



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ
ΧΗΜΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- ❑ Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια ΕΜΠ, (Επιβλέπουσα)
- ❑ Μ. Κουή, Καθηγήτρια ΕΜΠ,
- ❑ Ν. Κατσάνος, Ομότιμος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- ❑ Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια ΕΜΠ, (Επιβλέπουσα)
- ❑ Μ. Κουή, Καθηγήτρια ΕΜΠ
- ❑ Ν. Κουλουμπή, Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ
- ❑ Φ. Ρουμπάνη-Καλαντζοπούλου, συνταξιοδοτηθείσα Καθηγήτρια ΕΜΠ
- ❑ Α. Σιόλας, Καθηγητής ΕΜΠ
- ❑ Χ. Κυρανούδης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
- ❑ Ι. Σαγιάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)».

“Το ζητείν απανταχού το χρήσιμο ήκιστα αρμόζει τοις μεγαλοψύχοις και ελευθερίοις.”

Αριστοτέλης

Πρόλογος

Η διδακτορική αυτή διατριβή ανατέθηκε από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών μετά από εισήγηση της Αντωνίας Μοροπούλου, Καθηγήτριας ΕΜΠ, με στόχο τη διαμόρφωση των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, καθώς και τη συγκρότηση του στρατηγικού σχεδιασμού και της μεθοδολογίας που διέπει την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες μαρμάρου.

Η εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής έλαβε χώρα στον Τομέα ΙΙΙ, στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της αναπτύχθηκε ιδιαίτερη συνεργασία με τον Τομέα Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, καθώς και με τον Τομέα Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ειδικές μετρήσεις δε, πραγματοποιήθηκαν στο Materials Research Centre του Πανεπιστημίου του Bath στη Μεγάλη Βρετανία.

Παράλληλα, κατά την εκπόνηση της διατριβής και στο πλαίσιο της συνέργειας με τα ερευνητικά προγράμματα: “Διάγνωση της Φθοράς των Όψεων του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και Μελέτη των Υλικών και των Επεμβάσεων για τη Συντήρησή τους”, καθώς και “Επεμβάσεις Συντήρησης των Αρχιτεκτονικών Επιφανειών της Πρόσοψης και του Χώρου Υποδοχής του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου Αθηνών”, όπου Επιστημονικά Υπεύθυνη ήταν η Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου, υποστηρίχθηκε η διεξαγωγή Διπλωματικών και Μεταπτυχιακών εργασιών, που τα αποτελέσματά τους δημοσιεύτηκαν σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

Στην πορεία προσέγγισης του θέματος της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού χρειάστηκε να βρεθούν “κώδικες” που να συνδέουν το χώρο, που συνιστά το δίπολο μνημείο-περιβάλλον, με τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, που συνιστούν οι επεμβάσεις καθαρισμού και οι τεχνικές αποτίμησής τους.

Οι “κώδικες” αυτοί αποδείχθηκαν πολύτιμα εργαλεία περιγραφής των δεδομένων, άλλοτε καταλύοντας την Ευκλείδεια γεωμετρία με την ανάλυση fractals, άλλοτε διευρύνοντας τη δυαδική–Αριστοτέλεια λογική του αληθούς–ψευδούς με τη χρήση της ασαφούς λογικής και την εφαρμογή της μερικής συμμετοχής και άλλοτε αποδίδοντας και ταξινομώντας πληθώρα δεδομένων στο χώρο χρησιμοποιώντας τη δυαδική–Αριστοτέλεια λογική.

Οδηγός μου (συχνά ακόμη και άτυπος) σε αυτή την πορεία – διαδικασία υπήρξε η επιβλέπουσα αυτής της διδακτορικής διατριβής Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου. Την ευχαριστώ πολύ γιατί με έμαθε να περνώ από τη θεωρία στην πράξη αξιοποιώντας τη διαλεκτική και το συγκεκρισμό, έχοντας θάρρος, τόλμη αλλά και συνέπεια. Αν και το πληθωρικό και πολυσχιδές των χαρακτήρων μας, πολλές φορές οδήγησε σε αναπόφευκτες παλινδρομήσεις (κυρίως χρονικές), θεωρώ ότι είναι ο άνθρωπος που συνέβαλε καθοριστικά στο να αποκτήσω τελικά την αίσθηση του μέτρου, της οικονομίας χρόνου, του πεπερασμένου..... της τέχνης του εφικτού.

Της εύχομαι δε, στην κρίσιμη και γεμάτη ανατροπές περίοδο που διανύει ο χώρος της ανώτατης εκπαίδευσης της χώρας μας, και από τη θέση ευθύνης του Αντιπρύτανη ΕΜΠ, που της εμπιστεύτηκε η Πολυτεχνειακή κοινότητα, να ανταποκριθεί με κάθε επιτυχία στις

πολλαπλές προκλήσεις και καθήκοντα. Διαθέτει το όραμα και τη μεθοδολογική στόχευση για την υλοποίησή του.

Ευχαριστώ τον Ομότιμο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών Ν. Κατσάνο όπου χάρις και στη δική του προτροπή και πρώτη παρότρυνση ξεκίνησα την εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ την Καθηγήτρια ΕΜΠ Μ. Κουή για τη βοήθεια της στις μετρήσεις Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier, που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, καθώς και για τη βοήθεια και συμπαράσταση της στην αρχή της εκπόνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθ. Χ-Μ ΕΜΠ Ν. Μαρκάτο και Καθ. Α-Τ-Μ ΕΜΠ Α. Σίολα για τη καθοριστική συμβολή τους στις συνεργασίες που αναπτύχθηκαν, κατά την εκπόνηση της διατριβής, με τον Τομέα Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων της Σχ. Χ-Μ ΕΜΠ, καθώς και με τον Τομέα Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού της Σχ. Α-Τ-Μ ΕΜΠ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται τον Καθ. D. Almond, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να χρησιμοποιήσω τις εξειδικευμένες τεχνικές της laser προφίλομετρίας και της παλμικής θερμογραφίας στο Πανεπιστήμιο Bath της Μεγάλης Βρετανίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθ. ΕΜΠ Χ. Κυρανούδη για τη βοήθεια του στα θέματα της ασαφούς λογικής, καθώς και για την επισταμένη προσπάθεια του στην κατασκευή της αρχιτεκτονικής του ολοκληρωμένου συστήματος λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού.

Επιπλέον, ευχαριστώ την Επικ. Καθ. ΕΜΠ Μ. Κροκίδα για την πολύτιμη βοήθειά της στην ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παλμικής θερμογραφίας.

Ευχαριστώ τον Επικ. Καθ. ΕΜΠ Ι. Σαγιά, για τη μεγάλη βοήθεια που μου προσέφερε στα θέματα που σχετίζονται με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), καθώς και την άφογη συνεργασία. Η επιτυχής επίτευξη της διεπιστημονικής συνεργασίας ανάμεσα στις Σχ. Χ-Μ και Α-Τ-Μ που αναπτύχθηκε, όχι μόνο στο πλαίσιο εκπόνησης αυτής της διατριβής αλλά και στο πλαίσιο των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών του ΕΜΠ, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη δική του ευθυκρισία, αποτελεσματικότητα και βαθιά γνώση.

Δράττομαι δε, της ευκαιρίας να ευχαριστήσω την Ομ. Καθ. ΕΜΠ Ν. Κουλουμπή, για την αμέριστη υποστήριξή της κατά τη δύσκολη για μένα περίοδο, της διαδικασίας ένταξής μου στο μόνιμο προσωπικό του ΕΜΠ.

Ευχαριστώ το Νίκο Π. Αβδελίδη Δρ ΕΜΠ, για την ευκαιρία και τη βοήθεια που μου προσέφερε, αφού στο πλαίσιο εκπόνησης των μεταδιδακτορικών του σπουδών κατέστη εφικτή η πρόσβασή μου στο Πανεπιστήμιο του Bath για την εφαρμογή των τεχνικών της Laser προφίλομετρίας και της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, καθώς και για τη βοήθειά του κατά τη διεξαγωγή των παραπάνω μετρήσεων. Στη μακρά και δημιουργική περίοδο της ερευνητικής μας συνεργασίας έμαθε πολλά ο ένας από τον άλλο. Του εύχομαι κάθε επαγγελματική επιτυχία, υγεία και οικογενειακή ευτυχία.

Ευχαριστώ τον Σ. Ζερβό Επ. Καθ. ΑΤΕΙ Αθήνας, για τη βοήθειά του στο θέμα της ανάλυσης με κύριες συνιστώσες, τον Ι. Μαρακάκη, Υ.Δ. ΕΜΠ, για τη βοήθειά του σε ζητήματα χωρικής

ταξινόμησης δεδομένων στο ΓΣΠ, καθώς και τη Μ. Κωνσταντινίδου Δρ ΕΜΠ, για τη βοήθειά της στην κατανόηση της λειτουργίας των μοντέλων ασαφούς λογικής.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κο Ι. Μούντριχα για την πολύτιμη βοήθεια του σε θέματα τεχνικής υποστήριξης ΗΥ και λειτουργίας εξεζητημένων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ την από δεκαετία “συγκάτοικό” μου Μαρία Καρόγλου, Δρ ΕΜΠ, «στην (3x5)μ² τρέλα του τυφλού» γραφείου μας, για τις ατέρμονες συζητήσεις μας με θέματα που τακτοποιούν τη σκέψη μου και ενίοτε γαληνεύουν την ψυχή μου. Εύχομαι και ελπίζω ότι θα βρει αυτό που ψάχνει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Θεόδωρο και Άννα για την άπλετη αγάπη και υποστήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια, σε αυτούς οφείλω σχεδόν τα πάντα.

Ευχαριστώ το σύντροφό μου Κώνσταντίνο Βαβυλουσάκη για την υπομονή που επέδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διατριβής. Υπήρξε υποστηρικτής της από δεκαπενταετίας απόφασής μου να ασχοληθώ με την προστασία των μνημείων, θιασώτης και κοινωνός όλων των σχετιζόμενων με το θέμα αυτό ενεργειών μου, από τότε έως σήμερα.

Πάνω από όλους όμως, ευχαριστώ τη Λένια που κατέλυσε με την παρουσία της τη ζωή μου, που μου έμαθε να προσφέρω και να δίνω ανεξαρτήτως αποτελέσματος. Την ευχαριστώ απλά, γιατί υπάρχει.

Στη Λένια,
και σε όλα τα παιδιά,
αυτά είναι το μέλλον

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση του θέματος της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες μνημείων, με στόχο τη διαμόρφωση των κριτηρίων αποτίμησης, τη συγκρότηση της μεθοδολογίας που διέπει τη διαδικασία της αποτίμησης, καθώς και την επίτευξη του στρατηγικού σχεδιασμού των επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες μνημείων.

Η αποτίμηση των μεθόδων καθαρισμού είναι θεμελιώδους σημασίας. Μέσω της διεργασίας της αποτίμησης είναι εφικτή η επιλογή της ή των μεθόδων καθαρισμού που τελικά θα εφαρμοστούν σε ένα ιστορικό κτίριο (για συγκεκριμένο υλικό και συγκεκριμένο τύπο φθοράς), καθώς λαμβάνει χώρα κρίση επί της αποτελεσματικότητάς τους. Δυστυχώς όμως η επιστημονική κοινότητα δεν έχει οριοθετήσει πλήρως έως σήμερα, τις αντικειμενικές παραμέτρους που διέπουν την επιτυχημένη εφαρμογή μιας μεθόδου καθαρισμού.

Συνεπώς, για να ολοκληρωθεί η κρίση επί της αποτελεσματικότητας μιας επέμβασης καθαρισμού πρέπει να διατυπωθούν με σαφήνεια και ακρίβεια τα χαρακτηριστικά, τα οποία οφείλει να πληρεί η καθαρισμένη επιφάνεια, (ανάλογα βέβαια με το δομικό υλικό και τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει), οι συγκεκριμένες παράμετροι που θα πρέπει να μετρηθούν για να δώσουν τιμή σε αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα αποδεκτά όρια αυτών των παραμέτρων. Παράλληλα, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι κατάλληλες τεχνικές-μέθοδοι που θα πρέπει να εφαρμοστούν για να μετρηθούν οι παράμετροι των οριοθετημένων χαρακτηριστικών.

Σε αυτό το πλαίσιο, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές μαρμάρινες επιφάνειες ελέγχου στο ρυπασμένο αστικό περιβάλλον του κέντρου της Αθήνας, τόσο σε σχέση με τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς, όσο και σε σχέση με το είδος των αρχιτεκτονικών επιφανειών. Οι λείες και ανάγλυφες εξεταζόμενες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες βρίσκονται στα ιστορικά κτίρια της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (ΕΒΕ) και του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (ΕΑΜ) αντίστοιχα.

Σε αυτές τις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες έλαβε χώρα χαρακτηρισμός του ιστορικού υλικού και διάγνωση της φθοράς, με εφαρμογή μη καταστρεπτικών τεχνικών επί τόπου στην κλίμακα των μνημείων, καθώς και ενόργανων τεχνικών στο εργαστήριο κατόπιν δειγματοληψίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη βιβλιογραφία για τα ιστορικά και περιβαλλοντικά δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος και τη διάγνωση της παρουσιαζόμενης φθοράς εφαρμόστηκαν επί τόπου οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της μικροσκοπίας οπτικών ινών και της χρωματομετρίας, ελήφθησαν στερεά δείγματα για την εφαρμογή της οπτικής μικροσκοπίας, του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, καθώς και δείγματα σκόνης για την εφαρμογή της φασματοσκοπίας υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier, ενώ παράλληλα έλαβε χώρα ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τον έλεγχο της μικροδομής των εξεταζόμενων επιφανειών.

Τα αποτελέσματα της διαγνωστικής μελέτης με τη χρήση των παραπάνω τεχνικών υπέδειξαν ότι το μάρμαρο που έχει χρησιμοποιηθεί και στα δύο ιστορικά κτίρια είναι το Πεντελικό (όπως ανέφεραν και τα ιστορικά βιβλιογραφικά δεδομένα), καθώς και ότι οι λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ παρουσιάζουν τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου. Οι ανάγλυφες επιφάνειες του ΕΑΜ στον κίονα και την επιφάνεια των ανθεμίων του κιονόκρανου (ανατολικού προσανατολισμού και οι δύο) παρουσιάζουν επίσης τον τύπο φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών, ενώ η ανάγλυφη επιφάνεια του κίονα βόρειου προσανατολισμού παρουσιάζει το χαρακτηριστικό τύπο φθοράς των αποπλυμένων επιφανειών.

Βάσει της κατάστασης διατήρησης των εξεταζόμενων επιφανειών (δηλ. του υλικού, του τύπου φθοράς και του είδους της επιφάνειας), της σχετικής διεθνούς πρακτικής, όπως αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία, καθώς και της προηγούμενης εμπειρίας του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, επιλέχθηκαν κατάλληλα υλικά και επεμβάσεις καθαρισμού, οι οποίες και εφαρμόστηκαν πιλοτικά στις προαναφερθείσες αντιπροσωπευτικές επιφάνειες ελέγχου των δύο ιστορικών κτιρίων. Οι επεμβάσεις καθαρισμού που εφαρμόστηκαν ήταν: (α)πάστες σηπιολίθου που φέρουν μόνο απιονισμένο νερό ή δ/μα ανθρακικού αμμωνίου ή δ/μα δινατριούχου άλατος του EDTA, (β)ιοντοανταλλακτικές ρητίνες με απιονισμένο νερό ή δ/μα ανθρακικού αμμωνίου, (γ)πάστα AB57 και (δ)βιολογικό επίθεμα. Οι επεμβάσεις αυτές τοποθετήθηκαν στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες με διαφορετικούς χρόνους εφαρμογής, ενώ παράλληλα εφαρμόστηκε και τεχνική υγρής μικροψηγηματοβολής με αποξεστικό μέσο σφαιρικά σωματίδια ανθρακικού ασβεστίου διαμέτρου <math>< 80\mu\text{m}</math>.

Για να πραγματοποιηθεί η αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού, εφαρμόστηκαν επί τόπου οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της μικροσκοπίας οπτικών ινών και της χρωματομετρίας, ελήφθησαν στερεά δείγματα για την εφαρμογή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, ενώ παράλληλα έλαβε χώρα ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τον έλεγχο της μικροδομής των εξεταζόμενων επιφανειών.

Έτσι, εφαρμόζοντας μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού, τις ίδιες τεχνικές που εφαρμόστηκαν και πριν από τον καθαρισμό για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος και της διάγνωσης της φθοράς, συγκροτείται μια μεθοδολογική προσέγγιση αποτίμησης, που επιτρέπει τη σύγκριση των χαρακτηριστικών και των αντίστοιχων κρίσιμων παραμέτρων των εξεταζόμενων επιφανειών πριν και μετά τον καθαρισμό, καταγράφοντας τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα και καθιστώντας εφικτή την πρόταση της βέλτιστης ανά περίπτωση επέμβασης.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της laser προφίλομετρίας, του ενεργητικού ελέγχου της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, και της χρωματομετρίας, σε πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου στο εργαστήριο, τα οποία είχαν υποστεί διαφορετική επιφανειακή κατεργασία με γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, καθώς και εφαρμογή πάστας AB57, για την καλύτερη

κατανόηση των συνθηκών μέτρησης και των αποτελεσμάτων αυτών των τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου σε σχέση με τη μορφολογία, την επιφανειακή μικροδομή και το χρώμα του εξεταζόμενου υλικού.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω τεχνικών, τόσο από τον εργαστηριακό έλεγχο των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, όσο και από τις επί τόπου εφαρμογές στην κλίμακα των δύο ιστορικών κτιρίων, συγκροτούν μια επαρκή γνωσιολογικής υφής βάση δεδομένων, που οδήγησε στις παρακάτω διαπιστώσεις σε σχέση με τα κριτήρια αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, τις κρίσιμες παραμέτρους που τα διέπουν, τις τεχνικές μέτρησης που αποδίδουν τις παραμέτρους αυτές πιστότερα και αντικειμενικότερα, καθώς και τους κοινώς αποδεκτούς και επιδιωκόμενους στόχους για το καθένα από τα κριτήρια αποτίμησης:

1° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Χημική-ορυκτολογική σύσταση των επιφανειών, καθώς και διαστρωμάτωση των απαντούμενων υλικών στην επιφάνεια.*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Διατήρηση Πάτινας
- Διατήρηση Αυθεντικού Υλικού:
 - Διατήρηση Στρώματος Γύψου για τις φαιόμαυρες κρούστες
 - Διατήρηση Ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες
 - Διατήρηση Γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου
- Απομάκρυνση Μαύρων Επικαθήσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης & Μικρανάλυση Ακτινών Χ - SEM-EDS,
- Χρωματομετρία

2° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Υφή, Μορφολογία και Συνοχή Επιφανειών – Επιφανειακή Μικροδομή*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Τραχύτητα - Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

3° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Χρώμα*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

Τεχνικές Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

4° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Κατάσταση Διατήρησης - Επιδεκτικότητα στη Φθορά - Ανθεκτικότητα στο Χρόνο*

Κρίσιμες Παράμετροι, που παρέχουν σαφείς ενδείξεις:

- Τραχύτητα-Rq

- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

Κρίσιμη Παράμετρος, Εφικτά Μετρήσιμη στο Χρόνο:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

Τεχνική Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

Παράλληλα, **οι κοινώς αποδεκτοί και επιδιωκόμενοι στόχοι** για το καθένα από τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. διατήρηση της πλάκας, εάν και εφόσον διαπιστώνεται η ύπαρξή της κατά τη διάγνωση της φθοράς,
2. πλήρης απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων,
3. διατήρηση του αυθεντικού υλικού και πιο συγκεκριμένα:
 - του στρώματος του γύψου στις φαιόμαυρες κρούστες,
 - του γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου και
 - ο μικρότερος δυνατός βαθμός απώλειας ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες, (ο οποίος μπορεί να προκύψει από επέμβαση καθαρισμού ήπιας δραστηριότητας που παράγει επιφάνεια παρόμοιου επιπέδου επιφανειακής μικροδομής με αυτή που υπήρχε πριν τον καθαρισμό),
4. διατήρηση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής:
 - σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό, στην περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών,
 - σε παρόμοια επίπεδα ή/και ελαφρώς μειωμένα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού, στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου,
5. μεσαία - ενδιάμεση συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ,

Ο καθαρισμός αποτελεί την κατ' εξοχήν μη αντιστρεπτή επέμβαση συντήρησης, οπότε η έννοια της συμβατότητας η οποία πρέπει να τον διέπει, έγκειται στο σαφή προσδιορισμό των ορίων αποδοχής σε σχέση με τους παραπάνω επιδιωκόμενους στόχους του κάθε κριτηρίου αποτίμησης.

Στο αυτό πλαίσιο, αναπτύχθηκαν **τρία μοντέλα ασαφούς λογικής**, (τύπου Mamdani) ανάλογα με τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοζόμενες επεμβάσεις καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν. Πιο συγκεκριμένα, ως **παραμέτροι εισόδου** και στις τρεις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι κρίσιμες παράμετροι των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, ενώ κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των **ασαφών συνόλων** ουσιαστικά διαμορφώθηκαν τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια τόσο των παραμέτρων εισόδου, όσο και

της παραμέτρου εξόδου που ορίστηκε ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ), ο οποίος ταξινομεί τις επεμβάσεις καθαρισμού σε μη αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές και καλές – προτεινόμενες.

Επιπλέον, η ανάπτυξη των **ασαφών κανόνων** βασίστηκε στη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω των εργαστηριακών και επί τόπου αποτελεσμάτων αυτής της διατριβής, λαμβάνοντας υπόψη και τη διεθνή βιβλιογραφία στα θέματα αποτίμησης καθαρισμών, αφού έπρεπε να δοθεί αποτέλεσμα (παραμέτρος εξόδου ΔΑΕΚ) σε κάθε δυνατό συνδυασμό κλάσεων κάθε μεταβλητής εισόδου. Η δε λειτουργία και των τριών μοντέλων ασαφούς λογικής βασίστηκε στους μετασχηματισμούς της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδας εξαγωγής συμπεράσματος, και της μονάδας αποασαφοποίησης.

Για να διαπιστωθεί αν τα τρία μοντέλα ασαφούς λογικής είναι σωστά βαθμονομημένα και επιτελεστικά, όσον αφορά στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα σε φαιόμαυρες κρούστες, αποπλυμένες επιφάνειες και σε περιοχές περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, αυτά εφαρμόστηκαν στις αντίστοιχες μελέτες περιπτώσεων του EAM και της EBE, από όπου και προκύπτει ότι η ταξινόμηση των επεμβάσεων καθαρισμού βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις καταγεγραμμένες, σε αυτή τη διατριβή, κρίσεις επί της αποτελεσματικότητάς τους.

Συμπεραίνεται δε, ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλες μελέτες περιπτώσεων αντίστοιχων μαρμάρινων υλικών και τύπων φθοράς, με μόνη προϋπόθεση οι παράμετροι εισόδου να μετρηθούν με τις ανάλογες τεχνικές προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διατριβή.

Επιπλέον, στο πλαίσιο διερεύνησης του **4^{ου} κριτηρίου αποτίμησης** δηλ. της επιδεκτικότητας στη φθορά των καθαρισμένων επιφανειών, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα της συστηματικής χρήσης τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου και της βαθμονόμησής τους με στόχο τον περιορισμό της δειγματοληψίας, η οποία είναι σχεδόν απαγορευτική από άποψη δεοντολογίας στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς και αποτελεί τον κυριότερο λόγο (σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο που δίνεται από τους κρατικούς φορείς για την εκπόνηση των μελετών των επεμβάσεων συντήρησης) μη συλλογής νέων δεδομένων για τον έλεγχο της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο.

Τα αποτελέσματα της διατριβής προς αυτήν την κατεύθυνση υπέδειξαν ότι:

- υπάρχει μεγάλη συσχέτιση ανάμεσα στα μεγέθη της χρωματικής παραμέτρου της **λαμπρότητας L** και της επιφανειακής μικροδομής της **τραχύτητας Rq**, αφού όπως φαίνεται από την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες που έλαβε χώρα για αυτά τα μεγέθη στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, η αύξηση της τραχύτητας Rq οδηγεί σε μείωση των τιμών της λαμπρότητας L για τις εξεταζόμενες επιφάνειες,
- η μελέτη του φαινομένου της ψύξης του συνόλου των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών, με την εφαρμογή στο εργαστήριο της **παλμικής θερμογραφίας** στα ληφθέντα δείγματα, περιγράφεται από εμπειρικό μοντέλο κινητικής 1^{ης} τάξης, ενώ η σταθερά χρόνου του φαινομένου εξαρτάται, μέσω εκθετικής συνάρτησης, η οποία ενσωματώνει την επίδραση του υλικού, από την πυκνότητα ρηγματώσεων και τη λαμπρότητα των εξεταζόμενων επιφανειών. Η δυνατότητα χρήσης αντίστοιχου

εξοπλισμού παλμικής θερμογραφίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, σε συνδυασμό με την επί τόπου εφαρμογή της χρωματομετρίας που παρέχει τις τιμές της λαμπρότητας, καθώς και της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου, μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου. Αυτή η προοπτική του συνολικά μη καταστρεπτικού και ποσοτικού προσδιορισμού της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου είναι μεγάλης σημασίας για την παρακολούθηση στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης (ανθεκτικότητας) των καθαρισμένων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου.

Στη συνέχεια της διερεύνησης του 4^{ου} κριτηρίου αποτίμησης, προτείνεται η χρήση του **ΓΣΠ** ως μεθοδολογικού εργαλείου για τον έλεγχο και την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, στην κλίμακα των αντιπροσωπευτικών επιφανειών ενός κτιρίου, δηλ. σε ελεγχόμενη κλίμακα εργασίας.

Συμπεραίνεται, ότι η δυνατότητα διαχείρισης των ΣΒΔ με τη χρήση της άλγεβρας Boolean και των λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του “σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης” που προκύπτει μέσω της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης, (δηλ. την τομή των θεματικών χαρτών της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού) και περιλαμβάνει πλέον χωρικές και περιγραφικές ιδιότητες πριν και μετά τον καθαρισμό, δηλ. δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων, επιτρέπει τη σύγκριση, την απόδοση, την ανάλυση και τη συσχέτιση των μεταβολών των καταγεγραμμένων φ-χ χαρακτηριστικών στο χώρο σε διαφορετικούς χρόνους.

Συνεπώς, η **ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού**, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών επιφανειών στο εξεταζόμενο κτίριο, βάσει προσεκτικών μακροσκοπικών παρατηρήσεων σε σχέση με τα παρουσιαζόμενα δομικά υλικά των όψεων και τους τύπους φθοράς,
2. Χαρακτηρισμός του υλικού και διάγνωση της φθοράς – καταγραφή των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς,
3. Επιλογή υλικών και επεμβάσεων καθαρισμού, βάσει του τύπου φθοράς και του δομικού υλικού, της σχετικής βιβλιογραφίας, της προηγούμενης εμπειρίας και το είδος της αρχιτεκτονικής επιφάνειας,
4. Εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού σε πιλοτική κλίμακα, δηλ. στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες,
5. Εφαρμογή των τεχνικών μέτρησης των κρίσιμων παραμέτρων χαρακτηρισμού των καθαρισμένων επιφανειών στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες ελέγχου,
6. Εισαγωγή των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού στο μοντέλο της ασαφούς λογικής για την εξαγωγή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) και ταξινόμηση των πιλοτικών επεμβάσεων σε μη αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές, καλές – προτεινόμενες, βάσει των αντίστοιχα διαμορφωμένων ορίων,
7. Χρήση της πλατφόρμας του ΓΣΠ για τον έλεγχο και παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, μέσω:

- Της χωρικής ταξινόμησης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες εξέτασης,
 - Της κατασκευής σχεσιακών βάσεων δεδομένων (ΣΒΔ), που περιλαμβάνουν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού,
 - Της διαχείρισης των ΣΒΔ με κριτήρια άλγεβρας Boolean και λογικών πράξεων,
 - Της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης,
7. Επανάληψη των σταδίων 5,6,7 σε εύλογο χρονικό διάστημα στο μέλλον και **σχεδιασμός επεμβάσεων συντήρησης** στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του εξεταζόμενου κτιρίου, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Τέλος, για να πραγματοποιηθεί ο **στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού**, δηλ. για να ορισθεί και υλοποιηθεί το σύνολο των σχεδιασμένων χειρισμών - διαδικασιών που θα οδηγήσουν στον έλεγχο και την παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, με απώτερο στόχο και σκοπό τον προγραμματισμό των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού, για κάθε ένα από τους εξεταζόμενους τύπους φθοράς.

Το **ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης** προκύπτει από την ενσωμάτωση του μοντέλου της ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των καθαρισμών στο ΓΣΠ. Η πλατφόρμα αυτή δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς απόκρισης σε σχέση με την αποτελεσματικότητα των καθαρισμών με δεδομένες παραμέτρους και αποδεκτά όρια, σε κάθε χρονική στιγμή, σε συγκεκριμένη χωρικά επιφάνεια και ατμοσφαιρικές συνθήκες, αναπτύσσοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού για κάθε εξεταζόμενο τύπο φθοράς.

Όταν νέες τιμές των δεικτών παρακολούθησης της κατάστασης διατήρησης της επιφάνειας που είναι οι παράμετροι εισόδου στο μοντέλο της ασαφούς λογικής και παράλληλα αποτελούν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, δώσουν για την προτεινόμενη – εφαρμοσθείσα επέμβαση καθαρισμού τιμή $4.5 < \Delta A E K < 7$ (κλάση του μέτρου καθαρισμού που κυρίως εκφράζει τον ατελή καθαρισμό), τότε πρέπει να **προγραμματιστούν** νέες επεμβάσεις καθαρισμού στο πλαίσιο των **τακτικών επεμβάσεων συντήρησης** στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του μνημείου του αντίστοιχου τύπου φθοράς.

Abstract

The aim of this thesis is the configuration of the assessment criteria, the methodology compilation and the strategic planning of cleaning interventions applied on marble architectural surfaces of monuments.

The assessment of cleaning interventions is fundamental. Through the process of cleaning assessment the selection of the cleaning method(s) which will be finally applied on a historic building (for particular building material and particular decay pattern) can be accomplished.

Unfortunately, scientific society has not yet established common assessment criteria for cleaning interventions. That is, no common framework exists concerning objective parameters which could describe a cleaning intervention as successful.

Therefore, in order to assess the performance of a cleaning intervention, the precise characteristics that a surface (for particular building material and particular decay pattern) should hold after cleaning is to be established. Moreover, the specific parameters that should be measured, in order to give values to these characteristics, as well as the acceptance threshold levels of these parameters should also be defined. In parallel, the most appropriate experimental techniques for these parameters to be measured should be determined as well.

Within this context, representative marble surfaces were selected, in relation to the presented decay patterns and the type of the architectural surfaces. All investigation areas, smooth and relief ones, are located in the polluted urban environment of Athens. Smooth representative investigation areas are located on the architectural marble surfaces of the historic building of National Library of Greece (NLG), whereas the relief ones are on the facades of the historic building of National Archaeological Museum (NAM).

Characterization of historic building material and decay diagnosis took place for these representative investigation areas, after the application of non destructive techniques in situ (on monument scale), as well as after sampling and the application of analytical techniques in lab, taking under consideration historic and environmental data.

More specifically, substrate characterization and decay diagnosis was accomplished by the in situ application of the non destructive techniques of fiber optics microscopy and colorimetry, core samples were collected by the historic buildings architectural surfaces for the application of scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectroscopy, pulsed thermography, and laser profilometry, whereas digital image analysis of scanning electron microscopy images took place for the investigation of surface microstructure. Powder samples were collected as well by the historic buildings architectural surfaces for the application of the Fourier Transformation Infra-Red Spectroscopy.

The results of the decay diagnosis study indicated that the substrate in both historic buildings is Pentelic marble (confirmation of historic data), as well as that the smooth architectural surfaces of NLG presented the characteristic decay patterns of black-grey crusts, and inter-granular fissuring. The relief architectural surfaces of NAM located on the column and on the anthemion area of a capital (both east oriented), presented the characteristic decay pattern of black-grey crusts as well; whereas the relief column area of the northern orientation presented the characteristic decay pattern of washed out surfaces.

Pilot cleaning interventions were selected and applied on the investigation areas, based on their preservation state (building material and decay), the international common practice, as well as the former experience of the Material Science and Engineering Lab.

The applied cleaning interventions were: (a) sepiolite poultices of deionized water, or ammonium carbonate solution, or disodium EDTA solution, (b) ion exchange resins with deionized water or ammonium carbonate solution, (c) AB57 poultice, (d) biological poultice. These cleaning interventions were used under different application times, whereas in parallel the cleaning methods of atomized water and wet micro-blasting method of spherical calcium carbonate particles with diameter less than 80µm, were applied as well.

Cleaning interventions assessment was accomplished by the in situ application of the non destructive techniques of fiber optics microscopy and colorimetry, core samples were collected by the historic buildings architectural surfaces for the application of scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectroscopy, pulsed thermography, and laser profilometry, whereas digital image analysis of scanning electron microscopy images took place for the investigation of surface microstructure.

Therefore, applying, after pilot cleaning interventions, the same experimental techniques that were applied before cleaning (for substrate characterization and decay diagnosis), a methodological approach for cleaning assessment is compiled. This approach allows the comparison of the marble surfaces characteristics and the corresponding critical parameters, before and after cleaning, whereas recording of their variation makes feasible the recommendation of the best cleaning according to the examined case.

In parallel, the non destructive techniques of fiber optics microscopy, colorimetry, digital image analysis of scanning electron microscopy images, pulsed thermography, and laser profilometry, were applied in lab on reference (quarry) Pentelic marble samples, differently superficially treated (processed by sandpapers of different gritting according to P grade - European FEPA, and after AB57 Poultice application). This lab experimental procedure took place for the better understanding of these techniques measuring specifications and results interpretation in relation to morphology, surface microstructure, and color of the under investigation substrate.

The experimental results of the above mentioned techniques applied in lab and in situ on both monuments and reference samples, compile a sufficient knowledge based data base, establishing the following regarding (a) cleaning assessment criteria, (b) critical cleaning assessment parameters, (c) experimental techniques that measure these parameters objectively and in precision, as well as (d) the common accepted and pursuing goals for each one of the cleaning assessment criteria:

1° Assessment Criterion: *Chemical-mineralogical composition of the surfaces-stratification*

Critical Parameters:

- Preservation of Patina,
- Preservation of Authentic Material,
 - Preservation of gypsum layer for black-grey crusts,
 - Preservation of calcite for washed out surfaces,

- Preservation of gypsum in the inter-granular fissures for surfaces of inter-granular fissured marble,
- Removal of Black Depositions

Experimental Techniques:

- Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy / SEM-EDS,
- Colorimetry,

2° Assessment Criterion: *Texture, Morphology and Surface Cohesion - Surface Microstructure*

Critical Parameters:

- Roughness, Rq,
- Ratio of actual to projected area - Surface area,
- Fracture Density,

Experimental Techniques:

- Laser Profilometry / LP,
- Digital Image Analysis of Scanning Electron Microscopy Images / DIP-SEM

3° Assessment Criterion: *Color*

Critical Parameter:

- Total Color Difference, ΔE

Experimental Technique:

- Colorimetry

4° Assessment Criterion: *Surface Preservation State – Decay Susceptibility – Durability,*

Critical Parameters (providing clear indications):

- Roughness, Rq,
- Ratio of actual to projected area - Surface area,
- Fracture Density,

Experimental Techniques:

- Laser Profilometry / LP,
- Digital Image Analysis of Scanning Electron Microscopy Images / DIP-SEM

Critical Parameter feasible measurable in time:

- Total Color Difference, ΔE

Experimental Technique:

- Colorimetry

In parallel, the common accepted and pursuing goals for each one of the cleaning assessment criteria are summarized as follows:

1. Preservation of patina, if it is detected during decay diagnosis,
2. Complete removal of black depositions,
3. Preservation of authentic material and particularly:
 - Preservation of gypsum layer for black-grey crusts,
 - Preservation of gypsum in the inter-granular fissures for surfaces of inter-granular fissured marble, and

- The possible lower calcite loss for washed out surfaces, (which results from the application of a mild reactivity cleaning intervention producing a stone surface of similar microstructure pattern to the one before cleaning),
4. Preservation of the values of surface microstructure parameters:
 - Under similar threshold levels, comparing to the ones before cleaning, in the case of washed out surfaces,
 - Under similar and/or slightly lower threshold levels, comparing to the ones before cleaning, in the case of black-grey crusts and inter-granular fissured marble,
 5. Medium – Intermediate Total Color Difference ΔE ,

Since cleaning is the par excellence non-reversible conservation intervention, the compatibility concept that should governs it, relies on the specific determination of the acceptance threshold levels for the above mentioned pursuing goals of each one cleaning assessment criterion.

Under this framework, **3 fuzzy logic models** (Mamdani type) were developed according to the decay patterns that the applied cleaning interventions are appointed to remove. In particular, as **input parameters**, in all 3 cases, were used the critical parameters of the cleaning assessment criteria, while during the development of the fuzzy sets the acceptance and non-acceptance threshold levels were configured for all input and output parameters. **Cleaning Performance Index** (CPI) was defined as the output parameter, which classifies the cleaning interventions into non-accepted, medium, accepted and optimum-recommended ones.

Additionally, the development of **fuzzy rules** was based on the knowledge and experience that was acquired by the lab and in-field experimental results of this thesis, taking under consideration the international bibliography of cleaning assessment thematic area, since an outcome should be given (output parameter –CPI) to each possible combination of each input parameter set. The operation of the 3 fuzzy logic models was based on the processes of fuzzification, inference, and defuzzification.

To find out if the 3 fuzzy logic models were satisfactory classified and efficiently operating regarding the estimation of cleaning interventions performance for black-grey crusts, washed out surfaces and inter-granular fissured marble surfaces, they were operated with the corresponding case studies of NAM and NLG. It was demonstrated that cleaning interventions classification, after the operation of the suggested models, is in total agreement with the recorded, in this thesis, considerations about their performance.

It is concluded that these 3 fuzzy logic models can be also used to other case studies of corresponding marble materials and decay patterns, under the prerequisite that the input parameters will be measured by the specifications given in this thesis.

In addition, within the context of the investigation of **4th cleaning assessment criterion**, that is the decay susceptibility of cleaned surfaces, the necessity of systematic use of non destructive testing techniques (NDT) and their validation and calibration arises. NDT systematic use aims to the limitation of sampling (being almost restricted due to deontology in the thematic area of cultural heritage protection), which is one of the most important

reasons, along with the limited time given by the state for carrying out conservation intervention studies, responsible for not collecting data about monitoring and inspection of cleaned surfaces durability.

The results of this thesis towards this direction indicated that:

- there is strong correlation among the color parameter of **luminosity L** and the surface microstructure parameters of **roughness Rq** and **surface area**, as it is demonstrated from the principal component analysis that took place for these parameters on the reference samples of Pentelic marble; where it is shown that increase of roughness Rq and surface area values lead to decrease of luminosity L values for the investigated samples.
- the cooling rate of the investigated marble samples (reference and monument ones), after the application of **pulsed thermography (PT)** in lab, is described by an empirical first order kinetic model, whereas the time constant of the cooling rate is an exponential function (incorporating material effect) of fracture density and luminosity L. The capability of using a corresponding PT instrumental technique in situ, on monuments scale, in combination with the in situ application of colorimetry for recording luminosity values L, as well as the application of the suggested model, can contribute decisively to the prediction of fracture density values for marble surfaces. This potentiality, of total non destructive and quantitative estimation of marble superficial fracturing, is of high importance for monitoring the preservation state (durability) of cleaned marble surfaces in situ.

In the course of further investigation of the 4th cleaning assessment criterion, the **GIS** use is suggested as a methodological tool for control and monitoring of cleaned surfaces durability, on the scale of representative investigation areas of a building, (i.e. on focused working-scale).

It is concluded that the potential of RDB management using Boolean algebra and logical operations on the thematic map of “conservations interventions planning” which is the resulting output theme of both decay and pilot cleaning interventions thematic maps after the application of the geo-processing analysis of intersection operational tool, and includes spatial information and attribute data sets before and after cleaning; accomplish comparison, attribution, analysis and correlation of the recorded physico-chemical characteristics of marble surfaces to space, during different time periods.

Consequently, the **integrated methodology of cleaning intervention assessment** is compiled by the following stages:

1. Selection of the most representative areas on the investigated building, based on carefully visual inspection of the building materials and decay patterns presented on the facades,
2. Building materials characterization and decay diagnosis – recording of presented decay patterns,
3. Selection of cleaning materials and interventions, based on presented decay patterns and building materials, relative bibliography, experience, as well as architectural surface type,

4. Application of cleaning interventions on pilot scale, that is on representative investigation areas,
5. Application of the experimental techniques that measure the critical cleaning assessment parameters on the representative investigation areas,
6. Input of the values of critical cleaning assessment parameters in the fuzzy logic model, in order to extract the Cleaning Performance Index (CPI); classification of pilot cleaning interventions into non-accepted, medium, accepted, optimum – recommended, based on the corresponding threshold levels configuration,
7. Use of GIS platform for monitoring and inspection of cleaned surfaces preservation state in time, through:
 - Spatial classification of decay and cleaning interventions on the representative investigation areas, (building thematic maps of decay and pilot cleaning interventions),
 - Building of Relational Data Bases (RDB), which includes the critical assessment parameters of pilot cleaning interventions,
 - Management of RDB using Boolean algebra and logical operations,
 - Geo-processing analysis using intersection operational tool,
8. Repeat stages 5, 6, 7 in the future, and **planning of conservation interventions** on the total of marble façade surfaces of the investigated building, depending on the presented decay pattern will be accomplished.

Finally, the **strategic planning of cleaning interventions** is achieved, developing an integrated decision making system for the assessment of cleaning interventions, with ultimate goal the scheduling of the periodical conservation interventions. Particularly, the **integrated decision making system** resulted by the incorporation of fuzzy logic models into GIS. This platform enables the constant response in relation to the cleaning performance under predefined assessment parameters and acceptance threshold levels in a pointed spatial entity and environmental conditions, developing an integrated decision making system for the assessment of cleaning interventions for each one of the investigated decay patterns.

When new data regarding durability indexes (which actually are the input parameters for the fuzzy logic model and in parallel are the critical cleaning assessment parameters), give for the finally selected and applied cleaning intervention, values of $4.5 < \text{CPI} < 7$ (set of medium cleaning, mainly expressing the under-cleaning), then **periodical conservation interventions** on the marble facades of the investigated monument should be **scheduled**.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
- Πρόλογος	i
- Περίληψη	v
- Abstract	xii
1. Γενικό Θεωρητικό – Καθαρισμός: αναγκαιότητα, κριτήρια, υλικά	1
1.1 Τεκμηρίωση της αναγκαιότητας του καθαρισμού	1
1.2 Γενική μεθοδολογία και κριτήρια εφαρμογής επεμβάσεων καθαρισμού	2
1.3 Υλικά και μέθοδοι καθαρισμού	4
1.4 Πεντελικό μάρμαρο - Γενικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά	29
1.5 Μελέτη της επίδρασης περιβαλλοντικών παραγόντων στις μαρμάρινες επιφάνειες – Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές	37
1.6 Μοντέλα και μηχανισμοί διάβρωσης μαρμάρινων επιφανειών από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές	44
1.7 Γενικές κατηγορίες των συχνότερα συναντόμενων μορφών επιφανειακής φθοράς - Σύντομη περιγραφή	59
2. Ειδικό Θεωρητικό	64
2.1 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού - Βιβλιογραφική επισκόπηση κριτηρίων και <u>μερικών</u> μεθοδολογικών προσεγγίσεων	64
2.2 Αναγκαιότητα και κατευθύνσεις διερεύνησης για την ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης υλικών και το στρατηγικό σχεδιασμό επεμβάσεων καθαρισμού	76
2.2.1 Επιστήμη και τεχνική των επιφανειών - Τραχύτητα	77
2.2.2 Εξαγωγή παραμέτρων μικροδομής με ψηφιακή επεξεργασία εικόνας και χρήση fractal μαθηματικών	90
2.2.3 Βασικές αρχές και εφαρμογές της ασαφούς λογικής και των ασαφών συνόλων	96
2.2.4 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ): Εφαρμογές και χρησιμότητα στις επεμβάσεις συντήρησης μνημείων	109
3. Πειραματικό Μέρος	117
3.1 Πειραματικός σχεδιασμός	117
3.2 Μέθοδοι και τεχνικές – Περιγραφή πειραματικών διαδικασιών	122
4. Παρουσίαση Πειραμάτων, Περιγραφή Αποτελεσμάτων και Συζήτηση Αποτελεσμάτων - <u>Εργαστηριακός έλεγχος πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου</u>	149
4.1 Εργαστηριακός έλεγχος πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου	149

4.2	Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	152
4.3	Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	154
4.4	Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής	170
4.5	Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	174
4.6	Μερικά συμπεράσματα	177
5.	Παρουσίαση Πειραμάτων, Περιγραφή Αποτελεσμάτων και Συζήτηση Αποτελεσμάτων - <u>Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος</u>	
5.1	Στοιχεία για το κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος	181
5.2	5.2.1 Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος – Δειγματοληψία	183
	5.2.2 Χαρακτηρισμός των υλικών & διάγνωση της φθοράς	185
	5.2.2.1 Αποτελέσματα Οπτικής Μικροσκοπίας	185
	5.2.2.2 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	187
	5.2.2.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	189
	5.2.2.4 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier	204
	5.2.2.5 Συμπεράσματα	209
5.3	Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος – Πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού - Δειγματοληψία	211
5.4	Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - <u>Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος</u>	
	5.4.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	216
	5.4.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	218
	5.4.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	260
	5.4.4 Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι	265

	μικροδομής	
	5.4.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	275
	5.4.6 Μερικά συμπεράσματα	277
5.5	Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - <u>Η περίπτωση των περικρυσταλλικά ρηγματωμένων επιφανειών στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος</u>	
	5.5.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	279
	5.5.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	281
	5.5.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	305
	5.5.4 Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής	310
	5.5.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	318
	5.5.6 Μερικά συμπεράσματα	319
6.	Παρουσίαση Πειραμάτων, Περιγραφή Αποτελεσμάτων και Συζήτηση Αποτελεσμάτων - <u>Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου</u>	
6.1	Στοιχεία για το κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου	321
6.2	6.2.1 Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου – Δειγματοληψία	324
	6.2.2 Χαρακτηρισμός των υλικών & διάγνωση της φθοράς	329
	6.2.2.1 Αποτελέσματα Οπτικής Μικροσκοπίας	329
	6.2.2.2 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	331
	6.2.2.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	333
	6.2.2.4 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier	354
	6.2.2.5 Συμπεράσματα	362
6.3	Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου – Πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού - Δειγματοληψία	367
6.4	Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - <u>Η</u>	

	<u>περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου</u>	
6.4.1	Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	377
6.4.2	Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	379
6.4.3	Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	388
6.4.4	Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής	392
6.4.5	Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	398
6.4.6	Μερικά συμπεράσματα	399
6.5	<u>Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών κιονόκρανου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου</u>	
6.5.1	Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	400
6.5.2	Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	403
6.5.3	Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	426
6.5.4	Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής	433
6.5.5	Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	442
6.5.6	Μερικά συμπεράσματα	444
6.6	<u>Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου-Η περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου</u>	
6.6.1	Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών	446
6.6.2	Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ	448
6.6.3	Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια	464
6.6.4	Αποτελέσματα Ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής	469
6.6.5	Αποτελέσματα Χρωματομετρίας	476

6.6.6	Μερικά συμπεράσματα	478
7.	Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της Παλμικής Υπέρυθρης Θερμογραφίας	480
8.	Συμπεράσματα σε σχέση με τα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού	489
9.	Ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού	
9.1	Σχεδιασμός και ανάπτυξη μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες επιφάνειες	508
9.1.1	Σχεδιασμός του μοντέλου ασαφούς λογικής	508
9.1.2	Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς λογικής	512
9.1.3	Αποτελέσματα των δοκιμών του μοντέλου ασαφούς λογικής	543
9.1.4	Μερικά συμπεράσματα	575
9.2	Έλεγχος και παρακολούθηση στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών με χρήση ΓΣΠ	581
9.2.1	Μεθοδολογία εφαρμογής	581
9.2.2	Αποτελέσματα & συζήτηση	598
9.2.3	Μερικά συμπεράσματα	599
9.3	Συμπεράσματα σε σχέση με την ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού	600
10.	Στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων καθαρισμού – Ολοκληρωμένο Σύστημα Λήψης Απόφασης για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού – Τελικά Συμπεράσματα	
10.1	Αρχιτεκτονική του Ολοκληρωμένου Συστήματος Λήψης Απόφασης για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού	603
10.2	Τελικά Συμπεράσματα	610
11.	Προοπτικές	617
12.	Βιβλιογραφία	619
13.	Παράρτημα	633
13.1	Διπλωματικές & Μεταπτυχιακές Εργασίες που υποστηρίχθηκαν κατά την εκπόνηση της Διδακτορικής Διατριβής στο πλαίσιο της συνέργειας με τα ερευνητικά προγράμματα: “Διάγνωση της Φθοράς των Όψεων του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και Μελέτη των Υλικών και των Επεμβάσεων για τη Συντήρησή τους”, (Επ. Υπεύθυνη Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου) “Επεμβάσεις Συντήρησης των Αρχιτεκτονικών Επιφανειών της Πρόσοψης και του Χώρου Υποδοχής του Ιστορικού Κτιρίου του	633

Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου Αθηνών”, (Επ. Υπεύθυνη Καθ.
ΕΜΠ Α. Μοροπούλου)

13.2 Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από αυτή τη Διδακτορική Διατριβή

636

1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ: ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ, ΚΡΙΤΗΡΙΑ, ΥΛΙΚΑ

1.1 Τεκμηρίωση της Αναγκαιότητας Εφαρμογής των Μεθόδων Καθαρισμού

Σύμφωνα με το Normal document 20/85 “ Επεμβάσεις συντήρησης: στρατηγική, εκτέλεση και προληπτική αξιολόγηση” ICR-CNR Roma 1985, ο καθαρισμός ορίστηκε ως : “ η απομάκρυνση κάθε ουσίας η οποία είναι επιβλαβής για την πέτρα: διαλυτά άλατα, κρούστες όχι πολύ διαλυτές ή αδιάλυτες, διαστρωματώσεις διαφορετικών υλικών σκόπιμα εφαρμοσμένων και μη σταθερών, εκκρίσεις ζώων, ανεπτυγμένη βλάστηση, κ.α. [1].

Ο καθαρισμός είναι ζωτικής σημασίας βήμα στις επεμβάσεις συντήρησης, γιατί η συνολική επιτυχία των επεμβάσεων αυτών εξαρτάται από την ακρίβεια και την αισθητική ποιότητα της φάσης του καθαρισμού. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται όταν η προς καθαρισμό επιφάνεια υποφέρει από προχωρημένη διάβρωση ή έχει χαμηλό βαθμό συνοχής.

Εξαιτίας παλαιότερων αλλά δυστυχώς και νεότερων ανεπιτυχών επεμβάσεων καθαρισμού, οι οποίοι προκάλεσαν αισθητικές και φυσικοχημικές φθορές, καθώς και θεωριών που υποστηρίζουν ότι οι κρούστες δρουν σαν παθητικά στρώματα που προστατεύουν την πέτρα, ή άλλων θεωριών που υποστηρίζουν ότι αν ένα μνημείο καθαριστεί θα δείχνει “τόσο νέο και λευκό”, δημιουργείται η εντύπωση ότι δεν πρέπει να εφαρμόζονται επεμβάσεις καθαρισμού.

Ο καθαρισμός όμως είναι ένα μη αντιστρεπτό αλλά απαραίτητο στάδιο των επεμβάσεων συντήρησης:

1. Για αισθητικούς λόγους, εξαιτίας της αλλοίωσης του χρώματος λόγω φυσικής φθοράς ή/και φθοράς που προκλήθηκε από παλαιότερες επεμβάσεις.
2. Για φυσικούς και φυσικοχημικούς λόγους:
 - απομάκρυνση επικαθήσεων -αποθέσεων (άνθρακας, άργιλοι, σκόνη, προϊόντα καύσεων κ.α.)
 - απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης και αλλοίωσης της επιφάνειας (κρούστες, γύψος, κηλίδες, κ.α.)
 - απομάκρυνση βιολογικών παραγόντων διάβρωσης
 - απομάκρυνση διαλυτών αλάτων
3. Για να επιφέρει ενεργειακή αναβάθμιση στη φθαρμένη επιφάνεια, αλλά παράλληλα όμως τη μικρότερη δυνατή τραχύτητα, άρα η καθαρισμένη επιφάνεια θα διαθέτει τη μικρότερη δυνατή ειδική επιφάνεια και άρα τη μικρότερη δυνατή επιδεκτικότητα στη φθορά, καθιστώντας την έτσι, ικανή να δεχθεί τις περαιτέρω επεμβάσεις συντήρησης (προστασία, στερέωση).
4. Τέλος, οι επεμβάσεις καθαρισμού συντελούν στην προβολή του μνημείου και της καλλιτεχνικής του αξίας [2], [3],[4],[5],[6].

1.2 Γενική Μεθοδολογία και Κριτήρια Εφαρμογής Μεθόδων Καθαρισμού

Σύμφωνα με τα παραπάνω καθίσταται προφανές ότι οι επεμβάσεις του καθαρισμού είναι αναγκαίες και απαραίτητες. Διέπονται δε, από κάποιες γενικές αρχές και κριτήρια εφαρμογής, που είναι τα ακόλουθα:

- 1) Δεν πρέπει να προκαλούν άμεσες ή έμμεσες φθορές στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, αλλά να τις καθιστούν καθαρές και λείες (δηλαδή να επιφέρουν όσο το δυνατό μικρότερη τραχύτητα, άρα η καθαρισμένη επιφάνεια θα διαθέτει τη μικρότερη δυνατή ειδική επιφάνεια και άρα τη μικρότερη δυνατή επιδεκτικότητα στη φθορά), χωρίς τρύπες και ρωγμές, ενώ παράλληλα να μην προκαλούν διεύρυνση των ήδη υπάρχουσων ρωγμών ή απώλεια του αυθεντικού υλικού.
- 2) Πρέπει να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ισορροπία ανάμεσα στην ηθική της αισθητικής σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) και την επιστημονική προσέγγιση που αποβλέπει στη μείωση της ταχύτητας της φθοράς επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την καλύτερη δυνατή διατήρηση της αυθεντικής πάτινας και των πολυχρωμιών.
- 3) Δεν πρέπει να ευνοούν τη δημιουργία επιβλαβών παραπροϊόντων-υπολειμμάτων (π.χ. διαλυτά άλατα) τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τις περαιτέρω επεμβάσεις συντήρησης, ή/και να αποτελέσουν ενεργά κέντρα νέας φθοράς.
- 4) Πρέπει να διαθέτουν ελεγχόμενη ταχύτητα δράσης, έτσι ώστε ο συντηρητής να μπορεί να ελέγξει, να προσαρμόσει ή να διακόψει την επέμβαση καθαρισμού άμεσα και έγκαιρα.
- 5) Δεν πρέπει να απομακρύνουν το γύψο από αγάλματα και γλυπτούς διακόσμους γιατί α) στην επιφάνεια του γύψου διατηρούνται οι λεπτομέρειες, οι οποίες έχουν εξαλειφθεί από τις επιφάνειες των μαρμάρων (το συνηθέστερο υλικό τέτοιων έργων τέχνης) και β) ο σχηματισμός του γύψου ευνοείται στα περατωτικά όρια των κόκκων της πέτρας και η απομάκρυνση του συνεπάγεται αποκόλληση κομματιών [3].
- 6) Πρέπει να εφαρμόζονται από έμπειρο και καλά εκπαιδευμένο προσωπικό (συντηρητές).
- 7) Πρέπει η επιλογή της ή των κατάλληλων μεθόδων καθαρισμού (είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότερα από ένα υλικά και τύποι αρχιτεκτονικών επιφανειών) να γίνεται μετά από πιλοτική εφαρμογή κάποιων μεθόδων καθαρισμού και προσεκτικής αποτίμησης τους.

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

- 1) Η χημική και ορυκτολογική δομή του υλικού.
- 2) Το πορώδες.
- 3) Ο τύπος και η ένταση της φθοράς.
- 4) Το είδος των αποθέσεων που πρέπει να απομακρυνθούν.
- 5) Το είδος της επιφάνειας (ανάγλυφη, με γλυπτούς διακόσμους, επίπεδη, με πολυχρωμίες, κ.α.)
- 6) Το ιστορικό και καλλιτεχνικό ενδιαφέρον της κατασκευής [2], [3], [7], [4].
- 7) Το κόστος και η διάρκεια της επέμβασης του καθαρισμού, καθώς και η εποχή του χρόνου κατά την οποία πραγματοποιούνται. Είναι προφανές ότι όλες αυτές οι παράμετροι (7) είναι άμεσα συνυφασμένες με την προηγούμενη (6).

Για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω και να απαντηθούν ερωτήματα όπως: Τι πρέπει να καθαριστεί; Πως πρέπει να καθαριστεί; Πόσο πρέπει να προχωρήσει ο καθαρισμός; Πως μπορεί να ελεγχθεί η επέμβαση καθαρισμού; οι Rodrigues, Alessandrini, Bouinneau, [6], προτείνουν μια γενικότερη στρατηγική για την πλήρη και προσεκτική προετοιμασία και εφαρμογή, των επεμβάσεων καθαρισμού, η οποία θα πρέπει να ακολουθείται από τον ιδιοκτήτη και τον εργολάβο κατόπιν κοινής συμφωνίας.

A. Έρευνα από αρμόδιο ερευνητικό κέντρο για το:

1. Χαρακτηρισμό του υποστρώματος σύμφωνα με:

- Την πετρογραφία
- Το πορώδες
- Την ταχύτητα των υπερήχων
- Τα χαρακτηριστικά της υδατοαπορρόφησης
- Το βάθος της φθοράς
- Το χρώμα
- Το περιεχόμενο στα διαλυτά άλατα

2. Χαρακτηρισμό της φθοράς όσων αφορά:

- Το πάχος
- Τη συνοχή
- Τα περιεχόμενα άλατα
- Το χρώμα
- Τη χημική σύσταση
- Προέλευση επικαθήσεων-αποθέσεων και προϊόντων διάβρωσης

B. Συμφωνία για:

- Την επιλογή των μεθόδων καθαρισμού που θα εφαρμοστούν πιλοτικά.
- Τον ακριβή προσδιορισμό των σκοπών που πρέπει να επιτευχθούν με τον καθαρισμό του υποστρώματος όσων αφορά το χρώμα του, την τραχύτητα του, τα περιεχόμενα άλατα και την οπτική επιθεώρηση του από μακριά, οριοθετώντας τα αποδεκτά όρια.
- Την τελική επιλογή της μεθόδου καθαρισμού που θα εφαρμοστεί.
- Τις παραμέτρους σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει η αξιολόγηση της επέμβασης καθαρισμού για να διαπιστωθεί αν αυτή κινήθηκε εντός των οριοθετημένων αποδεκτών ορίων.

Γ. Εφαρμογή

- Λειτουργική ρύθμιση του εργοταξίου έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ποιοτική εργασία που να επιτελεί τους καθορισμένους στόχους.
- Αξιολόγηση-αποτίμηση της επέμβασης καθαρισμού με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους [6], [8].

1.3 Υλικά και Μέθοδοι Καθαρισμού

1.3.1 Φυσικές Μέθοδοι

1.3.1.1 Με βάση το Νερό

Ράντισμα με νερό χαμηλής πίεσης

Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά ήπια και ελεγχόμενη και επιτυγχάνει διαλυτοποίηση των επικαθήσεων καθώς και απόσπασής τους από το υπόστρωμα εξαιτίας της χαμηλής μηχανικής δράσης της (πίεση: 2.5-4atm). Υπολείμματα των κρουστών πρέπει να απομακρύνονται με βούρτσισμα των επιφανειών. Η εφαρμογή της γίνεται με αγροτικά ακροφύσια, που διαθέτουν αρθρωτούς σωλήνες, κατά μήκος της επιφάνειας και όχι κάθετα σε αυτήν, από πάνω προς τα κάτω του κτιρίου. Η μέθοδος αυτή, καλό είναι να εφαρμόζεται το καλοκαίρι. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με τον εκτεταμένο χρόνο εφαρμογής της μεθόδου έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλη διείσδυση του νερού στην πέτρα. Έτσι συμβάλει στην μετανάστευση των διαλυτών αλάτων από την επιφάνεια στο εσωτερικό της πέτρας (παρόλο που απομακρύνει τελείως ικανοποιητικές ποσότητες τους). Συμβάλει επίσης και στην εμφάνιση βιολογικών παραγόντων διάβρωσης, ενώ προκαλεί φθορές στα κονιάματα. Γι' αυτούς τους λόγους δε συνιστάται η χρήση της για επιφάνειες από πωρόλιθο. Χρησιμοποιείται δε, με αποτελεσματικότητα για την απομάκρυνση κρουστών 1-3mm με περιεκτικότητα σε γύψο 20-30 %. Συνιστάται για κτίρια που δεν έχουν ιστορικό και καλλιτεχνικό χαρακτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κτίρια με ιστορικό χαρακτήρα εάν αυτά βρίσκονται σε καλή κατάσταση [4], [7],[3],[9].

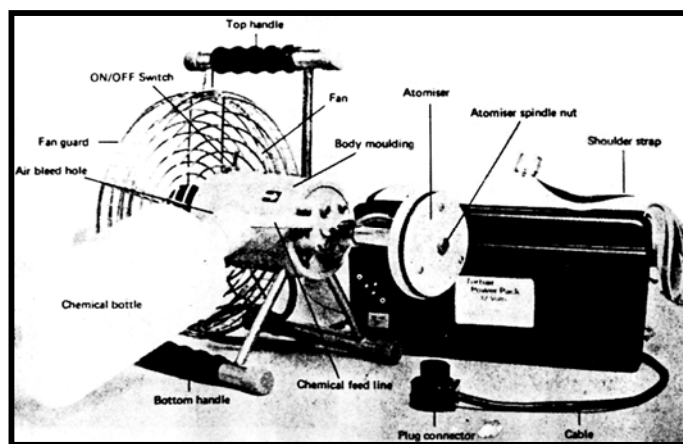


Υδρονέφωση

Κατά τη μέθοδο αυτή, ειδικοί συμπιεστές νερού (εκνεφωτές) παράγουν αιώρημα σταγονιδίων νερού υπό μεγάλη πίεση 60-120atm. Εφόσον το νερό πέφτει στην επιφάνεια υπό μορφή σταγόνων έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια άρα και πιο αποτελεσματική δράση για τη διάλυση και την απομάκρυνση κρουστών. Παράλληλα, εξαιτίας των μεγάλων πιέσεων που αναπτύσσονται, η μέθοδος έχει μεγάλη μηχανική δράση που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε απόσπαση τμημάτων της πέτρας, άρα κρίνεται μη ελεγχόμενη. Επιπλέον, ο εκτεταμένος χρόνος εφαρμογής, οι πολύ μεγάλες ποσότητες νερού που απαιτούνται και οι υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται, διευκολύνουν το διαποτισμό της τοιχοποιίας με νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά των διαλυτών αλάτων από την επιφάνεια της πέτρας στο εσωτερικό με τα γνωστά αρνητικά αποτελέσματα (κατά τη διεργασία της εξάτμισης τα άλατα κρυσταλλώνονται, ασκούν μηχανικές πιέσεις και αποσαθρώνουν το υλικό). Πρόκειται για μία μέθοδο που δε συνιστάται σε καμία περίπτωση για μνημεία ή ακόμα και για κτίρια χωρίς ιστορικό και καλλιτεχνικό ενδιαφέρον, αφού προκαλεί καταστροφές ακόμα και σε μη διαβρωμένες επιφάνειες [7], [9], [4], [3].

Ατμός

Ατμός νερού θερμοκρασίας 150-250° C , που παράγεται από βραστήρα, οδηγείται με κατάλληλο ακροφύσιο υπό πίεση 5-10atm στην προς καθαρισμό επιφάνεια. Ο ατμός μαλακώνει και διαλυτοποιεί τις μαύρες κρούστες. Τυχόν υπολείμματα τους απομακρύνονται με βούρτσισμα της επιφάνειας. Πρόκειται για μια μη ελεγχόμενη μέθοδο η οποία εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας του ατμού και της σχετικά υψηλής πίεσης που χρησιμοποιείται προκαλεί έντονες φθορές στην πέτρα. Παράλληλα, αν η πέτρα συγκρατεί μεγάλες ποσότητες ατμού μπορεί να εμφανιστούν εξανθήσεις αλάτων και κηλίδες υγρασίας. Είναι μέθοδος η οποία δεν συνιστάται ακόμα και για χωρίς ιστορικό και καλλιτεχνικό ενδιαφέρον κτίρια [4], [10], [7], [9].



Ατομικό νερό

Η συσκευή και η δράση αυτής της μεθόδου είναι η ίδια με εκείνη για την μέθοδο της υδρονέφωσης μόνο που χρησιμοποιείται μικρότερη ποσότητα νερού χωρίς πίεση. Είναι μία μέθοδος περισσότερο ελεγχόμενη, λιγότερο επιβλαβής, αλλά και με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, παρόλο το μεγαλύτερο χρόνο δράσης της (1ml ατομικού νερού ανά δευτερόλεπτο). Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή του εκνεφωτή παράγει πολύ μικρού μεγέθους σταγονίδια, τα οποία πέφτουν πάνω στην επιφάνεια της πέτρας που πρέπει να καθαριστεί, κατ' ουσία χωρίς πίεση. Το νερό γίνεται κάτι σαν ομίχλη και αφού από μία σταγόνα προκύπτουν δεκάδες 'ατομικές' έχουμε μεγάλη αύξηση της ειδικής επιφάνειας του χρησιμοποιούμενου νερού. Έτσι αυξάνονται τα σημεία επαφής του προσπίπτοντος νερού με την πέτρα. Οι μαύρες κρούστες μαλακώνουν και πέφτουν εύκολα ενώ η μηχανική δράση της μεθόδου είναι η μικρότερη δυνατή.

Είναι μια μέθοδος που ενδείκνυται για μνημεία με ιστορικό και καλλιτεχνικό χαρακτήρα, για πολυχρωμίες και τοιχοποιίες με έντονη διάβρωση. Επειδή η ομίχλη του ατομικού νερού κατευθύνεται εύκολα, είναι εφικτός ο καθαρισμός απρόσιτων περιοχών ή η απομόνωση και ο καθαρισμός μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το μπουκάλι που φαίνεται στην φωτογραφία μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύστημα συνεχόμενου ανεφοδιασμού νερού ή κατάλληλων χημικών διαλυμάτων.

Μια πρόσφατη βελτίωση της μεθόδου είναι η χρήση κλινών ιοντοανταλλακτικών ρητινών, μέσω των οποίων το νερό απιονίζεται συνέχεια και έτσι αποκτά μεγαλύτερη διαλυτική ικανότητα [5], [7], [1].

1.3.1.2 Μηχανικές Μέθοδοι

Υγρή αμμοβολή

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιείται άμμος ή ψήγματα από άλλα στερεά (χαλαζίας, αλουμίνα, κ.α.) που με νερό υπό πίεση ($0.5-3\text{kg/cm}^2$) βάλλονται στις προς καθαρισμό επιφάνειες. Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου και πρέπει προσεκτικά να καθοριστούν είναι: η αναλογία άμμου / νερού, η κοκκομετρία και η σκληρότητα της άμμου, η πίεση του νερού και η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια. Έχει το πλεονέκτημα, σε σχέση με τη ξηρή αμμοβολή, να μην προκαλεί σκόνη η οποία είναι επιβλαβής για την υγεία του χειριστή και του κοινού.

Πάντως μετά την εφαρμογή της πρέπει να ακολουθεί ένα τελικό ξέπλυμα με νερό. Είναι πολύ οικονομική μέθοδος και πολύ αποτελεσματική για την απομάκρυνση σκληρών επικαλύψεων, δεν πρέπει όμως να εφαρμόζεται το χειμώνα. Δεν είναι πλήρως ελεγχόμενη μέθοδος, ενώ παράλληλα εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων νερού που καταναλώνονται βοηθά τη μεταφορά των διαλυτών αλάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, όπου κατά τη διεργασία της εξάτμισης τα άλατα κρυσταλλώνονται, ασκώντας μηχανικές πιέσεις που αποσθρώνουν το υλικό. Γι' αυτούς τους λόγους δε συνιστάται σε καμία περίπτωση για μνημεία μεγάλου ιστορικού και καλλιτεχνικού ενδιαφέροντος. Μπορεί να εφαρμοστεί για τον καθαρισμό προσόψεων νεοτέρων κτιρίων μικρού ιστορικού και καλλιτεχνικού ενδιαφέροντος αφού πρώτα καθοριστούν προσεκτικά οι παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω [9], [3].



Ξηρή αμμοβολή

Άμμος ή άλλα στερεά βάλλονται με αέρα υπό πίεση πάνω στην επιφάνεια της προς καθαρισμό πέτρας. Η μέθοδος αυτή ελέγχεται πολύ δύσκολα και οδηγεί σε απώλεια αυθεντικού υλικού. Είναι επικίνδυνη για το χειριστή και το κοινό (ιδίως αν χρησιμοποιείται χαλαζιακή σκόνη) και επομένως δε συνιστάται για οποιοδήποτε κτίριο πόσο μάλλον για μνημεία αξίας [3], [9].



Μικροαμμοβολή

Σκόνη αλουμίνας ή γυάλινα σφαιρίδια ή ακόμα και σκόνη κουκουτσιών φρούτων διαμέτρου 27-40μm βάλλονται με αέρα υπό ρυθμιζόμενη πίεση πάνω στην πέτρα. Εξαιτίας της λεπτής κοκκοδιαβάθμισης των σφαιριδίων καθώς και της ατμοσφαιρικής υγρασίας συχνά το ακροφύσιο

φράζει. Γι' αυτό ο αέρας θα πρέπει να είναι ξηρός (διέρχεται από χλωριούχο ασβέστιο ή silica gel), ή ακόμα καλύτερα να χρησιμοποιείται άζωτο σαν προωθητικό αέριο. Η πίεση του αέρα ή του αζώτου ρυθμίζεται εύκολα, όπως και η αναλογία αέρα ή αζώτου προς στερεό. Επομένως ρυθμίζεται εύκολα η αποξεστική ικανότητα του συστήματος και ανάλογα με την πείρα και τη δεξιοτεχνία του χειριστή, η μέθοδος καθίσταται πλήρως ελεγχόμενη. Πρόκειται για μια μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε τύπο πέτρας, ακόμα και εάν πάσχει από έντονη διάβρωση (προηγείται βέβαια η φάση της προστερέωσης). Απομακρύνει με επιτυχία μεγάλο πάχους και σκληρές κρούστες, λεπτές κρούστες, εναποθέσεις ή μαύρες κρούστες που καλύπτουν πολυχρωμίες. Επίσης υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία για επιτυχείς καθαρισμούς αντικειμένων από κόκαλο, ελεφαντόδοντο και μέταλλο.

Η μέθοδος αυτή όμως, είναι πολύ αργή (περίπου 10cm² ανά ώρα) και ακριβή. Συνιστάται ανεπιφύλακτα για κτίρια μικρής ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας, καθώς και υπό προϋποθέσεις για μνημεία μεγάλου ιστορικού και καλλιτεχνικού ενδιαφέροντος ανάλογα με τον τύπο και την ένταση της φθοράς [9], [3], [7], [5].

Ψηγματοβολή ξηρού πάγου

Ο καθαρισμός ξηρού πάγου χρησιμοποιεί κατάλληλο εξοπλισμό, ο οποίος μετατρέπει το υγρό διοξείδιο του άνθρακα σε μεγάλης πυκνότητας σωματίδια ξηρού πάγου που βάλλονται υπό πίεση στην προς καθαρισμό επιφάνεια. Το μέσο καθαρισμού (μετά από την επαφή του με το προς καθαρισμό υπόστρωμα), μετατρέπεται σε αέριο διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο συλλέγεται σε μονάδα χαμηλής πίεσης. Οι επί τόπου όμως εφαρμογές αυτής της τεχνικής έχουν υψηλό κόστος λόγω των ειδικών διεργασιών παραγωγής του ξηρού πάγου, του ειδικού εξοπλισμού βολής του ξηρού πάγου και συλλογής των αποβλήτων του [11].

Ψηγματοβολή φύτρου σταριού (Wheatgerm)

Πρόκειται για μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία ψηγματοβολής, που χρησιμοποιεί φύτρο σταριού (wheatgerm) ως αποξεστικό μέσο και έχει αναπτυχθεί στις ΗΠΑ. Οι πρώτες εφαρμογές αυτής της μεθόδου έλαβαν χώρα για τον καθαρισμό της επίστρωσης αλουμινίου των αεροπλάνων, ενώ αργότερα η τεχνική χρησιμοποιήθηκε και για επεμβάσεις καθαρισμού τοιχοποιιών. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι το αποξεστικό μέσο είναι οικολογικό, αφού είναι πλήρως βιοδιασπάσιμο. Όμως, το εξαιρετικά υψηλό κόστος των υλικών και του εξοπλισμού (\$1.4M σε τιμές του 1999), καθιστά την εφαρμογή της τεχνικής ιδιαίτερα περιορισμένη [11].

Με υπερήχους

Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση αρκετού πάχους κρουστών χωρίς να καταστρέφει την πέτρα (όταν αυτή έχει συνοχή). Ο καθαρισμός γίνεται με οδοντιατρικά εργαλεία από τα οποία εκπέμπονται δονήσεις που φτάνουν στη μαύρη κρούστα μέσω ενός

διαβιβαστή με σχήμα σπάτουλας και ενός λεπτού στρώματος νερού. Είναι επαρκές να περνά ξυστά ο διαβιβαστής από την επιφάνεια της πέτρας χωρίς να την αγγίζει, γιατί το νερό μεταδίδει τις δονήσεις προκαλώντας την αποκόλληση της κρούστας. Ακολουθεί ξέπλυμα με νερό για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της κρούστας. Πρόκειται για μια μέθοδο πλήρως ελεγχόμενη και ακριβείας, ενώ είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την απομάκρυνση βρώμικων στρωμάτων από πολυχρωμίες. Εξαιτίας της μικρής της ταχύτητας εφαρμόζεται σε επιφάνειες μικρής έκτασης [5], [7].

Με εργαλεία

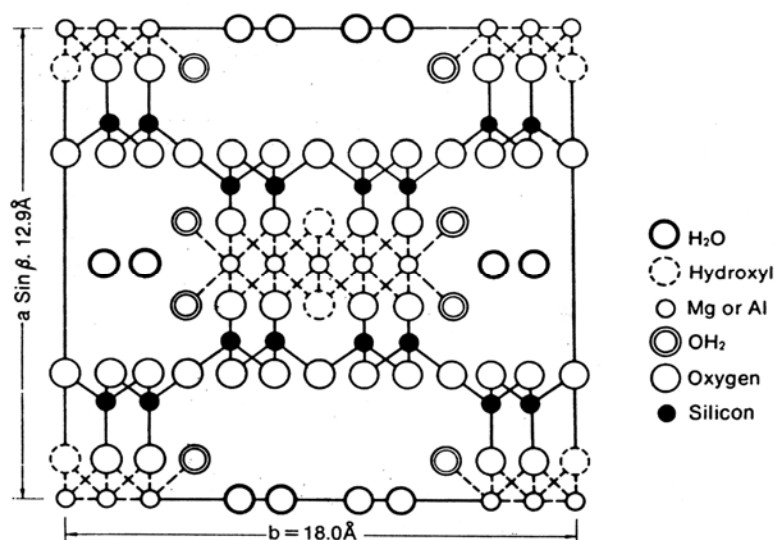
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την απομάκρυνση της μαύρης κρούστας και είναι η πιο φανερή και απλή προσέγγιση στο πρόβλημα της επέμβασης του καθαρισμού. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενοι δίσκοι ή μεταλλικές βούρτσες, γιατί δεν είναι εύκολα ελεγχόμενα εργαλεία ακόμα και από έμπειρο προσωπικό με αποτέλεσμα την απομάκρυνση



αυθεντικού υλικού. Προτεινόμενα εργαλεία είναι τα νυστέρια, μαλακές βούρτσες νάilon, ξέστρα, δονούμενα ξέστρα, μικρά τρυπάνια, οδοντιατρικά εργαλεία, λεπτά γυαλόχαρτα και σμυριδόχαρτα (400-600Mesh), κ.α. Είναι προφανές ότι πρόκειται για μια αργή μέθοδο η αποτελεσματικότητα της οποίας εξαρτάται από την επιδεξιότητα του χειριστή και συνεπώς πρέπει να αποκλεισθεί για αγάλματα και γλυπτούς διακόσμους, γιατί όσο επιδέξιος και αν είναι ο χειριστής, όποιο εργαλείο και αν χρησιμοποιήσει θα υπάρξει σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού ιδίως αν η επιφάνεια είναι έντονα φθαρμένη. Ενδεχομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες επιφάνειες ή προσόψεις νεωτέρων κτιρίων μικρής ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας. Δε συνιστάται σε καμία περίπτωση όμως, για μνημεία μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας [5], [3].

1.3.1.3 Καθαρισμός με Ειδικές Αργίλους

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται συνήθως δύο τύποι αργίλων, ο ατταπουλγίτης, $(Al\ Mg\ Fe)_5(Al\ Si_7)O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ και ο σηπιόλιθος, $Mg_9Si_{12}O_{30}(OH)_6 \cdot 4H_2O-6H_2O$, οι οποίοι έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια και επομένως μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες νερού, ελαίων ή άλλων υγρών ανάλογα με το βάρος τους [5]. Το αξιοσημείωτο γι' αυτούς τους ένυδρους μαγνήσιο- και άργιλο- φυλλοπυριτικούς αργίλους είναι ότι παρόλη την εξαιρετική ροφητική ικανότητα που παρουσιάζουν, δεν εκδηλώνουν το φαινόμενο της διόγκωσης. Αυτό αποδίδεται στη δομή τους: διπλή αλυσίδα από πυριτικά τετράεδρα ενωμένα στις κορυφές τους με ιόντα Mg^{2+} , οκταεδρικώς ενταγμένα. Στον ατταπουλγίτη το Mg^{2+} υποκαθίσταται μερικώς από Al^{3+} , Fe^{2+} και Fe^{3+} . Τα μόρια του νερού στην περίπτωση αυτή, ροφούνται και καλύπτουν τα κενά που υπάρχουν ανάμεσα στις επιμήκεις δομικές μονάδες-αλυσίδες. Για παράδειγμα, 1kg ατταπουλγίτη μπορεί να απορροφήσει 1.5kg νερού χωρίς να υποστεί καμία διόγκωση. Επιπλέον, τα διαπλεγματικά κατιόντα των αργίλων αυτών εύκολα δρουν ιοντοανταλλακτικά με τα Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , [12].



Εικόνα 1 Σχηματική παρουσίαση της δομής του ατταπουλγίτη

Εκμεταλλεύομενοι αυτές τις σπουδαίες ιδιότητες, χρησιμοποιήσαμε τους αργίλους αυτούς για τον καθαρισμό αγαμάτων ή ανάγλυφων, τα οποία φυλάσσονταν σε κλειστούς χώρους. Έτσι αποδείχθηκε η μεγάλη αποτελεσματικότητά τους κατά την διάλυση και απομάκρυνση λεπτών κρουστών (μέγιστο πάχος 1mm) καθώς και στην απορρόφηση διαλυτών αλάτων. Στην περίπτωση παχύτερων και πιο συνεκτικών κρουστών, οι οποίες βρίσκονται στις εξωτερικές επιφάνειες των μνημείων, η εφαρμογή των ειδικών αργίλων πρέπει να επαναληφθεί πολλές φορές (20 ή και περισσότερες). Όταν η προς καθαρισμό επιφάνεια παρουσιάζει κηρώδεις εναποθέσεις θα πρέπει πρώτα αυτές να απομακρύνονται με τους κατάλληλους διαλύτες (ακετόνη, χλωρομεθάνιο κ.α.), έτσι ώστε να βελτιώνεται η διαβρεξιμότητα της πέτρας και μετά να εφαρμόζονται οι ροφητικές πάστες. Επίσης πριν την εφαρμογή της πάστας θα πρέπει η

προς καθαρισμό επιφάνεια να ψεκάζεται με απεσταγμένο νερό ή ακόμα καλύτερα να γίνεται μια αρχική επίστρωση με ένα λεπτό στρώμα πολύ υγρού αργίλου.

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται και για τη διάλυση του γύψου. Στην περίπτωση επικαθίσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε γυψοποιημένες επιφάνειες μαρμάρου, οι οποίες διατηρούν τις λεπτομέρειες των ανάγλυφων (άρα ο γύψος πρέπει να διατηρηθεί), ο καθαρισμός μπορεί να επιτευχθεί με ροφητικές πάστες (μέσω ιαπωνικού χαρτιού) με νερό κορεσμένο σε CaCO_3 [3].

Ουσιαστικά οι άργιλοι κρατούν την κρούστα υγρή και απορροφούν άλατα και διαβρωτικά σωματίδια από την επιφάνεια της πέτρας. Το πάχος της πάστας μπορεί να είναι 2 με 3 cm, ενώ ο χρόνος εφαρμογής της ποικίλει από περίπτωση σε περίπτωση (συνήθως επαρκούν 24 με 48 ώρες). Η απομάκρυνση της γίνεται με σπάτουλες, όταν στην επιφάνεια της αρχίζουν να σχηματίζονται μικρορωγμές και αποκολλάται από την πέτρα.

Ακολουθεί επιμελές ξέπλυμα με νερό για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της πάστας. Όταν η εφαρμογή της πάστας πρόκειται να διαρκέσει μεγάλο χρονικό διάστημα, πρέπει ο άργιλος να καλύπτεται με φύλλα πολυαιθυλενίου έτσι ώστε να επιβραδύνεται η εξάτμιση του νερού. Επίσης η προσθήκη χαρτοπολτού κρίνεται πολλές φορές απαραίτητη, γιατί επιβραδύνει τη ξήρανση της πάστας και μειώνει το σχηματισμό μικρορωγμών.



Η χρήση του απιονισμένου νερού προτιμάται εξαιτίας της μεγαλύτερης του διαλυτότητας. Και οι δύο τύποι των αργίλων παρουσιάζουν καλά αποτελέσματα όταν η κοκκομετρία τους είναι αρκετά υψηλή (τουλάχιστον 100-200 Mesh). Επίσης έχει παρατηρηθεί, στις ίδιες συνθήκες, ότι ο σηπιόλιθος χάνει νερό λόγω εξάτμισης πιο γρήγορα από τον ατταπουλίτη, άρα παρουσιάζει πιο γρήγορα μικρορωγμές στην επιφάνεια του και αποκολλάται γρηγορότερα από την επιφάνεια της πέτρας.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση λιπαρών λεκέδων, οξειδίων του σιδήρου κ.α. , όταν το νερό αντικαθιστάται από τους κατάλληλους διαλύτες. Έχει επίσης αποδειχθεί χρήσιμη μέθοδος για την αφαλάτωση των τοιχογραφιών (frescoes) και άλλων έργων τέχνης. Στις περιπτώσεις που η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλες επιφάνειες, καλό θα ήταν να

συγκρατείται ο άργιλος με νάιλον, έτσι ώστε να μην αποκολληθεί από την επιφάνεια της πέτρας λόγω του μεγάλου βάρους του.

Η μέθοδος αυτή έχει αρκετά **πλεονεκτήματα**, αφού απορροφά τα διαλυτά άλατα, μειώνει τις χημικές δράσεις στην επιφάνεια της πέτρας εμποδίζοντας τη διείσδυση χημικών ουσιών σε αυτή και άρα είναι σχετικά ακίνδυνη (προτείνεται ακόμα και για τον καθαρισμό αγαλμάτων) [9], είναι οικονομική (οι άργιλοι αυτοί μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν εάν καθαριστούν με νερό) και εύκολη στην εφαρμογή.

Τα **μειονεκτήματα** αυτής της μεθόδου συνίστανται στο ότι είναι αργή, μη εύκολα ελεγχόμενη και στο ότι δεν είναι πολύ αποτελεσματική σε κρούστες μεγαλύτερου πάχους.

Επιπλέον, ιδίως σε πορώδης λίθους, η απομάκρυνση της είναι πολύ δύσκολη χωρίς την εφαρμογή δραστικών μηχανικών μέσων [5], γι' αυτό έχει προταθεί να παρεμβάλλεται ιαπωνικό χαρτί ανάμεσα στην προς καθαρισμό επιφάνεια και την ροφητική πάστα [3]. Επίσης, ανησυχία προκαλούν οι απόψεις για πιθανές καρκινογενείς_ιδιότητες του αταπουλγίτη εξαιτίας της ινώδους του δομής (Lazzarini and Lombardi, 1990) .

Εκτός από το σηπιόλιθο και τον αταπουλγίτη πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι εξίσου καλά αποτελέσματα σε επεμβάσεις καθαρισμού δίνουν και οι ροφητικές πάστες από μπετονίτη [13]. Σύμφωνα με τους Barbosa, Santiago και De Oliveira, οι μπετονίτες από τη Βραζιλία παρουσιάζουν καλύτερη κατιονανταλλακτική ικανότητα από τους σηπιολίθους και τους αταπουλγίτες που εξετάστηκαν. Παρουσιάζουν δε και καλή ροφητική ικανότητα εξαιτίας των μοντοριλλονιτών, του κύριου αργιλικού ορυκτού των μπετονιτών [13].

Η ικανότητα των ροφητικών παστών να απορροφούν τα διαλυτά άλατα ελέγχεται με μετρήσεις αγωγιμότητας στις ίδιες τις πάστες αφότου αυτές αφαιρεθούν από την καθαρισμένη επιφάνεια [13].

1.3.2 Χημικές Μέθοδοι

Με οξέα, βάσεις, απορρυπαντικά

Σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο χημικός καθαρισμός. Αυτή η μέθοδος απαιτεί στενή παρακολούθηση από τους ειδικούς ,αφού τα χημικά προϊόντα μπορούν να προκαλέσουν αναντίστροφη φθορά. Προϊόντα που χρησιμοποιούνται στο χημικό καθαρισμό είναι:

1) Τα επιφανειακά ενεργά και γαλακτωματοποιά αντιδραστήρια τα οποία προστίθενται στο νερό έτσι ώστε να αυξηθεί η διαβρεξιμότητα και να μειωθεί η επιφανειακή τάση. Τέτοια προϊόντα είναι τα απορρυπαντικά (πολυανθρακικές αλυσίδες με υδρόφιλες ομάδες), τα οποία διαλυτοποιούν έλαια και λίπη.

2) Τα οξέα και τα άλατα τους, τα οποία αντιδρούν με τις μαύρες κρούστες και τις διαλύουν. Ανάμεσα σε αυτά το υδροχλωρικό οξύ είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο. Εξαιτίας της ισχυρής και μη ελεγχόμενης δράσης του μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία κηλίδων οξειδωσης, την αλλαγή του χρώματος και το σχηματισμό χλωριδίων, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν περαιτέρω φθορά. Έτσι, ενώ στην αρχή μπορεί να προκληθούν θετικές εντυπώσεις για το αποτέλεσμα της μεθόδου του καθαρισμού με οξέα, η επιθετική τους συμπεριφορά μπορεί να φανεί πολλά χρόνια

αργότερα. Μετά από λίγο καιρό, οι επιβλαβείς επιδράσεις των οξέων σε επιφάνειες λίθων που περιέχουν ενώσεις Fe, γίνονται φανερές εξαιτίας του κιτρινίσματος τους. Οι ενώσεις Fe διαλύθηκαν από το υδροχλωρικό οξύ και συνεπώς μετανάστευσαν προς την επιφάνεια. Το δεύτερο μακροσκοπικά ορατό αποτέλεσμα είναι η ενεργοποίηση της διάβρωσης του λίθου, εξαιτίας της ύπαρξης υπολειμμάτων υδροχλωρικού οξέος, τα οποία δεν απομακρύνθηκαν πλήρως μετά τον καθαρισμό. Τα υπολείμματα του οξέως αντιδρούν με τον ασβεστόλιθο και το διαλύουν, ή σχηματίζουν ευδιάλυτα άλατα προκαλώντας επιπλέον μορφές διάβρωσης με έναν σημαντικά υψηλότερο ρυθμό από αυτόν της φυσικής φθοράς. Παρόμοια προβλήματα προκύπτουν και με τη χρήση του όξινου φθοριούχου αμμωνίου και του υδροφθορικού οξέως. Στην περίπτωση του ασβεστιτικού λίθου, το ανθρακικό ασβέστιο αντιδρά με αυτές τις ενώσεις παράγοντας φθοριούχο ασβέστιο, το οποίο είναι λιγότερο διαλυτό από ανθρακικό ασβέστιο. Μετά τον καθαρισμό η επιφάνεια καλύπτεται από μια πολύ λεπτή στοιβάδα φθοριούχου ασβεστίου, η οποία ίσως να δρα και σαν προστατευτικό υλικό. Στην πραγματικότητα, ο όγκος του φθοριούχου ασβεστίου είναι σημαντικά μικρότερος από το αρχικό ανθρακικό ασβέστιο και συνεπώς σχηματίζονται πολλές μικρορωγμές στη στοιβάδα του φθοριούχου ασβεστίου. Μέσα σε αυτές οι αέριοι ρυπαντές μπορούν εύκολα να διεισδύσουν προκαλώντας περαιτέρω φθορά. Η χρήση των φθοριούχων ενώσεων σε πυριτιούχους λίθους, όπως ο γρανίτης, ο ψαμμίτης και ο βασάλτης, ενέχει σημαντικούς κινδύνους γιατί το πυρίτιο που περιέχεται στο διοξείδιο του πυριτίου και τα πυριτικά άλατα, αντιδρά με το υδροφθορικό οξύ παράγοντας την αέρια ουσία του τετραφθοροπυριτίου SiF_4 . Η επιτυχής χρήση αυτών των ουσιών απαιτεί ακριβή έλεγχο της συγκέντρωσης και του χρόνου εφαρμογής. Επειδή όμως πρόκειται για μη ελεγχόμενη μέθοδο δε συνιστώνται σε καμία περίπτωση για κτίρια μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας.

3) Τα αλκάλια και ουσίες με αλκαλική δράση καταστρέφουν τις λιπαρές κηλίδες μέσω της αντίδρασης της σαπωνοποίησης. Η καυστική σόδα, η οποία συχνά χρησιμοποιήθηκε σαν καθαριστικό στο παρελθόν, πρέπει να αποφεύγεται ($\text{pH} > 8$). Η καυστική σόδα και η αμμωνία (οι ουσίες που συνήθως χρησιμοποιούνται), δεν απομακρύνουν τις μαύρες κρούστες, και σαν βασικές ουσίες που είναι, δημιουργούν ευδιάλυτα άλατα (θειικά όταν υπάρχει γύψος, ανθρακικά όταν σε ασβεστολιθικό πέτρωμα). Επίσης, για την απομάκρυνση γύψου έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, διάλυμα μίγματος εξαμεταφωσφορικού νατρίου, μυρμηκικού αμμωνίου και αιθανολαμίνης σε $\text{pH} = 9$. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η αλκαλικότητα ενός διαλύματος οφείλει να μη ξεπερνά την τιμή του $\text{pH} = 8$, διότι σε μια τέτοια περίπτωση το ανθρακικό ασβέστιο μετατρέπεται στο διαλυτό $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Πρόκειται για μη ελεγχόμενες μεθόδους που δε συνιστώνται σε καμία περίπτωση για κτίρια μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας [9], [3], [7].

Πάστα Mora, AB57

Στο I.C.R. (Istituto Centrale del Restauro) της Ρώμης παρασκευάστηκε το μίγμα με την ονομασία AB57, το οποίο συνίσταται από το ήπιο αλκαλικό άλας NH_4HCO_3 το δινατριούχο άλας του EDTA (αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ), το NaHCO_3 και το τεταρτοταγές χλωριούχο

αμμώνιο desogen (εμπορική ονομασία), του οποίου η δράση είναι η μείωση της επιφανειακής τάσης.

Όλα αυτά διαλύονται στο νερό και διατηρούνται με τη μορφή αιωρήματος προσθέτοντας ένα θιξοτροπικό αντιδραστήριο, το οποίο δρα ως φορέας, και είναι η καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη.

Οι προτεινόμενες αναλογίες αυτής της πάστας είναι:

1. H₂O	1000ml
2. NH₄HCO₃	30g
3. NaHCO₃	50g
4. EDTA (δινатριούχο άλας)	25g
5. desogen	10ml
6. καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη	60g

Η παραπάνω πάστα έχει pH=7.5, πράγμα που συνεπάγεται αποφυγή κάθε διάβρωσης του ασβεστόλιθου από το σχηματισμό επιβλαβών παραπροϊόντων.

Η ποσότητα του στην πάστα μπορεί να αυξηθεί έως και 100-125g σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση του καθαρισμού της Βασιλικής του Αγ. Πετρονίου στη Μπολώνια. Επίσης είναι πιθανή η προσθήκη αμμωνίας και τριαιθανολαμίνης N(CH₂CH₂OH)₂ στην πάστα στις περιπτώσεις απομάκρυνσης οξειδωμένων λιπών και ελαίων που μπορεί να υπάρχουν στην κρούστα. Παρόλα αυτά, όποτε είναι δυνατό, καλό θα ήταν να αποφεύγεται η χρήση του NaHCO₃ για να μειώνεται ο κίνδυνος ύπαρξης υπολειμμάτων των αλάτων του νατρίου στις καθαρισμένες επιφάνειες.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις έχουν μεγάλη αξία, γιατί είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ξεπλένεται και να τρίβεται η επιφάνεια κατ' επανάληψη μετά την αφαίρεση της πάστας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή απομάκρυνση κάθε υπολείμματος της, αφού υπολείμματα αλκαλικών αλάτων προκαλούν φθορά στην πέτρα, ενώ υπολείμματα καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης προσδίδουν στην επιφάνεια κολλώδη υφή.

Εάν χρησιμοποιηθεί ξυλοπολτός, χαρτοπολτός ή ακόμα και φαρμακευτικό βαμβάκι με απεσταγμένο νερό, αυτές οι ουσίες απομακρύνονται πιο αποτελεσματικά. Για τους παραπάνω λόγους, αλλά και την εύκολη απομάκρυνση της πάστας AB57, τοποθετείται ανάμεσα σε αυτή και την προς καθαρισμό επιφάνεια, απορροφητικό χαρτί (γιαπωνέζικο χαρτί ή ακόμα και απλό χαρτί κουζίνας). Έτσι όταν η επέμβαση του καθαρισμού τελειώσει η πάστα αφαιρείται εύκολα με ψεκασμό συμπιεσμένου αέρα. Επίσης, πολλαπλές εφαρμογές λεπτών στρωμάτων πάστας θεωρείται ότι είναι πιο αποτελεσματικές από την εφαρμογή μίας μόνο με μεγαλύτερο πάχος (για τον ίδιο χρόνο εφαρμογής βέβαια) [14].

Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι σχετικά εύκολα ελεγχόμενη, δε συνιστάται να εφαρμόζεται α)σε μάρμαρο, (το οποίο είναι περισσότερο επιδεκτικό στη διάβρωση του συνδετικού υλικού καθώς και στην απόσπαση κρυστάλλων ασβεστίτη από την επιφάνεια του, αφού το EDTA συμπλοκοποιεί το ασβέστιο του μαρμάρου και επομένως δρα διαλυτικά [3], [15]. Βέβαια σημαντικό ρόλο για τα παραπάνω παίζει ο χρόνος εφαρμογής και η συγκέντρωση του EDTA

στην πάστα.) και β) στους πορώδεις ασβεστόλιθους, όπου είναι δύσκολη η απομάκρυνση της πάστας.

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στον καθαρισμό τοιχογραφιών και στην απομάκρυνση ανθρακικών κρουστών των αντικειμένων ανασκαφής, γιατί έχει τα εξής πλεονεκτήματα: 1) είναι γρήγορη 2) εύκολη στην προετοιμασία και εφαρμογή και 3) χαμηλού κόστους.

Ένα άλλο μίγμα που έχει δοκιμαστεί στο εργαστήριο για τον καθαρισμό των ασβεστόλιθων και φαίνεται να έχει καλά αποτελέσματα και εκλεκτική δράση είναι το εξαμεταφωσφορικό νάτριο: $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$ και το μυρμηκικό αμμώνιο HCOONH_4 . Αυτά τα δύο άλατα, όταν καταφέρνουν συνδυάζονται έχουν μεγαλύτερη διαλυτότητα και να διαλύουν τον γύψο χωρίς να διαβρώνουν το ανθρακικό ασβέστιο. Πρόκειται για διάλυμα 5-10% σε νερό. Οι μέθοδοι εφαρμογής τους ποικίλουν και είναι υπό μορφή:

- Gel (πηκτής)
- Γαλακτωμάτων νερού / ελαίου
- Ψεκασμός, ο οποίος επαναλαμβάνεται ανά 5 έως 30 λεπτά.

Καλό είναι να προστίθεται στο μίγμα ένα αντιδραστήριο που να μειώνει την επιφανειακή τάση, ενώ ο καθαρισμός ολοκληρώνεται με ξέπλυμα της επιφάνειας (συνήθως με ψεκασμό νερού χαμηλής πίεσης) [5].

Παρατήρηση

Η χρήση απιονισμένου νερού σύμφωνα με τον Livingstone [15], δεν ενδείκνυται. Επειδή η διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου εξαρτάται από το pH και την μερική πίεση του CO_2 όταν το απιονισμένο νερό (το οποίο δεν περιέχει ιόντα ασβεστίου και συνεπώς είναι ακόρεστο ως προς τον ασβεστίτη) έρθει σε επαφή με την πέτρα θα διαλύσει τον ασβεστίτη έως ότου να προκύψει το κορεσμένο διάλυμα. Γι' αυτούς τους λόγους ο Livingstone [15], προτείνει ότι, στις επεμβάσεις καθαρισμού το νερό που θα χρησιμοποιείται πρέπει πρώτα να τοποθετείται σε ανοιχτό δοχείο με κομματάκια ασβεστόλιθου ή μαρμάρου, έτσι ώστε να αποκαθίσταται η ισορροπία, ενώ όσον αφορά τις πάστες αυτές πρέπει πάντοτε να καλύπτονται με φύλλα πολυαιθυλενίου.

Με ιοντοανταλλακτικές ρητίνες

Αυτές οι ρητίνες συνίσταται από σκόνες/κονίες ποικίλης κοκκομετρίας (100-400Mesh), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως για την απομάκρυνση του γύψου. Χρησιμοποιούνται και σε επιφάνειες πολυχρωμιών και σε τοιχογραφίες. Οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες είναι είτε τεχνητές, είτε φυσικές. Η δομή τους συνίσταται από μια μητρική αλυσίδα η οποία είναι δεσμευμένη μέσω ομοιοπολικών δεσμών με ιονικές ομάδες. Αυτές βρίσκονται σε ισορροπία ηλεκτρικού φορτίου, όπου το αντισταθμικό φορτίο ανταλλάσσεται και η ρητίνη ανάλογα με το φορτίο του κατατάσσεται σε ανιονική, κατιονική ή ακόμα και μεικτή. Χαρακτηριστικές συνθετικές ρητίνες είναι τα πολυδιφαινυλοβενζόλια.



Κατιονική ρητίνη



Ανιονική ρητίνη

Οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες είναι πολυηλεκτρολύτες που διογκώνονται στο νερό, αλλά είναι αδιάλυτες σε αυτό και άλλους διαλύτες. Αυτό αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα αλλά και περιορισμό. Πλεονέκτημα το ότι η ρητίνη επιδρά μόνο στην επιφάνεια του υποστρώματος, αφού ως μη διαλυτή δε μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό του και να μολύνει το υπόστρωμα με ξένα υλικά. Περιορισμός το ότι δε δείχνει μεγάλη ικανότητα στην εξαγωγή διαλυτών αλάτων αφού δρα μόνο στην επιφάνεια του υποστρώματος. Σε αυτό το πρόβλημα τα καλύτερα αποτελέσματα δίνει η εφαρμογή πάστας κυτταρίνης με νερό. Ουσιαστικά η δράση της ρητίνης είναι μια δράση ανταλλαγής που αντικαθιστά τα επιβλαβή ιόντα των επικαθήσεων με αβλαβή στη διεπιφάνεια ρητίνης –πέτρας.

Η πάστα που εφαρμόζεται έχει τη μορφή λεπτού επιθέματος και τοποθετείται με σπάτουλα ή πινέλο. Αν οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες βρίσκονται σε μεγάλη κοκκομετρία πιστεύεται ότι η δράση τους είναι ανομοιογενής ως προς τον καθαρισμό της επιφάνειας. Γι' αυτό και επιλέγονται χαμηλής κοκκομετρίας ρητίνες ώστε να επιτυγχάνεται ομοιογενής δράση στην επιφάνεια της πέτρας. Εάν, όμως η κοκκομετρία είναι μικρή υπάρχει ο κίνδυνος να παραμείνει η ρητίνη υπό μορφή σκόνης στο υπόστρωμα. Επομένως η τοποθέτηση ιαπωνικού χαρτιού (λεπτού πάχους, για να μην ανασταλεί η δράση της ρητίνης) στη διεπιφάνεια ρητίνης –πέτρας κρίνεται απαραίτητη. Βέβαια αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου εφαρμογής αλλά και του κόστους.

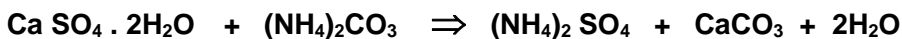
Η χημική σταθερότητα των ρητινών είναι μικρή γι' αυτό και η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται με την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι ρητίνες κατά τον καθαρισμό των τοιχογραφιών είναι η εξαγωγή πρωτεϊνών και λιπών από τα χρώματα όταν το pH είναι μεγάλο. Παρουσιάζουν όμως πολλά πλεονεκτήματα κατά τον καθαρισμό τοιχογραφιών με χρωστικές του χαλκού (αζουρίτης, μαλαχίτης).

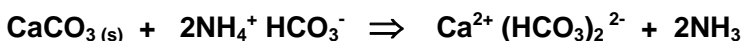
Τέλος αν και οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες που έχουν χρησιμοποιηθεί έως σήμερα είναι ακριβές, επειδή όμως μπορούν να αναγεννηθούν αποδεικνύονται τελικά οικονομική λύση [16], [17], [5], [18], [1].

Όξινο ανθρακικό αμμώνιο και ανθρακικό αμμώνιο

Υδατικό διάλυμα ανθρακικού αμμωνίου ή όξινου ανθρακικού αμμωνίου σε συγκεντρώσεις 10-15% w/v τοποθετούνται στις προς καθαρισμό επιφάνειες μέσω ροφητικών αργίλων ή χαρτοπολτού. Πρόκειται για μια αποτελεσματική μέθοδο για την απομάκρυνση του γύψου [19], [20], [21] με το πρώτο και των μαύρων ανθρακικών κρουστών [22] με το δεύτερο. Το ανθρακικό αμμώνιο απομακρύνει το γύψο σύμφωνα με την αντίδραση:



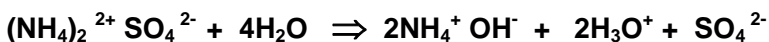
Το θειικό αμμώνιο που σχηματίζεται από την παραπάνω αντίδραση είναι ένα πολύ ευδιάλυτο άλας, το οποίο μπορεί να απομακρυνθεί με πλύσιμο της επιφάνειας (καλύτερα είναι να εφαρμόζονται πολλά αλληπάληλα πλυσίματα μικρής χρονικής διάρκειας και μικρών ποσοτήτων νερού) [19]. Στην περίπτωση λίθων με μεγάλο πορώδες όμως, προκαλείται ανεπιθύμητη διείσδυση του $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ σε αυτό [17]. Ένας άλλος τρόπος δέσμευσης των θειικών (πιθανά καλύτερος) είναι με την προσθήκη στην πάστα ανιονικών ρητινών [23], [16], [18]. Με αυτό τον τρόπο δε σχηματίζεται το λευκό ίζημα του CaCO_3 , το οποίο “λεκιάζει” δημιουργώντας αισθητικό πρόβλημα στις επιφάνειες. Γενικά, σε αυτή τη μέθοδο σημαντικό ρόλο για τη μείωση της δράσης των παραπροϊόντων παίζει η συγκέντρωση του διαλύματος και ο χρόνος εφαρμογής της πάστας. Σύμφωνα με τον Σκουλικίδη [3], η μέθοδος αυτή παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα:



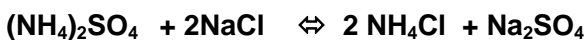
Δηλαδή διάλυση του μαρμάρου (θάμπωμα). Ο γύψος διαλύεται:



αλλά το παραγόμενο $(\text{NH}_4)_2^{2+} \text{SO}_4^{2-}$ υδρολύεται:



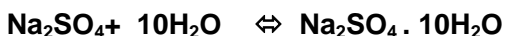
και σχηματίζει θειικό οξύ, που προσβάλλει το μάρμαρο. Επίσης, παρουσία χλωριούχου νατρίου από σταγονίδια του θαλασσινού νερού σχηματίζονται:



Το NH_4Cl υδρολύεται και σχηματίζει υδροχλωρικό οξύ που διαλύει το μάρμαρο:



Το Na_2SO_4 ανάλογα με τη θερμοκρασία και υγρασία κρυσταλλώνεται αντιστρεπτά με 10 μόρια νερού:



Με συνέπεια τη διόγκωση –συστολή και ρήξη των πόρων και ρωγμών (κόπωση του μαρμάρου).

Το διάλυμα του $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ έχει τις ίδιες συνέπειες από το σχηματισμό του $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Τα NH_4 σχηματίζουν έγχρωμα δυσδιάλυτα σύμπλοκα με βαρέα μέταλλα, που περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια, που έχουν κατακαθήσει και επιπλέον έλκουν μικροοργανισμούς. Δε συνιστάται σε καμία περίπτωση [3].

Καθαρισμός με βιολογικές πάστες

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε για να επιταχύνει τα αρχικά στάδια του καθαρισμού επιφανειών που έπασχαν από προχωρημένη διάβρωση και δεν ήταν εφικτός ο καθαρισμός τους με μεθόδους που βασιζόνταν στο νερό. Εφαρμόζεται με πάστες σηπιολίθου ή ατταπουλγίτη και περιλαμβάνει τα παρακάτω προϊόντα:

- | | |
|---------------------------------------|------|
| 1. H_2O | 1lt |
| 2. $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (ουρία) | 50 g |

3. (CH₂OH)₂CHOH (γλυκερίνη) 20 ml

Η άργιλος πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 2cm και πρέπει να καλύπτεται με φύλλα πολυαιθυλενίου. Η πάστα αφήνεται για ένα μήνα και απομακρύνει το μεγαλύτερο μέρος της κρούστας μετά από ξέπλυμα με νερό. Τυχόν υπολείμματα μικρής συνοχής απομακρύνονται με μικροαμμοβολή. Μετά η επιφάνεια ξεπλένεται με ένα βιοκτόνο (το οποίο αν είναι διαλυτό στο νερό προστίθεται στο νερό που ξεπλένει την πάστα), έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης που προκαλούνται από βακτήρια.

Οι μηχανισμοί οι οποίοι διέπουν αυτή τη μέθοδο καθαρισμού δεν έχουν γίνει πλήρως κατανοητοί. Οι τελευταίες εργαστηριακές έρευνες έδειξαν ότι η πάστα αυτή διαλύει το γύψο και άλλα συνδετικά υλικά της κρούστας που δημιουργούνται από μικροβακτήρια.

Τέλος πρόκειται για μια ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδο για τις δύσκολες επεμβάσεις καθαρισμού σκληρών και μεγάλου πάχους κρουστών [5], [7].

1.3.3 Θερμικές Μέθοδοι

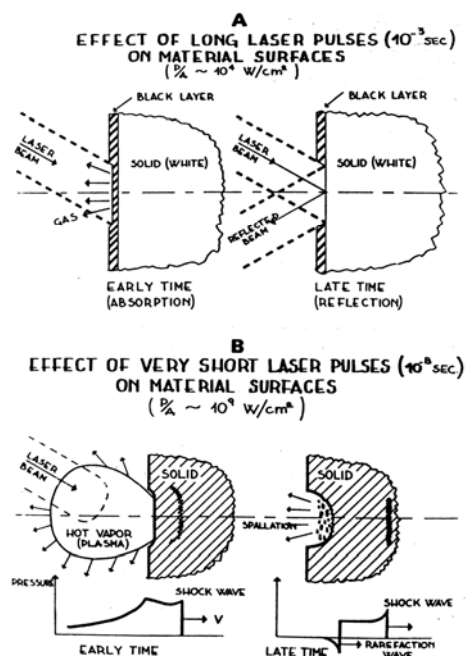
Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

(Ενίσχυση του Φωτός με Εξανασκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας)

Ο καθαρισμός με Laser είναι μια σχετικά νέα και πολλά υποσχόμενη μέθοδος, η οποία είναι αρκετά ακριβή και αρκετά χρονοβόρα, γι' αυτό και χρησιμοποιείται κυρίως για τον καθαρισμό αγαλμάτων. Το laser συνίσταται από μια πηγή ακτινοβολίας η οποία παράγει μια πολύ ισχυρή ακτίνα φωτός που εξαχνώνει την οργανική ύλη της κρούστας. Ενέργεια αναπτύσσεται στιγμιαία και η εστίαση της είναι εξαιρετικά συγκεντρωμένη [9].

Μια χαρακτηριστικοί συσκευή laser είναι αυτή που αποτελείται από ένα ασυνεχές laser Nd συζευγμένο με ένα συνεχές laser He-Ne. Η λειτουργία του τελευταίου είναι να παράγει μια κόκκινη ακτίνα οδηγό, η οποία υποδεικνύει την περιοχή της πέτρας στην οποία η ακτίνα του laser κατευθύνεται. Η διάρκεια του παλμού είναι 1/4000 sec με μία απόσταση 6 sec. Αυτό το διπλό σύστημα laser συνδέεται με μια ηλεκτρονική συσκευή, η οποία παρέχει την ενέργεια ή την διακόπτει. Συνήθως η διάμετρος της ακτίνας του laser κυμαίνεται ανάμεσα στα 4-10 mm: όσο μικρότερη διάμετρος, τόσο ισχυρότερη επίδραση.

Η αρχή της λειτουργίας ενός laser είναι η εξής: Όταν ένα άτομο διεγείρεται από μια πηγή ενέργειας τα ηλεκτρόνια του μεταπίπτουν σε υψηλότερο και ασταθές ενεργειακό επίπεδο. Η επιστροφή αυτών των ηλεκτρονίων στη θεμελιώδη κατάσταση συνοδεύεται από εκπομπή ενός φωτονίου συγκεκριμένης συχνότητας. Έτσι, εάν ένα κύμα μεταφερόμενων φωτονίων της ίδιας συγκεκριμένης συχνότητας χτυπήσει αυτά τα διεγερμένα ηλεκτρόνια, τότε αυτά αυθόρμητα θα



επιστρέψουν στη βασική τους κατάσταση εκπέμποντας τη συσσωρευμένη ενέργεια σαν φωτόνιο της ίδιας συχνότητας . Εάν δε η πηγή ενέργειας είναι μονοχρωματική, εκπέμπεται ενεργειακή δέσμη συγκεντρωμένη σε μια στενή στερεά γωνία [9].

Τα laser είναι ασυνεχή και μπορούν να παράγουν μακρύς παλμούς ή βραχύς. Τα μακρόπαλμα laser (normal-mode laser, 10^{-3} sec, $p/a \sim 10^4 \text{W/cm}^2$) έχουν την ακόλουθη δράση:

- Η μαύρη κρούστα απορροφά ενέργεια και φτάνει τη θερμοκρασία των 4000-5000K, έτσι ακολουθεί αυτόματη εξάχνωση των οργανικών συστατικών της κρούστας. Όταν όλο το υλικό της κρούστας εξαχνωθεί η λευκή επιφάνεια αντανακλά την ακτινοβολία και η εκπομπή του laser διακόπτεται.
- Μεγάλο πλεονέκτημα του normal-mode laser είναι ότι δε μεταβάλλει την επιφάνεια του δείγματος ακόμα και όταν επαναλαμβάνονται παλμοί εφαρμοστούν μετά την απομάκρυνση της μαύρης κρούστας.

Τα βραχύπαλμα laser ή Q-μετατροπής (Q-switched laser, 10^{-8} sec, $p/a \sim 10^9 \text{W/cm}^2$) προκαλούν απορρόφηση επαρκούς ενέργειας ακόμα και από ανακλούσες επιφάνειες, έτσι ώστε να φτάσουν τη θερμοκρασία εξάχνωσης ($10^4 - 10^5 \text{K}$). Σε αυτή τη θερμοκρασία ο ατμός ιονίζεται και το θερμαινόμενο πλάσμα μπορεί να αποκτήσει πίεση από 1-100bar, γεγονός που προκαλεί μικρορωγμές στο υπόστρωμα. Το Q-switched laser είναι πολύ αποτελεσματικό στην απομάκρυνση των μαύρων κρουστών, έχει όμως το μειονέκτημα να καταστρέφει το υπόστρωμα. Αντίθετα το normal-mode laser είναι πιο εκλεκτικό σε σχέση με τις ανοιχτόχρωμες και τις σκουρόχρωμες επιφάνειες και επομένως επαναλαμβάνόμενη εφαρμογή σε λευκές επιφάνειες δεν επηρεάζει το λευκό μάρμαρο.

Για την λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων η ακτίνα θα πρέπει να είναι κάθετη στην επιφάνεια και σε απόσταση 20cm από αυτή, γιατί σε μικρότερη απόσταση υπολείμματα μπορεί να λερώσουν τους φακούς του laser ή η υπερβολική συγκέντρωση ενέργειας μπορεί να φθείρει το μάρμαρο.

Η προς καθαρισμό επιφάνεια πρέπει να βρέχεται για δύο λόγους:

- Η υγρασία σκουραίνει την κρούστα οπότε λαμβάνει χώρα υψηλότερη απορρόφηση ακτινοβολίας και η απομάκρυνση των κρουστών καθίσταται πιο αποτελεσματική.
- Εάν ο καθαρισμός εφαρμοστεί σε ξηρή επιφάνεια η επέμβαση παράγει μεγάλες ποσότητες επιβλαβών υπολειμμάτων άνθρακα και αερίων στη ζώνη αναπνοής του χειριστή.

Το laser μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους της πέτρας ή των λευκών και των ανοιχτόχρωμων μαρμάρων αρκεί να είναι μεγάλης αντοχής (σε επιφάνειες με προχωρημένη διάβρωση πρέπει να προηγείται στερέωση) [24], [25]. Αυτή η μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική στα γκρίζα μάρμαρα, γιατί αφήνει μαύρα φωτοστέφανα ή ακόμα και μαύρα στίγματα [9].

Υπάρχουν οι εξής τύποι laser:

- Το Excimer, στο άπω υπεριώδες φάσμα (248nm, 30ns).
- Το Dye, στο ορατό (590nm, 20μs).
- Το Nd: YAG, στο εγγύς υπέρυθρο (1.06μm, 10ns, και 100μs).
- Του CO₂ , στο άπω υπέρυθρο (10.6μm, 100ns) [26].

Συνήθως ο τύπος του laser που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των λίθινων αρχιτεκτονικών επιφανειών είναι το Nd: YAG (Neodimium, Yttrium Aluminium Garnet).

Η εκλεκτικότητα του laser Nd: YAG εξαρτάται από:

- Την πυκνότητα της ενέργειας της ακτινοβολίας (J/cm^2), η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την τιμή της ενέργειας της ακτινοβολίας (W/cm^2).
- Τον τύπο δράσης normal ή Q switched
- Τον αριθμό των παλμών
- Το μήκος κύματος της ακτίνας
- Τη φύση και μορφολογία των επικαθήσεων [27], [20].

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει το laser Nd: YAG είναι τα ακόλουθα:

- Προκαλεί μορφολογικές μεταβολές στην επιφάνεια του υποστρώματος, πρόβλημα που είναι πιο εμφανές με το Q switched laser. Παράλληλα, η ανομοιογένεια του πάχους των μαύρων κρουστών αυξάνει τις πιθανότητες για μορφολογικές μετατροπές του υποστρώματος. Με μείωση όμως του αριθμού των παλμών έχουμε μείωση των μορφολογικών μεταβολών και της ενεργής ακτινοβολίας [27].
- Απομακρύνει τα άλατα μόνο από την επιφάνεια της πέτρας, ενώ η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσονται δίνουν τη δυνατότητα στο να λάβουν χώρα διάφορες αντιδράσεις αλάτων με αποτέλεσμα τη περαιτέρω φθορά στη συνεκτικότητα του λίθου.
- Παρουσιάζει αδυναμία για καθαρισμό μεγάλων επιφανειών με λεπτομέρειες, αφού σε κάθε σημείο απαιτείται καινούργια εστίαση. Έτσι η μέθοδος καθίσταται εξαιρετικά αργή [1], [2]. Βέβαια σημαντικές προσπάθειες για την άρση αυτού του μειονεκτήματος καταβάλλονται στο I.T.E. Κρήτης από τον κ. Φωτάκη και τους συνεργάτες του, με την κατασκευή ενός ρομπότ laser με αυτόματη εστίαση, αυτόματη μετατόπιση και αυτόματη διακοπή με την απόκτηση από την επιφάνεια του επιθυμητού χρώματος [3].
- Έχει υψηλό κόστος.
- Ένα ακόμα πρόβλημα του laser Nd: YAG είναι ότι αφήνει μια κίτρινη χροιά στην καθαρισμένη επιφάνεια (ιδίως όταν καθαρίζονται ελαφρές κρούστες), που κανένας δε ξέρει από που προέρχεται. (πραγματικό χρώμα ή εναπόθεση μικρο-υπολειμμάτων κρούστας από μεταφορά μέσω laser) [21]. Έτσι, ενώ χρειαζόμαστε μεγάλη ενέργεια ακτινοβολίας για την απομάκρυνση των μαύρων κρουστών, αυτό συνεπάγεται μικρότερο διάμετρο του spot της ακτινοβολίας και άρα μικρότερη επικάλυψη. Για μικρότερες ενέργειες όπου έχουμε μεγαλύτερη επικάλυψη, επέρχεται μείωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου όσον αφορά την απομάκρυνση της μαύρης κρούστας και το Nd: YAG αφήνει αυτό το ελαφρό κιτρίνισμα στην επιφάνεια [7].

Είναι προφανές λοιπόν ότι περαιτέρω έρευνα πρέπει να διεξαχθεί, έτσι ώστε να βελτιωθούν η εκλεκτικότητα και οι συνθήκες εφαρμογής του laser [27]. Παρόλα όμως τα προβλήματα που παρουσιάζει, είναι μια από τις μεθόδους που συνιστώνται για τον καθαρισμό μνημείων αξίας (αφού πρώτα γίνει ο απαραίτητος εργαστηριακός έλεγχος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραμέτρους) [3].

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) και η χρήση του σαν μια αυτόνομη on-line διαγνωστική τεχνική. Με την ίδια ακτίνα laser είναι δυνατό να επιτευχθεί ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση της κρούστας, ενώ παράλληλα μελετώντας το ρυθμό απομάκρυνσης της κρούστας (ablation rate) παίρνουμε πληροφορίες για το πάχος και τη μορφολογία της (μεγάλο μειονέκτημα του LIBS είναι το ότι δεν ανιχνεύει το θείο) [28].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μετά από έρευνες αρκετών χρόνων κατά τη μελέτη καθαρισμού της δυτικής ζωοφόρου του Παρθενώνα προτάθηκε σύστημα laser για τον καθαρισμό της με τα κάτωθι χαρακτηριστικά [29]:

Παλμικό σύστημα laser (έως τα 10ns - Q-switched Nd:YAG), με λειτουργία σε δύο μήκη κύματος, το εγγύς υπέρυθρο (1064nm) και στην τρίτη αρμονική του υπεριώδους (355nm). Η παρεχόμενη πυκνότητα ενέργειας πρέπει να κυμαίνεται στα 0.6-2.3J/cm² για τη συχνότητα του υπέρυθρου και στα 0.2-0.45J/cm² για την τρίτη αρμονική του υπεριώδους. Η διάμετρος δε της ακτίνας του laser δεν πρέπει να ξεπερνά τα 4mm. Επίσης, ο σχετικός λόγος των δύο δεσμών (E_{uv}/E_{IR}) μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τον προς καθαρισμό τύπο φθοράς και πρέπει να κυμαίνεται από το 0 έως 1/4 [29].

1.3.4 Μέθοδοι Καθαρισμού Κατά της Βιοδιάβρωσης

Οι μέθοδοι πρόληψης και ελέγχου των βιολογικών παραγόντων μπορούν να είναι άμεσες ή έμμεσες. Οι έμμεσες μέθοδοι διαρκούν περισσότερο και αποτρέπουν ή αναστέλλουν την βιοδιάβρωση, δεν είναι όμως εύκολο να εφαρμοστούν στο ανοιχτό περιβάλλον των μνημείων. Οι άμεσες μέθοδοι είναι βραχυπρόθεσμες και απαιτούν επανάληψη κατά περιοδικά διαστήματα.

Έμμεσες μέθοδοι ⇒ Τροποποίηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων:

- Υγρασία
- Θερμοκρασία
- Φως
- Θρεπτικοί παράγοντες

Μηχανικές (από τον άνθρωπο)

Άμεσες μέθοδοι ⇒ Φυσικές (ακτινοβολία)

Βιολογικές (ανταγωνιστικές)

Χημικές (βιοκτόνα)

Οι κατάλληλες μέθοδοι επιλέγονται κάθε φορά ανάλογα με:

- Τον τύπο της βιολογικής ανάπτυξης
- Τον τύπο και την έκταση της προς καθαρισμό επιφάνειας
- Την κατάσταση σε επίπεδα φθοράς της προς συντήρηση επιφάνειας
- Την καλύτερη αναλογία κόστους-ρίσκου / όφελος

Πολλές φορές η καλύτερη λύση επιτυγχάνεται με το συνδυασμό εφαρμογής έμμεσων και άμεσων μεθόδων [30].

1.3.4.1 Έμμεσες Μέθοδοι

Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος των περιβαλλοντικών παραγόντων στο ανοιχτό περιβάλλον των μνημείων είναι πολύ δύσκολος και συνήθως δεν εφαρμόζεται, παρόλη την μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητά τους. Επιγραμματικά αναφέρουμε:

- Μείωση της υγρασίας με στέγαστρα –καλύμματα. Επιδρά στην ανάπτυξη όλων των μικροοργανισμών, βρύων, υδρόφιλων φυτών, κ.α.
- Μείωση της θερμοκρασίας με στέγαστρα –καλύμματα. Επιδρά σε όλους τους οργανισμούς.
- Μείωση της επίδρασης του ηλιακού φωτός με στέγαστρα –καλύμματα και του τεχνητού με μείωση του χρόνου φωτισμού. Επιδρά στη φωτοσυνθετική χλωρίδα και μικροχλωρίδα.
- Μείωση των θρεπτικών υποστρωμάτων (οργανικών – ανόργανων κρυστών) με επεμβάσεις καθαρισμού. Επιδρά κυρίως στους ετερότροφους μικροοργανισμούς [30].

1.3.4.2 Άμεσες Μέθοδοι

Οι άμεσες μέθοδοι αποσκοπούν στην αποστείρωση της μικροχλωρίδας ή των ανωτέρων φυτών κατά τη διάρκεια της επέμβασης, γι' αυτό η επιφάνεια σε σύντομο χρονικό διάστημα καθίσταται καλό υπόστρωμα για νέα βιολογική ανάπτυξη. Πρόκειται λοιπόν για μια βραχυπρόθεσμη αντιμετώπιση της βιοδιάβρωσης γι' αυτό και οι επεμβάσεις αυτές πρέπει να επαναλαμβάνονται κατά διαστήματα. Οι μέθοδοι αυτές είναι είτε εκλεκτικές (καταστρέφουν τα ζωντανά κύτταρα) είτε μη εκλεκτικές (καταστρέφουν τη ζωντανή ύλη όπως κάθε άλλη οργανική ουσία και άρα θεωρούνται απλές μέθοδοι καθαρισμού) [30].

Μηχανικές μέθοδοι

Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση ανώτερων φυτών, βρύων, λειχήνων, κ.α. με χρήση των προαναφερθέντων εργαλείων.

- Ανάπτυξη έντονης μηχανικής δράσης (ιδίως όταν υπάρχουν ρίζες φυτών μέσα στην τοιχοποιία, καταστροφή κονιαμάτων επιχρισμάτων)
- Απομάκρυνση αυθεντικού υλικού
- Αποτελεσματικές για μικρό χρονικό διάστημα [30].

Φυσικές μέθοδοι

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα μήκη κύματος του υπεριώδους φάσματος (10-380nm) και των μικροκυμάτων (1cm –100μm). Οι υπεριώδεις ακτινοβολίες καταστρέφουν τα νουκλεϊκά οξέα και πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο είναι θανατηφόρα για κάθε είδος οργανισμού. Έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικά για τα άλγη, τις λειχήνες, τα κυανοβακτήρια και τα κυανοφύκη. Μάλιστα τα δύο τελευταία καταπολεμήθηκαν με επιτυχία στη Γερμανία, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα λαμπτήρων 40W υπεριώδους ακτινοβολίας (250nm) το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση 10-20cm από την επιφάνεια και αφέθηκε εκεί να δράσει για μία εβδομάδα [5]. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι απλή και δεν κάνει χρήση τοξικών ουσιών, παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Χαμηλή διεισδυτική ικανότητα (η μικροχλωρίδα στο εσωτερικό της πέτρας δεν εξουδετερώνεται).
- Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι φυσικά χρωματισμένη ή ζωγραφισμένη (frescoes), επιδρά καταστρεπτικά στις χρωστικές.
- Η μέθοδος αυτή πρέπει να εφαρμόζεται με ειδικά προληπτικά μέτρα: οι χειριστές πρέπει να φορούν μάσκα και ειδικά γυαλιά, ενώ δε θα πρέπει να υπάρχουν επισκέπτες.
- Επιπλέον, το σύστημα είναι δύσκολο να μεταφερθεί στο εργοτάξιο και είναι πολύ ακριβό.

Πάντως έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη μέθοδος για ξύλινα και κυτταρινικά υλικά εξαιτίας της βιοκτόνου δράσης της σε μικροοργανισμούς και έντομα.

Η εφαρμογή των μικροκυμάτων έχει εφαρμοστεί πειραματικά στον αγροτικό τομέα για την παρεμπόδιση της ανάπτυξης των ζιζανίων. Η υπερθέρμανση από τα μικροκύματα αναστέλλει τη βλάστηση των σπόρων αλλά ταυτόχρονα προκαλεί φθορές στην πέτρα.

Τέλος συστήματα ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής συχνότητας εφαρμόστηκαν για την απομάκρυνση των πουλιών από τα μνημεία [30].

Βιολογικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές είναι εκλεκτικές και εκμεταλλεύονται τις θρεπτικές ιδιαιτερότητες των μικροοργανισμών και των ανώτερων φυτών, ή το βιολογικό ανταγωνισμό των διαφόρων ειδών για να επιτευχθεί η εξαφάνιση της ανεπιθύμητης ανάπτυξής τους [30].

Χημικές μέθοδοι

Πρόκειται για μη εκλεκτικές μεθόδους, αφού συνήθως χρησιμοποιούνται βιοκτόνα ευρέου φάσματος. Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των χημικών μεθόδων είναι:

- Η μέγιστη ειδική τοξικότητα
- Έμμεσα τοξικολογικά χαρακτηριστικά και επιδράσεις
- Ρύπανση του περιβάλλοντος
- Αλληλεπίδραση με το υπόστρωμα
- Αποτελεσματικότητα με όσο το δυνατόν μικρότερες δόσεις
- Κόστος

Τα πιο διαδεδομένα χημικά που χρησιμοποιούνται χωρίς όμως να λαμβάνονται τα παραπάνω πλήρως υπόψη είναι:

- Ουδέτερες ενώσεις τριαζίνης με μικρή διαλυτότητα στο νερό για την απολύμανση των φυτών
- Ενώσεις του τεταρτοταγούς αμμωνίου (Desogen), ενώσεις χαλκού με αμμωνία και σύμπλοκα χαλκού με υδραζίνη για την καταπολέμηση των αλγών, κυανοφύκων και των χλωροφυκών.
- Υποχλωριώδες λίθιο, Lito 7, Lito 3 (εμπορικές ονομασίες) για τα βρύα και τις λειχήνες.
- Αμπικιλίνη, για τους μύκητες και τους ακτινομύκητες.

Επίσης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι κλασικές μέθοδοι καθαρισμού που εφαρμόζονται διευκολύνουν τη βιολογική δράση. Π.χ. το AB57 μπορεί να αυξήσει τους μικροοργανισμούς, η μέθοδος του ατομικού νερού αυξάνει τα φύκια και ενώ μειώνει τα βακτηρίδια αρχικά, αυτά επιστρέφουν με μεγαλύτερους πληθυσμούς. Οι οργανικοί διαλύτες, η μεθανόλη, η αιθανόλη και η γλυκερίνη, έχει αποδειχθεί ότι βοηθούν την ανάπτυξη των σπόρων και των μανιταριών. Τέλος, ακόμα και μετά από κατεργασία με Desogen (ευρέου φάσματος βιοκτόνο), υπήρξαν περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκαν νέες αποικίες μικροβίων (διαφορετικές από αυτές που υπήρχαν πριν), μετά την εφαρμογή του [31], [30].

1.3.5 Ειδικές Περιπτώσεις Καθαρισμών

Επιφάνειες με προχωρημένη διάβρωση ή πολυχρωμία

Προηγείται στερέωση και μετά καθαρισμός ο οποίος εφαρμόζεται με μηχανικά μέσα, βιολογικό επίθεμα και μικροαμβολή.

Η απομάκρυνση των ανθρακικών κρουστών

Το ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης) είναι διαλυτός ελάχιστα στο νερό (0.014g/l στους 25°C). Αν το νερό της βροχής είναι όξινο, λόγω της παρουσίας του διαλυμένου σε αυτό CO₂ διαλύει τον ασβεστίτη των μαρμάρων ή των ιζηματογενών ασβεστόλιθων, σύμφωνα με την αντίδραση:



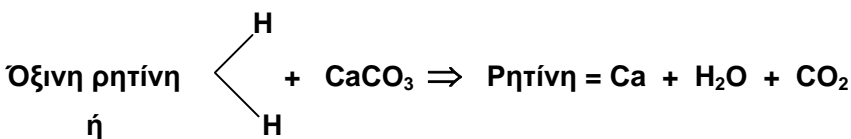
Αν η παραπάνω αντίδραση προχωρά από τα δεξιά στα αριστερά, λαμβάνει χώρα εναπόθεση CaCO₃ (s), μια αντίδραση που συμβαίνει και στη φύση π.χ. σχηματισμός σταλαχτιτών, κρουστών κ.α. Το προς ποία κατεύθυνση θα προχωρήσει η αντίδραση επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την πίεση και άλλους παράγοντες. Η ίδια αντίδραση πραγματοποιείται σε ανθρακικά πετρώματα κτιρίων (στις ψηλότερα εκτεθειμένες επιφάνειες του κτιρίου λαμβάνει χώρα η διάλυση, ενώ στις χαμηλότερα εκτεθειμένες επιφάνειες του η εναπόθεση CaCO₃ (s) με αποτέλεσμα το σχηματισμό κρούστας), καθώς και σε σιντριβάνια. Στην τελευταία περίπτωση, μεγάλου πάχους κρούστες (3-4cm) δημιουργούνται από ανθρακικά που εναποτίθενται εξαιτίας της συνεχόμενης ροής του τρεχούμενου νερού, η οποία διαλύει τον ασβεστόλιθο των αγαλμάτων ή άλλων επιφανειών του σιντριβανιού, ή / και από εναπόθεση CaCO₃ από ιδιαίτερα σκληρό νερό.

Οι σχηματιζόμενες κρούστες είναι πολύ συμπαγείς και μπορούν να καλύψουν τελείως μεγάλες επιφάνειες, κρύβοντας όλα τα χρώματα των μαρμάρων και καταστρέφοντας τα ανάγλυφα. Αυτές λοιπόν οι κρούστες πρέπει να απομακρυνθούν με χρήση κατάλληλων μεθόδων, γιατί στο παρελθόν λανθασμένα χρησιμοποιήθηκαν:

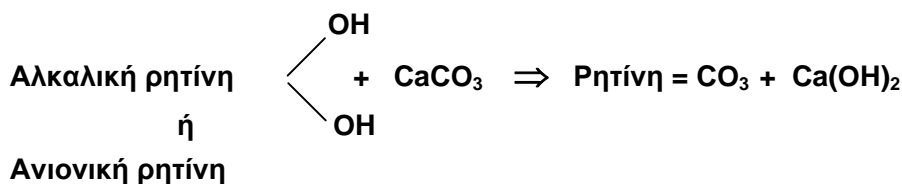
- Οξέα όπως το HCl, που πράγματι απομάκρυναν αυτές τις κρούστες, αλλά διάβρωσαν τα στρώματα της πέτρας κάτω από αυτές.
- Χειρουργικά νυστέρια, τροχοί κ.α. εργαλεία εκτριβής, τα οποία φθείρανε την πέτρα με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξήσουν την τραχύτητα της άρα και την ειδική της επιφάνεια με άμεση συνέπεια την αύξηση της επιδεκτικότητας της στη φθορά.

Η μέθοδος που έχει πρόσφατα προταθεί για την απομάκρυνση αυτών των σκληρών ανθρακικών κρουστών και η οποία είναι ελεγχόμενη και μη επιβλαβής είναι αυτή των **ιοντοανταλλακτικών ρητινών**.

Αυτές οι ρητίνες αποτελούνται από συνθετικά πολυμερή που περιέχουν όξινες ή αλκαλικές δραστικά ομάδες οι οποίες έχουν την ικανότητα να επιφέρουν μια διπλή ιοντική ανταλλαγή ανάμεσα στα ευκίνητα ιόντα της ρητίνης και στα ανιόντα/κατιόντα της ανθρακικής κρούστας. Η μέθοδος εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας ένα υδατικό μέσο, ενώ η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η ακόλουθη:



Κατιοντική ρητίνη



Η διάλυση της κρούστας είναι επαρκώς αργή, έτσι ώστε να επιτρέπεται ο έλεγχος της επέμβασης και να αποφεύγεται η διάλυση της επιφάνειας της πέτρας κάτω από την κρούστα όσο κρατά η δράση της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης. Σε μερικές περιπτώσεις, όπου υπάρχουν ποσότητες γύψου οι ανιονικές ρητίνες, που ανταλλάσσουν OH, έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικές. Η επιλογή του τύπου της ρητίνης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί είναι πολύ σημαντική:

- οι ρητίνες αυτές θα πρέπει να έχουν επαρκώς μικρή κοκκομετρία
- να επιτρέπουν στην πάστα να στέκεται σε κάθετες επιφάνειες
- να μην προκαλούν τη δημιουργία παραπροϊόντων που ίσως αποδειχθούν επιβλαβή για την προς καθαρισμό επιφάνεια.

Η πάστα πρέπει να καλύπτεται για να αποφεύγεται η εξάτμιση του νερού και έτσι να επιμηκύνεται η διαλυτική δράση (κρούστες με πάχος μεγαλύτερο του 1mm πρέπει να παραμείνουν σε επαφή με τη ρητίνη για 4-5 ημέρες). Άρα για κρούστες με μεγάλο πάχος είναι προτιμητέο να απομακρύνεται το μεγαλύτερο μέρος τους μηχανικά και η χρήση των ιοντοανταλλακτικών ρητινών να γίνεται μόνο για την απομάκρυνση της τελευταίας τους στοιβάδας [5],[18], [16], [17], [1].

Καθαρισμός κηλίδων σκουριάς

Για τον καθαρισμό κηλίδων σκουριάς, οι οποίες δημιουργούνται από τα οξειδία του σιδήρου και έχουν χρώμα κίτρινο – καφέ χρώμα, οι μέθοδοι που προτείνονται είναι οι εξής:

- Υδατικό διάλυμα κορεσμένο σε φωσφορικό αμμώνιο $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, του οποίου το pH διορθώνεται στο 6 με προσθήκη φωσφορικού οξέος. Πρόκειται για μια αποτελεσματική μέθοδο, της οποίας όμως ο χρόνος εφαρμογής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρός για να αποφευχθεί η διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου. Γι' αυτό το λόγο συνιστάται η διόρθωση του pH του παραπάνω διαλύματος σε 7-8.
- Διαλύματα οξαλικού αμμωνίου ή σαλικυλικού αμμωνίου, τα οποία όμως δεν είναι πολύ αποτελεσματικά. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του σαλικυλικού αμμωνίου η πέτρα λεκιάζεται από σύμπλοκο κόκκινου χρώματος.
- Υδατικό διάλυμα όξινου φθοριούχου αμμωνίου (NH_4HF_2) 1-5%. Κατά την εφαρμογή αυτού του διαλύματος θα πρέπει να λαμβάνονται οι ίδιες προφυλάξεις με αυτές που λαμβάνονται κατά την εφαρμογή του διαλύματος των φωσφορικών. Επίσης το διάλυμα αυτό πρέπει να

εφαρμόζεται με εξαιρετική προσοχή, επειδή καταστρέφει τα τζάμια των παραθύρων και τα κεραμικά πλακάκια.

- Διαλύματα θειοθειικού νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ή θειώδους οξέος (H_2SO_3) για τη διάσπαση των οξειδίων του σιδήρου, όπου μετά ακολουθεί προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου για τη δημιουργία των υδροξειδίων του σιδήρου. Αυτά είναι ουσίες που απομακρύνονται εύκολα με αντιδραστήρια που τις απομονώνουν ή τις συμπλοκοποιούν. Τέτοια αντιδραστήρια είναι το κιτρικό, το τρυγικό ή το θειγλυκολικό οξύ και το E.D.T.A. (ίσως αυτό έχει και την πιο αποτελεσματική δράση), σε αμμωνιακά διαλύματα.

Η αποτελεσματικότητα των παραπάνω διαλυμάτων αυξάνεται αν αυτά θερμανθούν και αν από την προς καθαρισμό επιφάνεια έχουν ήδη αφαιρεθεί λίπη ή έλαια. Επίσης για να περιοριστεί κατά το δυνατόν η διάχυση των κηλίδων σκουριάς, οι πάστες που θα εφαρμοστούν πρέπει να έχουν διπλάσιο μέγεθος από την ίδια την κηλίδα, το οποίο στις επόμενες εφαρμογές πρέπει βαθμιαία να μειώνεται [5], [7].

Καθαρισμός κηλίδων από άλατα χαλκού

Πρόκειται για πράσινες κηλίδες που σχηματίζονται από ενώσεις του χαλκού. Διαλυτά άλατα χαλκού όπως τα χλωριούχα και τα θειικά δημιουργούνται κυρίως από τη διάβρωση μπρούτζινων αγαλμάτων ή μπρούτζινων ανάγλυφων και αφού αποπλυθούν μεταφέρονται στην πέτρα με το νερό της βροχής, όπου κατανέμονται κατά μήκος των ακμών των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Εκεί εναποτίθενται με τη μορφή ανθρακικών αλάτων του χαλκού (αζουρίτης $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, μαλαχίτης $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) ή θεικών αλάτων του χαλκού (μπροχαντίτης $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση τους είναι:

- Το E.D.T.A.
- Υδατικό διάλυμα του σουλφαμινικού οξέος ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$), 10% .
- Υδατικό διάλυμα του ανθρακικού αμμωνίου (NH_4)₂CO₃, 20% .
- Ηλεκτρόλυση με χαμηλής εντάσεως ρεύμα, το οποίο για μια εβδομάδα διέρχεται από διάλυμα ανθρακικού αμμωνίου (NH_4)₂CO₃ 5% (μέσα στο οποίο βρίσκεται βυθισμένο το προς καθαρισμό αντικείμενο) και άνοδο πλάτινας και κάθοδο ανοξειδωτού χάλυβα, (μέθοδος που χρησιμοποιείται σε μικρά και εύκολα στη μετακίνηση αντικείμενα ή αγάλματα) [5], [7].

Καθαρισμός κηλίδων από οργανικές ουσίες

Κατά την προηγούμενη δεκαετία ήταν συνηθισμένο φαινόμενο η ανεύρεση λιπών, ελαίων και κεριών, υπολείμματα παλαιότερων επεμβάσεων, στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες μνημείων. Επίσης πιθανή είναι η εύρεση ασφαλτούχων κηλίδων ή των περιβόητων graffiti (συνθετικά ακρυλικά χρώματα ή κυτταρινικές ρητίνες). Η απομάκρυνση αυτών των ουσιών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή παστών με κατάλληλους διαλύτες:

- Έλαια και λίπη με ελαφρά αλκαλικούς διαλύτες όπως η βουτυλαμίνη ή η τριαιθανολαμίνη, ενώ τα κεριά με χλωριούχους διαλύτες.

- Οι ασφαλούχες κηλίδες απομακρύνονται αποτελεσματικά με αρωματικούς διαλύτες όπως το τολουόλιο και το ξυλόλιο.
- Τα graffiti απομακρύνονται με αλειφατικούς διαλύτες (συνήθως χλωριομένους), ακετόνη, χλωριούχο μεθυλένιο και αρωματικούς διαλύτες όπως το τολουόλιο και το ξυλόλιο. Αν τα graffiti έχουν αρχίσει να καταστρέφονται εξαιτίας παρατεταμένης έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία του ηλίου, καλό θα ήταν να εφαρμόσουμε χλωριούχο μεθύλιο και άλλους διαλύτες σε πάστα μέθυλοκυτταρίνης, την οποία θα απλώσουμε με πινέλο. Αφού τα παραπάνω δράσουν για μια ώρα ή και περισσότερο τα απομακρύνουμε με βαμβάκι ποτισμένο σε ακετόνη [5], [7], [9],[10].

Καθαρισμός με αναστροφή του γύψου

Η ειδική αυτή περίπτωση καθαρισμού πρέπει να λαμβάνει χώρα όταν στις επιφάνειες του γύψου διατηρούνται οι λεπτομέρειες των αγαλμάτων και των ανάγλυφων οι οποίες έχουν εξαλειφθεί από την επιφάνεια του μαρμάρου. Ο καθαρισμός με αναστροφή του γύψου, εφαρμόζεται με τις δυο μεθόδους που αναφέρονται πιο κάτω:

1. Με διάλυμα K_2CO_3 κορεσμένου σε $CaCO_3$

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται διάλυμα K_2CO_3 κορεσμένο σε $CaCO_3$, έτσι ώστε να μη διαλυθεί ο γύψος και να αρχίσει αμέσως η αποβολή κρυστάλλων $CaCO_3$ (η διαδικασία είναι γρήγορη αφού το διάλυμα είναι ήδη κορεσμένο σε $CaCO_3$) Επομένως οι κρύσταλλοι του $CaCO_3$ είναι μικροί και προσανατολισμένοι και άρα μεγάλης αντοχής και σκληρότητας (75kp/mm^2). Επίσης επειδή ο μοριακός όγκος του $CaCO_3$ είναι μικρότερος από εκείνον του γύψου, τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν κατακαθίσει χαλαρώνουν και με φύσημα αέρα απομακρύνονται. Μετά την πλήρη αναστροφή, η οποία πιστοποιείται με την μέθοδο των υγρών κρυστάλλων, η επιφάνεια μπορεί να πλυθεί για να απομακρυνθούν το K_2SO_4 και οι υπόλοιποι ρύποι. Ο καθαρισμός είναι συνάρτηση του αριθμού των ψεκασμών με διάλυμα K_2CO_3 κορεσμένο σε $CaCO_3$ [3], [32], [33], [34], [35]. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί με επιτυχία από τον κ. Σκουλικίδη και τους συνεργάτες του, στα μνημεία της Ακροπόλεως.

2. Με αναερόβια θειοβακτήρια

Τα αναερόβια βακτήρια (*Desulphovibrio desulphuricans*) μεταβολίζουν το θείο του γύψου κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παράγονται ανθρακικά, τα οποία σχηματίζουν με το εναπομείναν ασβέστιο το $CaCO_3$. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο σχηματισμός H_2S σαν παραπροϊόν, το οποίο μπορεί να αντιδράσει με τον ατμοσφαιρικό Fe και να πρόκυψη το μαύρο ίζημα FeS [36]. Επίσης οι κρύσταλλοι του παραγόμενου $CaCO_3$ έχουν μικρή μηχανική αντοχή και σκληρότητα επειδή δεν είναι προσανατολισμένοι [3].

Εξαγωγή αλάτων

Με εφαρμογή των ειδικών ροφητικών παστών (σηπιόλιθος, ατταπουλγίτης), ή παστών κυτταρίνης ή χαρτοπολτού, με νερό απιονισμένο. Οι πάστες πρέπει να εφαρμόζονται πολλές

φορές με μικρές ποσότητες νερού κάθε φορά, ενώ ανάμεσα σε κάθε εφαρμογή θα πρέπει να παρεμβάλλεται ένα ικανοποιητικό διάστημα στεγνώματος [19].

Σε τοιχοποιίες με εξανθήσεις, για την αποφυγή επαναδιαλυτοποίησης των αλάτων θα πρέπει πρώτα αυτά να απομακρύνονται μηχανικά με μια μαλακή βούρτσα και μετά να εφαρμόζονται οι πάστες [5].

1.4 Μάρμαρο - Γενικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά

1.4.1 Γενικά για το μάρμαρο

Μάρμαρο ονομάζεται το πέτρωμα που έχει προέλθει από μεταμόρφωση ανθρακικών ιζημάτων (ασβεστόλιθων ή δολομιτών). Πρόκειται για πέτρωμα ολοκρυσταλλικό με αναπτυγμένη ή όχι σχιστότητα. Τη μάζα του διασχίζουν συνήθως φλέβες κάθε χρώματος και σχήματος. Το κύριο ορυκτολογικό συστατικό του μαρμάρου είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3), ορυκτό το οποίο κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό κρυσταλλογραφικό σύστημα και σχηματίζει κρυστάλλους διαφόρων μεγεθών που προκαλούν ανακλάσεις του φωτός (μαρμαρυγή). Ο ασβεστίτης έχει σκληρότητα 3 κατά Mohs, και ειδικό βάρος $2,7 \text{ g/cm}^3$. Μπορεί να περιέχει επίσης δολομίτη $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, ο οποίος κρυσταλλώνεται επίσης στο τριγωνικό σύστημα. Ο δολομίτης είναι σκληρότερο (3,5-4 κατά Mohs) και βαρύτερο ($2,9 \text{ g/cm}^3$) ορυκτό από τον ασβεστίτη και η παρουσία του καθιστά τη κατεργασία του μαρμάρου δυσχερή και επιταχύνει τις διαδικασίες φθοράς του. Εκτός του ασβεστίτη και δολομίτη συναντάμε και άλλα ορυκτά, όπως χαλαζία, ανθρακούχες ενώσεις καθώς και εμποτισμούς μετάλλων με τη μορφή φλεβών που προσδίδουν τις διάφορες αποχρώσεις στη μάζα του μαρμάρου και επηρεάζουν τις φυσικομηχανικές του ιδιότητες.

Όταν το μάρμαρο δεν περιέχει σημαντικά ποσοστά άλλων στοιχείων, έχει λευκό χρώμα. Αντέχει καλά στους εξωτερικούς παράγοντες (ψύχος, θέρμανση, υγρασία) και η διάρκεια της ζωής του είναι μεγάλη. Αυτό διαπιστώνεται από την κατάσταση στην οποία βρίσκονται σήμερα τα μαρμάρινα έργα των αρχαίων. Καταστρέφεται όμως εύκολα από τη φωτιά, όπως οι κοινοί ασβεστόλιθοι γιατί περίπου στους 900°C , αποσυντίθεται το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σε CaO και CO_2 .

Στην Ελλάδα εντοπίζεται στις κρυσταλλοσχιστώδεις γεωτεκτονικές ζώνες της Ροδόπης, Πελαγονικής, Αττικοκυκλαδικής, Πελοποννήσου, Κρήτης, με πιο γνωστά μάρμαρα το μάρμαρο της Πάρου, της Νάξου, το Πεντελικό, του Μαραθώνα και της Αγίας Μαρίνας, της Δόμβραινας κοντά στη Θήβα, της Δράμας, της Ερέτριας και της Καρύστου στην Εύβοια, της Μάνης κ.ά.. [37], [38]

1.4.2 Κρυσταλλικές φάσεις του CaCO_3

Το ανθρακικό ασβέστιο βρίσκεται στη φύση σε τρεις κρυσταλλικές φάσεις που έχουν ίδια χημική σύσταση αλλά διαφορετική κρυσταλλική δομή και φυσικοχημικές ιδιότητες. Αυτές οι τρεις κρυσταλλικές φάσεις είναι οι εξής:

Ασβεστίτης: Αποτελεί τη θερμοδυναμικά σταθερότερη φάση του ανθρακικού ασβεστίου σε συνήθεις θερμοκρασίες και πιέσεις ($P=1 \text{ bar}$, $T=25^\circ\text{C}$) [39]. Κρυσταλλώνεται σε τριγωνική υποδιαίρεση του εξαγωνικού συστήματος και αποτελεί το κύριο συστατικό των ασβεστιτικών μαρμάρων [40].



Αραγωνίτης: Παρουσιάζεται ασταθές σε συνήθεις επιφανειακές θερμοκρασίες και πιέσεις, ενώ σε υψηλότερες πιέσεις είναι σταθερό, αλλά όχι σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί στους 400°C, ο αραγωνίτης μετατρέπεται αυθόρμητα σε ασβεστίτη εφόσον δεν υπάρχει αύξηση πίεσης [41]. Παρατηρείται σε περιβάλλοντα πλούσια σε μαγνήσιο και σε υψηλές τιμές πίεσης (>3Kbar). Κρυσταλλώνεται σε ορθορομβικό σύστημα [40]. Στη φύση βρίσκεται σε σκελετούς θαλάσσιων οργανισμών όπως σε γαστρόποδα, οστρακόδερμα κ.α.

Βατερίτης: Είναι η θερμοδυναμικά ασταθέστερη φάση του CaCO₃ ενώ συναντάται σπάνια. Κρυσταλλώνεται σε εξαγωνικό σύστημα. Στη φύση απαντάται σε κελύφη μαλακίων και σε ωλίθους ψαριών.

Όσον αφορά στο δολομιτικό μάρμαρο αυτό είναι ένα ιζηματώδης ορυκτό που οφείλει το όνομα του στο ορυκτό δολομίτη λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σ'αυτό (>40%). Δημιουργείται από τον ασβεστόλιθο κάτω από συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών παράλληλα με τη δειξοδυσση σ'αυτόν διαφόρων ορυκτών κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του. Υπάρχουν τρεις σημαντικές κατηγορίες δολομιτικών μαρμάρων [42]:

Τραβερνίτης

Σερπεντίτης

Όνυχας

Γενικότερα τα δολομιτικά μάρμαρα μπορεί να περιέχουν προσμείξεις όπως είναι ο πλωγοπίτης και ο τρεμολίτης αλλά και κάποιες άλλες ενώσεις όπως SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃. Ανάλογα με την περιεκτικότητα των προσμείξεων το δολομιτικό μάρμαρο συναντάται σε διάφορα χρώματα όπως άσπρο, γκρι, πράσινο και κοκκινωπό. Ανήκει σε διαφορετική κρυσταλλική κατηγορία από ότι ο ασβεστίτης αφού οι κρύσταλλοί του παρουσιάζονται πιο επιμηκυνμένοι από τους αντίστοιχους του ασβεστίτη [40]. Παρουσιάζει εξαγωνική, ρομβοεδρική κρυσταλλική δομή και το πορώδες του χαρακτηρίζεται υψηλό.

1.4.3. Ιστορικά στοιχεία

Στην Αρχαία Ελλάδα, αρχικά με την λέξη "μάρμαρος" εννοούσαν τον βραχώδη όγκο και αργότερα από το 400 π.Χ. χρησιμοποιήθηκε η λέξη με τη σημερινή της έννοια. Στα κλασικά χρόνια για να δηλώσουν το μάρμαρο χρησιμοποιούσαν την έκφραση «ο λίθος» ή «η λίθος». Έτσι είχαμε λίθο λευκό, πεντελικό, υμήττιο, πάριο κλπ.

Από το 400 π.Χ. χρησιμοποιούταν περισσότερο το λευκό μάρμαρο. Στους ελληνοιστικούς όμως χρόνους, διαδόθηκε η χρήση του χρωματιστού που μπορούσαν να το προμηθεύονται ευκολότερα από την Ασία και την Αφρική. Το μάρμαρο αυτό επικράτησε κυρίως στη Ρωμαϊκή και παλαιοχριστιανική περίοδο.

Στη Γλυπτική το μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε από πολύ νωρίς. Ήδη από το 5000 π.Χ., στη Μέση Νεολιθική εποχή έχουμε μαρμάρια γυναικεία ειδώλια, ενώ είναι γνωστή η σειρά των περίφημων κυκλαδικών που ακολούθησαν. Αντίθετα, στην αρχιτεκτονική η χρήση του άρχισε πολύ αργότερα και στην αρχή ήταν περιορισμένη. Μόλις τον 6ο αιώνα π.Χ. εμφανίζεται σε συνδυασμό με τον πωρόλιθο.

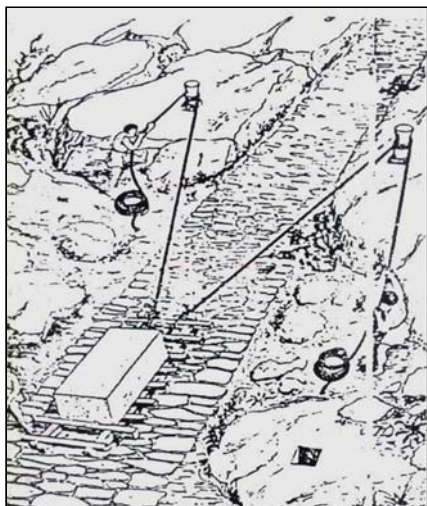
Τον 5ο και 4ο αιώνα το μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε περισσότερο. Τα λατομεία των Κυκλάδων προμήθευαν ήδη άφθονη την πρώτη ύλη. Η Πάρος είχε λευκό ομοιογενές

μάρμαρο με χονδρούς κόκκους, εύκολο στη λάξευση, που ήταν γνωστό στους αρχαίους ως Παρία ή Πάριος λίθος αλλά ακόμη και ως λυχνεύς ή λυχνίτης, γιατί εξορυσσόταν σε υπόγειες στοές με το φως των λυχναριών [43].

Άσπρο μάρμαρο, λίγο κατώτερο από το Παριανό είχε η Νάξος. Οι συγγραφείς δεν αναφέρουν το μάρμαρο της Νάξου. Έχουμε όμως την πληροφορία του Πausανία ότι πρώτος ο Νάξιος Βύζης βρήκε την "πρίσιν" του μαρμάρου και έφτιαξε μαρμάρινα κεραμίδια για τις στέγες των ναών, με πρότυπο τα πήλινα που χρησιμοποιούσαν μέχρι τότε. Από τα ευρήματα των ανασκαφών συμπεραίνουμε ότι το Ναξιώτικο μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο μισό του 5ου αιώνα τόσο στη γλυπτική όσο και στην αρχιτεκτονική, όχι μόνο στη Νάξο αλλά και στην Ολυμπία, στην Αλίφειρα στο ναό της Αθηνάς, ακόμη και στην Καλυδωνία.

Λατομεία μαρμάρου υπήρχαν και σε άλλες περιοχές όπως στην Τήνο, την Ανάφη, τη Θάσο. Και η Αττική είχε αρκετά λατομεία μαρμάρου που η λειτουργία τους άρχισε κυρίως μετά τους περσικούς πολέμους. Καλύτερο ήταν το άσπρο μάρμαρο της Πεντέλης, μετριότερο του Υμηττού το "άνωτερο υμήττιο" καθώς και ένα σικτό και εύθρυπτο μάρμαρο από την Αγγιλέζα κοντά στο Σούνιο.

Υπήρχαν και λατομεία εγχρώμων μαρμάρων στην αρχαία Ελλάδα. Εκείνοι όμως που τα εκμεταλλεύτηκαν περισσότερο ήταν οι Ρωμαίοι και ύστερα οι Χριστιανοί. Ο πρασινωπός "κροκεάτης λίθος", το κοκκινωπό μάρμαρο του Ταινάρου, ο Θεσσαλικός ατράκιος λίθος και ο Ευβοϊκός με τις πράσινες φλέβες, το μαύρο μάρμαρο της Χίου, το πολύχρωμο Σκυριανό και ο πράσινος οφείτης της Τήνου, ήταν γνωστά αλλά σκληρά μάρμαρα και γι' αυτό τα απέφευγαν στην αρχαιότητα [43].



Μεταφορά όγκου μαρμάρου

Αρχαίες μαρτυρίες για τον τρόπο εξόρυξης δεν υπάρχουν, αλλά από πληροφορίες που αντλούμε από τα ίδια τα λατομεία που διατηρήθηκαν φαίνεται ότι δε διαφέρει και πολύ από τον σημερινό. Τα λατομεία διακρίνονταν σε κάθετα επιφανειακά και υπόγεια οριζόντια όπως ήταν της Πάρου. Στα υπαίθρια λατομεία η απόσπαση των όγκων γινόταν ως εξής: Σχημάτιζαν πρώτα με πριόνι και άμμο κατακόρυφα και οριζόντια αυλάκια και ύστερα άνοιγαν σ' αυτά υποδοχές για σφήνες από σίδηρο ή ξερό ξύλο, που όταν βρεχόταν διογκωνόταν και βοηθούσε στην απόσπαση του μαρμάρου [43].

Ύστερα φαίνεται ότι ακολουθούσε επί τούτου η πρώτη λάξευση η "πελέκησις" και οι ογκόλιθοι έπαιρναν την αρχική τους μορφή, ενώ ταυτόχρονα έφευγε και το

περιττό βάρος και γινόταν ευκολότερη η μεταφορά. Κιονόκρανα, κολώνες και αγάλματα μισοτελειωμένα στο χώρο των λατομείων, ενισχύουν αυτή την υπόθεση.

Η μεταφορά των ογκολίθων από το λατομείο στο εργαστήριο, που λεγόταν από τους αρχαίους λιθαγωγία ή κομιδή δεν ήταν πάντα εύκολη, γιατί πολύ συχνά ήταν μεγάλη η απόσταση και το έδαφος ορεινό και ανώμαλο, άλλοτε πάλι μεσολαβούσε θάλασσα. Συνήθως για μικρές και οριζόντιες αποστάσεις και για όγκους όχι μεγάλους,

χρησιμοποιούσαν φάλαγγες ή ξύλινους κυλίνδρους (κατρακύλια). Από τις πλαγιές των βουνών και γενικότερα από κεκλιμένα επίπεδα η "καταγωγή" των μαρμάρων όπως την ονομάζει αρχαία επιγραφή, γινόταν πάνω σε ξύλινες σχάρες με τη βοήθεια μοχλών. Στις σχάρες αυτές ήταν δεμένη η μία άκρη σχοινίων που ξετυλίγονταν σιγά-σιγά από σταθερούς πασσάλους ή δέντρα για να τις συγκρατούν από την κατολίσθηση (β.λ. παραπάνω εικόνα). Για μεγαλύτερες αποστάσεις με μικρή κλίση χρησιμοποιούσαν τετράτροχες άμαξες που τις έσυραν ζώα. Ακόμη φαίνεται ότι συνηθιζόταν η μεταφορά με ζεύγη τροχών που τοποθετούσαν κατά μήκος των ογκολίθων, το ένα πίσω από το άλλο, όπως μεταφέρονται δηλαδή και σήμερα ξύλινες κολώνες και σιδηροδοκοί. Για τη θαλάσσια μεταφορά, που στοίχιζε πολύ φθηνότερα χρησιμοποιούσαν "φορηγίδες λιθαγωγούς" και εκεί στοίβαζαν τα μικρότερα κομμάτια, ενώ τα μεγάλα για να είναι ελαφρότερα τα κρεμούσαν στο νερό από ένα ξύλινο δοκάρι που στηριζόταν σε δύο φορηγίδες (αμφίπρυμνες) [43].

1.4.4. Το Πεντελικό μάρμαρο

Με τις ονομασίες Bianco di Pendeli, Bianco statuaire, Marmo greco fino είναι γνωστά στην παγκόσμια αγορά τα περίφημα λευκά μάρμαρα της Πεντέλης, που άρχισαν να εξορύσσονται κατά την αρχαιότητα στη νοτιοδυτική πλευρά του όρους, που σήμερα ονομάζεται Κοιλιάδα της Σπηλιάς. Από τα πεντελικά μάρμαρα έχουν κατασκευαστεί ο Παρθενώνας, το Ερεχθείο, τα Προπύλαια της Ακρόπολης, το Θησαείο, ο ναός του Ολυμπίου Διός και πολλοί άλλοι ναοί και μνημεία των Αθηνών και άλλων αρχαίων πόλεων της Ελλάδας.

Σήμερα, στην περιοχή των αρχαίων λατομείων και σε υψόμετρο 700 μέτρων διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση ένα από τα αρχαία μέτωπα εξόρυξης. Η νεότερη εξόρυξη στην Πεντέλη άρχισε το 1836, επί της βασιλείας του Όθωνα και συνεχίστηκε μέχρι το 1976 σε διάφορες θέσεις της νότιας πλευράς του Πεντελικού όρους. Κατά τους νεότερους χρόνους, κατασκευάστηκαν με το Πεντελικό μάρμαρο η Εθνική Βιβλιοθήκη, η Ακαδημία Αθηνών, το Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο και πολλά άλλα σημαντικά κτίρια. Από το 1976 η εξόρυξη πεντελικού μαρμάρου συνεχίζεται μόνο στη βόρεια πλευρά της Πεντέλης, στην περιοχή του Διονύσου, την αθέατη από το λεκανοπέδιο των Αθηνών [44].

Τα πεντελικά μάρμαρα παρουσιάζουν σχιστότητα, ιδιότητα που διευκολύνει την εξόρυξη των ογκολίθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Έχουν λεπτό υποσακχαροειδή ιστό και μεγάλη συνεκτικότητα, φυσιολογική αντοχή στη θραύση και στιλβώνονται εύκολα. Είναι χρώματος λευκού, μεγάλης καθαρότητας, χωρίς διάστιξη και διεσπαρμένες φλέβες.

Η ορυκτολογική και χημική σύσταση και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα του Ι.Γ.ΜΕ.

Το Πεντελικό μάρμαρο χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη διακοσμητική και αρχιτεκτονική και είναι κατάλληλο και για εξωτερικές χρήσεις, όταν δε διαθέτει τον κατάλληλο ιστό και χρωματισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη γλυπτική.

Πίνακας ορυκτολογικής και χημικής σύστασης, καθώς και φυσικομηχανικών ιδιοτήτων (Ι.Γ.ΜΕ)

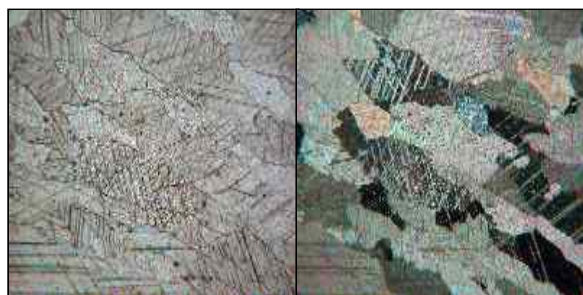
ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%)					ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (βάρος %)									ΦΥΣΙΚΕΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	ΧΑΛΑΖΙΑΣ	ΜΟΣΧΟΒΙΤΗ	ΣΕΡΙΚΙΤΗΣ	ΧΛΩΡΙΤΗΣ	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	CO ₂	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΛΙΠΩ. κ.β. %	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (kg/m ³)
98	0,5	0,5	0,5	0,5	54,8	1,55	1,10	0,14	0,2	0,09	0,04	0,02	43,05	2717	0,11	1136

Αυτός ο τύπος του πεντελικού μαρμάρου χρησιμοποιήθηκε στην αρχιτεκτονική, ιδιαίτερα όμως στη γλυπτική. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι κατά την κλασική περίοδο, οι γλύπτες χρησιμοποιούσαν το πεντελικό μάρμαρο για την κατασκευή των γυμνών μερών των αγαλμάτων. Το Pentelique Statuaire είναι μάρμαρο εξαιρετικής ποιότητας και μοναδικό στο είδος του. Τα μόνα μάρμαρα με τα οποία θα μπορούσε να συγκριθεί, είναι εκείνα της Carrara και της Versillia, χωρίς όμως να έχει προσδιοριστεί ένας συγκεκριμένος τρόπος διάκρισης μεταξύ τους [44].

Ο τύπος greco fino είχε τις περισσότερες εφαρμογές στην αρχιτεκτονική των Ρωμαίων και στην ελληνική γλυπτική. Είναι ένα μάρμαρο κατάλευκο και λεπτοκοκκώδες (διαφορά από το μεσοκοκκώδες μάρμαρο της Πάρου). Με το μάρμαρο αυτό έχει κατασκευαστεί ένας Ερμής, με το κεφάλι του νεαρού Αύγουστου, που βρίσκεται στο μουσείο CHIAROMONTI του Βατικανού, στη Ρώμη. Τα ελληνικά μάρμαρα είναι γνωστά σε όλο τον κόσμο γιατί έχουν ταυτιστεί με τα αριστουργήματα της γλυπτικής και της αρχιτεκτονικής της αρχαίας Ελλάδας, με έργα τέχνης μοναδικά και ανεπανάληπτα, που συνεχίζουν μέσα στους αιώνες να αποσπούν τον παγκόσμιο θαυμασμό.

1.4.5. Ιδιότητες του μαρμάρου

α) Ορυκτολογικές και πετρογραφικές ιδιότητες



Ο ιστός του μαρμάρου είναι γρανοβλαστικός, δηλαδή όλοι οι κόκκοι του έχουν περίπου ίδιο μέγεθος. Τα μάρμαρα διακρίνονται σε λεπτοκοκκώδη (διάμετρος κρυστάλλου ασβεστίτη $d=0.01-0.05\text{mm}$), μεσοκοκκώδη ($d = 0.6-2 \text{ mm}$) και χονδροκοκκώδη ($d = 2-6 \text{ mm}$). [38]

Αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι ασβεστίτη σε μάρμαρο (// και X Nicols)

Το κύριο συστατικό του μαρμάρου είναι ο ασβεστίτης. Οι ιδιότητες του αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα [38]:

Πίνακας Ιδιοτήτων Ασβεστίτη

ΧΡΩΜΑ	Άχρωμο, ενίοτε θολό
ΑΝΑΓΛΥΦΟ	Μέτριο αρνητικό έως υψηλό θετικό. Μεταβάλλεται έντονα με τη στροφή της τράπεζας.
ΣΧΗΜΑ-ΜΟΡΦΗ	Συνήθως σε αλλοτριόμορφους κόκκους. Ενίοτε σε ρομβοεδρικές τομές (σε ιζηματογενή).
ΣΧΙΣΜΟΣ	Τέλειος ρομβοεδρικός (10-11) (γωνία σχισμού 75ο). Σε μερικές τομές φαίνονται τα ίχνη τριών σχισμών.
ΧΡΩΜΑΤΑ ΠΟΛΩΣΗΣ	Πάρα πολύ υψηλά (ξέθωρα ρόδινα και πράσινα 4ης τάξης και άνω).
ΚΑΤΑΣΒΕΣΗ	Συμμετρική ως προς το σχισμό
ΟΠΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ	Μονάξων (-). Ενίοτε διάξων όταν πιεστεί. Η κωνοσκοπική εικόνα έχει λεπτές ισόγυρες και πολλούς ισόχρωμους δακτύλιους. Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης διπλοθλαστικότητας ακόμα και τομές κάθετες σε οπτικό άξονα δείχνουν φωτεινά χρώματα πόλωσης.
ΔΙΔΥΜΙΕΣ	Πολυδυμία κατά (01-12) και απλή κατά (0001)
ΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ	Εύκολα διαλύεται από όξινα νερά και αντικαθίσταται από χαλαζία, χαλκηδόνιο, σπάλλιο, Mn- και Fe-οξειδία σχηματίζοντας ψευδομορφώσεις. Μετατρέπεται σε δολομίτη. Ο ίδιος αποτελεί προϊόν αλλοίωσης των πλαγιοκλάστων και Ca-Mg-Fe ορυκτών.
ΕΜΦΑΝΙΣΗ	Από τα πιο διαδεδομένα μη πυριτικά ορυκτά. Σε ιζηματογενή πετρώματα (ασβεστόλιθοι) ως βασικό συστατικό, συνδετικό υλικό ή απολίθωμα. Σε μεταμορφωμένα (μάρμαρα). Σε πυριγενή ως υδροθερμικό ορυκτό σε κοιλάτητες και ως δευτερογενές ορυκτό. Σε καρμπονатиές ως πρωτογενές ορυκτό.

Εκτός από τον ασβεστίτη και τον δολομίτη, τα ορυκτά που κυρίως συμμετέχουν στην σύσταση του μαρμάρου είναι [45]:

Μοσχοβίτης, που αποτελεί και το συνηθέστερο πυριτικό συστατικό του Πεντελικού μαρμάρου. Τα συνήθως αργυρόχρωμα και σπανιότερα ανοιχτοτεφροπράσινα φυλλάρια είτε είναι μεμονωμένα και διάσπαρτα εντός του πετρώματος, είτε συγκεντρώνονται κατά μήκος ρωγμών, ραφών ή στρωσιγενών επιφανειών σε φακοειδή συσσωματώματα [45].

Χλωρίτης: Τα πεντελικά μάρμαρα, κυρίως τα ανοιχτόχρωμα, είναι πλούσια σε χλωρίτη που συνήθως συναντάται μαζί με τον μοσχοβίτη [45].

Χαλαζίας: Συναντάται σπάνια, αλλά σε μερικές ζώνες μαρμάρου που βρίσκονται σε επαφή με σχιστόλιθους, ο χαλαζίας είναι αφθονότερος και μπορεί να σχηματίζει λεπτά φλεβίδια ή φλέβες μαζί με διάφορα άλλα πυριτικά ορυκτά [45].

Σιδηροπυρίτης και οξειδία του σιδήρου που μπορεί να βρίσκονται υπό την μορφή κόκκων μέσα στο μάρμαρο [45].

Τα παραπάνω ορυκτολογικά συστατικά, όταν εμπεριέχονται σε μεγάλα ποσοστά, επηρεάζουν τις ιδιότητες και το χρώμα του μαρμάρου. Τα φυλλώδη ορυκτά (μοσχοβίτης, χλωρίτης) αυξάνουν τη σχιστότητα του πετρώματος όταν τα φυλλάριά τους διατάσσονται παράλληλα προς τη διεύθυνση επιμήκυνσης των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Ο χαλαζίας αυξάνει την αντοχή στην αποσάθρωση ενώ οι σιδηροπυρίτες μειώνουν την αντοχή [45].

β) Φυσικομηχανικές ιδιότητες

Από τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων εξαρτάται η ικανότητα του να αντιστέκεται στη μόλυνση του περιβάλλοντος και σε μηχανικές καταπονήσεις. Σαν γενικό συμπέρασμα θα αναφέρουμε ότι τα μονόμετα και λεπτόκοκκα πετρώματα (όπως το Πεντελικό μάρμαρο) παρουσιάζουν καλύτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των συγκεκριμένων ιδιοτήτων γίνεται σε εξειδικευμένα εργαστήρια βάσει των διεθνών προδιαγραφών που αφορούν στα φυσικά διακοσμητικά πετρώματα. Οι ιδιότητες αυτές είναι [46]:

1. Φαινόμενο ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος είναι ο λόγος του βάρους του πετρώματος προς τον όγκο του. Επειδή όμως τα πετρώματα έχουν πόρους, κοιλότητες και κενά, υπάρχουν 2 μετρούμενοι όγκοι: ο φαινόμενος, που είναι ο όγκος του πετρώματος μαζί με τα κενά και ο πραγματικός, που είναι χωρίς τα κενά. Αυτό που χαρακτηρίζει τα πετρώματα είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος και εκφράζεται σε Kgr/m^3 . Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι μια ιδιότητα που πρέπει να είναι γνωστή για όλων των ειδών τις κατασκευές, αφού με βάση αυτή και το πάχος των πλακών του μαρμάρου προσδιορίζουμε το βάρος κάθε τετραγωνικού μέτρου και επομένως το πόσο επιβαρύνεται η όλη κατασκευή. Η μέση τιμή του φαινόμενου ειδικού βάρους του λευκού μαρμάρου Πεντέλης είναι $\rho=2710 \text{ Kgr/m}^3$ [46].

2. Υδατοαπορρόφηση - Συντελεστής Υδατοαπορρόφησης

Είναι η ιδιότητα του πετρώματος να πληρώνεται με νερό. Συγκεκριμένα, η υδατοαπορροφητικότητα είναι η διαφορά της μάζας κορεσμένου με νερό δοκιμίου και ξηρού δοκιμίου. Όταν εκφράζεται επί % ονομάζεται συντελεστής υδατοαπορρόφησης. Η συγκεκριμένη ιδιότητα καθορίζει την καταλληλότητα ενός πετρώματος για εξωτερικές χρήσεις, όπου αυτό είναι εκτεθειμένο σε υγρές συνθήκες. Θεωρείται, όμως, σημαντική ιδιότητα και στην περίπτωση των εσωτερικών χρήσεων, όπου το μάρμαρο καλύπτει μεγάλους χώρους με μεγάλη συγκέντρωση ανθρώπων, όπου απαιτείται συχνός καθαρισμός με υγρά. Η μέση τιμή του συντελεστή υδατοαπορρόφησης για το λευκό μάρμαρο Πεντέλης είναι: $I_c=0.06\%$ [46].

3. Μέτρο ελαστικότητας

Είναι ο λόγος της τάσης που ασκείται σε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο πετρώματος προς την αξονική του παραμόρφωση. Από δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί τα μάρμαρα παρουσιάζουν μέτρο ελαστικότητας $E=650-700\text{tn/m}^2$ [46].

4. Αντοχή στην θλίψη

Σαν θλιπτική αντοχή ενός πετρώματος ορίζεται ο λόγος του συνολικού φορτίου που ασκείται σε ένα δοκίμιο προς το εμβαδόν της διατομής του. Εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της σύστασης και της δομής του. Η αντοχή στην θλίψη θεωρείται μια πολύ σημαντική ιδιότητα για την αξιολόγηση των μαρμάρων για χρήση τους σε διάφορες κατασκευές. Ειδικά για την χρήση των πετρωμάτων σε εξωτερικούς χώρους και χώρες με έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι καλό να ελέγχεται η αντοχή σε θλίψη. Η μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής για λευκό μάρμαρο Πεντέλης είναι: $C=1091\text{ Kg/cm}^2$ [42].

5. Αντοχή στον εφελκυσμό

Η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος ισοδυναμεί με τη μέγιστη τάση που ασκείται στο κάτω μέρος της πλάκας, όταν αυτή υφίσταται καμπτική καταπόνηση. Η αντοχή στην κάμψη των πετρωμάτων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της σύστασης και της δομής τους. Αυτή η ιδιότητα επηρεάζεται σημαντικά από τη στρώση ή τη σχιστότητα των πετρωμάτων. Η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής για το λευκό Πεντελικό μάρμαρο είναι $T=263\text{ Kg/cm}^2$ [46].

6. Αντοχή στη φθορά από τριβή

Η ιδιότητα αυτή εκφράζει την αντίσταση των πετρωμάτων στην τριβή. Σαν φθορά ορίζεται η προοδευτική απώλεια υλικού από την επιφάνεια ενός σταθερού σώματος που προκαλείται από μηχανικές αιτίες. Η αντοχή στη φθορά από τριβή εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογική σύσταση και επομένως τη σκληρότητα του πετρώματος και μερικώς από την τριβή και τον πιθανό βαθμό εξαλλοίωσής του. Η μέση τιμή της αντοχής στη φθορά από τριβή για το λευκό Πεντελικό μάρμαρο είναι $F=4,33\text{mm}$ [46].

7. Άλλες φυσικομηχανικές ιδιότητες

Άλλες φυσικομηχανικές ιδιότητες είναι η αντοχή στην κρούση, η μικροσκληρότητα Knoop, και η αντοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές [46].

1.5 Μελέτη της επίδρασης περιβαλλοντικών παραγόντων στις μαρμάρινες επιφάνειες

1.5.1 Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές

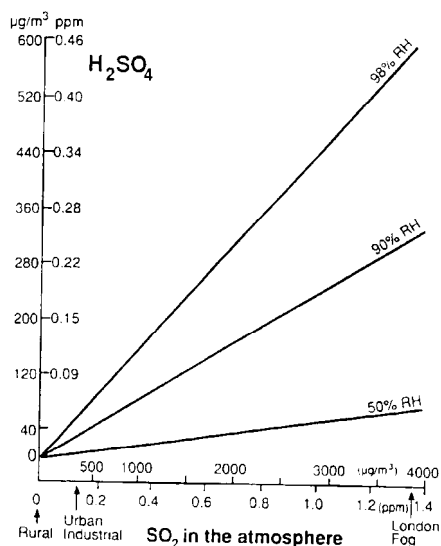
Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επιφέρει μια σειρά από σημαντικά προβλήματα αποσάθρωσης και αλλοίωσης των μαρμάρινων επιφανειών. Ως ατμοσφαιρικός ρυπαντής θεωρείται κάθε συστατικό της ατμόσφαιρας σε περιεκτικότητα ιχνών, προερχόμενο από ανθρωπογενείς ή μη πηγές, το οποίο μπορεί να επιφέρει βλαπτικές συνέπειες στα δομικά υλικά (και στην ανθρώπινη υγεία). Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι διακρίνονται σε πρωτογενείς (αιωρούμενα σωματίδια, SO₂, CO, NO, H/C) και δευτερογενείς που προέρχονται από αντίδραση μεταξύ πρωτογενών ρύπων και ατμοσφαιρικών ενώσεων (O₃, NO₂, PAN κ.α.) [9]. Το SO₂ στην αστική ατμόσφαιρα προέρχεται κυρίως από τη βαριά βιομηχανία και τη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης (Μεταλλουργία Ni, Cu, Zn, καύση κάρβουνου). Το διοξείδιο του θείου είναι δυνατόν να αντιδράσει στην ατμόσφαιρα με το οξυγόνο, σχηματίζοντας SO₃ σύμφωνα με την αντίδραση:



Η αντίδραση αυτή απαιτεί πέντε μέρες για να πραγματοποιηθεί. Το SO₃ το οποίο είναι υγροσκοπικό, αντιδρά με το νερό σχηματίζοντας θειικό οξύ σύμφωνα με την αντίδραση:

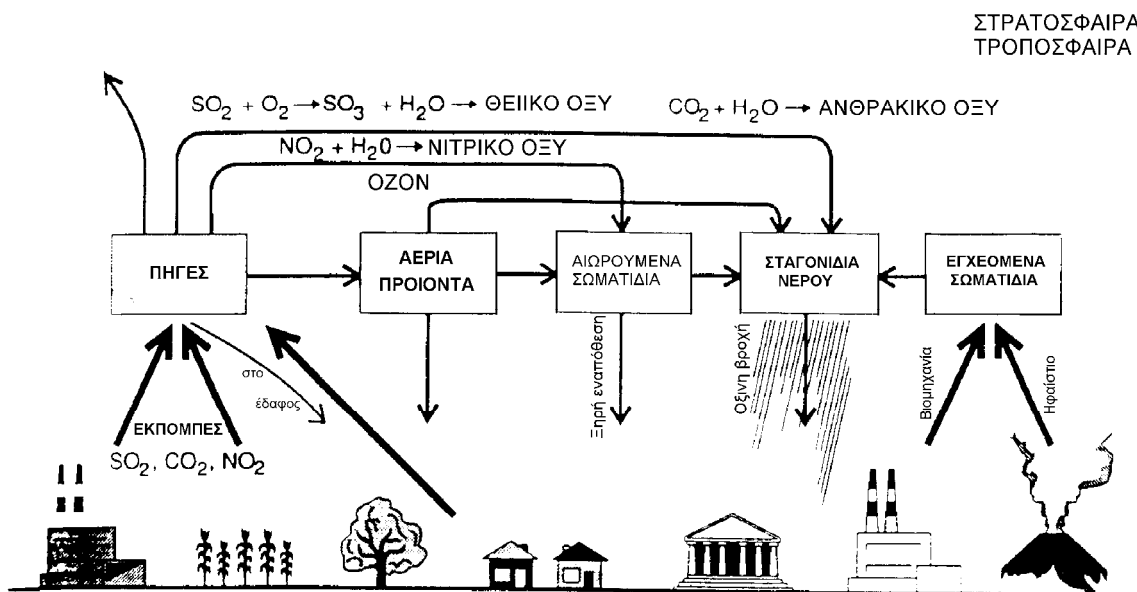


Το θειικό οξύ είναι πολύ όξινο, διαβρωτικό για τα δομικά υλικά, επιβλαβές για τη χλωρίδα και την ανθρώπινη υγεία, ενώ επηρεάζει και το κλίμα. Αποτελεί βασικό συστατικό της όξινης βροχής. Στην παρακάτω εικόνα παριστάνεται γραφικά η συγκέντρωση θειικού οξέος στην ατμόσφαιρα ως αερόλυμα, σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης του SO₂ και της σχετικής υγρασίας [47].



Εικ. 1.5.1: Ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης του H₂SO₄ στην ατμόσφαιρα σε συνάρτηση με την συγκέντρωση του SO₂ και τη RH [47]

Το NO σχηματίζεται κατά τη θέρμανση του αέρα, οπότε και αντιδρούν μεταξύ τους το άζωτο και το οξυγόνο. Το μονοξείδιο του αζώτου δεν είναι επιθετικό και επιβλαβές ούτε στα υλικά ούτε στην ανθρώπινη υγεία. Αντιδρώντας, όμως, με το οξυγόνο σχηματίζει το NO₂ το οποίο είναι καρκινογόνο, τοξικό, εξαιρετικά διαβρωτικό για υλικά, καταστροφικό για τη χλωρίδα. Οι κυριότερες πηγές διοξειδίου του αζώτου στην αστική ατμόσφαιρα είναι οι βιομηχανίες, η κεντρική θέρμανση και κυρίως η χρήση μεταφορικών μέσων [47]. Το NO₂, τους χειμερινούς μήνες, μέσω μιας σειράς αντιδράσεων, οδηγεί στο σχηματισμό νιτρικού οξέος (βασικό συστατικό της όξινης βροχής, μαζί με θειικό οξύ και ανθρακικό οξύ). Το καλοκαίρι, υπό την έντονη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, συμβάλλει στην παραγωγή όζοντος και οργανικών διαβρωτικών προϊόντων (π.χ. PAN). Το O₃ είναι ένας ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας που επιταχύνει τους ρυθμούς διάβρωσης σε μια σειρά υλικών [47]. Όσον αφορά στην όξινη βροχή, τα αέρια της ατμόσφαιρας που συνεισφέρουν στην παραγωγή των οξέων που την χαρακτηρίζουν (H₂SO₄ και HNO₃) προέρχονται από φυσικές πηγές (π.χ. ηφαιστεια, αποσύνθεση οργανικής ύλης) και από ανθρωπογενείς πηγές (π.χ. αυτοκίνητα και καυστήρες). Οι κύριοι ρυπαντές (SO₂ και NO_x) εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, όπου σταδιακά επικάθονται στη γη ως σκόνη με υψηλή οξύτητα (ξηρή απόθεση) ή σε συνδυασμό με υδρατμούς επιστρέφουν στη γη ως όξινη βροχή [47]. Στην παρακάτω εικόνα παριστάνεται γραφικά ο κύκλος ζωής των ρυπαντών.



Εικ. 1.5.2: Η πορεία των φυσικών και ανθρωπογενών ρυπαντών [47]

Η όξινη βροχή αποτελεί μία από τις σοβαρότερες μορφές ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όχι μόνο σε βιομηχανικές περιοχές, καθώς οι ρύποι είναι δυνατό να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή τους. Είναι εξαιρετικά επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία, για τη χλωρίδα (ελαττώνει το ρυθμό ανάπτυξης και την ικανότητα καρποφορίας και ανθοφορίας), για τα δομικά υλικά κτιρίων και μνημείων (ειδικά το μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος και ο χάλυβας επηρεάζονται δυσμενώς), ενώ προκαλεί οξίνιση ποταμών, λιμνών και εδαφών (με αποτέλεσμα την καταστροφή του πλαγκτόν, την εξαφάνιση υδρόβιων οργανισμών και την

πρόκληση διαταραχών στη διαδικασία διατροφής των φυτών) [47], [9]. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην Ελλάδα, μολονότι οι εκπομπές SO₂ είναι υψηλές, η σύσταση του εδάφους, οι άνεμοι και το ανάγλυφο συντελούν ώστε η όξινη βροχή να μην είναι τόσο επικίνδυνη όσο σε άλλες χώρες του κόσμου (Η.Π.Α., Γερμανία, Πολωνία, Σουηδία, Νορβηγία κ.α.).

1.5.2 Η Ρύπανση στην Αθήνα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα στοιχεία που προκύπτουν για την ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα, από μελέτες και μετρήσεις ρύπων που διενεργεί το ΥΠΕΧΩΔΕ. Σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε κατά το έτος 2000 [48] και συνεκτιμώντας τα συμπεράσματα προηγούμενων χρόνων, ισχύουν τα εξής:

- Διαχρονικά η ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή της Αθήνας παρουσιάζει πτωτική τάση ή τάση σταθεροποίησης. Η τάση αυτή πρέπει να αποδοθεί στη λήψη ορισμένων μέτρων αντιρρύπανσης, που αφορούν στις κινητές πηγές (σταδιακή αντικατάσταση του στόλου των παλαιών αυτοκινήτων με αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας, εφαρμογή του θεσμού της κάρτας ελέγχου καυσαερίων, βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων με μείωση της περιεκτικότητας τους σε θείο) και γενικά στα μέτρα που προβλέπονται από το σχέδιο ΑΤΤΙΚΗ SOS. Το 2000 η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα κυμάνθηκε σε ποσοστό 97% των ημερών του χρόνου από χαμηλά ως μέτρια επίπεδα. Πρόβλημα εξακολουθεί να υπάρχει όσον αφορά στο όζον. Ο ρύπος αυτός εμφανίζει μεγάλες τιμές λόγω αυξημένης ηλιοφάνειας της περιοχής, με αποτέλεσμα στην περιφέρεια της πόλης (και κυρίως στα βόρεια προάστια της) να εμφανίζονται το καλοκαίρι και στη διάρκεια των μεσημβρινών και πρώτων απογευματινών ωρών, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει το μέγιστο, αυξημένες τιμές όζοντος.
- Μεγαλύτερες τιμές SO₂, CO, NO₂ και καπνού παρουσιάζονται στο κέντρο της πόλης. Για τον καπνό και το διοξείδιο του αζώτου υπάρχει υπέρβαση των εθνικών ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας σε ένα από τους σταθμούς του κέντρου της πόλης (Πατησίων).
- Για το SO₂, τον καπνό και το CO, μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται τους χειμερινούς μήνες. Αυτό οφείλεται για μεν το SO₂ και τον καπνό στη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης, για δε το CO, στη μεγαλύτερη κυκλοφορία που παρατηρείται στην πόλη τους χειμερινούς μήνες και στις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας των μηχανών των αυτοκινήτων.
- Στη διάρκεια του Σαββατοκύριακου, οι τιμές όλων των ρύπων εκτός του όζοντος παρουσιάζουν μικρή μείωση.
- Στη διάρκεια του 24ώρου, οι αιχμές ρύπανσης παρουσιάζονται για το SO₂ και το CO το πρωί 8 – 10 και το βράδυ 9 – 11 (επειδή κατά τις ώρες αυτές επικρατούν ευνοϊκές για τη συσσώρευση των ατμοσφαιρικών ρύπων μετεωρολογικές συνθήκες και επειδή συμπίπτουν χρονικά οι ώρες λειτουργίας της κεντρικής θέρμανσης και οι αιχμές κυκλοφορίας), για το NO₂ το πρωί 10 – 12 (επειδή παρουσιάζεται χρονική υστέρηση που απαιτείται για το σχηματισμό του) και για το όζον τις πρώτες μεσημβρινές ώρες.
- Μεγάλες τιμές ρύπανσης παρουσιάζονται με διευθύνσεις ανέμου του νότιου και δυτικού τομέα, με ταχύτητα ανέμου μικρότερη από 5 m/sec και όταν επικρατούν συνθήκες θερμοκρασιακής αναστροφής.

1.5.3 Επίδραση των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο μάρμαρο

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επιφέρει μια σειρά από σημαντικά προβλήματα αποσάθρωσης και αλλοίωσης των μαρμάρινων επιφανειών. Οι ρύποι με τις πλέον επιβλαβείς επιδράσεις σε μαρμάρινες επιφάνειες είναι το SO₂ (κυρίως) και το CO₂. Παρακάτω εξετάζεται η επίδραση ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο μάρμαρο.

Επίδραση SO₂

Το διοξείδιο του θείου οδηγεί στη γυψοποίηση των μαρμάρινων επιφανειών. Παρουσία υγρασίας το SO₂ αντιδρά με τον ασβεστίτη σχηματίζοντας γύψο σύμφωνα με την αντίδραση:



Απουσία υγρασίας, εν ξηρώ, η γυψοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου περιγράφεται από τη θεωρία του Wagner (μοντέλο ηλεκτροχημικού δυναμικού). Τα μοντέλα και οι μηχανισμοί διάβρωσης του μαρμάρου από το SO₂ παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο 1.6. Ο σχηματισμός γύψου στην επιφάνεια του ασβεστίτη, έχει τα εξής αποτελέσματα [9]:

- Ο γύψος είναι περισσότερο διαλυτός από τον ασβεστίτη με αποτέλεσμα να διαλύεται με τη βροχή, με αντίστοιχη εξαφάνιση των γλυπτών λεπτομερειών του αυθεντικού μαρμάρινου έργου.
- Ο γύψος καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με το αυθεντικό κρυσταλλικό πλέγμα του ασβεστίτη, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του μνημείου να καθίσταται περισσότερη επιδεκτική στη φθορά και περισσότερο υγροσκοπική.
- Ο γύψος αποτελεί, όπως θα δούμε στη συνέχεια, συστατικό επιβλαβών κρουστών που δημιουργούνται στην επιφάνεια του μαρμάρου.
- Ο γύψος διαλύεται κατά τη διάρκεια υγρών περιόδων και μεταφέρεται σε βάθος, στο πορώδες σύστημα του λίθου προκαλώντας σημαντική φθορά.
- Η συνεχής αποφλοίωση της φθαρμένης επιφάνειας αποκαλύπτει συνεχώς νέα επιφάνεια, που εκτίθεται με τη σειρά της στη κυκλική διαδικασία γυψοποίησης / αποφλοίωσης, με αποτέλεσμα την εξέλιξη του φαινομένου της φθοράς σε βάθος.

Επίδραση CO₂

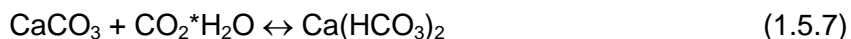
Το νερό της βροχής οξινισμένο από το CO₂ της ατμόσφαιρας προκαλεί τη μετατροπή του ασβεστιτικού υλικού στο διαλυτό Ca(HCO₃)₂. Αρχικά το διοξείδιο του άνθρακα του αέρα διαλύεται στο νερό της βροχής σχηματίζοντας CO₂*H₂O ως αποτέλεσμα της αντίδρασης:



Το φυσικά διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂*H₂O) στο νερό διαχωρίζεται στα ιόντα [HCO₃⁻] και [CO₃²⁻], οι συγκεντρώσεις των οποίων ελέγχονται από τη συγκέντρωση του [CO₂*H₂O] και τη συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Το ασθενώς όξινο διάλυμα που σχηματίζεται με τον παραπάνω τρόπο από τη διάλυση του CO₂ στο νερό, είναι σε θέση να διαλύει το ανθρακικό ασβέστιο ασβεστόλιθων και μαρμάρων διότι σχηματίζει το περισσότερο διαλυτό Ca(HCO₃)₂:

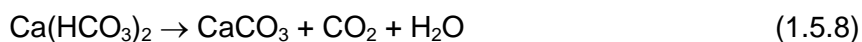


Το όξινο ανθρακικό ασβέστιο είναι περίπου 100 φορές πιο διαλυτό από το CaCO₃, ενώ η ποσότητα του που διαλύεται από το νερό της βροχής εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του νερού και από τη μερική πίεση του CO₂ στον αέρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας του CO₂ που διαλύεται φυσικά στο νερό [9].

Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η αυξανόμενη συγκέντρωση του CO₂ στον ατμοσφαιρικό αέρα μετατοπίζει τη θέση της χημικής ισορροπίας των αντιδράσεων (4 – 7) προς τα δεξιά, δηλαδή παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας όξινου ανθρακικού ασβεστίου [9].

Σύμφωνα με τον Winkler [47] η ταχύτητα διάλυσης των ασβεστόλιθων και των μαρμάρων εξαρτάται από παράγοντες όπως η μερική πίεση του CO₂, η διαλυτότητα του ορυκτού, η κίνηση του διαλύματος, η θερμοκρασία του νερού, οι ακαθαρσίες της πέτρας, η κρυσταλλική δομή του ορυκτού κ.α.

Με αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος, το φυσικά διαλυμένο στο νερό CO₂ τείνει να εξατμιστεί, με αποτέλεσμα το Ca(HCO₃)₂ να μετασχηματίζεται σε ανακρυσταλλωμένο CaCO₃, σύμφωνα με την αντίδραση:



Προκαλείται επομένως απόθεση ανακρυσταλλωμένου δευτερογενούς ασβεστίτη, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερους κρυστάλλους από τον αυθεντικό και πιο πορώδη δομή, με αποτέλεσμα την αύξηση του πορώδους της επιφάνειας και την ευκολότερη διείσδυση όξινων διαλυμάτων και διαλυτών αλάτων (αύξηση της επιδεκτικότητας σε φθορά).

Συμπερασματικά το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό όξινης ανθρακικής κρούστας, η οποία παρότι είναι επιφανειακά σκληρή, συνοδεύεται από χαλάρωση των υποκείμενων στρωμάτων του αυθεντικού υλικού, λόγω της κίνησης ιόντων ασβεστίου από τα εσωτερικά στρώματα προς τα έξω [9].

Επίδραση CO (μονοξειδίου του άνθρακα)

Το μονοξείδιο του άνθρακα παρίσταται στην ατμόσφαιρα σε υπολογίσιμες ποσότητες συγκρινόμενο με τους υπόλοιπους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές. Υπολογίσιμες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα παράγονται σε όλες τις αντιδράσεις κάυσεων. Πιο συγκεκριμένα, το CO παράγεται όταν το παρουσιαζόμενο οξυγόνο κατά την αντίδραση της καύσης είναι λιγότερο από το στοιχειομετρικά απαιτούμενο.



Η ταχύτητα της αντίδρασης (9) είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή της αντίδρασης (10) και συνεπώς το CO παρουσιάζεται σαν ενδιάμεσο προϊόν της διαδικασίας παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα ή όταν το οξυγόνο δεν επαρκεί για την πλήρη οξείφωση. Το CO δεν προκαλεί απευθείας φθορά στα δομικά υλικά, αλλά έμμεσα αφού αποτελεί την πηγή παραγωγής του CO₂ στην ατμόσφαιρα [9].

Επίδραση NO_x (οξειδία του αζώτου)

Τα οξειδία του αζώτου οδηγούν στο σχηματισμό νιτρικού οξέος που είναι λιγότερο διαβρωτικό από το θειικό οξύ σε ασβεστολιθικά πετρώματα. Το νιτρικό οξύ είναι συστατικό της όξινης βροχής. Όταν ένα μαρμάρινο μνημείο βρέχεται από όξινη βροχή, προκαλείται απομείωση των επιφανειών, απώλεια βάρους και εξαλλοίωση των χαρακτηριστικών του μνημείου [9]. Στην περίπτωση του μαρμάρου η πιο επιβλαβής δράση των NO_x είναι ότι δρουν καταλυτικά στην οξείδωση του διοξειδίου του θείου και στο σχηματισμό θειικού οξέος, που οδηγεί με τη σειρά του στο σχηματισμό γύψου [9].

Επίδραση όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων

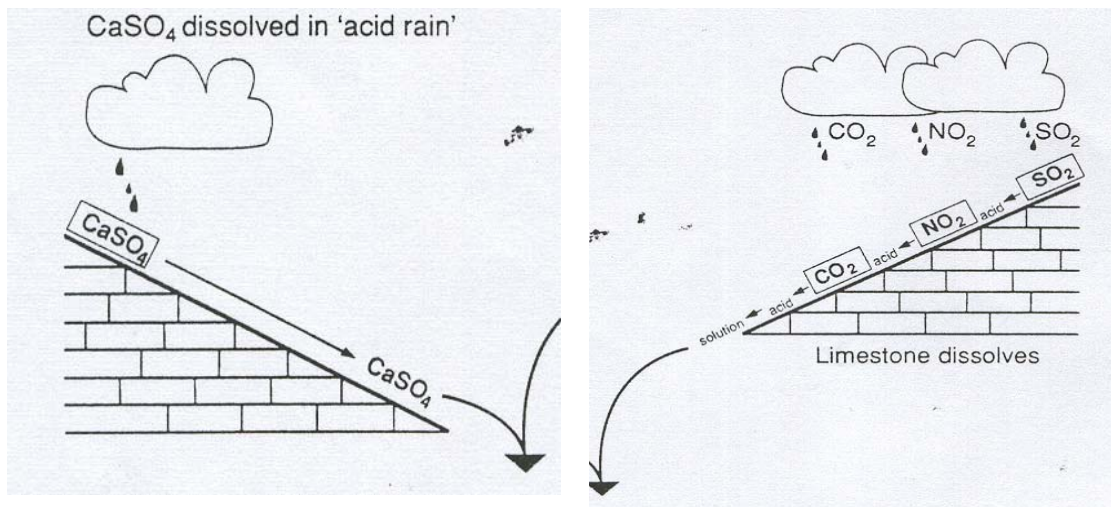
Το O₃ δεν επιδρά άμεσα στις μαρμάρινες επιφάνειες, δρα όμως καταλυτικά σε πληθώρα ατμοσφαιρικών αντιδράσεων αφού είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό αντιδραστήριο [9]. Τα αιωρούμενα σωματίδια (γαιώδη αιωρήματα, τσιμέντο, τέφρα, σωματίδια C, Cu, Cd, Cr, Fe, Mn, Pb, Zn, Ni, Vn κ.α.) προκαλούν αισθητική επιβάρυνση και δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για να λάβουν χώρα οξειδωτικές αντιδράσεις στις οποίες δρουν καταλυτικά σωματίδια άνθρακα και μέταλλα που εμπεριέχονται στη "σκόνη" [9].

Συνεργιστική δράση περιβαλλοντικών παραγόντων

Θα πρέπει να τονιστεί ότι καθένας από τους παραπάνω παράγοντες δεν επιδρά μεμονωμένα επί της επιφανείας του μαρμάρου, αλλά κατά την έκθεση ενός μαρμάρινου μνημείου στην ρυπασμένη ατμόσφαιρα της πόλης επικρατούν συνδυασμοί και αλληλεπιδράσεις παραγόντων διάβρωσης.

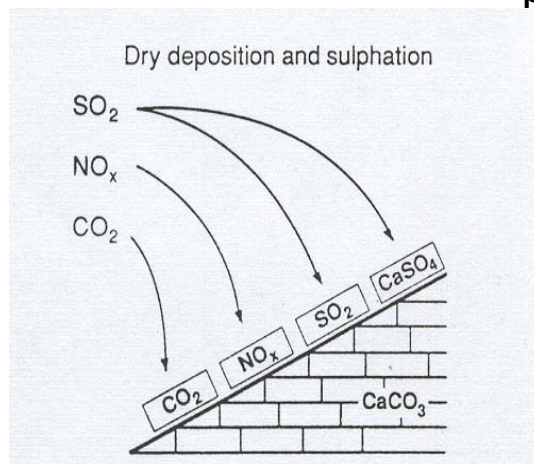
Παράδειγμα συνεργιστικής δράσης περιβαλλοντικών παραγόντων είναι η επίδραση της όξινης βροχής, η οποία προκαλεί διάλυση του δομικού υλικού (πέτρα) και γυψοποίηση. Η δράση της όξινης βροχής δεν περιορίζεται μόνο στη διάλυση του επιφανειακού στρώματος της πέτρας αλλά και των συνδέσμων μεταξύ των κόκκων του υλικού, έτσι οι κόκκοι αποσαθρώνονται. Ο ρυθμός απώλειας κόκκων λόγω αποσάθρωσης είναι διπλάσιος αυτού λόγω διάλυσης για το μάρμαρο και τριπλάσιος για τον ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός κρούστας γύψου συνδέεται με την παρουσία νερού σε μεγαλύτερες ποσότητες από αυτές που απορροφώνται τοπικά μέσω συμπύκνωσης υδρατμών ή ομίχλης. Η ποσότητα νερού που χρειάζεται όμως είναι μικρότερη από αυτήν της ελεύθερης ροής της βροχής. Ιδιαίτερη σημασία έχει και επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, της σχετικής υγρασίας, του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με τους αέριους ρυπαντές. Επίσης οι κύκλοι ύγρυνσης / ξήρανσης, η δράση του παγετού και τα θερμοκρασιακά σοκ είναι επιβλαβείς παράγοντες και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη [9].

Συνοπτικά διαγράμματα επίδρασης των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο μάρμαρο [47]



(α) Διάλυση γύψου από όξινη βροχή

(β) Διάλυση ασβεστίτη από όξινη βροχή



(γ) Ξηρή απόθεση ρύπων και γυψοποίηση

Εικ. 1.5.3: Συνοπτικά διαγράμματα επίδρασης των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στο μάρμαρο [47]

1.6 Μοντέλα και μηχανισμοί διάβρωσης μαρμάρινων επιφανειών

1.6.1 Εισαγωγή

Από το προηγούμενο κεφάλαιο κατέστη φανερό ότι οι πλέον καταστροφικοί παράγοντες διάβρωσης των μαρμάρων σε μνημεία και ιστορικά κτίρια, είναι η διάλυση του ασβεστίτη από την όξινη βροχή σε επιφάνειες εκτεθειμένες στο νερό της βροχής, καθώς και η επίδραση του διοξειδίου του θείου και ο σχηματισμός γύψου και κρουστών επί της επιφανείας σε επιφάνειες προστατευμένες από τη βροχή.

Στη ρυπασμένη ατμόσφαιρα, το SO₂ αντιδρά με τον ασβεστίτη (CaCO₃) του μαρμάρου και το τελικό προϊόν των αντιδράσεων είναι ο γύψος (CaSO₄·2H₂O). Ο γύψος αναπτύσσει κρούστες σε επιφάνειες προφυλαγμένες από το νερό της βροχής, είναι περισσότερο διαλυτός από τον ασβεστίτη και επιταχύνει τις διαδικασίες διάβρωσης σε περιοχές εκτεθειμένες στη βροχή και καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από το αυθεντικό πλέγμα (CaCO₃).

Αναπόφευκτα οι παραπάνω διαδικασίες επιφέρουν σημαντικές παραμορφώσεις και μεταβολές στην εμφάνιση και τη δομή των μαρμάρινων επιφανειών. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες με σκοπό την ανάδειξη μεθόδων προφύλαξης, ώστε να πάψουν ή να επιβραδυνθούν οι διαδικασίες διάβρωσης που καταστρέφουν σημαντικά μνημεία της πολιτισμικής μας κληρονομιάς.

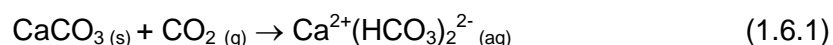
Στο κεφάλαιο αυτό θα καταγραφούν δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν στην απόπλυση του μαρμάρου, καθώς και στην γυψοποίηση του και το σχηματισμό επιφανειακών κρουστών, με κύριο σκοπό την αποσαφήνιση του μηχανισμού γυψοποίησης. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ενώ υπάρχουν πολυάριθμες μελέτες που αφορούν στην διάβρωση της δομικής πέτρας, ο μηχανισμός του φαινομένου δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητός.

1.6.2 Απόπλυση μαρμάρινων επιφανειών

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αποκαλύπτει τους δύο σημαντικότερους, από πλευράς συχνότητας εμφάνισης και αρνητικών επιπτώσεων, τύπους επίδρασης των ατμοσφαιρικών παραγόντων στο μάρμαρο [9]:

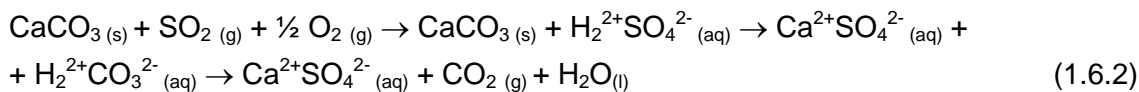
- Όξινη προσβολή από CO₂, SO₂ και υγρασία, με αποτέλεσμα τη διάλυση της πέτρας.
- Επίδραση διοξειδίου του θείου που οδηγεί στο σχηματισμό γύψου στη μαρμάρινη επιφάνεια.

Η φθορά τύπου (a), απουσία SO₂, υπήρξε πάντοτε παρούσα και περιγράφεται από την αργή και γνωστή αντίδραση:



Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται μόνο παρουσία νερού, σε εκείνα τα τμήματα του κτιρίου, του μνημείου ή του αγάλματος που έρχονται απευθείας σε επαφή με το νερό. Εξαιτίας της βιομηχανοποίησης, της εκτεταμένης χρήσης της κεντρικής θέρμανσης και της αυξανόμενης χρήσης μεταφορικών μέσων, η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα αυξήθηκε και ένας νέος ρυπαντής, το διοξείδιο του θείου έκανε την εμφάνιση του σε μεγάλες ποσότητες. Για τους λόγους αυτούς, παράλληλα με την αντίδραση (1.6.1),

λαμβάνει χώρα μια πολύ πιο γρήγορη αντίδραση, σε επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής:

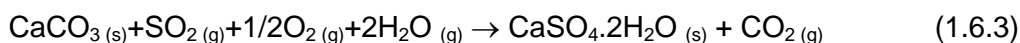


Οι συνέπειες των αντιδράσεων αυτών, που έχουν την τάση να ακολουθούν ενεργά μονοπάτια (στα όρια των κόκκων), είναι τοπικές διαλύσεις, αποφλοιώσεις και αποσπάσεις κομματιών μαρμάρου.

Αυτός ο τύπος φθοράς είναι πολύ καταστροφικός για το μάρμαρο και ο μηχανισμός του είναι αρκετά γνωστός. Ένας τρόπος αποφυγής ή επιβράδυνσης της φθοράς αυτής είναι ο αποφυγή άμεσης επαφής των πλέον ευαίσθητων τμημάτων των μνημείων (αγάλματα, ζωφόρος, διακοσμητικά στοιχεία κ.τ.λ) με το νερό της βροχής [9].

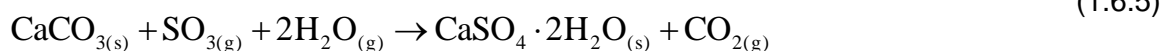
1.6.3 Γυψοποίηση μαρμάρινων επιφανειών

Η φθορά τύπου (b), η γυψοποίηση των μαρμάρινων επιφανειών, εμφανίζεται σε επιφάνειες που δεν έρχονται εξαρχής σε επαφή με το νερό της βροχής:



Μέχρι το 1975, για αυτό τον τύπο φθοράς ήταν γνωστά τα εξής [9]:

- Στη ρυπασμένη ατμόσφαιρα τα οξειδία του θείου απαντώνται υπό τη μορφή SO_2 (80%) και SO_3 (20%). Το τριοξείδιο του θείου είναι το προϊόν οξειδωσης του SO_2 που προκαλείται από την καταλυτική δράση των οξειδίων βαναδίου στην ατμόσφαιρα, από την καταλυτική δράση των κolloειδών στερεών συστατικών της ατμόσφαιρας (Fe_2O_3), από φωτοχημική δράση και από ηλεκτρικές εκκενώσεις στην ατμόσφαιρα.
- Στην επιφάνεια του μαρμάρου η οξειδωση του SO_2 σε SO_3 πραγματοποιείται μέσω της καταλυτικής δράσης επιφανειακών ακαθαρσιών (Fe_2O_3) και κolloειδών επικαθήσεων. Η οξειδωση ευνοείται επίσης από την ίδια τη φύση του ασβεστίτη, από τον $\text{Ca}^{2+}\text{SO}_4^{2-}$ εν διάλυση, από ήδη σχηματισμένο γύψο και από την παρουσία υγρασίας και ειδικών βακτηρίων.
- Οι ταχύτητες γυψοποίησης CaCO_3 και μαρμάρου υπό τη μορφή σκόνης εξαρτάται από την ποιότητα του μαρμάρου, τις παρούσες ακαθαρσίες, την κατανομή μεγέθους των κόκκων του CaCO_3 , τη μερική πίεση του SO_2 , την υγρασία και τη θερμοκρασία.
- Το πάχος των films γύψου εξαρτάται από την ποιότητα του μαρμάρου, τον τρόπο που κόπηκε και λαξεύτηκε, την ταχύτητα γυψοποίησης, το βαθμό προστασίας των μαρμάρινων περιοχών από τη βροχή και από το μικροκλίμα.
- Η διαδικασία γυψοποίησης του μαρμάρου αποτελείται από δύο διαδοχικές αντιδράσεις:



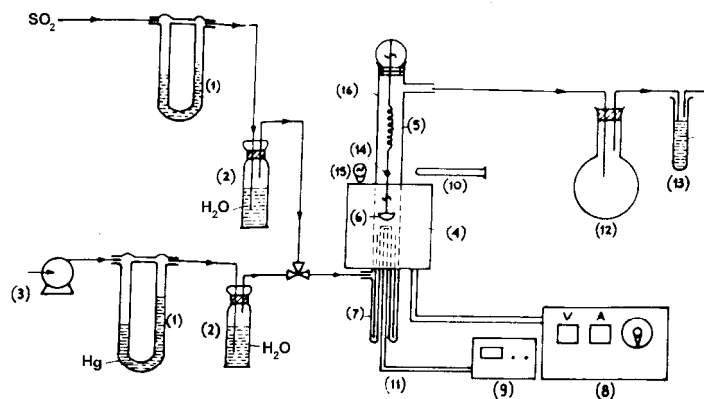
1.6.3.1 Μοντέλο του καθηγητή Σκουλικίδη

Η εργασία του καθηγητή Σκουλικίδη [49], [50], [51] είχε ως σκοπό την αποκάλυψη του μηχανισμού γυψοποίησης των μαρμάρινων επιφανειών. Στο πρώτο μέρος της μελέτης [49] πραγματοποιήθηκαν επί τόπου παρατηρήσεις και εργαστηριακές μετρήσεις σε μάρμαρα των μνημείων και των αγαλμάτων της Ακρόπολης, ώστε να εξεταστεί η κατάσταση φθοράς στην οποία βρίσκονταν και να γίνουν προτάσεις για την προστασία τους από την επίδραση φυσικοχημικών ατμοσφαιρικών παραγόντων.

Οι παρατηρήσεις και οι εργαστηριακές μετρήσεις απέδειξαν ότι το σχηματισμένο στρώμα γύψου στα μάρμαρα της Ακρόπολης, στις περιοχές εκείνες που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό της βροχής, αποτελείται από 85 – 97% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ και το υπόλοιπο από CaCO_3 και $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Το πάχος των στρωμάτων γύψου μετρήθηκε σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των αγαλμάτων και βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 0,1 – 1,5 cm.

Η σύγκριση φωτογραφιών και αντιγράφων των αγαλμάτων, από διάφορες χρονικές περιόδους, απέδειξε ότι η επιτάχυνση της επίδρασης του SO_2 συμπίπτει με την απαρχή της έντονης βιομηχανοποίησης στην περιοχή της Αθήνας.

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση, η οποία υπήρξε και ένα από τα βασικά συμπεράσματα του μηχανισμού που προτάθηκε στη συνέχεια, ήταν ότι οι λεπτομέρειες των αγαλμάτων διατηρούνται στις επιφάνειες των στρωμάτων γύψου και παρόλο του ότι ο γύψος έχει πάχος παραπάνω από μερικά mm οι λεπτομέρειες αυτές έχουν εξαφανιστεί από την διεπιφάνεια μαρμάρου / γύψου. Αυτό αποκαλύφθηκε με προσεκτική απομάκρυνση του γύψου με ζεστό νερό και κατέστησε εφεξής απαγορευτική την απομάκρυνση του γύψου στην περίπτωση που οι λεπτομέρειες ανάγλυφων πρέπει να διατηρηθούν.



Εικόνα 1.6.3.1.1: Διάγραμμα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Ροόμετρο αερίου | 9. Ψηφιακό θερμόμετρο |
| 2. Φιάλη με νερό | 10. Οπτικό μικρόμετρο |
| 3. Αντλία | 11. Θερμοστοιχείο |
| 4. Φούρνος | 12. Ογκομετρική Φιάλη |
| 5. Πηνίο από χαλαζία | 13. Δοκιμαστικός σωλήνας |
| 6. Γυάλινο χωνευτήρι | 14. Ένδειξη |
| 7. Τριχοειδείς σωλήνες | 15. Λυχνία |
| 8. Ποτενσιόμετρο | 16. Γυάλινος σωλήνας |

Στη μελέτη αυτή [49] πραγματοποιήθηκε πειραματική διαδικασία με σκοπό τον υπολογισμό της ταχύτητας της αντίδρασης γυψοποίησης και της ενέργειας ενεργοποίησης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστίτης υπό τη μορφή σκόνης με μέγεθος κόκκων της τάξης – 120 + 100 mesh και καθαρό SO₂ (g). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 1.6.3.1.1 και προσομοιώνει την αντίδραση μεταξύ CaCO₃, SO₂, αέρα και ατμών νερού. 40 – 100 mg ξηρού CaCO₃ τοποθετήθηκαν σε χωνευτήριο και διατηρήθηκαν σε σταθερή θερμοκρασία, ενώ υπήρχε σταθερή ροή 84% SO₂ κορεσμένο σε υγρασία και 16% αέρα κορεσμένου σε υγρασία.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος, αν παρασταθεί γραφικά το % ποσοστό σχηματιζόμενου γύψου σε συνάρτηση με το χρόνο (Εικόνα 1.6.3.1.2), για τις θερμοκρασίες που μελετήθηκαν (δηλαδή 375 – 500°C), διακρίνονται δύο ξεχωριστές φάσεις:

Φάση 1: Μέχρι ποσοστό σχηματισμού 11% (film γύψου με πάχος 300 Å) υπάρχει γραμμική σχέση % σχηματιζόμενου γύψου (y₁) και χρόνου (t₁)

$$y_1 = k_1 \cdot t_1 \quad (1.6.6)$$

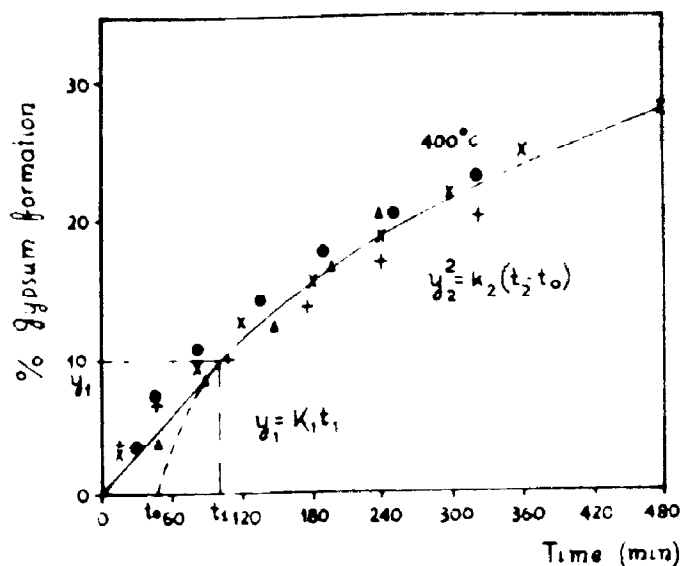
όπου k₁ = η σταθερά της ταχύτητας.

Η ενέργεια ενεργοποίησης για το στάδιο αυτό υπολογίστηκε και είναι ίση με 14,3 ± 1,5 Kcal/mol.

Φάση 2: Από ποσοστό ≈ 11% και πάνω, υπάρχει παραβολική σχέση της μορφής

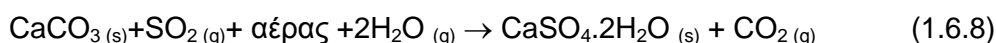
$$y_2^2 = k_2 \cdot (t_2 - t_0) \quad (1.6.7)$$

Η ενέργεια ενεργοποίησης για το δεύτερο στάδιο υπολογίστηκε και είναι ίση με 17,7 ± 1,5 Kcal/mol.



Εικόνα 1.6.3.1.2: Γραφική παράσταση του % ποσοστού του σχηματιζόμενου γύψου σε συνάρτηση με το χρόνο, για θερμοκρασία 400 °C.

Η συνολική αντίδραση που περιγράφει το φαινόμενο της γυψοποίησης είναι:

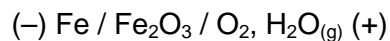


Η αντίδραση αυτή αποτελείται από δύο διαδοχικά στάδια (αντιδράσεις 1.6.4 και 1.6.5). Η αντίδραση (14) είναι καταλυόμενη (γρήγορη) άρα η ταχύτητα της συνολικής αντίδρασης καθορίζεται από την αντίδραση (15) (βραδύτερο στάδιο).

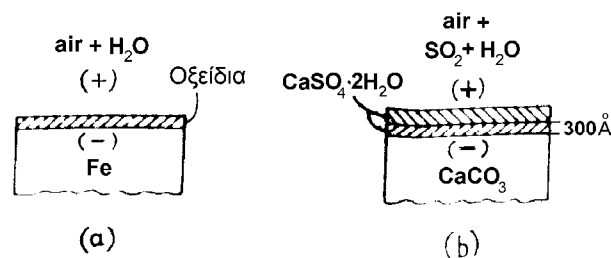
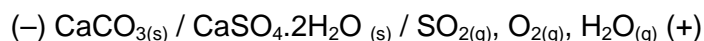
Στο δεύτερο μέρος της μελέτης του καθηγητή Σκουλικίδη [50] [51] προτείνεται μια νέα υπόθεση για την εξήγηση του μηχανισμού της διαδικασίας γυψοποίησης σε μαρμάρινες επιφάνειες, οι οποίες εκτίθενται σε ατμόσφαιρες που περιέχουν SO₂ και υγρασία.

Στην προσπάθεια να ερμηνευθεί η τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης για το δεύτερο (παραβολικό) στάδιο της αντίδρασης γυψοποίησης, διαπιστώθηκε ότι η τιμή $17,7 \pm 1,5$ Kcal/mol κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 16 – 19 Kcal/mol, που αντιστοιχούν σε διαδικασία διάχυσης σε στερεά κατάσταση ως το στάδιο που καθορίζει την ταχύτητα. Μεγάλος αριθμός ετερογενών αντιδράσεων πράγματι παρουσιάζουν ενέργειες ενεργοποίησης στην περιοχή των 18 Kcal/mol, μεταξύ των οποίων και η αντίδραση διάβρωσης των μετάλλων (μέσω ανάπτυξης στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια). Έχει αποδειχθεί ότι το βασικό στάδιο των αντιδράσεων αυτών, το στάδιο που καθορίζει τη ταχύτητα της συνολικής αντίδρασης, είναι η διάχυση μεταλλικών ιόντων σε στερεά κατάσταση.

Με βάση την θεωρία του Wagner, σύμφωνα με την οποία η οξείδωση των μετάλλων λαμβάνει χώρα μέσω της δημιουργίας ενός γαλβανικού στοιχείου της μορφής:

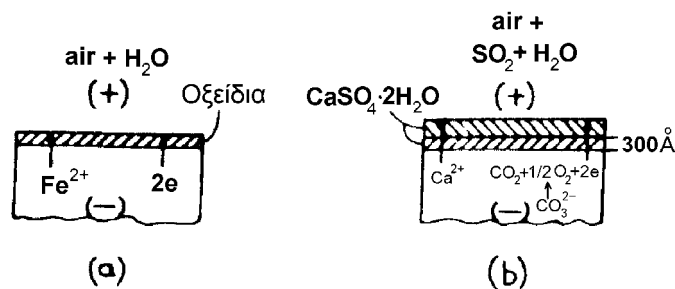


προτάθηκε η ερμηνεία της γυψοποίησης του CaCO₃ κατά παρόμοιο τρόπο. Το σύστημα που μελετάται μπορεί να θεωρηθεί ως ένα γαλβανικό στοιχείο, στο οποίο ο αρνητικός πόλος είναι το CaCO₃, θετικός πόλος είναι το διαβρωτικό περιβάλλον (SO₂, O₂, H₂O_(g)), ενώ ο γύψος που είναι το προϊόν διάβρωσης δρα ως ηλεκτρολύτης (Εικόνα 1.6.3.1.3):



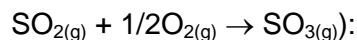
Εικόνα 1.6.3.1.3: (α) Το μοντέλο του Wagner που απεικονίζει το μηχανισμό διάβρωσης των μετάλλων, (b) Το προτεινόμενο μοντέλο γαλβανικού στοιχείου για την ερμηνεία του μηχανισμού γυψοποίησης του μαρμάρου

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, στη δεύτερη παραβολική φάση της αντίδρασης γυψοποίησης το στάδιο που καθορίζει την ταχύτητα είναι η διάχυση σε στερεά κατάσταση, στην οποία τα διαχεόμενα είδη μπορεί να είναι Ca²⁺, CO₃²⁻ ή SO₄²⁻. Μεταξύ των ειδών αυτών τα ιόντα Ca²⁺ έχουν την μικρότερη ακτίνα και σύμφωνα με τη θεωρία της αταξίας, είναι τα μόνα που θα μπορούσαν να εκτοπιστούν σε θέσεις αναστρέψιμης αταξίας και όντας ευκίνητα να μεταναστεύσουν (διαχυθούν). Επομένως το ηλεκτρικό ρεύμα στο γαλβανικό στοιχείο ρέει διαμέσου μετανάστευσης σε στερεά κατάσταση των ιόντων Ca²⁺ προς το διαβρωτικό περιβάλλον, με τα ηλεκτρόνια να κινούνται στην ίδια κατεύθυνση όπως το μοντέλο του Wagner (Εικόνα 1.6.3.1.4).

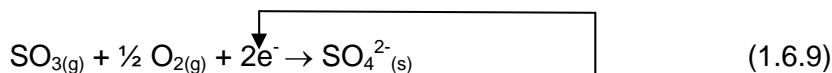


Εικόνα 1.6.3.1.4 : (α) Το μοντέλο του Wagner που απεικονίζει το μηχανισμό διάβρωσης των μετάλλων, (β) Το προτεινόμενο μοντέλο για την ερμηνεία του μηχανισμού γυψοποίησης του μαρμάρου

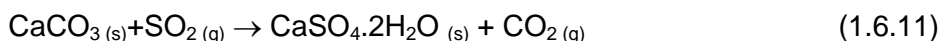
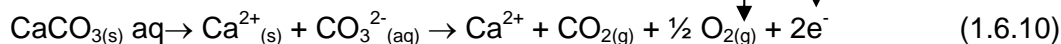
Η ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ως εξής (λαμβάνοντας υπόψη ότι αρχικά πραγματοποιείται η καταλυόμενη και γρήγορη αντίδραση



ΚΑΘΟΔΟΣ (+): Αναγωγή



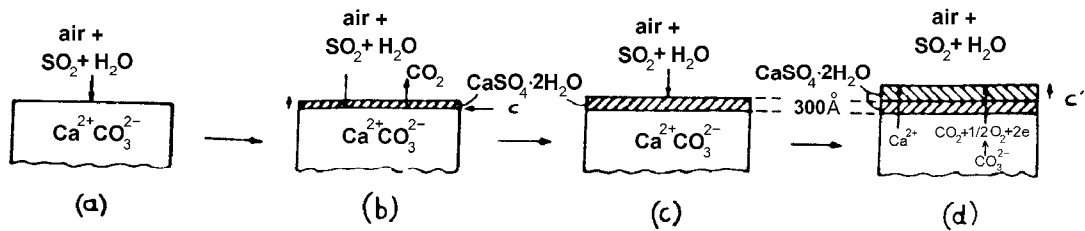
‘Ανοδος (-): Οξείδωση



Η εξέλιξη της γυψοποίησης, σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, φαίνεται στην Εικόνα 1.6.3.1.5.

- Σχήμα (a) βρισκόμαστε στο χρόνο μηδέν.
- Στα σχήματα (b) και (c) βρισκόμαστε στο πρώτο γραμμικό στάδιο. Το SO_2 , το O_2 και το $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ διαχέονται μέσω των πόρων του σχηματιζόμενου φιλμ γύψου πιο γρήγορα από τα ιόντα Ca^{2+} και $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_{2(\text{g})} + 1/2 \text{O}_{2(\text{g})} + 2\text{e}^-$. Η ταχύτητα της αντίδρασης στο στάδιο αυτό καθορίζεται από την ταχύτητα εκρόφησης (desorption) του $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ από την επιφάνεια του ασβεστίτη και της διάχυσης του, μέσω των πόρων του στρώματος γύψου, προς το διαβρωτικό περιβάλλον. Τα νέα στρώματα γύψου σχηματίζονται στη διεπιφάνεια γύψου / μαρμάρου και η μάζα του αυξάνεται προς το διαβρωτικό περιβάλλον.
- Σχήμα (d): Όταν το πάχος του γύψου $\approx 300 \text{ \AA}$, εμφανίζεται το δεύτερο στάδιο της αντίδρασης (παραβολικό). Το SO_2 , το O_2 και το $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ δεν μπορούν πλέον να διαχυθούν μέσω του στρώματος του γύψου, γιατί δεν είναι πια πορώδες (όσο αυξάνεται το πάχος του γύψου, ο αριθμός και το μήκος των πόρων μειώνονται εξαιτίας του μεγαλύτερου μοριακού όγκου του γύψου σε σχέση με το CaCO_3). Η ανάπτυξη ελέγχεται τώρα από τη

διάχυση σε στερεά κατάσταση των ιόντων $\text{Ca}^{2+}_{(s)}$ μέσω του γύψου στο περιβάλλον. Τα νέα στρώματα γύψου εμφανίζονται πάνω από τα ήδη διαμορφωμένα.



Εικόνα 1.6.3.1.5: Η διαδικασία γυψοποίησης σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η διάχυση σε στερεά κατάσταση των ιόντων $\text{Ca}^{2+}_{(s)}$ αποδείχθηκε με μετρήσεις EPMA [51] σε δείγματα μαρμάρου προστατευμένα με πολυμερή επικαλυπτικά στρώματα. Τα ιόντα διαχύθηκαν διαμέσου της επικάλυψης.

Ο παραπάνω προτεινόμενος μηχανισμός εξηγεί:

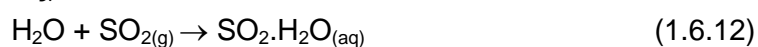
1. Την αναπαραγωγή των λεπτομερειών της επιφάνειας του μαρμάρου (των αγαλμάτων) στην επιφάνεια του φιλμ του γύψου.
2. Την ύπαρξη γύψου μέσα και πάνω σε πολυμερή ή ανόργανα στρώματα επικάλυψης, καθώς και τη θραύση των επικαλύψεων.
3. Το φαινόμενο γυψοποίησης σε φυσικές συνθήκες.

1.6.3.2 Άλλες δημοσιευμένες μελέτες που αφορούν στο φαινόμενο της γυψοποίησης

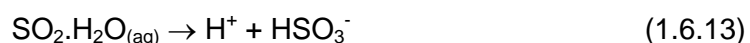
Η μελέτη του καθηγητή Σκουλικίδη, που θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι η μοναδική που κάνει σαφή λόγο για το μηχανισμό με τον οποίο πραγματοποιείται η γυψοποίηση μαρμάρινων επιφανειών και προτείνει ένα συγκεκριμένο μοντέλο ερμηνείας του, είναι αποδεκτή από κάποιους μελετητές αλλά υπάρχουν και ορισμένοι που δεν ενστερνίζονται τα συμπεράσματα της και το προτεινόμενο μοντέλο. Εκτός από τη μελέτη αυτή, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ερευνών που αφορούν στην διάβρωση της δομικής πέτρας από την επίδραση του SO_2 . Λίγες από αυτές όμως καταθέτουν στοιχεία για τη διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται η αλληλεπίδραση CaCO_3 και SO_2 .

Στη μελέτη του **Elfving et al.** [52], η αντίδραση μεταξύ ασβεστίτη και διοξειδίου του θείου περιγράφεται σαν να προχωρά σε ένα φιλμ νερού, όταν η συμπύκνωση ευνοείται στην επιφάνεια του ασβεστίτη (σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο μηχανισμός γυψοποίησης μπορεί να ερμηνευθεί μέσω διαδοχικών σταδίων αντιδράσεων διεπιφάνειας (αέρια – υγρή – στερεή φάση):

1. Διάχυση του SO_2 από την αέρια φάση στην υδατική, που είναι παρούσα στην επιφάνεια του μαρμάρου (φιλμ υγρασίας).

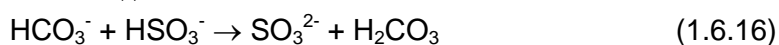
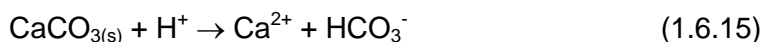


2. Διάλυση του SO_2 στην υδατική φάση.

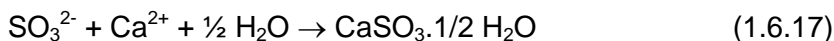




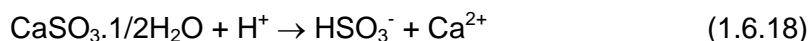
3. Διάλυση του ασβεστίτη (CaCO_3) στην υδατική φάση.



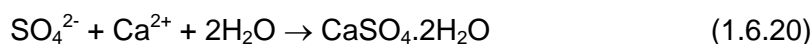
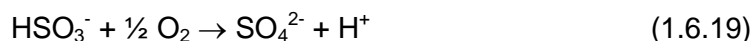
4. Κατακρήμνιση $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ στην υδατική φάση.



5. Μερική διάλυση του $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ στην υδατική φάση.



6. Σχηματισμός γύψου μέσω της οξειδωσης των θειούχων ιόντων που είναι παρόντα στην υδατική φάση.

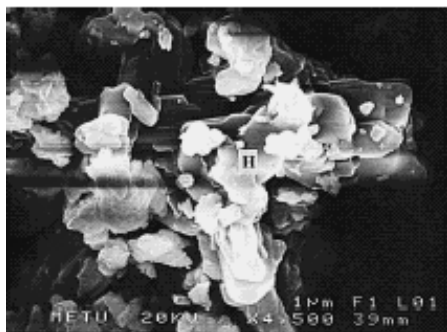


Στην αέρια φάση υποθέτεται ότι δεν λαμβάνει χώρα καμία αντίδραση των αερίων. Η ταχύτητα ροής του SO_2 διαμέσου του αερίου φιλμ δημιουργεί οριακές συνθήκες για το υγρό φιλμ.

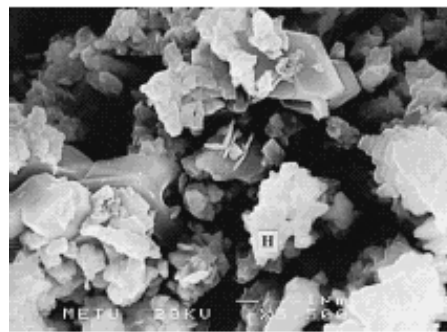
Στο υγρό φιλμ, θα πρέπει να θεωρηθούν δύο αντιδράσεις διαχωρισμού του $\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_{(aq)}$ (αντιδράσεις 1.6.13 και 1.6.14). Ο διαχωρισμός του $\text{SO}_{2(aq)}$ στο υγρό φιλμ οδηγεί στη διάλυση του ασβεστίτη και στη καταβύθιση ημιυδρίτη (αντιδράσεις 1.6.15 και 1.6.17). Η καταβύθιση ευνοείται σε τιμές $\text{pH} > 5,6$. Το pH της διεπιφάνειας αερίου – υγρού είναι όξινο και η οξύτητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου (για παράδειγμα συγκέντρωση 10 ppm SO_2 θα έχει σαν αποτέλεσμα τιμή $\text{pH} = 4,9$ στη διεπιφάνεια). Από την άλλη μεριά, οι τιμές του pH στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού στον ασβεστίτη πρέπει να είναι μεγαλύτερες από 5,6, εξαιτίας της αναγέννησης αλκαλικών ιόντων.

Βασιζόμενοι στον παραπάνω μηχανισμό γυψοποίησης, οι **Boke et al.** [53] πραγματοποίησαν πειράματα με σκοπό τον σχηματισμό $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ και το μετασχηματισμό αυτού σε γύψο. Το $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ήταν το βασικό προϊόν της αντίδρασης γυψοποίησης στο καθαρό πλέγμα του ασβεστίτη (Εικόνα 1.6.3.1.6α), για μεγάλο χρονικό διάστημα έκθεσης (περίπου 100 μέρες). Μετά, σταδιακά μετασχηματίστηκε σε γύψο (Εικόνα 1.6.3.1.6β). Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει ότι η κατακρήμνιση του $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ευνοείται περισσότερο από την οξείδωση των εν διαλύσει ιόντων SO_3^{2-} , που οδηγεί στο σχηματισμό γύψου.

Στην εργασία αυτή ο μετασχηματισμός $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ γύψος μελετήθηκε με χρήση καθαρής σκόνης $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, για να γίνει κατανοητός ο ρόλος του SO_2 διαμέσου του pH και του ποσού του ενυπόστατου νερού (σε υγρή φάση) στην αντίδραση. Πραγματοποιήθηκαν δύο σει πειραμάτων, με χρήση δοκιμίων $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ψεκασμένων με νερό και δοκιμίων σε ισορροπία (σε 90% σχετική υγρασία). Το πρώτο σει δοκιμών αφορούσε στην έκθεση σε ρεύμα SO_2 – αέρα και το δεύτερο επανάληψη με έκθεση σε ρεύμα αέρα και μόνο.



Εικόνα 1.6.3.1.6α: Κρύσταλλοι $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (H)

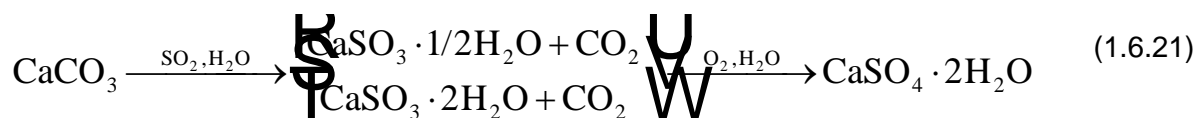


Εικόνα 1.6.3.1.6β: Κρύσταλλοι γύψου μαζί με κρυστάλλους $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (H)

Μετά την έκθεση σε ρεύμα SO_2 – αέρα παρατηρήθηκε υψηλό ποσοστό γύψου στα ψεκασμένα δείγματα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η διάλυση του $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ευνοείται στις συνθήκες χαμηλότερου pH λόγω της απορρόφησης του SO_2 . Στα άλλα δείγματα παρατηρήθηκε χαμηλό ποσό γύψου που μπορεί να εξηγηθεί από την παρουσία λιγότερου νερού στην επιφάνεια του $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$.

Μετά την έκθεση σε ρεύμα αέρα παρατηρήθηκε χαμηλό ποσοστό μετασχηματισμού του $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ σε γύψο στα ψεκασμένα δείγματα και καθόλου στα άλλα. Εξαιτίας της χαμηλής διαλυτότητας του $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ σε ουδέτερες συνθήκες, λιγότερα ιόντα SO_3^{2-} , είναι παρόντα στο φιλμ υγρασίας και ο μετασχηματισμός είναι περιορισμένος.

Στην εργασία του **Gauri et al.** [54] [55], ο μηχανισμός γυψοποίησης περιγράφεται ως εξής:



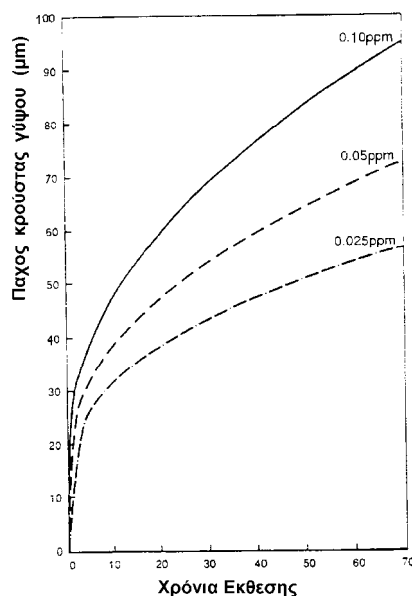
Αρχικά, πολύ μικροί δενδρίτες $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ σε σχήμα άστρου εμφανίζονται στην επιφάνεια του ασβεστίτη. Οι δενδρίτες αυτοί έχουν διαχωρισμένες θέσεις πυρηνοποίησης (αφού διαχωρίζονται ο ένας από τον άλλο από αμεταποίητο ασβεστίτη) και φαίνεται (υπό μικροσκοπική παρατήρηση) να βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του ασβεστίτη, γεγονός που υποδεικνύει μια κινητικότητα ιόντων ασβεστίου προς το διαβρωτικό περιβάλλον για να αντιδράσουν με το SO_2 . Το φαινόμενο αυτό εξηγείται μέσω του μοντέλου Σκουλικίδη.

Η πρόοδος της αντίδρασης οδηγεί, σύμφωνα με τον Gauri, στο μετασχηματισμό των δενδριτών σε δισκοειδείς φόρμες, μέσω ακτινικής σύμφυσης προς τα έξω νέου θειώδους ασβεστίου. Οι φόρμες αυτές στη συνέχεια συναυξάνονται, ενώ ταυτόχρονα μετασχηματίζονται σε λεπιδωτές δομές μέχρι να σχηματιστεί ένα συνεχόμενο στρώμα $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ σε όλη την επιφάνεια της πέτρας. Με την πάροδο του χρόνου έκθεσης οι κρύσταλλοι $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ οξειδώνονται και ενυδατώνονται σχηματίζοντας τελικά κρυστάλλους γύψου.

Η μικροσκοπική παρατήρηση εγκάρσιων τομών δειγμάτων από μαρμάρινες δομές που είχαν υποστεί διάβρωση σε φυσικό περιβάλλον, αποκάλυψε ότι οι επιφάνειες που εκτίθενται σε

περιοχές προστατευόμενες από τη βροχή εμφανίζουν μια ζώνη γήρανσης που αποτελείται από ένα ευδιάκριτο εξωτερικό και ένα εσωτερικό στρώμα. Το εξωτερικό στρώμα είναι η συνήθως παρατηρούμενη μαύρη κρούστα και αποτελείται από γύψο, αιθάλη και σκόνη. Το εσωτερικό στρώμα, με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, εμφανίζεται σαν μια ξέθωρη διηθημένη ζώνη στην οποία μικροί κρύσταλλοι γύψου μπορεί να είναι παρόντες σε ρομβοεδρικές κοιλότητες, οι οποίες αποκαλύπτουν τα χνάρια των επιπέδων σχισμού του CaCO_3 . Σε συνθήκες πειραματικής έκθεσης, ο Gauri παρατήρησε ότι εμφανίζονται παρόμοιες ζώνες γήρανσης, όμως στη χαμηλότερη ζώνη δεν υπάρχουν κρύσταλλοι γύψου. Σύμφωνα με τον Gauri, η μαύρη κρούστα αναπτύσσεται προς το εξωτερικό (διαβρωτικό) περιβάλλον μέσω πρόσφυσης (από τη στιγμή που η αντίδραση μεταξύ Ca^{2+} και SO_2 λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του δείγματος μόνο) και όχι προς τα μέσα, λόγω διάχυσης του SO_2 μέσω του μαρμάρου όπως συνήθως πιστεύεται. Ο μελετητής υποστηρίζει την παραπάνω θεωρία (όμοια με τη θεωρία Σκουλικίδη), λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω στοιχεία:

- Η κρούστα περιέχει ατμοσφαιρική σκόνη, κατανεμημένη σε κάθε σημείο του πάχους της. Θα ήταν δύσκολο για τα μεγάλα σωματίδια αιθάλης να εισέλθουν στους κόκκους του ασβεστίτη, αν η κρούστα αναπτυσσόταν από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό του μαρμάρου. Επιπλέον, η κρούστα είναι εξολοκλήρου απαλλαγμένη από ασβεστίτη.
- Η διεπιφάνεια μεταξύ της κρούστας και του εσωτερικού στρώματος με τις κοιλότητες είναι μια επίπεδη τραχιά επιφάνεια.
- Το εσωτερικό στρώμα έχει άδειες κοιλότητες και παραμένοντα σωματίδια ασβεστίτη, αντιπροσωπεύοντας υπολείμματα της μετανάστευσης ιόντων Ca^{2+} προς το διαβρωτικό περιβάλλον, από θέσεις όπως τα περατωτικά όρια των κόκκων και τα επίπεδα σχισμού του ασβεστίτη.
- Το εσωτερικό στρώμα είναι παχύτερο από την κρούστα και ακανόνιστο ως προς το πάχος του, από τη στιγμή που υφίσταται επιλεκτική εκκένωση για να αναπτυχθεί η κρούστα. Γι' αυτό το λόγο το πάχος της κρούστας αποτελεί μέτρο της συνολικής αντίδρασης του ασβεστίτη σε δεδομένες ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Εικόνα 1.6.3.1.7: Το προβλεπόμενο πάχος της κρούστας γύψου ως συνάρτηση των χρόνων έκθεσης του μαρμάρου στο SO_2 της ατμόσφαιρας, σε συνηθισμένες συνθήκες σχετικής υγρασίας.

Οι συγγραφείς στην ίδια εργασία πραγματοποιούν πειράματα με σκοπό να προσδιορίσουν καμπύλες γήρανσης του μαρμάρου σε συνηθισμένες συνθήκες σχετικής υγρασίας. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους προέκυψε το διάγραμμα στην Εικόνα 1.6.3.1.7, στο οποίο προβλέπεται η ανάπτυξη κρούστας γύψου ως συνάρτηση του χρόνου έκθεσης του μαρμάρου στο ατμοσφαιρικό SO₂ και της συγκέντρωσης του SO₂ (0,01/0,05/0,025 ppm).

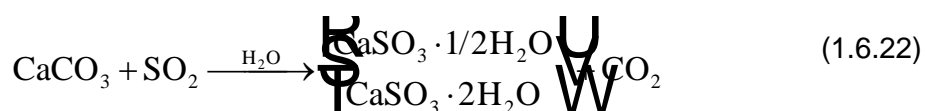
Οι **Amoroso** και **Fassina** [9], μετά από ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και δικής τους μελέτης, συνοψίζουν 3 πιθανά σενάρια για το μηχανισμό γυψοποίησης:

1. Ξηρή εναπόθεση του SO₂, μηχανισμός αργός αλλά συνεχής.
2. Υγρή εναπόθεση του SO₂, που ακολουθεί τα εξής βήματα: (α) μετατροπή του διοξειδίου σε θειική ρίζα στην αέρια φάση, (β) αφομοίωση με υπάρχον θειικό αερόλυμα μέσω καθίζησης, (γ) εναπόθεση στην επιφάνεια της πέτρας.
3. Υγρή εναπόθεση του SO₂, που ακολουθεί τα εξής βήματα: (α) απορρόφηση του SO₂ στο νερό μέσω κατακρήμνισης, (β) οξειδωση του διαλυμένου διοξειδίου του θείου στην υγρή φάση, (γ) εναπόθεση στην επιφάνεια της πέτρας.

Ακολουθεί αναλυτική εξέταση καθενός από τους τρεις μηχανισμούς:

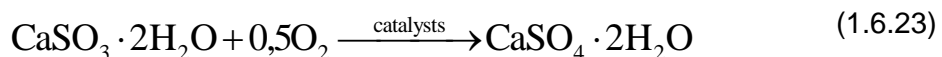
Ξηρή εναπόθεση του SO₂

Για τον πρώτο μηχανισμό είναι γνωστά τα εξής: όταν το διοξείδιο του θείου φτάνει στην επιφάνεια της πέτρας σε αέρια μορφή, η ταχύτητα προσρόφησης του εξαρτάται από την φύση της επιφάνειας. Η ταχύτητα λήψης του SO₂ είναι συνάρτηση του pH, οπότε παρουσία του CaCO₃ και μια μικρής ποσότητας νερού (χαμηλή σχετική υγρασία) σχηματίζεται ένυδρο θειώδες ασβέστιο σύμφωνα με την αντίδραση:

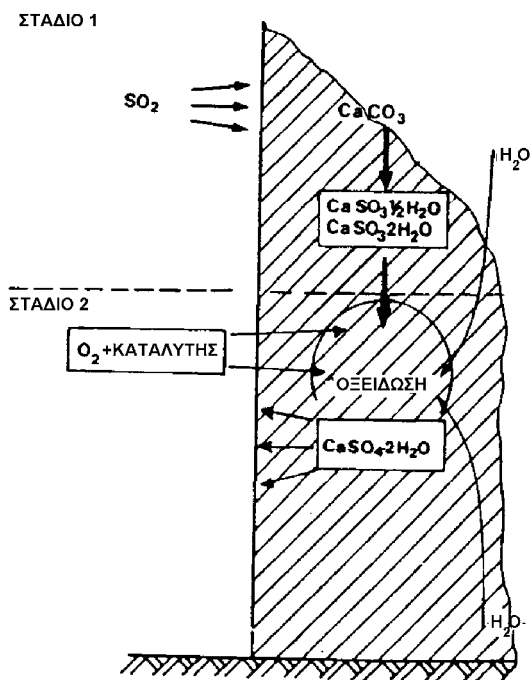


Ο μηχανισμός αυτός επιβεβαιώνεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τον **Gauri et.al.** [56] σε εργαστηριακά πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μαρμάρου εκτιθέμενα σε ατμόσφαιρα 3000 ppm SO₂.

Αν το νερό είναι παντελώς απών (περιπτώσεις επιφανειών με τέτοιο προσανατολισμό, ώστε ούτε η βροχή, ούτε ο δρόσος, ούτε η αναρριχόμενη υγρασία, είναι σε θέση να υγράνουν) το ένυδρο θειώδες ασβέστιο δεν μπορεί να μετατραπεί σε θειικό και η αντίδραση σταματά στο στάδιο σχηματισμού του CaSO₃·2H₂O. Παρουσία νερού, το θειώδες ασβέστιο μπορεί να οξειδωθεί σε θειικό υπό την επίδραση οξειδώντων και καταλυτών (σωματίδια άνθρακα, οξείδια μετάλλων) σύμφωνα με την αντίδραση:



Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, η υψηλή ποσότητα υγρασίας δεν επιτρέπει την ποσοτική ξηρή εναπόθεση του SO_2 (Εικόνα 1.6.3.1.8), συνεπώς ο μηχανισμός αυτός εμφανίζεται να έχει δευτερεύουσα σημασία στο μετασχηματισμό του ασβεστίτη σε γύψο.



Εικόνα 1.6.3.1.8: Σχηματική αναπαράσταση της προσρόφησης του διοξειδίου του θείου στην επιφάνεια της πέτρας, με το μηχανισμό της ξηρής εναπόθεσης

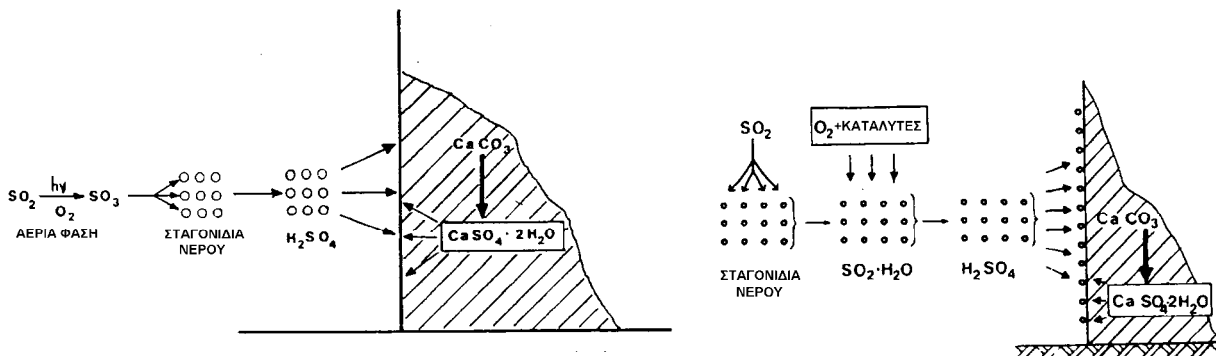
Ομογενής οξείδωση του SO_2

Η ομογενής οξείδωση του SO_2 στην αέρια φάση και η μετατροπή του σε θειικό αερόλυμα (Εικόνα 1.6.3.1.9) μπορεί να είναι:

1. Αποτέλεσμα άμεσης φωτο – οξείδωσης που συμπεριλαμβάνει αντιδράσεις διεγερμένων, από απορρόφηση υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, μορίων SO_2 . Τα μόρια αυτά αντιδρούν με το μοριακό οξυγόνο και παράγουν το υγροσκοπικό ενδιάμεσο προϊόν SO_3 . Παρουσία ατμών νερού το SO_3 αντιδρά αμέσως για να σχηματίσει σταγόνες θειικού οξέος. Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα με πολύ μικρή απόδοση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.
2. Αποτέλεσμα οξείδωσης του SO_2 από δραστικές ουσίες όπως άτομα, ελεύθερες ρίζες και διεγερμένα μοριακά είδη που έχουν ενεργοποιηθεί φωτοχημικά (OH^\cdot , HO_2 , RO_2). Σε διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην Δυτική Ευρώπη, βρέθηκε ότι η ομογενής οξείδωση του διοξειδίου του θείου από φωτοχημικά διεγερμένες ελεύθερες ρίζες είναι σημαντική διαδικασία για το μετασχηματισμό του SO_2 σε θειικό συστατικό στις χαμηλότερες ζώνες της ατμόσφαιρας.

Το θειικό συστατικό που σχηματίζεται, κατ' αυτόν τον τρόπο, στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να διαλυθεί στις σταγονίδια νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, οι οποίες στη συνέχεια εναποτίθενται στην επιφάνεια της πέτρας. Μέρος του θειικού συστατικού στα

σταγονίδια βρίσκεται υπό τη μορφή του θειικού οξέος που είναι εξαιρετικά δραστικό στο μάρμαρο. Τα βασικά στάδια της διαδικασίας αυτής μπορούν να καταγραφούν ως εξής:



Εικόνα 1.6.3.1.9: Ομογενής οξειδωση του SO_2 στην ατμόσφαιρα και επακόλουθη δράση του H_2SO_4 στην επιφάνεια της πέτρας

Εικόνα 1.6.3.1.10: Ετερογενής οξειδωση του SO_2 στην ατμόσφαιρα και δράση του H_2SO_4 στην επιφάνεια της πέτρας

Ετερογενής οξειδωση του SO_2

Σύμφωνα με τους δύο συγγραφείς [9], η οξειδωση του διοξειδίου του θείου στην υγρή φάση είναι πιθανόν η πιο σημαντική διαδικασία στο σχηματισμό γύψου και στη διάβρωση της πέτρας. Με βάση αυτόν τον μηχανισμό, σχηματίζεται θειικό οξύ το οποίο φτάνει στην επιφάνεια της πέτρας ως σταγονίδια ή μπορεί να σχηματιστεί στην επιφάνεια παρουσία ενός φιλμ υγρασίας. Η ετερογενής οξειδωση του SO_2 επομένως μπορεί να πραγματοποιηθεί (i) στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 1.6.3.1.10) ή (ii) στην ίδια την επιφάνεια της πέτρας (Εικόνα 1.6.3.1.11).

Στην περίπτωση (i), αρχικά το διοξείδιο του θείου του αέρα διαλύεται σε σταγονίδια νερού (σε τιμές pH των ατμοσφαιρικών σταγονιδίων που κυμαίνονται μεταξύ 3 και 6, διαλύεται το 90% του SO_2). Η διάλυση του διοξειδίου του θείου είναι πολύ γρήγορη διαδικασία, σε αντίθεση με την επακόλουθη οξειδωση του σε θειικό οξύ που είναι πιο αργή (δεύτερο στάδιο). Επομένως το βασικό στάδιο της ολικής διαδικασίας ετερογενούς μετασχηματισμού του SO_2 είναι η οξειδωση. Ο σχηματισμός του H_2SO_4 αυξάνει την οξύτητα των σταγονιδίων και σταματά σε τιμές $\text{pH} < 2$, αφού το SO_2 δεν μπορεί να διαλυθεί επιπλέον. Μόλις οι σταγόνες αυτές εναποτεθούν στην επιφάνεια της πέτρας, αρχίζει ο μετασχηματισμός του ασβεστίτη σε γύψο. Τα κύρια στάδια της παραπάνω διαδικασίας (που είναι όμοια με τον μηχανισμό που περιγράφηκε από τον **Elfvig** [52]) είναι τα εξής:



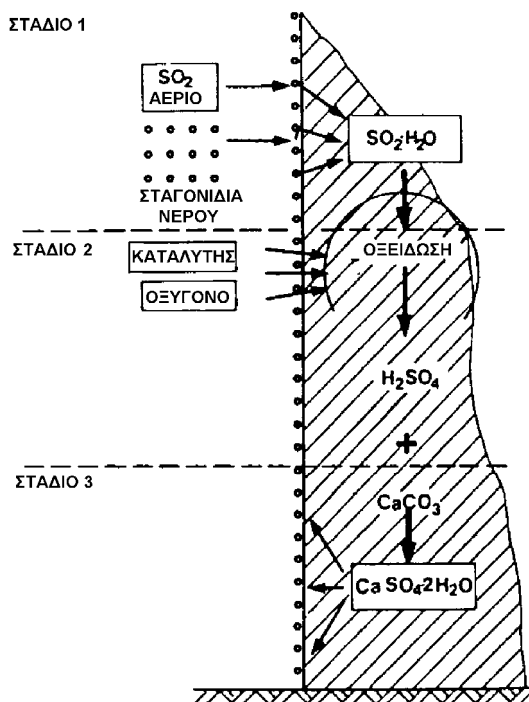
Γενικά η μεταφορά του SO_2 από τον αέρα σε σταγονίδια ελέγχεται από διαδικασίες διάχυσης σε αέρια και υγρή φάση και προχωρά μέσω τυρβώδους και μοριακής διάχυσης. Οι βασικές

αρχές που διέπουν τη διαδικασία ανταλλαγής μεταξύ αέρα και σταγονιδίων νερού είναι οι εξής:

- Οι ταχύτητες απορρόφησης του SO_2 αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος τις σταγόνας.
- Οι ταχύτητες απορρόφησης του SO_2 αυξάνονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου.
- Η διαδικασία απορρόφησης του SO_2 από σταγόνες νερού με ακτίνα μικρότερη από 100 μm είναι κατά πολύ ταχύτερη από τη διαδικασία οξείδωσης του SO_2 σε θειικό συστατικό.

Όσον αφορά στην οξείδωση του SO_2 στην υγρή φάση πια, για την παραγωγή θειικού οξέος, μπορεί να πραγματοποιηθεί από το οξυγόνο παρουσία αμμωνίας και παρουσία μεταλλικών ιόντων, που δρουν ως καταλύτες (κυρίως σίδηρος, μαγγάνιο), αλλά ακόμα και απουσία καταλυτών.

Στην περίπτωση (ii), όταν υπάρχει βαθμωτή μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας κοντά στην επιφάνεια της πέτρας, το αέριο SO_2 που περιέχεται στον περιβάλλον αέρα κινείται προς της επιφάνεια της πέτρας (κατά τη διάρκεια της φάσης της συμπύκνωσης) και περνά στην υγρή φάση που βρίσκεται αποτεθημένη στην πέτρα. Αν η ποσότητα του νερού είναι μικρή, η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου είναι μεγάλη. Αυτό το εξαιρετικά διαβρωτικό διάλυμα είναι δυνατόν να εισχωρήσει στο εσωτερικό του υλικού, σε βάθος που εξαρτάται από το πορώδες της πέτρας και από την ποσότητα του διαλύματος. Η μετακίνηση του SO_2 από την αέρια φάση στο διάλυμα είναι πολύ γρήγορη διαδικασία και ακολουθείται από την οξείδωση σε θειικό οξύ, παρουσία μιας υπολογίσιμης ποσότητας σωματιδίων άνθρακα που δρουν ως καταλύτες. Στην περίπτωση αυτή το pH του διαλύματος δεν μπορεί να πέσει κάτω από 2, γιατί εξουδετερώνεται συνεχώς από το ανθρακικό ασβέστιο της πέτρας.



Εικόνα 1.6.3.1.11: Ετερογενής οξείδωση του διοξειδίου του θείου πάνω στην επιφάνεια της πέτρας και επακόλουθη διαβρωτική επίδραση του θειικού οξέος

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός της ταχύτητας σχηματισμού του γύψου στην επιφάνεια της εκτιθέμενης πέτρας. Στην εργασία των **Bugini et al.** [57] γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού της ταχύτητας σχηματισμού κρουστών σε αστική περιοχή, στην οποία τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι γνωστά. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, συλλέχθηκαν από το γλυπτό διάκοσμο της κεντρικής εισόδου του Γενικού Νοσοκομείου του Μιλάνο. Τα μαρμάρια αυτά αγάλματα εγκαινιάστηκαν το 1937 και από τότε μέχρι το 1992 δεν είχε γίνει καμία προσπάθεια καθαρισμού και αποκατάστασης τους. Αυτή η ασυνήθιστη συγκυρία θεωρήθηκε ως μοναδική ευκαιρία να επιχειρηθεί μια εκτίμηση της ταχύτητας σχηματισμού μαύρων κρουστών.

Στα γλυπτά αυτά είχαν σχηματιστεί παχιές μαύρες κρούστες, στα σημεία που δεν έρχονταν σε επαφή με το νερό της βροχής, ενώ στις αποπλυμένες περιοχές εμφανιζόταν η τυπική μορφή διάβρωσης που δημιουργείται από την διαλυτική δράση της βροχής. Δείγματα των μαύρων κρουστών ελήφθησαν προσεκτικά από προστατευμένες περιοχές, ενώ πραγματοποιήθηκε συλλογή του ενδιάμεσου στρώματος στις περιπτώσεις που οι κρούστες εξακολουθούσαν να είναι καλά προσκολλημένες στην επιφάνεια του μαρμάρου κάτωθεν.

Το μάρμαρο από το οποίο ήταν κατασκευασμένα τα αγάλματα ήταν λεπτόκοκκο, με ισοδιαστατικούς κρυστάλλους ασβεστίτη. Τα δείγματα μελετήθηκαν με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD) και αποδείχθηκε ότι το βασικό συστατικό των κρουστών ήταν ο γύψος, ενώ ανιχνεύθηκαν και μικρές ποσότητες ασβεστίτη, χαλαζία, οξειδίων του σιδήρου και σωματιδίων άνθρακα.

Με τη βοήθεια Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) αποδείχθηκε ότι το πάχος της μαύρης κρούστας ήταν ακανόνιστο και κυμαινόταν μεταξύ 100 μm – 300 μm. Οι κρύσταλλοι ασβεστίτη της εξωτερικής επιφάνειας του μαρμάρου παρουσίαζαν συχνά διάβρωση διαμήκως των επιπέδων σχισμού τους, όπου είχαν κάνει την εμφάνισή τους νεοσχηματιζόμενοι μικροκρύσταλλοι. Επιπλέον ορισμένοι μεμονωμένοι κρύσταλλοι ασβεστίτη είχαν ενσωματωθεί στη μαύρη κρούστα.

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας σχηματισμού της κρούστας πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη το μέσο πάχος της κρούστας, το βάρος του δείγματος, την περιοχή δειγματοληψίας και την περίοδο έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση της δεδομένης περιοχής (54 χρόνια). Οι τιμές που υπολογίστηκαν ήταν της τάξης των 2 – 5 μm τον χρόνο, γεγονός που υποδεικνύει μια ραγδαία διαδικασία σχηματισμού. Η ποσότητα του σχηματιζόμενου γύψου ανά μονάδα επιφάνειας υπολογίστηκε από το λόγο (βάρος δείγματος / μονάδα επιφάνειας) και το θειικό συστατικό και βρέθηκε ίση με 5 – 13 mg / cm³. Η ταχύτητα σχηματισμού γύψου στη μαύρη κρούστα βρέθηκε ίση με 0,2 mg / cm³ το χρόνο. Οι τιμές αυτές μπορεί να θεωρηθούν, τουλάχιστον ως πρώτη προσέγγιση, ως ενδεικτικές σε περιπτώσεις έκθεσης μαρμάρου σε αστική ρυπασμένη ατμόσφαιρα, με αρκετά υγρό και ψυχρό κλίμα.

1.7 Γενικές Κατηγορίες Συχνότερα Συναντόμενων Μορφών Επιφανειακής Φθοράς - Σύντομη Περιγραφή

Φθορά ορίζεται ως η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής) των υλικών που οδηγεί στην αποσάθρωσή τους. Η φθορά είναι συνάρτηση τόσο ενδογενών (ορυκτολογική σύνθεση υλικού, ενεργός επιφάνεια επαφής με τους παράγοντες φθοράς), όσο και εξωγενών κυρίως παραγόντων (υγρασία της ατμόσφαιρας, θερμοκρασία, θαλάσσιο περιβάλλον και κυρίως ατμοσφαιρική ρύπανση), [2]

Ο σχηματισμός κρουστών ή/και επιφανειακών τύπων φθοράς στις λίθινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες εξαρτάται από [58], [59]:

- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το μάκρο- και μικρο-κλίμα, το εύρος θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, τις βροχοπτώσεις, την αιολική δράση, την ηλιοφάνεια, τη συγκέντρωση ρυπαντών, την παρουσία λιμνών, ποταμών, θάλασσας, βουνών, λόφων, κ.ά.
- Το υλικό της όψης και τα χαρακτηριστικά του, όπως ορυκτολογική, χημική σύσταση, μικροδομή, μηχανικές ιδιότητες, συντελεστή θερμικής διαστολής, κ.ά.
- Τη θέση του υλικού στην όψη του κτιρίου, προσανατολισμός, ύψος, προστατευόμενη ή όχι επιφάνεια
- Την επιφανειακή κατεργασία του υλικού επίπεδη, χτυπητή, ανάγλυφη επιφάνεια, κ.ά.
- Τους ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως βανδαλισμοί από graffiti, παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης, κ.ά.

Ρωγμές, προκύπτουν λόγω αστοχίας του υλικού κατά την τοποθέτηση του, από σεισμούς, από τη χημική εξαλλοίωση των φλεβών του, λόγω των συνεχόμενων κύκλων συστολής – διαστολής εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Περικρυσταλλικές ρηγματώσεις προκύπτουν στην μικρο-κλίμακα του υλικού, λόγω κόπωσης του λίθου από συνεχόμενους κύκλους συστολοδιαστολών, οι οποίες επιδεινώνονται από την όξινη προσβολή των αέριων ρυπαντών.

Ζαχαροειδής φθορά προκύπτει λόγω διακρυσταλλικής αποσάθρωσης του υλικού που οδηγεί στην εκλεκτική αποκόλληση κόκκων, μεταβάλλοντας την υφή της επιφάνειας, η οποία προσομοιάζει κόκκους ζάχαρης (εμφανίζεται κυρίως στα μάρμαρα).



Δυτική Όψη Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος
[60]



Ζαχαροειδής φθορά, Εικόνα Μικροσκοπίας
Οπτικών Ινών, x50, [60]

Αποπλυμένες επιφάνειες προκύπτουν λόγω της διαδοχικής έκπλυσης / διάλυσης του ασβεστίτη από την όξινη βροχή γεγονός που συνεπάγεται απώλεια αυθεντικού υλικού. Συνήθης είναι η παρουσία μικρορηγματώσεων και απολέπισης, καθώς και τραχιάς επιφάνειας σε πλήρως απροστάτευτες επιφάνειες. Πιθανή είναι επίσης η παρουσία γύψου σε μικρές ή μεγάλες ποσότητες ανάλογα με το μερικό βαθμό προστασίας της επιφάνειας.



Ακαδημία Αθηνών, Νότια Όψη, Βόρειος Προσανατολισμός Φανοστάτη, [61]



Αποπλυμένη επιφάνεια, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x25, [61]



Τραχιά Αποπλυμένη επιφάνεια, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x50, [61]



Φαιόμαυρη κρούστα, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x25, [61]

Ανθρακικές κρούστες (συνήθως λευκές), προκύπτουν από τη διαδοχική διάλυση του ασβεστίτη από την όξινη βροχή, όπου λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση, σχετική υγρασία, κ.ά) σχηματίζεται ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης.

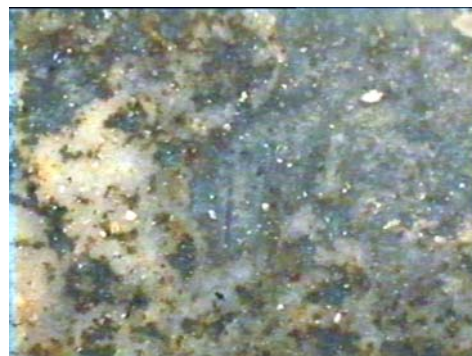


Φαιόμαυρες ή Μαύρες κρούστες προκύπτουν από τη γυψοποίηση της ασβεστιτικής επιφάνειας και προσρόφηση και εναπόθεση μαύρων σωματιδίων αιθάλης, H/C, αργιλοπυριτικής σύστασης κ.ά. σωματιδίων ατμοσφαιρικής προέλευσης που δρουν ως ενεργοί καταλύτες του μετασχηματισμού του ασβεστίτη σε γύψο. Οι επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών είναι προστατευμένες από το νερό της βροχής.

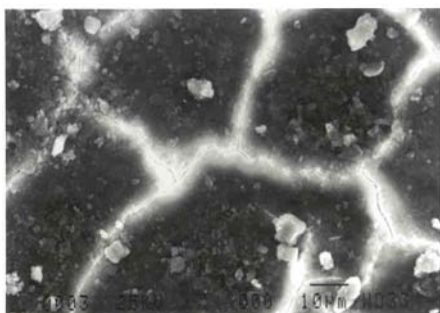
Φαιοκάστανες κρούστες διαθέτουν πλούσια περιεκτικότητα σε οξειδία και υδροξείδια του σιδήρου (έντονη γκριζοκάστανη ή/και πορτοκαλοκάστανη χροιά), τα οποία πολλές φορές είναι θωρακισμένα πίσω από ομοιογενές και συμπαγές στρώμα αργιλοπυριτικών.



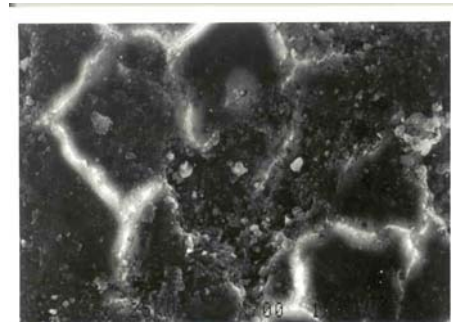
Ακαδημία Αθηνών, Νότια Όψη, [61]



Φαιοκάστανη κρούστα, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x50, [61]



Φαιοκάστανη κρούστα, Εικόνα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, x1000, [61]

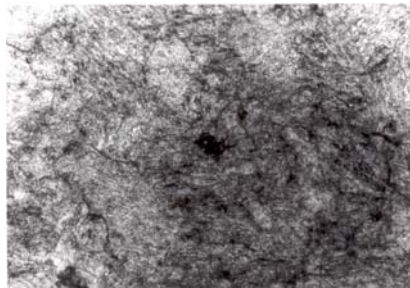


Φαιοκάστανη κρούστα Εικόνα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, x750, [61]

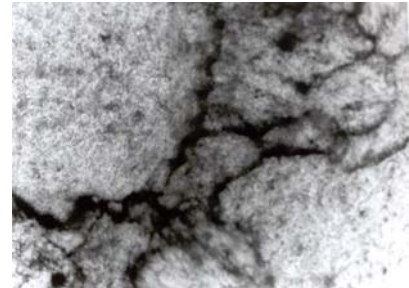
Χρυσές Πάτινες / Πάτινες στο χρώμα της σκουριάς προκύπτουν από τη διάχυση ιόντων σιδήρου του μαρμάρου από το εσωτερικό προς την εξωτερική του επιφάνεια. Η εμφανιζόμενη έντονη πορτοκαλοκάστανη χροιά οφείλεται στην οξειδωσή τους.



Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο – Δυτική όψη, Νότιος Προσανατολισμός Ορθομαρμαρώσεις Ισογείου, [62]

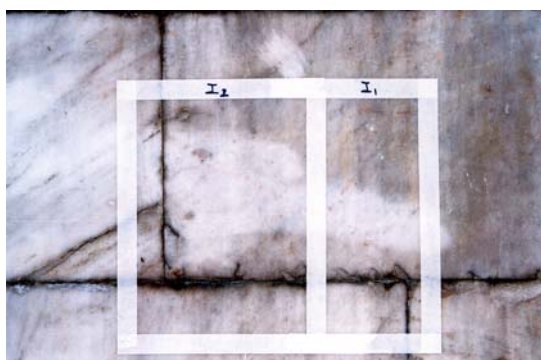


Κόκκοι σιδήρου, εγκλείσματα αρχικού υλικού, Εικόνα Οπτικού Μικροσκοπίου x50, παράλληλα Nicols, (πάνω μέρος εξεταζόμενης επιφάνειας), [62]

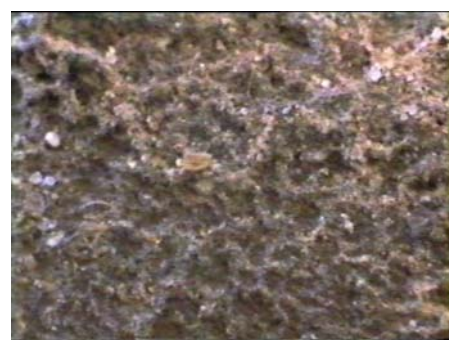


Δευτερογενώς τοποθετημένα οξειδία σιδήρου, Εικόνα Οπτικού Μικροσκοπίου x100, παράλληλα Nicols, (κάτω μέρος εξεταζόμενης επιφάνειας), [62]

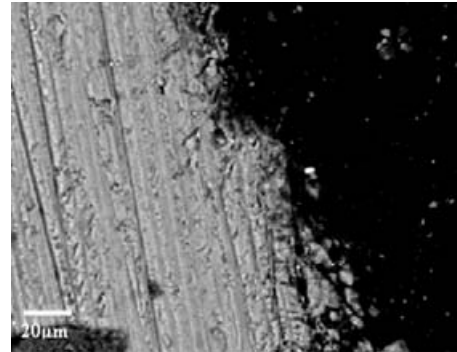
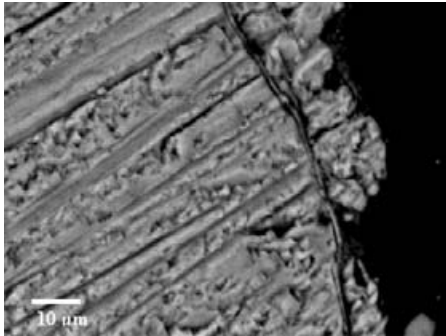
Αλκαλοπυριτικές (τσιμεντιτικές) κρούστες πρόκειται για σκληρό στρώμα ένυδρου πυριτικού ασβεστίου που καλύπτει τη λίθινη επιφάνεια. Περιμετρικά των κρουστών αυτών παρουσιάζονται συνήθως πολλές κοιλότητες και ρηγματώσεις.



Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο – Δυτική όψη, Νότιος Προσανατολισμός Ορθομαρμαρώσεις Ισογείου, [62]



Τσιμεντιτική κρούστα, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x25, [62]

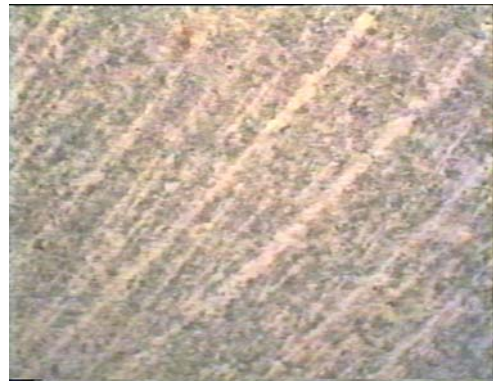


Τσιμεντιτική κρούστα, Εικόνες Τομών σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, [62]

Προσανατολισμένα χαράγματα, πρόκειται για κατευθυνόμενες – προσανατολισμένες γραμμές από παλαιότερες ασύμβατες επεμβάσεις συντήρησης μετά τη χρήση μεταλλικών βουρτσών και σβουρακίων.



Ιστορικό Κτίριο της Εθνικής Τράπεζας της Ελλάδος στο Ναύπλιο, Ορθομαρμαρώσεις Ισογείου, [63]



Προσανατολισμένα χαράγματα, Εικόνα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών, x25, [63]

Επικαθήσεις σωματιδίων σκόνης (dust fall), πρόκειται για αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα κυρίως αργιλοπυριτικής σύστασης.

Μαύρες επικαθήσεις (black depositions), πρόκειται για αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα συνήθως αργιλοπυριτικής σύστασης, έντονου μαύρου χρώματος λόγω της προσρόφησης σωματιδίων αιθάλης και H/C. Οι επικαθήσεις αυτές μπορεί να εμπεριέχονται ή/και να επικαλύπτουν χαλαρά συνδεδεμένες και συμπαγείς περιοχές κρουστών.

2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού - Βιβλιογραφική επισκόπηση κριτηρίων και μερικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων

Η αποτίμηση των μεθόδων καθαρισμού είναι θεμελιώδους σημασίας όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.2. Μέσω της διεργασίας της αποτίμησης είναι εφικτή η επιλογή της ή των μεθόδων καθαρισμού που τελικά θα εφαρμοστούν σε ένα ιστορικό κτίριο (για συγκεκριμένο υλικό και συγκεκριμένο τύπο φθοράς), καθώς λαμβάνει χώρα κρίση επί της αποτελεσματικότητάς τους. Για να ολοκληρωθεί η κρίση επί της αποτελεσματικότητας μιας επέμβασης καθαρισμού πρέπει να διατυπωθούν με σαφήνεια και ακρίβεια τα χαρακτηριστικά τα οποία οφείλει να πληρεί η καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα βέβαια με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει.

Δυστυχώς όμως η επιστημονική κοινότητα δεν έχει οριοθετήσει πλήρως έως σήμερα, τις αντικειμενικές παραμέτρους που διέπουν την επιτυχημένη εφαρμογή μιας μεθόδου καθαρισμού. Η άποψη αυτή είχε ήδη διατυπωθεί από τους G. Biscontin et al [8] από το 1995. Σήμερα, 16 χρόνια μετά δεν έχουν οριοθετηθεί σαφώς:

1. τα ακριβή χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει μια καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει, τα συγκεκριμένα μεγέθη - παράμετροι που θα πρέπει να μετρηθούν για να δώσουν τιμή σε αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα αποδεκτά όρια αυτών των μεγεθών - παραμέτρων,
2. το ποιες είναι οι κατάλληλες τεχνικές-μέθοδοι που θα πρέπει να εφαρμοστούν για να μετρηθούν τα μεγέθη - παράμετροι των χαρακτηριστικών που θα πρέπει να έχει μια καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει.

Στα δύο παρακάτω υποκεφάλαια, ακολουθεί βιβλιογραφική επισκόπηση και σχολιασμός των κριτηρίων και των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα στην παγκόσμια βιβλιογραφία για τα δύο διατυπωθέντα ερωτήματα.

2.1.1 Χαρακτηριστικά καθαρισμένης επιφάνειας ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς

2.1.1.1 Φαιόμαυρες κρούστες

Όσον αφορά στο πρώτο ζήτημα οφείλουμε καταρχάς να αναζητήσουμε τα ακριβή χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει μια καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει. Συνεπώς, ξεκινώντας από τον πιο συχνά συναντόμενο τύπο φθοράς στα αστικά ρυπασμένα περιβάλλοντα, που είναι αυτός των φαιόμαυρων κρούστων, οφείλουμε να απαντήσουμε στα κάτωθι ερωτήματα:

1. Τι πρέπει να έχει απομακρυνθεί ή να έχει διατηρηθεί στην αρχιτεκτονική επιφάνεια μετά από μια επέμβαση καθαρισμού;
2. Ποια πρέπει να είναι η επιφανειακή υφή, μορφολογία και συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας; Λεία, τραχιά, συνεκτική, μη συνεκτική, άλλη; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την επιφανειακή υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας;
3. Ποια πρέπει να είναι η γενικότερη αισθητική εντύπωση, καθώς και το χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας;

4. Πόσο γρήγορα θα επανεμφανιστεί η φθορά;

Ερώτημα 1: Τι πρέπει να έχει απομακρυνθεί ή να έχει διατηρηθεί στην αρχιτεκτονική επιφάνεια μετά από μια επέμβαση καθαρισμού;

Σε σχέση με το πρώτο ερώτημα καθίσταται σαφές από τη βιβλιογραφία ότι πάθε είδους πάτινα και πολυχρωμία που πιθανά εμπεριέχεται στην κρούστα πρέπει να διατηρείται για να θεωρηθεί αποδεκτός ο προτεινόμενος καθαρισμός και η καθαρισμένη επιφάνεια [3], [4], [64], [65], κ.ά.. Παράλληλα, το σύνολο των ελληνικών επιστημονικών ομάδων στις δημοσιεύσεις τους, σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, [28], [29], [66], [67], [68], [69] υιοθετούν πλήρως την άποψη Σκουλικίδη, η οποία προκύπτει από το προτεινόμενο μοντέλο γυψοποίησης του γαλβανικού στοιχείου, και αναφέρει ότι το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου μιας φαιόμαυρης κρούστας πρέπει να διατηρείται ανέπαφο μετά από μια επέμβαση καθαρισμού, αφού (α) αυτό διασώζει και προστατεύει τις λεπτομέρειες των ανάγλυφων, οι οποίες έχουν εξαιρεθεί από τη διεπιφάνεια γύψου - μαρμάρου και (β) ο σχηματισμός του γύψου ευνοείται στα περατωτικά όρια των κόκκων της πέτρας και η απομάκρυνσή του συνεπάγεται αποκόλληση κομματιών [3]. Συνεπώς, το απομακρυνόμενο στρώμα από μια φαιόμαυρη κρούστα πρέπει να είναι το πρώτο επιφανειακό στρώμα, όπου συνήθως περιλαμβάνει αδροκρυσταλλικό γύψο, καθώς και μαύρες επικαθήσεις ή/και επικαθήσεις σωματιδίων σκόνης δηλ. σωματίδια αιθάλης, υδρογονάνθρακες, σωματίδια αργιλοπυριτικής σύστασης και μεταλλικά ιόντα, συστατικά τα οποία καταλύουν την αντίδραση της γυψοποίησης και προκαλούν αισθητική αλλοίωση στις μαρμάρινες επιφάνειες.

Στις ξένες όμως ερευνητικές ομάδες οι απόψεις δίστανται. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν ερευνητές που στις δημοσιεύσεις τους, είτε δεν θέτουν καθόλου το θέμα της διατήρησης του μικρό-κρυσταλλικού γύψου, αναφερόμενες στα αποτελέσματά τους για το αν χάθηκε αυθεντικό υλικό εν γένει ή για το αν έχουμε απομάκρυνση μαύρων επικαθήσεων και δεν διευκρινίζουν αν αυτό το στρώμα του γύψου διατηρείται [14], [19], [20], [22], [70], [71], ή παρουσιάζουν στα αποτελέσματά τους επιφάνειες στις οποίες έχει λάβει χώρα πλήρης απομάκρυνση του γύψου, γεγονός που δεν σχολιάζεται ως μη αποδεκτό, [72], [78], [94]. Άλλοι ερευνητές, όπως η V. Verges – Belmin [64], [73], οι H. Siedel et al [90], οι R. Pini et al [91], οι S. Siano et al [92], και οι S. Klein et al [81] συμφωνούν με τη διατήρηση του μικρο-κρυσταλλικού γύψου μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού φαιόμαυρων κρουστών.

Ερώτημα 2: Ποια πρέπει να είναι η επιφανειακή υφή, μορφολογία και συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας; Λεία, τραχιά, συνεκτική, μη συνεκτική, άλλη; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την επιφανειακή υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας;

Σε σχέση με το δεύτερο ερώτημα υπάρχει η άποψη ότι η επιδιωκόμενη επιφάνεια θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο λεία (μικρότερη τραχύτητα), έτσι ώστε να διαθέτει τη μικρότερη δυνατή ειδική επιφάνεια και συνεπώς τη μικρότερη επιδεκτικότητα στη φθορά δηλ. μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο χρόνο [2], [61]. Μέχρι σήμερα όμως δεν έχει λάβει χώρα σαφής συσχέτιση της τραχύτητας μιας καθαρισμένης επιφάνειας με την ανθεκτικότητα που αυτή θα πρέπει να παρουσιάζει στο χρόνο, [64] παρόλο που στην πρόσφατη βιβλιογραφία

βρίσκει κανείς κάποιες δημοσιεύσεις (π.χ. [11], [72]), οι οποίες ασχολούνται με την πιο συστηματική καταγραφή μετρήσεων σχετικών με την τραχύτητα (β.λ. 2.1.2).

Παράλληλα, δεν θα πρέπει να διαπιστώνεται στην καθαρισμένη επιφάνεια η παρουσία νέων σπών και ρωγμών ή διεύρυνση των ήδη υπαρχόντων, [3]. Σε σχέση με αυτή τη διαπίστωση οι Mossoti et al [11] εισαγάγουν το κριτήριο της συνοχής του λίθου μετά τον καθαρισμό, ορίζοντας για αυτό το σκοπό τα μεγέθη της πυκνότητας ρηγματώσεων και του συντελεστή ευθρυπτότητας, τα οποία και αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο. Επιπλέον, θέτουν ένα καίριο ερώτημα: Ποια επιφάνεια μετά τον καθαρισμό είναι λιγότερο επιδεκτική στη φθορά δηλ. περισσότερο ανθεκτική στο χρόνο;

(α) αυτή που διατηρεί τις μικρορηγματώσεις και την τραχύτητα στα επίπεδα που δημιουργήθηκαν μακροχρόνια κάτω από την επίδραση των περιβαλλοντικών φορτίων, ή
(β) αυτή που παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα μικροδομής δηλ. μικρορηγματώσεων, και τραχύτητας;

Και απαντούν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ρηγματώσεων και η επιφανειακή τραχύτητα, τόσο περισσότερο αποτελεσματική θα είναι η πρωτογενής διαδικασία εναπόθεσης ατμοσφαιρικών ρύπων και σωματιδιακής ύλης, που τρέφει τους μηχανισμούς και ελέγχει την ανάπτυξη του φορτίου της «βρωμιάς» (soiling). Μακροπρόθεσμα, το αυξανόμενο φορτίο βρωμιάς οδηγεί σε μη αντιστρεπτή φθορά του υποστρώματος της πέτρας, φθορά η οποία εμφανίζεται ως περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας ρηγματώσεων και της επιφανειακής τραχύτητας [11].

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην υφή και τη μορφολογία της καθαρισμένης επιφάνειας είναι αυτή της διαβρεξιμότητας. Με τον όρο διαβρεξιμότητα εννοούμε την ικανότητα της καθαρισμένης επιφάνειας να παραμένει υγρή μετά τη διαβροχή της. Η παράμετρος αυτή είναι σημαντική, αφού οι αντιδράσεις που οδηγούν στην γυψοποίηση εννοούνται από την παρουσία του νερού και λαμβάνουν χώρα κυρίως υπό την παρουσία του (υπενθυμίζεται ότι ο μηχανισμός της ξηρής εναπόθεσης θεωρείται ότι δε συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στη γυψοποίηση). Καθίσταται σαφές λοιπόν ότι η συγκεκριμένη παράμετρος (δηλ. αυτή της διαβρεξιμότητας) μπορεί να αποτελέσει δείκτη της ανθεκτικότητας στο χρόνο ενός καθαρισμού, όπως και η τραχύτητα [64]. Όμως, όπως και στην περίπτωση της τραχύτητας, δεν έχει λάβει χώρα σαφής συσχέτιση της διαβρεξιμότητας μιας καθαρισμένης επιφάνειας με την ανθεκτικότητα που αυτή θα πρέπει να παρουσιάζει στο χρόνο, [64].

Ερώτημα 3: Ποια πρέπει να είναι η γενικότερη αισθητική εντύπωση, καθώς και το χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας;

Σε σχέση με το τρίτο ερώτημα η γενικότερη αισθητική μιας καθαρισμένης επιφάνειας παραμένει καθαρά υποκειμενικό ζήτημα αν και έχουν λάβει χώρα ακόμα και στατιστικής φύσης μελέτες για την περιγραφή της αισθητικής ιστορικών κτιρίων καθαρισμένων και μη καθαρισμένων [74]. Όσον αφορά στο χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας η επιστημονική κοινότητα δείχνει να έχει καταλήξει στην μέτρησή του μέσω της χρωματομετρίας και της χρήσης του ενιαίου χρωματικού χώρου CIELab, χωρίς όμως να έχει καταλήξει σε συγκεκριμένα αποδεκτά όρια τιμών των μετρούμενων χρωματικών παραμέτρων [29], [61], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82]. (Στο CIELab μετρείται η συνολική διαφορά του

χρώματος ΔΕ, σύμφωνα με τον τύπο: $\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ όπου ΔL^* είναι η διαφορά λαμπρότητας, Δa^* η διαφορά στο κόκκινο-πράσινο, Δb^* η διαφορά στο κίτρινο-μπλε), [83], [84], [85]. Αντικειμενική δυσκολία είναι προφανώς το γεγονός του ότι δεν μπορεί κανείς να γνωρίζει τις χρωματικές παραμέτρους του εξεταζόμενου υλικού πριν τη φθορά και αυτό οδηγεί σε διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης στην προσπάθεια επεξήγησης των αποτελεσμάτων ακόμα και από ίδιους ερευνητές (π.χ. [29], [81]). Αναλυτικότερα, υπάρχουν ερευνητικές ομάδες οι οποίες αποτιμούν τις μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων μέσω της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ [75], [76], [82], [78], [79] θεωρώντας σαν αρχικά L, a, b, αυτά που μετριοούνται πριν την επέμβαση καθαρισμού· άλλες ομάδες ερευνητών υπολογίζουν το ΔΕ θεωρώντας σαν αρχικές τιμές L, a, b, αυτές που μετρούνται από δοκίμια λατομείου [72], ή δοκιμίων λατομείου που έχουν υποστεί δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης και έχουν αποκτήσει στρώμα γυψοποιημένης επιφάνειας [81]· ενώ άλλοι καταγράφουν και συγκρίνουν τα L, a, b, των καθαρισμένων επιφανειών για να αποτιμήσουν τις εφαρμοζόμενες μεθόδους καθαρισμού [29], [90]. Παράλληλα, εξαιτίας του φαινομένου του κιτρινίσματος (yellowing ή solarization effect) που επέρχεται σε επιφάνειες οι οποίες έχουν καθαριστεί με Nd:YAG laser κυρίως στα 1064 nm, οι χρωματικές μεταβολές στη διαφορά κίτρινου - μπλέ (Δb) παρουσιάζονται ως πολύ σημαντικές από τη βιβλιογραφία, αφού περιγράφουν ποσοτικά αυτό το μειονέκτημα του laser καθαρισμού [29], [73], [81].

Ερώτημα 4: Πόσο γρήγορα θα πρέπει να επανεμφανιστεί η φθορά;

Σε σχέση με το τέταρτο ερώτημα αυτό δηλ. που σχετίζεται με την ανθεκτικότητα στο χρόνο ή αλλιώς με την επιδεκτικότητα στη φθορά μετά τον καθαρισμό, οι βιβλιογραφικές αναφορές που βρέθηκαν δεν είναι πολλές. Πιο συγκεκριμένα, η K. Kouzeli [87], και οι A. Moropoulou, & S. Kefalonitou [88], για να αποτιμήσουν την ανθεκτικότητα στο χρόνο των προτεινομένων επεμβάσεων καθαρισμού που έλαβαν χώρα σε φαιόμαυρες κρούστες εφάρμοσαν δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης με ατμόσφαιρα SO₂ σε καθαρισμένα δοκίμια και δοκίμια λατομείου. Συγκρίνοντας το πάχος της γυψοποιημένης επιφάνειας μετά τις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης στα δοκίμια μνημείου και λατομείου συμπέραναν τη μελλοντική επιδεκτικότητα στη φθορά της γυψοποίησης των καθαρισμένων επιφανειών. Οι M. E. Young et al [89] συνέκριναν τους ρυθμούς επιφανειακής φθοράς (χωρίς να διευκρινίζουν όμως στη δημοσίευση αυτή σε ποιες φθορές αναφέρονται, ποιες ήταν οι φθορές που προϋπήρχαν ή πως υπολογίστηκαν οι ρυθμοί αυτοί), ανάμεσα σε ογδόντα περίπου κτίρια (όπου επεμβάσεις καθαρισμού είχαν λάβει χώρα 25 χρόνια πριν) και σε εξήντα ακαθάριστα στη Μ. Βρετανία. Διαπίστωσαν μάλιστα ότι ο ρυθμός επιφανειακής φθοράς των κτιρίων που καθαρίστηκαν είναι κατά 25 φορές υψηλότερος από το ρυθμό φθοράς των κτιρίων που δεν υποβλήθηκαν σε καθαρισμό. Βέβαια, οι επεμβάσεις καθαρισμού που είχαν λάβει χώρα στη Μ. Βρετανία 25 χρόνια πριν την ημερομηνία της δημοσίευσης (2000), ανήκουν στις μη προτεινόμενες τεχνικές σε ιστορικά κτίρια όπως αναφέρεται και στο Κεφ. 1.3, αφού πρόκειται για υγρές και ξηρές ψηγματοβολές, υδροβολές υψηλής πίεσης, σφουράκια και χημικοί καθαρισμοί με υδροφθορικό οξύ και αλκαλικά μέσα. Τέλος, οι C. M. Grossi et al [80] χρησιμοποιούν τη χρωματομετρία και τον ενιαίο χρωματικό χώρο CIE Lab, για να μετρήσουν μέσω των μεταβολών της λαμπρότητας L, το βαθμό "μαύρης βρωμιάς" (black soiling) δηλ.

την εναπόθεση μαύρων επικαθήσεων, σε δοκίμια λατομείου διαφόρων λίθων (ασβεστόλιθος, μάρμαρο, κ.ά.) μετά από την έκθεσή τους στο φυσικό περιβάλλον σε περιοχές προστατευμένες και απροστάτευτες από το νερό της βροχής. Η συγκεκριμένη δουλειά αποτελεί καλή προκαταρκτική εργασία αναφοράς για το σχεδιασμό ενός πειράματος σχετικού με την αποτίμηση στο χρόνο επεμβάσεων καθαρισμού μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, γι αυτό και αναφέρεται.

Παράλληλα, πιστεύεται ότι: (α) η παράμετρος της τραχύτητας που εκτιμά ποσοτικά τη μεταβολή της υψής και της μορφολογίας της επιφάνειας που υπεβλήθη σε καθαρισμό, καθώς και (β) ο βαθμός διαβρεξιμότητας της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό δηλ. η ικανότητα της καθαρισμένης επιφάνειας να παραμένει υγρή μετά τη διαβροχή της, είναι δείκτες της ανθεκτικότητας στο χρόνο ενός καθαρισμού [64], [11]. Βέβαια, μέχρι σήμερα (όπως προαναφέρθηκε), δεν είναι σαφής η συσχέτιση των δύο παραπάνω χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας με την ανθεκτικότητα που αυτή θα πρέπει να παρουσιάζει στο χρόνο [64].

Η θέση, ο προσανατολισμός και γενικότερα το μικροκλίμα στο οποίο βρίσκεται η επιφάνεια, καθώς και η ατμοσφαιρική ρύπανση θα ευνοήσουν τη δημιουργία του ίδιου τύπου φθοράς που υπήρχε και πριν τον καθαρισμό. Οι Mossoti et al [11] συμπληρώνοντας την παραπάνω σκέψη θεωρούν ότι οι επεμβάσεις καθαρισμού επηρεάζουν με διαφορετικούς τρόπους τις μικρο-μορφολογικές μεταβλητές της πέτρας. Θεωρούν ότι οι μακροπρόθεσμες αισθητικές και δομικές ιδιότητες της πέτρας συνδέονται στενά με την πλευρική και κάθετη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων και των αλάτων - γύψου, καθώς και με τη μηχανική συνοχή των κόκκων της μήτρας του υλικού, και συνεπώς με την επέμβαση καθαρισμού.

2.1.2 Αποπλυμένες Επιφάνειες

Ένας εξίσου συχνά απαντώμενος τύπος φθοράς είναι αυτός των αποπλυμένων επιφανειών στις περιοχές που είναι εκτεθειμένες στο νερό της βροχής. Ο αριθμός των βιβλιογραφικών αναφορών που βρέθηκαν σε σχέση με τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί η καθαρισμένη επιφάνεια που παρουσίαζε τον τύπο φθοράς των αποπλυμένων επιφανειών, ήταν εξαιρετικά περιορισμένος (H. Siedel et al [90], Mossoti et al [11], Moropoulou et al [75], [76]). Στην προσπάθεια απάντησης στα ερωτήματα τα οποία ετέθησαν και στην περίπτωση της φαιόμαυρης κρούστας, μπορούμε να πούμε ότι:

Ερώτημα 1: Τι πρέπει να έχει απομακρυνθεί ή να έχει διατηρηθεί στην αρχιτεκτονική επιφάνεια μετά από μια επέμβαση καθαρισμού;

Επιτρέπεται να λάβει χώρα απομάκρυνση μόνο των επιφανειακών μαύρων επικαθήσεων και επικαθήσεων σκόνης με εξαιρετικά ήπιους τρόπους, αφού οι αποπλυμένες επιφάνειες σχηματίζονται μέσω της έκπλυσης του ασβεστίτη από την όξινη βροχή [90], [11]. Ο γύψος, ο οποίος μπορεί να υπάρχει και που συνήθως αναπτύσσεται (ανάλογα με την μερική προστασία της προς εξέτασης περιοχής) σε μικρο-ρωγμές και στα περατωτικά όρια των κόκκων του ασβεστίτη, πρέπει να διατηρείται για τους αντίστοιχους λόγους που προαναφέρονται στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών. Περαιτέρω διευκρινίσεις χρειάζονται για το αν θα πρέπει να διατηρείται ή όχι ο ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης, ο

οποίος συχνά βρίσκεται στις αποπλυμένες επιφάνειες και είναι περισσότερο πορώδης και ευάλωτος από τον αρχικό [59].

Ερώτημα 2: Ποια πρέπει να είναι η επιφανειακή υφή, μορφολογία και συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας; Λεία, τραχιά, συνεκτική, μη συνεκτική, άλλη; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την επιφανειακή υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας;

Σε σχέση με τη μορφολογία και την υφή της επιφάνειας δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία σαφή κριτήρια. Κατ' αντιστοιχία με τις φαιόμαυρες κρούστες μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι η όποια διαφορά επέλθει στη μορφολογία της επιφάνειας αυτή δε θα πρέπει να συνοδεύεται από σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, ενώ παράλληλα δεν θα πρέπει να έχουν δημιουργηθεί νέες ρωγμές ή κρατήρες. Βάσει αυτού οι Mossoti et al [11] εισαγάγουν το κριτήριο της συνοχής του λίθου μετά τον καθαρισμό, ορίζοντας σαν μετρήσιμα μεγέθη για αυτό το σκοπό την πυκνότητα ρηγματώσεων και το συντελεστή ευθρυπτότητας, τα οποία και αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

Ερώτημα 3: Ποια πρέπει να είναι η γενικότερη αισθητική εντύπωση, καθώς και το χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας;

Αντίστοιχα, σε σχέση με την αισθητική και το χρώμα μιας αποπλυμένης επιφάνειας μετά τον καθαρισμό, ισχύουν εν γένει οι διαπιστώσεις που αναφέρονται πιο πάνω για τις φαιόμαυρες κρούστες. Σημαντική διαφορά είναι ότι εδώ η συνολική μεταβολή χρώματος ΔE, καθώς και οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων L, a, b, πρέπει να κυμαίνονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από ότι σε μια φαιόμαυρη κρούστα, αφού στην περίπτωση της αποπλυμένης επιφάνειας δεν υπάρχουν σημαντικά ποσοστά μαύρων επικαθήσεων, οι οποίες προκαλούν τη χρωματική αλλοίωση των επιφανειών. Με την άποψη αυτή συμφωνούν και τα πειραματικά αποτελέσματα των H. Siedel et al [90].

Ερώτημα 4: Πόσο γρήγορα θα πρέπει να επανεμφανιστεί η φθορά;

Τέλος, σε σχέση με την ανθεκτικότητα στο χρόνο, την οποία θα πρέπει να επιδεικνύουν οι αποπλυμένες επιφάνειες μετά τον καθαρισμό τους, δεν βρέθηκε κάποια βιβλιογραφική αναφορά. Βέβαια, και πάλι ισχύουν οι αντίστοιχες διαπιστώσεις, οι οποίες αναφέρθηκαν και στην περίπτωση της φαιόμαυρης κρούστας.

2.1.2 Κατάλληλες τεχνικές για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών καθαρισμένης επιφάνειας και την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού

Στην παγκόσμια βιβλιογραφία της συντήρησης της πέτρας υπάρχουν αρκετές δεκάδες δημοσιεύσεις για τις επεμβάσεις καθαρισμού. Οι περισσότερες παρουσιαζόμενες μελέτες αποτιμούν την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων μεθόδων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν και καταγράφουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, χωρίς να θέτουν, όπως προείπαμε, κριτήρια για τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει η καθαρισμένη επιφάνεια.

Λιγοστές είναι επίσης οι μελέτες οι οποίες αποτιμούν τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας κάθε επέμβασης καθαρισμού [64] [61]. Καταγραφή και εκτίμηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού παρουσιάζονται από την V. Verges-Belmin [64], ενώ οι J. D. Rodrigues et al [6], και A. Morouliou et al [75, 86] προσπαθούν να διαμορφώσουν ένα πρωτόκολλο εργασιών για τις πιλοτικές και εργοληπτικές εργασίες καθαρισμού.

Τεχνικές αποτίμησης Χημικής και Ορυκτολογικής Σύστασης των επιφανειών

Από την αρχή της βιβλιογραφικής επισκόπησης καθίσταται σαφές, ότι οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται διαχρονικά στην αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού μαρμάρινων επιφανειών, είναι αυτές που σχετίζονται με τη χημική και την ορυκτολογική σύσταση. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι σταθερά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (FTIR), η Οπτική Μικροσκοπία (OM) και το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, (SEM-EDS). Η χρησιμότητά τους είναι μεγάλη και παρότι πρόκειται για τεχνικές που απαιτούν τη λήψη δειγμάτων, οπότε και είναι καταστρεπτικές για την προς εξέταση επιφάνεια, χρησιμοποιούνται τόσο πριν τον καθαρισμό για το χαρακτηρισμό της φθοράς, όσο και μετά από αυτόν για την αποτίμησή του - το FTIR είναι η λιγότερο καταστρεπτική, αφού λίγα mg επιφανειακής σκόνης επαρκούν, ενώ τα OM και SEM-EDS απαιτούν τη λήψη στερεών δειγμάτων από την εξεταζόμενη επιφάνεια-. Με το FTIR λαμβάνονται πληροφορίες σε σχέση με τις χημικές ενώσεις που βρίσκονται στην επιφάνεια μετά τον καθαρισμό [3], [64], [71], [75], [82], [69], [68], [28], [66], [101]. Με την εξέταση λεπτών τομών στο OM βλέπουμε τη διαστρωμάτωση της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό δηλ. αν παραμένει το μικροκρυσταλλικό στρώμα γύψου, αν διατηρούνται τα στρώματα της πάτινας (όταν αυτή υπάρχει), αν έχουν απομακρυνθεί οι μαύρες επικαθήσεις κ.ά. (βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιούν το OM για τον προαναφερόμενο λόγο: [3], [29], [64], [72], [69], [68], [28], [66], [65], [79], [73]). Με το SEM λαμβάνονται πληροφορίες σε σχέση με τη μορφολογία και την υφή της καθαρισμένης επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα με τη χρήση του EDS μπορεί να λάβει χώρα χημική ανάλυση της επιφάνειας των καθαρισμένων περιοχών [3], [64], [75], [72], [69], [66], [68], [28], [20], [65], [81]. Στην περίπτωση μάλιστα που τα εξεταζόμενα δείγματα στο SEM είναι τομές [3], [67], [11], [88], [87] βλέπουμε τη διαστρωμάτωση της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό, λαμβάνοντας πληροφορίες αντίστοιχες με αυτές του OM με το συγκριτικό πλεονέκτημα όμως, της ταυτόχρονης χημικής ανάλυσης από το EDS. Το μοναδικό μειονέκτημα του EDS είναι ότι δε δίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση για τον άνθρακα, γεγονός που καθιστά αναποτελεσματική τη χρήση του στις περιπτώσεις παρουσίας επικαλύψεων οργανικής σύστασης, όπως π.χ. παλαιότερα προστατευτικά στρώματα. Αυτές οι επικαλύψεις όμως μπορούν να ταυτοποιηθούν με τη συνδυασμένη χρήση OM και FTIR. Μια πρόσφατη τεχνική, και ραγδαία αναπτυσσόμενη στον τομέα της χημικής ανάλυσης των προς καθαρισμό επιφανειών είναι το LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) το οποίο χρησιμοποιείται σαν μια αυτόνομη on-line διαγνωστική τεχνική κατά τη διάρκεια της επέμβασης καθαρισμού με Nd:YAG laser [66], [28], [68], [69], [81]. Με την ίδια ακτίνα laser είναι δυνατό να επιτευχθεί ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση της κρούστας, η οποία

απομακρύνεται από το υπόστρωμα μέσω του laser. Κατ' ουσία η στοιχειακή ανάλυση λαμβάνει χώρα στο πλάσμα που προκύπτει από την εξάχνωση της κρούστας κατά τη διάρκεια του καθαρισμού [28]. Έτσι, μελετώντας το ρυθμό απομάκρυνσης - αποδόμησης της κρούστας (ablation rate) εκτός από τη χημική σύσταση παίρνουμε πληροφορίες για τη διαστρωμάτωσή της. Το μεγάλο μειονέκτημα του LIBS είναι το ότι δεν μπορεί να ανιχνεύσει και συνεπώς να δώσει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση για το θείο [28]. Το θείο όπως διαπιστώθηκε πρόσφατα [93] μπορεί να ανιχνευτεί μόνο υπό κενό, γεγονός που προκαλεί τεράστιες πρακτικές δυσκολίες ακόμα και σε καθαρισμούς που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο, πόσο μάλλον αν πρόκειται το laser και το LIBS να χρησιμοποιηθούν επί τόπου για τον καθαρισμό περιοχών σε κάποιο μνημείο.

Σημείωση

Σημαντικό στοιχείο σε σχέση με την κατεύθυνση που έχει η παγκόσμια βιβλιογραφία για τις επεμβάσεις καθαρισμού είναι το γεγονός ότι την τελευταία δεκαετία σχεδόν το σύνολο των δημοσιεύσεων ασχολούνται με εφαρμογές laser καθαρισμών αποκλειστικά [29], [66], [28], [68], [69], [81], [91], [90], [73], [79], ή σε συγκριτικές μελέτες με άλλες παραδοσιακές τεχνικές [11], [27], [26], [24], [21], [92], [20], [72].

Το laser είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος και είναι προφανές ότι προσφέρει μεγάλο πεδίο για έρευνα σε σχέση κυρίως με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να φέρει (πυκνότητα ενέργειας, διάμετρος ακτίνας laser, μήκος κύματος λειτουργίας, αριθμός παλμών, κ.ά.) για να επιτευχθεί ένας επιτυχημένος καθαρισμός. Σε έμπειρα χέρια και ιδίως όταν συνδυάζεται με το LIBS καθίσταται μια εξαιρετικά εκλεκτική και ελεγχόμενη μέθοδος. Όμως, λόγω του μεγάλου κόστους της συσκευής και της μικρής ταχύτητας δράσης του στον καθαρισμό, η χρήση του laser είναι δύσκολη ιδίως σε εργοληπτικό επίπεδο επί τόπου στην πραγματική κλίμακα του μνημείου, όπου οι παραδοσιακές τεχνικές των παστών ή των μικροψηγηματοβολών και των υγρών μικροψηγηματοβολών συνήθως προτιμούνται (λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας δράσης και χαμηλότερου κόστους). Το laser συνήθως επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό αντικειμένων, αγαλμάτων, πινάκων, κ.ά. σε πραγματική κλίμακα. Αυτό είναι προφανές ότι προκαλεί μια διάσταση ανάμεσα στην έρευνα για τον καθαρισμό και την πρακτική εφαρμογή του, αφού για τις συνήθως εφαρμοζόμενες τεχνικές καθαρισμού στα μνημεία δεν λαμβάνει χώρα περαιτέρω διερεύνηση για πιθανή βελτίωση της δράσης τους.

Όλα τα παραπάνω συνέβαλλαν και σε άλλες διαφοροποιήσεις στη βιβλιογραφία όσον αφορά στις πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού.

Πιο συγκεκριμένα, πριν οι ερευνητικές εργασίες επικεντρωθούν στην αποτίμηση των καθαρισμών με laser, λόγω της χρήσης των παστών και άλλων τεχνικών, όπως η μικροψηγηματοβολή, η υδροβολή, κ.ά. λάμβανε χώρα προσδιορισμός των προϊόντων διάβρωσης (κυρίως διαλυτών αλάτων), που έχουν απομακρυνθεί από το υπόστρωμα ή έχουν παραμείνει σε αυτό, με τις κάτωθι τεχνικές:

- Με ιονική χρωματογραφία (I.C., Ion Chromatography) λάμβανε χώρα ο προσδιορισμός των ανιόντων των διαλυτών αλάτων που έχουν απομακρυνθεί από το υπόστρωμα (κυρίως τα θειικά), και βρισκόνταν στις πάστες καθαρισμού, ή ο προσδιορισμός των

διαλυτών αλάτων (κυρίως τα θειικά), που είχαν παραμείνει στο υπόστρωμα, με αναλύσεις του νερού έκπλυσης που συλλεγόταν μετά την επέμβαση καθαρισμού [94], [82].

- Με φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης (A.A.S. Atomic Absorption Spectroscopy) γινόταν προσδιορισμός των ιόντων ασβεστίου μαγνησίου κ.α. που βρίσκονταν στις πάστες καθαρισμού και άρα είχαν απομακρυνθεί από την επιφάνεια [95], [20], [14]. Μάλιστα, επειδή τα ιόντα ασβεστίου μπορούσαν να προέρχονται είτε από το γύψο ή από το ασβεσπιτικό υπόστρωμα, η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των θειικών και των ιόντων ασβεστίου έδειχνε αν κάποια μέθοδος καθαρισμού αφαίρεσε αυθεντικό υλικό [82].
- Με μέτρηση της αγωγιμότητας [19], [13], [75] και του pH [14], [75] του νερού έκπλυσης με ειδικά αγωγιμόμετρα in situ ή συλλογή του νερού έκπλυσης και εφαρμογή των παραπάνω μετρήσεων στο εργαστήριο με παράλληλο ημιποσοτικό προσδιορισμό των διαλυτών αλάτων (θειικά, χλωριόντα κ.ά.) με κλασσικές μεθόδους χημικής ανάλυσης [75].

Η χρήση των πειραματικών αυτών τεχνικών δεν αναφέρεται πλέον στη βιβλιογραφία ακόμα και στις περιπτώσεις που λαμβάνει χώρα συγκριτική μελέτη παστών και laser, ή και μόνο παστών, προφανώς γιατί δεν θα μπορούσαν να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα τουλάχιστον για την πρώτη περίπτωση. Επίσης, η μεθοδολογική προσέγγιση της σύγκρισης των συγκεντρώσεων των ιόντων ασβεστίου και των θειικών πιθανότατα (α)δεν θα είχε νόημα ύπαρξης αν αποδεκτούμε την άποψη Σκουλικίδη, ότι δηλ. ο μικρο-κρυσταλλικός γύψος πρέπει να διατηρείται, ή (β)θα παρουσίαζε μεγάλες δυσκολίες στη διαπίστωση της διατήρησης του στρώματος του μικρο-κρυσταλλικού γύψου, ιδίως όταν υπάρχουν μέθοδοι άλλες πολύ πιο αποτελεσματικές γι' αυτό, όπως το OM και το SEM-EDS.

Τεχνικές αποτίμησης της υφής και της μορφολογίας των επιφανειών

Μέχρι ακόμα και σήμερα η πιο συνηθισμένη τεχνική για την ποιοτική εκτίμηση των μορφολογικών μεταβολών της καθαρισμένης επιφάνειας είναι το SEM [20], [64], [75], [72], [81]. Μάλιστα, στη βιβλιογραφία έχει καταγράψει ο ποιοτικός έλεγχος της επιφανειακής υφής με SEM ακόμα και σε αντίγραφα των καθαρισμένων περιοχών από σιλικόνη [95], [64], έτσι ώστε να εκτιμηθεί η μορφολογία της επιφάνειας σε μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές που προκύπτουν από την δειγματοληψία της αυθεντικής επιφάνειας. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των fractals μαθηματικών και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας κατέστη εφικτή και η ποσοτική εκτίμηση παραμέτρων τραχύτητας μέσω των εικόνων SEM. Πιο συγκεκριμένα:

Οι Mossoti et al [11] χρησιμοποιούν ψηφιακή επεξεργασία εικόνων SEM δειγμάτων μαρμάρου κατεργασμένων σε τομή και μέσω fractals μαθηματικών προσδιορίζουν την τραχύτητα, την πυκνότητα ρηγματώσεων και το συντελεστή ευθρυπτότητας (τρεις δείκτες της μικροδομής) για την ποσοτική αποτίμηση των μεταβολών της μορφολογίας μαρμάρινων επιφανειών μετά από διάφορους καθαρισμούς. Η πολύ ενδιαφέρουσα αυτή εργασία αναλύεται πιο διεξοδικά παρακάτω, αφού αποτελεί πεδίο διερεύνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής. Συνοπτικά εδώ αναφέρουμε ότι οι Mossoti et al [11] είναι οι πρώτοι που εισαγάγουν στην παγκόσμια βιβλιογραφία δύο δείκτες αποτίμησης καθαρισμένων επιφανειών που σχετίζονται με τη μηχανική συνοχή του λίθου. Την πυκνότητα ρηγματώσεων

που εκτιμά την φυσικομηχανική σταθερότητα του μαρμάρου σε βάθος έως και 300μm, και το συντελεστή ευθρυπτότητας που προκύπτει από την τραχύτητα και την πυκνότητα ρηγματώσεων, και εκτιμά τόσο τη φυσικοχημική όσο και τη φυσικομηχανική σταθερότητα του μαρμάρου. Οι S. Scherer et al [100] με χρήση ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων SEM και στερεο-μικροσκοπίου, από δείγματα διαφόρων υλικών, λαμβάνουν τρισδιάστατα τοπογραφικά διαγράμματα, από τα οποία προκύπτουν μέσω fractals μαθηματικών τιμές επιφανειακής τραχύτητας.

Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται από τους G. Biscontin et al [82], και A. Moropoulou et al [71], [75], [76] για την ποιοτική εκτίμηση των μεταβολών της μορφολογίας των επιφανειών πριν και μετά από καθαρισμούς και έχει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα να είναι μη καταστρεπτική και να εφαρμόζεται επί τόπου, είναι η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM). Μάλιστα, οι P. Karsalas et al [102], [103] εφάρμοσαν ψηφιακή επεξεργασία σε εικόνες FOM πριν και μετά από πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού για να εκτιμήσουν ποσοτικά τον βαθμό απομάκρυνσης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, καθώς και τις μορφολογικές μεταβολές που υπέστησαν οι επιφάνειες. Με τη μικροσκοπία οπτικών ινών εν τέλει είναι εφικτή μια γενική επισκόπηση της επιφάνειας σε μορφολογικό επίπεδο [82], [75], [76], στο επίπεδο απομάκρυνσης των μαύρων επικαθίσεων [71], [75], [76], [102], [103], καθώς και σε επίπεδο εκτίμησης της γενικότερης αισθητικής εντύπωσης που προκαλεί μια καθαρισμένη επιφάνεια [64].

Παλαιότερα δε, οι A. Moropoulou et al [71] μελέτησαν τις μορφολογικές μεταβολές επεμβάσεων καθαρισμού μετά από ψηφιακή επεξεργασία της μακροσκοπικής τους εικόνας, κυρίως σε σχέση με την απομάκρυνση των μαύρων επικαθίσεων.

Πέρα όμως από τον έμμεσο ποσοτικό προσδιορισμό παραμέτρων τραχύτητας με χρήση ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας μικροσκοπικών ή και μακροσκοπικών εικόνων, τα τελευταία χρόνια στη βιβλιογραφία συναντά κανείς όλο και περισσότερες εργασίες που σχετίζονται με τη διερεύνηση νέων τεχνικών που αποτιμούν ποσοτικά τις μεταβολές της υφής και της μορφολογίας της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό.

Ξεκινώντας από το 1992, οι M. Young και D. Uquhart [96] χρησιμοποιώντας μηχανικό προφιλόμετρο ακίδας, μέτρησαν τις μεταβολές της τραχύτητας Ra σε επιφάνειες πορωδών λίθων, μετά από τον καθαρισμό τους με υγρές και ξηρές μικροψηματοβολές. Διαπίστωσαν ότι η επιφανειακή απώλεια μάζας εξαρτάται από την τραχύτητα, χωρίς όμως να μπορέσουν να περιγράψουν με επαρκή σαφήνεια το φαινόμενο. Μετά από αυτή την αναφορά δεν βρέθηκαν άλλες δημοσιεύσεις, οι οποίες να αναφέρονται στην ποσοτική εκτίμηση της τραχύτητας για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η άνθιση όμως του επιστημονικού κλάδου της σύγχρονης οργανολογίας επέτρεψε την επιστροφή του επιστημονικού κόσμου της συντήρησης στις ποσοτικές εκτιμήσεις της τραχύτητας τα τελευταία χρόνια. Έτσι, τα μηχανικά προφιλόμετρα ακίδας (stylus profilometry) αντικαταστάθηκαν με διαφόρων τύπων όργανα, μεγάλης διακριτικής ικανότητας, που παράγουν τρισδιάστατα τοπογραφικά διαγράμματα των εξεταζόμενων επιφανειών. Σήμερα στη βιβλιογραφία βρίσκονται πολλές διαφορετικές και νέες τεχνικές που παράγουν αυτά τα τρισδιάστατα τοπογραφικά διαγράμματα των εξεταζόμενων επιφανειών μέσω διαφορετικών θεωρητικών αρχών, αποδεικνύοντας την άνθιση του επιστημονικού

αυτού κλάδου. Από τα διαγράμματα αυτά δε, μέσω ειδικών λογισμικών είναι πλέον εφικτή η μέτρηση παραμέτρων της τραχύτητας με μεγάλη ακρίβεια. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις δημοσιεύσεις που βρέθηκαν σε αυτή τη θεματική περιοχή:

Οι N. Avdelidis et al [97] με χρήση της laser προφίλομετρίας, μελέτησαν τη μεταβολή της τραχύτητας μέσω της μέτρησης της παραμέτρου Rq σε διαφορετικά κατεργασμένα δοκίμια λατομείου, καθώς και πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού μαρμάρινων επιφανειών, (εργασία που αποτελεί τμήμα αυτής της διδακτορικής διατριβής). Οι P. Gaspar et al [72] με τη χρήση της συμβολομετρίας λευκού φωτός, μελετούν και αυτοί τη μεταβολή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq πριν και μετά τους καθαρισμούς σε διάφορους τύπους πέτρας.

Οι P. Rouli et al [98] χρησιμοποιούν για την εκτίμηση των μορφολογικών μεταβολών μετά από επεμβάσεις καθαρισμού αντικειμένων ανασκαφών, τη μέθοδο της πολυφασματικής εικόνας, τεχνική που σύμφωνα με τους ερευνητές προβλέπεται στο μέλλον να ενσωματωθεί και στον επί τόπου έλεγχο της διαδικασίας ενός καθαρισμού.

Οι J. M. Lee et al [99] κατασκεύασαν μια τεχνική, την οποία ονόμασαν τεχνική χρωματικής διαμόρφωσης (chromatic modulation technique), αποτελούμενη κυρίως από φωτο-ανιχνευτές, οπτικές ίνες και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, για να αποτιμήσουν αποκλειστικά laser καθαρισμούς μαρμάρινων επιφανειών στο εργαστήριο.

Μια άλλη τεχνική η οποία συναντάται στη βιβλιογραφία από τους N. Avdelidis & A. Moropoulou [104], N. Avdelidis et al [97], [105], [106], και A. Moropoulou et al [75], [76], [107], [108], [109] είναι η μη καταστρεπτική τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου. Με τη συγκεκριμένη τεχνική, καταγράφονται οι διαφοροποιήσεις στην απορρόφηση και την εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας μιας επιφάνειας, πριν και μετά από τον καθαρισμό. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποδίδονται τόσο στη μεταβολή της μορφολογίας της επιφάνειας, όσο και στην απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων διάβρωσης (μαύρες επικαθήσεις, γύψος, κ.ά.). Στις περιπτώσεις μάλιστα που οι αποτιμώμενες επεμβάσεις καθαρισμού έχουν βάση το νερό (υδροβολές, υγρές μικροψηγματοβολές, κ.ά.) με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου μπορούν πρόσθετα να εκτιμηθούν οι όποιες επιπτώσεις στην καθαρισμένη επιφάνεια της ύπαρξης και της κίνησης του νερού στο εσωτερικό του λίθου, ιδίως στην περίπτωση πορωδών λίθων.

Τέλος, η διαβρεξιμότητα μιας επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί μέσω της μέτρησης της γωνίας επαφής που σχηματίζει μια μικρή σταγόνα νερού όταν τοποθετείται στο προς εξέταση υπόστρωμα. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται με ειδικά γωνιόμετρα στο εργαστήριο. Συνοπτικά αναφέρεται ότι για γωνία επαφής $\theta < 90^\circ$ η επιφάνεια θεωρείται ότι διαθέτει μεγάλη διαβρεξιμότητα, ενώ για $\theta > 90^\circ$ μικρή διαβρεξιμότητα. Επί τόπου στην κλίμακα των μνημείων είναι δυνατό να λάβουν χώρα μετρήσεις συντελεστών υδατοαπορρόφησης με την χρήση του σωλήνα Kursten, όπως αναφέρουν οι H. Siedel et al [90], και η V. Verges-Belmin [64].

Τεχνικές αποτίμησης του χρώματος των επιφανειών

Όσον αφορά στο χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας, όπως ήδη προαναφέρθηκε, η επιστημονική κοινότητα δείχνει να έχει καταλήξει στην μέτρησή του με τη χρήση μη

καταστρεπτικών φασματοφωτομέτρων που ονομάζονται χρωματόμετρα και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου. Επαναλαμβάνουμε ότι για τον έλεγχο των χρωματικών μεταβολών μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, συνήθως χρησιμοποιείται ο ενιαίος χρωματικός χώρος CIE Lab, [29], [61], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και διαφορετικές προσεγγίσεις στο θέμα όπως αυτή των Mossoti et al [11] που μελετούν τις διαβαθμίσεις του γκρίζου των επιφανειών, πριν και μετά από καθαρισμούς, με τη χρήση της τεχνικής της ανακλαστογραφίας.

Σχεδιασμός αποτίμησης της ανθεκτικότητας στο χρόνο των επεμβάσεων καθαρισμού

Η ανθεκτικότητα στο χρόνο των επεμβάσεων καθαρισμού ή αλλιώς η επιδεκτικότητα στη φθορά των καθαρισμένων επιφανειών μπορεί να αποτιμηθεί με παρακολούθηση στο χρόνο (monitoring) της διατήρησης της κατάστασης συντήρησης (maintenance) της καθαρισμένης επιφάνειας. Δηλ. επανάληψη των διαδικασιών της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού μετά από αρκετούς μήνες, με μέτρηση των ίδιων χαρακτηριστικών και χρήση των ίδιων ακριβώς τεχνικών (για να είναι πλήρως συγκρίσιμα τα αποτελέσματα), έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν ο προτεινόμενος καθαρισμός πράγματι πληρεί το κριτήριο της ανθεκτικότητας στο χρόνο [64], [61]. Ένας δεύτερος τρόπος αποτίμησης της ανθεκτικότητας στο χρόνο είναι η εξέταση δειγμάτων που έχουν ληφθεί από τις καθαρισμένες επιφάνειες μετά από δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης [2]. Ο τρόπος αυτός είναι σίγουρα πιο σύντομος, αλλά είναι προφανές ότι είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν όλα τα φαινόμενα διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα στην πραγματική κλίμακα των μνημείων.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι οι παράμετροι που έχουν οριοθετηθεί μέχρι σήμερα από τους ερευνητές για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού αφορούν στην αισθητική και το χρώμα του υλικού μετά από τον καθαρισμό, καθώς και στις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού μετά από τον καθαρισμό. Οι μέθοδοι καθαρισμού ασκούν στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες χημικές, φυσικές και χρωματικές επιδράσεις και άρα η μέτρηση των μεταβολών αυτών των επιδράσεων, πριν και μετά την επέμβαση καθαρισμού, στοιχειοθετούν μια λογικά επιστημονική θεώρηση [8], [6], [82].

2.2 Αναγκαιότητα και κατευθύνσεις διερεύνησης για την ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης υλικών και το στρατηγικό σχεδιασμό επεμβάσεων καθαρισμού

Στα επόμενα κεφάλαια του ειδικού θεωρητικού μέρους λαμβάνει χώρα περαιτέρω βιβλιογραφική επισκόπηση σε συγκεκριμένες θεματικές περιοχές χρήσιμες στην μεθοδολογική προσέγγιση της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, έτσι ώστε να μπορέσει ολοκληρωμένα να ακολουθήσει η τεκμηρίωση του σχεδιασμού των πειραματικών εργασιών αυτής της διδακτορικής διατριβής.

Πιο συγκεκριμένα, από τη βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης παραμέτρων που θα μπορούσαν να προσδιορίσουν ποσοτικά, μεγέθη σχετιζόμενα με την υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή των μαρμάρινων επιφανειών πριν και μετά από επεμβάσεις καθαρισμού.

Σε αυτό το πλαίσιο, η πρώτη βιβλιογραφικά επισκοπούμενη περιοχή είναι αυτή της τριβολογίας και της επιστήμης και τεχνικής των επιφανειών (surface science & engineering) σε σχέση με την τραχύτητα και τις παραμέτρους που την περιγράφουν. Παράλληλα, παρατίθενται συνοπτικά οι βασικές αρχές της θεωρίας του λογισμικού EDGE (Mosotti et al [11]), οι οποίες βασίζονται στη ψηφιακή επεξεργασία εικόνων SEM με fractals μαθηματικά, για την εξαγωγή δεικτών αποτίμησης της μικροδομής μαρμάρινων επιφανειών μετά από επεμβάσεις καθαρισμού.

Επιπλέον, στο κεφάλαιο 2.2.3 του ειδικού θεωρητικού μέρους αναπτύσσονται οι βασικές αρχές της ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Η ασαφής λογική χρησιμοποιήθηκε με στόχο την ανάπτυξη ενός μοντέλου που να αποφαίνεται για την καταλληλότητα ή μη, επεμβάσεων καθαρισμού, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με τις κλασικές παραμετρικές μεθόδους στην επίλυση πολύπλοκων και μη καλά ορισμένων προβλημάτων, όπως αυτό της αποτίμησης καθαρισμών. Έτσι, διερευνείται η δυνατότητα να θεσπιστούν τα αποδεκτά όρια των μετρούμενων χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού και την ταξινόμησή τους σε μη αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές και προτεινόμενες.

Τέλος, στο κεφάλαιο 2.2.4 αναπτύσσονται οι βασικές αρχές ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (ΓΣΠ). Το ΓΣΠ χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε μέσω: (α) της δόμησης θεματικών υποβάθρων, (β) της απόδοσης περιγραφικών ιδιοτήτων στις χωρικές οντότητες βάσει φυσικοχημικών δεδομένων, καθώς και (γ) των εργαλείων διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων, να επιτευχθεί μεθοδολογικά ο στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού, σε σχέση με την παρακολούθηση στο χρόνο των εφαρμοσμένων επεμβάσεων καθαρισμού (monitoring).

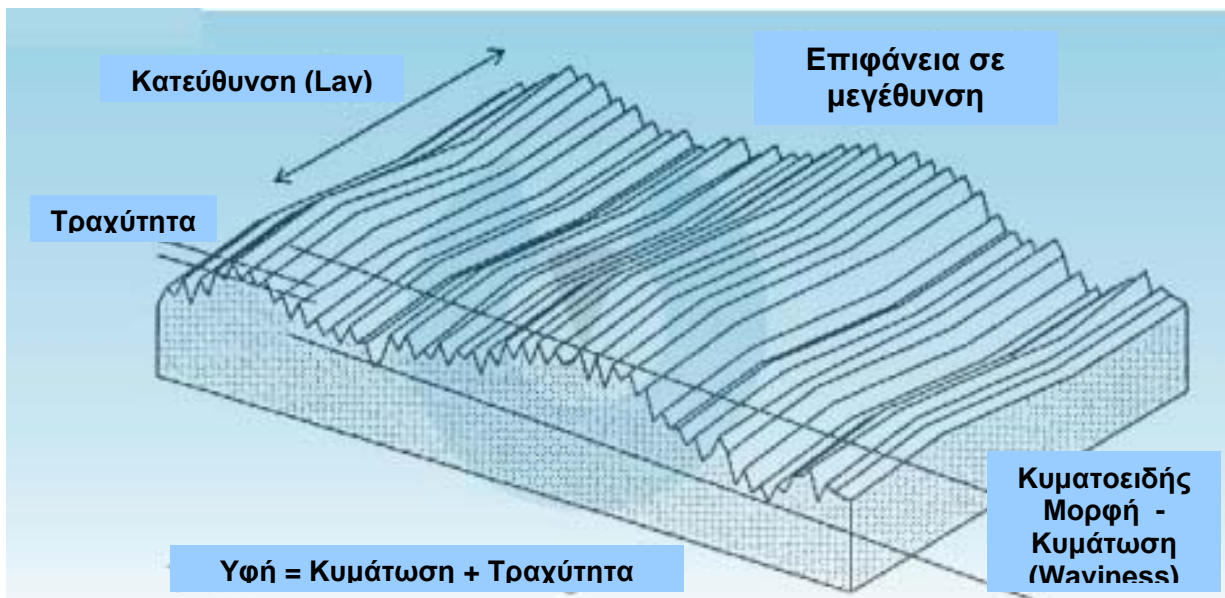
2.2.1 ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

2.2.1.1 Εισαγωγή

Μια λεία επιφάνεια μπορεί να διακριθεί από μια τραχιά με διάφορους τρόπους. Δίνουν διαφορετική αίσθηση κατά την αφή τους, ενώ ταυτόχρονα δείχνουν διαφορετικές. Η πρώτη ανακλά το φως σαν καθρέπτης, ενώ η δεύτερη όχι. Η πρώτη επιφάνεια δεν εμφανίζει κάποια μορφή, σε αντίθεση με την τραχιά επιφάνεια που εμφανίζει συνήθως μια διακριτή μορφή (κανονική ή ακανόνιστη). Επιπλέον, η λεία επιφάνεια ολισθαίνει εύκολα πάνω σε παρόμοιά της, ενώ η τραχιά εμφανίζει αξιοσημείωτες τριβές. Αυτές οι διαφορές μας επιτρέπουν να διακρίνουμε τις λείες από τις τραχιές επιφάνειες, χρησιμοποιώντας τις αισθήσεις μας, δηλαδή την αφή και την όραση. Το μειονέκτημα των παραπάνω μεθόδων έγκειται στην υποκειμενικότητά τους, αφού στηρίζονται στις αισθήσεις του παρατηρητή και όχι σε κάποιο μετρήσιμο μέγεθος. Είναι δεδομένο ότι δύο διαφορετικοί παρατηρητές δε μπορούν να έρθουν σε συμφωνία, όταν πρόκειται να αποτιμήσουν τέτοιες επιφάνειες. Οι δυσκολίες επιτείνονται όταν οι επιφάνειες παράγονται με διαφορετικές διεργασίες, όπως η τόννευση ή το τρόχισμα. Στο κατασκευαστικό και βιομηχανικό πεδίο - ιδίως στη μηχανική - ο ακριβής βαθμός της τραχύτητας είναι μεγάλης σημασίας, επιδρώντας στη λειτουργία ενός στοιχείου και πιθανώς στο κόστος του. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με αριθμητικούς όρους το πόσο λεία ή τραχιά είναι μια επιφάνεια [110].

Επιφανειακή υφή

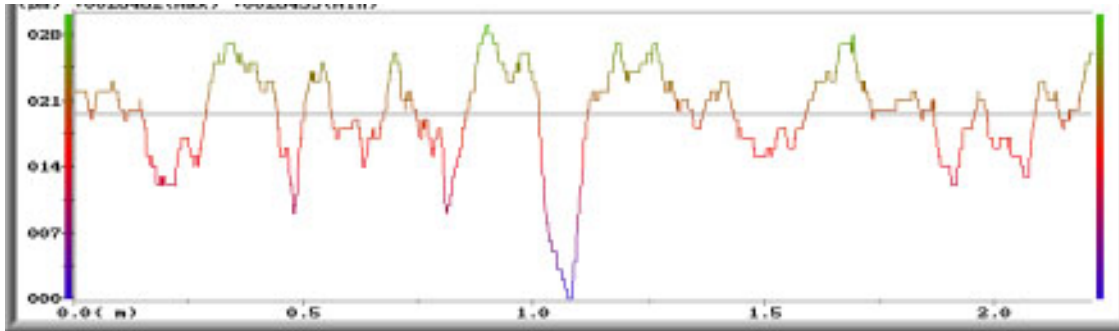
Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια θεωρητικώς λεία επίπεδη επιφάνεια μήκους 150mm. Αν στο κέντρο αυτής της επιφάνειας υπήρχε μια κοιλότητα βάθους 15μm και η υπόλοιπη επιφάνεια ήταν η ίδια, θα λέγαμε ότι η επιφάνεια παραμένει λεία, καθώς και ότι παράλληλα είναι καμπύλη. Αν η απόσταση μεταξύ των υψηλών σημείων χωριζόταν στη μέση, η επιφάνεια ακόμη θα παρέμενε λεία, καθώς και καμπύλη. Παρόλα αυτά όταν οι αποστάσεις μειώνονται ακόμη περισσότερο η επιφάνεια παύει πια να είναι λεία και γίνεται κυματοειδής, όπως οι γραμμές της άμμου στις παραλίες. Με μεγαλύτερη μείωση των παραπάνω αποστάσεων τα κύματα (ανωμαλίες όπως αποκαλούνται) είναι τόσο κοντά μεταξύ τους, ώστε το μάτι δεν αναγνωρίζει ανεξάρτητες κορυφές. Η επιφάνεια που εμφανίζει αυτά τα χαρακτηριστικά καλείται τραχιά. Επομένως, μια επιφάνεια που εμφανίζει το ίδιο ύψος ανωμαλιών θα καλείται καμπύλη, κυματοειδής ή τραχιά αναλόγως των αποστάσεων (διαστημάτων) μεταξύ αυτών των ανωμαλιών. Η καμπυλότητα είναι χαρακτηριστικό της μορφής, και παρόλο που συχνά μετράται με το ίδιο όργανο, δε λογίζεται ως μέρος της επιφανειακής υφής. Τα δύο άλλα χαρακτηριστικά - η τραχύτητα και η κυμάτωση (waviness) – συνθέτουν την υφή. Ορισμένες φορές η τραχύτητα και η κυμάτωση (waviness) καλούνται πρωτεύουσα και δευτερεύουσα υφή αντίστοιχα, όμως είναι πιο κατανοητό αν διατηρήσουμε τους περιγραφικούς ορισμούς (εικόνα 2.2.1.1 – 2.2.1.2) [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116].



εικ. 2.2.1.1 Επιφανειακή υφή [110]

Εξέταση των επιφανειών

Οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν ως παραδείγματα παρουσιάζουν ύψη ανωμαλιών, διαστήματα και σχήματα τελείως ίσα, τα οποία δε διαφέρουν κατά μήκος της επιφάνειας. Για αυτόν το λόγο οι επιφάνειες αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν θεωρητικές ή τεχνητές, γιατί όταν πρόκειται να εξετάσουμε μια πραγματική επιφάνεια, η μορφή των όρεων και των κοιλάδων μπορεί να είναι ανώμαλη ή επαναληπτική, αλλά δε θα εμφανίσει ποτέ την κανονικότητα που προαναφέραμε. Δεδομένου ότι οι ανεξάρτητες ανωμαλίες της τραχύτητας είναι πολύ μικρές για να εντοπιστούν με γυμνό μάτι, είναι χρήσιμη μια μεγεθυντική συσκευή. Ένα μικροσκόπιο έρχεται αμέσως στο μυαλό, αλλά καθώς αυτό αναδεικνύει καθαρά την οριζόντια μορφή των διαστημάτων, οι ανωμαλίες της τραχύτητας, οι οποίες είναι και οι σημαντικότερες, κυρίως τα όρη και οι κοιλάδες που είναι κάθετες στην επιφάνεια, δε διακρίνονται. Αντιθέτως, ας φανταστούμε ένα απλό όργανο, που αποτελείται από ένα μοχλό στη μια άκρη του οποίου υπάρχει μια κινητή γραφίδα και κοντά σε αυτήν μια λεπτή ακίδα που ιχνηλατεί και καταγράφει την επιφάνεια. Η διαδρομή της ακίδας με σταθερή ταχύτητα ακολουθείται και από την γραφίδα, οπότε με αυτόν τον τρόπο καταγράφεται σε μεγέθυνση η επιφάνεια σε ένα χαρτί, δίνοντάς μας ένα γράφημα με το προφίλ της επιφάνειας. Χονδρικά, ο υπολογισμός των παραμέτρων της τραχύτητας σήμερα πραγματοποιείται με έναν παρόμοιο τρόπο, με χρήση όμως ακτίνων laser αντί της ακίδας που ιχνηλατεί την επιφάνεια (στο πειραματικό μέρος περιγράφεται αναλυτικότερα η λειτουργία του laser προφίλομέτρου - laser profilometer). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να συγκρίνουμε οπτικά τα προφίλ διάφορων επιφανειών και να τα αποτιμήσουμε σχετικά με την τραχύτητά τους. Όταν έχουμε όμως να συγκρίνουμε οπτικά πολλά προφίλ επιφανειών, που σημαίνει επίπονη και υποκειμενική διαδικασία είναι αναγκαία μια αριθμητική παράμετρος, η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την αποτίμηση της τραχύτητας, εκφράζοντας τις χαρακτηριστικές



εικ. 2.2.1.3 Γραμμικό προφίλ (line profile)

2.2.1.2 Παράμετροι εξέτασης της υφής των επιφανειών

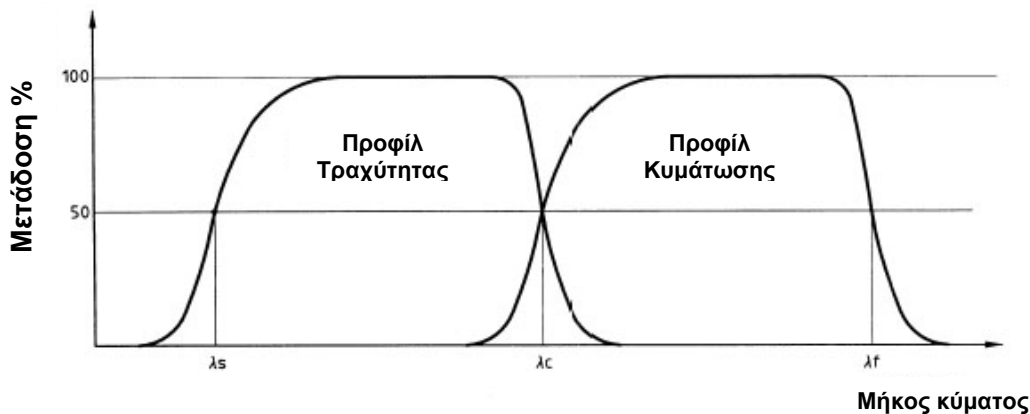
Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στους σημαντικότερους όρους που σχετίζονται με την υφή μιας επιφάνειας και θα περιγράψουμε τις σημαντικότερες από τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Τραχύτητα (Roughness)

Περιλαμβάνει τις λεπτότερες ανωμαλίες μιας επιφάνειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, τα ύψη των ανωμαλιών που οφείλονται στην τραχύτητα είναι πολύ μικρά, (τυπικά 3μm), ιδίως συγκρινόμενα με την μεταξύ τους απόσταση (τυπικά 50 μm) και το ελάχιστο μήκος αποτίμησης, το οποίο είναι 0.8mm, έτσι ώστε να έχουμε μια έγκυρη μέτρηση [110]. Η τραχύτητα είναι συνήθως αποτέλεσμα μιας ιδιαίτερης διεργασίας παραγωγής και αντανακλά την κατάσταση του υλικού [111], [112], [113], [114], [115], [116].

Κυμάτωση (Waviness)

Περιλαμβάνει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις της επιφάνειας από το βασικό σχήμα της, δηλαδή τα διαστήματα μεγαλύτερου μήκους [111], [112], [113], [114], [115], [116]. Πρόκειται για το συστατικό της υφής πάνω στο οποίο τοποθετείται η τραχύτητα [110].



εικ. 2.2.1.4 Χαρακτηριστικά μετάδοσης των προφίλ της τραχύτητας και της κυμάτωσης [111]

Υπάρχουν τρία διαφορετικά φίλτρα (φίλτρο προφίλ: το φίλτρο το οποίο διαχωρίζει τα προφίλ σε στοιχεία μακριών (μεγάλου μήκους) και βραχέων κυμάτων - BS EN ISO 11562:1998), που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των προφίλ της τραχύτητας και της κυμάτωσης, όπως φαίνονται στην εικόνα 2.2.1.4.

λs: καθορίζει την τομή της τραχύτητας με τα ακόμη πιο βραχέα στοιχεία των κυμάτων της επιφάνειας [111].

λc: καθορίζει την τομή των στοιχείων τραχύτητας και κυμάτωσης [111].

λf: καθορίζει την τομή ανάμεσα στην κυμάτωση και τα ακόμη μεγαλύτερου μήκους στοιχεία της επιφάνειας [111].

Κατεύθυνση (Lay)

Αναφέρεται στη δεσπόζουσα διεύθυνση της επιφανειακής υφής και συνήθως καθορίζεται από την ιδιαίτερη μέθοδο κατεργασίας και τη γεωμετρία της. Τόρνευση, άλεση, διάτρηση, λείανση και άλλες μηχανικές κατεργασίες παράγουν επιφάνειες με χαρακτηριστικές κατευθύνσεις, συνήθως διαγραμματίσεις ή όρη και κοιλάδες κατά τη διεύθυνση που κινούνταν τα εργαλεία στην επιφάνεια. Το σχήμα και η μορφή των διευθύνσεων διαφέρει αναλόγως της κατεργασίας [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], (εικόνα 2.2.1.5)



εικ. 2.2.1.5 Διαφορετικοί τύποι κατευθύνσεων

Σύστημα συντεταγμένων

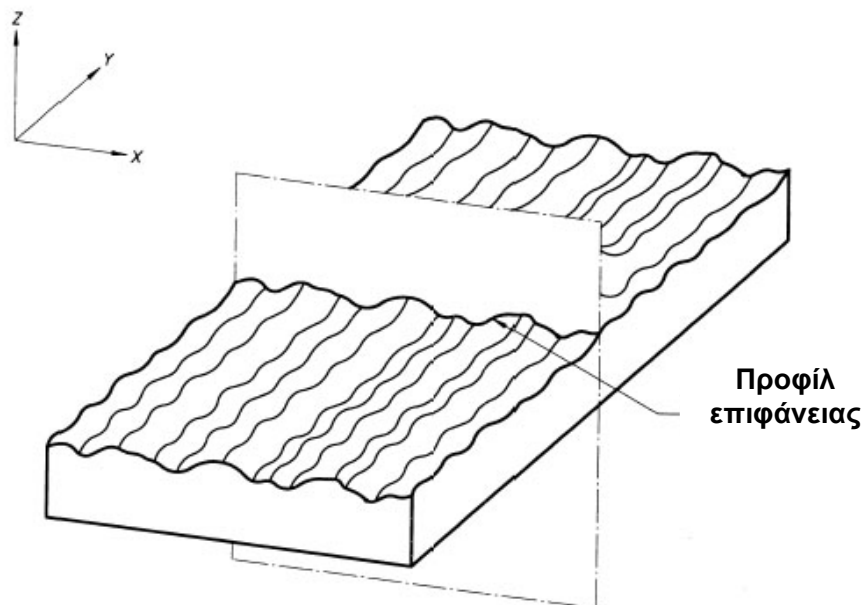
Σύστημα στο οποίο καθορίζονται όλες οι παράμετροι που αφορούν την επιφανειακή υφή. Πρόκειται για Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με άξονα X τον ομοαξονικό της μέσης γραμμής (κάθετη κατεύθυνση της πραγματικής επιφάνειας), άξονα Y στην πραγματική επιφάνεια και άξονα Z στην κατεύθυνση από το υλικό στο περιβάλλον [111]. (εικόνα 2.2.1.6).

Πραγματική επιφάνεια

Η επιφάνεια που ορίζει και διαχωρίζει το υλικό από το περιβάλλον [111].

Προφίλ επιφάνειας

Προφίλ που προκύπτει από την τομή της πραγματικής επιφάνειας και ενός επιπέδου κάθετου σε αυτήν, (βλ. εικ. 2.2.1.6). Υπάρχουν τρία διαφορετικά προφίλ που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Αυτά είναι το πρωταρχικό προφίλ, το προφίλ τραχύτητας με το οποίο υπολογίζουμε όλες τις παραμέτρους τραχύτητας και το προφίλ κυμάτωσης. Τα προφίλ τραχύτητας και κυμάτωσης προκύπτουν από το πρωταρχικό προφίλ με χρήση των φίλτρων που προαναφέρθηκαν. Ο ρόλος των φίλτρων είναι να αποσβένουν τα στοιχεία μεγαλύτερων ή βραχύτερων μηκών από το πρωταρχικό προφίλ, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών προφίλ από τα οποία όμως είναι εφικτή η αντικειμενική μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας και της κυμάτωσης.



εικ. 2.2.1.6 Προφίλ επιφάνειας

Για παράδειγμα, με χρήση του φίλτρου l_c αποσβένονται τα στοιχεία των μεγαλύτερων μηκών από το πρωταρχικό προφίλ και προκύπτει το προφίλ τραχύτητας. Αντίστοιχα με εφαρμογή του l_f αρχικά (απόσβεση στοιχείων μακριού κύματος) και στη συνέχεια του l_c (απόσβεση στοιχείων βραχέος κύματος) στο πρωταρχικό προφίλ προκύπτει το προφίλ κυμάτωσης [110],

[111], [112], [113], [114], [115], [116]. Στις μετρήσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω γίνεται χρήση του προφίλ τραχύτητας και υπολογισμός των παραμέτρων τραχύτητας.

Μήκος δειγματοληψίας (sampling length)

Μήκος που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών ανωμαλιών του προφίλ προς αποτίμηση. Είναι ένα μήκος της επιφάνειας στο οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός μιας παραμέτρου, στατιστικά σημαντικής, χωρίς όμως να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλαμβάνει άσχετες πληροφορίες [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116]. Το μήκος δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται για το προφίλ της τραχύτητας l_r , και της κυμάτωσης l_w , είναι αριθμητικά ίσο με τα φίλτρα των προφίλ l_c και l_f αντιστοίχως. Το μήκος δειγματοληψίας του πρωταρχικού προφίλ l_p ισούται με το μήκος αποτίμησης [111].

Μήκος αποτίμησης (evaluation length – length scale)

Μήκος στο οποίο πραγματοποιείται μια μέτρηση. Μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερα από ένα μήκη δειγματοληψίας, οπότε ως τιμή της μέτρησης λογίζεται ο αριθμητικός μέσος των υπολογισμών της παραμέτρου σε κάθε μήκος δειγματοληψίας [110], [111].

Γραμμή αναφοράς (reference line)

Ορισμένα πρότυπα την αναφέρουν και ως μέση γραμμή - mean line. Η γραμμή αναφοράς υιοθετείται για όλες τις παραμέτρους. Ουσιαστικά είναι μια ευθεία γραμμή που διατρέχει όλο το προφίλ, έχοντας σα χαρακτηριστικό ότι το άθροισμα των περιοχών πάνω από τη γραμμή αυτή είναι ίσο με το αντίστοιχο των περιοχών κάτω από αυτή. Μπορεί να ειπωθεί ότι είναι ένα είδος “κέντρου βάρους” του προφίλ της επιφάνειας [111].

Στοιχείο προφίλ

Κορυφή του προφίλ και η διπλανή κοιλάδα του προφίλ, (β.λ. εικ. 2.2.1.7) [111].

Κανονική τιμή $Z(x)$

Το ύψος του αποτιμώμενου προφίλ σε κάθε θέση x , [111].

Ύψος κορυφής προφίλ Z_p

Η απόσταση μεταξύ της μέσης γραμμής - mean line και της υψηλότερης κορυφής του προφίλ [111], [110] (εικόνα 2.2.1.7).

Βάθος κοιλάδας προφίλ Z_v

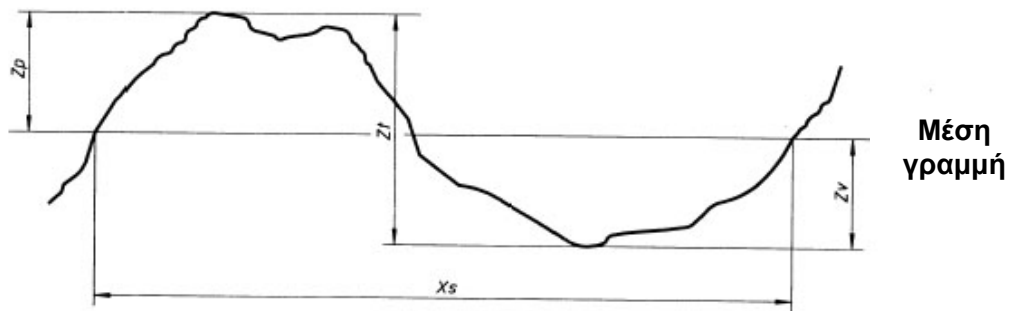
Η απόσταση μεταξύ της mean line και του βαθύτερου σημείου της κοιλάδας του προφίλ [111], [110] (εικόνα 2.2.1.7).

Ύψος του στοιχείου του προφίλ Z_t

Άθροισμα του ύψους της κορυφής και του βάθους της κοιλάδας του στοιχείου του προφίλ [111], [110] (εικόνα 2.2.1.7).

Εύρος στοιχείου προφίλ X_s

Το μήκος του τμήματος της μέσης γραμμής - mean line που τέμνει το στοιχείο του προφίλ [111], [110] (εικόνα 2.2.1.7).



εικ. 2.2.1.7 Στοιχείο προφίλ [111]

Μέγιστο ύψος κορυφής προφίλ, R_p

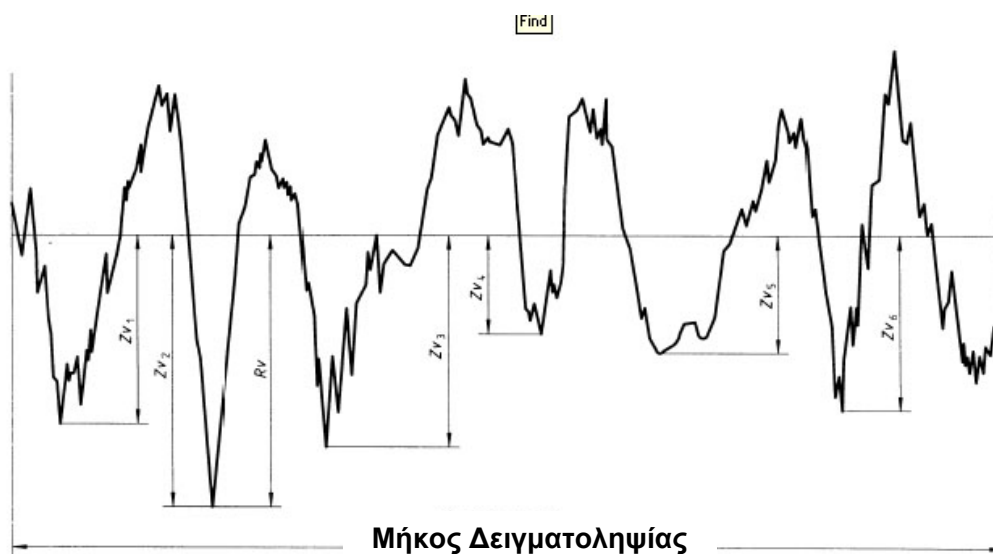
Το μέγιστο ύψος κορυφής του προφίλ Z_p εντός ενός μήκους δειγματοληψίας [111], [110] (εικόνα 2.2.1.8).



εικ. 2.2.1.8 Μέγιστο ύψος κορυφής προφίλ R_p , (παράδειγμα προφίλ τραχύτητας), [111]

Μέγιστο βάθος κοιλάδας προφίλ, R_v

Το μέγιστο βάθος κοιλάδας του προφίλ Z_v σε ένα μήκος δειγματοληψίας [111], [110] (εικόνα 2.2.1.9).



εικ. 2.2.1.9 Μέγιστο βάθος κοιλάδας, (παράδειγμα προφίλ τραχύτητας), [111]

Μέγιστο ύψος προφίλ, R_z

Άθροισμα των υψών του μέγιστου ύψους κορυφής του προφίλ Z_p και του μέγιστου βάθους κοιλάδας Z_v του προφίλ σε ένα μήκος δειγματοληψίας [111], [110] (εικόνα 2.2.1.10). Στο πρότυπο ISO 4287-1:1984 το σύμβολο R_z χρησιμοποιείται ως το ύψος των δέκα σημείων των ανωμαλιών. Ο χαρακτηρισμός όμως αυτός έχει πλέον αντικατασταθεί από τον παραπάνω ορισμό, [111].

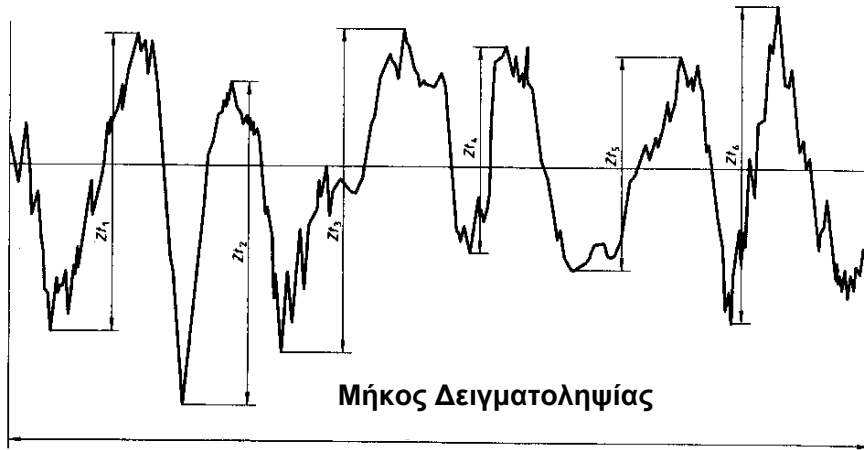


εικ. 2.2.1.10 Μέγιστο ύψος προφίλ, (παράδειγμα προφίλ τραχύτητας), [111]

Μέσο ύψος του στοιχείου του προφίλ

Η μέση τιμή των υψών Z_t των στοιχείων του προφίλ στο μήκος δειγματοληψίας, (εικόνα 2.2.1.11), [111].

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i}$$



Εικ. 2.2.1.11 Μέσο ύψος του στοιχείου του προφίλ (παράδειγμα προφίλ τραχύτητας), [111]

Συνολικό ύψος του προφίλ, P_t, R_t, W_t

Άθροισμα των υψών του μέγιστου ύψους κορυφής του προφίλ Z_p και του μέγιστου βάθους κοιλιάδας Z_n του προφίλ στο μήκος αποτίμησης, [111].

Ορισμοί των παραμέτρων των προφίλ των επιφανειών - Παράμετροι εύρους (μέσος όρος κανονικών τιμών)

Αριθμητική μέση απόκλιση του υπολογισμένου προφίλ P_a, R_a, W_a

Ο αριθμητικός μέσος των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας, [111].

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

με $l=p, l_r$ ή l_w ανάλογα την περίπτωση

Οι παράμετροι P_a, R_a, W_a αναφέρονται στα διαφορετικά προφίλ. Έτσι για όλα τα μεγέθη που ορίσαμε η P παράμετρος αντιστοιχεί στο πρωταρχικό προφίλ, η R στο προφίλ τραχύτητας και η W στο προφίλ κυμάτωσης, δηλαδή πρόκειται για τα ακριβώς ίδια μεγέθη υπολογισμένα σε διαφορετικά προφίλ. Επίσης, τα l_p, l_r, l_w είναι τα μήκη δειγματοληψίας για κάθε προφίλ. Όπως

αναφέρθηκε παραπάνω, στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση των R-παραμέτρων [111], [110].

Ρίζα του αριθμητικού μέσου του τετραγώνου της απόκλισης του υπολογισμένου προφίλ Rq

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου του τετραγώνου των απόλυτων κανονικών τιμών Z(x) στο μήκος δειγματοληψίας [111], [110].

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx}$$

με $l=r, lr$ ή lw ανάλογα την περίπτωση

Η τιμή Ra είναι η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της τραχύτητας μιας επιφάνειας, αφού η εκτίμησή της στα παλαιότερα όργανα ήταν πολύ εύκολη από το ίδιο το γράφημα του προφίλ πριν τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της τραχύτητας γίνουν διαθέσιμα. Σήμερα, και εφόσον η σύγχρονη οργανολογία το επιτρέπει, υπάρχει η τάση να υπολογίζουμε την τραχύτητα με χρήση της παραμέτρου Rq, δεδομένου ότι στατιστικά οι τιμές του μέσου των τετραγώνων των συντεταγμένων είναι σημαντικότερες από τον αριθμητικό μέσο των συντεταγμένων. Στον υπολογισμό των τετραγώνων των συντεταγμένων τα σφάλματα των ηλεκτρικών φίλτρων του οργάνου μπορούν να αγνοηθούν ως ασήμαντα, σε αντίθεση με την επίδραση που έχουν στον υπολογισμό του αριθμητικού μέσου των συντεταγμένων [110].

2.2.1.3 Κανόνες και προδιαγραφές για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των παραμέτρων της τραχύτητας

Η παράμετρος της τραχύτητας R_q , που, όπως προαναφέρθηκε, ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του μέσου του τετραγώνου των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας ενός προφίλ μιας επιφάνειας (RMS), χρησιμοποιείται συχνά στην επιστήμη της μηχανικής των υλικών και της τριβολογίας.

Αν και η παράμετρος της τραχύτητας R_q μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της τοπογραφίας μιας επιφάνειας, αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια ιδιότητα που εξαρτάται από την κλίμακα του μήκους εξέτασης [119]. Αυτό σημαίνει ότι για να συγκριθούν τιμές τραχύτητας R_q θα πρέπει να προσδιοριστούν για το ίδιο μήκος αποτίμησης (evaluation length). Σε κάθε διαφορετική περίπτωση τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα και προκαλούν εσφαλμένα συμπεράσματα για την υφή της εξεταζόμενης επιφάνειας [119]. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η εξάρτηση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας από την κλίμακα του μήκους αποτίμησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εάν πρόκειται να γίνει απευθείας σύγκριση των τιμών των δειγμάτων [119]. Επιπλέον, ακόμα και αν οι μετρήσεις γίνουν στην ίδια κλίμακα μήκους, η διακριτική ικανότητα του οργάνου που χρησιμοποιείται παίζει σημαντικό ρόλο. Μετρήσεις τραχύτητας με χρήση τεχνικών με διαφορετική διακριτική ικανότητα θα δώσουν αποτελέσματα, οι διαφορές των οποίων δε θα αποδίδονται αποκλειστικά στην τραχύτητα, αλλά και στο μέσο λήψης των δεδομένων [119]. Συνεπώς, το R_q εξαρτάται από το μήκος αποτίμησης (evaluation length) και την διακριτική ικανότητα του οργάνου [119].

Παράλληλα, εξίσου σημαντική παράμετρος στις μετρήσεις τραχύτητας είναι η επιλογή μήκους δειγματοληψίας (sampling length), το οποίο ουσιαστικά, όπως προαναφέρθηκε, συμπίπτει αριθμητικά με το φίλτρο του προφίλ l_c , το φίλτρο (cut-off filter), δηλαδή που απομακρύνει τις πληροφορίες της κυμάτωσης και της μορφής. Σύμφωνα με το BS EN ISO 4287:2000 [111], αλλά και όπως αναφέρεται στο BS EN ISO 4288:1998 [120], για τις παραμέτρους της τραχύτητας, το μήκος της αποτίμησης θα πρέπει να ισούται με πέντε μήκη δειγματοληψίας για να είναι αντικειμενική και σωστή η τιμή της παραμέτρου που μετράται.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μετρήσεων για την εξεταζόμενη παράμετρο της τραχύτητας, καθώς και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος αποτίμησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η αξιοπιστία της μέτρησης της εξεταζόμενης παραμέτρου της τραχύτητας και χαμηλότερη η αβεβαιότητα της μέσης τιμής της εξεταζόμενης παραμέτρου της τραχύτητας [120].

Επίσης, όταν δε διευκρινίζεται η κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να λάβει χώρα η μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας, τότε η κατεύθυνση η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι αυτή της οποίας οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας είναι οι μεγαλύτερες, [120].

Τα όρια ανοχής των μετρούμενων τιμών των παραμέτρων της τραχύτητας ορίζονται με τον κανόνα του 16%, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη λογικά υπάρχουσα ανομοιογένεια της επιφάνειας. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό ο μέγιστος αριθμός των μετρούμενων τιμών των παραμέτρων της τραχύτητας που μπορεί να υπερβαίνει τα ορισμένα ανώτατα ή και κατώτατα όρια ανοχής των τεχνικών προδιαγραφών της εξεταζόμενης επιφάνειας είναι το 16% του

συνόλου των τιμών που μετρήθηκαν. Στην περίπτωση δε που οι τιμές των μετρούμενων παραμέτρων τραχύτητας ακολουθούν την κανονική κατανομή, τότε το οριζόμενο όριο ανοχής του κανόνα του 16% δεν είναι άλλο από την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής [120].

Παράλληλα, στην περίπτωση της σύγκρισης τιμών παραμέτρων τραχύτητας με ορισμένα άνω και κάτω όρια ανοχής, η αβεβαιότητα της μέτρησης πρέπει να εκτιμάται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ανομοιογένεια της επιφάνειας, στοιχείο το οποίο αποτυπώνεται στον κανόνα του 16% [120].

Στις περιπτώσεις δε, εξέτασης επιφανειών όπου τίθεται από τις προδιαγραφές ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή για την εξεταζόμενη παράμετρο της τραχύτητας, τότε ισχύει ο κανόνας της μέγιστης τιμής. Δηλ. καμία από τις μετρούμενες τιμές της εξεταζόμενης παραμέτρου της τραχύτητας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τη προδιαγραφόμενη μέγιστη τιμή [120].

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς μια νέα τάση επεξεργασίας και αξιολόγησης της τραχύτητας από την επιστημονική κοινότητα με χρήση των μαθηματικών fractals. Η τάση αυτή οφείλεται κυρίως στο ότι αίρεται το μειονέκτημα της εξάρτησης της τραχύτητας από το μήκος αποτίμησης και συνεπώς δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης τιμών που έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες [119], [121].

2.2.2 ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ FRACTAL ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

2.2.2.1 Εισαγωγή στην έννοια της fractal διάστασης

Σήμερα τα fractal μαθηματικά παρέχουν μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τα Ευκλείδεια μαθηματικά, για την προσέγγιση του προβλήματος μοντελοποίησης πολύπλοκων καταστάσεων στη φύση. Η fractal διάσταση, η σημασία της οποίας θα αναλυθεί στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φυσικοχημικά μοντέλα που περιγράφουν πληθώρα ιδιοτήτων των φυσικών και τεχνικών υλικών.

Ο προσδιορισμός της επιφανειακής τραχύτητας μιας επιφάνειας μπορεί να βασιστεί στον υπολογισμό της fractal διάστασης αυτής της μελετούμενης επιφάνειας. Η δυνατότητα του υπολογισμού της fractal διάστασης από τη μορφή της διατομής της επιφάνειας, είναι παρόμοια με το πρόβλημα προσδιορισμού του μήκους μιας ακτογραμμής. Στη φύση, τα περιοριστικά όρια των περισσότερων επιφανειών δεν είναι ευθείες γραμμές που σχηματίζουν ένα πολύγωνο ή απλές ομαλές καμπύλες, αλλά είναι ακανόνιστα και τραχιά. Επιπρόσθετα, η τραχύτητα και η ανωμαλία που παρατηρούμε σε μια επιφάνεια γενικά οριοθετείται από την ποιότητα και την ανάλυση της εικόνας που διαθέτουμε. Αν είχαμε την δυνατότητα να αυξήσουμε την μεγέθυνση της εικόνας, η περίμετρος της επιφάνειας που θα βλέπαμε θα ήταν μεγαλύτερη [129].

Θα πρέπει να τονιστεί ότι όταν κοιτάμε μια γραμμή ή επιφάνεια η μορφής και τα εξαγόμενα συμπεράσματα από αυτή εξαρτώνται από τη μεγέθυνση. Επίσης, οποιοσδήποτε μετρήσεις και αν κάνουμε για να περιγράψουμε την τραχύτητα, αυτές εξαρτώνται από την κλίμακα που θα χρησιμοποιηθεί. Το γεγονός αυτό επιβάλλει ένα σημαντικό περιορισμό στη μορφή των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας και διαπιστώθηκε αρχικά από το Βρετανό μαθηματικό L. Richardson, ο οποίος ασχολήθηκε με τον προσδιορισμό του μήκους των συνόρων διαφόρων χωρών και ακτογραμμών, (εικ. 2.2.2.1).



Εικόνα 2.2.2.1 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του Richardson με χρήση πολυγώνων για την εύρεση της περιμέτρου της Μεγάλης Βρετανίας

Αν το μήκος ενός συνόρου (ακτογραμμή) προσδιοριστεί με μια “κίνηση” κατά μήκος ενός χάρτη της περιοχής, με τη βοήθεια διαιρετών αυθαίρετης απόστασης, προκύπτει ένα συνολικό μήκος. Αν η απόσταση διαίρεσης μειωθεί και πραγματοποιηθεί η ίδια διαδικασία, το μετρούμενο συνολικό μήκος θα είναι μεγαλύτερο γιατί η μέτρηση θα είναι σε θέση να ακολουθήσει και συνεπώς να λάβει υπόψη περισσότερες από τις ανωμαλίες της ακτογραμμής. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία με συνεχώς μικρότερα διαστήματα διαίρεσης (μήκη βήματος) και χρησιμοποιώντας χάρτες κατάλληλης κλίμακας, το συνολικό μήκος συνεχώς θα αυξάνεται, μέχρι που για απειροελάχιστα μήκη βήματος θα αναμένεται να γίνει άπειρο [129].

Ο Richardson παρατήρησε ότι για μια αξιοσημείωτη περιοχή τιμών των διαστημάτων διαίρεσης, αν παρασταθεί γραφικά σε λογαριθμική κλίμακα το μετρούμενο μήκος σε συνάρτηση με το μήκος βήματος, η κλίση της ευθείας που προκύπτει είναι σταθερή [130]. Επιπλέον παρατήρησε ότι η κλίση της ευθείας είναι διαφορετική για διαφορετικά σύνορα (περατωτικά όρια).

Η αύξηση του μήκους της μετρούμενης περιμέτρου, όσο μειώνεται το διάστημα διαίρεσης αντανακλά το γεγονός ότι τα πραγματικά περατωτικά όρια στη φύση αποτελούνται από ανωμαλίες σε όλες τις κλίμακες, καθώς και το γεγονός ότι όσο αυξάνεται η μεγέθυνση εξέτασης αποκαλύπτονται περισσότερα στοιχεία τραχύτητας. Η ανάλυση του Richardson απέδειξε ότι η τραχύτητα των περιοριστικών ορίων των επιφανειών είναι ταυτο – όμοια (self – similar), δηλαδή ότι η ποσότητα αύξησης στο παρατηρούμενο μήκος των συνόρων είναι η ίδια σε όλες τις κλίμακες. Επιπλέον αν δοθεί μια εικόνα ενός συνόρου χωρίς αναγραφή της κλίμακας, η οπτική εμφάνιση της τραχύτητας δεν προσφέρει κανένα στοιχείο για την πραγματική μεγέθυνση [129].

Συμπερασματικά, αν η αύξηση του μήκους βήματος με τη βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας είναι αμετάβλητη (ευθεία γραμμή στο διάγραμμα Richardson), το υπό εξέταση σύνορο καλείται ταυτο – όμοιο (self – similar). Έχει αποδειχθεί ότι πολλά φυσικά αντικείμενα, μικροσκοπικά και μεγάλα, παρουσιάζουν αυτόν τον χαρακτήρα, σε μεγάλο πεδίο αποστάσεων.

Η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα του Richardson (Εικόνα 2.2.2.2) είναι αρνητική, από τη στιγμή που η μεγαλύτερη τιμή του περιμετρικού μήκους αποκομίζεται από το μικρότερο μήκος βήματος. Η κλίση της γραμμής παίρνει τιμές μεταξύ 0 (το Ευκλείδιο όριο) και 1. Η fractal διάσταση της γραμμής είναι απλά το αλγεβρικό άθροισμα ($1 +$ μέγεθος της κλίσης). Το σύμβολο D χρησιμοποιείται για τη fractal διάσταση της γραμμής ή του συνόρου και μπορεί να εκφραστεί ως $(1 + d)$, ώστε να υποδεικνύει ότι το fractional μέρος της διάστασης αποκομίζεται από μια μέτρηση σαν το διάγραμμα του Richardson. Όσο αυξάνεται η τιμή της fractal διάστασης, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου συνόρου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη τραχύτητα αυξάνεται. Όταν μετράμε ολόκληρες επιφάνειες και όχι γραμμές ή όρια η fractal διάσταση παίρνει τιμές $2+d$ [129].

Στην πραγματικότητα, η διαδικασία του δομημένου “περπατήματος”, με τη βοήθεια αποστάσεων διαίρεσης κατά μήκος μιας εικόνας ή ενός χάρτη, είναι δύσκολη. Τα μικρά λάθη εξαιτίας της ταλάντωσης των διαιρετών ή της διεύρυνσης των οπών συσσωρεύονται και μπορεί να επηρεάσουν την κλίση της ευθείας στο διάγραμμα.



Εικόνα 2.2.2.2: Το διάγραμμα Richardson. Το ευθύγραμμο τμήμα μπορεί να καλύπτει πολλές τάξεις μεγέθους στους λογαριθμικούς άξονες και δίνει την fractal διάσταση [129]

Ακόμα πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι η κλίμακα της εικόνας ή του χάρτη θέτει περιορισμούς στο μήκος βήματος κατά περίπου μια τάξη μεγέθους. Η πεπερασμένη ανάλυση μιας εικόνας ή η αβοήθητη ανθρώπινη όραση θέτει περιορισμούς, όσον αφορά στα πολύ μικρά μήκη βήματος καθώς τα καθιστά πρακτικά ανεφάρμοστα. Σε πολύ μεγάλα μήκη διαίρεσης, ο αριθμός των βημάτων που πραγματοποιείται κατά μήκος του συνόρου είναι πολύ μικρός. Στην εικόνα 2.2.2.2 είναι φανερή η απόκλιση της γραμμής στα δύο προαναφερθέντα άκρα.

Μερικοί ερευνητές υποστήριξαν ότι η απόκλιση από την ευθεία γραμμή που παρατηρείται στο διάγραμμα Richardson στις μικρές διαστάσεις, είναι μια ένδειξη ότι ισχύει μια πιο πολύπλοκη σχέση από αυτή που πρότεινε ο Richardson για τη συσχέτιση μήκους βήματος – συνολικής περιμέτρου συνόρου [129]. Όμως πολλές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν σε παρόμοια δείγματα μικρών διαστάσεων (π.χ. σε ρηγματώσεις μετάλλων), πρότειναν ότι ο περιορισμός αυτός είναι αποτέλεσμα της πεπερασμένης ανάλυσης της χρησιμοποιούμενης μεθόδου απεικόνισης και πιθανόν της μη σωστής εφαρμογής της μεθόδου Richardson σε μη ταυτο – όμοιο (non self – similar) σύνορο. Γενικά η βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας, από αυτή που λαμβάνεται από οπτικό μικροσκόπιο σε αυτή που λαμβάνεται από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, προεκτείνει περαιτέρω την ευθεία γραμμή στο διάγραμμα.

Φυσικά, είναι φανερό ότι σε κάποια περιοχή διαστάσεων, ίσως σε αυτή των κρυστάλλων των ορυκτών ή των μεμονωμένων ατόμων, πρέπει να πραγματοποιείται μια αλλαγή στην φύση των περιοριστικών ορίων. Πράγματι, για μερικά αντικείμενα μπορεί να υπάρχουν άλλες χαρακτηριστικές διαστάσεις στις οποίες η φύση του συνόρου αλλάζει για διάφορους λόγους, όπως οι δυνάμεις που κυριαρχούν κατά τον σχηματισμό του. Όταν οι ατομικές δυνάμεις στην μορφή της κρυσταλλικής δομής ή οι επιφανειακές δυνάμεις τάσης είναι ισχυρές, το σύνορο μπορεί να μετατραπεί σε Ευκλείδειο [129].

Σε άλλες περιπτώσεις, η fractal διάσταση μπορεί να είναι διαφορετική από μια περιοχική διαστάσεων σε μια άλλη. Για παράδειγμα, η τραχύτητα της άμμου μιας παραλίας, που έχει προκύψει από την τριβή και την ρηγμάτωση κόκκων στη μικροκλίμακα, σε περιβάλλον ποταμού πολύ διαφορετικό από το παραλιακό περιβάλλον που αποτελεί το τελικό προορισμό απόθεσης, δεν θα οδηγεί αναγκαστικά στην ίδια fractal διάσταση με το σύνορο της ακτής σε κλίμακα μέτρων ή μιλίων. Ωστόσο και τα δύο σύνορα μπορεί να είναι fractal. Ο Kaye ονομάζει αυτές τις περιπτώσεις, όπου το διάγραμμα Richardson μπορεί εύκολα να χωριστεί σε δύο ή περισσότερες περιοχές ευθείας γραμμής, ως “multifractals”, ενώ ο Russ χρησιμοποιεί το όρο “mixed fractals” [129].

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι υπάρχουν δυσκολίες στην διασαφήνιση και στην εφαρμογή του διαγράμματος Richardson και διάφοροι περιορισμοί στη χρήση της fractal διάστασης. Παρ’ όλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις, η fractal διάσταση είναι ένας αριθμός που συνοψίζει λιτά, ουσιαστικά και ορθά την τραχύτητα ενός συνωριακού περιγράμματος. Ενδεικτικό της σημασίας της fractal διάστασης ως φυσικής ιδιότητας που βοηθά στην περιγραφή του φυσικού κόσμου, είναι το γεγονός ότι η κατάταξη ως προς την τραχύτητα διαφόρων επιφανειών όπως προκύπτει από την ανθρώπινη όραση είναι η ίδια με αυτήν που προκύπτει από τις αντίστοιχες τιμές των fractal διαστάσεων.

2.2.2.2 Εξαγωγή παραμέτρων μικροδομής για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού στο Δημαρχείο της Philadelphia των Η.Π.Α [11]

Βασιζόμενοι στα fractal μαθηματικά, οι Mossotti et al. [11] δημιούργησαν για το Γεωλογικό Ινστιτούτο Μελετών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ένα λογισμικό πακέτο προγραμμάτων, με σκοπό την επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού στο Δημαρχείο της Philadelphia των Η.Π.Α. Η ανάλυση αυτή των εικόνων, οδήγησε στον προσδιορισμό της fractal διάστασης και άλλων μορφολογικών παραμέτρων της μαρμάρινης επιφάνειας του Δημαρχείου, στη μικροκλίμακα. Η fractal διάσταση αποτέλεσε βασικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της επιφανειακής τραχύτητας της πέτρας μετά τον καθαρισμό που ονομάζεται συντελεστής μορφής (shape factor, Γ), ο οποίος μαζί με τον δείκτη της πυκνότητας ρηγματώσεων (fracture density, FD) όρισε έναν νέο δείκτη μικροδομής, ως μέτρο της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής ευστάθειας της πέτρας, το συντελεστή ευθρυπτότητας (friability index, FI). Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι είναι εφικτή η εκτίμηση της μικροδομής των μαρμάρινων επιφανειών πριν και μετά από καθαρισμούς, καθώς και η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν.

Το πρόγραμμα, που αποτελεί θέμα προς εξέταση της διδακτορικής αυτής διατριβής, είναι το EDGE και οι πλήρεις λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στις δημοσιεύσεις Mossotti et al [11] και Mossotti & Eldeeb [131]. Τα παρακάτω είναι μια σύντομη περίληψη των σημαντικότερων στοιχείων που σχετίζονται με τη χρήση του EDGE στην παρουσιαζόμενη διδακτορική διατριβή.

Το πρόγραμμα EDGE αναπτύχθηκε για την ανάλυση εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) που προκύπτουν από οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Οι λαμβανόμενες εικόνες αποθηκεύονται σε δυαδική μορφή αρχείου που αναπαριστά εικόνες με πλεγματική ανάλυση 1.7μm/pixel. Οι επεξεργαζόμενες εικόνες SEM προκύπτουν από τις τομές δειγμάτων του μνημείου με μεγέθυνση x100, αποτελούμενες από 512 σειρές των 512 pixel ανά σειρά, όπου κάθε pixel κωδικοποιείται από 8bit στην παλέτα των 256 διαβαθμίσεων του γκριζου. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης ο χρήστης του προγράμματος EDGE, ορίζει:

- ως κατάσταση κενών (PORE state) τιμές της διαβάθμισης του γκριζου που είναι μικρότερες ή ίσες με ένα οριζόμενο κατώτατο κατώφλι τιμών (lower threshold, T_L),
- ως κατάσταση μάζας (MASS state), τιμές της διαβάθμισης του γκριζου που είναι μεγαλύτερες ή ίσες με ένα οριζόμενο ανώτατο κατώφλι τιμών (lower threshold, T_L),

Τα pixel με τιμές διαβάθμισης γκριζου ανάμεσα στα δύο οριζόμενα από το χρήστη ανώτατα και κατώτατα κατώφλια τιμών ανήκουν στην κατάσταση άκρων (EDGE state), από την οποία και προκύπτει η διάσταση fractal.

Είναι προφανές ότι η διαδικασία της βαθμονόμησης της εικόνας και συνεπώς ο προσδιορισμός της κατάστασης άκρων (EDGE) εξαρτάται από την εμπειρία του χειριστή σε σχέση με την κατανόηση αφενός των εικόνων SEM και αφετέρου με τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού. Ο προσδιορισμός της διάστασης fractal βασίζεται στο κατά Richardson δομημένο “περπάτημα” κατά μήκος του πλευρικού ίχνους του προφίλ της επιφάνειας. Το αποτέλεσμα του Richardson ισχυρίζεται ότι μια ανώμαλη γραμμή περιγράμματος μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια μιας τεθλασμένης γραμμής, κατασκευασμένης από N διαστήματα μήκους ϵ , όπου:

$$N = \mu_D \cdot \epsilon^{-D} \quad (2.2.2.1)$$

Αν η τιμή του εκθέτη D είναι σταθερή εντός μιας κλίμακας τιμών του ϵ , το περίγραμμα (ακανόνιστη μορφή) λέγεται fractal και ο εκθέτης D ονομάζεται fractal διάσταση και από αυτήν εξαρτάται η σταθερά αναλογίας μ_D . Ο αλγόριθμος του προγράμματος EDGE χρησιμοποιεί την κλίση της καμπύλης $\log N$ συναρτήσεως του $\log \epsilon$, για να υπολογίσει την fractal διάσταση για ένα συγκεκριμένο περίγραμμα. Από τη στιγμή που η μέτρηση γίνεται κατά μήκος του ίχνους του προφίλ της επιφάνειας, η fractal διάσταση θα παίρνει τιμές μεταξύ 1 (ευθεία γραμμή) και 2 (επίπεδο).

Γενικά το μήκος L κατά μήκος του ίχνους του προφίλ της επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$L = N \cdot \epsilon = (\mu_D \cdot \epsilon^{-D}) \cdot \epsilon = \mu_D \cdot \epsilon^{(1-D)} \quad (2.2.2.2)$$

όπου το L έχει μονάδες $\mu\text{m}^{(1-D)}$.

Αν μετρήσουμε το L σε σχέση με μια κατάσταση αναφοράς L^* , μπορούμε να ορίσουμε το συντελεστή μορφής Γ από τον λόγο μ_D / μ_D^* :

$$\Gamma \approx (L / L^*) \cdot \varepsilon^D \quad (2.2.2.3)$$

όπου ο συντελεστής μορφής έχει μονάδες μm^* .

Στη μελέτη για το Δημαρχείο της Philadelphia, το L υπολογίστηκε ως ο αριθμός των pixels στο ίχνος της εκτεθειμένης επιφάνειας, δηλ. του πραγματικού ανάγλυφου. Η κατάσταση αναφοράς L^* είναι το Ευκλείδειο μήκος του ίχνους, δηλ. 512 pixels. Η τιμή του ε , στις εικόνες SEM που χρησιμοποιήθηκαν και που είχαν μεγέθυνση 100x, είναι ίση με 1,76 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (θα πρέπει να τονιστεί ότι το Ευκλείδειο μήκος μετατρέπεται σε μονάδες pixels χρησιμοποιώντας τον παράγοντα 512 / 22,5 pixel/cm). Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι αύξηση της fractal διάστασης συνεπάγεται αύξηση της τραχύτητας ή εν γένει αύξηση των ανωμαλιών στο παρατηρούμενο προφίλ [129].

Παράλληλα, μετά τη βαθμονόμηση της εικόνας είναι δυνατός ο υπολογισμός της πυκνότητας ρηγματώσεων που εκφράζει το ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων κοντά στην επιφάνεια του δείγματος. Η πυκνότητα ρηγματώσεων καταγράφεται ως το % ποσοστό των pixel που προσδιορίζονται σαν συστατικά των ρωγμών σε βάθος 100 μm από την επιφάνεια του δείγματος. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σχέση μεταξύ του συντελεστή μορφής Γ και της πυκνότητας ρηγματώσεων που εκφράζει το μέτρο της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής ευθρυπτότητας της πέτρας στη μικροκλίμακα, του συντελεστή ευθρυπτότητας (FI).

Ο συντελεστής ευθρυπτότητας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$FI = \sqrt{(FD)^2 + (\Gamma_r)^2} \quad (2.2.2.4)$$

Κατά την τελική επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους οι Mossoti et al [11], κατέληξαν ότι τα αποδεκτά όρια των παραμέτρων της μικροδομής, όλων των εξεταζόμενων τύπων φθοράς για να θεωρείται αποδεκτά αποτελεσματική η κάθε επέμβαση καθαρισμού θα πρέπει να κυμαίνονται:

- Συντελεστής μορφής: $1,8 \leq \Gamma \leq 2,5$.
- Δείκτης ευθρυπτότητας: $15\% \leq FI \leq 25\%$.

2.2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ

2.2.3.1 Εισαγωγή

Η μετάφραση στα ελληνικά του Fuzzy Logic, θα δώσει τον όρο «Ασαφής Λογική», δηλαδή κάτι το οποίο δεν είναι αυστηρά καθορισμένο, όπως είναι οι μαθηματικές έννοιες που γνωρίζουμε μέχρι τώρα. Ο όρος ασαφής λογική έχει χρησιμοποιηθεί με δυο έννοιες. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να αποσαφηνιστούν οι διαφορές ανάμεσα στις δυο χρήσεις του όρου [148]. Με τη στενή έννοια του όρου, η ασαφής λογική αναφέρεται σε ένα λογικό σύστημα το οποίο γενικεύει την κλασική λογική η οποία περιέχει δυο λογικές τιμές, «αληθής» και «ψευδής» για ένα συλλογισμό υπό αβεβαιότητα. Με την ευρεία έννοια, αναφέρεται σε όλες τις θεωρίες και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν σύνολα, τα όρια των οποίων δεν είναι αυστηρά. Τα σύνολα αυτά ονομάζονται «ασαφή σύνολα» και αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο της ασαφούς λογικής και θα εξεταστούν στη συνέχεια με παραδείγματα. Κατ' ουσία, η μη παραμετρική μέθοδος της ασαφούς λογικής αποτελεί μια επέκταση ή και γενίκευση της παραδοσιακής λογικής (Boolean) με στόχο να μπορεί να αντιμετωπιστεί η έννοια της μερικής αλήθειας, όπου οι τιμές για την αλήθεια βρίσκονται μεταξύ του "απόλυτα αληθινού" και του "απόλυτα μη - αληθινού" [135].

Η ουσία της τεχνικής που χρησιμοποιεί η ασαφής λογική βασίζεται πάνω στις παρακάτω βασικές έννοιες:

(α) τα **ασαφή σύνολα**,

(β) τις **συναρτήσεις συμμετοχής**,

(γ) τις **γλωσσολογικές μεταβλητές**, δηλαδή μεταβλητές των οποίων η τιμή εκφράζει όχι μόνο ποσότητα, αλλά και ποιότητα και περιγράφεται από το ασαφές σύνολο στο οποίο ανήκουν.

(δ) τους **ασαφείς κανόνες** τύπου «αν - τότε», απαρτίζοντας ένα σύνολο γνώσεων, μια γνωστική φόρμουλα, που περιγράφει τις συμπεριφορές όλων των μεταβλητών σε συνδυασμό μεταξύ τους.

Η ασαφής λογικής εμφανίστηκε τα τελευταία χρόνια ως ένα χρήσιμο εργαλείο μοντελοποίησης διεργασιών οι οποίες είναι αρκετά πολύπλοκες για τις συνηθισμένες ποσοτικές τεχνικές, ή στις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι είτε καθαρά ποιοτικές, είτε αβέβαιες [149]. Παρά το ότι εδώ και τέσσερις δεκαετίες ο Lofti A. Zadeh εισήγαγε τη θεωρία της ασαφούς λογικής, η τεχνική αυτή μόλις πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται ευρύτερα για την ανάπτυξη πολύπλοκων μοντέλων. Ο λόγος της ταχείας ανάπτυξης των ασαφών συστημάτων είναι απλός: η Ασαφής Λογική εκφράζει και αποτυπώνει επιτυχώς ποιοτικές πληροφορίες, επειδή προσομοιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι βγάζουν συμπεράσματα και λαμβάνουν αποφάσεις. Γεφυρώνει ένα σημαντικό χάσμα που αφορά στις μεθόδους σχεδιασμού συστημάτων, το οποίο χωρίζει τις αμιγώς μαθηματικές προσεγγίσεις (π.χ. σχεδιασμός συστήματος), από τις αμιγώς λογικές (π.χ. εμπειρικά συστήματα - Expert systems). Ενώ άλλες προσεγγίσεις απαιτούν ακριβείς εξισώσεις για να σχεδιάσουν πραγματικές συμπεριφορές, ο ασαφής σχεδιασμός μπορεί να εξομαλύνει τις ανακρίβειες που παρουσιάζουν πολλές φορές η ανθρώπινη γλώσσα και η λογική. Τέτοιου είδους συστήματα έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε πεδία αυτόματου ελέγχου,

ταξινόμησης δεδομένων, ανάλυση απόφασης, εμπειρικά συστήματα, και υπολογιστική όραση [150], ταξινόμηση πεπαλαιωμένων αποσταγμάτων κρασιού [158], διαχείριση κρίσεων πυρκαγιάς [159].

2.2.3.2 Σύντομη περιγραφή της ασαφούς λογικής

Η θεμελιώδης διαφορά της ασαφούς λογικής με τις συνηθισμένες τεχνικές σχεδιασμού έγκειται στον ορισμό των συνόλων. Η παραδοσιακή θεωρία συνόλων βασίζεται στη λογική του ότι ένα αντικείμενο ή ένας αριθμός ανήκει σε ένα σύνολο ή δεν ανήκει σ' αυτό. Τα σύνολα αυτά είναι γνωστά σαν *διακριτά σύνολα* και τα όρια τους είναι αυστηρά καθορισμένα. Αντίθετα, η ασαφής λογική επιτρέπει σε έναν αριθμό ή σε ένα αντικείμενο να ανήκει σε παραπάνω του ενός σύνολα, και το πιο σημαντικό απ' όλα είναι ότι εισάγει την έννοια της «μερικής συμμετοχής» σε ένα σύνολο. Γενικά τα διακριτά σύνολα ορίζονται από κάποιες χαρακτηριστικές συναρτήσεις, όπως έχουμε συναντήσει σύμφωνα με τη μέχρι τώρα εμπειρία μας. Για παράδειγμα, έστω A υποσύνολο του X . Η χαρακτηριστική συνάρτηση του A , χ_A , μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\chi_A : X \rightarrow \{0,1\} \quad (2.2.3.1)$$

Υποδηλώνει ότι αν το στοιχείο x ανήκει στο A , η τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης είναι 1, και αν δεν ανήκει, τότε η τιμή είναι 0.

2.2.3.2.1 Ασαφή Σύνολα και Συναρτήσεις Συμμετοχής

Ένα απλό παράδειγμα ασαφούς συνόλου

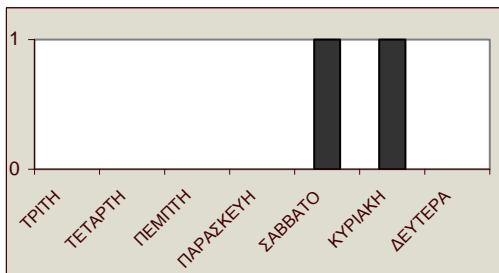
Στην περίπτωση της «μερικής συμμετοχής» που συναντάμε στην ασαφή λογική, ο βαθμός στον οποίο ένα αντικείμενο αποτελεί μέλος ενός συνόλου βρίσκεται στο διάστημα από 0 έως 1, $[0,1]$, [150].

Το 0 αντιστοιχεί σε μη συμμετοχή στο σύνολο (το αντικείμενο δεν ανήκει), ενώ το 1 αντιστοιχεί στην πλήρη συμμετοχή (το αντικείμενο ανήκει εξ ολοκλήρου στο σύνολο). Ένα ασαφές σύνολο μπορεί λοιπόν να περιέχει στοιχεία μέχρι κάποιο βαθμό το καθένα, καθώς επίσης μπορεί κάποιο στοιχείο να ανήκει συγχρόνως, με ίδιο ή και διαφορετικό βαθμό συμμετοχής σε περισσότερα από ένα ασαφή σύνολα.

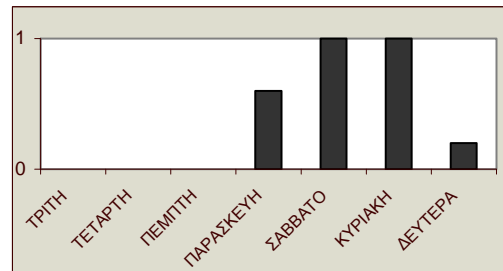
Ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση της έννοιας του ασαφούς συνόλου είναι το ακόλουθο: εξετάζουμε τις μέρες της εβδομάδας που αποτελούν το σαββατοκύριακο, δηλαδή το ζητούμενο σύνολο εδώ είναι το σαββατοκύριακο, και εξετάζουμε από ποια στοιχεία-εν προκειμένω μέρες- αποτελείται [151]. Οι περισσότεροι συνηγορούν στο ότι το Σάββατο και η Κυριακή αναμφισβήτητα ανήκουν σ' αυτό, όμως και η Παρασκευή κατά ένα ποσοστό αποτελεί κομμάτι του σαββατοκύριακου, καθώς και ένα μικρό κομμάτι του πρωινού της Δευτέρας.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία των συνόλων, το σαββατοκύριακο σαν διακριτό σύνολο περιέχει το Σάββατο και την Κυριακή από 00:00 π. μ. του Σαββάτου έως και 00:00 π. μ. της Δευτέρας. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, για τον καθορισμό του σαββατοκύριακου, υπεισέρχονται άλλοι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο, όπως είναι η προσωπική άποψη και εμπειρία του καθενός, και αυτό είναι ακριβώς το θέμα. Ενώ από ετυμολογικής άποψης είναι λανθασμένο να θεωρεί κανείς την Παρασκευή μέρος του σαββατοκύριακου, η άποψη σχεδόν όλων των ανθρώπων και το πώς αντιλαμβάνονται το λεγόμενο «δίημερο»

είναι αυτή που καθορίζει τη χρησιμότητα ενός ασαφούς συνόλου εδώ. Σχηματικά η συμμετοχή της κάθε μέρας παριστάνεται ως εξής και για τις δυο περιπτώσεις (Εικ. 2.2.3.1 & 2.2.3.2):



Εικ.2.2.3.1: Σαββατοκύριακο σαν διακριτό σύνολο



Εικ.2.2.3.2: Σαββατοκύριακο σαν ασαφές σύνολο

Όπως φαίνεται απ' τα σχήματα, ο κάθετος άξονας βαθμονομείται από 0 έως 1, και εκφράζει τη «μερική συμμετοχή» όπως περιγράφηκε παραπάνω, της κάθε μέρας στο σύνολο που ονομάσαμε «σαββατοκύριακο». Έτσι, και στις δυο περιπτώσεις το Σάββατο και η Κυριακή ανήκουν εξ ολοκλήρου (μερική συμμετοχή = 1), ενώ στην περίπτωση του ασαφούς συνόλου, η Παρασκευή και η Δευτέρα ανήκουν μέχρι ένα ποσοστό, κάτι το οποίο καθορίζεται κάθε φορά απ' την προσωπική εκτίμηση εκείνου που το ορίζει.

Συναρτήσεις Συμμετοχής

Ενώ τα διακριτά σύνολα ορίζονται από χαρακτηριστικές συναρτήσεις, τα ασαφή σύνολα χαρακτηρίζονται από «συναρτήσεις συμμετοχής», [152].

Θεωρούμε το σύνολο των ανθρώπων μετρίου αναστήματος. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο δε μπορεί να απεικονιστεί με διάγραμμα Venn, επειδή η έννοια του μετρίου ή μεγάλου αναστήματος διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο, ακόμα και από εποχή σε εποχή. Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι ένας άνθρωπος με ύψος 1,75m πριν από πενήντα χρόνια θεωρείτο ψηλός, ενώ τώρα μάλλον μετρίου ύψους. Ουσιαστικά τα ασαφή αποτελούν επέκταση των διακριτών συνόλων.

Ένα ασαφές σύνολο A με πεδίο ορισμού το X είναι ένα σύνολο το οποίο ορίζεται από μια συνάρτηση μ_A με την απεικόνιση:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (2.2.3.2)$$

Εδώ η τιμή της συνάρτησης $\mu_A(x)$ του ασαφούς συνόλου A ονομάζεται «τιμή συμμετοχής», του βαθμού συμμετοχής του στοιχείου x . Εκφράζει το βαθμό στον οποίο το x ανήκει στο A . Αν $\mu_A=0$, τότε το στοιχείο x δεν ανήκει στο ασαφές σύνολο, ενώ αν $\mu_A=1$, τότε το x ανήκει εξ ολοκλήρου σ' αυτό. Για οποιαδήποτε τιμή της συνάρτησης $0 < \mu_A(x) < 1$, το x ανήκει κατά ένα ποσοστό.

Με το ακόλουθο παράδειγμα θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ χαρακτηριστικών συναρτήσεων και συναρτήσεων συμμετοχής, με σκοπό να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά των ασαφών συνόλων, κάτι που θα βοηθήσει να κατανοήσουμε και τη λογική της δημιουργίας τους για τη μελέτη που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

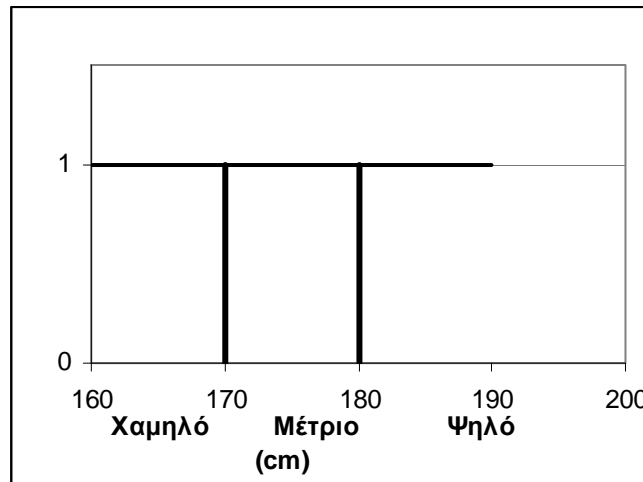
Ας υποθέσουμε το ύψος τριών ανθρώπων A, B, Γ :

A : 1,79m

B: 1,71m

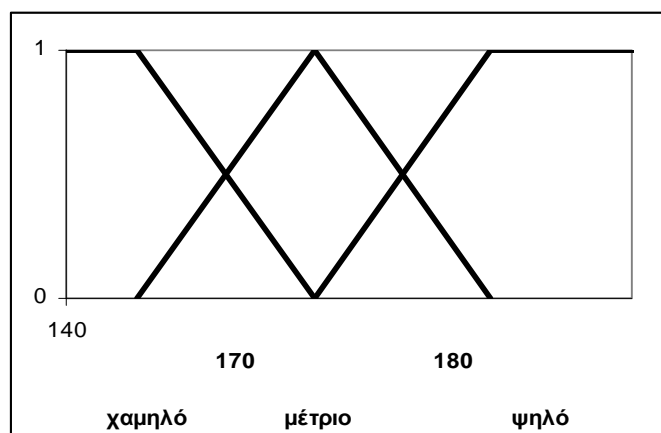
Γ: 1,68m

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία των συνόλων, ο διαχωρισμός των υψών σε τρεις κλάσεις: «χαμηλό», «μέτριο» και «μεγάλο» θα γίνει με συγκεκριμένα όρια που θα διαχωρίζουν ξεκάθαρα τις τρεις κλάσεις ύψους. Αυτό γίνεται κατανοητό από το παρακάτω σχήμα (Εικ. 2.2.3.3):



Εικ. 2.2.3.3: Διαχωρισμός υψών με βάση την κλασική θεωρία συνόλων

Μέχρι 1,70m ορίζεται το σύνολο των χαμηλών υψών, από 1,70-1,80m το σύνολο των μετρίων υψών, και όλα τα ύψη πάνω από 1,80m, ανήκουν στο σύνολο των μεγάλων υψών. Εδώ τα όρια των συνόλων είναι σαφώς διακεκριμένα. Οπότε μπορεί κανείς ξεκάθαρα να πει ότι ο A και ο B ανήκουν στο «μέτριο» σύνολο και ο Γ στο «χαμηλό». Ενώ η διαφορά του A με τον B είναι 8cm, ανήκουν στην ίδια κλάση, σε αντίθεση με τον Γ που ενώ έχει μόνο 3cm διαφορά με τον B ανήκει στη «χαμηλή» κλάση. Αυτό συμβαίνει ακριβώς επειδή ο διαχωρισμός των συνόλων έγινε με βάση την κλασική θεωρία, και τα όρια είναι αυστηρά καθορισμένα. Αν όμως ο διαχωρισμός γίνει με βάση τη θεωρία των ασαφών συνόλων, τότε η μετάβαση από τα «χαμηλά» προς τα ανώτερα ύψη πραγματοποιείται ομαλότερα, και πλέον υπεισέρχεται και ο παράγοντας του βαθμού συμμετοχής (Εικ. 2.2.3.4)



Εικ. 2.2.3.4: Διαχωρισμός των υψών με βάση το βαθμό συμμετοχής

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι π. χ. ο A (1,79m) θα ανήκει κατά 0,4 (40%) στο σύνολο των μετρίων, και κατά 0,6 (60%) στο σύνολο των ψηλών. Οι βαθμοί αυτοί είναι οι βαθμοί συμμετοχής του εκάστοτε στοιχείου που επιλέγεται, σε κάθε σύνολο. Αυτό που αξίζει να τονιστεί στο σημείο αυτό, είναι το γεγονός ότι ο διαχωρισμός των κλάσεων, πραγματοποιείται βάσει της προσωπικής εκτίμησης και εμπειρίας εκείνου που χειρίζεται το σύστημα κάθε φορά.

2.2.3.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Ασαφούς Συνόλου

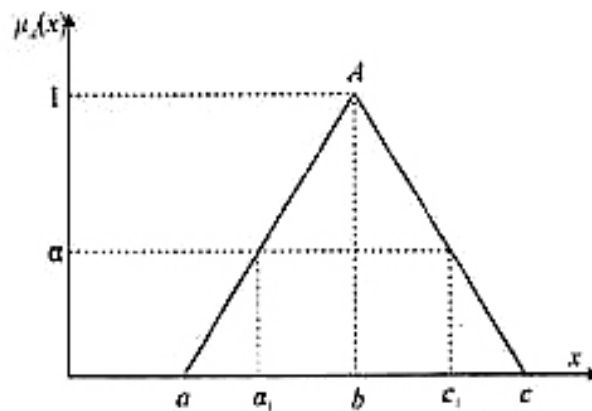
Τα χαρακτηριστικά ενός ασαφούς συνόλου αναφέρονται σε έναν αριθμό ιδιοτήτων, οι οποίες είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη ασαφών συστημάτων. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά μόνο των τριγωνικών ασαφών συνόλων, επειδή στην παρούσα μελέτη οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση τριγωνικά ασαφή σύνολα, χάριν ευκολίας.

(I) Βάση Ασαφούς Συνόλου

Έστω ένα ασαφές σύνολο A ορισμένο στο πεδίο ορισμού U [153]. Η βάση (*support*) του ασαφούς συνόλου είναι το διακριτό σύνολο όλων των σημείων του U τα οποία συμμετέχουν στο A με βαθμούς συμμετοχής μεγαλύτερους του μηδενός

$$S(A) = \{x \in U : \mu_A(x) > 0\} \quad (2.2.3.3)$$

Στην εικ. 2.2.3.5 η βάση του ασαφούς συνόλου A είναι το διακριτό σύνολο $S(A) = (a, c)$



Εικ. 2.2.3.5: Τριγωνικό Ασαφές Σύνολο του οποίου η Βάση είναι το Διακριτό Σύνολο (a, c)

(II) Ύψος Ασαφούς Συνόλου

Το ύψος $h(A)$ ενός ασαφούς συνόλου είναι ο μεγαλύτερος βαθμός συμμετοχής που παρουσιάζει το ασαφές σύνολο

$$h(A) = \sup_{x \in U} \mu_A(x) \quad (2.2.3.4)$$

Ένα ασαφές σύνολο με $h(A)=1$ ονομάζεται κανονικό.

(III) Ασαφής Αριθμός

Ο ασαφής αριθμός είναι ένα ασαφές σύνολο με τις παρακάτω ιδιότητες:

(α) το A είναι κανονικό ασαφές σύνολο, δηλαδή $h(A)=1$

(β) το σύνολο ${}^\alpha A$ είναι κλειστό για κάθε $\alpha \in (0,1]$

(γ) η βάση $S(A)$ είναι ένα ανοιχτό διάστημα

Το ασαφές σύνολο του σχήματος 7 είναι ασαφής αριθμός. Σε όλα τα πεδία εφαρμογής της ασαφούς λογικής με ελάχιστες εξαιρέσεις, χρησιμοποιούνται μόνο ασαφείς αριθμοί.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των ασαφών συνόλων και των πράξεων μεταξύ αυτών είναι κρίσιμη στο σχεδιασμό ασαφών συστημάτων. Η αρχή της επέκτασης των ιδιοτήτων των κλασικών συνόλων στα ασαφή σύνολα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, έδωσε τη δυνατότητα ορισμού θεμελιωδών πράξεων για τα ασαφή σύνολα. Οι πράξεις μεταξύ τους ορίζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής τους.

2.2.3.2.3 Ασαφείς Προτάσεις και Επαγωγή

Η ασαφής πρόταση είναι μια σχέση μεταξύ μεταβλητών η οποία εκφράζεται υπό τη μορφή γλωσσολογικής περιγραφής. Για να γίνει ευκολότερα κατανοητό, χρησιμοποιούμε το εξής παράδειγμα:

Έστω ότι θέλουμε να ρυθμίσουμε τη θερμοκρασία ενός δωματίου με air condition:

ΑΝ η θερμοκρασία στο δωμάτιο είναι «υψηλή»

ΤΟΤΕ πρέπει να ρυθμίσουμε τον κλιματισμό στην ένδειξη παροχής «μεγάλη»

Οι έννοιες «Υψηλή» (θα μπορούσε αντίστοιχα να ήταν «Μέτρια» ή «Μικρή») είναι ασαφή σύνολα, ενώ η «Θερμοκρασία» και η «Παροχή» είναι οι μεταβλητές που εμπλέκονται στις προτάσεις. Οι παραπάνω «Αν - Τότε» προτάσεις δίνουν μια γλωσσολογική περιγραφή της σχέσης που υπάρχει μεταξύ της «Θερμοκρασίας» και της «Παροχής». Γενικότερα, η σχέση μεταξύ δυο ή περισσότερων μεταβλητών η οποία εκφράζεται με ασαφείς προτάσεις ονομάζεται «γλωσσολογική σχέση». Η ερμηνεία αυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας ορισμένης τεχνικής που ονομάζεται «επαγωγή ασαφών προτάσεων». Οι μεταβλητές που συμμετέχουν σε μια ασαφή πρόταση ονομάζονται «γλωσσολογικές μεταβλητές». Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η έννοια της μεταβλητής στην ασαφή λογική είναι εντελώς διαφορετική από ότι στην κλασική λογική, επειδή οι τιμές που παίρνουν οι γλωσσολογικές μεταβλητές είναι ασαφή σύνολα και όχι διακριτοί αριθμοί.

- **Γλωσσολογική Μεταβλητή**

Γλωσσολογική μεταβλητή είναι μια μεταβλητή της οποίας οι τιμές είναι λέξεις ή φράσεις σε μια φυσική ή τεχνητή γλώσσα.

Ως γλωσσολογική μεταβλητή ορίζεται η τετράδα:

(x, T, U, G)

όπου: x: το όνομα της γλωσσολογικής μεταβλητής

T: το σύνολο των τιμών της μεταβλητής, το οποίο περιέχει ασαφή σύνολα

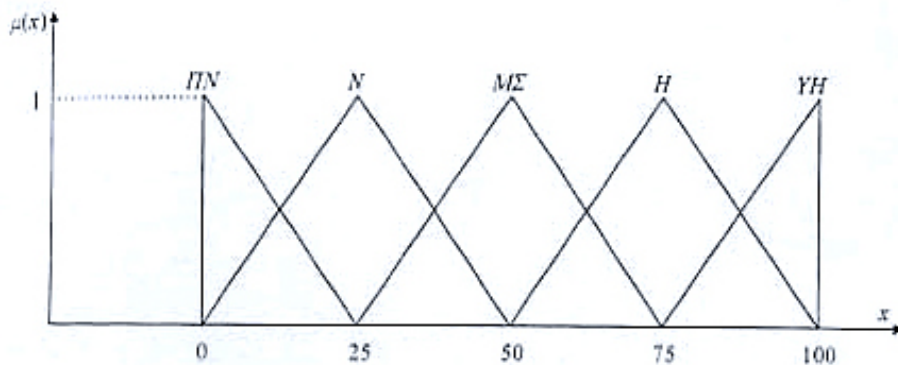
U: το πεδίο ορισμού της μεταβλητής το οποίο διαμερίζεται στα ασαφή σύνολα του συνόλου τιμών

G: ένας συντακτικός κανόνας που δίνει τα ονόματα τιμών της μεταβλητής, δηλ. τα ονόματα των ασαφών συνόλων. Ο κανόνας αυτός είναι εμπειρικός και συνήθως ορίζεται από το σχεδιαστή της γλωσσολογικής μεταβλητής

Ένα απλό παράδειγμα που θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε την έννοια της γλωσσολογικής μεταβλητής και τις τιμές που παίρνει αυτή περιέχοντας ασαφή σύνολα, είναι η ανθρώπινη ηλικία (σε έτη) και τα ασαφή σύνολα που ορίζονται ως εξής:

x : η ηλικία
 ΠΝ: Πολύ Νέος
 Ν: Νέος
 ΜΣ: Μεσήλικας
 Η: Ηλικιωμένος
 ΥΗ: Υπερήλικας
 $T = \{\Pi N, N, M\Sigma, H, YH\}$
 $U = [0, 100]$

Η ερμηνεία των στοιχείων του ορισμού της γλωσσολογικής μεταβλητής που δόθηκε παραπάνω φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2.2.3.6).



Εικ. 2.2.3.6: Χαρακτηριστικά της Γλωσσολογικής Μεταβλητής που αναφέρεται στην ανθρώπινη ηλικία

- **Ασαφείς Προτάσεις**

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των κλασικών και των ασαφών προτάσεων είναι το εύρος των βαθμών αληθείας τους. Ενώ μια κλασική πρόταση είναι αληθής ή ψευδής, μια ασαφής πρόταση είναι κατά ένα ποσοστό αληθής ή ψευδής αντίστοιχα.

Οι γενικές κατηγορίες ασαφών προτάσεων είναι οι: (α) Ασαφείς προτάσεις χωρίς υπόθεση και (β) Ασαφείς προτάσεις με υπόθεση, ή αλλιώς ασαφείς κανόνες. Η κατηγορία που χρησιμοποιείται κυρίως είναι η δεύτερη και αυτή χρησιμοποιείται και σε αυτή την εργασία, οπότε στην παράγραφο αυτή θα αναπτύξουμε τα βασικά χαρακτηριστικά μόνο των ασαφών κανόνων.

Η γενική δομή των ασαφών κανόνων είναι:

Αν (μια υπόθεση ισχύει) **Τότε** (ένα συμπέρασμα εξάγεται) (2.2.3.5)

Στο σχεδιασμό ασαφών συστημάτων τόσο η υπόθεση όσο και το συμπέρασμα του κανόνα εμπλέκουν γλωσσολογικές μεταβλητές, που όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι τιμές τους είναι ασαφή σύνολα. Άρα ο κανόνας μπορεί να γραφεί ως:

Αν x είναι A **Τότε** y είναι B (2.2.3.6)

όπου: x, y : γλωσσολογικές μεταβλητές

X, Y : τα πεδία ορισμού τους αντίστοιχα, και

A, B : ασαφή σύνολα ορισμένα στα πεδία X και Y αντίστοιχα.

- **Επαγωγή Ασαφών Κανόνων**

Η επαγωγή του ασαφούς κανόνα της προηγούμενης παραγράφου είναι μια ασαφής σχέση η οποία ορίζεται στο καρτεσιανό επίπεδο των μεταβλητών που εμπλέκονται στην πρόταση.

- **Μηχανισμός Εξαγωγής Συμπεράσματος Ασαφούς Κανόνα**

Η εξαγωγή συμπεράσματος από τον κανόνα

Αν x είναι A **Τότε** y είναι B

είναι μια πράξη σύνθεσης μεταξύ ενός ασαφούς συνόλου και της επαγωγής του κανόνα. Το ασαφές σύνολο εκφράζει ένα γεγονός που ισχύει για μια από τις γλωσσολογικές μεταβλητές (x ή y) και το συμπέρασμα εξάγεται από την παραπάνω σύνθεση είναι ένα ασαφές σύνολο ορισμένο στο πεδίο ορισμού της μιας ή της άλλης μεταβλητής (y ή x).

Σε γενικές γραμμές ο συνθετικός κανόνας επαγωγής διακρίνεται σε δυο γενικές κατηγορίες:

(α) ο συνθετικός κανόνας επαγωγής «Μεγίστου- Ελαχίστου» (max- min), ο οποίος συνθέτει τον τύπο της ένωσης $\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ (μέγιστο)

με τον τύπο της τομής $\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ (ελάχιστο)

(β) ο συνθετικός κανόνας επαγωγής «Μεγίστου- Γινομένου» (max- prod), ο οποίος συνθέτει τον τύπο της ένωσης $\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ (μέγιστο)

με τον τύπο της τομής $\mu_{A \cap B} = \mu_A(x)\mu_B(x)$ (γινόμενο)

Οι μηχανισμοί εξαγωγής συμπεράσματος ενός ασαφούς κανόνα είναι:

(α) Ευθύς Μηχανισμός

Πρόταση: **Αν** x είναι A **Τότε** y είναι B

Γεγονός: x είναι A'

Συμπέρασμα: y είναι B'

(β) Αντίστροφος Μηχανισμός

Πρόταση: **Αν** x είναι A **Τότε** y είναι B

Γεγονός: y είναι B'

Συμπέρασμα: x είναι A'

2.2.3.3 Ασαφή Συστήματα - Βασική δομή

Τα ασαφή συστήματα ονομάζονται επίσης συστήματα επαγωγής ή ασαφή μοντέλα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι ενσωματώνουν την ανθρώπινη λογική, εκτίμηση και εμπειρία για τον καθορισμό μιας στρατηγικής απόφασης. Επιτυχείς εφαρμογές των Ασαφών Συστημάτων αποτελούν αυτές σε πεδία αυτόματου ελέγχου, ταξινόμηση δεδομένων, λήψης αποφάσεων, και εμπειρικών συστημάτων (expert systems). Τα ασαφή συστήματα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα κλασικά ασαφή συστήματα, τα ασαφή συστήματα Takagi- Sugeno και τα δυναμικά ασαφή συστήματα. Η βασική δομή ενός ασαφούς συστήματος δίνεται στην εικόνα Εικ. 2.2.3.7. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο προσομοίωσης, ανάπτυξης, σχεδιασμού και επεξεργασίας σημάτων καθώς και ανάπτυξης συστημάτων με εφαρμογή της θεωρίας των ασαφών συνόλων [154].

Οι επιμέρους μονάδες από τις οποίες αποτελείται ένα κλασικό ασαφές σύστημα είναι:

- Μονάδα ασαφοποίησης
- Γνωσιολογική βάση δεδομένων, η οποία αποτελείται από τους ασαφείς κανόνες και τα ασαφή σύνολα
- Μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος
- Μονάδα αποασαφοποίησης



Εικ. 2.2.3.7: Βασική δομή Κλασικού Ασαφούς Συστήματος, όπου:

- (1): Διακριτή είσοδος,
- (2): Ασαφής είσοδος
- (3): Ασαφής έξοδος
- (4): Διακριτή έξοδος

(I) Μονάδα ασαφοποίησης

Σύμφωνα με την ανθρώπινη γλώσσα η λέξη «ασαφοποίηση» έχει άμεση σχέση με την ανακρίβεια [153]. Η ασαφοποίηση είναι μια υποκειμενική διαδικασία κατά την οποία μετρήσιμες, διακριτές τιμές μετασχηματίζονται σε γλωσσολογικά μεγέθη. Άρα η ασαφοποίηση αποτελεί μια απεικόνιση διακριτών (πραγματικών) αριθμών σε ασαφείς αριθμούς, ή γενικότερα σε ασαφή σύνολα. Η ασαφοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο αναφορικά με την επεξεργασία ανακριβούς πληροφορίας. Η ύπαρξή της είναι απαραίτητη διότι η επεξεργασία των δεδομένων στο ασαφές σύστημα πραγματοποιείται αποκλειστικά με ασαφή σύνολα. Οι μέθοδοι ασαφοποίησης είναι οι εξής:

(α) Μετατροπή σε ασαφή σύνολα του ενός στοιχείου

Με τη μέθοδο αυτή μια διακριτή τιμή μετασχηματίζεται σε ασαφές σύνολο το οποίο περιέχει μόνο ένα στοιχείο (fuzzy singleton). Το στοιχείο αυτό μετέχει στο ασαφές σύνολο με βαθμό συμμετοχής ίσο με τη μονάδα. Η μέθοδος αυτή δεν εισάγει κανενός είδους ασάφεια για τη διακριτή τιμή, αλλά χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ασαφών συστημάτων επειδή μπορεί να εφαρμοστεί πολύ εύκολα.

(β) Μετατροπή σε ασαφείς αριθμούς

Αυτή η μέθοδος ασαφοποίησης μετατρέπει διακριτούς αριθμούς σε ασαφείς αριθμούς οι οποίοι όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιούνται ευρέως στο σχεδιασμό ασαφών συστημάτων. Εφαρμόζεται κυρίως όταν τα μετρήσιμα μεγέθη που θέλουμε να ασαφοποιήσουμε εμπεριέχουν θόρυβο.

(II) Γνωσιολογική Βάση

Η μονάδα της γνωσιολογικής βάσης αποτελείται από δυο τύπους πληροφοριών:

- Τα **Ασαφή Σύνολα** στα οποία περιέχονται πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και το πλήθος των συναρτήσεων συμμετοχής και τα πεδία ορισμού των ασαφών συνόλων κάθε μεταβλητής [154]. Είναι η μονάδα εκείνη του ασαφούς συστήματος στην οποία ορίζονται τα χαρακτηριστικά των γλωσσολογικών μεταβλητών του συστήματος, δηλ. τα πεδία ορισμού και τα ασαφή σύνολα στα οποία αυτά διαιρούνται. Οι παράμετροι των ασαφών συνόλων ονομάζονται παράμετροι ασαφούς συστήματος. Το κύριο μέλημα στο σχεδιασμό της βάσης δεδομένων είναι ο σωστός ορισμός αυτών των παραμέτρων.
- Οι **Ασαφείς Κανόνες** οι οποίοι ουσιαστικά αποτελούν προσομοίωση της ανθρώπινης λογικής προσδιορίζοντας την αντιστοιχία των ασαφών εξόδων μέσω των ασαφών εισόδων του συστήματος. Οι μεταβλητές σε ένα ασαφές σύστημα είναι δυο τύπων: οι μεταβλητές εισόδου και οι μεταβλητές εξόδου, δηλαδή τα αποτελέσματα. Για κάθε μεταβλητή του συστήματος ορίζονται τα αντίστοιχα ασαφή σύνολα, και ο συνδυασμός τους αποτελεί τους ασαφείς κανόνες.

Οι τιμές των μεταβλητών τόσο κατά την είσοδο όσο και κατά την έξοδο του συστήματος είναι διακριτές. Η μετατροπή των διακριτών τιμών σε ασαφή σύνολα και αντίστροφα επιτυγχάνεται μέσω των μονάδων ασαφοποίησης και αποασαφοποίησης αντίστοιχα.

Η βάση των ασαφών κανόνων αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος. Είναι ένας δομημένος συνδυασμός ασαφών συνόλων αντικατοπτρίζοντας ουσιαστικά τη στρατηγική της απόφασης. Οι ασαφείς κανόνες εκφράζουν τις σχέσεις απόφασης σε **Αν - Τότε** σχήμα. Για παράδειγμα για ένα σύστημα με δυο μεταβλητές εισόδου και μια μεταβλητή εξόδου, ένας ασαφής κανόνας έχει τη γενική μορφή:

ΑΝ x είναι A **ΚΑΙ** y είναι B **ΤΟΤΕ** z είναι C

Γενικότερα: έστω ότι για m εισόδους και n εξόδους ενός ασαφούς συστήματος έχουμε K αριθμό ασαφών κανόνων. Ένας τυχαίος k κανόνας ($1 \leq k \leq K$) εκφράζεται ως εξής [153]:

Αν x_1 είναι A_1^k και x_2 είναι A_2^k και..... και x_m είναι A_m^k
Τότε y_1 είναι B_1^k και y_2 είναι B_2^k και..... και y_n είναι B_n^k (2.2.3.7)

όπου x_i , $i = 1, 2, \dots, m$ και y_j , $j = 1, 2, \dots, n$ είναι αντίστοιχα οι γλωσσολογικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου, ενώ είναι A_i^k , B_j^k ασαφή σύνολα.

Σ' αυτή την εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο του Mamdani του οποίου η γενική μορφή είναι [152]:

$$\forall r \in R : \text{if } \bigwedge_{1 \leq i \leq m} (x_i \in A_i^r) \text{ then } \bigwedge_{1 \leq j \leq n} (y_j \in B_j^r) \quad (2.2.3.8)$$

όπου: m : ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου

n : ο αριθμός των μεταβλητών εξόδου

x_i , $1 \leq i \leq m$: οι μεταβλητές εισόδου

A_i^r , $1 \leq i \leq m$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου

y_j , $1 \leq j \leq n$: οι μεταβλητές εξόδου

B_j^r , $1 \leq j \leq n$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εξόδου

Η μέθοδος εξαγωγής συμπεράσματος του Mamdani είναι η συχνότερα καταγεγραμμένη ασαφής μεθοδολογία. Αυτή η μέθοδος ήταν μεταξύ των πρώτων συστημάτων ελέγχου που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων. Προτάθηκε από τον

Ebrahim Mamdani το 1975 σε μια προσπάθεια ελέγχου ενός συνδυασμού ατμομηχανής και λέβητα συνθέτοντας ένα σετ γλωσσολογικών κανόνων ελέγχου οι οποίοι αποτελούσαν απόρροια της εμπειρίας των ανθρώπων που χειρίζονταν τα μηχανήματα [155]. Για να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του ασαφούς συστήματος οι ασαφείς κανόνες πρέπει να έχουν ορισμένες ιδιότητες [153]:

- **Πληρότητα:** ένα σύνολο κανόνων είναι πλήρες, αν για οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών εισόδων, στην έξοδο δημιουργείται ένα ασαφές σύνολο B με ύψος $h(B) > 0$. Δηλ. η βάση κανόνων ενεργοποιεί τουλάχιστον ένα κανόνα τη φορά. Για να γίνει εφικτό κάτι τέτοιο, πρέπει το σύνολο των κανόνων να καλύπτει ομοιόμορφα όλη την περιοχή στην οποία οι μεταβλητές εισόδου παίρνουν τιμές.
- **Συνοχή:** ένα σύνολο κανόνων έχει συνοχή όταν δεν υπάρχουν δυο ή περισσότεροι κανόνες με την ίδια υπόθεση και διαφορετικό συμπέρασμα. Η βάση κανόνων πρέπει να έχει συνοχή, γιατί στην αντίθετη περίπτωση οδηγούμαστε σε λάθος εκτίμηση της τιμής εξόδου.
- **Συνέχεια:** ένα σύνολο κανόνων είναι συνεχές όταν δεν ενεργοποιούνται κανόνες των οποίων τα ασαφή σύνολα (συμπεράσματα) έχουν ως τομή το κενό σύνολο. Η ύπαρξη συνέχειας των κανόνων εξασφαλίζει το ότι δεν υπάρχει περιοχή στο χώρο της εξόδου, η οποία να μην αντιστοιχεί σε κάποιο ασαφές σύνολο.
- **Αλληλεπίδραση:** συνήθως για ένα συνδυασμό των μεταβλητών εισόδου ενεργοποιούνται πολλοί κανόνες οι οποίοι συνεισφέρουν όλοι στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό το φαινόμενο λέγεται αλληλεπίδραση των κανόνων. Για ένα συνδυασμό τιμών των μεταβλητών εισόδου αντιστοιχεί μια περιοχή τιμών για τη μεταβλητή εξόδου, η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αλληλεπίδραση των κανόνων πρέπει να υφίσταται, αλλά ταυτόχρονα να είναι ελάχιστη, γιατί υπάρχει πιθανότητα το τελικό αποτέλεσμα να αλλοιωθεί και η έξοδος να μην ανήκει στην παραπάνω περιοχή τιμών.

(III) Μονάδα Εξαγωγής Συμπεράσματος

Η μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος ή αλλιώς *Ασαφής Λογική Μονάδα*, αποτελεί τον επεξεργαστή του συστήματος [154]. Εκτελεί τις παρακάτω πράξεις μεταξύ των ασαφών συνόλων για την επαγωγή της απόφασης εξόδου:

- Προσδιορισμός του βαθμού συμμετοχής των διακριτών μεταβλητών εισόδου στα διάφορα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου
- Υπολογισμός του βαθμού πυροδότησης κάθε ασαφούς κανόνα
- Εξαγωγή των μεταβλητών εξόδου του συστήματος με βάση τους πυροδοτημένους κανόνες και τα ορισμένα ασαφή σύνολα κάθε μεταβλητής

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ασαφούς επαγωγής είναι, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο:

- (α) Μεγίστου- Ελαχίστου (max- min)
- (β) Μεγίστου- Γινομένου (max- prod)

Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπεράσματος της βάσης κανόνων χρησιμοποιεί τις δυο παραπάνω μεθόδους καθώς και τον ευθύ μηχανισμό εξαγωγής συμπεράσματος για να ερμηνεύσει τον κάθε κανόνα ξεχωριστά και λαμβάνει ως τελικό αποτέλεσμα την ένωση των

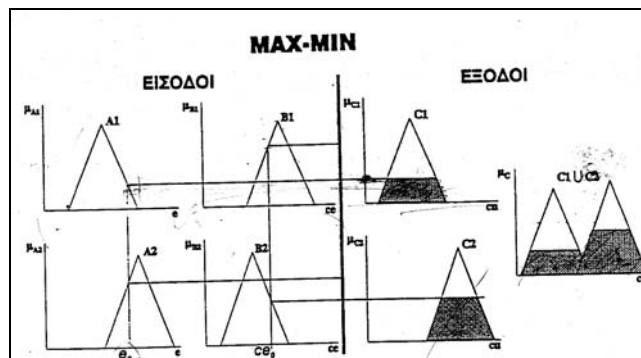
συμπερασμάτων όλων των κανόνων. Το σχήμα που απεικονίζει τον ευθύ μηχανισμό εξαγωγής συμπεράσματος για το σύνολο των κανόνων είναι:

Αν x_1 είναι A_1^1 και x_2 είναι A_2^1 και..... και x_m είναι A_m^1	Τότε y είναι B^1
Αν x_1 είναι A_1^2 και x_2 είναι A_2^2 και..... και x_m είναι A_m^2	Τότε y είναι B^2
.	.
.	.
.	.
Αν x_1 είναι A_1^K και x_2 είναι A_2^K και..... και x_m είναι A_m^K	Τότε y είναι B^K

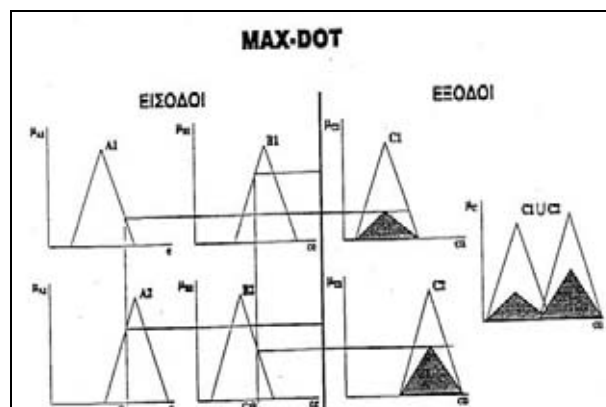
Γεγονός: x_1 είναι A_1 και x_2 είναι A_2 και..... και x_m είναι A_m

Συμπέρασμα: y είναι B

Η εικόνα 2.6.8 δείχνει το μηχανισμό εξαγωγής συμπεράσματος για ένα σύστημα 2 εισόδων και μιας εξόδου με δυο ασαφείς κανόνες όπου το διάνυσμα εισόδου είναι $x_k = [x_{k1}, x_{k2}]^T$. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικ. 2.2.3.8(α) φαίνεται διαγραμματικά η εξαγωγή συμπεράσματος από τους δυο κανόνες με τη χρήση του «μεγίστου-ελαχίστου» συνθετικού κανόνα, και στην Εικ. 2.2.3.8(β) φαίνεται η εξαγωγή του συμπεράσματος με τον τελεστή μέσου μεγίστου ύψους.



Εικ. 2.2.3.8(α): Εξαγωγή συμπεράσματος με συνθετικό κανόνα «μεγίστου-ελαχίστου»



Εικ. 2.2.3.8 (β): Εξαγωγή συμπεράσματος με συνθετικό κανόνα «μέσου μεγίστου»

(IV) Μονάδα Αποασαφοποίησης

Η μονάδα αποασαφοποίησης απεικονίζει τις ασαφείς τιμές της εξόδου σε διακριτές. Οι βασικότερες μέθοδοι αποασαφοποίησης είναι:

(α) Μέση τιμή των μεγίστων (μέθοδος μέσου μεγίστου)

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το βαθμό πυροδότησης του κάθε κανόνα. Στη συνέχεια από τους K κανόνες επιλέγει τους K' ($1 \leq K' \leq K$) οι οποίοι παρουσιάζουν βαθμό πυροδότησης μη μηδενικό. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων των K' κανόνων, δίνει ως διακριτή τιμή εξόδου τον μέσο όρο των κέντρων τους b^k ($k= 1, 2, \dots, K'$):

(β) Κέντρο βάρους

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, η μέθοδος του «κέντρου βάρους» προσδιορίζει το

$$y = \frac{\sum_{k=1}^{K'} b^k}{K'} \quad (2.2.3.9)$$

βαθμό πυροδότησης του κάθε κανόνα ξεχωριστά. Στη συνέχεια η διακριτή τιμή της εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^K b^k \mu_{B_k}(y)}{\sum_{k=1}^K \mu_{B_k}(y)} \quad (2.2.3.10)$$

όπου b^k το κέντρο του ασαφούς συνόλου της μεταβλητής εξόδου που συμμετέχει στον k κανόνα και $\mu_{B_k}(y)$ είναι ο βαθμός πυροδότησης του k κανόνα.

Οι δυο μέθοδοι αποασαφοποίησης που αναπτύχθηκαν παραπάνω είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στο σχεδιασμό ασαφών συστημάτων, γιατί έχουν αποδειχθεί πολύ αποδοτικές σε διάφορες περιοχές εφαρμογών.

2.2.4 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (ΓΣΠ): ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΙΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

2.2.4.1 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών είναι αυτά που έχουν την δυνατότητα να χειρίζονται γεωγραφικά δεδομένα σε συνδυασμό με «ποσοτικές» και «περιγραφικές» πληροφορίες (βάσεις δεδομένων).

Ένα ΓΣΠ περιλαμβάνει:

- Τεχνικές για εισαγωγή γεωγραφικής πληροφορίας σε ηλεκτρονική μορφή δηλ. μετατροπή της σε ψηφιακή μορφή και τεχνικές για αποθήκευσή της σε συμπιεσμένη μορφή σε ψηφιακά αποθηκευτικά μέσα.
- Μεθόδους αυτοματοποιημένης ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων, αναζήτηση προτύπων, συνδυασμό διαφορετικών ειδών δεδομένων, δυνατότητα μετρήσεων, κ.α.
- Μεθόδους πρόβλεψης των αποτελεσμάτων πιθανών σεναρίων
- Τεχνικές αναπαράστασης των δεδομένων σε μορφή χαρτών, εικόνων, πινάκων κ.τ.λ.
- Δυνατότητες για έξοδο των αποτελεσμάτων σε μορφή αριθμών και πινάκων.

Ένα ΓΣΠ συνδέει χωρικά δεδομένα με γεωγραφική αναφορά για συγκεκριμένη οντότητα του χάρτη. Η πληροφορία αποθηκεύεται ως ιδιότητα (attribute) του γραφικά παρουσιαζόμενου χαρακτηριστικού σε μια Βάση Δεδομένων. Για κάθε χαρακτηριστικό αποθηκεύονται τρεις βασικές πληροφορίες στη ΒΔ: η γεωγραφική πληροφορία, η προβολή (projection) πάνω στην οποία εκφράζεται η γεωγραφική πληροφορία και οι ιδιότητές του. Για κάθε χαρακτηριστικό του χάρτη αποθηκεύονται στη ΒΔ του ΓΣΠ οι εξής πληροφορίες: τι χαρακτηριστικό είναι (γραμμή, πολύγωνο, σημείο), που βρίσκεται και πως σχετίζεται με τα άλλα χαρακτηριστικά.

Εκτός της δυνατότητας σχεδιασμού ή χειρισμού χαρτών ένα ΓΣΠ μπορεί να συνδέει «εξωτερικές» βάσεις δεδομένων με οντότητες που ανήκουν στον χάρτη. Επίσης, διαθέτει ένα σύνολο από εργαλεία που μπορούν να διαχωρίσουν τα διάφορα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στις εξωτερικές ΒΔ εμφανίζοντας π.χ. αντικείμενα ή περιοχές που ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια με διαφορετικά χρώματα ή σχήματα.

Πρόκειται για ένα σημαντικό εργαλείο λήψης αποφάσεων και σχεδιασμού στρατηγικής αφού συνδυάζει δεδομένα από διαφορετικές πηγές και διαφορετικούς τομείς, ενώ δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού (χωρική πληροφορία) και εισαγωγής πρόσθετων πληροφοριών που συνδέονται μεταξύ τους με Βάσεις Δεδομένων. Επίσης, απαντά σε απλά ή σύνθετα ερωτήματα που αφορούν στα σχεδιασμένα αντικείμενα σε συνδυασμό με τα ποσοτικά στοιχεία των Βάσεων Δεδομένων και πληρώντας συγκεκριμένες συνθήκες, δίνοντας δε, τη δυνατότητα ανάδειξης των αποτελεσμάτων αυτών (με διαφορετικά χρώματα, γραμμοσκιάσεις, κ.τ.λ...)

Το ΓΣΠ είναι μια οργανωμένη συλλογή μηχανικών υπολογιστικών συστημάτων (hardware), λογισμικών συστημάτων (software), γεωγραφικών δεδομένων και ανθρωπίνου δυναμικού, με σκοπό τη συλλογή, καταχώρηση, οργάνωση, διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση, κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά στο γεωγραφικό περιβάλλον. Αποτελούν ένα σημαντικό

πολυεπιστημονικό εργαλείο λήψης αποφάσεων και γενικότερου σχεδιασμού καθότι μπορούν να ενσωματώσουν και να διαχειριστούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές και από διαφορετικούς τομείς. Με τα ΓΣΠ διευκολύνονται οι γραφικές αναπαραστάσεις μεγαλύτερων ή μικρότερων εκτάσεων, καθώς και η δημιουργία χωρικών μοντέλων διαφόρων τύπων για πολλές χρήσεις. Καθώς, όμως έχουν τη δυνατότητα σύνθετων αναζητήσεων στα δεδομένα τους ή και πράξεων μεταξύ αυτών, αποτελούν σημαντικό εργαλείο και για την υποστήριξη αποφάσεων σχεδιασμού και πολύκριτηριακές αναλύσεις [132].

Στη δημιουργία ενός ΓΣΠ περιλαμβάνεται η σχεδίαση του υποβάθρου (δηλαδή, η γραφική απόδοση της χωροθέτησης των στοιχείων που εξετάζονται) και η περαιτέρω επεξεργασία των στοιχείων αυτών, με τη γεωμετρική διόρθωση ενδεχομένων σχεδιαστικών λαθών, η δημιουργία τοπολογιών και η διασύνδεση των σχεδιασμένων οντοτήτων με πρόσθετα στοιχεία, που συνήθως βρίσκονται σε κάποια βάση δεδομένων [132].

Η «κρίσιμη» ιδιότητα των ΓΣΠ, που καθορίζει την αναγκαιότητα της χρήσης τους, εντοπίζεται στο γεγονός ότι ταυτόχρονα με την κάλυψη των αναγκών της χαρτογράφησης, της πρόσβασης σε βάσεις δεδομένων και της χωρικής ανάλυσης, απαντούν σε ερωτήματα που μπορεί να είναι απλά ή σύνθετα, ανάλογα με το αν περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές των ερωτημάτων μπορεί να αναφέρονται:

- Στη θέση των αντικειμένων στο χώρο, είτε απόλυτα (συντεταγμένες) ή σε σχέση με άλλα αντικείμενα (απόσταση από αντικείμενα) – “Τι βρίσκεται...;” “Που βρίσκεται...;”
- Σε διάφορα χαρακτηριστικά των αντικειμένων (π.χ. μέγεθος, είδος, θεματικός χάρτης στον οποίο ανήκουν)
- Σε σύνθετα ερωτήματα της βάσης δεδομένων (δηλαδή, συνθήκες εκτός του γεωγραφικού μέρους του ΓΣΠ που συνδυάζουν λογικές πράξεις μεταξύ χαρακτηριστικών οιονδήποτε αντικειμένων της βάσης που μπορεί να είναι *τάσεις* (“Τι μεταβολή έχουμε...;” - δηλαδή αναζητά τις διαφορές που προκύπτουν δυναμικά μέσα στο χρόνο), *πρότυπα* (“Από ποια χωρικά πρότυπα χαρακτηρίζεται...;” - δηλαδή ζητούνται συσχετισμοί οι οποίοι διέπουν φαινόμενα που συμβαίνουν ταυτόχρονα και αφορούν ένα συγκεκριμένο χώρο), *μοντέλα* (“Τι θα συνέβαινε αν...;” - Σε αυτό το ερώτημα η απάντηση απαιτεί συνολικότερη επιστημονική θεώρηση υπό την έννοια ότι μόνη η γεωγραφική πληροφορία δεν επαρκεί ως παράμετρος ανάλυσης των φαινομένων) [132].

Σημαντική λειτουργία των ΓΣΠ είναι και η παρουσίαση, είτε των αποτελεσμάτων των ερωτημάτων, ή των διαφόρων χαρακτηριστικών στοιχείων του συστήματος. Πέρα από τη χαρτογραφική απεικόνιση, το σύστημα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αναδείξει τα στοιχεία που εντόπισε ότι πληρούν τις συνθήκες του εκάστοτε ερωτήματος και μάλιστα η ανάδειξη αυτή πρέπει να γίνεται με τον καταλληλότερο κάθε φορά τρόπο. Ένα σημαντικό άλλωστε πλεονέκτημα των ΓΣΠ έναντι των παραδοσιακών θεματικών απεικονίσεων είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικών παρουσιάσεων των ίδιων δεδομένων, ανάλογα με τα στοιχεία που χρειάζεται να τονιστούν κάθε φορά.

Άλλα πλεονεκτήματα των ΓΣΠ είναι:

- η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των βάσεων δεδομένων
- το εύχρηστο περιβάλλον επικοινωνίας για το χρήστη
- το ισχυρό περιβάλλον επεξεργασίας
- το κατανοητό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών
- η υποστήριξη διαγραμμάτων, χαρτών, πινάκων, γραφικών, εικόνων, CAD
- η προηγμένη δυνατότητα ανάλυσης δικτύων
- η προηγμένη δυνατότητα χωρικής ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων

Σε σχέση με την ανάλυση, τα περισσότερα ΓΣΠ βασίζονται στη λογική της οργάνωσης της πληροφορίας σε επίπεδα. Κάθε επίπεδο περιέχει συγκεκριμένη κατηγορία δεδομένων ομοιογενούς υφής, στο οποίο εγκαθίστανται από το σύστημα χωρικές σχέσεις ανάμεσα στα χαρακτηριστικά που το απαρτίζουν. Κατόπιν γίνεται συσχέτιση των επιπέδων βάσει ενός κοινού κωδικού σύνδεσης των χαρακτηριστικών. Ο κωδικός αυτός αντιπροσωπεύει τη θέση του κάθε αντικειμένου στο γεωγραφικό χώρο. όλο το οικοδόμημα της χωρικής ανάλυσης μέσω ΓΣΠ βασίζεται σε μία σειρά συνδυασμούς με βάση απλές λογικές μαθηματικές πράξεις ανάμεσα στα επίπεδα πληροφορίας. Το αποτέλεσμα κάθε συνδυασμού προκρίνει ένα ανεξάρτητο επίπεδο – συνισταμένη, στο οποίο περιέχεται φιλτραρισμένη η πληροφορία των συνιστωσών επιπέδων βάσει της λογικής των ερωτήσεων [133].

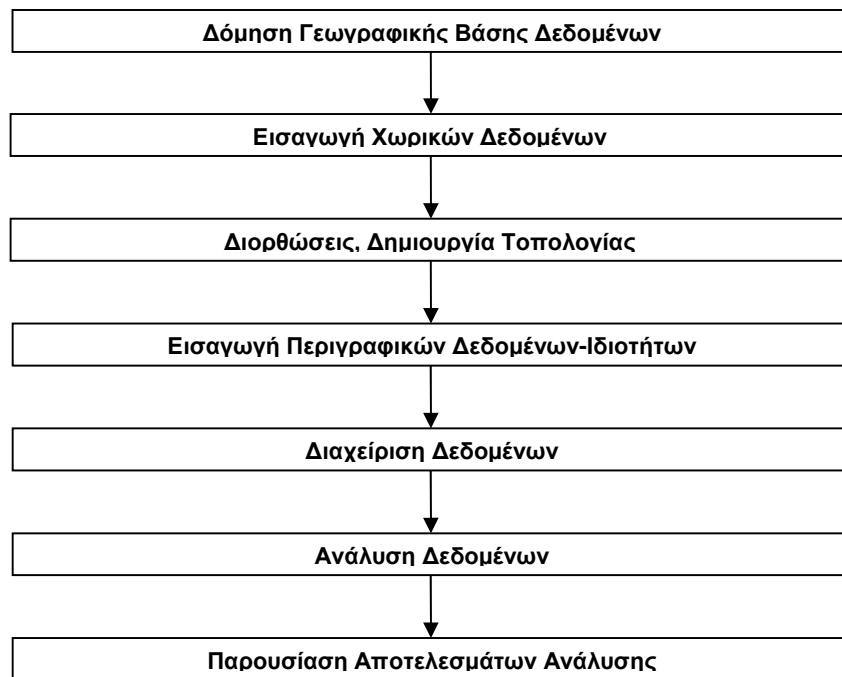
Ένας καθοριστικός παράγοντας στη λειτουργία ενός ΓΣΠ είναι η δημιουργία της βάσης δεδομένων. Ένα ΓΣΠ οργανώνεται σε μια σειρά βημάτων που το καθένα κτίζεται πάνω στο προηγούμενο. (Σχεδιασμός βάσης δεδομένων – εισαγωγή χωρικής πληροφορίας – επεξεργασία και δημιουργία τοπολογιών – εισαγωγή πληροφορίας διαφόρων χαρακτηριστικών – διαχείριση πληροφορίας – ανάλυση πληροφορίας – παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης). Κατά την εισαγωγή των χωρικών δεδομένων, η διαδικασία της δόμησης της τοπολογίας, είναι ιδιαίτερης σημαντικότητας. Η δόμηση της τοπολογίας, είναι αναγκαία για τη δημιουργία των χωρικών σχέσεων μεταξύ των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός θεματικού επιπέδου, δηλαδή για τη δημιουργία ψηφιακών σχέσεων, οι οποίες θα είναι αναγνωρίσιμες όταν κοιτάμε ένα χάρτη και σχετίζονται με τη συνέχεια, την περιεκτικότητα και τη γεινίαση [135]. Η δόμηση της τοπολογίας για ένα θεματικό επίπεδο δημιουργεί παράλληλα και τον πίνακα των περιγραφικών χαρακτηριστικών του επιπέδου αυτού. Άρα, η δόμηση της τοπολογίας, που βοηθά στην κατανόηση των χωρικών σχέσεων, συνδέεται άμεσα και απόλυτα με την περιγραφική πληροφορία που καταγράφεται και αποθηκεύεται σε έναν πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών (attribute table) [135].

Παράλληλα, κατά την εισαγωγή πληροφοριών – δεδομένων διαφόρων χαρακτηριστικών των γεωγραφικών οντοτήτων, ο σχεδιασμός της βάσης δεδομένων είναι επίσης ιδιαίτερης σημαντικότητας, αφού:

(α) η όσο το δυνατόν αρτιότερη σχεδίαση της, καθιστά ευκολότερη τη διαχείρισή της και τη συνεργασία της με το ΓΣΠ διευκολύνοντας την επικοινωνία με αυτό στη φάση διατύπωσης σύνθετων ερωτημάτων [134], και

(β) εμμέσως πλην σαφώς συνδέεται με τη δόμηση της τοπολογίας μέσω του πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών, στον οποίο κατ' ουσία προσθέτει νέα περιγραφικά χαρακτηριστικά.

Ένα σχέδιο που αναπτύσσεται με τη βοήθεια ενός ΓΣΠ μπορεί να οργανωθεί σε σειρές λογικών βημάτων, καθένα από τα οποία "κτίζει" πάνω στο προηγούμενο. Οφείλουμε όμως να γνωρίζουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός σχεδίου. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα στάδια ανάπτυξης των λογικών βημάτων για μια εφαρμογή σχεδιασμού στο περιβάλλον του ΓΣΠ είναι :



Επίσης, πριν ξεκινήσουμε το σχεδιασμό των απαραίτητων διαδικασιών για την πραγμάτωση του ΓΣΠ οφείλουμε να καθορίσουμε πλήρως το πρόβλημα που θέλουμε να λύσουμε, καθώς και ποιες είναι οι μεταβλητές που το ορίζουν ή εμείς θεωρούμε ότι είναι σημαντικές και πρέπει οπωσδήποτε να λάβουμε υπόψη [135]. Παράλληλα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη [134]:

- Ποιο είναι το πρόβλημα και ποιοι οι εναλλακτικοί τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του,
- Ποια θα είναι τα τελικά προϊόντα του σχεδίου (αναφορές, χάρτες εργασίας, χάρτες παρουσίασης) συχνότητα παραγωγής υλικού,
- Προορισμός των τελικών προϊόντων του σχεδίου.

Για την ολοκλήρωση ενός ΓΣΠ πρέπει να είναι γνωστά τα τεχνικά του στοιχεία, τα εργαλεία εφαρμογής του, καθώς και οι δυνατότητες διαχείρισης των συμβατά σχεδιασμένων βάσεων δεδομένων [136].

Συνεπώς, τα τεχνικά στοιχεία ενός ΓΣΠ συνίστανται στα κάτωθι:

- **Hardware:** Είναι ο τεχνικομηχανικός εξοπλισμός, το υπολογιστικό σύστημα και τα περιφερειακά συστήματα με τα οποία εργάζεται το ΓΣΠ,
- **Software:** Το λογισμικό του ΓΣΠ, το οποίο δίνει τα εργαλεία και τις λειτουργίες που απαιτούνται για την αποθήκευση, ανάλυση, παρουσίαση και διαχείριση των γεωγραφικών δεδομένων και των χαρακτηριστικών τους,
- **Δεδομένα :** Μπορεί να είναι φωτογραφικό υλικό, διανυσματικό υλικό, δυναμικά δεδομένα π.χ. σε σχέση με το χρόνο κ.ά.

Για να αποδοθούν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (features) περιγραφικά χαρακτηριστικά (attributes) πρέπει να λάβει χώρα η ανάπτυξη βάσης δεδομένων. Το λογισμικό που υποστηρίζει και ελέγχει την είσοδο, την έξοδο και την αποθήκευση στοιχείων σε μια βάση δεδομένων συνιστά το σύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων (ΣΔΒΔ) (data base management system) [137]. Τα σύγχρονα ΣΔΒΔ χρησιμοποιούν μια ποικιλία μεθόδων για αποτελεσματική αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων. Οι βασικές δομές που χρησιμοποιούνται στα ΣΔΒΔ είναι η ιεραρχική δομή, η δικτυακή δομή, η σχεσιακή δομή και η αντικειμενοστραφής που κατ' ουσία αποτελεί εξέλιξη της δικτυακής δομής. Η ιεραρχική προσέγγιση είναι χρήσιμη όταν σκοπός μας είναι η γεωγραφική ανάλυση και χαρτογράφηση συνεχών και συναφών φαινομένων. Η δικτυακή προσέγγιση είναι ιδανική για την τοπολογική απόδοση διανυσματικών γραμμών και πολυγώνων, ενώ η αντικειμενοστραφής είναι χρήσιμη όταν οι οντότητες μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά ή αλληλεπιδρούν με συγκεκριμένους και εξειδικευμένους τρόπους. Τέλος, η σχεσιακή δομή, που χρησιμοποιήθηκε στο ΓΣΠ αυτής της διδακτορικής διατριβής, είναι κατάλληλη για την ανάκληση οντοτήτων με βάση τα χαρακτηριστικά τους ή για τη δημιουργία νέων χαρακτηριστικών και των τιμών τους από υπάρχοντα δεδομένα [135].

Μία βάση δεδομένων ενός ΓΣΠ μπορεί να περιέχει [136], [137]:

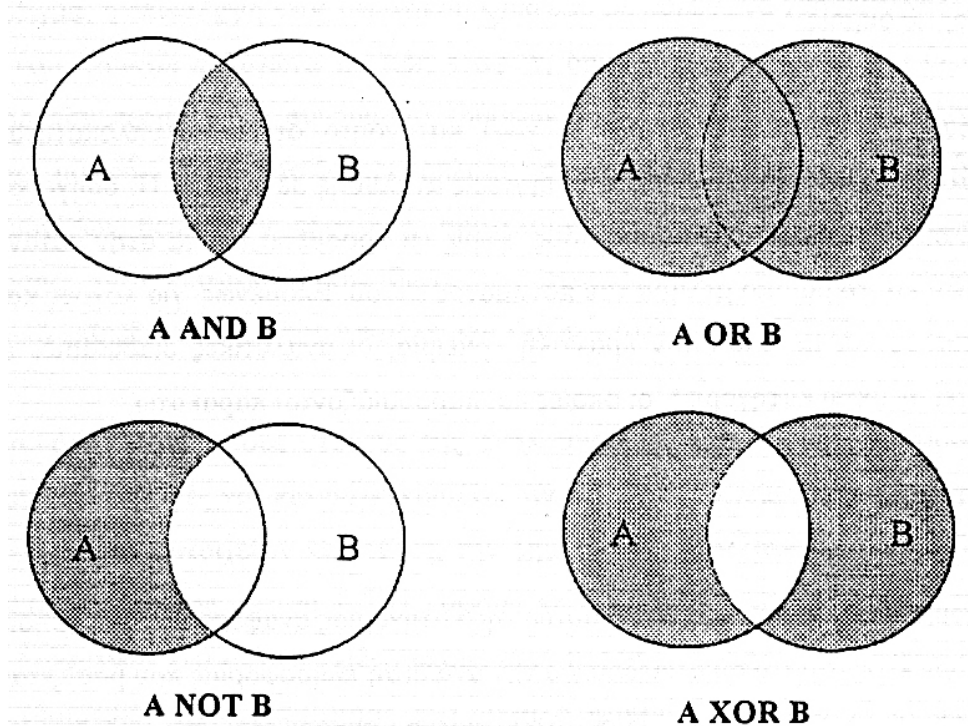
- **Ψηφιακούς Χάρτες:** Τα χωρικά δεδομένα μπορεί να είναι είτε σε μορφή raster (εικόνες αποτελούμενες από pixels) ή σε διανυσματική μορφή (σημεία και/ή γραμμές οριζόμενες από τις συντεταγμένες τους)
- **Ψηφιακές Εικόνες:** Οι εικόνες είναι raster και συνήθως σε format αρχείων jpeg για λόγους χωρητικότητας.
- **Πίνακες Μετρήσεων/Δεδομένων:** Τα αποτελέσματα των δεδομένων ομαδοποιούνται και οργανώνονται σε πίνακες

Για να λάβει χώρα η διαχείριση της ΒΔ (βάση δεδομένων) σε σχέση με τη διαδικασία της επιλογής χρησιμοποιούνται είτε τα κριτήρια τύπου Boolean, ή οι λογικές πράξεις.

Οι οντότητες ενός ΓΣΠ μπορούν να επιλεγούν βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους με τη χρήση των γνωστών κανόνων της άλγεβρας Boolean. Οι λειτουργίες της άλγεβρας Boolean εφαρμόζονται τόσο σε περιγραφικά χαρακτηριστικά μιας οντότητας, όσο και σε χωρικές και

τοπολογικές ιδιότητες μιας οντότητας. Οι τέσσερις βασικές πράξεις βάσει των οποίων καθορίζεται αν μια συνθήκη ανάμεσα σε δύο σύνολα είναι αληθινή ή όχι είναι οι εξής [135]:

- $A \text{ AND } B$: τομή των δύο συνόλων, δηλ. η πράξη αυτή εκπροσωπεί τις οντότητες που ανήκουν και στα δύο σύνολα A και B
- $A \text{ OR } B$: ένωση των δύο συνόλων, δηλ. η πράξη αυτή εκπροσωπεί τις οντότητες που ανήκουν είτε στο σύνολο A ή στο σύνολο B
- $A \text{ NOT } B$: διαφορά των δύο συνόλων, δηλ. η πράξη αυτή οριοθετεί τις οντότητες που ανήκουν στο σύνολο A αλλά όχι και στο σύνολο B
- $A \text{ XOR } B$: η πράξη αυτή οριοθετεί τις οντότητες που ανήκουν είτε στο σύνολο A ή στο σύνολο B , αλλά όχι και στα δύο



Εικ. 2.2.4.1: Άλγεβρα Boolean

Στην περίπτωση της εφαρμογής της διαδικασίας των λογικών πράξεων επιλέγεται ένα υποσύνολο των χωρικών στοιχείων με βάση μια επιλεγμένη λογική πράξη. Τέτοιες πράξεις είναι [135]:

- Ίσο με
- Διάφορο από
- Μεγαλύτερο από
- Μεγαλύτερο ή ίσο από
- Μικρότερο από

- Μικρότερο ή ίσο από
- Μεγαλύτερο και/ή ίσο και μικρότερο και/ή ίσο

Τέλος, μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες ανάλυσης ενός ΓΣΠ (ίσως η σημαντικότερη) είναι αυτή της επικάλυψης. Η επικάλυψη των θεματικών επιπέδων αποτελεί την πεμπτουσία ενός ΓΣΠ. Η επικάλυψη αποτελεί κατ' ουσία μια επέκταση των κανόνων της άλγεβρας Boolean από τα χαρακτηριστικά των οντοτήτων σε διαδικασίες που αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο οι οντότητες καλύπτουν το γεωγραφικό χώρο [135]. Η επικάλυψη μπορεί να είναι [135]:

- ένωση δηλ. η πράξη OR της Boolean άλγεβρας,
- ταυτότητα η οποία είναι αντίστοιχη με την ένωση μόνο που τα όρια του καινούργιου επιπέδου ορίζονται από τα όρια του επικαλυπτόμενου επιπέδου,
- τομή, δηλ. η πράξη AND της Boolean άλγεβρας,
- επικάλυψη σημείων ή γραμμών με πολύγωνα, όπου σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν μόνο οι διαδικασίες της ταυτότητας και της τομής,
- ποσοτικοί υπολογισμοί, όπου σε αυτόν τον τύπο χωρικής ανάλυσης το επιτιθέμενο επίπεδο είναι πάντα πολυγωνικό ενώ το επικαλυπτόμενο μπορεί να είναι σημειακό, γραμμικό ή πολυγωνικό.

Συνεπώς, τα εργαλεία εφαρμογής του ΓΣΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες διαδικασίες – εργασίες όπως:

- Υπολογισμός μετρήσεων μήκους και εμβαδού και περιμέτρου των χωρικών οντοτήτων,
- Αναζήτηση στη βάση δεδομένων και εντοπισμός περιοχών – σημείων τα οποία πληρούν συγκεκριμένες συνθήκες, ή διαθέτουν συγκεκριμένες ιδιότητες, ή/και βρίσκονται εντός κάποιων ορίων που ορίζει ο χρήστης, μέσω απλών και σύνθετων ερωτημάτων
- Στατιστική ανάλυση των δεδομένων των βάσεων και χωρική απεικόνισή τους

2.2.4.2 Εφαρμογές και χρησιμότητα των ΓΣΠ στις επεμβάσεις συντήρησης μνημείων

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι τα ΓΣΠ ανάλογα με τις εφαρμογές τους διαθέτουν (α) διαχειριστικές προσεγγίσεις τόσο σε σχέση με τη χαρτογραφία, όσο και σε σχέση με την πληροφορική, (β) προσεγγίσεις σε σχέση με τη χωρική ανάλυση, καθώς και (γ) σχεδιαστικές προσεγγίσεις [135]. Συνεπώς είναι φανερό ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να εφαρμοστούν σαν μεθοδολογική προσέγγιση στο θέμα του στρατηγικού σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης. Λέγοντας στρατηγικό σχεδιασμό επεμβάσεων συντήρησης εννοούμε το σύνολο των σχεδιασμένων χειρισμών - διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του στόχου της διατήρησης της κατάστασης συντήρησης των ιστορικών υλικών στο χρόνο. Δηλαδή τα ΓΣΠ μπορούν, λόγω των ευρέων δυνατοτήτων τους σε σχέση με την απεικόνιση, διαχείριση και ανάλυση χωρικών και μη δεδομένων, να καταγράψουν το σύνολο αυτών των σχεδιασμένων διαδικασιών - χειρισμών στο χώρο και στο χρόνο, επιτρέποντας τη συστηματική τους μελέτη, συσχέτιση και διαχείριση.

Ο χαρακτηρισμός των υλικών των αρχιτεκτονικών επιφανειών και η διάγνωση της φθοράς τους είναι το πρώτο και απαραίτητο βήμα για την ορθή προσέγγιση του σχεδιασμού των

επεμβάσεων συντήρησης. Παράλληλα, η καταγραφή και παρουσίαση των τύπων και της έκτασης της φθοράς στα αρχιτεκτονικά σχέδια και συνεπώς στην κλίμακα του μνημείου, παραμένει από τις πιο σημαντικές εργασίες για την ολοκλήρωση της κατηγοριοποίησης και απεικόνισης της παθολογίας ενός μνημείου με στόχο τον έλεγχο της εξέλιξης της φθοράς, καθώς και τον καλύτερο σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης [138]. Η σύγχρονη τεχνολογία μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε τα παραπάνω χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά μέσα καθιστώντας έτσι εφικτή την εφαρμογή ενός πιο σύγχρονου τρόπου έλεγχου της παθολογίας ενός κτιρίου, του κύκλου ζωής του, καθώς και του κόστους του κύκλου ζωής του, με απώτερο στόχο την προστασία του μέσω της πρόγνωσης και της πρόληψης [129], [140].

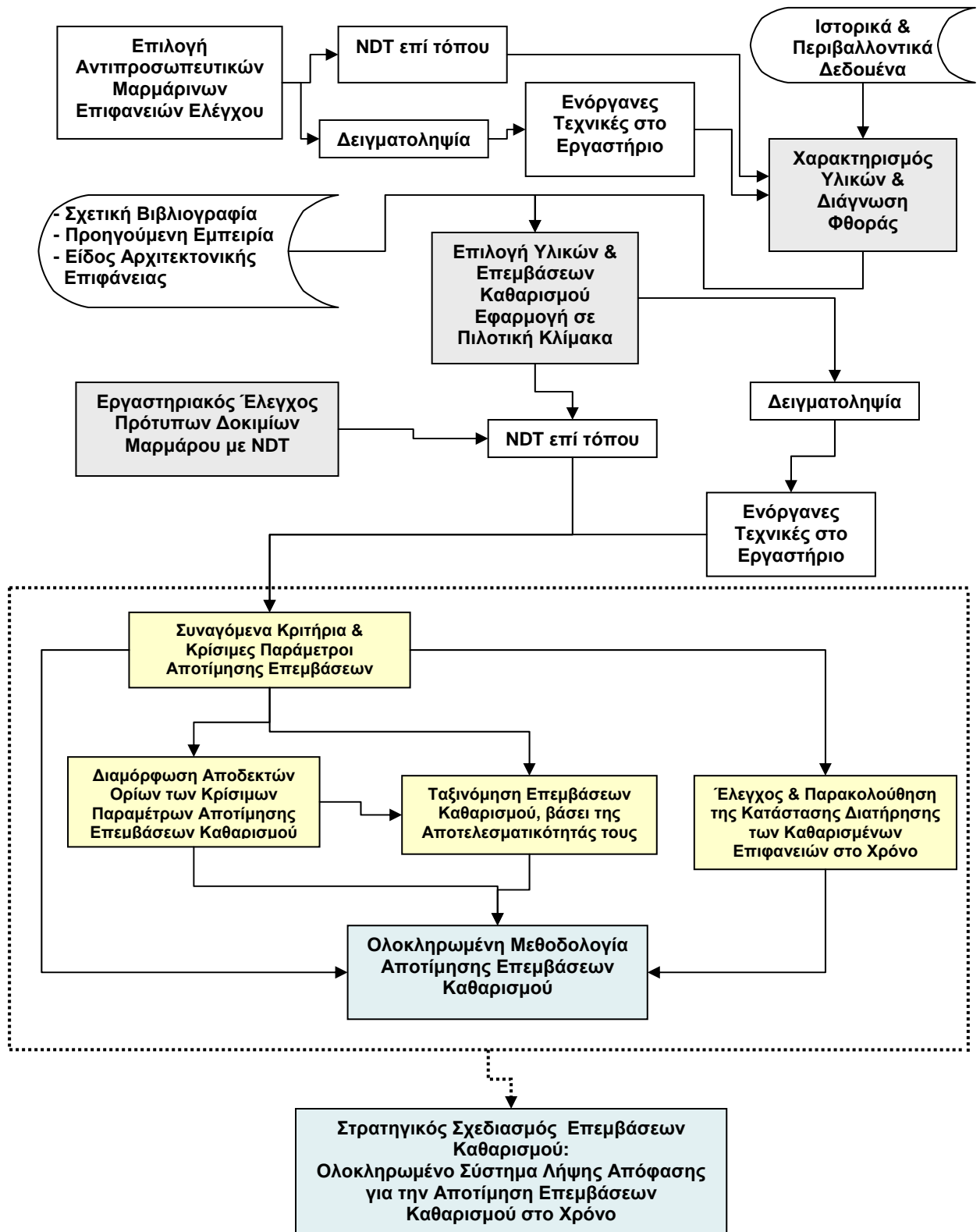
Έτσι, στη διεθνή βιβλιογραφία συναντούνται εργασίες, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφόρων τύπων ΓΣΠ κυρίως για τη χαρτογράφηση των υλικών και της φθοράς, με απώτερο στόχο την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης τους (monitoring) [86], [141], [142], καθώς και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανάλογα με τον προσανατολισμό των όψεων σε ρυπασμένο αστικό περιβάλλον [143]. Παράλληλα, υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές στις οποίες χαρτογραφούνται και οι προτεινόμενες επεμβάσεις συντήρησης στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες για την επίτευξη της κοστολόγησης με μεγάλη ακρίβεια των προτεινόμενων επεμβάσεων συντήρησης, καθώς και την παρακολούθηση στο χρόνο της διατήρησης της κατάστασης συντήρησης των αρχιτεκτονικών αυτών όψεων [143]. Επιπλέον, η διαχείριση, μέσω ΓΣΠ, σχεσιακών βάσεων δεδομένων με περιγραφικά πεδία που αναφέρονται στα υλικά δόμησης, τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς, καθώς και τις προτεινόμενες επεμβάσεις συντήρησης ενός ιστορικού κτιρίου, καθιστά εφικτή την εύκολη και γρήγορη πληροφόρηση και του πιο απλού χρήστη ενός ΓΠΣ, του οποίου το επιστημονικό υπόβαθρο μπορεί να ποικίλει [144], [145]. Αν όμως η σχεσιακή βάση δεδομένων παρουσιάζει πεδία τιμών φυσικοχημικών ιδιοτήτων σε συνάρτηση με τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς ενός κτιρίου, τότε ο χρήστης πρέπει να έχει αντίστοιχο επιστημονικό υπόβαθρο και να γνωρίζει τα παρεχόμενα εργαλεία διαχείρισης του ΓΣΠ (λογικές πράξεις, Μπούλεια άλγεβρα, κ.ά.), για να μπορέσει να εξαγάγει χρήσιμα συμπεράσματα και συσχετίσεις [145].

Άλλωστε, η νέα τάση σε σχέση με τον ολοκληρωμένο και στρατηγικό σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης των μνημείων, είναι η δημιουργία συστημάτων διαχείρισης πληροφοριών μνημείων (Monuments Information Management Systems -M.I.M.S.), όπου μπορούν να περιλαμβάνονται ιστορικά στοιχεία, αρχιτεκτονικά στοιχεία, στοιχεία σε σχέση με τις προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης/αποκατάστασης (τακτικές και έκτακτες), δεδομένα υλικών δόμησης, φθορών, βλαβών κ.ά.

Παράλληλα, τα ΓΠΣ, όπως είναι λογικό, έχουν χρησιμοποιηθεί πρωταρχικά και κατά κύριο λόγο σε σχέση με την πολιτιστική κληρονομιά, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την περιβαλλοντική διαχείριση, την αξιολόγηση και τον επανασχεδιασμό των χρήσεων γης σε ιστορικά κέντρα πόλεων και αρχαιολογικών χώρων, καθώς και για το σχεδιασμό πολεοδομικών και χωροταξικών προτάσεων με στόχο την ανάδειξη μνημείων σε επίπεδο αστικής ανάπτυξης [146], [147].

3. Πειραματικό Μέρος

3.1 Πειραματικός σχεδιασμός



Σχήμα 3.1.1 Γενικό Διάγραμμα Ροής Πειραματικού Σχεδιασμού

Ο βασικός άξονας για τη διαμόρφωση του πειραματικού μέρους συνίσταται κατ' ουσία στις απαντήσεις των παρακάτω ερωτημάτων, (ερωτήματα που ετέθησαν στο κεφάλαιο 2.1, όπου παρουσιάζεται η βιβλιογραφική επισκόπηση για το θέμα της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού).

1. Ποια είναι τα ακριβή χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει μια καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει, οι συγκεκριμένες παράμετροι που θα πρέπει να μετρηθούν για να δώσουν τιμή σε αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα αποδεκτά όρια αυτών των παραμέτρων;
2. Ποιες είναι οι κατάλληλες τεχνικές-μέθοδοι που θα πρέπει να εφαρμοστούν για να μετρηθούν οι παράμετροι των χαρακτηριστικών που θα πρέπει να έχει μια καθαρισμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τύπο φθοράς που παρουσιάζει;
3. Τι πρέπει να έχει απομακρυνθεί ή να έχει διατηρηθεί στην αρχιτεκτονική επιφάνεια μετά από μια επέμβαση καθαρισμού;
4. Ποια πρέπει να είναι η επιφανειακή υφή, μορφολογία και συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας; Λεία, τραχιά, συνεκτική, μη συνεκτική, άλλη; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την επιφανειακή υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της καθαρισμένης επιφάνειας;
5. Ποια πρέπει να είναι η γενικότερη αισθητική εντύπωση, καθώς και το χρώμα της καθαρισμένης επιφάνειας;
6. Πόσο γρήγορα θα επανεμφανιστεί η φθορά;

Ο σχεδιασμός του πειραματικού μέρους αυτής της διδακτορικής διατριβής, που παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχ. 3.1.1, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παρακάτω τέσσερις κύριες φάσεις, οι οποίες και οριοθέτησαν την πειραματική διαδικασία:

Φάση Ι – Χαρακτηρισμός των Υλικών & Διάγνωση της Φθοράς: Επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές μαρμάρινες επιφάνειες ελέγχου στο ρυπασμένο αστικό περιβάλλον του κέντρου της Αθήνας, τόσο σε σχέση με τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς, όσο και σε σχέση με το είδος των αρχιτεκτονικών επιφανειών. Οι λείες και ανάγλυφες εξεταζόμενες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες βρίσκονται στα ιστορικά κτίρια της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου αντίστοιχα. Παρουσιάζουν δε, τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας, των αποπλυμένων επιφανειών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου.

Σε αυτές τις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες έλαβε χώρα χαρακτηρισμός του ιστορικού υλικού και διάγνωση της φθοράς, με εφαρμογή μη καταστρεπτικών τεχνικών επί τόπου στην κλίμακα των μνημείων, καθώς και ενόργανων τεχνικών στο εργαστήριο κατόπιν δειγματοληψίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα ιστορικά και περιβαλλοντικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος και της διάγνωση της παρουσιαζόμενης φθοράς εφαρμόστηκαν επί τόπου οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της μικροσκοπίας οπτικών ινών και της χρωματομετρίας, ελήφθησαν στερεά δείγματα για την εφαρμογή της οπτικής μικροσκοπίας, του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης

θερμογραφίας, καθώς και δείγματα σκόνης για την εφαρμογή της φασματοσκοπίας υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier, ενώ παράλληλα έλαβε χώρα ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τον έλεγχο της μικροδομής των εξεταζόμενων επιφανειών.

Φάση II – Επί τόπου Εφαρμογή Πιλοτικών Επεμβάσεων Καθαρισμού στην Κλίμακα των Ιστορικών Κτιρίων: Βάσει της κατάστασης διατήρησης των εξεταζόμενων επιφανειών (δηλ. του υλικού, του τύπου φθοράς και του είδους της επιφάνειας), της σχετικής διεθνούς πρακτικής, όπως αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία, καθώς και της προηγούμενης εμπειρίας της συγγράφουσας, επιλέχθηκαν κατάλληλα υλικά και επεμβάσεις καθαρισμού, οι οποίες και εφαρμόστηκαν πιλοτικά στις προαναφερθείσες αντιπροσωπευτικές επιφάνειες ελέγχου των δύο ιστορικών κτιρίων. Αναλυτική περιγραφή των επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθεί στα παρακάτω κεφάλαια.

Φάση III – Αποτίμηση Επεμβάσεων Καθαρισμού: Για να πραγματοποιηθεί η αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού, εφαρμόστηκαν επί τόπου οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της μικροσκοπίας οπτικών ινών και της χρωματομετρίας, ελήφθησαν στερεά δείγματα για την εφαρμογή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, ενώ παράλληλα έλαβε χώρα ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τον έλεγχο της μικροδομής των εξεταζόμενων επιφανειών

Έτσι, εφαρμόζοντας μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού, τις ίδιες τεχνικές που εφαρμόστηκαν και πριν από τον καθαρισμό για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος και της διάγνωσης της φθοράς, συγκροτείται μια μεθοδολογική προσέγγιση αποτίμησης, που επιτρέπει τη σύγκριση των χαρακτηριστικών και των αντίστοιχων κρίσιμων παραμέτρων των εξεταζόμενων επιφανειών πριν και μετά τον καθαρισμό, καταγράφοντας τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα και καθιστώντας εφικτή την πρόταση της βέλτιστης ανά περίπτωση επέμβασης.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της laser προφίλομετρίας, του ενεργητικού ελέγχου της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, και της χρωματομετρίας, σε πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου στο εργαστήριο, για την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών μέτρησης και των αποτελεσμάτων αυτών των τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου σε σχέση με τη μορφολογία, την επιφανειακή μικροδομή και το χρώμα του εξεταζόμενου υλικού. Αναλυτική περιγραφή του εργαστηριακού ελέγχου των πρότυπων δοκιμίων ακολουθεί στο κεφάλαιο 4.

Στο τέλος αυτής της φάσης, συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και επί τόπου εφαρμογών, διατυπώνονται:

(α) τα κριτήρια αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού ή αλλιώς τα χαρακτηριστικά μιας καθαρισμένης επιφάνειας, οι μετρούμενες παράμετροι των χαρακτηριστικών αυτών, καθώς και οι τεχνικές μέτρησης των οριζόμενων παραμέτρων,

(β) η μεθοδολογία χρήσης των τεχνικών μέτρησης των κριτηρίων αποτίμησης,

(γ) οι κοινώς αποδεκτοί και επιδιωκόμενοι στόχοι για το κάθε κριτήριο αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και

(δ) οι κρίσιμες (ικανές και αναγκαίες) παράμετροι των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού.

Φάση IV – Στρατηγικός Σχεδιασμός Επεμβάσεων Καθαρισμού: Για να πραγματοποιηθεί ο στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού, δηλ. για να ορισθεί και υλοποιηθεί το σύνολο των σχεδιασμένων χειρισμών - διαδικασιών που θα επιτύχει το στόχο του ελέγχου και της παρακολούθησης στο χώρο και στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύστημα το οποίο θα έχει τη δυνατότητα καταγραφής, συσχέτισης και διαχείρισης των κρίσιμων μετρούμενων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια, καθώς και τη δυνατότητα απόκρισης σε σχέση με την αποτελεσματικότητα του εκάστοτε καθαρισμού, με συγκεκριμένες παραμέτρους και όρια αποδοχής σε κάθε χρονική στιγμή, σε συγκεκριμένη χωρικά επιφάνεια.

Συνεπώς, ο στρατηγικός σχεδιασμός μεθοδολογικά προσεγγίζεται με:

1. την επιλογή των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού και των κρίσιμων μετρούμενων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια, (που ολοκληρώνεται κατά τη Φάση III),
2. την οριοθέτηση των αποδεκτών ορίων των παραμέτρων αυτών με στόχο την ταξινόμηση των επεμβάσεων καθαρισμού βάσει της αποτελεσματικότητάς τους,
3. τη χωρική ταξινόμηση των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, καθώς και των επεμβάσεων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν, ούτως ώστε να φέρονται τα φυσικοχημικά δεδομένα των κρίσιμων μετρούμενων παραμέτρων,

Η υλοποίηση της δεύτερης παραμέτρου λαμβάνει χώρα με τη χρήση ενός μοντέλου ασαφούς λογικής, το οποίο αναπτύσσεται για τον ορισμό του δείκτη αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού (ΔΑΕΚ). Το μοντέλο αυτό διαμορφώνει τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων μετρούμενων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια, αποδίδοντας ποσοτικά χαρακτηριστικά στους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης.

Επιπλέον, ο τρόπος που επιλέχθηκε για την υλοποίηση της τρίτης παραμέτρου του στρατηγικού σχεδιασμού, είναι η χρήση της πλατφόρμας του ΓΣΠ όπου λαμβάνει χώρα:

- χωρική ταξινόμηση των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, καθώς και των επεμβάσεων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν, δηλ. δόμηση θεματικών υποβάθρων που παρουσιάζουν τις εξεταζόμενες επιφάνειες πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, μέσω της καταγραφής και της απόδοσης περιγραφικών ιδιοτήτων στις χωρικές οντότητες βάσει φυσικοχημικών δεδομένων,

- δημιουργία σχεσιακών βάσεων δεδομένων που περιλαμβάνουν τοπολογικά στοιχεία των χωρικών οντοτήτων και τις μετρούμενες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μια επιφάνεια.

Τέλος, ο στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού ολοκληρώνεται με την ενσωμάτωση του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των καθαρισμών στο ΓΣΠ. Η πλατφόρμα αυτή δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς απόκρισης σε

σχέση με την αποτελεσματικότητα των καθαρισμών με δεδομένες παραμέτρους και αποδεκτά όρια, σε κάθε χρονική στιγμή, σε συγκεκριμένη χωρικά επιφάνεια και ατμοσφαιρικές συνθήκες, αναπτύσσοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού.

3.2 Μέθοδοι και Τεχνικές – Περιγραφή πειραματικών εφαρμογών

3.2.1 Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

Η ιδιαίτερη σημασία της μεθόδου συνίσταται στον μη καταστρεπτικό της χαρακτήρα, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις εξέτασης υλικών μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας. Πρόκειται για ένα φορητό μικροσκόπιο (τύπου Pico Scopeman – Moritex), πολύ εύχρηστο, με το οποίο μπορεί να εξεταστεί επί τόπου ολόκληρη η επιφάνεια ενός ιστορικού συνόλου χωρίς να απαιτείται η προ-κατεργασία ή αλλοίωση των υλικών [165].

Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι:

- Λάμπα αλογόνου που λειτουργεί στα 100 W.
- Έλεγχος έντασης φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται απ' το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.
- Σύστημα εστίασης.
- Αντικειμενικοί φακοί. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μπορεί να αλλάξει κανείς περισσότερους φακούς για να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων (οι δυνατές λαμβανόμενες μεγεθύνσεις είναι x25, x50, x100, x200, x600). Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών [165].

Κατά τη διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και να ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Συνεπώς, σημαντικό είναι το γεγονός της μορφής της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και του βαθμού τραχύτητας αυτής, αφού σε μία επίπεδη επιφάνεια ο φακός του μικροσκοπίου προσαρμόζεται πολύ καλύτερα, με αποτέλεσμα οι εικόνες που παίρνουμε να είναι καλύτερης ποιότητας [165].

Η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για τη διάδοση του φωτός από την πηγή στους αντικειμενικούς φακούς και τελικά στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Οι οπτικές ίνες είναι σύνθετα κεραμικά υλικά, που κυρίως συνίστανται σε διοξείδιο του πυριτίου, με δομή τέτοια που επιτρέπει την κατευθυνόμενη διάδοση του φωτός. Αποτελούνται από υαλώδη κυλινδρικό πυρήνα και υαλώδες περίβλημα, ο οποίος παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαδοχική εσωτερική ολική ανάκλαση στο περίβλημα της εισερχόμενης, υπό κατάλληλη γωνία, ακτίνας φωτός και επομένως τη μετάδοσή της κατά μήκος της ίνας [165].

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών διαθέτει έξοδο τυποποιημένου βίντεο σήματος (PAL), παρέχοντας τη δυνατότητα σύνδεσης με video μόνιτορ και συσκευή εγγραφής. Οι εικόνες καταγράφονται σε μαγνητικό μέσο και έτσι μπορούν να αναπαραχθούν ανά πάσα στιγμή με ευκολία στο βίντεο. Η τυποποιημένη έξοδο σήματος επιτρέπει την εισαγωγή της εικόνας και σε υπολογιστή και κατ' επέκταση σε σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (η ψηφιακή ανάλυση εικόνας Pal είναι 768 x 576 pixel), παρέχοντας περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας [165].

Η τεχνική εφαρμόστηκε επί τόπου στις εξεταζόμενες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, καθώς και στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου κατά τον εργαστηριακό έλεγχο.

3.2.2 Οπτική Μικροσκόπια

Η πετρογραφική μελέτη χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της γεωγραφικής προέλευσης ενός δομικού υλικού και για την αναγνώριση των δομικών ορυκτών του. Η αναγνώριση επιτυγχάνεται με την εξέταση μιας λεπτής τομής από την προς εξέταση πέτρα και λεπτών τομών δειγμάτων από πυκνές πηγές προέλευσης του υλικού σε πετρογραφικό (πολωτικό) μικροσκόπιο [165].

Στην αναγνώριση ενός ορυκτού σε λεπτή τομή με τη χρήση πετρογραφικού μικροσκοπίου, τα αρχικά διαγνωστικά στοιχεία είναι το σχήμα του κρυστάλλου, τα επίπεδα σχισμών και οι οπτικές ιδιότητες σε επίπεδο πολωμένο φως. Η αναγνώριση μέσω του σχήματος είναι περιορισμένης χρήσης, γιατί στις πέτρες τα ορυκτά σπάνια μπορούν να αναπτυχθούν σε καλοσχηματισμένους κρυστάλλους. Ακόμα, το σχήμα που παρατηρείται εξαρτάται από σχήμα του κρυστάλλου που έχει κοπεί από τη λεπτή τομή και έτσι είναι τυχαίο. Παρ' όλα αυτά, επειδή υπάρχει σχέση ανάμεσα στον τύπο του κρυστάλλου και των διαρρήξεων, οι γραμμές διάρρηξης, οι οποίες παρουσιάζονται στις λεπτές τομές σαν ραβδώσεις που διατρέχουν τον κρύσταλλο, αποτελούν ένα αξιόπιστο διαγνωστικό στοιχείο [166].

Το φυσικό φως που παράγεται από συνήθεις πηγές όπως ο ήλιος ή οι λάμπες πυράκτωσης αποτελείται από στοιχειώδη κύματα, κάθε ένα από τα οποία έχει άλλο επίπεδο ταλάντωσης, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται γωνίες οποιασδήποτε τιμής ως προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και το φυσικό φως να μην εμφανίζεται πολωμένο. Όταν όμως διέρχεται μέσα από ένα πρίσμα Nicol που δρα ως πολωτής, αναλύεται λόγω διπλοδιαθλαστικότητας σε δύο πολωμένες γραμμικές ακτίνες, από τις οποίες η μία μόνο εξέρχεται από το πρίσμα παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο του πολωτή, με μειωμένη την ένταση της στο μισό. Το πρίσμα Nicol μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αναλυτής [166]. Για την παρασκευή των λεπτών τομών κόβεται από το υλικό ένα κομμάτι πάχους, κατά προσέγγιση 1mm και επιφάνειας 2cm². Η μία πλευρά λειαίνεται βαθμιαία με γυαλόχαρτα όλων και μικρότερων κόκκων μέχρι να γίνει η επιφάνεια λεία και επίπεδη. Η λειασμένη επιφάνεια επικολλάται πάνω σε αντικειμενοφόρο πλάκα και στην άλλη πλευρά αρχίζει να μειώνεται το πάχος μέχρι τα 30μm [165]. Η πλειοψηφία των ορυκτών που υπάρχουν είναι διαφανή σ' αυτό το πάχος και το δείγμα εξετάζεται στο πετρογραφικό μικροσκόπιο. Η διαφορά αυτού του μικροσκοπίου από το σύνηθες οπτικό μικροσκόπιο έγκειται στην προσθήκη πολωτή και αναλυτή οι οποίοι είναι δύο πρίσματα Nicol. Το φως από κατάλληλη πηγή αντανακλάται μ' έναν καθρέφτη μέσα στον πολωτή όπου εστιάζεται πάνω στην λεπτή τομή με συγκεντρωτικούς φακούς. Η μεγέθυνση σε τυπική κλίμακα από 20 ως 200 φορές επιτυγχάνεται από τους αντικειμενικούς φακούς και το σύστημα της διόπτρας, ανάμεσα στα οποία βρίσκεται ο αναλυτής. Το επίπεδο, όπου βρίσκονται η λεπτή τομή και ο πολωτής μπορεί να περιστραφεί σε βαθμονομημένη κλίμακα. Δείγματα ακάλυπτων λεπτών τομών εξετάστηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο τύπου Zeiss με διασταυρωμένα (⊥)

πρίσματα Nicols και μεγεθύνσεις x 100. Η Οπτική Μικροσκοπία χρησιμοποιήθηκε κατά τη φάση του χαρακτηρισμού των υλικών για την ταυτοποίηση των μαρμάρινων επιφανειών όπου πραγματοποιήθηκαν οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού.

3.2.3 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) και μικροανάλυση ακτίνων-X (EDS)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα υψηλής ανάλυσης μικροσκόπιο που επιτρέπει την παρατήρηση αγώγιμων υλικών σε πολύ μεγαλύτερες μεγεθύνσεις από το οπτικό (μέχρι 300.000 φορές), χρησιμοποιώντας διαφορετικές πηγές ακτινοβολίας για παραγωγή του απαιτούμενου φωτισμού. Συνήθως, τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης συνδυάζονται με συστήματα (φασματοφωτόμετρα) ποσοτικής και ποιοτικής χημικής ανάλυσης (μικροανάλυσης), τα λεγόμενα EDS/WDS (Energy Dispersive Spectrometer/Wavelength Dispersive Spectrometer). Η ικανότητα του SEM να συνδυάζει πληροφορίες επιφανειακής μορφολογίας και να παρέχει στοιχειακή ανάλυση της εξεταζόμενης περιοχής σε βάθος (depth profiles) με μικροανάλυση ακτίνων -X είναι μοναδική.

Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω τέσσερα συστήματα:

1. Το σύστημα φωτισμού / κατεύθυνσης της δέσμης, που παράγει την δέσμη ηλεκτρονίων και την κατευθύνει πάνω στο δείγμα.
2. Το σύστημα πληροφοριών που περιλαμβάνει τα δεδομένα που εκπέμπονται από το δείγμα κατά τον βομβαρδισμό του με ηλεκτρόνια και τους αισθητήρες που διαχωρίζουν και αναλύουν αυτά τα πληροφοριακά σήματα.
3. Το σύστημα παρουσίασης που αποτελείται από έναν ή δύο καθοδικούς σωλήνες ακτίνων -X, για παρατήρηση και φωτογράφιση της επιφάνειας.
4. Το σύστημα κενού που απομακρύνει τα αέρια από την στήλη και που διαφορετικά θα δημιουργούσαν προβλήματα [167].

Εάν το SEM είναι συνδεδεμένο με μικροαναλυτή, μπορεί να δώσει στοιχειακή μικροανάλυση των συστατικών στο σημείο εστίασης. Για την δημιουργία της εικόνας, δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας (1-50 KeV) εστιάζεται στο δείγμα με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών φακών. Ειδικά συστήματα επιτρέπουν την κίνηση της δέσμης αλλά και του δείγματος. Ο βομβαρδισμός με ηλεκτρόνια προκαλεί, εκτός από άλλα φαινόμενα, την διέγερση των ατόμων στη περιοχή εστίασης και την επακόλουθη εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας και ακτίνων-X που είναι χαρακτηριστικές για κάθε στοιχείο.

Ένα φασματοφωτόμετρο αναλύει την ένταση και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, επιτρέποντας την στοιχειακή ανάλυση στο εξεταζόμενο τμήμα. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια ενισχύονται και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εικόνας με τρόπο παρόμοιο με τις τηλεοράσεις. Η παρατήρηση της μορφής των κρυστάλλων μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την ταυτοποίηση των ορυκτών, ιδιαίτερα των δευτερογενών ή και αυτών που υπάρχουν σε πολύ μικρή ποσότητα [167].

Η ηλεκτρονική δέσμη δημιουργείται και διαμορφώνεται στο εσωτερικό μιας στήλης, η οποία περιέχει την πηγή ηλεκτρονίων τους φακούς εστίασης και τα πηνία σάρωσης. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων προέρχεται από την πυράκτωση ενός νήματος βολφραμίου που βρίσκεται στο εσωτερικό κυλινδρικού θαλάμου με μικρό άνοιγμα. Το νήμα θερμαίνεται με παροχή ρεύματος υψηλής τάσης (25-30 KV) ενώ ταυτόχρονα αποτελεί κάθοδο. Έτσι πραγματοποιείται θερμοηλεκτρονική εκπομπή ηλεκτρονίων (φαινόμενο Richardson), τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο. Οι φακοί εστίασης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μαγνητικοί και χρησιμοποιούνται για τη σμίκρυνση του μετώπου της δέσμης. Στο τέλος της διαδρομής της μέσα στη στήλη, η δέσμη διέρχεται από τα πηνία σάρωσης τα οποία δημιουργούν κατάλληλο μαγνητικό πεδίο, που κάνει τη δέσμη να αποκλίνει, έτσι ώστε να σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου. Τα υπό εξέταση δοκίμια τοποθετούνται σε θάλαμο υψηλού κενού έτσι ώστε να μη σκεδάζονται τα ηλεκτρόνια. Το κενό δημιουργείται με σύστημα αντλιών (περιστροφικών και πνευματικών).

Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων προσκρούει στο δοκίμιο, προκαλούνται τα εξής φαινόμενα:

- Ανάκλαση των πρωτογενών ηλεκτρονίων
- Εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων
- Εκπομπή ακτίνων $-X$
- Εκπομπή ορατού φωτός
- Τοπική μεταβολή της αγωγιμότητας

Από την εκπομπή των ηλεκτρονίων συντίθεται η εικόνα, είτε με καθοδικό σωλήνα ή με χρήση ημιαγωγίου κρυστάλλου στον οποίο προσκρούουν τα ηλεκτρόνια δημιουργώντας ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων, τα οποία εκφυλίζονται σε ακαθαρσίες του κρυστάλλου αποδίδοντας φωτόνια.

Από την εκπομπή των δευτερογενών ηλεκτρονίων συντίθεται η κανονική εικόνα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (Scanning Electron Image-SEI), η οποία είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη. Παρ' όλα αυτά, οι εικόνες των επανασκεδαζόμενων (πρωτογενών) ηλεκτρονίων Back Scattering Image (BSE) παρέχουν ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες [167].

Τα επανασκεδαζόμενα ηλεκτρόνια ποικίλλουν όσον αφορά την ποσότητα και την κατεύθυνση τους ανάλογα με τη σύνθεση, την τοπογραφία της επιφάνειάς, τη διαύγεια και το μαγνητισμό του δείγματος. Η αντίθεση (contrast) μιας τέτοιας εικόνας ηλεκτρονίων εξαρτάται από:

- (1) το ποσοστό παραγωγής επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, το οποίο εξαρτάται από το μέσο ατομικό όρο του δείγματος
- (2) την εξάρτηση από τη γωνία των επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων στην επιφάνεια δειγμάτων
- (3) την αλλαγή της έντασης των επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, λόγω της αλλαγής της προσπίπτουσας γωνία του ανιχνευτή ηλεκτρονίων πάνω σε ένα κρυσταλλικό δείγμα.

Η εικόνα επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων παρέχει δύο τύπους πληροφοριών: σχετικά με τη σύσταση των δειγμάτων και σχετικά με την τοπογραφία της επιφάνειας των δειγμάτων. Για να διαχωριστούν οι δύο τύποι πληροφοριών, χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής ημιαγωγών σε ζεύγος, συμμετρικά με τον οπτικό άξονα. Η χρήση τους δίνει τις εικόνες σύνθεσης (composition

image-COMPO), ενώ όταν δεν χρησιμοποιούνται παίρνουμε τις εικόνες τοπογραφίας (topography image-TOPO). Επομένως, η COMPO εικόνα είναι μια τεχνητή εικόνα και μας δείχνει αν υπάρχουν τυχόν διαφορές στη χημική σύσταση στην επιφάνεια του δοκιμίου που εξετάζουμε. Ενώ με την τοπογραφική εικόνα είμαστε σε θέση να ξεχωρίσουμε τυχόν διαφορές στο τοπογραφικό τοπίο του δοκιμίου. Επίσης, με τις εικόνες σύνθεσης μπορούν να ληφθούν οι διαφορές στους προσανατολισμούς των κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας το πλεονέκτημα ότι η ένταση των επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων αλλάζει πολύ τόσο πριν όσο και μετά την συνθήκη του Bragg. Η σύνθεση των 2 παραπάνω πληροφοριών μας δίνει την εικόνα SHADOW [167], [168]. Η περιοχή παραγωγής των επανασκεδαζόμενων ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από αυτή των δευτερογενών ηλεκτρονίων (αρκετές δεκάδες nm). Επομένως, τα επανασκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δίνουν φτωχότερη ειδική ανάλυση από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Αλλά, επειδή έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, επηρεάζονται λιγότερο από φόρτιση (charge-up) και τη μόλυνση των δειγμάτων [168].

Τα νέας τεχνολογίας ηλεκτρονικά μικροσκόπια, με την συμβολή του μικροαναλυτή ακτίνων-Χ, παρέχουν την δυνατότητα «χαρτογράφησης» της χημικής σύστασής του δοκιμίου (mapping). Με την διαδικασία της χαρτογράφησης, η κατανομή ενός στοιχείου στο χώρο μπορεί να αποκαλυφθεί με την καταγραφή της έντασης της χαρακτηριστικής γραμμής ακτίνων -Χ του συγκεκριμένου στοιχείου καθώς η δέσμη κινείται πάνω στο δείγμα. Πληροφορίες για τη σύσταση παίρνουμε και από τις BSE εικόνες, μόνο που σε αυτή την περίπτωση η καταγραφή της σύστασης αποτελεί συνάρτηση του ατομικού αριθμού του στοιχείου και δεν λαμβάνει υπόψη της τα μεμονωμένα στοιχεία. Η πιο απλή μορφή μιας εικόνας ακτίνων - Χ είναι η απεικόνιση σημείου (dot map) όπου κάθε καταγεγραμμένο φωτόνιο εμφανίζεται ως φωτεινή κουκίδα στην εικόνα. Καθώς η δέσμη σαρώνει το δείγμα, η ένταση των κουκκίδων στην οθόνη δείχνει τη διακύμανση της συγκέντρωσης του επιλεγμένου στοιχείου. Υπάρχουν και άλλα είδη χαρτογράφησης (Digital, EDS, WDS) [169].

Επειδή το SEM χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια για το σχηματισμό της εικόνας, αυτά πρέπει να απομακρύνονται συνεχώς από την επιφάνεια του δοκιμίου, αλλιώς δημιουργούνται φθορισμοί που καθιστούν την εικόνα δυσδιάκριτη. Αυτό προϋποθέτει ότι το δοκίμιο είναι στο σύνολό του αγωγίμο (ή τουλάχιστον η επιφάνειά του) και ότι έχει προβλεφθεί γέφυρα του δοκιμίου προς τη γείωση για τη συνεχή απομάκρυνση των ηλεκτρονίων.

Τα μέταλλα και κράματα είναι αγωγίμα και δε χρειάζονται ειδική προετοιμασία για να παρατηρηθούν. Μια λεία ή ανάγλυφη επιφάνειά τους (π.χ. από θραύση) είναι άμεσα παρατηρήσιμη. Για την παρατήρηση μη αγωγίμων υλικών (ορυκτών, κεραμικών) πρέπει η επιφάνειά τους να καλυφθεί με ένα στρώμα αγωγίμου υλικού. Αυτό το υλικό μπορεί να είναι γραφίτης ή χρυσός. Για να γίνει επανθράκωση των δοκιμίων χρησιμοποιείται συσκευή με εξάχνωση άνθρακα σε κενό (evaporating unit). Στην περίπτωση επιμετάλλωσης με χρυσό χρησιμοποιείται συσκευή ατομικής διασκόρπισης (sputter coater) [167].

Στην παρούσα εργασία, οι απαιτούμενες μελέτες πραγματοποιήθηκαν στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης του Πανεπιστημίου Αθηνών (Γεωλογικό Τμήμα), με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ο τύπος του οργάνου: Scanning Electron Microscope (SEM): JEOL JSM-5600.
- Το σύστημα Μικροανάλυσης - Energy Dispersive X-ray Microanalysis (EDX): OXFORD LINK™ ISIS™ 300.
- Συνθήκες μικροαναλύσεων:
 - Τάση επιτάχυνσης (Accelerating Voltage): 20 KV
 - Ρεύμα δέσμης (Beam current): 0,5nA
 - Χρόνος ανάλυσης (Livetime): 50 sec
 - Διάμετρος δέσμης (Beam diameter): <2μm

Προετοιμασία των προς εξέταση δειγμάτων

Στα δείγματα που εξετάστηκαν πραγματοποιήθηκε εγκιβωτισμός σε ρητίνη, λείανση και επιγραφίτωση για την τοποθέτησή τους στον ειδικό θάλαμο κενού του οργάνου. Η τελική μορφή κάθε δείγματος εξετάστηκε σε μικροσκόπιο με ανακλώμενο φως και αποδείχθηκε ότι είχε επιτευχθεί σε όλα εξαιρετικό επίπεδο λείανσης.

Η διαδικασία λείανσης στην οποία υποβλήθηκαν τα δείγματα περιλαμβάνει δύο στάδια: το στάδιο προλείανσης και το τελικό στάδιο λείανσης με αδαμανταλοιφές.

Στο *πρώτο στάδιο* η λείανση πραγματοποιείται σε περιστρεφόμενο δίσκο, παρουσία ελάχιστης ποσότητας νερού, με ψιλά γυαλόχαρτα κατασκευασμένα από καρβίδιο του πυριτίου (SMIRDEX waterproof abrasive papers). Αρχικά πραγματοποιείται λείανση με γυαλόχαρτα N° 800 και στη συνέχεια με N° 1000.

Με το *δεύτερο στάδιο* απομακρύνονται οι γραμμές που τυχόν υπάρχουν στην επιφάνεια του δείγματος από το στάδιο προλείανσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αδαμανταλοιφές DP – Paste M, αλοιφές που περιέχουν μονοκρυσταλλικά διαμάντια πάχους 3 μm και 1 μm. Η στίλβωση γίνεται σε περιστρεφόμενο δίσκο που περιστρέφεται με 250 στροφές / λεπτό, πάνω σε ειδικά πανιά λείανσης (Struers polishing cloths). Θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά το τελικό βήμα λείανσης των δειγμάτων (χρήση της αλοιφής με διαμάντια πάχους 1 μm), η λείανση γίνεται σε επαφή με πανί από βελούδο.

Για τη διάλυση των αδαμανταλοιφών, που είναι παχύρρευστες πάστες, χρησιμοποιείται το Lubricant Blue (προϊόν με βάση την αλκοόλη και άλλα περιεχόμενα συστατικά που βοηθούν στη λείανση) και όχι το νερό, ώστε να αποφευχθεί τυχόν διάλυση του γύψου των μαρμάρινων δειγμάτων που εξετάστηκαν.

Μελέτη με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Για την μελέτη της ορυκτολογικής σύστασης και της επιφανειακής μορφολογίας του υποστρώματος και του πάχους της φθοράς πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, πραγματοποιήθηκε λήψη εικόνων με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Τα δείγματα ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, προετοιμάστηκαν, όπως αναφέρεται παραπάνω και εξετάστηκαν σε τομή, ώστε να μελετηθεί η

διαστρωμάτωση των τύπων φθοράς και η απομάκρυνση τους μετά από τις διάφορες επεμβάσεις καθαρισμού. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε, μικροανάλυση ακτίνων-X με στόχο την μελέτη της σύστασης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, καθώς και έλεγχος της απομάκρυνσής τους μετά τον καθαρισμό.

3.2.4 Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier

Η υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εκτείνεται από την περιοχή του ορατού έως και την περιοχή των μικροκυμάτων και υποδιαιρείται στις περιοχές του:

- 1.Εγγύς υπέρυθρου IR (near IR) 0,4-2,5 μm (25000-4000 cm^{-1})
- 2.Μέσου υπέρυθρου (middle IR) 2,5-25 μm (4000-400 cm^{-1})
- 3.Απω υπέρυθρου (far IR) 25-1000 μm (400-10 cm^{-1}).

Η κύρια περιοχή που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το μέσο IR, από 4000 έως 400 cm^{-1} . Η υπέρυθη φασματοσκοπία στηρίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια μιας ένωσης τα οποία διεγείρονται σε υψηλότερες στάθμες δόνησης που είναι κβαντισμένες. Η υπέρυθη φασματοσκοπία διερευνά τις μοριακές δονήσεις (τάσης και κάμψης) και όχι τις ηλεκτρονιακές διεγέρσεις και μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δομή της ουσίας. Απαραίτητη είναι η ύπαρξη μεταβολής της διπολικής ροπής της ομάδας του μορίου. Έτσι ενώσεις όπως το HCl είναι ενεργές στο IR, ενώ διατομικά ομοατομικά μόρια, όπως το H₂, είναι ανενεργές [170].

Στην φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR) το συμβολόμετρο Michelson, γνωστό ήδη από τα τέλη του περασμένου αιώνα, αποτελεί την καρδιά της τεχνικής. Το συμβολόμετρο Michelson απαρτίζεται από δύο κάτοπτρα κάθετα μεταξύ τους, εκ των οποίων το ένα είναι κινητό, και ένα διαιρέτη δέσμης (beam splitter) που παρεμβάλλεται μεταξύ των σε γωνία 45°[171].

Πιο συγκεκριμένα, στο συμβολόμετρο μια πλάκα (A) κατασκευασμένη από ημιδιαφανές υλικό, συνήθως KBr που δεν απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία, είναι κατεργασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλά το 50% της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω της. Η πλάκα διαιρεί την ακτινοβολία σε δύο ίσα μέρη και στέλνει το ½ στον καθρέπτη K1 και το άλλο ½ στον καθρέπτη K2. Οι δύο δέσμες ανακλώνται στους K1 και K2 και επιστρέφουν στον διαιρέτη δέσμης, όπου και συνενώνονται πάλι σε μια δέσμη φωτός με κατεύθυνση στο δείγμα της ουσίας και μετά στον ανιχνευτή [172].

Η εισαγωγή της μονάδας του συμβολόμετρου στην σύγχρονη οργανολογία των FTIR έχει οδηγήσει στη σημαντική μείωση του θορύβου και στη σημαντική βελτίωση της έντασης των απορροφήσεων. Η ικανότητα διαχωρισμού των φασματικών γραμμών είναι περίπου 4 cm^{-1} και είναι εφικτή η βελτίωσή της με αύξηση των σημείων συγκέντρωσης πληροφοριών για το φάσμα και την απόσταση κίνησης του καθρέπτη K2 του συμβολόμετρου [172].

Η τεχνική που εφαρμόζεται για την μέτρηση του φάσματος υπέρυθρου ενός υλικού εξαρτάται από την φυσική κατάσταση του δείγματος, η οποία και καθορίζει τον τρόπο αλληλεπίδρασης της δέσμης υπέρυθρου με το δείγμα. Η πλέον διαδεδομένη και εύχρηστη τεχνική είναι η τεχνική της διαπερατότητας, η οποία χρησιμοποιείται όταν το δείγμα μπορεί να παρασκευαστεί υπό μορφή λεπτού φιλμ (π.χ. πολυμερή υλικά), ή να διασπαρεί υπό μορφή κόνεως σε ένα αδρανές μέσο

[171]. Στην φασματική περιοχή του μέσου υπέρυθρου (400 cm⁻¹ έως 4,000 cm⁻¹) κατάλληλα υλικά διασποράς είναι τα αλογονούχα άλατα των αλκαλίων (π.χ. KBr, NaCl, CsI), τα οποία δεν απορροφούν στην περιοχή αυτή, είναι σχετικά αδρανή και παρουσιάζουν μικρή υγροσκοπικότητα [171].

Η τεχνική της διαπερατότητας στη φασματοσκοπία υπέρυθρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ποσοτικές αναλύσεις χημικών ενώσεων βάσει του νόμου Beer-Lambert, ο οποίος εκφράζει την ποσοτική σχέση μεταξύ της έντασης του φωτός που διαπερνά το δείγμα της ουσίας και τη συγκέντρωσή της στο διάλυμα [172]. Έτσι, εάν I₀ είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο δείγμα και I η ένταση της ακτινοβολίας που εξέρχεται από το δείγμα, c είναι η συγκέντρωση, l το πάχος δείγματος και α ο συντελεστής απορρόφησης, ισχύει ο νόμος Beer-Lambert:

$$I = I_0 \exp(-\alpha cl)$$

Ο οποίος μπορεί να εκφραστεί και:

$$\log(I_0/I) = \epsilon cl$$

όπου ε είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Ο νόμος ισχύει για μονοχρωματικό φως και για μικρές συγκεντρώσεις και μπορεί να γραφτεί έτσι ώστε να δίνεται η διαπερατότητα T και η οπτική πυκνότητα A:

$$A = \log(I_0/I) = \log 100/\%T = \epsilon cl$$

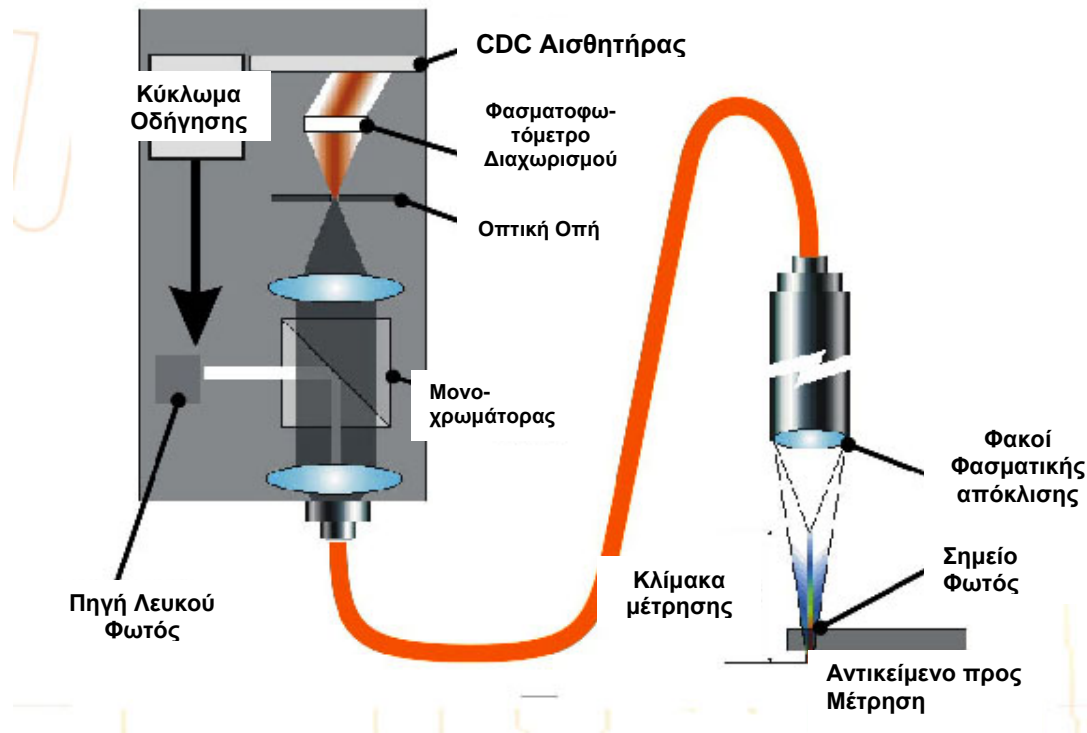
Η τεχνική της διαπερατότητας της υπέρυθρης φασματοσκοπίας υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier, εφαρμόστηκε σε δείγματα σκόνης που ελήφθησαν με νυστέρι από τις εξεταζόμενες επιφάνειες, πριν από τις επεμβάσεις καθαρισμού για τη διάγνωση των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς. Για τη λήψη φασμάτων χωρίς την παρουσία έντονων απορροφήσεων που οφείλονται στο H₂O και το CO₂ του χώρου του φωτομέτρου, χρησιμοποιήθηκε ατμόσφαιρα αζώτου. Τα φάσματα που προέκυψαν είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (η ένταση των φασματικών κορυφών αντιστοιχεί στη συγκέντρωσή τους στο δείγμα - ημιποσοτική ανάλυση), αφού από κάθε δείγμα ζυγίστηκε 1mg και κατόπιν αναμίχθηκε με 200mg KBr για την κατασκευή των προς μέτρηση δισκίων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε φούρνο κενού στους 30 με 40°C για 48 ώρες. Για την εξέταση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το όργανο Bio-rad Excalibur FTS 30000 MX.

3.2.5 Laser Προφίλομετρία

Η laser προφίλομετρία είναι μια σχετικά πρόσφατα αναπτυχθείσα μη καταστρεπτική τεχνική που χρησιμοποιείται στην επιστήμη και τεχνική των επιφανειών για να την εκτίμηση της επιφανειακής υψής και μορφολογίας, αντικαθιστώντας πλέον τα συμβατικά προφιλόμετρα ακίδας. Πρόκειται για προφιλόμετρα, τα οποία παράγουν τρισδιάστατες τοπογραφικές απεικονίσεις, των προς εξέταση επιφανειών, μεγάλης ακρίβειας [173].

Γενικά, αξίζει να σημειωθεί ότι τα προφιλόμετρα που χρησιμοποιούν ακτίνες laser παρουσιάζουν καλύτερη ποιότητα ανάλυσης, αφού η διάμετρος της ακτίνας του laser δεν

υπερβαίνει το 1 μm . Οι εξαιρετικά λεπτού διαμερισμού μικροδομές καταγράφονται ολοκληρωμένα, δηλ. διαμέσου το μέσου όρου του ύψους z του προφίλ. Συνεπώς, οι μετρήσεις των υψών είναι υψηλής ακρίβειας. Η εφαρμογή του φίλτρου πρέπει να λαμβάνει χώρα (εάν είναι αυτή απαραίτητη), όταν η 3-D τοπογραφική μέτρηση έχει ολοκληρωθεί [174].



Εικόνα 3.2.5.1. Διάταξη laser προφίλομέτρου

Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στο ότι το φως από την πηγή λευκού φωτός ανακλάται από τον παλμικό διαχωριστήρα και μεταφέρεται διαμέσου ενός καλωδίου οπτικών ινών στην κεφαλή μέτρησης. Η κεφαλή εστιάζει το λευκό φως μέσω ενός φακού φασματικής απόκλισης, που προκαλεί την εστίαση των ακτινοβολιών διαφορετικού μήκους κύματος σε διαφορετικές θέσεις στο εύρος μέτρησης. Καθώς το φως πέφτει στο προς μέτρηση αντικείμενο μόνο ένα μήκος κύματος εστιάζεται για δοσμένη θέση στο αντικείμενο. Το φως ανακλάται από το αντικείμενο και επιστρέφει περνώντας από το φακό φασματικής απόκλισης και από το καλώδιο οπτικών ινών. Αυτή τη φορά περνά μέσα από το μονοχρωμάτορα και προβάλλεται σε μια λεπτή οπτική οπή, που λειτουργεί ως φίλτρο. Αυτό επιτρέπει τη δίοδο μόνο του εστιασμένου μήκους κύματος. Για την ανίχνευση του μήκους κύματος του λαμβανομένου φωτός χρησιμοποιείται ένα φασματοφωτόμετρο, το οποίο εκτρέπεται το εισερχόμενο φως σε ένα CCD αισθητήρα (διαφορετικά μήκη κύματος εκτρέπονται με διαφορετικά ποσά). Έτσι από τη θέση της εικόνας στο CCD αισθητήρα και το μήκος κύματος του φωτός, η θέση του αντικειμένου μπορεί να μετρηθεί [173].

Το laser προφιλόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων της τραχύτητας είναι το Proscan 2000, ενώ η εκτέλεση των μετρήσεων έγινε στο Materials Research Center του Πανεπιστημίου του Bath στη Μ. Βρετανία.



Εικόνα 3.2.5.2. Φωτογραφία του laser προφιλόμετρου Proscan 2000

Το laser προφιλόμετρο Proscan 2000 αποτελείται από [173]:

- Αυτοκινούμενους άξονες ΧΥ ακριβείας (150mm x 100mm)
- Αυτοκινούμενο άξονα Ζ για τοποθέτηση του αισθητήρα (100mm)
- Αισθητήρα μη-επαφής
- Ηλεκτρονικό θάλαμο
- Ηλεκτρονικό υπολογιστή Hewlett Packard PC, πληκτρολόγιο και ποντίκι
- Οθόνη LCD 15 ιντσών
- Λογισμικό Proscan 2000

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [173]:

Συνολικές διαστάσεις οργάνου (w x h x d)	740x542x780mm min έως 835mm max
Μέγιστο βάρος	40kg
Συνολικές διαστάσεις ηλεκτρονικής καμπίνας	570x700x750mm
Βάρος ηλεκτρονικής καμπίνας	40kg
Οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή	15'' επίπεδη έγχρωμη οθόνη
Οθόνη φωτογραφικής μηχανής (προαιρετική)	14'' mono
Μέγεθος επίπεδης πλάκας σάρωσης	380x280 mm

Διαδρομή στους άξονες X και Y	150mmx100mm
Διαδρομή στον άξονα Z	100mm
Ηλεκτρολογικές απαιτήσεις	100-110/220-240 VAC, 50-60 Hz
Θερμοκρασία λειτουργίας	10-35° C
Ελάχιστο μέγεθος βήματος στους άξονες X και Y	1μm
Μέγιστο μέγεθος βήματος στους άξονες X και Y	9,999mm
Μέγιστο βάρος δείγματος	6kg
Μέγιστος ρυθμός συλλογής δεδομένων	20000/sec
Μέγιστη ταχύτητα σάρωσης	80 mm/sec
Ταχύτητα επανανίχνευσης	100 mm/ sec
Μέγιστος αριθμός σημείων δεδομένων	5,76 εκατομμύρια
Μέγιστη απόσταση πλάκας σάρωσης από αισθητήρα	100 mm

Πίνακας 3.2.5.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του laser προφίλομέτρου Proscan 2000

Αναλυτική περιγραφή κανόνων και προδιαγραφών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των παραμέτρων της τραχύτητας

Με τη laser προφίλομετρία εξετάστηκαν τόσο τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, όσο και τα στερεά δείγματα που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση της υφής και της μορφολογίας της επιφάνειας, καθώς και τον υπολογισμό των παραμέτρων που τις περιγράφουν, αφού τα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας μιας επιφάνειας τελικά αναπαριστούνται από τις προτεινόμενες παραμέτρους και τις τιμές τους [174].

Ακολουθώντας το πρότυπο EN ISO 4288 [120] (β.λ. κεφ. 2.2.3) επιλέχθηκε από τα προτεινόμενα μήκη αποτίμησης (το μήκος δηλ. στο οποίο κινείται ο παλμός του laser) αυτό των 1.25mm. Βάσει αυτού του μήκους αποτίμησης υπολογίζεται η παράμετρος της τραχύτητας R_q , εφαρμόζοντας ως μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter - τα 0.25mm [111], [120].

Επίσης, εφόσον δε διευκρινίζεται η κατεύθυνση κατά την οποία πρέπει να λάβει χώρα η μέτρηση της παραμέτρου της τραχύτητας R_q , και εφόσον η κατεύθυνση η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι αυτή της οποίας οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας είναι οι μεγαλύτερες [120], το ορισμένο μήκος αποτίμησης μετρήθηκε τόσο στον άξονα των x, όσο και στον άξονα των y. Άρα οι τρισδιάστατες τοπογραφικές απεικονίσεις των εξεταζόμενων δειγμάτων έχουν συνολικό εμβαδόν 1.25mm x1.25mm.

Το μέγεθος βήματος του laser ορίστηκε στο 1μm, οπότε συνολικά ο παλμός του laser πραγματοποιεί 1250 βήματα σε κάθε άξονα, για κάθε μέτρηση. Ο δε χρόνος λήψης της μέτρησης ήταν 47min περίπου.

Παράλληλα, η κεφαλή του οργάνου ρυθμίστηκε, έτσι ώστε να είναι οριοθετημένη η αρχή της μέτρησης για κάθε δείγμα, οπότε να είναι σαφώς καθορισμένη και η αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η διαδικασία που ακολουθείται για κάθε μέτρηση είναι η εξής:

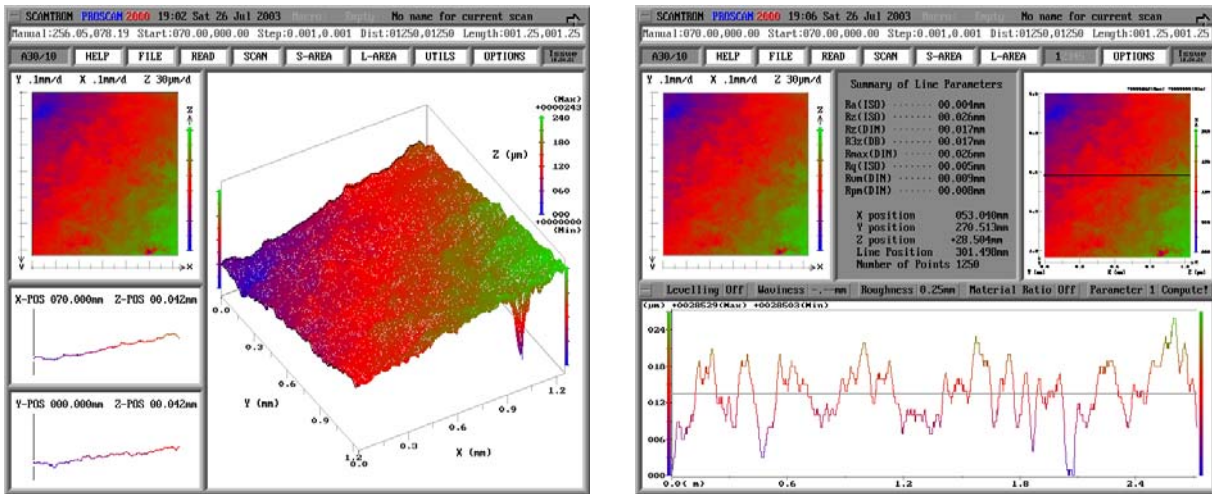
Ξεκινώντας από την αρχή των αξόνων, όπου το σημείο εκκίνησης του οργάνου είναι στο X (70) και Y (0), λαμβάνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας (β.λ. Εικ. 3.2.5.3.). Στη συνέχεια στην τρισδιάστατη εικόνα υπολογίζονται 50 γραμμικά προφίλ σε κάθε άξονα, δηλαδή 50 στον άξονα X και 50 στον άξονα Y, στα παρακάτω μήκη:

X1-Y1-0.025, X2-Y2-0.050, X13Y3-0.075, X4-Y4-0.100, X5-Y5-0.125, X6-Y6-0.150, X7-Y7-0.175, X8-Y8-0.200, X9-Y9-0.225, X10-Y10-0.250, X11-Y11-0.275, X12-Y12-0.300, X13-Y13-0.325, X14-Y14-0.350, X15-Y15-0.375, X16-Y16-0.400, X17-Y17-0.425, X18-Y18-0.450, X19-Y19-0.475, X20-Y20-0.500, X21-Y21-0.525, X22-Y22-0.550, X23-Y23-0.575, X24-Y24-0.600, X25-Y25-0.625, X26-Y26-0.650, X27-Y27-0.675, X28-Y28-0.700, X29-Y29-0.725, X30-Y30-0.750, X31-Y31-0.775, X32-Y32-0.800, X33-Y33-0.825, X34-Y34-0.850, X35-Y35-0.875, X36-Y36-0.900, X37-Y37-0.925, X38-Y38-0.950, X39-Y39-0.975, X40-Y40-1.000, X41-Y41-1.025, X42-Y42-1.050, X43-Y43-1.075, X44-Y44-1.100, X45-Y45-1.125, X46-Y46-1.150, X47-Y47-1.175, X48-Y48-1.200, X49-Y49-1.225, X50-Y50-1.249.

Μέσω του λογισμικού του οργάνου και εφαρμόζοντας το μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter προσδιορίζεται η παράμετρος της τραχύτητας R_q , για κάθε γραμμικό προφίλ από τα επιλεγμένα πενήντα και στους δύο άξονες (β.λ. Εικ. 3.2.5.3.). Κατόπιν υπολογίζεται για κάθε περιοχή το μέσο όρο των R_{qx} και R_{qy} , επιλέγοντας τελικά την υψηλότερη τιμή από τις δύο, η οποία και χρησιμοποιείται ως αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 4288 [120]. Οι κατανομές των τιμών της μετρούμενης παραμέτρου R_q στα περισσότερα δείγματα δεν είναι συμμετρικές, γι' αυτό και ο μέσος όρος ποσοτικοποιείται με τη χρήση του στατιστικού μεγέθους της ενδιάμεσης τιμής, που θεωρείται πιο ασφαλές και σταθερό μέγεθος στην απόδοση του μέσου όρου ενός δείγματος δεδομένων που είναι μετρούμενα, σε σχέση με τη μέση τιμή που είναι μέγεθος πολύ ευαίσθητο στις ακραίες τιμές, καθώς και στις μακριές ουρές μιας κατανομής [175].

Παράλληλα, η γεωμετρία μιας επιφάνειας περιγράφεται από το εμβαδόν και τον όγκο. Έτσι, η φέρουσα επιφάνεια, ο όγκος κενών και ο όγκος του υλικού που εμπεριέχονται στην επιφάνεια επαφής του μετρούμενου υλικού, έχουν πολύ στενή σχέση με λειτουργικές ιδιότητες των επιφανειών, όπως η επιφανειακή αντοχή, η φθορά και το πώς κυλάει ή αποτραβιέται ένα υγρό [174]. Συνεπώς, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή ενός δείκτη που θα μπορούσε να αποδώσει τη γεωμετρία των εξεταζόμενων επιφανειών. Η σύγχρονη οργανολογία της laser προφίλομετρίας, μέσω των τρισδιάστατων απεικονίσεων -μετρήσεων δηλ. στους τρεις άξονες- και των εξεζητημένων λογισμικών που χρησιμοποιεί, μας δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε το πραγματικό εμβαδόν των εξεταζόμενων επιφανειών, το οποίο εξαιτίας των παρουσιαζόμενων "βουνών" και "κοιλιάδων" είναι μεγαλύτερο από το προβαλλόμενο δηλ. στην προκειμένη περίπτωση μεγαλύτερο από $1.25\text{mm} \times 1.25\text{mm} = 1.560\text{mm}^2$. Ο δείκτης αυτός είναι ο Λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), ο οποίος εκφράζει την απόκλιση της εξεταζόμενης επιφάνειας από την επιπεδότητα. Παράλληλα, ο Λόγος της πραγματικής προς την

προβαλλόμενη επιφάνεια (r), σε σχέση με τη χημική κινητική υποδεικνύει το ρυθμό που προχωράει μια χημική αντίδραση, δηλ. αύξηση του λόγου συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού μιας χημικής αντίδρασης και εν προκειμένω αύξηση της επιδεκτικότητας της προς εξέταση επιφάνειας στη φθορά.



Εικόνα 3.2.5.3. Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας – γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου και υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του μήκους αποτίμησης στα 1.25mm έλαβε χώρα για να είναι συγκρίσιμες οι τιμές Rq που προσδιορίστηκαν στα πρότυπα δοκίμια μαρμάρου και τα δείγματα των ιστορικών κτιρίων. Παρόλο, που για τα πρότυπα δοκίμια μαρμάρου θα μπορούσε να είχε επιλεχθεί ένα μήκος αποτίμησης μεγαλύτερο από το 1.25mm αφού έχουν διαστάσεις 6cm x 6cm x 1cm, αυτό δεν ήταν εφικτό εφόσον οι διαστάσεις των δειγμάτων των ιστορικών κτιρίων ήταν μικρότερες από 4mmx4mm περίπου και το Rq εξαρτάται εκτός από τη διακριτική ικανότητα του οργάνου μέτρησης και από το μήκος αποτίμησης.

Έτσι, για τη λήψη πιο αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με το laser προφιλόμετρο που πληρούσαν τις προαναφερθείσες προδιαγραφές σε δύο περιοχές συνολικού εμβαδού 1.25mm x 1.25mm η κάθε μία. Η αντιπροσωπευτική τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq προέκυψε από το μέσο όρο των συνυπολογισθέντων Rqx και Rqy και των δύο περιοχών σάρωσης, δηλ. η κάθε μία από αυτές ήταν η ενδιάμεση τιμή 100 γραμμικών προφίλ και όχι 50 γραμμικών προφίλ όπως στα δείγματα των ιστορικών κτιρίων. Παράλληλα, ο λόγος πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), για τα πρότυπα δοκίμια προέκυψε από το λόγο του αθροίσματος του πραγματικού εμβαδού των δύο περιοχών σαρώσεως προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας των δύο περιοχών σαρώσεως, ήτοι $1.560\text{mm}^2 + 1.560\text{mm}^2 = 3.120\text{mm}^2$.

3.2.6 Εξαγωγή παραμέτρων μικροδομής με χρήση του λογισμικού EDGE.EXE - Χαρακτηριστικά εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης

Η ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με τη χρήση του λογισμικού EDGE.EXE, έλαβε χώρα σε όλα τα στερεά δείγματα που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες των δύο ιστορικών κτιρίων, πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού, καθώς και στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων της μικροδομής που σχετίζονται με την τραχύτητα (συντελεστής μορφής), την πυκνότητα ρηγματώσεων και το συντελεστή ευθρυπτότητας (Βλ. κεφ.2.2.2). Όπως ήδη προαναφέρθηκε, βασιζόμενοι στα fractal μαθηματικά, οι Mossotti et al. [11] δημιούργησαν για το Γεωλογικό Ινστιτούτο Μελετών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ένα λογισμικό πακέτο προγραμμάτων, με σκοπό την επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού στο Δημαρχείο της Philadelphia των Η.Π.Α.. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε δηλ. το EDGE.EXE οδήγησε στον προσδιορισμό της fractal διάστασης, η οποία αποτέλεσε βασικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της επιφανειακής τραχύτητας της πέτρας, που ονομάζεται συντελεστής μορφής (shape factor, Γ). Ο συντελεστής μορφής μαζί με τον δείκτη της πυκνότητας ρηγματώσεων (fracture density, FD) όρισε έναν νέο δείκτη μικροδομής, ως μέτρο της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής ευστάθειας της πέτρας, το συντελεστή ευθρυπτότητας (friability index, FI) (Βλ. κεφ.2.2.2) [11], [131].

Στο πλαίσιο εκπόνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής, οι εικόνες SEM που ελήφθησαν, για να υποστούν στη συνέχεια επεξεργασία με το πρόγραμμα EDGE.EXE, ήταν εικόνες BEI (Back-scattered Electron Images), με μεγέθυνση 100X και ανάλυση 640 pixels x 480 pixels. Οι διαστάσεις των εικόνων, στην οθόνη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, ήταν 25,6 cm μήκος και 19,2 cm ύψος (οι αντίστοιχες τιμές κατά την εκτύπωση των εικόνων είναι $25,6/2 = 12,8$ cm και $19,2/2 = 9,6$ cm). Για αυτές τις διαστάσεις εικόνας, ισχύει η μεγέθυνση 100X και η μπάρα των 100 μm αντιστοιχεί σε μήκος 1 cm στην εκτύπωση και σε 2 cm στην οθόνη του SEM.

Για να υπάρξει συμβατότητα, ως προς τις απαιτήσεις του EDGE.EXE, (όσον αφορά στις προδιαγραφές της εικόνας που δέχεται ως input), οι εικόνες SEM που ελήφθησαν επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ADOBE PHOTOSHOP®, ώστε να μετατραπούν σε αρχεία εικόνων που βρίσκονται σε δυαδική μορφή (binary format). Η διαδικασία επεξεργασίας είχε ως εξής:

- Μέσω της επιλογής Image → Mode, επιλέγεται η κλίμακα του γκριζου (grayscale).
- Μέσω της επιλογής Image → Canvas size, επιλέγεται ανάλυση 512 pixels x 512 pixels. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα pixels εκατέρωθεν της εικόνας (από οριζόντια ανάλυση 640 pixels μεταπίπτουμε σε 512 pixels), οπότε η εικόνα “κόβεται” δεξιά και αριστερά. Η αρχική κατακόρυφη ανάλυση είναι 480 pixels και κατά την αύξηση της σε 512 pixels, επιλέγουμε την προσθήκη μαύρου χρώματος, ως background, στο πάνω μέρος της εικόνας.

- Η εικόνα σώζεται ως filename.raw αρχείο.

Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, τα αρχεία εικόνων SEM, αποτελούνται από 512 σειρές με 512 pixels ανά σειρά, όπου το κάθε pixel είναι κωδικοποιημένο με 8 bits σε μια παλέτα 256 αποχρώσεων του γκριζου (512 pixels x 512 pixels x 8 bits), χωρίς να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά της μεγέθυνση τους.

Από την μπάρα που αντιπροσωπεύει την μεγέθυνση, προσδιορίστηκε ότι τα 100 μm αντιστοιχούν σε 50 pixels, επομένως η πραγματική πλευγματική ανάλυση (lateral resolution) των εικόνων είναι 2 μm / pixel. Η τιμή αυτή είναι παραπλήσια της αντίστοιχης τιμής των 1,76 μm / pixel που χαρακτήριζε τις εικόνες στη μελέτη των Mossotti et al [11] και χρησιμοποιήθηκε στη γραμμή εντολής του EDGE.EXE, ως edge [κενό] filename.raw [κενό] /m2).

Επεξεργασία των εικόνων με το πρόγραμμα EDGE

Αμέσως μετά την διαδικασία μετατροπής των εικόνων SEM με τη βοήθεια του προγράμματος ADOBE PHOTOSHOP®, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία κάθε εικόνας ξεχωριστά μέσω του προγράμματος EGDE.EXE. Οι εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά, σε κάθε περίπτωση, ήταν η εντολή Calibr8, η εντολή Trace, και η εντολή Density.

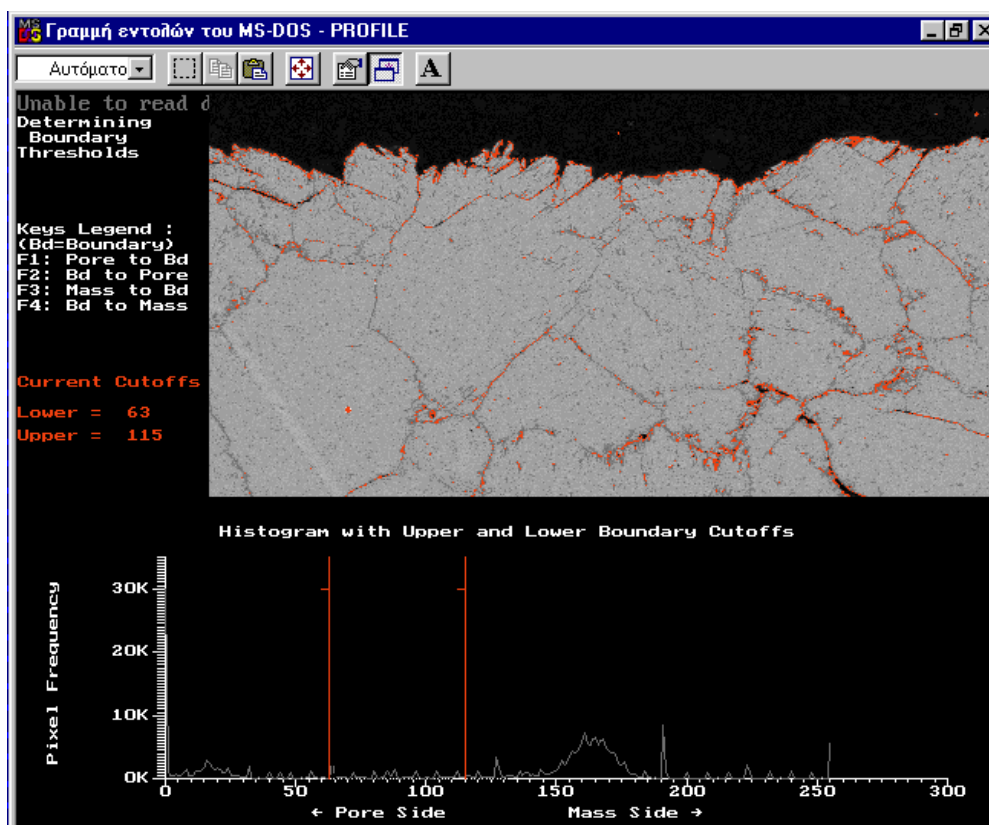
Εντολή Calibr8

Η βαθμονόμηση (calibration) είναι το πρώτο βήμα στην επεξεργασία και ανάλυση εικόνων. Καθένα από τα pixels της δυαδικής εικόνας SEM παρουσιάζει μια συγκεκριμένη τιμή φωτεινότητας, στην κλίμακα των 256 αποχρώσεων του γκριζου. Ο σκοπός της εντολής Calibr8 είναι η παροχή σαφέστατων ορισμών των σκοτεινών και ανοιχτών περιοχών της εικόνας, δηλαδή η προσαρμογή των 256 αποχρώσεων του γκριζου σε ευκρινείς ορισμούς περιοχών κενού χώρου (πόρος) και στερεάς κατάστασης (συμπαγής μάζα) [131].

Ο διαχωρισμός των pixels της εικόνας στις καταστάσεις MASS-MAZA (αναμφίβολα ανοιχτή απόχρωση) και PORE-ΠΟΡΟΣ (αναμφίβολα σκοτεινή απόχρωση) πραγματοποιήθηκε, μέσω της ρύθμισης των οριακών τιμών TL και TU. Τα pixels που παρουσιάζουν τιμές γκριζου μικρότερες ή ίσες από το χαμηλότερο όριο (lower threshold – TL) ορίζονται ως ΠΟΡΟΣ και τα pixels με τιμές γκριζου μεγαλύτερες ή ίσες από το ανώτερο όριο (upper threshold – TU) ορίζονται ως MAZA. Τα pixels που παρουσιάζουν τιμές γκριζου μεταξύ των δύο αυτών οριακών τιμών (περιοχές της εικόνας με ακαθόριστη ταυτότητα που βρίσκονται στα περατωτικά όρια που διαχωρίζουν τον κενό χώρο του πόρου και τη στερεή κατάσταση του δείγματος) ορίζονται ως EDGE pixels και εμφανίζονται κόκκινα στην οθόνη του υπολογιστή [131], βλ. εικ. 3.2.6.1.

Σκοπός, κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης κάθε εικόνας, ήταν η ελαχιστοποίηση του εύρους των τονισμένων ζωνών (EDGE pixels), δηλαδή η ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ TL και TU, γνωρίζοντας την φυσική δομή του υπό εξέταση υλικού. Επειδή ακριβώς το μάρμαρο παρουσιάζει μικρό πορώδες, ο πληθυσμός των αναμφίβολα σκοτεινών pixels (κατάσταση ΠΟΡΟΣ) ήταν μικρός σε κάθε εικόνα, ενώ αντίθετα τα περισσότερα pixels αντιστοιχούσαν στην κατάσταση MAZA. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οριοθετήθηκαν τις τιμές των TL και TU κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές τους να είναι σχετικά χαμηλές, η διαφορά τους να μην είναι

πολύ μεγάλη και τα κόκκινα pixels στην εικόνα να αντιπροσωπεύουν τα περατωτικά όρια μεταξύ κοιλοτήτων ή εσοχών ή ρηγματώσεων και συμπαγούς μάζας.



Εικόνα 3.2.6.1. Βαθμονόμηση της εικόνας SEM που αντιστοιχεί στο δείγμα Kn3b (DS, 10 min) με χαμηλότερο όριο $T_L=63$ και υψηλότερο όριο $T_U=115$

Εντολή Trace

Μετά το πέρας της διαδικασίας βαθμονόμησης, ενεργοποιείται η εντολή Trace, η οποία επιλέγει την αλυσιδωτή λίστα με το μεγαλύτερο αριθμό κόκκινων pixels, επί της επιφάνειας του κάθε δείγματος, ως το ανάγλυφο για την fractal ανάλυση, ανιχνεύει δηλαδή τα περατωτικά όρια και τονίζει το προφίλ μέσω του οποίου υπολογίζονται τα fractal και τα συμβατικά στατιστικά στοιχεία που είναι απαραίτητα. Στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζονται το ανάγλυφο της επιφάνειας (γραμμή κίτρινου χρώματος), η γραμμή της γραμμικής παλινδρόμησης διαμέσου του προφίλ (γραμμή κόκκινου χρώματος) και τα εξής στοιχεία [131] βλ. εικ.3.2.6.2:

1. Dimension: Η fractal διάσταση που αντιστοιχεί στο ανάγλυφο.
2. Crossings: Ο αριθμός των σημείων τομής μεταξύ του κίτρινου προφίλ και της κόκκινης γραμμής παλινδρόμησης.
3. Deviation: Η τυπική απόκλιση γύρω από την γραμμή παλινδρόμησης.
4. Pixel Count: Ο αριθμό των pixels της αλυσιδωτής λίστας του ανάγλυφου.



Εικόνα 3.2.6.2. Εφαρμογή της εντολής Trace του προγράμματος EDGE.EXE, για το δείγμα Kn3b (δεχόμενοι τις οριακές τιμές $T_L = 63$ και $T_U = 115$)

Εντολή Density

Μετά την εντολή Trace, ενεργοποιείται η εντολή Density με σκοπό τον προσδιορισμό της πυκνότητας ρηγματώσεων, δηλαδή του ποσοστού (%) του όγκου του κάθε δείγματος, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές [131].

Η εντολή αυτή εμφανίζει στην οθόνη μια αναφορά του ποσοστού των PORE, MASS και EDGE pixels, σε μια απομονωμένη περιοχή της εικόνας (γαλάζιο τετράγωνο του οποίου οι διαστάσεις και η θέση μεταβάλλονται ανάλογα με τη βούληση του χρήστη). Επίσης αναφέρει το % ποσοστό ρηγματώσεων (fracturing) στην επιλεγμένη περιοχή ως άθροισμα των ποσοστών PORE και EDGE, η τιμή του οποίου αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ρηγματώσεων στην συγκεκριμένη περιοχή [131].

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρηγματώσεων στη διδακτορική αυτή διατριβή, επιλέχτηκαν περιοχές με διαστάσεις $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ (οι διαστάσεις του τετραγώνου οριοθετήθηκαν με τη βοήθεια της μπάρας μεγέθυνσης, η οποία αντιστοιχεί σε $100\mu\text{m}$), κατά μήκος της επιφάνειας του κάθε δείγματος. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν δέκα τιμές του ποσοστού ρηγματώσεων, από τις οποίες υπολογίστηκε ο μέσος όρος. Ο μέσος όρος αντιστοιχεί στη μέση επιφανειακή πυκνότητα ρηγματώσεων του υπό μελέτη δείγματος, μέχρι βάθους $100\mu\text{m}$.

Κατόπιν υπολογίστηκαν ο συντελεστής μορφής (δείκτης επιφανειακής τραχύτητας) βάσει του τύπου [11]:

$$\Gamma \approx (L / L^*) \cdot \varepsilon^D$$

όπου:

- Το L είναι ο αριθμός των pixels στο ίχνος της εκτεθειμένης επιφάνειας (η τιμή Pixel Count που εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή, μετά την εφαρμογή της εντολής TRACE).
- Το D είναι η fractal διάσταση του ίχνους της εκτεθειμένης επιφάνειας (η τιμή Dimension που εμφανίζεται και αυτή στην οθόνη του υπολογιστή, μετά την εφαρμογή της εντολής TRACE).
- Η τιμή του ε, στις εικόνες SEM που χρησιμοποιήθηκαν και που είχαν μεγέθυνση 100x, είναι ίση με 2 μm/pixel.
- Το L* είναι ο αριθμός των pixels που δηλώνει το Ευκλείδειο μήκος του ίχνους. Στην περίπτωση που, μετά την εφαρμογή της εντολής TRACE, το ίχνος του ανάγλυφου καταλαμβάνει όλο το μήκος της γραμμής παλινδρόμησης, το L* είναι 512 pixels (από τις προδιαγραφές της εικόνας 512 x 512 x 8, το μήκος της γραμμής παλινδρόμησης αντιστοιχεί σε 512 pixels). Σε αντίθετη περίπτωση, προσδιορίζεται το Ευκλείδειο μήκος του ίχνους, σε pixels, με τη βοήθεια του σταυρονήματος της εντολής EDIT, μέσω της γραμμής παλινδρόμησης.

Η σχέση αλληλεπίδρασης μεταξύ του συντελεστή μορφής και της πυκνότητας ρηγματώσεων, εκφράστηκε μέσω του συντελεστή ευθρυπτότητας (Friability Index) που δίνεται από τη σχέση [11]:

$$FI = \sqrt{(FD)^2 + (\Gamma_R)^2}$$

3.2.7 Παλμική Υπέρυθρη Θερμογραφία

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική, κατά την οποία μετράται και καταγράφεται η θερμική ακτινοβολία, που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός υλικού στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αποτέλεσμα μιας τέτοιας καταγραφής είναι το θερμογράφημα, δηλαδή η "θερμική" εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας, το οποίο παρουσιάζεται είτε σε έγχρωμη ή σε ασπρόμαυρη μορφή [177].

Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας, εφαρμόζεται μεταξύ άλλων και στον καθορισμό της συμβατότητας των εξεταζόμενων υλικών, της υγρασίας και της φθοράς των υλικών. Σήμερα η θερμογραφία υπέρυθρου βρίσκει ευρύτατες εφαρμογές στην ιατρική, τη βιολογία, την αστρονομία, την γεωργία, την βιομηχανική παραγωγή, τον έλεγχο του μηχανολογικού-ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, τη διαχείριση και συντήρηση κτιρίων, καθώς και αρχιτεκτονικών επιφανειών των ιστορικών μνημείων [165].

Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα υλικά λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων τους. Η κίνηση αυτή γίνεται πιο έντονη με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται με μείωσή της. Η ένταση, η συχνότητα και το μήκος της υπέρυθρης ακτινοβολίας εξαρτάται βασικά από τη θερμοκρασία, το μέγεθος της πηγής και από την ικανότητα εκπομπής του υλικού [177], [178]. Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται από μία πηγή συναντήσει ένα υλικό, μέρος αυτής το διαπερνά, ανακλάται ή απορροφάται από το υλικό. Εάν όλη η ακτινοβολία πέσει πάνω στο υλικό, τότε ισχύει η σχέση:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

όπου τ, ρ και α είναι αντίστοιχα η διαπερατότητα, η ανάκλαση και η απορρόφηση του υλικού.

Αν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας διαπεράσει το υλικό, τότε το υλικό αυτό θα λέγεται διαφανές. Ακόμη διακρίνουμε αδιαφανή υλικά (ακτινοβολούν μόνο από την επιφάνειά τους) και ημιδιαπερατά (ακτινοβολούν από τη μάζα τους). Η απορροφητική ικανότητα των υλικών αυξάνει όταν η επιφάνειά τους είναι ανώμαλη [165], [177], [178].

Η πιο βασική αρχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι γνωστή ως **νόμος του Kirchoff**, ο οποίος είναι αποτέλεσμα της ισότητας της ισχύος της ακτινοβολίας ενός υλικού με την ισχύ της απορροφητικής του ικανότητας, κατά τη θερμική ισορροπία. Καθώς η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας δε μπορεί να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας, η εκπεμπόμενη ισχύς είναι η μέγιστη για ένα ιδανικό απορροφητικό μέσο. Για λιγότερο απορροφητικά υλικά, η εκπομπή είναι αντίστοιχα χαμηλότερη και μπορεί να εκφραστεί από το νόμο του Kirchoff, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$a=e$$

όπου a : απορροφητικότητα και e : συντελεστής εκπομπής, παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εκφράζει τη χαρακτηριστική εκπομπή κάθε επιφάνειας. Ο νόμος αυτός ισχύει για κάθε υλικό και μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε μήκος κύματος [165], [177], [178].

Ως **μέλαν σώμα** ορίζεται ένα αντικείμενο, το οποίο απορροφά όλη την ποσότητα της ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε αυτό σε οποιοδήποτε μήκος κύματος. Η ονομασία “μέλαν” που σχετίζεται με ένα σώμα το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία εξηγείται από τον **νόμο του Kirchoff**, που αναφέρει ότι “ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία σε οποιοδήποτε μήκος κύματος, είναι εξίσου ικανό να την εκπέμψει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις”. Ο νόμος του Kirchoff οδηγεί σε μια πολύ σημαντική έννοια, αυτή του ιδανικού απορροφητή ή «μέλανος σώματος» (black body), που είναι επίσης και ο πιο σημαντικός πομπός θερμικής ακτινοβολίας. Ένα μελανό σώμα μπορεί να περιγραφεί με ένα άνοιγμα που οδηγεί σε μία κοιλότητα, τα τοιχώματα της οποίας είναι μαύρα και έχουν σταθερή θερμοκρασία. Ακόμα και αν ο συντελεστής απορρόφησης των τοιχωμάτων είναι μικρότερος της μονάδας, η ακτινοβολία που διέρχεται από το άνοιγμα θα υποστεί τόσες πολλές ανακλάσεις πριν εξέλθει, που τελικά θεωρείται ότι απορροφήθηκε ολικά. Η έννοια του «μέλανος σώματος» είναι πολύ σπουδαία, όχι μόνο επειδή είναι ο πιο αποτελεσματικός πομπός θερμικής ενέργειας, αλλά και γιατί μπορεί να αποδείξει ότι η ολική ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και ο φασματικός διαχωρισμός της εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία [165], [177], [178].

Τα πραγματικά αντικείμενα ή έγχρωμα σώματα σχεδόν ποτέ δεν ακολουθούν τους νόμους ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, σε μια ευρεία περιοχή μήκους κύματος, αν και μπορεί να προσεγγίζουν την συμπεριφορά του μέλανος σώματος σε συγκεκριμένα διαστήματα φάσματος. Υπάρχουν τρεις διεργασίες που μπορεί να συμβούν και εμποδίζουν ένα πραγματικό αντικείμενο από το να συμπεριφερθεί ως μέλαν σώμα. Ένα μέρος α της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφηθεί, ένα άλλο ρ μπορεί να ανακλαστεί και ένα μέρος τ μπορεί να μεταδοθεί. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ . Έτσι:

- Για την απορρόφηση ακτινοβολίας, το α_λ ισούται με το λόγο της απορροφούμενης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο, προς την προσπίπτουσα.

- Για την ανάκλαση της ακτινοβολίας, το ρ_λ ισούται με το λόγο της ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα αντικείμενο, προς την προσπίπτουσα.
- Για τη μεταδιδόμενη ακτινοβολία, το τ_λ ισούται με το λόγο της ακτινοβολίας που διαπερνά δια μέσου ενός αντικειμένου, προς την προσπίπτουσα.

Το άθροισμα αυτών των συντελεστών σε κάθε μήκος κύματος πρέπει να ισούται με την μονάδα.

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Για αδιαφανή αντικείμενα $\tau_\lambda = 0$ και άρα $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$, [165], [177], [178].

Ένας άλλος παράγοντας, που ονομάζεται **συντελεστής εκπομπής ϵ** (emissivity), απαιτείται για να περιγράψει το μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός σώματος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Παίρνει τιμές από 0 έως 1. Ο φασματικός συντελεστής εκπομπής ϵ_λ ισούται με το λόγο της ενέργειας που εκπέμπει ένα αντικείμενο, προς την ενέργεια που εκπέμπει το μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία και μήκος κύματος [165], [177], [178].

Υπάρχουν δύο βασικές μεθοδολογίες θερμογραφικού ελέγχου, ο παθητικός έλεγχος (passive) και ο ενεργητικός έλεγχος (active).

Με τον **παθητικό θερμογραφικό έλεγχο** εξετάζονται υλικά και κατασκευές, που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασιακή κλίμακα από το περιβάλλον (συνήθως υψηλότερη), δηλαδή αφορά σε εφαρμογές που το υλικό περιέχει τη δική του πηγή θερμότητας (π.χ. το ανθρώπινο σώμα). Κατά τη μέθοδο αυτή, καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας [165], [177].

Στην **ενεργητική μέθοδο ελέγχου** χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή διέγερσης των εξεταζόμενων υλικών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στα πλαίσια της δομικής θερμογραφίας, για την ανίχνευση ασυνεχειών και ελαττωμάτων σε μια αρχιτεκτονική επιφάνεια. Ποιοτικά ο μηχανισμός λειτουργίας της είναι ο εξής: Με τη βοήθεια της εξωτερικής πηγής διέγερσης, το υπό εξέταση υλικό δέχεται ένα θερμικό παλμό, ο οποίος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των 3.8 με 47 Btu. Η θερμοκρασία του υλικού μεταβάλλεται απότομα μετά την εφαρμογή του θερμικού παλμού, λόγω φαινομένων διάχυσης της ακτινοβολίας κάτω από την επιφάνεια και απωλειών λόγω φαινομένων μεταφοράς με συναγωγή και ακτινοβολία. Η παρουσία ενός άλλου υλικού ή κενού μειώνει το ρυθμό διάχυσης. Επομένως, παρατηρώντας τη θερμοκρασία στην επιφάνεια, η ανομοιογένεια του υλικού φαίνεται σαν περιοχή με διαφορετική θερμοκρασία σε σχέση με τη γύρω «υγιή» ομοιογενή περιοχή. Η εφαρμογή του ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου π.χ. σε μια τοιχοποιία, με τη λήψη θερμογραφημάτων της επιφάνειας μετά από μια διαδικασία θέρμανσης-ψύξης, μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με το εσωτερικό μιας τοιχοποιίας [165], [177], [178].

Συμπερασματικά, ο ενεργητικός έλεγχος επιτρέπει την εξέταση σε βάθος της επιφάνειας, παρουσιάζει όμως λειτουργικά προβλήματα, αφού δεν είναι εύκολη η εφαρμογή του σε εξωτερικούς χώρους. Σε αυτούς συνήθως εφαρμόζουμε τον παθητικό έλεγχο, με τον οποίο παίρνουμε γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα [177], [178].

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εφαρμόστηκε η ενεργητική προσέγγιση της υπέρυθρης θερμογραφίας με τη χρήση παλμών, σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου, για την εξέταση τόσο των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, όσο και των στερεών δειγμάτων που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες των ιστορικών κτιρίων του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, και της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού. Η εκτέλεση των μετρήσεων έγινε στο Materials Research Center του Πανεπιστημίου του Bath στη Μ. Βρετανία.

Το σύστημα παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας Thermoscope περιλαμβάνει υπέρυθρη κάμερα μεσαίου μήκους κύματος (Merlin 3-5 μm) και χρησιμοποιεί έναν ανιχνευτή υπέρυθρου από ίνδιο – αντιμόνιο των 60 Hz, οπτικό φακό εστιακού μήκους 13 mm και πολλαπλές σειρές αισθητήρων 320 (H) x 256 (V) στοιχείων. Το όργανο έχει ενσωματωμένο σύστημα θερμικής διέγερσης και παράγει ενέργεια 2 KJ σε 2 – 5 ms [97], [179], [180].

Ο γενικός μηχανισμός λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι ο εξής: με τη βοήθεια της εξωτερικής πηγής διέγερσης τα υπό εξέταση υλικά δέχονται ένας θερμικό παλμό 2 KJ. Η θερμοκρασία του υλικού μεταβάλλεται αμέσως με την εφαρμογή αυτού του παλμού, λόγω φαινόμενων διάχυσης της ακτινοβολίας κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Τυχόν υπάρχουσες ανωμαλίες στην επιφάνεια όπως κενό, ρωγμές, άλλο υλικό, μειώνουν το ρυθμό διάχυσης της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αποτυπώνονται στο εικονογράφημα με διαφορετική θερμοκρασία [179], [180].

Από τις μετρήσεις της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, τόσο των πρότυπων δοκιμίων, όσο και των δειγμάτων του μνημείου, προέκυψαν διαγράμματα της έντασης των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων σε σχέση με το χρόνο, αφού η θερμοκάμερα είναι βαθμονομημένη, έτσι ώστε να καταγράφει την ένταση των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων που είναι 16 bit. Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση οδηγεί στη λήψη εικόνων καλύτερης διακριτικής ικανότητας – ακρίβειας, ενώ η ένταση των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων σχετίζεται με την εκπεμπόμενη ακτινοβολία και αποτελεί το αντίστοιχο της θερμοκρασίας [97], [179], [180].

Οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού επηρεάζονται από [181]:

- Την επιφανειακή τραχύτητα,
- Τις πιθανά υπάρχουσες διαφορές στη χημική σύσταση της επιφάνειας από την κυρίως μάζα του υλικού (φθορά, διάβρωση, μολύνσεις κ.τ.λ.),
- Την παρουσία ρωγμών, ρηγματώσεων, κοιλοτήτων, κενών, κ.ά.

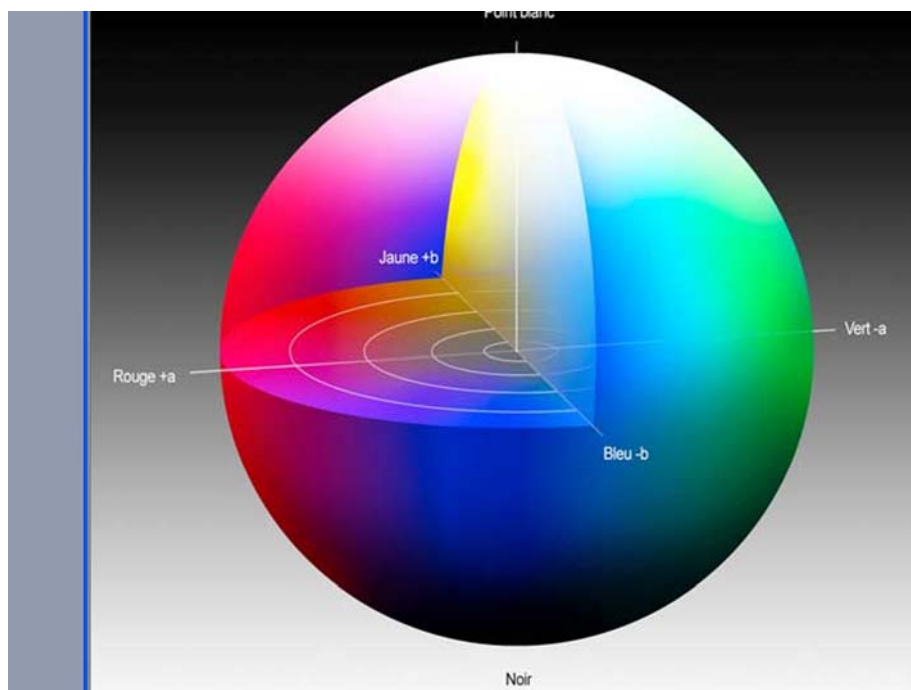
Τα παραπάνω, κατά τη μεταφορά της θερμότητας που παράγεται από ένα σύστημα θερμικού παλμού, μεταβάλλουν το βάθος της επιφανειακής ενεργής στοιβάδας όπου λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα της θερμικής διάχυσης (α) και της θερμικής εκπομπής (ϵ), τα οποία συνδέονται με τη θερμική αγωγιμότητα (k), την πυκνότητα (ρ) και την ειδική θερμότητα (C_p), [181], [179], βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$a = \frac{k}{\rho C_p}$$

$$\varepsilon = \sqrt{k\rho Cp}$$

Συνεπώς, οι μετρήσεις της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας έλαβαν χώρα για να διερευνηθεί η συσχέτιση των μετρούμενων τιμών έντασης των εξεταζόμενων επιφανειών στο χρόνο με τις παραμέτρους της υφής, της μορφολογίας και της συνοχής της επιφάνειας, σε συνδυασμό πάντα με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση τους.

3.2.8 Χρωματομετρία



Εικόνα 3.2.8.1 Σχηματική αναπαράσταση του Ενιαίου Χρωματικού Χώρου CIE L*, a*, b*

Η χρωματομετρία είναι ένας κλάδος της επιστήμης του χρώματος που ασχολείται με τον αριθμητικό προσδιορισμό (ποσοτικοποίηση) του χρώματος ενός ορατού ερεθισμού, κατά τέτοιο τρόπο ώστε [84]:

1. Για παρατηρητή με κανονική όραση, κάτω από τις ίδιες συνθήκες φωτός, οι χρωματικοί ερεθισμοί, που έχουν προσδιοριστεί με τον ίδιο τρόπο, να είναι χρωματικά όμοιοι (color matching).
2. Οι ερεθισμοί που είναι χρωματικά όμοιοι να έχουν οριστεί κατά τον ίδιο τρόπο.
3. Ο αριθμητικός προσδιορισμός (ποσοτικοποίηση) να πραγματοποιείται από συνεχείς συναρτήσεις των φυσικών παραμέτρων που ορίζουν τη φασματική κατανομή ισχύος της ακτινοβολίας του ορατού ερεθισμού.

Η χρωματική αντίληψη, όπως ακριβώς αυτή του χώρου, είναι τρισδιάστατη. Αυτό σημαίνει ότι η περιγραφή των χρωμάτων είναι ακριβέστερη με τη χρήση αριθμητικών δεδομένων-διανυσμάτων, σχετικά με τη φωτεινότητα, τον κορεσμό και τη σκίαση, από την περιγραφή με χρήση λέξεων (π.χ. μπλε-ουρανού). Η δυσκολία περιγραφής των χρωματικών διαφορών με χρήση λέξεων γίνεται αντιληπτή, αν αναλογιστεί κανείς ότι το ανθρώπινο μάτι διακρίνει ένα εκατομύριο διαφορετικούς χρωματικούς τόνους. Η διεθνής επιτροπή φωτισμού **CIE (Commission International de l'Eclairage)**, η οποία συγκροτήθηκε το 1931 παρέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τον προσδιορισμό των προτύπων και των μεθόδων μέτρησης του χρώματος, ώστε η χρωματομετρία να είναι χρήσιμο εργαλείο στην επιστήμη και την τεχνολογία [85].

Η τριχρωματική θεωρία αποτελεί τη γενίκευση μιας σειράς πειραμάτων χρωματικής ομοιότητας, μεταξύ δύο χρωματικών ερεθισμών. Στόχος της χρωματομετρίας είναι να ενσωματώσει τις ιδιότητες της ανθρώπινης τριχρωματικής όρασης, στη μέτρηση και τον καθορισμό των ιδιοτήτων του ορατού φωτός. Βάσει της θεωρίας αυτής αποτελεί η υπόθεση, ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες παρατήρησης, μπορεί να πραγματοποιηθεί η χρωματική προσομοίωση ενός ερεθισμού, με τον ερεθισμό που προκύπτει από την ανάμιξη τριών "πρωταρχικών ερεθισμών", των οποίων η ισχύς ακτινοβολίας έχει ρυθμιστεί κατάλληλα. Η επιλογή των ερεθισμών αυτών δεν είναι απολύτως αυθαίρετη. Κάθε ένας από τους τρεις πρωταρχικούς ερεθισμούς δε μπορεί να προκύψει με ανάμιξη των άλλων δύο [182], [183].

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι χρωματικής ταυτοποίησης, η οπτική, η φασματική και η μέθοδος των τριερεθισμικών μετρήσεων.

Από τις τρεις μεθόδους, η μέθοδος των τριερεθισμικών μετρήσεων, είναι αυτή στην οποία βασίζεται το χρωματόμετρο, που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις αυτής της διδακτορικής διατριβής. Σε αυτήν τη μέθοδο, το φως που ανακλάται από το δείγμα (επιφάνεια), περνά από χρωματικά φίλτρα με συνέπεια το διαχωρισμό του στο κόκκινο, πράσινο και μπλε τμήμα της ακτινοβολίας, δηλαδή κάτι ανάλογο με τη λειτουργία των κωνίων. Στη συνέχεια τα τμήματα αυτά μετρώνται ανεξάρτητα με φωτοκύτταρα και οι τιμές που προκύπτουν αντιστοιχούν στις ανακλάσεις R_x , R_y , και R_z . Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τριερεθισμικών τιμών, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις [184].

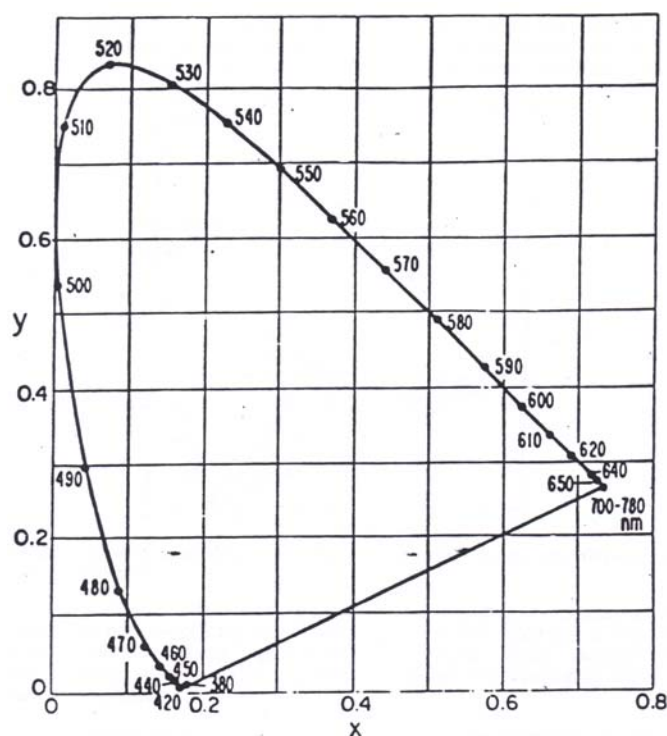
$$X = a \cdot R_x + b \cdot R_z \quad Y = R_y \quad Z = c \cdot R_z$$

Οι τριερεθισμικές τιμές αποτελούν τη βάση της χρωματομετρίας. Όπως ακριβώς η θεωρητική γεωμετρία, περιγράφει τη θέση ενός σημείου στον τρισδιάστατο Καρτεσιανό χώρο, η χρωματομετρία περιγράφει τη θέση ενός χρώματος στον πραγματικό χρωματικό χώρο. Καθώς οι τριερεθισμικές τιμές X , Y , Z δε δίνουν άμεσες πληροφορίες για τη φωτεινότητα, τον κορεσμό και την απόχρωση, μετατίθενται σε άλλα χρωματικά συστήματα. Με την πάροδο του χρόνου πολλές θεωρίες αναπτύχθηκαν, σχετικά με τη χρωματική αντίληψη του ανθρώπου, ενώ παράλληλα εισήχθηκαν πολλά χρωματικά συστήματα. Κάποια από αυτά είναι το τριερεθισμικό σύστημα και ο ενιαίος χώρος $L^*a^*b^*$ (CIE 1976), τα οποία και αναλύονται παρακάτω.

Οι συντεταγμένες της χρωματικότητας x και y (μικρά) στο τριερεθισμικό σύστημα υπολογίζονται από τις τριερεθισμικές τιμές X , Y , Z μέσω των εξισώσεων:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \qquad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Αν σχεδιάσουμε τις συντεταγμένες της χρωματικότητας x και y , όλων των χρωμάτων του φάσματος σε ένα διάγραμμα (κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος), το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια πεταλοειδής καμπύλη (εικ. 3.2.8.2).

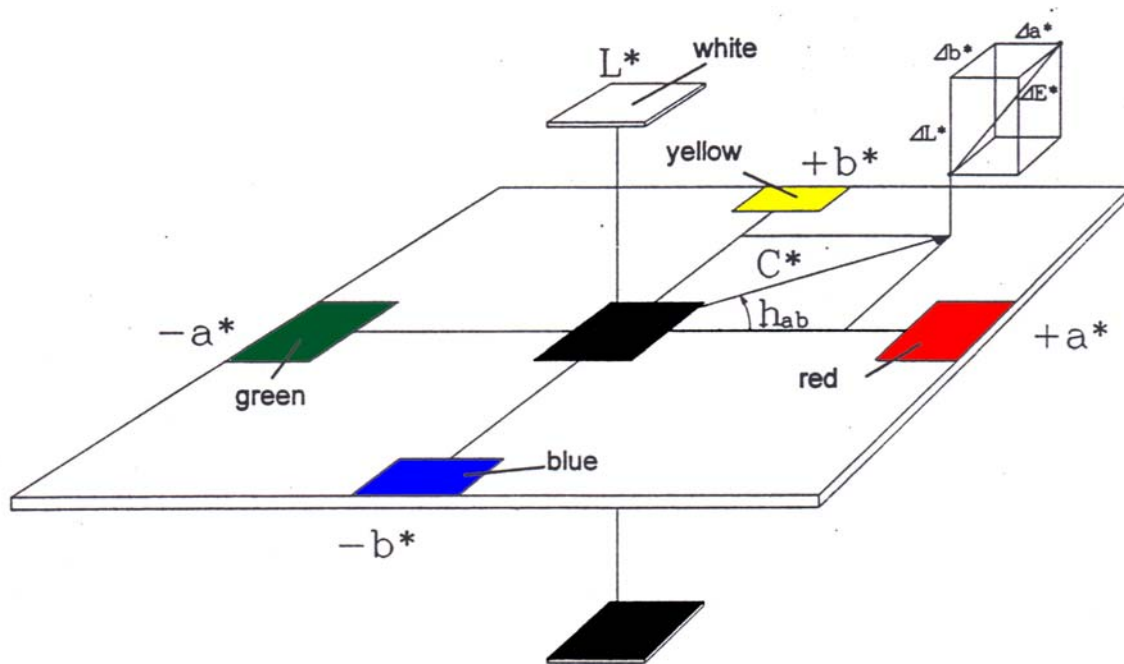


Εικόνα 3.2.8.2.Γράφημα της χρωματικότητας των χρωμάτων του ορατού φάσματος

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι χρωματικοί ερεθισμοί με μήκος κύματος στο διάστημα (700-780)nm παριστάνονται με ένα σημείο, ενώ αυτοί του διαστήματος (380-430)nm με ένα σύνολο σημείων, που σχεδόν συμπίπτουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζουν την ίδια περίπου χρωματικότητα [83], [182], [183].

Στο ίδιο χρωματικό επίπεδο, μπορούν να εμφανιστούν μόνο τα χρώματα με ίσες τιμές φωτεινότητας. Χρώματα με διαφορετικές τιμές φωτεινότητας τοποθετούνται σε διαφορετικά επίπεδα του παραπάνω γραφήματος. Συνεπώς η γραφική απεικόνιση της φωτεινότητας, του κορεσμού και της απόχρωσης πρέπει να είναι τρισδιάστατη. Αποτέλεσμα της ανάγκης αυτής αποτελούν οι τρισδιάστατοι ενιαίοι χρωματικοί χώροι.

Μια καθαρότερη παρουσίαση από αυτήν του τριερεθισμικού χώρου, αποτελεί ο ενιαίος χρωματικός χώρος $L^*a^*b^*$ (εικ. 3.3.9.3). Όταν αποδείχτηκε ότι ο τρισδιάστατος χρωματικός χώρος δεν ήταν ενιαίος, δηλαδή δεν επέτρεπε τη διατύπωση μιας αναλογικής σχέσης μεταξύ της χρωματικής διαφοράς δύο ερεθισμών και της χρωματικής διακριτικής ικανότητας, ο MacLaughen πρότεινε τη μελέτη του χρώματος όχι με τις καρτεσιανές συντεταγμένες, αλλά με τις πολικές.



Εικόνα 3.2.8.3 Σχηματική αναπαράσταση του Ενιαίου Χρωματικού Χώρου CIE L^*, a^*, b^* [184]

Βλέπουμε ότι ο χώρος αυτός προκύπτει από τη θεώρηση των κάθετων μεταξύ τους διανυσμάτων L^*, a^*, b^* . Μια διαφορετική αναπαράσταση του χώρου φαίνεται στην εικόνα 3.2.8.1 Το βασικό πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι παρέχει αριθμητικές τιμές των διαφορών $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$ μεταξύ δύο χρωματικών ερεθισμών.

Ο άξονας L^* αναπαριστά τη λαμπρότητα ενός χρωματικού ερεθισμού, ο άξονας a^* την κόκκινη-πράσινη απόχρωση του ερεθισμού, ενώ ο άξονας b^* την κίτρινη-μπλε απόχρωση. Οι τιμές της λαμπρότητας είναι πάντα θετικές και κυμαίνονται από 0 έως 100, για ιδανικά μαύρο και λευκό χρώμα αντίστοιχα. Οι κόκκινες αποχρώσεις έχουν θετικό a^* , ενώ οι πράσινες αρνητικό. Με τον ίδιο τρόπο οι κίτρινες αποχρώσεις έχουν θετικό b^* , ενώ οι μπλε αρνητικό [83], [183], [184].

Η λαμπρότητα είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας, η χροιά ανάλογη του μήκους κύματος, ενώ ο κορεσμός αντιστρόφως ανάλογος του ποσού του λευκού φωτός, που περιέχει η ακτινοβολία (π.χ. το κόκκινο είναι πιο κορεσμένο από το ροζ). Οι συνιστώσες L^*, a^*, b^* του χώρου υπολογίζονται από τις πρότυπες τριερεθισμικές τιμές, μέσω πολύπλοκων εξισώσεων [83], [85]. Η επίλυσή τους αποφεύγεται, αφού τα χρωματόμετρα που χρησιμοποιούνται

περιλαμβάνουν στο λογισμικό τους πρόγραμμα τις εξισώσεις αυτές, τις επιλύουν και μας παρέχουν αμέσως τις τιμές των L^* , a^* , b^* .

Η συνολική διαφορά χρώματος δίνεται από τη σχέση [83], [182], [183], [184]:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad , \text{ όπου}$$

ΔL^* : διαφορά λαμπρότητας ($\Delta L^* = L^*_{\text{ΜΕΤΑ}} - L^*_{\text{ΠΡΙΝ}}$),

Δa^* : διαφορά στο κόκκινο-πράσινο ($\Delta a^* = a^*_{\text{ΜΕΤΑ}} - a^*_{\text{ΠΡΙΝ}}$),

Δb^* : διαφορά στο κίτρινο-μπλε ($\Delta b^* = b^*_{\text{ΜΕΤΑ}} - b^*_{\text{ΠΡΙΝ}}$).

Χρωματόμετρα: Η σύγχρονη οργανολογία της χρωματομετρίας είναι σχεδιασμένη ώστε να παρέχει αυτόματα τις τριερεθισμικές τιμές και τις συντεταγμένες της χρωματικότητας ενός χρωματικού ερεθισμού, χωρίς ο ανθρώπινος οφθαλμός να λαμβάνει μέρος στις μετρήσεις.

Το Χρωματόμετρο είναι το φασματοφωτόμετρο (μέτρηση της έντασης του φωτός σε διάφορα μήκη κύματος, λ) που μετατρέπει τις μετρήσεις του φάσματος (συνήθως υπολογίζεται ο φασματικός συντελεστής ανάκλασης $\beta(\lambda)$), στις αντίστοιχες τριερεθισμικές τιμές ενός χρωματικού ερεθισμού και σε άλλες συντεταγμένες που γνωρίζουμε [184].

Όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας του χρωματόμετρου, πηγή λευκού φωτός (συνήθως λάμπα αλογόνου) εκπέμπει ακτινοβολία ορισμένης ισχύος, η οποία εισέρχεται στον μονοχρωμάτορα (σύστημα που επιτρέπει τη δίοδο της επιθυμητής ακτινοβολίας) και διαχωρίζεται σε μονοχρωματικές ακτινοβολίες. Στη συνέχεια οι μονοχρωματικές ακτινοβολίες μεταφέρονται διαμέσου κατάλληλης σχισμής στο χώρο όπου βρίσκονται το προς εξέταση δείγμα και το δείγμα αναφοράς. (Ιδανικό δείγμα αναφοράς θα ήταν αυτό με φασματικό συντελεστή ανάκλασης $\beta(\lambda)=1$, επειδή όμως δεν υπάρχει τέτοιο υλικό στη φύση χρησιμοποιούνται δευτερεύοντα προτυποποιημένα δείγματα, που καλούνται λευκά δείγματα.)

Ο ανιχνευτής διαβάζει συνεχώς τη φασματική ισχύ της ανακλώμενης ακτινοβολίας και τη μετατρέπει σε ηλεκτρικό παλμό. Το προκύπτον ηλεκτρικό σήμα είναι ανάλογο της έντασης του φωτός σε κάθε μήκος κύματος και μέσω ειδικού λογισμικού αναγράφονται τελικώς στο όργανο οι τριερεθισμικές τιμές [184].

Ο τύπος χρωματόμετρου που χρησιμοποιήθηκε στις χρωματομετρικές μετρήσεις είναι το Dr Lange color – pen, LMG 159/160.

Τα χρωματικά συστήματα ή οι χρωματικοί χώροι οι οποίοι μπορούν να μετρηθούν με το Dr Lange color – pen, LMG 159/160 είναι [184]:

- Το πρότυπο Χρωματομετρικό Σύστημα X, Y, Z της CIE 1931, (Commission International de' l' Eclairage)
- L^* , a^* , b^* , CIE
- L^* , C^* , h_{ab}^* CIE
- L, a, b, Hunter
- x, y, Y

Παράλληλα, μπορεί να μετρηθεί η συνολική διαφορά χρώματος του προς εξέταση δείγματος (σε κάθε ένα από τα παραπάνω χρωματικά συστήματα), ως προς δείγμα αναφοράς που έχει επιλεγεί από το χειριστή. Επιπλέον, μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή σειράς μετρήσεων. Στη μνήμη του οργάνου μπορούν να σωθούν 500 μετρήσεις οι οποίες τυπώνονται στο ειδικό σύστημα εκτύπωσης ή παρουσιάζονται στο software CP – QC όταν το όργανο συνδεθεί με Η/Υ. Με το software CP – QC είναι δυνατοί στατιστικοί υπολογισμοί, μετατροπές μετρήσεων από το ένα χρωματικό σύστημα στο άλλο, καθώς και ο σχηματισμός γραφικών παραστάσεων [184].

Η χρωματομετρία εφαρμόστηκε στα πρότυπα δοκίμια του μαρμάρου στο εργαστήριο για την καταγραφή των χρωματικών παραμέτρων L^* , a^* , b^* και του πως αυτές μεταβάλλονται σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα τραχύτητας. Παράλληλα, η χρωματομετρία εφαρμόστηκε επί τόπου στις εξεταζόμενες επιφάνειες, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών, καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού. Στις επί τόπου μετρήσεις, κάθε περιοχή καθαρισμού χωρίστηκε σε κλίμακα έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, ο ίδιος αριθμός μετρήσεων στα ίδια σημεία και συνεπώς τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

4. Παρουσίαση Πειραμάτων, Περιγραφή Αποτελεσμάτων και Συζήτηση Αποτελεσμάτων - Εργαστηριακός έλεγχος πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου

4.1 Εργαστηριακός έλεγχος πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφ. 3.1 για την καλύτερη κατανόηση της υφής, της μορφολογίας, της συνοχής και του χρώματος των επιφανειών, καθώς και των παραμέτρων που τις ορίζουν, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω έλεγχος τους με εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και της χρωματομετρίας, σε πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου στο εργαστήριο.

Τα πρότυπα δοκίμια Πεντελικού Μαρμάρου είναι διαστάσεων 15cmx6cmx1cm. Τα δοκίμια αυτά έχουν υποστεί κατεργασία με διαφορετικά γυαλόχαρτα, με τέτοιο τρόπο ώστε οι επιφάνειές τους να εμφανίζουν διαφορετικά επίπεδα υφής, συνοχής και μορφολογίας. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια κατεργάστηκαν με γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου SiC, τα νούμερα των οποίων αντιστοιχούν, - σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό FEPA (Federation of European Producers of Abrasives)* και την P ταξινόμηση για τα επικαλυπτόμενα υλικά εκτριβής - στο μέγεθος των κόκκων εκτριβής, δηλ. στο μέγεθος των σωματιδίων των υλικών εκτριβής που ενσωματώνονται στο γυαλόχαρτο [185]. Έτσι, όσον αφορά στην P ταξινόμηση του Ευρωπαϊκού FEPA, η μεγαλύτερης διαμέτρου μάκρο-κόκκοι συμβολίζονται με τους αριθμούς από 12 έως 220, οι οποίοι αντιστοιχούν σε τιμές μέσης διαμέτρου κόκκων από 1815μm έως 68μm και παράγονται με χρήση κόσκινων, ενώ η μικρότερης διαμέτρου μικρο-κόκκοι συμβολίζονται με τους αριθμούς από 240 έως 2000, με αντίστοιχες τιμές μέσης διαμέτρου κόκκων από 58,5μm έως 10,3μm και παράγονται με κατακάθιση [185].

Για τις ανάγκες του εργαστηριακού ελέγχου παρασκευάστηκαν πέντε σειρές δοκιμών, διαστάσεων 15cmx6cmx1cm, τα οποία κατεργάστηκαν με τα γυαλόχαρτα P60, P80, P100, P220, P400, P600, όπου το μέγεθος των κόκκων του πυριτικού καρβιδίου που είναι το υλικό εκτριβής, βάσει της ταξινόμησης P της FEPA, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα [185]:

Πίνακας 4.1.1

Μάκρο-κόκκοι			Μίκρο-κόκκοι		
Γενικός Χαρακτηρισμός Γυαλόχαρτου	Συμβολισμός κόκκων	Μέση διάμετρος κόκκων σε μm	Γενικός Χαρακτηρισμός Γυαλόχαρτου	Συμβολισμός κόκκων	Μέση διάμετρος κόκκων σε μm
μεσαίο	P60	269	εξαιρετικά ψιλό	P400	35
μεσαίο	P80	201	εξαιρετικά ψιλό	P600	25,8
ψιλό	P100	162	—	—	—
πολύ ψιλό	P220	68	—	—	—

Όλα τα γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου εφαρμόστηκαν στα δοκίμια μαρμάρου με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκύπτει επιφανειακή υφή με κατεύθυνση (δεσπόζουσα διεύθυνση –

lay). Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι το δοκίμιο I60 κατεργάστηκε μόνο με το γυαλόχαρτο P60, το δοκίμιο I80 κατεργάστηκε με το γυαλόχαρτο P60 και μετά με το P80, το δοκίμιο I100 κατεργάστηκε με τα γυαλόχαρτα P60, P80 και μετά με το P100, το δοκίμιο I220 κατεργάστηκε με τα γυαλόχαρτα P60, P80, P100 και μετά με το P220, το δοκίμιο I400 κατεργάστηκε με τα γυαλόχαρτα P60, P80, P100, P220 και μετά με το P400 και τέλος το δοκίμιο I600 κατεργάστηκε με τα γυαλόχαρτα P60, P80, P100, P220, P400 και μετά με το P600.

Στη συνέχεια τα δοκίμια ψεκάστηκαν με απιονισμένο νερό (αγωγιμότητας 0.81 μ S) μέσω υδροβολέα για να ξεπλυθούν, ενώ παράλληλα για να απομακρυνθούν όλα τα σωματίδια σκόνης που συγκεντρώθηκαν στην επιφάνειά τους εξαιτίας της κατεργασίας με τα γυαλόχαρτα, εφαρμόστηκε μαλακό βούρτσισμα. Ακολούθως, καταβυθίστηκαν σε απιονισμένο νερό για 1 ώρα και αφού ξηράθηκαν σε φούρνο στους 105°C για δέκα ώρες, η επιφάνειά τους χωρίστηκε σε τρεις περιοχές. Οι δύο πρώτες έχουν διαστάσεις 6cmx6cmx1cm, ενώ η τρίτη έχει διαστάσεις 3cmx6cmx1cm.



Εικ. 4.1.1 Πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, κατά τη διάρκεια εφαρμογής της Πάστας AB57

Στην πρώτη περιοχή κάθε δοκιμίου, κάθε σειράς εφαρμόστηκε πάστα AB57 για είκοσι λεπτά (Εικ. 4.1.1), έτσι ώστε να διαφοροποιηθούν τα επίπεδα της υφής, της μορφολογίας και της συνοχής της επιφάνειας, όπως αυτά προέκυψαν με την κατεργασία από τα γυαλόχαρτα. Η προσδοκώμενη διαφοροποίηση των επιπέδων της υφής, της μορφολογίας και της συνοχής της μαρμάρινης επιφάνειας μετά την εφαρμογή της πάστας AB57, οφείλεται στη συμπλοκοποίηση του κατιόντος ασβεστίου του μαρμάρου από το δινατριούχο άλας του EDTA της πάστας, γεγονός που οδηγεί σε απώλεια αυθεντικού υλικού.

Συνεπώς, τα προς μέτρηση δοκίμια είναι δώδεκα και στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κωδικοί ονομασίας, ενώ συνοψίζονται οι διαδικασίες κατεργασίας για το κάθε ένα από αυτά.

Πίνακας 4.1.2

Κωδικός Δείγματος	Τύπος Κατεργασίας
I60	Εφαρμογή γυαλόχαρτου SiC, P60
I80	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60 και P80
I100	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80 και P100
I220	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100 και P220
I400	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100, P220 και P400
I600	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100, P220, P400 και P600
I60AB57	Εφαρμογή γυαλόχαρτου SiC, P60 και Πάστας AB57 για 20min
I80AB57	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80 και Πάστας AB57 για 20min
I100AB57	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100 και Πάστας AB57 για 20min
I220 AB57	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100, P220 και Πάστας AB57 για 20min
I400 AB57	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100, P220, P400 και Πάστας AB57 για 20min
I600 AB57	Διαδοχική εφαρμογή γυαλόχαρτων SiC, P60, P80, P100, P220, P400, P600 και Πάστας AB57 για 20min

Εν συνεχεία εφαρμόστηκαν οι προαναφερθείσες μη καταστρεπτικές τεχνικές, οι οποίες δίνουν τιμές στις μετρούμενες παραμέτρους της τραχύτητας, του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, του συντελεστή μορφής, της πυκνότητας ρηγματώσεων, του συντελεστής ευθυπτότητας, της λαμπρότητας, της διαφοράς σε κόκκινο-πράσινο, της διαφοράς σε κίτρινο-μπλε, καθώς και της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας και της καταγραφόμενης θερμοκρασίας.

* Μια σειρά από διαφορετικά πρότυπα έχουν διαμορφωθεί για την ταξινόμηση του μεγέθους των κόκκων εκτριβής που ενσωματώνονται στα γυαλόχαρτα. Αυτά τα πρότυπα ορίζουν όχι μόνο το μέσο μέγεθος κόκκων αλλά και την επιτρεπτή απόκλιση από το μέσο όρο. Τα πιο διαδεδομένα πρότυπα είναι το CAMI (Coated Abrasive Manufacturers Institute, που πλέον είναι μέλος των Unified Abrasives Manufacturers' Association) των Ηνωμένων Πολιτειών και το Ευρωπαϊκό FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) P grade (P ταξινόμηση για τα επικαλυπτόμενα υλικά εκτριβής) και F grade (F ταξινόμηση για τα συγκολλούμενα υλικά εκτριβής). Το σύστημα FEPA είναι το ίδιο με αυτό που παρουσιάζεται στο πρότυπο ISO 6344. Για κάθε μία από τις δύο διαφορετικές σειρές ταξινόμησης του Ευρωπαϊκού FEPA έχουν διαμορφωθεί δύο πρότυπα, τα οποία ορίζουν λεπτομερώς τα μεγέθη των χρησιμοποιούμενων κόκκων, καθώς και τις διαφορετικές διεργασίες παραγωγής τους. Σημειώνεται δε ότι οι δύο σειρές ταξινόμησης P και F δεν είναι συμβατές μεταξύ τους, όσον αφορά στη μέση διάμετρο των κόκκων εκτριβής που ενσωματώνονται στα γυαλόχαρτα.

4.2 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Η χρήση της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών στον εργαστηριακό έλεγχο των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, έλαβε χώρα για τη γενική μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών σε σχέση με τα διαφοροποιημένα επίπεδα υφής, μορφολογίας και συνοχής, όπως αυτά προκύπτουν μετά από την κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου και την εφαρμογή της πάστας AB57. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εικόνες για κάθε δοκίμιο που έχει κατεργαστεί με διαφορετικό τρόπο (β.λ. πίνακας 4.1.2) σε μεγέθυνση x50.



I60 x50



II60 x50



I60 pasta AB57 x50



II60 pasta AB57 x50



I80 x50



II80 x50



I80 pasta AB57 x50



III80 pasta AB57 x50



I100 x50



II100 x50



I100 pasta AB57 x50



II100 pasta AB57 x50



I220 x50



III220 x50



I220 pasta AB57 x50



III220 pasta AB57 x50



I400 x50



III400 x50



I400 pasta AB57 x50



III400 pasta AB57 x50



I600 x50



II600 x50



I600 pasta AB57 x50



II600 pasta AB57 x50

Από τις παραπάνω εικόνες της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών μπορούν να εξαχθούν μόνο γενικά συγκριτικά συμπεράσματα σε σχέση με τη μορφολογία και την υφή των προς εξέταση δοκιμίων. Αφενός, δεν καταγράφονται σαφείς μορφολογικές διαφορές ανάμεσα στα δείγματα που είναι κατεργασμένα μόνο με τα γυαλόχαρτα και στα αντίστοιχα μετά την εφαρμογή της πάστας AB57. Αφετέρου και σε γενικές γραμμές προκύπτει ότι η χρήση των πιο λεπτόκοκκων γυαλόχαρτων P400 και P600 (ακόμα και μετά την εφαρμογή της πάστας AB57), οδηγεί σε επιφάνειες όπου οι κόκκοι του μαρμάρου είναι ευδιάκριτοι στο σύνολό της εξεταζόμενης περιοχής, σε σχέση με τις επιφάνειες όπου έχουν κατεργαστεί με πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (P60, P80, P100, P220), όπου κάποιοι κόκκοι μαρμάρου είναι εμφανείς αποσπασματικά.

Οι κόκκοι του μαρμάρου είναι περισσότερο εμφανείς στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με τη σειρά των γυαλόχαρτων έως P400 (δείγμα I400), καθώς και στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με τη σειρά των γυαλόχαρτων έως P400 και την πάστα AB57 (δείγμα I400AB57).

Η διακριτή εμφάνιση των κόκκων λογικά συνεπάγεται επιφάνειες που πρέπει να παρουσιάζουν μεγαλύτερη τραχύτητα, εμβαδόν πραγματικής επιφάνειας και επιφανειακές ρηγματώσεις και συνεπώς μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά.

4.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον εργαστηριακό έλεγχο των πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υφής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

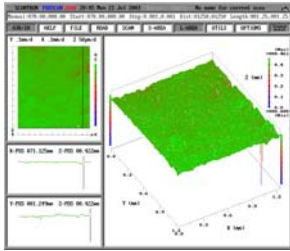
Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υφής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας της κατεργασίας με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου και την εφαρμογή της πάστας AB57.

Υπενθυμίζεται δε ότι (β.λ. κεφ. 2.2.1 & 3.2.5):

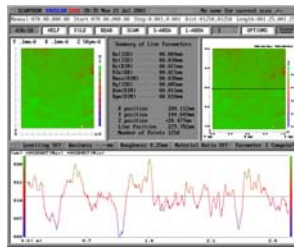
- Το μήκος αποτίμησης είναι ίσο με 1.25mm, το μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter - 0.25mm [111], [120] και συνεπώς οι τρισδιάστατες τοπογραφικές απεικονίσεις των εξεταζόμενων δειγμάτων έχουν συνολικό προβαλλόμενο εμβαδόν 1.25mm x1.25mm.
- Μέσω του λογισμικού του οργάνου και εφαρμόζοντας το μήκος δειγματοληψίας, προσδιορίζεται η παράμετρος της τραχύτητας R_q , για κάθε ένα από τα ορισθέντα 50 γραμμικά προφίλ, τόσο στον άξονα X, όσο και στον άξονα Y. Κατόπιν υπολογίζεται ο μέσος όρος της τιμής του R_q για τον άξονα X (R_{qx}) και τον άξονα Y (R_{qy}), ο οποίος ποσοτικοποιείται με τη χρήση του στατιστικού μεγέθους της ενδιάμεσης τιμής (median) [175]. Τελικά, η υψηλότερη τιμή από τις δύο (R_{qx} , R_{qy}), χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 4288 [120].
- Για τον αντιπροσωπευτικότερο έλεγχο των πρότυπων δοκιμών πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με το laser προφίλομετρο σε δύο περιοχές συνολικού εμβαδού 1.25mm x1.25mm, η κάθε μία. Η αντιπροσωπευτική τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας R_q προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών του μέσου όρου των συνυπολογισθέντων R_{qx} και R_{qy} και των δύο περιοχών σάρωσης δηλ. η κάθε μία από αυτές ήταν η ενδιάμεση τιμή 100 γραμμικών προφίλ και όχι 50 γραμμικών προφίλ όπως στα δείγματα των ιστορικών κτιρίων. Ο λόγος πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), για τα πρότυπα δοκίμια προέκυψε από το λόγο του αθροίσματος του πραγματικού εμβαδού και των δύο περιοχών σαρώσεως προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας των δύο περιοχών σαρώσεως, ήτοι $1.560\text{mm}^2+1.560\text{mm}^2=3.120\text{mm}^2$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q και για τις δύο περιοχές σαρώσεως των πρότυπων δοκιμών Πεντελικού μαρμάρου.

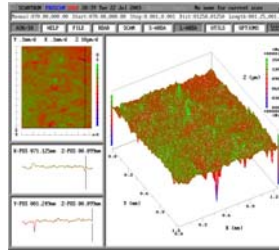
1^η σειρά σαρώσεων με χρήση της laser προφίλομετρίας



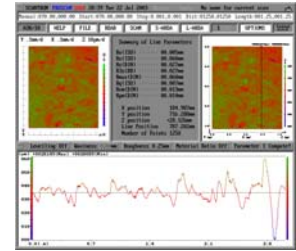
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I60



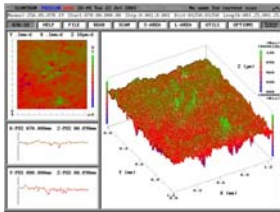
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I60



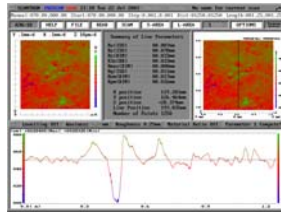
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I60AB57



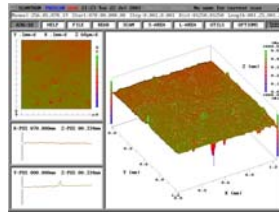
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I60AB57



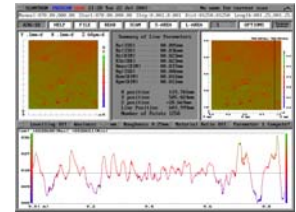
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I80



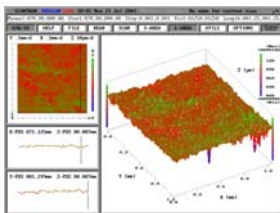
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I80



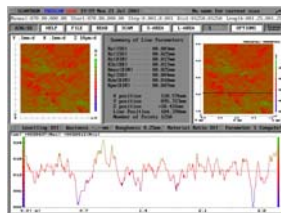
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I80AB57



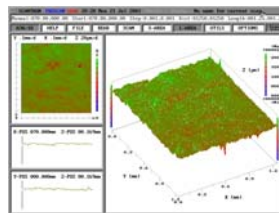
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I80AB57



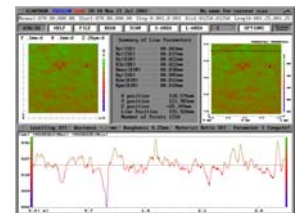
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I100



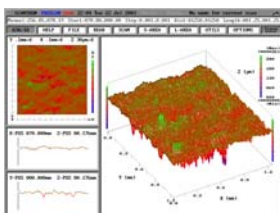
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I100



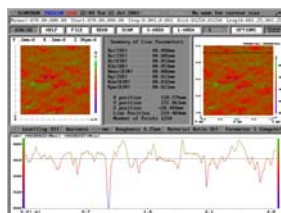
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I100AB57



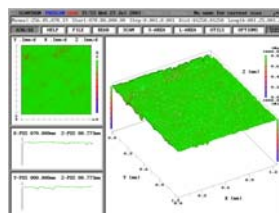
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I100AB57



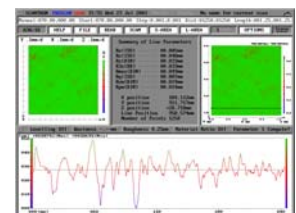
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I220



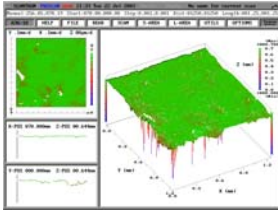
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I220



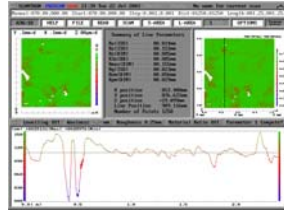
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I220AB57



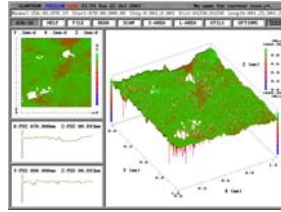
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I220AB57



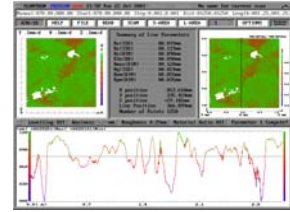
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I400



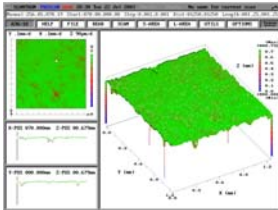
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I400



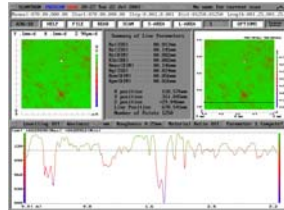
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I400AB57



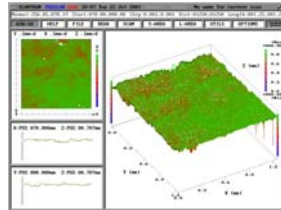
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I400AB57



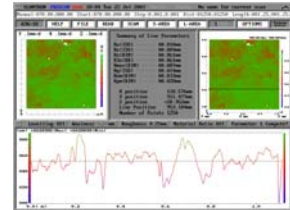
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I600



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I600

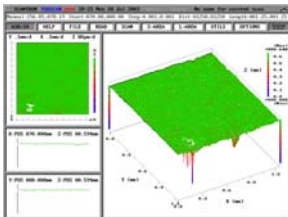


Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I600AB57

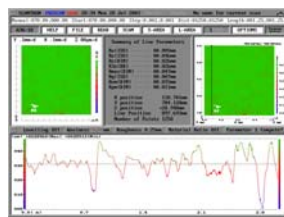


Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I600AB57

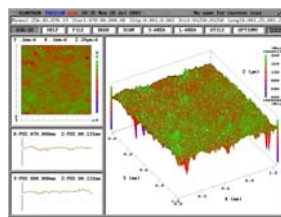
2^η σειρά σαρώσεων με χρήση της laser προφίλομετρίας



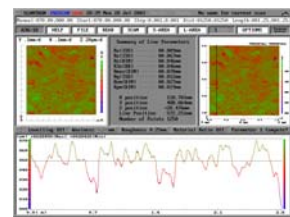
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I60_2



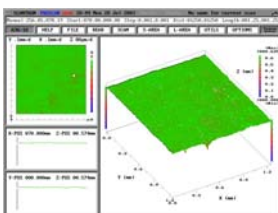
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I60_2



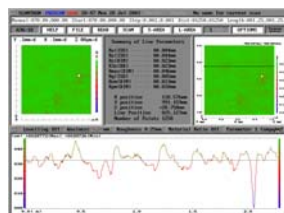
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I60AB57_2



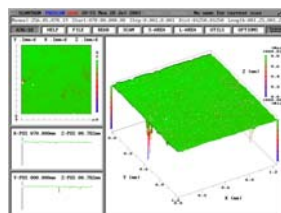
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I60AB57_2



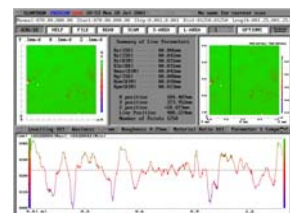
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I80_2



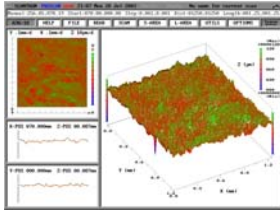
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I80_2



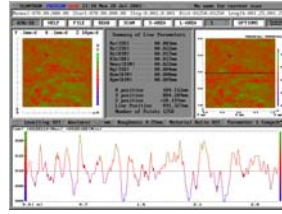
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I80AB57_2



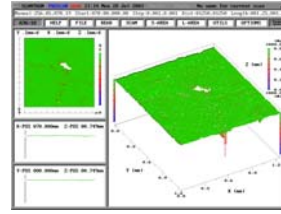
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I80AB57_2



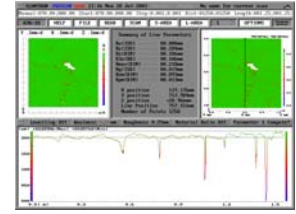
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I100_2



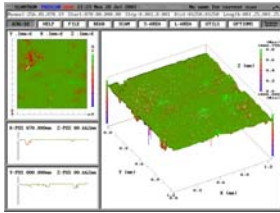
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I100_2



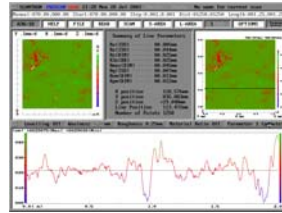
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I100AB57_2



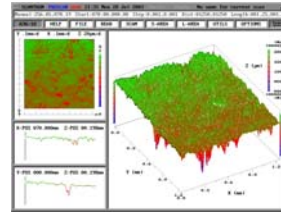
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I100AB57_2



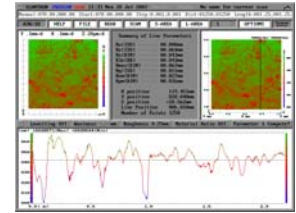
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I220_2



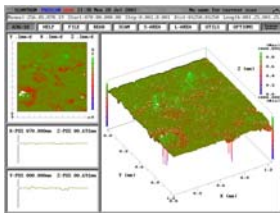
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I220_2



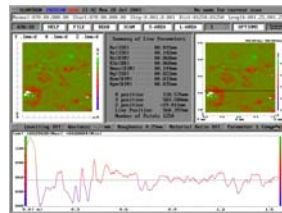
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I220AB57_2



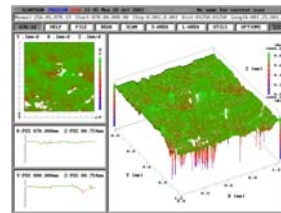
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I220AB57_2



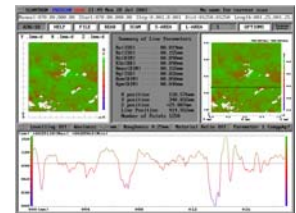
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I400_2



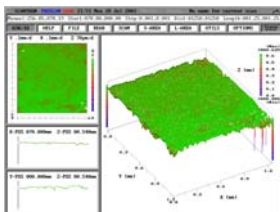
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I400_2



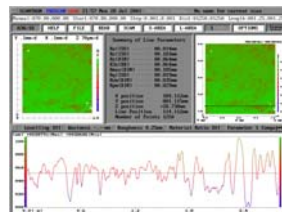
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I400AB57_2



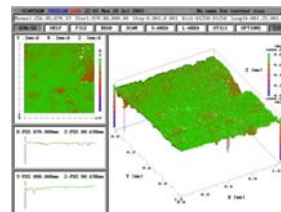
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I400AB57_2



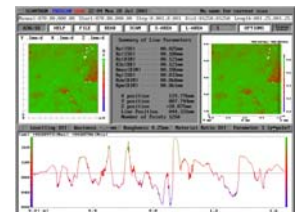
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I600_2



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I600_2



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα I600AB57_2



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα I600AB57_2

Στον Πίνακα 4.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε μm στις επιφάνειες των πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου, που έχουν υποστεί κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου και την πάστα AB57. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του Rq των 100 γραμμικών

προφίλ για τον άξονα X (R_{qx}) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (R_{qy}), καθώς και το κατώτερο -1° και ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του R_q (δηλ. οι τιμές R_q που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή R_q από τις δύο συγκρινόμενες R_{qx} και R_{qy} , η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 4.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας R_q

Κωδικός Δείγματος	Τύπος Κατεργασίας	R_{qx} (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο X άξονας		R_{qy} (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Y άξονας		R_q (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
			5	7		5	8		5	8
I60	P60	5	5	7	6	5	8	6	5	8
I80	P80	6	5	7	6	5	8	6	5	7
I100	P100	4	4	5	5	5	6	5	5	6
I220	P220	13	10	18	15	12	20	15	12	20
I400	P400	20	13	23	21	15	28	21	15	28
I600	P600	17	13	20	17	14	22	17	13	20
I60AB57	P60 & Πάστα AB57, 20 min	6	5	7	7	5	8	7	5	8
I80AB57	P80 & Πάστα AB57, 20 min	7	5	12	8	6	12	8	6	12
I100AB57	P100 & Πάστα AB57, 20 min	6	4	9	7	6	10	7	6	10
I220AB57	P220 & Πάστα AB57, 20 min	10	8	12	12	10	14	12	10	14
I400AB57	P400 & Πάστα AB57, 20 min	23	18	26	26	23	28	26	23	28
I600AB57	P600 & Πάστα AB57, 20 min	20	17	26	23	20	28	23	20	28

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφές, σε σχέση με τα δοκίμια που έχουν υποστεί μόνο την κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, ότι:

- Υπάρχει σαφής διαφοροποίηση της παραμέτρου της τραχύτητας R_q ανάμεσα στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60,

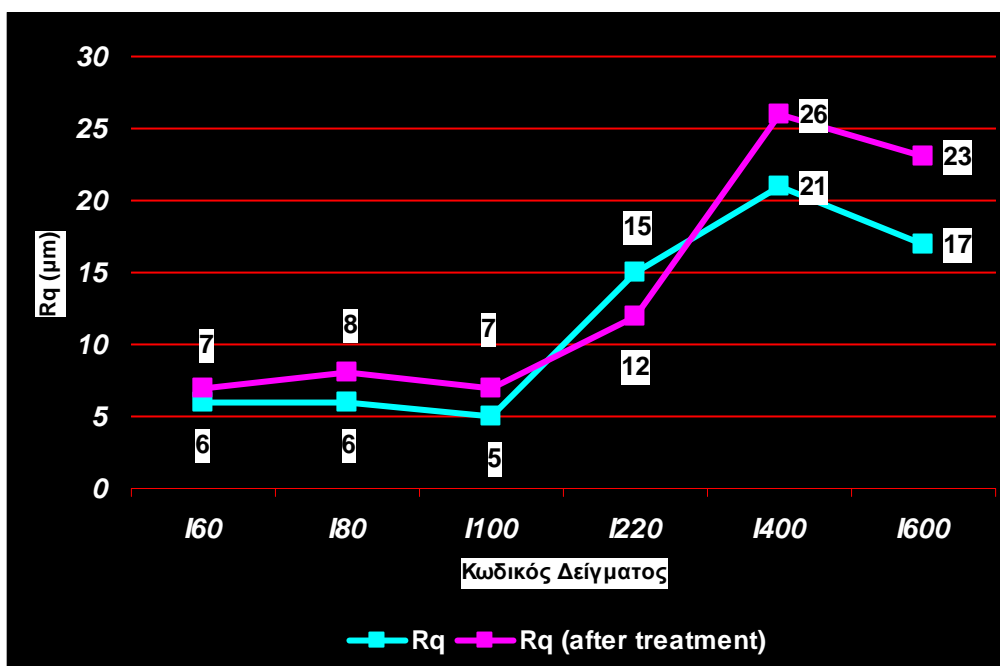
180, I100), οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές Rq (<10μm), και στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220, I400, I600), οι οποίες εμφανίζουν υψηλότερες τιμές Rq (>15μm).

- Υψηλότερη τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq εμφανίζεται στο δοκίμιο I400 (21μm) που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το δεύτερο πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο (P400), ενώ τη μικρότερη τιμή Rq εμφανίζει το δοκίμιο I100 (5μm) που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P100.
- Οι δύο επιφάνειες I60 και I80 που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα P60 και P80 παρουσιάζουν την ίδια μικρή ενδιάμεση τιμή Rq των 6μm.
- Η τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq της επιφάνειας I220 (που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το γυαλόχαρτο P220), είναι 15μm, δηλ. είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του I100 (5μm), που έχει κατεργαστεί με το αμέσως πιο χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P100.
- Παράλληλα, η τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq της επιφάνειας I600 (17μm), που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο από τα χρησιμοποιηθέντα το P600, παρότι είναι μεγαλύτερη αυτής του I220, είναι μικρότερη από την τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας Rq της επιφάνειας I400 (21μm), που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το πιο δεύτερο πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο από τα χρησιμοποιηθέντα, το P400.

Καθώς ο P-αριθμός του γυαλόχαρτου αυξάνει, τα σωματίδια του πυριτικού καρβιδίου γίνονται πιο λεπτόκοκκα, δηλ. μικρότερης διαμέτρου γεγονός που αντανάκλαται στις επιφερόμενες επιφανειακές ρηγματώσεις και γενικότερα στα επίπεδα εκτριβής και φθοράς από εκτριβή της επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, οδηγώντας σε απώλεια κόκκων αυθεντικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια του πυριτικού καρβιδίου, ανάλογα με τη διάμετρό τους μεταβάλλουν τις κορυφές και τις κοιλάδες που προκύπτουν λόγω της απόσπασης κόκκων μαρμάρου ή τμημάτων τους από την εκτριβή, δηλ. μεταβάλλουν τον αριθμό των επιφανειακών ρηγματώσεων κατά μήκος του γραμμικού προφίλ, καθώς και το βάθος τους, αυξάνοντας ή μειώνοντας έτσι το ύψος z (x) του αποτιμώμενου προφίλ της επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, στοιχείο που αποτυπώνεται στην τιμή της παραμέτρου Rq. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μείωση της μέσης διαμέτρου των κόκκων του πυριτικού καρβιδίου (δηλαδή χρήση πιο λεπτόκοκκου γυαλόχαρτου), συνεπάγεται σε γενικές γραμμές την αύξηση της τιμής της παραμέτρου της τραχύτητας Rq, δηλ. αύξηση του ύψους z (x) του αποτιμώμενου προφίλ του μαρμάρου (τουλάχιστον όσον αφορά στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία που εφαρμόστηκε και τα δεδομένα χρησιμοποιηθέντα γυαλόχαρτα). Αυτό υποδηλώνεται και μέσω του υψηλού αρνητικού συντελεστή Pearson (-0,90) που συνδέει αντιστρόφως ανάλογα τα δύο μεγέθη, αποδεικνύοντας την υψηλή γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στις μετρούμενες τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας Rq και της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων του πυριτικού καρβιδίου του κάθε γυαλόχαρτου.

Εφόσον δε, κατά τον πειραματικό σχεδιασμό έχουμε διαδοχική εφαρμογή των γυαλόχαρτων, όταν μειώνεται η τιμή του Rq κατά την εφαρμογή πιο λεπτόκοκκων γυαλόχαρτων, δηλ. στις περιπτώσεις της χρήσης P100 και P600, λογικά θα πρέπει να λαμβάνει χώρα απώλεια αυθεντικού υλικού, λόγω απόσπασης κόκκων ή ακόμα και τμημάτων τους, που οδηγεί σε

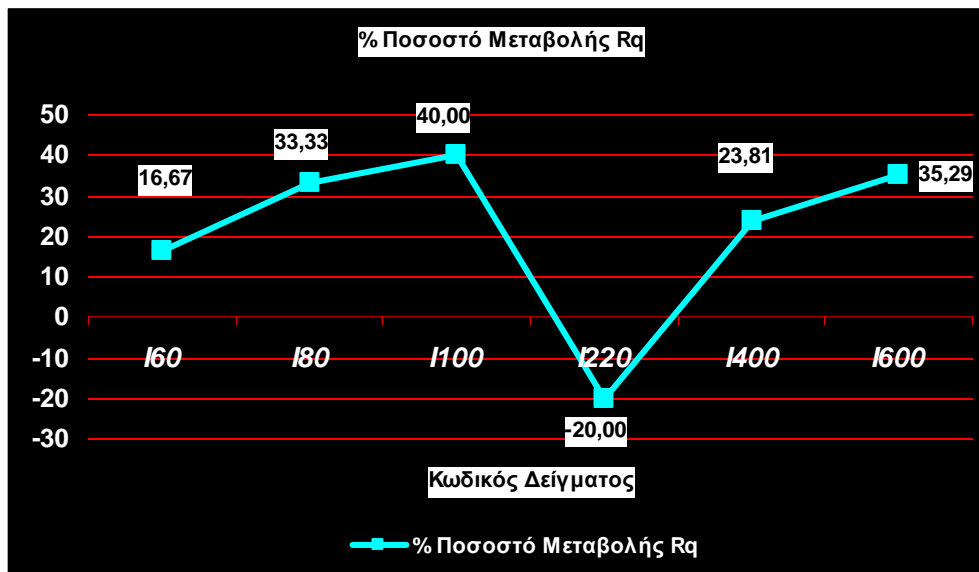
μείωση του βάθους των επιφανειακών ρηγματώσεων και συνεπώς του ύψους $z(x)$ του αποτιμώμενου προφίλ της επιφάνειας, μεγέθους που καταγράφεται κατά την μέτρηση της R_q .



Εικ. 4.3.1: Συγκριτικό διάγραμμα των τιμών της παραμέτρου R_q ανάμεσα στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και στα δοκίμια που έχει εφαρμοστεί (μετά από την κατεργασία με γυαλόχαρτα) η Πάστα AB57

Πίνακας 4.3.2: Αποτελέσματα του % ποσοστού μεταβολής της παραμέτρου R_q μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57

Κωδικός Δείγματος	R_q (μm)	R_q (μm) μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57	% Ποσοστό Μεταβολής R_q μετά την Εφαρμογή της Πάστας AB57
I60	6	7	16,67
I80	6	8	33,33
I100	5	7	40,00
I220	15	12	-20,00
I400	21	26	23,81
I600	17	23	35,29



Εικ. 4.3.2: Διάγραμμα του % ποσοστού μεταβολής των τιμών της παραμέτρου R_a των δοκιμών μαρμάρου μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.3.1 καθίσταται σαφές, σε σχέση με τα δοκίμια, όπου μετά την κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, εφαρμόστηκε η Πάστα AB57 ότι:

- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας R_a σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57, με τις αντίστοιχες επιφάνειες που έχουν υποστεί μόνο κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, διαπιστώνεται αύξηση της R_a, εκτός από το δοκίμιο I220AB57, στο οποίο παρατηρείται μείωση της (β.λ. συγκριτικό διάγραμμα: 4.3.1).
- Παραμένει σαφής η διαφοροποίηση της παραμέτρου της τραχύτητας R_a ανάμεσα στις επιφάνειες, που πριν από την εφαρμογή της πάστας AB57, υπέστησαν κατεργασία με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60AB57, I80AB57, I100AB57) και οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές R_a (<10μm), και στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220AB57, I400AB57, I600AB57), οι οποίες εμφανίζουν υψηλότερες τιμές R_a (>12μm).
- Ακόμα και μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57 η υψηλότερη τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας R_a εμφανίζεται στο δοκίμιο I400AB57 (26μm) που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το δεύτερο πιο λεπτοκοκκο γυαλόχαρτο (P400).
- Τη μικρότερη τιμή R_a εμφανίζουν τα δοκίμια I60AB57 και I100AB57 (7μm) που πριν την εφαρμογή της πάστας είχαν υποστεί τελική κατεργασία με τα χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα P60 και P100 αντίστοιχα.
- Η τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας R_a της επιφάνειας I600AB57 (23μm), που πριν την εφαρμογή της πάστας AB57 είχε υποστεί τελική κατεργασία με το πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο από τα χρησιμοποιηθέντα, το P600, παρότι είναι

μεγαλύτερη αυτής του I220AB57, είναι μικρότερη από την τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας R_q της επιφάνειας I400AB57 (26 μ m).

Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 επιτεύχθηκε η προσδοκώμενη, κατά τον πειραματικό σχεδιασμό, διαφοροποίηση των επιπέδων της υφής των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών. Η χημική δράση της πάστας, η οποία οφείλεται κυρίως στη συμπλοκοποίηση του κατιόντος ασβεστίου του μαρμάρου από το δινατριούχο άλας του EDTA και συνεπάγεται απώλεια αυθεντικού υλικού, μεταβάλλει περαιτέρω την υφή των εξεταζόμενων επιφανειών μεταβάλλοντας τον αριθμό των επιφανειακών ρηγματώσεων κατά μήκος του γραμμικού προφίλ, και κυρίως το βάθος τους, αυξάνοντας ή μειώνοντας έτσι το ύψος $z(x)$ του αποτιμώμενου προφίλ της επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, στοιχείο που αποτυπώνεται στην τιμή της παραμέτρου R_q . Πιο συγκεκριμένα, η χημική δράση της πάστας επιφέρει αλλαγές στο ύψος $z(x)$ του αποτιμώμενου προφίλ της επιφάνειας σε τρεις κατευθύνσεις: αφενός μειώνει το ύψος των κορυφών, αφετέρου αυξάνει το βάθος των κοιλάδων, ενώ παράλληλα μπορεί να προκαλέσει και νέες επιφανειακές ρηγματώσεις, που λογικά πρέπει να κυμαίνονται σε μικρά βάθη. Συνεπώς, ανάλογα με το πιο φαινόμενο από τα παραπάνω θα υπερισχύσει, η μετρούμενη τιμή της R_q θα μειωθεί ή θα αυξηθεί αντιστοίχως. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το φαινόμενο που υπερισχύει είναι η αύξηση του βάθους των κοιλάδων, αφού οι τιμές της R_q αυξάνονται σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή της πάστας, εκτός από το δοκίμιο I220AB57 όπου καταγράφεται μείωση της R_q κατά 20% (β.λ. Πίνακας 4.3.2 & Διάγραμμα 4.3.2), υποδεικνύοντας ότι σε αυτή την περίπτωση υπερισχύει το φαινόμενο της μείωσης του ύψους των κορυφών στο αποτιμώμενο προφίλ του μαρμάρου. Τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της τιμής της παραμέτρου της τραχύτητας R_q μετά την εφαρμογή της πάστας την παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P100 (40%), ενώ εξίσου υψηλές ποσοστιαίες μεταβολές στην τιμή της R_q παρουσιάζονται και στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με τα γυαλόχαρτα P600 (35,29%) και P80 (33,33%). Τη μικρότερη δε αύξηση της τιμής R_q μετά την εφαρμογή της πάστας την παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το πιο χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο από τα χρησιμοποιηθέντα το P60 (16,67%), ενώ το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το λεπτής κοκκομετρίας γυαλόχαρτο P400, όπου και έχει καταγραφεί η υψηλότερη τιμή της παραμέτρου R_q , παρουσιάζει, μετά την εφαρμογή της πάστας, μεσαία ποσοστιαία μεταβολή (23.81%).

Στον παρακάτω Πίνακα 4.3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις επιφάνειες των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, που έχουν υποστεί κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου και την πάστα AB57. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm^2 , του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm^2 , ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσημο τρόπο την απόκλιση από την επιπεδότητα. Διευκρινίζεται δε, ότι οι τιμές των ανωτέρω μεγεθών προκύπτουν από το άθροισμα των δεδομένων του πραγματικού εμβαδού και του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας και

των δύο περιοχών σαρώσεως των πρότυπων δοκιμών με την τεχνική της laser προφίλομετρίας.

Πίνακας 4.3.3: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (r)

Κωδικός Δείγματος	Τύπος Κατεργασίας	Εμβαδόν Προβαλλόμενης επιφάνειας (mm ²)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm ²)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας (r)	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
I60	P60	3,089	4,310	1,395	39,53%
I80	P80	3,117	4,371	1,402	40,23%
I100	P100	3,120	4,287	1,374	37,4%
I220	P220	3,006	6,507	2,165	116,47%
I400	P400	2,979	6,327	2,124	112,39%
I600	P600	2,998	6,843	2,283	128,25%
I60AB57	P60 & Πάστα AB57, 20 min	3,089	4,517	1,462	46,23%
I80AB57	P80 & Πάστα AB57, 20 min	3,102	5,088	1,640	64,02%
I100AB57	P100 & Πάστα AB57, 20 min	3,060	4,654	1,521	52,09%
I220Ab57	P220 & Πάστα AB57, 20 min	3,118	5,767	1,850	84,96%
I400AB57	P400 & Πάστα AB57, 20 min	2,470	6,437	2,606	160,61%
I600AB57	P600 & Πάστα AB57, 20 min	2,871	7,410	2,581	158,10%

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφές, σε σχέση με τα δοκίμια που έχουν υποστεί μόνο την κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, ότι:

- Υπάρχει σαφής διαφοροποίηση του λόγου r ανάμεσα στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60, I80, I100), οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές r (<1,500), καθώς και απόκλιση από την επιπεδότητα (Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής) κάτω από 40,5%, και στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220, I400, I600), οι οποίες εμφανίζουν υψηλότερες τιμές λόγου r (>2,000), καθώς και απόκλιση από την επιπεδότητα πάνω από 100%, δηλ. διπλάσια πραγματική επιφάνεια από την προβαλλόμενη που αντιστοιχεί στο απόλυτα λείο επίπεδο.
- Υψηλότερη τιμή του λόγου r, καθώς και του ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, εμφανίζεται στο δοκίμιο I600 (2,283 & 128,25%), που έχει υποστεί τελική κατεργασία

με το πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο P600, ενώ τη μικρότερη τιμή λόγου r και «απόκλισης από την επιπεδότητα» εμφανίζει το δοκίμιο I100 (1,374 & 37,4%), που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P100.

- Οι δύο επιφάνειες I60 και I80 που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα P60 και P80 παρουσιάζουν παραπλήσιες μικρές τιμές λόγου r και ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, 1,395 & 39,53% καθώς και 1,402 & 40,23% αντίστοιχα.
- Παράλληλα, οι δύο επιφάνειες I220 και I400 που έχουν κατεργαστεί με τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα P220 και P400 παρουσιάζουν παραπλήσιες μεγάλες τιμές λόγου r και ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, 2,165 & 116,47% καθώς και 2,124 & 112,39% αντίστοιχα.

Η ανάλυση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων του λόγου του εμβαδού της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια των εξεταζόμενων δοκιμίων, που είναι κατεργασμένα με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, είναι αντίστοιχη με αυτή που προηγήθηκε για την παράμετρο της τραχύτητας R_a , με μόνη ουσιαστική όμως διαφορά ότι πλέον η μεταβολή του αριθμού των επιφανειακών ρηγματώσεων και του βάθους τους καταγράφονται ανά μονάδα επιφάνειας, αναφερόμενα στις δύο διαστάσεις και όχι στο μονοδιάστατο γραμμικό προφίλ.

Συνεπώς, καθώς ο P-αριθμός του γυαλόχαρτου αυξάνει, τα σωματίδια του πυριτικού καρβιδίου γίνονται πιο λεπτόκοκκα, δηλ. μικρότερης διαμέτρου γεγονός που αντανακλάται στις επιφερόμενες επιφανειακές ρηγματώσεις και γενικότερα στα επίπεδα εκτριβής και φθοράς από εκτριβή της επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, οδηγώντας σε απώλεια κόκκων αυθεντικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια του πυριτικού καρβιδίου, ανάλογα με τη διάμετρό τους μεταβάλουν τις κορυφές και τις κοιλάδες που προκύπτουν λόγω της απόσπασης κόκκων μαρμάρου ή τμημάτων τους από την εκτριβή, δηλ. μεταβάλλουν τον αριθμό των επιφανειακών ρηγματώσεων ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και το βάθος και το εύρος τους, αυξάνοντας ή μειώνοντας έτσι το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, στοιχείο που αποτυπώνεται στην καταγραφόμενη τιμή του λόγου r .

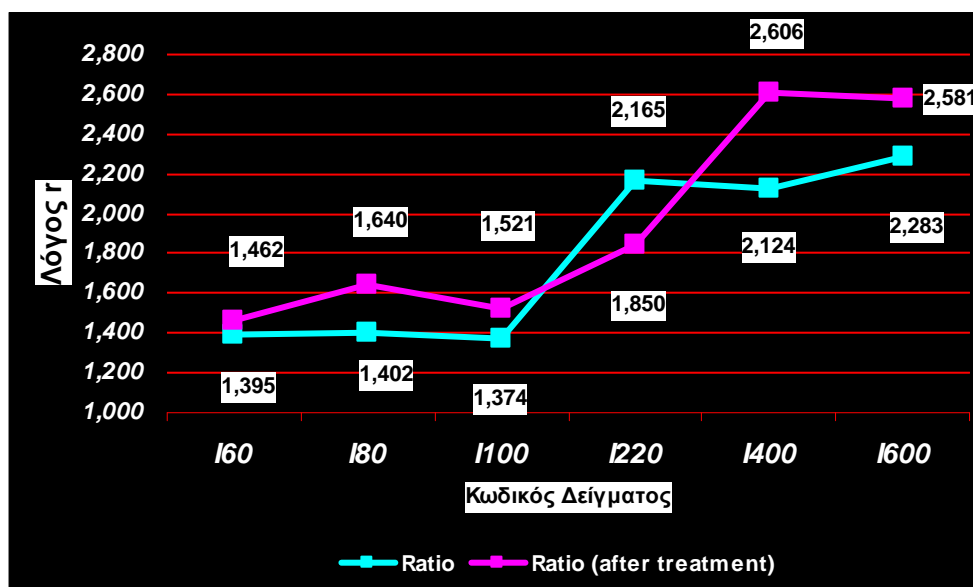
Από τα αποτελέσματα καθίσταται σαφές ότι τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (P60, P80, P100) δεν επιφέρουν αρκετές ρηγματώσεις ανά μονάδα επιφάνειας, έτσι ώστε να αυξήσουν το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας σημαντικά, ενώ τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα επιφέρουν αφενός αρκετές ρηγματώσεις ανά μονάδα επιφάνειας και αφετέρου τέτοιου βάθους και εύρους, ώστε να αυξάνουν σημαντικά το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας.

Είναι προφανές λοιπόν, ότι μείωση της μέσης διαμέτρου των κόκκων του πυριτικού καρβιδίου (δηλαδή χρήση πιο λεπτόκοκκου γυαλόχαρτου), συνεπάγεται σε γενικές γραμμές την αύξηση του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας (τουλάχιστον όσον αφορά στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία που εφαρμόστηκε και τα δεδομένα χρησιμοποιηθέντα γυαλόχαρτα).

Αυτό υποδηλώνεται και μέσω του υψηλού αρνητικού συντελεστή Pearson (-0,92) που συνδέει αντιστρόφως ανάλογα τα δύο μεγέθη, αποδεικνύοντας την υψηλή γραμμική

συσχέτιση ανάμεσα στις μετρούμενες τιμές του λόγου του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r) και της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων του πυριτικού καρβιδίου του κάθε γυαλόχαρτου.

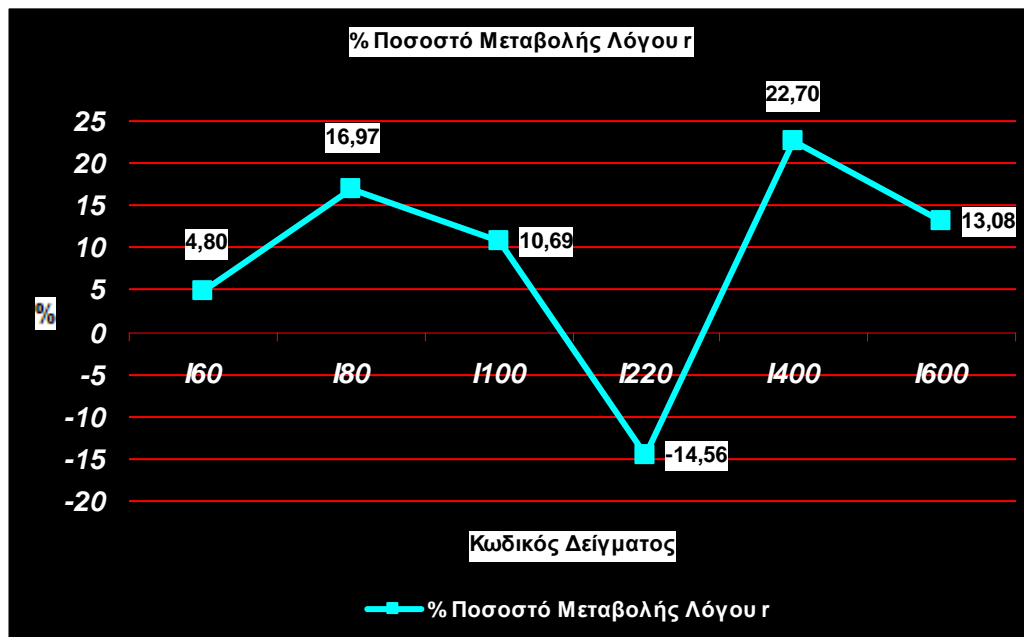
Εφόσον δε, κατά τον πειραματικό σχεδιασμό έχουμε διαδοχική εφαρμογή των γυαλόχαρτων, όταν μειώνεται η τιμή του λόγου r κατά την εφαρμογή πιο λεπτόκοκκων γυαλόχαρτων, δηλ. στις περιπτώσεις της χρήσης των P100 και P400, λογικά θα πρέπει να λαμβάνει χώρα απώλεια αυθεντικού υλικού, λόγω απόσπασης κόκκων ή ακόμα και τμημάτων τους, που οδηγεί σε μείωση του βάθους των επιφανειακών ρηγματώσεων και ομαλοποίηση του εύρους τους.



Εικ. 4.3.3: Συγκριτικό διάγραμμα των τιμών του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενης επιφάνειας (r), ανάμεσα στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και στα δοκίμια που έχει εφαρμοστεί (μετά από την κατεργασία με γυαλόχαρτα) η Πάστα AB57

Πίνακας 4.3.4: Αποτελέσματα του % ποσοστού μεταβολής του Λόγου (r) μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57

Κωδικός Δείγματος	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας (r)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57 (r_{AB57})	% Ποσοστό Μεταβολής εμβαδού πραγματικής Επιφάνειας μετά την Εφαρμογή της Πάστας AB57
I60	1,395	1,462	4,80%
I80	1,402	1,640	16,97%
I100	1,374	1,521	10,69%
I220	2,165	1,850	-14,56%
I400	2,124	2,606	22,70%
I600	2,283	2,581	13,08%



Εικ. 4.3.4: Διάγραμμα του % ποσοστού μεταβολής των τιμών του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενης επιφάνειας (r), των δοκιμών μαρμάρου μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.3.3 καθίσταται σαφές, σε σχέση με τα δοκίμια, όπου μετά την κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, εφαρμόστηκε η Πάστα AB57 ότι:

- Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου (r) καθώς και αυτές του % ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57, με τις αντίστοιχες επιφάνειες που έχουν υποστεί μόνο κατεργασία με τα διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα πυριτικού καρβιδίου, διαπιστώνεται αύξηση των αντίστοιχων τιμών, εκτός από το δοκίμιο I220AB57, στο οποίο παρατηρείται μείωση τους (β.λ. και συγκριτικό διάγραμμα: 4.3.3).
- Παραμένει σαφής η διαφοροποίηση των τιμών του λόγου r ανάμεσα στις επιφάνειες, που πριν από την εφαρμογή της πάστας AB57, υπέστησαν κατεργασία με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60AB57, I80AB57, I100AB57) και οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές r (<1,800), καθώς και απόκλιση από την επιπεδότητα (Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής) κάτω από 52,09%, και στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220AB57, I400AB57, I600AB57), οι οποίες εμφανίζουν υψηλότερες τιμές r (>1,800), καθώς και απόκλιση από την επιπεδότητα πάνω από 85%.
- Υψηλότερη τιμή του λόγου r, καθώς και του ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, εμφανίζεται στο δοκίμιο I400AB57 (2,606 & 160,61%), που έχει υποστεί τελική κατεργασία με το δεύτερο πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο P400, ενώ τη μικρότερη τιμή

λόγου r και «απόκλιση από την επιπεδότητα» εμφανίζει το δοκίμιο I60AB57 (1,462 & 46,23%), που έχει υποστεί τελική κατεργασία με πιο το χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P60.

- Οι δύο επιφάνειες I80AB57 και I100AB57 που πριν την εφαρμογή της πάστας είχαν κατεργαστεί με τα χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα P80 και P100 παρουσιάζουν μικρές τιμές λόγου r και ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, 1,640 & 64,02% καθώς και 1,521 & 52,09% αντίστοιχα.
- Παράλληλα, οι δύο επιφάνειες I220AB57 και I600AB57, που πριν την εφαρμογή της πάστας είχαν κατεργαστεί με τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα P220 και P600 παρουσιάζουν μεγάλες τιμές λόγου r και ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, 1,850 & 84,96% καθώς και 2,581 & 158,10% αντίστοιχα. Είναι εμφανές δε, ότι οι τιμή του λόγου r της επιφάνειας I600AB57 (2,581) παρότι μικρότερη, είναι παραπλήσια με αυτή της επιφάνειας I400AB57 (2,606).

Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 επιτεύχθηκε η προσδοκώμενη, κατά τον πειραματικό σχεδιασμό, διαφοροποίηση των επιπέδων της υψής των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών. Η χημική δράση της πάστας, η οποία οφείλεται κυρίως στη συμπλοκοποίηση του κατιόντος ασβεστίου του μαρμάρου από το δινατριούχο άλας του EDTA και συνεπάγεται απώλεια αυθεντικού υλικού, μεταβάλλει περαιτέρω την υψή των εξεταζόμενων επιφανειών μεταβάλλοντας τον αριθμό των επιφανειακών ρηγματώσεων ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και το βάθος και το εύρος τους, αυξάνοντας ή μειώνοντας έτσι το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας του μαρμάρινου υλικού, στοιχείο που αποτυπώνεται στην καταγραφόμενη τιμή του λόγου r .

Πιο συγκεκριμένα, η χημική δράση της πάστας επιφέρει αλλαγές στο πραγματικό εμβαδόν της επιφάνειας προς τις εξής κατευθύνσεις: αφενός μεταβάλλει αυξάνοντας ή μειώνοντας το βάθος και το εύρος των ήδη υπαρχόντων ρηγματώσεων και αφετέρου προκαλεί νέες επιφανειακές ρηγματώσεις, που λογικά πρέπει να αναπτύσσονται σε μικρά βάθη και εύρη, τα οποία όμως θα αυξήσουν, έστω και σε μικρό ποσοστό, το πραγματικό εμβαδόν της μετρούμενης επιφάνειας.

Αν και τα παραπάνω φαινόμενα δρουν παράλληλα και συναθροίζονται, κάποιο ή κάποια θα υπερισχύσουν, οπότε η μετρούμενη τιμή του λόγου (r), καθώς και αυτή του % ποσοστού μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, θα μειωθεί ή θα αυξηθεί. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα φαινόμενα που υπερισχύουν είναι η αύξηση του βάθους και του εύρους των ήδη υπαρχόντων ρηγματώσεων, καθώς και η ανάπτυξη νέων επιφανειακών ρηγματώσεων, αφού οι τιμές του λόγου r αυξάνονται σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή της πάστας, εκτός από το δοκίμιο I220AB57, όπου καταγράφεται μείωση του λόγου r κατά 14,56% (β.λ. Πίνακας 4.3.4 & Διάγραμμα 4.3.4) υποδεικνύοντας έτσι ότι σε αυτή την περίπτωση υπερισχύει το φαινόμενο της μείωσης του βάθους των ήδη υπαρχόντων επιφανειακών ρηγματώσεων και η ομαλοποίηση του εύρους τους στη μετρούμενη επιφάνεια του

μαρμάρου, δηλ. κατ' ουσία λόγω της χημικής δράσης της πάστας έχει επέλθει απώλεια αυθεντικού υλικού με παράλληλη «λείανση» της επιφάνειας.

Τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της τιμής του λόγου r του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας, μετά την εφαρμογή της πάστας, την παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο P400 (22,70%), ενώ εξίσου υψηλές ποσοστιαίες μεταβολές στην τιμή του λόγου r παρουσιάζονται και στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με τα γυαλόχαρτα P80 (16,97%) και P600 (13,08%). Τη μικρότερη δε αύξηση της τιμής του λόγου r , μετά την εφαρμογή της πάστας, την παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το πιο χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο από τα χρησιμοποιηθέντα το P60 (4,80%), ενώ το δοκίμιο που έχει υποστεί κατεργασία με το χοντρόκοκκο γυαλόχαρτο P100 παρουσιάζει, μετά την εφαρμογή της πάστας, μεσαία ποσοστιαία μεταβολή (10.69%).

Πίνακας 4.3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Τύπος Κατεργασίας	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας (r)	Rq (μm)
I60	P60	1,395	6
I80	P80	1,402	6
I100	P100	1,374	5
I220	P220	2,165	15
I400	P400	2,124	21
I600	P600	2,283	17
I60AB57	P60 & Πάστα AB57, 20 min	1,462	7
I80AB57	P80 & Πάστα AB57, 20 min	1,640	8
I100AB57	P100 & Πάστα AB57, 20 min	1,521	7
I220AB57	P220 & Πάστα AB57, 20 min	1,850	12
I400AB57	P400 & Πάστα AB57, 20 min	2,606	26
I600AB57	P600 & Πάστα AB57, 20 min	2,581	23

Τέλος, σε γενικές γραμμές, όπως προκύπτει από τον παραπάνω συγκεντρωτικό Πίνακα των αποτελεσμάτων (Πιν. 4.3.5), τα πρότυπα δοκίμια μαρμάρου που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (P600, P400, P220), παρουσιάζουν τιμές τραχύτητας και πραγματικού εμβαδού κατά πολύ μεγαλύτερες από τις μαρμάρινες επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (P60, P80, P100), υποδεικνύοντας έτσι ότι πρόκειται για επιφάνειες που θα παρουσιάσουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά και συνεπώς μικρότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για τα πρότυπα δοκίμια μαρμάρου, που μετά την κατεργασία με τα γυαλόχαρτα εφαρμόστηκε η πάστα AB57. Πιο συγκεκριμένα, μετά την εφαρμογή της πάστας AB57, εξακολουθούν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές τραχύτητας και πραγματικού εμβαδού τα πρότυπα δοκίμια μαρμάρου που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (P600, P400, P220), σε σχέση με τις μαρμάρινες επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (P60, P80, P100). Συνεπώς, ακόμα και μετά την εφαρμογή της πάστας οι επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα

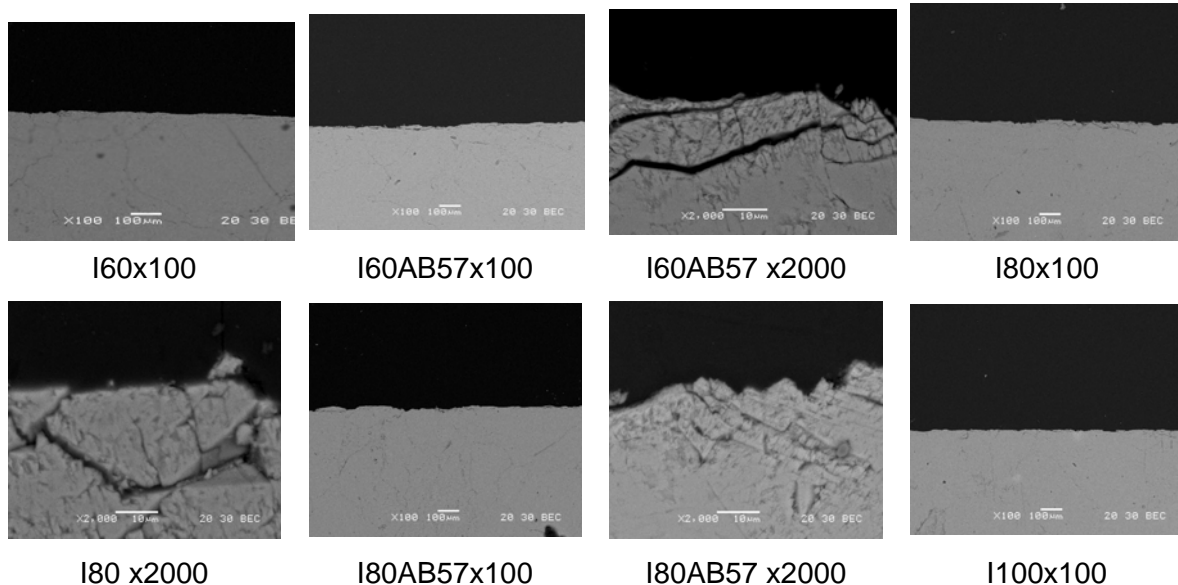
γυαλόχαρτα (P600, P400, P220) παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά και συνεπώς μικρότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο. Μάλιστα, μετά την εφαρμογή της πάστας, όλες οι εξεταζόμενες επιφάνειες παρουσιάζουν αύξηση των καταγραφόμενων τιμών της τραχύτητας και του πραγματικού εμβαδού σε σχέση με τις αντίστοιχες όπου έχουν υποστεί την κατεργασία μόνο με τα γυαλόχαρτα (εκτός από την επιφάνεια I220AB57), γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτές οι μαρμάρινες επιφάνειες μετά την εφαρμογή της πάστας καθίστανται περισσότερο επιδεκτικές στη φθορά, ενώ αντίθετα το δοκίμιο I220AB57 θα παρουσιάσει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο χρόνο σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο I220 που εφαρμόστηκε μόνο η κατεργασία με το γυαλόχαρτο P220.

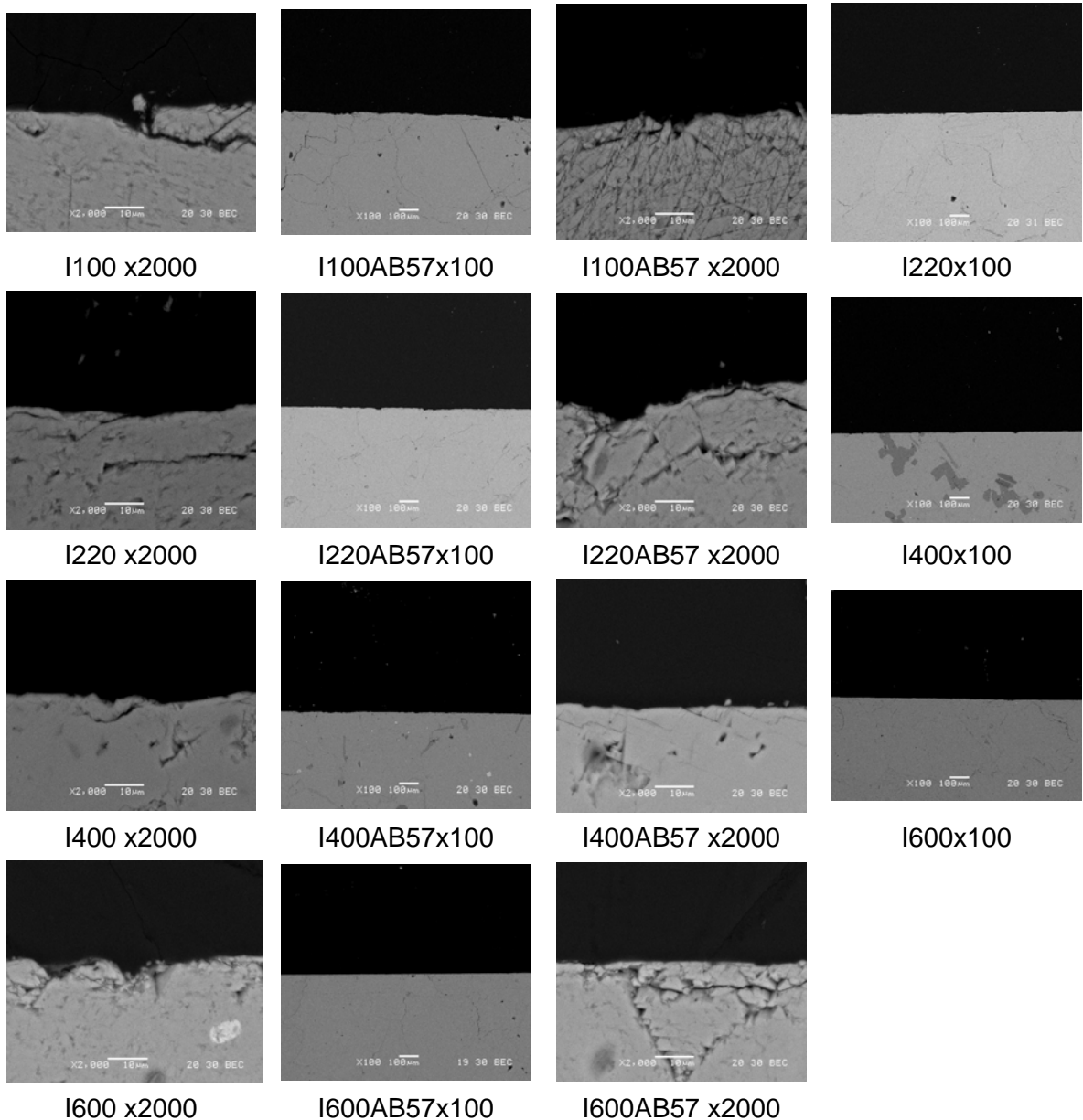
Θεωρώντας δεδομένη την αντίστοιχη απώλεια ασβεστίτη σε όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, ανεξαρτήτως των αρχικών τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q και του λόγου r , αφού εφαρμόστηκε η ίδια πάστα με τον ίδιο χρόνο εφαρμογής, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι για τιμές $R_q < 10$ και $R_q > 20$ η εφαρμογή της πάστας αυξάνει την τραχύτητα δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η τραχύτητα να αυξάνεται, ενώ για τιμές $10 < R_q < 20$ φαίνεται ότι η εφαρμογή της πάστας μειώνει την τραχύτητα, δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η τραχύτητα να μειώνεται.

Αντίστοιχα για $r < 1.5$ καταγράφονται μικρές αυξήσεις των τιμών του λόγου r μετά την εφαρμογή της πάστας, δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να αυξάνεται σε μικρό βαθμό. Για $r > 2$ καταγράφονται μεγαλύτερες αυξήσεις των τιμών του λόγου r εκτός από το δοκίμιο I220AB57, δηλ. για $r > 2$ (εκτός από το δοκίμιο I220AB57) η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Στο δοκίμιο I220AB57, το οποίο αποτελεί εξαίρεση, η απώλεια του ασβεστίτη εξαιτίας της χημικής δράσης της πάστας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να μειώνεται.

4.4. Αποτελέσματα Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης – Παράμετροι Μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου που έχουν υποστεί κατεργασία με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και πάστα AB57. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια. Ακολουθούν οι εικόνες της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης των δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, καθώς και αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας τους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.1.





Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.4.1 διαπιστώνεται ότι υπάρχει σαφής διαφοροποίηση του συντελεστή μορφής (δηλ. της τραχύτητας) ανάμεσα στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκκοκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60, I80, I100), οι οποίες παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές Γ , από στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκκοκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220, I400, I600), οι οποίες εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές Γ (~2). Αυτή η σαφής διαφοροποίηση παραμένει και μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 για 20 λεπτά.

Επίσης, διαπιστώνεται ότι η διάσταση fractal στα δοκίμια που κατεργάστηκαν με τα λεπτόκκοκα γυαλόχαρτα είναι περίπου ίση με το 1, δηλαδή το γραμμικό προφίλ της τομής του δείγματος στην μικροσκοπική εικόνα δεν ορίζεται από τη fractal γεωμετρία αλλά από την ευκλείδεια.

Πιθανότατα η μεγέθυνση των μικροσκοπικών εικόνων και η αντιστοιχία των 2 μ m ανά pixel που ορίζει το λογισμικό για την εφαρμογή της επεξεργασίας να μην είναι οι ενδεδειγμένες για δοκίμια κατεργασμένα με λεπτό φινίρισμα όπως αυτό το οποίο

προκύπτει από τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα. Εικάζεται ότι μεγαλύτερη μεγέθυνση εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και κατά συνέπεια μικρότερη αντιστοιχία μm ανά pixel θα μπορούσε να άρει τον περιορισμό αυτό.

Ο παραπάνω ισχυρισμός, ενισχύεται και από τα αποτελέσματα της πυκνότητας ρηγματώσεων όπου παρατηρείται βαθμιαία μείωση των τιμών της με αύξηση του αριθμού P του γυαλόχαρτου δηλ. με μείωση της διαμέτρου των κόκκων του SiC, με μοναδική εξαίρεση το I400 που παρουσιάζει μικρότερη τιμή από το I600.

Αντίστοιχη βαθμιαία μείωση τιμών, ανάλογα με τον αριθμό του γυαλόχαρτου, παρουσιάζει και ο συντελεστής ευθρυπτότητας με ανακολουθία το I400 που παρουσιάζει μικρότερη τιμή από το I600.

Στη σειρά των δοκιμών μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 ο συντελεστής μορφής αυξάνει για τα χονδρόκοκκα γυαλόχαρτα, ενώ για τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα παίρνει αντίστοιχες τιμές με αυτές που μετρήθηκαν πριν λάβει χώρα η εφαρμογή της πάστας. Και σε αυτή την περίπτωση η διάσταση fractal στα δοκίμια που κατεργάστηκαν με τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα είναι περίπου ίση με το 1, δηλαδή το γραμμικό προφίλ της τομής του δείγματος στην μικροσκοπική εικόνα δεν ορίζεται από τη fractal γεωμετρία αλλά από την ευκλείδεια.

Οι τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων και του συντελεστή ευθρυπτότητας, μετά την εφαρμογή της πάστας αυξάνονται εκτός από τα δοκίμια I60AB57 και I600AB57, όπου λαμβάνει χώρα μικρή μείωση των τιμών τους.

Το πρόγραμμα EDGE είναι ένα εξεζητημένο λογισμικό που κατασκευάστηκε από τους Mossoti et al [11] αποκλειστικά για την αποτίμηση μαρμάρινων επιφανειών μετά από την εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού, οπότε και οι όποιες ιδιαιτερότητες του υλικού και του στόχου της συγκεκριμένης επέμβασης συντήρησης έχουν ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη. Είναι αλήθεια, όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα κεφάλαια παρουσίασης των αποτελεσμάτων της τεχνικής αυτής στα δείγματα από τις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των μνημείων, ότι η αντιστοιχία $2\mu\text{m}/\text{pixel}$ είναι επαρκής στις περιπτώσεις των δειγμάτων από τα μνημεία, υποδεικνύοντας ακριβώς τις ακριβείς προδιαγραφές του σε σχέση με το στόχο σχεδιασμού του.

Πίνακας 4.4.1.: Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας μικροσκοπικών εικόνων πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου

Κωδικός δείγματος	Τύπος Κατεργασίας	Οριακές τιμές T_L και T_U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L^* (pixels)	F.D. (%)	Συντελ. μορφής (Γ)	Συντελ. Ευθρυπτότητας F.I. (%)
I60	60 P	52	91	1.012	540	512	12.0	2,13	24,42
I80	80 P	48	90	1.009	535	512	11.5	2,10	23,97
I100	100 P	29	96	1.007	526	512	7.8	2,06	22,07
I220	220 P	76	120	1.002	517	512	6.9	2,02	21,37
I400	400 P	12	62	1.001	512	512	3.6	2,00	20,34
I600	600 P	25	63	1.002	516	512	5.1	2,02	20,82
I60AB57	60 P & Πάστα AB57, 20 min	45	94	1.015	546	512	10.0	2,16	23,76
I80AB57	80 P & Πάστα AB57, 20 min	56	94	1.011	538	512	14.0	2,12	25,39
I100AB57	100 P & Πάστα AB57, 20 min	54	88	1.010	537	512	10.8	2,11	23,72
I220AB57	220 P & Πάστα AB57, 20 min	31	131	1.001	513	512	7.7	2,01	21,48
I400AB57	400 P & Πάστα AB57, 20 min	12	76	1.002	516	512	5.8	2,02	21,00
I600AB57	600 P & Πάστα AB57, 20 min	15	80	1.001	512	512	4.9	2,00	20,60

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης της μικροδομής:

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων [$\rho(\Gamma/F.D.)$] = 0.85

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης [$\rho(\Gamma/D)$] = 0.99

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης [$\rho(F.D/D)$] = 0.83

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(F.D./F.I.)$] = 0.99

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ fractal διάστασης και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(D/F.I.)$] = 0.92

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(\Gamma /F.I.)$] = 0.92

4.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της χρωματομετρίας, τα οποία έλαβαν χώρα κατά τον εργαστηριακό έλεγχο των πρότυπων δοκιμίων Πεντελικού μαρμάρου, για την καταγραφή των τιμών των χρωματικών παραμέτρων L^* , a^* , b^* , (βάσει του ενιαίου χρωματικού χώρου CIEL*a*b*), σε συνάρτηση με τη διαφορετική μορφολογία, υφή και συνοχή που παρουσιάζουν οι εξεταζόμενες επιφάνειες λόγω της διαφορετικής τους κατεργασίας.

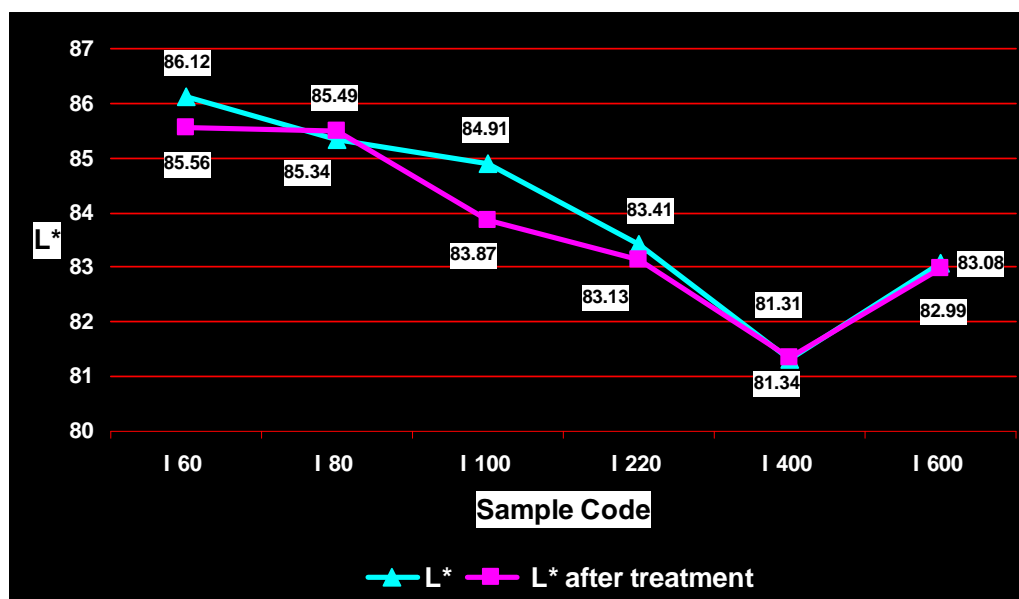
Για την καταγραφή των μεταβολών των χρωματικών παραμέτρων ανάλογα με την κατεργασία των εξεταζόμενων δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή εφαρμογής της πάστας AB57 10 μετρήσεις πριν και 10 μετρήσεις μετά την εφαρμογή της, στα ίδια σημεία έτσι ώστε τα αποτελέσματα του Μ.Ο. των τιμών να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακες 4.5.1 & 4.5.2) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 4.5.1: Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Κωδικός Δείγματος	L^*	a^*	b^*	Κωδικός Δείγματος	L^*	a^*	b^*
I 60	86,12	-1,31	-2,64	I 60 AB57	85,56	-1,36	-2,72
I 80	85,34	-1,22	-2,77	I 80 AB57	85,49	-1,01	-2,22
I 100	84,91	-1,29	-2,91	I 100 AB57	83,87	-1,34	-2,06
I 220	83,41	-1,41	-3,18	I 220 AB57	83,13	-1,33	-2,97
I 400	81,31	-1,09	-3,25	I 400 AB57	81,34	-1,02	-3,14
I 600	83,08	-1,29	-2,38	I 600 AB57	82,99	-1,33	-1,71

Διαπιστώνεται ότι η επιφανειακή κατεργασία προκαλεί μικρής τάξης μεταβολές στις χρωματικές παραμέτρους L^* , a^* , b^* , που μετρήθηκαν. Οι τιμές της λαμπρότητας πριν την εφαρμογή της πάστας παρουσιάζουν μικρή αλλά βαθμιαία μείωση με την αύξηση του αριθμού – P του γυαλόχαρτου, δηλ. με τη μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων του SiC, εκτός από το δοκίμιο I600 που αυξάνει την τιμή της L^* στα επίπεδα του δοκιμίου I220. Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για τις τιμές της λαμπρότητας των δοκιμίων μετά την εφαρμογή της πάστας (β.λ. εικ. 4.5.1). Οι τιμές των παραμέτρων a^* (διαφορά στο κόκκινο-πράσινο) και b^* (διαφορά στο κίτρινο-μπλε) είναι αρνητικές στο σύνολο των περιπτώσεων υποδεικνύοντας ότι ο χρωματικός ερεθισμός βρίσκεται προς το πράσινο και το μπλε.



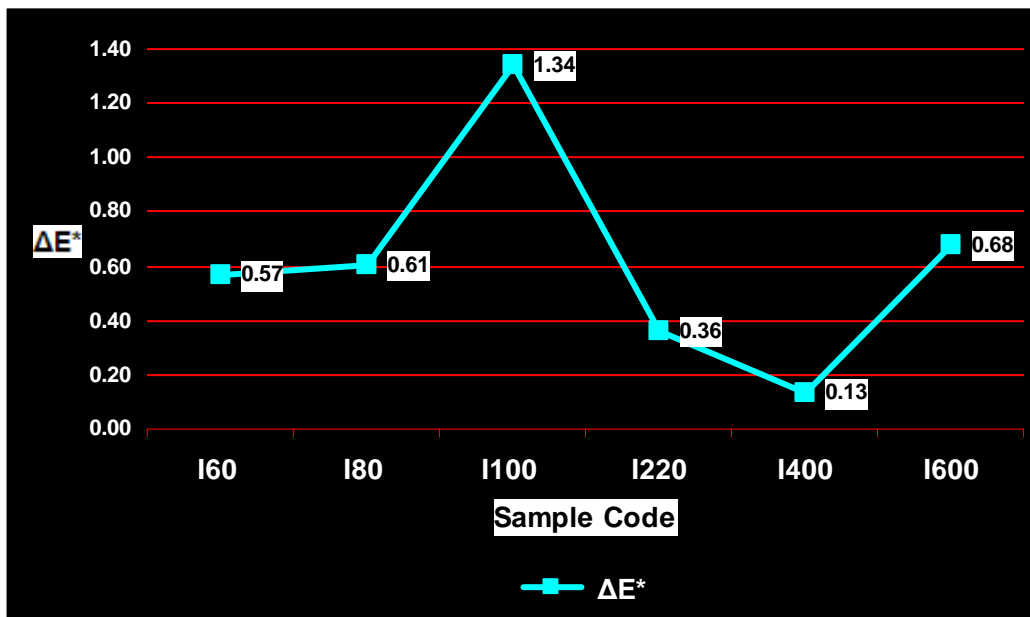
Εικ. 4.5.1: Συγκριτικό διάγραμμα της χρωματικής παραμέτρου της λαμπρότητας ανάμεσα στα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και στα δοκίμια που έχει εφαρμοστεί (μετά από την κατεργασία με γυαλόχαρτα) η Πάστα AB57

Πίνακας 4.5.2: Αποτελέσματα μεταβολών χρωματικών παραμέτρων

Κωδικός Δείγματος	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
I60	-0,56	-0,05	-0,08	0,57
I80	0,15	0,21	0,55	0,61
I100	-1,04	-0,05	0,85	1,34
I220	-0,28	0,08	0,21	0,36
I400	0,03	0,07	0,11	0,13
I600	-0,09	-0,04	0,67	0,68

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.2, καθίσταται σαφές ότι μετά την κατεργασία με την πάστα AB57 η λαμπρότητα μειώνεται στα εξεταζόμενα δοκίμια, εκτός από τις περιπτώσεις των δοκιμίων I80 και I400. Σε σχέση με τη μεταβολή στο κόκκινο-πράσινο παρατηρείται μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο για τα δοκίμια I60, I100 και I600, αφού οι τιμές Δa^* είναι αρνητικές, ενώ στα δοκίμια I80, I220 και I400 η μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο γίνεται προς το κόκκινο. Όσον αφορά στη μεταβολή στο κίτρινο-μπλε μετά την εφαρμογή της πάστας παρατηρείται μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο προς το κίτρινο (αφού το Δb^* είναι θετικό), εκτός από το δοκίμιο του I60.

Τέλος, η συνολική διαφορά χρώματος ΔE παρουσιάζει χαμηλές τιμές, υποδηλώνοντας ότι μετά την κατεργασία με την πάστα οι χρωματικές παράμετροι διαφοροποιούνται σε μικρό βαθμό (β.λ. εικ. 4.5.2). Μεγαλύτερο ΔE εμφανίζει το δοκίμιο I100, ενώ μικρότερη τιμή ΔE καταγράφεται για το I400.



Εικ. 4.5.2: Διάγραμμα των τιμών της συνολικής διαφοράς χρώματος ΔΕ των δοκιμίων μαρμάρου μετά την εφαρμογή της Πάστας AB57

4.6 Μερικά Συμπεράσματα

Με στόχο την καλύτερη κατανόηση της υφής, της μορφολογίας, της συνοχής και του χρώματος των μαρμάρινων επιφανειών, καθώς και των παραμέτρων που τις ορίζουν, πραγματοποιήθηκε έλεγχος διαφορετικά κατεργασμένων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου με εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της laser προφίλομετρίας, της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και της χρωματομετρίας.

(σημείωση: τα αποτελέσματα της παλμικής θερμογραφίας για τα δοκίμια λατομείου σχολιάζονται στο κεφ. 7 της διατριβής μαζί με τα αποτελέσματα των δειγμάτων που ελήφθησαν από τις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των ιστορικών κτηρίων).

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι επιτεύχθηκε η προσδοκώμενη, κατά τον πειραματικό σχεδιασμό, διαφοροποίηση των επιπέδων της υφής, μορφολογίας και χρώματος των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών με τη διαδοχική χρήση γυαλόχαρτων SiC (ταξινόμηση P της FEPA), καθώς και την εφαρμογή της Πάστας AB57 για 20 λεπτά.

Σε σχέση με τη γενική μορφολογική εξέταση των δοκιμίων με τη **Μικροσκοπία Οπτικών Ινών** προκύπτει ότι η χρήση των πιο λεπτόκοκκων γυαλόχαρτων P400 και P600 (ακόμα και μετά την εφαρμογή της πάστας AB57), οδηγεί σε επιφάνειες όπου οι κόκκοι του μαρμάρου είναι ευδιάκριτοι στο σύνολό της εξεταζόμενης περιοχής, σε σχέση με τις επιφάνειες όπου έχουν κατεργαστεί με πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (P60, P80, P100, P220), όπου κάποιοι κόκκοι μαρμάρου είναι εμφανείς αποσπασματικά. Αυτή η διακριτή εμφάνιση των κόκκων λογικά συνεπάγεται επιφάνειες που πρέπει να παρουσιάζουν μεγαλύτερη τραχύτητα.

Την παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνουν με ποσοτικά κριτήρια πλέον οι παράμετροι της τραχύτητας R_q και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενης επιφάνειας r (ενεργή επιφάνεια) που μετρήθηκαν με τη **laser προφίλομετρία**. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφεται σαφής διαφοροποίηση της παραμέτρου της τραχύτητας R_q και του λόγου r ανάμεσα στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60, I80, I100), οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές R_q ($<10\mu\text{m}$) και r ($<1,500$), καθώς και στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220, I400, I600), οι οποίες εμφανίζουν υψηλότερες τιμές R_q ($>15\mu\text{m}$) και r ($>2,000$). Αυτή η σαφής διαφοροποίηση παραμένει και μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 για 20 λεπτά.

Διαπιστώνεται δε ότι για τιμές $R_q < 10$ και $R_q > 20$ η εφαρμογή της πάστας αυξάνει την τραχύτητα δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η τραχύτητα να αυξάνεται, ενώ για τιμές $10 < R_q < 20$ φαίνεται ότι η εφαρμογή της πάστας μειώνει την τραχύτητα, δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η τραχύτητα να μειώνεται.

Αντίστοιχα για $r < 1.5$ καταγράφονται μικρές αυξήσεις των τιμών του λόγου r μετά την εφαρμογή της πάστας, δηλ. η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να αυξάνεται σε μικρό βαθμό. Για $r > 2$ καταγράφονται μεγαλύτερες αυξήσεις των τιμών του λόγου r εκτός από το δοκίμιο I220AB57,

δηλ. για $r > 2$ (εκτός από το δοκίμιο I220AB57) η απώλεια του ασβεστίτη λόγω της χημικής δράσης της πάστας λαμβάνει χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Στο δοκίμιο I220AB57, το οποίο αποτελεί εξαίρεση, η απώλεια του ασβεστίτη εξαιτίας της χημικής δράσης της πάστας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πραγματική επιφάνεια να μειώνεται.

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα της **ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων** ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και την εξαγωγή των τιμών των τριών δεικτών επιφανειακής μικροδομής, διαπιστώνεται ότι υπάρχει σαφής διαφοροποίηση του συντελεστή μορφής Γ (δηλ. της τραχύτητας) ανάμεσα στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο χοντρόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I60, I80, I100), οι οποίες παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές Γ , από στις επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με τα πιο λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα (δοκίμια I220, I400, I600), οι οποίες εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές Γ (~2). Αυτή η σαφής διαφοροποίηση παραμένει και μετά την εφαρμογή της πάστας AB57 για 20 λεπτά.

Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τα αποτελέσματα της laser προφίλομετρίας, όσον αφορά στη μέτρηση της τραχύτητας R_q , κάτι το οποίο προκύπτει αφενός λόγω της διαφορετικής αρχής της κάθε μίας μεθόδου και αφετέρου στη μειωμένη διακριτική ικανότητα της τεχνικής της ψηφιακής επεξεργασίας μικροσκοπικών εικόνων στον εντοπισμό κατεργασιών λεπτού φινιρίσματος, όπως αυτό το οποίο προκύπτει από τα λεπτόκοκκα γυαλόχαρτα. Εικάζεται ότι μεγαλύτερη μεγέθυνση εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και κατά συνέπεια μικρότερη αντιστοιχία μm ανά pixel από αυτή που χρησιμοποιήθηκε ($2\mu\text{m}/\text{pixel}$), θα μπορούσε να άρει τον περιορισμό αυτό.

Επιπλέον, από την εφαρμογή της τεχνικής της **χρωματομετρίας** διαπιστώνεται ότι οι τιμές της λαμπρότητας πριν την εφαρμογή της πάστας παρουσιάζουν μικρή αλλά βαθμιαία μείωση με την αύξηση του αριθμού $-P$ του γυαλόχαρτου, δηλ. με τη μείωση της διαμέτρου των σωματιδίων του SiC, εκτός από το δοκίμιο I600 που αυξάνει την τιμή της L^* στα επίπεδα του δοκιμίου I220. Αντιστοίχως, οι τιμές της χρωματικής παραμέτρου της λαμπρότητας μετά την εφαρμογή της πάστας μειώνονται (σε μικρό ποσοστό) όσο πιο λεπτόκοκκο καθίσταται το γυαλόχαρτο, εκτός και πάλι από το δοκίμιο I600AB57. Επίσης, μετά την κατεργασία με την πάστα AB57 η λαμπρότητα μειώνεται στα εξεταζόμενα δοκίμια, εκτός από τις περιπτώσεις των δοκιμίων I80 και I400.

Τέλος, γνωρίζοντας ότι η μη καταστρεπτική τεχνική της χρωματομετρίας χρησιμοποιείται επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, γεγονός που την καθιστά σημαντικό εργαλείο για την αποτίμηση των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, ενώ η εφαρμογή της laser προφίλομετρίας (προς το παρόν τουλάχιστον) μπορεί να λάβει χώρα μη καταστρεπτικά επίσης, μόνο όμως στο εργαστήριο μετά τη λήψη δείγματος, επιχειρήθηκε η συσχέτιση των τιμών των παραμέτρων της τραχύτητας R_q και του λόγου r , με τις χρωματικές παραμέτρους L^* , a^* , b^* .

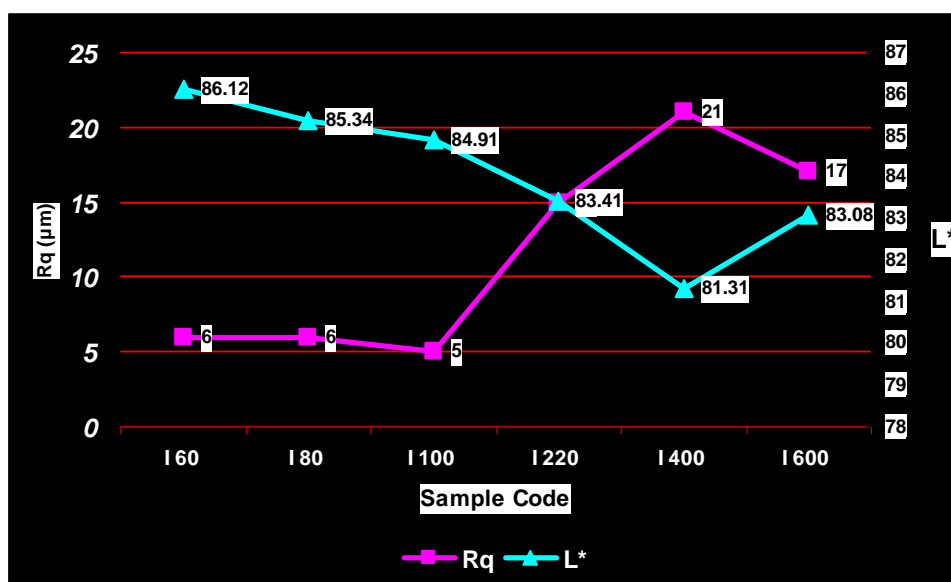
Από τις εικόνες 4.6.1 και 4.6.2 των συγκριτικών διαγραμμάτων της τραχύτητας R_q και της λαμπρότητας L^* φαίνεται να υπάρχει μεταξύ τους συσχέτιση που δηλώνει ότι αυξανόμενου του ενός μεγέθους το έτερο μειώνεται, τόσο για τα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής

κοκκομετρίας γυαλόχαρτα, όσο και για τα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και πάστα AB57.

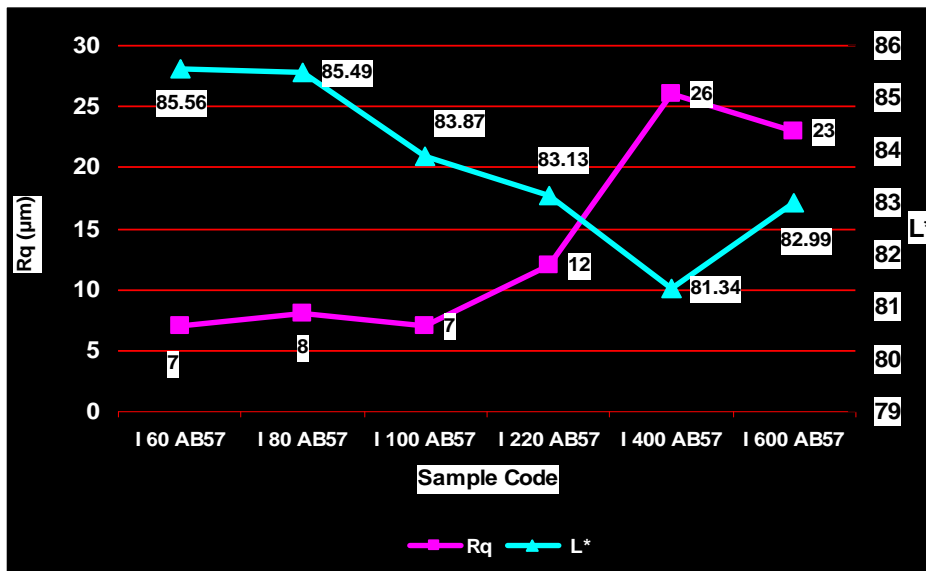
Για την πιο σαφή κατάδειξη των παραπάνω εφαρμόστηκε **ανάλυση σε κύριες συνιστώσες** ανάμεσα στα μεγέθη των χρωματικών παραμέτρων L^* , a^* , b^* και των παραμέτρων της τραχύτητας R_q και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια r , στα αποτελέσματα του εργαστηριακού ελέγχου των πρότυπων δοκιμών πεντελικού μαρμάρου. Όπως φαίνεται και στην εικ. 4.6.3, υπάρχει μεγάλη συσχέτιση ανάμεσα στα μεγέθη της λαμπρότητας L , της τραχύτητας R_q , και του λόγου r . Η διαγραμματική απεικόνιση δείχνει ότι η αύξηση της λαμπρότητας οδηγεί σε μείωση των τιμών της τραχύτητας R_q και του λόγου r , σε ότι αφορά τις εξεταζόμενες μαρμάρινες επιφάνειες.

Αύξηση της τραχύτητας ή/και της ενεργής επιφάνειας σημαίνει αύξηση της κατανομής, του βάθους και του εύρους των επιφανειακών ρηγματώσεων κατά μήκος του γραμμικού προφίλ (R_q), ή ανά μονάδα επιφάνειας (r), γεγονός που οδηγεί σε μείωση της ανάκλασης της επιφάνειας, η οποία αποδίδεται με τη λαμπρότητα στις μετρήσεις της χρωματομετρίας.

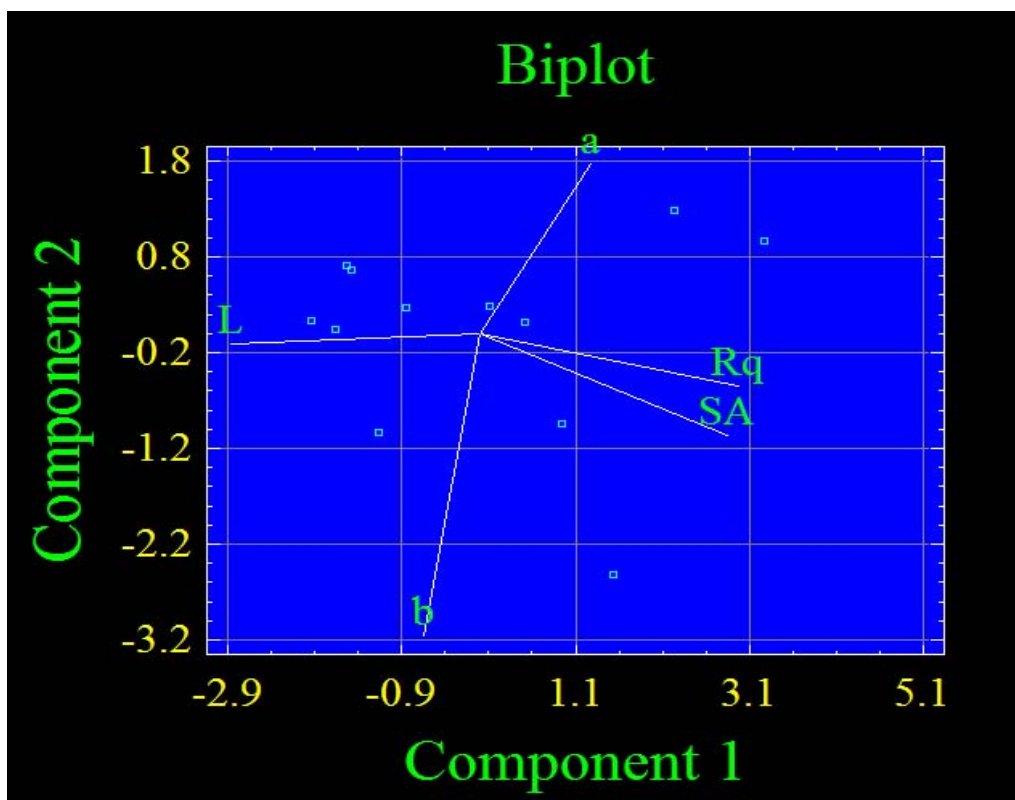
Οι χρωματικές παράμετροι της διαφοράς στο κόκκινο-πράσινο a^* , καθώς και στο κίτρινο-μπλε b^* , φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητες των παραμέτρων της επιφανειακής μορφολογίας και υφής, γεγονός καταρχάς λογικό, αφού το χρώμα δεν έχει λόγο να επιδρά στην κατανομή των επιφανειακών ρηγματώσεων κατά μήκος τόσο του γραμμικού προφίλ (R_q), όσο και ανά μονάδα επιφάνειας (r) στο λευκής χροιάς πεντελικό μάρμαρο.



Εικ. 4.6.1: Συγκριτικό διάγραμμα των τιμών της τραχύτητας R_q και της λαμπρότητας L^* για τα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα



Εικ. 4.6.2: Συγκριτικό διάγραμμα των τιμών της τραχύτητας Rq και της λαμπρότητας L* για τα δοκίμια που έχουν κατεργαστεί με διαφορετικής κοκκομετρίας γυαλόχαρτα και πάστα AB57



Εικ. 4.6.3: Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες ανάμεσα στις χρωματικές παραμέτρους L*, a*, b* και τις παραμέτρους της τραχύτητας Rq και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια r

5. Παρουσίαση Πειραμάτων, Περιγραφή Αποτελεσμάτων και Συζήτηση Αποτελεσμάτων - Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος

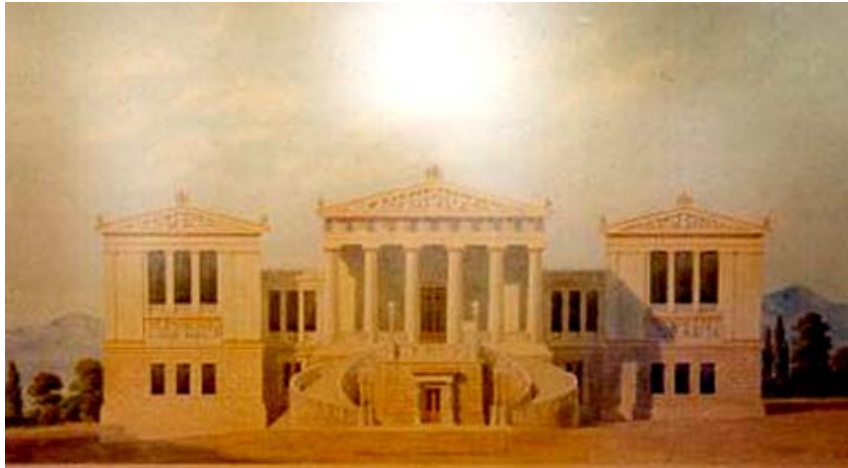
5.1 Σύντομα ιστορικά στοιχεία για το κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος

Η Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάδος, που ονομάζεται και Βαλλιάνειος, λόγω των δωρητών της, κατασκευάστηκε από τον Ερνέστο Τσίλλερ σε σχέδια του Θεόφιλου Χάνσεν και αποτελεί το τελευταίο μέρος της Αθηναϊκής Τριλογίας (Ακαδημία – Πανεπιστήμιο - Βιβλιοθήκη) [61].

Το 1858 ο Θεόφιλος Χάνσεν έλαβε εντολή από τον Όθωνα να μελετήσει το παρακείμενο της Ακαδημίας κτίριο για χρήση του ως Βιβλιοθήκη ή Μουσείο. Λόγω έλλειψης χρημάτων για την ανοικοδόμηση του κτιρίου το ζήτημα έμεινε στάσιμο για πολλά χρόνια. Το 1884 ο Χαρίλαος Τρικούπης έδωσε τελικά την εντολή στον Χάνσεν να συντάξει τα τελικά σχέδια για την Βιβλιοθήκη. Το οικονομικό έλλειμμα συμπλήρωσε ο Παναγής Βαλλιάνος και τα δύο αδέρφια του Μαρίνος και Ανδρέας, χάριν της δωρεάς των 3.000.000 δρχ. που προσέφεραν στο Ελληνικό Δημόσιο και έτσι το έργο μπόρεσε να ξεκινήσει με την επίβλεψη του Ερνέστου Τσίλλερ. Ο θεμέλιος λίθος τίθεται επί πρωθυπουργίας Χαρίλαου Τρικούπη στις 16 Μαρτίου του 1888 και το έργο ολοκληρώθηκε το 1902. Χρησιμοποιήθηκε Χαρβάτιος Λίθος για την κατασκευή της βάσης και Πεντελικό μάρμαρο για τον πάνω όροφο [163].

Η Βιβλιοθήκη σχεδιάστηκε από τον Χάνσεν σε νεοκλασικό δωρικό ρυθμό με το μεγαλύτερο βάρος να πέφτει στον κάτω όροφο -λόγω κλίσεως του εδάφους- ο οποίος παίζει τον ρόλο του βάθρου του αρχαίου ρυθμού. Εξαίρεση αποτελούν οι κλίμακες, που ακολουθούν αναγεννησιακό ρυθμό και εκτονώνουν το «βάρος» του κάτω ορόφου [163].

Στο σχέδιο του Χάνσεν προβλεπόταν γλυπτά στα τύμπανα των αετωμάτων, ανάγλυφες παραστάσεις στα στηθαία των παραθύρων, των προσόψεων και στον πρόδρομο, ενώ στο αναγνωστήριο τοιχογραφίες. Οι οικονομικές συνθήκες όμως κάτω από τις οποίες χτίστηκε το μέγαρο δεν επέτρεψαν την εκτέλεση των παραπάνω διακοσμητικών στοιχείων. Προ της προσόψεως στήθηκε ο ανδριάντας του Παναγή Βαλλιάνου και στον πρόδρομο οι ανδριάντες των αδερφών του Μαρίνου και Ανδρέα και τα τρία έργα του γλύπτη Μπονάνου [163].



Εικ. 5.1.1 Ελαιογραφία που απεικονίζει την πρόσοψη του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, όπως σχεδιάστηκε από τον Χανσεν



Εικ. 5.1.2 Η πρόσοψη του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος σήμερα

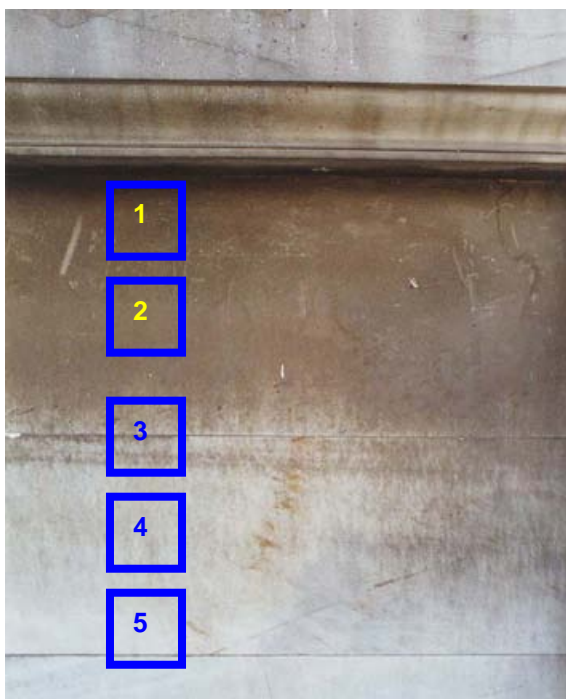
5.2 Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος – Δειγματοληψία – Χαρακτηρισμός των υλικών & διάγνωση της φθοράς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, όπου, κατόπιν της επί τόπου εφαρμογής των τεχνικών του μη καταστρεπτικού ελέγχου και των αναλυτικών τεχνικών στο εργαστήριο, αφού προηγήθηκε η δειγματοληψία, έλαβε χώρα η διαγνωστική μελέτη για το χαρακτηρισμό του ιστορικού υλικού και τη διάγνωση της φθοράς του.



(α) Τμήμα της βόρειας όψης όπου τοποθετήθηκε ικρίωμα για να λάβουν χώρα η διαγνωστική μελέτη, οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού και η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού. (β) Η επιφάνεια στην οποία έλαβαν χώρα η διαγνωστική μελέτη, οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού και η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού. Μακροσκοπικά, δείχνει να παρουσιάζει τους τύπους φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας και των αποπλυμένων επιφανειών.

5.2.1 Δειγματοληψία



Εικ. 5.2.1 Θέσεις Δειγματοληψίας της υπό εξέταση επιφάνειας

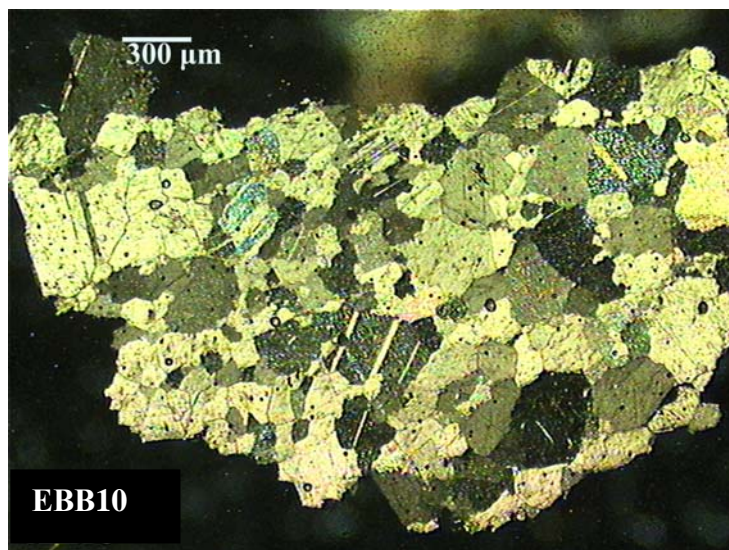
Πίνακας 5.2.1 Αναλυτική Περιγραφή Δειγμάτων

Θέση Δειγματοληψίας στην Εικ. 5.2.1	Περιγραφή Περιοχής Δειγματοληψίας	Κωδικός Δείγματος	Κατάσταση Δείγματος
1	Περιοχή Επιφανειακά εύθραπτης μαύρης κρούστας – περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής	Pm1	Συμπαγές στερεό
		Pm1	σκόνη
		Pm1a	σκόνη
2	Περιοχή συνεκτικής μαύρης κρούστας – περιοχή προστατευμένη από το νερό της βροχής	Pm2	Συμπαγές στερεό
		Pm2	σκόνη
3	Περιοχή με έντονες μαύρες επικαθήσεις – περιοχή μερικώς προστατευμένη από το νερό της βροχής	Pma	Συμπαγές στερεό
		Pma	σκόνη
4	Περιοχή με λιγότερες μαύρες επικαθήσεις – περιοχή μερικώς προστατευμένη από το νερό της βροχής	Padf	Συμπαγές στερεό
		Padf	σκόνη
5	Περιοχή με πολύ λιγότερες μαύρες επικαθήσεις (σχεδόν αποπλυμένη) – πολύ εκτεθειμένη περιοχή στο νερό της βροχής	Pa2	Συμπαγές στερεό
		Pa2	σκόνη

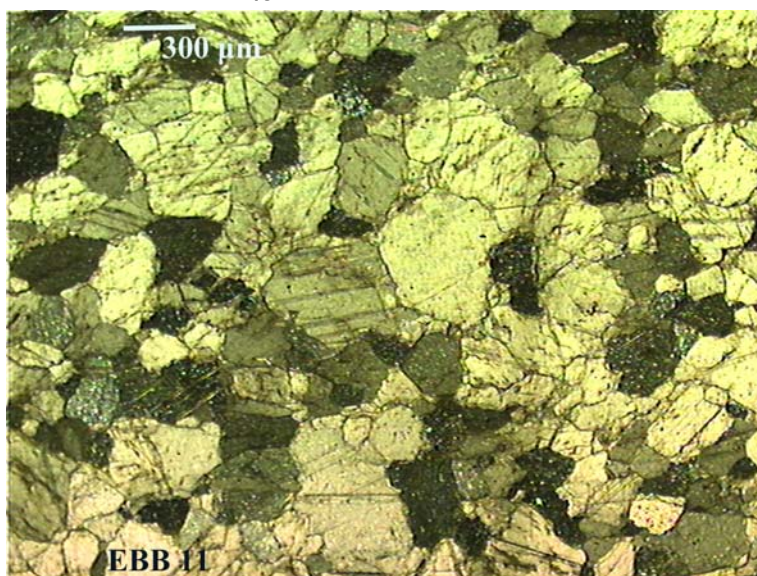
5.2.2 Χαρακτηρισμός των υλικών και διάγνωση της φθοράς

5.2.2.1 Αποτελέσματα Οπτικής Μικροσκοπίας

Στερεό δείγμα λήφθηκε από τη λεία μαρμάρινη αρχιτεκτονική επιφάνεια του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (ΕΒΕ) για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι πρόκειται για Πεντελικό μάρμαρο και έρχονται σε συμφωνία με τα ιστορικά βιβλιογραφικά δεδομένα.



Εικ. 5.2.2.1.1: εικόνα λεπτής τομής δείγματος των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ. Διασταυρωμένα πρίσματα



Εικ. 5.2.2.1.2: εικόνα λεπτής τομής δείγματος των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ. Διασταυρωμένα πρίσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οπτικής μικροσκοπίας, το υπόστρωμα των μαρμάρινων επιφανειών της ΕΒΕ είναι λευκό μάρμαρο μικροκρυσταλλικής υφής. Η υφή του είναι συμπαγής και το σχήμα των κρυστάλλων πολυγωνικό και ακανόνιστο (Εικ. 5.2.2.1.1). Η ορυκτολογική του σύσταση είναι ασβεσπιτική. Οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη, που το μέγεθός

τους κυμαίνεται από μικρό έως μεσαίο (από δεκάδες έως κάποιες εκατοντάδες μm), καθώς και οι χαρακτηριστικές τους πολυδιδυμίες είναι εμφανείς. Σε πολλά σημεία όμως, παρουσιάζει μικρορωγμές που οφείλονται στην έντονη κόπωση του υλικού (Εικ. 5.2.2.1.2). Οι επαναλαμβανόμενες συστολές – διαστολές, στις οποίες οφείλεται η κόπωση του υλικού, είναι φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κυρίως εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασιακές μεταβολές, κύκλοι υγρασίας – ξηρασίας, αιολική δράση) ευνοείται δε, από τη ρυπασμένη ατμόσφαιρα, όπως αυτή του κέντρου της Αθήνας. Χαρακτηρίζεται δε, ως Πεντελικό μάρμαρο.

5.2.2.2 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, στο πλαίσιο της διάγνωσης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς.

Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού.



Εύθρυπτη φαιόμαυρη κρούστα, x25



Εύθρυπτη φαιόμαυρη κρούστα, x50



Συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα, x50



Συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα, x25



Περικρυσταλλικές ρηγματώσεις και έντονες μαύρες επικαθήσεις, x25



Περικρυσταλλικές ρηγματώσεις με λιγότερες μαύρες επικαθήσεις, x50



Οξειδία & υδροξείδια σιδήρου (φλέβες) στην περικρυσταλλικά ρηγματωμένη περιοχή του μαρμάρου, x25



Οξειδία & υδροξείδια σιδήρου (φλέβες) στην περικρυσταλλικά ρηγματωμένη περιοχή του μαρμάρου, x50



Καθαρά αποπλυμένη περιοχή, x50



**Καθαρά αποπλυμένη περιοχή,
x50**

Στις δύο πρώτες εικόνες, παρατηρούμε την εύθρυπτη φαιόμαυρη κρούστα, η οποία παρουσιάζει μια εξωτερική πορώδη ζώνη με εμφανείς μικρορηγματώσεις και μια εσωτερική συνεκτικά συνδεδεμένη με την επιφάνεια του μαρμάρου. Ακολουθούν οι δύο αντιπροσωπευτικές εικόνες του δεύτερου τύπου φαιόμαυρης κρούστας. Πρόκειται για φαιόμαυρη κρούστα, η οποία δείχνει συνεκτικά συνδεδεμένη με την επιφάνεια του μαρμάρου και παρουσιάζει λεία επιφανειακή μορφολογία. Και οι δύο αυτές περιοχές προστατεύονται από τη διαλυτική δράση της βροχής από υπερκείμενο γείσο. Η επιφανειακά εύθρυπτη κρούστα βρίσκεται στους πρώτους 20 πόντους κάτω από το γείσο, ενώ η πιο συνεκτική μορφή της αναπτύσσεται στους επόμενους 30 πόντους κάτω από το γείσο. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ακριβώς ότι η συσσώρευση των μαύρων επικαθήσεων εξαρτάται από τη θέση της εξεταζόμενης επιφάνειας στο κτίριο.

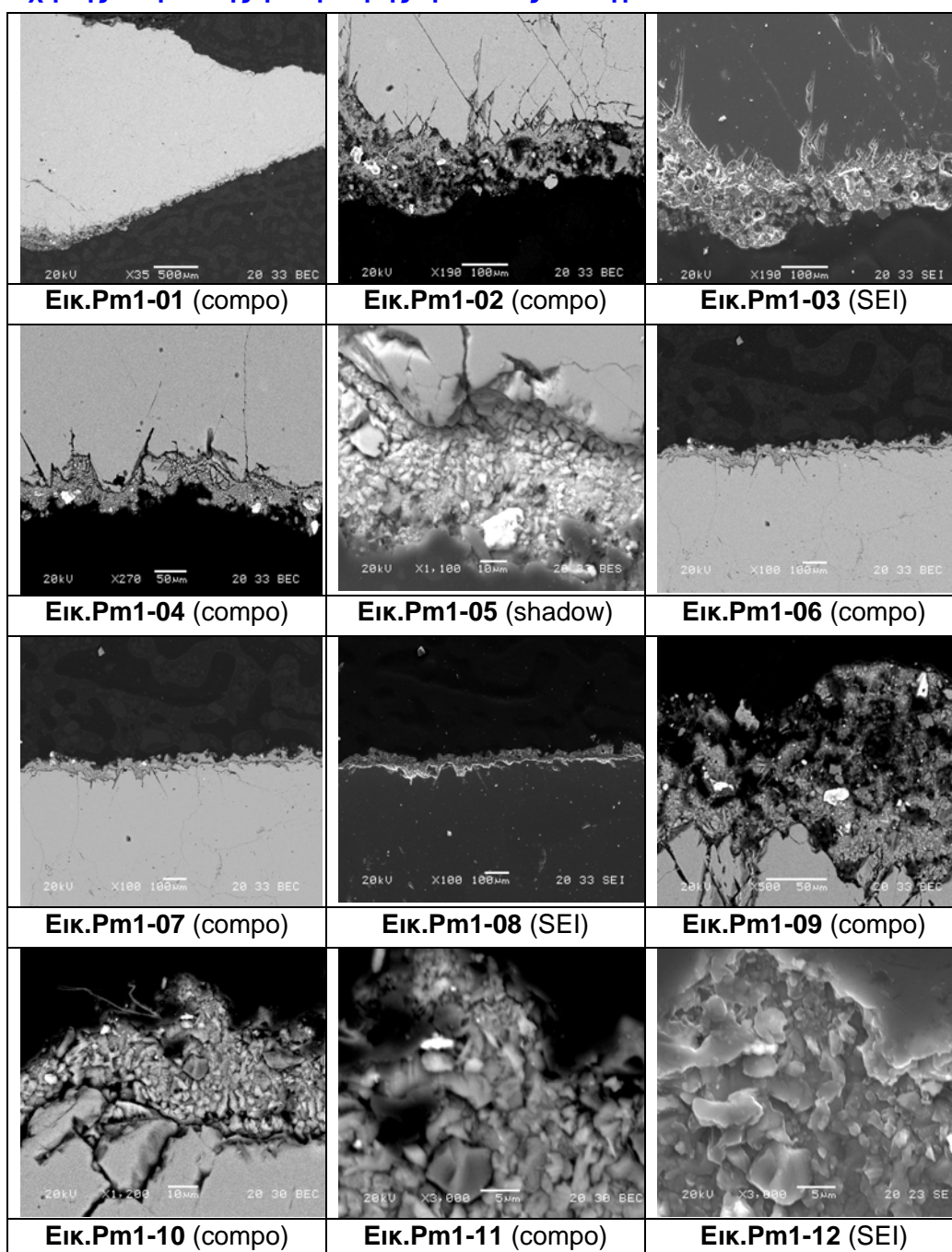
Στη συνέχεια εμφανίζονται οι περιοχές με έντονες περικρυσταλλικές ρηγματώσεις. Στις περιοχές αυτές είναι εμφανή τα περατωτικά όρια των κόκκων ή των συσσωματωμάτων των κόκκων του μαρμάρου, τα οποία δε, διαγράφονται εντονότερα λόγω της παρουσίας των μαύρων επικαθήσεων. Ανάλογα με το βαθμό προστασίας της επιφάνειας από το νερό της βροχής παρατηρείται μείωση της εμφάνισης των μαύρων επικαθήσεων.

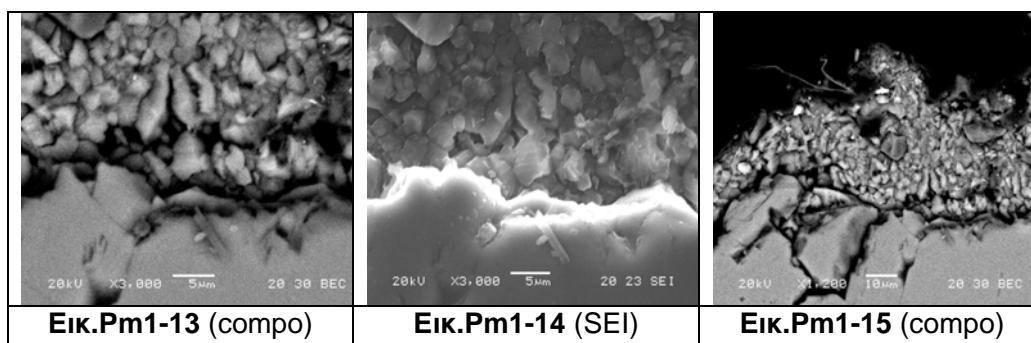
Επιπλέον, παρουσιάζονται οι περιοχές που εμφανίζουν οξειδία και υδροξειδία σιδήρου, και οι καθαρά αποπλυμένες περιοχές. Οι οξειδωμένες φλέβες σιδήρου εμφανίζονται σε σημεία, όπου λαμβάνει χώρα διάχυση ιόντων σιδήρου από το εσωτερικό του Πεντελικού μαρμάρου προς την εξωτερική επιφάνεια, προσδίδοντας αυτήν τη χαρακτηριστική πορτοκαλοκίτρινη χροιά. Σε ότι αφορά τις καθαρά αποπλυμένες περιοχές, οι έντονες περικρυσταλλικές ρηγματώσεις παραμένουν, παρά την συνεχή απόπλυση της επιφάνειας από το νερό της βροχής, φαινόμενο που ευνοείται από τη θέση της συγκεκριμένης περιοχής.

5.2.2.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

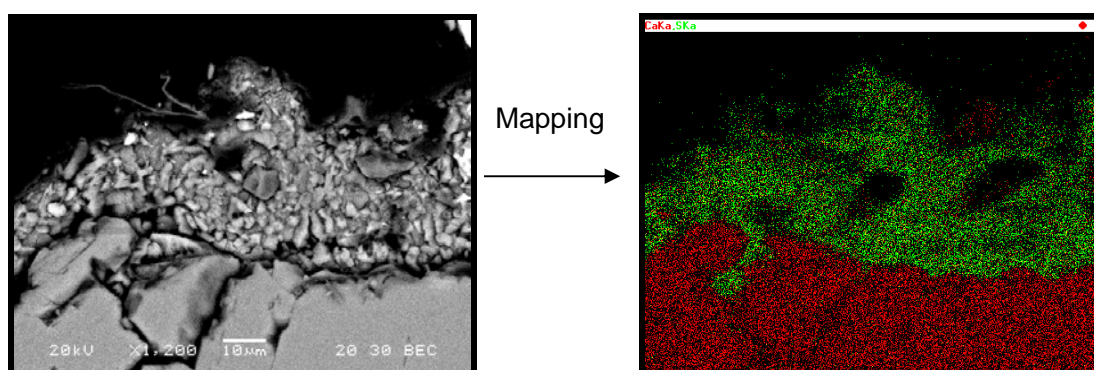
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ για τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς των λείων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ.

1) Περιοχή της εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας – Δείγμα Pm1





Στην Εικόνα **Pm1-15** έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba	P
Pm1-02	1	~	~	*	**	*	•	**	~	****	~	~	~
	2	•	*	*	****	•	•	***	•	•	•	~	~
	3	~	•	*	****	•	•	***	~	•	~	~	~
	4	•	*	**	***	•	•	***	•	**	~	~	~
	5	~	~	****	~	~	~	~	~	~	~	~	~

Pm1-02	6	•	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~
	7	•	•	*	***	**	•	****	~	*	~	~	~
	8	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~
	9	~	~	•	**	~	~	****	~	~	~	~	~
	10	~	~	**	***	•	•	***	~	*	~	~	~
	11	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba	P
Pm1-04	1	~	~	•	*	•	~	****	~	~	~	~	~
	2	•	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~
	3	•	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~
	4	~	~	•	~	~	~	****	~	~	~	~	~
	5	~	*	*	****	•	•	***	~	•	~	~	~
	6	~	*	*	***	•	•	***	•	•	~	~	~
Pm1-04	7	•	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~	~

	8	~	~	**	*	•	•	**	~	****	~	~	*
--	---	---	---	----	---	---	---	----	---	------	---	---	---

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba	P
Pm1-05	1	•	•	•	•	•	•	****	•	~	•	•	•

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα Pm1 αποτελεί το δείγμα διάγνωσης της μεγάλης πάχους φαιόμαυρης κρούστας που έχει σχηματιστεί στην υποκείμενη περιοχή του γέισου. Το δείγμα εμφανίζεται με στρωματική δομή, της οποίας το επιφανειακό τμήμα αποτελείται από γύψο, ενώ το υποκείμενο τμήμα αποτελείται από ολοκρυσταλλικό ασβεστίτη σε συμπαγή μορφή (μάρμαρο). Από τις εικόνες του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης διακρίνεται η γυψοποιημένη περιοχή κατά μήκος όλης της επιφάνειας του δείγματος, η οποία έχει πάχος που κυμαίνεται από 20 ως 80μm. Το κοκκώδες συσσωμάτωμα της επιφάνειας αποτελείται αποκλειστικά από κρυστάλλους γύψου πρισματικής μορφής.

Η δευτερογενής μετατροπή του ασβεστίτη σε γύψο οφείλεται στην όξινη προσβολή του μαρμάρου από τη βροχή λόγω ρυπασμένης ατμόσφαιρας. Η γυψοποιημένη περιοχή στην επιφάνεια εμφανίζεται αρκετά συνεκτική και με έντονο ανάγλυφο, ενώ διαχωρίζεται σαφώς από το σώμα του μαρμάρου με μία κατά μήκος ρωγμή πάχους περίπου 3μm (Εικ. Pm1-04 / Pm1-15). Στην εικόνα Pm1-11(comp) και την αντίστοιχη SEI εικόνα Pm1-12, όπως και στην Pm1-13 (comp) και την αντίστοιχη SEI Pm1-14 φαίνεται καθαρά ο σχηματισμός μικροκρυσταλλικού γύψου (μέγεθος κόκκων μικρότερο των 30 μm), όπως και η έντονη διαφοροποίηση της γυψοποιημένης επιφάνειας από αυτή του ασβεστίτη. Αν και οι διάμετροι των κόκκων του γύψου ποικίλλουν, σε καμία περίπτωση δεν υπερβαίνουν τα 10μm.

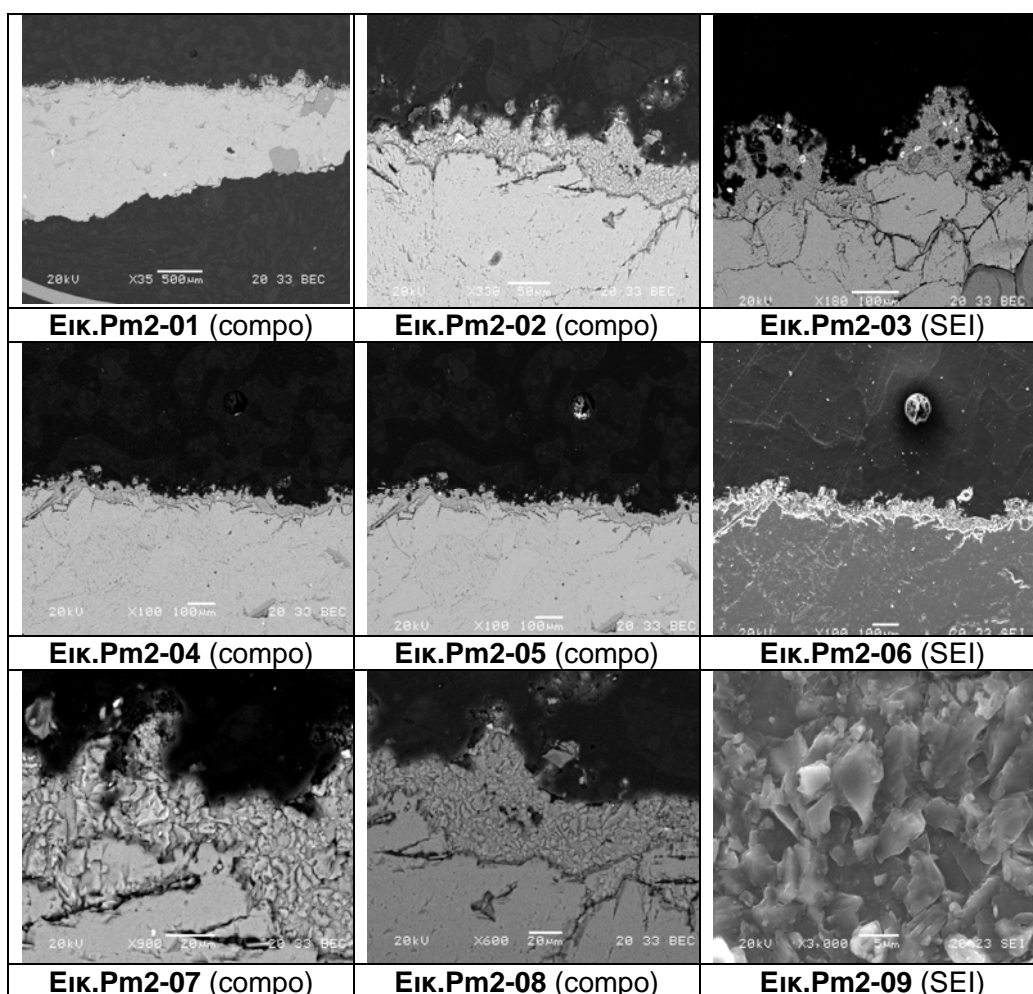
Σε όλη τη διεπιφάνεια γύψου-ασβεστίτη παρατηρούνται ρηγματώσεις διαφόρων μηκών στους κρυστάλλους ασβεστίτη που φανερώνουν τη διάβρωση του. Στο σώμα του μαρμάρου δεν ανιχνεύεται παρουσία S, άρα η γυψοποίηση του ασβεστίτη δεν έχει προχωρήσει σε βάθος στην περιοχή.

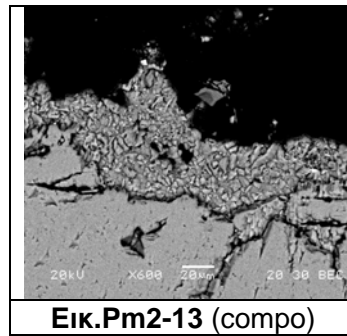
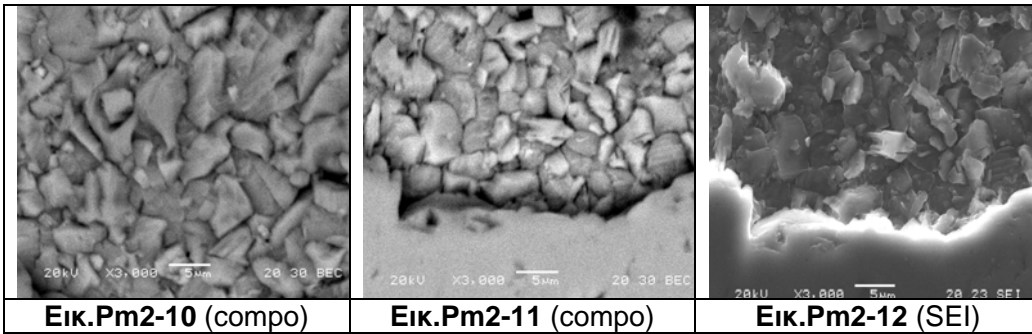
Η ανάλυση δείχνει ίχνη Mg στους κρυστάλλους του ασβεστίτη (Εικ. Pm1-02: EDX 6/ Εικ. Pm1-04: EDX 2,3,7), γεγονός αναμενόμενο καθώς ο ασβεστίτης του Πεντελικού μαρμάρου περιέχει σημαντικά ποσοστά Mg.

Επίσης, υπάρχει Si και Al σε χαμηλές περιεκτικότητες στην κρούστα, ενώ ίχνη εντοπίζονται και στο ασβεστίτιο σώμα μέχρι το βάθος των 10μm. Ακόμη, υπάρχουν ορισμένα ίχνη Ti και Zn, πιθανώς λόγω ατμοσφαιρικών επικαθίσεων.

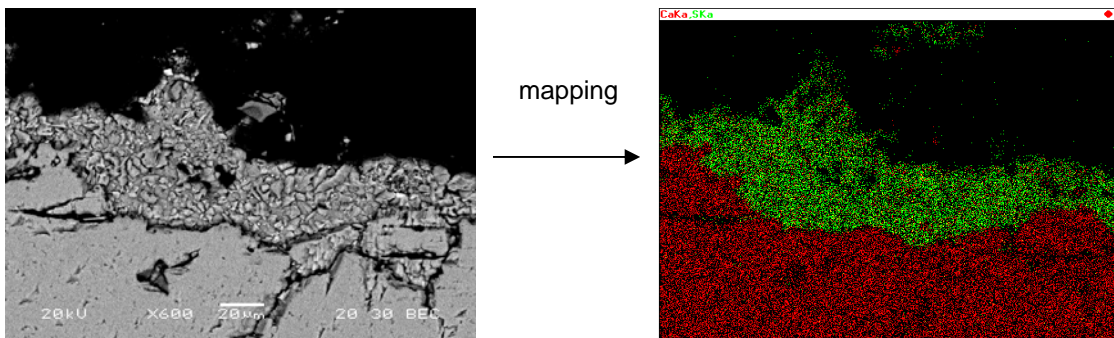
Στις λευκές περιοχές του δείγματος (αγώγιμες) ανιχνεύεται Fe, ο οποίος συμπεραίνουμε ότι εμφανίζεται με την μορφή οξειδίων (Εικ. Pm1-02 / Pm1-04/ Pm1-07/ Pm 1-09). Τέλος, διαγνώστηκε η παρουσία κρυστάλλου χαλαζία στην κρούστα (Εικ. Pm1-02: EDX 5).

2) Περιοχή της συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας – Δείγμα Pm2





Στην Εικόνα **Pm2-13** έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pm2-02	1	**	*	***	~	~	~	~	***	~	**	~	~
	2	~	•	•	~	***	~	~	***	~	~	~	~
	3	~	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~	~
	4	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	5	•	•	•	~	•	~	~	****	~	~	~	~
Pm2-02	6	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	7	~	~	•	~	***	•	~	***	~	~	~	~
	8	*	*	**	~	***	*	*	***	~	*	~	~
	9	~	•	*	•	*	*	*	**	~	****	~	~
	10	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~	~
	11	~	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~	~
	12	•	~	~	~	•	~	•	****	~	~	~	~
	13	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pm2-03	1	*	***	***	•	~	~	**	*	~	~	~	~
	2	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	3	~	~	****	~	~	~	~	•	~	~	~	~
	4	•	*	*	~	****	~	•	***	~	*	~	~
	5	*	~	~	~	•	~	~	****	~	~	~	~
	6	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	7	~	~	~	~	~	***	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το Pm2 αποτελεί το δείγμα διάγνωσης της φθοράς για τη λεπτή και συνεκτική κρούστα. Όπως φαίνεται από όλες τις εικόνες του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, ο ασβεστίτης έχει επιφανειακά γυψοποιηθεί, σχηματίζοντας μια συνεκτική ζώνη με έντονο ανάγλυφο πάχους 20-140μm, η οποία αποτελείται από κοκκώδες μονόμικτο συσσωμάτωμα μικροκρυσταλλικού γύψου διαμέτρου 5-10μm (Εικ. Pm2-07, Pm2-10, Pm2-11, Pm2-13).

Η γυψοποιημένη επιφάνεια διαχωρίζεται από το μάρμαρο με μια ασυνέχεια πάχους 2μm. Περιμετρικά στους κρυστάλλους ασβεστίτη που βρίσκονται στο ανώτερο τμήμα (σε επαφή με το γύψο) έχουν δημιουργηθεί σπασίματα τα οποία φτάνουν μέχρι και τα 100 μm μήκος (Εικ. Pm2-01). Ίχνη S βρίσκονται σε κρυστάλλους ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 10 μm. Τόσο στο γύψο όσο και στον ασβεστίτη ανιχνεύεται Mg σε χαμηλά ποσοστά, το οποίο είναι συστατικό του αυθεντικού υλικού.

Στην εικόνα Pm2-01 είναι διακριτές σκουρόχρωμες περιοχές που αποτελούν κρυστάλλους χαλαζία μέσα στο σώμα του μαρμάρου. Κρύσταλλος χαλαζία υπάρχει και στην εικόνα Pm2-03 (EDX 3) μέσα στο συσσωμάτωμα του γύψου.

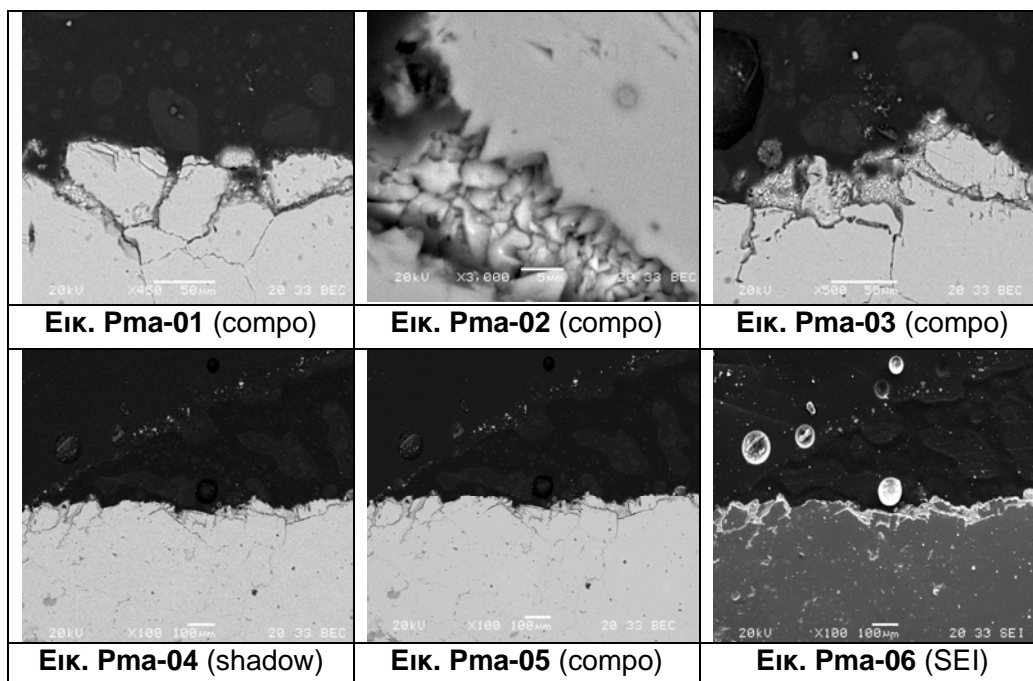
Στην εικόνα Pm2-03 (EDX 1) εντοπίστηκε μέσα στο ασβεστίτικο σώμα αργιλοπυριτικό ορυκτό με λεπιδώδη μορφή που περιέχει σημαντικά ποσοστά Mg και K, και πιθανώς είναι μαρμαρυγίας. Αργιλοπυριτικά ορυκτά βρέθηκαν, ακόμη, μέσα στην γυψοποιημένη επιφάνεια και περιέχουν Mg και Fe σε μικρά ποσοστά (Εικ. Pm2-02: EDX 1 / Εικ. Pm2-03: EDX 4).

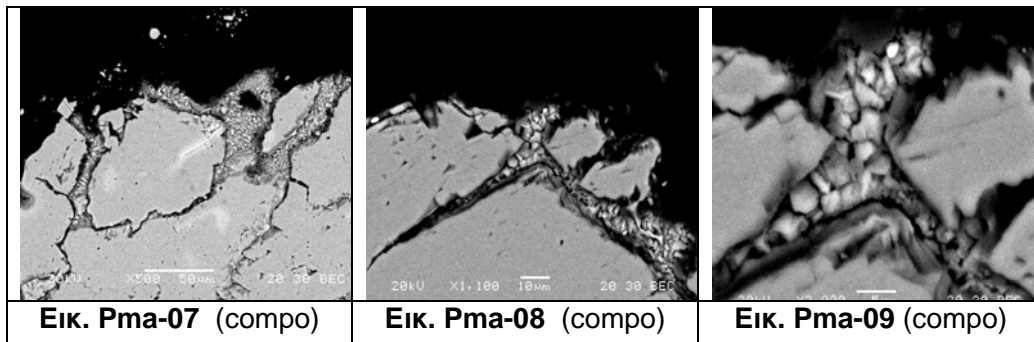
Επίσης, μέσα στη ασβεστίτική μάζα εντοπίζεται σε σημεία Si και Al (ίχνη) μέχρι βάθους 5μm, μετρούμενο από την διεπιφάνεια γύψου-ασβεστίτη, ενώ σε αναλύσεις μέσα στην κρούστα τα στοιχεία αυτά εμφανίζονται σε χαμηλά ποσοστά (Εικ. Pm2-02: EDX 2,8,9).

Οι λευκές περιοχές που εμφανίζονται στην εικόνα Pm2-02 μέσα στην επιφάνεια του γύψου αντιστοιχούν σε ενώσεις Fe που πιθανώς έχουν μεταφερθεί από το περιβάλλον. Τέλος, υπάρχουν Cl και K σε χαμηλά ποσοστά έως και ίχνη, που βρίσκονται μέσα στη γυψοποιημένη περιοχή.

3) Περιοχή περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με διαφορετική κατανομή μαύρων επικαθίσεων – Δείγματα Pma, Padf, Pa2

Περιοχή περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με έντονες μαύρες επικαθίσεις – Δείγμα Pma

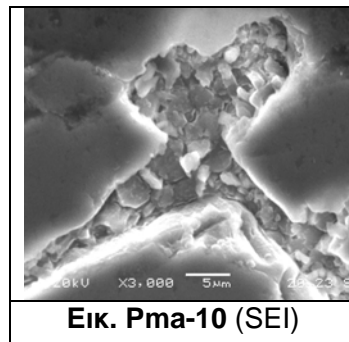




Εικ. Pma-07 (compo)

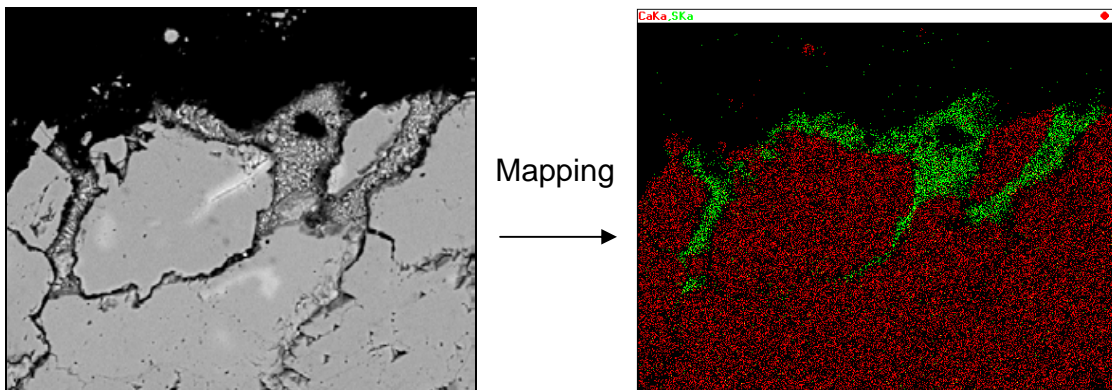
Εικ. Pma-08 (compo)

Εικ. Pma-09 (compo)



Εικ. Pma-10 (SEI)

Στην Εικόνα **Pma-07** έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pma-01	1	•	~	•	~	•	~	•	****	~	~	•	•
	2	•	•	•	•	***	•	•	***	~	•	~	•
	3	•	•	*	•	•	•	•	****	•	•	•	•
	4	•	•	•	~	~	•	•	****	~	•	~	•
Pma-01	5	•	~	•	~	•	•	•	****	~	•	•	~
	6	•	•	•	~	***	•	•	***	~	•	~	•
	7	•	~	•	~	•	•	•	****	•	~	~	~
	8	~	•	•	~	***	~	•	***	•	•	~	•

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pma-02	1	~	•	•	~	***	~	•	***	•	•	~	•
	2	•	~	•	•	•	~	~	***	•	~	~	~
	3	*	•	•	•	•	•	•	***	~	~	•	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pma-03	1	•	•	•	•	**	~	•	****	•	~	•	~
	2	•	•	•	~	***	•	•	***	~	•	•	~
	3	•	•	•	•	•	•	•	****	•	•	•	•
	4	~	•	•	~	***	•	•	****	~	~	~	•

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα Pma αποτελεί το δείγμα διάγνωσης στην περιοχή της επιφάνειας που βρίσκεται ανάμεσα στην λεπτή και συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα και την επιφάνεια των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων με προσροφημένη αιθάλη. Από τις εικόνες του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης δεν διακρίνεται γυψοποιημένη ζώνη κατά μήκος όλης της επιφάνειας του δείγματος όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις φθοράς, αλλά τοπικά εμφανίζονται περιοχές με γύψο (πάχους μέχρι 30μm) που φαίνεται να πληρώνουν τα διάκενα ή τις ρηγματώσεις που σχηματίζονται στο έντονο επιφανειακό ανάγλυφο του σώματος του μαρμάρου, εισχωρώντας, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε βάθος μέχρι 50μm μέσα στην ασβεστιτική μάζα.

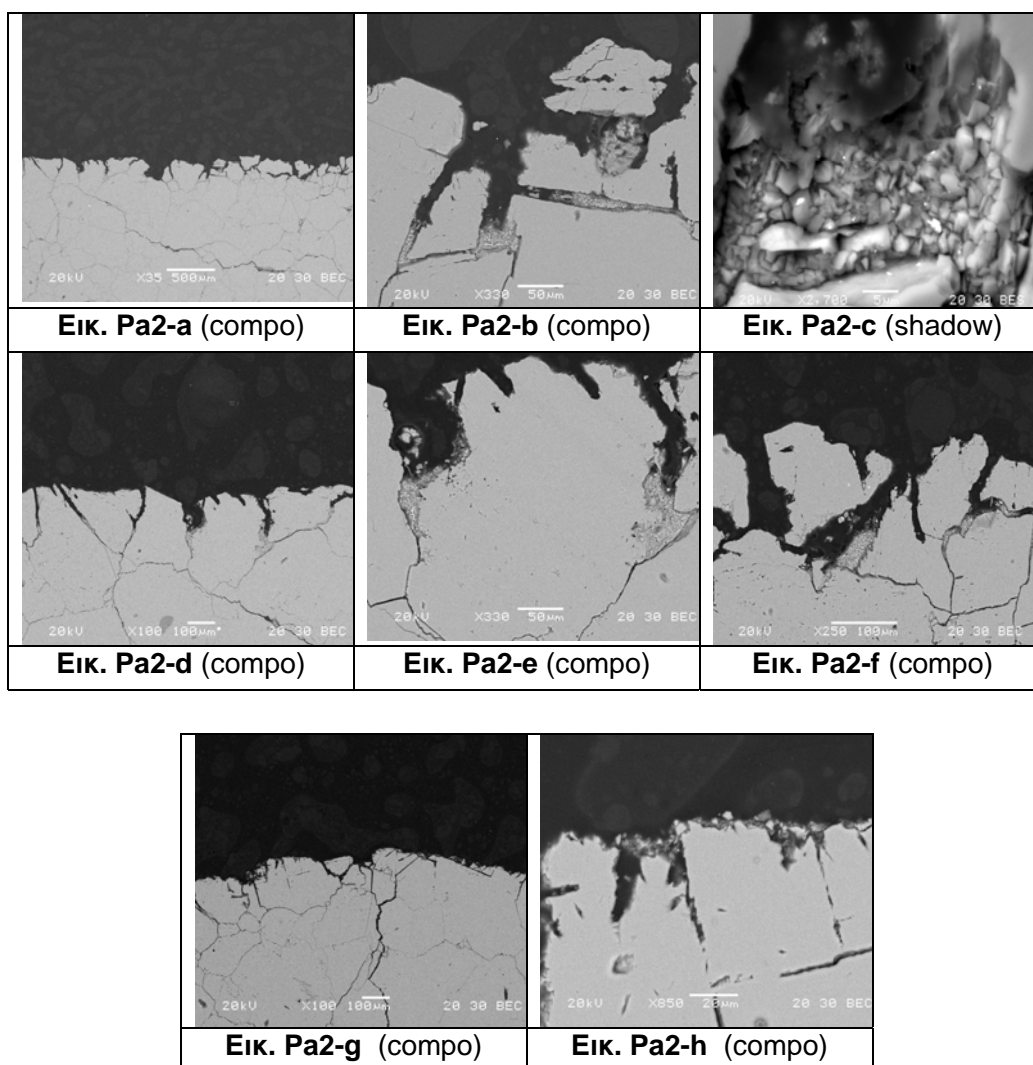
Τα κοκκώδη συσσωματώματα γύψου αποτελούνται από κρυστάλλους μικρής διαμέτρου (μέγιστη 5μm) και μπορούν να χαρακτηριστούν ανά περιοχές είτε ως μικροκρυσταλλικά (διάμετρο κόκκων από 30 ως 1μm) είτε ως κρυστοκρυσταλλικά (διάμετρο κόκκων από 1 ως 0.1μm). Οι μορφές των κρυστάλλων γύψου ποικίλλουν και μπορούν να χαρακτηριστούν πρισματικές ή, σε άλλες περιπτώσεις, πλακώδεις.

Στην επιφάνεια του ασβεστίτη διακρίνονται διακλάσεις διαφόρων μηκών που φανερώνουν την έντονη διάβρωση του δείγματος. Στο σώμα του μαρμάρου ανιχνεύεται παρουσία S μέχρι βάθους 7μm, άρα η γυψοποίηση του ασβεστίτη έχει προχωρήσει σε βάθος στην περιοχή.

Η ανάλυση δείνει ίχνη Mg τόσο στους κρυστάλλους του ασβεστίτη όσο και στο γύψο (Εικ. Pma-01, Pma-02, Pma-03). Επίσης, υπάρχουν ίχνη Si και Al σε όλες τις αναλύσεις, τα οποία εντοπίζονται μέχρι βάθους 30μm.

Σε όλες τις αναλύσεις επίσης εντοπίζονται ίχνη Fe, Ba, Ti, Zn, πιθανώς λόγω ατμοσφαιρικών επικαθίσεων. Τέλος, σε αρκετά σημεία όπου υπάρχουν Si και Al εντοπίζονται ίχνη Cl, K και Na.

Περιοχή περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με λίγες μαύρες επικαθίσεις – Δείγμα Pa2



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pa2-b	1	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~	~
Pa2-b	2	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	3	~	*	*	~	***	~	~	****	~	~	~	~
	4	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	5	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~
	6	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pa2-c	1	~	~	*	~	***	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	*	~	***	~	~	****	~	•	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Ba
Pa2-h	1	~	~	*	~	•	~	•	****	~	~	~	~
	2	*	**	***	~	*	•	•	****	~	*	~	~
	3	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα Pa2 αποτελεί το δείγμα διάγνωσης στην περιοχή της καθαρά αποπλυμένης επιφάνειας. Όπως και στα προηγούμενα δείγματα διάγνωσης, δεν διακρίνεται γυψοποιημένη ζώνη κατά μήκος της επιφάνειας, αλλά τοπικά εμφανίζονται ρηγματώσεις πάχους μέχρι 20μm που πληρώνονται από γύψο. Αυτά τα κοκκώδη συσσωματώματα αποτελούνται από κρυστάλλους μικρής διαμέτρου (2-3μm).

Στην επιφάνεια του ασβεστίτη παρατηρούνται διάκενα, αποκολλημένοι κόκκοι, διακλάσεις διαφόρων μηκών που σχηματίζουν την έντονη διαβρωμένη εικόνα του δείγματος. Στο σώμα του μαρμάρου δεν ανιχνεύεται παρουσία S.

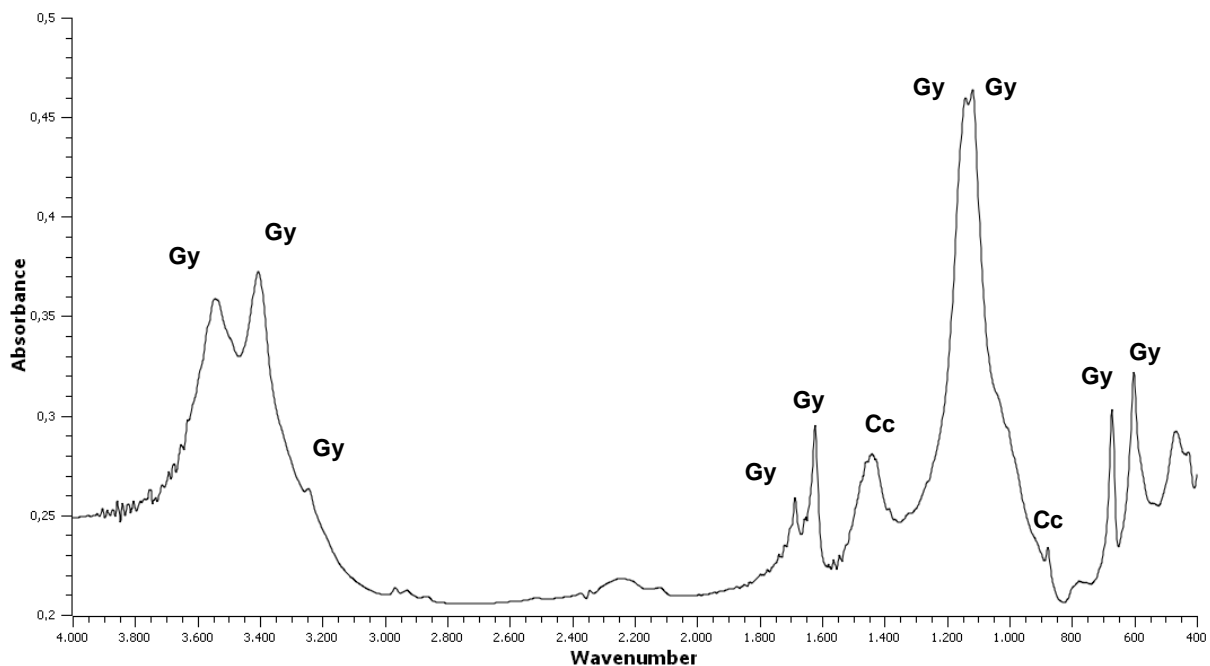
Η ανάλυση δείχνει ίχνη Mg σε αρκετούς κρυστάλλους του ασβεστίτη. Υπάρχουν τα στοιχεία Si και Al σε χαμηλή περιεκτικότητα σε αναλύσεις μέσα σε περιοχές όπου υπάρχει γύψος. Το Si εντοπίστηκε και σε δύο αναλύσεις σε κόκκους που βρίσκονται στην επιφάνεια το δείγματος. Ακόμη, εντοπίστηκε κόκκος αργιλοπυριτικού ορυκτού (Εικ.Pa2-h: EDX 2), με παρουσία Mg και Fe.

5.2.2.4 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier

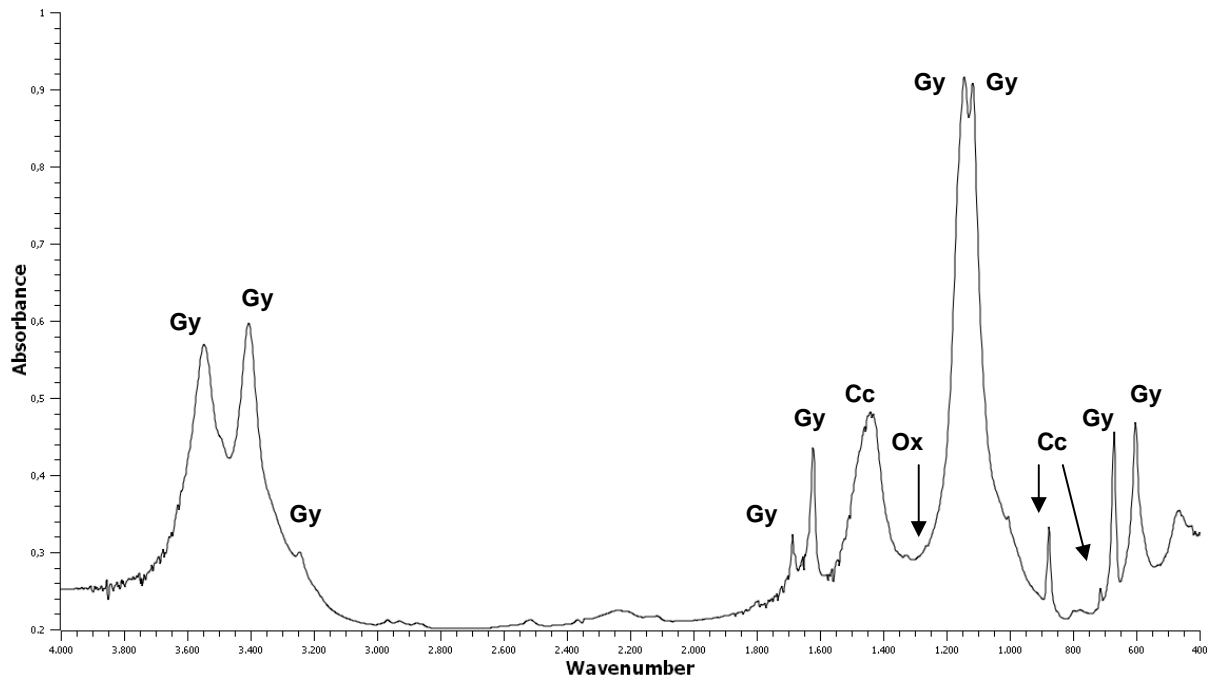
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier που έλαβαν χώρα σε δείγματα σκόνης που ελήφθησαν από τις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, στο πλαίσιο της διάγνωσης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς.

Υπενθυμίζεται δε, ότι τα φάσματα που προέκυψαν είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (η ένταση των φασματικών κορυφών αντιστοιχεί στη συγκέντρωσή τους στο δείγμα - ημιποσοτική ανάλυση), αφού από κάθε δείγμα ζυγίστηκε 1mg και κατόπιν αναμίχθηκε με 200mg KBr για την κατασκευή των προς μέτρηση δισκίων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε φούρνο κενού στους 30 με 40°C για 48 ώρες.

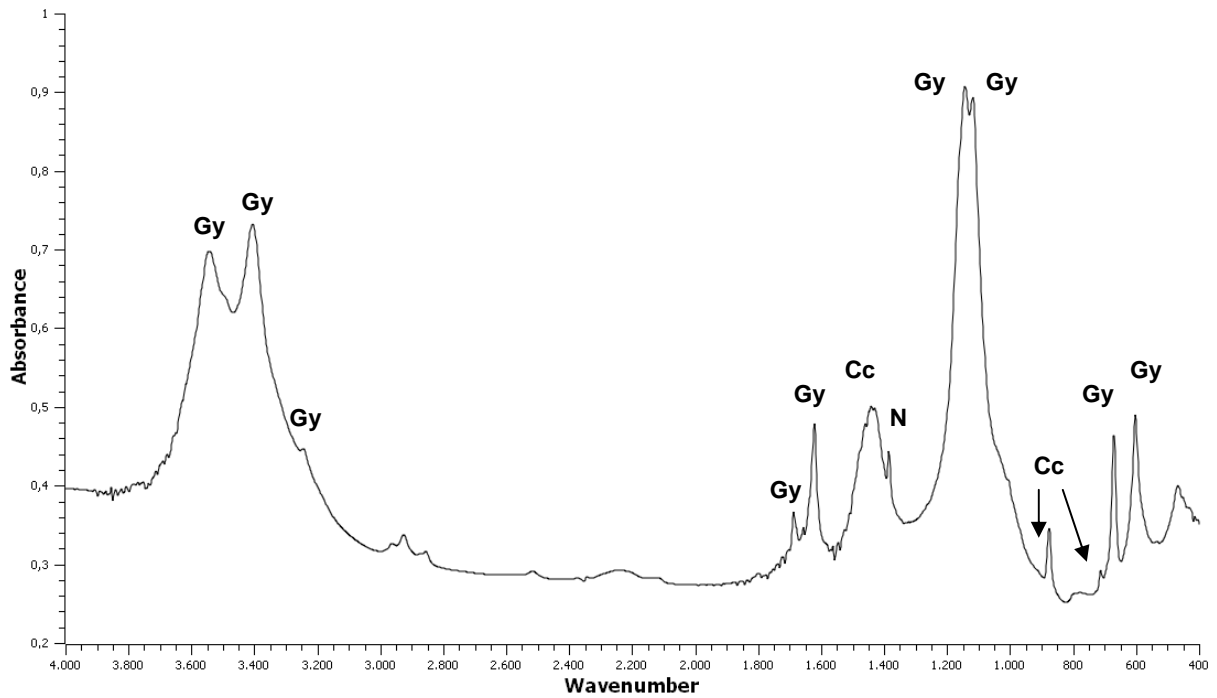
Συνολικά ελήφθησαν 6 δείγματα: 2 δείγματα από την περιοχή της επιφανειακά εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας (κωδικοί Pm1 και Pm1a), 1 δείγμα από την περιοχή της συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας (κωδικός Pm2), 1 δείγμα από την περιοχή με τις έντονες μαύρες επικαθήσεις που προστατεύεται μερικώς από το νερό της βροχής (κωδικός Pma), 1 δείγμα από την περιοχή με λιγότερες μαύρες επικαθήσεις που προστατεύεται μερικώς από το νερό της βροχής (κωδικός Padf), καθώς και 1 από την σχεδόν αποπλυμένη περιοχή, όπου είναι πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής (κωδικός Pa2).



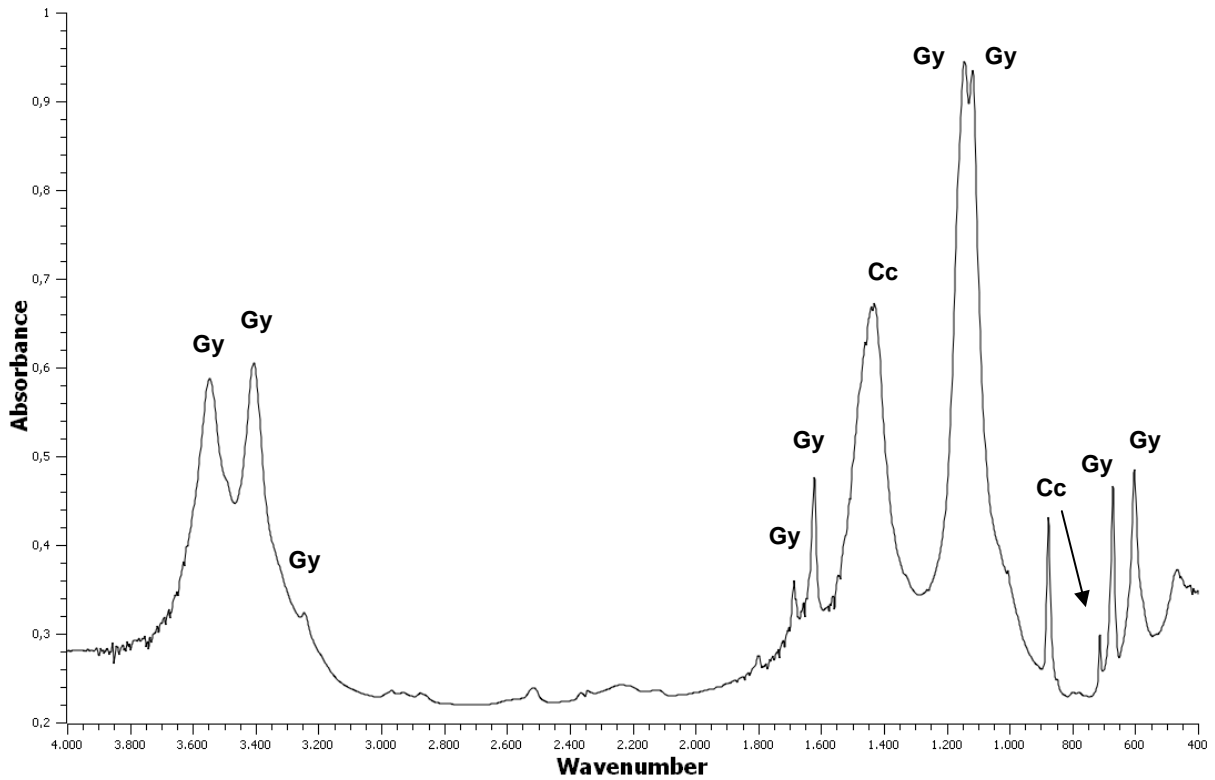
Εικ. 5.2.2.4.1: Φάσμα δείγματος της περιοχής της επιφανειακά εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας (κωδικός Pm1)



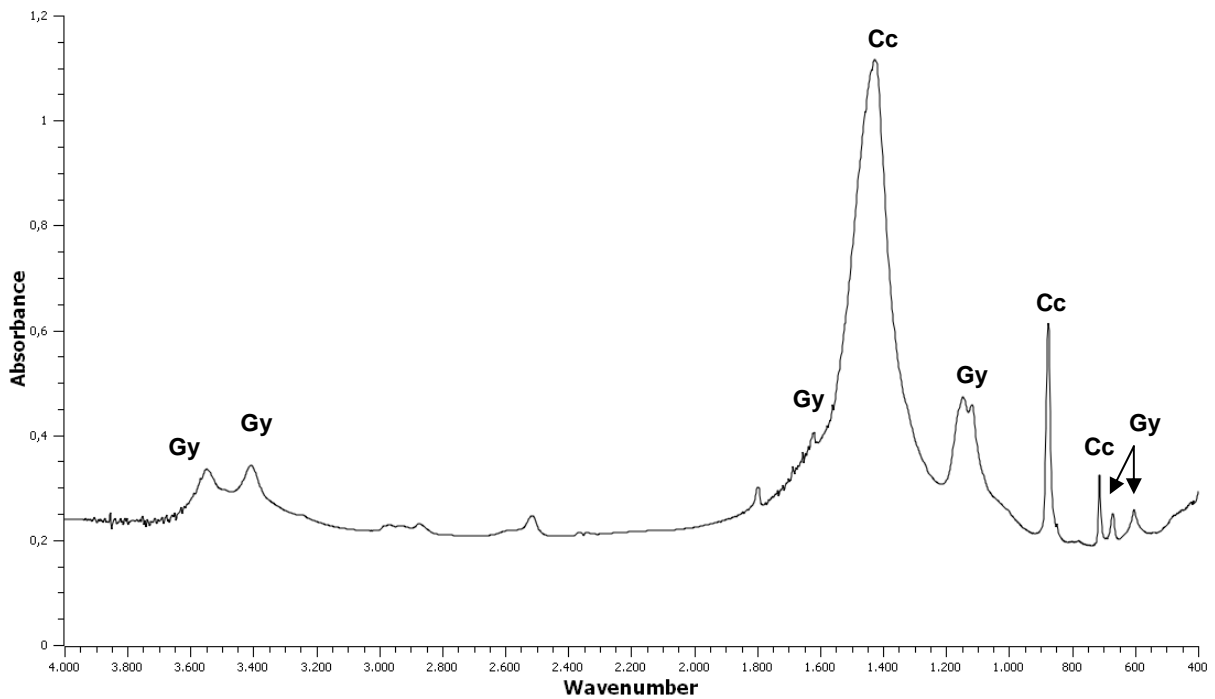
Εικ. 5.2.2.4.2: Φάσμα δείγματος της περιοχής της επιφανειακά εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας (κωδικός Pm1a)



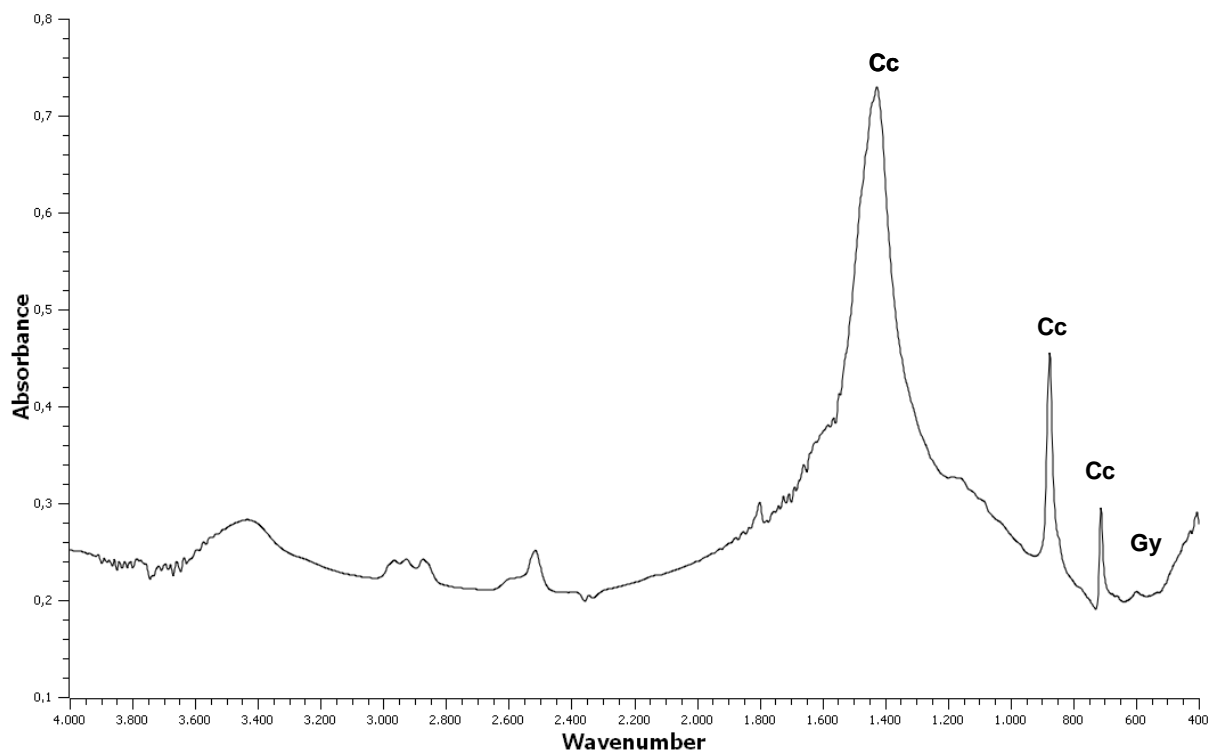
Εικ. 5.2.2.4.3: Φάσμα δείγματος της περιοχής της συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας (κωδικός Pm2)



Εικ. 5.2.2.4.4: Φάσμα δείγματος της περιοχής έντονων μαύρων επικαθήσεων που προστατεύεται μερικώς από το νερό της βροχής (κωδικός Pma)



Εικ. 5.2.2.4.5: Φάσμα δείγματος της περιοχής με λιγότερες μαύρες επικαθήσεις που προστατεύεται μερικώς από το νερό της βροχής (κωδικός Padf)



Εικ. 5.2.2.4.6: Φάσμα δείγματος από την σχεδόν αποπλυμένη περιοχή, όπου είναι πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής (κωδικός Pa2)

Πίνακας 5.2.2.4: Χαρακτηριστικές συχνότητες των ενώσεων που αναγνωρίζονται στα εξεταζόμενα φάσματα

Ενώσεις	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_9	ν_{11}	ν_{12}	ν_{H_2O}	δ_{H_2O}	Αναφορές
Γύψος, (Gy) $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1006w	492w	1142vs	606s				3548s	1685m	[188]
		413w	1118vs	674s				3408s	1626ms	
								3250s		
Νιτρικό Κάλιο, (N), KNO_3		824w	1385vs							[188]
Οξαλικό Ασβέστιο, (Ox) $CaC_2O_4 \cdot H_2O$					1620s	1316s,sp	782s		1650ms	[190]
Ασβεστίτης, (Cc), $CaCO_3$		877s,sp	1435s,b	712w						[189]

s=ισχυρή, w=ασθενής, m=μέτρια, sp=οξεία, b=πλατιά

Όπως διαπιστώνεται από τις παραπάνω μετρήσεις, τα κύρια συστατικά των ληφθέντων δειγμάτων είναι ο γύψος και ο ασβεστίτης. Παρατηρείται δε, βαθμιαία μείωση της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε γύψο και αντίστοιχη αύξηση σε ασβεστίτη ανάλογα με το βαθμό έκθεσης της εκάστοτε επιφάνειας στο νερό της βροχής. Έτσι τα δείγματα Pm1, Pm1a και Pm2, που προέρχονται από επιφάνειες που προστατεύονται πλήρως από τη βροχή, παρουσιάζουν τυπικά φάσματα φαιόμαυρων κρουστών, όπου ο γύψος είναι το κύριο συστατικό τους. Επιπλέον, τα δείγματα Pm1a και Pm2 εμφανίζουν τη χαρακτηριστική

κορυφή του οξαλικού ασβεστίου και του νιτρικού καλίου αντιστοίχως. Στο φάσμα του δείγματος Pma, της περιοχής έντονων μαύρων επικαθήσεων που προστατεύεται μερικώς από το νερό της βροχής, παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του ασβεστίτη, ενώ κύριο συστατικό του δείγματος παραμένει ο γύψος. Στο φάσμα του δείγματος Padf, από την περιοχή με τις λίγες μαύρες επικαθήσεις, ο ασβεστίτης είναι το κύριο συστατικό με παρουσία γύψου, ενώ στην σχεδόν αποπλυμένη περιοχή ο γύψος παρουσιάζεται σε ίχνη και ο ασβεστίτης είναι το κύριο συστατικό, (δείγμα Pa2).

Όσον αφορά στις χαρακτηριστικές συχνότητες των ενώσεων που αναγνωρίζονται στα εξεταζόμενα φάσματα (β.λ. και πίνακα 5.2.2.4) συμπεραίνεται ότι:

Ο ασβεστίτης παρουσιάζει D_3 συμμετρία και έχει τρεις ενεργούς τύπους δόνησης. Παρατηρούμε σταθερά στα εξεταζόμενα φάσματα τη συμμετοχή των ανθρακικών ανιόντων του ασβεστίτη, μέσω της παρουσίας μιας κορυφής ισχυρής έντασης και σχετικά ευρείας, $\nu_3 = 1435 \text{ cm}^{-1}$, μιας μέτριας έντασης και οξείας κορυφής $\nu_2 = 876 \text{ cm}^{-1}$, και μιας ασθενούς έντασης και οξείας κορυφής $\nu_4 = 712 \text{ cm}^{-1}$. Η ν_3 είναι η δόνηση τάσης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη, ενώ οι ν_2 and ν_4 είναι οι δονήσεις κάμψης του, [189].

Ο γύψος παρουσιάζει C_2 συμμετρία και τέσσερις ενεργούς τύπους δόνησης. Σε όλα τα εξεταζόμενα φάσματα (εκτός από το Pa2) παρατηρούμε την παρουσία των θειικών ανιόντων του γύψου μέσω της εμφάνισης δύο κορυφών πολύ ισχυρής έντασης $\nu_3 = 1142 \text{ cm}^{-1}$ και $\nu_3 = 1118 \text{ cm}^{-1}$, καθώς και δύο κορυφών ισχυρής έντασης $\nu_4 = 606 \text{ cm}^{-1}$ και $\nu_4 = 674 \text{ cm}^{-1}$. Οι ν_3 αποτελούν τις δονήσεις τάσης του θειικού ανιόντος του γύψου, ενώ οι ν_4 αποτελούν τις δονήσεις κάμψης του θειικού ανιόντος του γύψου.

Σε γενικές γραμμές το κρυσταλλικό νερό (ή μόρια νερού πλέγματος) απορροφά περί τα $3550\text{-}3200 \text{ cm}^{-1}$ (αντισυμμετρική ν_{as} και συμμετρική ν_s δόνηση τάσης της ομάδας -OH) και περί τα $1600\text{-}2600 \text{ cm}^{-1}$ (δόνηση κάμψης H-OH) [188]. Συνεπώς, σε όλα τα φάσματα που εμφανίζεται ο γύψος παρατηρούνται τρεις κορυφές ισχυρής έντασης που αποδίδονται στην $\nu_{as}(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3548 cm^{-1}], $\nu_s(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3410 cm^{-1}] και $\nu_s(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3250 cm^{-1}] των δύο κρυσταλλικών νερών του γύψου. Παράλληλα, παρατηρούνται μία μεσαία προς ισχυρής έντασης κορυφή στους 1626 cm^{-1} , καθώς και μια μεσαίας έντασης κορυφή στους 1685 cm^{-1} που αποδίδονται στις δονήσεις κάμψης H-OH των δύο κρυσταλλικών νερών του γύψου.

Στο φάσμα Pa2 η μέτριας έντασης και ευρεία ταινία περί τα 3450 cm^{-1} αποδίδεται στη δόνηση τάσης $\nu(\text{OH})$ του H_2O . Το γεγονός ότι η κορυφή αυτή είναι ευρεία υποδηλώνει το σχηματισμό δεσμών υδρογόνου αλλά και προσρόφηση υγρασίας και πιθανότατα οφείλεται στην πολύ μικρή ποσότητα γύψου (ίχνη), τα οποία προσδιορίζονται από την μικρής έντασης κορυφή στα 602 cm^{-1} που υποδηλώνει την παρουσία του θειικού ανιόντος του γύψου (ν_4 δόνηση κάμψης).

Επιπλέον, οι μικρής έντασης κορυφές στα $2930\text{-}2870 \text{ cm}^{-1}$ μπορούν να αποδοθούν ως $\nu_{as}(\text{C-H})$ και $\nu_s(\text{C-H})$ των κορεσμένων υδρογονανθράκων, [172].

Η αναγνώριση του νιτρικού καλίου στο φάσμα Pm2, βασίζεται στην παρουσία της ισχυρής έντασης κορυφής στα 1385 cm^{-1} (ν_3 αντισυμμετρική δόνηση τάσης N-O των νιτρικών ανιόντων), [188].

Τέλος, η αναγνώριση του οξαλικού ασβεστίου στο φάσμα Pm1a, βασίζεται στην παρουσία της οξείας κορυφής στα 1320 cm^{-1} περίπου (ν_{11} συμμετρική δόνηση τάσης O-C-O), [190].

5.2.2.5 Συμπεράσματα – Χαρακτηρισμός των υλικών και διάγνωση της φθοράς

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της οπτικής μικροσκοπίας, της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, καθώς και της φασματοσκοπία υπεράυθρου με μετασχηματισμό Fourier, εξάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα σε σχέση με το χαρακτηρισμό του υποστρώματος των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, καθώς και για τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς:

- Το υπόστρωμα των αρχιτεκτονικών επιφανειών χαρακτηρίζεται ως πεντελικό μάρμαρο, συμφωνώντας με τα ιστορικά βιβλιογραφικά δεδομένα του αρχείου της ΕΒΕ. Παρουσιάζει δε, σε πολλά σημεία μικρορωγμές που οφείλονται στην έντονη κόπωση του υλικού.
- Παρουσιάζονται δύο διαφορετικού τύπου **φαιόμαυρες κρούστες** στην περιοχή της αρχιτεκτονικής επιφάνειας που προστατεύεται από τη βροχή από υπερκείμενο γείσο. Η πρώτη (χαρακτηριζόμενη ως εύθρυπτη και χωροθετημένη πιο ψηλά, ακριβώς κάτω από το γείσο) εμφανίζει πορώδη και ρηγματωμένη επιφανειακή μορφολογία, καθώς και μέσο συνολικό πάχος 50μm από όπου το μέσο πάχος του μικρό-κρυσταλλικού και κρυστοκρυσταλλικού γύψου είναι στα 20μm. Το υπόλοιπο τμήμα της κρούστας συνίσταται σε αδροκρυσταλλικό γύψο, μαύρες επικαθίσεις και επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Επιπλέον, προκύπτει από τις μετρήσεις FTIR η παρουσία οξαλικών αλάτων.
- Η δεύτερη (χαρακτηριζόμενη ως συνεκτική και χωροθετημένη 20 με 30 πόντους κάτω από το γείσο), εμφανίζει λεία επιφανειακή μορφολογία, καθώς και μέσο συνολικό πάχος 80μm από όπου το μέσο πάχος του μικρό-κρυσταλλικού και κρυστοκρυσταλλικού γύψου είναι στα 30μm. Το υπόλοιπο τμήμα της κρούστας συνίσταται σε αδροκρυσταλλικό γύψο, μαύρες επικαθίσεις και επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Επιπλέον, προκύπτει από τις μετρήσεις FTIR η παρουσία νιτρικών αλάτων.
- Στην περιοχή της αρχιτεκτονικής επιφάνειας που προστατεύεται μερικώς από τη βροχή λόγω του υπερκείμενου γείσου, παρουσιάζεται ο τύπος φθοράς των **περικρυσταλλικών ρηγματώσεων του μαρμάρου** σε διαβαθμίσεις, όσον αφορά στην εμφανιζόμενη ποσότητα των μαύρων επικαθίσεων. Η επιφανειακή μορφολογία του τύπου φθοράς του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου συνίσταται στη διάκριση των περατωπικών ορίων των κόκκων ή των συσσωματωμάτων των κόκκων του μαρμάρου, τα οποία διαγράφονται εντονότερα λόγω της παρουσίας των μαύρων επικαθίσεων. Περιμετρικά των κόκκων του ασβεστίτη αναπτύσσονται ρηγματώσεις και μικρο-ρωγμές μέσου μήκους 50μm, οι οποίες στην περιοχή των έντονων μαύρων επικαθίσεων είναι πληρωμένες με μικρο- και κρυστοκρυσταλλικό γύψο, ενώ κατά τόπους αναπτύσσεται στρώμα γύψου μέσου πάχους 15μm. Στην περιοχή των λίγων μαύρων επικαθίσεων οι ρηγματώσεις περιμετρικά των κόκκων του ασβεστίτη έχουν μέσο μήκος τα 175μm και είναι πληρωμένες με γύψο κατά το ήμισυ και λιγότερο, ενώ δεν παρουσιάζεται γυψοποιημένο στρώμα επιφανειακά. Καθίσταται σαφές ότι όσο η περιοχή εκτίθεται περισσότερο στη βροχή (δηλ. βρίσκεται πιο μακριά από το γείσο), τόσο μειώνονται οι εμφανιζόμενες μαύρες επικαθίσεις, αυξάνεται το μήκος των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων, μειώνεται στο ποσοστό πλήρωσής τους από το γύψο και συνεπώς μειώνεται η επιφανειακή συνοχή της.

Βάσει αυτών των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, έλαβε χώρα επιλογή εκλεκτικών επεμβάσεων καθαρισμού όσον αφορά στην απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων και των γυψοποιημένων ζωνών (β.λ. κεφ. 1.3). Αυτές οι επεμβάσεις καθαρισμού παρουσιάζονται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

5.3 Λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος – Πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού - Δειγματοληψία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες έλαβαν χώρα οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Περιγράφονται οι μέθοδοι και τα υλικά καθαρισμού που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μία από αυτές, καθώς και τα δείγματα που λήφθηκαν για την αποτίμησή τους.



(α)

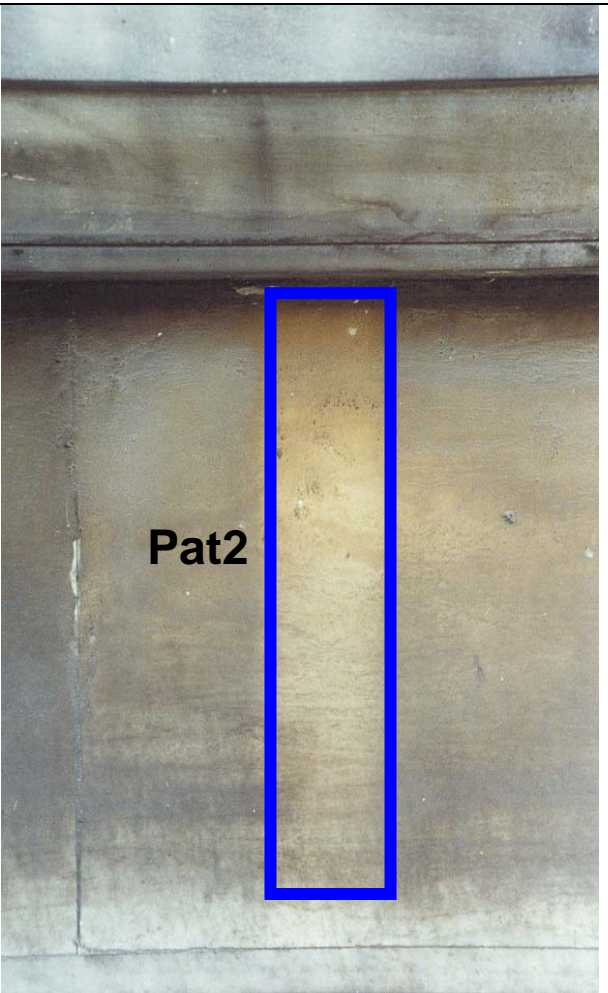
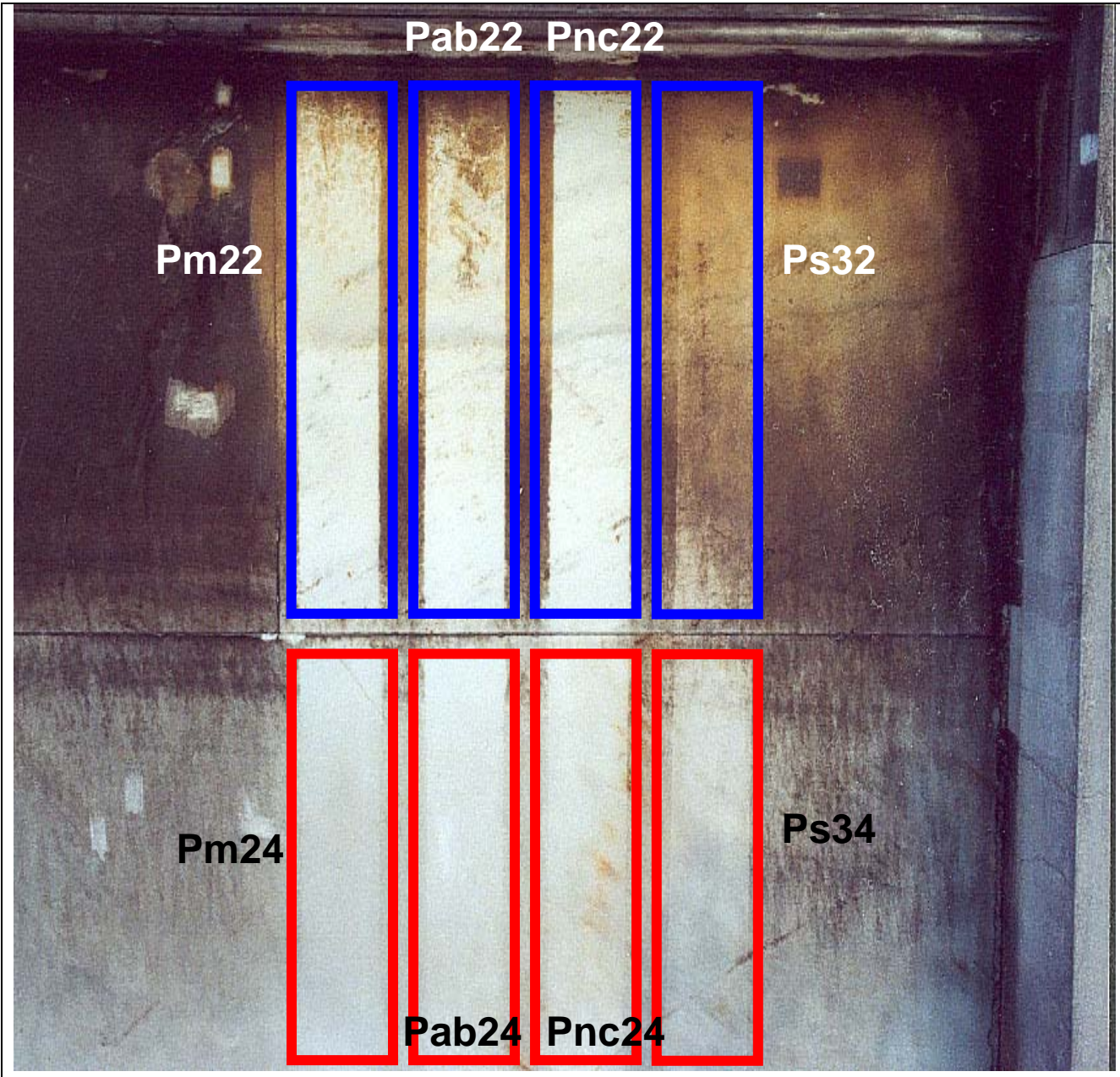


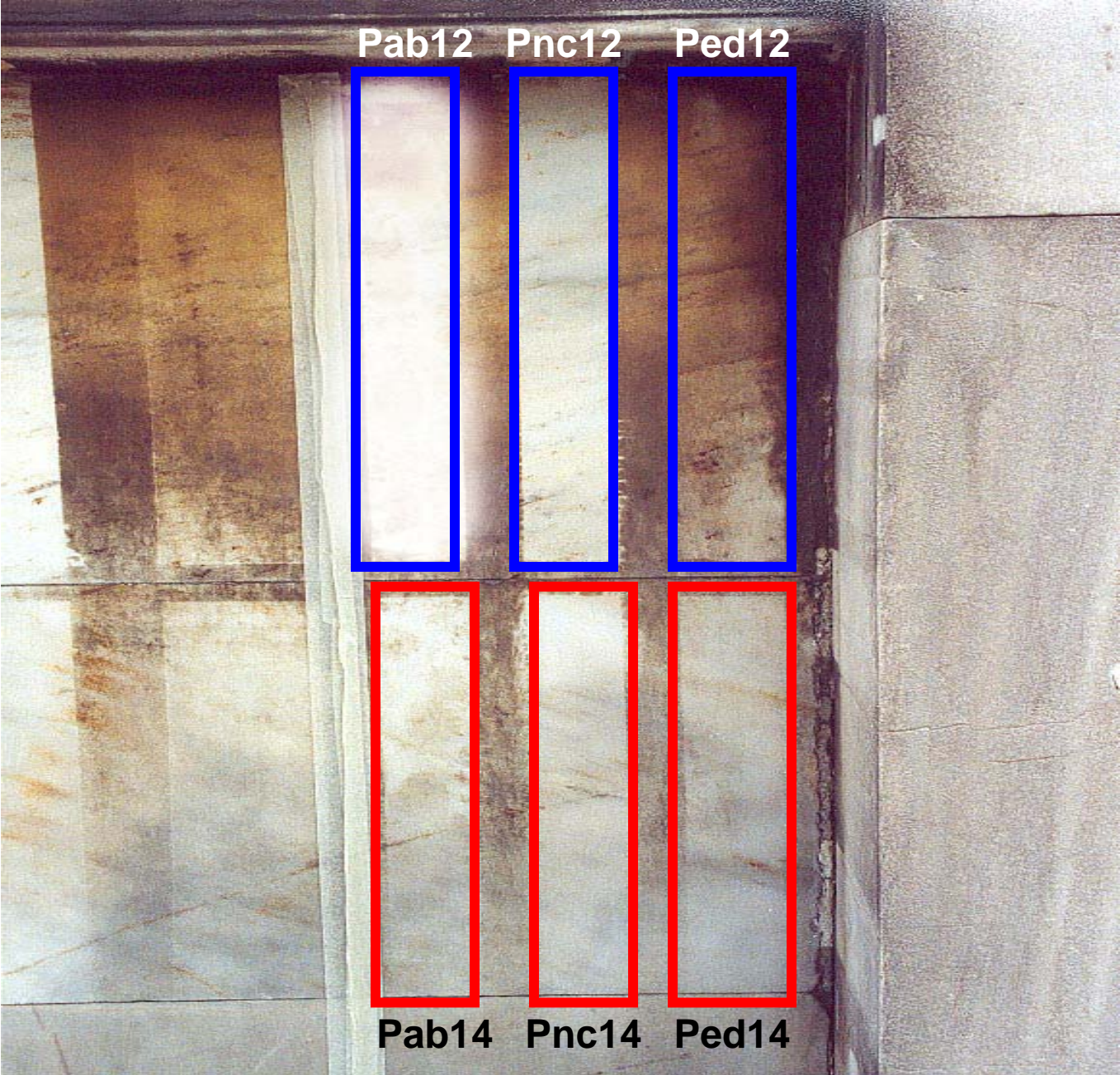
(β)



(γ)

(α) Τμήμα της βόρειας όψης όπου τοποθετήθηκε ικρίωμα για να λάβουν χώρα η διαγνωστική μελέτη, οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού και η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού. (β) Η επιφάνεια στην οποία έλαβαν χώρα η διαγνωστική μελέτη, οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού και η μελέτη αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού. Μακροσκοπικά, δείχνει να παρουσιάζει τους τύπους φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας και των αποπλυμένων επιφανειών. (γ) Η επιφάνεια μετά την εφαρμογή απιονισμένου νερού και μαλακής βούρτσας. Μερική απομάκρυνση τμήματος της επιφανειακά εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας στο Λίθο 1 (πάνω μέρος της εικόνας).





ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ρ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (cm ²)	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ρ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (cm ²)	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
	Pm22	744	Πάστα Mora	2h		Pm24	671	Πάστα Mora	1:30h
	Pab22	744	Πάστα AB57	2h		Pab24	671	Πάστα AB57	1:30h
	Pnc22	744	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.)	2h		Pnc24	671	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.)	1:30h
	Ps32	744	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό	3:30 h		Ps34	671	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό	3h
	Pat2	732	ατομικό νερό, διάμετρος ακροφυσίου 1.6mm	16 min ρυθμός ροής 105ml/min κατανάλωση 2lt απιονισμένου νερού.		Pab14	499	Πάστα AB57	1h
	Pab12	553	Πάστα AB57	1h		Pnc14	499	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.)	1h
	Pnc12	553	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.)	1h		Ped14	499	Πάστα EDTA 3% κ.β.	1h
	Ped12	553	Πάστα EDTA 3% κ.β.	1h					

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ρ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ρ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	Pm22	Πάστα Mora, 2h	Pm22c	στερεό		Pm24	Πάστα Mora, 1:30h	Pm24	στερεό
			Pm23	στερεό					
	Pab22	Πάστα AB57, 2h	Pab22LEF	στερεό		Pab24	Πάστα AB57, 1:30h	Pab24	στερεό
	Pnc22	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 2h	Pnc22	στερεό		Pnc24	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1:30h	Pnc24	στερεό
			Pnc23	στερεό					
	Ps32	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30 h	Ps32	στερεό		Ps34	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3h	Ps34	στερεό
			Ps33	στερεό					
	Pat2	ατομικό νερό	Pat2	στερεό		Pab14	Πάστα AB57, 1h	Pab14	στερεό
	Pab12	Πάστα AB57, 1h	Pab12	στερεό		Pnc14	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1h	Pnc14	στερεό
Pnc12	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1h	Pnc12	στερεό	Ped14	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	Ped14	στερεό		
Ped12	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	Ped12	στερεό						

5.4 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου – Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος

5.4.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Στο πλαίσιο της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, στις περιοχές των μαύρων κρουστών όπου είναι προστατευμένες από το νερό της βροχής. Μελετάται κυρίως η υφή των κόκκων του πεντελικού μαρμάρου, η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των τύπων φθοράς, καθώς και η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των επεμβάσεων καθαρισμού. Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.



Π. Mora 2h, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



Π. Mora 2h, x25 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



AB57 2h, x50 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



AB57 2h, x50 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



10% (NH₄)₂CO₃ 2h, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



10% (NH₄)₂CO₃ 2h, x50 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



Σηπιόλιθος και απιονισμένο νερό 3:30h x50 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



Σηπιόλιθος και απιονισμένο νερό 3h, x25 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



AB57 1h, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



AB57 1h, x25 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



10% (NH₄)₂CO₃ 1h, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



10% (NH₄)₂CO₃ 1h, x25 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



EDTA 3% 1h, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



EDTA 3% 1h, x50 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)



Ατομικό νερό, x25 (περιοχή εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας)



Ατομικό νερό, x25 (περιοχή συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας)

Από τις παραπάνω εικόνες καθίσταται σαφές ότι οι επεμβάσεις καθαρισμού του ατομικού νερού, του δινατριούχου άλατος του EDTA και του σηπιολίθου με απιονισμένο νερό δεν απομάκρυναν και τους δύο τύπους φαιόμαυρης κρούστας, κάτι το οποίο βέβαια ήταν εμφανές και μακροσκοπικά.

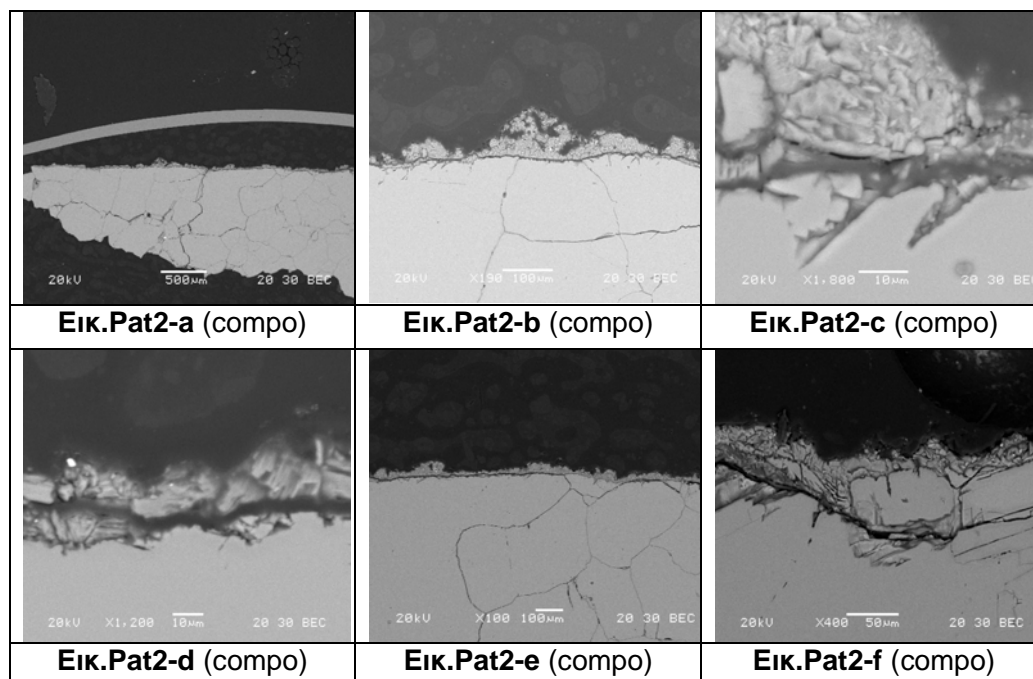
Οι δίωρες εφαρμογές της πάστας Moga, AB57 και (NH₄)₂CO₃ αποδίδουν επιφάνειες όπου κατά τόπους οι κόκκοι του μαρμάρου είναι εμφανείς υποδηλώνοντας ότι έχει λάβει χώρα απώλεια αυθεντικού υλικού. Μάλιστα κατά τόπους στην περιοχή της εύθρυπτης φαιόμαυρης κρούστας υπάρχουν κυκλικά ή επιμήκη υπολείμματα της κρούστας.

Οι μονόωρες εφαρμογές της πάστας AB57 και του (NH₄)₂CO₃ δείχνουν να αποδίδουν επιφάνειες καλύτερης μορφολογικής υφής, αφού οι κόκκοι του μαρμάρου δεν είναι εμφανείς μετά την εφαρμογή τους.

5.4.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ στα δείγματα που ελήφθησαν μετά την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών του κτιρίου της ΕΒΕ.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ατομικό νερό



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pat2-b	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	2	~	~	~	•	~	****	~	•	***		~	~
	3	~	~	*	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	4	~	•	*	*	~	****	~	~	***	~	~	~

Pat2-b	5	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	~	•	*	*	~	****	~	•	***	*	~	~
	7	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pat2-c	1	~	~	~	~	~	~	~	~	***	~	~	~
	2	~	~	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	~	~	~	•	•	•	~	~	****	~	~	~
	4	~	~	***	****	~	•	~	***	•	~	~	~
	5	~	~	~	•	~	****	•	•	***	~	~	~
	6	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pat2-d	1	*	~	*	**	~	**	~	~	**	~	****	~
	2	~	~	*	*	~	****	•	•	***	•	~	~
	3	~	***	***	***	~	•	~	~	•	***	~	~

Pat2-d	4	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	5	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	6	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	7	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα Pat2 έχει καθαριστεί με την μέθοδο του ατομικού νερού. Παρατηρούμε ότι το πάχος της γυψοποιημένης επιφάνειας έχει μειωθεί εμφανώς (κυμαίνεται από 10 ως 50 μm), αλλά έχει παραμείνει τμήμα της σε όλο το μήκος του δείγματος.

Όλη η περιοχή του ασβεστίτη φαίνεται καταπονημένη καθώς έχουν δημιουργηθεί λεπτές ρηγματώσεις στα όρια των κρυστάλλων. Εφόσον, όμως, αντίστοιχή εικόνα της επιφάνειας του ασβεστίτη εμφανίζεται και στο δείγμα διάγνωσης της φθοράς (Δείγμα Pm1-Κεφ. 8.1), συμπεραίνουμε ότι η καταπόνηση της ασβεστιτικής επιφάνειας οφείλεται στις συνολικότερες διεργασίες που συντελούν στην φθορά του μαρμάρου και όχι στην συγκεκριμένη μέθοδο καθαρισμού.

Η γυψοποιημένη επιφάνεια διαχωρίζεται εμφανώς από την ασβεστιτική μάζα με μία ρηγμάτωση διαμέτρου 5μm. Ίχνη θείου ανιχνεύονται μέσα στο σώμα του ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 4μm (μετρούμενο από την διεπιφάνεια ασβεστιτικής-γυψοποιημένης περιοχής), υποδηλώνοντας ότι η γυψοποίηση του ασβεστίτη έχει προχωρήσει σε βάθος.

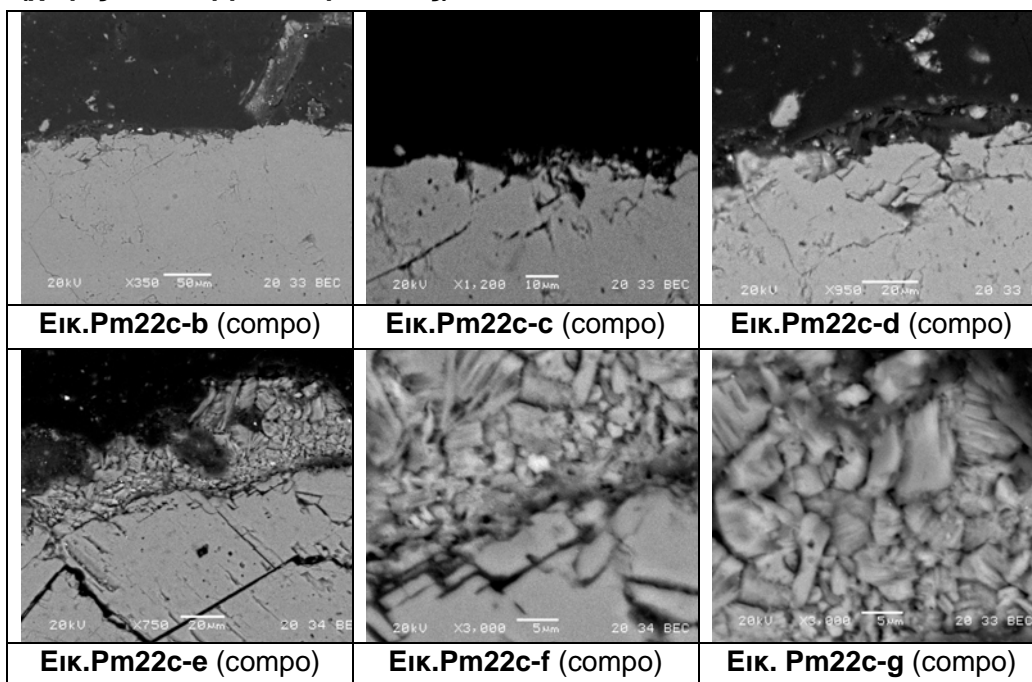
Σε ορισμένες περιοχές της γυψοποιημένης επιφάνειας μέχρι το βάθος των 50μm ανιχνεύονται Al και Si σε χαμηλές περιεκτικότητες, που προέρχονται από επικαθίσεις του περιβάλλοντος. Το Si εντοπίζεται σε ίχνη (μαζί με P) και σε κρύσταλλο ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 4μm (EDX 3, Εικόνα Pat2-c).

Από περιβαλλοντική επικαθιση προέρχεται και το οξείδιο του Zn, που φαίνεται ως λευκή περιοχή στην εικόνα Pat2-d. Το Mg σχεδόν απουσιάζει (βρίσκεται μόνο στο EDX 3, Εικόνα Pat2-d).

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα Moga

Μετά την επέμβαση καθαρισμού στη μεγάλη πάχους - εύθραπτη φαιόμαυρη κρούστα με πάστα Moga για 2 ώρες, ελήφθησαν δύο δείγματα: i) το Pm22c χωρίς υπολείμματα κρούστας, και ii) το Pm22r με υπολείμματα κρούστας.

Pm22c (χωρίς υπολείμματα κρούστας)



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22c-b	1	~	**	*	*	•	**	•	~	****	~	~	~
	2	**	•	*	*	~	~	*	*	****	~	~	~
	3	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22c-c	1	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	*	~	*	~	*	*	•	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22c-d	1	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
Pm22c-d	2	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	**	~	*	*	~	***	~	•	**	~	***	~
	5	~	*	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	6	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	7	~	~	~	~	*	~	~	~	~	****	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22c-e	1	~	~	~	*	~	****	•	•	***	~	~	~
	2	~	~	~	*	~	****	•	•	***	~	~	~
	3	~	~	•	*	~	****	•	•	***	~	~	~

	4	~	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22c-f	1	*	~	~	~	~	~	*	~	****	~	~	~
	2	**	*	*	*	~	**	**	**	***	~	~	~
Pm22c-f	3	~	~	~	~	~	•	~	~	****	~	~	~
	4	*	~	~	*	~	***	~	*	****	•	~	~
	5	~	*	~	*	~	~	•	•	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα Pm22c έχει καθαριστεί με πάστα Moga για 2 ώρες. Στην εικόνα με τη μικρότερη μεγέθυνση (x100, Εικ. Pm22c-a), διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του γύψου έχει απομακρυνθεί, ενώ τα υπολείμματα που έχουν απομείνει τοπικά κυμαίνονται σε πάχος από 5 ως 40μm. Οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη παρουσιάζουν αρκετές και έντονες ρηγματώσεις, προσδίδοντας μια εικόνα σημαντικής διάβρωσης στο σύνολο του δείγματος (Εικ. Pm22c-b, Pm22c-d).

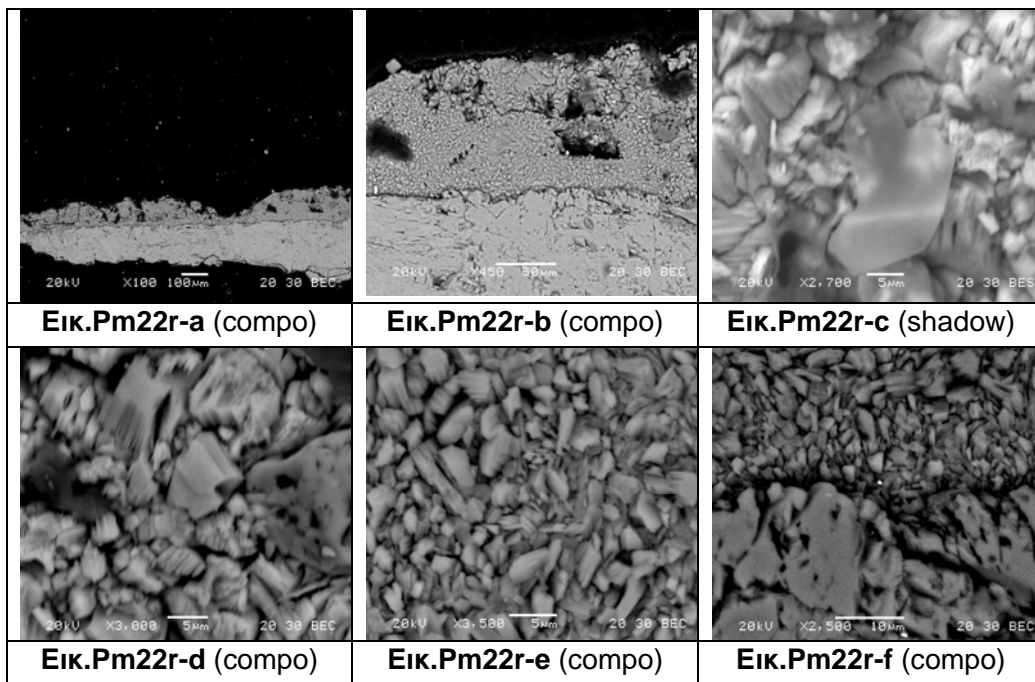
Στις εικόνες Pm22c-e, Pm22c-f και Pm22c-g, όπου εξετάζονται τμήματα περιοχών με συσσωματώματα κόκκων γύψου (υπολείμματα), παρατηρείται ότι οι κρύσταλλοι γύψου που βρίσκονται επιφανειακά έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος (διάμετρο έως 20μm σε σχέση με τους κρυστάλλους που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος (διάμετρο < 5μm). Επίσης, οι κρύσταλλοι γύψου που βρίσκονται στην επιφάνεια τείνουν να λάβουν ανά περιπτώσεις

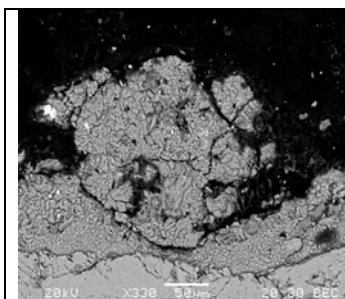
βελονοειδή μορφή, σε αντίθεση με τους υποκείμενους κρυστάλλους που έχουν μορφή πρισματική. Θείο ανιχνεύεται σε κρυστάλλους ασβεστίτη σε βάθος ως και 5μm κάτω από τις γυψοποιημένες επιφάνειες.

Η λευκή περιοχή αποτελείται από Zn και S σε υψηλά ποσοστά, και αποτελεί πιθανότατα κρύσταλλο σφαλερίτη (ZnS) (Εικ. Pm22c-d: EDX 4). Σε αρκετά σημεία, στους επιφανειακούς κόκκους του ασβεστίτη, υπάρχουν σημαντικά ποσοστά Mg (Εικ. Pm22c-b: EDX 1,2,3,4 / Pm22c-c: EDX 1,2 / Εικ. Pm22c-d: EDX 1,2,3,4,5,6 / Εικ. Pm22c-d: EDX 2), ενώ σε πολλές περιοχές στην γυψοποιημένη επιφάνεια εντοπίζονται Al και Si σε χαμηλές περιεκτικότητες, που οφείλονται σε επικαθίσεις σωματιδίων από το περιβάλλον. Το Si ανιχνεύεται σε χαμηλά ποσοστά σε κρύσταλλο ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 10μm.

Υπάρχουν αρκετά σημεία όπου υπάρχει παρουσία Na, K και Cl (Εικ. Pm22c-b: EDX 2 / Εικ. Pm22c-c: EDX 2, 4 / Εικ. Pm22c-f: EDX 1,2). Το K και το Cl βρίσκονται σε ιχνή σε αρκετά περισσότερα σημεία από ότι το Na. Το Na και το K αποτελούν πιθανότατα υπολείμματα της πάστας Mora.

ii) Pm22r (με υπολείμματα κρούστας)





Εικ. Pm22r-g (compo)

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22r-b	1	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	2	~	~	~	~	~	**	*	~	****	~	~	~
	3	*	~	~	~	~	*	*	~	****	~	~	~
	4	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	5	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22r-c	1	*	•	**	***	~	***	~	•	***	•	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22r-d	1	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
Pm22r-d	2	~	*	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pm22r-f	1	~	*	~	*	~	**	~	~	****	~	~	~
	2	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	~	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	5	~	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	6	~	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	7	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	8	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	9	*	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα αυτό έχει καθαριστεί, όπως και το προηγούμενο (Pm22c), με πάστα Mora για 2 ώρες. Σε αντίθεση όμως με το προηγούμενο, τα υπολείμματα της φαιόμαυρης κρούστας (γυψοποιημένης επιφάνειας) είναι σημαντικότερα: η κρούστα φαίνεται να μην έχει

απομακρυνθεί, καθώς ο γύψος φτάνει μέχρι και 150μm πάχος. Μέσα στη γυψοποιημένη μάζα εντοπίζεται κρύσταλλος ασβεστίτη διαμέτρου 20μm (Εικ. Pm22r-b: EDX 2,3).

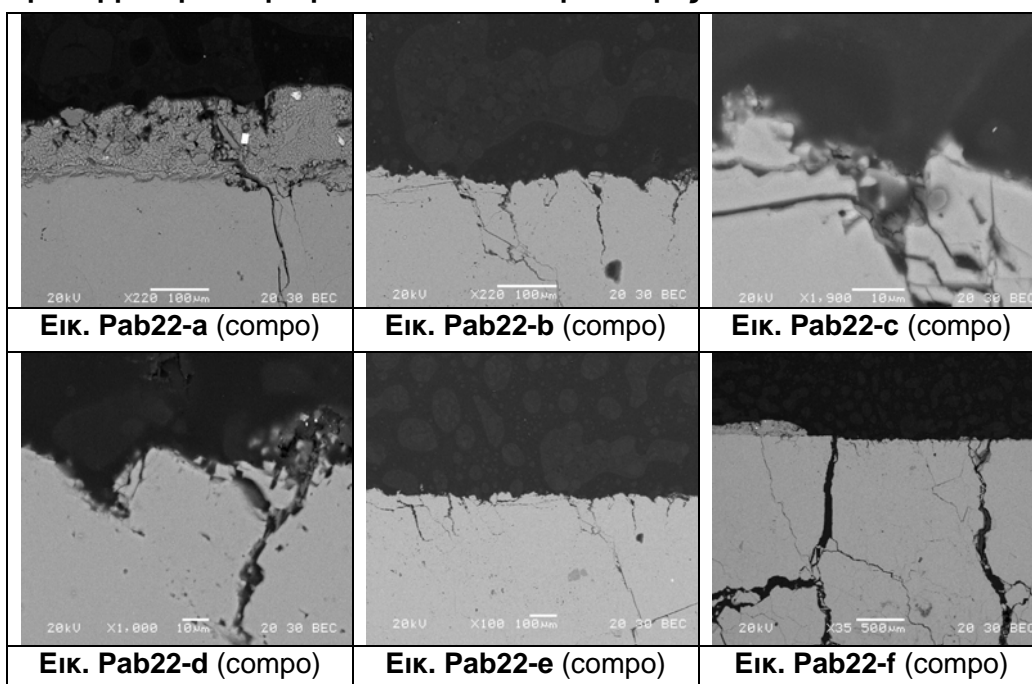
Η γυψοποιημένη επιφάνεια στο σύνολό της παρουσιάζει αρκετά κενά και ρηγματώσεις, που σημαίνει ότι η πάστα Mora έχει επιδράσει τοπικά. Υπάρχει S (σε ίχνη) σε κρυστάλλους ασβεστίτη σε βάθος 4μm (EDX 7, Εικ. Pm22r-f).

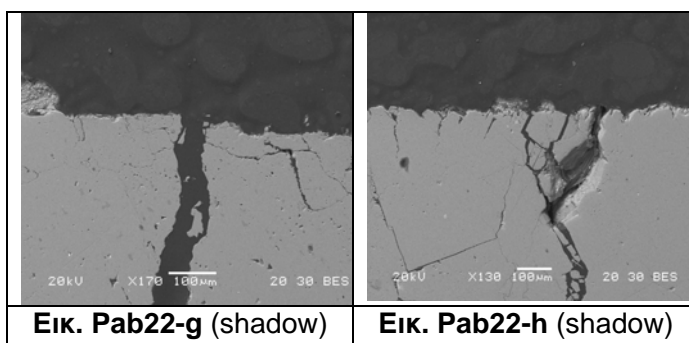
Οι κρύσταλλοι του γύψου έχουν μικρή διάμετρο (< 5μm) και όσο πιο κοντά βρίσκονται στην ασβεστιτική επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη συνοχή εμφανίζουν. Στην Εικόνα Pm22r-e φαίνονται διακρίνονται οι μικροκρύσταλλοι του γύψου. Όσο απομακρυνόμαστε από τον ασβεστίτη, οι κρύσταλλοι εμφανίζονται με μεγαλύτερο μέγεθος (διάμετρο έως 10μm).

Στην γυψοποιημένη επιφάνεια, σε όλο το βάθος, υπάρχουν σε χαμηλό ποσοστό Si και Al προερχόμενα από επικαθίσεις. Εξάιρεση αποτελεί το σημείο του EDX 1 (Εικ. Pm22r-c), όπου τα ποσοστά Si και Al είναι πολύ υψηλά (με αναλογία Si:Al ≈ 3:1) και πρόκειται για κρύσταλλο πυριτικού ορυκτού με φυλλώδες σχήμα, πιθανώς μαρμαρυγία. Ίχνη Si εντοπίζονται μέσα στην ασβεστιτική περιοχή σε βάθος 4μm.

Επίσης, υπάρχει Na σε χαμηλή περιεκτικότητα (Εικ. Pm22r-b:EDX 2 / Εικ. Pm22r-c: EDX 1 / Pm22r-f : EDX 9) στις ίδιες αναλύσεις όπου εντοπίζεται και Si. Σε μια ανάλυση εντοπίζεται K (Εικ. Pm22r-c: EDX 1).

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα AB57 για 2 ώρες





Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
	1	~	~	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~
Pab22-a	2	~	~	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~
	3	~	~	~	•	~	****	•	•	***	~	~	~
	4	~	*	~	*	•	•	~	~	****	~	~	~
	5	*	*	**	***	~	***	~	•	***	**	~	~
	6	*	~	*	**	*	*	*	*	*	****	~	~
	7	~	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~
Pab22-a	8	~	~	~	~	~	***	~	~	~	~	~	****
	9	~	*	*	****	~	~	~	~	~	*	~	~

	10	~	~	***	****	~	~	~	**	~	*	~	~
	11	~	•	*	**	~	***	~	•	***	~	~	~
	12	~	~	~	*	~	***	~	~	****	~	~	~

Pab22-a	13	~	~	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~
	14	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab22-b	1	~	•	•	*	~	*	*	~	****	~	~	~
	2	~	•	~	*	~	*	*	•	****	~	~	~
	3	~	•	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~
	4	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab22-c	1	~	*	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~

Pab22-c	4	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
---------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------	---	---	---

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab22-d	1	~	*	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	2	~	*	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	~	~	**	~	*	•	•	****	~	~	~
	6	~	•	~	*	~	*	•	•	****	~	~	~
	7	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	8	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	9	~	*	~	~	~	~	*	•	•	****	~	~
Pab22-d	10	~	•	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	11	~	***	~	•	~	~	•	•	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα AB57 για 2 ώρες. Τόσο η επιφάνεια όσο και το σύνολο του δείγματος δείχνουν ότι το μάρμαρο έχει καταπονηθεί ιδιαίτερα με τον καθαρισμό: κατακερματισμένες περιοχές με διακλάσεις ποικίλων μηκών, πολλές ρηγματώσεις μεγάλης διαμέτρου (μέχρι 100μm) που διατρέχουν όλο το δείγμα και, τέλος, αποκολλημένοι κόκκοι διαφόρων μεγεθών.

Επίσης, είναι εμφανή σε αρκετά σημεία τα υπολείμματα της γυψοποιημένης μάζας που κυμαίνονται από 30 έως και 150μm (Εικ. Pab22-a, Pab22-f). Χαμηλά ποσοστά έως και ίχνη S εντοπίζονται από τις στοιχειακές αναλύσεις σε κρυστάλλους ασβεστίτη μέχρι βάθους 15μm. Ακόμη, χαμηλά ποσοστά S ανιχνεύονται πλευρικά σε ρηγμάτωση (Εικ. Pab22-d) μέχρι το βάθος των 25 μm, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ορισμένα μεγάλα διάκενα που φαίνονται χαρακτηριστικά στις φωτογραφίες ήταν πριν τον καθαρισμό πληρωμένα με γύψο ο οποίος απομακρύνθηκε με την πάστα AB57 και του οποίου τα ίχνη εντοπίζουμε στις αναλύσεις.

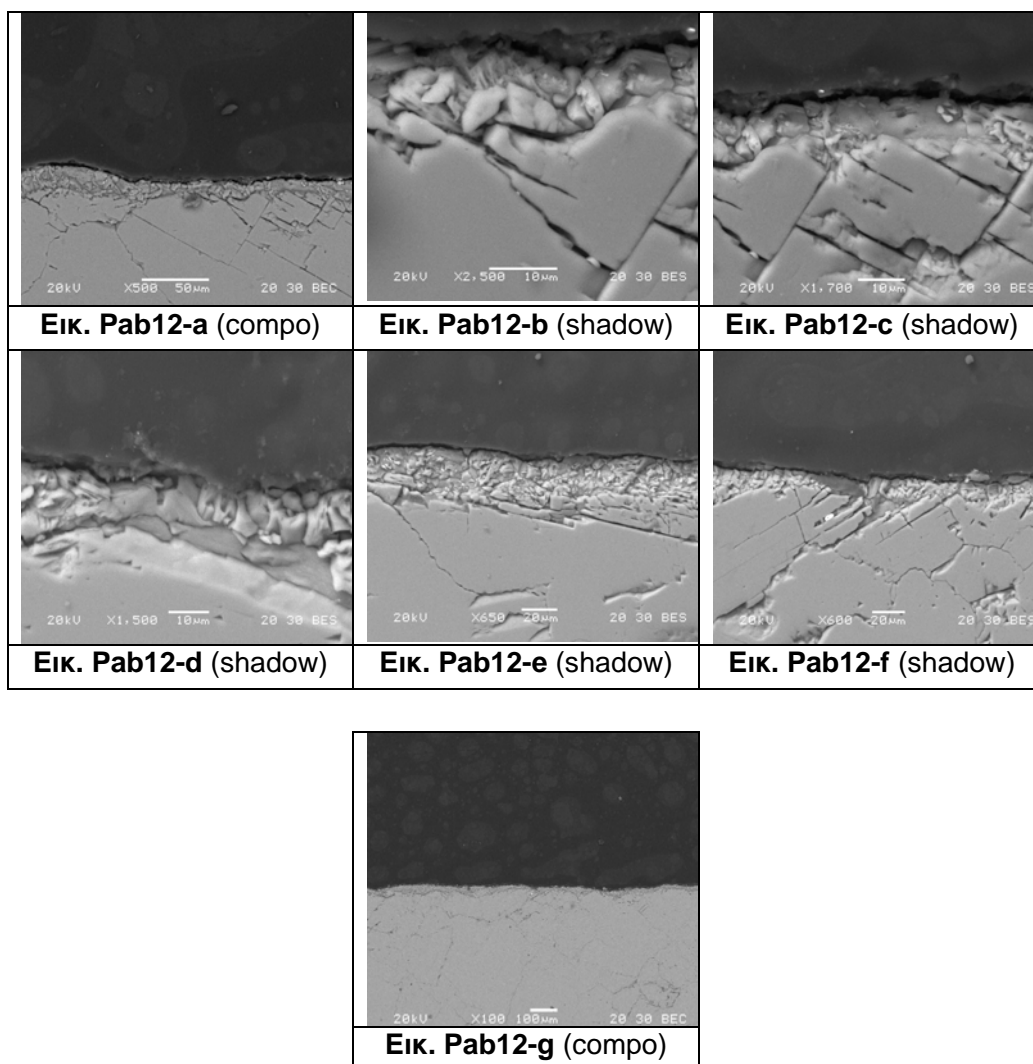
Στην εικόνα Pab22-a, μέσα στην γυψοποιημένη ζώνη, διακρίνονται λευκοί κρύσταλλοι. Ο κρύσταλλος που βρίσκεται σχεδόν επιφανειακά περιέχει υψηλό ποσοστό Fe και είναι πιθανώς οξειδίο που έχει μεταφερθεί από το περιβάλλον. Ο κρύσταλλος που βρίσκεται βαθύτερα περιέχει Ba και πρόκειται επίσης για επικάλυψη από το περιβάλλον.

Σε πολλές αναλύσεις ανιχνεύεται Mg σε χαμηλές περιεκτικότητες, το οποίο αποτελεί συστατικό του μαρμάρου. Επίσης, σε χαμηλές περιεκτικότητες εντοπίζεται Si και Al τόσο μέσα στη μάζα του γύψου όσο και σε κρυστάλλους ασβεστίτη. Στη δεύτερη περίπτωση, τα στοιχεία εντοπίζονται μέχρι σημαντικού βάθους (30μm), σε περιεκτικότητες που μειώνονται καθώς αυξάνεται το βάθος.

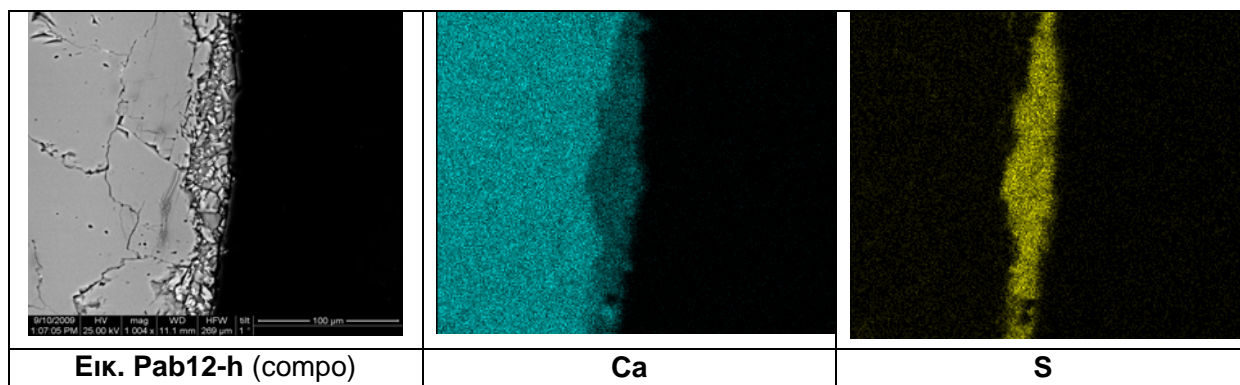
Ορισμένες αναλύσεις δίνουν αρκετή έως πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε Si και Al, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη αργιλοπυριτικών ορυκτών στην κρούστα (Εικ. Pab22-a: EDX 5, 6, 10), ή ακόμα και χαλαζία (Εικ. Pab22-a: EDX 9), μέσα στη γυψοποιημένη μάζα. Σε δυο αναλύσεις εντοπίζεται σε χαμηλή περιεκτικότητα Na, που αποτελεί στοιχείο των ορυκτών αυτών.

Στο γύψο, μια στοιχειακή ανάλυση (Εικ. Pab22-a: EDX 4) δίνει χαμηλό ποσοστό P, ενώ και σε άλλα σημεία εντοπίζονται ίχνη P. Ακόμα, υπάρχουν ίχνη K, Cl

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα AB57 για 1 ώρα



Στην παρακάτω εικόνα έλαβε χώρα χαρτογράφηση ασβεστίου (μπλε χρώμα) και θείου (κίτρινο χρώμα)



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab12-a	1	~	~	*	**	~	***	~	•	***	~	~	~
	2	~	~	~	•	~	****	•	•	***	~	~	~
	3	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	4	~	•	*	*	~	***	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	*	*	~	**	~	~	****	~	~	~
	6	~	~	~	~	~	**	~	~	****	~	~	~
Pab12-a	7	~	*	•	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	8	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab12-b	1	~	~	~	•	~	***	~	~	****	~	~	~
	2	~	•	~	•	~	***	•	•	****	~	~	~
	3	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	•	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~

	5	~	~	~	*	~	**	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab12-c	1	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	2	~	~	•	***	~	***	•	•	***	~	~	~
	3	~	~	*	**	~	****	~	*	***	*	~	~
	4	~	~	•	*	~	****	•	•	***	~	~	~
	5	~	~	•	*	~	***	•	•	****	~	~	~
Pab12-c	6	~	~	~	~	~	*	•	•	****	~	~	*
	7	~	~	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab12-d	1	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	2	~	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	3	~	•	•	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	*	~	~	****	~	~	~

	5	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

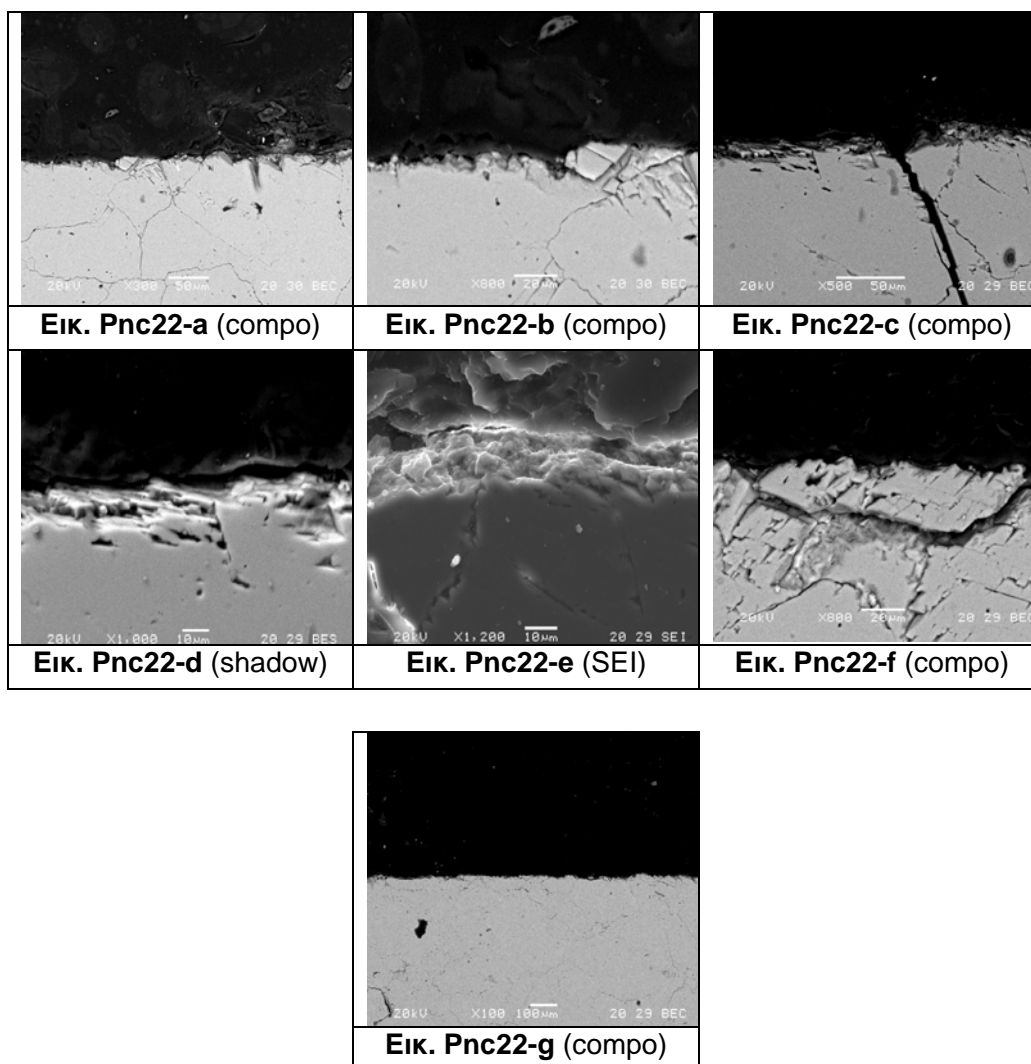
Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα AB57 για 1 ώρα. Είναι εμφανές ότι έχει μείνει υπόλειμμα συνεκτικής γυψοποιημένης επιφάνειας στο δείγμα, σημαντικού πάχους (5–20 μm). Οι περιοχές που αποτελούνται από μικροκρυσταλλικό γύψο φαίνονται χαρακτηριστικά στις εικόνες Pab12-a, Pab12-e, Pab12-f. Το σώμα του μαρμάρου είναι αρκετά διαβρωμένο, εμφανίζοντας σπασίματα και ρηγματώσεις μέχρι μεγάλο βάθος. Λόγω της ύπαρξης του μικροκρυσταλλικού γύψου στην επιφάνεια του δείγματος υποθέτουμε ότι δεν αποκολλήθηκαν κόκκοι ασβεστίτη. Επίσης, εντοπίστηκαν σημαντικά ποσοστά S και σε κόκκους ασβεστίτη που βρίσκονται κοντά στη διεπιφάνεια μαρμάρου – γύψου μέχρι το βάθος των 5 μm.

Επίσης, ανιχνεύθηκαν Si κατά κύριο λόγο και Al, δευτερευόντως, σε πολλά σημεία σε όλο το βάθος της γυψοποιημένης περιοχής. Τα στοιχεία αυτά στο συγκεκριμένο δείγμα εμφανίζονται και στην περιοχή του ασβεστίτη σε χαμηλά ποσοστά έως και ίχνη (σε χαμηλές περιεκτικότητες που μειώνονται από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του δείγματος καταλήγοντας σε ίχνη) μέχρι σημαντικού βάθους: μέχρι 20 μm από την επιφάνεια του δείγματος στην εικόνα Pab12-a και μέχρι 8 μm περίπου στις εικόνες Pab12-c και Pab12-d.

Στην Εικ. Pab12-c (EDX 2) το ποσοστό του Si αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη κρυστάλλου αργιλοπυριτικού ορυκτού, αν και δεν είναι διακριτός.

Ακόμα, εντοπίζονται Fe και Ba σε χαμηλά ποσοστά (Εικ. Pab12-a: EDX 1 / EDX 6), σε σημεία που βρίσκονται στη διεπιφάνεια γύψου-ασβεστίτη, και πιθανώς έχουν προέλθει από επικαθίσεις σκόνης. Μέσα στη μάζα του ασβεστίτη υπάρχουν σε σημεία ίχνη K και Cl. Ποσοστά Mg υπάρχουν σε λίγες αναλύσεις και κυμαίνονται σε χαμηλές περιεκτικότητες.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β. για 2 ώρες



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Pb	Ba
Pnc22-a	1	~	~	~	*	~	~	•	~	****	~	~	***	~
	2	~	~	~	*	~	~	~	~	***	~	~	****	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc22-b	1	*	~	•	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	2	•	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	•	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
Pnc22-b	4	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	*	*	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~
	6	~	~	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~
	7	*	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	8	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	9	~	•	•	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	10	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	11	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
	1	*	*	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~

Pnc22-c	2	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	•	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	*	*	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc22-d	1	*	*	*	*	~	*	~	•	****	•	~	~
	2	*	*	*	*	~	*	~	•	****	~	~	~
	3	*	*	*	*	~	*	~	•	****	~	~	~
	4	*	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	5	*	•	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	*	•	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	7	*	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	8	•	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	9	*	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

	10	*	*	•	*	~	•	~	~	****	~	~	~
	11	*	*	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	12	*	*	~	•	~	•	~	~	****	~	~	~
	13	~	*	~	*	~	*	~	•	****	~	~	~
Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc22-e	1	*	*	*	*	~	*	~	•	****	•	~	~
	2	*	•	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	*	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc22-f	1	~	~	~	•	~	~	~	•	****	~	~	~
	2	*	*	~	*	~	~	•	•	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β για 2 ώρες. Παρατηρούμε ότι ο γύψος έχει απομακρυνθεί στο σύνολό του από την επιφάνεια του μαρμάρου, αφήνοντας την επιφάνεια της ασβεσπιτικής μάζας με σχετικά ομαλό ανάγλυφο, καθώς φαίνεται στην εικόνα Pnc22-g με μεγέθυνση x100. Παρόλα αυτά, σε εικόνες με μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (x800,x1000),

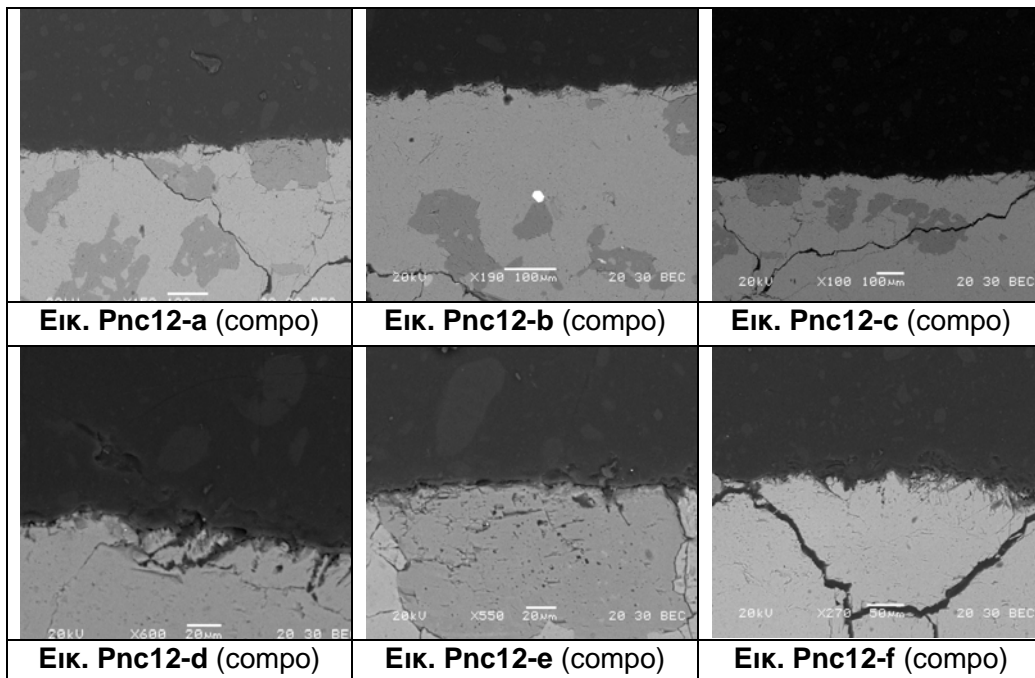
εντοπίζονται περιοχές με έντονο ανάγλυφο, ενώ στο δείγμα εμφανίζονται διάκενα επιμήκη και κυκλικά μέχρι το βάθος των 30μm. Σε ορισμένες περιοχές, επίσης, έχουν δημιουργηθεί διακλάσεις και ρηγματώσεις πάχους μέχρι 10 μm (Εικ. Pnc22-c), ενώ έχουν αποκολληθεί κομμάτια ασβεσπιτικού υλικού εξαιτίας της επέμβασης (Εικ. Pnc22-f).

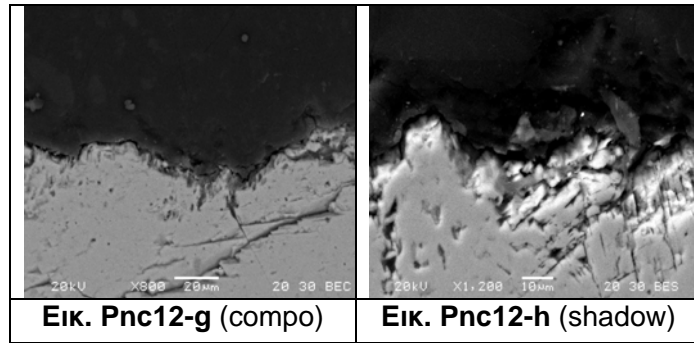
Ακόμη, εντοπίζεται τοπικά το φαινόμενο της κλιμακωτής αποφλοώωσης επιπέδων του κόκκου κάθετα στην τομή του δείγματος. Λόγω της διαβρωμένης όψης της επιφάνειας του δείγματος θεωρούμε ότι έχει απομακρυνθεί με την επέμβαση καθαρισμού και τμήμα του αυθεντικού υλικού.

Ανιχνεύονται χαμηλά ποσοστά S σε μικρό βάθος μέχρι 5 μm από την επιφάνεια, ενώ ίχνη S εντοπίζονται μέχρι τα 10μm (Εικ. Pnc22-b: EDX 1,2,5,6 / Pnc22-c: EDX 1/ Pnc22-d: EDX 1,2,10,11,12,13 / Pnc22-e: EDX 1,3).

Σε όλη την επιφάνεια (μέχρι τα 10μm) ανιχνεύονται χαμηλά ποσοστά Si (ενώ σε λιγότερα σημεία υπάρχει Al), τα οποία προέρχονται από επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Το Na, επίσης, εντοπίζεται σε χαμηλά ποσοστά στην πλειοψηφία των αναλύσεων όπου υπάρχουν ίχνη αργιλοπυριτικών. Από αυτές τις αναλύσεις συμπεραίνουμε ότι υπάρχει παρουσία αργιλοπυριτικών ορυκτών που περιέχουν Na και ίχνη Fe. Στην εικόνα Pnc22-a, υπάρχει λευκή περιοχή που περιέχει πολύ υψηλό ποσοστό Pb (επικαθίσεις σωματιδίων).

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β. για 1 ώρα





Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc12-a	1	~	***	~	•	~	~	~	~	****	•	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc12-b	1	~	~	~	~	~	****	~	~	•	***	~	~
	2	~	~	~	~	***	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc12-d	1	•	•	•	*	~	•	~	~	****	*	~	~
Pnc12-d	2	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	~	*	~	~	~	~	****	*	~	~
	4	•	•	•	*	~	•	~	~	****	*	~	~
	5	~	•	•	*	~	*	~	~	****	*	~	~

	6	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	------	---	---	---

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc12-e	1	*	***	*	**	~	*	~	~	****	*	~	~
	2	*	**	*	**	~	*	•	•	****	*	~	~
	3	~	•	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	4	~	***	*	*	~	*	~	~	****	*	~	~
	5	~	***	~	~	~	~	~	~	****	•	~	~
	6	~	***	~	•	~	~	~	~	****	•	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc12-f	1	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
Pnc12-f	2	~	*	•	*	~	•	~	~	****	~	~	~
	3	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

6	~	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
7	~	~	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~
8	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
9	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

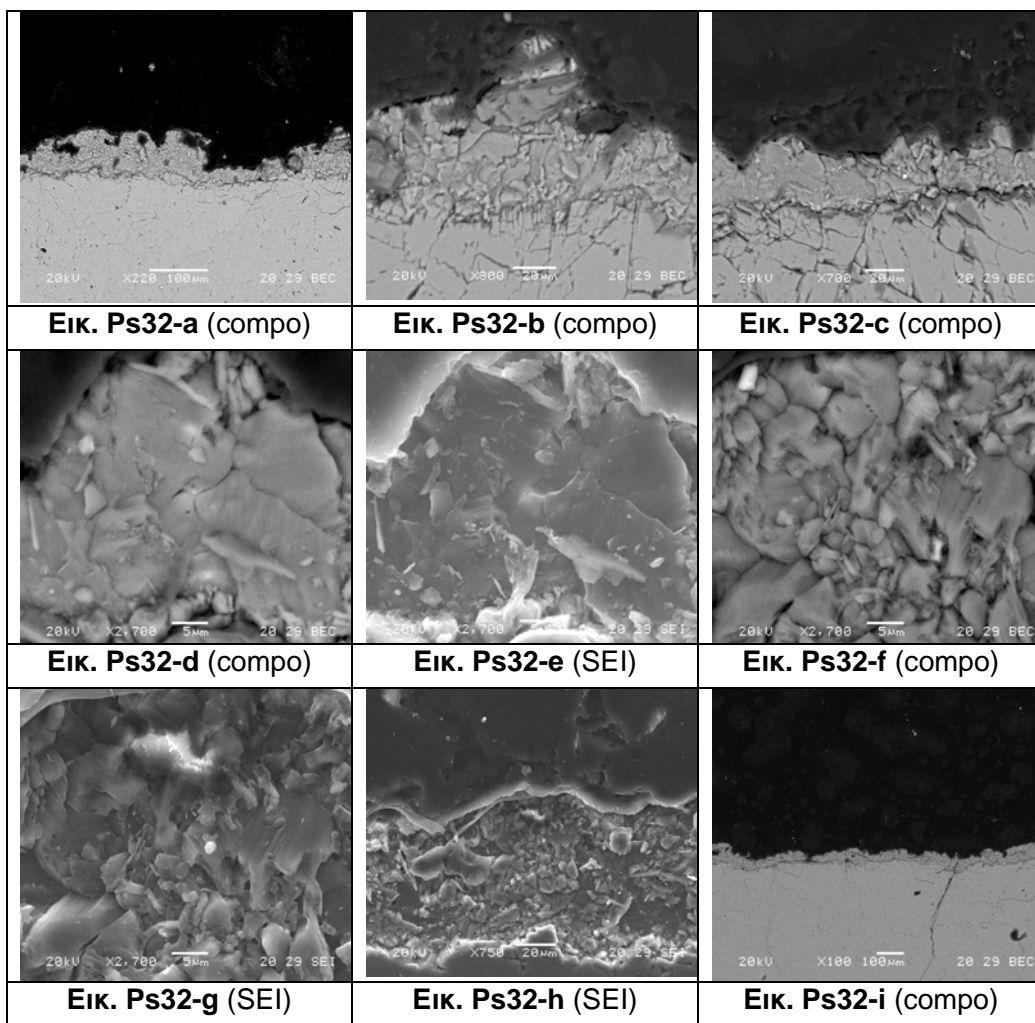
Το δείγμα έχει καθαριστεί με $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (10% κ.β.) για 1 ώρα. Στις εικόνες με τη μικρότερη μεγέθυνση (Pnc12-a, Pnc12-b) διαπιστώνεται η πλήρης απομάκρυνση της γυψοποιημένης ζώνης. Παρατηρώντας τις μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, είναι εμφανές ότι η επιφάνεια του αυθεντικού υλικού έχει καταπονηθεί από την επέμβαση, παρουσιάζοντας ιδιαίτερα διαβρωμένο ανάγλυφο με ρηγματώσεις μικρού και μεγάλου μήκους, σπασίματα και διάκενα (Εικ. Pnc12-f) και (Pnc12-c / Pnc12-h). Ακόμη, διακρίνονται κόκκοι αποκολλημένοι από το σώμα του μαρμάρου (Εικ. Pnc12-f) καθώς και κλιμακωτή αποφλοίωση επιπέδων του ασβεστίτη παράλληλα στην τομή του δείγματος.

Μέχρι ορισμένου βάθους από την επιφάνεια του δείγματος εντοπίζεται S. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια του δείγματος το θείο περιέχεται σε χαμηλά ποσοστά. Σε βάθος μέχρι 5μm υπάρχουν ίχνη S (Pnc12-d: EDX 1,4,5 / Pnc12-c: EDX 1,2,3,4 / Pnc12-f: EDX 2,7,8,9).

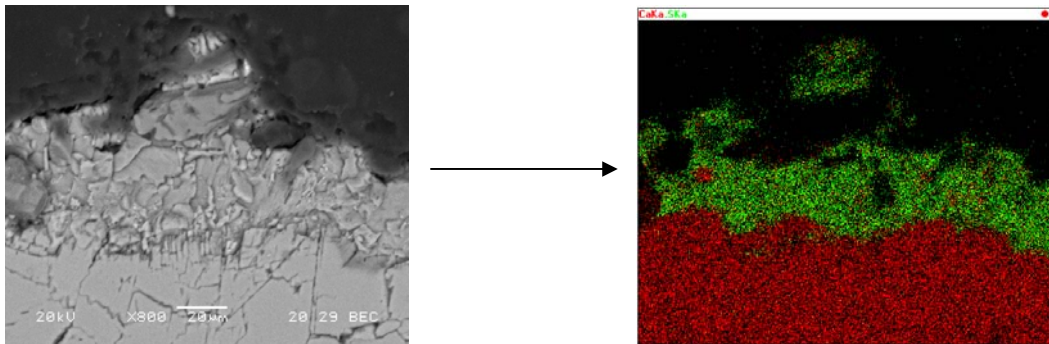
Οι σκουρόχρωμοι κρύσταλλοι είναι του ορυκτού δολομίτη (Pnc12-a: EDX 1/ Pnc12-e: EDX 1,4,5,6), ενώ ίχνη Mg υπάρχουν και σε πολλά άλλα σημεία του δείγματος. Στις εικόνες όπου οι κόκκοι δολομίτη είναι στην επιφάνεια, παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν πιο ομαλό ανάγλυφο συγκρινόμενοι με το επιφανειακό ανάγλυφο των κόκκων ασβεστίτη που είναι ιδιαίτερα έντονο (Pnc12-a, Pnc12-c, Pnc12-e). Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς ο δολομίτης παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση από τον ασβεστίτη.

Στην εικόνα Pnc12-b υπάρχουν 2 ανοιχτόχρωμα σημεία. Το σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια είναι οξειδίο του Fe, ενώ αυτό που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος περιέχει υψηλό ποσοστό P και πιθανότατα είναι το ορυκτό υδροξαπατίτης ($\text{Ca}_5[\text{OH}(\text{PO}_4)_3]$). Τέλος, υπάρχουν ίχνη Si σε πολλά σημεία στο επιφανειακό τμήμα του δείγματος (μέχρι 10 μm), ενώ ανιχνεύεται και Al σε μικρό ποσοστό. Εκτός από τον κόκκο της σιδηρούχου ένωσης, ανιχνεύεται Fe επιφανειακά σε πολύ χαμηλή περιεκτικότητα στους κρυστάλλους δολομίτη (Εικ. Pnc12-e). Τα στοιχεία αυτά αποτελούν προφανώς επιφανειακές επικαθίσεις.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα Σηπιολίθου για 3.5 ώρες



Στην Εικόνα **Ps32-b** έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ps32-a	1	•	~	•	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	2	~	~	•	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	3	•	~	•	*	~	****	•	•	***	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ps32-c	1	~	•	*	**	~	***	•	*	***	*	~	~
	2	~	~	•	*	~	***	~	~	***	~	~	~
	3	~	~	~	~	~	****	~	~	***	~	~	~
	4	•	~	•	*	~	****	~	~	***	~	~	~

5	•	*	~	*	~	•	~	~	****	~	~	~
6	~	•	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
7	~	•	~	*	~	~	~	•	****	~	~	~
8	*	~	*	**	~	***	•	•	***	***	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

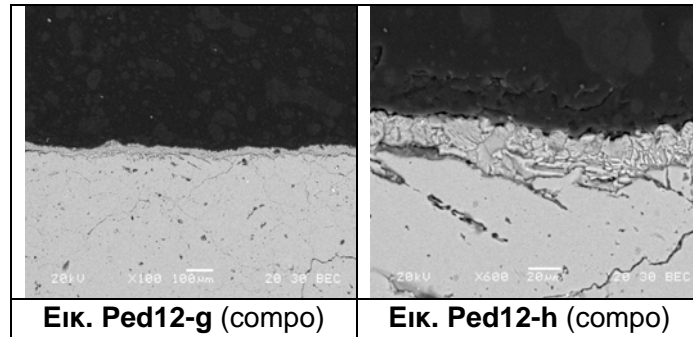
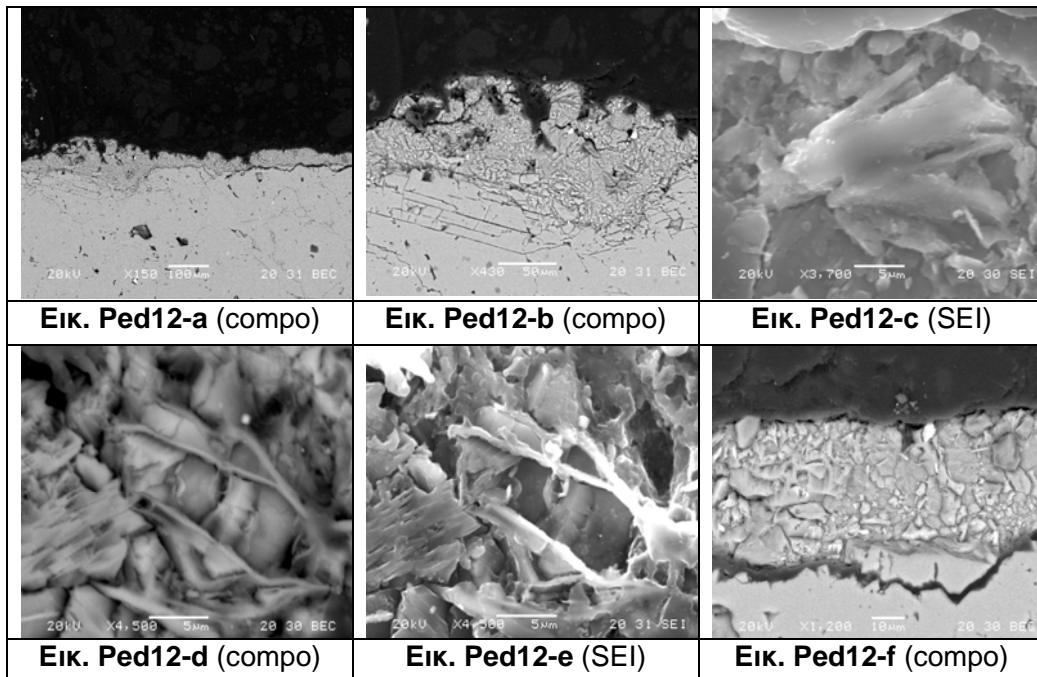
πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα σηπιόλιθου για 3,5 ώρες. Η κρούστα με το γύψο έχει απομακρυνθεί ελάχιστα μετά τον καθαρισμό με τον σηπιόλιθο, καθώς διατηρεί το ίδιο πάχος με την κρούστα του δείγματος διάγνωσης της φθοράς (20-80μm). Η γυψοποιημένη περιοχή διαχωρίζεται σαφώς από την ασβεσπιτική μάζα με μια ασυνέχεια πάχους 2-3μm. Οι κόκκοι ασβεστίτη που βρίσκονται σε επαφή με τη γυψοποιημένη επιφάνεια έχουν έντονο ανάγλυφο, εμφανίζοντας πολλά σπασίματα και ρηγματώσεις. Η γυψοποιημένη περιοχή έχει έντονο ανάγλυφο και στο εσωτερικό της περιέχονται κρύσταλλοι διαφόρων διαμέτρων (από 3 ως 30 μm) και διαφόρων μορφών (πλακώδεις, πρισματικές).

Στην εικόνα Ps32-c (EDX 8) φαίνεται λευκή περιοχή που αντιστοιχεί σε ένωση του σιδήρου, ενώ τα στοιχεία Al, Si βρίσκονται σε χαμηλά ποσοστά στην γυψοποιημένη επιφάνεια αλλά και στο σώμα του ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 10μm από την διεπιφάνεια γύψου-ασβεστίτη.

Το Mg βρίσκεται σε χαμηλή περιεκτικότητα. Ακόμη, υπάρχουν σε σημεία της γυψοποιημένης ζώνης (όπου εντοπίζεται και Al, Si) ίχνη Na, K, Cl. Τέλος, εντοπίζεται Fe σε χαμηλή περιεκτικότητα σε μια ανάλυση (Ps32-c: EDX 1), που προφανώς αντιπροσωπεύει την ύπαρξη αργιλοπυριτικού ορυκτού που περιέχει και σίδηρο.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα EDTA 3% για 1 ώρα



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
	1	•	~	***	***	~	**	~	**	**	•	~	•
	2	~	~	~	*	~	****	~	~	***	•	~	~
	3	*	*	*	***	*	***	•	•	***	***	~	~
Ped12-b	4	~	~	•	*	~	*	~	~	*	****	~	~
	5	•	~	~	•	~	****	~	~	***	~	~	~
	6	~	~	~	•	~	**	~	~	****	~	~	~
	7	•	~	~	~	~	•	~	~	****	~	~	~
	8	~	~	~	•	~	***	~	~	****	~	~	~
	9	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	10	~	~	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	11	~	~	**	**	~	****	~	~	***	~	~	~
	12	•	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ped12-d	1	~	~	*	*	~	****	~	•	***	~	~	~
	2	~	~	***	***	~	***	~	~	***	•	~	~
	3	~	~	*	*	~	****	~	•	***	•	~	~
	4	~	~	*	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	5	~	~	*	*	~	****	~	~	***	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba	
Ped12-f	1	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	
	2	~	~	*	*	~	**	~	•	****	•	~	~	
	3	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~	
	4	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~	
	5	~	~	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~	
	6	~	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	7	~	~	~	~	*	~	****	~	•	***	~	~	~

	8	~	~	•	*	~	****	~	•	***	~	~	~
	9	~	•	*	*	~	****	~	•	***	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ped12-h	1	~	~	*	*	~	*	~	•	****	*	~	~
	2	~	~	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~
Ped12-h	3	~	~	~	~	~	***	~	~	****	~	~	~
	4	*	*	*	*	~	**	~	•	***	***	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με EDTA για 1 ώρα. Η γυψοποιημένη επιφάνεια έχει παραμείνει σχεδόν στο σύνολό της, διατηρώντας πάχος από 30 ως 80μm (Εικ. Ped12-a, Ped12-b, Ped12-f, Ped12-g, Ped12-h). Σε ορισμένες περιοχές διαχωρίζεται από το σώμα του ασβεστίτη με μια ασυνέχεια πάχους μέχρι 3μm (Εικ. Ped12-f), ενώ σε άλλες περιοχές ο γύψος και ο ασβεστίτης είναι συνεκτικά συνδεδεμένοι (Εικ. Ped12- a, Ped12-b). Η επιφάνεια του μαρμάρου είναι σχετικά καταπονημένη, εμφανίζοντας ανά περιοχές ρηγματώσεις, ασυνέχειες, διάκενα και στίγματα που φανερώνουν εσωτερική διάβρωση.

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν ρηγματώσεις στους κρυστάλλους ασβεστίτη που βρίσκονται υποκείμενοι στη γυψοποιημένη επιφάνεια που είναι πληρωμένες με γύψο (Εικ. Ped12-h: EDX 3, 4). Το S σε χαμηλή περιεκτικότητα εντοπίζεται σε κρυστάλλους ασβεστίτη μέχρι το βάθος των 3 μm κάτω από την ασυνέχεια που διαχωρίζει την κρούστα με το σώμα του ασβεστίτη. Στο συσσωμάτωμα της γυψοποιημένης επιφάνειας υπάρχουν κρύσταλλοι διαφόρων μεγεθών διαμέτρου ως 10μm.

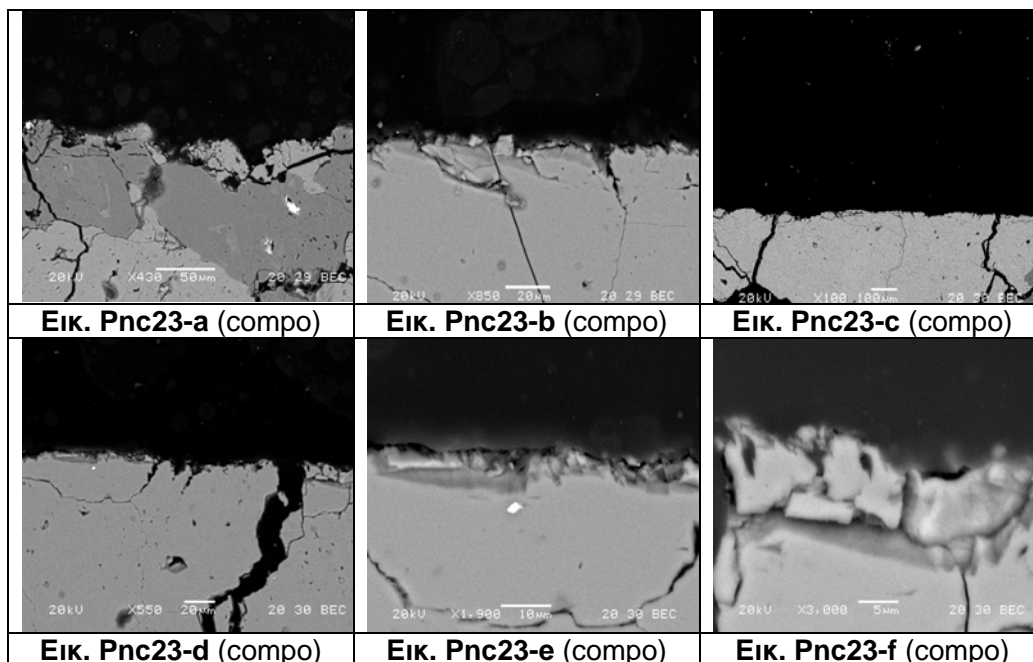
Το Mg σχεδόν απουσιάζει από το δείγμα, σε αντίθεση με το Si και το Al που βρίσκονται σε υψηλές περιεκτικότητες σε όλη την περιοχή του γύψου, αλλά εντοπίζονται και σε ίχνη σε κρυστάλλους ασβεστίτη μέχρι και το βάθος των 10μm από την διεπιφάνεια με τον γύψο. Λόγω των υψηλών ποσοστών σε Al, Si και των μορφών και σχημάτων των κρυστάλλων που εμφανίζονται, οι οποίοι διαφοροποιούνται από αυτούς του γύψου, συμπεραίνουμε την ύπαρξη αργιλοπυριτικών ενώσεων μέσα στην γυψοποιημένη επιφάνεια (Εικ. Ped12-d, Ped12-e, Ped12-b: EDX 1).

Μαζί με το Si και το Al εντοπίζονται Na και K σε χαμηλές περιεκτικότητες, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι περιέχονται σε κρυστάλλους αργιλοπυριτικών ενώσεων που έχουν προέλθει από επικαθίσεις σωματιδίων.

Επίσης, υπάρχουν ενώσεις του σιδήρου (λευκές περιοχές) στις εικόνες Ped12-b (EDX 3, 4) και Ped12-h (EDX 4) αλλά ανιχνεύονται και χαμηλά ποσοστά Fe και σε άλλα σημεία (Εικ. Ped12-d: EDX 2 / Εικ. Ped12-f: EDX 2 / Εικ. Ped12-h: EDX 1).

Στην εικόνα Ped12-b (EDX 1) ανιχνεύεται Ba (από επικάθιση του περιβάλλοντος) αλλά και P (EDX 3) που βρίσκεται πλησίον του Fe.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού στην περιοχή της λεπτής & συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba	
Pnc23-a	1	~	***	~	~	~	~	~	~	****	*	~	~	
	2	*	*	~	*	~	~	~	~	*	****	~	~	
	3	~	*	~	*	~	**	~	~	****	~	~	~	
	4	~	***	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~	
	5	~	***	~	*	~	~	~	~	****	•	~	~	
	6	~	~	~	*	~	•	~	~	****	~	~	~	
	7	~	***	~	*	~	~	~	~	****	•	~	~	
	8	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~	
	9	~	***	~	*	~	*	~	~	****	*	~	~	
	10	~	***	•	~	~	~	~	~	****	*	~	~	
	11	~	~	~	•	~	~	~	~	****	•	~	~	
	12	~	***	~	•	~	~	*	~	~	****	~	~	~
	13	~	***	~	*	~	~	~	~	~	****	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc23-b	1	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	*	*	~	•	~	•	****	~	~	~
	4	~	*	•	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	~	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	•	•	*	*	~	•	~	~	****	~	~	~
	7	*	*	*	*	~	*	•	~	****	~	~	~
	8	~	*	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	9	*	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	10	*	*	*	*	~	*	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc23-d	1	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc23-e	1	~	*	*	*	~	*	•	•	****	•	~	~
	2	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	*	*	~	*	•	•	****	*	~	~
	4	~	•	•	*	~	*	•	•	****	*	~	~
	5	~	*	*	*	~	~	~	~	****	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc23-f	1	~	~	*	*	~	*	•	~	****	~	~	~
	2	~	~	*	*	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	~	•	***	~	~	~	~	****	•	~	~
	4	~	~	~	•	~	•	~	•	****	•	~	~
	5	~	~	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

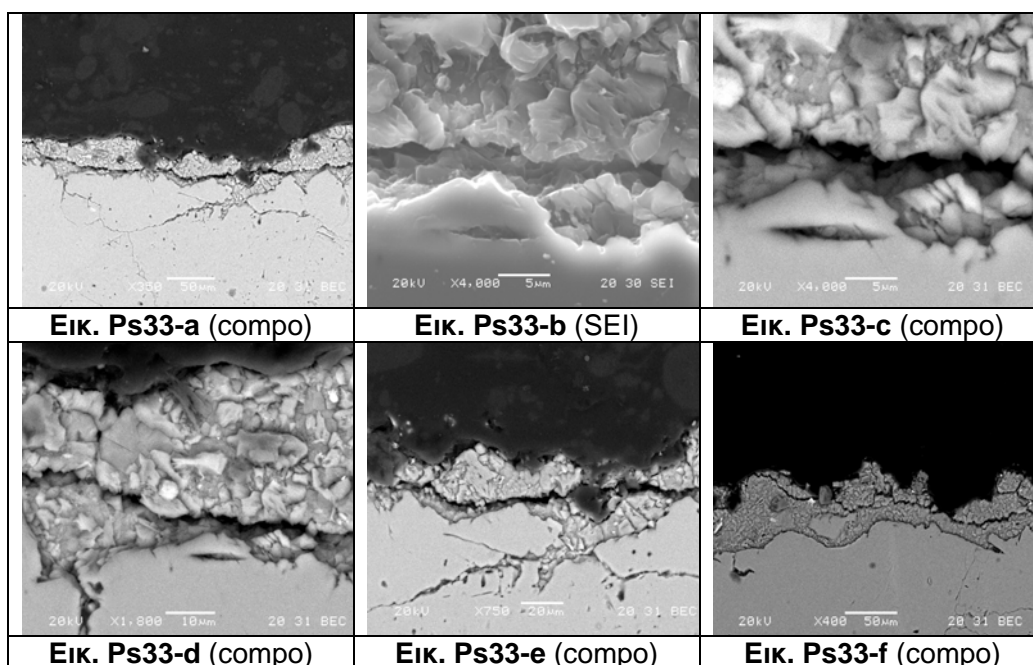
πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

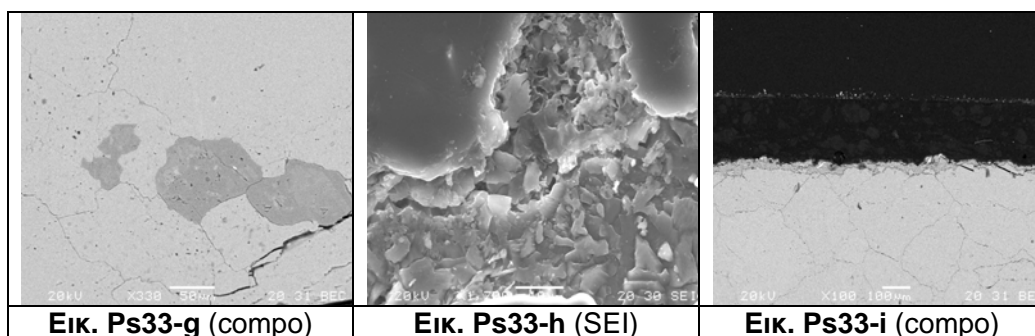
Το δείγμα έχει καθαριστεί με $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β. για 2 ώρες. Το δείγμα είναι ιδιαίτερα καταπονημένο τόσο επιφανειακά όσο και σε βάθος, παρουσιάζοντας πλήρως αποκολλημένους κόκκους, ρηγματώσεις μέχρι 30μm, ασυνέχειες, διάκενα (Εικ. Pnc23-b, Pnc23-c, Pnc23-d, Pnc23-e, Pnc23-f) και ιδιαίτερα διαβρωμένο ανάγλυφο (Εικ. Pnc23-a). Ο γύψος έχει απομακρυνθεί από όλη την επιφάνεια του δείγματος, ενώ σε όλη τη μάζα του μαρμάρου υπάρχουν κρύσταλλοι δολομίτη (Εικ. Pnc23-a, Pnc23-c) διαμέτρου μέχρι 200μm.

Μέσα στους κρυστάλλους του δολομίτη διακρίνονται εγκλείσματα ενώσεων (οξειδίων) σιδήρου (Εικ. Pnc23-a: EDX 2). Ίχνη Mg υπάρχουν στις περισσότερες αναλύσεις. Επίσης, μέχρι βάθους 15μm μέσα στο σώμα του μαρμάρου, ανιχνεύεται S σε ποσοστά που μειώνονται καθώς μεγαλώνει το βάθος (από χαμηλή περιεκτικότητα έως ίχνη) .

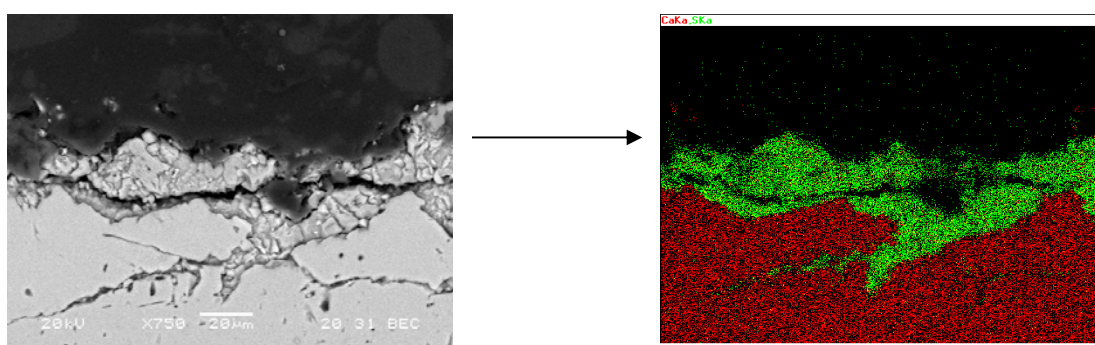
Ακόμη, διακρίνεται κρύσταλλος χαλαζία (Εικ. Pnc23-f: EDX 3), ενώ σε πολλά σημεία μέχρι και το βάθος των 15μm εντοπίζονται Al και Si σε χαμηλές περιεκτικότητες, που πιθανώς έχουν προέλθει από επικαθίσεις του περιβάλλοντος. Σε ορισμένες αναλύσεις (Εικ. Pnc23-a: EDX 2 / Εικ. Pnc23-b: EDX 6, 7, 9, 10) εντοπίζεται Na χαμηλές περιεκτικότητες μαζί με τα Al και Si.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού στην περιοχή της λεπτής & συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας: Πάστα Σηπιολίθου για 3 ώρες





Στην Εικόνα Ps33-e έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ps33-a	1	~	~	•	•	~	***	~	•	****	~	~	~
	2	•	~	~	•	~	***	~	~	****	~	~	~
	3	•	~	*	**	~	***	~	•	****	*	~	~
	4	**	~	***	****	~	*	~	•	*	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba	
Ps33-d	1	~	•	~	•	~	***	~	~	****	~	~	~	
	2	~	~	•	*	~	***	~	~	****	~	~	~	
	3	•	•	~	*	~	**	~	**	****	~	~	~	
	4	•	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~	
	5	~	•	~	~	~	•	~	~	****	~	~	~	
	6	•	~	~	•	~	~	***	~	~	****	~	~	~
	7	~	•	~	~	~	~	*	~	•	****	~	~	~
Ps33-d	8	~	~	•	•	~	***	~	~	****	~	~	~	
	9	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~	

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ps33-f	1	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	•	~	•	~	~	*	****	~	~
	3	~	~	~	****	~	~	~	~	•	~	~	~
	4	~	~	~	*	~	~	***	~	~	****	**	~

	5	~	~	*	**	~	***	~	*	***	*	~	~
	6	~	~	~	•	~	***	~	~	****	~	~	~
	7	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	8	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDS	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ps33-g	1	~	***	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με σηπιόλιθο για 3,5 ώρες. Το πάχος της γυψοποιημένης επιφάνειας έχει μειωθεί σε μικρό βαθμό σε σχέση με το δείγμα διάγνωσης (κυμαίνεται από 5 ως 60μm) και η διαφοροποίησή της από το σώμα του ασβεστίτη είναι έντονη. Σε όλο το δείγμα παρατηρούνται διακλάσεις και περικρυσταλλικές ρηγματώσεις (Εικ. Ps33-i).

Η επιφάνεια του γύψου έχει έντονο ανάγλυφο και σε ορισμένα σημεία είναι αρκετά κατακερματισμένη (Εικ. Ps33-a, Ps33-c, Ps33-d, Ps33-e, Ps33-f). Κατά μήκος, η επιφάνεια χωρίζεται σε δύο τμήματα με μια έντονη ρωγμή διαμέτρου μέχρι και 4μm.

Το S ανιχνεύεται στους κρυστάλλους ασβεστίτη μέχρι βάθους 6μm (Εικ. Ps33-f: EDX 3, 4,5,7 / Εικ. Ps33-f: EDX 7) σε χαμηλά ποσοστά, ενώ αυξανόμενου του βάθους τα ποσοστά μειώνονται σε ίχνη. Μέσα στη γυψοποιημένη επιφάνεια εντοπίστηκε κρύσταλλος ασβεστίτη (Εικ. Ps33-f: EDX 1) και χαλαζία (Εικ. Ps33-f: EDX 3). Σποραδικά, επίσης, μέσα στο μάρμαρο διακρίνονται κρύσταλλοι δολομίτη (Εικ. Ps33-g: EDX 1).

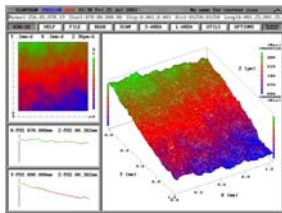
Μέσα στην επιφάνεια του γύψου ανιχνεύονται χαμηλά ποσοστά Al, Si (Εικ. Ps33-a: EDX 3, 4), ενώ στο σώμα του ασβεστίτη μέχρι τα 2μm υπάρχουν ίχνη. Ακόμη, υπάρχουν ίχνη K, Na και Fe (που έχει μεταφερθεί από επικαθίσεις του περιβάλλοντος). Παρουσία Na υπάρχει σε ανάλυση που εκφράζει την ύπαρξη αργιλοπυριτικού ορυκτού στην κρούστα (Εικ. Ps33-a: EDX 4) Τέλος, στην εικόνα f, οι λευκές περιοχές περιέχουν Ba.

5.4.4 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

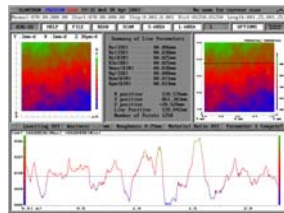
Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον έλεγχο των δειγμάτων από την επιφάνεια των φαιόμαυρων κρουστών των λείων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υφής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια (ενεργή επιφάνεια), οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των ληφθέντων δειγμάτων από το ιστορικό κτίριο, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υφής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας των επεμβάσεων καθαρισμού που έχουν λάβει χώρα.

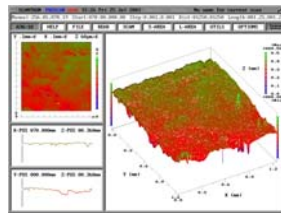
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών των δειγμάτων, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για την περιοχή όπου έλαβε χώρα η σάρωση με τη χρήση της laser προφίλομετρίας.



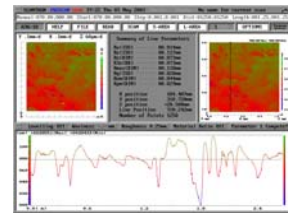
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Pm1



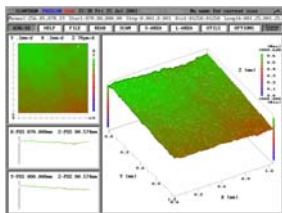
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Pm1



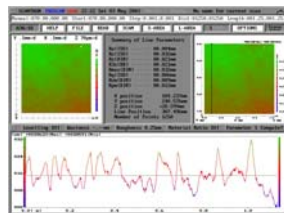
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Pat2



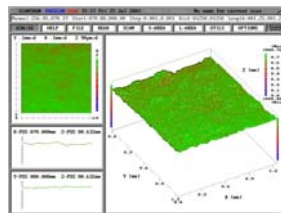
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Pat2



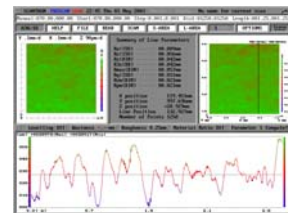
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PM22c



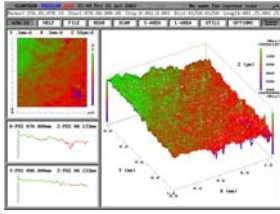
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα PM22c



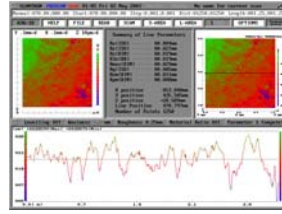
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PAB22



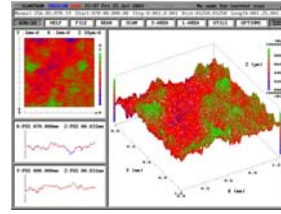
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα PAB22



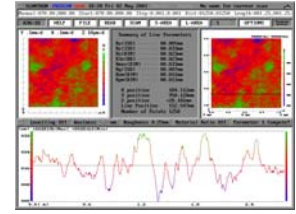
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PNC22



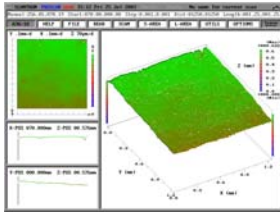
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PNC22



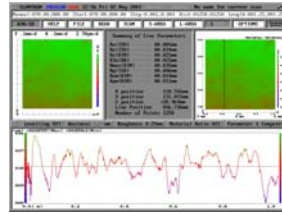
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PS32



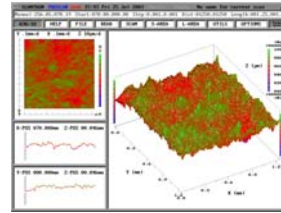
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PS32



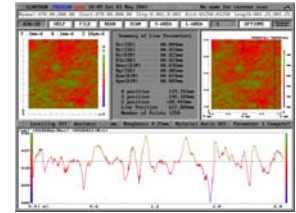
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PAB12



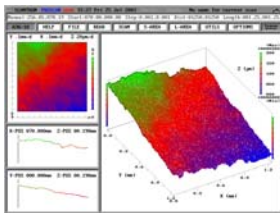
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PAB12



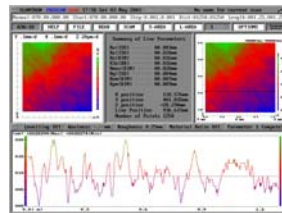
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PNC12



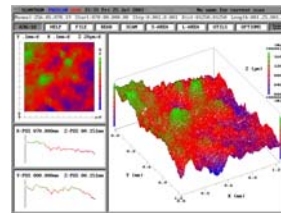
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PNC12



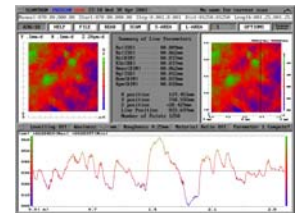
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PED12



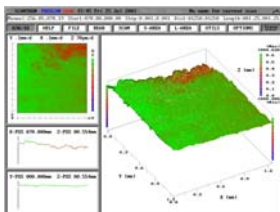
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PED12



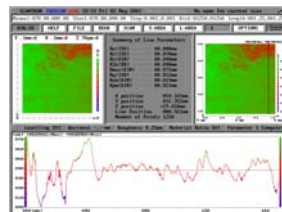
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Pm2



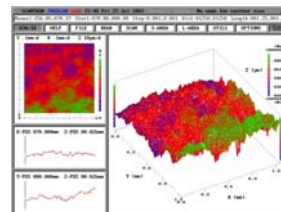
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Pm2



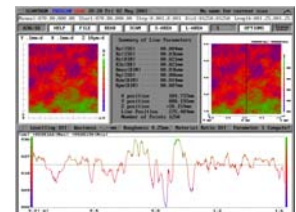
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PNC23



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PNC23



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PS33



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PS33

Στον Πίνακα 5.4.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε μm στα ληφθέντα δείγματα πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του Rq των 50 γραμμικών προφίλ για τον άξονα X (Rqx) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (Rqy), καθώς και το κατώτερο -1° και

ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του Rq (δηλ. οι τιμές Rq που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή Rq από τις δύο συγκρινόμενες Rqx και Rqy, η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 5.4.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Rqx (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Χ άξονας		Rqy (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Υ άξονας		Rq (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
Pm1	Διάγνωσης	8	7	9	8	8	9	8	8	9
Pat2	ατομικό νερό, διάμετρος ακροφυσίου 1.6mm	14	12	20	19	15	22	19	15	22
PM22c	Πάστα Μοα, 2h	6	5	7	7	6	7	7	6	7
PAB22	Πάστα AB57, 2h	10	9	11	13	11	16	13	11	16
PNC22	Πάστα NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 2h	6	5	7	6	5	9	6	5	7
PS32	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	6	5	6	6	5	7	6	5	7
PAB12	Πάστα AB57, 1h	5	5	6	6	6	8	6	6	8
PNC12	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1h	5	4	5	5	5	6	5	5	6
PED12	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	5	4	5	5	5	6	5	5	6
Pm2	διάγνωσης	10	9	12	10	9	12	10	9	12
PNC23	Πάστα NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 2h	8	7	20	16	13	19	16	13	19
PS33	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	6	5	6	6	5	6	6	5	6

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της τραχύτητας των εξεταζόμενων μαρμαρίνων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού και συνάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με τις αντίστοιχες επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς, διαπιστώνεται μείωση της Rq, εκτός από τα δείγματα PNC23, Pat2 και PAB22, στα οποία παρατηρείται αύξησή της.
- Η πολύ μεγάλη αύξηση της τιμής της τραχύτητας στην περίπτωση του δείγματος Pat2 δε μπορεί να οφείλεται στη χημικής δράση της τεχνικής, αφού αυτή είναι πολύ χαμηλή και πρόκειται για καθαρισμό που αφαιρεί μόνο την επιφανειακή στοιβάδα των χαλαρών μαύρων επικαθίσεων, διατηρώντας το μεγαλύτερο μέρος της κρούστας του γύψου. Αυτό

το γεγονός σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές της τραχύτητας που καταγράφονται στα δείγματα διάγνωσης οδηγεί σε προβληματισμούς σχετικά με τις δυνατότητες απόκρισης της τεχνικής παρουσία μαύρων επικαθίσεων.

- Επίσης, παρατηρούνται χαμηλές τιμές τραχύτητας στις επιφάνειες των ατελών καθαρισμών PED12, PS33 και PS32, όπου οι μαύρες επικαθίσεις διατηρούνται.
- Συγκρίνοντας τις τιμές Rq στις περιοχές PAB22 και PAB12, καθώς και PNC22 με PNC12, όπου αυξάνει ο χρόνος εφαρμογής των αντίστοιχων παστών, παρατηρείται ότι η αύξηση του χρόνου εφαρμογής οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας.

Στον παρακάτω Πίνακα 5.4.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς καθώς και σε αυτές μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm^2 , του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm^2 , ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσχημο τρόπο την απόκλιση από την επιπεδότητα.

Πίνακας 5.4.3.2: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Εμβαδόν Προβαλλόμενης επιφάνειας (mm^2)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm^2)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
Pm1	Διάγνωσης	1,560	2,199	1,410	40,96%
Pat2	ατομικό νερό, διάμετρος ακροφυσίου 1.6mm	1,512	3,233	2,138	113,82%
PM22c	Πάστα Moga, 2h	1,552	2,149	1,385	38,47%
PAB22	Πάστα AB57, 2h	1,536	2,496	1,625	62,50%
PNC22	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (10% κ.β.), 2h	1,544	2,204	1,427	42,75%
PS32	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	1,560	2,106	1,350	35,00%
PAB12	Πάστα AB57, 1h	1,515	2,164	1,428	42,84%
PNC12	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (10% κ.β.), 1h	1,560	2,107	1,351	35,06%
PED12	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	1,560	2,066	1,324	32,44%

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι:

- Ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια) στις επιφάνειες των δειγμάτων PM22c, PS32, PNC12 και PED12, παρουσιάζει μείωση σε σχέση με την τιμή που εμφανίζει στο δείγμα της διάγνωσης της φθοράς.
- Στις περιπτώσεις των επιφανειών PAB12 και PNC22, οι τιμές του λόγου αν και αυξημένες παραμένουν σε αντίστοιχα επίπεδα τιμών με αυτά του δείγματος της διάγνωσης της φθοράς.
- Αυξημένες τιμές λόγου, μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, εμφανίζουν τα δείγματα Pat2 και PAB22, τα οποία παρουσιάζουν και τα υψηλότερα ποσοστά μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής.

Πίνακας 5.4.3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Rq (μm)
Pm1	Διάγνωσης	1,410	8
Pat2	ατομικό νερό, διάμετρος ακροφυσίου 1.6mm	2,138	19
PM22c	Πάστα Mora, 2h	1,385	7
PAB22	Πάστα AB57, 2h	1,625	13
PNC22	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 2h	1,427	6
PS32	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	1,350	6
PAB12	Πάστα AB57, 1h	1,428	6
PNC12	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 1h	1,351	5
PED12	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	1,324	5
Pm2	διάγνωσης	1,507	10
PNC23	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 2h	1,891	16
PS33	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	1,380	6

5.4.4 Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής στις φαιόμαυρες κρούστες των λείων μαρμάρινων επιφανειών του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης του Ελλάδος. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια.

Τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας των μικροσκοπικών εικόνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.4.1.

⇒ Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με τον **συντελεστή μορφής (Γ)**, ξεκινώντας από την πιο τραχιά επιφάνεια και καταλήγοντας στην πιο λεία:

Όσον αφορά στην fractal διάσταση των δειγμάτων, γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη τραχύτητα αυξάνεται.

Από τον πίνακα 5.4.4.1. φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης είναι υψηλός και ίσος με 0.98 άρα η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μεγάλη. Οι ασυνέχειες που παρουσιάζονται στις 2 κατατάξεις (συντελεστή μορφής και fractal διάστασης) δικαιολογούνται καθώς αφορούν σε πολύ μικρές αριθμητικές διαφορές των μεγεθών των διαφόρων δειγμάτων (οι οποίες αντιστοιχούν σε σχεδόν ίδια στοιχεία τραχύτητας).

Η ανακολουθία αφορά την αντιστροφή των θέσεων κατάταξης μεταξύ των μεθόδων καθαρισμού με EDTA (συντελεστής μορφής $\Gamma = 2,45$ και fractal διάσταση $D = 1,021$) και με Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β για 1 ώρα (συντελεστής μορφής $\Gamma = 2,41$ και fractal διάσταση $D = 1,036$).

Πίνακας 5.4.4.1.: Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας δειγμάτων των φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων επιφανειών στην ΕΒΕ

Κωδικός δείγματος	Διάγνωση / Επέμβαση καθαρισμού	Οριακές τιμές T _L και T _U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L* (pixels)	F.D. (%)	Συντελ. μορφής (Γ)	Συντελ. Ευθρυπτότητας F.I. (%)
Pm1	Διάγνωση	59	102	1.114	823	512	23,2	3.48	41,82
Pat2	Ατομικό Νερό	44	67	1.107	759	458	17,4	3.57	39,71
Pab22	Πάστα AB 57, 2h	68	106	1.064	675	512	13,8	2.76	30,82
Pab12	Πάστα AB 57, 1h	95	123	1.043	580	455	10,4	2.63	28,25
Pnc22	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ 10%κ.β., 2h	120	157	1.040	620	512	16,3	2.49	29,76
Pm22c	Πάστα Mora, 2h	57	94	1.038	444	371	11,4	2.46	27,09
Pnc12	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ 10%κ.β., 1h	38	60	1.037	601	512	10,5	2.41	26,28
Ps32	Πάστα Σηπιόλιθου 3.5h	41	54	1.036	604	512	10,0	2.42	26,18
Ped12	Πάστα EDTA, 1h	67	106	1.021	498	413	12,1	2.45	27,30

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης:

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων [$\rho(\Gamma/F.D.)$] = 0.82

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης [$\rho(\Gamma/D)$] = 0.98

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης [$\rho(F.D/D)$] = 0.84

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(F.D./F.I.)$] = 0.92

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ fractal διάστασης και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(D/F.I.)$] = 0.97

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(\Gamma /F.I.)$] = 0.98

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	Συντελεστής μορφής (Γ)
Pm1	Διάγνωση	3.48
Pat2	Ατομ. Νερό	3.57
Pab22	Πάστα AB 57, 2h	2.76
Pab12	Πάστα AB 57, 1h	2.63
Pnc22	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ 10% κ.β., 2h	2.47
Pm22c	Πάστα Mora, 2h	2.46
Ped12	Πάστα EDTA, 1h	2.45
Ps32	Πάστα Σηπιόλιθου. 3.5h	2.42
Pnc12	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ 10% κ.β., 1h	2.41

Το δείγμα που παρουσιάζει, με σημαντική αριθμητική διαφορά, το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής είναι εκείνο που αντιστοιχεί στον καθαρισμό με ατομικό νερό. Η τραχύτητα του δείγματος (Pat 2) ουσιαστικά αποδίδει την πραγματική τραχύτητα της κρούστας όταν από αυτή έχουν απομακρυνθεί όλες οι επικαθίσεις. Είναι επόμενο, δηλαδή, το γεγονός ότι το δείγμα Pat2 έχει τον υψηλότερο συντελεστή μορφής (αριθμητικά λίγο χαμηλότερο από αυτόν του δείγματος διάγνωσης), καθώς αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει το εντονότερο ανάγλυφο, και επομένως τη μεγαλύτερη τραχύτητα.

Έπειτα, ακολουθούν τα δείγματα καθαρισμού με Πάστα AB 57 για 2 ώρες και για 1 ώρα. Συμπεραίνουμε, δηλαδή, ότι μετά τον καθαρισμό με την συγκεκριμένη πάστα, οι επιφάνειες παρουσιάζουν σημαντικό ανάγλυφο και ότι η εφαρμογή της προσδίδει μεγαλύτερη τραχύτητα από τις υπόλοιπες.

Όλες οι υπόλοιπες μέθοδοι (Πάστα (NH₄)₂CO₃ για 2 και 1 ώρα, Πάστα Mora, Πάστα EDTA, Πάστα Σηπιόλιθου) μπορούν να ομαδοποιηθούν σε μία κατηγορία καθώς παρουσιάζουν χαμηλές και παρόμοιες τιμές συντελεστή μορφής (από 2,47 ως 2,41). Πιο συγκεκριμένα, οι επιφάνειες που αντιστοιχούν στον καθαρισμό με πάστα EDTA και πάστα Σηπιόλιθου παρουσιάζουν χαμηλή τραχύτητα, παρότι έχει απομείνει μεγάλο υπόλοιπο κρούστας. Αντίθετα, στις άλλες τρεις επιφάνειες χαμηλής τραχύτητας (λείες επιφάνειες), η κρούστα έχει απομακρυνθεί στο σύνολό της.

Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με την πυκνότητα ρηγματώσεων (F.D.):

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100 μm. Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	πυκνότητα ρηγματώσεων (F.D.)
Pm1	Διάγνωση	23,2
Pat2	Ατομ. Νερό	17,4
Pnc22	Πάστα (NH₄)₂CO₃ 10% κ.β, 2h	16,3
Pab22	Πάστα AB 57, 2h	13,8
Ped12	Πάστα EDTA, 1h	12,1
Pm22c	Πάστα Mora, 2h	11,4
Pnc12	Πάστα (NH₄)₂CO₃ 10% κ.β, 1h	10,5
Pab12	Πάστα AB 57, 1h	10,4
Ps32	Πάστα Σηπιόλιθου 3.5h	10,0

Ο συντελεστής μορφής και η πυκνότητα ρηγματώσεων που αντιστοιχούν στο δείγμα διάγνωσης αντικατοπτρίζουν, με τις υψηλές τιμές, τον χαρακτηριστικό τύπο φθοράς της επιφάνειας της μεγάλου πάχους φαιόμαυρης κρούστας, η οποία εμφανίζεται με έντονο εξωτερικό ανάγλυφο (κρούστα) και με παρουσία ρηγματώσεων στην εξωτερική επιφάνεια του ασβεστίτη.

Η σειρά κατάταξης των μεθόδων με βάση την πυκνότητα των ρηγματώσεων δεν αλλάζει αρκετά από αυτή του συντελεστή μορφής. Στον πίνακα 5.4.4.1 φαίνεται εξάλλου, ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των δύο μεγεθών είναι αρκετά καλός και ίσος με 0,82. Επομένως, η αναλογία μεταξύ των μεγεθών είναι καλή.

Η επιφάνεια με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεως είναι αυτή που εφαρμόστηκε το ατομικό νερό.

Τα δείγματα με τις αμέσως υψηλότερες τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων αντιστοιχούν στον καθαρισμό με πάστα (NH₄)₂CO₃ για 2 ώρες και πάστα AB57 για 2 ώρες, υποδεικνύοντας ότι οι επιφάνειες έχουν καταπονηθεί από την εφαρμογή των παστών. Και στα δύο δείγματα, η κρούστα έχει απομακρυνθεί και έχει προκληθεί απώλεια αυθεντικού υλικού.

Στην ίδια κατηγορία των επιφανειών με υψηλή τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων ανήκει και το δείγμα καθαρισμού με πάστα EDTA. Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα δείγματα, η πάστα EDTA δεν έχει απομακρύνει τη γυψοποιημένη κρούστα στο σύνολό της. Έχει όμως προκαλέσει φθορά της ασβεστιτικής μάζας σε βάθος, δημιουργώντας διάκενα, ασυνέχειες και στίγματα, και όπως είναι λογικό, η τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων προκύπτει υψηλή.

Κατόπιν, παρουσιάζεται ομάδα επιφανειών με πολύ κοντινές και αριθμητικά μεσαίες τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων στην οποία ανήκουν τα δείγματα καθαρισμού με: πάστα AB57 για 1 ώρα, πάστα Mora, Ατομικό νερό και πάστα (NH₄)₂CO₃ για 1 ώρα. Η αντίστοιχη ομαδοποίηση των δειγμάτων σε σχέση με την κατάταξη με βάση το

συντελεστή μορφής (ομάδα χαμηλών τιμών συντελεστή μορφής) αφορούσε τα δείγματα: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 2 και 1 ώρα, Πάστα Mora, Πάστα EDTA, Πάστα Σηπιόλιθου.

⇒ Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με τον **συντελεστή ευθρυπτότητας F.I. (%)**:

Οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη ευθρυπτότητας, αντιπροσωπεύουν επιφάνειες περισσότερο ευσταθείς φυσικοχημικά.

Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθρυπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια), είναι:

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	Δείκτης ευθρυπτότητας F.I. (%)
Pm1	Διάγνωση	41,82
Pat2	Ατομ. Νερό	39,71
Pab22	Πάστα AB 57, 2h	30,82
Pnc22	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β, 2h	29,76
Pab12	Πάστα AB 57, 1h	28,25
Ped12	Πάστα EDTA, 1h	27,30
Pm22c	Πάστα Mora, 2h	27,09
Pnc12	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β, 1h	26,28
Ps32	Πάστα Σηπιόλιθου 3.5h	26,18

Ο συντελεστής ευθρυπτότητας του δείγματος διάγνωσης είναι 41,82% και η φυσικοχημική αστάθεια που αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει, αναφέρεται στον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας με αργιλοπυριτικές επικαθίσεις. Ως γενικότερο κριτήριο, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι οι τιμές των συντελεστών ευθρυπτότητας των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις μεθόδους καθαρισμού, δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή αυτή ώστε να μην υφίσταται, μετά τον καθαρισμό, χειρότερη κατάσταση διάβρωσης και μικρότερη επιφανειακή ευστάθεια από την αρχική. Συνεπώς, από την κατάταξη παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις καθαρισμού οι επιφάνειες που προέκυψαν πράγματι παρουσιάζουν συντελεστές ευθρυπτότητας μικρότερους από 41,82%. Εξακολουθούν, όμως, οι τιμές αυτές, εξεταζόμενες μεμονωμένα, να είναι αρκετά υψηλές. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα καθαρισμού με Ατομικό νερό έχει πολύ υψηλή τιμή, αντίστοιχη με την τιμή του δείγματος διάγνωσης, όπως προκύπτει και από την κατάταξη με βάση το συντελεστή μορφής.

Τα υπόλοιπα δείγματα ομαδοποιούνται σε μια κατηγορία με χαμηλότερες τιμές F.I. (από 24,6% ως 29,4%), η οποία ακολουθεί σχετικώς την κατάταξη με βάση το συντελεστή μορφής.

Οι ασυνέχειες μεταξύ των δύο κατηγοριοποιήσεων είναι ασήμαντες καθώς οι διαφορές στις τιμές των μεγεθών είναι πολύ μικρές.

Πιο συγκεκριμένα:

- Στην κατάταξη με βάση τον συντελεστή μορφής, το δείγμα καθαρισμού με Πάστα AB57 για 1 ώρα εμφανίζεται με περισσότερο τραχιά επιφάνεια σε σχέση με το δείγμα της Πάστας $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 2 ώρες. Στην κατάταξη με βάση το F.I. το δείγμα της Πάστας AB57 έχει χαμηλότερο F.I., γεγονός αναμενόμενο καθώς εμφανίζεται με λιγότερο καταπονημένη επιφάνεια (χαμηλότερη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων) και επομένως είναι φυσικοχημικά πιο ευσταθές από το δεύτερο. Οι τιμές του συντελεστή ευθρυπτότητας και των δύο δειγμάτων είναι, όμως, πολύ κοντινές.
- Το δείγμα καθαρισμού με Πάστα AB57 για 2 ώρες εμφανίζει υψηλή τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας, διατηρώντας στην κατάταξη την ίδια θέση που είχε και κατά την κατάταξη με βάση το συντελεστή μορφής (μετά τον καθαρισμό με Ατομικό νερό). Επομένως, υποδεικνύεται ότι το δείγμα εμφανίζεται με τραχιά επιφάνεια και παράλληλα φυσικοχημική αστάθεια.
- Τέλος, τα υπόλοιπα δείγματα (Πάστα Σηπιόλιθου, Πάστα Moga, Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, Πάστα EDTA) παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ευθρυπτότητας, όπως παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή μορφής καθώς ανήκουν στην ομαδοποίηση των δειγμάτων χαμηλού συντελεστή μορφής.

Γενικώς, τα δείγματα παρουσιάζουν μεγάλη ακολουθία κατάταξης με βάση το συντελεστή μορφής και το συντελεστή ευθρυπτότητας (συντελεστής συσχέτισης Pearson $\rho[(F / \text{F.I.})] = 0,98$). Αντίστοιχα, η κατάταξη με βάση το συντελεστή ευθρυπτότητας είναι ακόλουθη της κατάταξης με βάση την πυκνότητα ρηγματώσεων (συντελεστής συσχέτισης Pearson $\rho[(\text{F.D.} / \text{F.I.})] = 0,92$).

Γενικότερα συνάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η εφαρμογή καθαρισμού με **ατομικό νερό**, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με υψηλό συντελεστή μορφής, και επομένως παρουσιάζει μεγάλη τραχύτητα. Στην πραγματικότητα, αποδίδει την πραγματική τραχύτητα της κρούστας, χωρίς τις επικαθίσεις. Ανήκει, όμως, στις μεθόδους που αποδίδουν επιφάνειες με χαμηλή πυκνότητα ρηγματώσεων. Αντίθετα, έχει τον πιο υψηλό συντελεστή ευθρυπτότητας, γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι η ασταθέστερη φυσικοχημικά, επιφάνεια όλων. Η φυσικοχημική αστάθεια που αντιπροσωπεύει αναφέρεται ως επί το πλείστον στον υπάρχοντα γύψο (αστάθεια και ευθρυπτότητα της επιφάνειας \Rightarrow απώλεια γύψου). Παράλληλα, από τις μικροαναλύσεις (SEM/EDX), παρατηρούμε ότι η κρούστα έχει παραμείνει στο σύνολό της (20-80mm). Επομένως, τόσο μορφολογικά όσο και φυσικοχημικά, η μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα τη

δημιουργία επιφάνειας που διαφέρει ελάχιστα από την επιφάνεια φθοράς, και, άρα, θεωρείται αποτυχημένη.

- Η επιφάνεια που έχει προκύψει με εφαρμογή της **Πάστας AB57** για 1 ώρα είναι αυτή που ανήκει στην ομαδοποίηση των επιφανειών με υψηλό συντελεστή ευθρυπτότητας που περιγράφει επιφάνειες με συγκριτικά μεσαία προς υψηλή φυσικοχημική αστάθεια. Ως επιφάνεια παρουσιάζει σχετικά μεγάλη τραχύτητα, καθώς οι τιμές του συντελεστή μορφής είναι υψηλές μεν, αλλά σημαντικά χαμηλότερες από του δείγματος διάγνωσης. Ακόμη, η επιφάνεια εμφανίζει μεσαία προς χαμηλή συγκριτικά πυκνότητα ρηγματώσεων. Με την εφαρμογή της πάστας, προκύπτει ότι η επιφάνεια του δείγματος διατηρεί γυψοποιημένη ζώνη πάχους ως 20μm που αποτελείται από μικροκρυσταλλικό γύψο συνδετικά συνδεδεμένο. Από τις εικόνες SEM, παρατηρούμε ότι το δείγμα σε βάθος διατηρεί πολύ καλύτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά (λιγότερες ρηγματώσεις και ασυνέχειες) από αυτό της δίωρης εφαρμογής, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη σχετικά χαμηλή τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων. Η υψηλή τιμή της επιφανειακής ευθρυπτότητας αναφέρεται στον υπάρχοντα γύψο (υποδεικνύει απώλεια γύψου και όχι αυθεντικού υλικού).
- Από την εφαρμογή της **Πάστας EDTA** προκύπτει επιφάνεια που ανήκει στις μεθόδους με χαμηλό συντελεστή μορφής (συγκριτικά λείες επιφάνειες) και μεσαία προς χαμηλή ευθρυπτότητα. Στην επιφάνεια έχει παραμείνει κρούστα σημαντικού πάχους (30-80μm) που υποδεικνύει ότι ο καθαρισμός δε λειτούργησε, εφόσον το πάχος της κρούστας του δείγματος διάγνωσης ήταν 80μm. Επίσης, η εικόνα του δείγματος συνολικά εμφανίζει σε όλο το βάθος διάβρωση που προσομοιάζει της βελονοειδούς διάβρωσης των μετάλλων (οπές, κρατήρες, ασυνέχειες), αλλά και επιφανειακή καταπόνηση (ρηγματώσεις) απ' όπου προφανώς προκύπτει και η μεσαία τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων. Συνολικά, η μέθοδος απορρίπτεται, καθώς εμφανίζει χαμηλό συντελεστή απόδοσης.
- Μετά τον καθαρισμό με **Πάστα Σηπιόλιθου**, παρατηρούμε από τις εικόνες SEM, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ότι η κρούστα με το γύψο έχει απομακρυνθεί ελάχιστα μετά τον καθαρισμό με τον σηπιόλιθο, καθώς διατηρεί περίπου το ίδιο πάχος με την κρούστα του δείγματος διάγνωσης της φθοράς (20-80μm). Η γυψοποιημένη περιοχή έχει έντονο ανάγλυφο και στο εσωτερικό της περιέχονται κρύσταλλοι διαφόρων διαμέτρων (από 3 ως 30 μm) και διαφόρων μορφών (πλακώδεις, πρισματικές). Αν και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά που αποτελούν τους δείκτες αποτίμησης είναι ικανοποιητικά (χαμηλότερος συγκριτικά συντελεστής μορφής άρα πιο λεία επιφάνεια, χαμηλότερος συγκριτικά συντελεστής ευθρυπτότητας άρα φυσικοχημικά πιο ευσταθής επιφάνεια, χαμηλή πυκνότητα ρηγματώσεων), η μέθοδος δεν είναι αποδεκτή σε σχέση με το κριτήριο της αποτελεσματικότητας καθώς ο καθαρισμός δεν έχει λειτουργήσει (η γυψοποιημένη κρούστα παραμένει σχεδόν στο σύνολό της). Από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις

της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό, διαπιστώνεται ότι οι χρωματικές αλλοιώσεις που δημιουργεί η κρούστα στην επιφάνεια δεν έχουν απομακρυνθεί. Επομένως, η μέθοδος δεν ικανοποιεί ούτε το κριτήριο της αισθητικής.

- Τα δείγματα από τις επιφάνειες όπου εφαρμόστηκαν η **πάστα Moga, η πάστα AB57 για 2 ώρες, η πάστα δ/ματος ανθρακικού αμμωνίου για 1 και 2 ώρες**, αποδίδουν μεσαίες προς χαμηλές τιμές συντελεστή μορφής οι οποίες υποδεικνύουν σχετικά λείες επιφάνειες καθαρού ασβεστίτη. Οι τιμές συντελεστή ευθρυπτότητας για τις πάστες Moga και $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα και 2 ώρες είναι μεσαίες προς χαμηλές συγκριτικά, όμως ως απόλυτες τιμές είναι υψηλές (27,09%, 29,76%, 26,28%). οδηγούμαστε στην απόρριψη των μεθόδων. Η πάστα AB57 για 2 ώρες ανήκει στην ομαδοποίηση των μεθόδων που παρουσιάζουν υψηλή ευθρυπτότητα, άρα η επιφάνεια που προκύπτει είναι φυσικοχημικά η πιο ασταθής. Οι τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων είναι μεσαίες για δύο μεθόδους (Πάστα Moga και Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα) ενώ είναι συγκριτικά πολύ υψηλή για τις άλλες δύο μεθόδους (Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 2 ώρες, Πάστα AB57 για 2 ώρες). Συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις συμπεραίνουμε ότι αυτές οι μέθοδοι απορρίπτονται καθώς τελικά οδηγούν στη δημιουργία επιφανειών εύθρυπτου και καταπονημένου ασβεστίτη, πιθανότατα απώλεια αυθεντικού υλικού και συνολική εικόνα έντονης διάβρωσης.
- Τελικώς, συμπεραίνουμε ότι η επιλογή της βέλτιστης εκ των εξεταζόμενων μεθόδων καθαρισμού αποτέλεσε μια διαδικασία κατά την οποία έπρεπε να ληφθούν υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά των επιφανειών (μορφολογικά, φυσικοχημικά, αισθητικά). Παρόλα αυτά, συμπεραίνουμε ότι για τον τύπο φθοράς της μεγάλους πάχους φαιόμαυρης κρούστας η αποτελεσματικότερη μέθοδος καθαρισμού υπήρξε η εφαρμογή της **Πάστας AB57 για 1 ώρα**.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για τη συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα.

Πίνακας 5.4.4.2.: Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας δειγμάτων των συνεκτικών φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων επιφανειών στην ΕΒΕ

Κωδικός δείγματος	Διάγνωση / Επέμβαση καθαρισμού	Οριακές τιμές T_L και T_U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L* (pixels)	F.D. (%)	Συντελ. μορφής (Γ)	Συντελ. Ευθρυπτότητας F.I. (%)
Pm2	Διάγνωση	72	146	1.118	921	512	15,6	3.90	42,04
Pnc23	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ 10%κ.β., 2h	36	114	1.092	837	512	13,7	3.48	37,44
Ps33	Πάστα Σηπιόλιθου 3.5h	75	110	1.046	440	359	11,2	2.53	27,67

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης:

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων [$\rho(\Gamma/F.D.)$] = 0.99

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης [$\rho(\Gamma/D)$] = 1

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης [$\rho(F.D/D)$] = 1

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(F.D./F.I.)$] = 0.99

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ fractal διάστασης και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(D/F.I.)$] = 1

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(\Gamma /F.I.)$] = 1

Συνολικά, παρατηρούμε ότι το δείγμα μετά από τον καθαρισμό με **Πάστα Σηπιόλιθου** παρουσιάζει εμφανώς ομαλότερο ανάγλυφο (πολύ χαμηλότερη τιμή συντελεστή μορφής), λιγότερες επιφανειακές ρηγματώσεις και παρουσιάζει φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια (μικρότερο συντελεστή ευθρυπτότητας) από το δείγμα καθαρισμού με Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Για όλους τους δείκτες επίσης, το δείγμα καθαρισμού με **Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$** διατηρεί τιμές που κρίνονται πού υψηλές, γεγονός που υποδεικνύει ότι η επιφάνεια μετά τον καθαρισμό δεν έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά.

Από τον πίνακα 5.5.4.2 φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ όλων των δεικτών αποτίμησης είναι πολύ υψηλός (κοντά στη μονάδα), άρα τα μεγέθη είναι ανάλογα, αν και τα συμπεράσματα σε σχέση με την συσχέτιση των δύο μεγεθών (πυκνότητα ρηγματώσεων- συντελεστή μορφής) δεν μπορούν να γενικευτούν καθώς αφορούν πολύ μικρό αριθμό δειγμάτων. Παράλληλα σε σχέση με την κρίση επί της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού συμπεραίνονται τα εξής:

Το δείγμα που έχει καθαριστεί με Πάστα **$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$** 10%κ.β. για 2 ώρες είναι ιδιαίτερα καταπονημένο τόσο επιφανειακά όσο και σε βάθος, παρουσιάζοντας πλήρως αποκολλημένους κόκκους, ρηγματώσεις μέχρι 30μm, ασυνέχειες, διάκενα (και ιδιαίτερα διαβρωμένο ανάγλυφο. Ο γύψος έχει απομακρυνθεί από όλη την επιφάνεια, έχει αποκαλυφθεί ασβεστική επιφάνεια, και, τελικά, η εφαρμογή πιθανότατα έχει προκαλέσει απώλεια αυθεντικού υλικού (ασβεστίτη). Επομένως, ο υψηλός συντελεστής ευθρυπτότητας αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στη δημιουργία εύθρυπτου ασβεστίτη (μη αποδεκτή κατάσταση). Όπως αναφέρθηκε, το δείγμα διατηρεί επίσης υψηλές τιμές συντελεστή μορφής και την πυκνότητα ρηγματώσεων, με μικρή διαφορά από το δείγμα διάγνωσης.

Η μέθοδος καθαρισμού με **Σηπιόλιθο** έχει δημιουργήσει επιφάνεια με περισσότερο αποδεκτούς δείκτες αποτίμησης. Όμως, δεν έχει απομακρύνει τη γυψοποιημένη κρούστα σε επιθυμητό βαθμό, καθώς έχει παραμείνει υπόλειμμα ζώνης γύψου (με επιφάνεια που έχει έντονο ανάγλυφο και σε ορισμένα σημεία είναι αρκετά κατακερματισμένη), πάχους που κυμαίνεται από 5 έως 60μm. Επομένως, ο συντελεστής ευθρυπτότητας αναφέρεται ως επί το πλείστον στο υπάρχοντα γύψο (αστάθεια και ευθρυπτότητα της επιφάνειας σημαίνει απώλεια γύψου). Τα υπολείμματα της κρούστας διακρίνονται εμφανώς και από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις της επιφάνειας μετά τον καθαρισμό (Κεφ.2.4).

Συνεπώς, καμία από τις δύο μεθόδους δεν ικανοποιεί τα κριτήρια για την αποτελεσματικότητα του καθαρισμού.

5.4.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Η τεχνική της χρωματομετρίας έλαβε χώρα επί τόπου στις εξεταζόμενες περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών των λείων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της Εθνικής Βιβλιοθήκης, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* (Χρωματομετρικό σύστημα CIELab), καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού.

Στις επί τόπου μετρήσεις, η επιφάνεια του τύπου φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών χωρίστηκε σε κανάβο και μετρήθηκαν οι χρωματικές παράμετροι L^* , a^* , b^* που τον χαρακτηρίζουν (Μ.Ο. 90 συνολικά τιμών), ανά τύπο φαιόμαυρων κρουστών, δηλ. για την εύθρυπτη και μεγάλου πάχους μαύρη κρούστα, καθώς και για τη συνεκτική. Μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις στον κανάβο αλλά ανά περιοχή καθαρισμού πλέον και καταγράφηκαν οι χρωματικές παράμετροι (Μ.Ο. 25 τιμών, ανά περιοχή καθαρισμού). Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακα 5.4.5) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 5.4.5: Αποτελέσματα επί τόπου χρωματομετρικού ελέγχου

Κωδικός Επιφάνειας	Επέμβαση Καθαρισμού	L^* πριν	a^* πριν	b^* πριν	L^* μετά	a^* μετά	b^* μετά	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Pat2	ατομικό νερό, διάμετρος ακροφυσίου 1.6mm	40.00	2.12	10.00	51.5	3.22	16.3	11.50	1.10	6.30	3.33
Pm22c	Πάστα Moga, 2h	40.00	2.12	10.00	71.4	0.68	9.31	31.40	-1.44	-0.69	31.44
Pab22	Πάστα AB57, 2h	40.00	2.12	10.00	71.2	0.95	9.29	31.20	-1.17	-0.71	31.20
Pnc22	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 2h	40.00	2.12	10.00	78.1	-0.11	6.21	38.10	-2.23	-3.79	38.40
Ps32	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	40.00	2.12	10.00	44.2	3.72	18.9	4.20	1.60	8.90	4.52
Pab12	Πάστα AB57, 1h	40.00	2.12	10.00	53.68	1.53	13.7	13.68	-0.59	3.70	14.7
Pnc12	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 1h	40.00	2.12	10.00	77.4	-0.48	6	37.40	-2.60	-4.00	37.70
Ped12	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	40.00	2.12	10.00	44.26	3.4	17.2	4.26	1.28	7.20	4.89
Pnc23	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 2h	42.80	2.06	10.40	79.2	-0.14	5.74	36.40	-2.20	-4.66	36.80
Ps33	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3:30h	42.80	2.06	10.40	47	2.59	14.6	4.20	0.53	4.20	4.21

Μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού οι τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις ανάλογα με την μέθοδο καθαρισμού που εφαρμόστηκε και την αποτελεσματικότητα που αυτή επέδειξε στην απομάκρυνση των μαύρων κρουστών. Πιο συγκεκριμένα, οι επεμβάσεις του σηπιόλιθου, του ατομικού νερού, καθώς και του EDTA που

δεν απομάκρυναν τις μαύρες κρούστες, παρουσιάζουν μικρές συνολικές μεταβολές χρώματος, και αντίστοιχα μικρές διαφορές λαμπρότητας.

Παράλληλα, οι επεμβάσεις που απομάκρυναν τις μαύρες επικαθήσεις εμφανίζουν τιμές ΔΕ πολύ ψηλές εκτός από την εφαρμογή με πάστα AB57 για μία ώρα. Μεγαλύτερη ΔΕ και αντίστοιχα διαφορά λαμπρότητας, παρουσιάζει η επιφάνεια εφαρμογής της πάστας του ανθρακικού αμμωνίου για δύο ώρες, ενώ μικρότερη η επιφάνεια εφαρμογής του ατομικού νερού.

Μετά τον καθαρισμό οι περισσότερες επιφάνειες μετατοπίζονται στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο, αφού οι τιμές Δa^* είναι αρνητικές, εκτός από τις επιφάνειες που εφαρμόστηκαν οι τεχνικές του ατομικού νερού, της πάστας του σηπιόλιθου, καθώς και του EDTA, δηλ. αυτών που δεν απομάκρυναν επιτυχώς τη μαύρη κρούστα. Αντιστοίχως, σημειώνεται μετατόπιση στο χρωματικό χώρο προς το μπλε, με αρνητικές τιμές του Δb^* για όλες τις περιοχές εκτός από τις προαναφερθείσες και την περιοχή επέμβασης πάστας AB57 για 1 ώρα.

5.4.6 Μερικά Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας και της χρωματομετρίας που δίνουν σαφείς πληροφορίες σε σχέση με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, την επιφανειακή μορφολογία και συνοχή (επιφανειακή μικροδομή), καθώς και το χρώμα των καθαρισμένων επιφανειών και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας που οι εφαρμοσθείσες μέθοδοι καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν συνάγονται τα εξής:

Οι επεμβάσεις καθαρισμού των επιφανειών Pm22c, Pab22, Pnc22, Pnc12, Pnc23, (δηλ. της πάστας Mora, της πάστας AB57 για 2 ώρες και της πάστας ανθρακικού αμμωνίου για 1 και 2 ώρες) απομακρύνουν πλήρως τη φαιόμαυρη κρούστα ακόμα και το στρώμα του μικρο- και κρυπτο-κρυσταλλικού γύψου, αποδίδοντας μια καθαρά ασβεστίτικη επιφάνεια. Τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής μικροδομής των εν λόγω καθαρισμών κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα για τον συντελεστή μορφής (τραχύτητα), σε μέτρια προς υψηλά επίπεδα σε σχέση με την πυκνότητα ρηγματώσεων (ιδίως για την πάστα ανθρακικού αμμωνίου για 2 ώρες), καθώς και σε μέτρια προς υψηλά επίπεδα για τον συντελεστή ευθρυπτότητας. Αν και οι τιμές των ανωτέρω συντελεστών είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του δείγματος διάγνωσης θεωρούνται μη αποδεκτές, αφού περιγράφουν καθαρή ασβεστίτικη επιφάνεια (οι αντίστοιχες τιμές των δειγμάτων διάγνωσης αναφέρονται και περιγράφουν με σχετικά υψηλές τιμές δεικτών μικροδομής την τραχύτητα, πυκνότητα ρηγματώσεων και ευθρυπτότητα τις επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών). Σε σχέση με την τραχύτητα Rq και το λόγο πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια) ισχύουν αντίστοιχα ότι οι σχετικά χαμηλές τιμές τους (εκτός από την πάστα AB57 για 2 ώρες, την πάστα Mora και την πάστα ανθρακικού αμμωνίου για 2 ώρες στην περιοχή της συνεκτικής φαιόμαυρης κρούστας), υποδηλώνουν υψηλή χημική δράση και απώλεια αυθεντικού υλικού που όντως έχει λάβει χώρα αφού απομακρύνθηκε το σύνολο της γυψοποιημένης ζώνης. Τέλος, σε σχέση με τις χρωματικές παραμέτρους διαπιστώνεται ότι οι συγκεκριμένες τεχνικές παρουσιάζουν μεγάλες τιμές συνολικής διαφοράς χρώματος ΔΕ (πάνω από 30) και συνεπώς κρίνονται και αισθητικά ως μη αποδεκτές.

Οι επεμβάσεις καθαρισμού που έλαβαν χώρα στις επιφάνειες Pat2, Ps32, Ped12 και Ps33 (δηλ. το ατομικό νερό, η πάστα σηπιολίθου και η πάστα EDTA) δεν κατάφεραν να απομακρύνουν τις μαύρες επικαθήσεις και τον αδροκρυσταλλικό γύψο του ανώτερου στρώματος της κρούστας. Βέβαια διατήρησαν το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου που είναι το έτερο επιδιωκόμενο. Σε αυτές τις επιφάνειες η συνολική μεταβολή του χρώματος ΔΕ είναι πάρα πολύ χαμηλή (<5), υποδεικνύοντας ακριβώς τη μη απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων. Σε σχέση με τους συντελεστές της επιφανειακής μικροδομής διαπιστώνεται ότι οι τιμές τους είναι παρόμοιες με αυτές του δείγματος διάγνωσης (επιφ. Ατομικού νερού) ή μικρότερες δείχνοντας ότι υπήρξε χημική δράση αλλά αναποτελεσματική από τις πάστες του σηπιολίθου και του EDTA. Η τραχύτητα Rq και η ενεργή επιφάνεια αντίστοιχα παρουσιάζουν

υψηλές τιμές για την τεχνική του ατομικού νερού (υποδεικνύοντας πιθανά τις πραγματικές τιμές για την κατάσταση διάγνωσης) και χαμηλές για τις υπόλοιπες.

Τέλος, η επιφάνεια που καθαρίστηκε με την πάστα AB57 για 1 ώρα διατηρεί το στρώμα του μικρο-, και κρύπτοκρυσταλλικού γύψου, έχοντας απομακρύνει το υπερκείμενο στρώμα του αδροκρυσταλλικού γύψου με τις μαύρες επικαθήσεις. Η συνολική μεταβολή χρώματος είναι μεσαία (γύρω στο 14) και άρα μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή. Η γενική μορφολογική επισκόπηση, κρίνεται ικανοποιητική και οι δείκτες της μικροδομής παρουσιάζουν τιμές πιο χαμηλές από το δείγμα διάγνωσης αποδίδοντας όμως πλέον χαρακτηριστικά επιφ. μικροδομής στη διατηρημένη γυψοποιημένη ζώνη. Αντίστοιχα, η τραχύτητα R_q και η ενεργή επιφάνεια παρουσιάζουν τιμές χαμηλές, υποδηλώνοντας μικρή επιδεκτικότητα στη φθορά.

5.5 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - Η περίπτωση των περικρυσταλλικά ρηγματωμένων επιφανειών στο ιστορικό κτίριο της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος

5.5.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Στο πλαίσιο της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, στις περιοχές του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, όπου είναι μερικώς προστατευμένες από το νερό της βροχής. Μελετάται κυρίως η υφή των κόκκων του πεντελικού μαρμάρου, η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των τύπων φθοράς, καθώς και η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των επεμβάσεων καθαρισμού.

Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.



Π. Mora 1,5h, x25 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



Π. Mora 1,5h, x50 (αποπλυμένη περιοχή)



AB57 1,5h, x50 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



AB57 1,5h, x25 (αποπλυμένη περιοχή)



10% $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 1,5h, x25 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



10% $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 1,5h, x25 (αποπλυμένη περιοχή)



Σηπιόλιθος και απιονισμένο νερό 3h, x50, (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



Σηπιόλιθος και απιονισμένο νερό 3h, x25 (αποπλυμένη περιοχή)



AB57 1h, x50 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



10% $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 1h, x50 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



EDTA 3% 1h, x25 (περιοχή με μαύρες επικαθίσεις)



EDTA 3% 1h, x25 (αποπλυμένη περιοχή)

Από τις παραπάνω εικόνες καθίσταται σαφές ότι οι επεμβάσεις καθαρισμού που έχουν εφαρμοστεί για μιάμιση ώρα (δηλ. η πάστα Mora το $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ και η πάστα AB57) παρόλο που απομακρύνουν πλήρως τις μαύρες επικαθίσεις, καθιστούν τα περατωτικά όρια των κόκκων ή των συσσωματωμάτων των κόκκων του ασβεστίτη πολύ πιο εμφανή, δίνοντας την εντύπωση ότι έχουν παραχθεί πιο τραχιές επιφάνειες.

Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις για την περιοχή που εφαρμόστηκε $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για μία ώρα, ενώ για την επιφάνεια εφαρμογής πάστας AB57 για 1 ώρα δεν έχει λάβει χώρα πλήρης απομάκρυνση των μαύρων επικαθίσεων.

Στην επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε το EDTA ανάλογα με το κατά τόπους παρουσιαζόμενο ποσοστό των μαύρων επικαθίσεων, η χημική δράση της πάστας είτε δεν απομάκρυνε τις μαύρες επικαθίσεις ή στις περιπτώσεις που αυτό επιτεύχθηκε η επιφάνεια παρουσιάζει πιο τραχιά υφή.

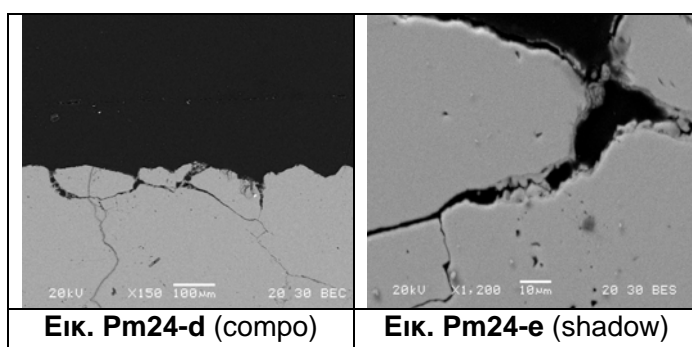
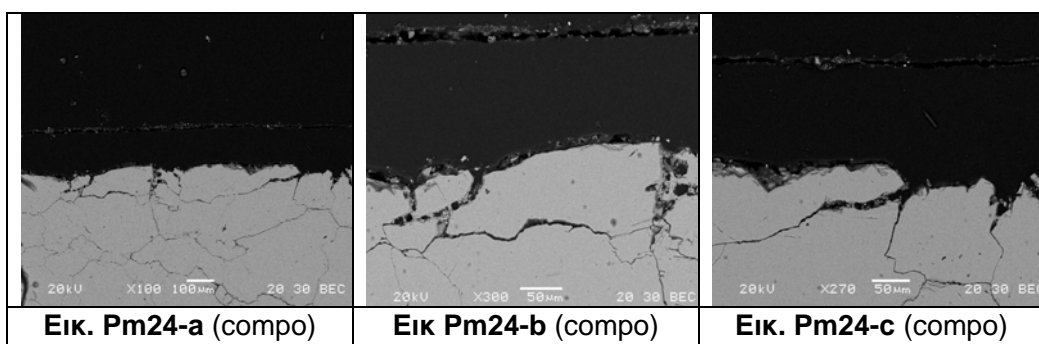
Τέλος, η πάστα του σηπιολίθου με απιονισμένο νερό δείχνει να απομακρύνει τις μαύρες επικαθίσεις χωρίς να ενισχύει το φαινόμενο της τραχιάς υφής σε σχέση με τα περατωτικά όρια των κόκκων του ασβεστίτη.

Στοιχεία για την επίδραση των καθαρισμών στις σχεδόν αποπλυμένες περιοχές υπάρχουν μόνο για τις επεμβάσεις με πάστα Mora, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 1:30h, AB57 1:30h και σηπιόλιθο, αφού μόνο αυτές οι επεμβάσεις καθαρισμού χωροθετικά στο κάτω τμήμα τους περιελάμβαναν αυτές τις εκπλενόμενες περιοχές. Οι παρατηρήσεις και σε αυτές τις περιοχές είναι ανάλογες με αυτές των περιοχών με έντονες μαύρες επικαθίσεις.

5.5.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ στα δείγματα που ελήφθησαν μετά την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου του κτιρίου της ΕΒΕ.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Πάστα Mora



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pm24-b	1	~	~	~	•	~	*	~	~	****	•	~	~
	2	~	***	**	****	~	~	~	~	***	**	*	~
	3	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Pm24-b	4	*	*	•	*	~	**	~	•	****	~	~	~
	5	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	~	*	*	*	~	*	~	~	****	***	~	~
	7	~	~	~	•	~	~	~	•	****	~	~	~
	8	*	*	*	*	~	*	~	•	****	*	~	~
	9	~	*	*	**	~	*	~	~	****	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pm24-c	1	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	****	*	~	~	~	**	*	~	~
	3	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	~	*	*	**	~	*	~	~	****	*	*	~
Pm24-c	7	~	*	*	**	~	*	~	•	****	•	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pm24-d	1	~	~	~	*	~	•	~	~	****	~	~	~
	2	~	•	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	***	*	***	•	*	•	~	****	*	~	~
	6	*	*	~	*	~	**	•	~	****	~	~	~
	7	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pm24-e	1	~	~	~	•	~	**	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	~	~	•	~	•	****	~	~	~
	3	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα Mora για 1,5 ώρα. Στο δείγμα είναι εμφανείς οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, ενώ επιφανειακά έχουν αποκολληθεί κρύσταλλοι ασβεστίτη (Εικ. Pm24-b, Pm24-d). Ο γύψος απουσιάζει εξολοκλήρου από την επιφάνεια του δείγματος.

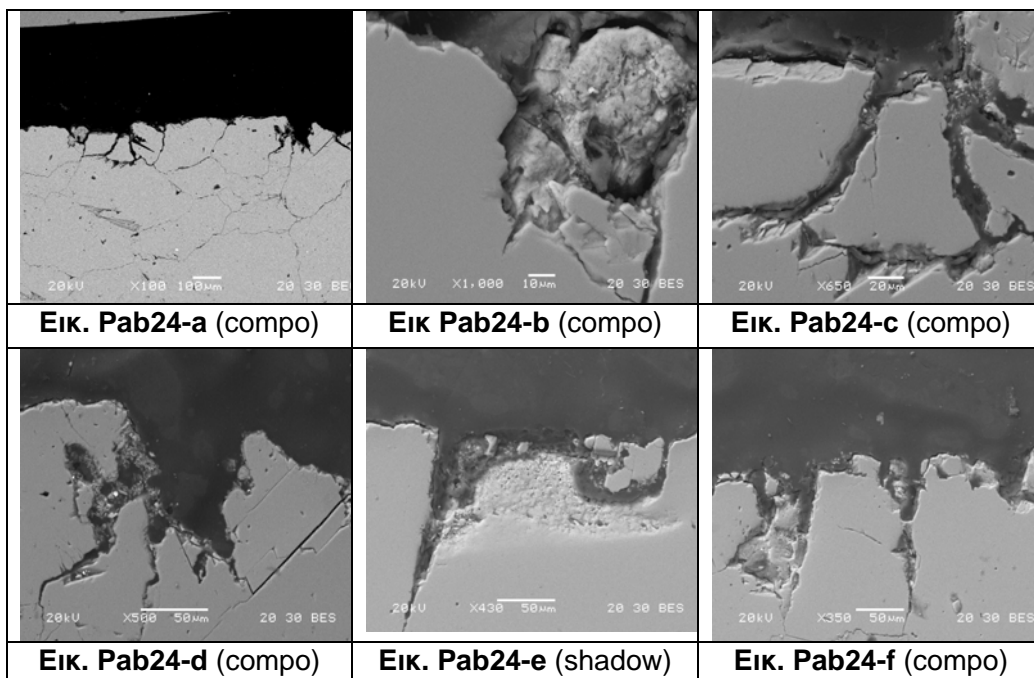
Το S σε χαμηλά ποσοστά ανιχνεύεται τόσο στην επιφάνεια του δείγματος όσο και σε αρκετά σημεία πλευρικά των ρηγματώσεων μέχρι το βάθος των 70μm (Εικ. Pm24-b: EDX 1, 4, 8 / Εικ. Pm24-d: EDX 2, 5, 7 / Εικ. Pm24- e: EDX 1, 3), γεγονός που δηλώνει ότι οι ρηγματώσεις ήταν πριν τον καθαρισμό πληρωμένες με γύψο.

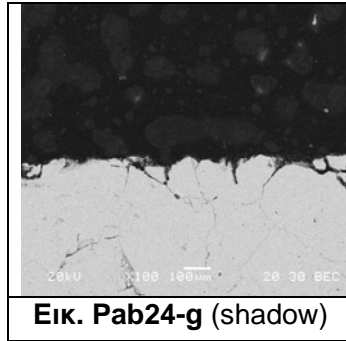
Υπάρχει χαμηλή περιεκτικότητα σε Si και Al μέχρι και τα 70μm (πλευρικά σε ρηγματώσεις), ενώ εντοπίζονται σημεία όπου η περιεκτικότητα του Si είναι αυξημένη (παρουσία έως πολλή), υποδηλώνοντας την ύπαρξη αργιλοπυριτικών ενώσεων στην επιφάνεια του δείγματος, πιθανότατα υπολείμματα πάστας, (Pm24-b : EDX 2, 9 / Pm24-c : EDX 6, 7 / Pm24-d : EDX 5) ή χαλαζία (Pm24-c : EDX 2), παρόλο που δεν διακρίνεται σαφώς κρύσταλλος του ορυκτού στην εικόνα.

Στις αναλύσεις όπου τα Si και Al βρίσκονται σε υπολογίσιμες περιεκτικότητες, εντοπίζεται αρκετό Mg και Fe σε διάφορα ποσοστά (αρκετό, παρουσία, λίγο), ενώ υπάρχουν και ίχνη K.

Στο EDX 6 (Εικ. Pm24-c) υπάρχει ένα Ti σε χαμηλή περιεκτικότητα. Τέλος, εντοπίζονται ίχνη P στην εικόνα Pm24-d (EDX 5).

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα AB57 για 1.5 ώρα





Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab24-a	1	~	*	•	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	2	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab24-b	1	~	~	~	~	~	•	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab24-c	1	~	*	*	***	~	**	*	*	****	*	~	~
	2	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	•	~	*	~	•	~	•	****	~	~	~
	4	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	~	*	~	*	~	•	****	~	~	~

	6	~	*	**	***	~	*	~	*	***	*	~	~
	7	~	*	~	*	•	~	~	~	****	~	~	~
	8	~	~	~	*	~	*	~	~	****	**	~	~
Pab24-c	9	~	~	~	•	~	~	•	~	****	~	~	~
	10	~	•	•	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	11	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	12	~	*	~	*	~	•	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab24-d	1	~	*	*	***	~	*	•	•	****	*	~	~
	2	*	~	*	**	*	*	•	•	****	~	~	~
	3	*	*	~	**	~	*	~	•	****	*	~	~
	4	*	*	*	***	~	**	•	*	****	*	~	~
	5	~	*	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	6	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

	7	~	•	•	*	~	*	~	~	****	~	~	**
	8	~	•	*	*	~	***	•	•	****	~	~	***
	9	*	*	•	•	~	*	•	•	****	~	~	~
Pab24-d	10	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	11	*	*	*	**	•	*	•	*	****	*	~	~
	12	*	*	•	**	~	**	•	*	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab24-e	1	~	*	~	*	•	*	~	•	****	~	~	~
	2	~	*	•	*	•	*	~	•	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

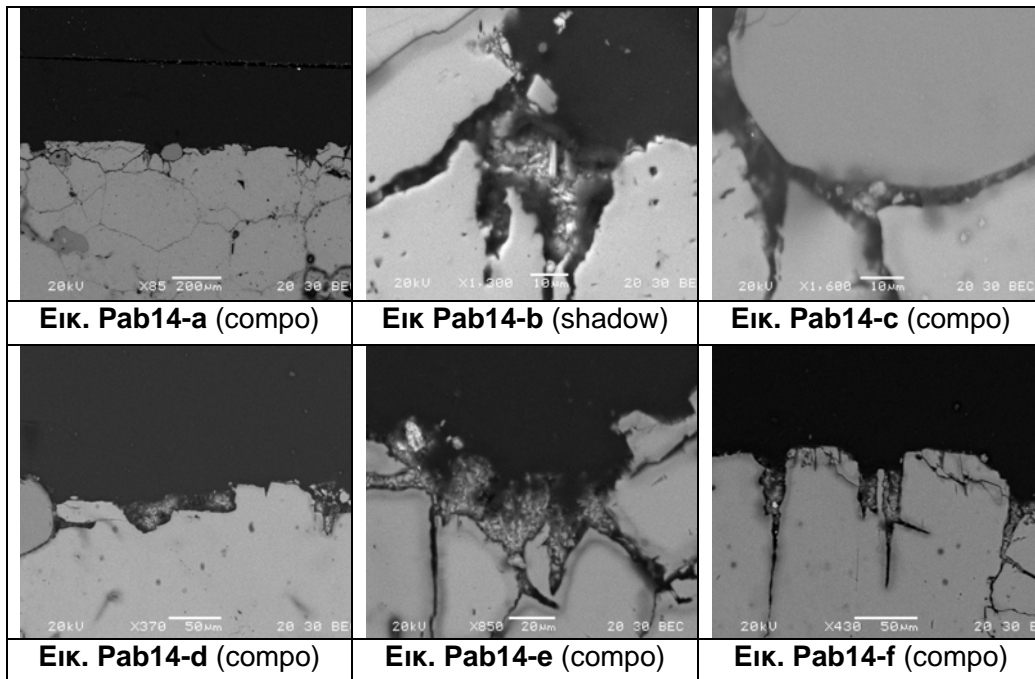
Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα AB57 για 1,5 ώρα. Η επιφάνεια του δείγματος είναι έντονα διαβρωμένη με κατακερματισμένο ανάγλυφο (Εικ. Pab24-a, Pab24-b, Pab24-c, Pab24-d, Pab24-e, Pab24-f, Pab24-g). Υπάρχουν αρκετοί κόκκοι ασβεστίτη που είναι αποκολλημένοι (Εικ. Pab24-c, Pab24-e, Pab24-d). Οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις (Εικ. Pab24-a, Pab24-g) είναι ιδιαίτερα εμφανείς και σε μεμονωμένους κρυστάλλους διακρίνονται έντονα σπασίματα (Εικ. Pab24-c, Pab24-d). Στις εικόνες Pab24-a και Pab24-e εντοπίζονται αποφλοιωμένες

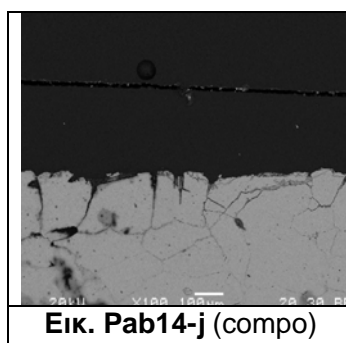
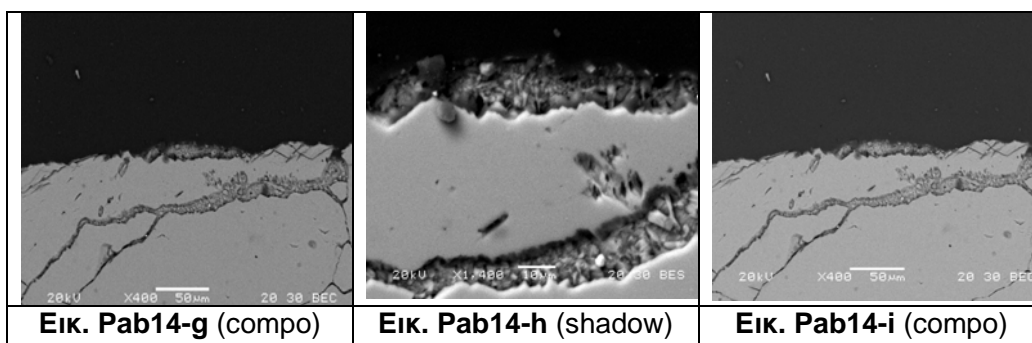
περιοχές με έντονα σπογγώδη μορφολογία που οφείλονται πιθανότατα σε χημική προσβολή του κόκκου του ασβεστίτη από την πάστα.

Δεν εντοπίστηκε γύψος επιφανειακά στο δείγμα (εκτός από την ανάλυση: Εικ. Pab24-d: EDX 8). Υπάρχουν αρκετά σημεία στην επιφάνεια όπου εντοπίζεται S σε ποσοστά που κυμαίνονται (από χαμηλά έως παρουσία), ενώ εντοπίζεται, σε χαμηλή περιεκτικότητα και πλευρικά σε ρηγμάτωση, στο βάθος των 80μm.

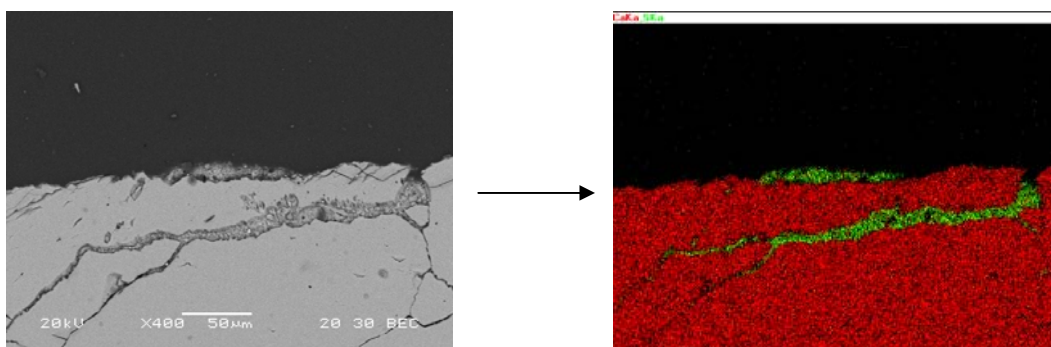
Η παρουσία Mg είναι χαμηλή (εως και ίχνη), αλλά εντοπίζεται στην πλειοψηφία των αναλύσεων. Σε χαμηλά ποσοστά και μέχρι τα 80μm υπάρχει Al, Si αλλά και Na, K, Cl (χαμηλά ποσοστά ή ίχνη). Επίσης, λόγω της αρκετής περιεκτικότητας του Si σε ορισμένα σημεία, που συνοδεύεται και από Al σε χαμηλότερα ποσοστά, συμπεραίνουμε ότι υπάρχουν κρύσταλλοι αργιλοπυριτικών ορυκτών, που πιθανώς αποτελούν υπολείμματα της πάστας. Στην εικόνα Pab24-d διακρίνονται ορισμένες λευκές περιοχές. Αυτές που αντιστοιχούν στα EDX 7 και 8 δίνουν αρκετό ποσοστό Ba, που πιθανότατα αποτελεί επικάθιση σωματιδίων, ενώ το EDX 2 παρουσιάζει αρκετό P. Σε χαμηλά ποσοστά και σε διάφορες αναλύσεις υπάρχει Fe, το οποίο βρίσκεται μαζί με τα αργιλοπυριτικά.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα AB57 για 1 ώρα





Στην Εικόνα **Pab14 –i** έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και του S. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο Ca ενώ το πράσινο στο S.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab14-a	1	~	~	~	****	~	~	~	~	~	~	~	~
	2	~	*	*	**	~	*	•	•	****	~	~	~

Pab14-a													
	3	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pab14-b	1	~	*	***	***	~	***	~	**	**	*	•	~
	2	~	~	~	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	3	~	*	~	•	~	~	~	•	****	~	~	~
	4	~	~	~	*	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab14-c	1	~	~	~	***	~	***	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pab14-d	1	~	~	•	*	~	****	~	~	***	~	~	~
	2	~	•	~	~	~	~	~	•	****	~	~	~
	3	~	~	~	~	~	~	~	•	****	~	~	~
	4	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	~	~	•	~	****	•	~	***	•	~	~

Pab14-d	6	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	7	~	~	~	~	~	~	~	•	****	~	~	~
	8	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab14-e	1	~	***	***	***	~	*	•	•	*	****	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Pb
Pab14-f	1	*	~	*	***	**	*	*	*	*	****	*	**
	2	~	~	•	*	~	****	•	•	***	~	~	*
	3	~	•	~	•	~	****	~	~	***	~	~	*

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pab14-h	1	~	~	•	*	~	****	•	~	***	•	~	~
	2	~	~	~	~	~	•	~	•	****	~	~	~
	3	~	~	*	**	~	****	•	•	***	•	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

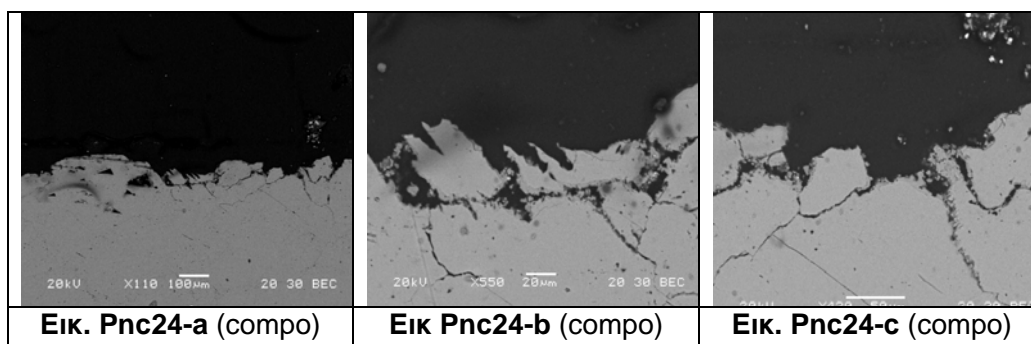
Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα AB57 για 1ώρα. Η επιφάνεια του δείγματος είναι έντονα διαβρωμένη με κατακερματισμένο ανάγλυφο, καθώς υπάρχουν αρκετοί κόκκοι ασβεστίτη αποκολλημένοι, περικρυσταλλικές ρηγματώσεις πάχους μεγαλύτερου των 10μm. Στην εικόνα εντοπίζονται κρατήρες και οπές σε κόκκο ασβεστίτη, που συνοδεύονται από απώλεια υλικού του κόκκου σε βάθος, και πιθανότατα είναι αποτέλεσμα της χημικής προσβολής που προκάλεσε η πάστα.

Υπάρχουν αρκετές γυψοποιημένες περιοχές στο δείγμα, που είτε βρίσκονται επιφανειακά ή πληρώνουν ρηγματώσεις μήκους μέχρι 300μm (Εικ.Pab14-d, Pab14-e, Pab14-f, Pab14-g, Pab14-h). Σε μια τέτοια χαρακτηριστική εικόνα (Pab14-i) έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του Ca και S. Ίχνη S εντοπίζονται μόνο σε μια ανάλυση, σε βάθος μόλις 2μm από την επιφάνεια.

Στην εικόνα Pab14-e διακρίνεται λευκός κρύσταλλος αργιλοπυριτικού ορυκτού που είναι πλούσιο σε Mg και Fe (πιθανώς μαρμαρυγίας). Όμοιας σύστασης κρύσταλλος υπάρχει μέσα στην μάζα του γύψου στην εικόνα Pab14-b (EDX 1), αλλά και στην Pab14-f (EDX 1), όπου υπάρχει P (παρουσία) καθώς επίσης και Zn, Pb σε χαμηλή περιεκτικότητα. Ο Pb εντοπίζεται, ακόμη, σε άλλες δύο αναλύσεις μέσα στον γύψο. Το Si (σε χαμηλή περιεκτικότητα), το Al και ο Fe (σε ίχνη), ανιχνεύονται σε διάφορα σημεία μέσα στις γυψοποιημένες περιοχές. Το Si εντοπίζεται, επίσης, σε χαμηλή περιεκτικότητα σε κόκκο ασβεστίτη στο βάθος των 3μm.

Στην εικόνα Pab14-a (EDX 2,3) διακρίνεται επιφανειακά σκουρόχρωμος κρύσταλλος χαλαζία διαμέτρου 80μm, που αποτελεί συστατικό του πεντελικού μαρμάρου. Τέλος, υπάρχουν μέσα σε γυψοποιημένες περιοχές ίχνη K και Cl.

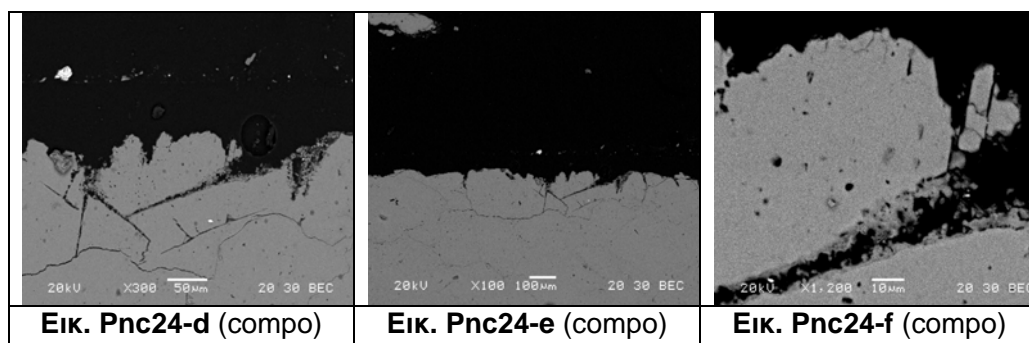
Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10 %κ.β. για 1.5 ώρα



Εικ. Pnc24-a (compo)

Εικ Pnc24-b (compo)

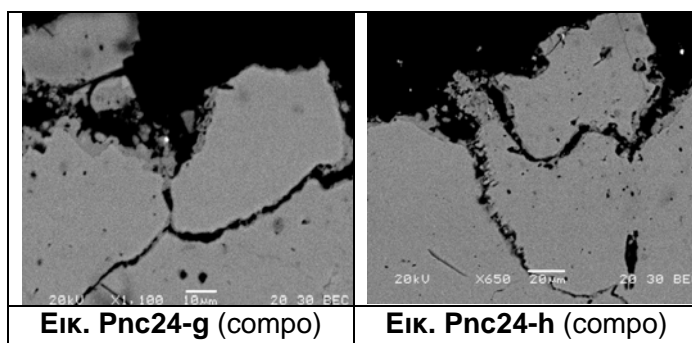
Εικ. Pnc24-c (compo)



Εικ. Pnc24-d (compo)

Εικ. Pnc24-e (compo)

Εικ. Pnc24-f (compo)



Εικ. Pnc24-g (compo)

Εικ. Pnc24-h (compo)

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc24-a	1	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc24-b	1	~	*	*	**	~	*	~	•	****	*	~	~
	2	~	*	***	****	•	*	~	*	*	**	~	~
	3	~	***	*	*	~	*	•	•	****	*	~	~
	4	~	~	~	~	~	~	*	~	~	****	~	~
	5	*	•	**	***	~	~	*	•	•	****	*	~

	6	~	*	*	*	~	**	•	•	****	*	~	~
	7	~	*	~	*	~	~	~	•	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc24-c	1	~	•	***	***	~	**	~	*	***	*	~	~
	2	~	*	**	***	~	**	•	*	***	*	~	~
	3	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
Pnc24-c	4	~	•	~	*	~	**	~	~	****	~	~	~
	5	~	**	~	•	~	*	~	•	****	~	~	~
	6	~	~	~	*	~	*	•	•	****	~	~	~
	7	~	**	*	***	~	***	*	*	***	~	~	~
	8	~	•	~	*	~	*	•	•	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
	1	~	**	*	***	~	**	•	•	****	~	~	~
	2	~	*	•	*	~	**	•	•	****	•	~	~

Pnc24-d	3	~	*	•	*	~	**	•	•	****	~	~	~
	4	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	~	*	~	*	•	•	****	~	~	~
	6	~	*	*	*	~	**	~	~	****	•	~	~

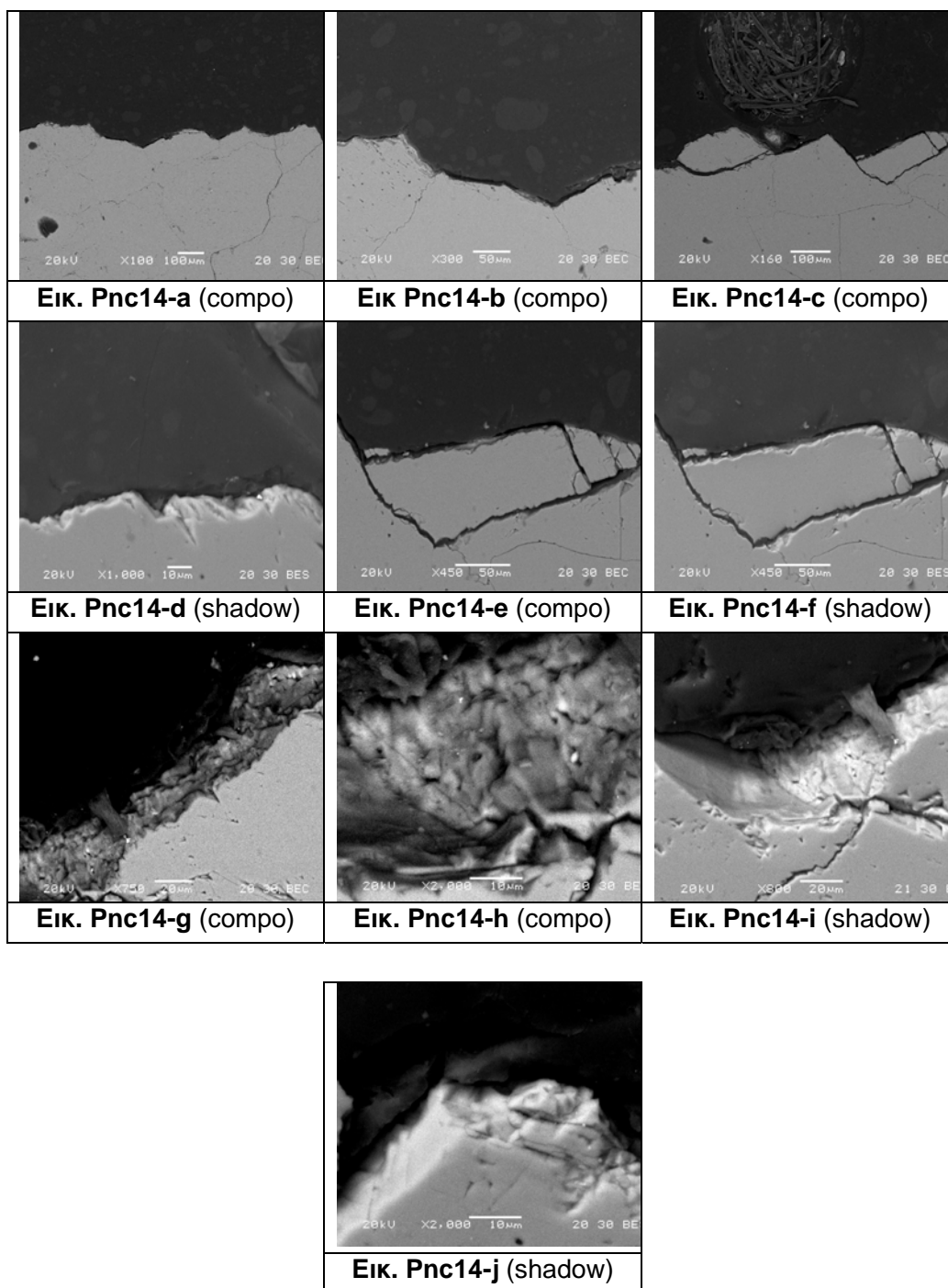
Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β. για 1.5 ώρα. Στην επιφάνεια υπάρχουν κόκκοι ασβεστίτη αποκολλημένοι από τη μάζα του δείγματος, ενώ ορισμένων κόκκων τα όρια εμφανίζουν μεγάλη τραχύτητα. Οι ρηγματώσεις είναι εμφανείς σε όλο το δείγμα. Σε όλες σχεδόν τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε επιφανειακά σημεία των κρυστάλλων ασβεστίτη, εντοπίζεται S (παρουσία ή λίγο). Επίσης, S σε αρκετή περιεκτικότητα (κρύσταλλος γύψου), βρίσκεται μόνο μέσα σε ρηγμάτωση και σε βάθος 80μm από την επιφάνεια. Ακόμη, τα όρια των κόκκων του ασβεστίτη εμφανίζουν μορφολογική αλλοίωση και εικόνα χημικής προσβολής από την πάστα (Εικόνα Pnc24-f, g, h).

Η εμφάνιση Al και Si στις επιφανειακές περιοχές ή μέσα σε ρηγματώσεις (μέχρι και το βάθος των 80μm) είναι συχνή, αντιπροσωπεύοντας σε άλλες περιπτώσεις αργιλοπυριτικά ορυκτά (περιεκτικότητα πολλή ή αρκετή) και σε άλλες περιπτώσεις παρουσία ή ίχνη. Το δείγμα περιέχει, επίσης, Mg σε περιεκτικότητα που κυμαίνεται από ίχνη ως αρκετή. Ακόμη, πολλές αναλύσεις δείχνουν την ύπαρξη K και Cl, είτε σε ίχνη ή σε χαμηλές περιεκτικότητες. Σε χαμηλές περιεκτικότητες βρίσκεται, τέλος, και ο Fe σε αρκετές αναλύσεις.

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β. για 1 ώρα



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Pnc14-a	1	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Pnc14-b	1	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
Pnc14-b	2	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	4	~	~	~	•	•	~	~	~	****	*	~	~

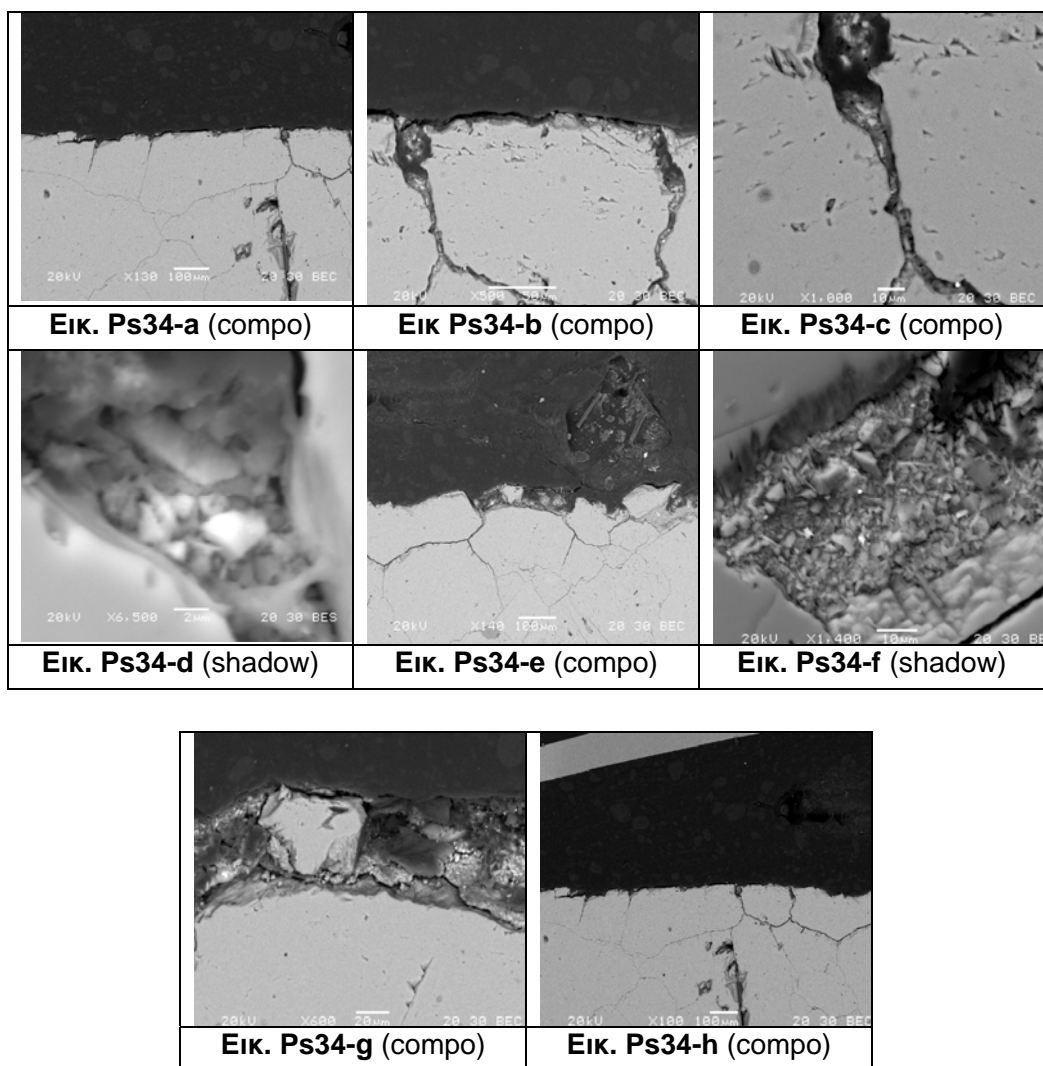
Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β. για 1ώρα. Η επιφάνεια του δείγματος εμφανίζεται με λιγότερα στοιχεία διάβρωσης από ότι στα δείγματα των προηγούμενων επεμβάσεων καθαρισμού. Όμως, ούτε στην συγκεκριμένη περίπτωση απουσιάζουν οι αποκολλημένοι, από το σώμα του μαρμάρου, κόκκοι ασβεστίτη και το έντονο ανάγλυφο της επιφάνειας. Οι ρηγματώσεις είναι επίσης εμφανείς, έχοντας πάχος μέχρι 10 μm . Παρουσιάζεται το φαινόμενο της κλιμακωτής αποφλοίωσης τόσο παράλληλα στην τομή (Εικ. Pnc14-g) όσο κάθετα στην τομή (Εικ. Pnc14-j), εξαιτίας της χημικής προσβολής του ασβεστίτη από την πάστα, αφήνοντας έντονο ανάγλυφο στους επιφανειακούς κόκκους.

Ο γύψος απουσιάζει από το δείγμα, όπως επίσης και τα ίχνη S. Αντίθετα, υπάρχει Si και Mg σε ίχνη μέχρι το βάθος των 25 μm .

Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Πάστα Σηπιολίθου



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Ps34-b	1	~	•	*	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	2	~	*	~	*	~	~	~	•	****	~	~	~
	3	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Ps34-b	4	~	*	*	***	*	*	*	*	****	~	~	~
	5	~	•	*	*	~	*	•	•	****	*	~	~
	6	*	*	*	***	*	***	*	*	***	**	~	~
	7	*	~	*	**	~	***	*	*	****	**	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Ps34-c	1	~	~	*	***	~	***	•	•	***	•	~	~
	2	~	~	~	*	~	*	~	•	****	~	~	~
	3	~	~	•	*	~	*	**	*	***	~	~	***
	4	~	~	~	•	•	*	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Ps34-d	1	~	•	*	*	~	***	•	•	****	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Ps34-e	1	~	~	*	**	~	****	~	•	***	~	~	~
Ps34-e	2	~	•	~	•	~	•	~	•	****	~	~	~

	3	~	~	•	*	~	****	•	•	***	~	~	~
	4	~	*	**	***	~	***	~	*	***	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
Ps34-f	1	~	*	*	*	~	***	~	~	****	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Sn	Pb
Ps34-g	1	~	•	~	*	~	***	~	~	****	~	~	~
	2	~	~	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	3	~	*	*	***	~	*	~	~	****	*	~	~
	4	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~
	6	~	~	•	*	~	***	~	~	***	*	**	~
	7	~	*	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~
	8	~	•	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

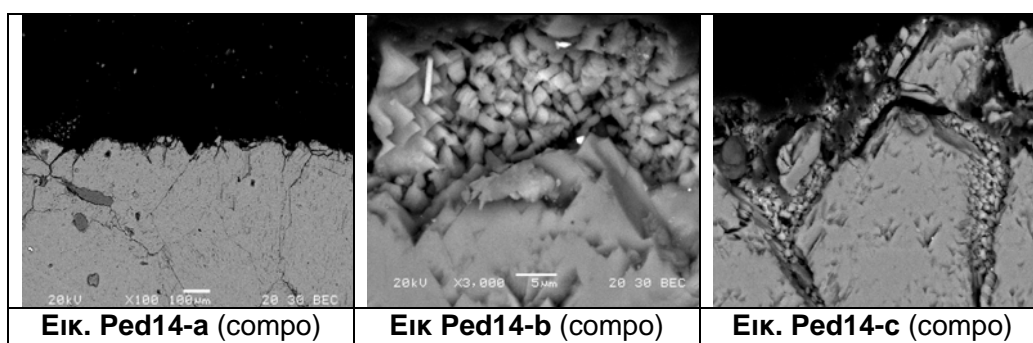
Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα Σηπτιολίθου. Στο δείγμα δεν διακρίνεται γυψοποιημένη ζώνη στην επιφάνεια του δείγματος, όμως οι κατά τόπους επιφανειακές ρηγματώσεις (πάχους κατά μέσο όρο 5μm) είναι πληρωμένες με γύψο. Και σε αυτό το δείγμα είναι εμφανείς οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις και οι διακλάσεις, όπως επίσης και το διαβρωμένο ανάγλυφο, όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της κλιμακωτής αποφλοίσωσης του δείγματός παράλληλα στην τομή (Εικ.Ps34).

Στις εικόνες Ps34-d και Ps34-f φαίνονται χαρακτηριστικά περιοχές αποτελούμενες από κρυσταλλικά συσσωματώματα γύψου μέσα σε ρηγματώσεις (διάμετρος κόκκων από 1 ως 0.1μm). Στο σώμα του μαρμάρου ανιχνεύεται παρουσία S μέχρι βάθους 2μm, άρα η γυψοποίηση του ασβεστίτη έχει προχωρήσει σε ορισμένο βάθος στην περιοχή.

Τα Si και Al εντοπίζονται στις γυψοποιημένες περιοχές σε αρκετές αναλύσεις και σε διάφορες περιεκτικότητες που υποδεικνύουν και την ύπαρξη αργιλοπυριτικών μέσα στις περιοχές του γύψου. Στην εικόνα Ps34-f (EDX1) διακρίνεται επιμήκης κρύσταλλος αργιλοπυριτικού ορυκτού στη γυψοποιημένη περιοχή, ενώ στην εικόνα Ps34-h μέσα στο σώμα του μαρμάρου διακρίνεται σκουρόχρωμος κρύσταλλος χαλαζία.

Η ανάλυση δείχνει ίχνη Mg τόσο στους κρυστάλλους του ασβεστίτη όσο και στην περιοχή του γύψου (είτε σε ίχνη ή σε χαμηλή περιεκτικότητα). Τέλος, μέσα στην περιοχή του γύψου εντοπίζεται Fe (από ίχνη εως παρουσία), Ba (αρκετό) και Sn (παρουσία), που προέρχονται από επικαθίσεις σωματιδίων.

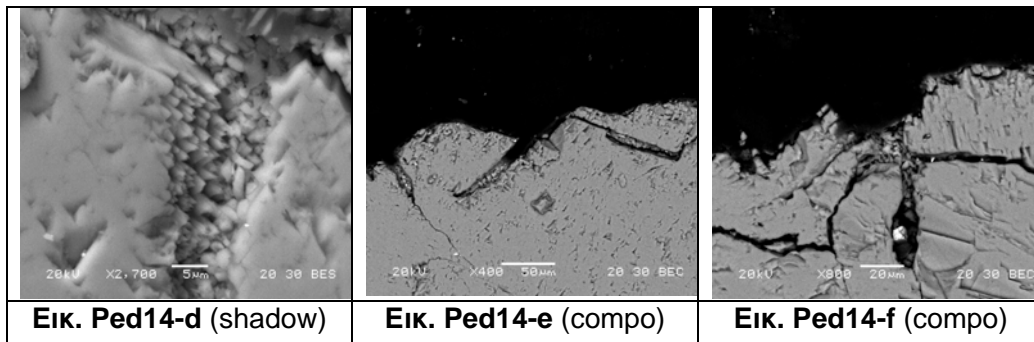
Πιλοτική Επέμβαση Καθαρισμού: Αποτίμηση καθαρισμού με πάστα EDTA 3%



Εικ. Ped14-a (compo)

Εικ. Ped14-b (compo)

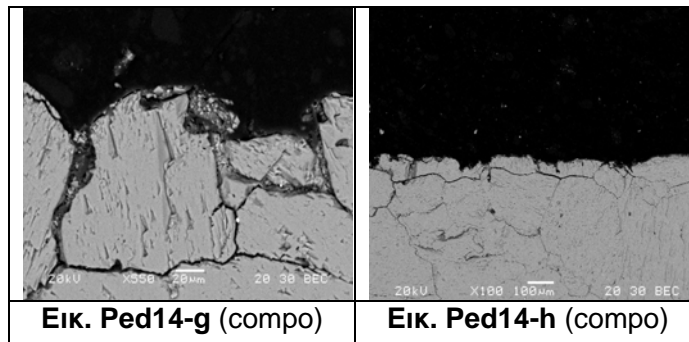
Εικ. Ped14-c (compo)



Εικ. Ped14-d (shadow)

Εικ. Ped14-e (compo)

Εικ. Ped14-f (compo)



Εικ. Ped14-g (compo)

Εικ. Ped14-h (compo)

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ba
Ped14-a	1	~	~	~	****	~	~	~	~	•	~	~	~
	2	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~
	3	~	~	•	*	~	***	~	~	****	*	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ti	Cu
	1	~	~	*	*	~	*	~	~	***	~	~	****	~
	2	~	~	~	•	~	**	~	~	****	~	~	~	~
	3	~	•	~	•	~	*	~	~	****	~	~	~	~

Ped14-b	4	~	~	~	*	~	***	~	~	****	~	~	~	~
	5	~	~	•	**	~	***	•	•	***	•	***	~	***
	6	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~	~
	7	~	•	~	*	~	**	~	~	****	~	~	~	~
	8	~	~	~	*	~	*	~	~	****	~	~	~	~
	9	~	*	~	~	~	~	~	~	****	~	~	~	~

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ti
Ped14-c	1	~	~	~	****	~	*	~	~	*	~	~	~
	2	~	~	•	*	•	*	~	•	****	~	~	~
	3	~	*	***	****	~	~	~	*	**	**	~	•

Κωδικός Εικόνας	EDX	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ba
	1	~	~	~	*	~	•	~	•	****	~	~	~
	2	~	*	~	~	~	~	~	•	****	~	~	~
	3	~	~	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~

Ped14-e	4	~	•	~	•	~	~	~	~	****	~	~	~
	5	~	~	~	*	~	*	~	•	****	~	~	~
	6	~	~	~	*	~	***	•	*	****	**	~	~
	7	~	~	~	~	~	***	~	~	****	~	~	~
	8	~	~	•	*	~	****	~	•	***	~	~	~

Τα σύμβολα αντιστοιχούν στις εξής περιεκτικότητες:

πολύ	****	λίγο	*
αρκετό	***	ίχνη	•
παρουσία	**	καθόλου	~

Το δείγμα έχει καθαριστεί με πάστα EDTA 3%. Το δείγμα διαφοροποιείται σε σχέση με τα προηγούμενα λόγω του ότι παρουσιάζει έντονη διάβρωση σε όλο το βάθος, η οποία εμφανίζεται με μορφή που προσομοιάζει της βελονοειδούς διάβρωσης των μετάλλων, με τα χαρακτηριστικά στίγματα. Επίσης, είναι εμφανείς οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, οι διακλάσεις και το έντονο ανάγλυφο. Κατά τόπους οι επιφανειακές ρηγματώσεις πάχους ως 10μm είναι πληρωμένες με γύψο (Εικ. Ped14-e, Ped14-g). Στην Εικ. Ped14-d είναι εμφανής η κατακερματισμένη απόλιξη των ορίων του κόκκου ασβεστίτη, που συνίσταται από επιμήκης ανάγλυφους σχηματισμούς, πιθανώς αποτέλεσμα της χημικής προσβολής της πάστας.

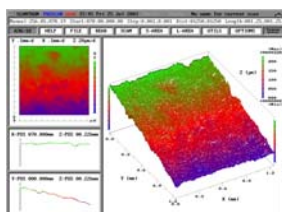
Στο σώμα του μαρμάρου ανιχνεύεται παρουσία S μέχρι βάθους 3μm, ενώ Mg βρίσκεται μέχρι βάθους 10μm. Επίσης, υπάρχει Si και Al σε αρκετές αναλύσεις. Το Si εντοπίζεται σε χαμηλές περιεκτικότητες μέχρι το βάθος των 5μm. Στην εικόνα Ped14-b, μέσα στη γυψοποιημένη μάζα διακρίνονται λευκές περιοχές που αντιστοιχούν σε οξειδία μετάλλων (Fe, Zn, Ti, Cu). Στις εικόνες Ped14-a και Ped14-c φαίνονται χαρακτηριστικά κρύσταλλοι χαλαζία στο μάρμαρο. Τέλος, εντοπίζονται μέσα στις περιοχές του γύψου ίχνη K και Cl.

5.5.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

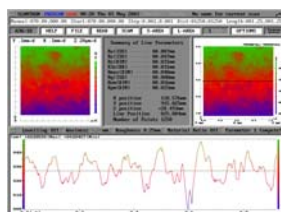
Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον έλεγχο των δειγμάτων από την επιφάνεια του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υψής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια (ενεργή επιφάνεια), οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των ληφθέντων δειγμάτων από το ιστορικό κτίριο, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υψής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας των επεμβάσεων καθαρισμού που έχουν λάβει χώρα.

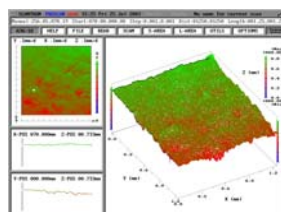
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών των δειγμάτων, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για την περιοχή όπου έλαβε χώρα η σάρωση με τη χρήση της laser προφίλομετρίας.



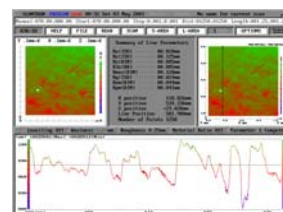
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Pma



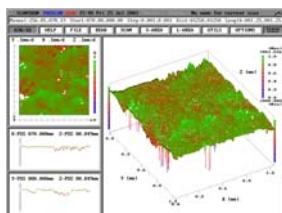
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Pma



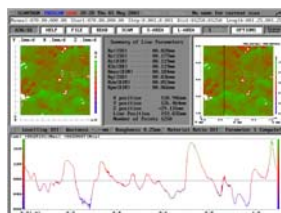
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Padf



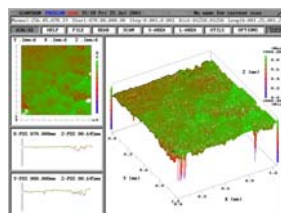
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Padf



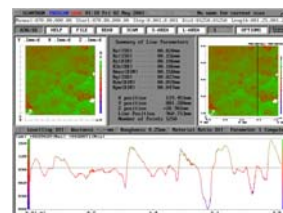
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PM24



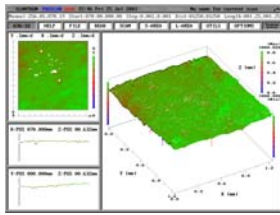
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα PM24



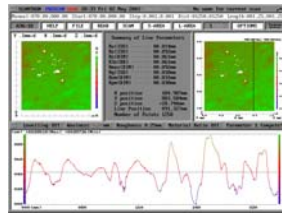
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PAB24



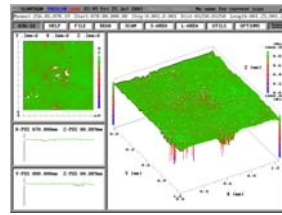
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα PAB24



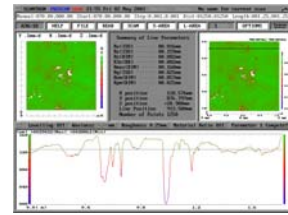
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PNC24



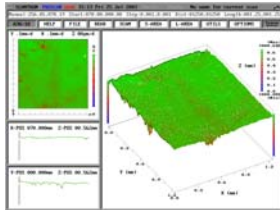
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PNC24



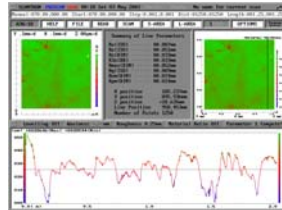
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PS34



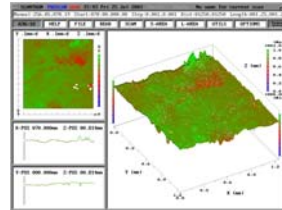
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PS34



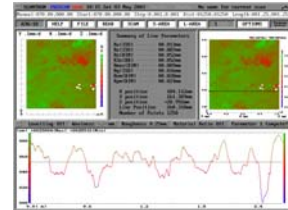
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PAB14



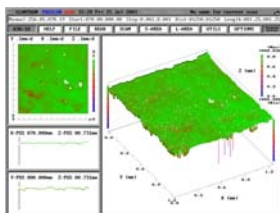
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PAB14



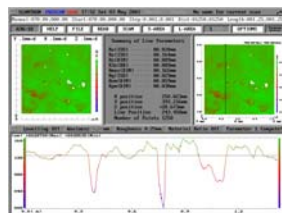
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PNC14



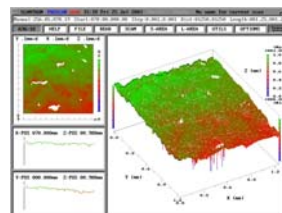
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PNC14



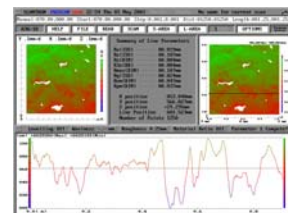
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα PED14



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα PED14



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Pa2



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Pa2

Στον Πίνακα 5.5.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε μm στα ληφθέντα δείγματα πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του Rq των 50 γραμμικών προφίλ για τον άξονα X (Rqx) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (Rqy), καθώς και το κατώτερο -1° και ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του Rq (δηλ. οι τιμές Rq που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή Rq από τις δύο συγκρινόμενες Rqx και Rqy, η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 5.5.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Rqx (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Χ άξονας		Rqy (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Υ άξονας		Rq (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
Pma	Διάγνωση	6	5	8	7	6	9	7	6	9
Padf	Διάγνωση	23	20	27	29	27	31	29	27	31
Pa2	Διάγνωση	24	19	28	27	24	28	27	24	28
PM24	Πάστα Moga, 1:30h	34	24	41	37	34	40	37	34	40
PAB24	Πάστα AB57, 1:30h	28	20	33	27	23	31	28	20	33
PNC24	Πάστα NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1:30h	16	13	18	16	14	20	16	13	18
PS34	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3h	19	14	24	18	14	23	19	14	24
PAB14	Πάστα AB57, 1h	11	10	14	10	8	15	11	10	14
PNC14	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1h	20	15	27	30	23	33	30	23	33
PED14	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	20	12	27	23	15	27	23	15	27

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της τραχύτητας των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού και συνάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση των τιμών της Rq ανάμεσα στα δείγματα των επιφανειών της διάγνωσης της φθοράς, παρόλο που από τις εικόνες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και της μικροσκοπίας οπτικών ινών διαπιστώνεται ότι η κατάσταση της επιφανειακής μικροδομής είναι αντίστοιχη και οι διαφορές τους έγκειται στο ποσοστό πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο, καθώς και στα ποσοστά των μαύρων επικαθήσεων. Το δείγμα Pma από την περιοχή του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με μεγάλο ποσοστό μαύρων επικαθήσεων παρουσιάζει εξαιρετικά μειωμένη τιμή Rq σε σχέση με αυτές των περιοχών με μεσαίο και μικρό ποσοστό επικαθήσεων. Θεωρείται ότι η τεχνική παρουσιάζει περιορισμό στην εφαρμογή της σε σχέση με την μέτρηση επιφανειών που παρουσιάζουν μαύρες επικαθήσεις είτε λόγω ισχυρών απορροφήσεων της ακτίνας του φωτός του οργάνου [119], ή γιατί οι μαύρες επικαθήσεις ουσιαστικά ομαλοποιούν το πραγματικό ανάγλυφο των επιφανειών, γεμίζοντας τα κενά ανάμεσα τους κόκκους του ασβεστίτη.
- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με τις αντίστοιχες επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς (εκτός από το Pma), διαπιστώνεται μείωση της Rq, εκτός από το δείγμα PM24 όπου η τιμή της Rq παρουσιάζει κατακόρυφη αύξηση, ενώ όσον αφορά στα δείγματα PNC14 και PAB24, οι καταγραφόμενες τιμές κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά πριν από τον καθαρισμό.

- Συγκρίνοντας τις τιμές Rq στις περιοχές PAB24 και PAB14, παρατηρείται ότι με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής της πάστας αυξάνεται η τραχύτητα, ενώ αντίθετα στις περιοχές PNC24 και PNC14, αύξηση του χρόνου εφαρμογής οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας.

Στον παρακάτω Πίνακα 5.5.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς καθώς και σε αυτές μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm², του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm², ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσχημο τρόπο την απόκλιση από την επιπεδότητα.

Πίνακας 5.5.3.2: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Εμβαδόν Προβαλλόμενης επιφάνειας (mm ²)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm ²)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδό προβαλλόμενης επιφάνειας	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
Pma	Διάγνωσης	1,560	2,191	1,404	40,45%
Padf	Διάγνωσης	1,505	3,860	2,565	156,48%
Pa2	Διάγνωσης	1,441	3,405	2,363	136,29%
PM24	Πάστα Mora, 1:30h	1,315	4,491	3,415	241,52%
PAB24	Πάστα AB57, 1:30h	1,440	4,273	2,967	196,74%
PNC24	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1:30h	1,270	2,307	1,817	81,65%
PS34	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3h	1,357	2,949	2,173	117,32%
PAB14	Πάστα AB57, 1h	1,532	2,743	1,790	79,05%
PNC14	Πάστα (NH ₄) ₂ CO ₃ (10% κ.β.), 1h	1,520	3,655	2,405	140,46%
PED14	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	1,453	3,193	2,198	119,75%

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι:

- Παρατηρείται αντίστοιχη απόκλιση των τιμών του λόγου, με αυτή των τιμών της τραχύτητας, ανάμεσα στα δείγματα των επιφανειών της διάγνωσης της φθοράς,

- Ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια) στις επιφάνειες των δειγμάτων PAB14 και PNC24 παρουσιάζει μείωση σε σχέση με την τιμή που εμφανίζουν τα δείγματα της διάγνωσης της φθοράς.
- Στις περιπτώσεις των επιφανειών PS34, PNC14 και PED14 οι τιμές του λόγου παραμένουν σε αντίστοιχα επίπεδα τιμών με αυτά των δειγμάτων της διάγνωσης της φθοράς.
- Αυξημένες τιμές λόγου, μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, εμφανίζουν τα δείγματα PM24 και PAB24, τα οποία παρουσιάζουν και τα υψηλότερα ποσοστά μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής.

Πίνακας 5.4.3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Rq (μm)
Pma	Διάγνωσης	1,404	7
Padf	Διάγνωσης	2,565	29
Pa2	Διάγνωσης	2,363	27
PM24	Πάστα Mora, 1:30h	3,415	37
PAB24	Πάστα AB57, 1:30h	2,967	28
PNC24	Πάστα NH₄)₂CO₃ (10% κ.β.), 1:30h	1,817	16
PS34	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3h	2,173	19
PAB14	Πάστα AB57, 1h	1,790	11
PNC14	Πάστα (NH₄)₂CO₃ (10% κ.β.), 1h	2,405	30
PED14	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	2,198	23

5.5.4 Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής στις περικρυσταλλικά ρηγματωμένες μαρμάρινες επιφάνειες του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης του Ελλάδος. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια.

Τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας των μικροσκοπικών εικόνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.4.1.

Για την διάγνωση της φθοράς της συγκεκριμένης περιοχής της επιφάνειας ελήφθησαν τρία δείγματα από διαφορετικά σημεία της περιοχής. Τα δείγματα αυτά αντιστοιχούν μακροσκοπικά σε περιοχές με διαφορετικές συγκεντρώσεις μαύρων επικαθήσεων (με φθίνουσα σειρά σε συγκέντρωση: P_{ma} , P_{adf} , P_{a_2}). Οι διαφορετικές συγκεντρώσεις μαύρων επικαθήσεων στην επιφάνεια των δειγμάτων αναγνωρίζονται και οπτικά παρατηρώντας την επιφάνεια. Η πραγματική κατάσταση της διαβρωμένης επιφάνειας στην περιοχή των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων περιγράφεται ουσιαστικά και από τα τρία δείγματα.

Το πρώτο δείγμα (**Pma**) βρίσκεται ανάμεσα στη λεπτή-συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα και στην περιοχή των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων, έχει σημαντική συγκέντρωση προσροφημένης αιθάλης και εμφανίζει τοπικά περιοχές (πάχους ως και 30 μm) με γύψο ή γυψοποιημένες περιοχές που πληρώνουν τις επιφανειακές ρηγματώσεις. Ως δείγμα, εντάσσεται στη διάγνωση της συγκεκριμένης φθοράς, καθώς και σε όλο το βάθος του είναι έντονες οι διακλάσεις που παρατηρούνται στα όρια των κρυστάλλων ασβεστίτη.

Το δεύτερο δείγμα (**Padf**) ελήφθη από το μέσο της διαβρωμένης περιοχής και είναι το αντιπροσωπευτικότερο χωροθετικά για τη διάγνωση της συγκεκριμένης φθοράς. Όμως, εξαιτίας της κακής δειγματοληψίας και της κακής κατάστασης συντήρησης της διαβρωμένης επιφάνειας,

Πίνακας 5.5.4.1.: Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας δειγμάτων των επιφανειών του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου στην ΕΒΕ

Κωδικός δειγματος	Διάγνωση / Επέμβαση καθαρισμού	Οριακές τιμές T_L και T_U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L^* (pixels)	F.D. (%)	Συντελ. μορφής (Γ)	Συντελεστής Ευθρυπτότητας F.I. (%)
Padf	Διάγνωση	87	120	1.226	1234	512	46	5.64	72.8
Pma	Διάγνωση	82	135	1.053	589	442	21.8	2.76	35.2
Pa2	Διάγνωση	92	134	1.190	1223	512	27.5	5.45	61.0
Pm24	Πάστα Mora, 1.5 h	80	95	1.188	753	352	21.5	4.87	53.3
Pab24	Πάστα AB 57, 1.5 h	71	100	1.142	917	512	21.2	3.95	44.9
Ped14	Πάστα EDTA, 1h	83	118	1.120	819	512	21.4	3.48	40.8
Ps34	Πάστα Σηπιόλιθου, 3h	72	125	1.096	745	512	15.9	3.11	34.9
Pab14	Πάστα AB 57, 1h	56	107	1.077	698	512	21	2.88	35.6
Pnc14	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$, 1h	51	78	1.075	723	507	17	3.00	34.5
Pnc24	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$, 1.5h	22	60	1.071	694	512	20.1	2.85	34.9

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης:

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων $[\rho(\Gamma/F.D.)] = 0.74$

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης $[\rho(\Gamma/D)] = 0.98$

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης $[\rho(F.D/D)] = 0.73$

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας $[\rho(F.D./F.I.)] = 0.88$

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ fractal διάστασης και συντελεστή ευθρυπτότητας $[\rho(D/F.I.)] = 0.95$

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας $[\rho(\Gamma /F.I.)] = 0.97$

απομακρύνθηκε ο επιφανειακός γύψος κατά την παρασκευή του δείγματος και, επομένως, δεν μπορούσε να καταστεί το μόνο αντιπροσωπευτικό δείγμα, καθώς γνωρίζουμε ότι στον συγκεκριμένο τύπο φθοράς, εμφανίζονται και γυψοποιημένες περιοχές. Είναι, όμως, αρκετά χαρακτηριστικό για την περιγραφή των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων. Ας σημειωθεί στο σημείο αυτό, το γεγονός ότι η συγκεκριμένη διαβρωμένη επιφάνεια περιέχει γυψοποιημένα τμήματα επιβεβαιώθηκε αρχικά από μετρήσεις με το FTIR (Φασματοσκοπία Υπερύθρου).

Τρίτο δείγμα είναι το **Pa2** που αντιστοιχούσε σε χαμηλότερο (και λιγότερο προστατευμένο) σημείο της επιφάνειας. Δεν εμφανίζει επιφανειακά γύψο, αλλά εντοπίζονται γυψοποιημένες περιοχές μέσα σε ρηγματώσεις και εσοχές των επιφανειακών κρυστάλλων ασβεσίτη. Λόγω, όμως, της χωροταξικής του θέσης, θα μπορούσε να ενταχθεί και σε περιοχή φθοράς αποπλυμένης επιφάνειας.

Το δείγμα που εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές δεικτών αποτίμησης είναι το πρώτο δείγμα (**Pma**) και είναι αυτό που εμφανίζει τοπικά περιοχές (πάχους ως και 30 μm) με γύψο ή γυψοποιημένες περιοχές που πληρώνουν τις επιφανειακές ρηγματώσεις. Ακολουθεί το **Pa2**, το οποίο δεν εμφανίζει γύψο επιφανειακά, αλλά μόνο μέσα σε ρηγματώσεις. Το **Padf** εμφανίζει τον υψηλότερο συντελεστή μορφής, όπως επίσης και fractal διάσταση (άρα έχει την πιο μεγάλη τραχύτητα) και διατηρεί πάρα πολύ υψηλή τιμή ευθρυπτότητας. Η επιφανειακή φυσικοχημική αστάθεια του (υψηλό FI) αναφέρεται σε ασβεσιτική επιφάνεια. Οι τιμές των δεικτών αποτίμησης και των τριών δειγμάτων είναι, εξεταζόμενες μεμονωμένα, υψηλές έως πάρα πολύ υψηλές.

⇒ Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με τον **συντελεστή μορφής (Γ)**, ξεκινώντας από την πιο τραχιά επιφάνεια και καταλήγοντας στην πιο λεία:

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	Συντελεστής μορφής (Γ)
Padf	Διάγνωση	5.64
Pma	Διάγνωση	2.76
Pa2	Διάγνωση	5.45
Pm24	Πάστα Mora, 1.5 h	4.87
Pab24	Πάστα AB 57, 1.5 h	3.95
Ped14	Πάστα EDTA, 1h	3.48
Ps34	Πάστα Σηπιόλιθου, 3h	3.11
Pnc14	Πάστα (NH₄)₂CO₃ 10%κ.β., 1h	3.00
Pab14	Πάστα AB 57, 1 h	2.88
Pnc24	Πάστα (NH₄)₂CO₃ 10%κ.β., 1.5h	2.85

Η αναλογία της fractal διάστασης και του συντελεστή μορφής είναι πολύ υψηλή, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης Pearson $\rho[(\Gamma/D)]$ είναι ίσος με 0,98. Όσον αφορά στην fractal διάσταση των δειγμάτων, γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη

τραχύτητα αυξάνεται. Επομένως, όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει ο συντελεστής μορφής τόσο πιο λείο ανάγλυφο παρουσιάζει η επιφάνεια. Η μόνη ασυνέχεια που εμφανίζεται στις δυο κατατάξεις (fractal διάστασης ή συντελεστή μορφής) αφορά στην αντιστροφή των θέσεων μεταξύ του δείγματος καθαρισμού με Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα (συντελεστής μορφής $\Gamma=3,00$ και Fractal διάσταση $D=1,75$) και Πάστα AB 57 για 1 ώρα (συντελεστής μορφής $\Gamma=2,88$ και Fractal διάσταση $D=1,77$). Λόγω του ότι οι διαφορές των τιμών των δυο μεγεθών είναι πολύ μικρές θεωρούμε ότι αναφερόμαστε στα ίδια στοιχεία τραχύτητας.

Τα δείγματα μπορούμε να τα κατατάξουμε σε δυο ομαδοποιήσεις. Σε εκείνα που παρουσιάζουν υψηλότερο συντελεστή μορφής (κυμαίνεται από 4,87 ως 3,48) και ανήκουν εκείνα που έχουν καθαριστεί με: Πάστα Mora για 1,5 ώρα, Πάστα AB57 για 1,5 ώρα και Πάστα EDTA για 1 ώρα. Ακολουθεί η δεύτερη ομαδοποίηση με χαμηλότερες τιμές συντελεστή μορφής (3,11 ως 2,85) που περιλαμβάνει τα δείγματα μετά από καθαρισμό με Πάστα Σηπιόλιθου, Πάστα AB57 για 1 ώρα, Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα και 1,5 ώρα.

⇒ Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με **την πυκνότητα ρηγματώσεων (F.D.):**

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100 μm.. Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	πυκνότητα ρηγματώσεων (F.D.)
Padf	Διάγνωση	46
Pma	Διάγνωση	21.8
Pa2	Διάγνωση	27.5
Pm24	Πάστα Mora, 1.5 h	21.5
Ped14	Πάστα EDTA, 1h	21.4
Pab24	Πάστα AB 57, 1.5 h	21.2
Pab14	Πάστα AB 57, 1 h	21
Pnc24	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β., 1.5h	20.1
Pnc14	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β., 1h	17
Ps34	Πάστα Σηπιόλιθου, 3h	15.9

Τα δείγματα που άνηκαν στην ομαδοποίηση του υψηλότερου συγκριτικά συντελεστή μορφής παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές και ιδιαίτερα κοντινές πυκνότητες ρηγματώσεων που κυμαίνονται από 21,2% ως 21,5% (Πάστα Mora, Πάστα AB57 1,5 h, Πάστα EDTA).

Αντίστοιχα, τα δείγματα των χαμηλότερων τιμών Γ αντιστοιχούν σε επιφάνειες με επίσης χαμηλότερες συγκριτικά τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων. Η κατάταξη των μεθόδων μέσα στην ομαδοποίηση όμως, αλλάζει από την κατάταξη στην αντίστοιχη ομαδοποίηση με βάση τον συντελεστή μορφής. Η σειρά της κατάταξης είναι:

1. Πάστα AB57 για 1 ώρα
2. Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1,5 ώρα
3. Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα
4. Πάστα Σηπιόλιθου

Ενώ η αντίστοιχη κατάταξη για τον συντελεστή μορφής ήταν:

1. Πάστα Σηπιόλιθου
2. Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1 ώρα
3. Πάστα AB57 για 1 ώρα,
4. Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 1,5 ώρα

Η συσχέτιση ανάμεσα στην πυκνότητα ρηγματώσεων και τον συντελεστή μορφής είναι ικανοποιητική (συντελεστής Pearson 0,74)

⇒ Κατάταξη των μεθόδων καθαρισμού σύμφωνα με τον **συντελεστή ευθρυπτότητας F.I. (%)**:

Οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη ευθρυπτότητας, αντιπροσωπεύουν επιφάνειες περισσότερο ευσταθείς φυσικοχημικά. Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθρυπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια), είναι:

Κωδικός δείγματος	Μέθοδος καθαρισμού	δείκτης ευθρυπτότητας F.I. (%)
Padf	Διάγνωση	72.8
Pma	Διάγνωση	35.2
Pa2	Διάγνωση	61.0
Pm24	Mora, 1.5 h	53.3
Pab24	Πάστα AB 57, 1.5 h	44.9
Ped14	Πάστα EDTA, 1h	40.8
Pab14	Πάστα AB 57, 1 h	35.6
Pnc14	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β., 1h	35.4
Ps34	Πάστα Σηπιόλιθου, 3h	34.9
Pnc24	Πάστα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10%κ.β., 1.5h	34.9

Εξεταζόμενες μεμονωμένα ή συγκρινόμενες με τους συντελεστές ευθρυπτότητας των επιφανειών καθαρισμού των προηγούμενων τύπων φθοράς, έχουν πολύ υψηλές τιμές. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη τιμή FI που λαμβάνει δείγμα μετά από καθαρισμό των

προηγούμενων τύπων φθοράς είναι 36% (περίπτωση καθαρισμού με ατομικό νερό της μεγάλου πάχους φαιόμαυρης κρούστας ή περίπτωση καθαρισμού με Σηπιόλιθο της λεπτής συνεκτικής κρούστας) όταν εμφανίζεται στον συγκεκριμένο τύπο φθοράς το δείγμα με το χαμηλότερο FI με παραπλήσια τιμή (35%).

Η ομαδοποίηση που προέκυψε κατά την κατάταξη με βάση τον συντελεστή μορφής και την πυκνότητα ρηγματώσεων ισχύει και σε αυτή την κατάταξη:

- Υπάρχει ομάδα με υψηλούς συντελεστές ευθρυπτότητας (από 53,3% ως 40,8%) που περιλαμβάνει τα δείγματα που βρίσκονται στις υψηλότερες θέσεις και στις άλλες δύο κατατάξεις: Πάστα Mora, Πάστα AB57 1,5 ώρα και Πάστα EDTA. Οι τιμές του FI των δειγμάτων αυτών βρίσκονται αριθμητικά ανάμεσα στις τιμές του FI των δύο δειγμάτων διάγνωσης που εμφανίζουν επιφανειακά γύψο (Pa2, FI:61,0% και Pma, FI:35,2%).
- Η δεύτερη ομαδοποίηση περιλαμβάνει (όπως και σε άλλες κατατάξεις) τα δείγματα (με φθίνουσα σειρά): Πάστα AB57 1 ώρα, Πάστα $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$ για 1 ώρα, Πάστα Σηπιόλιθου, Πάστα $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$ για 1,5 ώρα. Εδώ, οι τιμές του FI είναι πολύ κοντινές (από 35,6 ως 34,9%) υποδεικνύοντας ότι και τα 4 δείγματα παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά φυσικοχημικής αστάθειας. Οι τιμές του FI είναι μεν χαμηλότερες από της πρώτης ομαδοποίησης (και χαμηλότερες από των δειγμάτων διάγνωσης) όμως εξακολουθούν να είναι υψηλές ως απόλυτοι αριθμοί.

Τα δείγματα παρουσιάζουν μεγάλη ακολουθία κατάταξης με βάση το συντελεστή μορφής και το συντελεστή ευθρυπτότητας (συντελεστής συσχέτισης Pearson $\rho[(\Gamma / \text{F.I.})] = 0,97$). Η κατάταξη με βάση το συντελεστή ευθρυπτότητας είναι επίσης ικανοποιητικά ακόλουθη της κατάταξης με βάση την πυκνότητα ρηγματώσεων (συντελεστής συσχέτισης Pearson $\rho[(\text{F.D.} / \text{F.I.})] = 0,88$).

Γενικότερα συνάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η επιφάνεια που έχει παραχθεί μετά από τον καθαρισμό με **Πάστα Mora** εμφανίζει πάρα πολύ υψηλή ταχύτητα (την υψηλότερη τιμή Γ) την υψηλότερη πυκνότητα ρηγματώσεων και τον υψηλότερο συντελεστή ευθρυπτότητας ο οποίος αναφέρεται αποκλειστικά στον επιφανειακό ασβεστίτη. Από τις εικόνες SEM διακρίνουμε εμφανώς τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, τις επιφανειακές ασυνέχειες και διάκενα στο δείγμα, όπως και την απουσία επιφανειακού γύψου. Από το γεγονός ότι από τις αναλύσεις EDX εντοπίζονται ίχνη S πλευρικά σε ρηγματώσεις, συμπεραίνουμε ότι οι ρηγματώσεις ήταν πιθανότατα πληρωμένες με γύψο που με τον καθαρισμό απομακρύνθηκε. Επίσης, παρατηρούνται επιφανειακά αποκολλημένοι κόκκοι ασβεστίτη που υποδεικνύουν δείγμα καταπονημένο τόσο από τις διεργασίες διάβρωσης όσο και από τον καθαρισμό. Άρα, η επιφάνεια που έχει παραχθεί αποτελείται εξολοκλήρου από διαβρωμένο αυθεντικό υλικό με υψηλή ευθρυπτότητα.
- Το δείγμα Pab24 (**Πάστα AB57 για 1,5 ώρα**) παρουσιάζει μορφολογικά παρόμοια εικόνα με αυτό της Mora. Και στο δείγμα αυτό απουσιάζει επιφανειακά ο γύψος, ενώ εντοπίζονται ίχνη S σε ρηγματώση (σε βάθος 80 μm), που δηλώνει ότι πριν τον καθαρισμό ήταν πιθανώς πληρωμένη με γύψο. Επίσης, εντοπίζεται αποφλοιωμένη περιοχή με έντονα σπογγώδη μορφολογία, πιθανώς αποτέλεσμα της χημικής προσβολής της πάστας στον ασβεστίτη. Οι

ιδιότητες που προσδιορίζονται από την επεξεργασία εικόνας είναι παραπλήσιες (λίγο χαμηλότερες) από του δείγματος της Πάστας Mora, υποδεικνύοντας ότι η επιφάνεια του δείγματος είναι, όπως και η προηγούμενη, έντονα καταπονημένη. Ας σημειωθεί, βέβαια, ότι είναι αναμενόμενο ότι η Πάστα Mora επιφέρει μεγαλύτερες μορφολογικές αλλοιώσεις από την AB57, καθώς πρόκειται για πάστα ίδιας σύστασης, αλλά με υψηλότερες συγκεντρώσεις των δραστικών ουσιών.

- Η επιφάνεια του δείγματος μετά τον καθαρισμό **με πάστα EDTA** είναι, όπως και οι προηγούμενες, έντονα καταπονημένη, με ρηγματώσεις και ασυνέχειες. Διαφοροποιείται στο ότι εντοπίζονται υπολείμματα από τις γυψοποιημένες περιοχές μέσα σε ρηγματώσεις που σημαίνει ότι είχε συγκριτικά ηπιότερη δράση σε σχέση με την απομάκρυνση του γύψου. Όμως, διαφοροποιείται και από το γεγονός ότι παρουσιάζει έντονη διάβρωση με τη μορφή που προσομοιάζει τη βελονοειδή διάβρωση των μετάλλων σε όλο το βάθος του δείγματος. Η αντίστοιχη παρατήρηση είχε γίνει και στο δείγμα καθαρισμού με Πάστα EDTA στην περίπτωση του μεγάλου πάχους φαιόμαυρης κρούστας. Επίσης η πάστα έχει δημιουργήσει (λόγω χημικής προσβολής) στα όρια των κόκκων κατακεραματισμένες απολήξεις με επιμήκεις ανάγλυφους σχηματισμούς.
- Οι καθαρισμοί με **Πάστα $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$ για 1 και 1.5 ώρα** έχουν παράξει επιφάνειες με χαμηλή συγκριτικά τραχύτητα: τα δυο δείγματα έχουν τη χαμηλότερη fractal διάσταση και μεσαίες προς χαμηλές τιμές συντελεστή Γ. Επίσης το δείγμα με εφαρμογή μιας ώρας εμφανίζει τη χαμηλότερη όλων πυκνότητα ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας, ενώ το δείγμα εφαρμογής μιάμισης ώρας διατηρεί στα μεγέθη αυτά μεσαίες προς χαμηλές τιμές. Όμως, παρατηρώντας τις εικόνες SEM, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει εμφανής χημική προσβολή της πάστας στην επιφάνεια του ασβεστίτη, είτε με τη μορφή της κλιμακωτής αποφλοίσωσης ασβεστιτικού υλικού παράλληλα στην τομή, ή αφήνοντας σπογγώδες ανάγλυφο ή ακόμη, μορφολογική αλλοίωση των ορίων των κόκκων. Από τις παρατηρήσεις αυτές συμπεραίνουμε ότι η πάστα λειτουργεί με υψηλή δραστηριότητα και υποθέτουμε ότι υπάρχει απώλεια του αυθεντικού υλικού, γεγονός που δικαιολογεί την χαμηλή τιμή του συντελεστή μορφής. Επίσης, ο συντελεστής ευθρυπτότητας των δειγμάτων, είναι χαμηλότερος των υπολοίπων, παραμένει, όμως υψηλός και αναφέρεται αποκλειστικά στον επιφανειακό ασβεστίτη (απώλεια αυθεντικού υλικού). Επομένως, οι μέθοδοι απορρίπτονται.
- Το δείγμα από την επιφάνεια που εφαρμόστηκε η **πάστα AB57 για 1 ώρα** ανήκει στην ομαδοποίηση με τους χαμηλότερους δείκτες αποτίμησης. Από τις εικόνες SEM παρατηρούνται ρηγματώσεις στα διάκενα που είναι πληρωμένα με γύψο (στην επιφάνεια του δείγματος) αλλά και υπολείμματα γυψοποιημένων περιοχών τοπικά. Το επιφανειακό ανάγλυφο είναι σχετικά ομαλό (χαμηλή συγκριτικά τιμή συντελεστή μορφής) και η πυκνότητα ρηγματώσεων, όπως και η ευθρυπτότητα, έχουν μεσαίες προς χαμηλές συγκριτικά τιμές, αν και ως απόλυτες τιμές είναι υψηλές. Εντοπίζονται, όμως, κρατήρες και οπές σε κόκκους ασβεστίτη που συνοδεύονται από ευρύτερη απώλεια υλικού των κόκκων σε βάθος και πιθανότατα είναι αποτέλεσμα της χημικής προσβολής της Πάστας. Επομένως, αν και η

εφαρμογή επιφέρει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα από τις προηγούμενες, δεν απομακρύνει τον γύψο ομοιόμορφα από την επιφάνεια και προκαλεί τοπικά απώλεια αυθεντικού υλικού, επομένως τελικά δεν ενδείκνυται.

- Η εφαρμογή **πάστα σηπιολίθου** οδήγησε στην παραγωγή επιφάνειας με μέση προς χαμηλή συγκριτικά τραχύτητα, με τη χαμηλότερη πυκνότητα ρηγματώσεων και σχεδόν τον χαμηλότερο συντελεστή ευθρυπτότητας (σχεδόν όμοιο με της Πάστας $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$ για 1,5 ώρα). Οι κατά τόπους επιφανειακές ρηγματώσεις είναι πληρωμένες με κρυπτοκρυσταλλικά συσσωματώματα γύψου. Οι μορφολογικές παρατηρήσεις είναι ικανοποιητικές, καθώς υποδεικνύουν επιφάνεια με ομαλό ανάγλυφο, που δεν εμφανίζει (συγκρινόμενη με τα δείγματα φθοράς) σημάδια περαιτέρω καταπόνησης (ρηγματώσεις, ασυνέχειες κ.λ.π.).
- Με δεδομένο ότι συγκεκριμένος τύπος φθοράς αντιστοιχεί σε επιφάνειες ιδιαίτερα διαβρωμένες (υψηλή τραχύτητα, έντονο ανάγλυφο, ρηγματώσεις, επιφανειακά διάκενα), η προτεινόμενη μέθοδος καθαρισμού θα πρέπει όχι μόνο να ικανοποιεί τα κριτήρια που επιβάλλουν οι δείκτες αποτίμησης, αλλά να μην επιβαρύνει επιπλέον την επιφάνεια με διαβρωτική δράση και να μην συντελεί σε απώλεια αυθεντικού υλικού (όπως η Πάστα AB57 για 1 ώρα). Για τον λόγο αυτό προτείνεται η μέθοδος καθαρισμού με Σηπιόλιθο.

5.5.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Η τεχνική της χρωματομετρίας έλαβε χώρα επί τόπου στις εξεταζόμενες περιοχές του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών της Εθνικής Βιβλιοθήκης, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* (Χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab), καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού.

Στις επί τόπου μετρήσεις, η επιφάνεια του τύπου φθοράς των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων χωρίστηκε σε κάναβο και μετρήθηκαν οι χρωματικές παράμετροι L^* , a^* , b^* που τον χαρακτηρίζουν (Μ.Ο. συνολικά 90 τιμών). Μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις στον κάναβο αλλά ανά περιοχή καθαρισμού πλέον και καταγράφηκαν οι χρωματικές παράμετροι (Μ.Ο. 25 τιμών, ανά περιοχή καθαρισμού). Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακα 5.5.5) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 5.5.5: Αποτελέσματα επί τόπου χρωματομετρικού ελέγχου

Κωδικός Επιφάνειας	Επέμβαση Καθαρισμού	L^* πριν	a^* πριν	b^* πριν	L^* μετά	a^* μετά	b^* μετά	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Pm24	Πάστα Mora, 1:30h	60.5	0.75	8.35	74.1	-0.5	5.93	13.6	-1.25	-2.42	13.9
Pab24	Πάστα AB57, 1:30h	60.5	0.75	8.35	75	-0.08	6.03	14.5	-0.83	-2.32	14.7
Pab14	Πάστα AB57, 1h	60.5	0.75	8.35	70	-0.02	7.39	9.5	-0.77	-0.96	9.58
Pnc24	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 1:30h	60.5	0.75	8.35	73.2	-0.14	6.88	12.7	-0.89	-1.47	12.8
Pnc14	Πάστα $(NH_4)_2CO_3$ (10% κ.β.), 1h	60.5	0.75	8.35	69.9	0.06	7.39	9.4	-0.69	-0.96	9.47
Ps34	Πάστα σηπιολίθου με απιονισμένο νερό, 3h	60.5	0.75	8.35	65.9	0.27	8.14	5.4	-0.48	-0.21	5.42
Ped14	Πάστα EDTA 3% κ.β., 1h	60.5	0.75	8.35	69.3	0.02	6.46	8.8	-0.73	-1.89	9.03

Μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού παρατηρείται ικανοποιητική συνολική μεταβολή χρώματος ΔE^* . Όλες οι τιμές ΔE είναι μικρότερες του 15 με μεγαλύτερη αυτή της πάστας AB57 για 1,5 ώρες και μικρότερη αυτή της πάστας σηπιολίθου για 3 ώρες. Αντίστοιχες είναι και οι τιμές της διαφοράς της λαμπρότητας είναι σε όλες τις θέσεις θετικές, γεγονός που σημαίνει ότι μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού προέκυψαν πιο φωτεινές επιφάνειες.

Μετά τον καθαρισμό το σύνολο των επιφανειών μετατοπίζονται στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο, αφού οι τιμές Δa^* είναι αρνητικές, καθώς και προς το μπλε αφού το Δb^* λαμβάνει αρνητικές τιμές για όλες τις περιοχές.

5.5.6 Μερικά Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας και της χρωματομετρίας που δίνουν σαφείς πληροφορίες σε σχέση με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, την επιφανειακή μορφολογία και συνοχή (επιφανειακή μικροδομή), καθώς και το χρώμα των καθαρισμένων επιφανειών και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοσθείσες μέθοδοι καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν συνάγονται τα εξής:

Οι επεμβάσεις καθαρισμού των επιφανειών Pm24, Pab24, Pnc24, Pnc14 (δηλ. της πάστας Mora, της πάστας AB57 για 1,5 ώρες και της πάστας ανθρακικού αμμωνίου για μία και 1,5 ώρες εφαρμογής) απομακρύνουν πλήρως τις κατά τόπους ανεπτυγμένες επιφανειακές γυψοποιημένες ζώνες, καθώς και το μικροκρυσταλλικό γύψο από τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις του ασβεστίτη, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή του συνοχή. Αυτό αποτυπώνεται και στις τιμές των δεικτών της επιφανειακής μικροδομής, όπου οι τιμές του συντελεστή μορφής, της πυκνότητας ρηγματώσεων και του συντελεστή ευθρυπτότητας για τις μεθόδους καθαρισμού της πάστας Mora και της πάστας AB57 είναι πολύ υψηλές προσομοιάζοντας τις αντίστοιχες τιμές του δείγματος διάγνωσης, μόνο που μετά τον καθαρισμό αυτές οι τιμές περιγράφουν καθαρά μια ασβεστική επιφάνεια έντονα ρηγματωμένη και κατακερματισμένη. Αντίθετα οι επιφάνειες που εφαρμόστηκε η πάστα ανθρ. αμμωνίου για 1.5 και 1 ώρα παρουσιάζουν χαμηλή συγκριτικά τραχύτητα: τα δυο δείγματα έχουν τη χαμηλότερη fractal διάσταση και μεσαίες προς χαμηλές τιμές συντελεστή μορφής Γ. Επίσης, το δείγμα με εφαρμογή μιας ώρας εμφανίζει χαμηλή πυκνότητα ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας, ενώ το δείγμα εφαρμογής μιάμισης ώρας διατηρεί στα μεγέθη αυτά μεσαίες προς χαμηλές τιμές. Όμως, παρατηρώντας τις εικόνες SEM, διαπιστώνουμε ότι εκτός από την απομάκρυνση του γύψου από τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις υπάρχει εμφανής χημική προσβολή της πάστας στην επιφάνεια του ασβεστίτη, η οποία και αποτυπώνεται στους μετρούμενους συντελεστές. Συμπεραίνουμε ότι η πάστα του ανθρακικού αμμωνίου λειτουργεί με υψηλή δραστηριότητα και μπορούμε να υποθέσουμε βάσιμα ότι υπάρχει απώλεια ακόμα και κόκκων ασβεστίτη. Κατά αντιστοιχία η τραχύτητα Rq και η ενεργή επιφάνεια καταγράφεται με πολύ ψηλές τιμές για τις επιφάνειες Pm24, Pab24 και Pnc14, υποδεικνύοντας μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά για τις καθαρά πλέον ασβεστικές επιφάνειες. Στην επιφάνεια Pnc24 οι τιμές είναι πιο χαμηλές από αυτές της Pnc14, υποδηλώνοντας ότι η δραστηριότητα της πάστας αυξήθηκε με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής και η απομάκρυνση του αυθεντικού υλικού ήταν τόσο μεγάλη που οδήγησε σε μείωση των τιμών της σε σχέση με την εφαρμογή της 1 ώρας. Τέλος η συνολική μεταβολή του χρώματος ΔΕ για αυτές τις επεμβάσεις καθαρισμού αν και κινείται σε γενικώς χαμηλές τιμές (εδώ τα ποσοστά των μαύρων επικαθίσεων δεν είναι τόσο υψηλά όσο στις περιοχές των μαύρων κρουστών, ώστε το ΔΕ να είναι πολύ μεγάλο), είναι τα υψηλότερα που καταγράφονται.

Η επιφάνεια εφαρμογής της πάστας AB57 για 1 ώρα διατηρεί μετά τον καθαρισμό τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις του ασβεστίτη πληρωμένες με γύψο, όμως δεν απομακρύνει κατά τόπους τις μαύρες επικαθήσεις. Παράλληλα, η τραχύτητα και η ενεργή επιφάνεια παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές από όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες γεγονός που μπορεί δεύτερες σκέψεις σε σχέση με τη δραστηριότητα της πάστας.

Οι τιμές των δεικτών της επιφανειακής μικροδομής κυμαίνονται σε μέτρια προς χαμηλά επίπεδα (αντίστοιχα της επιφάνειας PED14). Το επιφανειακό ανάγλυφο είναι σχετικά ομαλό (χαμηλή συγκριτικά τιμή συντελεστή μορφής) και η πυκνότητα ρηγματώσεων, όπως και η ευθυπτότητα, έχουν μεσαίες προς χαμηλές συγκριτικά τιμές. Η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε μέτρια επίπεδα.

Η επιφάνεια εφαρμογής της Πάστας με δινατριούχο EDTA διατηρεί κατά το ήμισυ περίπου τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις πληρωμένες με μικροκρυσταλλικό γύψο και εμφανίζει διάβρωση με τη μορφή που προσομοιάζει τη βελονοειδή διάβρωση των μετάλλων σε όλο το βάθος του δείγματος (παρατηρήσεις Ηλ. μικροσκοπία σάρωσης). Επίσης, από τη γενική μορφολογική εξέταση με τη μικροσκοπία οπτικών ινών διαπιστώνεται η μη απομάκρυνση μαύρων επικαθήσεων κατά τόπους. Σε σχέση με τους δείκτες της επιφανειακής μικροδομής η επιφάνεια που αποδίδεται κρίνεται αποδεκτή αφού οι τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων, του συντελεστή ευθυπτότητας και του συντελεστή μορφής κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα, χαμηλότερα από τις αντίστοιχες τιμές του δείγματος διάγνωσης της φθοράς. Επιπλέον, η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε μέτρια επίπεδα.

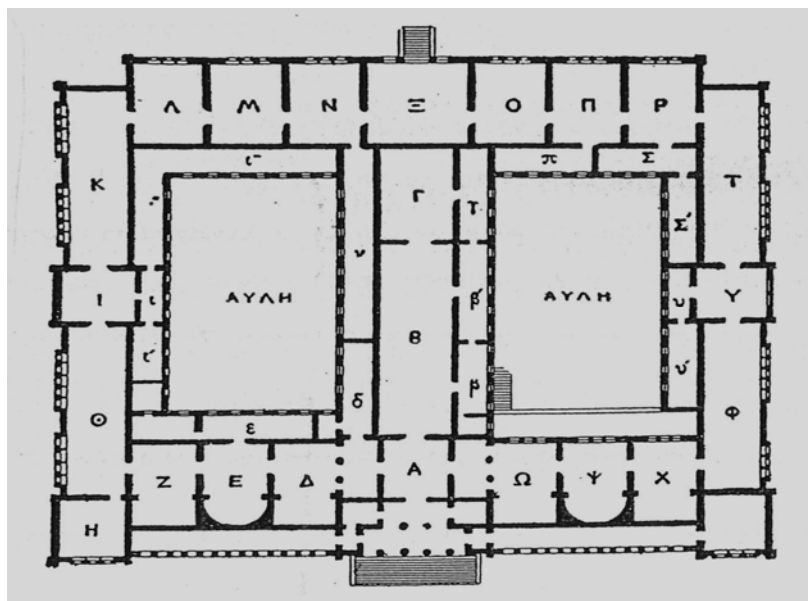
Η πάστα του σηπιόλιθου παράγει επιφάνειες όπου οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις του ασβεστίτη παραμένουν πληρωμένες με το κρυσταλλικό συσσωματώματα γύψου, καθώς και διατηρούν τα κατά τόπους επιφανειακά στρώματα γύψου (όπου αυτά υπάρχουν). Η επιφάνεια PS34 παρουσιάζει μικρή συνολική μεταβολή χρώματος παρόλο που απομακρύνει πλήρως τις μαύρες επικαθήσεις. Τέλος, οι δείκτες της επιφανειακής μικροδομής παρουσιάζουν μέση προς χαμηλή τιμή συντελεστή μορφής, χαμηλή πυκνότητα ρηγματώσεων και σχεδόν τον χαμηλότερο συντελεστή ευθυπτότητας. Αντίστοιχα, η τραχύτητα Rq και η ενεργή επιφάνεια (λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια) παρουσιάζουν αποδεκτά χαμηλότερες τιμές από το δείγμα της διάγνωσης.

6. Παρουσίαση πειραμάτων, περιγραφή αποτελεσμάτων και συζήτηση αποτελεσμάτων – Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

6.1 Σύνομα ιστορικά στοιχεία για το κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

Η θεμελίωση του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου έλαβε χώρα στις 3 Οκτωβρίου του 1866, ύστερα από προσπάθειες 30 χρόνων που περιελάμβαναν άγονους αρχιτεκτονικούς διαγωνισμούς και πολλές διαφωνίες σε σχέση με τη θέση ανέγερσής του [62], [164]. Η Ελένη Τσοπίσα, λίγες μέρες πριν το θάνατό της, στις 17 Μαρτίου 1866, δώρισε στο κράτος το οικόπεδο της οδού Πατησίων, συνολικής έκτασης 62.056,42 τετραγωνικών μέτρων για τη ανέγερση του μουσείου. Είχε προηγηθεί η δωρεά των 200.000 δραχμών στα τέλη του 1856 από τον ομογενή της Πετρούπολης Δημήτριο Βερναρδάκη ή Μπερναρδάκη, η έγκριση των αρχιτεκτονικών σχεδίων του Γερμανού αρχιτέκτονα Ludwig Lange, καθηγητή στην Ακαδημία του Μονάχου, τον Μάρτιο του 1865, καθώς και ο διορισμός του αρχιτέκτονα της οικοδομής Παναγιώτη Κάλκου [164].

Μετά το θάνατο του Π. Κάλκου και την άρνηση του Theophil Hansen να συνεχίσει την οικοδόμηση του μουσείου, ο Ernst Ziller μαθητής και συνεργάτης του Hansen, δέχτηκε να αναλάβει την ολοκλήρωσή του. Η ανάμειξη του στην οικοδομή του Εθνικού Μουσείου χρονολογείται από το 1888 και κράτησε έναν ολόκληρο χρόνο. Στο διάστημα αυτό ολοκληρώθηκε, με τη χρηματική βοήθεια του ελληνικού κράτους, η πρόσοψη, η ανατολική πλευρά και το κεντρικό τμήμα του μουσείου. Εκτός από την επίβλεψη των εργασιών, ο Ziller έκανε και μερικές αλλαγές στο αρχικό σχέδιο του Lange και ιδιαίτερα στην κεντρική πτέρυγα και την πρόσοψη [62].



Εικ. 6.1.1. Κάτοψη του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου στα 1889, μετά τις αλλαγές του Ziller.



Εικ. 6.1.2. Το Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο στα τέλη του 19ου αιώνα

Ένα πρόπυλο με τέσσερις ιωνικούς κίονες στην πρόσοψη και με δύο ακόμη μπροστά από την είσοδο, αποτελεί του κύριο διάκοσμο της δυτικής, κύριας όψης του μουσείου. Μια επιμήκης στοά με πολλά ανοίγματα εκτείνεται δεξιά και αριστερά του και καταλήγει στα δύο άκρα της σε μικρά ορθογωνικά δωμάτια που στεγάζονται με αετωματικές στέγες. Ο λιτός διάκοσμος συμπληρώθηκε, σύμφωνα με την αγαπητή στον Ziller συνήθεια, με πλήηνα αγάλματα, αντίγραφα αρχαίων έργων. Η επιμήκης στοά με τα πολλά ανοίγματα και οι ιωνικοί κίονες στο πρόπυλο της εισόδου έδωσε αρμονικά με το υπόλοιπο κτίριο και ανέδειξε οπωσδήποτε το μουσείο [62].

Επίσης, θα πρέπει να σημειώσουμε την ωραία τοποθέτηση του μουσείου στο μεγάλο οικόπεδο της οδού Πατησίων. Το κτίριο δεν κάλυψε ολόκληρο το πλάτος του οικοπέδου, αλλά άφησε μεγάλους ελεύθερους χώρους στην μπροστά και πίσω πλευρά, κατάλληλους για την δημιουργία κήπων. Οι ωραίοι αυτοί κήποι, που χάριζαν στο μουσείο στα πρώτα χρόνια της αποπεράτωσης του, δροσιά και γραφικότητα, αποδείχτηκαν αργότερα χρήσιμοι, όταν ύστερα από χρόνια χρειάστηκε να γίνει επέκταση του μουσείου [164].

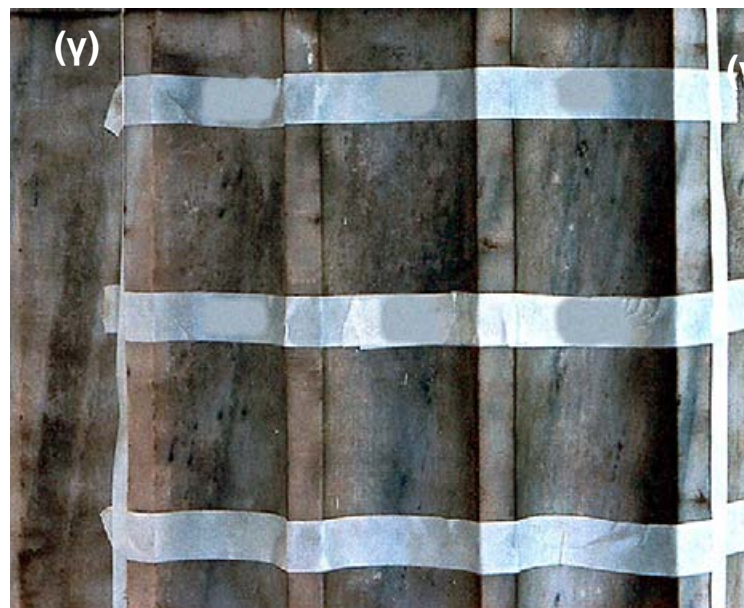
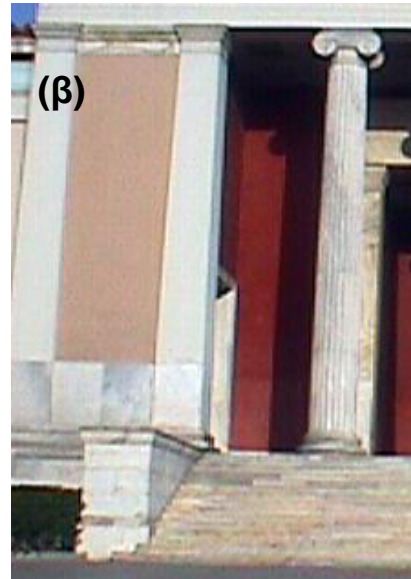
Η κατασκευή του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου διήρκησε είκοσι τρία χρόνια, από το 1866 έως το 1889. Πολύ πριν όμως από την ολοκλήρωσή του τοποθετούνται αρχαία στην αυλή και στις ημιτελείς ακόμη αίθουσές του. Η μεταφορά των αρχαίων στο νέο κτίριο αρχίζει κυρίως από το 1874, όταν ολοκληρώθηκε η δυτική πτέρυγα του μουσείου [62].

Πριν ακόμα κλείσει δεκαπενταετία από την αποπεράτωση του μουσείου, μια νέα επιμήκης πτέρυγα με τρεις αίθουσες, η τελευταία από τις οποίες ήταν κυκλική σε κάτοψη, χτίζεται στον άξονα της ανατολικής πλευράς του κτιρίου. Ο αρχιτέκτονας Αναστάσιος Μεταξάς συνέταξε τα σχέδια και ανέλαβε την επίβλεψη της κατασκευής που κράτησε τρία ολόκληρα χρόνια, από το 1903 ως το 1906 [164]. Στα 1932-1939 ένα νέο διώροφο συγκρότημα με δύο εσωτερικές αυλές,

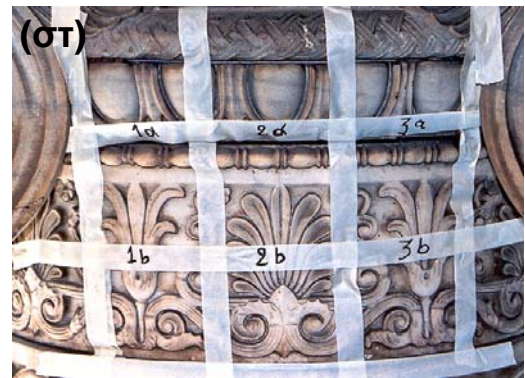
όπως και το παλιό κτίριο, χτίστηκε στην ανατολική πλευρά του μουσείου με σχέδια του αρχιτέκτονα Γ. Νομικού. Το παλιό κτίριο, ύστερα από το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο, είχε ανάγκη ριζικής επισκευής πριν δεχτεί και πάλι στις αίθουσές του τα πολύτιμα εκθέματα. Τα εγκαίνια της πρώτης μεταπολεμικής έκθεσης έγιναν στα 1947 σε τρεις αίθουσες του κτιρίου. Αμέσως μετά αρχίζουν οι εργασίες για την επισκευή και τη διαρρύθμιση του παλιού κτιρίου, με σχέδια του αρχιτέκτονα Πάτροκλου Καραντινού [62].

6.2 Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου – Δειγματοληψία – Χαρακτηρισμός των υλικών & διάγνωση της φθοράς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες έλαβε χώρα η διαγνωστική μελέτη.



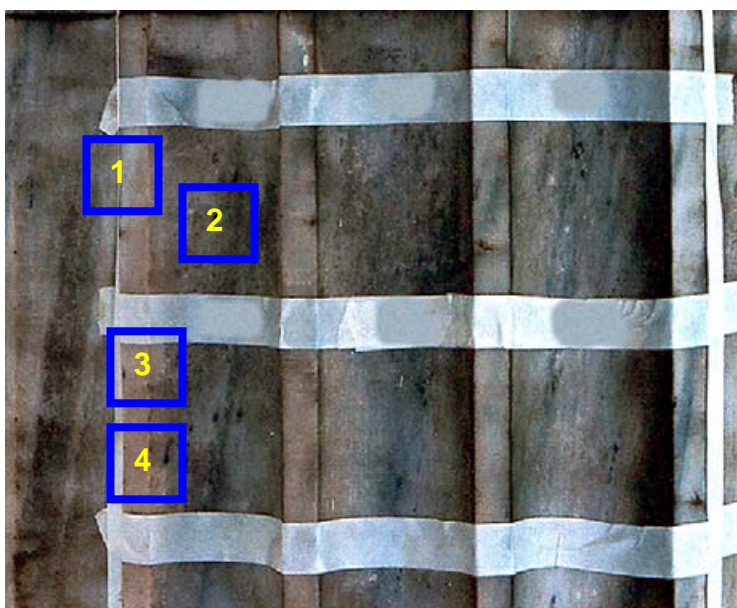
(α) Πρόσοψη του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, Τμήμα Πρόπυλου, Δυτικός Προσανατολισμός. (β) Ο κίονας όπου βρίσκονται οι τρεις επιφάνειες ελέγχου. (γ) Ανάπτυξη φαιόμαυρης κρούστας στις ραβδώσεις του κίονα - επιφάνεια ελέγχου ke – ανατολικός προσανατολισμός. (δ) Ανάπτυξη φαιόμαυρης κρούστας και αποπλυμένων επιφανειών στις ραβδώσεις του κίονα, ανάλογα με το βαθμό προστασίας από τη βροχή - επιφάνεια ελέγχου kn – βόρειος προσανατολισμός.



(ε), (στ) Ανάπτυξη φαιόμαυρης κρούστας στον ανάγλυφο διάκοσμο του κιονόκρανου - επιφάνεια ελέγχου Kke – ανατολικός προσανατολισμός.

Κωδικός Επιφάνειας	Θέση	Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις Παρουσιαζόμενοι Τύποι Φθοράς
Ke	Εξωτερική Σειρά Κιόνων Πρόπυλου, 1 ^{ος} από Αριστερά, 4 ^{ος} – 5 ^{ος} Σπόνδυλος, Ανατολικός Προσανατολισμός	Φαιόμαυρη κρούστα
Kn	Εξωτερική Σειρά Κιόνων Πρόπυλου, 1 ^{ος} από Αριστερά, 4 ^{ος} – 5 ^{ος} Σπόνδυλος, Βόρειος Προσανατολισμός	Φαιόμαυρη κρούστα, Αποπλυμένες Επιφάνειες
Kke	Εξωτερική Σειρά Κιόνων, 1 ^{ος} από Αριστερά, Κιονόκρανο, Ανατολικός Προσανατολισμός	Φαιόμαυρη κρούστα

6.2.1 Δειγματοληψία
1) Επιφάνεια ke

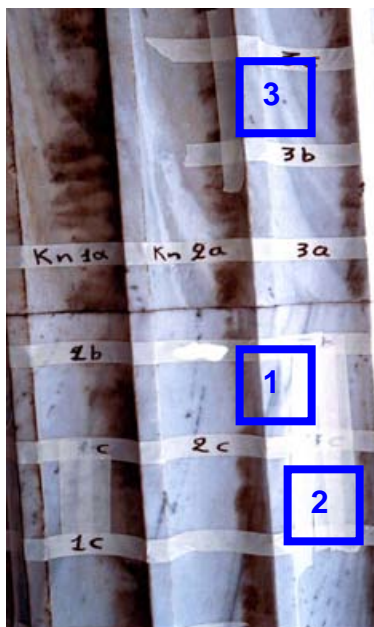


Εικ. 6.2.1.1 Θέσεις Δειγματοληψίας της υπό εξέταση επιφάνειας

Πίνακας 6.2.1.1 Αναλυτική Περιγραφή Δειγμάτων

Θέση Δειγματοληψίας στην Εικ. 6.2.1.1	Περιγραφή Περιοχής Δειγματοληψίας	Κωδικός Δείγματος	Κατάσταση Δείγματος
1	Περιοχή φαιόμαυρης κρούστας – ακμή ράβδωσης κίονα (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	Kerav	σκόνη
2	Περιοχή φαιόμαυρης κρούστας – αύλακας κίονα (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	Keav	σκόνη
3	Περιοχή φαιόμαυρης κρούστας – ακμή ράβδωσης κίονα (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	K4	Συμπαγές στερεό
4	Περιοχή φαιόμαυρης κρούστας – ακμή ράβδωσης κίονα (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	Ke6	Συμπαγές στερεό

2) Επιφάνεια kn

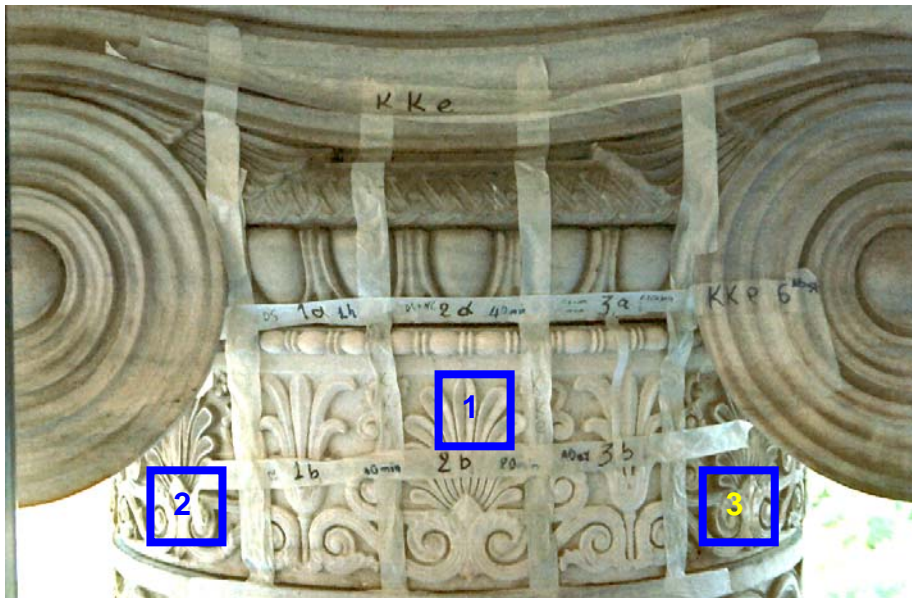


Εικ. 6.2.1.2 Θέσεις Δειγματοληψίας της υπό εξέταση επιφάνειας

Πίνακας 6.2.1.2 Αναλυτική Περιγραφή Δειγμάτων

Θέση Δειγματοληψίας στην Εικ. 6.2.1.2	Περιγραφή Περιοχής Δειγματοληψίας	Κωδικός Δείγματος	Κατάσταση Δείγματος
1	Περιοχή αποπλυμένων επιφανειών – ακμή ράβδωσης κίονα (βόρειος προσανατολισμός, περιοχή πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής)	Kn _{1av}	σκόνη
2	Περιοχή αποπλυμένων επιφανειών – ακμή ράβδωσης κίονα (βόρειος προσανατολισμός, περιοχή πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής)	Kn _{2av}	σκόνη
3	Περιοχή αποπλυμένων επιφανειών – ακμή ράβδωσης κίονα (βόρειος προσανατολισμός, περιοχή πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής)	Kn _{3cd}	Συμπαγές στερεό

2) Επιφάνεια kke



Εικ. 6.2.1.3 Θέσεις Δειγματοληψίας της υπό εξέταση επιφάνειας

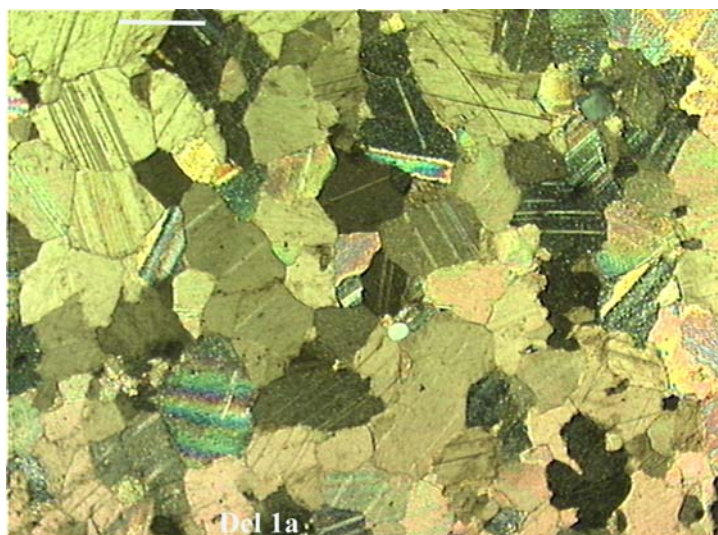
Πίνακας 6.2.1.3 Αναλυτική Περιγραφή Δειγμάτων

Θέση Δειγματοληψίας στην Εικ. 6.2.1.3	Περιγραφή Περιοχής Δειγματοληψίας	Κωδικός Δείγματος	Κατάσταση Δείγματος
1	Περιοχή φαιόμαυρων κρουστών – κεντρικό τμήμα ανάγλυφου ανθεμίων (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	kked1a, πρόσθια όψη	σκόνη
		kked1o, πορτοκαλοκάστανη χροιά, πλάγια όψη	σκόνη
		kked1, (πλάγια & πρόσθια όψη)	Συμπαγές στερεό
		Kkek, (πλάγια & πρόσθια όψη)	Συμπαγές στερεό
2	Περιοχή φαιόμαυρων κρουστών – αριστερό τμήμα ανάγλυφου ανθεμίων (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	Kkeeraa, πορτοκαλοκάστανη χροιά, πρόσθια όψη	σκόνη
		Kkeerak, πλάγια όψη	σκόνη
		Kkeera (πλάγια & πρόσθια όψη)	Συμπαγές στερεό
3	Περιοχή φαιόμαυρων κρουστών – δεξί τμήμα ανάγλυφου ανθεμίων (ανατολικός προσανατολισμός, περιοχή πλήρως προστατευμένη από το νερό της βροχής)	Kkeega, πρόσθια όψη	σκόνη
		Kkeego, πλάγια όψη	σκόνη
		Kkeeg, (πλάγια & πρόσθια όψη)	Συμπαγές στερεό

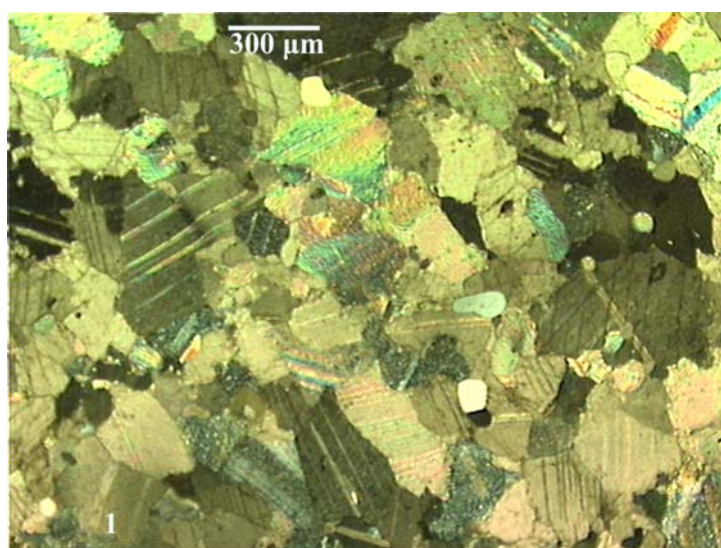
6.2.2 Χαρακτηρισμός των υλικών και διάγνωση της φθοράς

6.2.2.1 Αποτελέσματα Οπτικής Μικροσκοπίας

Στερεό δείγμα λήφθηκε από μαρμάρινη αρχιτεκτονική επιφάνεια του ιστορικού κτιρίου της Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (ΕΑΜ) για το χαρακτηρισμό του υποστρώματος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι πρόκειται για Πεντελικό μάρμαρο και έρχονται σε συμφωνία με τα ιστορικά βιβλιογραφικά δεδομένα.



Εικ. 6.2.2.1.1: εικόνα λεπτής τομής δείγματος των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ΕΑΜ. Διασταυρωμένα πρίσματα



Εικ. 6.2.2.1.2: εικόνα λεπτής τομής δείγματος των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ΕΑΜ. Διασταυρωμένα πρίσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της οπτικής μικροσκοπίας, το υπόστρωμα των μαρμάρινων επιφανειών του ΕΑΜ είναι λευκό μάρμαρο ασβεστίτης σύστασης. Οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη καθώς και οι χαρακτηριστικές του πολυδιδυμίες είναι εμφανείς.

Το σχήμα των κρυστάλλων του ασβεστίτη είναι πολυγωνικό και ακανόνιστο, ενώ το μέγεθός τους κυμαίνεται από μικρό έως μεσαίο (από δεκάδες έως κάποιες εκατοντάδες μm). Το πέτρωμα παρουσιάζει έναν κοκκώδη ιστό (Εικ. 6.2.2.1.1), όπου δηλαδή οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη είναι ενωμένοι μεταξύ τους παρουσιάζοντας σαφή όρια επαφής. Λίγοι αποστρογγυλεμένοι και μικρότεροι σε διάσταση κόκκοι χαλαζία, είναι διάσπαρτοι μέσα στην ασβεστιτική μάζα, (Εικ. 6.2.2.1.2). Χαρακτηρίζεται δε ως Πεντελικό μάρμαρο.

5.2.2 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, στο πλαίσιο της διάγνωσης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς. Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού



φαιόμαυρη κρούστα, κίονας, ράβδωση, (ανατολικός προσανατολισμός), x25



φαιόμαυρη κρούστα, κίονας, αύλακας, (ανατολικός προσανατολισμός), x25



αποπλυμένη επιφάνεια, κίονας, ράβδωση, (βόρειος προσανατολισμός), x25



αποπλυμένη επιφάνεια, κίονας, αύλακας, (βόρειος προσανατολισμός), x25



φαιόμαυρη κρούστα, κιονόκρανο, κεντρικό τμήμα, (ανατολικός προσανατολισμός), x100



φαιόμαυρη κρούστα, κιονόκρανο, κεντρικό τμήμα, (ανατολικός προσανατολισμός), x100



φαιόμαυρη κρούστα, κιονόκρανο, δεξί τμήμα, (ανατολικός προσανατολισμός), x50



φαιόμαυρη κρούστα, κιονόκρανο, δεξί τμήμα, (ανατολικός προσανατολισμός), x100



φαιόμαυρη κρούστα, κιονόκρανο, αριστερό τμήμα, (ανατολικός προσανατολισμός), x100



**φαιόμαυρη κρούστα,
κιονόκρανο, αριστερό τμήμα,
(ανατολικός προσανατολισμός),
x100**

Οι δύο πρώτες εικόνες προέρχονται από την επιφάνεια του κίονα με ανατολικό προσανατολισμό που προστατεύεται πλήρως από το νερό της βροχής. Ο χαρακτηριστικός τύπος φθοράς που εμφανίζεται και στις ραβδώσεις, καθώς και στους αύλακες είναι οι φαιόμαυρες κρούστες. Στις εικόνες Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών διακρίνονται οι κρούστες μεγάλου πάχους, στις στοιβάδες των οποίων εγκλείονται επικαθίσεις αργιλοπυριτικής σύστασης και σωματίδια άνθρακα προερχόμενα από ατελείς καύσεις, που τελικά προσδίδουν το χαρακτηριστικό μαύρο χρωματισμό.

Οι επόμενες δύο εικόνες προέρχονται από την επιφάνεια του κίονα με βόρειο προσανατολισμό δηλ. περιοχή που εκπλένεται από την όξινη βροχή. Παρατηρείται η εμφάνιση λεπτόκοκκων στρωμάτων μαρμάρου, που προκύπτουν από την εκλεκτική αποκόλληση κρυσταλλικών κόκκων.

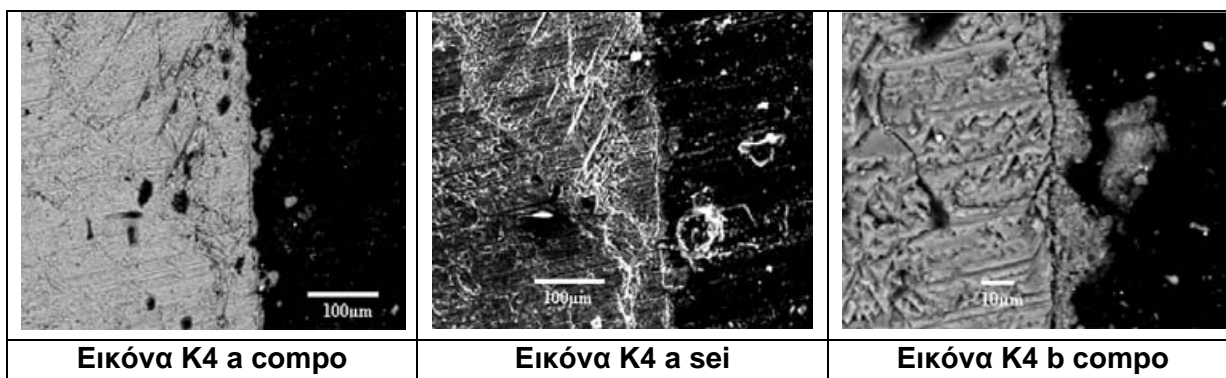
Οι εικόνες από τις ανάγλυφες επιφάνειες των ανθεμίων του κιονόκρανου (ανατολικός προσανατολισμός) εμφανίζουν, είτε μια έντονη πορτοκαλοκάστανη χροιά, που δεν προσομοιάζει μορφολογικά με φαιόμαυρη κρούστα ή σε άλλες περιοχές (κυρίως στις πλάγιες όψεις) χαρακτηριστικές φαιόμαυρες κρούστες.

6.2.2.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ για τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς των ανάγλυφων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ΕΑΜ.

1) Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών κίονα (ανατολικός προσανατολισμός) – Δείγματα K4 και Ke6

Δείγμα K4



Από τις εικόνες K4 a και K4b και τις αναλύσεις EDS (1ο,5ο,6ο,15ο,16ο EDS) φαίνεται ότι η επιφάνεια του δείγματος έχει γυψοποιηθεί και χωρίζεται καθαρά από το υπόλοιπο μάρμαρο με μια ασυνέχεια, το πλάτος της οποίας είναι σχετικά μικρό και φτάνει τα 2-3 µm.

Το πάχος της γυψοποιημένης επιφάνειας φτάνει τα 30 µm και στην εικόνα K4b φαίνεται καθαρά η διαφοροποίηση του γύψου από τον ασβεστίτη .

Πίσω από την ασυνέχεια αυτή εντοπίζονται ίχνη θείου έως και σε βάθος 40 µm (από το τέλος της ασυνέχειας, 4ο, 7ο , 8ο, 9ο, 10ο, 11ο, 12ο, 13ο, 14ο, 17ο EDX).


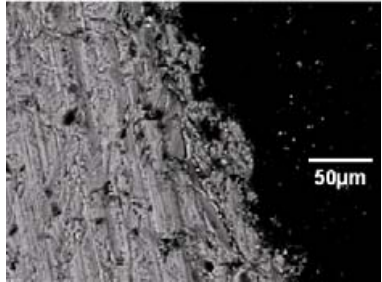
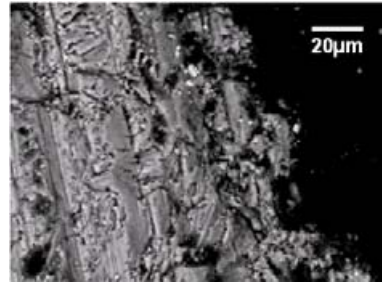
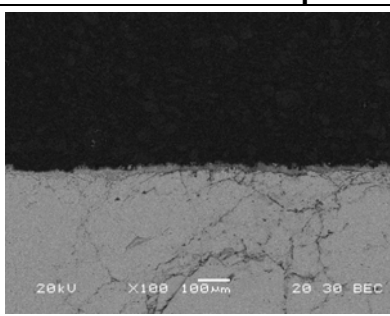
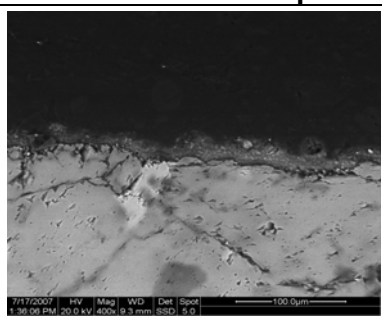
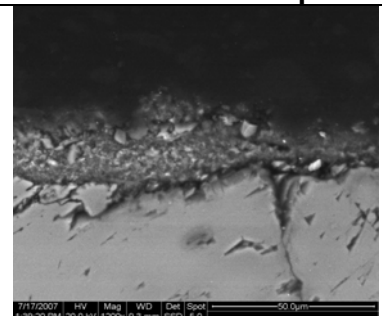
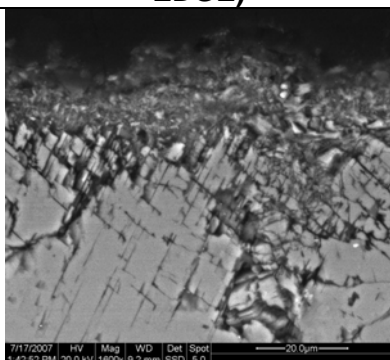
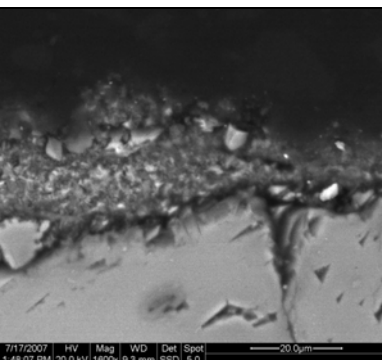
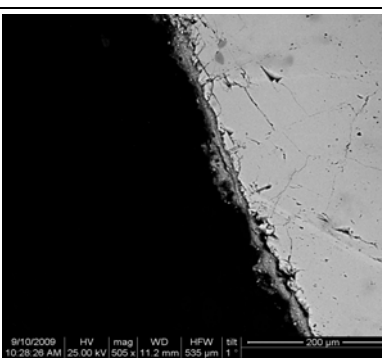
Στο αδροκρυσταλλικό επιφανειακό στρώμα γύψου συναντάμε και ποσοστά Si,Al,Fe που προέρχονται από το περιβάλλον (επικαθίσεις). Επίσης εντοπίστηκαν και 2 λευκοί κόκκοι, ο πρώτος πλούσιος σε Fe και ο δεύτερος σε Pb (2ο και 3ο EDS- εικόνα K4a). Οι κόκκοι αυτοί μπορεί να βρέθηκαν στην θέση αυτή κατά την διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος ή να προέρχονται από το περιβάλλον.

Αποτελέσματα Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ (EDS)

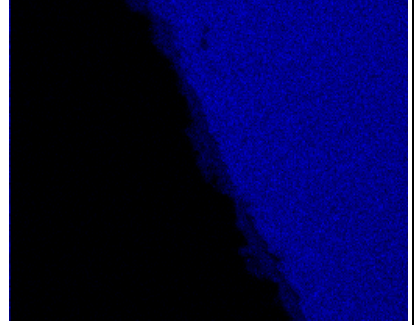
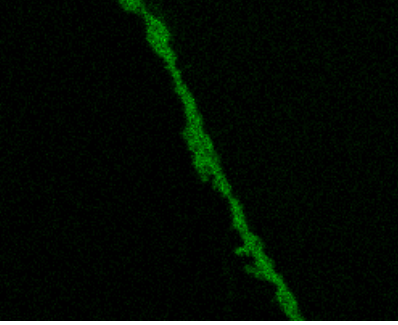
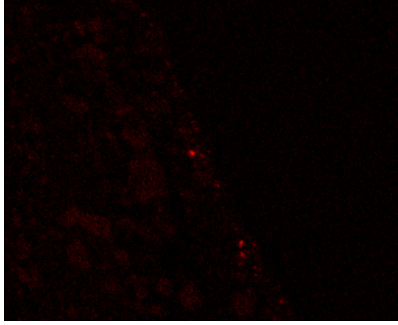
Κωδικός δείγματος Κ4	EDS	Ca	Si	Al	Mg	S	Fe	Cl	K	Mn	Pb
	1 (Εικ. Κ4a compo)	****	*	*	-	***	•	•	•	-	-
	2 (Εικ. Κ4a compo)	**	•	•	*	*	****	•	-	•	-
	3 (Εικ. Κ4a compo)	*	•	•	-	*	-	-	-	-	****
	4 (Εικ. Κ4a compo)	****	-	-	•	•	-	•	-	-	-
	5 (Εικ. Κ4a compo)	****	**	*	•	***	*	•	•	-	-
	6 (Εικ. Κ4a compo)	****	•	•	-	***	-	•	-	-	-
	7 (Εικ. Κ4a&Κ4b compo)	****	•	-	-	•	-	-	-	-	-
	8 (Εικ. Κ4b compo)	****	-	-	•	•	-	•	-	-	-
	9 (Εικ. Κ4b compo)	****	-	-	-	•	-	•	-	-	-
	10 (Εικ. Κ4b compo)	****	•	•	•	•	-	•	•	-	-
	11 (Εικ. Κ4b compo)	****	•	•	•	•	-	-	-	-	-
	12 (Εικ. Κ4b compo)	****	-	-	•	•	-	•	-	-	-
	13 (Εικ. Κ4b compo)	****	-	-	•	-	-	-	-	-	-
	14 (Εικ. Κ4b compo)	****	-	-	•	*	-	-	-	-	-
	15 (Εικ. Κ4b compo)	****	*	*	-	***	*	•	•	-	-
	16 (Εικ. Κ4a compo)	****	***	•	-	•	**	-	-	•	-
17 (Εικ. Κ4a compo)	****	-	•	-	•	-	-	-	-	-	

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Δείγμα Ke6

		
Εικόνα Ke6a compo	Εικόνα Ke6b compo	Εικόνα Ke6c compo
		
Εικόνα Ke6d compo (ψηφιακή επεξεργασία EDGE)	Εικόνα Ke6e compo	Εικόνα Ke6f compo
		
Εικόνα Ke6g compo	Εικόνα Ke6h compo	Εικόνα Ke6i compo

Στην εικόνα **Ke6i compo** έλαβε χώρα χαρτογράφηση του Ca, του S και του Al

		
Ca	S	Al

Αποτελέσματα Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος Κε6	EDS	Ca	S	Si	Mg	Ba	Cl	Na	K	Al	Fe
	1 (Εικόνα Κε6b compo)	****	***	*	•	-	-	-	-	*	*
	2 (Εικόνα Κε6b compo)	****	***	***	-	-	•	-	*	***	-
	3 (Εικόνα Κε6b compo)	****	*	-	•	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Κε6b compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Κε6b compo)	****	***	•	-	-	•	-	-	•	-
	6 (Εικόνα Κε6b compo)	****	**	•	-	-	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Κε6b compo)	****	•	-	-	-	-	-	-	-	-
	8 (Εικόνα Κε6b compo)	***	***	•	-	****	•	*	-	-	-
	9 (Εικόνα Κε6c compo)	****	*	-	•	-	-	-	-	-	-
	10 (Εικόνα Κε6c compo)	****	-	-	•	-	-	-	-	-	-

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Το Κε6 αποτελεί το δείγμα διάγνωσης της φθοράς για τη φαιόμαυρη κρούστα. Όπως φαίνεται από όλες τις εικόνες του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, ο ασβεστίτης έχει επιφανειακά γυψοποιηθεί, σχηματίζοντας μια συνεκτική ζώνη πάχους 30-40μm, έντονου ανάγλυφου, η οποία αποτελείται από συσσωμάτωμα κρυπτοκρυσταλλικού γύψου (διαμέτρου <1μm) (Εικ. Κε6g, Κε6h), ενώ σποραδικά εμφανίζονται κρύσταλλοι γύψου διαφόρων διαμέτρων (από 1 ως 6 μm) και διαφόρων μορφών και σχημάτων.

Στη διεπιφάνεια γυψοποιημένης ζώνης και ασβεστιτικών κόκκων εμφανίζονται εγκάρσιες ρηγματώσεις και διακλάσεις ακόμα και περιμετρικά των κρυστάλλων ασβεστίτη. Στην Εικ. Κε6g είναι εμφανείς οι κατακερματισμένες απολήξεις των ορίων του κόκκου ασβεστίτη, που υποδεικνύουν την καταπόνηση της εξώτατης στοιβάδας του μαρμάρου.

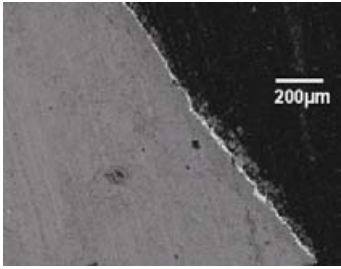
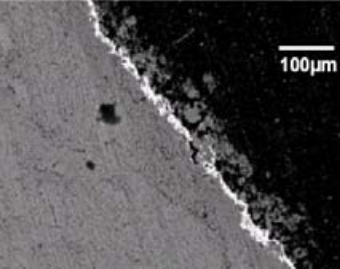
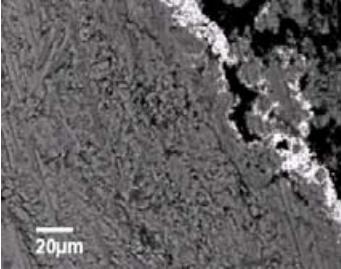
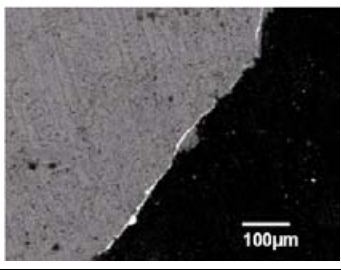
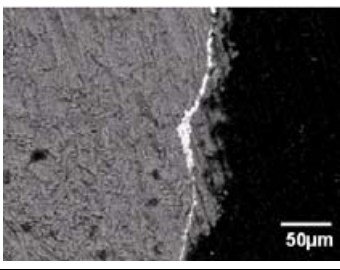
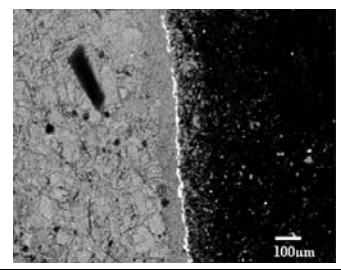
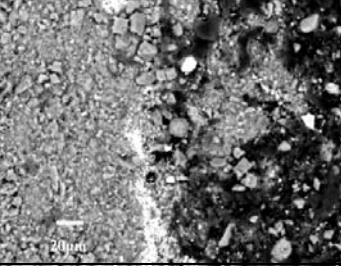
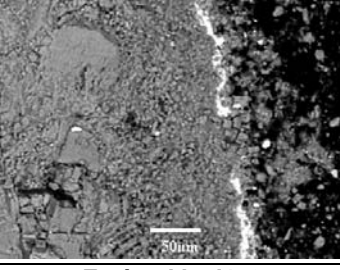
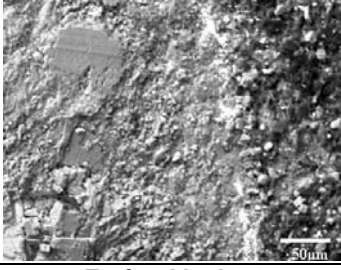
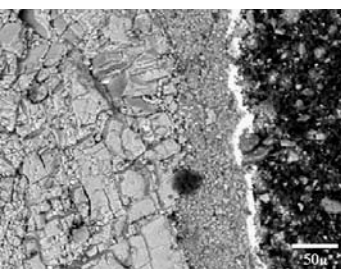

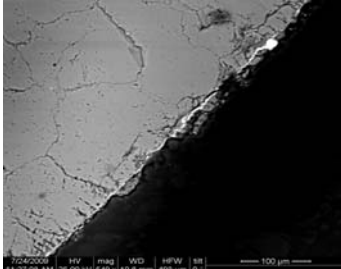
Σε αρκετές περιοχές της γυψοποιημένης ζώνης εντοπίζονται Al και Si σε μέσες έως χαμηλές περιεκτικότητες, που προφανώς έχουν προέλθει από επικαθήσεις του περιβάλλοντος.

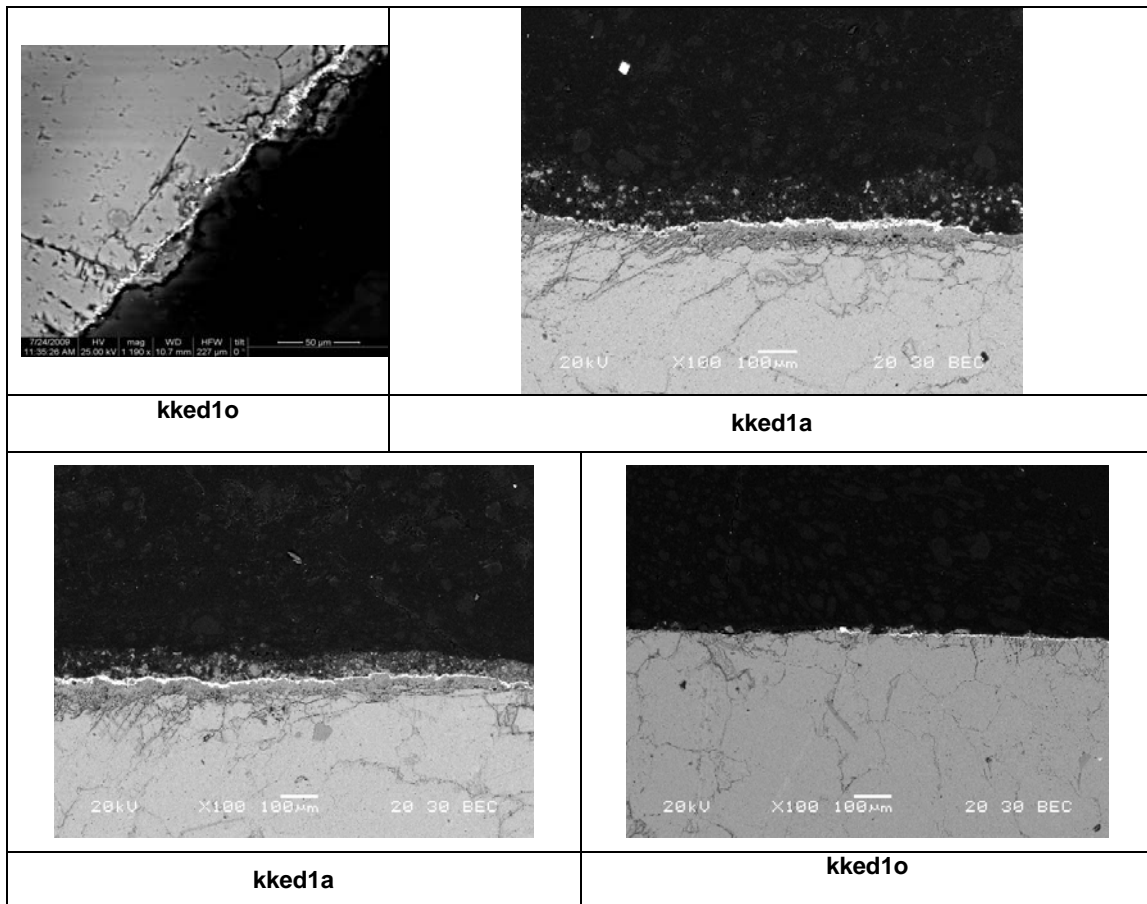
Κόκκος βαρίου εντοπίζεται σε μία ανάλυση στη διεπιφάνεια ασβεστίτη γύψου, (EDS 8).

5.2.2.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

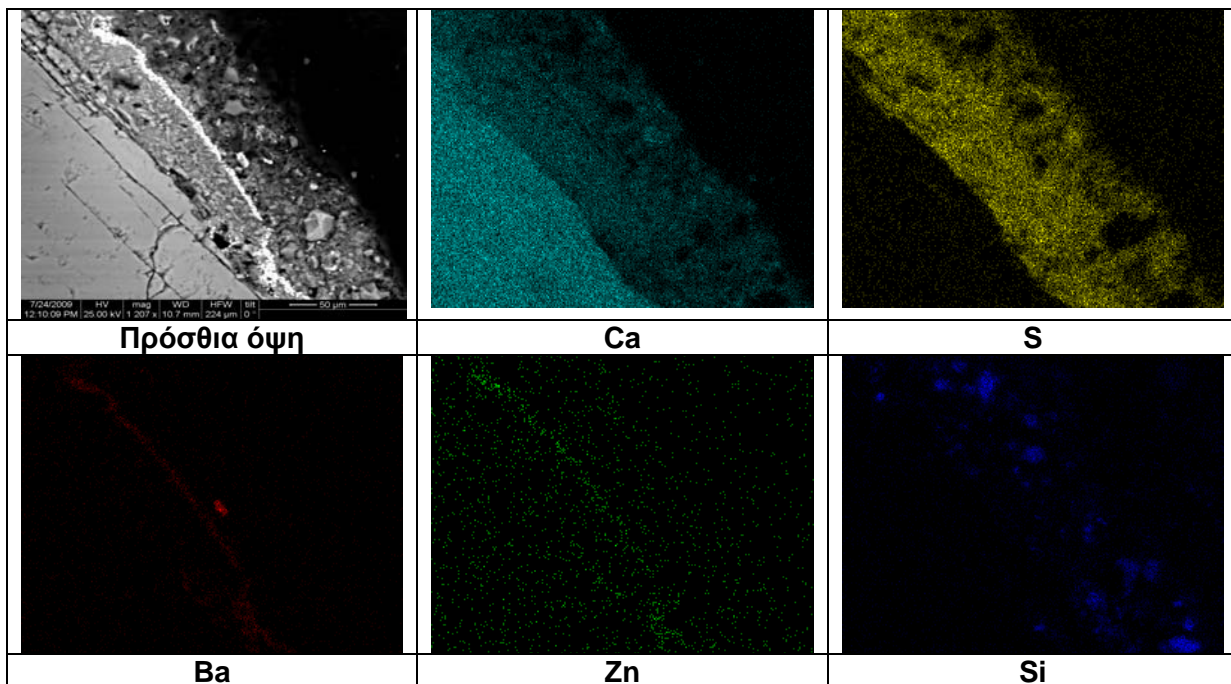
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ για τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς των ανάγλυφων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών των ανθεμίων στο κιονόκρανο στο ΕΑΜ.

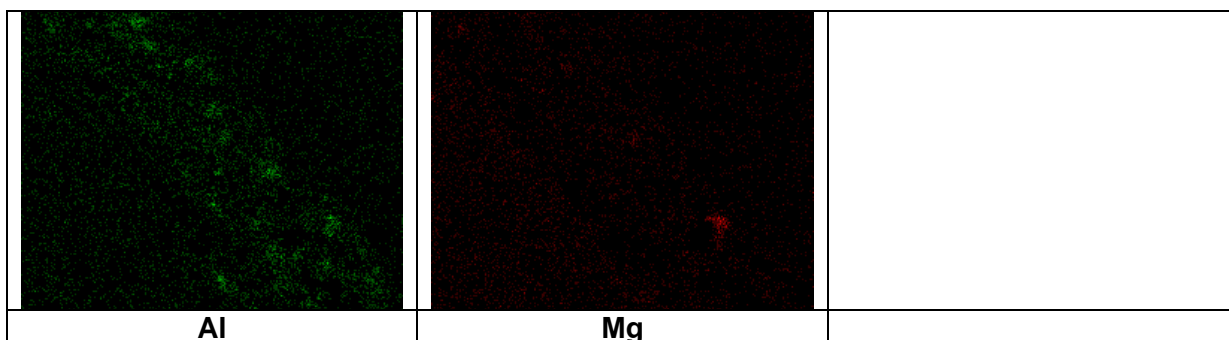
1) Περιοχή της κεντρικού τμήματος του κιονόκρανου – Δείγμα kked1 (πρόσθια & πλάγια όψη)

		
Εικόνα kked1oa	Εικόνα kked1ob	Εικόνα kked1oc
		
Εικόνα kked1od	Εικόνα kked1oe	Εικόνα kked1a1
		
Εικόνα kked1a2	Εικόνα kked1a3	Εικόνα kked1a4
		
Εικόνα kked1a5	Εικόνα kked1a6	kked1o

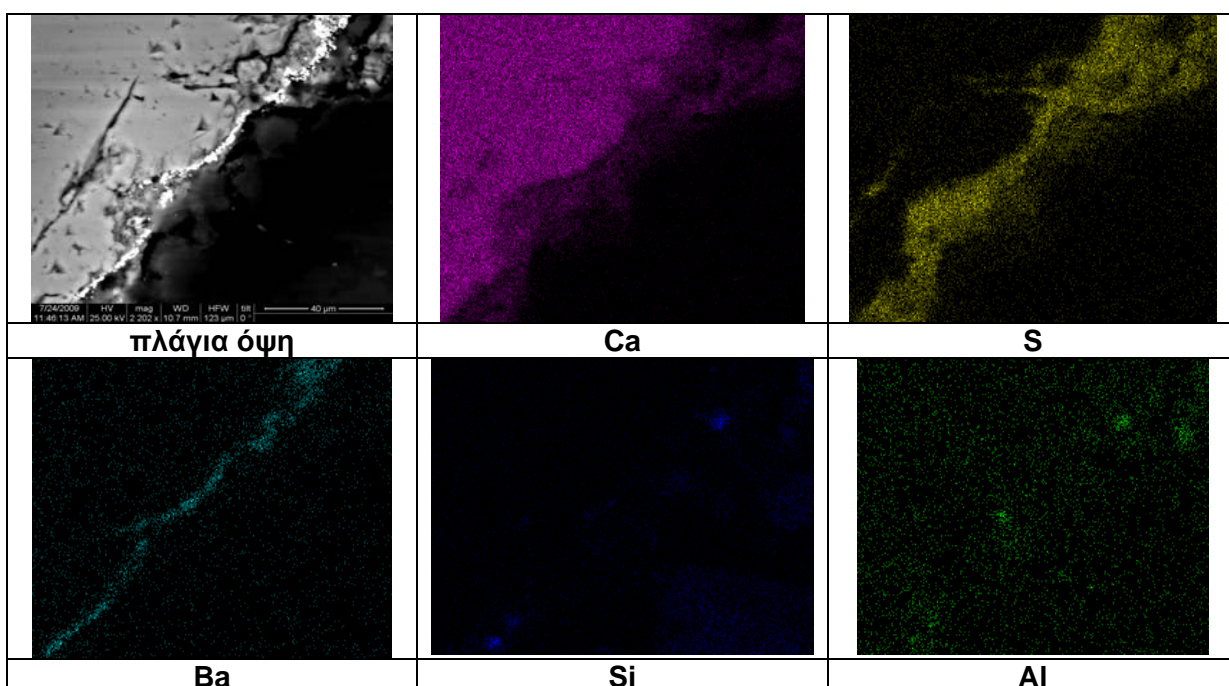


Στην παρακάτω εικόνα της πρόσθιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.





Στην παρακάτω εικόνα της πλάγιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Ba	Al	Cl	Zn	Fe	Pb
Κωδικός δείγματος Kked1	1 (Εικόνα kked1b compo)	****	***	-	-	-	•	-	-	-
	2 (Εικόνα kked1b compo)	*	**	•	****	•	•	*	-	-
	3 (Εικόνα kked1b compo)	****	***	-	-	-	•	-	-	-
	4 (Εικόνα kked1c compo)	****	***	-	-	-	*	-	-	-
	5 (Εικόνα kked1c compo)	****	•	-	-	-	•	-	-	-
	6 (Εικόνα kked1c compo)	****	*	-	-	-	•	-	-	-
	7 (Εικόνα kked1b compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	****								

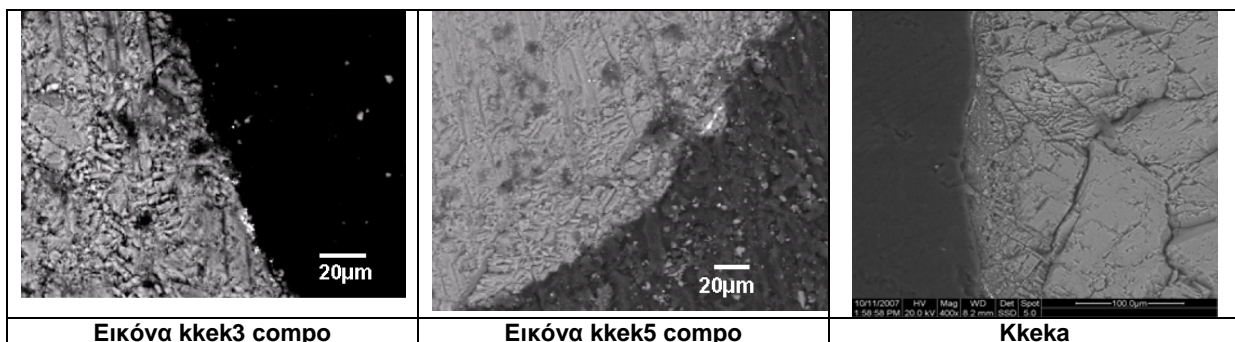
(Εικόνα kked1b compo)										
9 (Εικόνα kked1b compo)	****	*	-	-	-	-	-	-	-	-
10 (Εικόνα kked1d compo)	****	***	*	-	•	•	-	-	*	
11 (Εικόνα kked1d compo)	***	***	-	****	-	•	*	•	-	
12 (Εικόνα kked1e compo)	****	***	*	-	•	•	-	-	*	
13 (Εικόνα kked1e compo)	****	***	*	-	•	•	-	-	*	
14 (Εικόνα kked1e compo)	****	*	-	-	-	-	-	-	-	
15 (Εικόνα kked1e compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-	
16 (Εικόνα kked1e compo)	****	•	-	-	-	-	-	-	-	

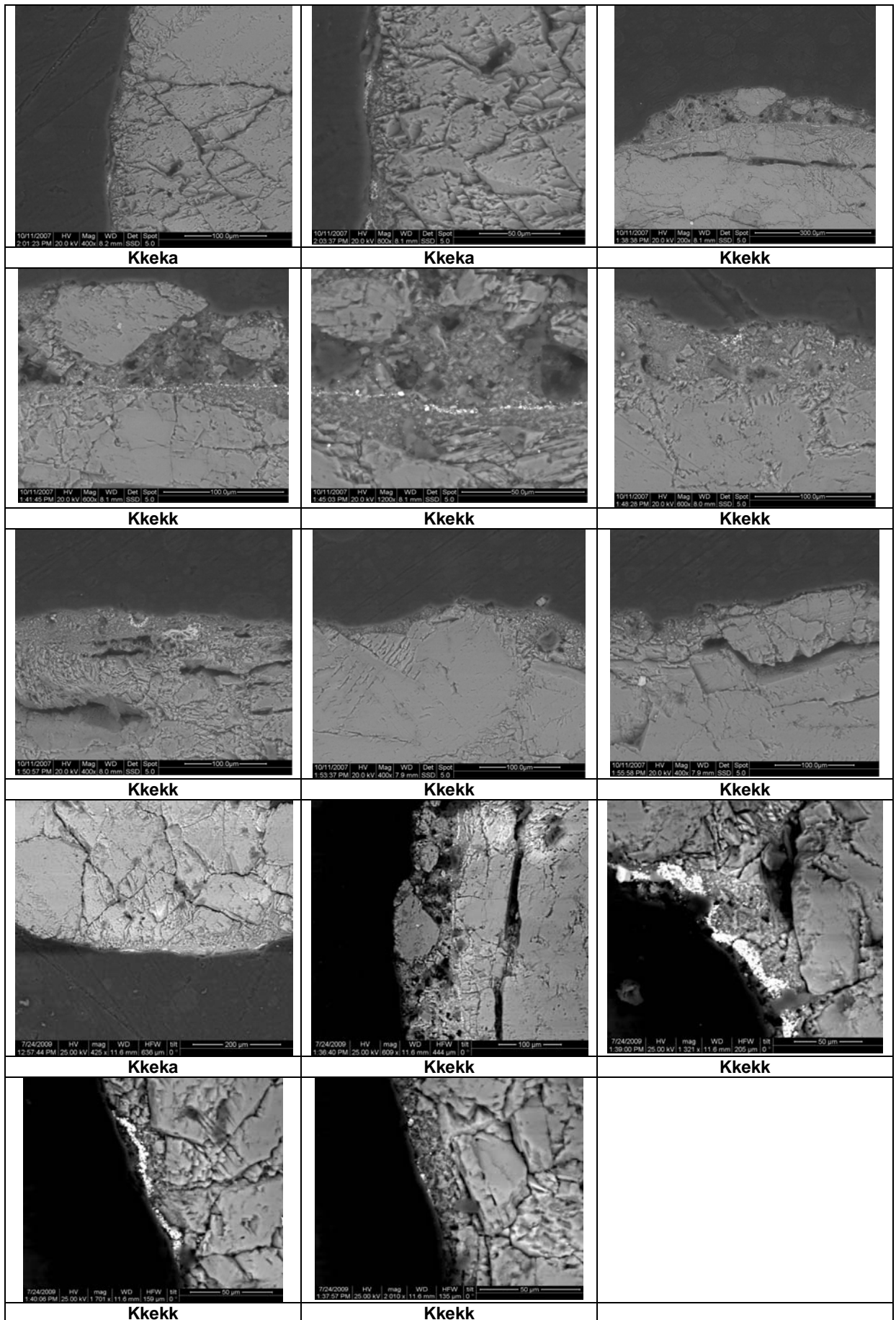
**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Καταγράφεται ότι η πρόσθια όψη του κεντρικού τμήματος του ανάγλυφου μπορεί να παρουσιάζει μέσο συνολικό πάχος 130μm από όπου το μέσο πάχος του μικροκρυσταλλικού είναι στα 60μm. Το υπόλοιπο τμήμα της κρούστας συνίσταται σε αδροκρυσταλλικό γύψο, μαύρες επικαθίσεις και επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Επιπλέον, ανάμεσα στον αδροκρυσταλλικό και μικροκρυσταλλικό γύψο εντοπίζεται στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 10μm (kked1a).

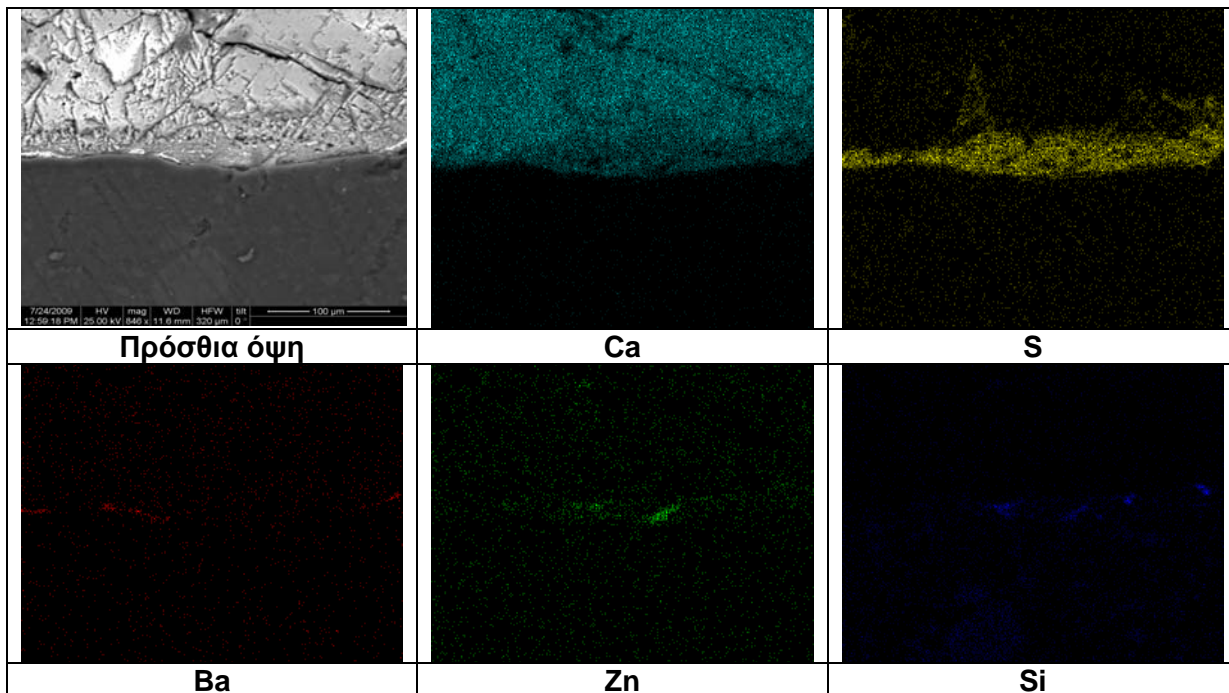
Στην πλάγια όψη μέσο συνολικό πάχος κρούστας 30μm συνολικά αποτελούμενο από μικροκρυσταλλικό ασβεστίτη και στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 15μm που βρίσκεται κάτω από το στρώμα του γύψου ή στο εσωτερικό του ή στην επιφάνειά του (kked1k).

Δείγμα kkek

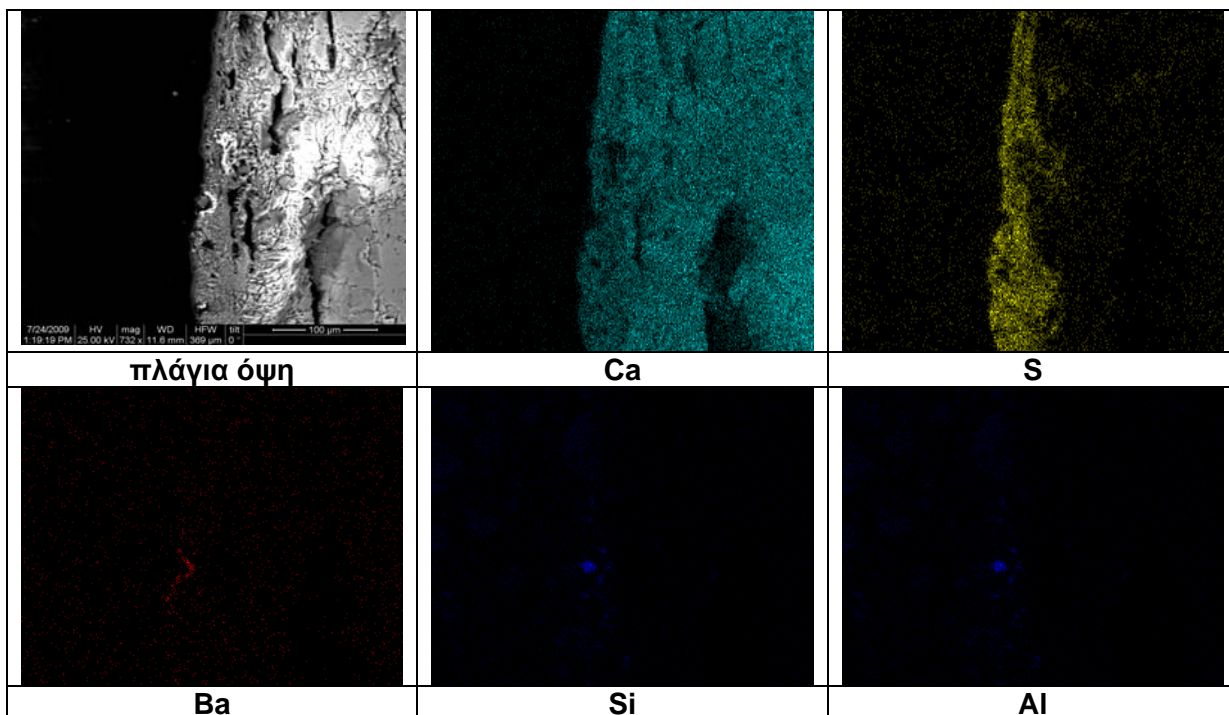




Στην παρακάτω εικόνα της πρόσθιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



Στην παρακάτω εικόνα της πλάγιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Al	K	Mg	Cl	Fe	Ba	Ti	P	
Κωδικός Δείγματος Κκεκ	1 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	*	-	-	•	-	•	-	-	-	•	
	2 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	***	•	•	•	-	•	-	-	*	-	
	3 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	•	-	-	-	*	-	-	-	-	-	
	4 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	•	-	-	-	•	-	-	-	-	-	
	5 (Εικόνα κκεκ3 compo)	**	***	•	•	•	-	•	-	****	-	-	
	6 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	***	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-
	7 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	***	•	•	•	•	•	•	-	-	•	-
	8 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	*	-	-	-	•	-	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	***	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-
	10 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	•	-	-	-	•	-	-	-	-	-	-
	11 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-
	12 (Εικόνα κκεκ3 compo)	****	•	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-
	13 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	***	•	-	-	-	•	-	-	-	-	-
	14 (Εικόνα κκεκ5 compo)	***	***	•	-	-	-	•	-	****	-	-	-
	15 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	**	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-
	16 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	•	•	-	-	*	-	-	-	-	-	-
	17 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-
	18 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	***	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-
	19 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	***	•	•	•	-	*	-	-	-	-	-
	20 (Εικόνα κκεκ5 compo)	****	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

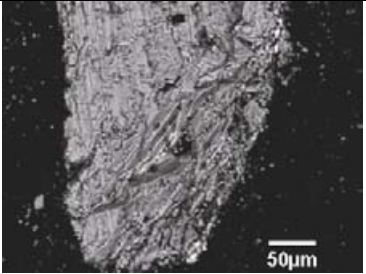
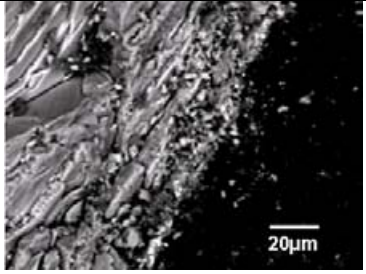
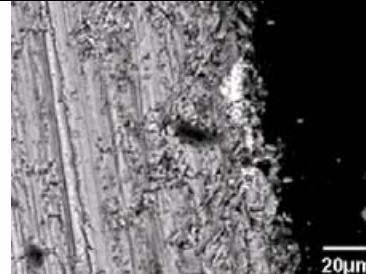
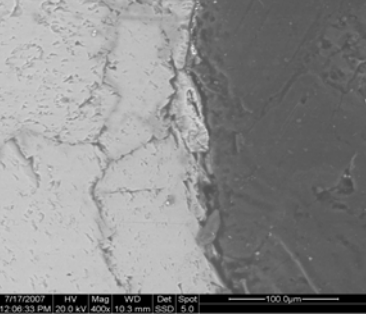
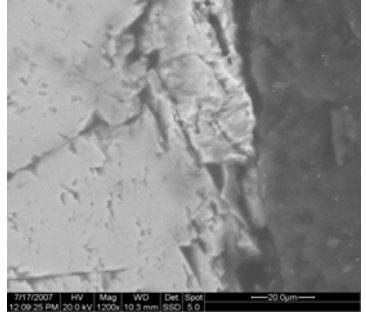
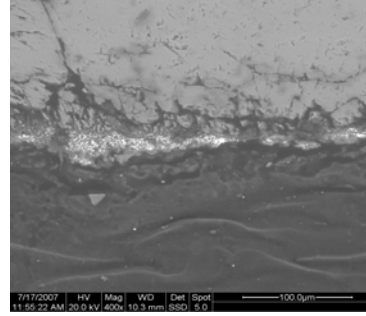
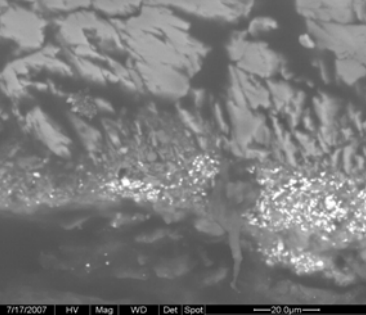
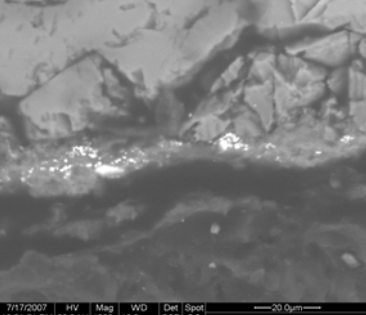
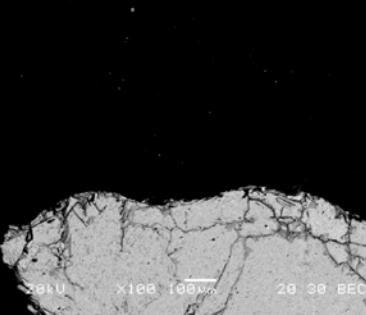
Στην πρόσθια όψη του δείγματος το συνολικό πάχος της κρούστας κυμαίνεται στα 35 περίπου μm και συνίσταται μόνο από μικροκρυσταλλικό γύψο που στην επιφάνεια του βρίσκεται στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 5μm (kkeka).

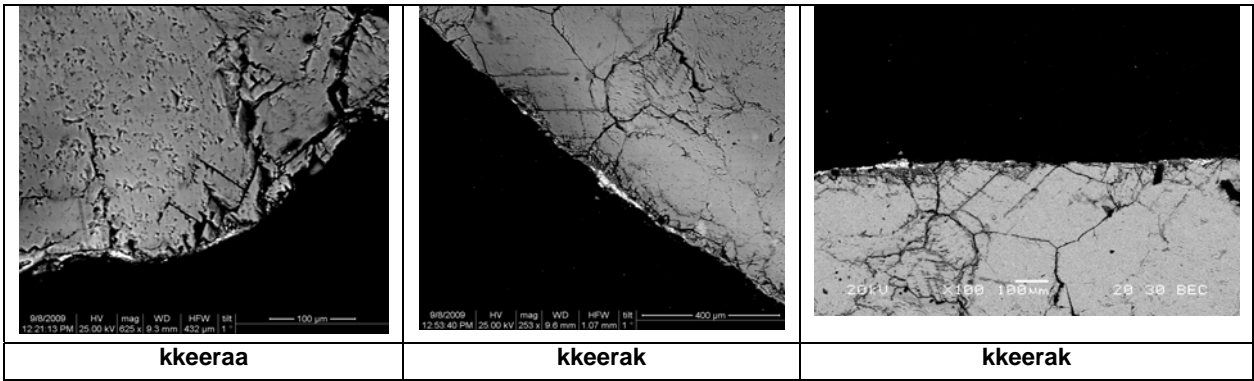
Στην πλάγια όψη του δείγματος παρατηρείται συνολικό πάχος κρούστας 100μm όπου το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου είναι 20μm και στρώμα βαρύτη βρίσκεται ανάμεσα στον μακρο και μικροκρυσταλλικό γύψο με μέσο πάχος 3μm, (kkekk).

Σε άλλη περιοχή το μέσο συνολικό πάχος κρούστας είναι 50μm συνολικά αποτελούμενο από μικροκρυσταλλικό ασβεσίτη και στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 15μm που βρίσκεται κάτω από το στρώμα του γύψου ή στο εσωτερικό του ή στην επιφάνειά του.

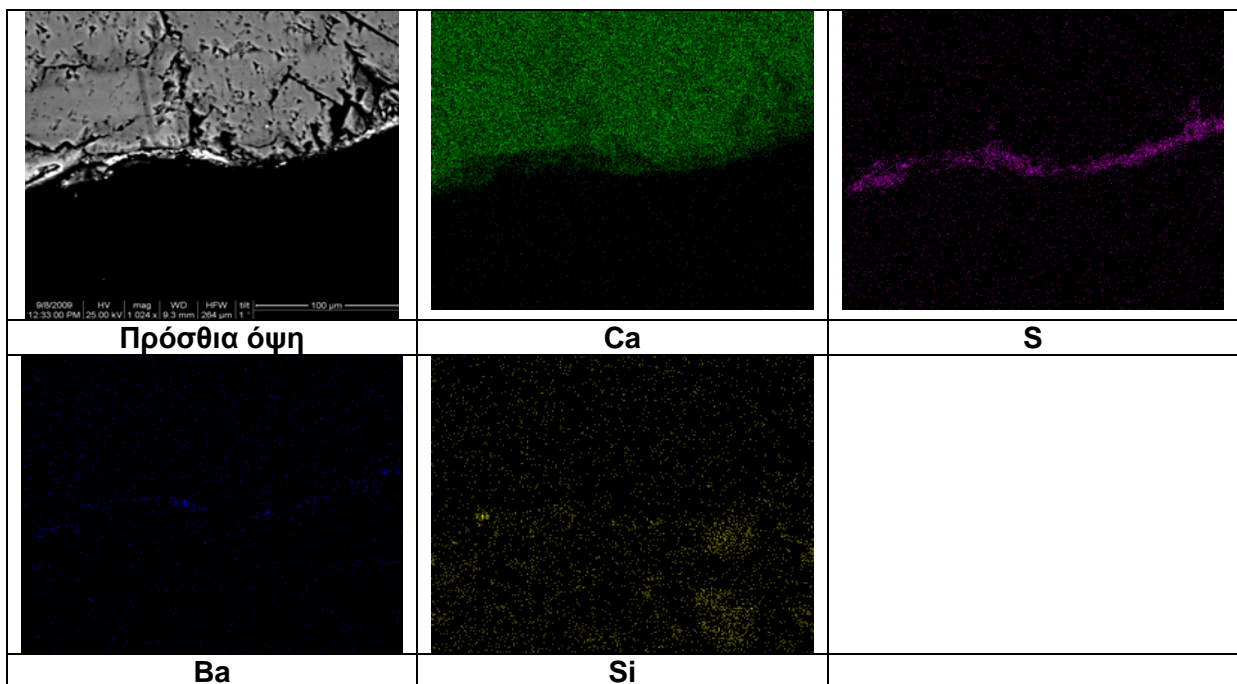
Σε τρίτη περιοχή της πλάγιας όψης του δείγματος το μέσο συνολικό πάχος κρούστας καταγράφεται στα 50μm και δεν υπάρχει βαρύτης.

2) Περιοχή του αριστερού τμήματος του κιονόκρανου – Δείγμα kkeera (πρόσθια & πλάγια όψη)

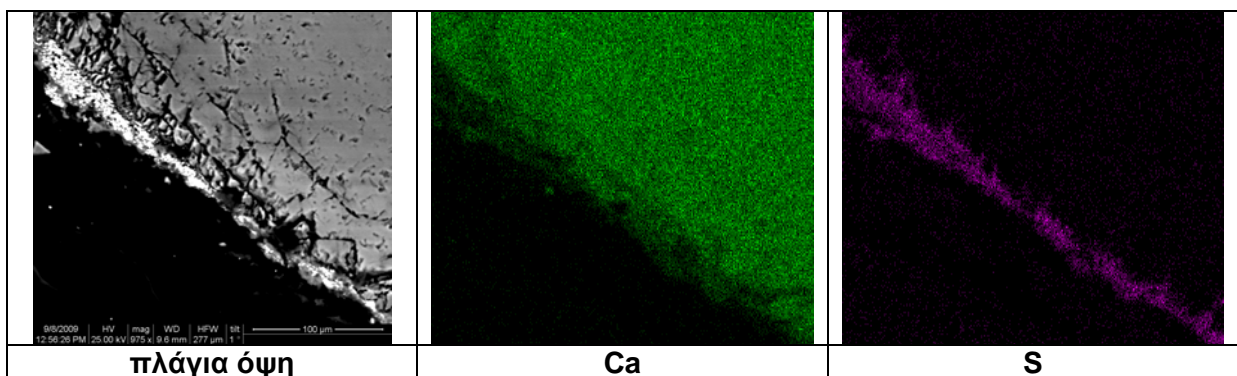
		
Εικόνα kkeera2 compo	Εικόνα kkeera3 compo	Εικόνα kkeera4 compo
		
kkeeraa	kkeeraa	kkeerak
		
kkeerak	kkeerak	kkeeraa

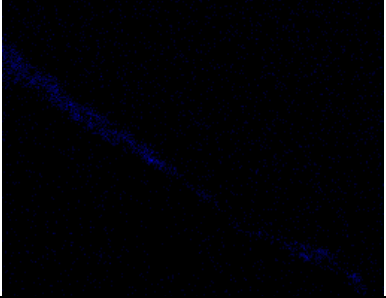


Στην παρακάτω εικόνα της πρόσθιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



Στην παρακάτω εικόνα της πλάγιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



		
Ba		

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος κκεερα	EDS	Ca	S	Si	Na	Mg	Ba	Al	K	Zn	Cl	
	1 (Εικόνα κκεερα2 compo)	***	***	•	-	-	****	-	-	*	-	-
	2 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	•	•	-	•	-	-	-	-	-	-
	3 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	***	•	*	-	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα κκεερα3 compo)	****	***	•	*	-	-	-	•	-	•	-
	5 (Εικόνα κκεερα3 compo)	****	*	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	6 (Εικόνα κκεερα3 compo)	****	*	-	-	-	-	-	•	-	-	-
	7 (Εικόνα κκεερα3 compo)	****	**	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	8 (Εικόνα κκεερα3 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	•	-	*	-	-	-	•	-	-	-
	10 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	11 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	*	•	-	•	-	-	•	-	-	-
	12 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	**	-	*	-	-	-	-	-	-	-
	13 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	*	-	*	-	•	-	•	-	-	-
	14 (Εικόνα κκεερα2 compo)	****	•	-	*	-	-	-	•	-	-	-

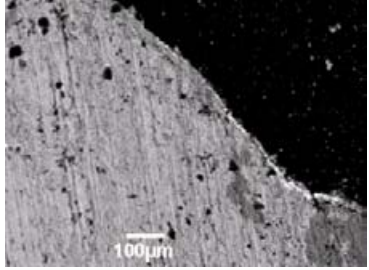
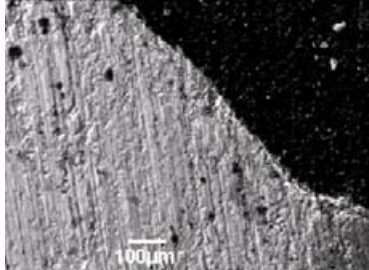
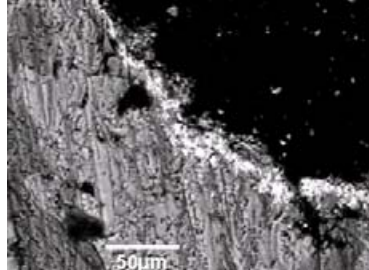
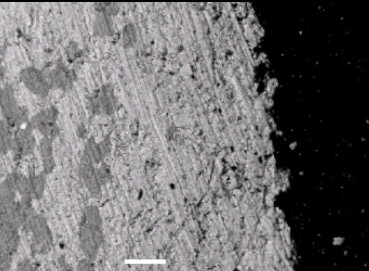
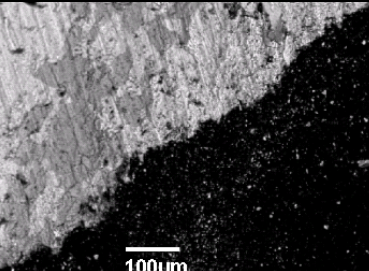
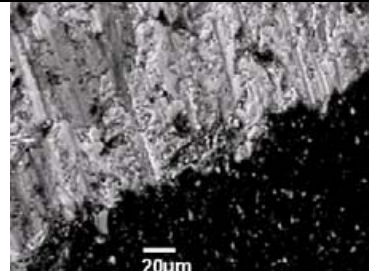
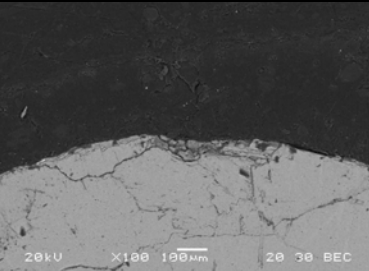
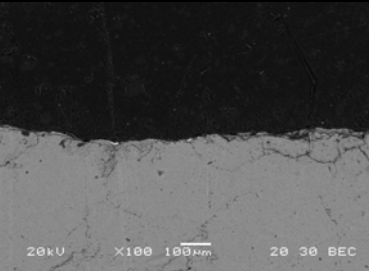
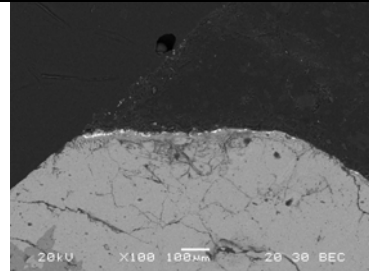
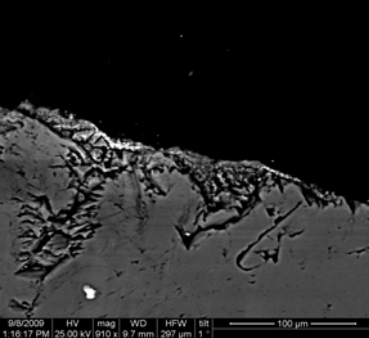
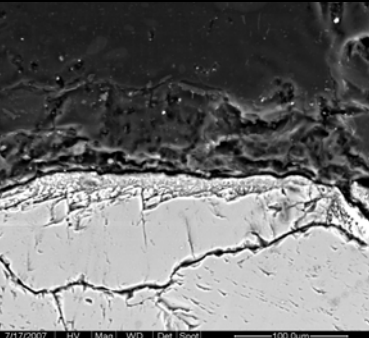
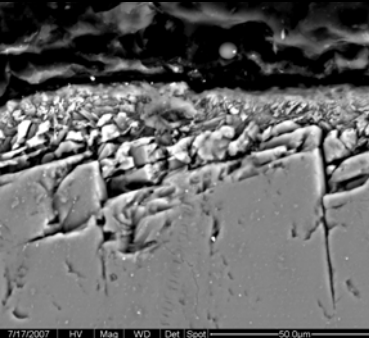
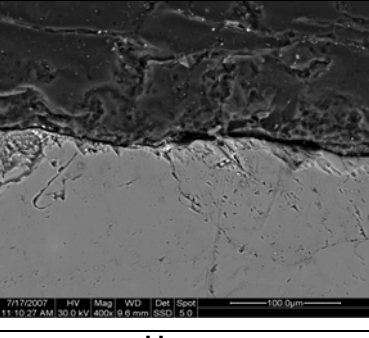
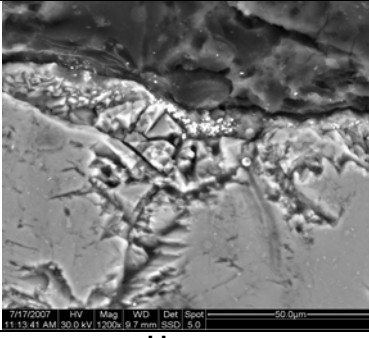
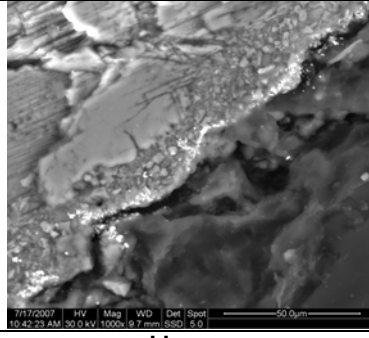
	compo)										
	15 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	***	*	*	-	•	•	-	-	•
	16 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	****	•	*	-	*	•	•	-	•
	17 (Εικόνα kkeera4 compo)	**	***	-	-	-	****	-	-	*	-
	18 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	•	-	*	-	-	-	•	-	-
	19 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	**	-	-	-	-	-	-	-	-
	20 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	-	-	*	-	-	-	•	-	-
	21 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	-
	22 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	***	-	-	-	-	-	-	-	-
	23 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	-
	24 (Εικόνα kkeera4 compo)	****	*	-	*	-	-	-	•	-	-
	25 (Εικόνα kkeera 4 compo)	****	*	-	*	-	-	-	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στην πρόσθια όψη του δείγματος διαπιστώνεται ότι το μέσο συνολικό πάχος της γυψοποιημένης ζώνης είναι 15μm, ενώ βαρύτης ανιχνεύεται στην επιφάνειά της ή στο εσωτερικό της (kkeeraa).

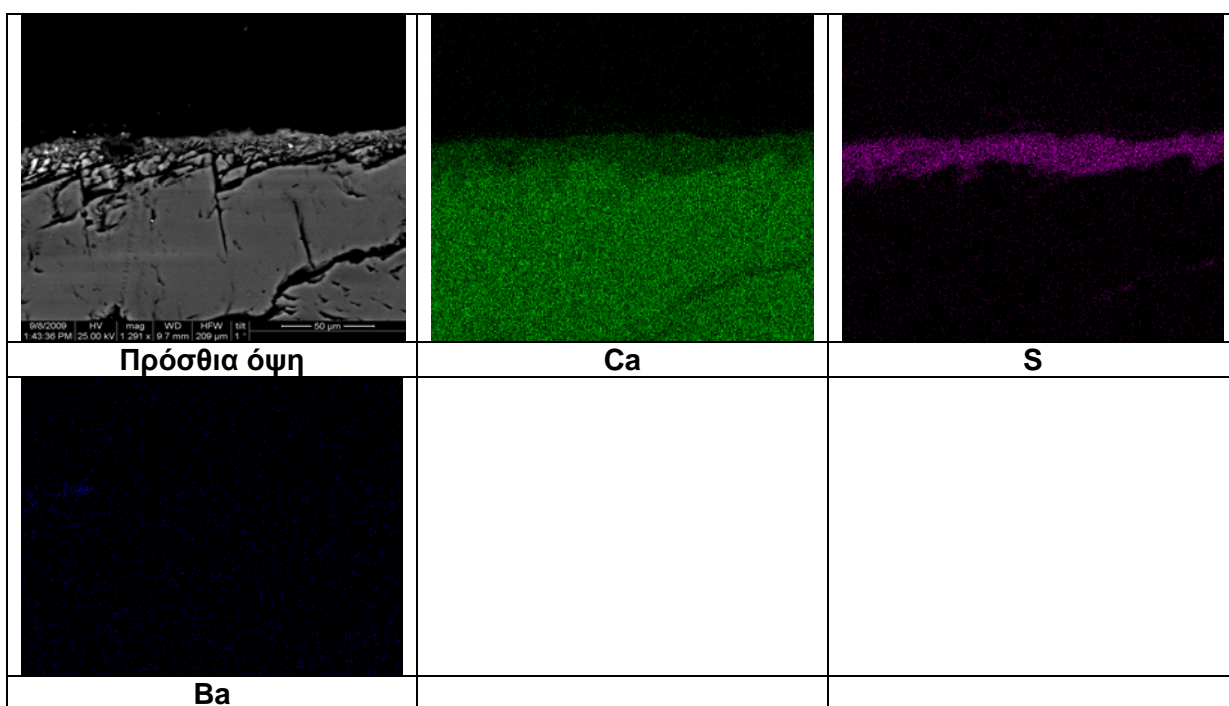
Η πλάγια όψη του δείγματος παρουσιάζει στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 20μm που βρίσκεται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό γυψοποιημένης ζώνης μέσου πάχους 30μm (kkeerak).

3) Περιοχή του δεξιού τμήματος του κιονόκρανου – Δείγμα kkeeg (πρόσθια & 2 πλάγιες όψεις)

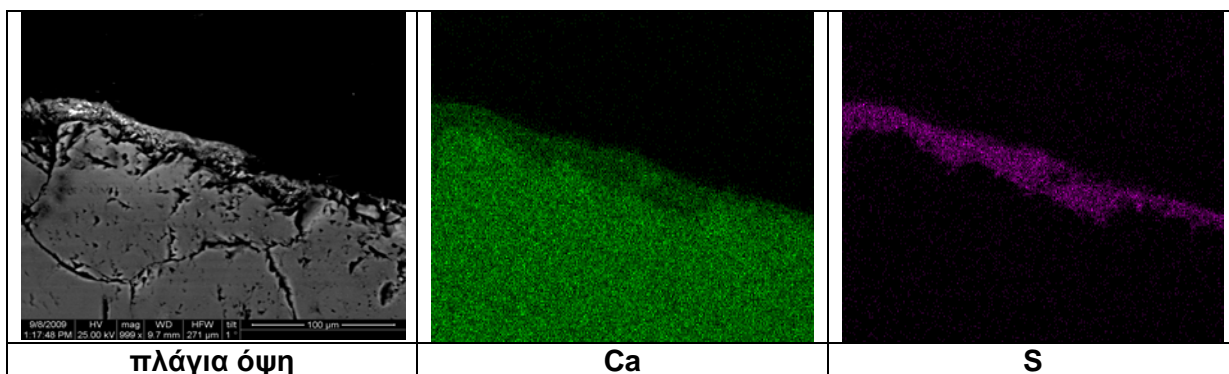
		
Εικόνα kkeego2	Εικόνα kkeego2	Εικόνα kkeego3
		
Εικόνα kkeego4	Εικόνα kkeegg	kkeegg
		
Εικόνα kkeega	Εικόνα kkeegg compo	Εικόνα kkeego
		
Εικόνα kkeegg	kkeega	kkeega
		
kkeegg	kkeegg	kkeego




Στην παρακάτω εικόνα της πρόσθιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.

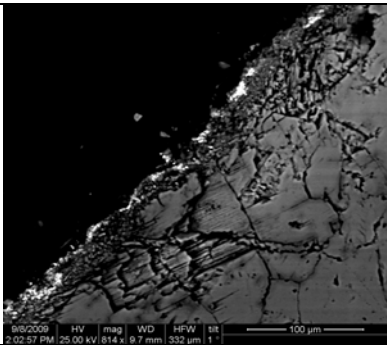
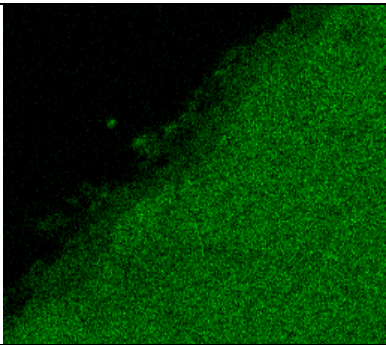
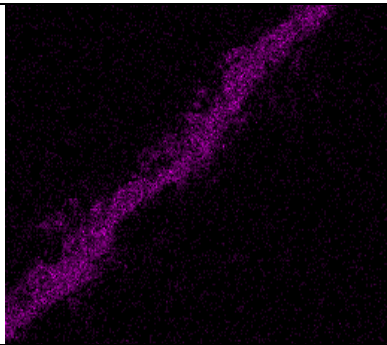
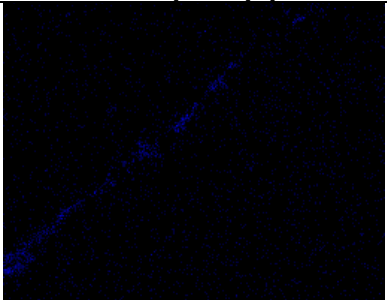


Στην παρακάτω εικόνα της γκρίζας πλάγιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.



		
Ba		

Στην παρακάτω εικόνα της πορτοκαλοκάστανης πλάγιας όψης του δείγματος έχει πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση του των στοιχείων της κρούστας.

		
πλάγια όψη	Ca	S
		
Ba		

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Na	Mg	Ba	Al	K	Br	Cl	Cd	
Κωδικός δείγματος kkeeg	1 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	****	•	*	-	****	-	-	-	•	-	
	2 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	***	•	*	-	-	•	•	-	•	-	
	3 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	***	•	*	-	-	•	•	-	•	-	
	4 (Εικόνα kkeeg3 compo)	•	-	****	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	*	-	*	•	-	-	-	-	-	-	-

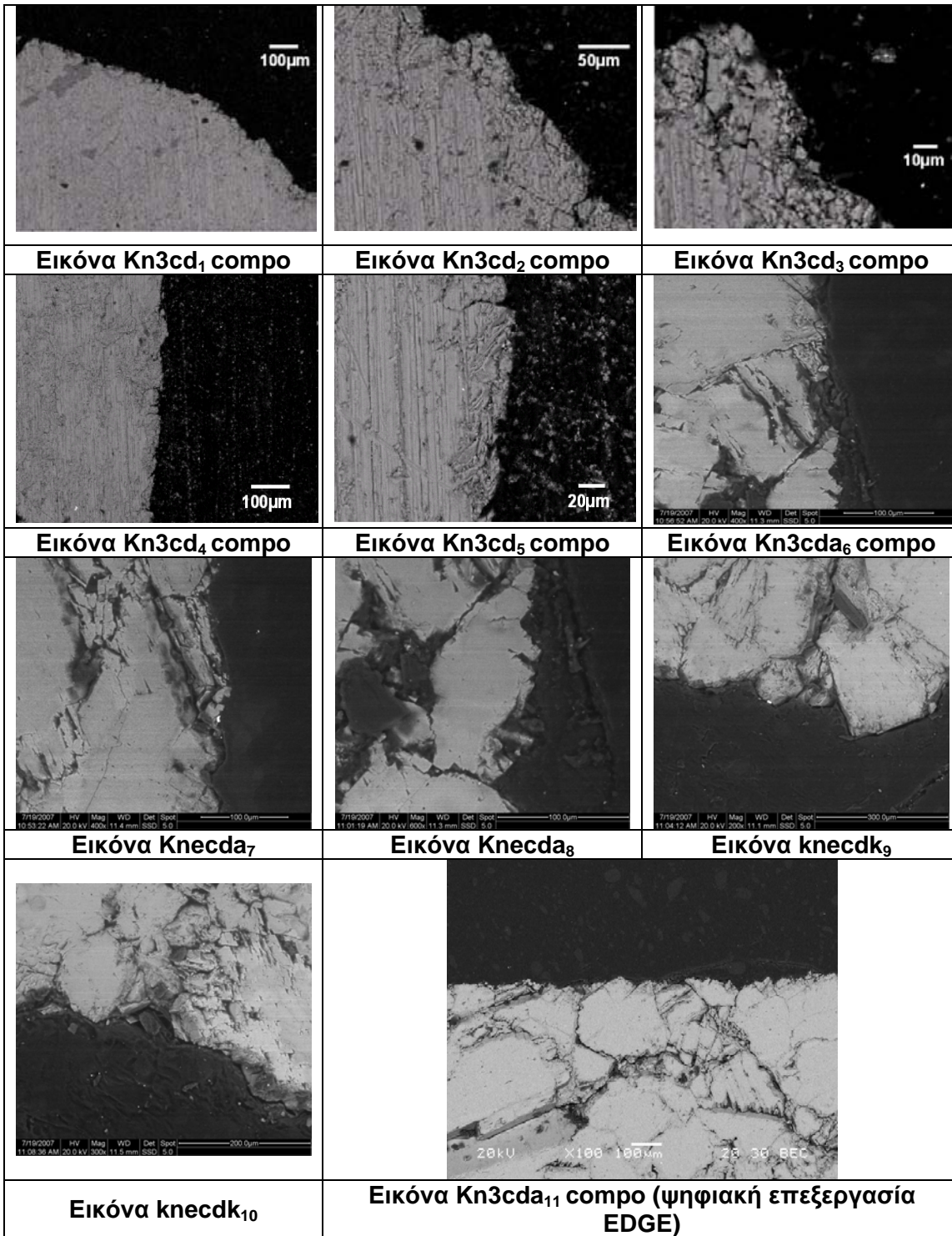
6 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	***	-	•	-	-	-	-	-	•	-
7 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	•	-	-	•	-	-	•	-	-	-
8 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	-	-	-	-	-	-	•	-	-	-
9 (Εικόνα kkeeg2 compo)	****	•	-	-	***	-	-	-	-	•	-
10 (Εικόνα kkeeg3 compo)	****	•	-	*	•	-	-	-	-	-	-
11 (Εικόνα kkeeg4 compo)	****	-	•	*	-	-	-	•	-	-	-
12 (Εικόνα kkeeg4 compo)	****	-	•	*	-	-	-	•	-	-	-
13 (Εικόνα kkeeg4 compo)	****	-	•	*	-	-	-	•	-	-	-
14 (Εικόνα kkeeg1 compo)	****	•	•	*	-	-	-	-	-	-	-
15 (Εικόνα kkeeg4 compo)	****	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-
16 (Εικόνα kkeeg4 compo)	****	-	-	*	-	-	-	•	*	-	-
17 (Εικόνα kkeeg5 compo)	****	-	-	*	-	-	-	•	-	-	-
18 (Εικόνα kkeeg5 compo)	****	•	-	*	*	-	-	-	-	•	-
19 (Εικόνα kkeeg5 compo)	****	•	-	*	•	-	-	-	-	•	-
20 (Εικόνα kkeeg5 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	-	•

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στην πρόσθια όψη του δείγματος δεν υπάρχει βαρύτης, ενώ το μέσο συνολικό πάχος του στρώματος της γυψοποιημένης ζώνης είναι 80μm (kkeega).

Η πλάγια όψη του δείγματος, είτε δεν παρουσιάζει βαρύτη, ή παρουσιάζει κόκκους του ή/και στρώμα του στην επιφάνεια γυψοποιημένης ζώνης μέσου πάχους 20 με 25μm (kkeego, kkeegg).

3) Η περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών του κίονα (βόρειος προσανατολισμός) – Δείγμα Kn3cd



Αποτελέσματα Μικροανάλυσης Ακτίνων Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	Cl	K	Ti
Κn3cd	1 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	•	*	-	•	-
	2 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	•	•	-	*	-	-	-
	3 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	•	•	•	*	•	•	*
	4 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	•	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	-	-	*	-	-
	6 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	-	-	•	-	-
	7 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	•	-	*	-	•
	8 (Εικόνα Κn3cd3 compo)	****	-	-	-	-	*	-	-
	9 (Εικόνα Κn3cd5 compo)	****	-	-	•	•	*	-	-
	10 (Εικόνα Κn3cd5 compo)	****	-	-	•	•	*	-	-
	11 (Εικόνα Κn3cd5 compo)	****	-	-	•	•	*	-	-
	12 (Εικόνα Κn3cd5 compo)	****	-	-	-	•	•	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Εξετάζοντας την επιφάνεια του δείγματος (εικόνες Κn3cd₁- Κn3cd₅, αναλύσεις 1-12) δεν παρουσιάζονται επιφάνειες γυψοποίησης, τουναντίον υπάρχει ασβεστίτης και μόνο σε 2 σημεία στην επιφάνεια υπάρχουν ίχνη S. Βέβαια ο ασβεστίτης εμφανίζεται σχετικά καταπονημένος μιας και παρατηρούνται ρωγμές στην επιφάνεια (εικόνα Κn3cd₂). Αξίζει να αναφερθεί ότι κάποιες αναλύσεις σε κόκκους ασβεστίτη δίνουν ίχνη Na,Cl και Si.

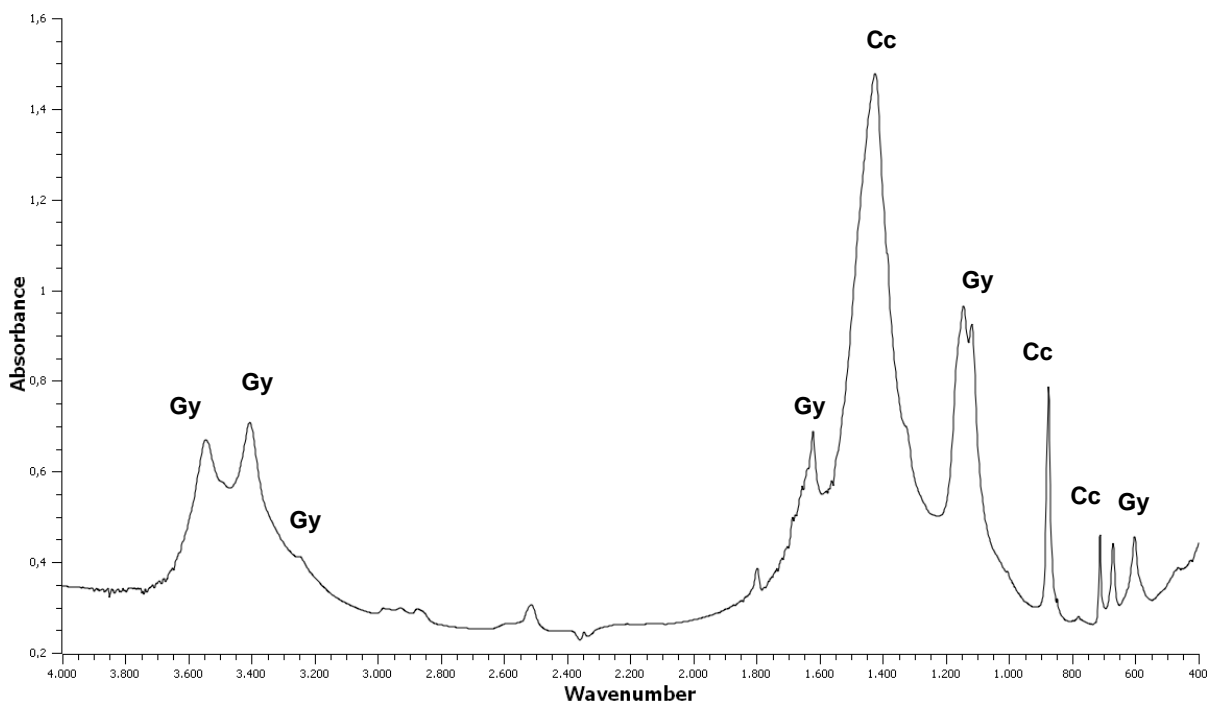
Οι ασβεστιτικοί κόκκοι εμφανίζουν εγκάρσιες ρηγματώσεις και διακλάσεις ακόμα και περιμετρικά των κρυστάλλων ασβεστίτη για αρκετά δεκάδες μικρόμετρα από την εξώτατη στοιβάδα του. Είναι εμφανείς οι κατακερματισμένες απολήξεις των ορίων του κόκκου ασβεστίτη, που υποδεικνύουν την καταπόνηση της εξώτατης στοιβάδας του μαρμάρου από τις διαδοχικές εκπλύσεις της όξινης βροχής. Πρόκειται δηλ. για τυπική περίπτωση της αποπλυμένης επιφάνειας.

6.2.2.4 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier

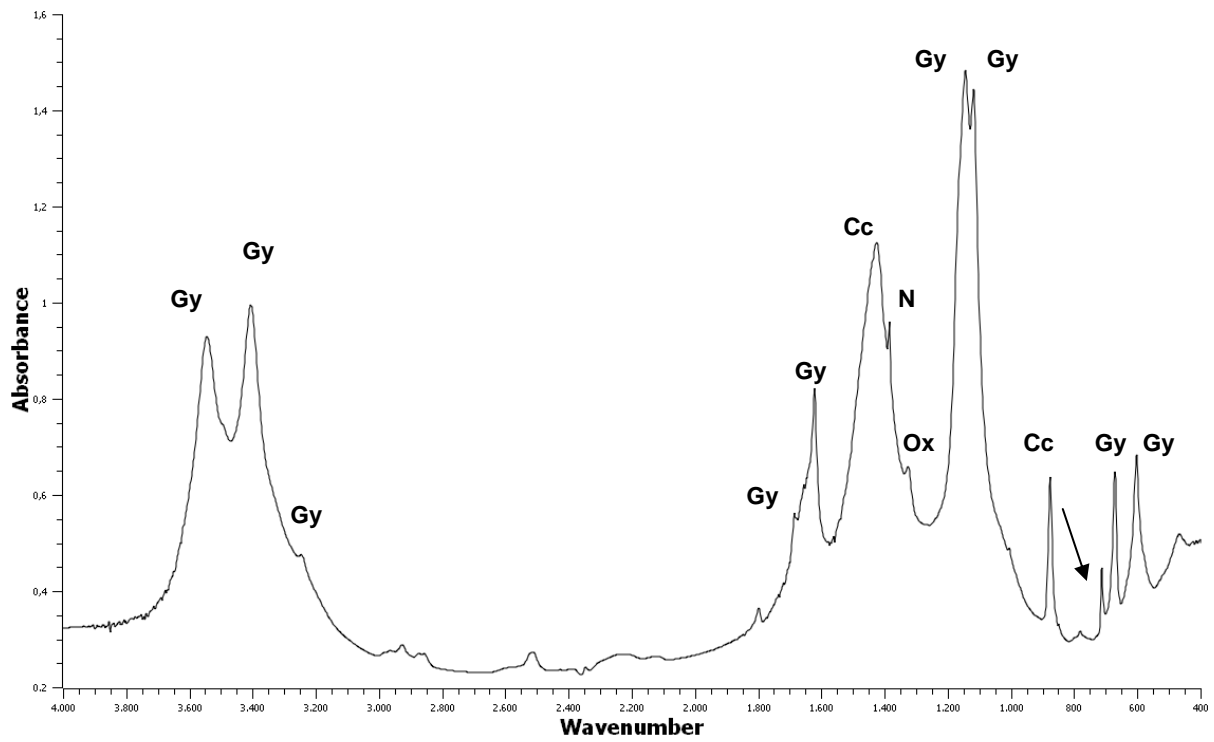
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier που έλαβαν χώρα σε δείγματα σκόνης που ελήφθησαν από τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, στο πλαίσιο της διάγνωσης των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς.

Υπενθυμίζεται δε, ότι τα φάσματα που προέκυψαν είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (η ένταση των φασματικών κορυφών αντιστοιχεί στη συγκέντρωσή τους στο δείγμα - ημιποσοτική ανάλυση), αφού από κάθε δείγμα ζυγίστηκε 1mg και κατόπιν αναμίχθηκε με 200mg KBr για την κατασκευή των προς μέτρηση δισκίων, τα οποία τοποθετήθηκαν σε φούρνο κενού στους 30 με 40°C για 48 ώρες.

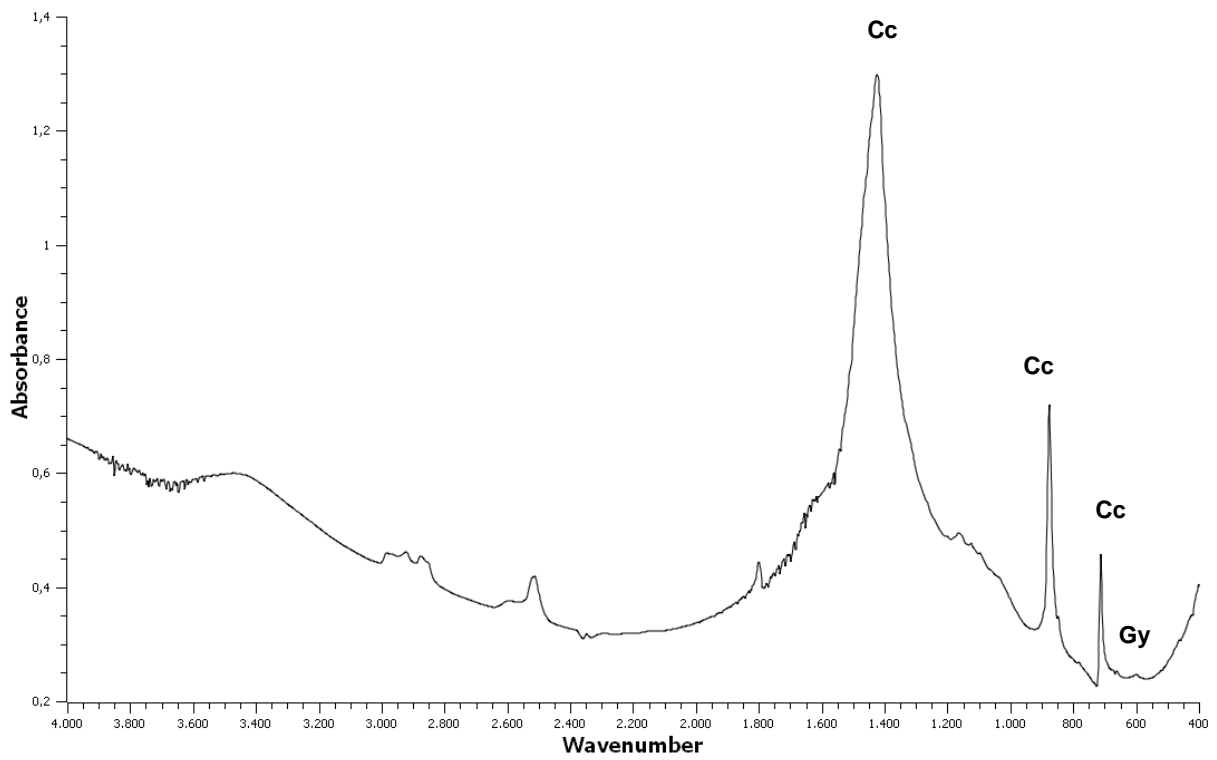
Συνολικά ελήφθησαν 10 δείγματα: 2 δείγματα από την περιοχή του κίονα ανατολικού προσανατολισμού (κωδικοί: kegan ράβδωση και kean αύλακας), 2 δείγματα από την περιοχή του κίονα βόρειου προσανατολισμού (κωδικοί: kngan ράβδωση και knan αύλακας), 2 δείγματα από το κεντρικό τμήμα του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικοί: kked1a πρόσθια όψη και kked1o, πορτοκαλοκάστανη χροιά πλάγια όψη), 2 δείγματα από το δεξί τμήμα του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικοί: kkeega πρόσθια όψη και kkeego πλάγια όψη), καθώς και 2 δείγματα από το αριστερό τμήμα του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικοί: kkeega πορτοκαλοκάστανη χροιά πρόσθια όψη και kkeerak πλάγια όψη).



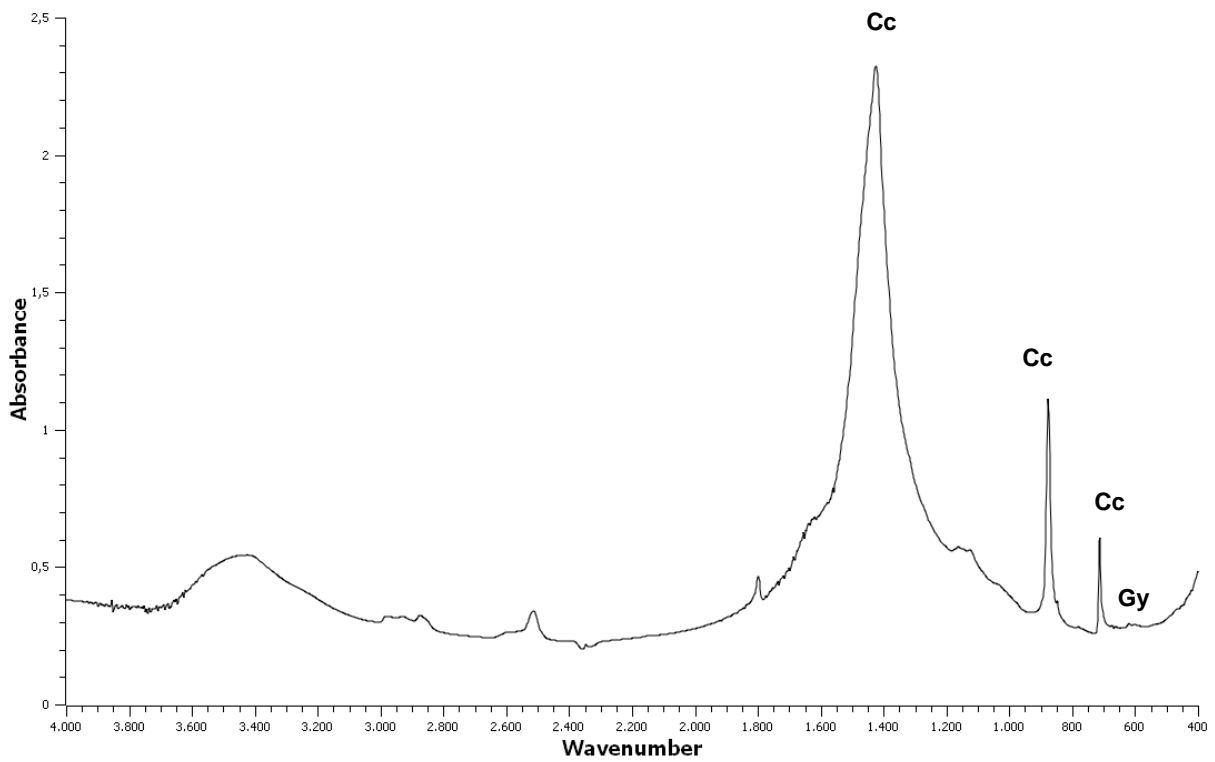
Εικ. 6.2.2.4.1: Φάσμα δείγματος της περιοχής της ράβδωσης του κίονα, ανατολικός προσανατολισμός (κωδικός Keran)



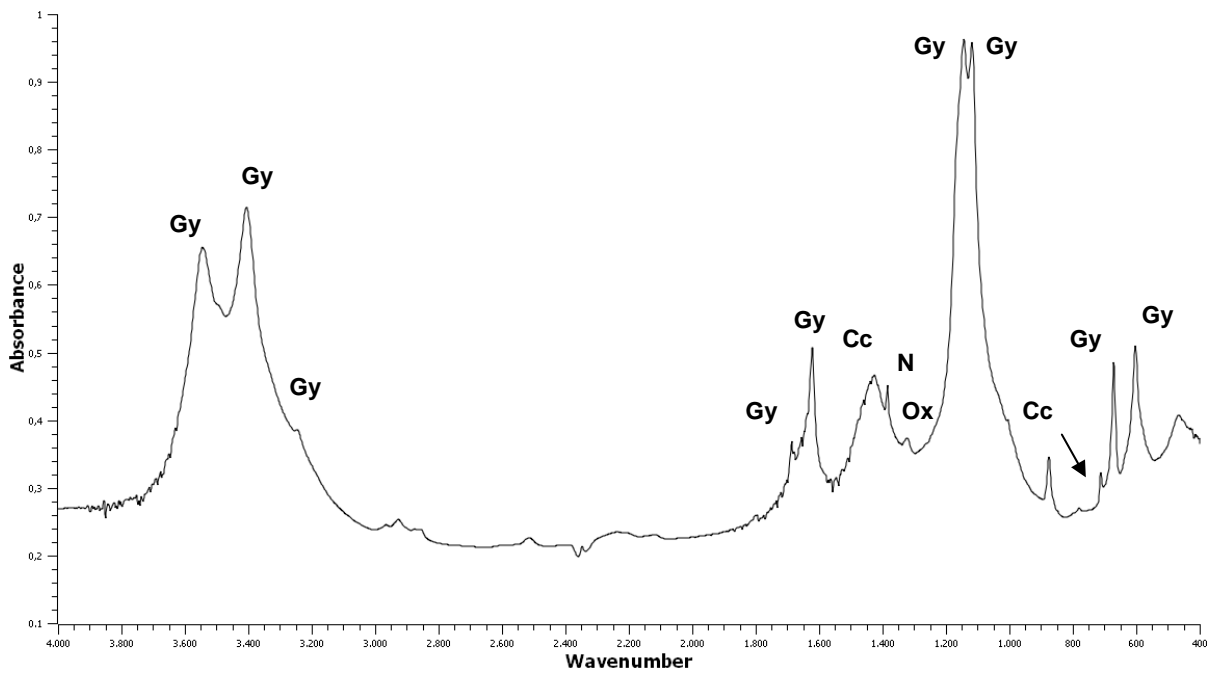
Εικ. 6.2.2.4.2: Φάσμα δείγματος της περιοχής του αύλακα του κίονα, ανατολικός προσανατολισμός (κωδικός Keav)



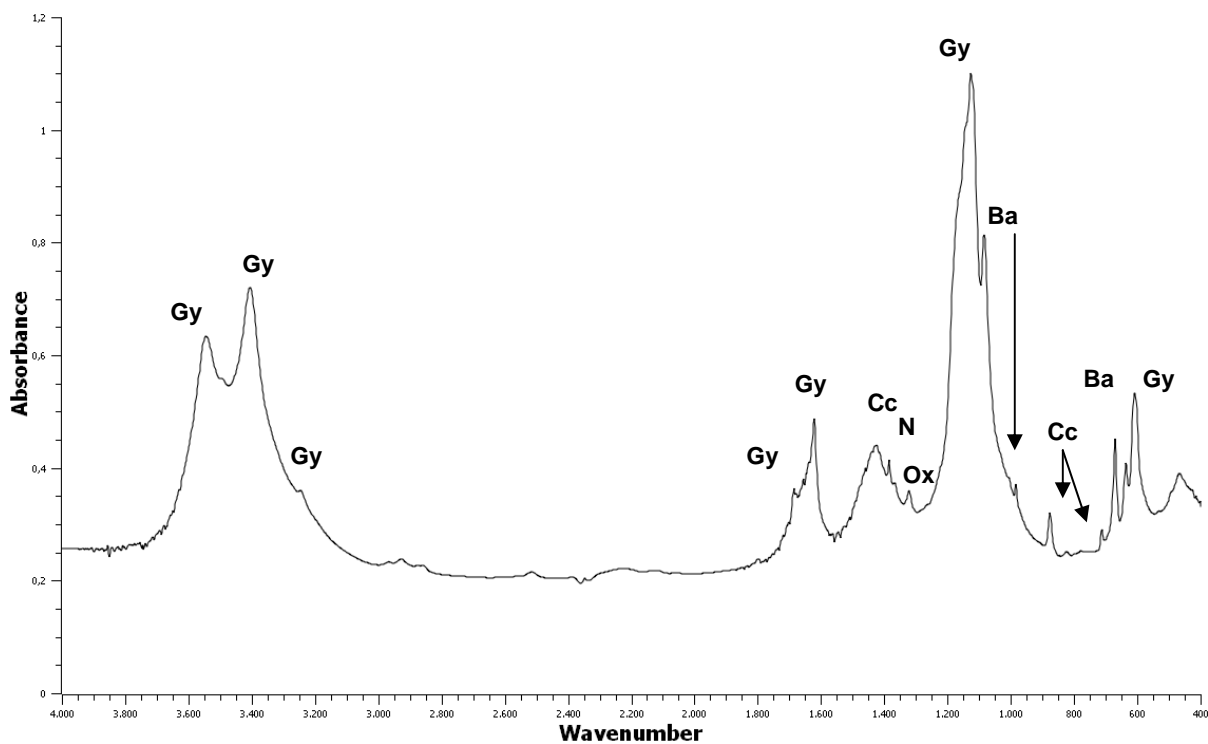
Εικ. 6.2.2.4.3: Φάσμα δείγματος της περιοχής της ράβδωσης του κίονα, βόρειος προσανατολισμός (κωδικός Knav)



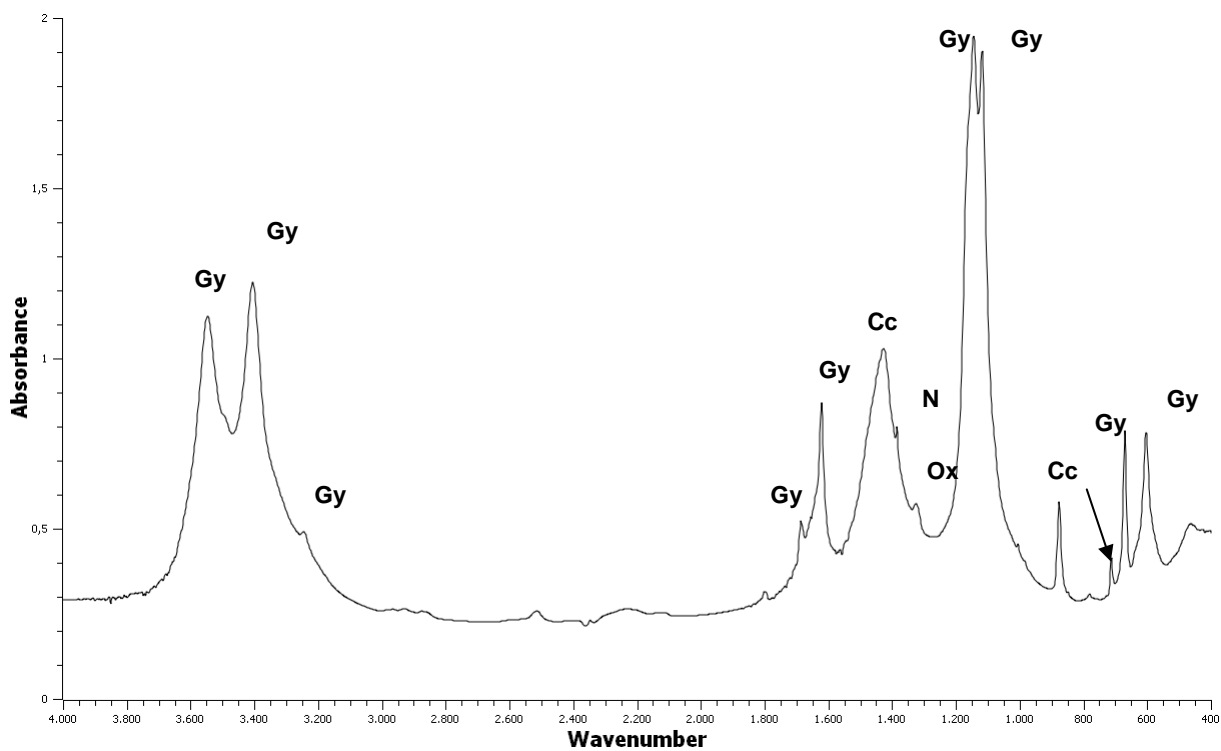
Εικ. 6.2.2.4.4: Φάσμα δείγματος της περιοχής του αλάκα του κίονα, βόρειος προσανατολισμός (κωδικός Knav)



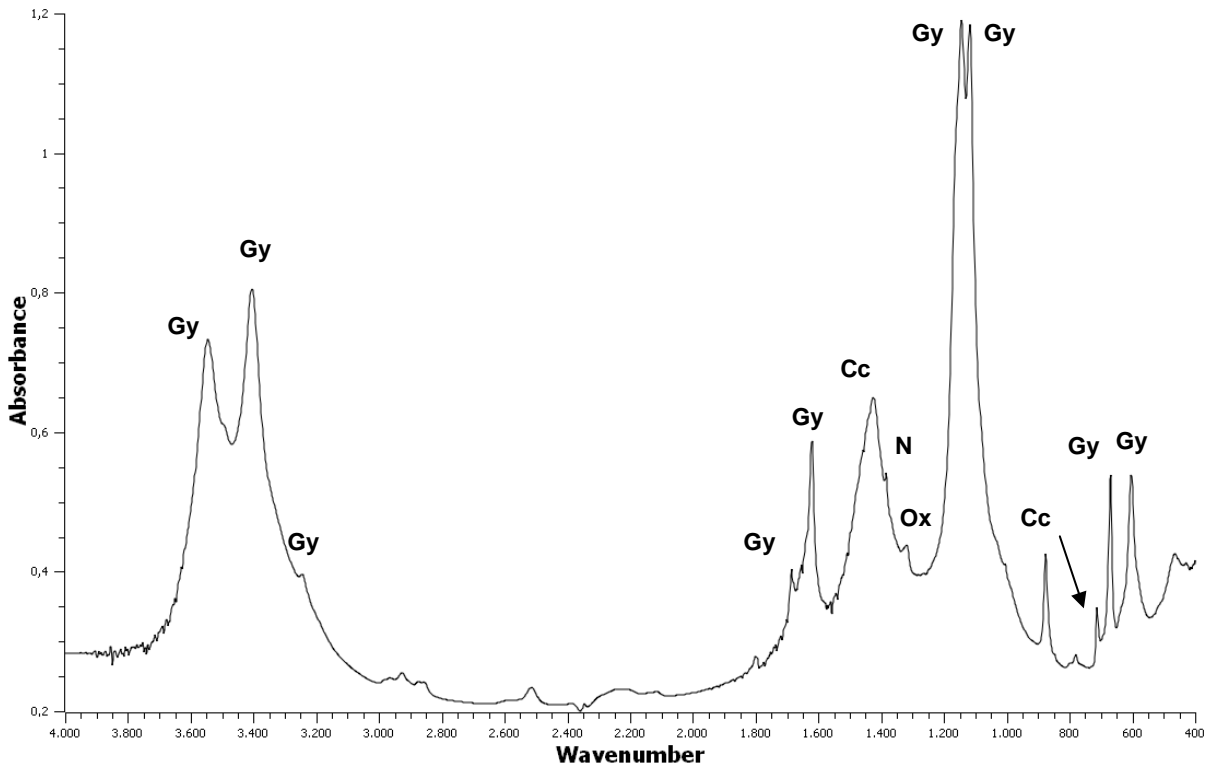
Εικ. 6.2.2.4.5: Φάσμα δείγματος της περιοχής του κεντρικού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kked1a, πρόσθια όψη)



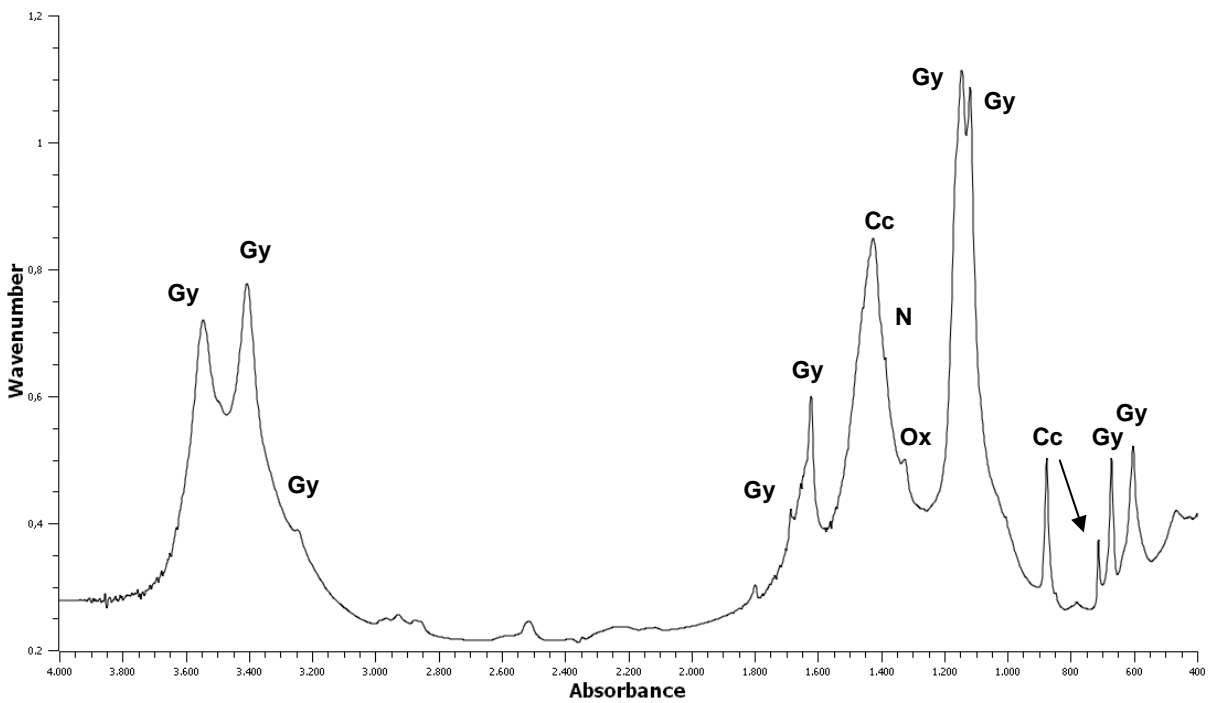
Εικ. 6.2.2.4.6: Φάσμα δείγματος της περιοχής του κεντρικού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kked1ο, πλάγια όψη)



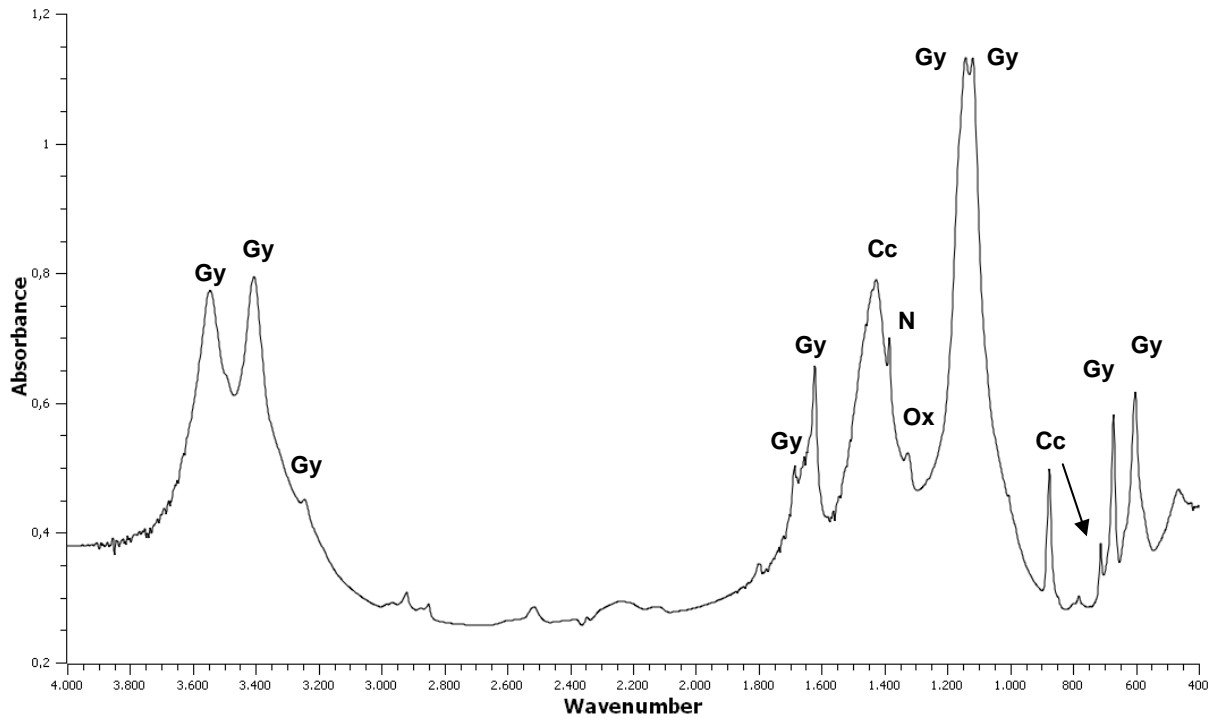
Εικ. 6.2.2.4.7: Φάσμα δείγματος της περιοχής του δεξιού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kkeega, πρόσθια όψη)



Εικ. 6.2.2.4.8: Φάσμα δείγματος της περιοχής του δεξιού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kceego, πλάγια όψη)



Εικ. 6.2.2.4.9: Φάσμα δείγματος της περιοχής του αριστερού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kceeraa, πρόσθια όψη)



Εικ. 6.2.2.4.10: Φάσμα δείγματος της περιοχής του αριστερού τμήματος του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου (κωδικός: kkeerak, πλάγια όψη)

Πίνακας 6.2.2.4: Χαρακτηριστικές συχνότητες των ενώσεων που αναγνωρίζονται στα εξεταζόμενα φάσματα

Ενώσεις	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_9	ν_{11}	ν_{12}	ν_{H_2O}	δ_{H_2O}	Αναφορές
Γύψος, (Gy) $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1006w	492w	1142vs	606s				3548s	1685m	[188]
		413w	1118vs	674s				3408s	1626ms	
								3250s		
Βαρύτης, (Ba) $BaSO_4$	980w	470w	1179vs	637s						[188]
		439w	1120vs	614s						
			1084vs							
Νιτρικό Κάλιο, (N), KNO_3		824w	1385vs							[188]
Οξαλικό Ασβέστιο, (Ox) $CaC_2O_4 \cdot H_2O$					1620s	1316s,sp	782s		1650ms	[190]
Ασβεστίτης, (Cc), $CaCO_3$		877s,sp	1435s,b	712w						[189]

s=σιχωρή, w=ασθενής, m=μέτρια, sp=οξεΐα, b=πλατιά

Όπως διαπιστώνεται από τις παραπάνω μετρήσεις, τα κύρια συστατικά των ληφθέντων δειγμάτων είναι ο γύψος και ο ασβεστίτης. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του κίονα με ανατολικό προσανατολισμό η επιφάνεια της ράβδωσης παρουσιάζει ως κύριο συστατικό τον ασβεστίτη και ως δευτερεύον το γύψο. Αντίθετα στην επιφάνεια του αύλακα κύριο συστατικό

είναι ο γύψος και ο ασβεστίτης παρουσιάζεται σε χαμηλότερη περιεκτικότητα. Σε αυτό το δείγμα δε, είναι εμφανείς οι κορυφές του οξαλικού ασβεστίου και του νιτρικού καλίου.

Στην περιοχή του κίονα με βόρειο προσανατολισμό, επιφάνεια πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής, οι επιφάνειες της ράβδωσης και του αύλακα παρουσιάζουν αντίστοιχα φάσματα με κύριο συστατικό τον ασβεστίτη, καθώς και ίχνη γύψου.

Στην επιφάνεια των ανθεμίων (ανατολικού προσανατολισμού) του κιονόκρανου το σύνολο των φασμάτων παρουσιάζουν ως κύριο συστατικό γύψο, παρουσία ασβεστίτη, οξαλικών και νιτρικών αλάτων. Επιπλέον, στο φάσμα που ελήφθηκε από την πλάγια όψη του κεντρικού τμήματος της εξεταζόμενης επιφάνειας και εμφάνιζε πορτοκαλοκάστανη χροιά (κωδικός kked1o) παρουσιάζονται και χαρακτηριστικές κορυφές του βαρύτη.

Όσον αφορά στις χαρακτηριστικές συχνότητες των ενώσεων που αναγνωρίζονται στα εξεταζόμενα φάσματα (β.λ. και πίνακα 6.2.2.4) συμπεραίνεται ότι:

Ο ασβεστίτης παρουσιάζει D_3 συμμετρία και έχει τρεις ενεργούς τύπους δόνησης. Παρατηρούμε σταθερά στα εξεταζόμενα φάσματα τη συμμετοχή των ανθρακικών ανιόντων του ασβεστίτη, μέσω της παρουσίας μιας κορυφής ισχυρής έντασης και σχετικά ευρείας, $\nu_3 = 1435 \text{ cm}^{-1}$, μιας μέτριας έντασης και οξείας κορυφής $\nu_2 = 876 \text{ cm}^{-1}$, και μιας ασθενούς έντασης και οξείας κορυφής $\nu_4 = 712 \text{ cm}^{-1}$. Η ν_3 είναι η δόνηση τάσης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη, ενώ οι ν_2 and ν_4 είναι οι δονήσεις κάμψης του, [189].

Ο γύψος παρουσιάζει C_2 συμμετρία και τέσσερις ενεργούς τύπους δόνησης. Σε όλα τα εξεταζόμενα φάσματα (εκτός από τα kkgan και knan) παρατηρούμε την παρουσία των θειικών ανιόντων του γύψου μέσω της εμφάνισης δύο κορυφών πολύ ισχυρής έντασης $\nu_3 = 1142 \text{ cm}^{-1}$ και $\nu_3 = 1118 \text{ cm}^{-1}$, καθώς και δύο κορυφών ισχυρής έντασης $\nu_4 = 606 \text{ cm}^{-1}$ και $\nu_4 = 674 \text{ cm}^{-1}$. Οι ν_3 αποτελούν τις δονήσεις τάσης του θειικού ανιόντος του γύψου, ενώ οι ν_4 αποτελούν τις δονήσεις κάμψης του θειικού ανιόντος του γύψου.

Σε γενικές γραμμές το κρυσταλλικό νερό (ή μόρια νερού πλέγματος) απορροφά περί τα $3550\text{-}3200 \text{ cm}^{-1}$ (αντισυμμετρική ν_{as} και συμμετρική ν_s δόνηση τάσης της ομάδας -OH) και περί τα $1600\text{-}2600 \text{ cm}^{-1}$ (δόνηση κάμψης H-OH) [188]. Συνεπώς, σε όλα τα φάσματα που εμφανίζεται ο γύψος παρατηρούνται τρεις κορυφές ισχυρής έντασης που αποδίδονται στην $\nu_{as}(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3548 cm^{-1}], $\nu_s(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3410 cm^{-1}] και $\nu_s(\text{OH})_{\text{κρυστ.}\text{H}_2\text{O}}$ [3250 cm^{-1}] των δύο κρυσταλλικών νερών του γύψου. Παράλληλα, παρατηρούνται μία μεσαία προς ισχυρής έντασης κορυφή στους 1626 cm^{-1} , καθώς και μια μεσαίας έντασης κορυφή στους 1685 cm^{-1} που αποδίδονται στις δονήσεις κάμψης H-OH των δύο κρυσταλλικών νερών του γύψου.

Ο βαρύτης παρουσιάζει C_s συμμετρία και τέσσερις ενεργούς τύπους δόνησης. Στο φάσμα kked1o παρατηρούμε την παρουσία των θειικών ανιόντων του βαρύτη μέσω της εμφάνισης κορυφής πολύ ισχυρής έντασης $\nu_3 = 1084 \text{ cm}^{-1}$, της ασθενούς έντασης κορυφή $\nu_1 = 984 \text{ cm}^{-1}$, καθώς της κορυφής ισχυρής έντασης $\nu_4 = 636 \text{ cm}^{-1}$. Οι ν_3 και ν_1 αποτελούν τις δονήσεις τάσης του θειικού ανιόντος του βαρύτη, ενώ η ν_4 αποτελεί τη δόνηση κάμψης του θειικού ανιόντος του βαρύτη, [188]. Η πολύ ισχυρής έντασης κορυφή $\nu_3 = 1125 \text{ cm}^{-1}$ αποδίδεται στο συγκεκριμένο φάσμα στη δόνηση τάσης ν_3 των θειικών ανιόντων τόσο του γύψου, όσο και του βαρύτη.

Στα φάσματα kkgan και knan η μέτριας έντασης και ευρεία ταινία περί τα 3450 cm^{-1} αποδίδεται στη δόνηση τάσης $\nu(\text{OH})$ του H_2O . Το γεγονός ότι η κορυφή αυτή είναι ευρεία

υποδηλώνει το σχηματισμό δεσμών υδρογόνου αλλά και προσρόφηση υγρασίας και πιθανότατα οφείλεται στην πολύ μικρή ποσότητα γύψου (ίχνη), τα οποία προσδιορίζονται από την πολύ μικρής έντασης κορυφή στα 600 cm^{-1} που υποδηλώνει την παρουσία του θειικού ανιόντος του γύψου (ν_4 δόνηση κάμψης).

Επιπλέον, οι μικρής έντασης κορυφές στα $2930\text{-}2870\text{ cm}^{-1}$ μπορούν να αποδοθούν ως $\nu_{as}(\text{C-H})$ και $\nu_s(\text{C-H})$ των κορεσμένων υδρογονανθράκων, [172].

Η αναγνώριση του νιτρικού καλίου στο σύνολο σχεδόν των δειγμάτων που παρουσιάζουν γύψο, βασίζεται στην παρουσία της ισχυρής έντασης κορυφής στα 1385 cm^{-1} (ν_3 αντισυμμετρική δόνηση τάσης N-O των νιτρικών ανιόντων), [188].

Τέλος, η αναγνώριση του οξαλικού ασβεστίου στο σύνολο σχεδόν των δειγμάτων που παρουσιάζουν γύψο, βασίζεται στην παρουσία της οξείας κορυφής στα 1320 cm^{-1} περίπου (ν_{11} συμμετρική δόνηση τάσης O-C-O), [190].

6.2.2.5 Συμπεράσματα - Χαρακτηρισμός των υλικών και διάγνωση της φθοράς

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της οπτικής μικροσκοπίας, της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ, καθώς και της φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier, εξάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα σε σχέση με το χαρακτηρισμό του υποστρώματος των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, καθώς και για τους παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς:

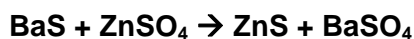
- Το υπόστρωμα των αρχιτεκτονικών επιφανειών χαρακτηρίζεται ως πεντελικό μάρμαρο, συμφωνώντας με τα ιστορικά βιβλιογραφικά δεδομένα του αρχείου του ΕΑΜ.
- Στην ανάγλυφη επιφάνεια του κίονα ανατολικού προσανατολισμού, η οποία προστατεύεται πλήρως από το νερό της βροχής παρουσιάζεται ο χαρακτηριστικός τύπος φθοράς της **φαιόμαυρης κρούστας**. Η κρούστα αυτή εμφανίζει συνεκτική και κοκκώδη επιφανειακή μορφολογία, καθώς και μέσο συνολικό πάχος 35μm από όπου το μέσο πάχος του μικροκρυσταλλικού γύψου είναι στα 20μm. Το υπόλοιπο τμήμα της κρούστας συνίσταται σε αδροκρυσταλλικό γύψο, μαύρες επικαθίσεις και επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Επιπλέον, προκύπτει από τις μετρήσεις FTIR η παρουσία νιτρικών και οξαλικών αλάτων στη θέση του αύλακα της ράβδωσης του κίονα.
- Στην ανάγλυφη επιφάνεια του κίονα βόρειου προσανατολισμού, η οποία είναι πλήρως εκτεθειμένη στο νερό της βροχής παρουσιάζεται ο χαρακτηριστικός τύπος φθοράς των **αποπλυμένων επιφανειών**. Αυτός ο τύπος φθοράς εμφανίζει λεπτόκοκκα στρώματα ασβεστίτη όσον αφορά στη γενική επιφανειακή μορφολογία, καθώς και κατακερματισμένες απολήξεις των ορίων των επιφανειακών κόκκων του ασβεστίτη, που υποδεικνύουν την καταπόνηση της εξώτατης στοιβάδας του μαρμάρου από τις διαδοχικές εκπλύσεις της όξινης βροχής. Επιπλέον, ίχνη γύψου προσδιορίζονται από τις μετρήσεις FTIR.
- Στην ανάγλυφη επιφάνεια των ανθεμίων του κιονόκρανου ανατολικού προσανατολισμού, η οποία προστατεύεται πλήρως από το νερό της βροχής, παρουσιάζεται ο χαρακτηριστικός τύπος φθοράς των **φαιόμαυρων κρουστών**. Οι παρουσιαζόμενες φαιόμαυρες κρούστες στο ανάγλυφο του κιονόκρανου εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία σε σχέση με το πάχος τους, τη διαστρωμάτωσή τους, καθώς και την παρουσία ή μη του βαρύτη που εντοπίζεται σε αυτές, ανάλογα με τη θέση στην ανάγλυφη επιφάνεια (κεντρική, δεξιά ή αριστερά), καθώς και ανάλογα με την όψη του ανάγλυφου πρόσθια ή πλάγια.
- Έτσι καταγράφεται ότι η πρόσθια όψη του κεντρικού τμήματος του ανάγλυφου μπορεί να παρουσιάζει μέσο συνολικό πάχος 130μm από όπου το μέσο πάχος του μικροκρυσταλλικού είναι στα 60μm. Το υπόλοιπο τμήμα της κρούστας συνίσταται σε αδροκρυσταλλικό γύψο, μαύρες επικαθίσεις και επικαθίσεις σωματιδίων σκόνης. Επιπλέον, ανάμεσα στον αδροκρυσταλλικό και μικροκρυσταλλικό γύψο εντοπίζεται στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 10μm. Σε έτερο δείγμα της πρόσθιας όψης του κεντρικού τμήματος του ανάγλυφου το συνολικό πάχος της κρούστας κυμαίνεται στα 35 περίπου μm και συνίσταται μόνο από μικροκρυσταλλικό γύψο που στην επιφάνεια του βρίσκεται στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 5μm. Στην πρόσθια όψη του αριστερού τμήματος του κιονόκρανου διαπιστώνεται ότι το μέσο συνολικό πάχος της γυψοποιημένης ζώνης είναι

15μm, ενώ βαρύτης ανιχνεύεται στην επιφάνειά της ή στο εσωτερικό της. Στην πρόσθια όψη του δεξιού τμήματος του κιονόκρανου δεν υπάρχει βαρύτης ενώ το μέσο συνολικό πάχος του στρώματος της γυψοποιημένης ζώνης είναι 80μm.

- Αντίστοιχη ποικιλομορφία παρουσιάζει και η πλάγια όψη του ανάγλυφου του κιονόκρανου. Πιο συγκεκριμένα στο κεντρικό τμήμα παρουσιάζονται 3 διαφορετικές περιπτώσεις: (1) συνολικό πάχος κρούστας 100μm όπου το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου είναι 20μm και στρώμα βαρύτη βρίσκεται ανάμεσα στον μάκρο και μικροκρυσταλλικό γύψο με μέσο πάχος 3μm, (2) μέσο συνολικό πάχος κρούστας 30μm ή 50μm συνολικά αποτελούμενο από μικροκρυσταλλικό ασβεστίτη και στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 15μm που βρίσκεται κάτω από το στρώμα του γύψου ή στο εσωτερικό του ή στην επιφάνειά του, (3) μέσο συνολικό πάχος κρούστας 50μm, όπου δεν υπάρχει βαρύτης
- Η πλάγια όψη του αριστερού τμήματος του κιονόκρανου παρουσιάζει στρώμα βαρύτη μέσου πάχους 20μm που βρίσκεται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό γυψοποιημένης ζώνης μέσου πάχους 30μm.
- Η πλάγια όψη του δεξιού τμήματος του κιονόκρανου είτε δεν παρουσιάζει βαρύτη, ή παρουσιάζει κόκκους του ή/και στρώμα του στην επιφάνεια γυψοποιημένης ζώνης μέσου πάχους 20 με 25μm.
- Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι προκύπτει από τις μετρήσεις FTIR η παρουσία οξαλικών και νιτρικών αλάτων.

Δύο είναι τα πιθανά σενάρια για την προέλευση του στρώματος βαρύτη που ανιχνεύονται στις φαιόμαυρες κρούστες της ανάγλυφης επιφάνειας του κιονόκρανου.

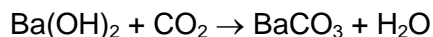
Το πρώτο σενάριο προέλευσης του βαρύτη είναι να πρόκειται για παλαιότερη τοποθέτηση της *λευκής χρωστικής «λιθοπόνιο»*, η οποία συνίσταται σε ZnS (28%) & BaSO₄ (72%), η ευρεία χρήση της οποίας χαρακτηρίζει το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, περίοδο κατασκευής του Μουσείου. Η λευκή χρωστική του λιθοπονίου παρασκευάζεται βάση της παρακάτω «διπλής αποσύνθεσης» χημική αντίδραση:



Γενικότερα, η χρήση του Θεικού Βαρίου ως συνδετικού υλικού στην παρασκευή διαφόρων χρωστικών χρονολογείται από το 1810 με 1820 και αυτό λόγω της αφθονίας του στη φύση αλλά και της μεγάλης του χημικής αδράνειας και σταθερότητας. Πρόκειται για ένωση αδιάλυτη στο νερό (η διαλυτότητά του είναι μικρότερη από 0.5g/l) και με μικρό γινόμενο διαλυτότητας (1.5×10^{-9}). Δυστυχώς η ιστορική τεκμηρίωση της τοποθέτησης αυτής της χρωστικής (πιθανό σενάριο: στρώμα προετοιμασίας για τοποθέτηση χρωστικών απομίμησης χρυσού, όπως αζωικών ενώσεων –που ανεπτύχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα την ίδια περίοδο με το λιθοπόνιο- από όπου παράγονταν χρωστικές κίτρινες και πορτοκαλόχρες, ιδιαίτερα σταθερές στην ηλιακή ακτινοβολία), δε κατέστη δυνατή, αφού δεν αναφέρεται πουθενά στα αρχεία του Μουσείου ή του ΥΠΠΟ.

Ένα άλλο πιθανό σενάριο (εκτός από αυτό του λιθοπονίου), που θα μπορούσε να ίσχυε, είναι αυτό της τοποθέτησης υδροξειδίου του βαρίου μαζί με ουρία και γλυκερίνη σαν προστατευτικό υλικό στις μαρμάρινες επιφάνειες, το οποίο μάλιστα πολλές φορές προκαλούσε χρωματικές διαφοροποιήσεις στις κατεργασμένες επιφάνειες λόγω του λευκού χρώματος των αλάτων του βαρίου. Η ενανθράκωση του υδροξειδίου του βαρίου για την

προστασία του λίθου ελάμβανε χώρα από το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



ενώ οι λόγοι προσθήκης της ουρίας και της γλυκερίνης ήταν: η πρώτη για την καλύτερη διείσδυση του υδροξειδίου στον προς κατεργασία λίθο, τη ρύθμιση του pH, και ως πηγή διοξειδίου του άνθρακα που θα υποβοηθούσε το σχηματισμό του ανθρακικού βαρίου στο εσωτερικό του λίθου και η δεύτερη για την παρεμπόδιση σχηματισμού κρυστάλλων υδροξειδίου του βαρίου στο προς εφαρμογή διάλυμα.

Επίσης, σαν υλικό προστασίας στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί και διάλυμα αιθυλοθειικού βαρίου σε περίσσεια υδροξειδίου του βαρίου (για την εξουδετέρωση του θειικού οξέος που σχηματίζεται), με σκοπό την καταβύθιση θειικού βαρίου σε διαβρωμένους λίθους, άλλη μία πιθανή περίπτωση λόγου ανίχνευσης θειικού βαρίου στις εξεταζόμενες επιφάνειες.

Σε κάθε περίπτωση το BaSO_4 , είτε πρόκειται για υπόστρωμα χρωματικής διακόσμησης, ή προϊόν φθοράς υλικού συντήρησης για την στερέωση των ασβεστιτικών κόκκων, πρόκειται για ένα στρώμα σκόπιμα τοποθετημένο στη μαρμάρινη επιφάνεια, το οποίο όμως δεν είναι πλέον ομοιογενές, συνεκτικό και συνεχές, έτσι ώστε να δρα προστατευτικά για αυτήν, όπως συμβαίνει με τις πλάκες του οξαλικού ασβεστίου, του υδροξυαπατίτη, πυριτικών υλικών κ.ά., οι οποίες συχνά βρίσκονται σε μνημεία της Αθήνας, της Βενετίας, και άλλων πόλεων της Ευρώπης.

Πιθανότατα, οι ασύμβατες επεμβάσεις καθαρισμού με σύστημα υδροβολής διαλύματος καυστικού καλίου σε συνθήκες υψηλής πίεσης, και θερμοκρασίας στα τέλη της δεκαετίας του 90, σε συνδυασμό με το έντονα ρυπασμένο αστικό περιβάλλον του κέντρου της Αθήνας, συνέβαλλαν καθοριστικά στο γεγονός του ότι σήμερα πρόκειται για στρώμα ανομοιογενές σε σχέση με το πάχος, τη συνέχεια, τη θέση και τη συνοχή του.

Αν όμως, θεωρήσουμε επικρατέστερο σενάριο για την παρουσία του BaSO_4 την άποψη της χρήσης του λιθοπονίου ως υπόστρωμα χρωματικής διακόσμησης, τότε πρόκειται για ένα στρώμα ιδιαίτερης ιστορικής σημασίας, καθώς αποτελεί σαφή ένδειξη για το ότι στα τέλη του 19^{ου} αιώνα τα κιονόκρανα του πρόπυλου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου ήταν επιζωγραφισμένα. Οι ενδείξεις αυτές επιβεβαιώνονται μετά από εξέταση δείγματος επιζωγραφισμένου μαρμάρινου κιονόκρανου του χώρου υποδοχής του ΕΑΜ. Στις μετρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης που ενδεικτικά παρουσιάζονται πιο κάτω είναι εμφανής η παρουσία λιθοπονίου αφού ανιχνεύεται και ο ψευδραργυρος.

Συνεπώς, το στρώμα του BaSO_4 πρέπει να χαρακτηριστεί ως πλάκινα και πρέπει να διατηρείται μετά την προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού έστω και στην ανομοιογενή κατάσταση με την οποία υπάρχει πλέον.

<p>1^η χαρτογράφηση στοιχείων στο δείγμα χρυσής διακοσμητικής επίστρωσης από κίονα του χώρου υποδοχής του EAM</p>	<p>Ca</p>	<p>S</p>
<p>Ba</p>	<p>Zn</p>	<p>Na</p>
<p>2^η χαρτογράφηση στοιχείων στο δείγμα χρυσής διακοσμητικής επίστρωσης από κίονα του χώρου υποδοχής του EAM</p>	<p>Ca</p>	<p>S</p>
<p>Ba</p>	<p>Zn</p>	<p>Na</p>

Βάσει αυτών των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς, έλαβε χώρα επιλογή εκλεκτικών επεμβάσεων καθαρισμού όσον αφορά στην απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων ή/και των γυψοποιημένων ζωνών (β.λ. κεφ. 1.3). Αυτές οι επεμβάσεις καθαρισμού παρουσιάζονται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

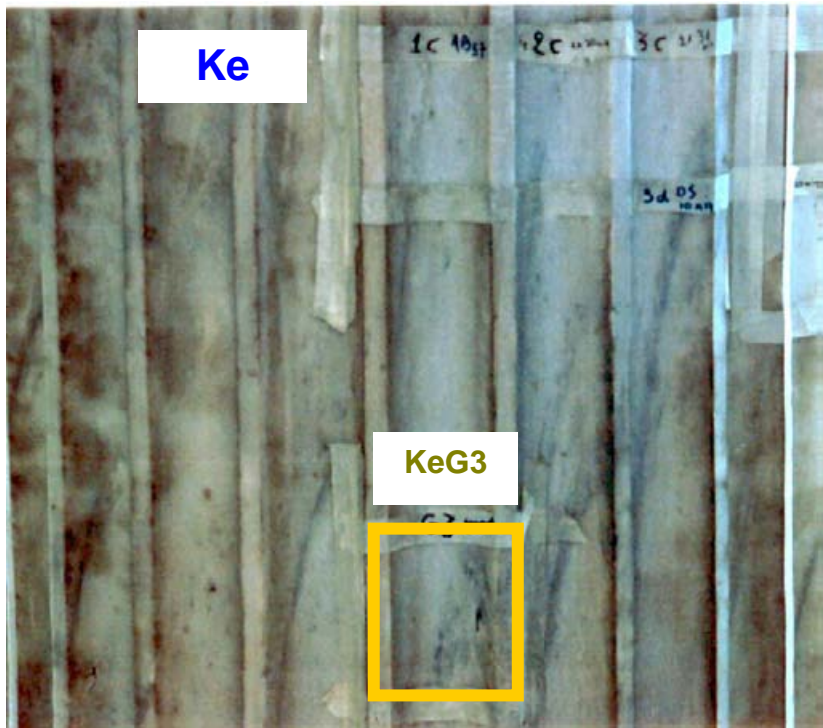
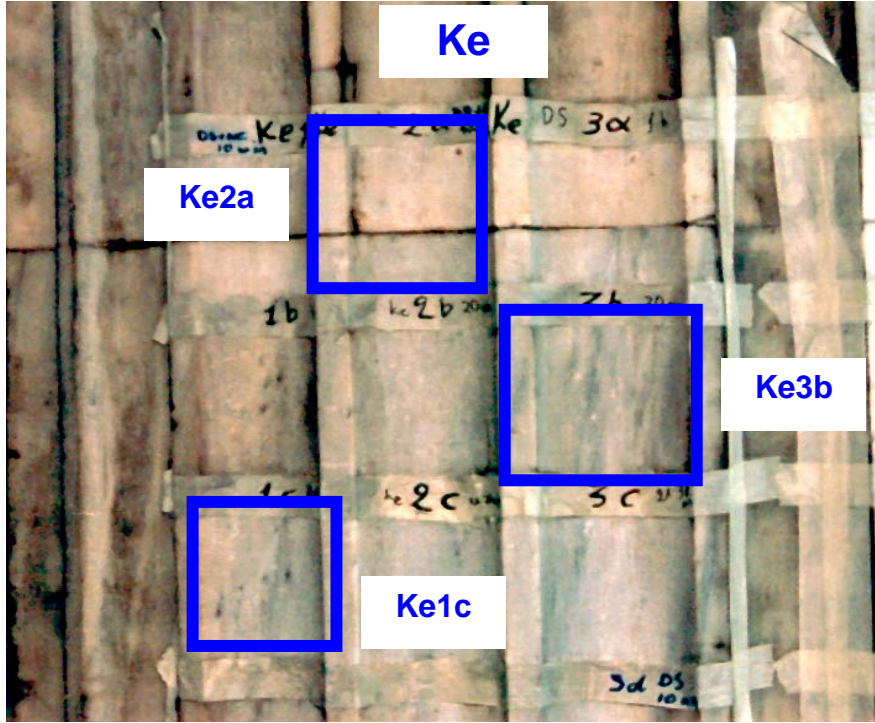
6.3 Ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου – Πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού - Δειγματοληψία

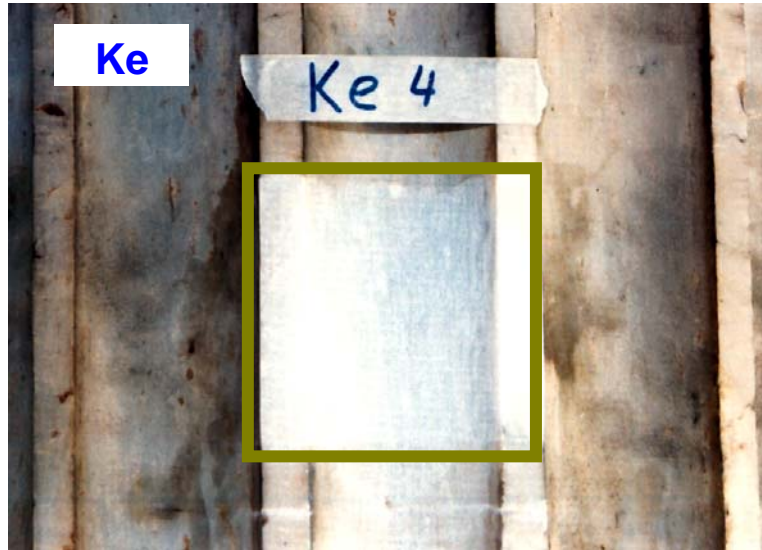
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι επιφάνειες στις οποίες έλαβαν χώρα οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Περιγράφονται οι μέθοδοι και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μία από αυτές.

Επιφάνεια Εφαρμογής Φαιόμαυρης Κρούστας Κίονα - Ke

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (cm ²)	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ			ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ		ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ			
			(min)		ΗΜΕΡΕΣ	ml	ml/cm ²	1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ		2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
			1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ				ml	ml/cm ²	ml	ml/cm ²
			ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ke								
Ke 1c	160	AB 57	5	-	-	40	0,25	50	0,312	-	-
Ke 2a	160	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	40	-	-	50	0,312	60	0,375	-	-
Ke 3b	160	DS*	30	-	-	60	0,375	30	0,187	-	-
Ke 4	180	Βιολογικό Επίθεμα	-	-	18	65	0,361	270	1,5	-	-
KeG3	216	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟ-ΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	ΠΙΕΣΗ ΒΟΛΗΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΟΣ (bar)	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ (CaCO ₃) ΠΡΟΣ ΝΕΡΟ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (μm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (mm)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (cm)	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΔΟ ΑΝΑΜΙΞΕΩΣ (m)			
			0.5	1/3	80	12	50	8.35			

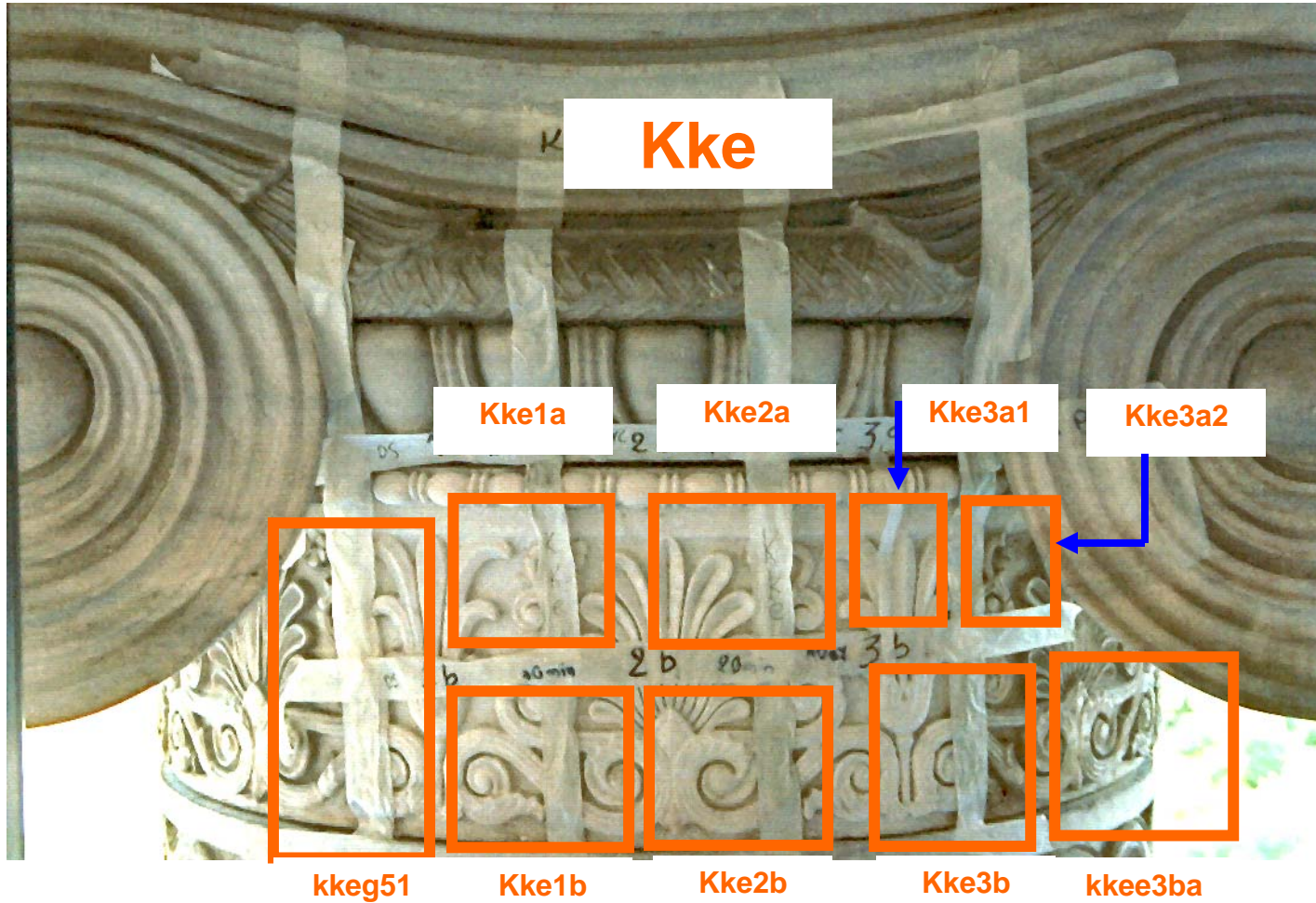
*DS: ιοντοανταλλακτική ρητίνη





Επιφάνεια Εφαρμογής Φαιόμαυρης Κρούστας Κιονοκράνου - Κκε

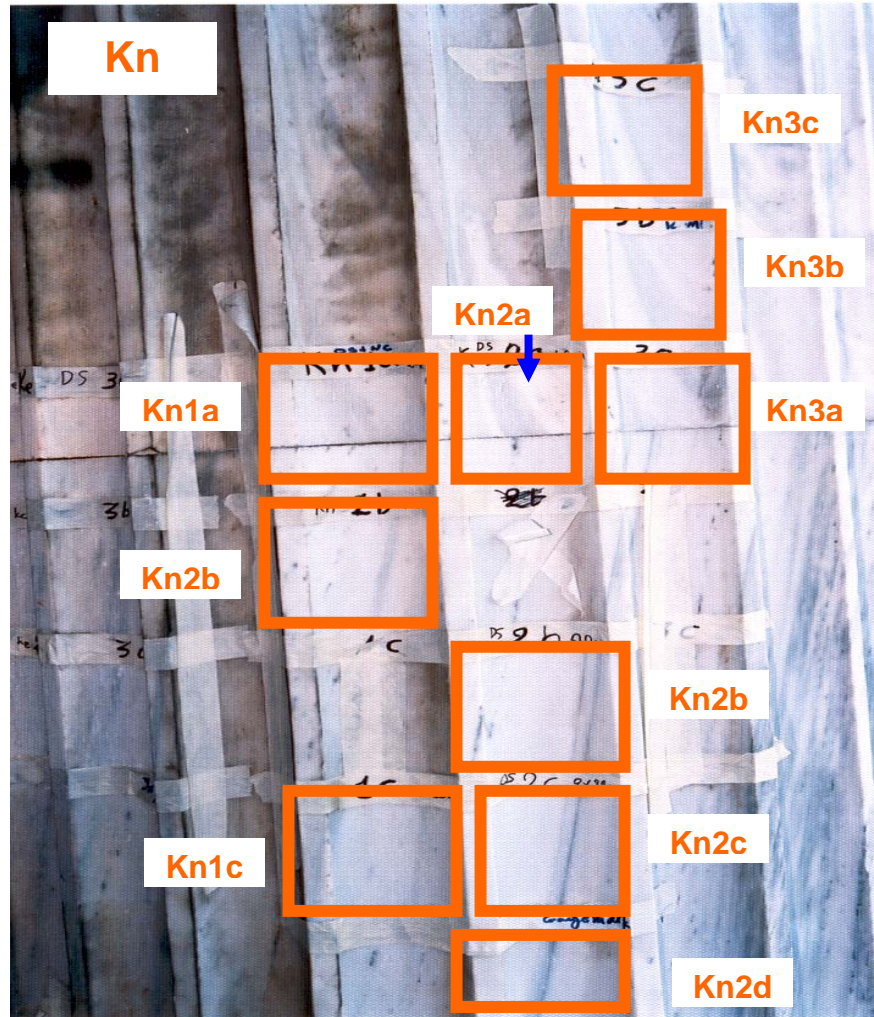
ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (cm ²)	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ			ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ		ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ			
			(min)		ΗΜΕΡΕΣ	(ml)	(ml/cm ²)	1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ		2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
			1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ				(ml)	(ml/cm ²)	(ml)	(ml/cm ²)
			ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Κκε								
Kke 1a	144	DS* ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑ ΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ	60	-	-	50	0,347	70	0,486	-	-
Kke 1b	144	DS*	30	-	-	50	0,347	110	0,763	-	-
Kke 2a	144	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	40	-	-	50	0,347	80	0,555	-	-
Kke 2b	144	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	20	-	-	50	0,347	70	0,486	-	-
Kke 3a1**	55	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	10	-	-	40	0,727	40	0,727	-	-
Kke 3a2**	50	DS*	10	-	-	40	0,8	40	0,8	-	-
Kkee3ba	144	DS*	20	-	-	40	0,8	40	0,8	-	-
Kke 3b	144	AB 57	5	15	-	60	0,416	140	0,972	150	1,041
Kkeeg51	330	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟ- ΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	ΠΙΕΣΗ ΒΟΛΗΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΟΣ (bar)	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ (CaCO₃) ΠΡΟΣ ΝΕΡΟ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (μm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (mm)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (cm)	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΔΟ ΑΝΑΜΙΞΕΩΣ (m)			
			0.5	1/3	80	12	40	10.90			



Επιφάνεια Εφαρμογής Αποπλυμένων επιφανειών Κίονα - Κη

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (cm ²)	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)		ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ		ΝΕΡΟ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ			
			1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	(ml)	(ml/cm ²)	1 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ		2 ^η ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
							(ml)	(ml/cm ²)	(ml)	(ml/cm ²)
Κη 1a	160	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	20	-	40	0,25	50	0,312	-	-
Κη 1b	160	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	10	-	40	0,25	50	0,312	-	-
Κη 1c	160	DS* & 10% (NH ₄) ₂ CO ₃	10	10	40	0,25	50	0,312	60	0,375
Κη 2a	160	DS*	40	-	40	0,25	40	0,25	-	-
Κη 2b	160	DS*	20	-	40	0,25	40	0,25	-	-
Κη 2c	160	DS*	20	20	40	0,25	40	0,25	40	0,25
Κη 3b	160	DS*	10	-	20	0,125	50	0,312	-	-
Κη 3c	160	AB 57	5	-	20	0,125	70	0,437	-	-
Κη2 d	160	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟ-ΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	ΠΙΕΣΗ ΒΟΛΗΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΟΣ (bar)	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ (CaCO ₃) ΠΡΟΣ ΝΕΡΟ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (μm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (mm)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (cm)	ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΠΟ ΚΑΔΟ ΑΝΑΜΙΞΕΩΣ (m)		
			0.5	1/3	80	12	50	8.45		

*DS: ιοντοανταλλακτική ρητίνη



6.3 Δειγματοληψία

1) Επιφάνεια Ke

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Ke	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	Ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Ke2a	στερεό
	Ke1c	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Ke1c	στερεό
	keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	keG3	στερεό
	Ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Ke3b	στερεό
	Ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Ke4	στερεό

2) Επιφάνεια Κκε

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Κκε	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	Kke3a1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke3a1a, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke3a1k, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke2ba1, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke2bk, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke2aa, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke2ak, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke3a2	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke3a2a, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke3a2k, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kkee3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, <u>ΔΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kkee3ba, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kkee3bk, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke1b, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke1bk, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke1aa, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke1ak, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kke3b, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kke3bk, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό
	Kkeeg51	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	Kkeeg51a, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , Kkeeg51k, <u>ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ</u> ,	στερεό

3) Επιφάνεια Κη

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Κη	ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ
	Kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn1b	στερεό
	Kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn1a	στερεό
	Kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn1c	στερεό
	Kn3ca	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn3ca	στερεό
	Kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn2d	στερεό
	Kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn3b	στερεό
	Kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn2b	στερεό
	Kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn2a	στερεό
	Kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	Kn2c	στερεό

6.4 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

6.4.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Στο πλαίσιο της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, στις περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών όπου είναι προστατευμένες από το νερό της βροχής (ανατολικός προσανατολισμός). Μελετάται κυρίως η υφή των κόκκων του πεντελικού μαρμάρου, η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των τύπων φθοράς, καθώς και η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των επεμβάσεων καθαρισμού. Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.



πάστα AB57 5min, ράβδωση, x50



πάστα AB57 5min, αλάκας, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 40min, ράβδωση, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 40min, αλάκας, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 30min, ράβδωση, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 30min, αλάκας, x25



βιολογικό επίθεμα 18 ημέρες, ράβδωση, x25



βιολογικό επίθεμα 18 ημέρες, αλάκας, x25



υγρή μικροφηγηματοβολή, ράβδωση, x25



υγρή μικροψηγματοβολή,
αύλακας, x25

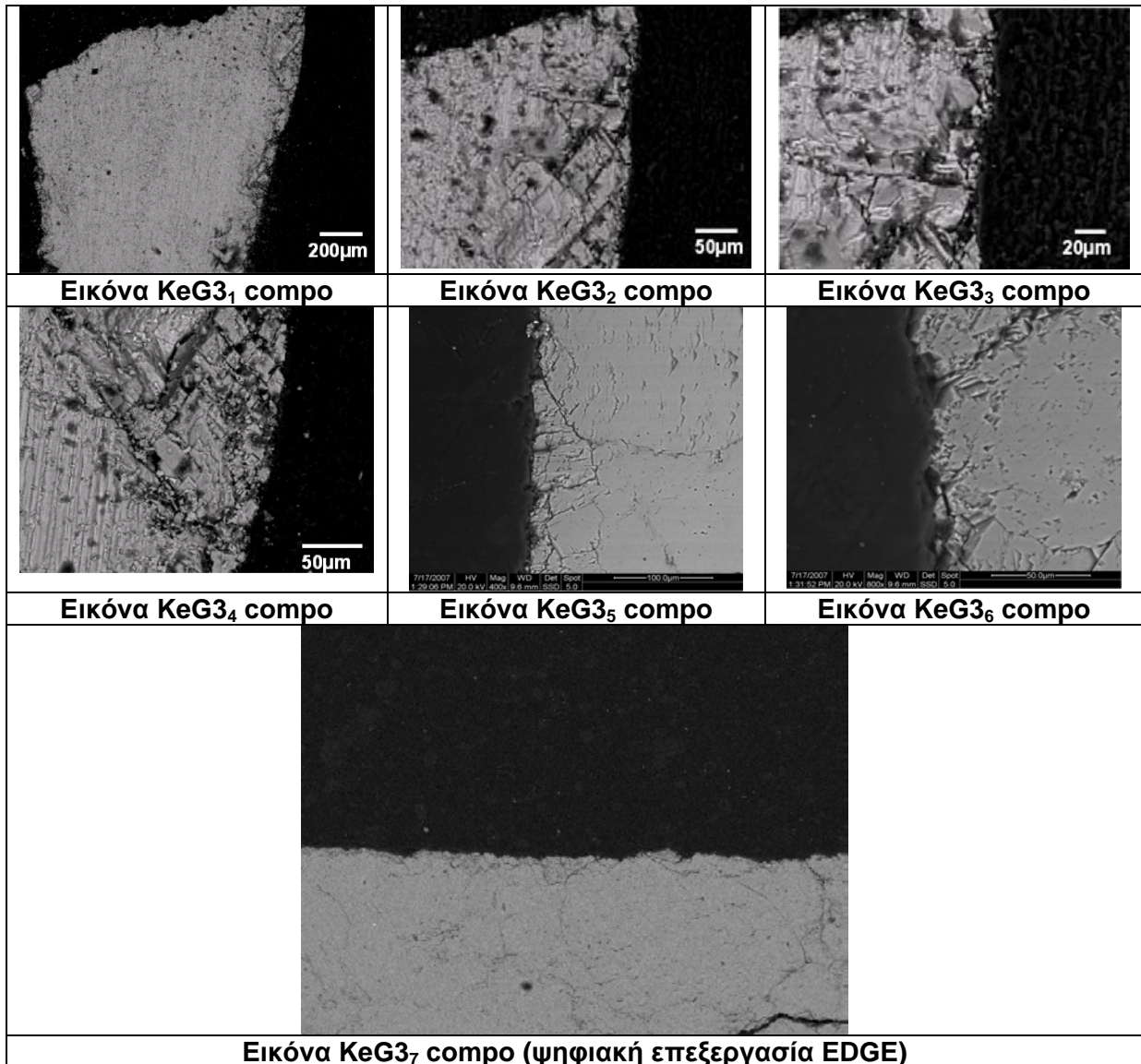
Από τις παραπάνω εικόνες καθίσταται σαφές ότι όλες οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού που χρησιμοποιήθηκαν απομάκρυναν το χαρακτηριστικό τύπο φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών. Η χαρακτηριστική μορφολογική υφή του μαρμάρου είναι εμφανής στο σύνολο των εικόνων. Όμως οι εφαρμογές του βιολογικού επιθέματος, της πάστας AB57 στη ράβδωση, καθώς και της υγρής μικροψηγματοβολής επέφεραν τέτοια μεταβολή στην επιφανειακή μορφολογία, όπου κατά τόπους οι κόκκοι του μαρμάρου είναι εμφανείς υποδηλώνοντας ότι έχει λάβει χώρα απώλεια αυθεντικού υλικού.

Στις δύο εφαρμογές της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης στις περιοχές της ράβδωσης είναι εμφανής κατά τόπους χαρακτηριστική πορτοκαλοκάστανη χροιά που πιθανότατα οφείλεται σε υπολείμματα της κρούστας.

6.4.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ στα δείγματα που ελήφθησαν μετά την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών του κίονα στο κτίριο του ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός) .

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: υγρή μικροψηγματοβολή - Δείγμα KeG3



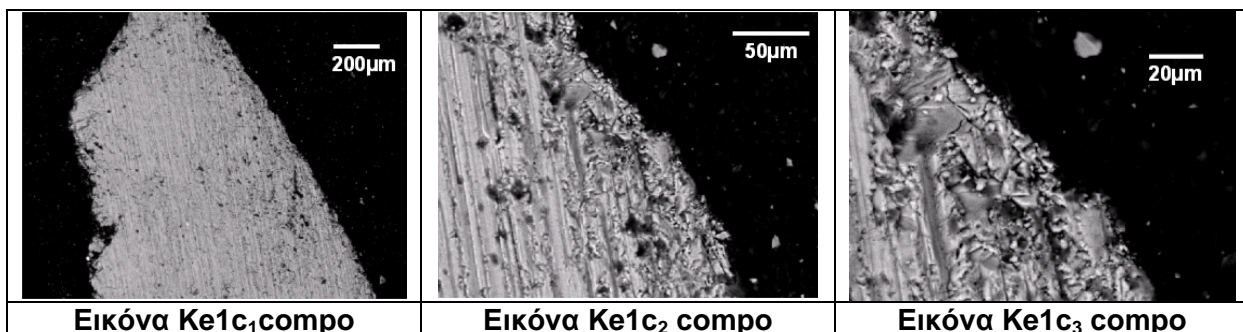
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

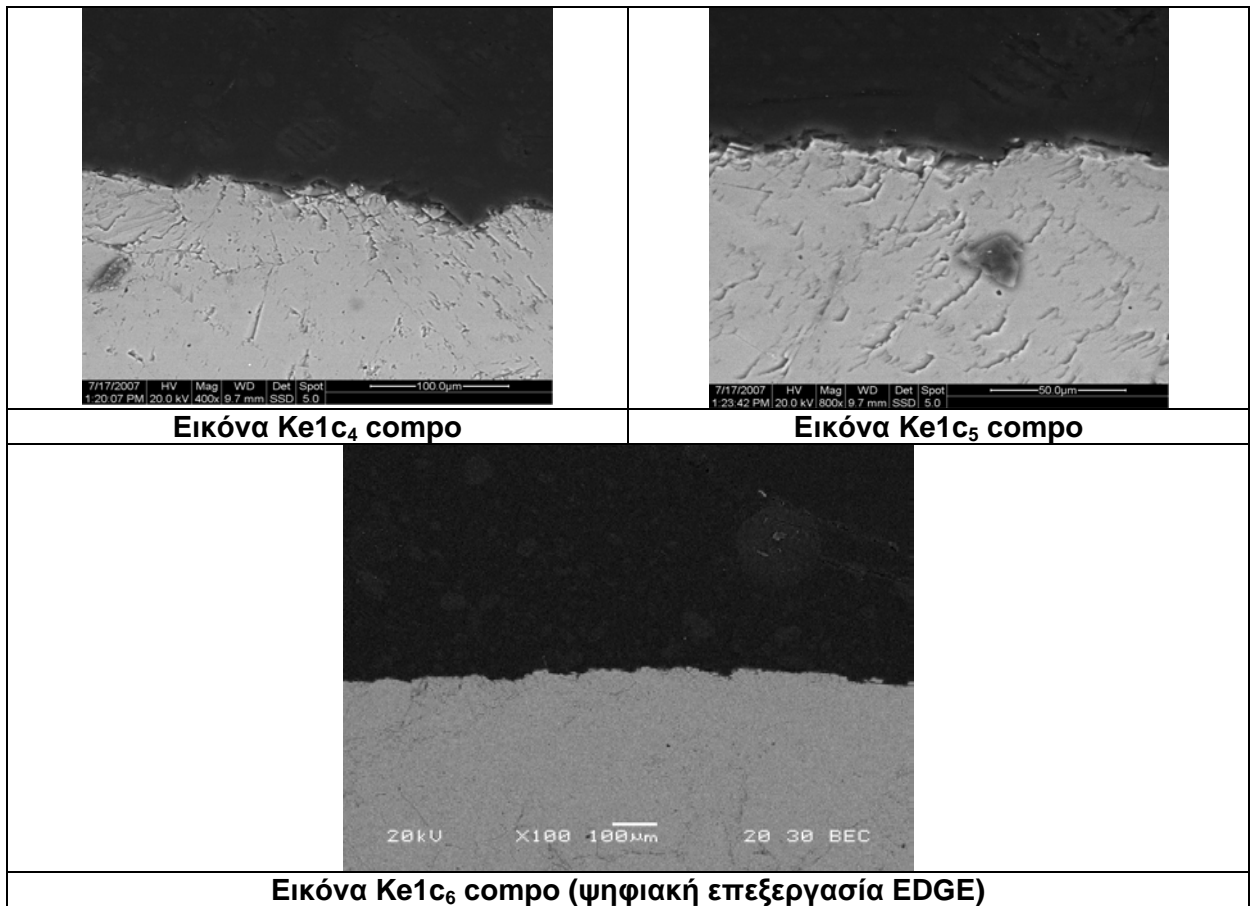
Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Cl
KeG3	1 (Εικόνα KeG3 ₃ compo)	****	•	-	•	-	-
	2 (Εικόνα KeG3 ₃ compo)	****	-	-	•	-	-
	3 (Εικόνα KeG3 ₃ compo)	****	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα KeG3 ₃ compo)	****	•	•	-	-	-
	5 (Εικόνα KeG3 ₃ compo)	****	-	-	-	-	-
	6 (Εικόνα KeG3 ₄ compo)	****	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα KeG3 ₄ compo)	****	*	•	-	-	•
	8 (Εικόνα KeG3 ₄ compo)	****	-	-	•	-	•

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Κατόπιν αυτής της επέμβασης καθαρισμού διαπιστώνεται ότι η φαιόμαυρη κρούστα και η γυψοποιημένη ζώνη έχουν απομακρυνθεί στο σύνολό τους. Ίχνη S εντοπίζονται σε μεμονωμένα σημεία της επιφάνειας, καθώς και σε βάθος $\approx 10 \mu\text{m}$. Από την όψη των επιφανειακών κόκκων ασβεστίτη φαίνεται ότι η επιφάνεια του δείγματος έχει καταπονηθεί αρκετά. Σε ορισμένες περιοχές, έχουν δημιουργηθεί διακλάσεις και ρηγματώσεις (Εικ. KeG3₅, KeG3₆), ενώ έχουν αποκολληθεί κομμάτια ασβεστιτικού υλικού εξαιτίας της επέμβασης, αφού η επιφανειακή μορφολογία των ασβεστιτικών κόκκων παρουσιάζει κατά τόπους αποφλοιώσεις σε εγκάρσια επίπεδα (εικ. KeG3₆).

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Πάστα AB57 για 5 min - Δείγμα Ke1c





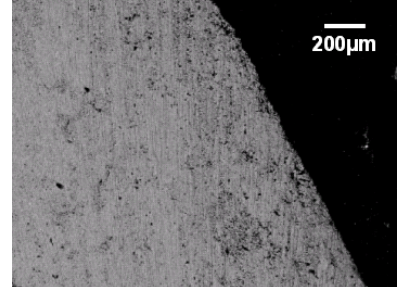
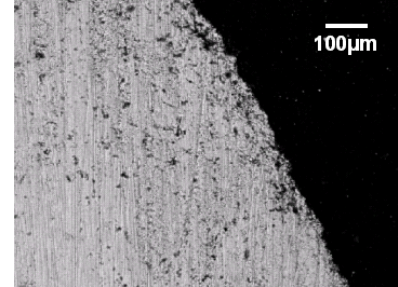
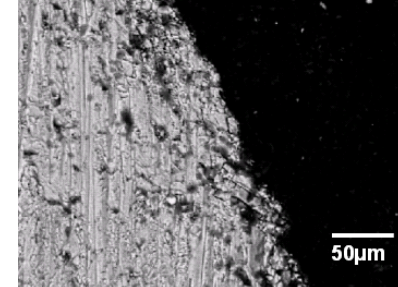
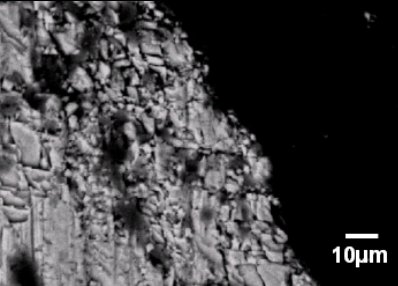
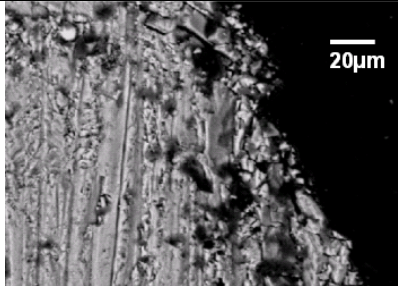
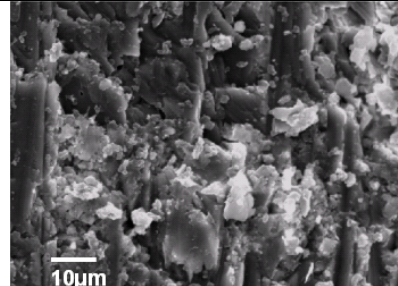
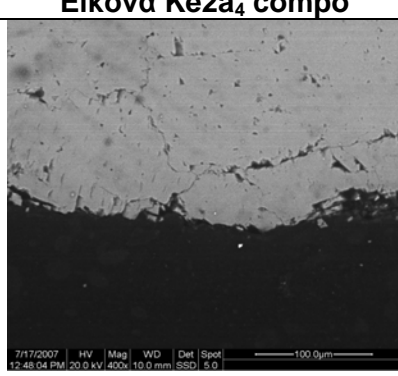
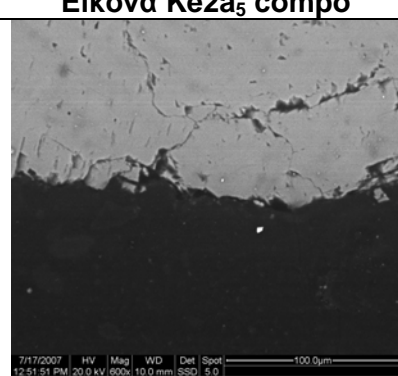
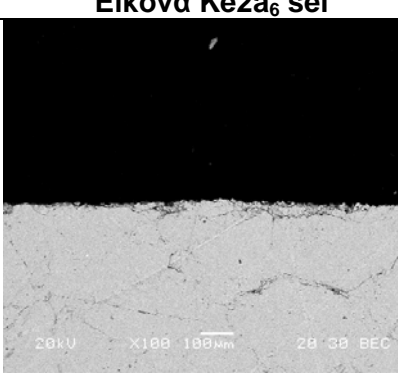
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg
Ke1c	1 (Εικόνα Ke1c2 compo)	****	-	-	-
	2 (Εικόνα Ke1c2 compo)	****	-	-	•
	3 (Εικόνα Ke1c2 compo)	****	-	•	-
	4 (Εικόνα Ke1c2 compo)	****	-	-	•
	5 (Εικόνα Ke1c3 compo)	****	•	-	•
	6 (Εικόνα Ke1c2 compo)	****	-	-	-
	7 (Εικόνα Ke1c3 compo)	****	-	-	•

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Μετά την επέμβαση καθαρισμού με πάστα AB57 έλαβε χώρα πλήρης απομάκρυνση της γυψοποιημένης ζώνης. Ίχνος θείου εντοπίζεται μόνο σε μια ανάλυση της επιφάνειας του δείγματος. Παρατηρείται έντονο επιφανειακό ανάγλυφο, που υποδηλώνει ότι η πάστα έχει προσβάλλει χημικά την ασβεστιτική μήτρα, οδηγώντας σε απώλεια αυθεντικού υλικού.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 40min - Δείγμα Ke2a

		
Εικόνα Ke2a₁ compo	Εικόνα Ke2a₂ compo	Εικόνα Ke2a₃ compo
		
Εικόνα Ke2a₄ compo	Εικόνα Ke2a₅ compo	Εικόνα Ke2a₆ sei
		
Εικόνα Ke2a₇ compo	Εικόνα Ke2a₈ compo	Εικόνα Ke2a₉ compo (ψηφιακή επεξεργασία EDGE)

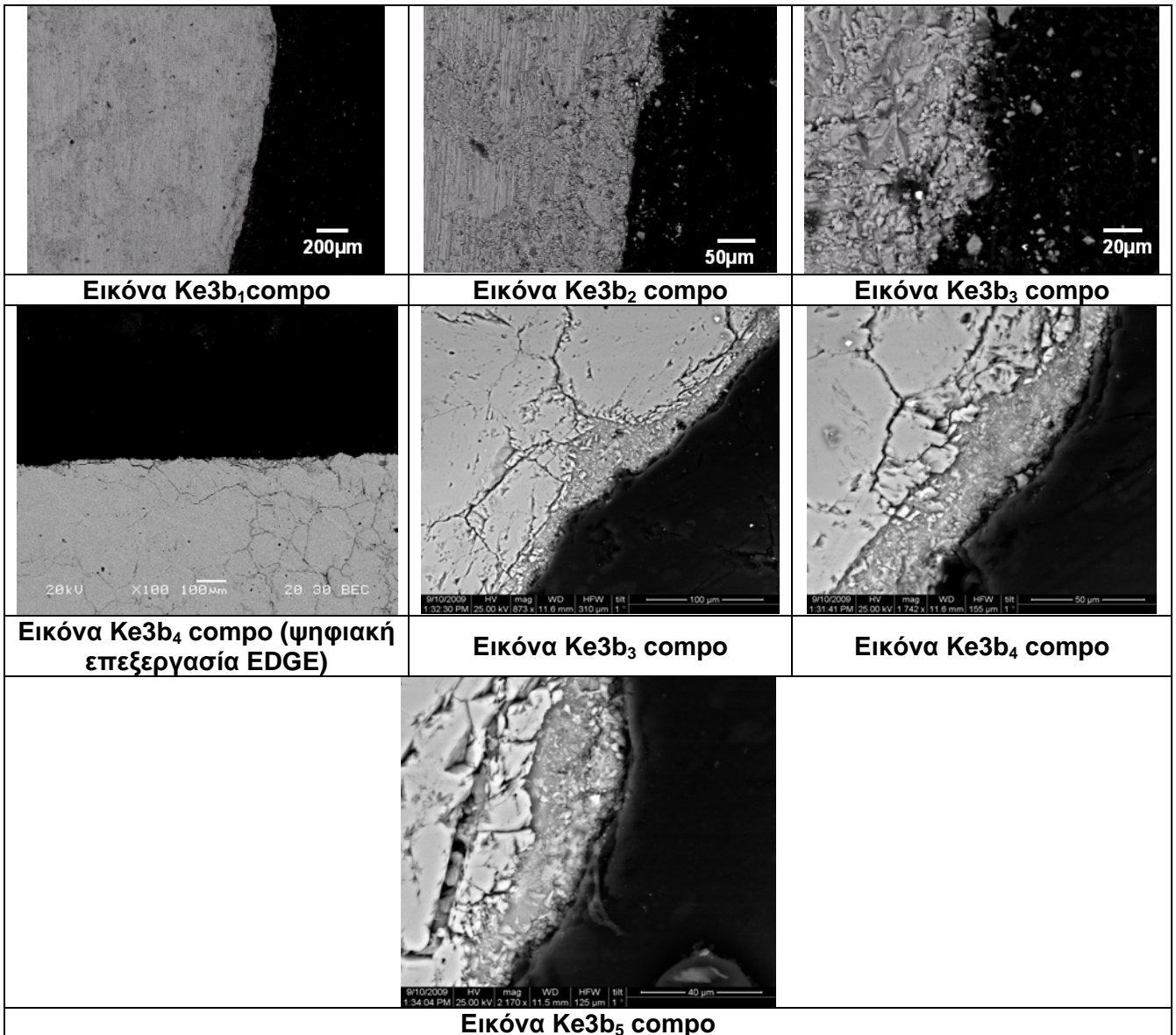
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	P
Ke2a	1 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	•	•	•	-	-
	2 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	•	•	-	-
	3 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	•	•	•	-	-
	5 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	-	•	•	-
	6 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	-	•	•	-
	8 (Εικόνα Ke2a2 compo)	****	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα Ke2a3 compo)	****	-	-	•	•	-
	10 (Εικόνα Ke2a5 compo)	****	-	-	-	•	***
	11 (Εικόνα Ke2a5 compo)	****	-	-	•	-	-
	12 (Εικόνα Ke2a4 compo)	****	-	-	•	-	-

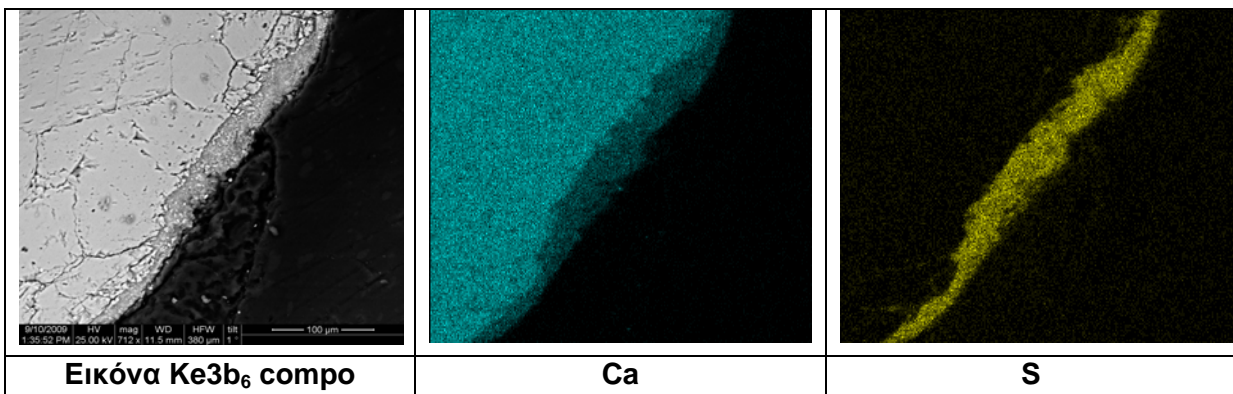
**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Μετά την επέμβαση καθαρισμού διαπιστώνεται η πλήρης απομάκρυνση της γυψοποιημένης ζώνης. Ίχνη θείου εντοπίζονται σε ανάλυση της επιφάνειας καθώς και σε βάθος 25 μm. Μετά την επέμβαση η επιφάνεια παρουσιάζει σχετικά λείο ανάγλυφο με εμφανή όμως αποκόλληση κόκκων που μπορεί να αποδοθεί στη χημική επίδραση της πάστας. Παρουσιάζονται δε, ρηγματώσεις και διάκενα στο εσωτερικό, κυρίως στα όρια των ασβεστιτικών κρυστάλλων. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι ο κόκκος απατίτη (10^ο EDX-εικόνες Ke2a₅, Ke2a₆) εντοπίζεται στην μάζα του μαρμάρου.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 30min - Δείγμα Ke3b



Στην παρακάτω εικόνα έλαβε χώρα χαρτογράφηση ασβεστίου (μπλε χρώμα) και θείου (κίτρινο χρώμα)



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Cl	Pb
Ke3b	1 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	****	•	-	-	•	*
	2 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	-	-	•	-	-	-
	3 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	****	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	**	•	•	•	•	-
	5 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	-	•	•	-	-	-
	6 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	**	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	****	-	•	-	•	*
	8 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	**	-	•	-	-	-
	9 (Εικόνα Ke3b3 compo)	****	**	-	•	-	-	-

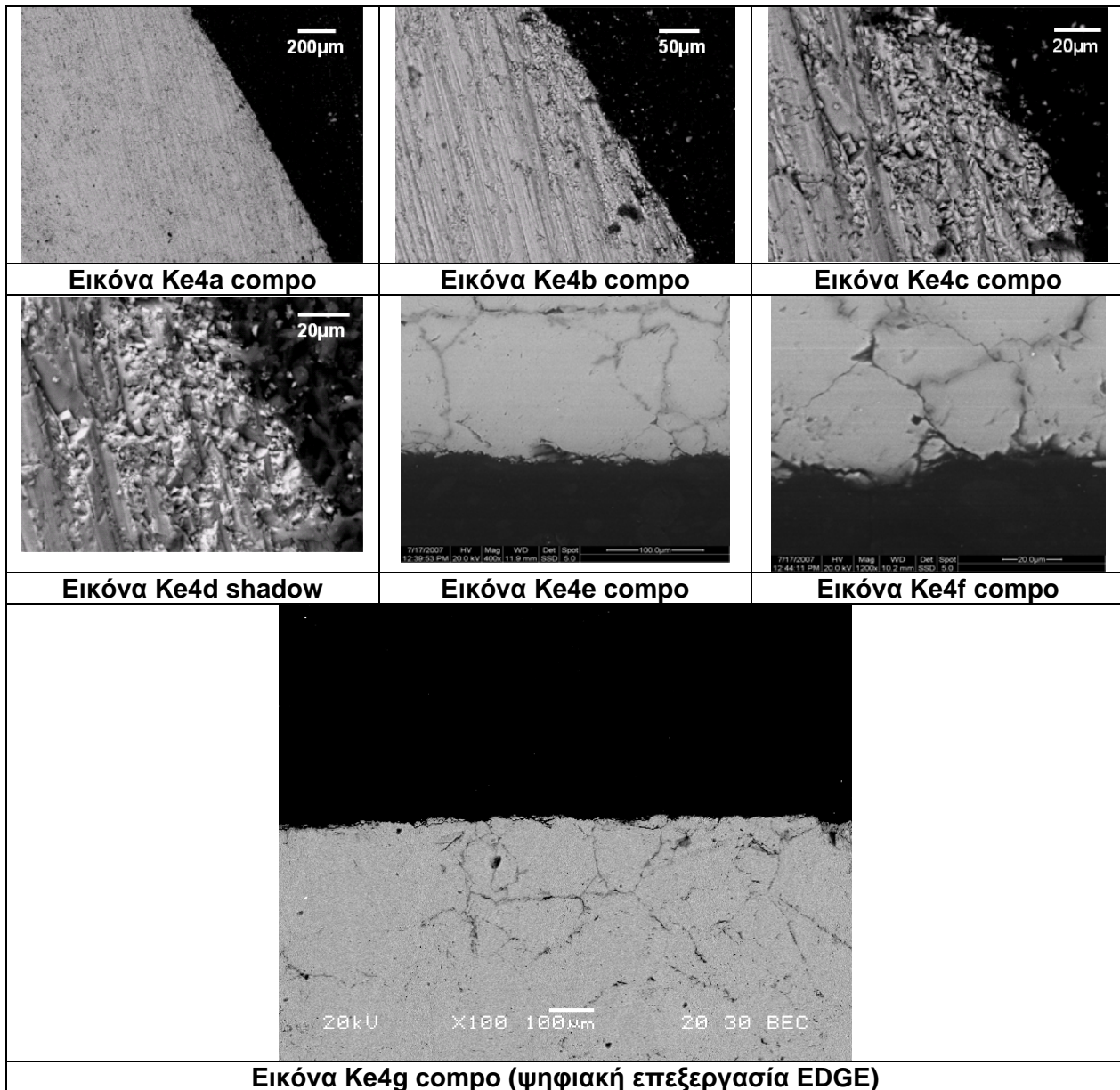
**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Μετά την επέμβαση καθαρισμού διαπιστώνεται η διατήρηση ζώνης γύψου μέσου πάχους 20μm. Οι κόκκοι ασβεσίτη που βρίσκονται σε επαφή με τη γυψοποιημένη επιφάνεια έχουν έντονο ανάγλυφο, εμφανίζοντας πολλά σπασίματα και ρηγματώσεις.

Τα κοκκώδη συσσωματώματα γύψου αποτελούνται από κρυστάλλους μικρής διαμέτρου (μέγιστη 5μm) και μπορούν να χαρακτηριστούν ανά περιοχές είτε ως μικροκρυσταλλικά (διάμετρο κόκκων από 30 ως 1μm) είτε ως κρυπτοκρυσταλλικά (διάμετρο κόκκων από 1 ως 0.1μm).

Επίσης, κόκκος Pb, εντοπίζεται στη γυψοποιημένη επιφάνεια(1^ο,7^ο EDS).

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Βιολογικό επίθεμα 18 ημερών - Δείγμα Ke4



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	Si	Mg	K
Ke4	1 (Εικόνα Ke4 compo)	****	-	•	•
	2 (Εικόνα Ke4c compo)	****	-	-	-
	3 (Εικόνα Ke4c compo)	****	•	•	•
	4 (Εικόνα Ke4c compo)	****	•	-	-
	5 (Εικόνα Ke4c compo)	****	-	•	•

*** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

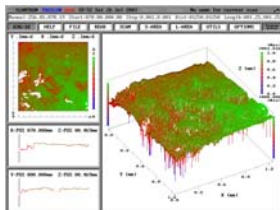
Μετά την εφαρμογή της επέμβασης καθαρισμού διαπιστώνεται η πλήρης απομάκρυνση της γυψοποιημένης ζώνης. Παρατηρείται έντονο κυματοειδές ανάγλυφο με εμφανή όμως αποκόλληση των επιφανειακών κόκκων που μπορεί να αποδοθεί στη χημική επίδραση της πάστας. Επίσης, είναι εμφανείς επιφανειακές ρηγματώσεις κυρίως στα όρια των ασβεστιτικών κόκκων.

6.4.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

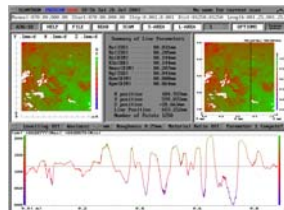
Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον έλεγχο των δειγμάτων από την επιφάνεια των φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ΕΑΜ, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υψής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια (ενεργή επιφάνεια), οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των ληφθέντων δειγμάτων από το ιστορικό κτίριο, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υψής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας των επεμβάσεων καθαρισμού που έχουν λάβει χώρα.

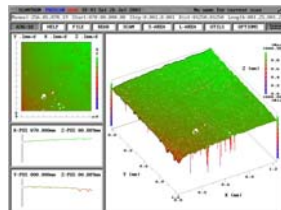
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών των δειγμάτων, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για την περιοχή όπου έλαβε χώρα η σάρωση με τη χρήση της laser προφίλομετρίας.



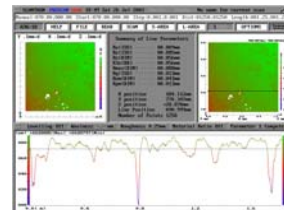
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα ke2a



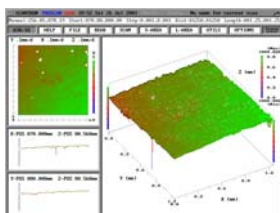
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα ke2a



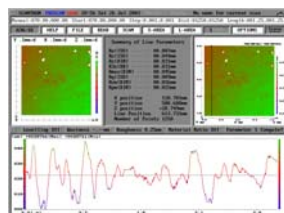
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα ke1c



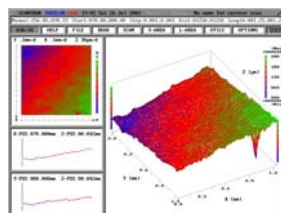
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα ke1c



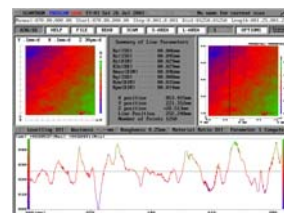
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα keG3



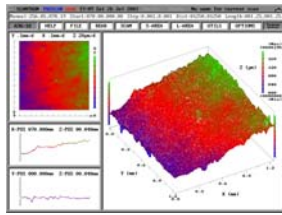
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα keG3



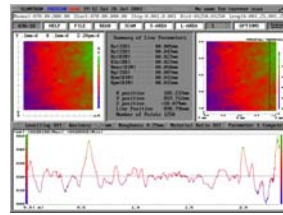
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα ke3b



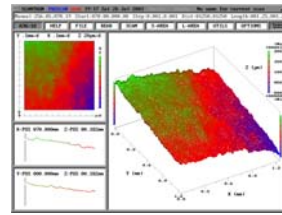
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα ke3b



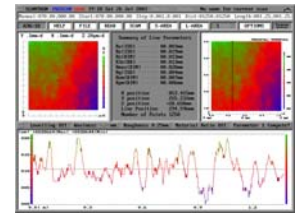
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα ke4



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα ke4



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα ke6



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα ke6

Στον Πίνακα 6.4.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε μm στα ληφθέντα δείγματα πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του Rq των 50 γραμμικών προφίλ για τον άξονα X (Rqx) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (Rqy), καθώς και το κατώτερο -1° και ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του Rq (δηλ. οι τιμές Rq που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή Rq από τις δύο συγκρινόμενες Rqx και Rqy, η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 6.4.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Rqx (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο X άξονας		Rqy (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Y άξονας		Rq (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min	30	24	37	39	35	42	39	35	42
ke1c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	14	11	16	12	9	17	14	11	16
keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	13	9	17	15	12	18	15	12	18
ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min	6	5	7	7	6	8	7	6	8
ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ	6	5	7	7	6	7	7	6	7
ke6	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	6	5	6	5	4	5	6	5	6

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της τραχύτητας των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Συμπερασματικά δε, αναφέρεται:

- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με την αντίστοιχη επιφάνεια της διάγνωσης της φθοράς, διαπιστώνεται αύξηση της Rq, σε όλες τις περιπτώσεις.

- Χαμηλό ποσοστό αύξησης των τιμών της τραχύτητας παρουσιάζουν οι επιφάνειες με κωδικό ke4 και ke3b, ενώ η περιοχή όπου εφαρμόστηκε ο καθαρισμός με ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή τραχύτητας.
- Λαμβάνοντας υπόψη ότι όλες οι επεμβάσεις καθαρισμού (εκτός από αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό) απομακρύνουν το στρώμα του γύψου, διαπιστώνεται ότι οι επεμβάσεις αυτές οδηγούν σε αύξηση των τιμών της τραχύτητας και άρα σε αύξηση της επιδεκτικότητας στην φθορά των αντίστοιχων μαρμαρίνων περιοχών.
- Εξαίρεση αποτελεί η επέμβαση του βιολογικού επιθέματος, όπου οδηγεί σε μικρής τάξης αύξηση της τιμής της τραχύτητας.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.4.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς καθώς και σε αυτές μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm², του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm², ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσημο τρόπο την απόκλιση από την επιτεδότητα.

Πίνακας 6.4.3.2: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Εμβαδόν Προβαλλόμενης επιφάνειας (mm ²)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm ²)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min	1.011	3.465	3.427	242,73%
ke1c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	1.001	2.013	2.011	101,10%
keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	1.252	2.264	1.808	80,83%
ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min	1.546	2.198	1.422	42,17%
ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ	1.560	2.146	1.376	37,56%
ke6	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	1.560	2.100	1.346	34,62%

Αντίστοιχες είναι οι διαπιστώσεις και από τα παραπάνω αποτελέσματα του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια:

- Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια), σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με την αντίστοιχη επιφάνεια της διάγνωσης της φθοράς, διαπιστώνεται αύξηση του, σε όλες τις περιπτώσεις
- Η αύξηση του ποσοστού μεταβολής του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής για τις περιοχές ke2a και ke1c είναι πολύ υψηλό, υποδεικνύοντας την παραγωγή επιφανειών μετά τους συγκεκριμένους καθαρισμούς με μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.
- Ενδιάμεσα ποσοστά μεταβολής του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής καταγράφονται για τις περιοχές ke3b και ke4 (αντίστοιχες τιμές με αυτό του δείγματος της διάγνωσης της φθοράς).
- Συμπεραίνεται δε, ότι η δραστηριότητα του καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου είναι η πιο υψηλή, με δεύτερη αυτή της πάστας AB57, ενώ ακολουθούν η τεχνικής της υγρής μικροψηματοβολής και του βιολογικού επιθέματος.

Πίνακας 6.4.3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Rq (μm)
ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min	3.427	39
ke1c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	2.011	14
keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	1.808	15
ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min	1.422	7
ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ	1.376	7
ke6	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	1.346	6

6.4.4 Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής στις γυψοποιημένες ανάγλυφες επιφάνειες του κίονα του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια.

Όσον αφορά στην fractal διάσταση των δειγμάτων, γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη τραχύτητα αυξάνεται. Από τον πίνακα 6.4.4.1 είναι φανερό ότι η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη τιμή fractal διάστασης και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, είναι ακριβώς η ίδια με την κατάταξη των δειγμάτων βάση της τιμής του συντελεστή μορφής, ξεκινώντας από την πιο τραχιά επιφάνεια και καταλήγοντας στην πιο λεία.

Το δείγμα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη fractal διάσταση και το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής, είναι εκείνο που αντιστοιχεί στην κατεργασία με υγρή ψηφματοβολή (Keg3). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι είναι το μοναδικό δείγμα, στο οποίο η επιφάνεια παρουσιάζεται καταπονημένη από την κατεργασία (έντονο ανάγλυφο \Rightarrow μεγάλη τραχύτητα). Επίσης, το δείγμα Keg3 είναι και το μοναδικό που υπερβαίνει τις αντίστοιχες τιμές του δείγματος διάγνωσης (Keg6). Τα υπόλοιπα δείγματα που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, παρουσιάζουν τιμές fractal διάστασης και συντελεστή μορφής μικρότερες από τις αντίστοιχες του δείγματος διάγνωσης. Από τον πίνακα 4 φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης είναι υψηλός και ίσος με 0,91, άρα η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μεγάλη.

Η γενική κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από την επιφάνεια με το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής (πιο τραχιά επιφάνεια) και καταλήγοντας στην επιφάνεια με τον μικρότερο (πιο λεία επιφάνεια) είναι η εξής:

Κωδικός δείγματος	Διάγνωση / Επέμβαση καθαρισμού	Οριακές τιμές T_L και T_U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L^* (pixels)	Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%)	Συντελεστής μορφής (Γ)	Συντελεστής ευθρυπτότητας (%)
		T_L	T_U						
Ke6	Διάγνωσης	T_L 60	T_U 90	1,085	728	512	14,1	3,02	33
Keg3	Υγρή ψηγατοβολή	T_L 90	T_U 118	1,144	884	496	18,1	3,94	43
Ke2a	DS + NC 40 min	T_L 62	T_U 148	1,074	710	512	11,4	2,92	31
Ke3b	DS 30 min	T_L 50	T_U 110	1,053	633	512	13,2	2,57	29
Ke4	Βιολογικό επίθεμα	T_L 9	T_U 19	1,037	610	512	4,3	2,44	25
Ke1c	AB57 5 min	T_L 60	T_U 90	1,027	584	512	3,2	2,32	23

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης:

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων [$\rho(\Gamma/F.D.)$] = **0,84**

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης [$\rho(\Gamma/D)$] = **0,91**

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης [$\rho(F.D/D)$] = **0,9**

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(F.D./F.I.)$] = **0,91**

Συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ fractal διάστασης και συντελεστή ευθρυπτότητας [$\rho(D/F.I.)$] = **0,998**

Πίνακας 6.4.4.1: Αποτελέσματα επεξεργασίας δειγμάτων της ανάγλυφης επιφάνειας του κίονα στο EAM

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση τον συντελεστή μορφής

Υγρή μικροψηγατοβολή	(3,94)	
Δείγμα διάγνωσης	(3,02)	
DS + NC, 40 min	(2,92)	
DS, 30 min	(2,57)	
Βιολογικό επίθεμα	(2,44)	
AB57, 5 min	(2,32)	Λεία επιφάνεια

Η ίδια κατάταξη προκύπτει με βάση και τον αριθμό L των pixels του ανάγλυφου κάθε δείγματος (Pixel Count), λαμβάνοντας υπόψη ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός αυτός, τόσο περισσότερα στοιχεία τραχύτητας αποκαλύπτει (αυτό συμβαίνει υπό την προϋπόθεση ότι σε όλα τα δείγματα το Ευκλείδιο μήκος είναι $L^* = 512$ ή πολύ κοντά στην τιμή αυτή).

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100 μm. Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση την πυκνότητα ρηγματώσεων

Υγρή μικροψηγατοβολή	(18,1%)	
Δείγμα διάγνωσης	(14,1%)	
DS, 30 min	(13,2%)	
DS+NC, 40 min	(11,4%)	
Βιολογικό επίθεμα	(4,3%)	
AB57, 5 min	(3,2%)	Μικρή πυκνότητα ρηγματώσεων

Ο συντελεστής μορφής και η πυκνότητα ρηγματώσεων που αντιστοιχούν στο δείγμα διάγνωσης, αντικατοπτρίζουν, με λογικές και σχετικά υψηλές τιμές, τον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας με αργιλοπυριτικές επικαθίσεις. Το μοναδικό δείγμα που υπερβαίνει την τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων του δείγματος διάγνωσης, είναι και πάλι εκείνο που αντιστοιχεί στην κατεργασία με υγρή ψηγατοβολή (το μοναδικό δείγμα στο οποίο η επιφάνεια παρουσιάζεται καταπονημένη, μετά την κατεργασία καθαρισμού).

Η μοναδική ασυνέχεια που υπάρχει μεταξύ της κατάταξης με βάση το συντελεστή μορφής και της κατάταξης με βάση την μέση πυκνότητα ρηγματώσεων, είναι η αντιστροφή των θέσεων μεταξύ των μεθόδων DS 30 min (εφαρμογή ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 30 min) και DS+NC 40 min (εφαρμογή ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 40 min). Συγκεκριμένα το δείγμα που αντιστοιχεί στη μέθοδο DS 30 min παρουσιάζει μικρότερο συντελεστή μορφής (μικρότερη επιφανειακή τραχύτητα), αλλά μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων από το δείγμα που αντιστοιχεί στη μέθοδο DS+NC 40 min. Η ανομοιομορφία

αυτή πιθανόν οφείλεται στο ότι η παρουσία καθαρού γύψου στην επιφάνεια του δείγματος που αντιστοιχεί στη μέθοδο DS 30 min, σε αντίθεση με τον καθαρό ασβεστίτη που παρατηρείται στην επιφάνεια του δείγματος της DS+NC 40 min, αυξάνει την πυκνότητα ρηγματώσεων, γιατί πιθανά το στρώμα γύψου παρουσιάζει μεγαλύτερο πορώδες από τον ασβεστίτη (γεγονός που αποδίδεται, κατά την επεξεργασία των αντίστοιχων εικόνων SEM, με την οριοθέτηση των T_L και T_U).

Από τον πίνακα 6.4.4.1 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης είναι και αυτοί υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,84 και 0,9. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Από τον Πίνακα 6.4.4.1 είναι φανερό ότι το δείγμα υγρής ψηγματοβολής παρουσιάζει συντελεστή ευθρυπτότητας μεγαλύτερο ακόμα και από την αντίστοιχη τιμή του δείγματος διάγνωσης.

Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθρυπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια), είναι ίδια με τη κατάταξη που γίνεται με βάση το συντελεστή μορφής.

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση τον συντελεστή ευθρυπτότητας

Υγρή μικροψηγματοβολή	(43%)	Περισσότερο εύθρυπτη επιφάνεια ↑ ↓ Λιγότερο εύθρυπτη επιφάνεια
Δείγμα διάγνωσης	(33%)	
DS + NC, 40 min	(31%)	
DS, 30 min	(29%)	
Βιολογικό επίθεμα	(25%)	
AB57, 5 min	(23%)	

Ο συντελεστής ευθρυπτότητας του δείγματος διάγνωσης είναι 33% και η φυσικοχημική αστάθεια που αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει, αναφέρεται στον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας με αργιλοπυριτικές επικαθίσεις. Ως γενικότερο κριτήριο, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι οι τιμές των συντελεστών ευθρυπτότητας των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις μεθόδους καθαρισμού, δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή αυτή ώστε να μην υφίσταται, μετά τον καθαρισμό, χειρότερη κατάσταση διάβρωσης και μικρότερη επιφανειακή ευστάθεια από την αρχική. Συνεπώς, από την κατάταξη παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις καθαρισμού, πλην της υγρής ψηγματοβολής, οι επιφάνειες που προέκυψαν πράγματι παρουσιάζουν συντελεστές ευθρυπτότητας μικρότερους από 33%. Εξακολουθούν, όμως, οι τιμές αυτές, εξεταζόμενες μεμονωμένα, να είναι αρκετά υψηλές.

Από τον πίνακα 6.4.4.1 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και fractal διάστασης είναι υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,91 και 0,998. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Από τις υψηλές τιμές όλων των συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης, συμπεραίνουμε ότι η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη. Από το γεγονός αυτό και ειδικότερα από τον μεγάλο βαθμό αναλογίας μεταξύ fractal διάστασης και πυκνότητας ρηγματώσεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τελικά επιλεγόμενες τιμές των T_L και T_U , σε κάθε περίπτωση εικόνας, υπήρξαν κατάλληλες για την ορθή διαδικασία βαθμονόμησης των εικόνων SEM των δειγμάτων (η βαθμονόμηση, σε κάθε εικόνα, υπήρξε αντιπροσωπευτική των στοιχείων που αυτή παρουσίαζε και οδήγησε, στη συνέχεια, στον υπολογισμό αντιπροσωπευτικών δεικτών αποτίμησης).

Παράλληλα, διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Οι μέθοδοι καθαρισμού της **υγρή ψηγματοβολής (Keg3)** και της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(NH_4)_2CO_3$ για 40 min (DC+NC 40 min)**, οδηγούν στην παραγωγή επιφανειών με υψηλούς συντελεστές μορφής. Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν μεγάλη τραχύτητα, συγκριτικά με τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες μεθόδους, άρα είναι περισσότερο επιδεκτικές στην επανέναρξη των μηχανισμών φθοράς. Γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει η επιφάνεια μετά τον καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και συνεπώς η ταχύτητα διάβρωσης, από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Οι επιφάνειες αυτές επίσης δίνουν συγκριτικά τις μεγαλύτερες τιμές συντελεστή ευθρυπτότητας, που σημαίνει ότι είναι φυσικοχημικά ασταθέστερες από τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες μεθόδους. Και στις δύο επιφάνειες έχει αποκαλυφθεί ο ασβεστίτης και έχει υπάρξει απώλεια αυθεντικού υλικού (στην περίπτωση των επιφανειών αυτών, οποιαδήποτε απώλεια αυθεντικού υλικού σημαίνει απώλεια ασβεστίτη). Η φυσικοχημική αστάθεια των επιφανειών αυτών, που δηλώνεται από τις υψηλές τιμές του συντελεστή ευθρυπτότητας, αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στο ασβεστίτη (γεγονός μη αποδεκτό). Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι καθαρισμού είναι καλύτερα να αποφευχθούν.
- Οι μέθοδοι καθαρισμού του **βιολογικού επιθέματος (Ke4)** και της **AB57 5 min (Ke1c)** οδηγούν στην παραγωγή επιφανειών με τους χαμηλότερους συγκριτικά συντελεστές μορφής και τους χαμηλότερους συντελεστές ευθρυπτότητας. Αυτό σημαίνει ότι οι επιφάνειες αυτές είναι λιγότερο επιδεκτικές στη φθορά και περισσότερο ευσταθείς φυσικοχημικά, από τις υπόλοιπες. Με βάση τα παραπάνω και μόνο θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι δύο αυτές μέθοδοι είναι οι προτιμότερες από τις 5 που εξετάστηκαν. Όμως, αν λάβουμε υπόψη μας τα στοιχεία των χημικών αναλύσεων που αποδεικνύουν την πλήρη απομάκρυνση του στρώματος γύψου, προκύπτει ότι οι μέθοδοι έχουν προκαλέσει την απώλεια αυθεντικού υλικού. Οι τιμές των συντελεστών ευθρυπτότητας, που αν εξεταστούν μεμονωμένα είναι αρκετά υψηλές, αντιπροσωπεύουν την φυσικοχημική αστάθεια του επιφανειακού ασβεστίτη. Συμπερασματικά οι παραπάνω μέθοδοι είναι σαφώς πιο αποδεκτές από τις μεθόδους Keg3 και Ke2a, αλλά οδηγούν στην απώλεια αυθεντικού υλικού και στην παρουσία, στην επιφάνεια, σχετικά ασταθούς (φυσικοχημικά) ασβεστίτη και δεν είναι οι καλύτερες δυνατές.
- Η μέθοδος της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 30 min (DS 30 min)**, όπως προκύπτει από τα στοιχεία των χημικών αναλύσεων, είναι η μοναδική που έχει κρατήσει

επί της επιφανείας ένα στρώμα γύψου ≈ 20 μm (γεγονός θεμιτό στη περίπτωση καθαρισμού φαιόμαυρης κρούστας). Παράλληλα, η τιμή του συντελεστή μορφής είναι ακριβώς η ενδιάμεση συγκριτικά με τις τιμές των υπολοίπων μεθόδων και παρουσιάζει λογική και σχετικά μικρή απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή του δείγματος διάγνωσης. Και η τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας είναι ακριβώς η ενδιάμεση και η επιφανειακή φυσικοχημική αστάθεια που αντιπροσωπεύει, αναφέρεται ως επί το πλείστον στο υπάρχοντα γύψο (αστάθεια και ευθρυπτότητα της επιφάνειας \Rightarrow απώλεια γύψου). Οι τιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές και επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέθοδος DS 30 min είναι η πλέον κατάλληλη από τις 5 που εξετάστηκαν, στη συγκεκριμένη περίπτωση καθαρισμού.

6.4.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Η τεχνική της χρωματομετρίας έλαβε χώρα επί τόπου στις εξεταζόμενες περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός), πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* (Χρωματομετρικό σύστημα CIELab), καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού.

Στις επί τόπου μετρήσεις, κάθε περιοχή καθαρισμού χωρίστηκε σε κάναβο, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, ο ίδιος αριθμός μετρήσεων στα ίδια σημεία και συνεπώς τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* , αφού μετρήθηκαν 5 σημεία στη ράβδωση του κίονα και 15 σημεία στο τμήμα του αύλακα, για κάθε εξεταζόμενη περιοχή πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακα 6.4.5) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 6.4.5: Αποτελέσματα επί τόπου χρωματομετρικού ελέγχου

Κωδικός Επιφάνειας	Επέμβαση Καθαρισμού	L^* πριν	a^* πριν	b^* πριν	L^* μετά	a^* μετά	b^* μετά	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 40min	49.45	0.86	10.73	61.57	0.08	5.61	12.12	-0.78	-5.12	13.18
Ke1c	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min	48.73	0.55	9.38	62.37	-0.08	4.90	13.64	-0.63	-4.48	16.41
KeG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	52.59	-0.01	8.04	57.42	-0.36	3.85	4.83	-0.35	-4.19	6.40
Ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min	50.24	-0.17	9.23	59.23	-0.68	4.42	8.99	-0.51	-4.81	10.21
Ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ	57.36	0.75	10.26	69.39	-1.13	2.56	12.03	-1.88	-7.7	17.47

Στις επιφάνειες αυτές, σε όλες τις θέσεις πραγματοποίησης επεμβάσεων καθαρισμού, παρατηρείται ικανοποιητική συνολική μεταβολή χρώματος ΔE^* . Η μεγαλύτερη τιμή συνολικής μεταβολής χρώματος προκύπτει στη θέση Ke4, όπου και εφαρμόστηκε το βιολογικό επίθεμα ($\Delta E^*=17.47$), ενώ η μικρότερη μεταβολή καταγράφεται στην επιφάνεια της υγρής μικροψηγματοβολής. Η μεταβολή της λαμπρότητας είναι σε όλες τις θέσεις θετική, γεγονός που σημαίνει ότι μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού προέκυψαν πιο φωτεινές επιφάνειες, καθώς και ότι οι μαύρες επικαθήσεις απομακρύνθηκαν ικανοποιητικά. Η μεγαλύτερη αύξηση της λαμπρότητας, καταγράφεται στην θέση όπου έλαβε χώρα η εφαρμογή της πάστας ΑΒ57. Σε όλες τις θέσεις έχουμε μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο, αφού οι τιμές Δa^* είναι αρνητικές, με μεγαλύτερη μετατόπιση στη θέση Ke4 ($\Delta a^*=-1.88$), όπου εφαρμόστηκε βιολογικό επίθεμα. Επιπλέον, σημειώνεται μετατόπιση στο χρωματικό χώρο προς το μπλε, με αρνητικές τιμές του Δb^* για όλες τις περιοχές, με μεγαλύτερη μετατόπιση στη θέση εφαρμογής βιολογικού επιθέματος για 18 ημέρες, Ke4 ($\Delta b^*=-7.70$).

6.4.6 Μερικά Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας και της χρωματομετρίας που δίνουν σαφείς πληροφορίες σε σχέση με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, την επιφανειακή μορφολογία και συνοχή (επιφανειακή μικροδομή), καθώς και το χρώμα των καθαρισμένων επιφανειών και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας που οι εφαρμοσθείσες μέθοδοι καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν συνάγονται τα εξής:

Οι επεμβάσεις καθαρισμού των επιφανειών ke2a, ke1c, keG3, Ke4 (δηλ. η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 40 λεπτά, η πάστα AB57, η υγρή μικροψηγηματοβολή και το βιολογικό επίθεμα) απομακρύνουν πλήρως τη φαιόμαυρη κρούστα, ακόμα και το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου, αποδίδοντας μια καθαρά ασβεστιτική επιφάνεια. Οι δείκτες της επιφανειακής μικροδομής για την υγρή μικροψηγηματοβολή και την ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 40 λεπτά καταγράφονται σε υψηλές τιμές (τις υψηλότερες) για το συντελεστή μορφής, την πυκνότητα ρηγματώσεων και το συντελεστή ευθρυπτότητας, που σημαίνει ότι είναι φυσικοχημικά και φυσικομηχανικά ασταθέστερες από τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες μεθόδους και συνεπώς οι καθαρά ασβεστιτικές επιφάνειες έχουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά. Αντίστοιχα, παρουσιάζουν ψηλές τιμές τραχύτητας Rq και λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια.

Το βιολογικό επίθεμα και η πάστα AB57 οδηγούν στην παραγωγή επιφανειών με τους χαμηλότερους συγκριτικά συντελεστές μορφής, πυκνότητας ρηγματώσεων και τους χαμηλότερους συντελεστές ευθρυπτότητας. Όμως, γνωρίζοντας ότι έχει λάβει χώρα πλήρης απομάκρυνση της γυψοποιημένης ζώνης προκύπτει ότι η υψηλή δραστηριότητα των μεθόδων αυτών έχουν προκαλέσει απώλεια αυθεντικού υλικού σε τέτοιο βαθμό που να εκφράζεται με χαμηλές τιμές δεικτών επιφανειακής μικροδομής. Η τραχύτητα Rq και η ενεργή επιφάνεια των περιοχών αυτών λαμβάνουν τιμές μεγάλες για την πάστα AB57 και μικρές για το βιολογικό επίθεμα. Η συνολική διαφορά χρώματος σε υψηλά σχετικά επίπεδα εκτός από την τεχνική της υγρής μικροψηγηματοβολής που παρουσιάζει χαμηλή τιμή.

Η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 30 λεπτά στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο EAM, διατηρεί το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου, απομακρύνοντας τις μαύρες επικαθήσεις.

Η πυκνότητα ρηγματώσεων, ο συντελεστής μορφής και ο συντελεστής ευθρυπτότητας παρουσιάζουν τιμές ενδιάμεσες (συγκρινόμενες με το σύνολο των δειγμάτων) και πιο χαμηλές από το δείγμα διάγνωσης. Αντίστοιχα, η τραχύτητα Rq και η ενεργή επιφάνεια παρουσιάζουν τιμές χαμηλές, υποδηλώνοντας μικρή επιδεκτικότητα στη φθορά. Τέλος η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε μεσαία επίπεδα και κρίνεται αποδεκτή.

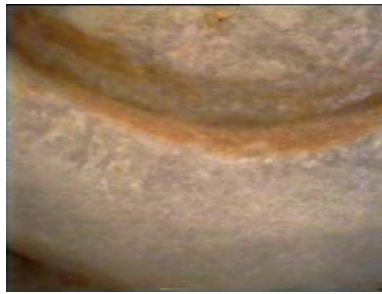
6.5 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου - Η περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών κιονόκρανου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

6.5.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Στο πλαίσιο της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, στις περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών, όπου είναι προστατευμένες από το νερό της βροχής (ανατολικός προσανατολισμός). Μελετάται κυρίως η υφή των κόκκων του πεντελικού μαρμάρου, η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των τύπων φθοράς, καθώς και η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των επεμβάσεων καθαρισμού. Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 10min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 10min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 20min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 20min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 40min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 40min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 10min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 10min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 20min, πρόσθια όψη, δεξί τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 20min, πλάγια όψη, δεξί τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 30min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 30min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 60min, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 60min, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



υγρή μικροψηγματοβολή, πρόσθια όψη, αριστερό τμήμα, x50



υγρή μικροψηγματοβολή, πλάγια όψη, αριστερό τμήμα, x50



πάστα AB57, πρόσθια όψη, κεντρικό τμήμα, x50



πάστα AB57, πλάγια όψη, κεντρικό τμήμα, x50

Από τις παραπάνω εικόνες καθίσταται σαφές ότι όλες οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού που χρησιμοποιήθηκαν απομάκρυναν το χαρακτηριστικό τύπο φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών, ενώ σε σχέση με τη χαρακτηριστική πορτοκαλοκάστανη χροιά που εμφανίζεται κυρίως τις πλάγιες όψεις του ανάγλυφου, ο τύπος επέμβασης και ο χρόνος εφαρμογής οδηγούν σε ποικίλα αποτελέσματα.

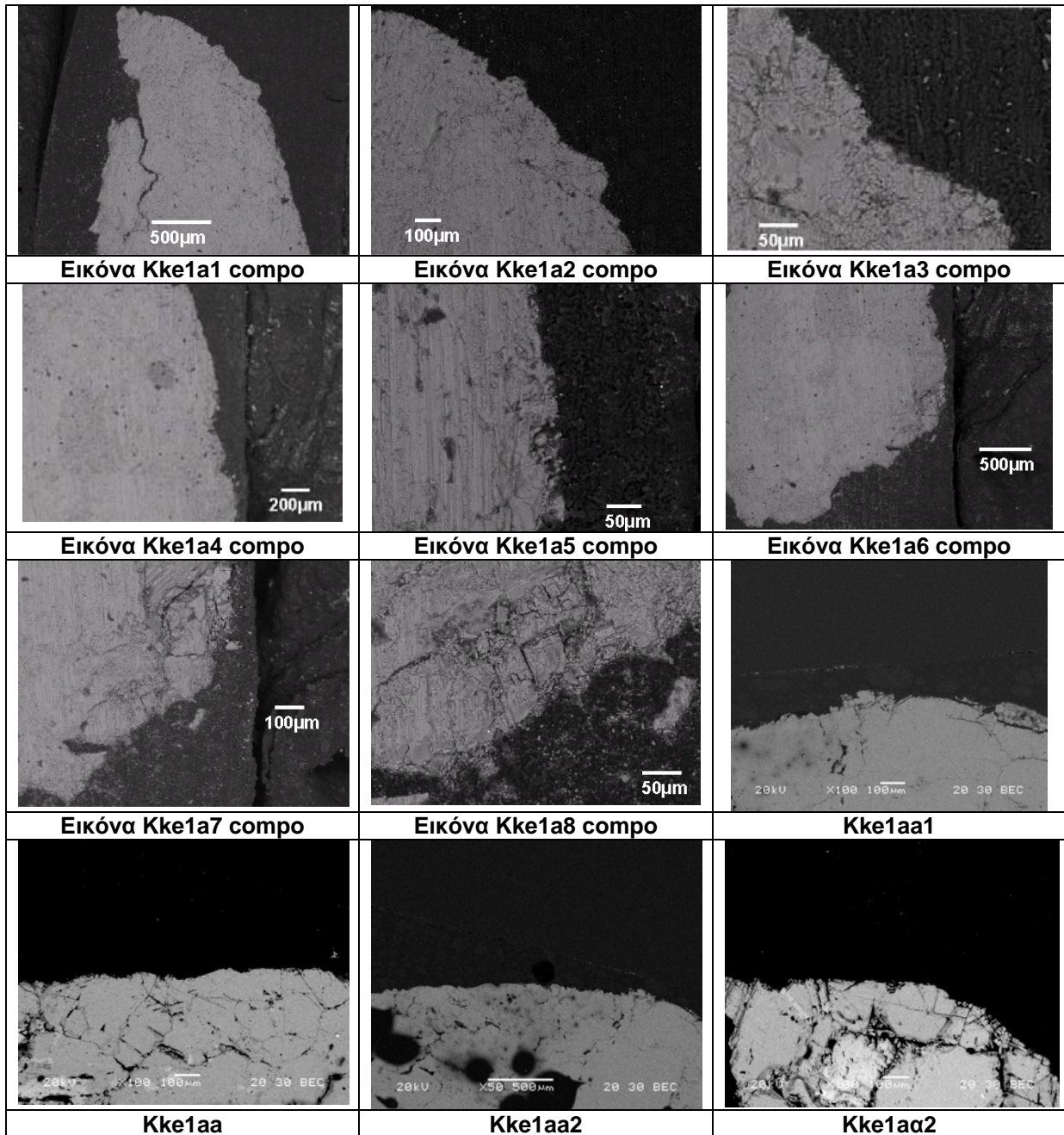
Σε σχέση με τις πρόσθιες όψεις του ανάγλυφου παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10min, καθώς και της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με ανθρακικό αμμώνιο για 10min, οι μαρμάρινες επιφάνειες παρουσιάζουν στο σύνολό τους χαρακτηριστική πορτοκαλοκάστανη χροιά, η οποία δεν ήταν εμφανής πριν τους καθαρισμούς. Οι υπόλοιπες μέθοδοι αποδίδουν αρχιτεκτονικές επιφάνειες χωρίς αυτή τη χροιά, εκτός από την επέμβαση της υγρής μικροψηγηματοβολής που τη διατηρεί στις εγκοπές του ανάγλυφου. Η μεταβολή στην επιφανειακή μορφολογία των επεμβάσεων της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 60min, καθώς και της πάστας AB57 είναι τέτοια, ώστε κατά τόπους οι κόκκοι του μαρμάρου είναι εμφανείς, υποδηλώνοντας πιθανή απώλεια αυθεντικού υλικού.

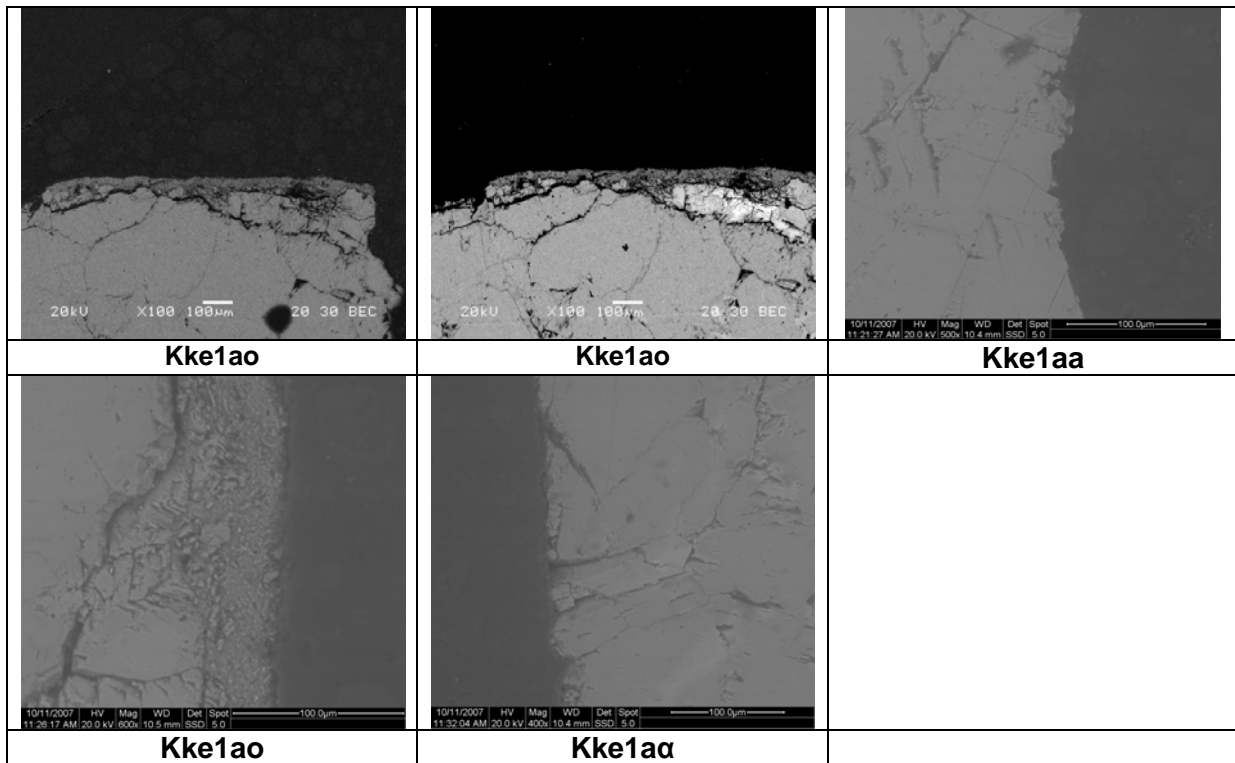
Σε σχέση με τις πλάγιες όψεις των ανάγλυφων επιφανειών παρατηρείται ότι οι περισσότερες από τις επεμβάσεις διατηρούν τμήμα ή και μεγάλο εύρος της πορτοκαλοκάστανης χροιάς, εκτός από την πάστα AB57, την ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 30min και την ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο για 20min. Στην περιοχή δε, της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20min, η πορτοκαλοκάστανη χροιά είναι πολύ έντονη και ουσιαστικά πρόκειται για υπόλοιπο κρούστας.

6.5.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ στα δείγματα που ελήφθησαν μετά την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών του κιονόκρανουστο κτίριο του ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός) .

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 1 h - Δείγμα Kke1a





Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος Kke1a	EDS	Ca	S	Mg	Si	K	Mn	P
	1 (Εικόνα Kke1a3 compo)	****	-	•	-	-	-	-
	2 (Εικόνα Kke1a3 compo)	****	•	•	•	-	-	-
	3 (Εικόνα Kke1a3 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Kke1a3 compo)	**	-	*	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Kke1a5 compo)	****	-	*	-	-	*	-
	6 (Εικόνα Kke1a5 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Kke1a5 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	8 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	9 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	*	*	*	-	-	-
	10 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	•	*	*	-	-	•
	11 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	-	-	-	-
	13 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	***	-	-	-
14 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	*	-	-	-	

	15 (Εικόνα Kke1a7 compo)	****	-	*	***	•	-	-
--	-----------------------------	------	---	---	-----	---	---	---

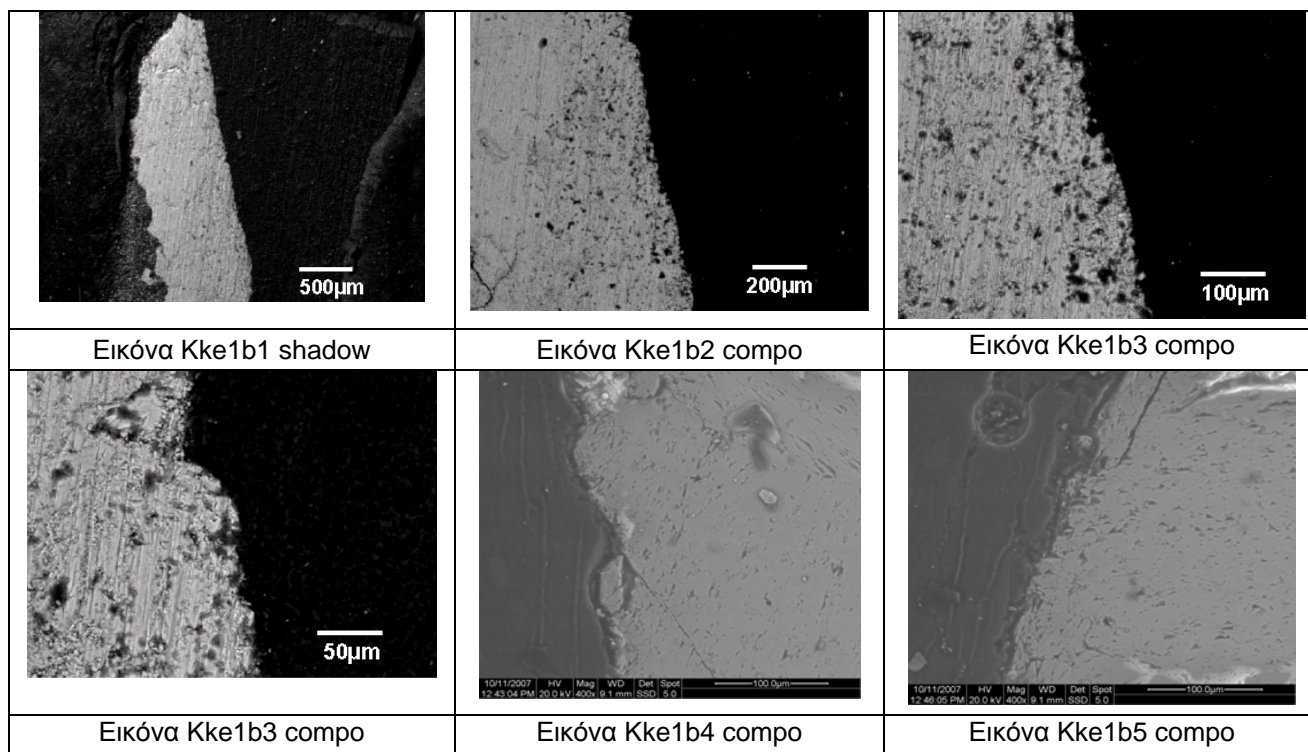
**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

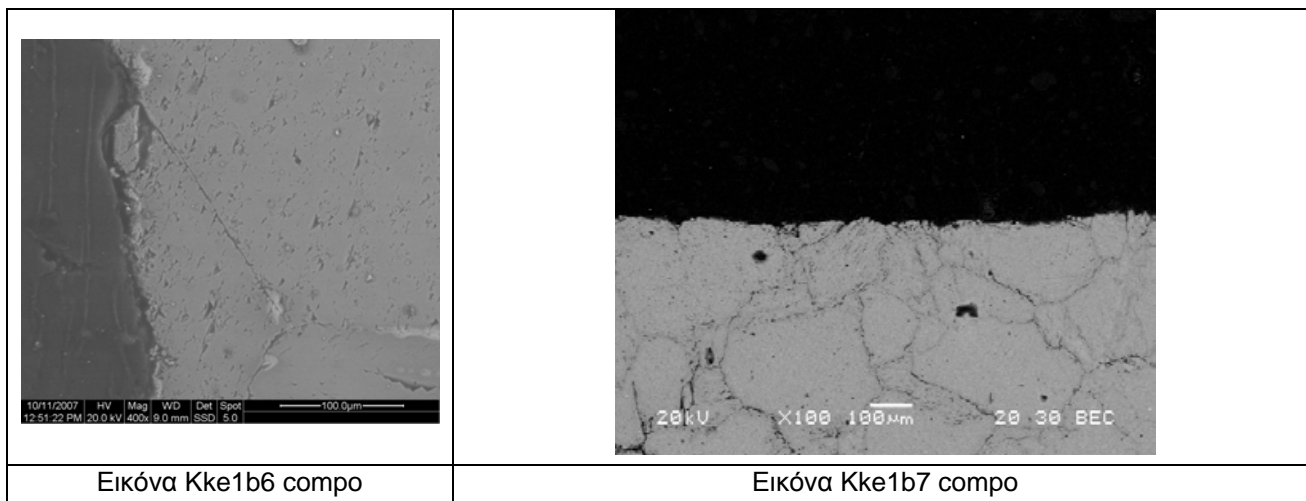
Η πρόσθια όψη (Kke1aα) του εξεταζόμενου δείγματος είναι ασβεσπιτική, και κατά περιοχές εμφανίζει ίχνη θείου, πυριτίου και μαγνησίου. Η ανίχνευση λίγου μαγνησίου στα 30μm και 50μm από την επιφάνεια, πιθανά υποδηλώνει δολομιτική σύσταση κάποιων κόκκων.

Στην πορτοκαλί πλάγια όψη (Kke1aο) το συνολικό μέσο πάχος της διατηρούμενης γυψοποιημένης ζώνης είναι περίπου 40μm, ενώ δεν εντοπίζεται καθόλου βαρύτητας. Σε όλες τις μικροαναλύσεις ακτίνων Χ αυτού του δείγματος ανιχνεύτηκε λίγο μαγνήσιο, γεγονός που πιθανά υποδηλώνει τη δολομιτική σύσταση κάποιων κόκκων.

Και οι δύο όψεις του ανάγλυφου παρουσιάζουν έντονες ρηγματώσεις μεγαλου μήκους.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 30min - Δείγμα Kke1b





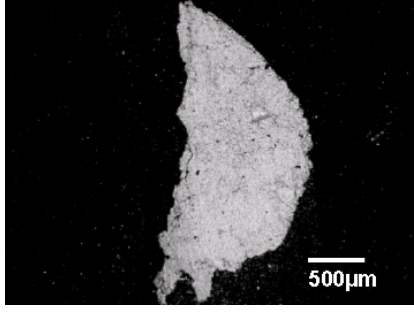
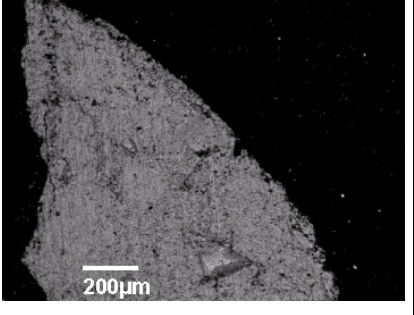
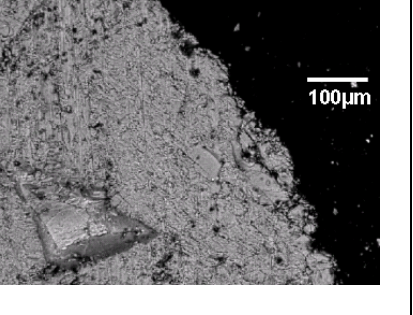
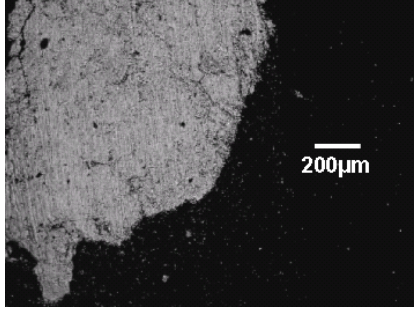
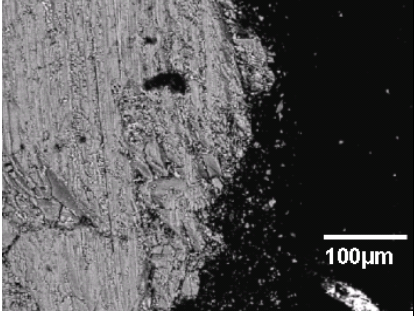
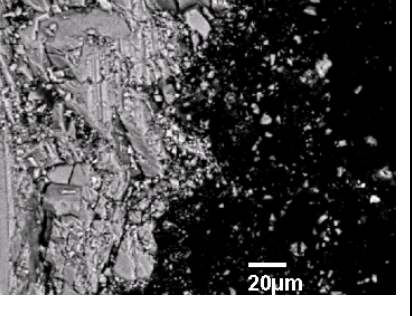
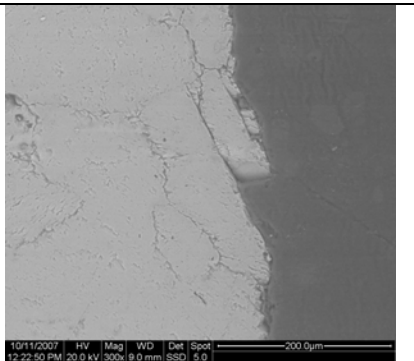
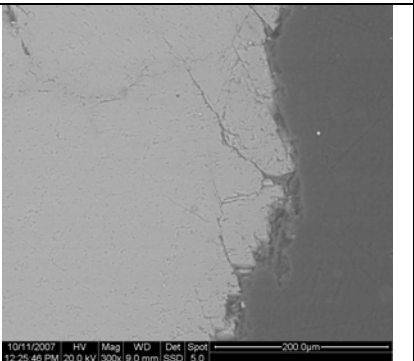
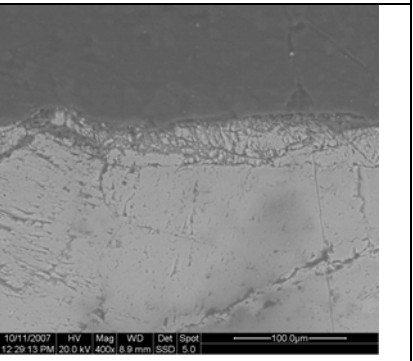
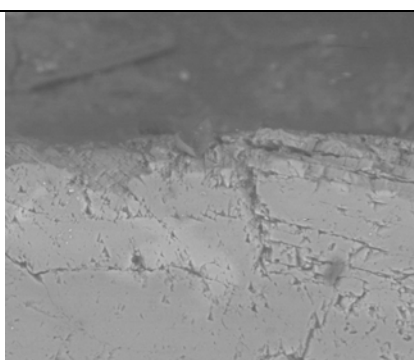
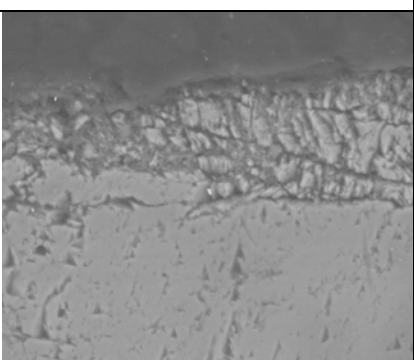
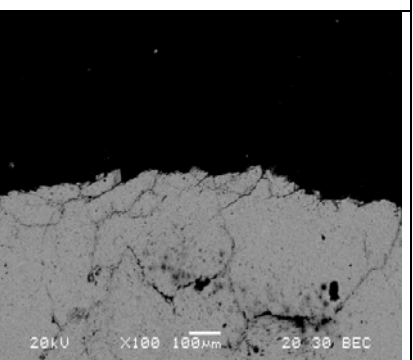
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Mg	Si	K
Kke1b	1 (Εικόνα Kke1b3 compo)	****	-	•	-	•
	2 (Εικόνα Kke1b3 compo)	****	-	•	•	-
	3 (Εικόνα Kke1b3 compo)	****	-	•	•	-
	4 (Εικόνα Kke1b3 compo)	****	-	•	•	•
	5 (Εικόνα Kke1b4 compo)	****	•	•	•	-

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Το συγκεκριμένο δείγμα έχει κατεργαστεί με DS για 30'. Κατόπιν της κατεργασίας, είναι φανερό απο τα αποτελέσματα των αναλύσεων ότι έχουν απομακρυνθεί οι γυψοποιημένες επιφάνειες, αφού το μόνο που βρίσκουμε είναι ίχνη S σε μια και μόνη ανάλυση (εικόνα Kke1b4 - 5^ο EDX) σε κόκκο ασβεσίτη στην επιφάνεια του δείγματος. Γενικά θα λέγαμε ότι στο συγκεκριμένο δείγμα έχει αποκαλυφθεί η ενεργή επιφάνεια του μαρμάρου.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 40min - Δείγμα Kke2a

		
Εικόνα Kke2a1 compo	Εικόνα Kke2a2 compo	Εικόνα Kke2a3 compo
		
Εικόνα Kke2a4 compo	Εικόνα Kke2a5 compo	Εικόνα Kke2a6 compo
		
Kke2aa	Kke2aa	Kke2ak
		
Kke2ak	Kke2ak	Kke2aa compo

	
Kke2ak compo	

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Mg	Si	K	Cl	Cd
Kke2a	1 (Εικόνα Kke2a3 compo)	****	-	•	-	-	-	-
	2 (Εικόνα Kke2a3 compo)	****	-	•	-	•	-	-
	3 (Εικόνα Kke1a3 compo)	****	-	•	-	•	-	-
	4 (Εικόνα Kke2a3 compo)	****	-	-	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Kke2a3 compo)	****	-	•	-	•	-	•
	6 (Εικόνα Kke2a5 compo)	****	-	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Kke2a6 compo)	****	*	•	•	-	-	-
	8 (Εικόνα Kke2a6 compo)	****	-	•	-	-	•	-
	9 (Εικόνα Kke2a6 compo)	****	-	-	•	•	-	-
	10 (Εικόνα Kke2a6 compo)	****	-	-	•	•	-	-
	11 (Εικόνα Kke2a6 compo)	****	-	-	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Kke2a5 compo)	****	-	-	•	•	-	-

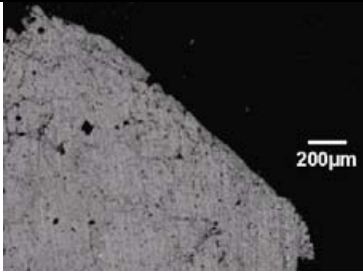
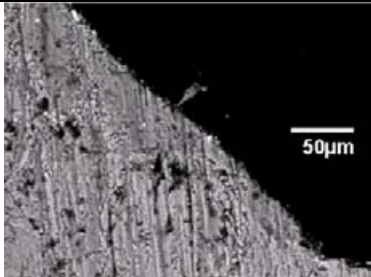
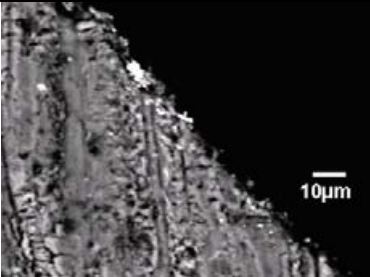
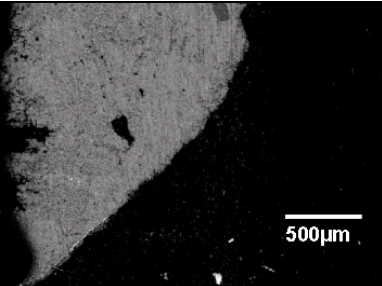
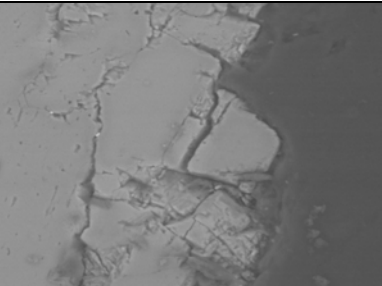
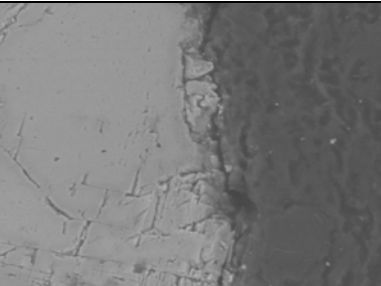
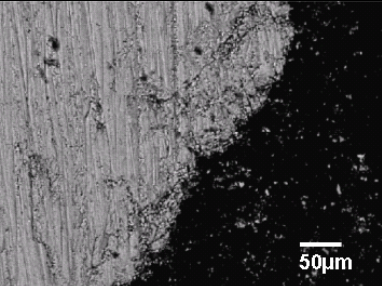
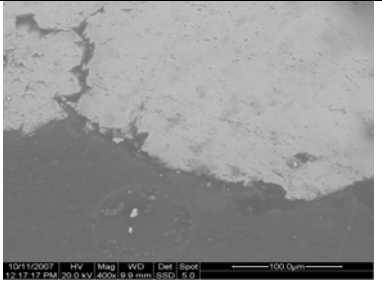
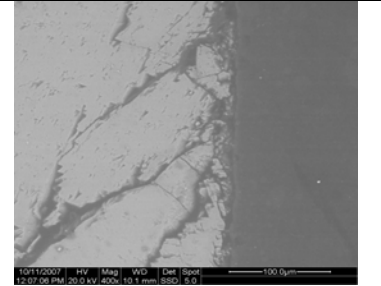
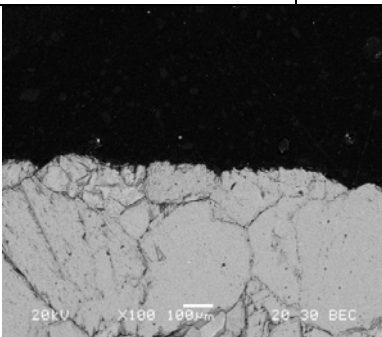
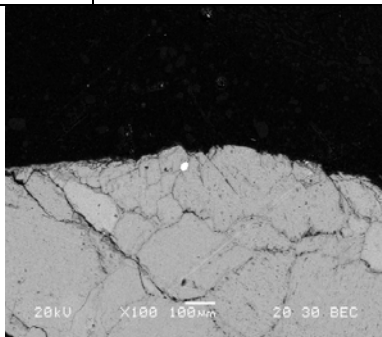
**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

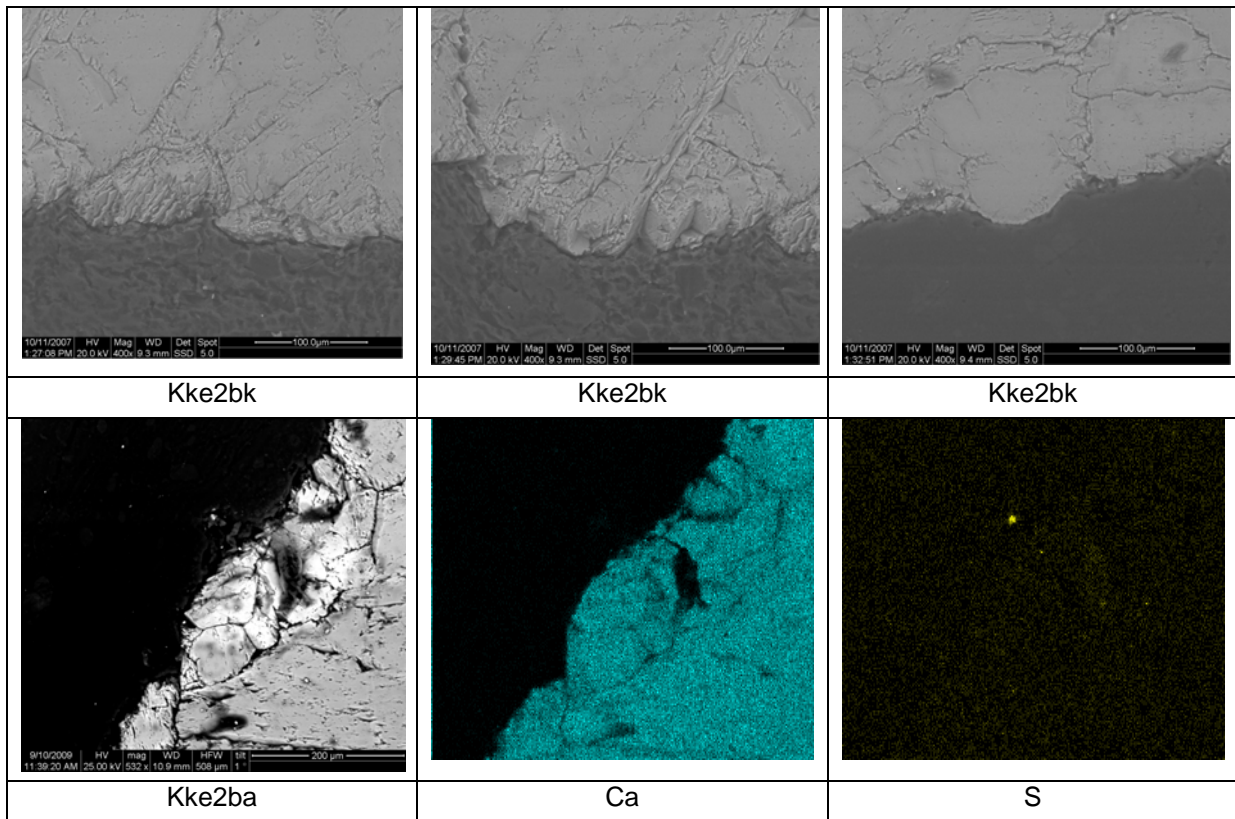
Η πρόσθια όψη του δείγματος (Kke2aa) είναι ασβεστίτικη και εμφανίζει συχνά ίχνη πυριτίου και καλίου, τα οποία φτάνουν και σε 10μm βάθος. Λίγο θείο και ίχνη μαγνησίου απαντώνται ελάχιστες φορές στην επιφάνεια του δείγματος. Ίχνη μαγνησίου και χλωρίου ανιχνεύονται ακόμα και σε 20μm βάθος από την επιφάνεια. Αυτή η ανίχνευση μαγνησίου πιθανά να υποδηλώνει τη δολομιτική σύσταση κάποιων κόκκων.

Στην πλάγια όψη του δείγματος (Kke2ak) διατηρείται γυψοποιημένη ζώνη μέσου πάχους 20μm. Εμφανίζονται σποραδικά ίχνη μαγνησίου και καλίου, τα οποία απαντώνται και στα

60μm βάθος από την επιφάνεια. Τα ίχνη καδμίου που βρίσκονται στο ίδιο βάθος μπορεί να είναι υπολείμματα παλαιότερης κατεργασίας με κάποια χρωστική.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη και διάλυμα $(NH_4)_2CO_3$ για 20min - Δείγμα Kke2b

		
Εικόνα Kke2b1 compo	Εικόνα Kke2b2 compo	Εικόνα Kke2b3 compo
		
Εικόνα Kke2b4 compo	Εικόνα Kke2b5 compo	Εικόνα Kke2b6 compo
		
Εικόνα Kke2b7 compo	Kke2ba	Kke2bk
		
Kke2ba compo		Kke2bk compo



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

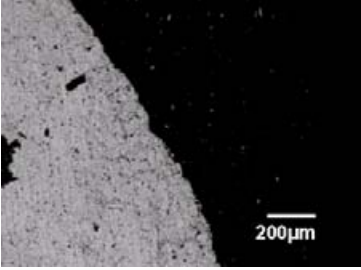
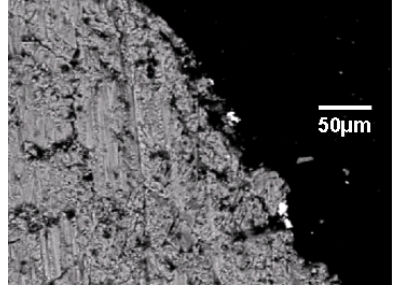
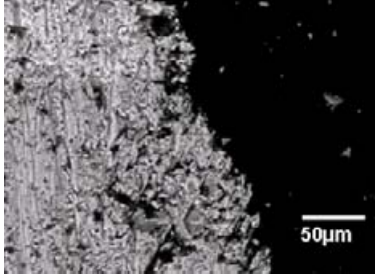
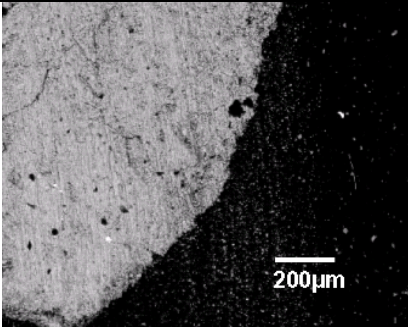
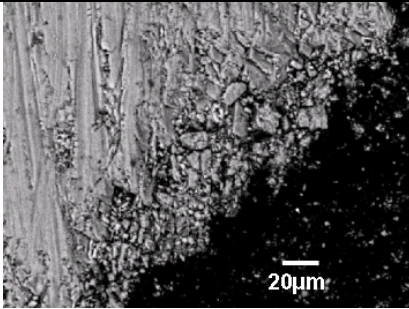
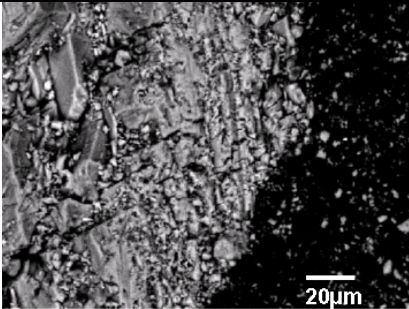
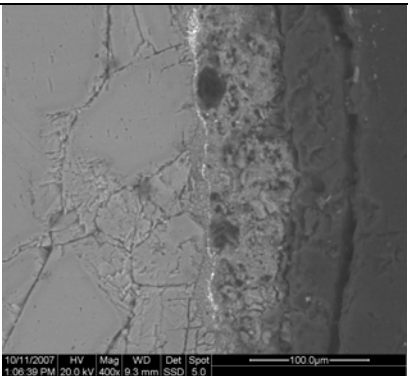
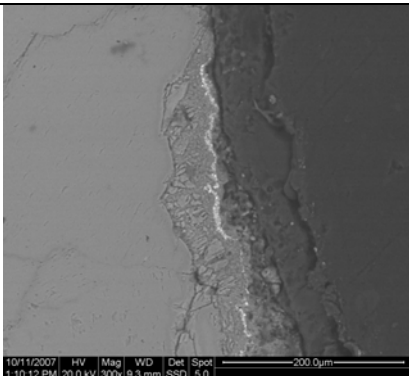
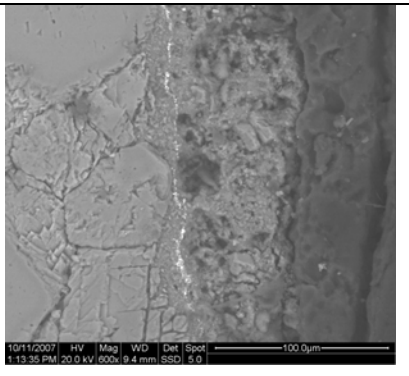
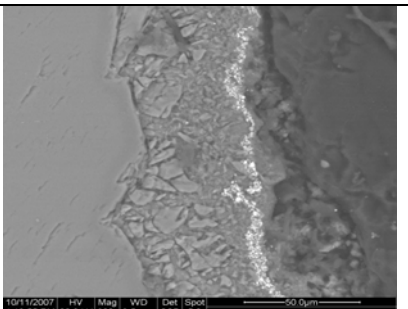
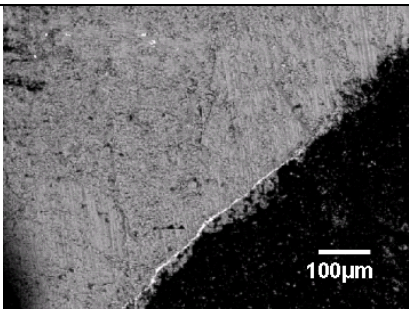
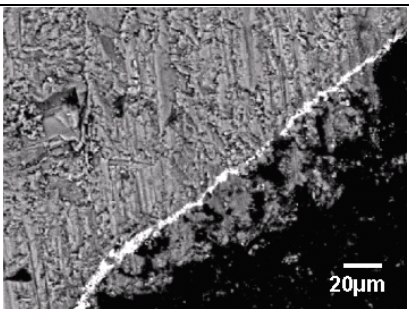
Κωδικός δείγματος Kke2b	EDX	Ca	S	Si	Mg	K	Ba	Al	Cl	Zn	Fe	Cu
	1 (Εικόνα Kke2b3 compo)	*	-	*	-	-	-	•	*	**	-	*
	2 (Εικόνα Kke2b3 compo)	**	-	***	**	-	-	***	•	-	****	-
	3 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	*	•	•	*	*	*	-	*	-
	4 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	*	*	•	•	*	•	-	*	-
	5 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	**	*	•	-	*	•	-	*	-
	6 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	**	-	•	-	•	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	•	-	-	-	•	•	-	-	-
	8 (Εικόνα Kke2b3 compo)	****	-	**	-	•	-	•	•	-	•	-
	9 (Εικόνα Kke2b2 compo)	****	*	-	-	•	-	-	-	-	-	-

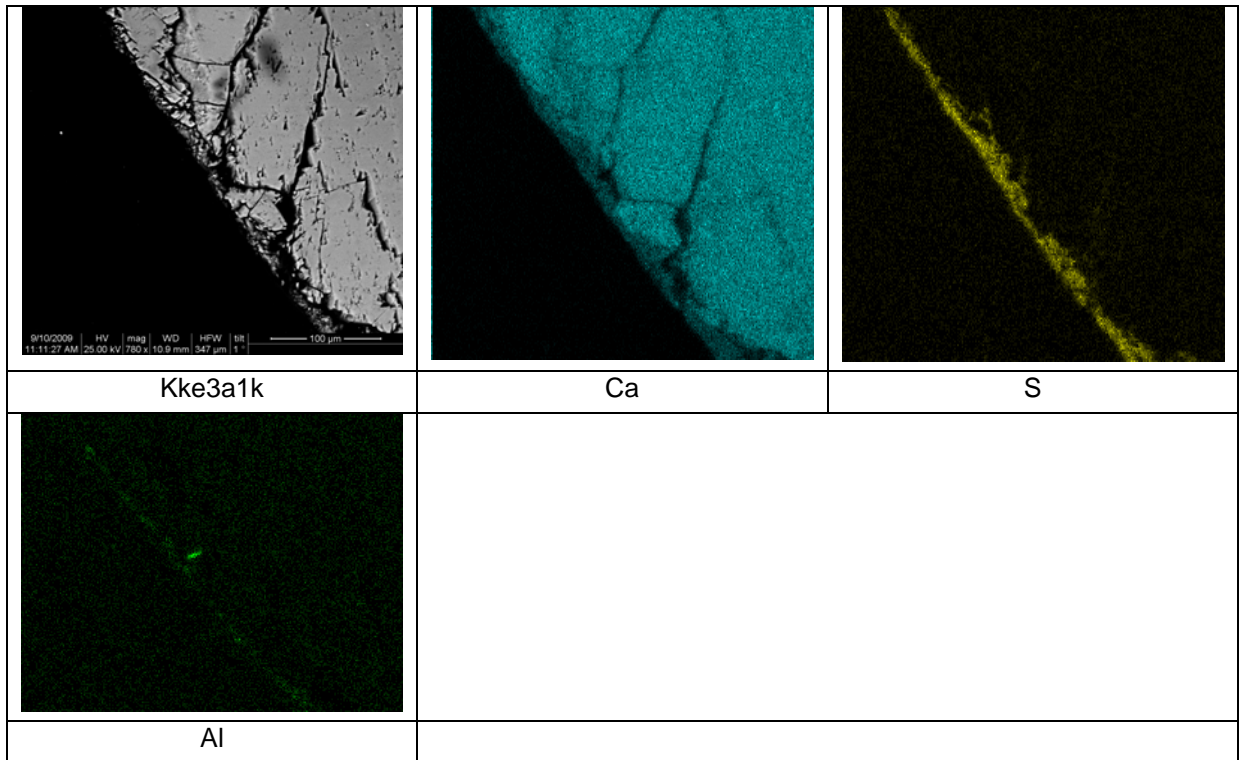
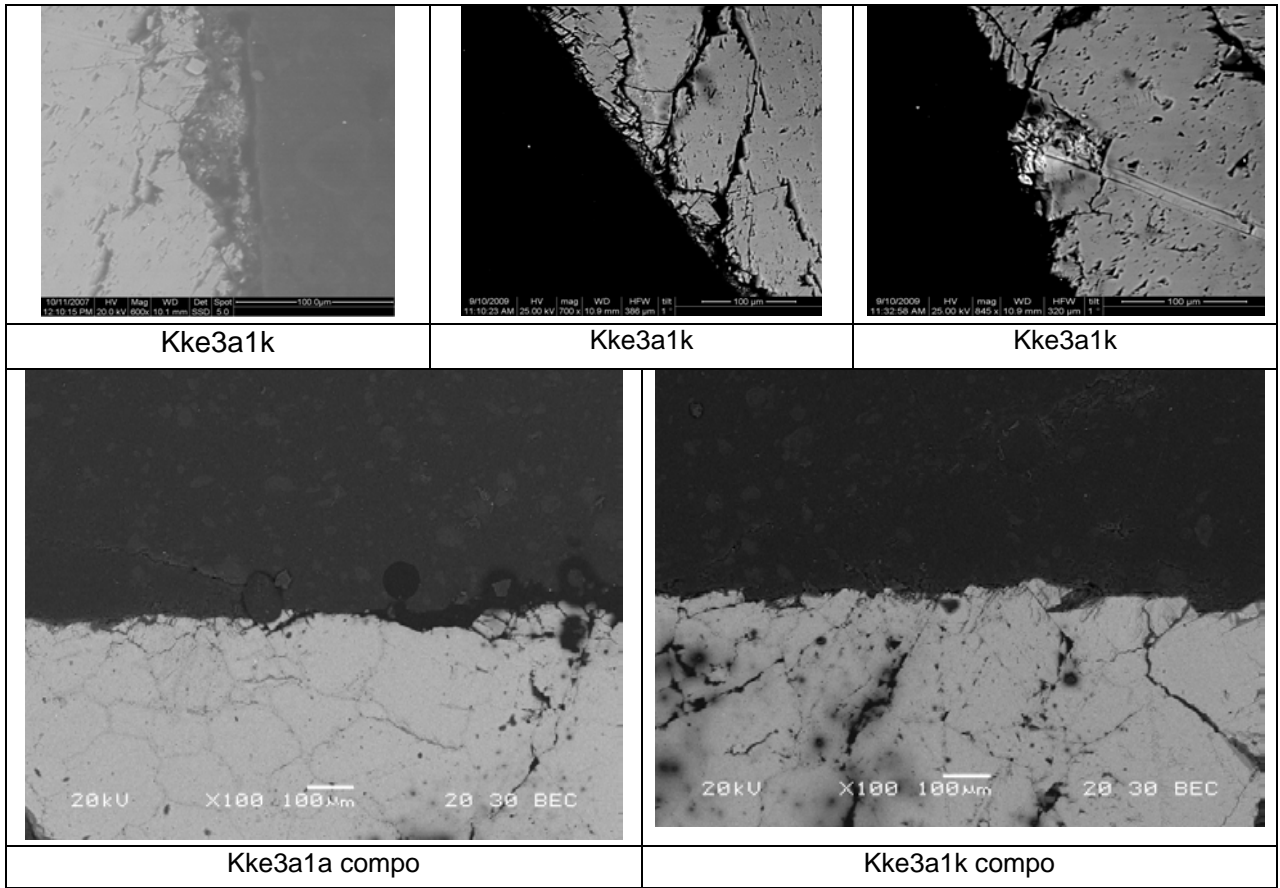
10 (Εικόνα Kke2b2 compo)	****	-	•	-	-	-	-	-	•	-	-	-
11 (Εικόνα Kke2b2 compo)	****	-	*	•	•	-	*	-	-	-	**	-
12 (Εικόνα Kke2b2 compo)	****	•	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-
13 (Εικόνα Kke2b5 compo)	****	-	-	-	•	-	-	•	-	-	-	-
14 (Εικόνα kke2b5 compo)	**	-	-	-	*	-	-	•	-	-	-	-
15 (Εικόνα kke2b6 compo)	****	-	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-
16 (Εικόνα Kke2b6 compo)	****	-	-	•	•	-	-	•	-	-	-	-
17 (Εικόνα Kke2b6 compo)	****	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-
18 (Εικόνα Kke2b6 compo)	****	*	•	•	•	-	-	•	-	-	-	-
19 (Εικόνα Kke2b7 compo)	****	•	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-
20 (Εικόνα Kke2b7 compo)	****	-	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στην επιφάνεια του δείγματος τόσο στην πρόσθια, όσο και στην πλάγια όψη του ανάγλυφου, απαντώνται καθαρός ασβεστίτης με ίχνη θείου, μαγνησίου, καλίου και πυριτίου. Επίσης, ανιχνεύεται χλωριούχο κάλιο στην επιφάνεια των ασβεσσιτικών κόκκων.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη και διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10min - Δείγμα Kke3a1

		
Εικόνα Kke3a ₁ 1 compo	Εικόνα Kke3a ₁ 2 compo	Εικόνα Kke3a ₁ 3 compo
		
Εικόνα Kke3a ₁ 4 compo	Εικόνα Kke3a ₁ 5 compo	Εικόνα Kke3a ₁ 6 compo
		
Kke3a1a	Kke3a1a	Kke3a1a
		
Kke3a1a	Kke3a1k	Kke3a1k



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

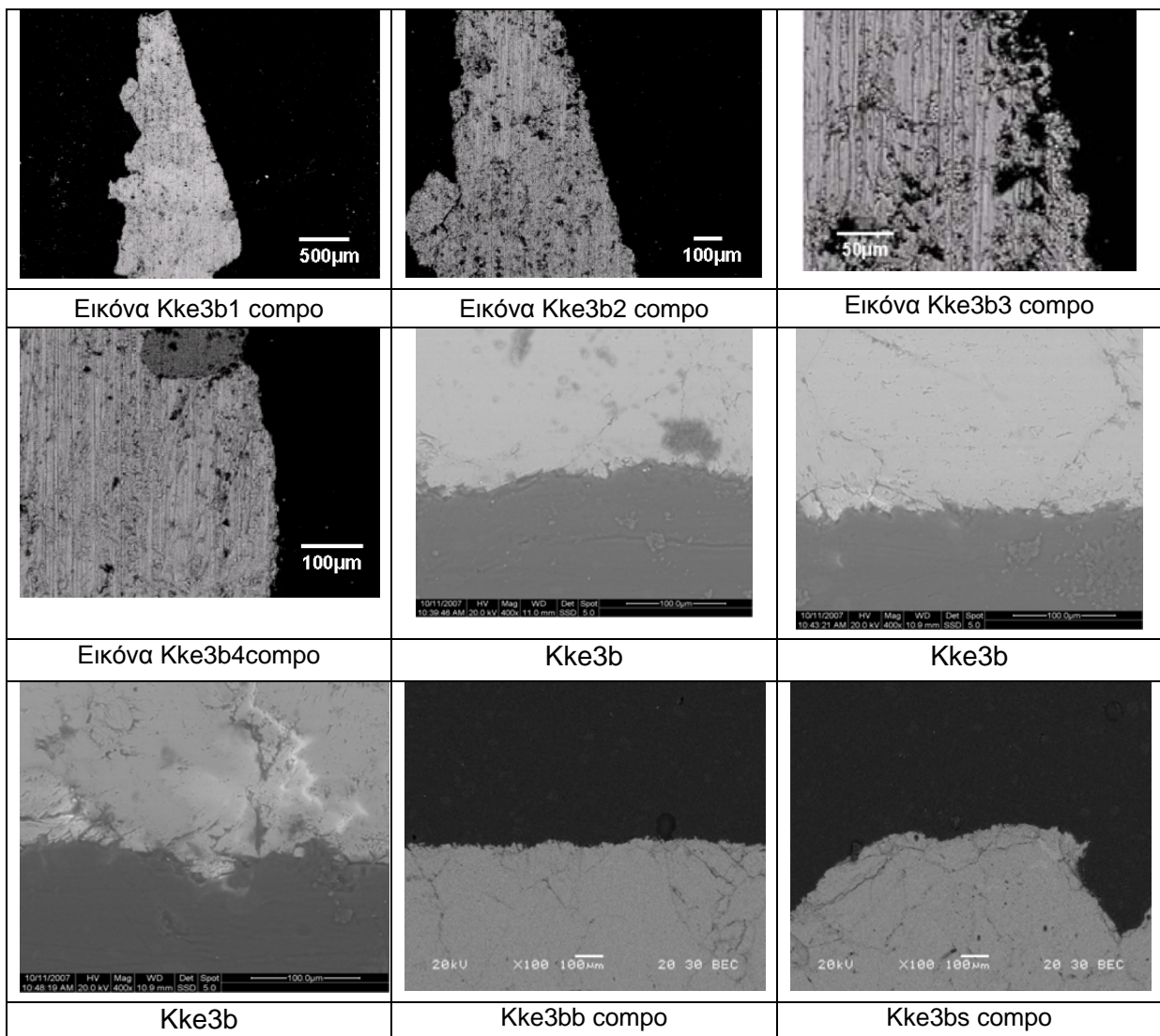
Κωδικός δείγματος Κκε3α1	EDS	Ca	S	Si	Na	K	Mg	Ba	Cl	Zn
	1 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	**	***	•	*	•	-	****	*	-
	2 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	3 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	****	-	-	*	-	-	-	•	-
	5 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	****	-	-	•	-	-	-	-	-
	6 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	*	***	•	*	•	-	****	•	*
	7 (Εικόνα Κκε3α,2 compo)	****	-	-	-	-	•	-	-	-
	8 (Εικόνα Κκε3α,3 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα Κκε3α,3 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	10 (Εικόνα Κκε3α,3 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	11 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	*	•	•	-	•	-	•	-
	12 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-
	13 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	14 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	•	-	-	-	-	-
	15 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	•	*	-	-	-	-	-
	16 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	•	-	-	-	•	-	-	-
	17 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	•	•	-	-	-	-	-	-
	18 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	19 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	20 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	*	-	*	-	-	-
	21 (Εικόνα Κκε3α,5 compo)	****	-	-	-	-	•	-	-	-
	22 (Εικόνα Κκε3α,6 compo)	****	-	**	*	-	•	-	-	-
	23 (Εικόνα Κκε3α,6 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Η πρόσθια όψη του ανάγλυφου (Kke3a1a) διατηρεί στρώμα μικροκρυσταλλικού γύψου μέσου πάχους 55μm, καθώς και ζώνη βαρύτη μέσου πάχους 5μm που βρίσκεται στην επιφάνεια της γυψοποιημένης ζώνης ή κάτω από αυτή. Επίσης, στην επιφάνεια παρουσιάζονται λίγο έως ίχνη χλωρίου και νατρίου, καθώς και ίχνη μαγνησίου, πυριτίου και καλίου.

Η πλάγια όψη του ανάγλυφου (Kke3a1k) παρουσιάζει έως και σε βάθος 25μm από την επιφάνεια στοιβάδα γύψου με αρκετά αργιλοπυριτικά επιφανειακά, η περιεκτικότητα των οποίων σταδιακά μειώνεται με την απομάκρυνση από την επιφάνεια. Παράλληλα, το δείγμα παρουσιάζει στην επιφάνεια του σποραδικά κόκκους θειικού βαρίου (βαρύτη) παρουσία ψευδαργύρου, (πιθανή κατεργασία με τη χρωστική του λιθοπονίου). Λίγος χαλκός ανιχνεύεται σε μικροανάλυση με παρουσία βαρύτη, στοιχείο που μπορεί εξίσου να προέρχεται από παλαιότερη κατεργασία με χρωστικές. Σίδηρος και ίχνη χλωρίου απαντώνται κυρίως επιφανειακά.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: διπλή εφαρμογή πάστας AB57 για 5 + 15min - Δείγμα Kke3b



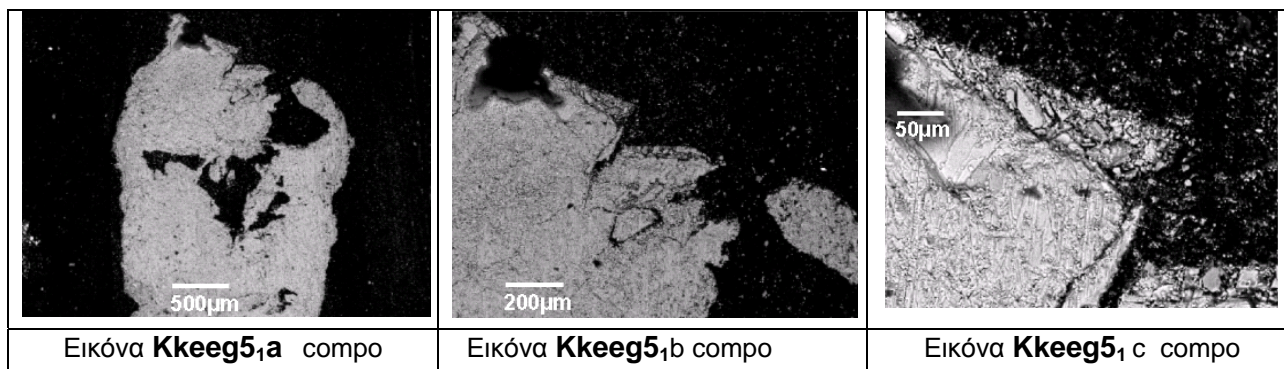
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

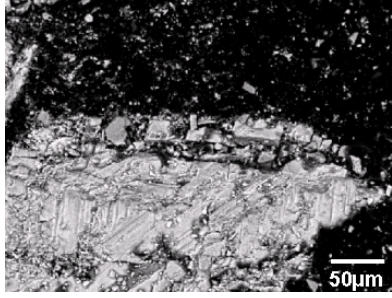
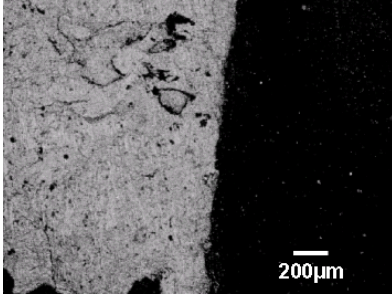
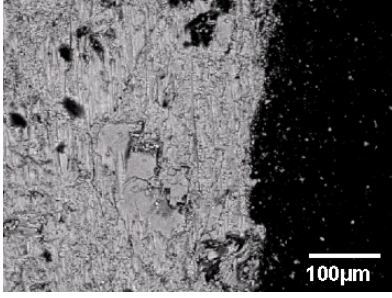
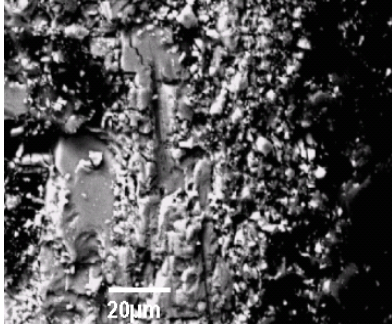
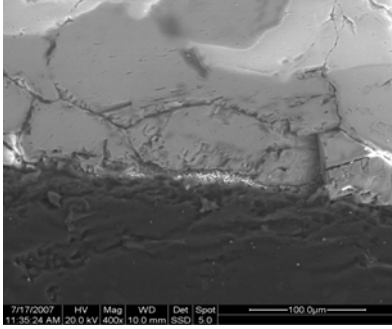
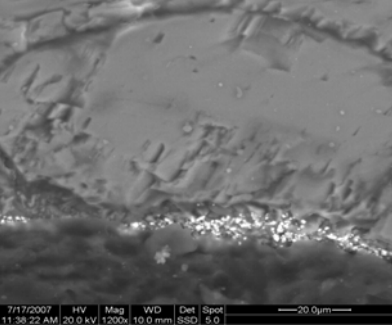
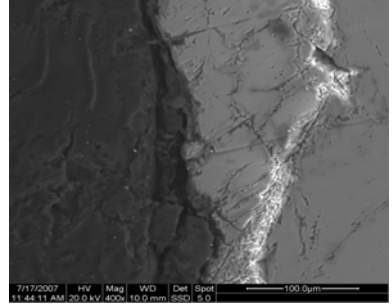
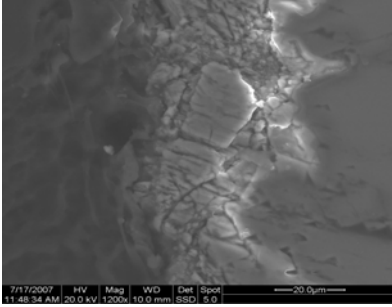
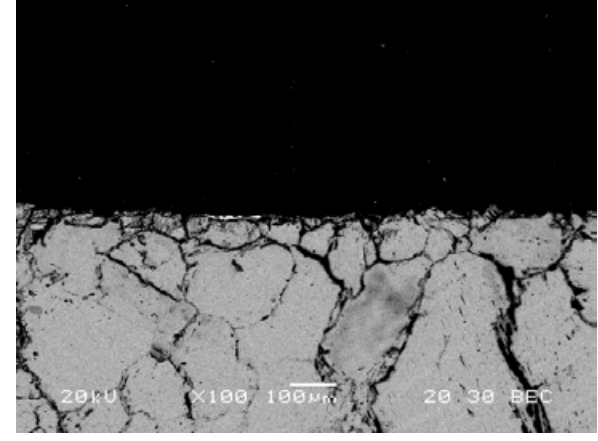
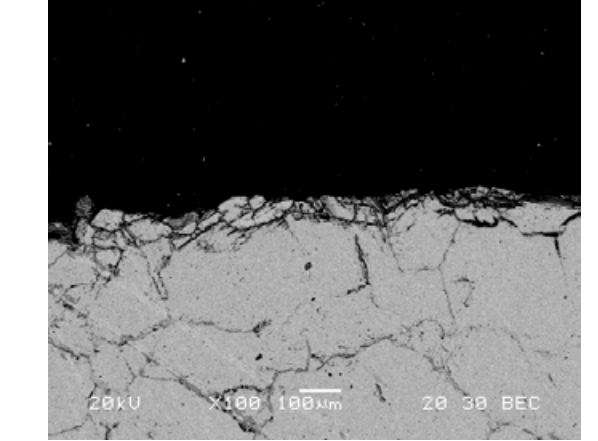
Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Al	Ba
Kke3b	1 (Εικόνα Kke3b3 compo)	****	-	•	•	-	-	-
	2 (Εικόνα Kke3b3 compo)	****	-	-	•	-	-	-
	3 (Εικόνα Kke3b3 compo)	****	-	-	•	•	-	-
	4 (Εικόνα Kke3b4 compo)	-	-	****	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Kke3b4 compo)	****	•	•	•	-	•	*
	6 (Εικόνα Kke3b4 compo)	****	-	•	•	•	-	-
	7 (Εικόνα Kke3b4 compo)	****	-	-	•	•	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Η επιφάνεια του δείγματος είναι καθαρά ασβεστιτική, ενώ εμφανίζει κόκκο με ίχνη θείου και βαρίου, καθώς και κόκκο χαλαζία. Επίσης, εντοπίζονται ίχνη πυριτίου, καλίου και μαγνησίου.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: υγρή μικροψηματοβολή - Δείγμα Kkeeg5₁



		
Εικόνα Kkeeg5₁ d compo	Εικόνα Kkeeg5₁ e compo	Εικόνα Kkeeg5₁ f compo
		
Εικόνα Kkeeg5₁ g shadow	Kkeeg5₁ a	Kkeeg5₁ a
		
Kkeeg5₁ k	Kkeeg5₁ k	
		
Kkeeg5₁ a compo	Kkeeg5₁ k compo	

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος EG5 ₁	EDS	Ca	S	Si	Na	Mg	K	Fe	Cl	Cd	Ni	
	1 (Εικόνα Kkeeg51c compo)	****	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-
	2 (Εικόνα Kkeeg51c compo)	****	**	-	**	-	-	-	-	-	-	
	3 (Εικόνα Kkeeg51 c compo)	****	-	•	*	-	•	•	-	-	-	
	4 (Εικόνα Kkeeg51c compo)	****	•	•	*	-	•	-	-	-	-	
	5 (Εικόνα Kkeeg51 c compo)	****	*	•	*	-	•	-	•	-	-	
	6 (Εικόνα Kkeeg51 c compo)	****	-	-	*	-	•	-	-	-	-	
	7 (Εικόνα Kkeeg51 c compo)	****	-	-	-	•	•	-	-	-	-	
	8 (Εικόνα Kkeeg51 d compo)	****	-	-	*	*	-	-	-	-	-	
	9 (Εικόνα Kkeeg51d compo)	•	-	****	-	-	-	-	-	-	-	
	10 (Εικόνα Kkeeg51d compo)	****	-	•	•	•	-	-	-	-	•	
	11 (Εικόνα Kkeeg51d compo)	****	-	-	*	-	•	-	-	-	-	
	12 (Εικόνα Kkeeg51d compo)	****	-	-	*	-	-	•	-	-	-	
	13 (Εικόνα Kkeeg51d compo)	****	-	-	*	-	-	-	-	-	-	
	14 (Εικόνα Kkeeg51 f compo)	****	-	-	*	-	•	-	-	-	-	
	15 (Εικόνα Kkeeg51f compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-	-	
	16 (Εικόνα Kkeeg51 f compo)	****	-	•	*	-	•	-	-	-	-	
17 (Εικόνα Kkeeg51 g compo)	****	-	-	*	-	•	-	-	-	•		

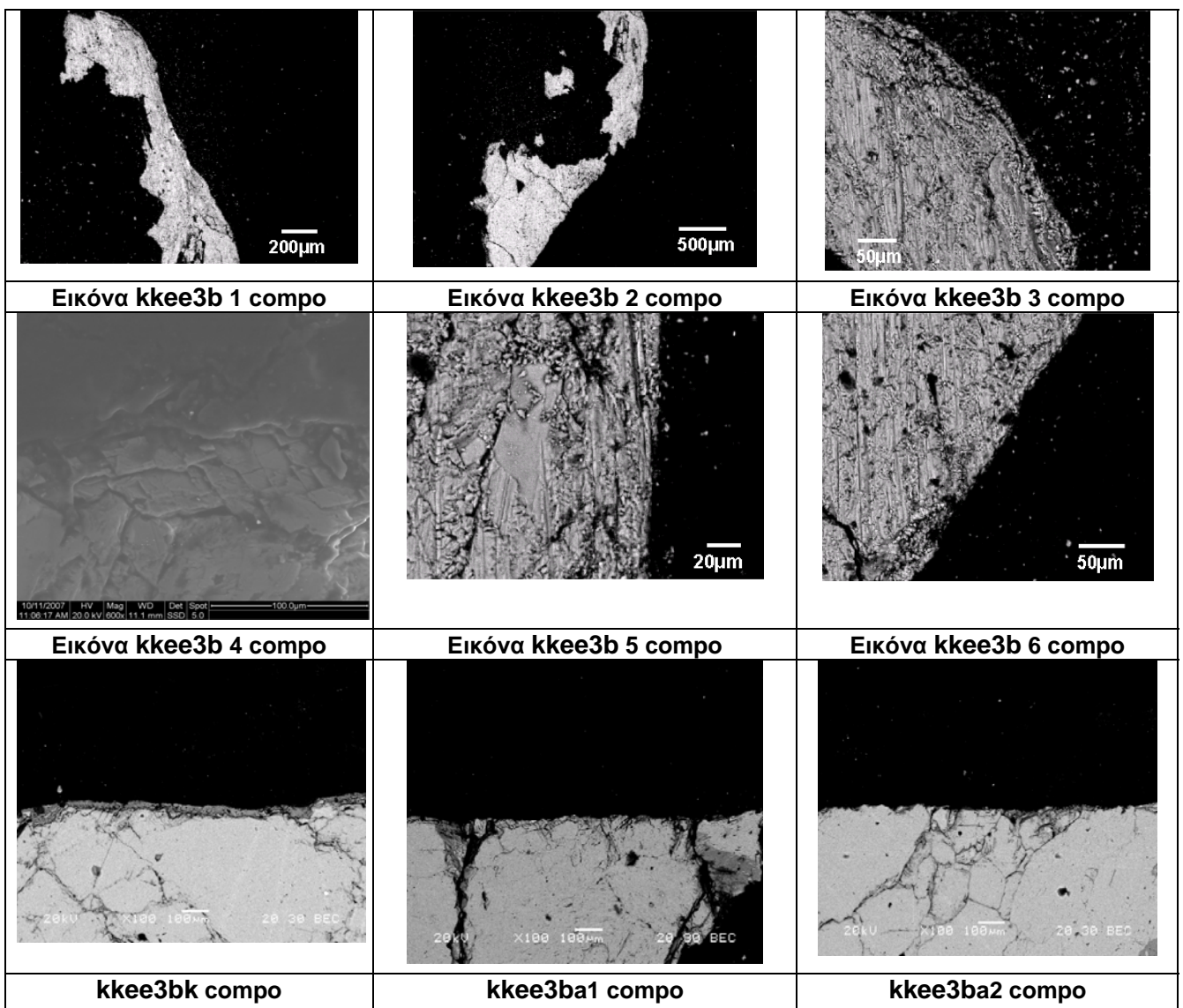
**** πολύ *** αρκετό

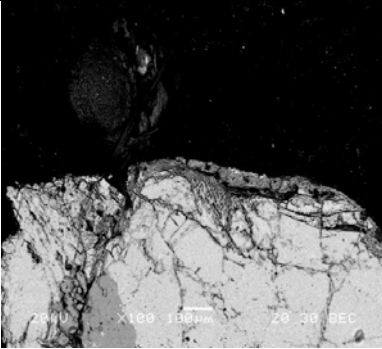
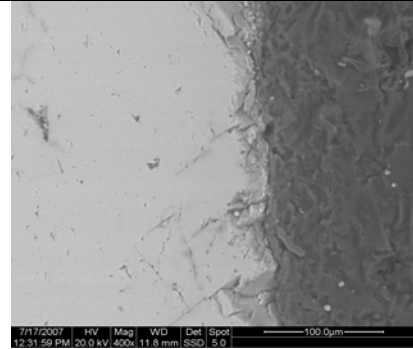
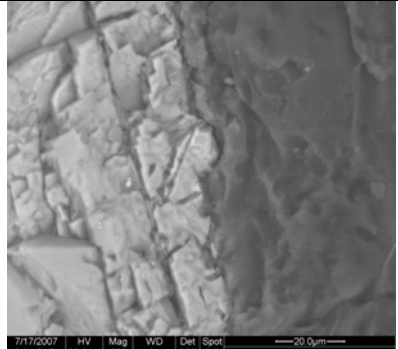
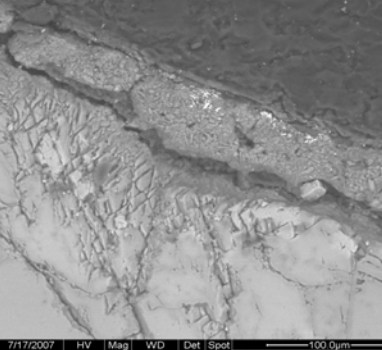
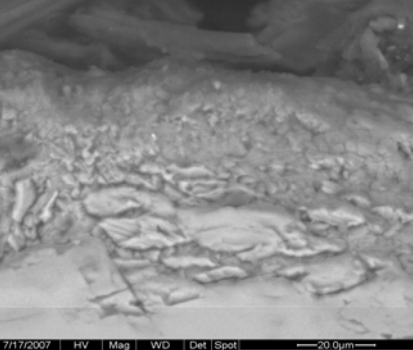
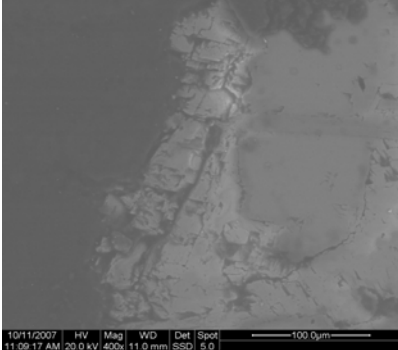
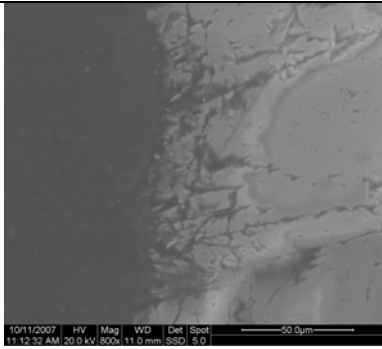
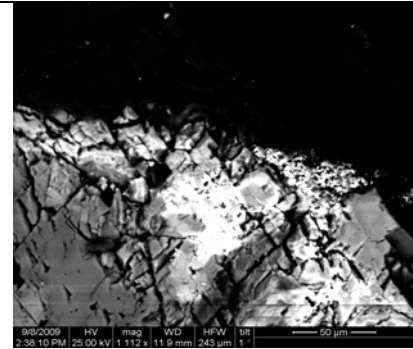
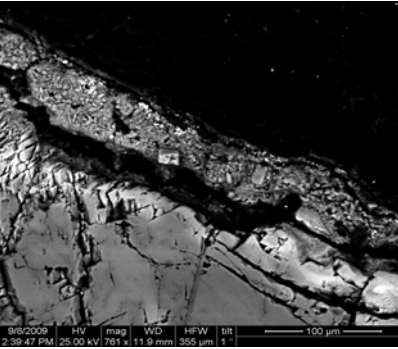
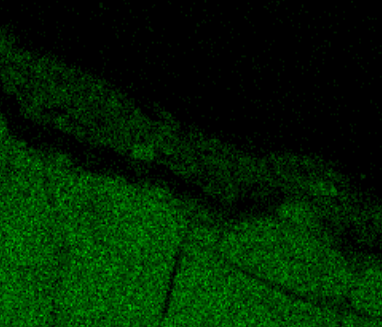
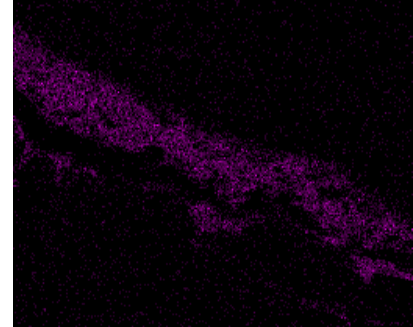
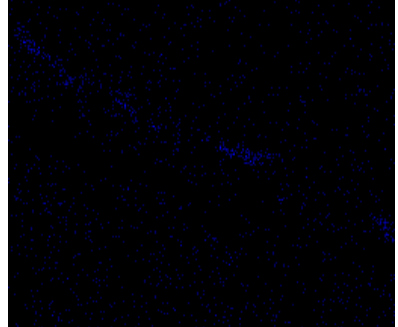
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στην πρόσθια όψη του ανάγλυφου παρατηρείται ζώνη μικροκρυσταλλικού γύψου μέσου πάχους 6μm. Ζώνη βαρύτη μέσου πάχους 3μm εμφανίζεται κατά τόπους στην επιφάνεια της γυψοποιημένης ζώνης.. Κόκκος χαλαζία εμφανίζεται επιφανειακά στην εικόνα (d).

Στην πλάγια όψη του δείγματος δεν απαντάται καθόλου θείο στην επιφάνεια του δείγματος, η σύσταση της οποίας είναι καθαρά ασβεστιτική. Ίχνη καλίου και λίγο νάτριο κάνουν την εμφάνισή τους σε αρκετούς κόκκους ασβεστίτη.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 20min - Δείγμα kkee3b



 <p>100 100µm 78.30 SEC</p>	 <p>7/17/2007 HV Mag WD Det Spot 12:31:59 PM 20.0 kV 400x 11.8 mm SSD 5.0</p> <p>100.0µm</p>	 <p>7/17/2007 HV Mag WD Det Spot 12:34:54 PM 20.0 kV 400x 11.9 mm SSD 5.0</p> <p>20.0µm</p>
<p>kkee3bk compo DS 20 min</p>	<p>kkee3ba</p>	<p>kkee3b a</p>
 <p>7/17/2007 HV Mag WD Det Spot 12:23:18 PM 20.0 kV 400x 11.9 mm SSD 5.0</p> <p>100.0µm</p>	 <p>7/17/2007 HV Mag WD Det Spot 12:28:14 PM 20.0 kV 1200x 11.9 mm SSD 5.0</p> <p>20.0µm</p>	 <p>10/11/2007 HV Mag WD Det Spot 11:09:17 AM 20.0 kV 400x 11.9 mm SSD 5.0</p> <p>100.0µm</p>
<p>kkee3b k</p>	<p>kkee3b k</p>	<p>kkee3b a</p>
 <p>10/11/2007 HV Mag WD Det Spot 11:12:32 AM 20.0 kV 600x 11.9 mm SSD 5.0</p> <p>50.0µm</p>	 <p>9/8/2009 HV mag WD HFW tilt 2:38:10 PM 25.00 kV 112x 11.9 mm 245 µm 1</p> <p>50 µm</p>	 <p>9/8/2009 HV mag WD HFW tilt 2:39:47 PM 25.00 kV 721x 11.9 mm 355 µm 1</p> <p>100 µm</p>
<p>kkee3b a</p>	<p>kkee3ba</p>	<p>kkee3bk mapping</p>
		
<p>Ca</p>	<p>S</p>	<p>Ba</p>

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος E3b	EDS	Ca	S	Si	Na	Mg	Ba	K	Zn	Al	Cl	P	
	1 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	***	•	-	-	-	-	-	-	•	•	-
	2 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	-	•	*	-	-	-	-	-	-	-	-
	3 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	*	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα κkee 3a3 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	*	•	-	•	-	-	•	-	-	-	-
	7 (Εικόνα κkee 3b3 compo)	****	-	-	*	-	-	-	•	-	-	-	-
	8 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	*	**	•	-	-	-	****	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	****	•	•	*	-	-	-	-	-	-	-	•
	10 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	****	•	-	*	-	-	-	•	-	-	-	-
	11 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	****	***	•	*	-	-	*	-	-	•	-	-
	12 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	****	***	•	*	-	-	•	•	*	•	•	-
	13 (Εικόνα κkee 3b4 compo)	****	***	•	-	-	-	-	-	-	•	•	-
	14 (Εικόνα κkee 3b5 compo)	****	•	*	*	•	-	-	-	-	•	-	-
	15 (Εικόνα κkee 3b5 compo)	****	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16 (Εικόνα κkee 3b5 compo)	****	-	•	*	-	-	-	-	-	-	-	-
	17 (Εικόνα κkee 3b5 compo)	****	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18 (Εικόνα κkee 3b5 compo)	****	***	•	*	-	-	-	-	-	-	•	-
19	****	***		*				•			•		

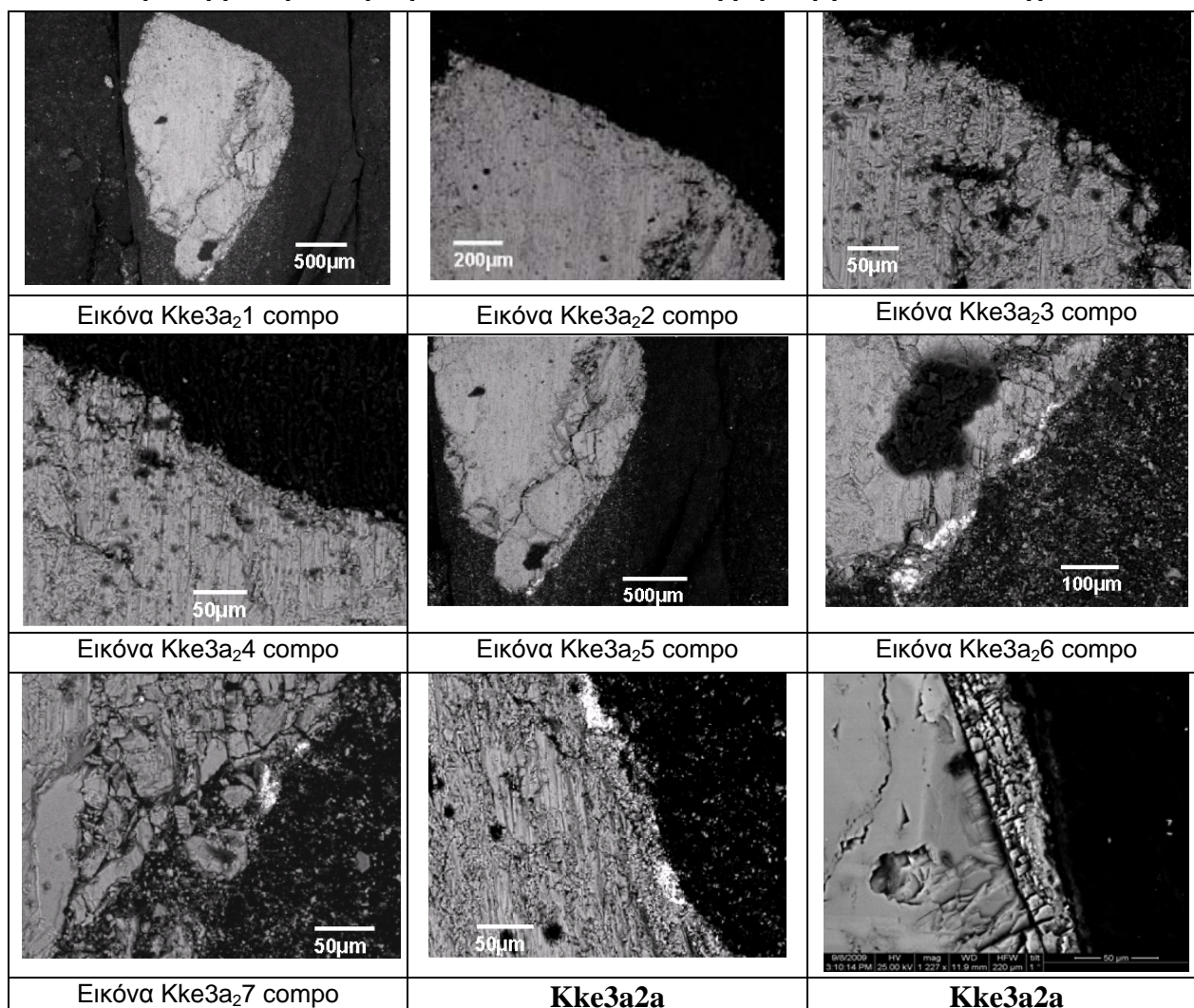
(Εικόνα kkee 3b6 compo)												
20 (Εικόνα kkee3b6 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-	•	-	-
21 (Εικόνα 3b6 compo)	****	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Η πρόσθια όψη του ανάγλυφου του δείγματος (kkee3ba) είναι ασβεστιτική και κατά περιοχές εμφανίζει ίχνη θείου και λίγο πυρίτιο και νάτριο.

Η πλάγια όψη του δείγματος εμφανίζει γυψοποιημένη ζώνη μέσου πάχους 55μm. Βαρύτης εντοπίζεται κατά τόπους στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου με μέσο πάχος 2μm.

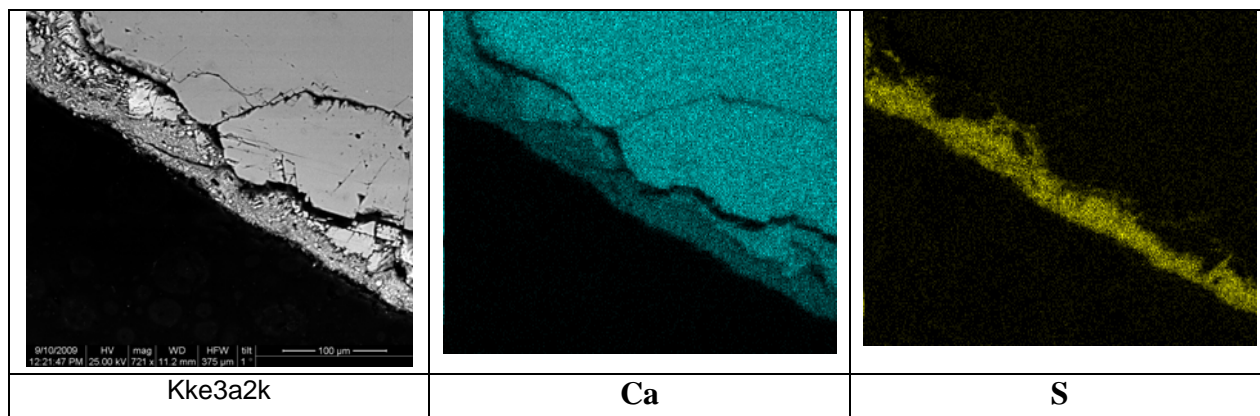
Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 10min - Δείγμα Kke3a2



Kke3a2k	Kke3a2k	Kke3a2k
Kke3a2k	Kke3a2a compo	Kke3a2k compo

Kke3a2a	Kke3a2a, χαρτογράφηση πρόσθιας όψης αναγλύφου	Ca
S	Ba	

Χαρτογράφηση πλάγιας όψης αναγλυφου



Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

ωδικός δείγματος Κκε3α2	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Cl	Al	Ba	Zn
	1 (Εικόνα Κκε3α ₂ 3 compo)	****	-	-	*	•	-	-	-	-
	2 (Εικόνα Κκε3α ₂ 3 compo)	****	•	•	•	-	-	-	-	-
	3 (Εικόνα Κκε3α ₂ 3 compo)	****	-	-	*	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Κκε3α ₂ 4 compo)	****	**	**	•	•	-	-	-	-
	5 (Εικόνα Κκε3α ₂ 4 compo)	****	**	-	*	-	-	•	-	-
	6 (Εικόνα Κκε3α ₂ 4 compo)	****	-	-	*	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Κκε3α ₂ 4 compo)	****	•	-	*	-	-	-	-	-
	8 (Εικόνα Κκε3α ₂ 6 compo)	**	***	*	•	-	-	-	****	*
	9 (Εικόνα Κκε3α ₂ 6 compo)	****	-	•	*	-	-	-	-	-
	10 (Εικόνα Κκε3α ₂ 6 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	11 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	**	-	*	•	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	***	*	•	-	•	-	-	-
	13 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	***	-	•	-	-	-	-	-
	14 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-
	15 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
16 (Εικόνα Κκε3α ₂ 7 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-	

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο

• ίχνη	- καθόλου
--------	-----------

Η πρόσθια επιφάνεια του δείγματος καλύπτεται από στοιβάδα γύψου της οποίας το μέσο πάχος είναι 55μm. ζώνη βαρύτερη μέσου πάχους 5μm παρουσιάζεται στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου ή κάτω από αυτό. Επίσης, στην επιφάνεια παρουσιάζονται λίγο έως ίχνη μαγνησίου, παρουσία πυριτίου, καθώς και ίχνη καλίου και αργιλίου.

Η πλάγια όψη του δείγματος του δείγματος παρουσιάζει γυψοποιημένη ζώνη μέσου πάχους 30μm. Δεν εντοπίζεται βαρύτερης. Επίσης, στην επιφάνεια παρουσιάζονται λίγο έως ίχνη μαγνησίου και πυριτίου, καθώς και ίχνη καλίου.

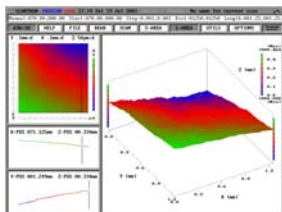
6.5.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον έλεγχο των δειγμάτων από την επιφάνεια των φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών των ανθεμίων του κιονάκρανου του ΕΑΜ, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υψής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια (ενεργή επιφάνεια), οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

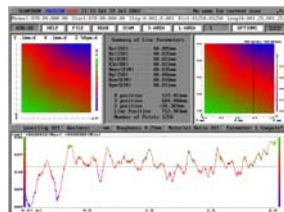
Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των ληφθέντων δειγμάτων από το ιστορικό κτίριο, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υψής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας των επεμβάσεων καθαρισμού που έχουν λάβει χώρα.

Στην συγκεκριμένη επιφάνεια ανάλογα με τον τρόπο κοπής του δείγματος, έλαβαν χώρα μετρήσεις τόσο τις πρόσθιες επιφάνειες όσο και στις πλάγιες επιφάνειες του ανάγλυφου.

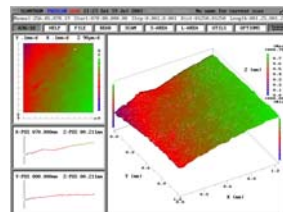
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών των δειγμάτων, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για την περιοχή όπου έλαβε χώρα η σάρωση με τη χρήση της laser προφίλομετρίας.



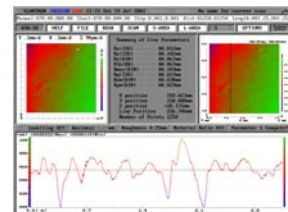
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kke1ao



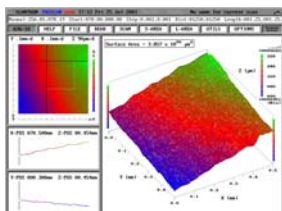
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kke1ao



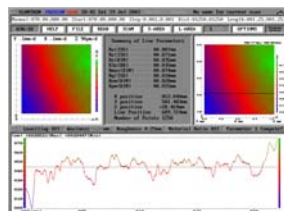
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kke1aa



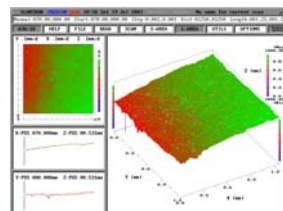
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kke1aa



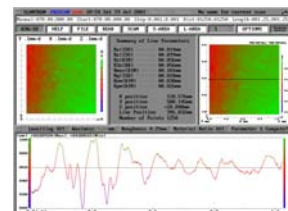
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke1b



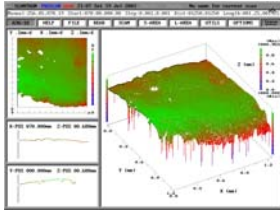
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Kke1b



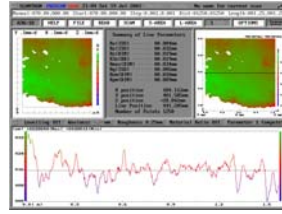
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke2aa



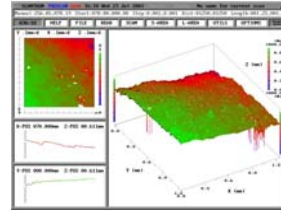
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα Kke2aa



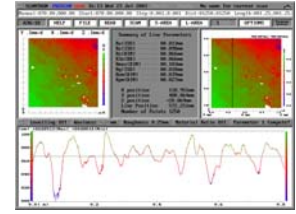
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke2ak



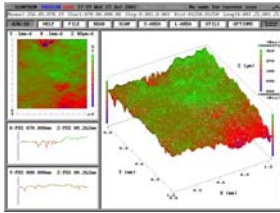
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke2ak



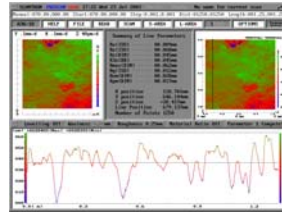
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke2ba1



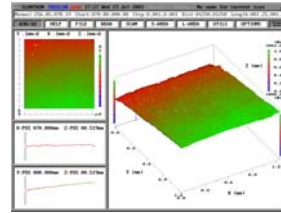
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke2ba1



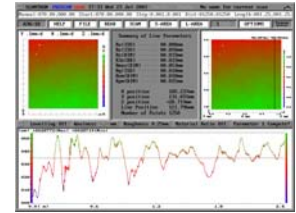
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke3a1a



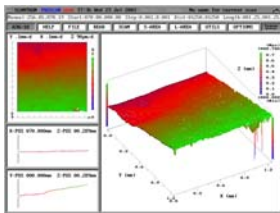
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke3a1a



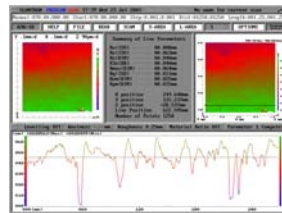
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke3a2a



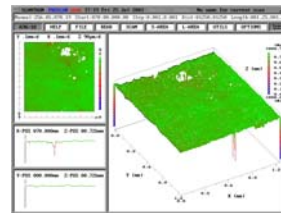
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke3a2a



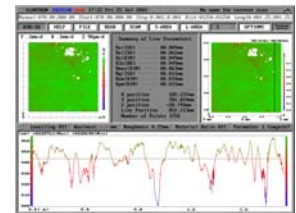
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke3a2k



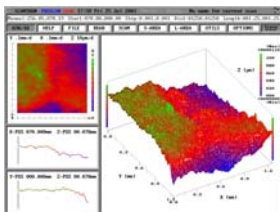
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke3a2k



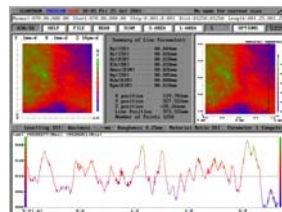
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke3b



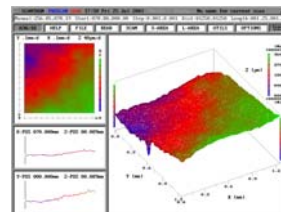
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke3b



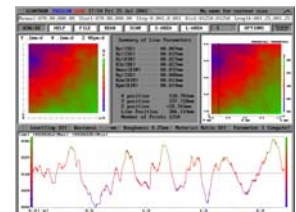
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kked1o



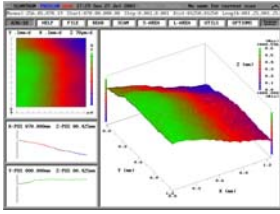
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kked1o



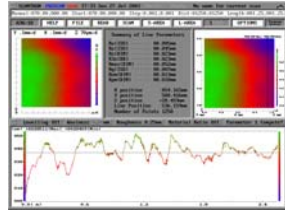
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kked1a



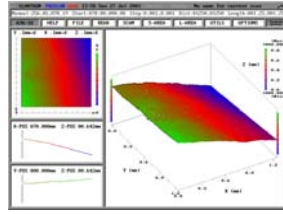
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kked1a



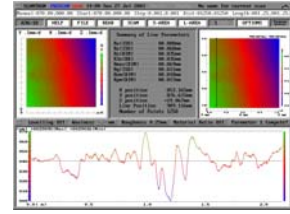
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kkeega



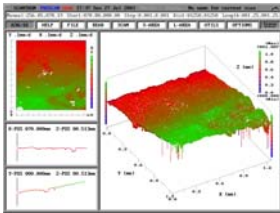
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα kkeega



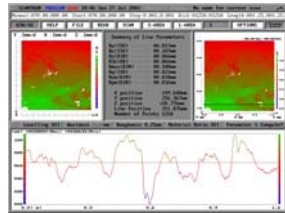
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kke3ba



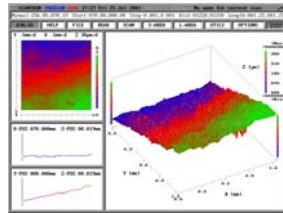
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kke3ba



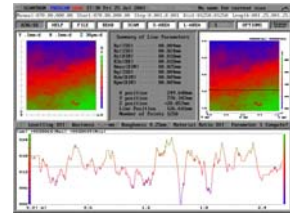
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα Kkeeg51a



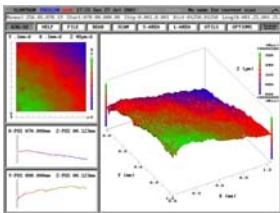
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα Kkeeg51a



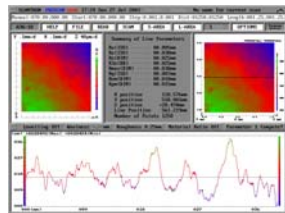
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kkeeraa



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα kkeeraa



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kkeerak



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας Rq – δείγμα kkeerak

Στον Πίνακα 6.5.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε μm στα ληφθέντα δείγματα πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του Rq των 50 γραμμικών προφίλ για τον άξονα X (Rqx) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (Rqy), καθώς και το κατώτερο -1° και ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του Rq (δηλ. οι τιμές Rq που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή Rq από τις δύο συγκρινόμενες Rqx και Rqy, η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 6.5.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Rqx (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Χ άξονας		Rqy (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Υ άξονας		Rq (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
Kke1ao	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	4	4	5	6	5	6	6	5	6
Kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	11	11	15	10	9	16	11	11	15
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	9	9	11	7	6	9	9	9	11
Kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	15	13	18	14	13	18	15	13	18
Kke2ak	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	10	9	12	—	—	—	10	9	12
Kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	20	16	28	22	17	32	22	17	32
Kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	12	10	16	17	13	22	17	13	22
Kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	7	6	9	11	10	12	11	10	12
Kke3a2k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	7	6	8	10	9	13	10	9	13
Kke3b	ΓΙΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	10	8	13	10	9	12	10	9	12
Kked1o	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	4	3	4	5	4	5	5	4	5
Kked1a	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	6	5	7	7	7	8	7	7	8
kkeega	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	6	6	7	7	7	8	7	7	8
Kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	10	9	10	5	4	7	10	9	10
Kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	21	15	29	30	21	34	30	21	34
kkeeraa	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	6	5	7	8	7	9	8	7	9
kkeerak	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	6	5	7	6	5	7	6	5	7

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της τραχύτητας των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Οι

διαφοροποιήσεις αυτές ενισχύονται και από το γεγονός ότι η πρόσθια όψη του ανάγλυφου διαθέτει άλλη διαστρωμάτωση φθοράς σε σχέση με αυτή της πλάγιας όψης του ανάγλυφου, ενώ μεγάλο ρόλο παίζει και το τμήμα του ανάγλυφου που ελήφθη το δείγμα κεντρικά, δεξιά ή αριστερά. Έτσι, στα δείγματα που προέρχονται από το κεντρικό τμήμα του ανάγλυφου και είναι πρόσθιας όψης, κατάσταση αναφοράς αποτελεί το δείγμα kked1a. Στα δείγματα που προέρχονται από το κεντρικό τμήμα του ανάγλυφου και είναι πλάγιας όψης, κατάσταση αναφοράς αποτελεί το δείγμα kked1o, ενώ για τον καθαρισμό της υγρής μικροψηγηματοβολής δείγματα αναφοράς είναι τα kkeeraa και kkeerak (πρόσθια και πλάγια όψη αντιστοίχως). Τέλος για τον καθαρισμό της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά, μέτρηση αναφοράς αποτελεί αυτή του δείγματος kkeega. Συμπερασματικά δε, αναφέρονται τα εξής:

- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας R_q στις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό, διαπιστώνεται η αύξηση της σε σχέση με την αντίστοιχη επιφάνεια της διάγνωσης της φθοράς. Η αύξηση του χρόνου εφαρμογής της πάστας οδηγεί σε επιφάνειες που παρουσιάζουν αυξομειώσεις όσον αφορά στις τιμές της τραχύτητας, που δείχνουν όμως να εξαρτώνται από τη δραστηριότητά της, αφού μόνο η δεκάλεπτη εφαρμογή διατηρεί τη γυψοποιημένη επιφάνεια, καθώς και τμήμα της πάτινας του θειικού βαρίου.
- Υψηλότερες τιμές τραχύτητας εμφανίζουν οι επιφάνειες όπου καθαρίστηκαν με ιοντοανταλλακτική ρητίνη και ανθρακικό αμμώνιο αν συγκριθούν με τις επεμβάσεις που περιλαμβάνουν μόνο απιονισμένο νερό. Η αύξηση του χρόνου εφαρμογής της πάστας οδηγεί σε επιφάνειες που παρουσιάζουν αυξομειώσεις όσον αφορά στις τιμές της τραχύτητας, που δείχνουν όμως να εξαρτώνται από τη δραστηριότητά της, αφού μόνο η δεκάλεπτη εφαρμογή διατηρεί τη γυψοποιημένη επιφάνεια, καθώς και σημαντικό ποσοστό της πάτινας του θειικού βαρίου.
- Την υψηλότερη τιμή επιφανειακής τραχύτητας παρουσιάζει η επιφάνεια που εφαρμόστηκε η υγρή μικροψηγηματοβολή, ενώ η πάστα AB57 παρουσιάζει ενδιάμεση τιμή R_q .

Στον παρακάτω Πίνακα 6.5.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς καθώς και σε αυτές μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm^2 , του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm^2 , ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσημο τρόπο την απόκλιση από την επιτεδότητα.

Πίνακας 6.5.3.2: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Εμβαδόν Προβαλλόμενη επιφάνειας (mm ²)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm ²)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδό προβαλλόμενης επιφάνειας	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
Kke1ao	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,022	1,296	29,62%
Kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,524	2,410	1,581	58,14%
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,437	1,562	56,22%
Kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,541	2,921	1,896	89,55%
Kke2ak	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,298	2,336	1,800	79,97%
Kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,457	3,417	2,345	134,52%
Kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,986	1,914	91,41%
Kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,501	2,314	1,542	54,16%
Kke3a2k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,520	2,411	1,586	58,62%
Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,410	2,454	1,740	74,04%
Kked1o	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	1,960	1,256	25,64%
Kked1a	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,107	1,351	35,06%
Kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,416	1,549	54,87%
kkeega	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,256	1,446	44,62%
Kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,416	3,671	2,593	159,25%
kkeeraa	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,218	1,422	42,18%
kkeerak	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,560	2,142	1,373	37,31%

Αντίστοιχες είναι οι διαπιστώσεις και από τα παραπάνω αποτελέσματα του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια:

- Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια), σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με την αντίστοιχη επιφάνεια της διάγνωσης της φθοράς, διαπιστώνεται αύξηση του, σε όλες τις περιπτώσεις
- Η αύξηση του ποσοστού μεταβολής του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής για τις περιοχές kke2b και kkeeg51a είναι πολύ υψηλό, υποδεικνύοντας την παραγωγή επιφανειών μετά τους συγκεκριμένους καθαρισμούς με μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.
- Ενδιάμεσα ποσοστά μεταβολής του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής καταγράφονται για τις περιοχές kke3a2a, kke3a2k και kke3ba.

Πίνακας 6.5.3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Rq (μm)
Kke1ao	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,296	6
Kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,581	11
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,562	9
Kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,896	15
Kke2ak	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,800	10
Kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	2,345	22
Kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,914	17
Kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,542	11
Kke3a2k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,586	10
Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,740	10
Kked1o	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,256	5
Kked1a	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,351	7
Kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,549	10
kkeega	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,446	7
Kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	2,593	30
kkeeraa	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,422	8
kkeerak	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1,373	6

6.5.4 Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής στις γυψοποιημένες ανάγλυφες επιφάνειες του κιονόκρανου του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης των πρόσθιων όψεων των δειγμάτων και εμφανίζονται στον πίνακα 6.5.4.2, μελετήθηκαν και ως προς τη μεταξύ τους συσχέτιση υπολογίζοντας τους συντελεστές Pearson για τις παραμέτρους (πίνακας 6.5.4.1): τη fractal διάσταση (D) και το συντελεστή μορφής (Γ), την πυκνότητα ρηγματώσεων (FD) και το συντελεστή ευθρυπτότητας (FI), την πυκνότητα ρηγματώσεων (FD) και το συντελεστή μορφής (Γ), τη fractal διάσταση (D) και την πυκνότητα ρηγματώσεων (FD), το συντελεστή μορφής (Γ) και το συντελεστή ευθρυπτότητας (FI), τη fractal διάσταση (D) και το συντελεστή ευθρυπτότητας (FI). Τα αποτελέσματα για τα δείγματα πρόσθιας όψης είναι:

$\rho D/\Gamma$	0,98
$\rho FD/FI$	0,99
$\rho FD/\Gamma$	0,98
$\rho D/FD$	0,96
$\rho \Gamma/FI$	1,00
$\rho D/FI$	0,98

Πίνακας 6.5.4.1: Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης

Όσον αφορά τη fractal διάσταση των δειγμάτων, γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η μετρούμενη τραχύτητα αυξάνεται.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το δείγμα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη fractal διάσταση είναι αυτό με επιφάνεια που καθαρίστηκε με την υγρή μικροψηγηματοβολή (kkeeg51a). Η υψηλή τιμή του δείγματος μπορεί να δικαιολογηθεί από την έντονη, μη ομοιογενής και ομοιόμορφη δράση της μεθόδου αυτής. Η πρόσκρουση των σφαιρικών ασβεστιτικών σωματιδίων στην επιφάνεια του μαρμάρου οδήγησε στη μηχανική καταπόνηση του και στην αύξηση των τιμών των παραμέτρων που περιγράφουν την κατάσταση της επιφάνειας (Γ, FD, FI). Έτσι κατατάσσεται το δείγμα στις ψηλότερες θέσεις μεταξύ των δειγμάτων παρουσιάζοντας τιμές κοντά στο δείγμα που καθαρίστηκε με την ιοντοανταλλακτική ρητινή για 20min και λίγο πιο κάτω από αυτές που έδωσε το δείγμα διάγνωσης (kked1a2).

Από τον πίνακα 6.5.4.1 φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης είναι υψηλός και ίσος με 0,98, άρα η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μεγάλη.


Η γενική κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από την επιφάνεια με το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής Γ (πιο τραχιά επιφάνεια) και καταλήγοντας στην επιφάνεια με τον μικρότερο (πιο λεία επιφάνεια) είναι η εξής:

Υγρή μικροψηγηματοβολή	5,17	↓ Τραχιά επιφάνεια	
DS 20min	4,96		
DS 1h	4,85		
DS 10min	3,72		
DS+NC 20min	3,54		
DS+NC 40min	3,28		
DS+NC 10min	3,12		
DS 30min	2,76		↓
AB57 5+15min	2,44		Λεία επιφάνεια

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση συντελεστή μορφής Γ

Συνεπώς, η υψηλή τιμή του συντελεστή Γ υποδηλώνει και την υψηλή τραχύτητα του δείγματος, ενώ όσο μειώνεται ο συντελεστής μορφής τόσο πιο λεία και επίπεδη είναι η επιφάνεια του δείγματος.

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100 μm. Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:


Υγρή μικροψηγατοβολή	36,6%		Μεγάλη πυκνότητα ρηγματώσεων	
DS 20min	36,5%			
DS+NC 20min	27,9%			
DS 1h	26,4%			
DS 10min	23,1%			
DS+NC 40min	20,3%			
DS+NC 10min	16,1%			
DS 30min	11,3%			
AB57 5+15min	11,2%			Μικρή πυκνότητα ρηγματώσεων

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση πυκνότητας ρηγματώσεων FD

Ο συντελεστής μορφής και η πυκνότητα ρηγματώσεων που αντιστοιχούν στο δείγμα διάγνωσης, αντικατοπτρίζουν, με λογικές και υψηλές τιμές, το τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας όπου το επιφανειακό στρώμα συνίσταται σε αργιλοπυριτικές επικαθίσεις και αδρόκοκκο γύψο. Τα δείγματα που κατεργάστηκαν με υγρή μικροψηγατοβολή και ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 20min έδωσαν υψηλές τιμές. Επίσης, το δείγμα που έχει κατεργασθεί με την πάστα AB57 κατέχει και στις δύο ταξινομήσεις τις χαμηλότερες τιμές που πιθανολογείται ότι οφείλεται στην ισχυρή δράση της πάστας που απομακρύνει το στρώμα γύψου δηλαδή αυθεντικό υλικό.

Από τον πίνακα 6.5.4.1 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης είναι και αυτοί υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,98 και 0,96. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθρυπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά και φυσικομηχανικά ευσταθέστερη επιφάνεια), είναι ίδια με τη κατάταξη που γίνεται με βάση το συντελεστή μορφής. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε η παρακάτω κατάταξη:

Υγρή μικροψηγατοβολή	63,38%		Περισσότερο εύθρυπτη επιφάνεια	
DS 20min	61,60%			
DS 1h	55,20%			
DS+NC 20min	45,09%			
DS 10min	43,79%			
DS+NC 40min	38,57%			
DS+NC 10min	35,12%			
DS 30min	29,78%			
AB57 5+15min	26,87%			Λιγότερο εύθρυπτη επιφάνεια

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση συντελεστή ευθρυπτότητας FI

Δείγματα	Περιγραφή	Οριακές τιμές		Pixel Count (L)	L* (Pixels)	Fractal Dimension	Συντελεστής Μορφής (Γ)	FD. (%)	Συντελεστής ευθρυπτότητας (%)
		T _U	T _L						
kke3a1a	DS+NC 10min	91	74	746	512	1,099	3,12	16,1	35,12
kke2ba	DS+NC 20min	142	67	838	512	1,114	3,54	27,9	45,09
kke2aa	DS+NC 40min	78	35	790	512	1,088	3,28	20,3	38,57
kke3a2a	DS 10min	95	33	871	512	1,129	3,72	23,1	43,79
kkee3ba2	DS 20min	94	41	830	384	1,199	4,96	36,5	61,60
kke1b	DS 30min	82	55	673	512	1,068	2,76	11,3	29,78
kke1aa	DS 1h	31	1	1103	512	1,170	4,85	26,4	55,20
kke3bb	AB57 5+15min	70	57	609	512	1,038	2,44	11,2	26,87
kkeeg51a	Υγρή Μικροπηγματοβολή	100	13	1046	512	1,204	5,17	36,6	63,38
kked1a2	Δείγμα διάγνωσης (κεντρικό τμήμα)	70	21	1150	429	1,198	5,59	42,1	70,01
kkeeraa	Δείγμα διάγνωσης (αριστερό τμήμα)	68	25	1000	550	1.182	4.54	35.3	57.49
kkeega	Δείγμα διάγνωσης (δεξί τμήμα)	88	29	833	512	1.112	3.52	21.1	41.01

Πίνακας 6.5.4.2: Αποτελέσματα επεξεργασίας δειγμάτων πρόσθιας όψης της επιφάνειας των ανθεμίων του κιονόκρανου στο EAM

Από τον πίνακα 6.5.4.1 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και fractal διάστασης είναι υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,99 και 0,98. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Από τις υψηλές τιμές όλων των συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης, συμπεραίνουμε ότι η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη. Από το γεγονός αυτό και ειδικότερα από τον μεγάλο βαθμό αναλογίας μεταξύ fractal διάστασης και πυκνότητας ρηγματώσεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τελικά επιλεγόμενες τιμές των T_L και T_U , σε κάθε περίπτωση εικόνας, υπήρξαν κατάλληλες για την ορθή διαδικασία βαθμονόμησης των εικόνων SEM των δειγμάτων (η βαθμονόμηση, σε κάθε εικόνα, υπήρξε αντιπροσωπευτική των στοιχείων που αυτή παρουσίαζε και οδήγησε, στη συνέχεια, στον υπολογισμό αντιπροσωπευτικών δεικτών αποτίμησης).

Δείγματα πλάγιας όψεως ανάγλυφου

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Πίνακας 6.5.4.4) της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας των πλαγίων όψεων των δειγμάτων του αναγλύφου του κιονόκρανου στο EAM.

Η εξάρτηση και αναλογία των εξεταζόμενων παραμέτρων αποδείχθηκε με τους συντελεστές Pearson. Γίνεται εμφανές από τον πίνακα 6.5.4.3 ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων και αλληλεξάρτηση.

$\rho D/\Gamma$	0,92
$\rho FD/FI$	0,96
$\rho FD/\Gamma$	0,90
$\rho D/FD$	0,85
$\rho \Gamma/FI$	0,99
$\rho D/FI$	0,92

Πίνακας 6.5.4.3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης

Το δείγμα με τη μεγαλύτερη fractal διάσταση και το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής, είναι εκείνο που αντιστοιχεί στην κατεργασία με ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 10 min (kke3a2k). Πράγματι από την εικόνα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης γίνεται εμφανής ο λόγος που το δείγμα έδωσε υψηλούς συντελεστές αφού όχι μόνο η επιφάνεια αλλά και το εσωτερικό του μαρμάρου είναι καταπονημένο και υπερβολικά ρηγματωμένο. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της fractal διάστασης, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη τραχύτητα αυξάνεται (έντονο ανάγλυφο \Rightarrow μεγάλη τραχύτητα). Από τον πίνακα 6.5.4.3 φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης είναι υψηλός και ίσος με 0,92, άρα η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μεγάλη.

Δείγματα	Περιγραφή	Οριακές τιμές		Pixel Count (L)	L* (Pixels)	Fractal Dimension	Συντελεστής Μορφής (Γ)	FD. (%)	Συντελεστής ευθρυπτότητας (%)
		T _u	T _L						
kke3a2k	DS 10min	96	54	1469	456	1,235	7,58	53,2	92,63
kkee3bk	DS 20min	76	29	991	512	1,135	4,25	40,0	58,37
Kke3a1k	DS+NC 10min	72	43	688	512	1.078	2.90	17.3	33.75
kke2bk	DS+NC 20min	71	45	695	512	1,070	2,85	15,2	32,30
kke2ak	DS+NC 40min	72	40	669	319	1,207	4,84	38,3	61,73
kke1ao	DS 1h	65	2	644	512	1.052	2.61	37.3	45.51
kkeeg51k	Υγρή Μικροψηγατοβολή	76	25	1139	512	1,193	5,09	31,7	59,93
kkeerak	Διάγνωσης (αριστερό τμήμα)	83	38	936	512	1,178	4,14	32,2	52,42
kkeego	Διάγνωσης (δεξί τμήμα)	78	32	856	452	1,148	4,20	29,8	51,47
kkeegg	Διάγνωσης (δεξί τμήμα)	45	34	682	512	1,073	2,80	16,1	32,32
kked1k	Διάγνωσης (κεντρικό τμήμα)	85	40	651	512	1,057	2,65	15,4	30,61

Πίνακας 6.5.4.4: Αποτελέσματα επεξεργασίας δειγμάτων πλάγιας όψης της επιφάνειας των ανθεμίων του κιονόκρανου στο EAM

Η γενική κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από την επιφάνεια με το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής (πιο τραχιά επιφάνεια) και καταλήγοντας στην επιφάνεια με τον μικρότερο (πιο λεία επιφάνεια) είναι η εξής:

DS 10min	7,58	↓	Τραχιά επιφάνεια
Υγρή μικροψηγηματοβολή	5,09		
DS+NC 40min	4,84		
DS 20min	4,25		Λεία επιφάνεια
DS+NC 10min	2,90		
DS+NC 20min	2,85		
DS 1h λευκή	2,61		

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση συντελεστή μορφής Γ

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100μm. Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:

DS 10min	53,2%	↓	Μεγάλη πυκνότητα ρηγματώσεων
DS 20min	40,0%		
DS+NC 40min	38,3%		
DS 1h λευκή	37,3%		Μικρή πυκνότητα ρηγματώσεων
Υγρή μικροψηγηματοβολή	31,7%		
DS+NC 10min	17,3%		
DS+NC 20min	15,2%		

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση πυκνότητας ρηγματώσεων FD

Όλα τα δείγματα, εκτός των δειγμάτων της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα ανθρακικού αμμωνίου για 10min και 20min, παρουσιάζουν υψηλές έως και πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων, περιγράφοντας αντίστοιχα καταπονημένες επιφάνειες.

Παρατηρώντας τις τιμές του συντελεστή μορφής Γ και πυκνότητα ρηγματώσεων FD διαπιστώνεται:

- Οι επιφάνειες που κατεργάστηκαν με τη μέθοδο της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 20min και 10min παρουσίασαν χαμηλές τιμές στους δείκτες αποτίμησης
- Η επιφάνεια που έδωσε τις υψηλότερες τιμές συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων είναι αυτή που καθαρίστηκε με ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 10min ($\Gamma=7,58$, $FD=53,2\%$). Η μικροανάλυση ακτίνων Χ έδειξε στρώμα βαρύτη που επικαλύπτει στρώμα γύψου ή κόκκους βαρύτη ενταγμένους στον επιφανειακό ασβεστίτη που αποκαλύφθηκε. Η επιφάνεια, είναι τραχιά και έντονα ρηγματωμένη.

- Η επιφάνεια του δείγματος που αντιστοιχεί στη μέθοδο της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 20min, παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων, καθώς και σχετικά υψηλό συντελεστή μορφής ($\Gamma=4,25$). Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία των χημικών αναλύσεων, διαπιστώνεται ότι η μέθοδος αυτή παράγαγε μια έντονα γυψοποιημένη επιφάνεια με υπολείμματα $BaSO_4$. Από την εικόνα, επίσης που λήφθηκε από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δικαιολογούνται οι υψηλές τιμές και των δύο παραμέτρων αφού η επιφάνεια είναι ρηγματωμένη με εμφανή την παρουσία στρώματος γύψου.
- Η μέθοδος της υγρής ψηγματοβολής ενώ έδωσε το δεύτερο υψηλότερο συντελεστή μορφής, βρίσκεται στη μεσαία θέση της κατάταξης βάση της πυκνότητας ρηγματώσεων με τιμή 31,7%. Από την εικόνα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διαπιστώνεται η απομάκρυνση του στρώματος γύψου προκαλώντας μία εύθραπτη επιφάνεια με αρκετές ρωγμές. Επειδή η υγρή μικροψηγματοβολή είναι μια μηχανικής δράσης και μη εκλεκτική μέθοδος, η αποτελεσματικότητά της οποίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία του χειριστή, απομάκρυνε τον υπάρχοντα γύψο, αυξάνοντας την τραχύτητα της επιφάνειας και προκαλώντας απώλεια αυθεντικού υλικού.

Από τον πίνακα 6.5.4.4 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης είναι και αυτοί υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,90 και 0,85. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθραπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια), παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με την κατάταξη που γίνεται με βάση το συντελεστή μορφής, ιδιαίτερα στις υψηλότερες και στις χαμηλότερες θέσεις.

DS 10min	92,63%	↑ Περισσότερο εύθραπτη επιφάνεια ↓ Λιγότερο εύθραπτη επιφάνεια
DS+NC 40min	61,73%	
Υγρή μικροψηγματοβολή	59,93%	
DS 20min	58,37%	
DS 1h λευκή	45,51%	
DS+NC 10min	33,75%	
DS+NC 20min	32,30%	

Ταξινόμηση δειγμάτων βάση συντελεστή ευθραπτότητας FI

Από την κατάταξη βάση του συντελεστή ευθραπτότητας παρατηρείται:

- Η επιφάνεια που κατεργάστηκε με τη μέθοδο της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 10 λεπτά έδωσε εξαιρετικά υψηλό συντελεστή ($FI=92,63\%$) που υποδηλώνει μία ιδιαίτερα φυσικοχημικά και φυσικομηχανικά ασταθής επιφάνεια.
- Τη χαμηλότερη τιμή συντελεστή ευθραπτότητας, από τις μεθόδους καθαρισμού, παρουσίασε η μέθοδος της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(NH_4)_2CO_3$ για 20min ($FI=32,30\%$) και αναφέρεται στο στρώμα γύψου που παρέμεινε στην επιφάνεια.

- Οι επιφάνειες που κατεργάστηκαν με τις υπόλοιπες μεθόδους έδωσαν υψηλές και σχετικά κοντινές τιμές μεταξύ τους, που υποδηλώνουν τη φυσικοχημική και φυσικομηχανική αστάθειά τους.

Από τον πίνακα 6.5.4.3 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και fractal διάστασης είναι υψηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,96 και 0,92. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στη μονάδα, επομένως η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Από τις υψηλές τιμές όλων των συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης, συμπεραίνουμε ότι η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη. Από το γεγονός αυτό και ειδικότερα από τον μεγάλο βαθμό αναλογίας μεταξύ fractal διάστασης και πυκνότητας ρηγματώσεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τελικά επιλεγόμενες τιμές των T_L και T_U , σε κάθε περίπτωση εικόνας, υπήρξαν κατάλληλες για την ορθή διαδικασία βαθμονόμησης των εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου των δειγμάτων (η βαθμονόμηση, σε κάθε εικόνα, υπήρξε αντιπροσωπευτική των στοιχείων που αυτή παρουσίαζε και οδήγησε, στη συνέχεια, στον υπολογισμό αντιπροσωπευτικών δεικτών αποτίμησης).

Τέλος, συγκρίνοντας τους δείκτες της μικροδομής των δύο γυψοποιημένων όψεων του αναγλύφου (πρόσθιας και πλάγιας) συμπεραίνουμε ότι τα δείγματα που αντιστοιχούν στην πρόσθια όψη εμφανίζονται κατά πολύ τραχύτερα από αυτά της πλάγιας όψης. Με χαμηλή πυκνότητα ρηγματώσεων και συντελεστή ευθρυπτότητας οι δείκτες της μικροδομής της πλάγιας όψης περιγράφουν μια επιφάνεια με χαμηλή τραχύτητα αλλά και συνεκτική με λίγες ρωγμές και κοιλότητες. Οι διαφορές στη μικροδομή αλλά και στη χημική σύσταση αυτών των δύο επιφανειών αποτελούν την αιτία που οι μέθοδοι καθαρισμού έχουν άλλη αποτελεσματικότητα στις πρόσθιες και άλλη στις πλάγιες όψεις του ανάγλυφου.

6.5.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Η τεχνική της χρωματομετρίας έλαβε χώρα επί τόπου στις εξεταζόμενες περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών των μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ανάγλυφου των ανθεμίων του κιονόκρανου του ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός), πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* (Χρωματομετρικό σύστημα CIELab), καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού.

Στις επί τόπου μετρήσεις, κάθε περιοχή καθαρισμού χωρίστηκε σε κανάβο, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, ο ίδιος αριθμός μετρήσεων στα ίδια σημεία και συνεπώς τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* , αφού μετρήθηκαν 12 σημεία, για κάθε εξεταζόμενη περιοχή πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, εκτός από τις επιφάνειες kke3a1 και kke3a2 όπου μετρήθηκαν 6, εξαιτίας της μικρότερης έκτασής τους. Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακα 6.5.5) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 6.5.5: Αποτελέσματα επί τόπου χρωματομετρικού ελέγχου

Κωδικός Επιφάνειας	Επέμβαση Καθαρισμού	L^* πριν	a^* πριν	b^* πριν	L^* μετά	a^* μετά	b^* μετά	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 10min	54.90	0.09	8.89	61.66	0.02	6.37	6.76	-0.07	-2.52	7.21
kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 20min	60.07	1.09	9.54	62.20	-0.95	5.62	2.13	-2.04	-3.92	4.91
kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 40min	54.86	0.09	9.69	59.07	-0.44	5.27	4.21	-0.53	-4.42	6.13
kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min	54.90	0.09	8.89	64.15	-0.21	6.48	9.25	-0.30	-2.41	9.56
kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min	59.11	0.11	8.92	67.05	-0.78	5.37	7.94	-0.89	-3.55	8.74
kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min	58.69	1.21	10.15	61.75	-0.30	6.85	3.06	-1.51	-3.30	4.75
kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min	60.97	0.28	10.87	65.14	-1.34	6.06	4.17	-1.62	-4.81	6.57
kke3b	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min & 15 min	52.91	1.02	9.77	67.44	-0.12	5.12	14.53	-1.14	-4.65	15.3
kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΦΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	61.95	-0.15	6.80	67.11	-1.48	3.11	5.16	-1.33	-3.69	6.48

Χαρακτηριστικό αυτής της επιφάνειας είναι ότι σε όλες τις θέσεις εφαρμογής επεμβάσεων καθαρισμού έχουμε μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο και το μπλε, γεγονός εν μέρει αναμενόμενο αφού απομακρύνθηκαν επικαθήσεις με έντονη πορτοκαλοκάστανη χροιά. Η μεγαλύτερη μετατόπιση προς το πράσινο παρατηρείται στη

θέση εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με ανθρακικό αμμώνιο για 30 λεπτά όπου $\Delta a^* = -2.04$, ενώ η αντίστοιχη προς το μπλε στη θέση εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 1 ώρα $\Delta b^* = -4.81$. Η μεγαλύτερη τιμή συνολικής μεταβολής χρώματος προκύπτει στη θέση Kke3b ($\Delta E^* = 15.30$), όπου χρησιμοποιήθηκε πάστα AB57 δύο αλληπάλληλες φορές, με χρόνο εφαρμογής 5 και 15min αντίστοιχα. Η μικρότερη συνολική μεταβολή χρώματος παρατηρείται στην περιοχή Kke1b ($\Delta E^* = 4.75$), όπου εφαρμόστηκε ιοντανταλλακτική ρητίνη, με χρόνο εφαρμογής 30min. Η μεταβολή της λαμπρότητας είναι σε όλες τις θέσεις θετική, γεγονός που σημαίνει ότι μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού προέκυψαν πιο φωτεινές επιφάνειες, καθώς και ότι οι μαύρες επικαθήσεις απομακρύνθηκαν ικανοποιητικά. Η λαμπρότητα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση στη θέση Kke3b ($\Delta L^* = 14.53$), γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιοχή αυτή μετά την επέμβαση καθαρισμού προκύπτει πιο φωτεινή, ενώ η επιφάνεια με τη χαμηλότερη μεταβολή λαμπρότητας είναι ιοντανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό, με χρόνο εφαρμογής 20min, ($\Delta L^* = 2.13$).

6.5.6 Μερικά Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας και της χρωματομετρίας που δίνουν σαφείς πληροφορίες σε σχέση με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, την επιφανειακή μορφολογία και συνοχή (επιφανειακή μικροδομή), καθώς και το χρώμα των καθαρισμένων επιφανειών και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας τόσο των πρόσθιων, όσο και πλάγιων όψεων του μαρμάρινου ανάγλυφου του κιονόκρανου που οι εφαρμοσθείσες μέθοδοι καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν συνάγονται τα εξής:

Οι επεμβάσεις καθαρισμού των επιφανειών kke2ba1, kke2aa, kkee3ba, kke1b, kke1aa, kke3b, kke2bk, kke1bk, kke3bk, kkeeg51k, (δηλ. η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 20 λεπτά, για 40 λεπτά, η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά, για 30 λεπτά, για 1 ώρα, η πάστα AB57, στις πρόσθιες όψεις του ανάγλυφου και η υγρή μικροψηγματοβολή, η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 20 λεπτά, η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 30 λεπτά και η πάστα AB57 στις πλάγιες όψεις του ανάγλυφου), απομακρύνουν πλήρως τη φαιόμαυρη κρούστα, τόσο το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου, όσο και την πάτινα του θειικού βαρίου, αποδίδοντας μια καθαρά ασβεστιτική επιφάνεια. Παράλληλα, οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, είτε παρουσιάζουν μείωση (σε σχέση με τις τιμές των αντίστοιχων δειγμάτων πριν την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού), ή παρόμοιες τιμές, οι οποίες όμως πλέον αφορούν επιφάνειες αποκλειστικά ασβεστιτικές. Η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται με χαμηλά σχετικά τιμές και κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων.

Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις επιφάνειες kke3a2a, kkeeg51a, kke3a1k, kke2ak, kke3a2k, kke1ao, χαρακτηρίζονται ως μέτριοι επειδή, παρότι διατηρούν το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και οι παράμετροι της μικροδομής, καθώς και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνονται γενικά σε αποδεκτά επίπεδα, απομακρύνουν την πάτινα του βαρύτη. Χαρακτηρίζονται δε, ως μέτριοι και όχι ως μη αποδεκτοί παρόλο που απομακρύνουν την πάτινα, επειδή το συγκεκριμένο στρώμα του βαρύτη παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία όσον αφορά στην παρουσία του ή μη, στην ανομοιογένεια του πάχους του, καθώς και στη θέση του στο συνολικό στρώμα της κρούστας.

Όσον αφορά την επιφάνεια εφαρμογής της υγρής μικροψηγματοβολής (kkeeg51a) στην πρόσθια όψη του ανάγλυφου, αυτή χαρακτηρίζεται ως μέτρια επέμβαση καθαρισμού, επειδή αφενός διατηρεί το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων, αφετέρου όμως η διατήρηση της πάτινας καταγράφεται σε μέτρια επίπεδα και κυρίως οι παράμετροι της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές σε σχέση με όλες τις άλλες πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού.

Η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά (kkee3bk), στην πλάγια όψη του ανάγλυφου είναι αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού, εφόσον ναι μεν διατηρεί το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων, όμως η διατήρηση της πάτινας καταγράφεται

σε μέτρια επίπεδα και κυρίως η παράμετρος της πυκνότητας ρηγματώσεων παρουσιάζει μεγάλη αύξηση της τιμής της συγκρινόμενη με αυτές των δειγμάτων πριν την επέμβαση καθαρισμού.

Τέλος, η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με 10% κ.ο. δ/μα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 λεπτά, στην πρόσθια όψη του ανάγλυφου, είναι μια επέμβαση καθαρισμού, που διατηρεί την πάτινα και το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου με χαρακτηριστικά επιφανειακής μικροδομής παρόμοια με αυτά που προϋπήρχαν του καθαρισμού, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα.

6.6 Αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες πεντελικού μαρμάρου-Η περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

6.6.1 Αποτελέσματα Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών

Στο πλαίσιο της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών που έλαβαν χώρα επί τόπου στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, στις περιοχές των αποπλυμένων επιφανειών, όπου είναι πλήρως εκτεθειμένες στο νερό της βροχής (βόρειος προσανατολισμός). Μελετάται κυρίως η υφή των κόκκων του πεντελικού μαρμάρου, η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των τύπων φθοράς, καθώς και η παρουσία ή μη υπολειμμάτων των επεμβάσεων καθαρισμού. Βάσει των παρακάτω μικροσκοπικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της μορφολογίας και της υφής των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.



πάστα AB57 5min, άλακας, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 10min, άλακας, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 20min, άλακας, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη με ανθρακικό αμμώνιο 2x10min, άλακας, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 10min, άλακας, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 20min, άλακας, x50



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 40min, άλακας, x25



ιοντοανταλλακτική ρητίνη 2x20 min, άλακας, x25



υγρή μικροψηματοβολή, άλακας, x25

Από τις παραπάνω εικόνες καθίσταται σαφές ότι όλες οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού που χρησιμοποιήθηκαν τόνωσαν τη χαρακτηριστική μορφολογική υφή του μαρμάρου, στο δύσκολα αντιμετωπιζόμενο τύπο φθοράς των αποπλυμένων επιφανειών.

Οι διαφορετικές επεμβάσεις όμως απέδωσαν διαφορετικά και χρωματικά. Η χρωματική μεταβολή των επιφανειών όπου εφαρμόστηκε η πάστα AB57, η υγρή μικροψηγηματοβολή και η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για δύο φορές επί δέκα λεπτά, είναι πιο έντονη, αν συγκριθεί με τις περιοχές των υπόλοιπων μεθόδων.

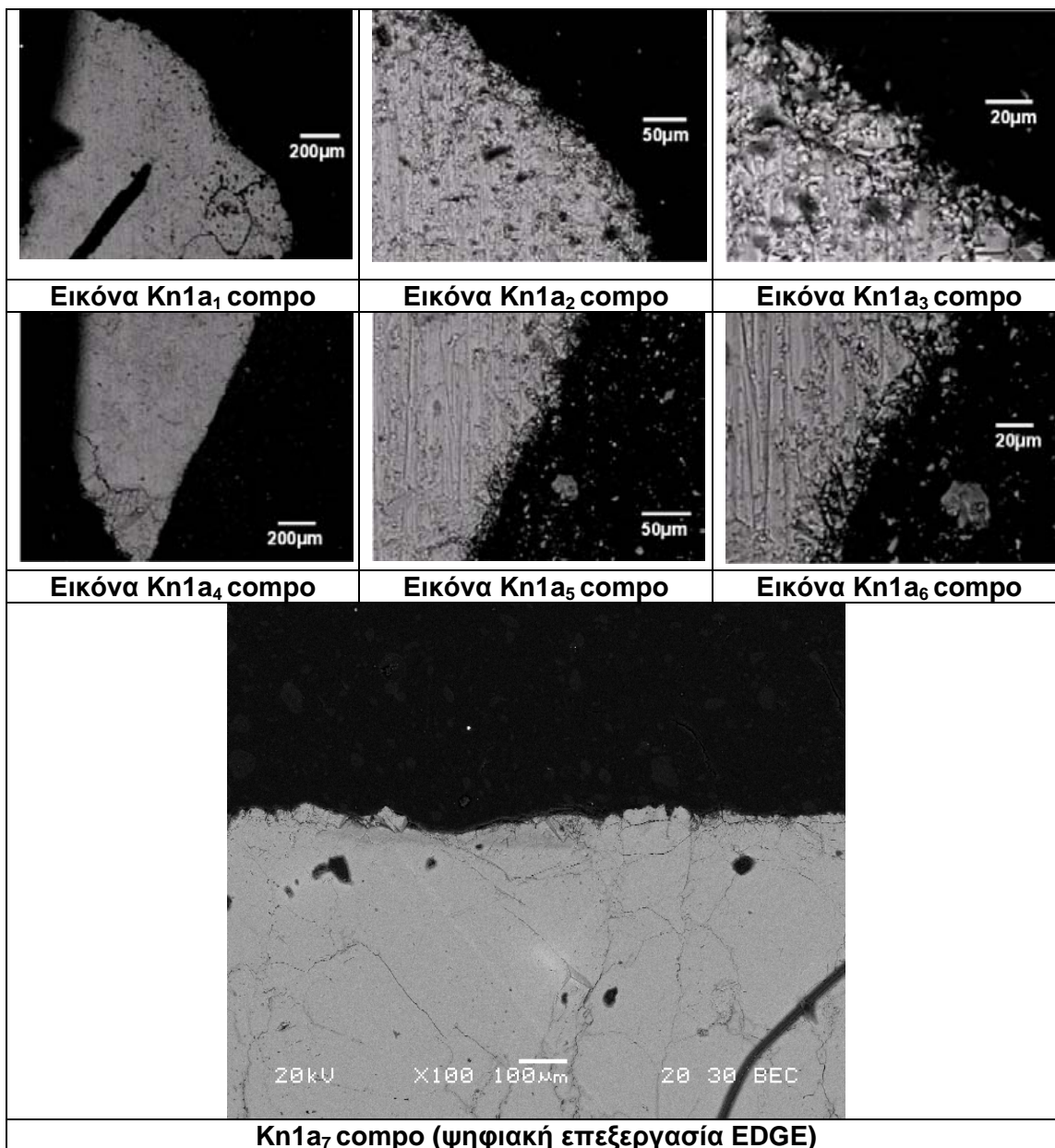
Επιπλέον, στην επιφάνεια όπου εφαρμόστηκε η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά παρατηρούνται μεμονωμένα υπολείμματα μαύρων επικαθήσεων.

Τέλος, η κοκκώδης υφή του μαρμάρου είναι εμφανής και σε αντιστοιχία με αυτή που καταγράφεται πριν από τις επεμβάσεις καθαρισμού, ιδίως στις επιφάνειες των εφαρμογών της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 λεπτά και της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για δέκα λεπτά.

6.6.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ στα δείγματα που ελήφθησαν μετά την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των αποπλυμένων επιφανειών του κίονα στο κτίριο του ΕΑΜ (βόρειος προσανατολισμός) .

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 20min - Δείγμα Κη1α



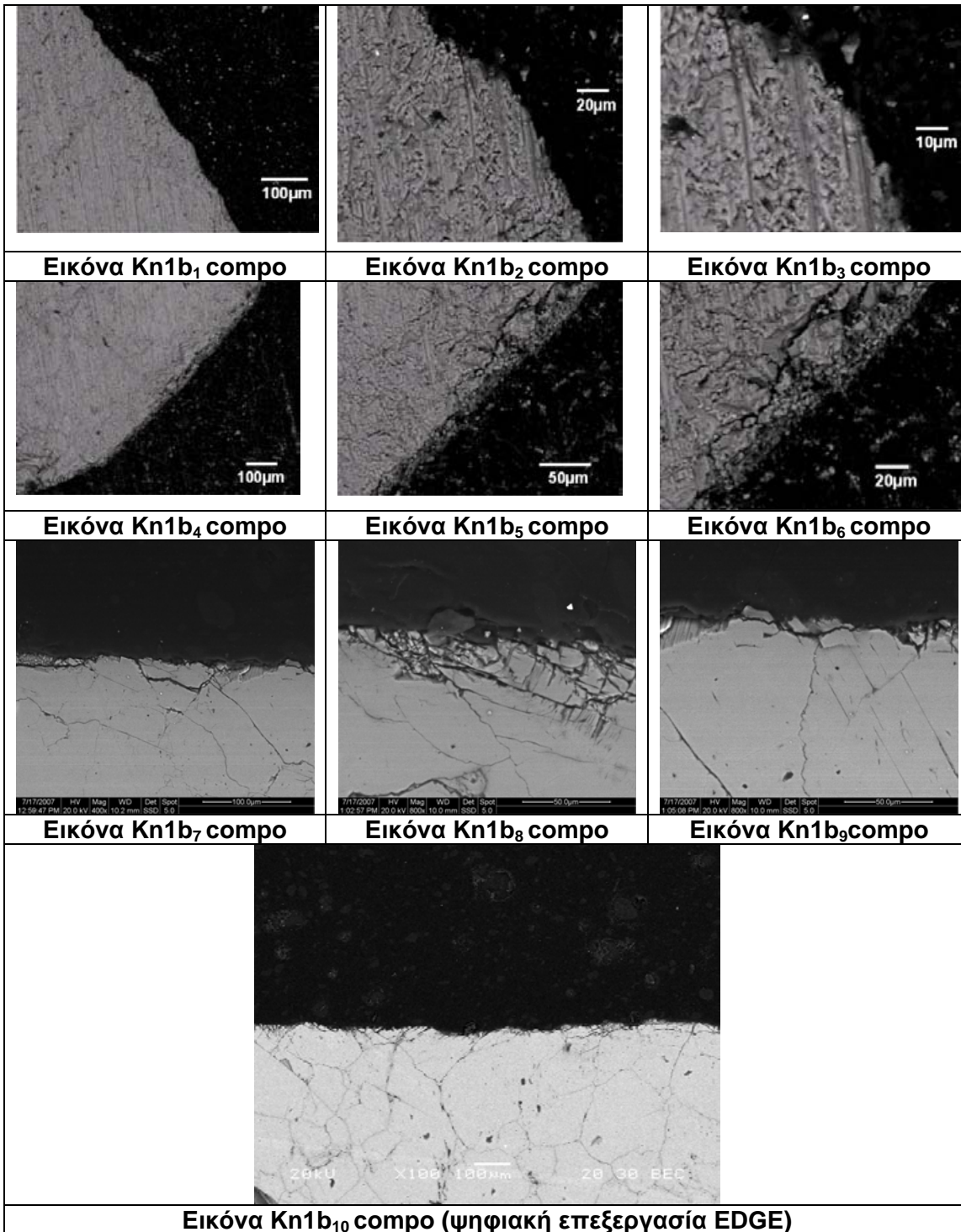
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δειγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Na	Cd
Κη1α	1 (Εικόνα Κη1α3 compro)	****	-	-	•	-	•	-
	2 (Εικόνα Κη1α3 compro)	****	-	-	-	-	•	-
	3 (Εικόνα Κη1α3 compro)	****	-	•	-	-	*	-
	4 (Εικόνα Κη1α3 compro)	****	-	-	•	-	•	-
	5 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	-	-	•	•	-
	6 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	•	-	-	*	-
	7 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	-	-	-	•	-
	8 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	•	-	-	-	•	•
	9 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	-	-	-	-	-
	10 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	•	-	-	-	•	-
	11 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	-	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	•	-	-	-	-	-
	13 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	-	-	-	-	•	-
	14 (Εικόνα Κη1α5 compro)	****	•	-	-	-	•	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Μετά την επέμβαση καθαρισμού παρατηρείται έντονο επιφανειακό ανάγλυφο με μικρορηγματώσεις που αναπτύσσονται για περίπου 50µm. Η κατακερματισμένη αυτή μορφολογία οφείλεται πιθανότατα σε χημική προσβολή του ασβεστίτη από την πάστα. Ίχνη θείου και καδμίου εντοπίζονται στην ασβεστιτική επιφάνεια. Επίσης, οι περισσότερες αναλύσεις τόσο στην πρόσθια όσο και στην πλάγια επιφάνεια, δίνουν ίχνη Na και κάποιες Si, στοιχεία που αποτελούν ενδείξεις από υπολείμματα NaCl και αργιλοπυριτικών επικαθίσεων.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10min - Δείγμα Κη1b



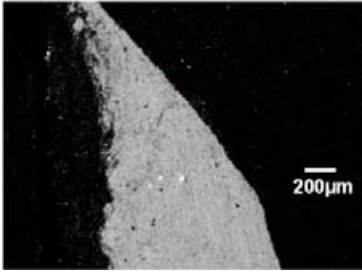
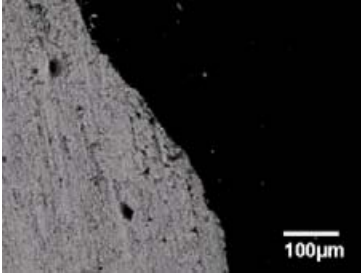
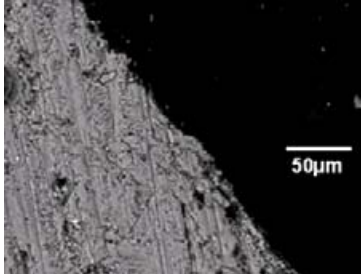
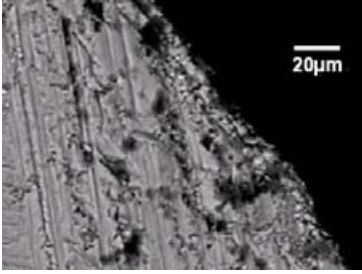
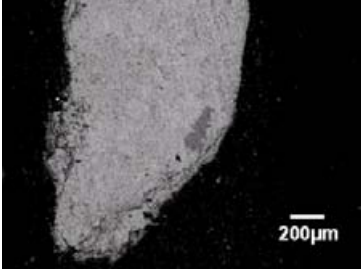
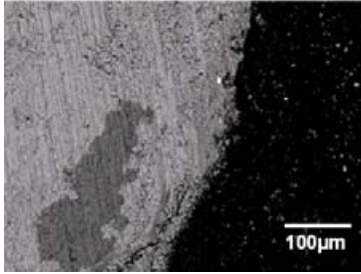
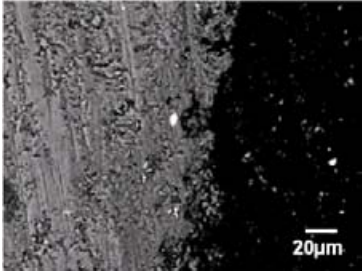
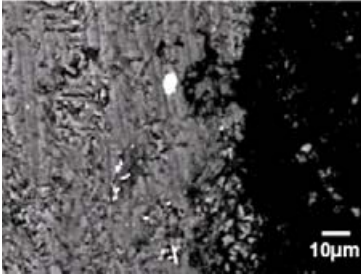
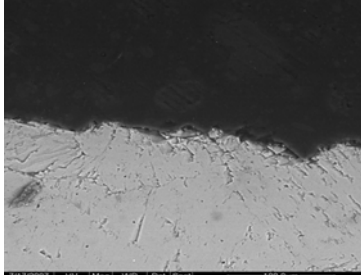
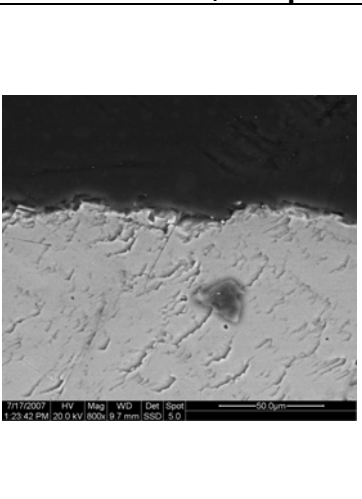
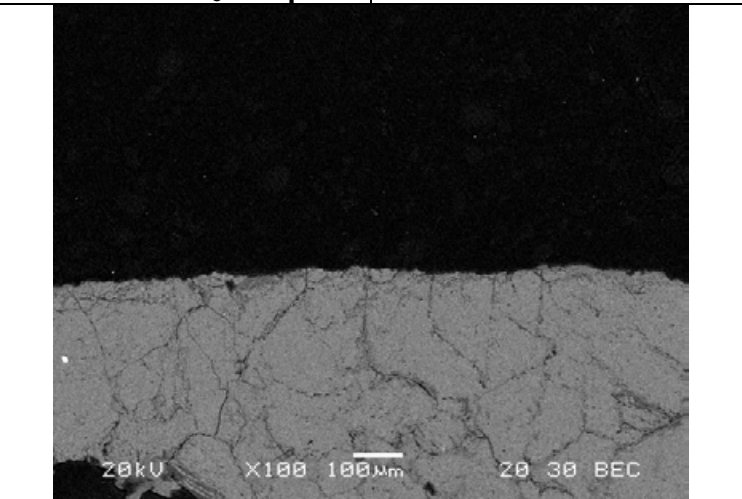
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Na	K	Cl
Κη1b	1 (Εικόνα Κη1b2 compo)	****	-	-	-	-	•
	2 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	-	-	-	-	•
	3 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	-	-	•	-	•
	4 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	-	-	-	•	•
	5 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	-	•	-	•	-
	6 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	•	•	•	-	-
	7 (Εικόνα Κη1b3 compo)	****	•	-	-	•	-
	8 (Εικόνα Κη1b6 compo)	***	-	****	*	*	-
	9 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	-	•	*	•	•
	10 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	-	-	-	-	-
	11 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	•	•	-	•	-
	12 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	•	-	*	-	-
	13 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	•	•	*	•	•
	14 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	-	-	-	•	-
	15 (Εικόνα Κη1b6 compo)	****	*	•	*	•	•

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Στην επιφάνεια υπάρχουν κόκκοι ασβεστίτη αποκολλημένοι από τη μάζα του δείγματος, ενώ ορισμένων κόκκων τα όρια εμφανίζουν μεγάλη τραχύτητα. Οι ρηγματώσεις είναι επίσης εμφανείς, έχοντας μήκος μέχρι και 20μm. Παρουσιάζεται το φαινόμενο της κλιμακωτής αποφλοίσωσης κάθετα στην τομή πιθανότατα εξαιτίας της χημικής προσβολής του ασβεστίτη από την πάστα, αφήνοντας έντονο ανάγλυφο στους επιφανειακούς κόκκους.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Διπλή εφαρμογή 10min ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ - Δείγμα Κη1c

		
Εικόνα Κη1c₁ compo	Εικόνα Κη1c₂ compo	Εικόνα Κη1c₃ compo
		
Εικόνα Κη1c₄ compo	Εικόνα Κη1c₅ compo	Εικόνα Κη1c₆ compo
		
Εικόνα Κη1c₇ compo	Εικόνα Κη1c₈ compo	Εικόνα Κη1c₉ compo
		
Εικόνα Κη1c₁₀ compo	Εικόνα Κη1c₁₁ compo (ψηφιακή επεξεργασία EDGE)	

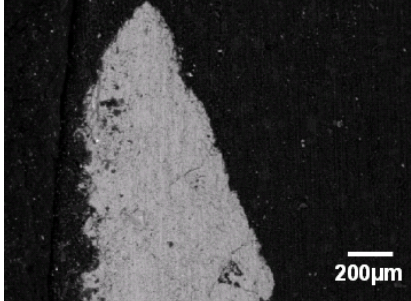
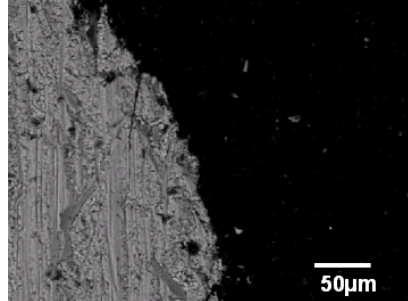
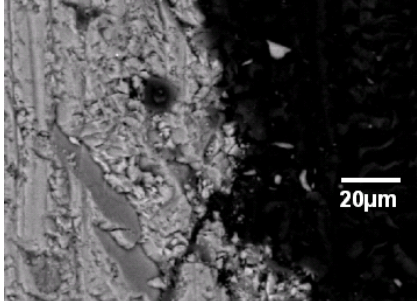
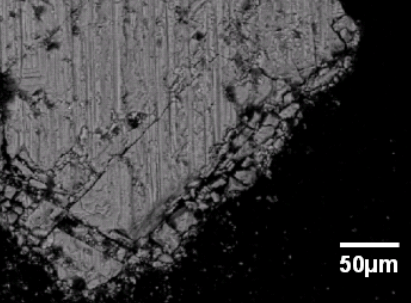

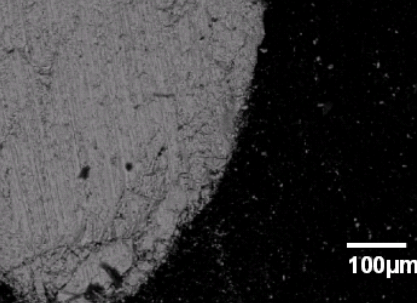
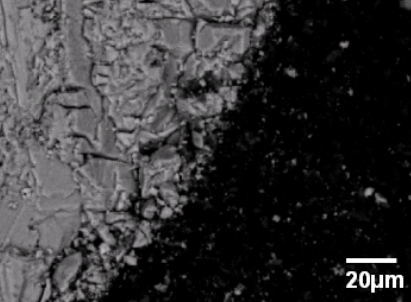
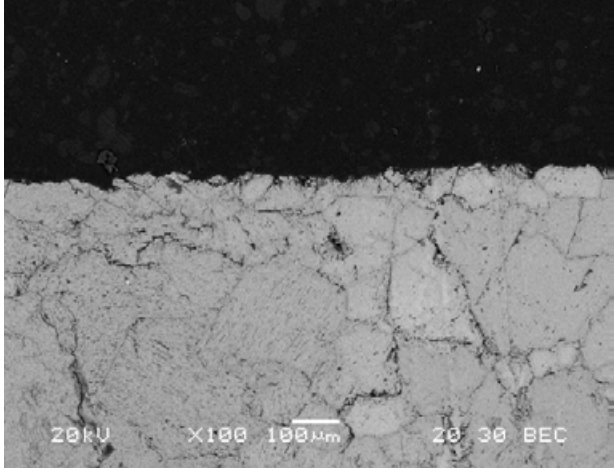
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Mg	K	Na	Al	Cl	Fe
Κωδικός δείγματος Κη1c	1 (Εικόνα Κη1c3 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	2 (Εικόνα Κη1c3 compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-
	3 (Εικόνα Κη1c3 compo)	****	*	-	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Κη1c4 compo)	****	-	-	•	-	•	-	-	-
	5 (Εικόνα Κη1c4 compo)	****	*	•	-	-	*	-	•	-
	6 (Εικόνα Κη1c4 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Κη1c4 compo)	****	***	-	-	-	-	-	•	-
	8 (Εικόνα Κη1c4 compo)	****	-	*	•	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα Κη1c6 compo)	**	***	•	-	-	-	-	•	-
	10 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	***	•	-	-	-	•	-	-
	11 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	***	•	-	-	-	-	•	-
	12 (Εικόνα Κη1c7 compo))	****	***	-	•	-	-	-	-	-
	13 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-
	14 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	*	-	-	-	-	-	•	-
	15 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	*	-	•	-	•	-	-	-
	16 (Εικόνα Κη1c7 compo)	****	•	-	•	-	-	-	-	-
	17 (Εικόνα Κη1c compo)	****	***	*	-	•	-	•	-	*

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δείγματος είναι εμφανείς ρηγματώσεις, διακλάσεις και το έντονο κυματοειδές ανάγλυφο. Παρουσιάζεται δε μεγάλου μήκους ρηγμάτωση. Επίσης, αναλύσεις σε κόκκους γύψου στην επιφάνεια (10^ο, 17^ο EDS) δίνουν και ελάχιστες ποσότητες Si, Al, στοιχεία που δείχνουν παρουσία από υπολείμματα αργιλοπυριτικών επικαθίσεων..

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 40min - Δείγμα Kn2a

		
<p>Εικόνα Kn2a₁ compo</p>	<p>Εικόνα Kn2a₂ compo</p>	<p>Εικόνα Kn2a₃ compo</p>
		
<p>Εικόνα Kn2a₄ compo</p>	<p>Εικόνα Kn2a₅ compo</p>	<p>Εικόνα Kn2a₆ compo</p>
		
<p>Εικόνα Kn2a₇ compo</p>	<p>Εικόνα Kn2a₈ compo (ψηφιακή επεξεργασία EDGE)</p>	

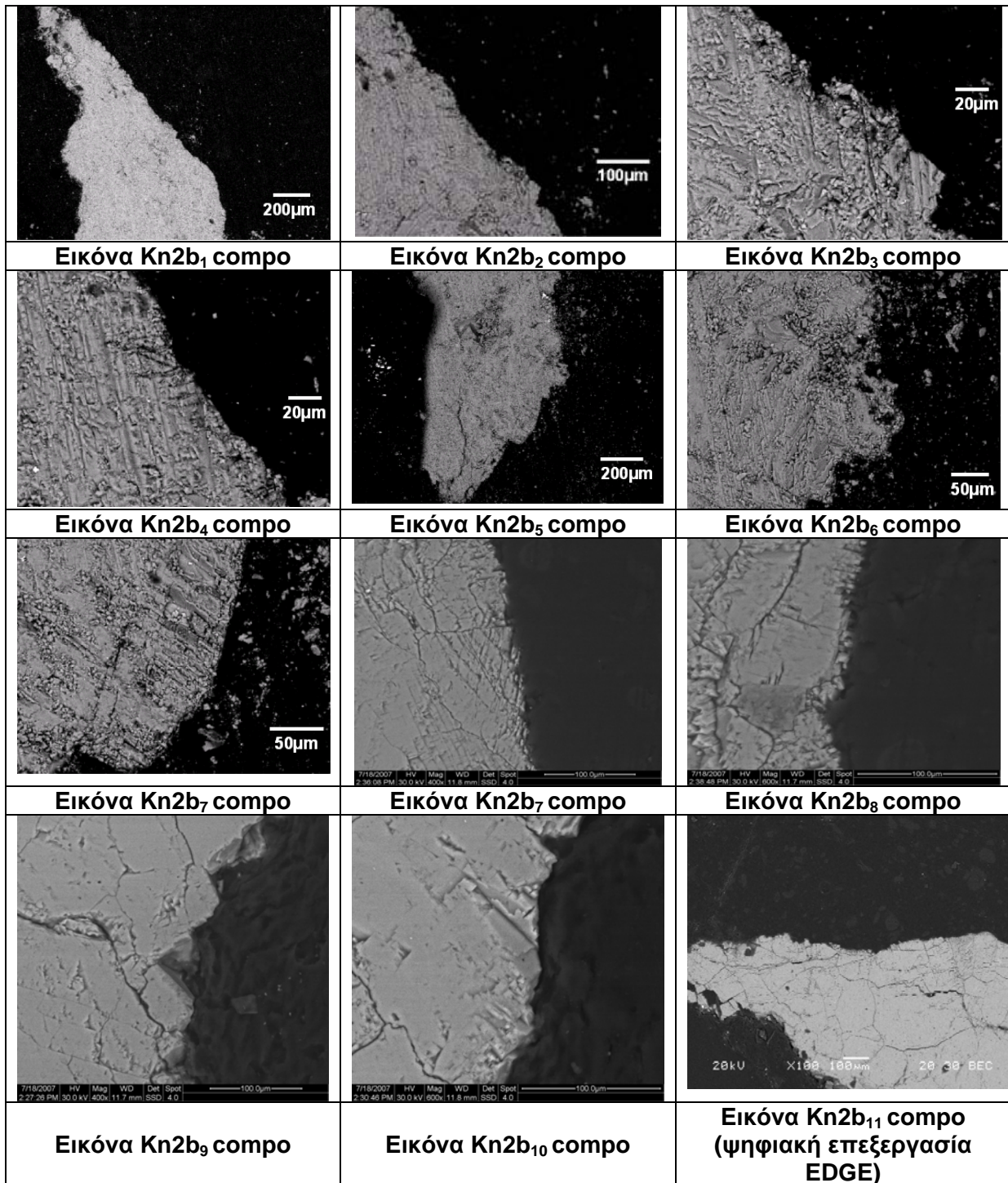
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	Cl	Fe	Cd
Κωδικός δείγματος Κη2α	1 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	*	-	-	-
	2 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	*	-	-	-
	3 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	*	-	-	-
	5 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	*	-	-	-	-	-	-
	6 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	*	-	-	-
	7 (Εικόνα Κη2α2 compo)	****	-	-	-	•	-	-	-
	8 (Εικόνα Κη2α3 compo)	****	-	•	-	-	-	-	-
	9 (Εικόνα Κη2α3 compo)	****	-	•	-	*	-	-	-
	10 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	•	-	-	-	•	•	-
	11 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	•	-	-	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	-	-	•	•	-	-	-
	13 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	-	•	-	-	•	-	-
	14 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	-	-	-	-	-	-	-
	15 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	-	-	•	*	-	-	-
	16 (Εικόνα Κη2α5 compo)	****	•	•	-	*	-	-	-
	17 (Εικόνα Κη2α7 compo)	****	•	-	•	•	-	-	-
	18 (Εικόνα Κη2α7 compo)	****	-	-	-	•	-	-	-
	19 (Εικόνα Κη2α7 compo)	****	-	-	•	•	-	-	•

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Η επιφάνεια παρουσιάζεται καταπονημένη με ρηγματώσεις και ασυνέχειες. Εντοπίζονται κρατήρες και οπές σε κόκκους ασβεστίτη που συνοδεύονται από ευρύτερη απώλεια υλικού των κόκκων σε βάθος και πιθανότατα είναι αποτέλεσμα της χημικής προσβολής της επέμβασης καθαρισμού. Ύστερα από την κατεργασία, στην επιφάνεια παρατηρούνται ίχνη θείου σε 2 κόκκους στην επιφάνεια του δείγματος.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 20min - Δείγμα Kn2b



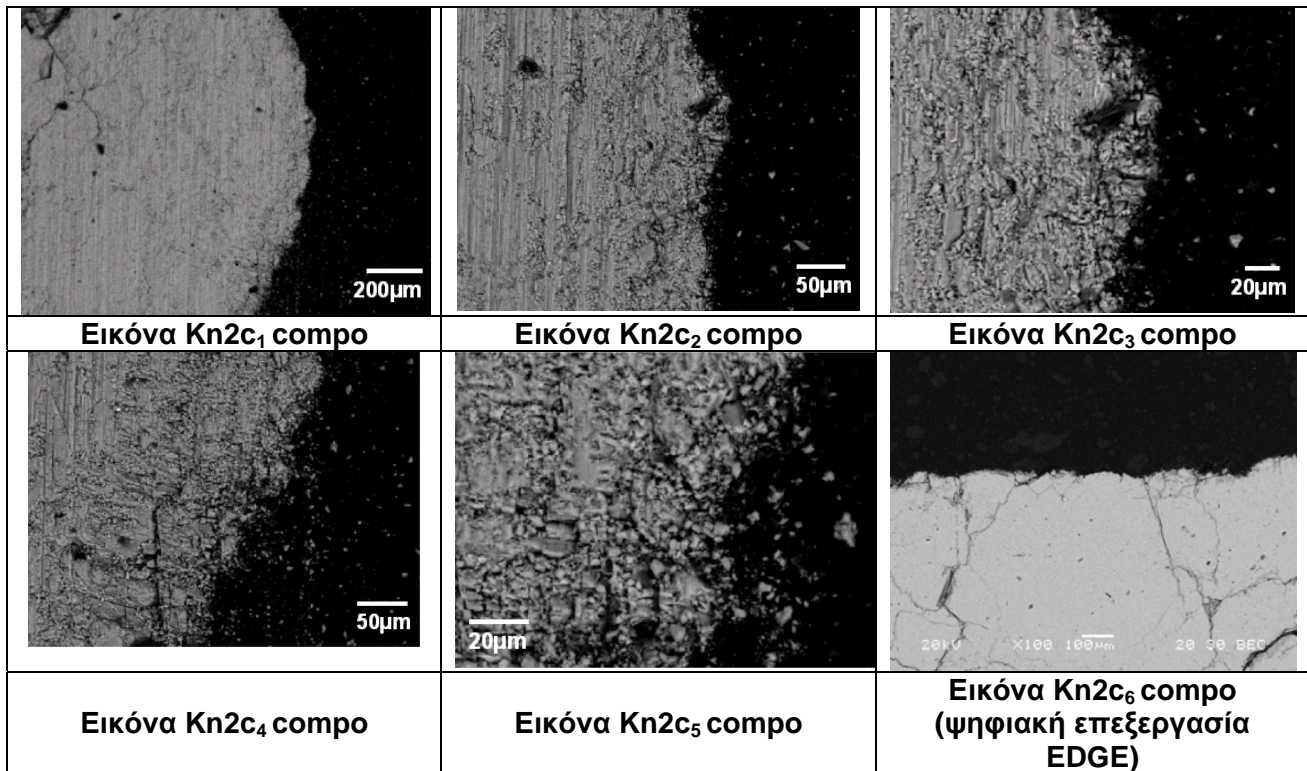
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	K
Kn2b	1 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	•	•	-	-
	2 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	*	-	*	•
	3 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	•	-	*	-
	5 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	•	•	-	*	-
	6 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	-	-	-	-
	7 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	•	•	-	*	-
	8 (Εικόνα Kn2b3 compro)	****	-	•	-	•	-
	9 (Εικόνα Kn2b4 compro)	****	-	•	•	-	-
	10 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	-	-	-	•	-
	11 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	•	-	-	-	-
	12 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	•	-	-	-	-
	13 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	•	•	-	-	-
	14 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	-	-	-	-	•
	15 (Εικόνα Kn2b6 compro)	****	-	-	•	-	-
	16 (Εικόνα Kn2b7 compro)	****	•	-	•	*	-
	17 (Εικόνα Kn2b7 compro)	****	-	-	•	*	-
	18 (Εικόνα Kn2b7 compro)	****	-	-	•	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Ύστερα απο την κατεργασία με ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 20min, παρατηρούνται ίχνη Si και Na στις περισσότερες αναλύσεις στην επιφάνεια, στοιχεία που το πιθανότερο είναι να προέρχονται απο υπολείμματα αργιλοπυριτικών επικαθίσεων και αλάτων (NaCl). Στην εικόνα Kn2b₆ η επιφάνεια παρουσιάζεται εμφανώς καταπονημένη με έντονο ανάγλυφο.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Διπλή εφαρμογή 20min ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ - Δείγμα Kn2c



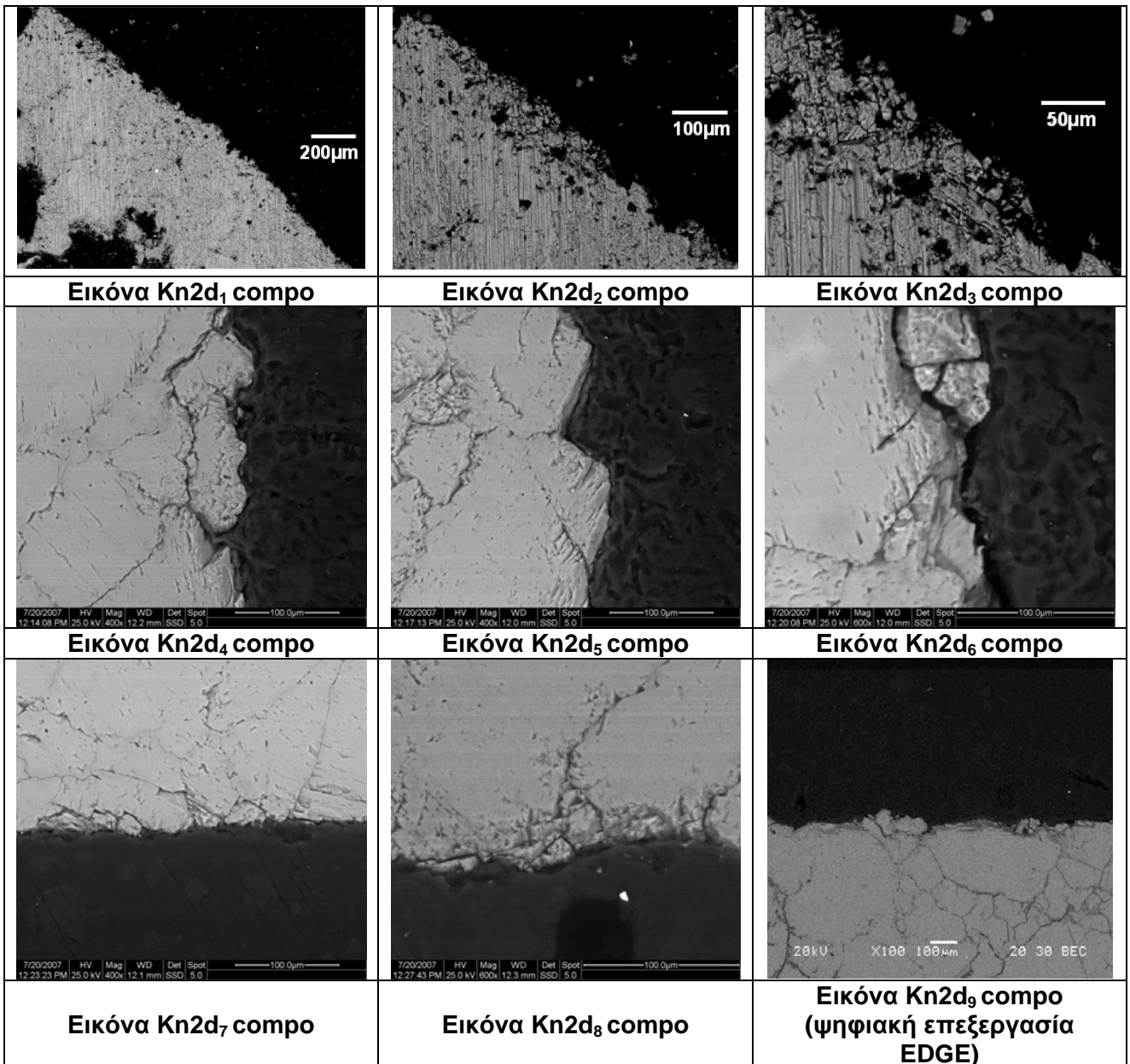
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	K
Kn2c	1 (Εικόνα Kn2c3 compo)	****	-	-	•	-	-
	2 (Εικόνα Kn2c3 compo)	****	-	-	•	*	•
	3 (Εικόνα Kn2c3 compo)	****	-	-	•	•	-
	4 (Εικόνα Kn2c3 compo)	****	-	-	•	•	-
	5 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	•	-	•	-	-
	6 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	-	-	-	•	-
	7 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	-	-	-	-	-
	8 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	-	-	-	•	-
	9 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	-	•	-	*	-
	10 (Εικόνα Kn2c4 compo)	****	-	-	•	*	-

****	πολύ	***	αρκετό
**	παρουσία	*	λίγο
•	ίχνη	-	καθόλου

Ύστερα από την κατεργασία με διπλή εφαρμογή ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ από 20min, παρατηρείται χαμηλής τραχύτητας ανάγλυφο, πιθανότατα λόγω της χημικής δράσης της πάστας, καθώς και μεγάλου μήκους ρηγματώσεις περιμετρικά των κόκκων του ασβεστίτη που είναι εμφανείς σε όλο το δείγμα.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: υγρή μικροψηγματοβολή - Δείγμα Kn2d



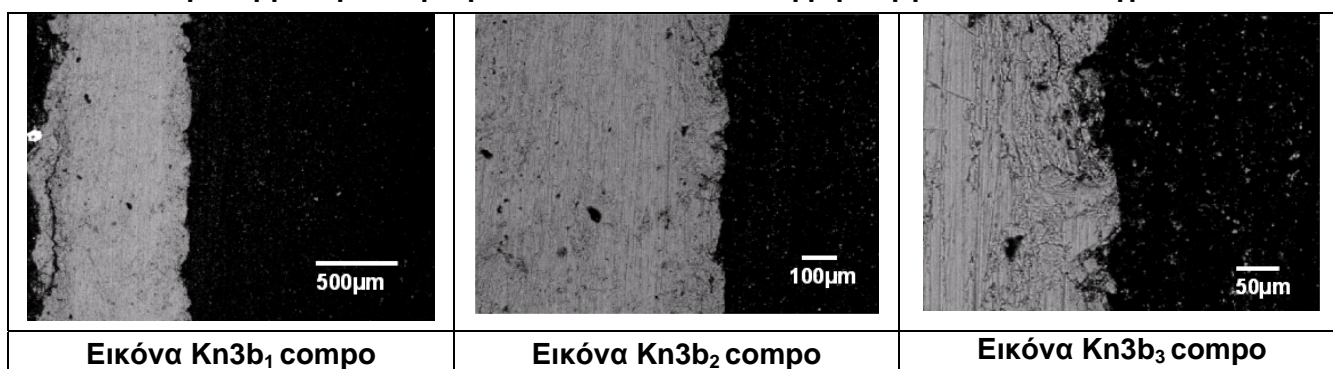
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-X (EDS)

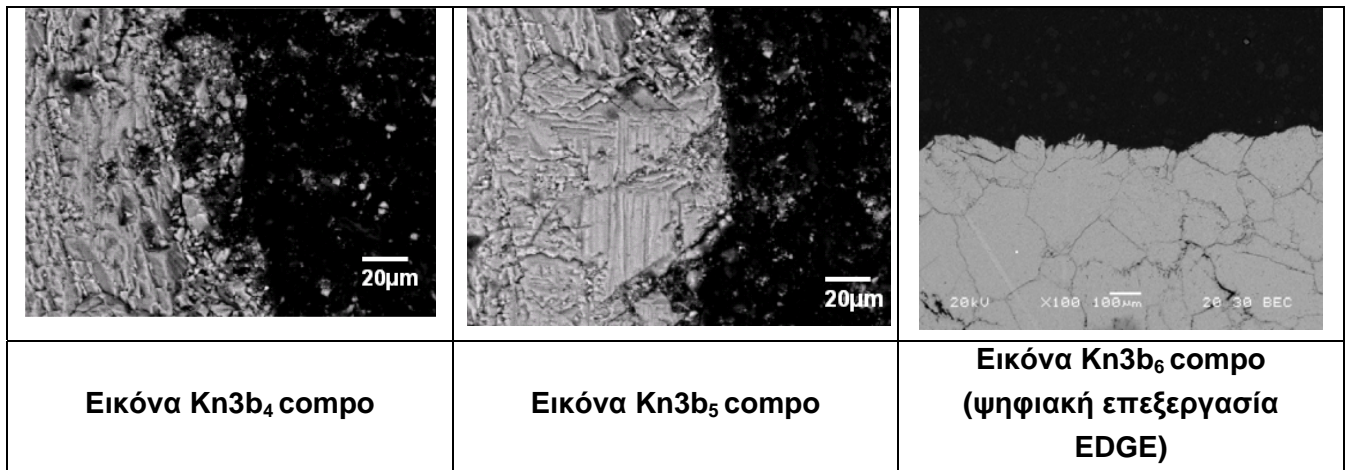
Κωδικός δείγματος	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na
Kn2d	1 (Εικόνα Kn2d3 compo)	****	-	-	•	•
	2 (Εικόνα Kn2d3 compo)	****	-	-	-	*
	3 (Εικόνα Kn2d3 compo)	****	-	-	•	•
	4 (Εικόνα Kn2d3 compo)	****	-	*	•	•
	5 (Εικόνα Kn2d3 compo)	****	•	-	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στην επιφάνεια υπάρχουν κόκκοι ασβεστίτη αποκολλημένοι από τη μάζα του δείγματος, λόγω της καταπόνησης της επιφάνειας από τη μηχανική δράση της τεχνικής της υγρής μικροψηματοβολής, καθώς και έντονο ανάγλυφο. Επιπλέον, ρηγματώσεις είναι εμφανείς σε όλο το δείγμα.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Ιοντοανταλλακτική ρητίνη για 10min - Δείγμα Kn3b





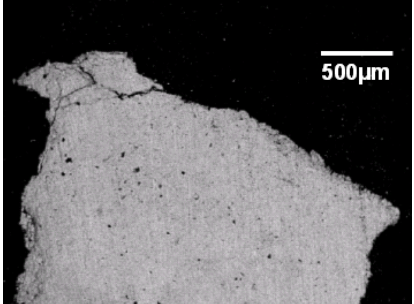
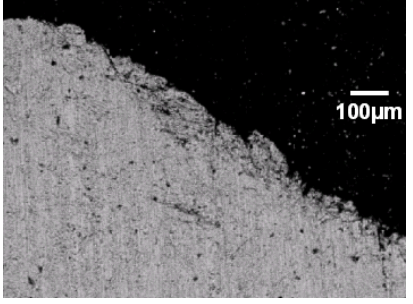
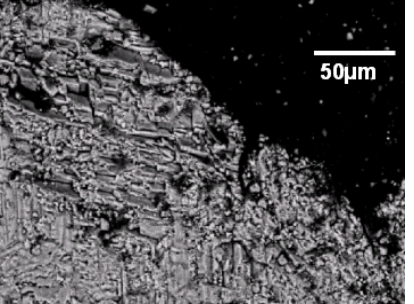
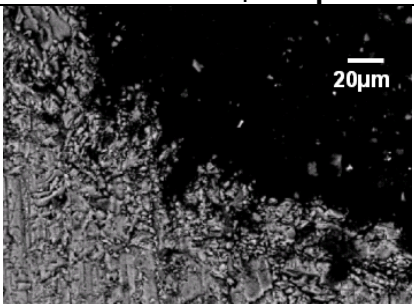
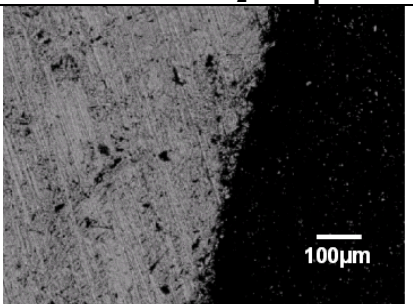
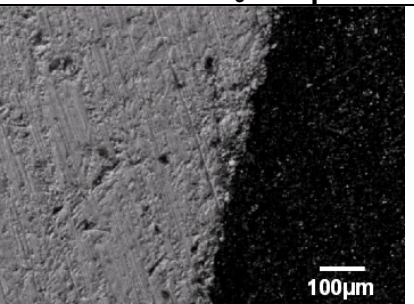
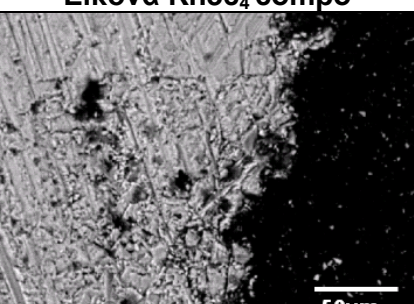
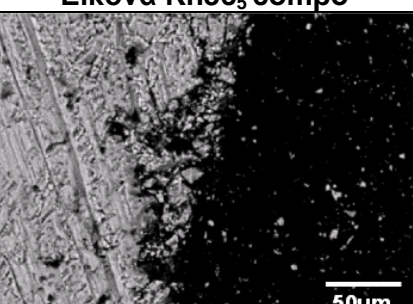
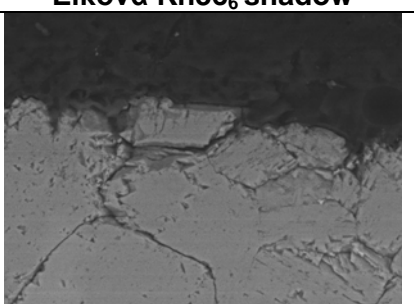
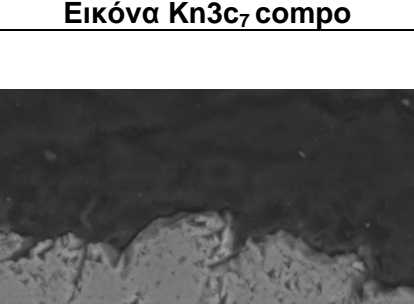
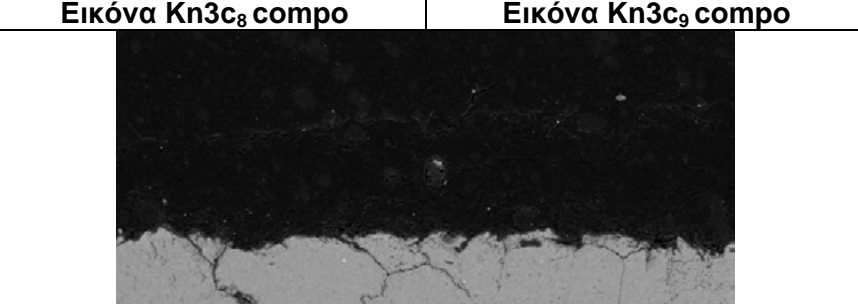
Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	K	Cl
Κωδικός δείγματος Kn3b	1 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	*	-	•	•	•
	2 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	-	•	•	-	-
	3 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	-	-	-	-	-
	4 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	-	-	•	-	-
	5 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	•	-	*	-	•
	6 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	•	-	•	*	-	-
	7 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	•	-	•	*	-	-
	8 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	-	•	•	-	-
	9 (Εικόνα Kn3b3 compo)	****	-	-	•	•	-	-

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

Στο συγκεκριμένο δείγμα η επιφάνεια παρουσιάζεται με έντονο ανάγλυφο και παρουσία λεπτόκοκκου ασβεστίτη κατά θέσεις. Εντοπίζονται ίχνη Na, Cl πάνω σε ασβεσπιτικούς κόκκους, ενώ ρηγματώσεις είναι εμφανείς σε όλο το δείγμα.

Πιλοτική επέμβαση καθαρισμού: Πάστα ΑΒ57 για 5min - Δείγμα Κη3c

		
Εικόνα Κη3c ₁ compo	Εικόνα Κη3c ₂ compo	Εικόνα Κη3c ₃ compo
		
Εικόνα Κη3c ₄ compo	Εικόνα Κη3c ₅ compo	Εικόνα Κη3c ₆ shadow
		
Εικόνα Κη3c ₇ compo	Εικόνα Κη3c ₈ compo	Εικόνα Κη3c ₉ compo
		
Εικόνα Κη3c ₁₀ compo	Εικόνα Κη3c ₁₁ compo (ψηφιακή επεξεργασία EDGE)	

Αποτελέσματα μικροανάλυσης ακτίνων-Χ (EDS)

	EDS	Ca	S	Si	Mg	Na	K
Κωδικός δείγματος Κη3c	1 (Εικόνα Κη3c2 compo)	****	-	-	•	-	-
	2 (Εικόνα Κη3c3 compo)	****	-	•	•	*	•
	3 (Εικόνα Κη3c2 compo)	****	-	-	•	-	-
	4 (Εικόνα Κη3c2 compo)	****	-	-	•	-	-
	5 (Εικόνα Κη3c6 compo)	****	-	-	-	•	-
	6 (Εικόνα Κη3c6 compo)	****	-	•	-	•	-
	7 (Εικόνα Κη3c7 compo)	****	-	-	-	-	•
	8 (Εικόνα Κη3c7 compo)	****	-	-	-	•	•

**** πολύ	*** αρκετό
** παρουσία	* λίγο
• ίχνη	- καθόλου

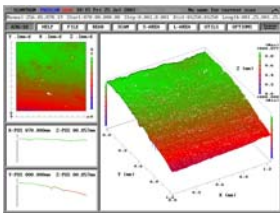
Υστερά από την κατεργασία, στην επιφάνεια παρατηρούνται ίχνη Si, Na, K, ενώ όλες οι υπόλοιπες αναλύσεις δίνουν ασβεστίτη. Σε πολλές περιοχές της επιφάνειας παρατηρείται καταπόνηση της εξώτατης στοιβάδας του δείγματος, ενώ ορισμένων κόκκων τα όρια εμφανίζουν μεγάλη τραχύτητα.

6.6.3 Αποτελέσματα Laser προφίλομετρίας – Τραχύτητα, Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια

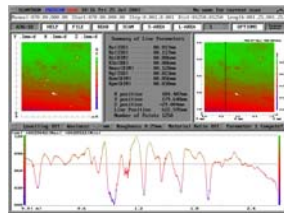
Η χρήση της laser προφίλομετρίας στον έλεγχο των δειγμάτων από την επιφάνεια των αποπλυμένων μαρμαρίνων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ΕΑΜ, έλαβε χώρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της υψής και της μορφολογίας των επιφανειών, μέσω της μέτρησης της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια (ενεργή επιφάνεια), οι οποίες παράλληλα παίζουν σημαντικό ρόλο για την ανθεκτικότητα του καθαρισμού στο χρόνο.

Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q (τετραγωνική ρίζα του μέσου των τετραγώνων των απόλυτων κανονικών τιμών $Z(x)$ στο μήκος δειγματοληψίας) και της παραμέτρου r (λόγος του πραγματικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας) στις επιφάνειες των ληφθέντων δειγμάτων από το ιστορικό κτίριο, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποιημένα επίπεδα υψής, μορφολογίας και συνοχής, εξαιτίας των επεμβάσεων καθαρισμού που έχουν λάβει χώρα.

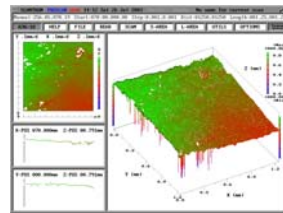
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες απεικονίσεις της τοπογραφίας των εξεταζόμενων επιφανειών των δειγμάτων, καθώς και απεικονίσεις του γραμμικού προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου για τον υπολογισμό της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για την περιοχή όπου έλαβε χώρα η σάρωση με τη χρήση της laser προφίλομετρίας.



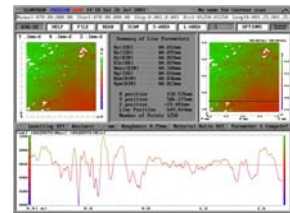
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn1c



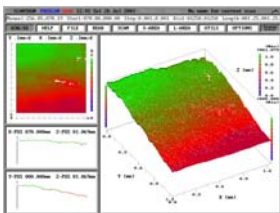
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn1c



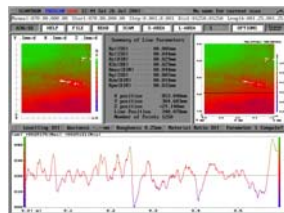
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn3c



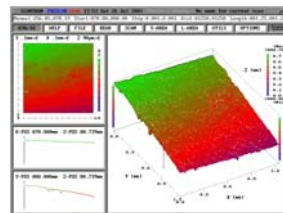
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn3c



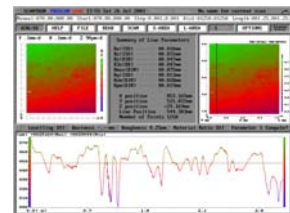
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn2b



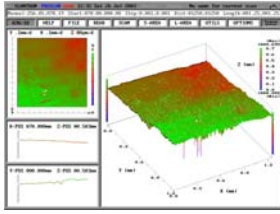
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn2b



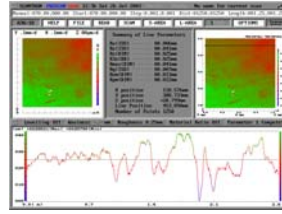
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn2d



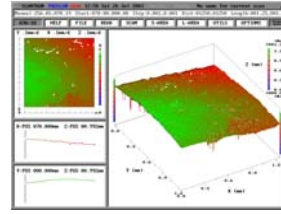
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn2d



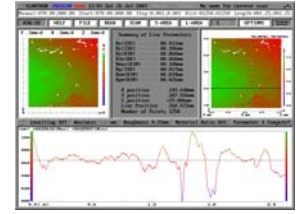
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn2a



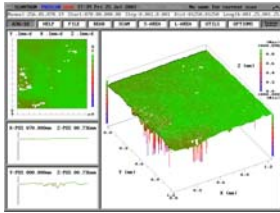
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn2a



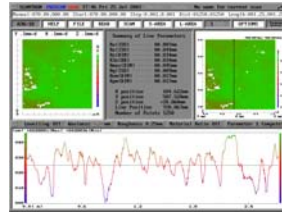
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn2c



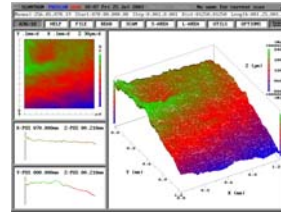
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn2c



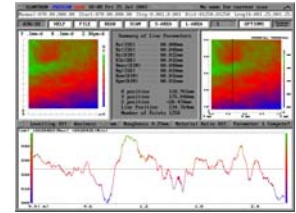
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn1a



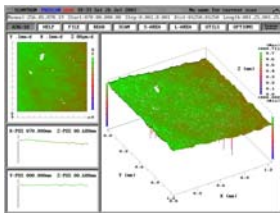
Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn1a



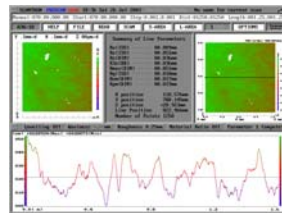
Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn1b



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn1b



Τρισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας - δείγμα kn3cd



Γραμμικό προφίλ μετά την εφαρμογή του φίλτρου & υπολογισμός της παραμέτρου της τραχύτητας R_q – δείγμα kn3cd

Στον Πίνακα 6.6.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου της τραχύτητας R_q σε μm στα ληφθέντα δείγματα πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού. Παρατίθενται οι ενδιάμεσες τιμές του R_q των 50 γραμμικών προφίλ για τον άξονα X (R_{qx}) και οι αντίστοιχες για τον άξονα Y (R_{qy}), καθώς και το κατώτερο -1° και ανώτερο -3° τεταρτημόριο των ενδιάμεσων τιμών του R_q (δηλ. οι τιμές R_q που αντιστοιχούν στο 25° εκατοστημόριο και το 75° εκατοστημόριο). Στις δύο τελευταίες στήλες αναγράφεται (α) η υψηλότερη ενδιάμεση τιμή R_q από τις δύο συγκρινόμενες R_{qx} και R_{qy} , η οποία και χρησιμοποιείται ως το αριθμητικό κριτήριο σχετικά με την αποτίμηση της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και (β) το αντίστοιχο κατώτερο και ανώτερο τεταρτημόριο.

Πίνακας 6.6.3.1: Αποτελέσματα της παραμέτρου της τραχύτητας Rq

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Rq _x (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Χ άξονας		Rq _y (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο Υ άξονας		Rq (μm)	Κατώτερο & Ανώτερο τεταρτημόριο	
kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	15	11	19	18	16	18	18	16	23
kn3c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	16	13	23	18	15	18	18	15	25
kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min	14	11	18	20	18	21	20	18	21
kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	10	8	14	15	13	17	15	13	17
kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40 min	10	8	14	15	13	15	15	13	17
kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	16	13	23	18	15	25	18	15	25
kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min	8	7	12	10	8	10	10	8	11
kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min,	5	5	6	8	6	8	8	6	9
kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min	4	4	5	10	9	10	10	9	12
kn3cd	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	11	10	13	12	11	12	12	11	13

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της τραχύτητας των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Συμπερασματικά δε, αναφέρεται:

- Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου της τραχύτητας Rq σε όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, με τις αντίστοιχες επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς, διαπιστώνεται αύξηση της Rq, εκτός από τα δείγματα kn3b, kn1b και kn1a, στα οποία παρατηρείται μείωσή της και πρόκειται για επιφάνειες όπου ο χρόνος δράσης των παστών είναι μικρότερος.
- Συγκρίνοντας τις τιμές Rq στις περιοχές που έχουν καθαριστεί με ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου εφαρμογής δεν οδηγεί κατ' ανάγκη σε αύξηση των τιμών της τραχύτητας. Οι παρατηρούμενες αυξομειώσεις των τιμών της Rq σε σχέση με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής της πάστας υποδεικνύουν ότι η πάστα οδηγεί σε τέτοια απώλεια αυθεντικού υλικού που καθιστά τις επιφάνειες πιο λείες μετά από συγκεκριμένο χρόνο δράσης.
- Συγκρίνοντας τις τιμές Rq στις περιοχές που έχουν καθαριστεί με ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου 10%, παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου εφαρμογής οδηγεί σε αύξηση των τιμών της τραχύτητας.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.6.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της παραμέτρου του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια (r), στις

επιφάνειες της διάγνωσης της φθοράς καθώς και σε αυτές μετά τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Παρατίθενται τα μεγέθη του εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε mm², του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας σε mm², ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής επιφάνειας προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (r), καθώς και το % ποσοστό μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής, που αποδίδει με πιο εύσχημο τρόπο την απόκλιση από την επιπεδότητα.

Πίνακας 6.6.3.2: Αποτελέσματα Λόγου Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Εμβαδόν Προβαλλόμενης επιφάνειας (mm ²)	Εμβαδόν Πραγματικής επιφάνειας (mm ²)	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς το εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Ποσοστό Μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής
kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ Σ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	1,248	2,846	2,280	128,04%
kn3c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	1,066	2,367	2,220	122,05%
kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min	1,466	2,935	2,002	100,20%
kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	1,487	2,950	1,984	98,39%
kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40 min	1,518	2,975	1,960	95,98%
kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ Σ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	1,058	2,039	1,927	92,72%
kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , , 20min	1,088	1,747	1,606	60,57%
kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min,	1,560	2,122	1,360	36,03%
kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min	1,501	1,933	1,288	28,78%
kn3cd	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	1,390	2,380	1,712	71,22%

Αντίστοιχες είναι οι διαπιστώσεις και από τα παραπάνω αποτελέσματα του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια:

- Ο λόγος του εμβαδού της πραγματικής προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας (ενεργή επιφάνεια) στις επιφάνειες των δειγμάτων kn3b, kn1b και kn1a, παρουσιάζει μείωση σε σχέση με την τιμή που εμφανίζει στο δείγμα της διάγνωσης της φθοράς και αντιστοιχεί σε καθαρισμούς όπου οι χρόνοι εφαρμογής είναι μικροί.
- Αυξημένες τιμές λόγου, μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, εμφανίζουν τα δείγματα kn2c, kn2a, kn2d, kn2b, kn3c και kn1c, τα οποία παρουσιάζουν και υψηλά

ποσοστά μεταβολής του μετρούμενου εμβαδού της προβαλλόμενης επιφάνειας σε σχέση με αυτό της πραγματικής.

- Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου στις περιοχές που έχουν καθαριστεί με ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου εφαρμογής δεν οδηγεί κατ' ανάγκη σε αύξηση των τιμών του λόγου. Οι παρατηρούμενες αυξομειώσεις των τιμών της ενεργής επιφάνειας σε σχέση με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής της πάστας υποδεικνύουν ότι η πάστα οδηγεί σε τέτοια απώλεια αυθεντικού υλικού που καθιστά τις επιφάνειες πιο λείες μετά από συγκεκριμένο χρόνο δράσης.
- Συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου στις περιοχές που έχουν καθαριστεί με ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου 10%, παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου εφαρμογής οδηγεί σε αύξηση των τιμών του λόγου.

Πίνακας 6.6.3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων

Κωδικός Δείγματος	Επέμβαση Καθαρισμού	Λόγος εμβαδού πραγματικής προς εμβαδόν προβαλλόμενης επιφάνειας	Rq (μm)
kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	2,280	19
kn3c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min	2,220	18
kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min	2,002	21
kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ,	1,984	15
kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40 min	1,960	16
kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ,	1,927	21
kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min	1,606	10
kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min,	1,360	8
kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min	1,288	12
kn3cd	ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	1,712	13

6.6.4 Αποτελέσματα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης – παράμετροι μικροδομής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με στόχο τον προσδιορισμό δεικτών της επιφανειακής μικροδομής στις αποπλυμένες ανάγλυφες επιφάνειες του κίονα του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EDGE.EXE. Το πρόγραμμα αυτό, κάνοντας χρήση fractal μαθηματικών, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της fractal διάστασης της επιφάνειας του κάθε εξεταζόμενου δείγματος. Κατόπιν με τη βοήθεια των μαθηματικών τύπων, που παρουσιάζονται στο κεφ. 2.2.2, υπολογίζονται ο συντελεστής μορφής, η πυκνότητα ρηγματώσεων και ο συντελεστής ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής μορφής αποτελεί ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας, επομένως έχει φυσικοχημική έννοια, καθώς όσο μεγαλύτερη τραχύτητα παρουσιάζει μια επιφάνεια μετά από καθαρισμό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιδεκτικότητα της στη φθορά και η ταχύτητα διάβρωσης της από τη χρονική στιγμή εκείνη και μετά. Παράλληλα, η πυκνότητα ρηγματώσεων αποτελεί μέτρο του % ποσοστού του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται επιφανειακά από ρηγματώσεις, κοιλότητες και κενούς χώρους πόρων, επομένως έχει φυσικομηχανική έννοια (όσο περισσότερες ρηγματώσεις παρουσιάζει μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο καταπονημένη είναι). Τέλος, ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που είναι παράγωγο μέγεθος των δύο παραπάνω, έχει τόσο φυσικοχημική, όσο και φυσικομηχανική έννοια.

Η γενική κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από την επιφάνεια με το μεγαλύτερο συντελεστή μορφής (πιο τραχιά επιφάνεια) και καταλήγοντας στην επιφάνεια με τον μικρότερο (πιο λεία επιφάνεια) είναι η εξής:

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση τον συντελεστή μορφής

AB57, 5 min	(5,92)	Τραχιά επιφάνεια
Δείγμα διάγνωσης	(4,30)	↑
Υγρή μικροψηγατοβολή	(4,26)	
DS, 20 min	(3,73)	
DS + NC, 2x10 min	(3,47)	
DS, 40 min	(3,45)	
DS + NC, 2x20 min	(3,35)	
DS + NC, 20 min	(3,11)	
DS, 10 min	(3,09)	
DS + NC, 10 min	(3,04)	Λεία επιφάνεια

Όσον αφορά στην fractal διάσταση των δειγμάτων, γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερες ανωμαλίες του εξεταζόμενου ανάγλυφου αποκαλύπτονται και επομένως η παρατηρούμενη τραχύτητα αυξάνεται. Από τον πίνακα 6.6.4.1 είναι φανερό ότι η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη τιμή fractal διάστασης και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη,

Κωδικός δείγματος	Διάγνωση / Επέμβαση καθαρισμού	Οριακές τιμές T _L και T _U		Fractal Dimension	Pixel Count (L)	L* (pixels)	F.D. (%)	Συντελεστής μορφής (Γ)	Συντελεστής ευθρυπτότητας (%)
		T _L	T _U						
Kn3ca	AB57 5 min	T _L 112	T _U 128	1,212	1162	455	24,8	5,92	64
Kn3cd	Διάγνωσης	T _L 70	T _U 113	1,132	1005	512	20	4,30	47
Kn2d	Υγρή ψηγματοβολή	T _L 47	T _U 65	1,170	642	339	18	4,26	46
Kn2b	DS 20 min	T _L 115	T _U 150	1,134	870	512	23,3	3,73	44
Kn1c	DS + NC 2 x 10 min	T _L 78	T _U 102	1,118	818	512	22,7	3,47	41
Kn2a	DS 40 min	T _L 70	T _U 130	1,115	816	512	20,6	3,45	40
Kn2c	DS 2 x 20 min	T _L 100	T _U 148	1,109	795	512	19,7	3,35	39
Kn1a	DS + NC 20 min	T _L 72	T _U 122	1,088	443	303	19	3,11	36
Kn3b	DS 10 min	T _L 63	T _U 115	1,093	742	512	16,4	3,09	35
Kn1b	DS + NC 10 min	T _L 80	T _U 175	1,086	733	512	16,6	3,04	35
<p>Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των δεικτών αποτίμησης: $\rho(\Gamma/F.D.) = 0,63$ $\rho(F.D./F.I.) = 0,72$ $\rho(D/F.D.) = 0,62$ $\rho(D/F.I.) = 0,96$ $\rho(\Gamma/D) = 0,96$</p>									

Πίνακας 6.6.4.1: Αποτελέσματα επεξεργασίας δειγμάτων των αποπλυμένων επιφανειών του κίονα στο EAM

είναι ίδια με την κατάταξη των δειγμάτων βάσει του συντελεστή μορφής, ξεκινώντας από την πιο τραχιά επιφάνεια και καταλήγοντας στην πιο λεία, με μοναδική ανακολουθία την αντιστροφή των θέσεων μεταξύ των μεθόδων DS + NC 20 min (Συντελεστής μορφής = 3,11 και Fractal διάσταση = 1,088) και DS 10 min (Συντελεστής μορφής = 3,09 και Fractal διάσταση = 1,093). Οι διαφορές μεταξύ των τιμών των δύο μεγεθών, όπως φαίνεται, είναι τόσο μικρές που δικαιολογούν την ασυνέχεια των δύο κατατάξεων (μηδαμινές διαφορές \Rightarrow σχεδόν ίδια στοιχεία τραχύτητας).

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και fractal διάστασης είναι πολύ υψηλός και ίσος με 0,96, άρα η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μεγάλη.

Η τιμή της μέσης πυκνότητας ρηγματώσεων κάθε δείγματος, μας δίνει το % ποσοστό του όγκου του πλέγματος του υλικού, που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές, μέχρι βάθους 100 μm . Αν κατατάξουμε τα δείγματα των επεμβάσεων καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ρηγματώσεων και καταλήγοντας σε αυτό με τη μικρότερη, προκύπτει η εξής κατάταξη:

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση την πυκνότητα ρηγματώσεων

AB57, 5 min	(24,8%)	Μεγάλη πυκνότητα ρηγματώσεων ↑ ↓ Μικρή πυκνότητα ρηγματώσεων
DS, 20 min	(23,3%)	
DS + NC, 2x10 min	(22,7%)	
DS, 40 min	(20,6%)	
Δείγμα διάγνωσης	(20%)	
DS, 2x20 min	(19,7%)	
DS + NC, 20 min	(19%)	
Υγρή ψηγατοβολή	(18%)	
DS + NC, 10 min	(16,6%)	
DS, 10 min	(16,4%)	

Ο συντελεστής μορφής και η πυκνότητα ρηγματώσεων που αντιστοιχούν στο δείγμα διάγνωσης, αντικατοπτρίζουν, με τις υψηλές τους τιμές, τον χαρακτηριστικό τύπο φθοράς της αποπλυμένης επιφάνειας, που παρουσιάζεται καταπονημένη με παρουσία ρηγματώσεων στον επιφανειακό ασβεστίτη .

Οι ασυνέχειες που υπάρχουν μεταξύ της κατάταξης με βάση το συντελεστή μορφής και της κατάταξης με βάση την πυκνότητα ρηγματώσεων είναι οι εξής:

- Η επιφάνεια του δείγματος που αντιστοιχεί στην μέθοδο της υγρής ψηγατοβολής, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζει τον δεύτερο μεγαλύτερο συντελεστή μορφής, παρουσιάζει αρκετά χαμηλή τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων. Επειδή ακριβώς η υγρή ψηγατοβολή είναι μια πολύ δραστική μέθοδος (μη εκλεκτική μέθοδος, η αποτελεσματικότητα της οποίας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία του χειριστή), οδήγησε σε απώλεια αυθεντικού υλικού, αυξάνοντας την τραχύτητα της επιφάνειας. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και από τις αντίστοιχες εικόνες SEM, προκάλεσε μικρή καταπόνηση της

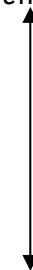
επιφάνειας χωρίς τη δημιουργία ρηγματώσεων (γι' αυτό παρουσιάζει μικρή τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων).

- Αντιστροφή των θέσεων μεταξύ της μεθόδου εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 10 min (Συντελεστής μορφής = 3,09 και Πυκνότητα ρηγματώσεων = 16,4%) και της μεθόδου εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 min (Συντελεστής μορφής = 3,04 και Πυκνότητα ρηγματώσεων = 16,6%). Οι διαφορές μεταξύ των τιμών των δύο μεγεθών, όπως φαίνεται, είναι τόσο μικρές που δικαιολογούν την ασυνέχεια των δύο κατατάξεων (μηδαμινές διαφορές \Rightarrow σχεδόν ίδια στοιχεία τραχύτητας και πυκνότητας ρηγματώσεων).

Από τον πίνακα 6.6.4.1 φαίνεται ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων και μεταξύ πυκνότητας ρηγματώσεων και fractal διάστασης είναι σχετικά χαμηλοί και αντίστοιχα ίσοι με 0,6 και 0,61. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ότι η αναλογία μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών είναι μέτρια.

Από τον Πίνακα 4 είναι φανερό ότι το δείγμα που αντιστοιχεί στη μέθοδο εφαρμογής πάστας AB57 για 5 min, παρουσιάζει συντελεστή ευθρυπτότητας μεγαλύτερο ακόμα και από την αντίστοιχη τιμή του δείγματος διάγνωσης. Αυτή η πολύ μεγάλη τιμή συντελεστή ευθρυπτότητας οφείλεται στην καταπόνηση που προκάλεσε η μέθοδος αυτή στην επιφάνεια. Η κατάταξη των δειγμάτων που αντιστοιχούν στις επεμβάσεις καθαρισμού, ξεκινώντας από αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ευθρυπτότητας και καταλήγοντας σε αυτό με τον μικρότερο (φυσικοχημικά ευσταθέστερη επιφάνεια), είναι ίδια με τη κατάταξη που γίνεται με βάση το συντελεστή μορφής.

Κατάταξη δειγμάτων καθαρισμού με βάση τον συντελεστή ευθρυπτότητας

AB57, 5 min	(64%)	Περισσότερο εύθρυπτη επιφάνεια  Λιγότερο εύθρυπτη επιφάνεια
Δείγμα διάγνωσης	(47%)	
Υγρή μικροψηματοβολή	(46%)	
DS, 20 min	(44%)	
DS + NC, 2x10 min	(41%)	
DS, 40 min	(40%)	
DS 2x20 min	(39%)	
DS + NC, 20 min	(36%)	
DS, 10 min	(35%)	
DS + NC, 10 min	(35%)	

Από τον πίνακα 6.6.4.1 φαίνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και πυκνότητας ρηγματώσεων είναι σχετικά υψηλός και ίσος με 0,69, επομένως η αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών είναι σχετικά υψηλή. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ συντελεστή ευθρυπτότητας και fractal διάστασης είναι ίσος με 0,96, επομένως η αναλογία μεταξύ των δύο εξεταζόμενων μεγεθών είναι μεγάλη.

Οι τιμές όλων των συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ των δεικτών αποτίμησης, για την επιφάνεια K_n , είναι λίγο ως πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της επιφάνειας K_e .

Ειδικότερα από τον μέτριο βαθμό αναλογίας συντελεστή μορφής και πυκνότητας ρηγματώσεων, συμπεραίνουμε ότι δεν μπορούν να υπάρξουν ορθά συμπεράσματα, μέσω της σύγκρισης των δεικτών αποτίμησης, για το σύνολο των δειγμάτων. Αυτό δεν οφείλεται στο γεγονός ότι οι τελικά επιλεγόμενες τιμές των T_L και T_U , σε κάθε περίπτωση εικόνας, δεν υπήρξαν κατάλληλες για την ορθή διαδικασία βαθμονόμησης των αντίστοιχων εικόνων SEM (η βαθμονόμηση, σε κάθε εικόνα, υπήρξε κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτική των στοιχείων που αυτή παρουσίαζε).

Γενικότερα όμως μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

1. Η υψηλή τιμή του συντελεστή μορφής στο δείγμα διάγνωσης, υποδεικνύει την αυξημένη τραχύτητα της επιφάνειας, εξαιτίας της καταπόνησης του επιφανειακού ασβεστίτη με την παρουσία ρηγματώσεων (γι' αυτό και η τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων είναι υψηλή). Η φυσικοχημική αστάθεια της επιφάνειας, που δηλώνεται από την υψηλή τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας, αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στον ασβεστίτη. Επομένως η επιφάνεια του δείγματος διάγνωσης χαρακτηρίζεται από την παρουσία καταπονημένου και σχετικά φυσικοχημικά ασταθούς ασβεστίτη, ενώ παρουσιάζει μεγάλη τραχύτητα.
2. Η μέθοδος καθαρισμού της εφαρμογής **πάστας AB57 για 5 min**, οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με υψηλότερους δείκτες αποτίμησης από την επιφάνεια του δείγματος διάγνωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αύξησε κατά πολύ την τραχύτητα της επιφάνειας και καταπόνησε ακόμη περισσότερο την ήδη βεβαρημένη κατάσταση της πέτρας (αύξηση της πυκνότητας ρηγματώσεων). Η πολύ υψηλή τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας, υποδεικνύει την μεγάλη φυσικοχημική αστάθεια της επιφάνειας, η οποία σύμφωνα με τα στοιχεία των χημικών αναλύσεων αποτελείται μόνο από ασβεστίτη (άρα ο επιφανειακός ασβεστίτης καθίσταται εξαιρετικά εύθρυπτος) και την πιθανή απώλεια αυθεντικού υλικού από τη δράση της μεθόδου καθαρισμού. Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος καθαρισμού με εφαρμογή AB57 για 5 min, είναι καλύτερα να αποφευχθεί.
3. Η μέθοδος καθαρισμού της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 10 min**, οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με χαμηλότερους δείκτες αποτίμησης από την επιφάνεια του δείγματος διάγνωσης. Η συγκεκριμένη επιφάνεια παρουσιάζει μειωμένη, κατά πολύ, τιμή συντελεστή μορφής (μικρότερη τραχύτητα) και μειωμένη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων, σε σχέση με την επιφάνεια που αντιστοιχεί στο δείγμα διάγνωσης. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με χαμηλότερο συντελεστή ευθρυπτότητας από το δείγμα διάγνωσης, γεγονός που σημαίνει ότι η επιφάνεια αυτή είναι λιγότερο επιδεκτική στη φθορά και περισσότερο ευσταθής φυσικοχημικά, από τις δύο υπόλοιπες που εξετάζονται. Η μέθοδος εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 10 min εφαρμόστηκε σε επιφάνεια που παρουσίαζε ίδια κατάσταση διάβρωσης με το δείγμα διάγνωσης. Σε αυτή την περίπτωση μετέβαλε κατά πολύ την κατάσταση της επιφάνειας, μειώνοντας κατά πολύ την επιφανειακή τραχύτητα και εξομαλύνοντας αρκετά την ρηγματωμένη επιφανειακή δομή, εξαιτίας απώλειας αυθεντικού υλικού (πιθανά η απώλεια αυτή ευνοήθηκε από την παρουσία λεπτόκοκκου ασβεστίτη). Η μέθοδος αυτή είναι σαφώς πιο αποδεκτή από την μέθοδο εφαρμογής

πάστας AB57 για 5 min, αλλά επειδή οδηγεί στην απώλεια αυθεντικού υλικού και στην παρουσία στην επιφάνεια σχετικά εύθρυπτου ασβεστίτη, δεν είναι η καλύτερη δυνατή.

4. Η επιφάνεια του δείγματος που αντιστοιχεί στην μέθοδο της **υγρής ψηγματοβολής**, παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή μορφής, δηλαδή υψηλή τραχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια αυτή είναι η περισσότερο επιδεκτική στη φθορά. Η επιφάνεια αυτή επίσης δίνει συγκριτικά τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή συντελεστή ευθρυπτότητας, που σημαίνει ότι είναι φυσικοχημικά ασταθέστερη από τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες μεθόδους. Η υγρή ψηγματοβολή είναι μια πολύ δραστική μέθοδος, αύξησε την τραχύτητα της επιφάνειας και προκάλεσε απώλεια αυθεντικού υλικού. Επομένως, η φυσικοχημική αστάθεια της επιφάνειας, που δηλώνεται από την υψηλή τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας, αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στο ασβεστίτη (παρουσία εύθρυπτου ασβεστίτη στην επιφάνεια). Η μικρή τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εφαρμογή της, η μέθοδος προκάλεσε επιφανειακή καταπόνηση της επιφάνειας χωρίς, όμως, τη δημιουργία μεγάλου ποσοστού ρηγματώσεων.
5. Η μέθοδος καθαρισμού της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 min** (DS+NC, 10 min), οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με το χαμηλότερο συγκριτικά συντελεστή μορφής και το χαμηλότερο συντελεστή ευθρυπτότητας. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια αυτή είναι λιγότερο επιδεκτική στη φθορά και περισσότερο ευσταθής φυσικοχημικά, από τις υπόλοιπες. Επίσης παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων
6. Η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην μέθοδο καθαρισμού της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 20 min** (DS+NC, 20 min), παρουσιάζει συγκριτικά τον τρίτο χαμηλότερο συντελεστή μορφής και το δεύτερο χαμηλότερο συντελεστή ευθρυπτότητας. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια αυτή είναι λιγότερο επιδεκτική στη φθορά και περισσότερο ευσταθής φυσικοχημικά από τις υπόλοιπες, πλην της επιφάνειας που αντιστοιχεί στη μέθοδο DS+NC, 10 min και στη μέθοδο DS 10 min.
7. Η επιφάνεια που αντιστοιχεί στη μέθοδο της **διπλής εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 min** (DS+NC, 2x20 min), παρουσιάζει σχετικά υψηλές τιμές συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας. Ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που αν εξεταστεί μεμονωμένα είναι μεγάλος, αντιπροσωπεύει την φυσικοχημική αστάθεια του επιφανειακού ασβεστίτη (σχετικά εύθρυπτος επιφανειακός ασβεστίτης).
8. Η μέθοδος καθαρισμού της **διπλής εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 min** (DC+NC, 2x10 min), οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με τον υψηλότερο συντελεστή μορφής (μεγάλη τραχύτητα) και την υψηλότερη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων, συγκριτικά με τις επιφάνειες που αντιστοιχούν σε όλες τις μεθόδους DS+NC. Η επιφάνεια αυτή, επίσης, δίνει μεγάλη τιμή συντελεστή ευθρυπτότητας, που σημαίνει ότι είναι φυσικοχημικά ασταθής (η φυσικοχημικά ασταθέστερη από τις επιφάνειες που αντιστοιχούν σε όλες τις μεθόδους DS+NC).

9. Η επιφάνεια που αντιστοιχεί στη μέθοδο της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 40 min** (DS 40 min), δίνει συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας των οποίων οι τιμές είναι ακριβώς οι ενδιάμεσες συγκριτικά με τις τιμές των υπολοίπων μεθόδων. Ο συντελεστής ευθρυπτότητας, που αν εξεταστεί μεμονωμένα είναι αρκετά μεγάλος, αντιπροσωπεύει την φυσικοχημική αστάθεια του επιφανειακού ασβεστίτη.
10. Η μέθοδος καθαρισμού της εφαρμογής **ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 20 min** (DS, 20 min), οδηγεί στην παραγωγή επιφάνειας με τον υψηλότερο συντελεστή μορφής (μεγαλύτερη τραχύτητα), την υψηλότερη τιμή πυκνότητας ρηγματώσεων και την μεγαλύτερη τιμή συντελεστή ευθρυπτότητας (φυσικοχημικά ασταθέστερη), πλην της επιφάνειας που αντιστοιχεί στην υγρή ψηγματοβολή και την πάστα AB57. Η φυσικοχημική αστάθεια της επιφάνειας αυτής, που δηλώνεται από την υψηλή τιμή του συντελεστή ευθρυπτότητας, αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στο ασβεστίτη.
11. Από τα παραπάνω αποτελέσματα, δεν μπορούμε με σιγουριά να κάνουμε πρόταση για επέμβαση καθαρισμού. Θεωρούμε ότι πρέπει να πραγματοποιηθούν περαιτέρω εφαρμογές πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού, οι οποίες να είναι εξαιρετικά ήπιες και να βασίζονται μόνο στη χρήση απιονισμένου νερού (καλό παράδειγμα τέτοιας ήπιας επέμβασης θεωρείται η χρήση ατομικού νερού). Με μια τέτοια μέθοδο, δεν θα τροποποιηθεί η μικροδομή των αποπλυμένων επιφανειών. Σε περίπτωση που κριθεί σκόπιμη η μικρή τροποποίηση της επιφανειακής μικροδομής του τύπου φθοράς των αποπλυμένων επιφανειών, πιθανά θα μπορούσαμε να προτείνουμε τη χρήση της μεθόδου DS+NC, 10 min (εφαρμογής ιοντοανταλλακτικής ρητίνης και διαλύματος $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 min) ή / και της μεθόδου DS, 10 min (εφαρμογή ιοντοανταλλακτικής ρητίνης για 10 min).

6.6.5 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Η τεχνική της χρωματομετρίας έλαβε χώρα επί τόπου στις εξεταζόμενες περιοχές των αποπλυμένων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ΕΑΜ (βόρειος προσανατολισμός), πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, για τη μέτρηση των χρωματικών μεταβολών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* (Χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab), καθώς και για την εξέταση του βαθμού απομάκρυνσης των μαύρων επικαθίσεων, μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού.

Στις επί τόπου μετρήσεις, κάθε περιοχή καθαρισμού χωρίστηκε σε κανάβο, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, ο ίδιος αριθμός μετρήσεων στα ίδια σημεία και συνεπώς τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των τιμών των παραμέτρων L^* , a^* , b^* , αφού μετρήθηκαν 5 σημεία στη ράβδωση του κίονα και 10 σημεία στο τμήμα του αύλακα που παρουσίαζε επιφανειακή απόπλυση, για κάθε εξεταζόμενη περιοχή πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκαν (β.λ. πίνακα 6.6.5) οι μεταβολές των χρωματικών παραμέτρων (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) κάθε περιοχής καθαρισμού, καθώς και η συνολική διαφορά χρώματος μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Πίνακας 6.6.5: Αποτελέσματα επί τόπου χρωματομετρικού ελέγχου

Κωδικός Επιφάνειας	Επέμβαση Καθαρισμού	L^* πριν	a^* πριν	b^* πριν	L^* μετά	a^* μετά	b^* μετά	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 10min,	59.88	-0.56	5.99	65.02	-1.39	2.14	5.14	-0.83	-3.85	6.48
Kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 20min	58.65	-2.42	6.14	66.00	-0.93	3.56	7.35	1.49	-2.58	7.93
Kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. $(NH_4)_2CO_3$, 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ	57.01	-0.11	6.82	65.96	-0.96	2.67	8.95	-0.85	-4.15	9.90
Kn3ca	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min	65.02	-1.5	3.05	68.95	-2.24	-1.85	3.93	-0.74	-4.9	6.33
Kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ	65.55	-0.63	3.19	69.28	-2.69	1.30	3.73	-2.06	-1.89	4.66
Kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min	64.41	-0.63	3.74	68.12	-1.61	0.83	3.71	-0.98	-2.91	4.82
Kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min	62.42	-1.2	2.72	67.28	-2.06	0.30	4.86	-0.86	-2.42	5.50
Kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40 min	62.44	-0.62	4.33	68.78	-1.09	2.22	6.34	-0.47	-2.11	6.70
Kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ	62.0	-1.14	2.7	70.75	-1.91	0.08	8.75	-0.77	-2.62	9.17

Στις επιφάνειες αυτές, σε όλες τις θέσεις πραγματοποίησης επεμβάσεων καθαρισμού, παρατηρείται ικανοποιητική συνολική μεταβολή χρώματος ΔE^* , που δε ξεπερνά την τιμή του 10. Η μεγαλύτερη τιμή συνολικής μεταβολής χρώματος προκύπτει στη θέση Kη1c, όπου και εφαρμόστηκε συνδυασμός ιοντανταλλακτικής ρητίνης και πάστας ανθρακικού αμμωνίου, δύο αλληπάλληλες φορές με χρόνους εφαρμογής 10min για την κάθε φορά. Η μεταβολή της λαμπρότητας είναι σε όλες τις θέσεις θετική, γεγονός που σημαίνει ότι μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού προέκυψαν πιο φωτεινές επιφάνειες και οι οποίες μαύρες επικαθήσεις υπήρχαν στις επιφάνειες απομακρύνθηκαν.

Η μεγαλύτερη αύξηση της λαμπρότητας, όπως αναμενόταν προκύπτει στην ίδια θέση, δηλαδή την Kη1c, όπου έχουμε μεγαλύτερη τιμή της συνολικής μεταβολής του χρώματος ($\Delta E^*=9.90$). Σε όλες τις θέσεις έχουμε μετατόπιση στο χρωματικό επίπεδο προς το πράσινο, αφού οι τιμές Δa^* είναι αρνητικές, με εξαίρεση τη θέση εφαρμογής ιοντανταλλακτικής ρητίνης και πάστας ανθρακικού αμμωνίου για 20min Kη1a, όπου ($\Delta a^*=1.49$) και έχουμε μετατόπιση προς το κόκκινο. Επιπλέον, σημειώνεται μετατόπιση στο χρωματικό χώρο προς το μπλε, με αρνητικές τιμές του Δb^* για όλες τις περιοχές.

6.6.6 Μερικά Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών της μικροσκοπίας οπτικών ινών, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλυση ακτίνων Χ, της laser προφίλομετρίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας και της χρωματομετρίας που δίνουν σαφείς πληροφορίες σε σχέση με τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, την επιφανειακή μορφολογία και συνοχή (επιφανειακή μικροδομή), καθώς και το χρώμα των καθαρισμένων επιφανειών και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοσθείσες μέθοδοι καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν συνάγονται τα εξής:

Μετά την εφαρμογή μιας επέμβασης καθαρισμού σε αποπλυμένη επιφάνεια είναι σχεδόν αδύνατο να αποφευχθεί η απώλεια αυθεντικού υλικού, αφού η όποια δράση της μεθόδου (φυσική, χημική, βιολογική ή θερμική) λαμβάνει χώρα στο ασβεστίτικο υλικό απευθείας, ενώ παράλληλα δεν υπάρχει γύψος, η παρουσία ή μη του οποίου αποτελεί σαφή ένδειξη για τον βαθμό απώλειας του αυθεντικού υλικού. Όπως αποδείχθηκε και στο κεφάλαιο του εργαστηριακού ελέγχου των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου οι δείκτες της επιφανειακής μικροδομής και της επιφανειακής μορφολογίας υποδεικνύουν την απώλεια μάζας αυθεντικού υλικού που έχει λάβει χώρα και μάλιστα την καταγράφουν αριθμητικά. Όμως, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποκλειστικοί δείκτες αποτίμησης της αν δε ληφθεί υπόψη η δραστικότητα του εφαρμοζόμενου καθαρισμού που υποδηλώνει αν η καταγραφόμενη επιφανειακή μικροδομή προκύπτει από ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού ακόμα και αν οι τιμές της κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό. Έτσι, ταξινομώντας τη δραστικότητα της κάθε επέμβασης καθαρισμού που εφαρμόστηκε στην ανάγλυφη επιφάνεια του κίονα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

Υψηλότερη χημική δράση παρουσιάζει η πάστα AB57 (κωδικός επιφάνειας kn3ca), εξαιτίας της εκλεκτικής δράσης του δινατριούχου EDTA κατά την πρόσληψη κατιόντων ασβεστίου που οδηγεί στη δημιουργία σταθερής χηλικής ένωσης. Παρόλο που ο χρόνος εφαρμογής είναι μικρός (5 min), η δραστικότητα της πάστας χαρακτηρίζεται υψηλή.

Η χημική δράση της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό χαρακτηρίζεται ως μέτρια προς χαμηλή, αφού ουσιαστικά αποτελεί μια πιο δραστική μορφή της απλής εφαρμογής νερού με σηπιόλιθο. Με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής όμως, αυξάνεται η δραστικότητά της αφού προσλαμβάνοντας τα ανθρακικά και τα όξινα ανθρακικά ανιόντα που προκύπτουν από τη διάλυση του ασβεστίτη (κυρίως του ανακρυσταλλωμένου που βρίσκεται στην εξώτατη στοιβάδα των αρχιτεκτονικών επιφανειών) παράγονται κατά τόπους βασικά διαλύματα υδροξειδίου του ασβεστίου με υψηλό pH.

Η χημική δράση της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα 10% κ.ο. ανθρακικού αμμωνίου χαρακτηρίζεται ως μέτρια προς υψηλή, και αποτελεί μια πιο δραστική επέμβαση καθαρισμού από αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό. Πιο συγκεκριμένα, το δ/μα του ανθρακικού αμμωνίου παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή pH (οι μετρήσεις με πεχάμετρο των παρασκευασμένων δ/μάτων επί τόπου, πριν την προσθήκη της ρητίνης, έδειξαν την τιμή 9), αφού ουσιαστικά συνίσταται από κατιόντα αμμωνίας και ανιόντα όξινων ανθρακικών, τα οποία και προσλαμβάνονται από την ανιονική ρητίνη. Παράλληλα, με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής, αυξάνεται η δραστικότητά της.

Τέλος, η μέθοδος της υγρής μικροψηγατοβολής παρουσιάζει την ήπια διαλυτική δράση του νερού και μέτρια προς υψηλή μηχανική δράση που προκύπτει από τη βολή του αιωρήματος νερού – σφαιρικών σωματιδίων ανθρακικού ασβεστίου (αναλογία 1:3), παρόλο που κατά την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν χαμηλές πιέσεις της τάξης του 0.5bar. Ο δε χρόνος εφαρμογής χαρακτηρίζεται ως μέτριος αφού έλαβαν χώρα 2 με 3 περάσματα της τεχνικής στην προς καθαρισμό επιφάνεια.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι επεμβάσεις καθαρισμού των επιφανειών kn1a, kn1c, kn3ca, kn2a, kn2b, kn2c (δηλ. η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 20λεπτά, η διπλή εφαρμογή της για 10 λεπτά η φορά, η πάστα AB57 για 5 λεπτά, η ιοντοανταλλακτική ρητίνη με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά, για 40 λεπτά και η διπλή εφαρμογή της για 20 λεπτά η φορά) οδηγούν σε απώλεια αυθεντικού υλικού ασβεστίτη μη αποδεκτή. Παράλληλα, οι δείκτες επιφανειακής μικροδομής των τεχνικών αυτών παρουσιάζουν τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων, συντελεστή μορφής και συντελεστή ευθρυπτότητας, είτε αυξημένες σε σχέση με το δείγμα της διάγνωσης της φθοράς (οπότε παράγονται ασβεστιπικές επιφάνειες μετά τον καθαρισμό περισσότερο επιδεκτικές στη φθορά), ή μειωμένες υποδεικνύοντας την ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού που έχει λάβει χώρα λόγω της υψηλής τους δραστηριότητας. Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις για τις τιμές της τραχύτητας R_q και της ενεργής επιφάνειας. Σε σχέση με τη συνολική μεταβολή χρώματος οι καταγραφόμενες τιμές είναι χαμηλές (μικρότερες του 10), γεγονός λογικό αφού το ποσοστό των μαύρων επικαθήσεων που πρέπει να απομακρυνθούν δεν είναι μεγάλο.

Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10λεπτά, παρόλο που παρουσιάζει μέτρια προς μικρή δραστηριότητα και συνεπώς η όποια απώλεια του ασβεστίτη φαίνεται να είναι ελεγχόμενη, προκαλεί μείωση (μετρίου επιπέδου) και των πέντε παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε χαμηλά επίπεδα (<5). Αντίστοιχα ισχύουν και για τη μέθοδο καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10λεπτά, με μόνες διαφοροποιήσεις τις καταγραφές μεγαλύτερης μείωσης της παραμέτρου της τραχύτητας R_q , και της ενεργής επιφάνειας (γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη δραστηριότητα της μεθόδου), ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (<6,5).

7. Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παλμικής θερμογραφίας υπερύθρου, σε σχέση με τις παραμέτρους της πυκνότητας ρηγματώσεων και της λαμπρότητας L*

Η παλμική θερμογραφία είναι η θερμογραφική τεχνική όπου η επιφάνεια του προς μέτρηση δοκιμίου θερμαίνεται παλμικά και η μεταβατική θερμοκρασία (thermal transient) της επιφάνειας καταγράφεται από μια υπέρυθρη κάμερα [198]. Την τελευταία δεκαετία μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία πολλές πειραματικές εφαρμογές της παλμικής θερμογραφίας για το μη καταστρεπτικό έλεγχο επιφανειών σε σχέση με τον εντοπισμό του βάθους ή της διαμέτρου διαφορετικών τύπων ελαττωματικών περιοχών [199, 200, 201].

Η μη καταστρεπτική τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς [202, 203], εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και την αποτίμηση της συμβατότητας υλικών και επεμβάσεων συντήρησης σε ιστορικά δομικά υλικά και κατασκευές. Η δε εφαρμογή της, όταν συνοδεύεται από συστηματική καταγραφή αποτελεσμάτων ενόργανων τεχνικών ή/και ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων, επιτρέπει την εμβάθυνση στην αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της, ώστε να μπορούν να αναπτυχθούν εργαλεία πρόβλεψης για τις όποιες αστοχίες ή και ασυμβατότητες επεμβάσεων συντήρησης. Συνεπώς, η εφαρμογή της παλμικής θερμογραφίας και η διερεύνηση της συσχέτισης των αποτελεσμάτων της με τα αποτελέσματα άλλων τεχνικών που εφαρμόστηκαν για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού καθίσταται πολύ σημαντική.

Με βάση λοιπόν το ανωτέρω πλαίσιο, στην παρούσα διδακτορική διατριβή εφαρμόστηκε η παλμική θερμογραφία, μία ενεργητική προσέγγιση της υπέρυθρης θερμογραφίας, σε ελεγχόμενες συνθήκες εργαστηρίου, για την εξέταση τόσο των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, όσο και των στερεών δειγμάτων που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες των ιστορικών κτιρίων της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού. Καταγράφηκαν οι θερμοκρασιακές μεταβολές των εξεταζόμενων επιφανειών κατά τη μεταβατική φάση (transient phase) της ψύξης, και κατασκευάστηκαν διαγράμματα της θερμοκρασιακής διαφοράς (thermal contrast plots) στο χρόνο. Παράλληλα, διερευνήθηκε η επίδραση των παραμέτρων του χρώματος και της επιφανειακής μορφολογίας, στο ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας.

Πιο συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις της παλμικής θερμογραφίας, τόσο των πρότυπων δοκιμίων, όσο και των δειγμάτων του μνημείου, προέκυψαν διαγράμματα της έντασης των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων σε σχέση με το χρόνο, αφού η θερμοκάμερα είναι βαθμονομημένη, έτσι ώστε να καταγράφει την ένταση των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων που είναι 16 bit. Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση οδηγεί στη λήψη εικόνων καλύτερης διακριτικής ικανότητας – ακρίβειας, ενώ η ένταση των τόνων του γκρίζου των pixels των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων σχετίζεται με την εκπεμπόμενη ακτινοβολία και αποτελεί το αντίστοιχο της θερμοκρασίας [97], [179], [180].

Στα παρακάτω διαγράμματα της θερμοκρασιακής μεταβολής στο χρόνο, (μεταβολής της έντασης των τόνων του γκρίζου των ριχέλς των λαμβανόμενων θερμικών εικόνων στο χρόνο), παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της παλμικής θερμογραφίας που καταγράφηκαν για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου σε σχέση:

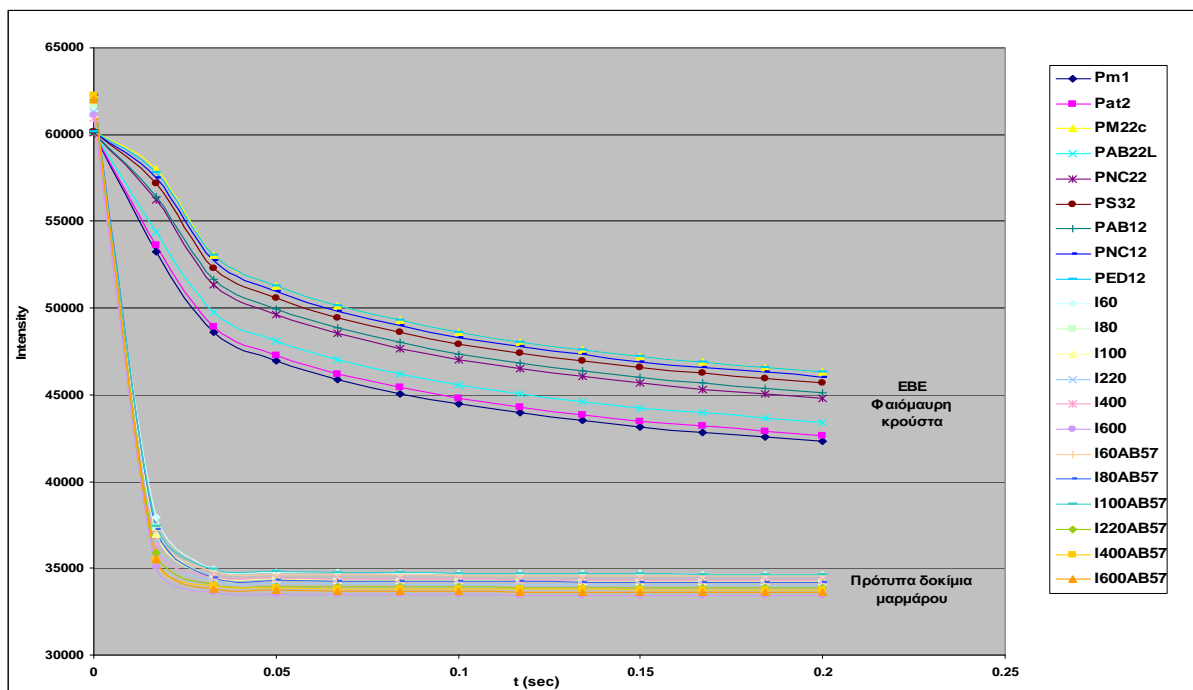
(α) με τα δείγματα των φαιόμαυρων κρουστών των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (εικ. 7.1),

(β) με τα δείγματα του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (εικ. 7.2),

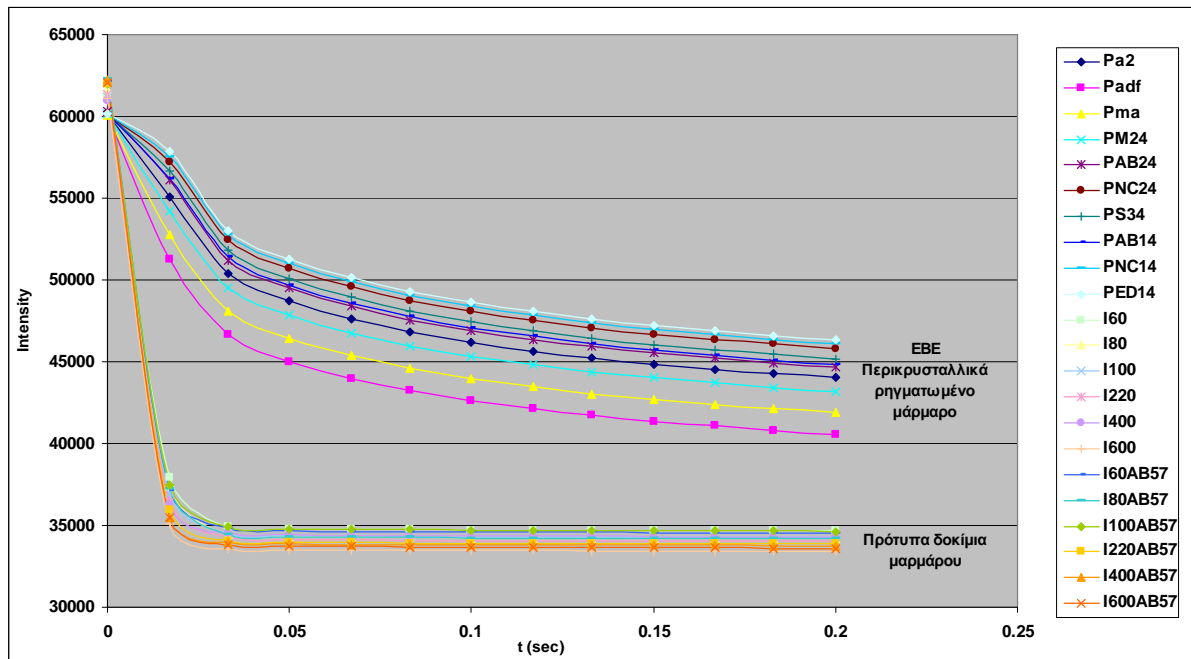
(γ) με τα δείγματα των φαιόμαυρων κρουστών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κίονα του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (εικ. 7.3),

(δ) με τα δείγματα των αποπλυμένων επιφανειών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κίονα του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (εικ. 7.4), καθώς και

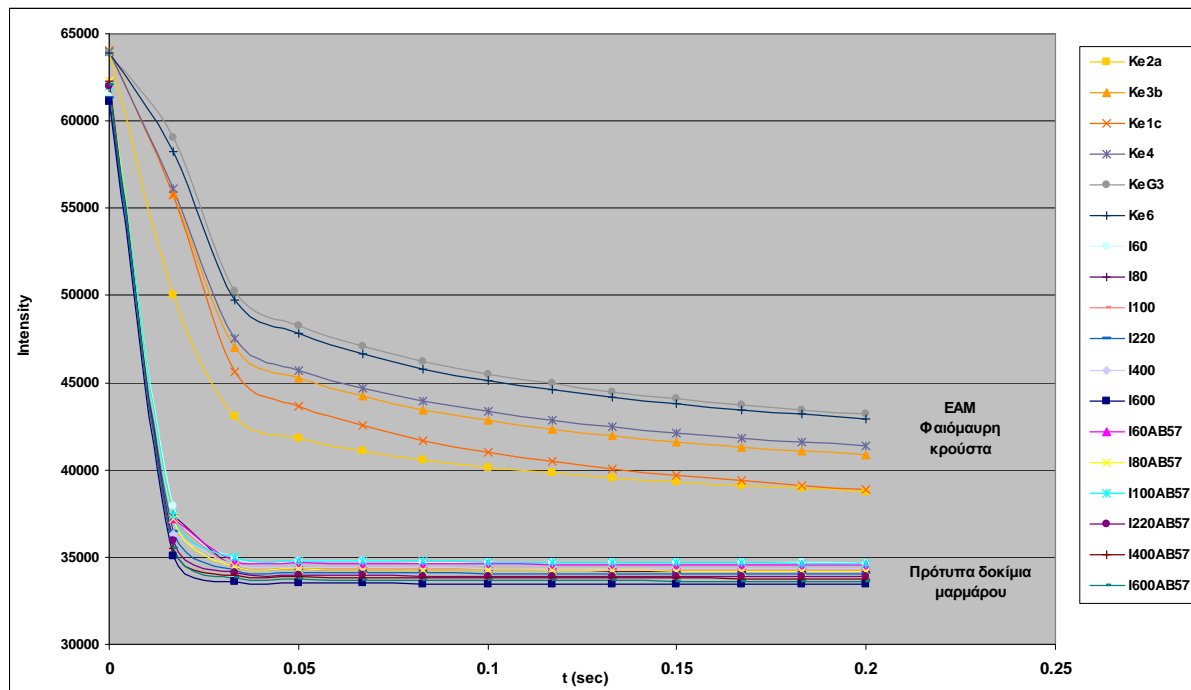
(ε) με τα δείγματα των φαιόμαυρων κρουστών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κιονόκρανου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (εικ. 7.5).



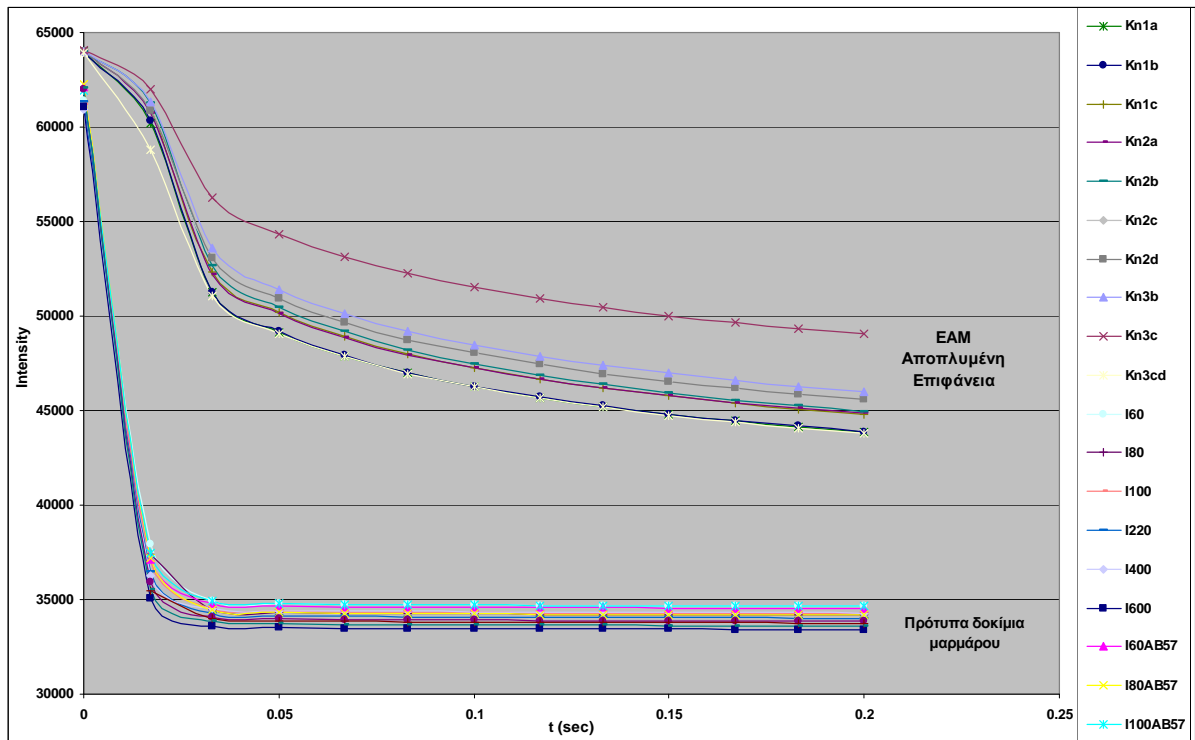
Εικ. 7.1: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου και τα δείγματα των φαιόμαυρων κρουστών στην Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάδος



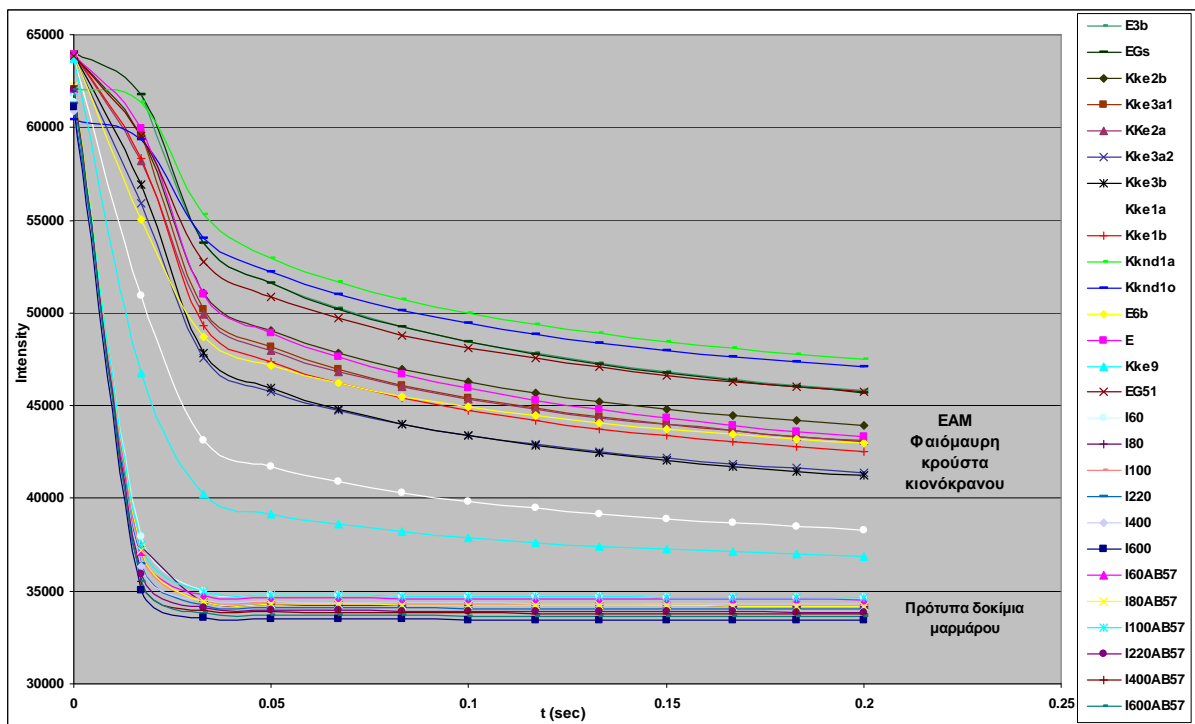
Εικ. 7.2: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου και τα δείγματα του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου στην Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάδος



Εικ. 7.3: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου και τα δείγματα των φαϊόμαυρων κρουστών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κίονα του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου



Εικ. 7.4: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου και τα δείγματα των αποπλυμένων επιφανειών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κίονα του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου



Εικ. 7.5: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο για τα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου και τα δείγματα των φαιόμαυρων κρουστών στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες κιονόκρανου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου

Από τα παραπάνω διαγράμματα καθίσταται σαφές ότι ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου είναι υψηλότερος (δηλ. η ψύξη ολοκληρώνεται γρηγορότερα) από τους αντίστοιχους ρυθμούς πτώσης της θερμοκρασίας των δειγμάτων των δύο εξεταζόμενων ιστορικών κτιρίων και για τους τρεις παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς. Ακόμα και στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, όπου οι πρώτες καταγραφόμενες θερμοκρασιακές τιμές είναι χαμηλότερες από αυτές των πρότυπων δοκιμίων, ο ρυθμός ψύξης των εργαστηριακά κατεργασμένων δοκιμίων ολοκληρώνεται πιο γρήγορα.

Τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η ένταση των τόνων του γκρίζου των ριχεί των θερμικών εικόνων (αντίστοιχο της θερμοκρασίας), συσχετίζεται με το χρόνο στη μεταβατική φάση μέσω ενός κινητικού μοντέλου 1^{ης} τάξης (β.λ. εικ. 7.6):

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{t_c} (I - I_e) \quad (7.1)$$

Όπου

$\frac{dI}{dt}$: ο ρυθμός πτώσης της έντασης δηλ. της θερμοκρασίας της εξεταζόμενης μαρμάρινης επιφάνειας,

I : η ένταση σε χρόνο t ,

I_e : η ένταση της επιφάνειας στην ισορροπία δηλ. σε άπειρο χρόνο (όταν το φαινόμενο της ψύξης έχει ολοκληρωθεί και η επιφάνεια έχει πλέον τη θερμοκρασία περιβάλλοντος),

t_c : η σταθερά χρόνου για $I=0,666 I_e$. Η τιμή της σταθεράς χρόνου έχει φυσική σημασία όπως αυτή ορίζεται από την κινητική της 1^{ης} τάξης και δηλώνει τον χρόνο που απαιτείται, έτσι ώστε η θερμοκρασία της μετρούμενης επιφάνειας να πέσει στα 2/3 της τιμής της ισορροπίας της.

Η εξίσωση 7.1 ολοκληρώνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{I - I_e}{I_o - I_e} = \exp \left(-\frac{t}{t_c} \right) \quad (7.2)$$

Όπου I_o είναι η ένταση για $t=0$

Η μελέτη της κινητικής της ψύξης των εξεταζόμενων επιφανειών των πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου διαφορετικής επιφανειακής μορφολογίας και των δειγμάτων πεντελικού μαρμάρου των εξεταζόμενων επιφανειών των ιστορικών κτιρίων EBE και EAM, πριν και μετά από την εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού, πραγματοποιήθηκε με ένα εκθετικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει τη σχέση της σταθεράς χρόνου t_c με την πυκνότητα ρηγματώσεων (FD) και τη λαμπρότητα (L), ενσωματώνοντας την επίδραση του υλικού, βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$t_c = \frac{1}{c_o} \left(\frac{FD}{FD_o} \right)^{c_1} \left(\frac{L}{L_o} \right)^{c_2} \quad (7.3)$$

όπου

c_o : εμπειρική σταθερά του υλικού

c_1 : εμπειρική σταθερά εξαρτώμενη από την πυκνότητα ρηγματώσεων

c_2 : εμπειρική σταθερά εξαρτώμενη από την λαμπρότητα

FD : πυκνότητα ρηγματώσεων

L : λαμπρότητα

Οι παράμετροι του προτεινόμενου μοντέλου προσδιορίζονται ελαχιστοποιώντας την παρακάτω τυπική απόκλιση [204]:

$$S = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(I - I^*)^2}{(N - p)} \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

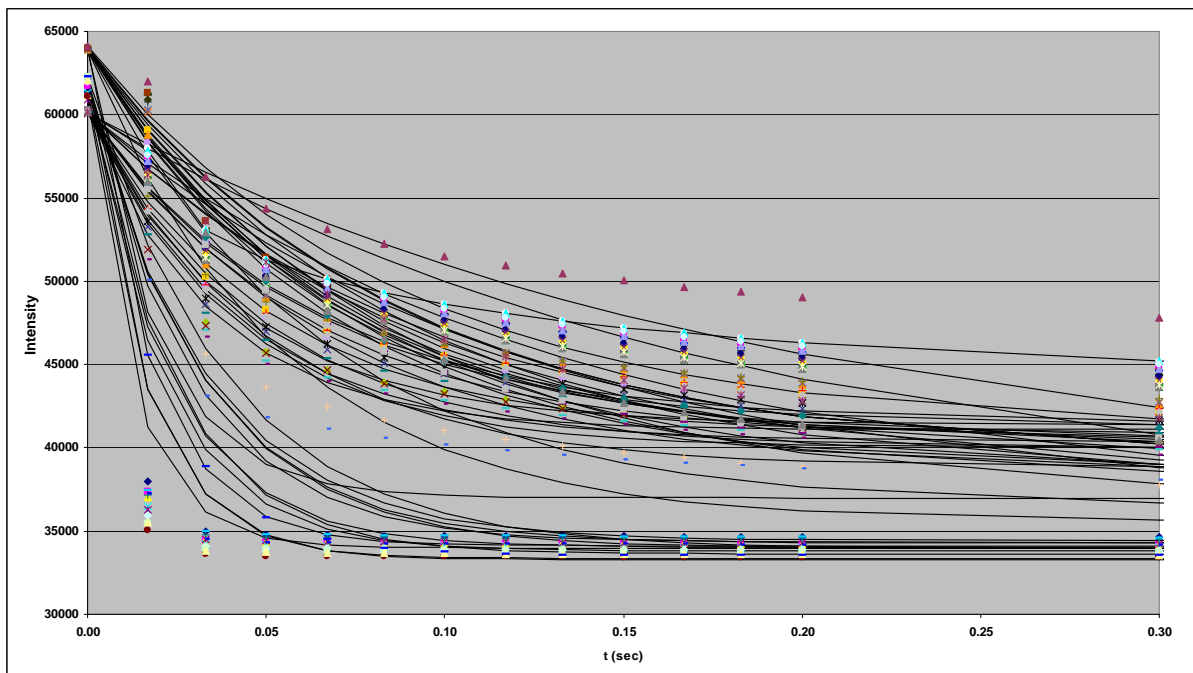
Όπου

I και I^* είναι οι πειραματικές και οι προβλεπόμενες τιμές της έντασης (θερμοκρασίας),

N είναι ο αριθμός των πειραματικών σημείων και

p είναι ο αριθμός των προσδιοριζόμενων παραμέτρων

Παράλληλα, έλαβε χώρα στατιστική ανάλυση και η τυπική απόκλιση του μαθηματικού προτύπου βρέθηκε λίγο πιο κάτω από το πειραματικό σφάλμα περίπου στο 11.24%.



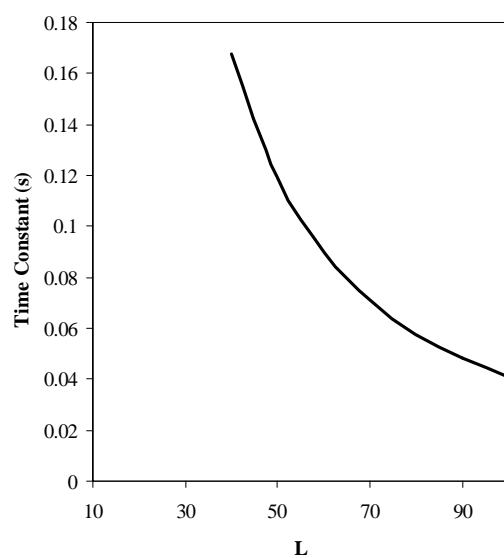
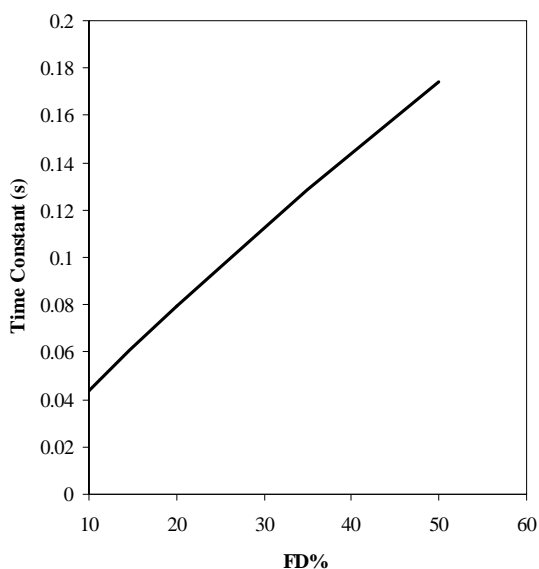
Εικ. 7.6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας στο χρόνο (πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές, βάσει του προτεινόμενου μοντέλου) για το σύνολο των εξεταζόμενων επιφανειών.

Οι πειραματικές τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων και της λαμπρότητας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των εμπειρικών σταθερών c_0 , c_1 , και c_2 μέσω της εξίσωσης 7.3 και οι τιμές που λαμβάνουν είναι 8.40, 1.5, και -0.85 αντιστοίχως.

Το διάγραμμα 7.7 δείχνει τη συσχέτιση της σταθεράς χρόνου t_c του ρυθμού ψύξης των μαρμάρινων επιφανειών σε σχέση με την πυκνότητα ρηγματώσεων. Αύξηση των τιμών της πυκνότητας ρηγματώσεων οδηγεί σε αύξηση της σταθεράς χρόνου, δηλ. ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας της μετρούμενης επιφάνειας μειώνεται (το φαινόμενο της ψύξης λαμβάνει χώρα πιο αργά). Χαμηλός ρυθμός ψύξης σημαίνει ότι η επιφάνεια ανταλλάσσει θερμική ενέργεια (φτάνει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος) πιο αργά.

Η περιγραφή του φαινομένου από το προτεινόμενο κινητικό μοντέλο είναι λογική, αφού όταν η πυκνότητα ρηγματώσεων παρουσιάζει υψηλές τιμές, τότε το ποσοστό (%) του όγκου της κάθε επιφάνειας που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές μέχρι βάθους 100μm είναι υψηλό. Αυτές οι ελαττωματικές περιοχές παρεμποδίζουν την ομαλή μεταφορά της θερμότητας, οδηγώντας σε αργή ψύξη [205].

Επιπλέον, το διάγραμμα 7.8 δείχνει τη συσχέτιση της σταθεράς χρόνου t_c του ρυθμού ψύξης των μαρμάρινων επιφανειών σε σχέση με τη λαμπρότητα. Αύξηση των τιμών της λαμπρότητας οδηγεί σε μείωση της σταθεράς χρόνου, δηλ. ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας της μετρούμενης επιφάνειας αυξάνεται (το φαινόμενο της ψύξης λαμβάνει χώρα πιο γρήγορα). Όταν η επιφάνεια του μαρμάρου παρουσιάζει υψηλές τιμές λαμπρότητας, η ανάκλαση της επιφάνειας είναι υψηλή και συνεπώς η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται με υψηλότερους ρυθμούς.



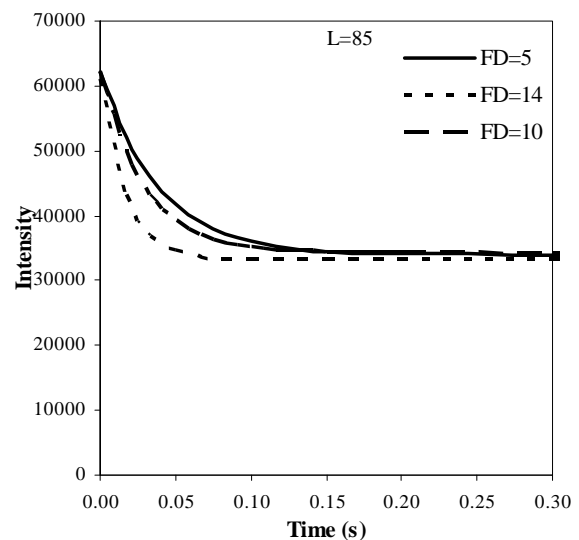
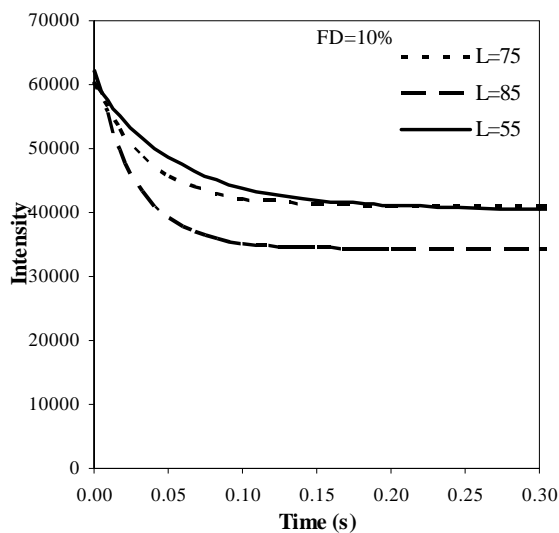
Εικ. 7.7: Επίδραση της πυκνότητας ρηγματώσεων FD(%) στη σταθερά χρόνου t_c (s) του ρυθμού ψύξης για το σύνολο των εξεταζόμενων επιφανειών

Εικ. 7.8: Επίδραση της λαμπρότητας (L) στη σταθερά χρόνου t_c (s) του ρυθμού ψύξης για το σύνολο των εξεταζόμενων επιφανειών

Παράλληλα, το προτεινόμενο κινητικό μοντέλο βοηθά περαιτέρω στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παλμικής θερμογραφίας που έλαβε χώρα στις μαρμάρινες επιφάνειες τόσο των μνημείων, πριν και μετά από τις πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού, όσο και των πρότυπων δοκιμών που κατεργάστηκαν στο εργαστήριο με διαφορετικά γυαλόχαρτα.

Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση της λαμπρότητας στο ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας των μαρμάρινων επιφανειών μελετήθηκε για σταθερή τιμή της πυκνότητας ρηγματώσεων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 7.9. Αποδεικνύεται από την εφαρμογή του μοντέλου ότι όταν οι μαρμάρινες επιφάνειες παρουσιάζουν μεσαίες προς χαμηλές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων (όπως 10%), ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας αυξάνεται (γίνεται πιο γρήγορος) με την αύξηση των τιμών της λαμπρότητας.

Παράλληλα, μελετήθηκε η επίδραση της πυκνότητας ρηγματώσεων στο ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας των μαρμάρινων επιφανειών για σταθερή τιμή της λαμπρότητας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 7.10. Διαπιστώνεται από την εφαρμογή του μοντέλου ότι όταν οι μαρμάρινες επιφάνειες παρουσιάζουν υψηλές τιμές λαμπρότητας (όπως 85), ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας αυξάνεται (γίνεται πιο γρήγορος) με την αύξηση των τιμών της πυκνότητας ρηγματώσεων



Εικ. 7.9: Πρόβλεψη του ρυθμού ψύξης μαρμάρινων επιφανειών για πυκνότητα ρηγματώσεων $FD=10(\%)$ και τρεις διαφορετικές τιμές λαμπρότητας ($L=55, 75, 85$).

Εικ. 7.10: Πρόβλεψη του ρυθμού ψύξης μαρμάρινων επιφανειών για λαμπρότητα $L=85$ και τρεις διαφορετικές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων ($FD= 5, 10, 14\%$).

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο εμπειρικό μοντέλο κινητικής 1^{ης} τάξης το φαινόμενο της ψύξης των μελετώμενων μαρμάρινων επιφανειών με την εφαρμογή της παλμικής θερμογραφίας περιγράφεται ικανοποιητικά. Διαπιστώθηκε δε, ότι η σταθερά χρόνου του φαινομένου εξαρτάται, μέσω εκθετικής συνάρτησης η οποία ενσωματώνει την επίδραση του υλικού, από την πυκνότητα ρηγματώσεων και τη λαμπρότητα των εξεταζόμενων επιφανειών.

Χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο η παλμική θερμογραφία ανάγεται σε πολύ χρήσιμη μη καταστρεπτική τεχνική, όσον αφορά στην αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού. Πλέον, η δυνατότητα χρήσης αντίστοιχου εξοπλισμού παλμικής θερμογραφίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, σε συνδυασμό με την επί τόπου εφαρμογή της χρωματομετρίας που παρέχει τις τιμές της λαμπρότητας, καθώς και της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου, μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου. Αυτή η προοπτική του συνολικά μη καταστρεπτικού και ποσοτικού προσδιορισμού της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου είναι μεγάλης σημασίας για την παρακολούθηση στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης (ανθεκτικότητας) των καθαρισμένων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου.

8. Συμπεράσματα σε σχέση με τα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού

Οι μελέτες περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν και αφορούσαν το συχνά απαντώμενο στην πολιτιστική μας κληρονομιά υλικό του πεντελικού μαρμάρου, σε διαφορετικούς και χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς και είδη αρχιτεκτονικών επιφανειών σε αστικό ρυπασμένο περιβάλλον, η πληθώρα των διαφορετικών υλικών και επεμβάσεων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν, οι διαφορετικές τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για να αποδώσουν ποιοτικά και ποσοτικά την κατάσταση των αρχιτεκτονικών επιφανειών μετά τους καθαρισμούς, καθώς και ο εργαστηριακός έλεγχος πρότυπων δοκιμίων πεντελικού μαρμάρου, συγκροτούν μια επαρκή, γνωσιολογικής υφής, βάση δεδομένων η οποία επιτρέπει τη διατύπωση των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε σχέση, αφενός με τις μετρούμενες παραμέτρους που περιγράφουν και χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια και αφετέρου με τις τεχνικές μέτρησης που δίνουν τιμές στις οριζόμενες παραμέτρους.

Μιας και ο καθαρισμός αποτελεί την κατ' εξοχήν μη αντιστρεπτή επέμβαση συντήρησης και λαμβάνει χώρα αφότου έχουν ολοκληρωθεί οι όποιες δομητικές επεμβάσεις αποκατάστασης κρίνονται αναγκαίες, η έννοια της συμβατότητας η οποία πρέπει να τον διέπει, έγκειται στη σαφή οριοθέτηση του τι πρέπει να απομακρύνεται από την επιφάνεια και του τι πρέπει να μείνει, καθώς και των ορίων της μικροδομής της καθαρισμένης επιφάνειας, έτσι ώστε αυτή να επιδεικνύει στο χρόνο μικρότερη επιδεκτικότητα στη φθορά, λαμβάνοντας πάντα υπόψη την αισθητική και το χρώμα.

Συνεπώς, τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού ή αλλιώς τα χαρακτηριστικά μιας καθαρισμένης επιφάνειας, οι μετρούμενες παράμετροι των χαρακτηριστικών αυτών, καθώς και οι τεχνικές μέτρησης των οριζόμενων παραμέτρων (β.λ. σχήματα 8.1 και 8.2), διαμορφώνονται ως εξής:

1^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού – Εξεταζόμενο Χαρακτηριστικό Καθαρισμένης Επιφάνειας:

Χημική-ορυκτολογική σύσταση των επιφανειών, καθώς και διαστρωμάτωση των απαντούμενων υλικών στην επιφάνεια.

Μετρούμενες Παράμετροι:

- Διατήρηση Πάτινας
- Διατήρηση Αυθεντικού Υλικού
- Απομάκρυνση Μαύρων Επικαθήσεων

Τεχνικές Μέτρησης των Παραμέτρων:

- Μικροσκοπία Οπτικών Ινών - FOM,
- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης & Μικρανάλυση Ακτινών Χ - SEM-EDS,
- Χρωματομετρία

2^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού – Εξεταζόμενο Χαρακτηριστικό Καθαρισμένης Επιφάνειας:

Υφή, Μορφολογία και Συνοχή Επιφανειών – Επιφανειακή Μικροδομή

Μετρούμενες Παράμετροι:

- Τραχύτητα - Rq

- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Συντελεστής Μορφής – τραχύτητα
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων
- Συντελεστής Ευθρυπτότητας
- Θερμοκρασία επιφάνειας

Τεχνικές Μέτρησης των Παραμέτρων:

- Μικροσκοπία Οπτικών Ινών - FOM
- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης, SEM
- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM
- Παλμική Θερμογραφία – PT

3° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού – Εξεταζόμενο Χαρακτηριστικό Καθαρισμένης Επιφάνειας:

Χρώμα

Μετρούμενες Παράμετροι:

- Λαμπρότητα, L
- Διαφορά στο κόκκινο-πράσινο, a
- Διαφορά στο κίτρινο-μπλε, b
- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔE

Τεχνικές Μέτρησης των Παραμέτρων:

Χρωματομετρία

4° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού – Εξεταζόμενο Χαρακτηριστικό Καθαρισμένης Επιφάνειας:

Κατάσταση Διατήρησης - Επιδεκτικότητα στη Φθορά - Ανθεκτικότητα στο Χρόνο

Μετρούμενες Παράμετροι, που παρέχουν σαφείς ενδείξεις:

- Τραχύτητα-Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Συντελεστής Μορφής – τραχύτητα
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων
- Συντελεστής Ευθρυπτότητας
- Θερμοκρασία επιφάνειας

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM
- Παλμική Θερμογραφία – PT

Παράμετρος Εφικτά Μετρήσιμη στο Χρόνο:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔE

Τεχνική Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

Σκοπός των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού και της διαδικασίας αποτίμησής τους, είναι να διασφαλιστεί ότι κάθε μεταβολή της επιφάνειας, μετά από τον προτεινόμενο καθαρισμό,

θα τηρεί τους κοινώς αποδεκτούς και επιδιωκόμενους στόχους για κάθε κριτήριο και τις παραμέτρους που το ορίζουν και θα είναι πλήρως προβλέψιμη και αναπαραγωγίσιμη, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί πληρώντας τις προδιαγραφές από τον εργολήπτη στο σύνολο των αρχιτεκτονικών επιφανειών του μνημείου.

Συνεπώς, μετά τη διαμόρφωση των κριτηρίων αποτίμησης, τις παραμέτρους που τα ορίζουν και τις τεχνικές μέτρησης που τα περιγράφουν, πρέπει να διατυπωθούν (α) η μεθοδολογία χρήσης των τεχνικών μέτρησης που εφαρμόστηκαν, καθώς και (β) οι κοινώς αποδεκτοί και επιδιωκόμενοι στόχοι για το καθένα από τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού

(α) Συμπεράσματα σε σχέση με τη μεθοδολογία χρήσης των τεχνικών μέτρησης των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού

Παρακάτω αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί που παρουσιάζουν οι τεχνικές μέτρησης σε σχέση με τη χρήση και την εφαρμογή τους επί τόπου και στο εργαστήριο, ενώ παράλληλα εξάγονται συμπεράσματα για το ποιες αποδίδουν πιστότερα και αντικειμενικότερα τις παραμέτρους που διέπουν τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού.

Η **μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)** είναι μια μη καταστρεπτική τεχνική, η οποία εφαρμόζεται επί τόπου και παρέχει άμεσα ποιοτικές πληροφορίες όσον αφορά στη μορφολογία και την υφή της επιφάνειας, πριν και μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού. Η γενική αυτή μορφολογική επισκόπηση μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού μπορεί να δώσει ποιοτικά δεδομένα σε σχέση με την κατάσταση των περατωτικών ορίων του ασβεστίτη, την παρουσία νέων ρωγμών ή κοιλοτήτων, καθώς και την απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων στο σύνολο της εξεταζόμενης επιφάνειας.

Με τη χρήση της **Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης & Μικρανάλυσης Ακτινών Χ (SEM-EDS)**, επιτυγχάνεται χημική και ορυκτολογική μελέτη της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και άμεση ποιοτική εξέταση της υφής και της μορφολογίας της πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Το FOM και το SEM-EDS είναι τεχνικές μέτρησης, οι οποίες δρουν συμπληρωματικά μεταξύ τους, όσον αφορά στη συλλογή πληροφοριών για την υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή (ή αλλιώς επιφανειακή μικροδομή) της κάθε εξεταζόμενης επιφάνειας. Το FOM ως μια μη καταστρεπτική τεχνική μπορεί να σαρώσει επιφανειακά το σύνολο της εξεταζόμενης επιφάνειας, ενώ όταν οι λαμβανόμενες από το SEM μικροσκοπικές εικόνες παρουσιάζουν στερεά δείγματα των εξεταζόμενων επιφανειών κατεργασμένα σε τομή, λαμβάνονται πληροφορίες για τη χημική-ορυκτολογική σύσταση, τη διαστρωμάτωση, την υφή, τη συνοχή και τη μορφολογία της αντίστοιχης περιοχής σε βάθος αρκετών μικρομέτρων. Συνεπώς, με το συνδυασμό των δύο ανωτέρω μεθόδων λαμβάνονται ποιοτικές πληροφορίες για την επιφανειακή μικροδομή τόσο σε βάθος, όσο και κατά πλάτος της επιφάνειας.

Η ποσοτικοποίηση των ποιοτικών δεδομένων που αφορούν στην επιφανειακή μικροδομή που λαμβάνονται από το SEM και το FOM μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

Ο πρώτος, (που είναι άμεσα σχετιζόμενος με την τεχνική του SEM και αφορά στη **ψηφιακή επεξεργασία με το λογισμικό EDGE εικόνων SEM** που έχουν ληφθεί υπό συγκεκριμένες

συνθήκες, σε δείγματα κατεργασμένα σε τομή), εισάγει μέσω της προσδιοριζόμενης fractal διάστασης του επιφανειακού ανάγλυφου της εξεταζόμενης περιοχής:

(α) το συντελεστή μορφής που αποτελεί δείκτη τραχύτητας,

(β) την πυκνότητα ρηγματώσεων που εκφράζει το ποσοστό (%) του όγκου του κάθε δείγματος που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές μέχρι βάθους 100μm, καθώς και

(γ) το συντελεστή ευθρυπτότητας, ο οποίος είναι δείκτης της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής ευστάθειας της επιφάνειας του μαρμάρου και είναι ένα παράγωγο μέγεθος που προκύπτει από τη συσχέτιση του συντελεστή μορφής και της πυκνότητας ρηγματώσεων.

Παρόλο που το πρόγραμμα EDGE είναι ένα εξεζητημένο λογισμικό που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για την αποτίμηση μαρμάρινων επιφανειών μετά από την εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού (οπότε και οι όποιες ιδιαιτερότητες του υλικού και του στόχου της συγκεκριμένης επέμβασης συντήρησης έχουν ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη), δεν παύει η χρησιμοποιηθείσα τεχνική να ανήκει στις τεχνικές της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας όπου, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης της εικόνας, η εμπειρία του χρήστη πάνω στα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού δηλ. του μαρμάρου, καθώς και τα θέματα του καθαρισμού και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, παίζει καθοριστικό ρόλο. Παράλληλα, στους περιορισμούς της τεχνικής πρέπει να συνυπολογιστεί ότι η εξαγωγή των δεικτών της επιφανειακής μικροδομής, μέσω της χρήσης του λογισμικού EDGE, πραγματοποιήθηκε σε ένα μόνο επιφανειακό ανάγλυφο-προφίλ της κάθε εξεταζόμενης περιοχής μήκους 1024μm (1 pixel αντιστοιχεί σε 2μm), αφού λήφθηκε ένα μόνο δείγμα πολύ μικρού μεγέθους από κάθε εξεταζόμενη περιοχή, εξαιτίας της δεοντολογίας που διέπει την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και καθιστά ενίοτε ακόμα και την απαραίτητη δειγματοληψία απαγορευτική.

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η ποσοτικοποίηση των ποιοτικών δεδομένων της επιφανειακής μικροδομής που λαμβάνονται από το SEM και το FOM και ο οποίος καλύπτει τους περιορισμούς της ψηφιακής επεξεργασίας των εικόνων SEM, τουλάχιστον σε ότι αφορά την όποια υποκειμενικότητα (που αναπόφευκτα διέπει) τη βαθμονόμηση των εικόνων της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, είναι η εφαρμογή της **laser προφίλομετρίας** στα δείγματα που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

Οι τρισδιάστατες τοπογραφικές απεικονίσεις των εξεταζόμενων δειγμάτων, που προκύπτουν από την εφαρμογή της laser προφίλομετρίας, έχουν συνολικό εμβαδόν 1.25mm x1.25mm, ενώ το μέγεθος βήματος του laser ορίστηκε στο 1μm, με αποτέλεσμα η τοπογραφία της επιφάνειας να καταγράφεται με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της αντιπροσωπευτικής τιμής της παραμέτρου της τραχύτητας Rq για κάθε δείγμα, έλαβε χώρα μέσω του υπολογισμού της σε 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα x και 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα y, μήκους 1250μm το κάθε ένα. Οι παραπάνω συνθήκες μέτρησης επιτρέπουν πιο αντικειμενική απόδοση της τραχύτητας από αυτή που προκύπτει από το λογισμικό EDGE, ενώ παράλληλα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παράμετρος Rq είναι η παράμετρος της τραχύτητας που χρησιμοποιείται σχεδόν καθολικά στην επιστήμη της μηχανικής των

υλικών και της τριβολογίας σε πληθώρα υλικών και για την αποτίμηση διαφορετικών κατεργασιών.

Παρόλα αυτά, οι μικρές τιμές που καταγράφονται για την παράμετρο της τραχύτητας R_q σε δείγματα επιφανειών πριν την εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού όπου η παρουσία των μαύρων επικαθήσεων είναι μεγάλη, αποδεικνύουν ότι σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει περιορισμός στην εφαρμογή της τεχνικής. Αυτό διαπιστώνεται χαρακτηριστικά στα αποτελέσματα της laser προφίλομετρίας των δειγμάτων που ελήφθησαν πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού στις περικρυσταλλικά ρηγματωμένες μαρμάρινες επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της ΕΒΕ. Πιο συγκεκριμένα, στα δείγματα των επιφανειών που παρουσιάζουν μικρές ποσότητες μαύρων επικαθήσεων, καταγράφονται τιμές R_q 26 μm και 29 μm , ενώ στο δείγμα που προέρχεται από την περιοχή του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με μεγάλες ποσότητες μαύρων επικαθήσεων η τιμή της R_q πέφτει στα 7 μm , παρόλο που τα ποιοτικής υψής αποτελέσματα των FOM και SEM δείχνουν ότι η κατάσταση της επιφανειακής μικροδομής είναι αντίστοιχη και στα τρία εξεταζόμενα δείγματα.

Η τεχνική της laser προφίλομετρίας απεικονίζει την τοπογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας, καταγράφοντας τη μορφολογία της εξώτατης στοιβάδας. Η παρουσία των μαύρων επικαθήσεων παράγει επιφάνειες που αφενός «γεμίζουν» τα κενά του έντονου αναγλύφου των περατωτικών ορίων των κόκκων του ασβεστίτη ή/και των κρυστάλλων του γύψου, ομαλοποιώντας την κατά άλλα τραχιά επιφάνεια και αφετέρου απορροφούν ισχυρά την προσπίπτουσα ακτίνα του φωτός με άμεση συνέπεια η ένταση του ανακλώμενου φωτός που καταγράφεται να μειώνεται, επιδρώντας πτωτικά στη μέτρηση των τιμών της R_q [119].

Το ποιο από τα δύο παραπάνω φαινόμενα υπερισχύει καθίσταται σαφές κατά την εξέταση της περιοχής της φαιόμαυρης κρούστας της λείας αρχιτεκτονικής επιφάνειας της ΕΒΕ. Στην επιφάνεια αυτή, τα δείγματα πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού παρουσίαζαν τιμές τραχύτητας R_q 8 μm και 10 μm , ενώ μετά την εφαρμογή του ατομικού νερού (επέμβαση που αφαίρεσε τμήμα του επιφανειακού στρώματος των μαύρων ατμοσφαιρικών επικαθήσεων - ατελής καθαρισμός) η τιμή της R_q καταγράφηκε στα 19 μm . Συνεπώς, η καταγραφή μειωμένων τιμών R_q κατά την εφαρμογή της laser προφίλομετρίας σε δείγματα με υψηλό ποσοστό μαύρων επικαθήσεων, πρέπει να οφείλεται κυρίως στο γεγονός του ότι οι μαύρες επικαθήσεις «γεμίζουν» τα κενά του αναγλύφου των κόκκων του ασβεστίτη ή/και των κρυστάλλων του γύψου, ομαλοποιώντας την τραχιά επιφάνεια.

Έτσι λοιπόν ο περιορισμός αυτός μπορεί να αρθεί αν τα δείγματα που πρόκειται να εξετασθούν με την τεχνική της laser προφίλομετρίας, ληφθούν από την αρχιτεκτονική επιφάνεια αφότου απομακρυνθεί, με μαλακή βούρτσα και νερό, το εύθρυπτο και μη συνεκτικά συνδεδεμένο στρώμα των ατμοσφαιρικών εναποθέσεων, πρακτική που ούτως ή άλλως εφαρμόζεται πριν από οποιαδήποτε πιλοτική επέμβαση καθαρισμού.

Τεχνικά και πρακτικά προβλήματα δεν επιτρέπουν τον προσδιορισμό του μεγέθους της ειδικής επιφάνειας, που θα δρούσε καθοριστικά στον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη φθορά μιας καθαρισμένης επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, η μη κανονική γεωμετρία των λαμβανόμενων δειγμάτων σε συνδυασμό με το ακανόνιστο σχήμα του κάτω μέρους του δείγματος, θα οδηγούσε σε αποτελέσματα όπου οι μετρούμενες τιμές της ειδικής επιφάνειας δε θα είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Παράλληλα, η χρήση της αερίου αντίστροφης

χρωματογραφίας (IGC), που βρίσκεται στη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό των ενεργών θέσεων δειγμάτων λίθου σε σχέση με την αντίδρασή τους με διαβρωτικούς παράγοντες όπως το SO₂, DMSO, O₃, NO_x, κ.ά., αναφέρεται σε στερεά δείγματα σκόνης [206]. Σε αυτή την περίπτωση η κοκκομετρία του δείγματος παίζει ρόλο και μπορεί να διαφοροποιήσει το αποτέλεσμα των ενεργών θέσεων αντίδρασης του εξεταζόμενου δείγματος, μη αναλογικά και αναντίστοιχα σε σχέση με την πραγματική ενεργή επιφανειακή στοιβάδα όπου ελέγχει την επιδεκτικότητα στη φθορά της καθαρισμένης επιφάνειας.

Αυτά τα τεχνικά και πρακτικά προβλήματα οδήγησαν τη χρήση του μεγέθους του πραγματικού εμβαδού της επιφάνειας (surface area), το οποίο καταγράφεται με τη χρήση της laser προφίλομετρίας. Η αδιαστατοποίηση του μεγέθους που επιτρέπει τη σύγκριση όλων των μετρηθέντων δειγμάτων, έλαβε χώρα διαιρώντας τις τιμές της πραγματικής επιφάνειας με τις αντίστοιχες της προβαλλόμενης, προκύπτοντας έτσι ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια. Ο λόγος αυτός που αποδίδει τη γεωμετρία των εξεταζόμενων επιφανειών, εκφράζει την απόκλιση τους από την επιπεδότητα, ενώ η αύξησή του ισοδυναμεί με την αύξηση των ενεργών θέσεων στην εξώτατη στοιβάδα της επιφάνειας, θέσεις στις οποίες μπορεί να λάβει χώρα μια χημική αντίδραση. Συνεπώς, αύξηση του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια συνεπάγεται αύξηση της επιδεκτικότητας της προς εξέταση επιφάνειας στη φθορά. Σημειώνεται δε, ότι και για το μέγεθος του λόγου της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια, ισχύει ο αντίστοιχος περιορισμός στη χρήση της τεχνικής της laser προφίλομετρίας για δείγματα που προέρχονται από περιοχές με μεγάλες ποσότητες μαύρων επικαθήσεων, ο οποίος και αίρεται όταν η δειγματοληψία λάβει χώρα μετά την απομάκρυνση, με νερό και μαλακή βούρτσα, του εύθρυπτου και μη συνεκτικά συνδεδεμένου στρώματος των ατμοσφαιρικών εναποθέσεων.

Τα αποτελέσματα της **Παλμικής Θερμογραφίας** σε συνδυασμό με το προτεινόμενο εμπειρικό μοντέλο (που περιγράφει την κινητική της θερμοκρασιακής μεταβολής των θερμικά διεγερμένων μαρμάρινων επιφανειών και αποδεικνύει την εξάρτηση της σταθεράς χρόνου του φαινομένου από την πυκνότητα ρηγματώσεων και την λαμπρότητα, μέσω εκθετικής συνάρτησης που ενσωματώνει την επίδραση του υλικού), δείχνουν ότι όταν η τεχνική χρησιμοποιηθεί στο μέλλον, επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο πρόβλεψης της παραμέτρου της επιφανειακής μικροδομής, της πυκνότητας ρηγματώσεων, εφόσον η χρωματική παράμετρος της λαμπρότητας L μετρηθεί κατά την επί τόπου εφαρμογή της χρωματομετρίας.

Με την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της **χρωματομετρίας** καταγράφονται οι χρωματικές παράμετροι της λαμπρότητας L, της διαφοράς στο κόκκινο-πράσινο a και της διαφοράς στο κίτρινο-μπλε b, σύμφωνα με το χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab. Η χρωματομετρία εκφράζει άμεσα, αντικειμενικά και ποσοτικά τα χρωματικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και το βαθμό απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων από αυτήν. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι για να είναι αντιπροσωπευτικές των εξεταζόμενων επιφανειών οι μετρήσεις των χρωματικών παραμέτρων, θα πρέπει αυτές να πραγματοποιούνται με συγκεκριμένο τρόπο. Έτσι, στις επί τόπου μετρήσεις, κάθε περιοχή καθαρισμού πρέπει να χωρίζεται σε κανάβο, ώστε να πραγματοποιηθεί ο ίδιος αριθμός

μετρήσεων στα ίδια σημεία πριν και μετά από κάθε επέμβαση καθαρισμού και συνεπώς τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι οι μη καταστρεπτικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου είναι η μικροσκοπία οπτικών ινών και η χρωματομετρία. Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της laser προφίλομετρίας και της παλμικής υπέρυθρης θερμογραφίας εφαρμόστηκαν στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν από τις εξεταζόμενες επιφάνειες, πριν από την απαραίτητη κατεργασία για την εφαρμογή της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και μικροανάλυσης ακτίνων Χ.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά τη **διεξαγωγή της δειγματοληψίας**, εξαιτίας του δεοντολογικού περιορισμού που ισχύει στο επιστημονικό πεδίο της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς σε σχέση με τη λήψη δειγμάτων. Είναι σημαντικό λοιπόν, τα στερεά δείγματα που θα συλλεχθούν για να εξεταστούν στο εργαστήριο να έχουν το μικρότερο δυνατό μέγεθος, καθώς και να λαμβάνονται από αντιπροσωπευτικές και αντίστοιχες θέσεις, τόσο πριν και μετά τον καθαρισμό, όσο και μεταξύ των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τον καθαρισμό, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι συγκρίσιμα.

(β) Κοινώς αποδεκτοί και επιδιωκόμενοι στόχοι για το κάθε κριτήριο αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού

1^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: «Χημική-ορυκτολογική σύσταση των επιφανειών, καθώς και διαστρωμάτωση των απαντούμενων υλικών στην επιφάνεια»

Σε γενικές γραμμές ως πάτινα χαρακτηρίζεται κάθε ομοιογενές, συνεκτικό και συνεχές στρώμα που προστατεύει τη μαρμάρινη επιφάνεια, πάνω στην οποία βρίσκεται τοποθετημένο, από την επίδραση των περιβαλλοντικών φορτίων [207]. Ανεξαρτήτως του ζητήματος της βιολογικής ή χημικής προέλευσης των διαφόρων τύπων πάτινας, (θέμα που προκαλεί έντονες αντιπαραθέσεις στην επιστημονική κοινότητα), στην περίπτωση που κατά την φάση της διάγνωσης της φθοράς, οποιοσδήποτε και αν είναι ο παρουσιαζόμενος τύπος φθοράς, διαπιστωθεί η ύπαρξη πάτινας, αυτή θα πρέπει να διατηρείται ανέπαφη μετά από τον καθαρισμό. Η διατήρηση της πάτινας είναι προαπαιτούμενο για να μπορέσει μια επέμβαση καθαρισμού να χαρακτηριστεί αποτελεσματική και επιτυχής.

Φαιόμαυρες κρούστες

Στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών δείκτης του ατελούς καθαρισμού (under-cleaning), είναι η ατελής απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων, δείκτης του υπέρ-καθαρισμού (over-cleaning) δηλ. της απώλειας αυθεντικού υλικού, είναι η απώλεια της γυψοποιημένης επιφάνειας, ενώ επιδιωκόμενος καθαρισμός (target cleaning) ορίζεται αυτός που έχει απομακρύνει πλήρως τις μαύρες επικαθήσεις διατηρώντας παράλληλα το στρώμα του υπάρχοντος γύψου. Ο μικρό-κρυσταλλικός γύψος είναι το πρώτο και συμπαγές τμήμα που δημιουργείται κατά τη διαδικασία της γυψοποίησης των μαρμάρων [52]. Άρα, η διατήρησή του είναι επιθυμητή και αποδεκτή, αφού έτσι (α) διατηρούνται και προστατεύονται

οι λεπτομέρειες των ανάγλυφων, οι οποίες έχουν εξαλειφθεί από τη διεπιφάνεια γύψου - μαρμάρου και (β) ο σχηματισμός του ευνοείται στα περατωτικά όρια των κόκκων της πέτρας με αποτέλεσμα η όποια απομάκρυνσή του να συνεπάγεται αποκόλληση κομματιών [50]. Η δε απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων είναι επιβεβλημένη τόσο για αισθητικούς, όσο και για φυσικοχημικούς λόγους. Με το όρο «μαύρες επικαθήσεις» περιγράφονται συνοπτικά τα αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια που προσροφούνται ή/και εναποτίθενται στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες και συνίστανται κυρίως σε σωματίδια αιθάλης, αργιλοπυριτικής σύστασης σωματίδια, ακόρεστους και κορεσμένους υδρογονάνθρακες, καθώς και οξειδία διαφόρων μετάλλων ή/και μέταλλα όπως Fe, Pb, Zn, Ni, Vn, κ.ά. Οι αισθητικοί λόγοι για τους οποίους είναι επιβεβλημένη η απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων είναι προφανείς, αφού ένας από τους κύριους στόχους των επεμβάσεων καθαρισμού είναι η ανάδειξη και η διατήρηση της καλλιτεχνικής αξίας της εκάστοτε ιστορικής κατασκευής. Εκτός όμως από την αισθητική υποβάθμιση, οι μαύρες επικαθήσεις δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για να λάβουν χώρα οξειδωτικές αντιδράσεις στις οποίες δρουν καταλυτικά κυρίως τα σωματίδια άνθρακα και μετάλλων που εμπεριέχονται σε αυτές [9], οδηγώντας έτσι με την παρουσία τους στην αύξηση της επιδεκτικότητας στην περαιτέρω φθορά των αρχιτεκτονικών επιφανειών.

Αποπλυμένες επιφάνειες

Στις αποπλυμένες επιφάνειες δείκτης του ατελούς καθαρισμού, είναι η ατελής απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων, ενώ δείκτης του υπέρ-καθαρισμού είναι η απώλεια του γύψου, ο οποίος μπορεί να υπάρχει κι συνήθως αναπτύσσεται (ανάλογα με το βαθμό της προστασίας από τη βροχή και τον αέρα της προς εξέταση περιοχής), σε μικρορωγμές και στα περατωτικά όρια των κόκκων του ασβεστίτη. Κατά αντιστοιχία με την περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών ως επιδιωκόμενος καθαρισμός καθορίζεται αυτός που απομακρύνει τις μαύρες επικαθήσεις και διατηρεί τον υπάρχοντα γύψο.

Όμως, στις συχνά απαντώμενες περιπτώσεις αποπλυμένων επιφανειών όπου δεν υπάρχει γύψος, η παρουσία ή μη του οποίου αποτελεί σαφή ένδειξη για τον βαθμό απώλειας του αυθεντικού υλικού και δίνει στοιχεία για τον υπέρ-καθαρισμό, είναι φανερό ότι για να προσδιοριστεί επαρκώς η επιδιωκόμενη κατάσταση πρέπει να αναζητηθούν άλλα δεδομένα σύγκρισης από αυτά των φαιόμαυρων κρουστών.

Μετά την εφαρμογή μιας επέμβασης καθαρισμού σε αποπλυμένη επιφάνεια είναι σχεδόν αδύνατο να αποφευχθεί η απώλεια αυθεντικού υλικού, αφού η όποια δράση της μεθόδου (φυσική, χημική, βιολογική ή θερμική) λαμβάνει χώρα στο ασβεστιτικό υλικό απευθείας. Θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς ότι εφόσον οι παράμετροι της επιφανειακής μικροδομής υποδεικνύουν την απώλεια μάζας αυθεντικού υλικού που έχει λάβει χώρα και μάλιστα την καταγράφουν αριθμητικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποκλειστικοί δείκτες αποτίμησης της. Δηλαδή, να διατυπωθεί ότι εφόσον η απώλεια αυθεντικού υλικού είναι αναπόφευκτη, μεγάλες αυξήσεις ή μεγάλες μειώσεις των τιμών των παραμέτρων της μικροδομής υποδεικνύουν ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού, ενώ όταν οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής καταγράφονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό, η όποια απώλεια αυθεντικού υλικού θεωρείται αποδεκτή.

Το σφάλμα αυτού του συλλογισμού έγκειται στο ότι δεν λαμβάνεται υπόψη τη δραστικότητα του εφαρμοζόμενου καθαρισμού. Αν η δραστικότητα του εφαρμοζόμενου καθαρισμού είναι υψηλή, ή ακόμα και μέτρια, είναι πιθανό να έχει λάβει χώρα ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού ακόμα και αν οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό.

Αυτό φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στην εξεταζόμενη αποπλυμένη επιφάνεια του κίονα του ΕΑΜ, στην περίπτωση των εφαρμογών της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 10% κ.β., υλικό σχετικά υψηλής χημικής δράσης. Κατά τον μικρότερο χρόνο εφαρμογής (10 λεπτά) η απώλεια του αυθεντικού υλικού (ασβεστίτη) λόγω της δράσης της πάστας παράγει επιφάνεια με μειωμένες τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής σε σχέση με αυτές που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό. Κατά την εφαρμογή των 20 λεπτών η δραστικότητα του καθαρισμού αυξάνει και συνεπώς η απώλεια του αυθεντικού υλικού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την εφαρμογή των 10 λεπτών, αλλά οι τιμές των παραμέτρων της μικροδομής καταγράφονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που είχε η επιφάνεια πριν τον καθαρισμό.

Συνεπώς, στην περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών, αν δε λάβουμε υπόψη τη δραστικότητα της επέμβασης καθαρισμού, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου δράσης (φυσικός, χημικός βιολογικός ή θερμικός) και του χρόνου εφαρμογής, δε μπορούμε να εκτιμήσουμε το βαθμό της απώλειας του αυθεντικού υλικού. Άρα, ο επιδιωκόμενος καθαρισμός θα πρέπει να προκύπτει από επέμβαση καθαρισμού ήπιας δραστικότητας, οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής να καταγράφονται σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό και φυσικά οι μαύρες επικαθήσεις να έχουν απομακρυνθεί.

Περικρυσταλλικά ρηγματωμένη επιφάνεια μαρμάρου

Στην περίπτωση δε της επιφάνειας του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, (που στην πραγματικότητα αποτελεί έναν ενδιάμεσο τύπο φθοράς ανάμεσα στις φαιόμαυρες κρούστες και τις αποπλυμένες επιφάνειες, παρουσιάζοντας πως η μερική προστασία από τη βροχή και τον αέρα μπορεί να επηρεάσει τον εμφανιζόμενο τύπο φθοράς και κατ' ουσία αποτυπώνει ένα ενδιάμεσο στάδιο του μηχανισμού της έκπλυσης του ασβεστίτη από την όξινη βροχή), η παρουσία του γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις διευκολύνει την εκτίμηση σε σχέση με τους επιδιωκόμενους στόχους για το πρώτο κριτήριο αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Έτσι, επιδιωκόμενος καθαρισμός ορίζεται αυτός που έχει απομακρύνει πλήρως τις μαύρες επικαθήσεις και διατηρεί παράλληλα τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις πληρωμένες με γύψο. Όταν δε, μετά τον καθαρισμό ο γύψος έχει απομακρυνθεί από τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, τότε έχει λάβει χώρα μη αποδεκτή απώλεια αυθεντικού υλικού (υπέρ-καθαρισμός), ενώ όταν οι μαύρες επικαθήσεις δεν έχουν απομακρυνθεί, τότε ο καθαρισμός χαρακτηρίζεται ατελής.

2^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: «Υφή, Μορφολογία και Συνοχή Επιφανειών – Επιφανειακή Μικροδομή»

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν για να περιγράψουν την υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της εξεταζόμενης επιφάνειας, ή αλλιώς την επιφανειακή μικροδομή (δηλ. η τραχύτητα R_q , ο λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια ή ενεργή επιφάνεια, ο συντελεστής

μορφής – τιμή τραχύτητας που προκύπτει από τη fractal διάσταση του προφίλ της επιφάνειας, η πυκνότητα ρηγματώσεων, και ο συντελεστής ευθρυπτότητας) αποδίδουν και καταγράφουν τα χαρακτηριστικά αυτά για την κατάσταση της καθαρισμένης επιφάνειας. Παράλληλα, όπως δείχνει και ο εργαστηριακός έλεγχος (κεφ. 4.3, 4.4), υποδεικνύουν την επιφανειακή απώλεια μάζας και συνεπώς τη δράση και τη δραστικότητα της επέμβασης καθαρισμού. Επιπλέον, δίνουν σαφείς ενδείξεις για την ανθεκτικότητα στο χρόνο της καθαρισμένης επιφάνειας αφού: αύξηση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής συνεπάγεται αύξηση των ενεργών θέσεων για τις αντιδράσεις που οδηγούν στην γυσοποίηση ή/ και στην έκπλυση του ασβεστίτη, καθώς και της εναπόθεσης της σωματιδιακής ύλης (μαύρων επικαθήσεων). Έτσι, η ικανότητα της επιφάνειας να απορροφά και να διατηρεί την υγρασία αυξάνει, ενώ η επιπρόσθετη υγρασία στην επιφάνεια επιταχύνει τους ρυθμούς των αντιδράσεων της γυσοποίησης και της έκπλυσης του ασβεστίτη και επαυξάνει τη χημική συγγένεια για την εναπόθεση της σωματιδιακής ύλης [11]. Συνεπώς, όσο οι τιμές των παραμέτρων τις μικροδομής αυξάνουν, τόσο αυξάνει η επιδεκτικότητα στη φθορά της εξεταζόμενης επιφάνειας.

Είναι προφανές ότι μετά το καθαρισμό η επιφάνεια αναβαθμίζεται ενεργειακά και για να έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον της, εξαιτίας του δευτέρου θερμοδυναμικού νόμου, θα αρχίσει πάλι να φθείρεται. Η θέση, ο προσανατολισμός, η προστασία από το νερό της βροχής και τον άνεμο, δηλ. το μικροκλίμα, καθώς και η ατμοσφαιρική ρύπανση, θα ευνοήσουν τη δημιουργία του ίδιου τύπου φθοράς που υπήρχε και πριν τον καθαρισμό. Θα μπορούσε λοιπόν να ισχυριστεί κανείς ότι ζητούμενο είναι ο ρυθμός επανεμφάνισης του συγκεκριμένου τύπου φθοράς να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Εν προκειμένω δηλ. μικροί ρυθμοί σχηματισμού γύψου ή έκπλυσης ασβεστίτη, καθώς και εναπόθεσης μαύρων επικαθήσεων ή εν γένει ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην επιφάνεια.

Βάσει αυτού του συλλογισμού οι επιφάνειες που προκύπτουν μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού θα πρέπει να παρουσιάζουν όσο το δυνατόν πιο μικρές τιμές παραμέτρων μικροδομής δηλ. να είναι λείες και χωρίς ρηγματώσεις, έτσι ώστε οι μηχανισμοί της φθοράς να ενεργοποιηθούν όσο το δυνατόν πιο αργά. Όμως, σε αυτήν την περίπτωση είναι πιθανό η επιφανειακή απώλεια μάζας να είναι μεγάλη και ίσως ανεπίτρεπτη, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με το προηγούμενο κριτήριο που επιβάλλει τη διατήρηση του αυθεντικού υλικού.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την πιθανότητα παρουσίασης «αντικρουόμενων συμφερόντων» σε σχέση με τα επίπεδα επιφανειακής απώλειας μάζας και την επιδεκτικότητα στη φθορά μιας καθαρισμένης επιφάνειας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι επιδιωκόμενος καθαρισμός είναι αυτός που διατηρεί τις τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του.

Στην περίπτωση των **αποπλυμένων επιφανειών** το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει αυστηρά, αφού θα πρέπει τα επίπεδα των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής να κυμαίνονται στα αντίστοιχα επίπεδα των τιμών της πριν λάβει χώρα η επέμβαση. Δηλαδή η επιδιωκόμενη καθαρισμένη επιφάνεια θα πρέπει να παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή επιφανειακή μορφολογική διαφοροποίηση, έτσι ώστε να έχει λάβει χώρα η μικρότερη δυνατή απώλεια αυθεντικού υλικού, ενώ η επιδεκτικότητα στη φθορά να είναι

παρόμοια δηλ. ο ρυθμός έκπλυσης του ασβεστίτη αντίστοιχος με αυτόν που προϋπήρχε του καθαρισμού.

Στην περίπτωση των **φαιόμαυρων κρουστών** το παραπάνω συμπέρασμα, αν και ισχύει, υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να εμφανίσει μια μικρή διαφοροποίηση. Οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής εμφανίζονται μειωμένες όταν συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές πριν την επέμβαση καθαρισμού. Η παρουσία των μαύρων επικαθήσεων ή εν γένει των ατμοσφαιρικών σωματιδίων στο εξωτερικό στρώμα της κρούστας οδηγεί σε καταγραφή υψηλότερων τιμών για τις παραμέτρους της επιφανειακής μικροδομής από αυτές που καταγράφονται μετά τον καθαρισμό και αφορούν μόνο τον ασβεστίτη και το γύψο, υλικά που βρίσκονται στο εσωτερικό στρώμα της κρούστας πριν τον καθαρισμό και πρέπει να διατηρούνται μετά από αυτόν. Άρα, η μικρής τάξης μείωση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής μετά τον καθαρισμό είναι λογική και συνεπώς αποδεκτή. Μεγάλη μείωση των τιμών όμως υποδεικνύει επιφανειακή απώλεια μάζας ίσως και ανεπίτρεπτη, ενώ μεγάλη αύξηση των τιμών μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά. Συνεπώς, στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών ο επιδιωκόμενος καθαρισμός θα πρέπει να επιφέρει μικρής τάξης μείωση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής ή να τις διατηρεί σε παρόμοια επίπεδα σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν πριν την εφαρμογή του.

Στην περίπτωση της επιφάνειας του **περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου**, (που αποτελεί έναν ενδιάμεσο τύπο φθοράς ανάμεσα στις φαιόμαυρες κρούστες και τις αποπλυμένες επιφάνειες), ο επιδιωκόμενος καθαρισμός θα πρέπει να διατηρεί παρόμοια τα επίπεδα των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν πριν την εφαρμογή του, κατά αντιστοιχία με τις αποπλυμένες επιφάνειες. Μικρής τάξης μείωση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή, αν κατά τη διάγνωση της φθοράς τα ποσοστά παρουσίας των μαύρων επικαθήσεων είναι υψηλά και οι κόκκοι του ασβεστίτη επικαλύπτονται από μικρού πάχους στρώμα γύψου, δηλ. αν σε κάποιο βαθμό προσομοιάζεται η φαιόμαυρη κρούστα. Τέλος, αντίστοιχα με τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, μεγάλη μείωση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής δεν θεωρείται αποδεκτή γιατί υποδηλώνει μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας (πιθανότητα υπέρ-καθαρισμού), ενώ μεγάλη αύξηση τους οδηγεί σε επιφάνεια με μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά.

3^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: «Χρώμα»

Η μέτρηση των μεταβολών των χρωματικών παραμέτρων L, a, b, πριν και μετά τον καθαρισμό, καθώς και η συνολική τους θεώρηση μέσω της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, εκφράζει ποσοτικά το βαθμό απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων από την εξεταζόμενη επιφάνεια, εκτός από την προφανή αποτύπωση της αισθητικής της επιφάνειας. Η παραπάνω διαπίστωση ισχύει ανεξάρτητα από τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς, αφού αυτός λαμβάνεται ούτως ή άλλως υπόψη στον υπολογισμό του μεγέθους της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, μέσω της μέτρησης των μεταβολών των χρωματικών παραμέτρων L, a, b, πριν και μετά τον καθαρισμό.

Χαμηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ υποδεικνύουν ότι οι μαύρες επικαθήσεις δεν έχουν απομακρυνθεί επαρκώς από την καθαρισμένη επιφάνεια, μεγάλες τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ υποδεικνύουν μεν ότι οι μαύρες επικαθήσεις έχουν απομακρυνθεί επιτυχώς, από την άλλη δε, υποδηλώνουν την πιθανότητα απώλειας αυθεντικού υλικού. Παράλληλα, δείχνουν ότι η επέμβαση καθαρισμού προκάλεσε μεγάλη χρωματική διαφοροποίηση στην επιφάνεια γεγονός μη επιθυμητό. Συνεπώς, για να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία ανάμεσα στην ηθική της αισθητικής σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) και τη φυσικο-χημική προσέγγιση που έχει σαν στόχο την επιτυχή απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων χωρίς απώλεια αυθεντικού υλικού, οι επιδιωκόμενες τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ πρέπει να είναι ενδιάμεσες.

Παρόλη την αντικειμενική δυσκολία, η οποία προκύπτει από το ότι δεν είναι γνωστές οι τιμές των χρωματικών παραμέτρων πριν τη φθορά (αρχική κατάσταση του υλικού με το πέρας της κατασκευής), η συστηματική καταγραφή των χρωματικών παραμέτρων είναι χρήσιμη γιατί έτσι καθίστανται εφικτά:

(α) ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των επεμβάσεων καθαρισμού του εργολήπτη σε σχέση με το χρώμα, δηλ. αν η επιλεγείσα επέμβαση καθαρισμού μετά την αποτίμηση των πιλοτικών εφαρμογών εφαρμόζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μελέτης από τον εργολήπτη,

(β) η παραγωγή ομοιογενών χρωματικά επιφανειών και η αποφυγή δημιουργίας «μπαλωμάτων» σε παράπλευρες επιφάνειες που έχουν καθαριστεί με διαφορετικά υλικά και μεθόδους, λόγω της παρουσίας διαφορετικών τύπων φθοράς,

(γ) η ύπαρξη τιμών αναφοράς του χρώματος για τις επεμβάσεις προστασίας – υδροφοβίωσης που τυχόν θα ακολουθήσουν,

(δ) η αρχειοθέτηση και καταγραφή των χρωματικών παραμέτρων της καθαρισμένης επιφάνειας, για την παρακολούθηση στο χρόνο (monitoring) των επερχόμενων διαφοροποιήσεων τους λόγω της εναπόθεσης των μαύρων επικαθήσεων. Έτσι, αυτή η καταγραφή των αισθητικών δεδομένων σχετίζεται με την παθολογία του συνόλου του μνημείου στο πλαίσιο εφαρμογής των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης, αφού αποτελεί δείκτη της αυξανόμενης εναπόθεσης των μαύρων επικαθήσεων.

4^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: «Κατάσταση Διατήρησης - Επιδεκτικότητα στη Φθορά - Ανθεκτικότητα στο Χρόνο»

Όπως προαναφέρθηκε οι παράμετροι που μετρήθηκαν για να περιγράψουν την υφή, τη μορφολογία και τη συνοχή της εξεταζόμενης επιφάνειας, ή αλλιώς την επιφανειακή μικροδομή, δίνουν σαφείς ενδείξεις για την ανθεκτικότητα στο χρόνο της καθαρισμένης επιφάνειας. Ισχύουν λοιπόν αυτά που αναφέρονται στην παράγραφο του 2^{ου} κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού ότι δηλ. οι ρυθμός επανεμφάνισης της φθοράς δεν θα πρέπει να είναι ο μικρότερος δυνατός, (γεγονός που αποτιμάται από χαμηλές τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής), γιατί τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος της μεγάλης επιφανειακής απώλειας μάζας. Οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής θα πρέπει να κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα ή/και ελαφρώς μειωμένα σε σύγκριση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού, υποδεικνύοντας έτσι μέτριους και όχι αργούς ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς.

Ο ποιο ενδεδειγμένος τρόπος ελέγχου της ανθεκτικότητας στο χρόνο των επεμβάσεων καθαρισμού ή αλλιώς της επιδεκτικότητας στη φθορά των καθαρισμένων επιφανειών είναι η παρακολούθηση στο χρόνο (monitoring) της κατάστασης διατήρησης (preservation state) της καθαρισμένης επιφάνειας. Δηλ. επανάληψη των διαδικασιών της αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού μετά από αρκετούς μήνες, ή και χρόνια με μέτρηση των ίδιων χαρακτηριστικών και χρήση των ίδιων ακριβώς τεχνικών (για να είναι πλήρως συγκρίσιμα τα αποτελέσματα), έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν ο προτεινόμενος καθαρισμός πράγματι πληρεί το κριτήριο της ανθεκτικότητας στο χρόνο. Πρόκειται δηλαδή για μια διαδικασία, η οποία απαιτεί σχεδιασμό, χρόνο και όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω, νέα μεθοδολογικά και επιστημονικά εργαλεία για να υλοποιηθεί.

Η δυσκολία προσέγγισης του ελέγχου της ανθεκτικότητας στο χρόνο των επεμβάσεων καθαρισμού είναι σαφής και αποτυπώνεται από την έλλειψη δεδομένων στη βιβλιογραφία. Αυτή η έλλειψη δεδομένων δεν οφείλεται σε αδιαφορία της επιστημονικής κοινότητας, αλλά περισσότερο σε αδυναμία προσέγγισης, που προκύπτει κυρίως από περιορισμούς που σχετίζονται με τις ιδιαιτερότητες του επιστημονικού πεδίου της προστασίας των μνημείων και εν γένει της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στα ζητήματα κυρίως της δειγματοληψίας αλλά και του χρόνου που δίνεται για την εκπόνηση της μελέτης των επεμβάσεων συντήρησης ενός ιστορικού κτιρίου ή μνημείου (και άρα της διάγνωσης της φθοράς, της εφαρμογής των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού και της αποτίμησης τους), από τους κρατικούς φορείς σε σχέση με την έναρξη του έργου των επεμβάσεων συντήρησης.

Για τον δεύτερο περιοριστικό παράγοντα δηλ. του χρόνου εκπόνησης της μελέτης των επεμβάσεων συντήρησης, το μόνο που μπορεί να γίνει είναι η συνεχής υπενθύμιση με τεκμηριωμένη επιχειρηματολογία στους υπεύθυνους των κρατικών φορέων της αναγκαιότητας διεύρυνσης του χρόνου των μελετών, της αναγκαιότητας για συνεχή παρακολούθηση στο χρόνο, καθώς και της αναγκαιότητας τακτικών επεμβάσεων συντήρησης.

Για τον πρώτο και ίσως σημαντικότερο περιορισμό από άποψη δεοντολογίας, που συνίσταται στην αντικειμενική αδυναμία ακόμα και της απαραίτητης δειγματοληψίας, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα της συστηματικής χρήσης τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου και κυρίως της βαθμονόμησής τους. Η βαθμονόμηση των μη καταστρεπτικών τεχνικών θα πρέπει να λάβει χώρα σε σχέση με τις ποσοτικά μετρούμενες παραμέτρους των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού οι οποίες, εκτός από τη μη καταστρεπτική τεχνική της χρωματομετρίας που μπορεί να εφαρμοστεί επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, προκύπτουν από εξέταση στερεών δειγμάτων στο εργαστήριο.

Προς αυτήν την κατεύθυνση άλλωστε κινείται και η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παλμικής θερμογραφίας σε σχέση με την παράμετρο της επιφανειακής μικροδομής (πυκνότητα ρηγματώσεων) και της χρωματικής παραμέτρου της λαμπρότητας, που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το οποίο και αναδεικνύει τη δυναμική της τεχνικής για τη μελλοντική της χρήση ως επί τόπου διαγνωστικό εργαλείο.

Επιπλέον, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα του εργαστηριακού ελέγχου (κεφ. 4) υπάρχει μεγάλη συσχέτιση ανάμεσα στα μεγέθη της χρωματικής παραμέτρου της

λαμπρότητας L και της επιφανειακής μικροδομής της τραχύτητας Rq, αφού όπως φαίνεται από την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες που έλαβε χώρα για αυτά τα μεγέθη στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, η αύξηση της τραχύτητας Rq οδηγεί σε μείωση των τιμών της λαμπρότητας L για τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

Στις προσπάθειες βαθμονόμησης των τεχνικών του μη καταστρεπτικού ελέγχου μπορούν να συμβάλλουν με καθοριστικό τρόπο οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης σε πρότυπα δοκίμια λατομείου, αφού όμως πρώτα διαμορφωθούν οι συνθήκες προσομοίωσης των πιο χαρακτηριστικών τύπων φθοράς όπως των φαιόμαυρων κρουστών και των αποπλυμένων επιφανειών.

Είναι φανερό ότι παράλληλα με τα παραπάνω, είναι αναγκαία η χρήση μεθοδολογικού εργαλείου που να έχει τη δυνατότητα της διαχείρισης και ανάλυσης ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, χαρακτηριστικών για τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού στο χρόνο, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το χώρο της εξεταζόμενης επιφάνειας δηλ. το μικροκλίμα (θέση, προσανατολισμός, βαθμός προστασίας από τη βροχή και τον άνεμο) και το μακροκλίμα (ατμοσφαιρικές συνθήκες, ατμοσφαιρική ρύπανση, υψόμετρο, απόσταση από τη θάλασσα κ.ά.), τα οποία και επιδρούν καθοριστικά στη δημιουργία και επανεμφάνιση των διαφορετικών τύπων φθοράς. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό εργαλείο που μπορεί να επιτύχει τον έλεγχο και την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών σε σχέση με τα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που τις χαρακτηρίζουν, στις δεδομένες χωρικές τους συντεταγμένες και ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι το ΓΣΠ και αναπτύσσεται στο κεφ. 9.2.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε ότι επιδιωκόμενη κατάσταση μιας επιφάνειας μετά από μια πιλοτική επέμβαση καθαρισμού είναι:

1. Η διατήρηση της πάτινας, εάν και εφόσον διαπιστώνεται η ύπαρξή της κατά τη διάγνωση της φθοράς,
2. Η πλήρης απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων,
3. Η διατήρηση του αυθεντικού υλικού και πιο συγκεκριμένα:
 - του στρώματος του γύψου στις φαιόμαυρες κρούστες,
 - του γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου και
 - ο μικρότερος δυνατός βαθμός απώλειας ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες, (ο οποίος μπορεί να προκύψει από επέμβαση καθαρισμού ήπιας δραστηριότητας που παράγει επιφάνεια παρόμοιου επιπέδου επιφανειακής μικροδομής με αυτή που υπήρχε πριν τον καθαρισμό),
4. Η διατήρηση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής:
 - σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό, στην περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών,
 - σε παρόμοια επίπεδα ή/και ελαφρώς μειωμένα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού, στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου,
5. Η μεσαία - ενδιάμεση συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ,

(γ) Κρίσιμες παράμετροι των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού

Τέλος, συνεκτιμώντας τα συμπεράσματα που εξήχθησαν σε σχέση με τις παραμέτρους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, καθώς και σε σχέση με τις τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, μπορούμε να ορίσουμε τις κρίσιμες (ικανές και αναγκαίες) παραμέτρους των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, καθώς και τις τεχνικές μέτρησης που τις αποδίδουν πιστότερα και αντικειμενικότερα:

1° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Χημική-ορυκτολογική σύσταση των επιφανειών, καθώς και διαστρωμάτωση των απαντούμενων υλικών στην επιφάνεια.*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Διατήρηση Πάτινας
- Διατήρηση Αυθεντικού Υλικού:
 - Διατήρηση Στρώματος Γύψου για τις φαιόμαυρες κρούστες
 - Διατήρηση Ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες
 - Διατήρηση Γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου
- Απομάκρυνση Μαύρων Επικαθίσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης & Μικρανάλυση Ακτινών Χ - SEM-EDS,
- Χρωματομετρία

2° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Υφή, Μορφολογία και Συνοχή Επιφανειών – Επιφανειακή Μικροδομή*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Τραχύτητα - Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

3° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Χρώμα*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

Τεχνικές Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

4° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Κατάσταση Διατήρησης - Επιδεκτικότητα στη Φθορά - Ανθεκτικότητα στο Χρόνο*

Κρίσιμες Παράμετροι, που παρέχουν σαφείς ενδείξεις:

- Τραχύτητα-Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

Κρίσιμη Παράμετρος, Εφικτά Μετρήσιμη στο Χρόνο:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

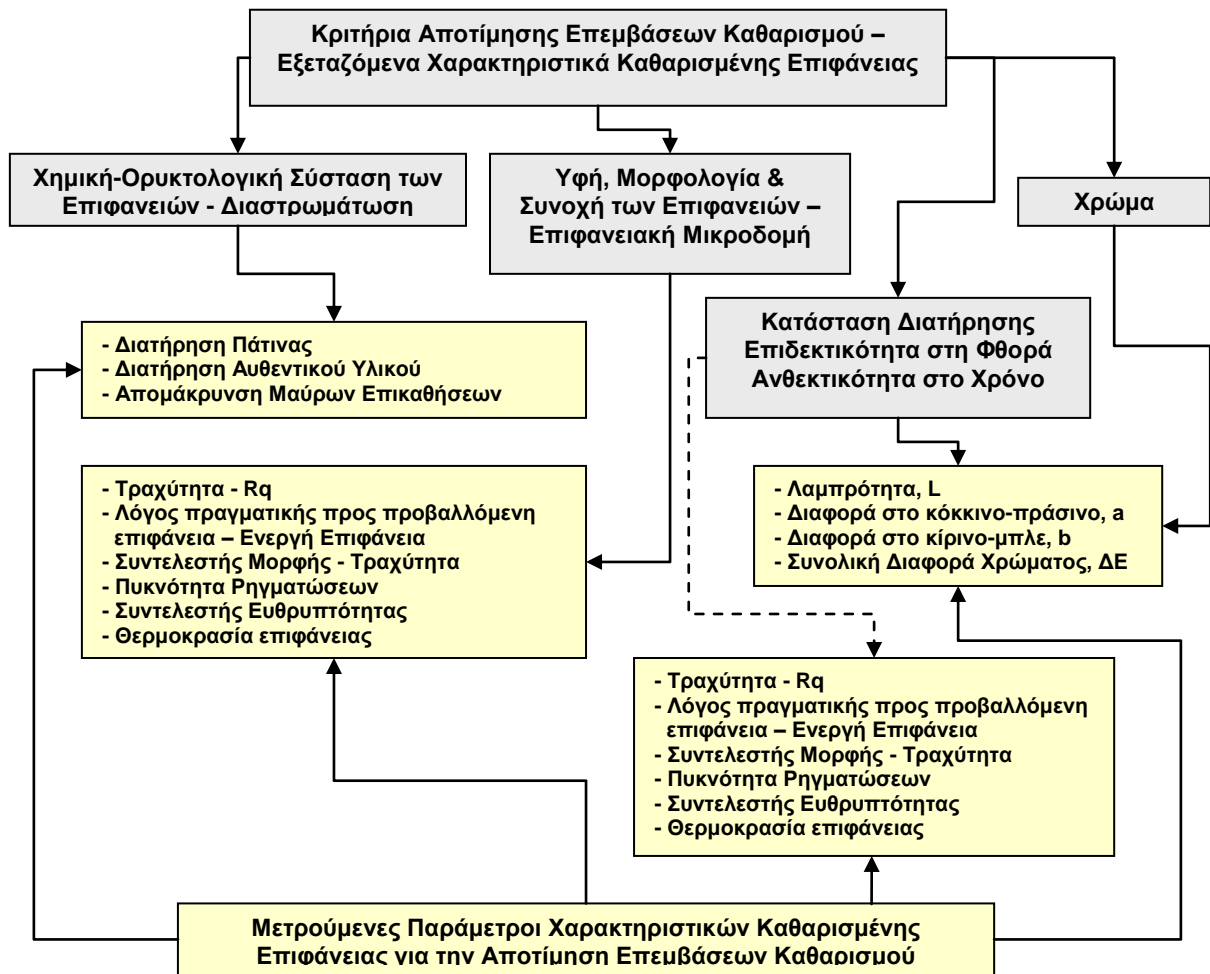
Τεχνική Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

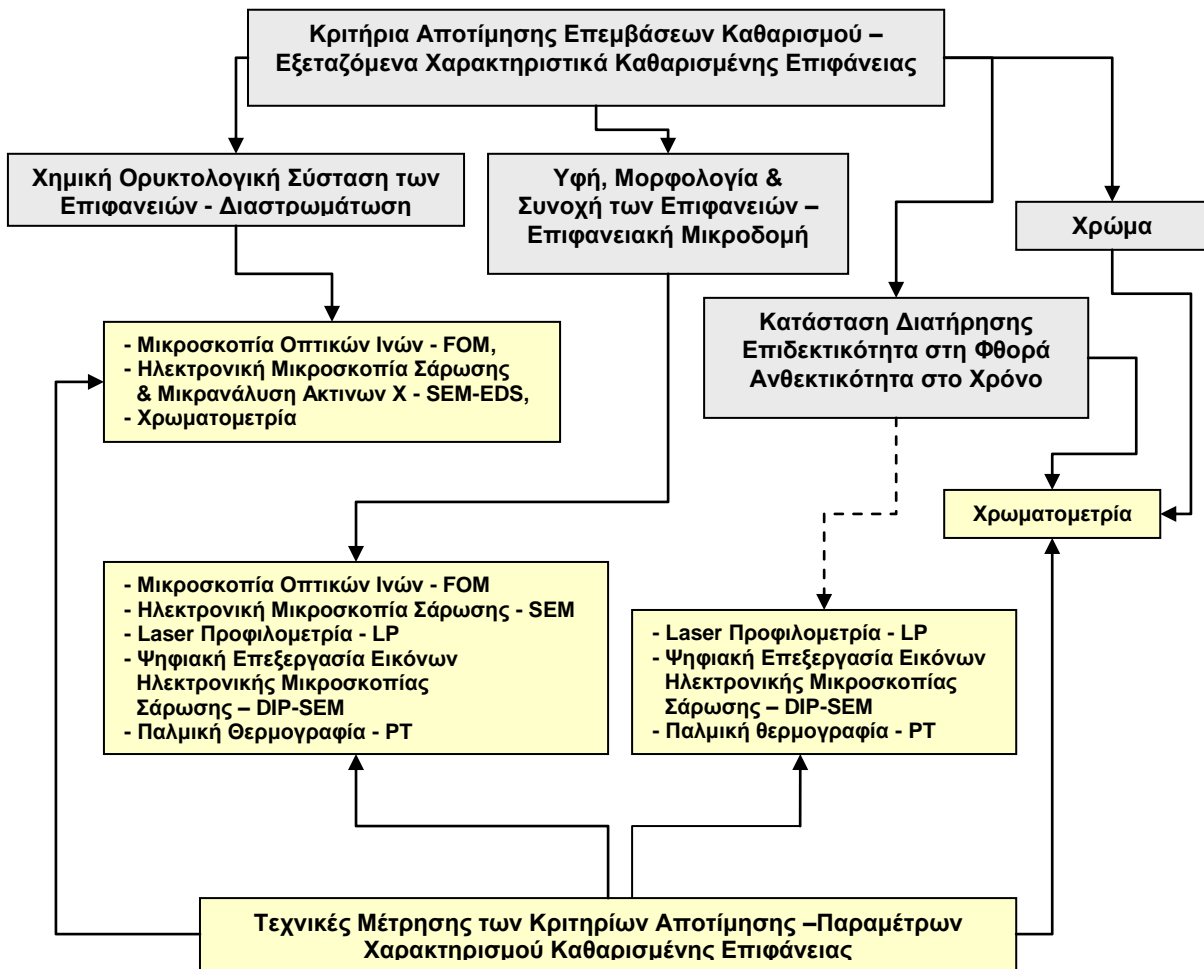
Στην Εικ. 8.3 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού σε σχέση με τις κρίσιμες παραμέτρους που τα διέπουν, καθώς και με τις τεχνικές μέτρησης που αποδίδουν τις δεύτερες πιστότερα και αντικειμενικότερα.

Τέλος, στο πλαίσιο της συγκρότησης της μεθοδολογίας αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού πρέπει καταρχάς να αξιοποιηθεί η αποκτηθείσα γνώση στο θέμα της κατηγοριοποίησης των επεμβάσεων καθαρισμού, βάσει της αποτελεσματικότητάς τους, αποδίδοντας όμως πλέον ποσοτικά χαρακτηριστικά τους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης. Γι αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ένα μεθοδολογικό εργαλείο που να μπορεί να συμβάλλει στην ταξινόμηση και τη μαθηματική διαμόρφωση των αποδεκτών και μη αποδεκτών ορίων των επιλεγμένων κρίσιμων παραμέτρων της αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, τα οποία να είναι σαφώς ορισμένα και επαναλαμβανόμενα. Το εργαλείο, αυτό είναι η μοντελοποίηση με χρήση ασαφούς λογικής και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 9.1.

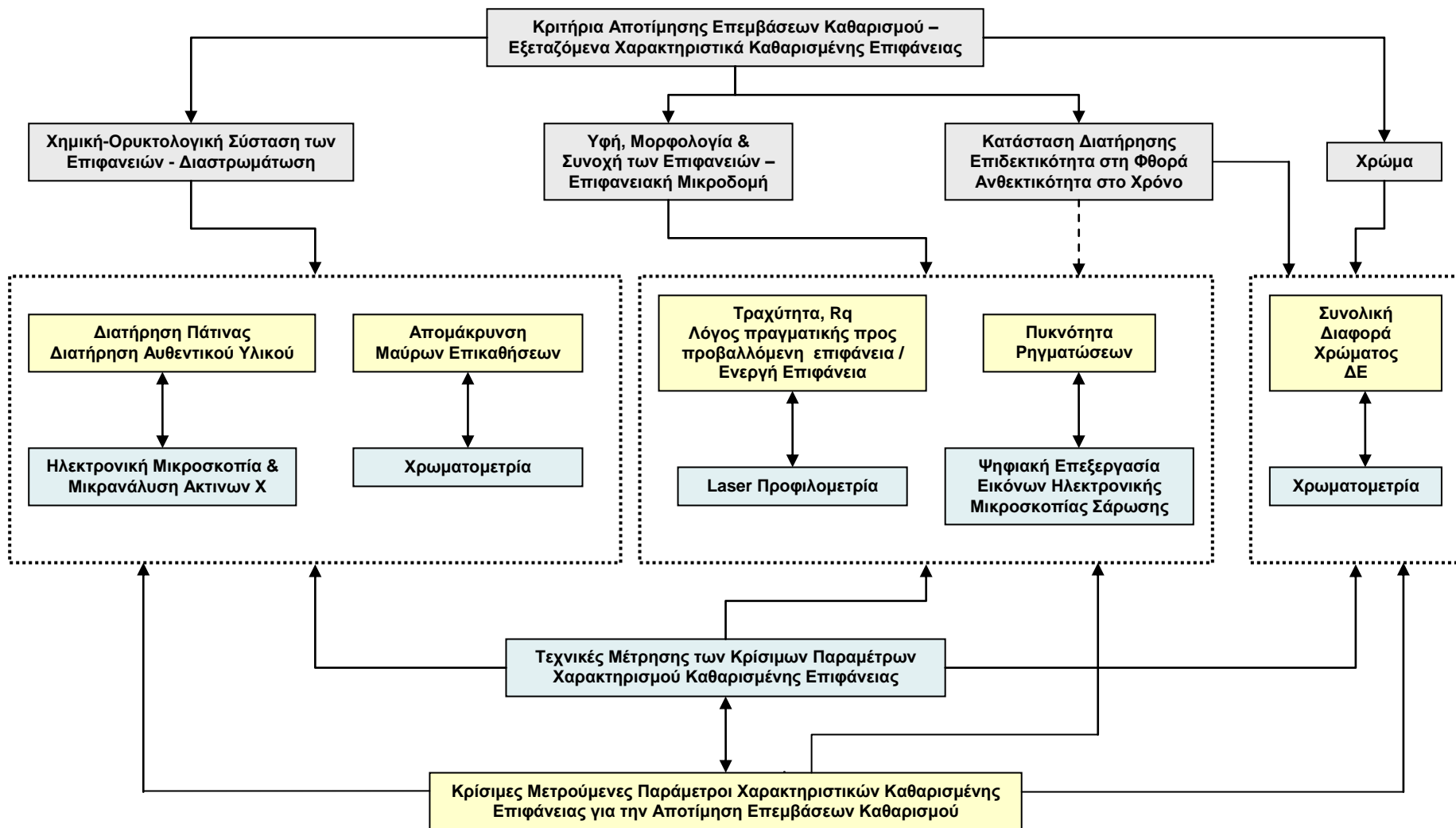
Παράλληλα δε, για την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ακόμα ένα μεθοδολογικό εργαλείο που θα επιτυγχάνει τον έλεγχο και την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στις δεδομένες χωρικές τους συντεταγμένες και ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό εργαλείο για αυτό το σκοπό είναι το ΓΣΠ και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 9.2.



Εικ. 8.1 Διάγραμμα Ροής Μεθοδολογίας Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού, σε σχέση με τις Μετρούμενες Παραμέτρους Χαρακτηριστικών Καθαρισμένης Επιφάνειας



Εικ. 8.2 Διάγραμμα Ροής Μεθοδολογίας Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού, σε σχέση με τις Τεχνικές Μέτρησης των Κριτηρίων Αποτίμησης



Εικ. 8.3 Διάγραμμα Ροής που παρουσιάζει τα Κριτήρια Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού σε σχέση με τις Κρίσιμες Παραμέτρους που τα διέπουν, καθώς και με τις Τεχνικές Μέτρησης που αποδίδουν τις δεύτερες πιστότερα και αντικειμενικότερα

9. Ολοκληρωμένη μεθοδολογία επεμβάσεων καθαρισμού

9.1 Σχεδιασμός και ανάπτυξη μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες επιφάνειες

9.1.1 Σχεδιασμός του μοντέλου ασαφούς λογικής

9.1.1.1 Εισαγωγή - Η ασαφής λογική σαν εργαλείο μοντελοποίησης

Η ασαφής λογική, οι βασικές έννοιες της οποίας αναλύθηκαν διεξοδικά στο κεφ. 2.2.3, εμφανίστηκε τα τελευταία χρόνια ως ένα χρήσιμο εργαλείο μοντελοποίησης διεργασιών οι οποίες είναι αρκετά πολύπλοκες για τις συνηθισμένες ποσοτικές τεχνικές, ή οι διαθέσιμες πληροφορίες οι οποίες τις περιγράφουν είναι είτε καθαρά ποιοτικές ή αβέβαιες [149].

Η ασαφής λογική άρχισε να χρησιμοποιείται πρόσφατα για την ανάπτυξη πολύπλοκων μοντέλων, παρόλο που ο Zadeh εισήγαγε τη θεωρία της εδώ και τέσσερις δεκαετίες, δηλώνοντας ότι «Όσο πιο κοντά εξετάζει κανείς ένα πρόβλημα του πραγματικού κόσμου, τόσο η λύση του γίνεται πιο ασαφής. Με πιο απλά λόγια, η ουσία αυτής της αρχής είναι ότι, όσο η πολυπλοκότητα ενός συστήματος αυξάνει, η ικανότητά μας να βγάλουμε ακριβή και σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μειώνεται μέχρι ενός ορίου πέρα από το οποίο η ακρίβεια και η σημαντικότητα γίνονται σχεδόν αμοιβαία αποκλειστικά χαρακτηριστικά» [208].

Ο λόγος της ταχείας ανάπτυξης των ασαφών συστημάτων είναι απλός: η ασαφής λογική εκφράζει και αποτυπώνει επιτυχώς ποιοτικές και αβέβαιες πληροφορίες, επειδή προσομοιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι βγάζουν συμπεράσματα και λαμβάνουν αποφάσεις. Ενώ άλλες προσεγγίσεις απαιτούν ακριβείς εξισώσεις για να σχεδιάσουν πραγματικές συμπεριφορές, ο ασαφής σχεδιασμός μπορεί να εξομαλύνει τις ανακρίβειες που παρουσιάζουν πολλές φορές η ανθρώπινη γλώσσα και η λογική [150].

Κατ' ουσία, η μη παραμετρική μέθοδος της ασαφούς λογικής αποτελεί μια επέκταση ή και γενίκευση της παραδοσιακής λογικής (Boolean), με στόχο να μπορεί να αντιμετωπιστεί η έννοια της μερικής αλήθειας, όπου οι τιμές για την αλήθεια βρίσκονται μεταξύ του "απόλυτα αληθινού" και του "απόλυτα μη - αληθινού" [135].

Το βασικό πλεονέκτημα των ασαφών μοντέλων είναι ότι ενσωματώνουν την ανθρώπινη λογική, εκτίμηση και εμπειρία για τον καθορισμό μιας στρατηγικής απόφασης. Αυτό οφείλεται στη θεμελιώδη διαφορά της ασαφούς λογικής (σε σχέση με τις συνηθισμένες τεχνικές σχεδιασμού), η οποία και έγκειται στον ορισμό των ασαφών συνόλων. Η παραδοσιακή θεωρία συνόλων βασίζεται στη λογική του ότι ένα αντικείμενο ή ένας αριθμός ανήκει σε ένα σύνολο ή δεν ανήκει σ' αυτό. Τα σύνολα αυτά ονομάζονται διακριτά σύνολα και τα όρια τους είναι αυστηρά καθορισμένα. Αντίθετα, η ασαφής λογική επιτρέπει σε έναν αριθμό ή σε ένα αντικείμενο να ανήκει σε παραπάνω του ενός σύνολα, εισάγοντας την έννοια της «μερικής συμμετοχής», ότι δηλαδή ο αριθμός ή το αντικείμενο αυτό μπορεί να ανήκει συγχρόνως, με ίδιο ή και διαφορετικό βαθμό συμμετοχής σε περισσότερα από ένα σύνολα, τα οποία ορίζονται ως ασαφή σύνολα.

9.1.1.2 Σχεδιασμός του μοντέλου ασαφούς λογικής

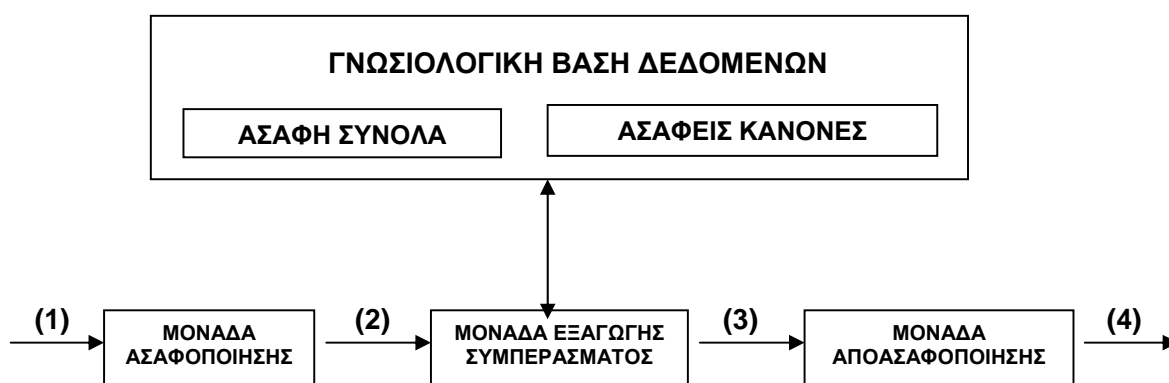
Στόχος του σχεδιαζόμενου μοντέλου ασαφούς λογικής είναι η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, μέσω της διαμόρφωσης των αποδεκτών και μη αποδεκτών ορίων των παραμέτρων που ορίζουν το κάθε κριτήριο αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ασαφούς λογικής που ανήκει στην κατηγορία των Mamdani μοντέλων και έχει την παρακάτω γενική μορφή [209]:

$$\forall r \in R : \text{if } \bigwedge_{1 \leq i \leq m} (x_i \in A_i^r) \text{ then } \bigwedge_{1 \leq j \leq n} (y_j \in B_j^r) \quad (9.1.1.2.1)$$

όπου: m : ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου
 n : ο αριθμός των μεταβλητών εξόδου
 $x_i, 1 \leq i \leq m$: οι μεταβλητές εισόδου
 $A_i^r, 1 \leq i \leq m$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου
 $y_j, 1 \leq j \leq n$: οι μεταβλητές εξόδου
 $B_j^r, 1 \leq j \leq n$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εξόδου

Ο κώδικας κατασκευάστηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχ. Χ-Μ του ΕΜΠ κ. Χρ. Κυρανούδη, είναι γραμμένος σε γλώσσα “C++” και μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε υπολογιστικό περιβάλλον, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις υπολογιστικής μνήμης.

Όπως παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικ. 9.1.1.2.1. σε πρώτη φάση πρέπει να συγκροτηθεί η γνωσιολογική βάση δεδομένων που συνίσταται από τα ασαφή σύνολα και τους ασαφείς κανόνες και σε δεύτερη φάση να ορισθεί η λειτουργία του ασαφούς μοντέλου σε σχέση με τις συναρτήσεις που ορίζουν τη μονάδα ασαφοποίησης, τη μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος, και τη μονάδα αποασαφοποίησης.



Εικ. 9.1.1.2.1: Βασική δομή κλασικού συστήματος ασαφούς λογικής, όπου:

- (1): Διακριτή είσοδος, (2): Ασαφής είσοδος, (3): Ασαφής έξοδος,
(4): Διακριτή έξοδος

1^η Φάση: Κατασκευή της Γνωσιολογικής Βάσης Δεδομένων

Εφόσον, στόχος του σχεδιαζόμενου μοντέλου ασαφούς λογικής είναι η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, η γνωσιολογική βάση του σχεδιαζόμενου μοντέλου προκύπτει από τη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω των εξεταζόμενων επιφανειών αυτής της διατριβής, λαμβάνοντας υπόψη και τη διεθνή βιβλιογραφία στα θέματα αποτίμησης καθαρισμών. Έτσι κατασκευάστηκαν τρεις γνωσιολογικές βάσεις δεδομένων ανάλογα με τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοζόμενες επεμβάσεις καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν, δηλ. μία βάση δεδομένων για τις φαιόμαυρες κρούστες, μία για τις αποπλυμένες επιφάνειες και μία για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου. Η κατασκευή της κάθε γνωσιολογικής βάσης δεδομένων έλαβε χώρα σε 3 βήματα:

1^ο Βήμα: Επιλογή Παραμέτρων Εισόδου και Παραμέτρου Εξόδου

Οι παράμετροι εισόδου στο ασαφές σύστημα επιλέχθηκαν από τις μετρούμενες παραμέτρους των χαρακτηριστικών που πρέπει να παρουσιάζει η καθαρισμένη επιφάνεια, όπως αυτές οριοθετούνται στο κεφ. 8, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις τεχνικές μέτρησης που τις αποδίδουν. Οι έξι παράμετροι εισόδου που επιλέχθηκαν για κάθε σχεδιαζόμενο μοντέλο ανά παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς, είναι οι κρίσιμες παράμετροι των χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού (β.λ. εικ. 8.3). Ως παράμετρος εξόδου ορίστηκε ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ).

2^ο Βήμα: Ανάπτυξη Ασαφών Συνόλων

Τα ασαφή σύνολα, ή αλλιώς κλάσεις, ορίζονται για κάθε μία από τις παραμέτρους εισόδου του κάθε μοντέλου, καθώς και για την παράμετρο εξόδου. Ουσιαστικά, πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία ο εμπειρογνώμονας ταξινομεί σε κλάσεις κάθε μία από τις επιλεγμένες κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και διαμορφώνει τα όρια αποδοχής κάθε κλάσης, τα οποία πρέπει να είναι σαφώς ορισμένα και επαναλαμβανόμενα. Στην προκειμένη περίπτωση δηλ. ταξινομούνται και διαμορφώνονται τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, χρησιμοποιώντας τις τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής.

3^ο Βήμα: Ανάπτυξη Ασαφών Κανόνων

Αναπτύσσεται το σύνολο των ασαφών κανόνων, βάσει των οποίων θα λειτουργήσει το μοντέλο και θα δώσει το τελικό αποτέλεσμα. Κατασκευάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί κλάσεων για όλες τις μεταβλητές εισόδου, καθώς και το αποτέλεσμα που δίνει ο κάθε συνδυασμός. Στα σχεδιαζόμενα συστήματα οι ασαφείς κανόνες είναι εντολές βασισμένες στη μέθοδο του Mamdani με τη μορφή AN - TOTΕ και χρησιμοποιούν το λογικό τελεστή ΚΑΙ. Το σύνολο των ασαφών κανόνων είναι το γινόμενο των αριθμών των κλάσεων κάθε μίας παραμέτρου εισόδου (δηλ. όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί). Για τα ασαφή μοντέλα που εκτιμούν την αποτελεσματικότητα επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρούστες και σε περικρυσταλλικά ρηγματωμένο

μάρμαρο δημιουργήθηκαν 648 κανόνες, ενώ για την περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών δημιουργήθηκαν 243 κανόνες.

2^η Φάση: Λειτουργία του Μοντέλου Ασαφούς Λογικής

Η ροή της πληροφορίας μέσα σε ένα μοντέλο ασαφούς λογικής απαιτεί οι παράμετροι εισόδου να διέρχονται από τρεις σημαντικούς μετασχηματισμούς πριν εξαχθούν από το σύστημα σαν πληροφορία εξόδου. Οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι: η μονάδα ασαφοποίησης, η μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος, και η μονάδα αποασαφοποίησης. Στα τρία σχεδιαζόμενα συστήματα (δηλ. σε αυτά των φαιόμαυρων κρούστων, του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου και των αποπλυμένων επιφανειών) οι τρεις αυτές διαδικασίες είναι ίδιες και λειτουργούν όπως περιγράφεται παρακάτω:

Μονάδα ασαφοποίησης: χρησιμοποιούνται οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής (ασαφή σύνολα), οι οποίες αποτελούν τις κλάσεις της κάθε μίας μεταβλητής εισόδου και εφαρμόζονται στις πραγματικές τιμές των μεταβλητών αυτών, με σκοπό να προσδιοριστεί ο βαθμός αλήθειας της εφαρμογής καθενός από τους κανόνες, δηλ. να αποφασιστεί ποιος κανόνας από τους 648 ή τους 243 (ανάλογα με το σύστημα) πρέπει να εφαρμοστεί. Συνεπώς, σε αυτή τη λειτουργική διαδικασία το σύστημα εκτελεί το “ΑΝ...ΚΑΙ...ΑΝ...ΚΑΙ...” κομμάτι του κανόνα.

Μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος: κατά τη διαδικασία της εξαγωγής του συμπεράσματος, το σύστημα υπολογίζει το βαθμό αλήθειας για την ενεργοποίηση κάθε κανόνα και την εφαρμόζει στο τμήμα του συμπεράσματος κάθε κανόνα, δηλ. στο κομμάτι “...ΤΟΤΕ...” του κανόνα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της κλάσης (ασαφούς συνόλου) της μεταβλητής εξόδου για τον κάθε κανόνα. Στον σχεδιασμό των παρουσιαζόμενων συστημάτων η μέθοδος ασαφούς επαγωγής που εφαρμόζεται είναι αυτή του «μεγίστου-ελαχίστου» (§ 2.2.3.3 και Εικ. 2.2.3.8(α)), όπου βάσει του βαθμού αλήθειας του κάθε τμήματος του κανόνα, προσδιορίζεται η επίδραση του στη συνάρτηση συμμετοχής της μεταβλητής εξόδου [210].

Δηλαδή, αν κάποιο κομμάτι του κανόνα δεν ενεργοποιείται (βαθμός ενεργοποίησης ίσος με μηδέν), τότε δεν ενεργοποιείται καθόλου ο κανόνας. Επιπλέον, η χρησιμοποιηθείσα μέθοδος λαμβάνει υπόψη τον ελάχιστο βαθμό ενεργοποίησης για κάθε κανόνα και τον απεικονίζει στην αντίστοιχη κλάση εξόδου. Η συνδυασμένη ασαφής συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή εξόδου προκύπτει τότε από τον συνδυασμό της επίδρασης όλων των ασαφών κανόνων. Αν μια κλάση της εξόδου ενεργοποιηθεί με παραπάνω του ενός κανόνες, τότε λαμβάνεται υπόψη ο μέγιστος από όλους τους βαθμούς ενεργοποίησης [150].

Μονάδα αποασαφοποίησης: το τελικό αποτέλεσμα, δηλ. ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού, που λαμβάνεται στην έξοδο του συστήματος, θα πρέπει να είναι ένας διακριτός αριθμός (διακριτή έξοδος). Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο του κέντρου βάρους (§ 2.2.3.3, εξ. 2.2.3.9 & 2.2.3.10), όπου η διακριτή τιμή του αποτελέσματος, που αποτελεί την έξοδο του συστήματος, υπολογίζεται αναλυτικά με την εύρεση του κέντρου βάρους του εμβαδού της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη της συνδυασμένης συνάρτησης συμμετοχής, [211].

9.1.2 Ανάπτυξη των μοντέλων ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού

Στόχος των τριών σχεδιαζόμενων μοντέλων ασαφούς λογικής (ένα για κάθε τύπο φθοράς) είναι η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, μέσω της απόδοσης ποσοτικών χαρακτηριστικών στους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, αφού διαμορφωθούν τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των παραμέτρων που τα ορίζουν, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Η κατασκευή της γνωσιολογικής βάσης δεδομένων του κάθε σχεδιαζόμενου συστήματος έλαβε χώρα στα 3 βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω (δηλ. στην επιλογή των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου, στην ανάπτυξη των ασαφών συνόλων και των ασαφών κανόνων) και βασίστηκε στη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω των εργαστηριακών και επί τόπου αποτελεσμάτων αυτής της διατριβής, λαμβάνοντας υπόψη και τη διεθνή βιβλιογραφία στα θέματα αποτίμησης καθαρισμών. Η δε λειτουργία και των τριών ασαφών μοντέλων βασίστηκε στους μετασχηματισμούς της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδα εξαγωγής συμπεράσματος, και της μονάδας αποασαφοποίησης, όπως αυτοί περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο.

Έτσι αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα ασαφούς λογικής ανάλογα με τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοζόμενες επεμβάσεις καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν, δηλ. ένα για τις φαιόμαυρες κρούστες, ένα για τις αποπλυμένες επιφάνειες και ένα για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου.

(α) Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρούστες

1. Επιλογή Παραμέτρων Εισόδου & Παραμέτρου Εξόδου

Οι έξι παράμετροι εισόδου που επιλέχθηκαν για το σχεδιαζόμενο μοντέλο, είναι οι κρίσιμες παράμετροι των χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρούστες, όπως αυτές ορίστηκαν στο κεφ. 8, (β.λ. εικ. 8.3). Πιο συγκεκριμένα:

1^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης Πάτινας (%), αποτελέσματα SEM-EDS,

2^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης του Στρώματος Γύψου (%), αποτελέσματα SEM-EDS,

3^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%), αποτελέσματα Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων SEM,

4^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια, αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

5^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm), αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

6^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ, αποτελέσματα Χρωματομετρίας,

Η πρώτη και η δεύτερη παράμετρος εισόδου αναφέρονται στο κριτήριο αποτίμησης της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, η τρίτη, η τέταρτη και η πέμπτη παράμετρος εισόδου αναφέρονται στο κριτήριο της επιφανειακής μικροδομής, ενώ η έκτη παράμετρος εισόδου αναφέρεται αφενός στο κριτήριο του χρώματος και αφετέρου στο κριτήριο της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, όσον αφορά στο βαθμό απομάκρυνσης των μαύρων επικαθίσεων.

Τέλος, ως παράμετρος εξόδου ορίστηκε:

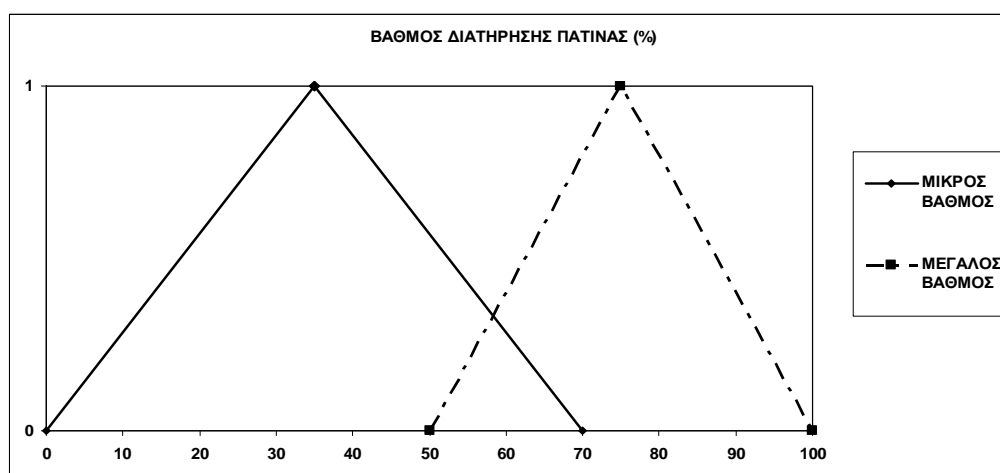
Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ)

2. Οριοθέτηση Ασαφών Συνόλων των Παραμέτρων Εισόδου & της Παραμέτρου Εξόδου

Τα ασαφή σύνολα, ή αλλιώς κλάσεις, ορίζονται για κάθε μία από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, καθώς και για την παράμετρο εξόδου. Κατά τη διαδικασία αυτή διαμορφώνονται τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών.

Για τη δημιουργία των κλάσεων (ασαφών συνόλων) των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου χρησιμοποιούνται οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Κατασκευάζονται έτσι διαγράμματα, όπου κάθε ισοσκελές τρίγωνο αντιστοιχεί στην κλάση (ασαφές σύνολο) της εξεταζόμενης παραμέτρου. Στον άξονα των x του διαγράμματος καταγράφονται οι τιμές που παίρνει η κάθε παράμετρος, καθώς και το εύρος των λαμβανόμενων τιμών της κάθε κλάσης για την εξεταζόμενη παράμετρο. Στον άξονα y καταγράφεται ο βαθμός συμμετοχής της εξεταζόμενης παραμέτρου στο κάθε ασαφές σύνολο – κλάση (το κέντρο κάθε κλάσης στον άξονα των x, είναι το σημείο όπου ο βαθμός συμμετοχής γίνεται 1 στον άξονα των y). Για κάθε παράμετρο εισόδου, καθώς και την παράμετρο εξόδου παρατίθενται τα εύρη των τριγωνικών ασαφών συνόλων, καθώς και η απεικόνισή τους σε διάγραμμα.

1^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης Πάτινας (%)



Εικ. 9.1.2.1: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός Διατήρησης Πάτινας»

Για την 1^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται δύο κλάσεις:

Μικρός βαθμός διατήρησης πάτινας (0-70%),

Μεγάλος βαθμός διατήρησης πάτινας (50-100%)

Το ασαφές σύνολο που περιλαμβάνει τιμές εντός αποδεκτών ορίων είναι αυτό του μεγάλου βαθμού διατήρησης πάτινας, αφού, όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφ. 8, η διατήρηση της πάτινας είναι προαπαιτούμενο για να μπορέσει μια επέμβαση καθαρισμού να χαρακτηριστεί αποτελεσματική και επιτυχής.

Οι τιμές του βαθμού διατήρησης της πάτινας, προκύπτουν από τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, αφού εκτιμηθεί το πάχος του στρώματος της πάτινας, η συνοχή, η συνέχεια και η ομοιογένειά του, σε σχέση με τα αντίστοιχα δεδομένα πριν την εφαρμογή της επέμβασης καθαρισμού. Η χρήση του επί τοις εκατό ποσοστού για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την εισαγωγή και τη σύγκριση δεδομένων στο ίδιο μοντέλο από διαφορετικές επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών, όπου τόσο τα ποσοτικά δεδομένα που αφορούν στο πάχος (μm) του στρώματος της πάτινας, όσο και τα ποιοτικά δεδομένα που αφορούν στη συνοχή, στη συνέχεια και την ομοιογένειά του είναι διαφορετικά.

2^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης του Στρώματος Γύψου (%)



Εικ. 9.1.2.2: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός Διατήρησης Στρώματος Γύψου»

Για τη 2^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός βαθμός διατήρησης στρώματος γύψου (0-40%),

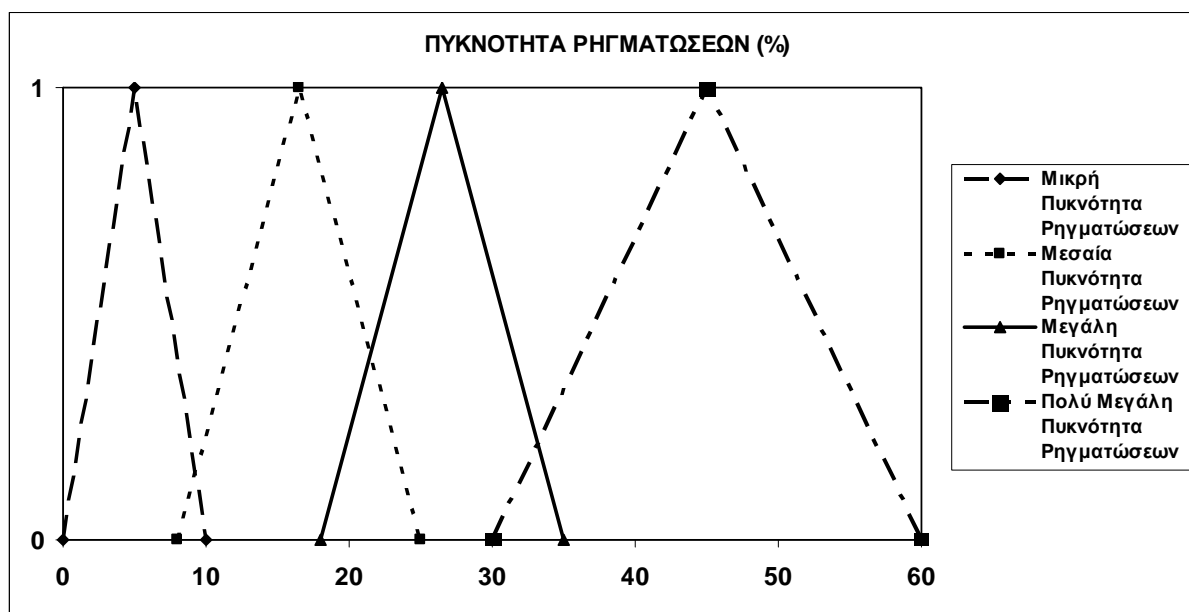
Μεσαίος βαθμός διατήρησης στρώματος γύψου (30-70%)

Μεγάλος βαθμός διατήρησης γύψου (50-100%)

Αποδεκτές τιμές θεωρούνται αυτές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο του μεγάλου βαθμού διατήρησης του στρώματος γύψου, εφόσον επιθυμητή και αποδεκτή είναι η διατήρηση του μικρό-κρυσταλλικού γύψου που προστατεύει τις λεπτομέρειες των ανάγλυφων επιφανειών και συγκρατεί τους ασβεστιτικούς κόκκους, αφού αναπτύσσεται στα περατωτικά τους όρια. Οι τιμές που ανήκουν στις άλλες δύο κλάσεις υποδεικνύουν ότι η επέμβαση καθαρισμού έχει απομακρύνει σε μεγάλο ή μεσαίο βαθμό (αντίστοιχα) τον μικρό-κρυσταλλικό γύψο και συνεπώς τα δύο ασαφή αυτά σύνολα ορίζουν τα μη αποδεκτά όρια της 2^{ης} παραμέτρου εισόδου.

Οι τιμές του βαθμού διατήρησης του στρώματος γύψου, προκύπτουν από τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, αφού μετρηθεί το πάχος του στρώματος του γύψου σε μη και συγκριθεί με αυτό που παρουσίαζε η επιφάνεια πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού. Η (%) έκφραση των αποτελεσμάτων λαμβάνει χώρα έτσι ώστε στο ίδιο μοντέλο να μπορούν να εισαχθούν και να συγκριθούν δεδομένα από διαφορετικές επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών όπου το αρχικό πάχος του στρώματος του γύψου σε μη είναι διαφορετικό, με αποτέλεσμα και η κρίση για τη διατήρηση του στρώματος του γύψου που παραμένει μετά τον καθαρισμό να ποικίλει.

3^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%)



Εικ. 9.1.2.3: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Πυκνότητα Ρηγματώσεων»

Για την 3^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τέσσερις κλάσεις:

Μικρή Πυκνότητα Ρηγματώσεων (0-10%),

Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων (8-25%),

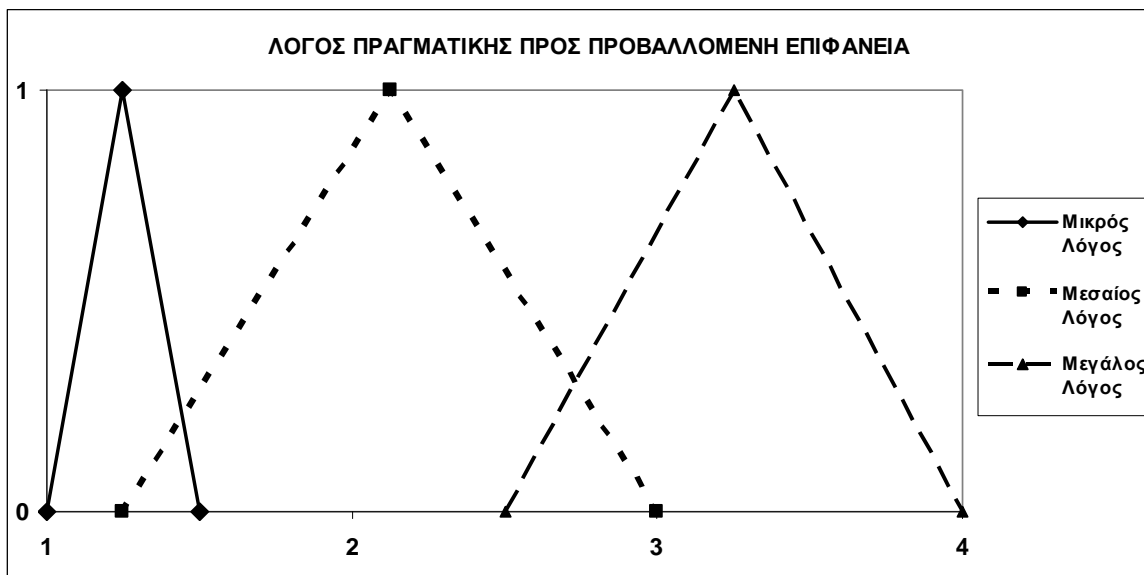
Μεγάλη Πυκνότητα Ρηγματώσεων (18-35%),

Πολύ Μεγάλη Πυκνότητα Ρηγματώσεων (30-60%),

Οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 3^η παράμετρο εισόδου, αφού για την πυκνότητα ρηγματώσεων (ως παράμετρος της επιφανειακής μικροδομής) επιδιωκόμενος στόχος είναι οι τιμές της να παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα ή/και ελαφρώς μειωμένα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού. Χαμηλές τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές ή πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων, υποδεικνύουν μεγάλη αύξηση της επιδεκτικότητας στη φθορά ακόμα και αν η επιφανειακή απώλεια μάζας είναι αποδεκτή.

Οι τιμές της 3^{ης} παραμέτρου εισόδου που προκύπτουν από τη ψηφιακή επεξεργασία με το λογισμικό EDGE εικόνων SEM που έχουν ληφθεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες, εκφράζουν το ποσοστό (%) του όγκου του κάθε δείγματος που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές μέχρι βάθους 100μm.

4^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια,



Εικ. 9.1.2.4: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια»

Για την 4^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1-1.5),

Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1.25-3),

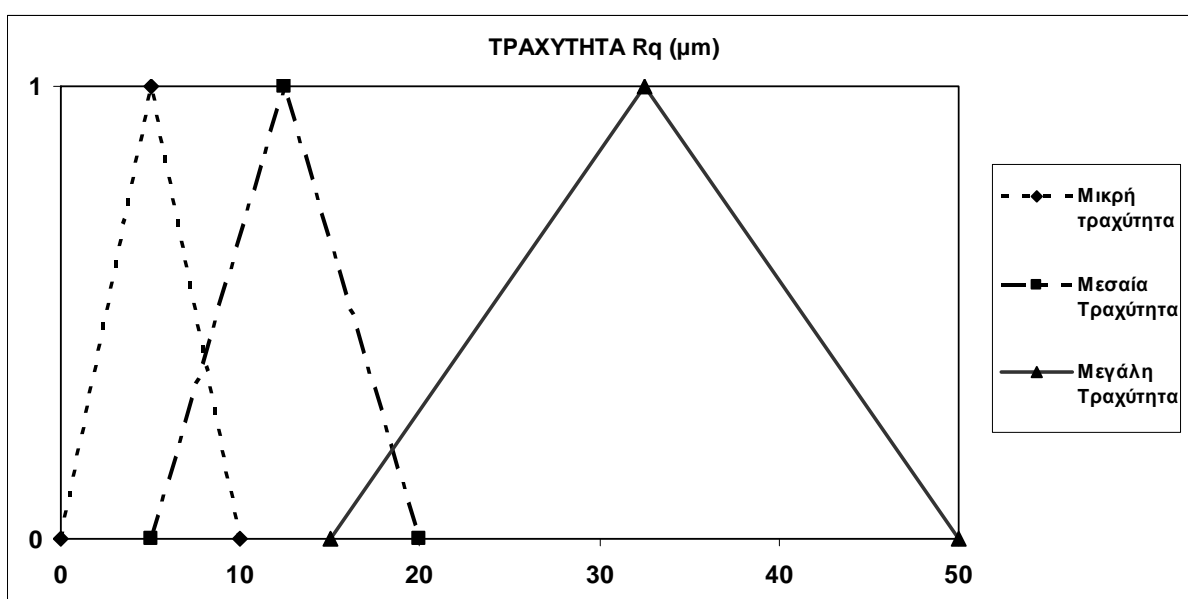
Μεγάλος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (2.5-4),

Το ασαφές σύνολο «Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια» ορίζει τα αποδεκτά όρια της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου, επειδή ικανοποιεί τη συνθήκη της αποδεκτής επιφανειακής απώλειας μάζας σε σχέση με τους μέτριους ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς

(μέτρια επιδεκτικότητα στη φθορά μιας καθαρισμένης επιφάνειας). Χαμηλές τιμές του λόγου υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές του υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Μετρείται το πραγματικό εμβαδό της επιφάνειας (surface area), το οποίο και διαιρείται από το προβαλλόμενο εμβαδόν της μετρούμενης περιοχής για να προκύψει ο λόγος.

5^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm),



Εικ. 9.1.2.5: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολο) της παραμέτρου εισόδου «Τραχύτητα Rq»

Για την 5^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Τραχύτητα Rq (0-10μm),

Μεσαία Τραχύτητα (5-20μm),

Μεγάλη Τραχύτητα (15-50μm),

Όπως και στις άλλες δύο μεταβλητές εισόδου του ασαφούς μοντέλου που είναι κρίσιμες παράμετροι της επιφανειακής μικροδομής, έτσι και στην περίπτωση της τραχύτητας, το ασαφές σύνολο που αντιπροσωπεύει αποδεκτά επίπεδα επιφανειακής απώλειας μάζας, καθώς και μέτριους ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς, είναι η «Μεσαία Τραχύτητα». Επιπλέον, χαμηλές τιμές της τραχύτητας Rq υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές της υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 5^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Ο προσδιορισμός της αντιπροσωπευτικής τιμής της παραμέτρου της

τραχύτητας Rq για κάθε δείγμα, έλαβε χώρα μέσω του υπολογισμού της σε 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα x και 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα y, μήκους 1250μm το κάθε ένα, εφαρμόζοντας ως μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter - τα 0.25mm.

6^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ,



Εικ. 9.1.2.6: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολο) της παραμέτρου εισόδου «Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ»

Για την 6^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (0-6),

Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (5-15),

Μεγάλη Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (13-40),

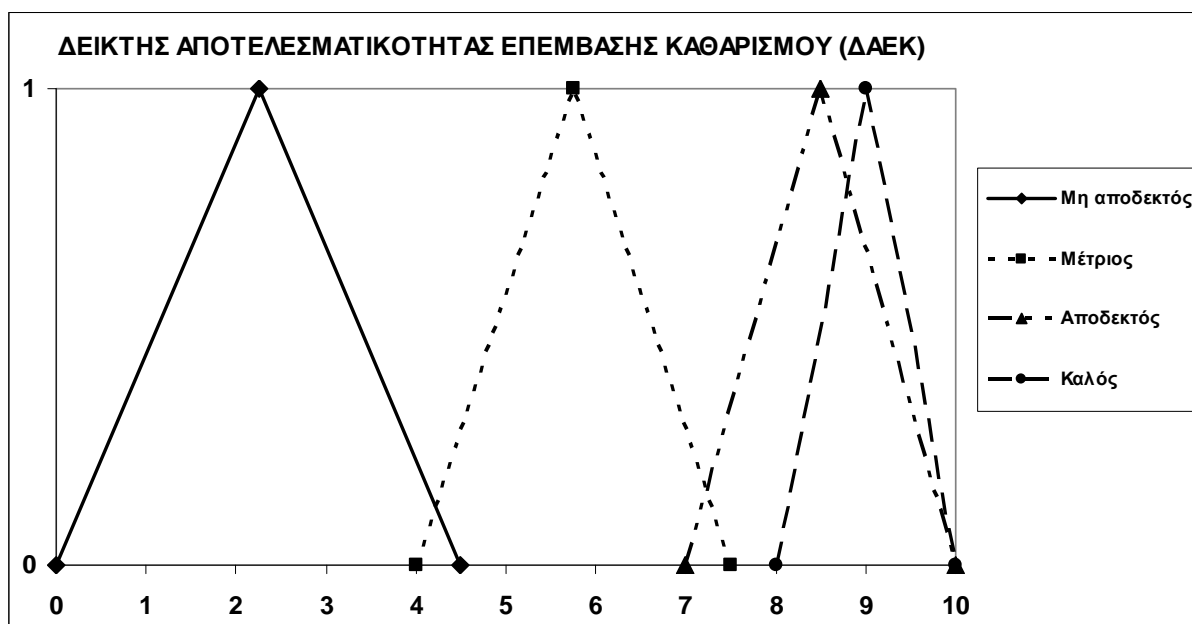
Οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 6^η παράμετρο εισόδου, αφού με αυτά τα ανώτερα και κατώτερα κατώφλια τιμών μπορεί να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη αισθητική για τις καθαρισμένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) και η επιτυχής απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων. Υψηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, δείχνουν ότι οι μαύρες επικαθήσεις έχουν απομακρυνθεί επιτυχώς, υποδηλώνοντας όμως την πιθανότητα απώλειας αυθεντικού υλικού. Επιπλέον, δείχνουν ότι η επέμβαση καθαρισμού προκάλεσε μεγάλη χρωματική διαφοροποίηση στην επιφάνεια γεγονός μη επιθυμητό. Παράλληλα, χαμηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ υποδεικνύουν ότι οι μαύρες επικαθήσεις δεν έχουν απομακρυνθεί επαρκώς από την καθαρισμένη επιφάνεια.

Οι τιμές της 6^{ης} παραμέτρου εισόδου προκύπτουν από τον τύπο:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

μετά την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της χρωματομετρίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, όπου καταγράφονται οι τιμές των χρωματικών παραμέτρων της λαμπρότητας L, της διαφοράς στο κόκκινο-πράσινο a και της διαφοράς στο κίτρινο-μπλε b, σύμφωνα με το χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.

Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ),



Εικ. 9.1.2.7: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εξόδου «Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού, (ΔΑΕΚ)»

Για την παράμετρο εξόδου, ορίζονται τέσσερις κλάσεις:

Μη Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (0-4.5),

Μέτριος Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΑΕΚ (4-7.5),

Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΕ (7-10),

Καλός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, (8-10)

Η κλίμακα για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου εξόδου ορίστηκε από το 0 έως το 10. Η πρώτη κλάση των τιμών που περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μη αποδεκτής αποτελεσματικότητας και αναφέρεται κυρίως σε επεμβάσεις υπερ-καθαρισμού (over-cleaning). Το δεύτερο οριζόμενο ασαφές σύνολο περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μέτριας αποτελεσματικότητας και περιλαμβάνει κυρίως τους ατελείς καθαρισμούς (under-cleaning). Το τρίτο ασαφές σύνολο αναφέρεται σε επεμβάσεις καθαρισμού αποδεκτής αποτελεσματικότητας, δηλ. καθαρισμούς που παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Η τέταρτη κλάση αναφέρεται σε επεμβάσεις καθαρισμού καλής αποτελεσματικότητας, που επιτυγχάνουν τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου

αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και συνεπώς είναι προτεινόμενες για εφαρμογή από τον εργολήπτη στο σύνολο των φαιόμαρων κρουστών του υπό μελέτη μνημείου.

3. Ανάπτυξη Ασαφών Κανόνων

Κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης των ασαφών κανόνων, βάσει των οποίων θα λειτουργήσει το μοντέλο για να δώσει το τελικό αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν 648 κανόνες της μορφής AN - TOTE που χρησιμοποιούν το λογικό τελεστή ΚΑΙ. Ελήφθησαν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί κλάσεων και για τις 6 μεταβλητές εισόδου, (δηλ. $2*3*4*3*3*3=648$), καθώς και το αποτέλεσμα που δίνει ο κάθε συνδυασμός για τις ορισθείσες κλάσεις της μεταβλητής εξόδου, βάσει των συμπερασμάτων που παρουσιάζονται στο κεφ. 8 για τα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα κανόνων για δώδεκα διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων εισόδου που δίνουν το δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού και στις τέσσερις κλάσεις της παραμέτρου εξόδου:

1. «**Av** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
2. «**Av** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
3. «**Av** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
4. «**Av** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».

5. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
6. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι πολύ μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
7. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαία **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
8. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
9. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
10. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».
11. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η

τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

12. «**Av** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει πάτινα στην εξεταζόμενη επιφάνεια των φαιόμαυρων κρουστών οι παράμετροι εισόδου γίνονται πέντε και συνεπώς το σύνολο των κανόνων μειώνεται σε 324 ($3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 324$). Για αυτήν την περίπτωση, που είναι και η πλέον συνηθισμένη για τις φαιόμαυρες κρούστες, επαναπροσδιορίστηκαν οι ασαφείς κανόνες.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα κανόνων για 4 διαφορετικούς συνδυασμούς των 5 πλέον παραμέτρων εισόδου που δίνουν το δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού και στις τέσσερις κλάσεις της παραμέτρου εξόδου:

1. «**Av** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
2. «**Av** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
3. «**Av** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
4. «**Av** ο βαθμός διατήρησης του στρώματος του γύψου είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

4. Λειτουργία του Μοντέλου Ασαφούς Λογικής

Για να εξαχθεί η πληροφορία εξόδου από το ασαφές μοντέλο (δηλ. για να εξαχθεί η διακριτή τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρούστες),

πρέπει οι πληροφορίες που συνιστούν την γνωσιολογική βάση που αναπτύχθηκε να διέλθουν από τις διαδικασίες των μετασχηματισμών της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδας εξαγωγής συμπεράσματος και της μονάδας αποασαφοποίησης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 9.1.1.2.

(β) Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες

1. Επιλογή Παραμέτρων Εισόδου & Παραμέτρου Εξόδου

Οι πέντε παράμετροι εισόδου που επιλέχθηκαν για το σχεδιαζόμενο μοντέλο, είναι οι κρίσιμες παράμετροι των χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες, όπως αυτές ορίστηκαν στο κεφ. 8, (β.λ. εικ. 8.3). Πιο συγκεκριμένα:

1^η Παράμετρος Εισόδου: Εκτιμώμενος Βαθμός Απώλειας Αυθεντικού Υλικού (%), συνεκτίμηση αποτελεσμάτων SEM-EDS και δραστηριότητας επεμβάσεων καθαρισμού,

2^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%), αποτελέσματα Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων SEM,

3^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια, αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

4^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm), αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

5^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ, αποτελέσματα Χρωματομετρίας,

Η πρώτη παράμετρος εισόδου αναφέρεται στο κριτήριο αποτίμησης της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, η δεύτερη, η τρίτη και η τέταρτη παράμετρος εισόδου αναφέρονται στο κριτήριο της επιφανειακής μικροδομής, ενώ η πέμπτη παράμετρος εισόδου αναφέρεται αφενός στο κριτήριο του χρώματος και αφετέρου στο κριτήριο της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, όσον αφορά στο βαθμό απομάκρυνσης των μαύρων επικαθήσεων. Τέλος, ως παράμετρος εξόδου ορίστηκε:

Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ)

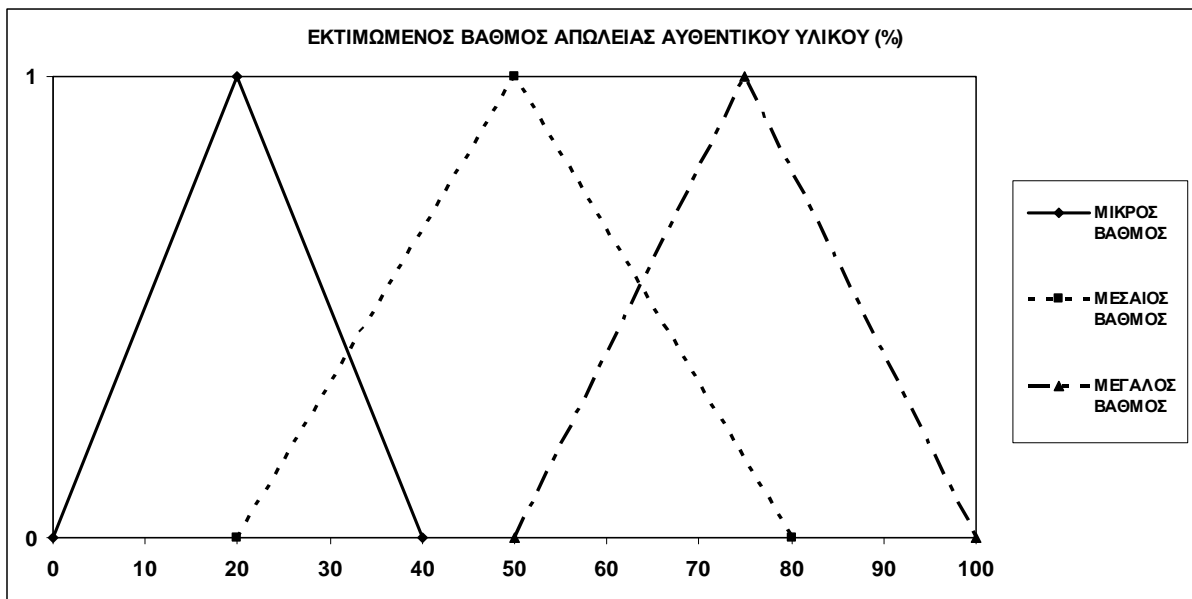
2. Οριοθέτηση Ασαφών Συνόλων των Παραμέτρων Εισόδου & της Παραμέτρου Εξόδου

Τα ασαφή σύνολα, ορίζονται για κάθε μία από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, καθώς και για την παράμετρο εξόδου. Κατά τη διαδικασία αυτή διαμορφώνονται τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού στις αρχιτεκτονικές περιοχές αποπλυμένων επιφανειών.

Για τη δημιουργία των κλάσεων (ασαφών συνόλων) των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου χρησιμοποιούνται οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Κατασκευάζονται έτσι διαγράμματα, όπου κάθε ισοσκελές τρίγωνο αντιστοιχεί στην κλάση (ασαφές σύνολο) της εξεταζόμενης παραμέτρου. Στον άξονα των x του διαγράμματος καταγράφονται οι τιμές που παίρνει η κάθε παράμετρος, καθώς και το εύρος των

λαμβάνομενων τιμών της κάθε κλάσης για την εξεταζόμενη παράμετρο. Στον άξονα y καταγράφεται ο βαθμός συμμετοχής της εξεταζόμενης παραμέτρου στο κάθε ασαφές σύνολο – κλάση (το κέντρο κάθε κλάσης στον άξονα των x, είναι το σημείο όπου ο βαθμός συμμετοχής γίνεται 1 στον άξονα των y). Για κάθε παράμετρο εισόδου, καθώς και την παράμετρο εξόδου παρατίθενται τα εύρη των τριγωνικών ασαφών συνόλων, καθώς και η απεικόνισή τους σε διάγραμμα.

1^η Παράμετρος Εισόδου: Εκτιμώμενος Βαθμός Απώλειας Αυθεντικού Υλικού (%),



Εικ. 9.1.2.8: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Εκτιμώμενος Βαθμός Απώλειας Αυθεντικού Υλικού»

Για τη 1^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού (0-40%),

Μεσαίος εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού (20-80%)

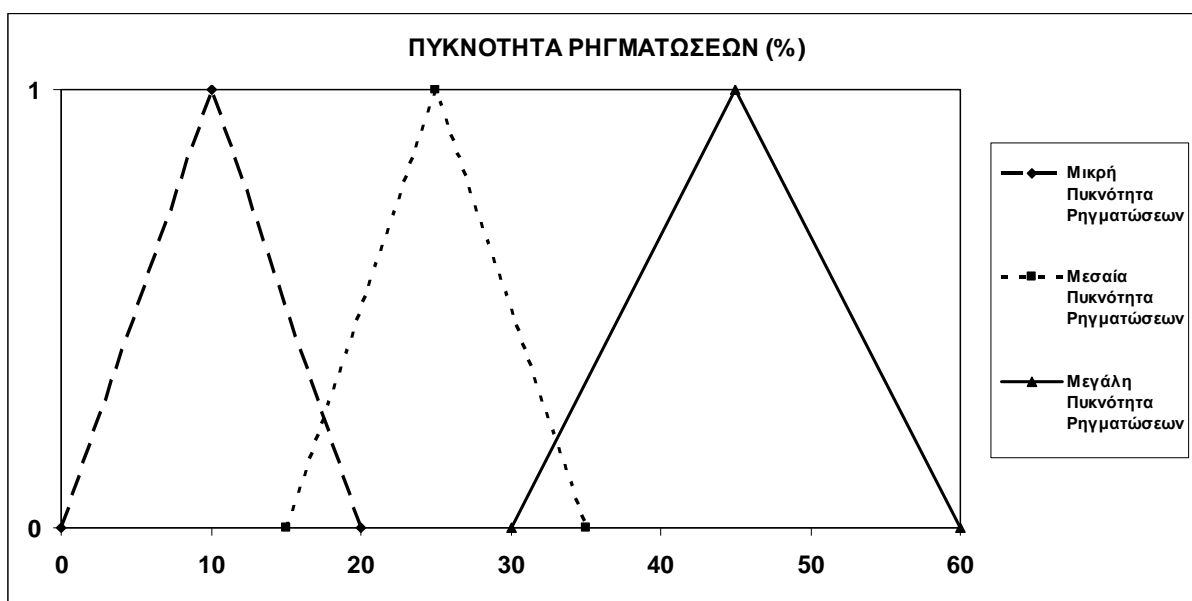
Μεγάλος εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού (50-100%)

Αποδεκτές τιμές θεωρούνται αυτές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο του μικρού εκτιμώμενου βαθμού απώλειας αυθεντικού υλικού, εφόσον επιθυμητή και αποδεκτή είναι η μεγαλύτερη δυνατή διατήρηση του ασβεστίτη μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού στις αποπλυμένες επιφάνειες, όπου το ποσοστό των παρουσιαζόμενων μαύρων επικαθήσεων είναι μικρό και η όποια δράση της μεθόδου καθαρισμού που χρησιμοποιείται λαμβάνει χώρα απευθείας στο ασβεστίτικο υλικό. Οι τιμές που ανήκουν στις άλλες δύο κλάσεις υποδεικνύουν ότι η επέμβαση καθαρισμού έχει απομακρύνει σε μεσαίο ή μεγάλο βαθμό (αντίστοιχα) το αυθεντικό υλικό και συνεπώς τα δύο ασαφή αυτά σύνολα ορίζουν τα μη αποδεκτά όρια της 1^{ης} παραμέτρου εισόδου. Στην περίπτωση όπου στην εξεταζόμενη επιφάνεια παρουσιάζεται πάτινα

εκτιμάται η κατάσταση διατήρησής της μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού και συνυπολογίζεται στον % εκτιμώμενο βαθμό απώλειας αυθεντικού υλικού.

Οι τιμές του εκτιμώμενου βαθμού απώλειας αυθεντικού υλικού, προκύπτουν τη συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, και της δραστηριότητας των επεμβάσεων καθαρισμού, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου δράσης (φυσικός, χημικός, βιολογικός, θερμικός) και του χρόνου εφαρμογής της επέμβασης καθαρισμού.

2^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%)



Εικ. 9.1.2.9: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολο) της παραμέτρου εισόδου «Πυκνότητα Ρηγματώσεων»

Για την 2^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Πυκνότητα Ρηγματώσεων (0-20%),

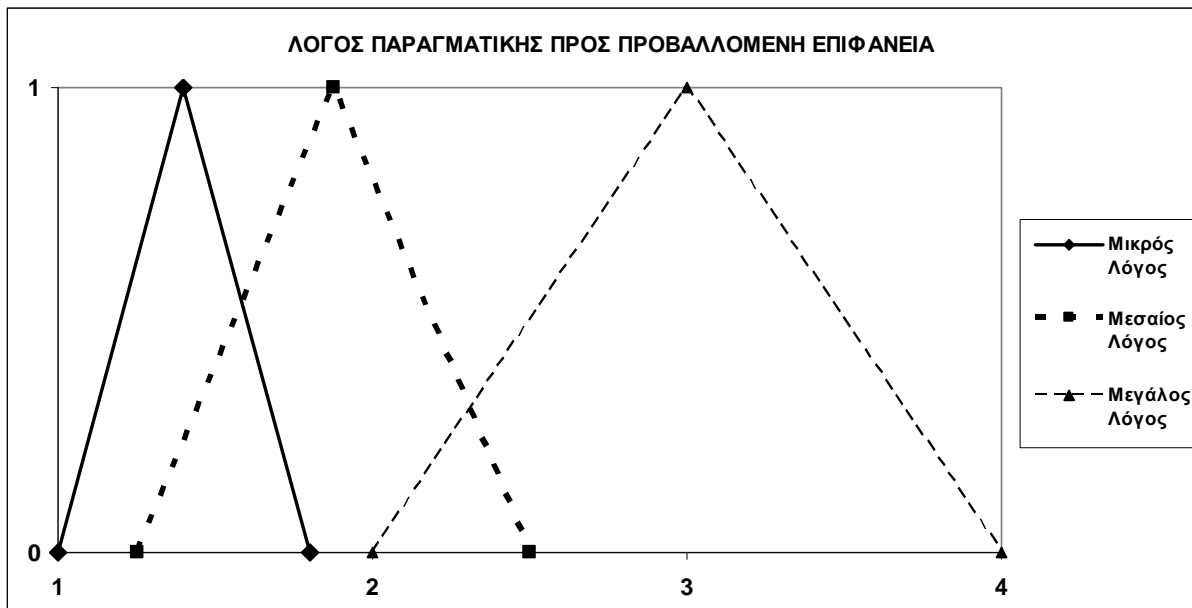
Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων (15-35%),

Μεγάλη Πυκνότητα Ρηγματώσεων (30-60%),

Οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 2^η παράμετρο εισόδου, αφού για την πυκνότητα ρηγματώσεων (ως παράμετρος της επιφανειακής μικροδομής) επιδιωκόμενος στόχος είναι οι τιμές της να παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού, έτσι ώστε η επιφανειακή απώλεια μάζας να είναι αποδεκτή και η επιδεκτικότητα στη φθορά να είναι παρόμοια, δηλ. ο ρυθμός έκπλυσης του ασβεστίτη αντίστοιχος με αυτόν που προϋπήρχε του καθαρισμού. Χαμηλές τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων, υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 2^{ης} παραμέτρου εισόδου που προκύπτουν από τη ψηφιακή επεξεργασία με το λογισμικό EDGE εικόνων SEM που έχουν ληφθεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες, εκφράζουν το ποσοστό (%) του όγκου του κάθε δείγματος που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές μέχρι βάθους 100μm.

3^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια,



Εικ. 9.1.2.10: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολο) της παραμέτρου εισόδου «Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια»

Για την 3^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1-1.8),

Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1.25-2.5),

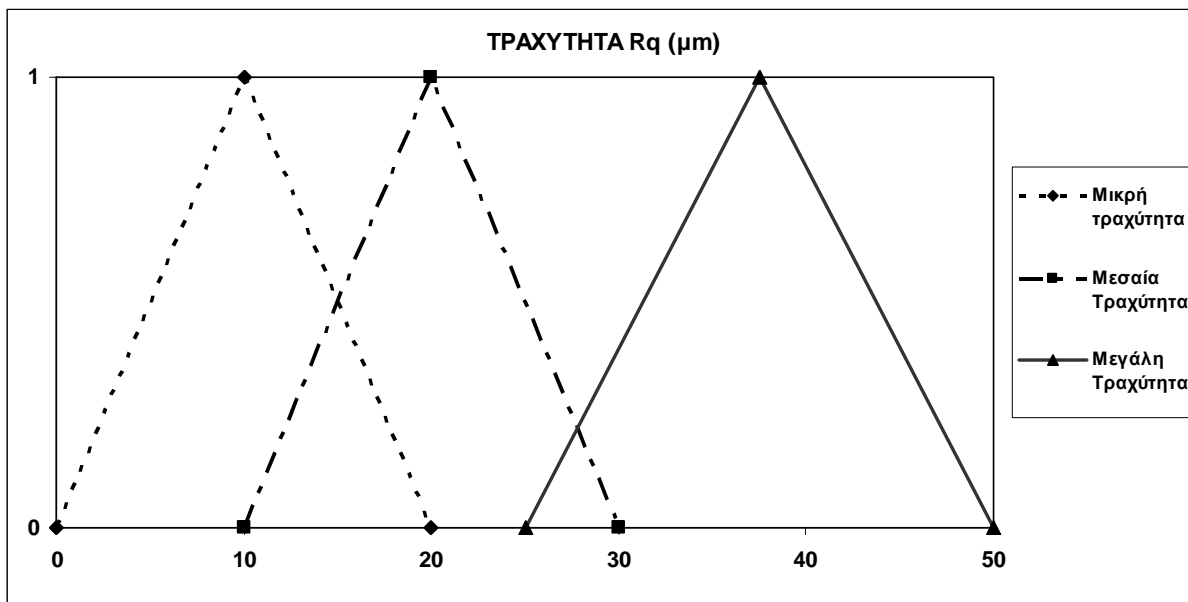
Μεγάλος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (2-4),

Το ασαφές σύνολο «Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια» ορίζει τα αποδεκτά όρια της 3^{ης} παραμέτρου εισόδου, επειδή ικανοποιεί τη συνθήκη της αποδεκτής επιφανειακής απώλειας μάζας σε σχέση με το μέτριο ρυθμό έκπλυσης του ασβεστίτη (μέτρια επιδεκτικότητα στη φθορά μιας καθαρισμένης επιφάνειας). Χαμηλές τιμές του λόγου υποδηλώνουν ότι έλαβε χώρα μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές του υποδεικνύουν υψηλό ρυθμό έκπλυσης του ασβεστίτη - μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 3^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Μετρείται το πραγματικό εμβαδό της επιφάνειας (surface area), το

οποίο και διαιρείται από το προβαλλόμενο εμβαδόν της μετρούμενης περιοχής για να προκύψει ο λόγος.

4^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm),



Εικ. 9.1.2.11: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Τραχύτητα Rq»

Για την 4^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Τραχύτητα Rq (0-20μm),

Μεσαία Τραχύτητα (10-30μm),

Μεγάλη Τραχύτητα (25-50μm),

Όπως και στις άλλες δύο μεταβλητές εισόδου του ασαφούς μοντέλου που είναι κρίσιμες παράμετροι της επιφανειακής μικροδομής, έτσι και στην περίπτωση της τραχύτητας, το ασαφές σύνολο που αντιπροσωπεύει αποδεκτά επίπεδα επιφανειακής απώλειας μάζας, καθώς και μέτριους ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς, είναι η «Μεσαία Τραχύτητα». Επιπλέον, χαμηλές τιμές της τραχύτητας Rq υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές της υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Ο προσδιορισμός της αντιπροσωπευτικής τιμής της παραμέτρου της τραχύτητας Rq για κάθε δείγμα, έλαβε χώρα μέσω του υπολογισμού της σε 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα x και 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα y, μήκους 1250μm το κάθε ένα, εφαρμόζοντας ως μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter - τα 0.25mm.

5^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ,



Εικ. 9.1.2.12: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ»

Για την 5^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (0-6),

Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (4.5-11),

Μεγάλη Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (10-40),

Οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 5^η παράμετρο εισόδου, αφού έτσι επιτυγχάνεται η επιδιωκόμενη αισθητική για τις καθαρισμένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) σε συνδυασμό με την επιτυχημένη απομάκρυνση του μικρού, ούτως ή άλλως, ποσοστού των μαύρων επικαθήσεων. Υψηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, ναι μεν δείχνουν ότι οι μαύρες επικαθήσεις έχουν απομακρυνθεί επιτυχώς, υποδηλώνουν όμως την πιθανότητα απώλειας αυθεντικού υλικού. Επιπλέον, δείχνουν ότι η επέμβαση καθαρισμού προκάλεσε μεγάλη χρωματική διαφοροποίηση στην επιφάνεια γεγονός μη επιθυμητό. Παράλληλα, χαμηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ υποδεικνύουν ότι οι μικρού ποσοστού μαύρες επικαθήσεις δεν έχουν απομακρυνθεί επαρκώς από την καθαρισμένη επιφάνεια.

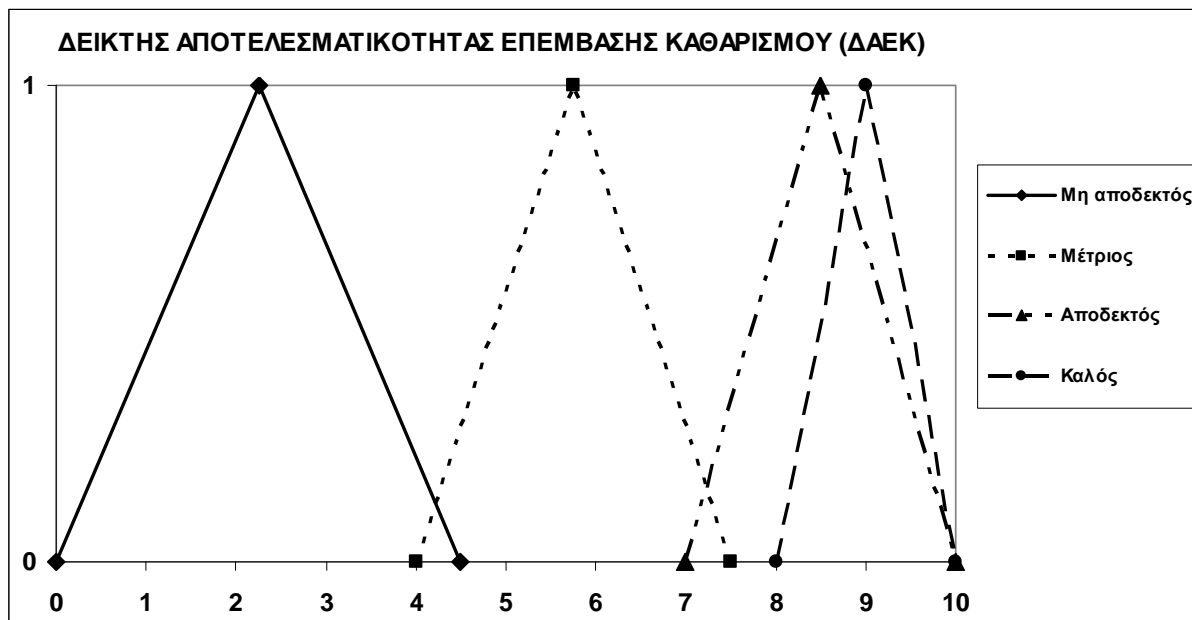
Οι τιμές της 5^{ης} παραμέτρου εισόδου προκύπτουν από τον τύπο:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

μετά την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της χρωματομετρίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, όπου καταγράφονται οι τιμές των χρωματικών παραμέτρων της

λαμπρότητας L, της διαφοράς στο κόκκινο-πράσινο a και της διαφοράς στο κίτρινο-μπλε b, σύμφωνα με το χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.

Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ),



Εικ. 9.1.2.13: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολα) της παραμέτρου εξόδου «Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού, (ΔΑΕΚ)»

Για την παράμετρο εξόδου, ορίζονται τέσσερις κλάσεις:

Μη Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (0-4.5),

Μέτριος Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΑΕΚ (4-7.5),

Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΕ (7-10),

Καλός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, (8-10)

Ο αριθμός των κλάσεων της παραμέτρου εξόδου, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες, είναι ίδια με αυτό των ασαφών μοντέλων που εκτιμούν την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών.

Συνεπώς και εδώ η κλίμακα για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου εξόδου ορίστηκε από το 0 έως το 10. Η πρώτη κλάση των τιμών που περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μη αποδεκτής αποτελεσματικότητας και αναφέρεται κυρίως σε επεμβάσεις υπερ-καθαρισμού (over-cleaning). Το δεύτερο οριζόμενο ασαφές σύνολο περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μέτριας αποτελεσματικότητας και περιλαμβάνει κυρίως τους ατελείς καθαρισμούς (under-cleaning). Το τρίτο ασαφές σύνολο αναφέρεται σε επεμβάσεις καθαρισμού αποδεκτής αποτελεσματικότητας, δηλ. καθαρισμούς που παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Η τέταρτη κλάση αναφέρεται σε

επεμβάσεις καθαρισμού καλής αποτελεσματικότητας, που επιτυγχάνουν τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και συνεπώς είναι προτεινόμενες για εφαρμογή από τον εργολήπτη στο σύνολο των αποπλυμένων επιφανειών του υπό μελέτη μνημείου.

3. Ανάπτυξη Ασαφών Κανόνων

Κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης των ασαφών κανόνων, βάσει των οποίων θα λειτουργήσει το μοντέλο για να δώσει το τελικό αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν 243 κανόνες της μορφής AN - ΤΟΤΕ που χρησιμοποιούν το λογικό τελεστή ΚΑΙ. Ελήφθησαν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί κλάσεων και για τις 5 μεταβλητές εισόδου, (δηλ. $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 243$), καθώς και το αποτέλεσμα που δίνει ο κάθε συνδυασμός για τις ορισθείσες κλάσεις της μεταβλητής εξόδου, βάσει των συμπερασμάτων που παρουσιάζονται στο κεφ. 8 για τα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα κανόνων για οκτώ διαφορετικούς συνδυασμούς των πέντε παραμέτρων εισόδου που δίνουν το δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού και στις τέσσερις κλάσεις της παραμέτρου εξόδου:

1. «**Av** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
2. «**Av** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλη **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
3. «**Av** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
4. «**Av** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
5. «**Av** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος

είναι μικρή **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».

6. «**Αν** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
7. «**Αν** ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».
8. «**Αν** ο ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρή **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

4. Λειτουργία του Ασαφούς Μοντέλου

Για να εξαχθεί η πληροφορία εξόδου από το ασαφές μοντέλο (δηλ. για να εξαχθεί η διακριτή τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες), πρέπει οι πληροφορίες που συνιστούν την γνωσιολογική βάση που αναπτύχθηκε να διέλθουν από τις διαδικασίες των μετασχηματισμών της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδας εξαγωγής συμπεράσματος και της μονάδας αποασαφοποίησης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 9.1.1.2.

(γ) Ανάπτυξη του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου

1. Επιλογή Παραμέτρων Εισόδου & Παραμέτρου Εξόδου

Οι έξι παράμετροι εισόδου που επιλέχθηκαν για το σχεδιαζόμενο μοντέλο, είναι οι κρίσιμες παράμετροι των χαρακτηριστικών μιας καθαρισμένης επιφάνειας για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, όπως αυτές ορίστηκαν στο κεφ. 8. Πιο συγκεκριμένα:

1^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης Πάτινας (%), αποτελέσματα SEM-EDS,

2^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο (%), αποτελέσματα SEM-EDS,

3^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%), αποτελέσματα Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων SEM,

4^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια, αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

5^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm), αποτελέσματα laser προφίλομετρίας,

6^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ, αποτελέσματα Χρωματομετρίας,

Η πρώτη και η δεύτερη παράμετρος εισόδου αναφέρονται στο κριτήριο αποτίμησης της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, η τρίτη, η τέταρτη και η πέμπτη παράμετρος εισόδου αναφέρονται στο κριτήριο της επιφανειακής μικροδομής, ενώ η έκτη παράμετρος εισόδου αναφέρεται αφενός στο κριτήριο του χρώματος και αφετέρου στο κριτήριο της χημικής-ορυκτολογικής σύστασης των επιφανειών, όσον αφορά στο βαθμό απομάκρυνσης των μαύρων επικαθίσεων.

Τέλος, ως παράμετρος εξόδου ορίστηκε:

Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ)

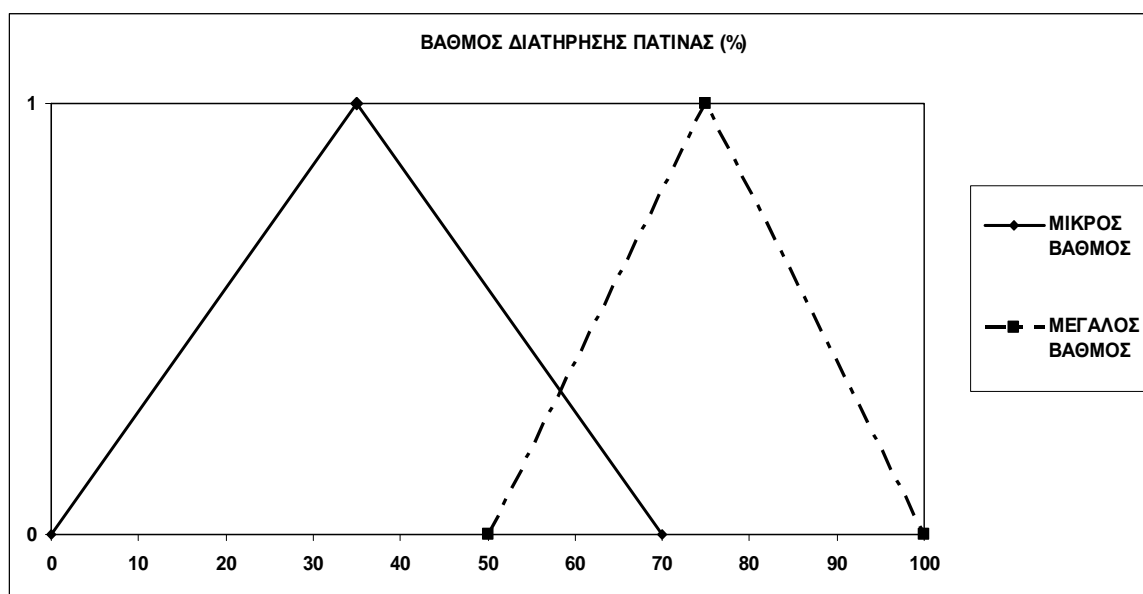
2. Οριοθέτηση Ασαφών Συνόλων των Παραμέτρων Εισόδου & της Παραμέτρου Εξόδου

Τα ασαφή σύνολα, ή αλλιώς κλάσεις, ορίζονται για κάθε μία από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, καθώς και για την παράμετρο εξόδου. Κατά τη διαδικασία αυτή διαμορφώνονται τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου.

Για τη δημιουργία των κλάσεων των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου χρησιμοποιούνται οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Κατασκευάζονται έτσι διαγράμματα, όπου κάθε ισοσκελές τρίγωνο αντιστοιχεί στην κλάση (ασαφές σύνολο) της εξεταζόμενης παραμέτρου. Στον άξονα των x του διαγράμματος καταγράφονται οι τιμές που παίρνει η κάθε παράμετρος, καθώς και το εύρος των λαμβανόμενων τιμών της κάθε κλάσης για την εξεταζόμενη παράμετρο. Στον άξονα y καταγράφεται ο βαθμός συμμετοχής της εξεταζόμενης

παραμέτρου στο κάθε ασαφές σύνολο – κλάση (το κέντρο κάθε κλάσης στον άξονα των x, είναι το σημείο όπου ο βαθμός συμμετοχής γίνεται 1 στον άξονα των y). Για κάθε παράμετρο εισόδου, καθώς και την παράμετρο εξόδου παρατίθενται τα εύρη των τριγωνικών ασαφών συνόλων, καθώς και η απεικόνισή τους σε διάγραμμα.

1^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Διατήρησης Πάτινας (%)



Εικ. 9.1.2.14: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός Διατήρησης Πάτινας»

Για την 1^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται δύο κλάσεις:

Μικρός βαθμός διατήρησης πάτινας (0-70%).

Μεγάλος βαθμός διατήρησης πάτινας (50-100%).

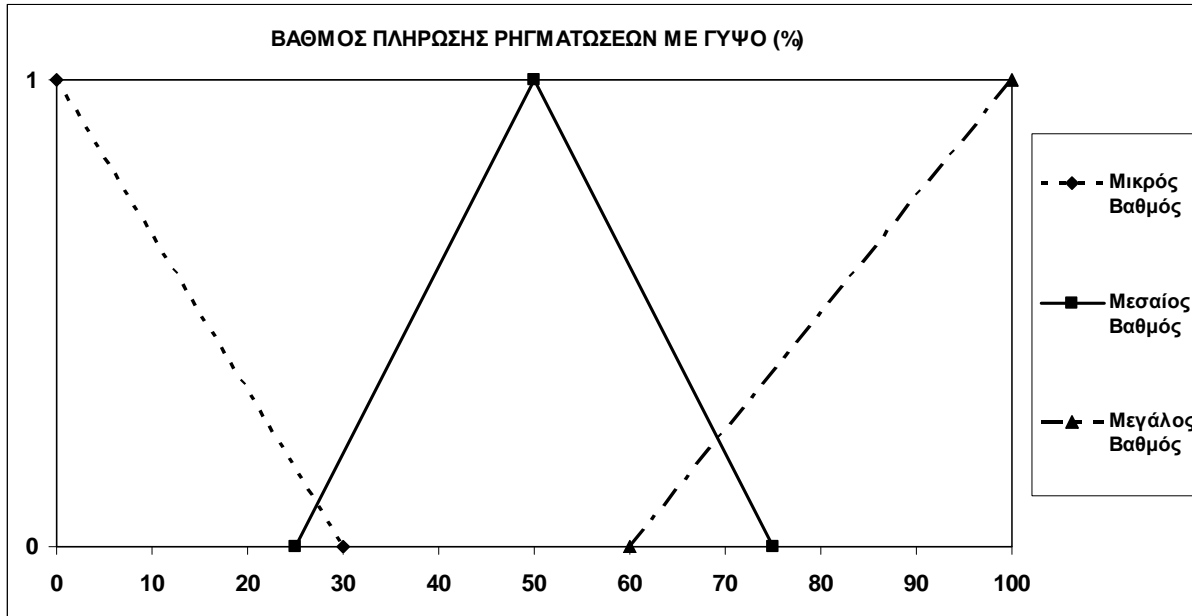
Ο αριθμός των κλάσεων της 1^{ης} παραμέτρου εισόδου δηλ. του βαθμού διατήρησης της πάτινας, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά του ασαφούς μοντέλου που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών.

Συνεπώς, το ασαφές σύνολο που περιλαμβάνει τιμές εντός αποδεκτών ορίων είναι αυτό του μεγάλου βαθμού διατήρησης πάτινας, αφού, όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφ. 8, η διατήρηση της πάτινας είναι προαπαιτούμενο για να μπορέσει μια επέμβαση καθαρισμού να χαρακτηριστεί αποτελεσματική και επιτυχής.

Οι τιμές του βαθμού διατήρησης της πάτινας, προκύπτουν από τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, αφού εκτιμηθεί το πάχος του στρώματος της πάτινας, η συνοχή, η συνέχεια και η ομοιογένειά του, σε σχέση με τα αντίστοιχα δεδομένα πριν την εφαρμογή της επέμβασης καθαρισμού. Η χρήση του επί τοις

εκατό ποσοστού για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την εισαγωγή και τη σύγκριση δεδομένων στο ίδιο μοντέλο από διαφορετικές επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, όπου τόσο τα ποσοτικά δεδομένα που αφορούν στο πάχος (μm) του στρώματος της πάτινας, όσο και τα ποιοτικά δεδομένα που αφορούν στη συνοχή, στη συνέχεια και την ομοιογένειά του είναι διαφορετικά.

2^η Παράμετρος Εισόδου: Βαθμός Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο (%)



Εικ. 9.1.2.15: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο»

Για τη 2^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός βαθμός πλήρωσης ρηγματώσεων με γύψο (0-30%),

Μεσαίος βαθμός πλήρωσης ρηγματώσεων με γύψο (25-75%)

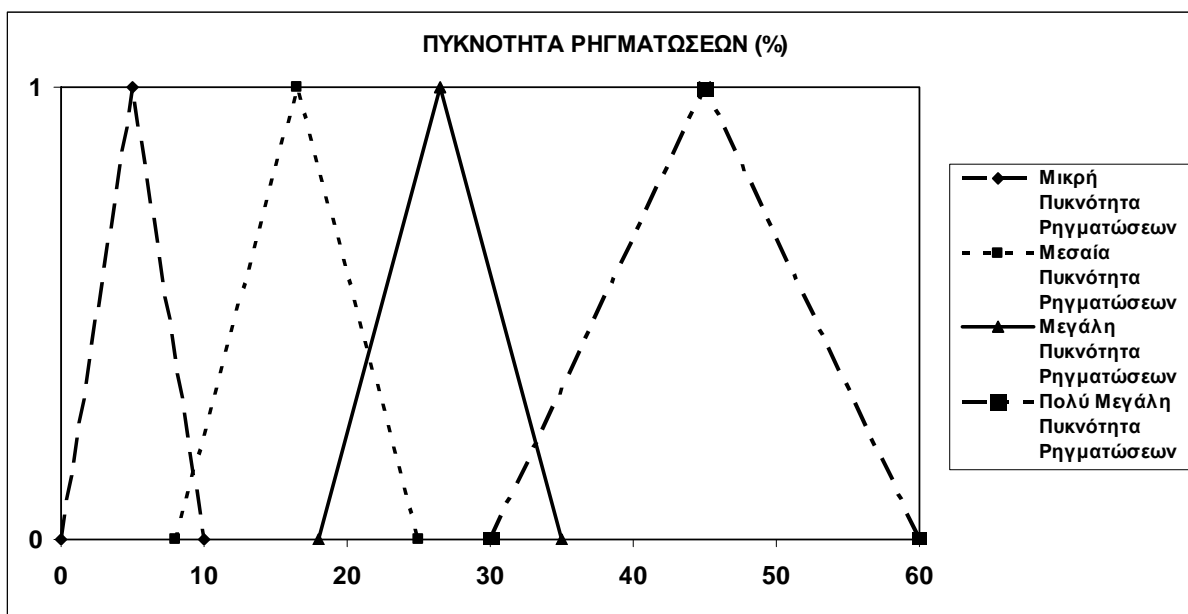
Μεγάλος βαθμός πλήρωσης ρηγματώσεων με γύψο (60-100%)

Αποδεκτές τιμές θεωρούνται αυτές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο του μεγάλου βαθμού πλήρωσης ρηγματώσεων με γύψο, εφόσον επιθυμητή και αποδεκτή είναι η διατήρηση του μικρό-κρυσταλλικού γύψου στις μικρό-ρωγμές που αναπτύσσονται στα περατωτικά όρια των ασβεστιτικών κόκκων, αφού έτσι οι επιφανειακοί ασβεστιτικοί κόκκοι συγκρατούνται και δεν αποκολλούνται. Οι τιμές που ανήκουν στις άλλες δύο κλάσεις υποδεικνύουν ότι η επέμβαση καθαρισμού έχει απομακρύνει σε μεσαίο ή μεγάλο βαθμό (αντίστοιχα) τον μικρό-κρυσταλλικό γύψο και συνεπώς τα δύο ασαφή αυτά σύνολα ορίζουν τα μη αποδεκτά όρια της 2^{ης} παραμέτρου εισόδου.

Οι τιμές του βαθμού πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο, προκύπτουν από τα αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, αφού μετρηθεί το

βάθος των ρηγματώσεων που εμπεριέχει μικρό-κρυσταλλικό γύψο σε μμ. Η (%) έκφραση των αποτελεσμάτων λαμβάνει χώρα έτσι ώστε στο ίδιο μοντέλο να μπορούν να εισαχθούν και να συγκριθούν δεδομένα από διαφορετικές επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, όπου το αρχικό βάθος των ρηγματώσεων που είναι πληρωμένες με γύψο σε μμ είναι διαφορετικό, με αποτέλεσμα και η κρίση για την ποσότητα του γύψου που παραμένει στις μικρό-ρωγμές μετά τον καθαρισμό να ποικίλει.

3^η Παράμετρος Εισόδου: Πυκνότητα Ρηγματώσεων (%)



Εικ. 9.1.2.16: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Πυκνότητα Ρηγματώσεων»

Για την 3^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τέσσερις κλάσεις:

Μικρή Πυκνότητα Ρηγματώσεων (0-10%),

Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων (8-25%),

Μεγάλη Πυκνότητα Ρηγματώσεων (18-35%),

Πολύ Μεγάλη Πυκνότητα Ρηγματώσεων (30-60%),

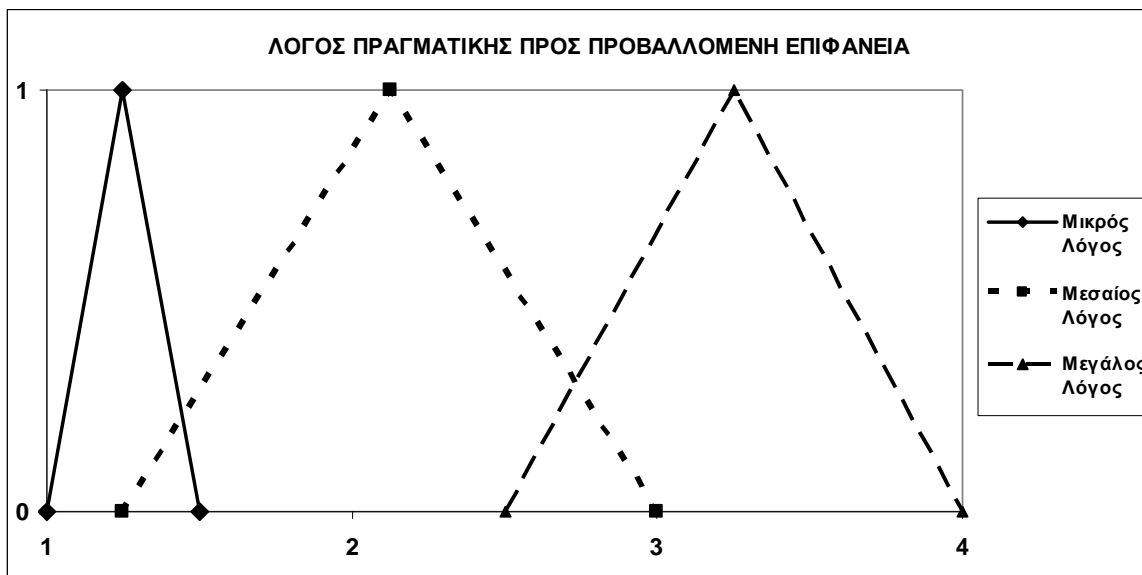
Ο αριθμός των κλάσεων της 3^{ης} παραμέτρου εισόδου δηλ. της πυκνότητας ρηγματώσεων, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά του ασαφούς μοντέλου που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών.

Συνεπώς και εδώ, οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Πυκνότητα Ρηγματώσεων» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 3^η παράμετρο εισόδου, αφού για την πυκνότητα ρηγματώσεων επιδιωκόμενος στόχος είναι οι τιμές της να παραμένουν σε παρόμοια

ή/και ελαφρώς μειωμένα επίπεδα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού. Χαμηλές τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, (ασβεστίτη και γύψου που βρίσκεται στα περατωτικά όρια των ασβεστιτικών κόκκων), ενώ υψηλές ή πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας ρηγματώσεων, υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 3^{ης} παραμέτρου εισόδου που προκύπτουν από τη ψηφιακή επεξεργασία με το λογισμικό EDGE εικόνων SEM που έχουν ληφθεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες, εκφράζουν το ποσοστό (%) του όγκου του κάθε δείγματος που καταλαμβάνεται από ρηγματώσεις, κοιλότητες και εσοχές μέχρι βάθους 100μm.

4^η Παράμετρος Εισόδου: Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή επιφάνεια,



Εικ. 9.1.2.17: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφής Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια»

Για την 4^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρός Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1-1.5),

Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (1.25-3),

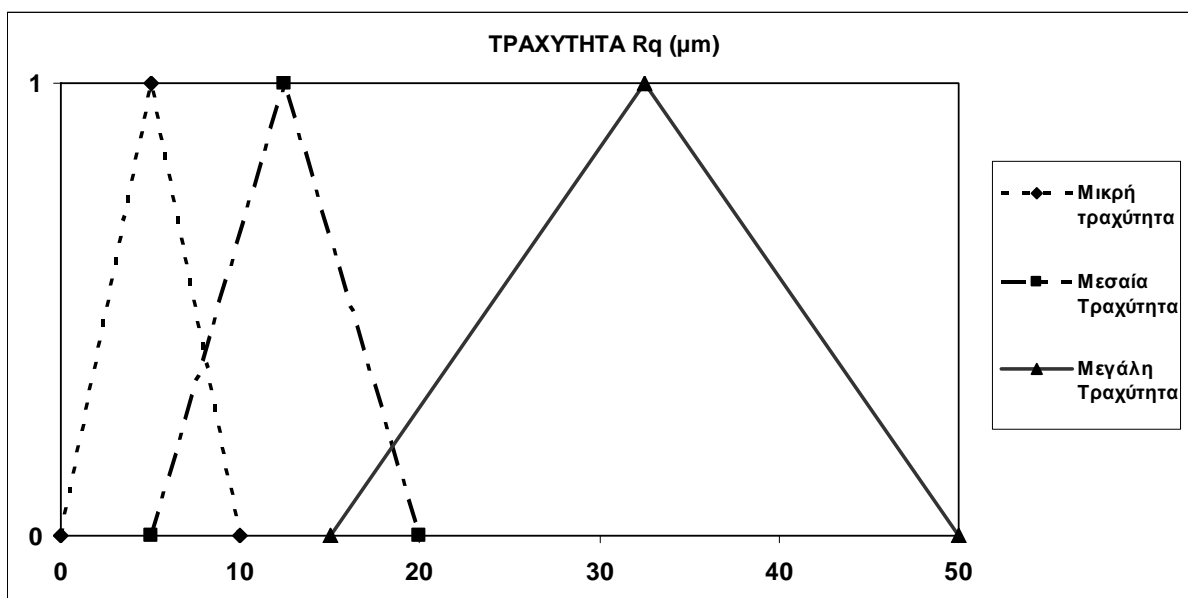
Μεγάλος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια (2.5-4),

Ο αριθμός των κλάσεων της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου δηλ. του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά του ασαφούς μοντέλου που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών.

Συνεπώς, κατ' αντιστοιχία, το ασαφές σύνολο «Μεσαίος Λόγος Πραγματικής προς Προβαλλόμενη Επιφάνεια» ορίζει τα αποδεκτά όρια της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου, επειδή ικανοποιεί τη συνθήκη της αποδεκτής επιφανειακής απώλειας μάζας σε σχέση με τους μέτριους ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς (μέτρια επιδεκτικότητα στη φθορά μιας καθαρισμένης επιφάνειας). Χαμηλές τιμές του λόγου υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές του υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 4^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Μετρείται το πραγματικό εμβαδό της επιφάνειας (surface area), το οποίο και διαιρείται από το προβαλλόμενο εμβαδόν της μετρούμενης περιοχής για να προκύψει ο λόγος.

5^η Παράμετρος Εισόδου: Τραχύτητα Rq (μm),



Εικ. 9.1.2.18: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Τραχύτητα Rq»

Για την 5^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Τραχύτητα Rq (0-10μm),

Μεσαία Τραχύτητα (5-20μm),

Μεγάλη Τραχύτητα (15-50μm),

Ο αριθμός των κλάσεων της 5^{ης} παραμέτρου εισόδου δηλ. της τραχύτητας, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά του ασαφούς μοντέλου που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών.

Συνεπώς, στην περίπτωση της τραχύτητας, το ασαφές σύνολο που αντιπροσωπεύει αποδεκτά επίπεδα επιφανειακής απώλειας μάζας, καθώς και μέτριους ρυθμούς επανεμφάνισης της φθοράς, είναι η «Μεσαία Τραχύτητα». Επιπλέον, χαμηλές τιμές της τραχύτητας R_q υποδηλώνουν μεγάλη επιφανειακή απώλεια μάζας, ενώ υψηλές τιμές της υποδεικνύουν μεγάλη επιδεκτικότητα στη φθορά.

Οι τιμές της 5^{ης} παραμέτρου εισόδου καταγράφονται από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της laser προφίλομετρίας στο εργαστήριο σε στερεά δείγματα που ελήφθησαν μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού. Ο προσδιορισμός της αντιπροσωπευτικής τιμής της παραμέτρου της τραχύτητας R_q για κάθε δείγμα, έλαβε χώρα μέσω του υπολογισμού της σε 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα x και 50 γραμμικά προφίλ στον άξονα y, μήκους 1250μm το κάθε ένα, εφαρμόζοντας ως μήκος δειγματοληψίας - cut-off filter - τα 0.25mm.

6^η Παράμετρος Εισόδου: Συνολική Διαφορά Χρώματος ΔΕ,



Εικ. 9.1.2.19: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφή Σύνολα) της παραμέτρου εισόδου «Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ»

Για την 6^η παράμετρο εισόδου, ορίζονται τρεις κλάσεις:

Μικρή Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (0-6),

Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (4.5-11),

Μεγάλη Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ (10-40),

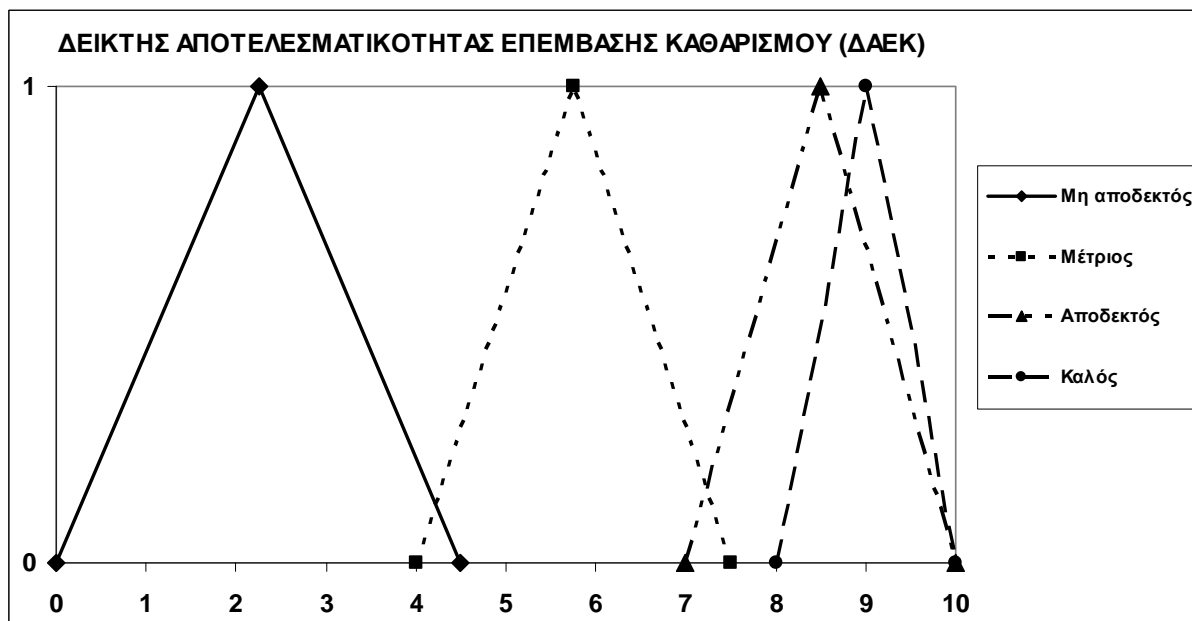
Ο αριθμός των κλάσεων της 6^{ης} παραμέτρου εισόδου δηλ. της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά του ασαφούς μοντέλου που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού στις αποπλυμένες επιφάνειες.

Συνεπώς, οι τιμές που ανήκουν στο ασαφές σύνολο «Μεσαία Συνολική Μεταβολή Χρώματος, ΔΕ» ορίζουν τα όρια αποδοχής για την 6^η παράμετρο εισόδου, αφού με αυτά τα ανώτερα και κατώτερα κατώφλια τιμών μπορεί να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη αισθητική για τις καθαρισμένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) και η επιτυχής απομάκρυνση των μαύρων επικαθίσεων. Υψηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, δείχνουν ότι οι μαύρες επικαθίσεις έχουν απομακρυνθεί επιτυχώς, υποδηλώνοντας όμως την πιθανότητα απώλειας αυθεντικού υλικού. Επιπλέον, δείχνουν ότι η επέμβαση καθαρισμού προκάλεσε μεγάλη χρωματική διαφοροποίηση στην επιφάνεια γεγονός μη επιθυμητό. Παράλληλα, χαμηλές τιμές της συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ υποδεικνύουν ότι οι μαύρες επικαθίσεις δεν έχουν απομακρυνθεί επαρκώς από την καθαρισμένη επιφάνεια. Οι τιμές της 6^{ης} παραμέτρου εισόδου προκύπτουν από τον τύπο:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

μετά την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής τεχνικής της χρωματομετρίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, όπου καταγράφονται οι τιμές των χρωματικών παραμέτρων της λαμπρότητας L, της διαφοράς στο κόκκινο-πράσινο a και της διαφοράς στο κίτρινο-μπλε b, σύμφωνα με το χρωματομετρικό σύστημα CIE Lab, πριν και μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού.

Παράμετρος Εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ),



Εικ. 9.1.2.20: Τριγωνικές Κλάσεις (Ασαφές Σύνολο) της παραμέτρου εξόδου «Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού, (ΔΑΕΚ)»

Για την παράμετρο εξόδου, ορίζονται τέσσερις κλάσεις:

Μη Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (0-4.5),
Μέτριος Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΑΕΚ (4-7.5),

Αποδεκτός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, ΔΕ (7-10),

Καλός Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού, (8-10)

Ο αριθμός των κλάσεων της παραμέτρου εξόδου, καθώς και τα όρια τους για το ασαφές μοντέλο που εκτιμά την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, είναι ίδια με αυτά των ασαφών μοντέλων που εκτιμούν την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε περιοχές των φαιόμαυρων κρουστών και των αποπλυμένων επιφανειών.

Συνεπώς και εδώ η κλίμακα για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου εξόδου ορίστηκε από το 0 έως το 10. Η πρώτη κλάση των τιμών που περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μη αποδεκτής αποτελεσματικότητας και αναφέρεται κυρίως σε επεμβάσεις υπερ-καθαρισμού (over-cleaning). Το δεύτερο οριζόμενο ασαφές σύνολο περιγράφει επεμβάσεις καθαρισμού μέτριας αποτελεσματικότητας και περιλαμβάνει κυρίως τους ατελείς καθαρισμούς (under-cleaning). Το τρίτο ασαφές σύνολο αναφέρεται σε επεμβάσεις καθαρισμού αποδεκτής αποτελεσματικότητας, δηλ. καθαρισμούς που παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Η τέταρτη κλάση αναφέρεται σε επεμβάσεις καθαρισμού καλής αποτελεσματικότητας, που επιτυγχάνουν τους επιδιωκόμενους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και συνεπώς είναι προτεινόμενες για εφαρμογή από τον εργολήπτη στο σύνολο των περικρυσταλλικά ρηγματωμένων μαρμάρινων επιφανειών του υπό μελέτη μνημείου.

3. Ανάπτυξη Ασαφών Κανόνων

Κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης των ασαφών κανόνων, βάσει των οποίων θα λειτουργήσει το μοντέλο για να δώσει το τελικό αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν 648 κανόνες της μορφής AN - TOTE που χρησιμοποιούν το λογικό τελεστή ΚΑΙ. Ελήφθησαν υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί κλάσεων και για τις 6 μεταβλητές εισόδου, (δηλ. $2*3*4*3*3*3=648$), καθώς και το αποτέλεσμα που δίνει ο κάθε συνδυασμός για τις ορισθείσες κλάσεις της μεταβλητής εξόδου, βάσει των συμπερασμάτων που παρουσιάζονται στο κεφ. 8 για τα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα κανόνων για 4 διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων εισόδου που δίνουν το δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού και στις τέσσερις κλάσεις της παραμέτρου εξόδου:

1. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».

2. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μικρός **και** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεσαίος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
3. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
4. «**Αν** ο βαθμός διατήρησης της πάτινας είναι μεγάλος **και** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει πάτινα στην εξεταζόμενη επιφάνεια του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, οι παράμετροι εισόδου γίνονται πέντε και συνεπώς το σύνολο των κανόνων μειώνεται σε 324 ($3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 324$). Για αυτήν την περίπτωση, που είναι και η πλέον συνηθισμένη, επαναπροσδιορίστηκαν οι ασαφείς κανόνες.

Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα κανόνων για 4 διαφορετικούς συνδυασμούς των 5 πλέον παραμέτρων εισόδου που δίνουν το δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού και στις τέσσερις κλάσεις της παραμέτρου εξόδου:

9. «**Αν** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μικρός **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μικρή **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μικρός **και** η τραχύτητα είναι μικρή **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεγάλη, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μη αποδεκτός (μη αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».
10. «**Αν** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεγάλος **και** η τραχύτητα είναι μεγάλη **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μικρή, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι μέτριος (μέτρια επέμβαση καθαρισμού)».
11. «**Αν** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεγάλη **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος

είναι μεσαία **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι αποδεκτός (αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού)».

12. «**Αν** ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο είναι μεγάλος **και** η πυκνότητα ρηγματώσεων είναι μεσαία **και** ο λόγος της πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια είναι μεσαίος **και** η τραχύτητα είναι μεσαία **και** η συνολική διαφορά χρώματος είναι μεσαία, **τότε** ο δείκτης αποτελεσματικότητας της επέμβασης καθαρισμού είναι καλός (καλή - προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού)».

4. Λειτουργία του Μοντέλου Ασαφούς Λογικής

Για να εξαχθεί η πληροφορία εξόδου από το ασαφές μοντέλο (δηλ. για να εξαχθεί η διακριτή τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε περιοχές περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου), πρέπει οι πληροφορίες που συνιστούν την γνωσιολογική βάση που αναπτύχθηκε να διέλθουν από τις διαδικασίες των μετασχηματισμών της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδας εξαγωγής συμπεράσματος και της μονάδας αποασαφοποίησης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 9.1.1.2.

9.1.3 Αποτελέσματα δοκιμών των μοντέλων ασαφούς λογικής

Για να διαπιστωθεί αν τα τρία ασαφή μοντέλα που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες είναι σωστά βαθμονομημένα και επιτελεστικά, όσον αφορά στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα σε φαιόμαυρες κρούστες, αποπλυμένες επιφάνειες και σε περιοχές περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, αυτά εφαρμόστηκαν στις αντίστοιχες μελέτες περιπτώσεων:

(α) των φαιόμαυρων κρουστών των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα και του κιονόκρανου του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (34 διαφορετικές περιπτώσεις),

(β) των αποπλυμένων επιφανειών των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (9 διαφορετικές περιπτώσεις), καθώς και

(γ) του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (7 διαφορετικές περιπτώσεις).

Όσον αφορά στην εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου των φαιόμαυρων κρουστών, η δοκιμή του πραγματοποιείται σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κιονόκρανου του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (19 διαφορετικές περιπτώσεις), όπου υπάρχει πάτινα και στη δεύτερη περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, καθώς και των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (15 διαφορετικές περιπτώσεις), όπου δεν υπάρχει πάτινα και συνεπώς οι παράμετροι εισόδου μειώνονται σε 5.

(α1) Αποτελέσματα δοκιμών του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρούστες παρουσία πάτινας

Ακολουθεί η εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών του κιονόκρανου του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου που συνίσταται στην αποτίμηση 19 διαφορετικών περιπτώσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν την παράμετρο εισόδου του βαθμού διατήρησης της πάτινας.

Στον Πίνακα 9.1.3.1 παρατίθενται τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η επί τοις εκατό βαθμονόμησή των αποτελεσμάτων που αποτελούν και τις διακριτές τιμές των παραμέτρων εισόδου του «Βαθμού Διατήρησης Πάτινας» και του «Βαθμού Διατήρησης Στρώματος Γύψου».

Υπενθυμίζεται δε, ότι στη συγκεκριμένη επιφάνεια το παρουσιαζόμενο στρώμα του θειικού βαρίου αποτελεί πάτινα παρότι πρόκειται για στρώμα ανομοιογενές σε σχέση με το πάχος, τη

συνέχεια, τη θέση και τη συνοχή του, αφού ως επικρατέστερο σενάριο για την παρουσία του θεωρείται η άποψη της χρήσης του λιθοπονίου ως υπόστρωμα χρωματικής διακόσμησης. Συνεπώς, το στρώμα του θειικού βαρίου χαρακτηρίζεται ως πάτινα, εφόσον είναι ιδιαίτερης ιστορικής σημασίας, καθώς αποτελεί σαφή ένδειξη για το ότι στα τέλη του 19^{ου} αιώνα τα κιονόκρανα του πρόπυλου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου ήταν επιζωγραφισμένα.

Στις πρώτες γραμμές του Πίνακα 9.1.3.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν στα δείγματα που ελήφθησαν πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού, κατά τη διάγνωση της φθοράς, όπου και καθίσταται σαφής η ποικιλομορφία του συνολικού πάχους της κρούστας, του πάχους των τμημάτων του μακρό-κρυσταλλικού και του μικρό-κρυσταλλικού γύψου της, της παρουσίας ή μη του βαρύτη, της ανομοιογένειας του πάχους του, καθώς και της θέσης του στο συνολικό στρώμα της κρούστας. Όλα τα παραπάνω είναι άμεσα εξαρτώμενα από τη θέση του κάθε εξεταζόμενου δείγματος, δηλ. από τον αν προέρχεται από το κεντρικό, το δεξί ή το αριστερό τμήμα του κιονόκρανου, την πρόσθια ή την πλάγια όψη.

Συνεπώς, για την εκτίμηση των επί τοις εκατό τιμών εισόδου του βαθμού διατήρησης της πάτινας και του στρώματος του γύψου, πρέπει να ληφθεί ως κατάσταση αναφοράς προς σύγκριση για κάθε εξεταζόμενο δείγμα μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, το αντίστοιχο δείγμα διάγνωσης σε σχέση με τη θέση από την οποία προήλθε στην αρχιτεκτονική επιφάνεια του κιονόκρανου και την όψη του. Πιο συγκεκριμένα, για τα δείγματα Kke3a1a, Kke2ba1, Kke2aa, Kke3a2a, Kke1b, Kke1aa, Kke3b, δείγματα αναφοράς είναι αυτά που προέρχονται από την πρόσθια όψη του κεντρικού τμήματος του κιονόκρανου, δηλ. τα Kked1a, Kkeka, ενώ για το δείγμα Kke3ba κατάσταση αναφοράς είναι το δείγμα Kkeega (πρόσθια όψη δεξιού τμήματος κιονόκρανου) και για το Kkeeg51a, δείγμα αναφοράς είναι το Kkeeraa (πρόσθια όψη αριστερού τμήματος κιονόκρανου). Επιπλέον, για τα δείγματα Kke3a1k, Kke2bk, Kke2ak, Kke3a2k, Kke1b, Kke1ao, Kke3b, τα δείγματα αναφοράς είναι αυτά που προέρχονται από την πλάγια όψη του κεντρικού τμήματος του κιονόκρανου, δηλ. τα Kkek, Kked1o, ενώ για το δείγμα Kke3bk, κατάσταση αναφοράς είναι τα δείγματα kkeego και kkeegg (πλάγια όψη δεξιού τμήματος κιονόκρανου), και τέλος για το Kkeeg51k, δείγμα αναφοράς είναι το Kkeerak (πλάγια όψη αριστερού τμήματος κιονόκρανου).

Παρόλο που η θέση του κάθε εξεταζόμενου δείγματος, δηλ. το αν προέρχεται από το κεντρικό, το δεξί ή το αριστερό τμήμα του κιονόκρανου, την πρόσθια ή την πλάγια όψη, είναι καθοριστικής σημασίας, είναι παράλληλα εμφανές ότι υπάρχει αρκετή αβεβαιότητα σε σχέση με το ποια ήταν ακριβώς η διαστρωμάτωση της κρούστας πριν την κάθε επέμβαση καθαρισμού στη συγκεκριμένη περιοχή όπου αυτή εφαρμόστηκε, αφού ακόμα και σε ίδια δείγματα διάγνωσης παρουσιάζονται διαφορετικά ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα που χαρακτηρίζουν την κρούστα (π.χ. δείγμα kkek). Συνεπώς, για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος βαθμονόμησης των τιμών των δύο παραμέτρων εισόδου, δηλ. του βαθμού διατήρησης της πάτινας και του στρώματος του γύψου, αναφέρονται ενδεικτικά οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Στο δείγμα από την επιφάνεια εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10 λεπτά στην πρόσθια όψη του ανάγλυφου (kke3a1a), η τιμή για

την παράμετρο του βαθμού διατήρησης του στρώματος γύψου ορίζεται στο 90%, επειδή το πάχος του μικρο-κρυσταλλικού γύψου καταγράφεται στα 55μm, όταν για τα αντίστοιχα δείγματα διάγνωσης (kked1a και kkeka) καταγράφεται στα 60μm ή 35 μm. Παράλληλα, το πάχος του στρώματος του βαρύτη πριν την εφαρμογή του εν λόγω καθαρισμού ήταν 10 μm και ο βαρύτης βρισκόταν ανάμεσα στο μακρο- και μικρο-κρυσταλλικό γύψο ή είχε πάχος 5 μm και βρισκόταν στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου. Μετά τον καθαρισμό το πάχος του στρώματος του βαρύτη καταγράφεται στα 5 μm και παρουσιάζεται πάνω από το στρώμα του γύψου ή κάτω από αυτό, οπότε και η τιμή για την παράμετρο του βαθμού διατήρησης της πάτινας ορίζεται στο 90%.

➤ Στην περίπτωση της εφαρμογής της υγρής μικροψηγματοβολής στην πρόσθια όψη του ανάγλυφου (kkeeg51a) το μέσο πάχος του μικρο-κρυσταλλικού γύψου, από 15μm (δείγμα διάγνωσης kkeega), καταγράφεται στα 6μm και συνεπώς η τιμή για την παράμετρο του βαθμού διατήρησης του στρώματος γύψου ορίζεται στο 70%. Παράλληλα, το πάχος του στρώματος του βαρύτη πριν την εφαρμογή του εν λόγω καθαρισμού ήταν 5 μm και ο βαρύτης βρισκόταν στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου ή στο εσωτερικό του. Μετά τον καθαρισμό, το πάχος του στρώματος του βαρύτη καταγράφεται στα 3 μm και παρουσιάζεται κατά περιοχές πάνω στο στρώμα του γύψου και συνεπώς η τιμή για την παράμετρο του βαθμού διατήρησης της πάτινας ορίζεται στα 65%.

➤ Στο δείγμα από την επιφάνεια εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά στην πλάγια όψη του ανάγλυφου (kkee3bk), το πάχος του μικρο-κρυσταλλικού γύψου, από 20μm ή 25 μm (δείγματα διάγνωσης kkeego και kkeegg αντιστοίχως), καταγράφεται στα 55μm (μέτρηση που υποδεικνύει τη μεγάλη ποικιλομορφία και ανομοιογένεια της κρούστας) και συνεπώς η τιμή για την παράμετρο του βαθμού διατήρησης του στρώματος γύψου ορίζεται στο 90%. Παράλληλα, πριν την εφαρμογή του εν λόγω καθαρισμού, είτε δεν υπήρχε βαρύτης ή υπήρχαν κόκκοι βαρύτη στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου ή το πάχος του στρώματος του βαρύτη ήταν 5 μm και βρισκόταν στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου. Μετά τον καθαρισμό, το πάχος του στρώματος του βαρύτη καταγράφεται στα 2 μm και παρουσιάζεται κατά περιοχές στην επιφάνεια του στρώματος του γύψου, οπότε και η τιμή για την παράμετρο του βαθμού διατήρησης της πάτινας ορίζεται στο 65%.

Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου μετά την εφαρμογή των καθαρισμών δε διατηρούνται η πάτινα και ο γύψος, η επί της εκατό έκφραση των αντίστοιχων παραμέτρων εισόδου περιγράφεται με το 1% και όχι με το 0%, έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί ο βαθμός πυροδότησης του ασαφούς κανόνα-κανόνων που περιγράφουν τη συγκεκριμένη ομάδα (σετ) αποτελεσμάτων και να λάβει χώρα η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού, μέσω της εξαγωγής της διακριτής τιμής της παραμέτρου εξόδου ΔΑΕΚ.

Τέλος, στον Πίνακα 9.1.3.2 παρατίθενται οι τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού, καθώς και η διακριτή τιμή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου.

Πίνακας 9.1.3.1: Ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, και επί τοις εκατό βαθμονόμησή τους σε επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών παρουσία πάτινας. Παρουσίαση τιμών των παραμέτρων εισόδου του «Βαθμού Διατήρησης Πάτινας» και του «Βαθμού Διατήρησης Στρώματος Γύψου».

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΑΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ & ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΥΤΗ (μm)	ΘΕΣΗ ΒΑΡΥΤΗ	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)
Kked1a	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	130	70	60	-	10	ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΜΑΚΡΟ- & ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΓΥΨΟ	-
Kkeka	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	35	0	35	-	5	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	-
Kkeeraa	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	15	0	15	-	5	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ Ή ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ	-
Kkeega	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	80	0	80	-	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	-
Kkekk	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	100	80	20	-	3	ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΜΑΚΡΟ- & ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΓΥΨΟ	-
Kked1o	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	30	0	30	-	15	ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ Ή ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ	-
Kkekk	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	50	0	50	-	15	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	-
Kkekk	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	50	0	50	-	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	-
Kkeerak	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	30	0	30	-	20	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ Ή ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ	-
kkeego	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	20	0	20	-	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ Ή ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΟΚΚΩΝ ΒΑΡΥΤΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ	-
kkeegg	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	25	0	25	-	5	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	-

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΑΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ & ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΥΤΗΣ (μm)	ΘΕΣΗ ΒΑΡΥΤΗΣ	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)
Kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	55	0	55	90	5	ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ Ή ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	90
Kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	30	0	30	80	0	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΟΚΚΩΝ ΒΑΡΥΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	25
Kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ</u> , <u>ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ</u>	6	0	6	70	3	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΑΡΥΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	65

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΑΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ & ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ (μm)	ΠΑΧΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΥΤΗ (μm)	ΘΕΣΗ ΒΑΡΥΤΗ	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)
Kke3a1k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	25	0	25	80	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke2bk	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke2ak	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	20	0	20	80	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke3a2k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	30	0	30	80	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kkee3bk	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	55	0	55	90	2	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΑΡΥΤΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ	65
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke1ao	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	40	0	40	90	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kke3b	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min & 15 min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1
Kkeeg51k	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	0	0	0	1	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΒΑΡΥΤΗΣ	1

Πίνακας 9.1.3.2: Διακριτές τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού. Διακριτή τιμή της παραμέτρου εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, σε φαιόμαυρες κρούστες παρουσία πάτινας.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ						ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Kke3a1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	90	90	16.10	1.914	17	7.21	8.14
Kke2ba1	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	27.90	2.345	22	4.91	3.36
Kke2aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	20.30	1.896	15	6.13	3.36
Kke3a2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	25	80	23.10	1.542	11	9.56	6.62
Kkee3ba	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	36.50	1.549	10	8.74	3.36

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ						ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	11.30	1.562	9	4.75	3.36
Kke1aa	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	26.40	1.581	11	6.57	3.36
Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	11.20	1.740	10	15.30	3.36
Kkeeg51a	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	65	70	36.60	2.593	30	6.48	6.65
Kke3a1k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	80	17.30	1.914	17	7.21	6.51
Kke2bk	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	15.20	2.345	22	4.91	3.36
Kke2ak	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ	1	80	38.30	1.800	10	6.13	6.51

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ						ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Kke3a2k	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	80	53.20	1.586	10	9.56	6.51
Kkee3bk	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	65	90	40.00	1.549	10	8.74	7.08
Kke1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	11.30	1.562	9	4.75	3.36
Kke1ao	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 60min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	90	37.30	1.296	6	6.57	6.51
Kke3b	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	11.20	1.740	10	15.30	3.36
Kkeeg51k	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ, ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ	1	1	31.70	2.593	30	6.48	3.36

Οι τιμές της παραμέτρου εξόδου δηλ. του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ), μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία και σύγκλιση με τις εκτιμήσεις για την καταλληλότητα των εφαρμοσθέντων επεμβάσεων καθαρισμού που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 6.5.6. Πιο συγκεκριμένα:

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών kke2ba1, kke2aa, kkee3ba, kke1b, kke1aa, kke3b, kke2bk, kke1bk, kke3bk, kkeeg51k, καταγράφεται στα 3.36 δηλ. είναι μικρότερος από 4.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μη αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μη αποδεκτές επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτοί και αποτελούν τυπικές περιπτώσεις υπέρ-καθαρισμών (over-cleaning), αφού εξαιτίας των επεμβάσεων έλαβε χώρα ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού (πλήρης απομάκρυνση του στρώματος του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και της πάτινας), παρότι η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων. Παράλληλα, οι τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, είτε παρουσιάζουν μείωση (σε σχέση με τις τιμές των αντίστοιχων δειγμάτων πριν την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού), ή παρόμοιες τιμές, οι οποίες όμως πλέον αφορούν επιφάνειες αποκλειστικά ασβεστιτικές.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών kke3a2a, kkeeg51a, kke3a1k, kke2ak, kke3a2k, kke1ao, καταγράφεται γύρω στα 6.5 δηλ. είναι μικρότερος από 7.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μέτριου ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μέτριες επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες (εκτός της kkeeg51a) χαρακτηρίζονται ως μέτριοι επειδή, παρότι διατηρούν το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και οι παράμετροι της μικροδομής, καθώς και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνονται γενικά σε αποδεκτά επίπεδα, απομακρύνουν την πάτινα του βαρύτη. Χαρακτηρίζονται δε, ως μέτριοι και όχι ως μη αποδεκτοί παρόλο που απομακρύνουν την πάτινα, επειδή (όπως αναλύθηκε παραπάνω) το συγκεκριμένο στρώμα του βαρύτη παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία όσον αφορά στην παρουσία του ή μη, στην ανομοιογένεια του πάχους του, καθώς και στη θέση του στο συνολικό στρώμα της κρούστας. Όσον αφορά την επιφάνεια εφαρμογής της υγρής μικροψηγατοβολής (kkeeg51a), αυτή χαρακτηρίζεται ως μέτρια επέμβαση καθαρισμού, επειδή αφενός διατηρεί το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων, αφετέρου όμως η διατήρηση της πάτινας καταγράφεται σε μέτρια επίπεδα και κυρίως οι παράμετροι της τραχύτητας και του λόγου πραγματικής προς την προβαλλόμενη επιφάνεια παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές σε σχέση με όλες τις άλλες πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού της επιφάνειας kkee3bk, καταγράφεται στα 7.08 δηλ. είναι μικρότερος από 8, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμάται ως μία αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού. Η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά, είναι αποδεκτή επέμβαση καθαρισμού και όχι καλή-προτεινόμενη, εφόσον ναι

μεν διατηρεί το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου και η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται εντός αποδεκτών ορίων, όμως η διατήρηση της πάτινας καταγράφεται σε μέτρια επίπεδα και κυρίως η παράμετρος της πυκνότητας ρηγματώσεων παρουσιάζει μεγάλη αύξηση της τιμής της συγκρινόμενη με αυτές των δειγμάτων πριν την επέμβαση καθαρισμού.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού της επιφάνειας kke3a1a, καταγράφεται στα 8.14 δηλ. είναι μεγαλύτερη από 8, που είναι το κάτω όριο του ασαφούς συνόλου του καλού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμάται ως μία προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού. Η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με 10% κ.ο. δ/μα $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ για 10 λεπτά, είναι μια καλή επέμβαση καθαρισμού, αφού διατηρεί την πάτινα και το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου με χαρακτηριστικά επιφανειακής μικροδομής παρόμοια με αυτά που προϋπήρχαν του καθαρισμού, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα.

(α2) Αποτελέσματα δοκιμών του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε φαιόμαυρες κρουστές χωρίς πάτινα

Ακολουθεί η εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, καθώς και των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, που συνίσταται σε 15 διαφορετικές περιπτώσεις, όπου δεν υπάρχει πάτινα και συνεπώς οι παράμετροι εισόδου μειώνονται σε 5.

Στον Πίνακα 9.1.3.3 παρατίθενται τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού και για τις δύο εξεταζόμενες επιφάνειες, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η επί τοις εκατό βαθμονόμησή των αποτελεσμάτων που αποτελούν και τις διακριτές τιμές της παραμέτρου εισόδου του «Βαθμού Διατήρησης Στρώματος Γύψου».

Στις πρώτες γραμμές του Πίνακα 9.1.3.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν στα δείγματα που ελήφθησαν πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού, κατά τη διάγνωση της φθοράς. Εν αντιθέσει με την προηγούμενα παρουσιαζόμενη ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ, εδώ οι δύο εξεταζόμενες αρχιτεκτονικές επιφάνειες παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια όσον αφορά στο μέσο συνολικό πάχος των κρουστών, στο μέσο πάχος των τμημάτων του γύψου που περιέχουν τις μαύρες επικαθήσεις, καθώς και στο μέσο πάχος του καθαρού μικρό-κρυσταλλικού γύψου. Παράλληλα, η πλήρης αντιστοιχία των θέσεων λήψης των δειγμάτων πριν και μετά τον καθαρισμό, καθώς και μεταξύ των εξεταζόμενων επιφανειών μετά τον καθαρισμό, μας επιτρέπουν την άμεση σύγκριση των ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ και συνεπώς την ορθή επί τοις εκατό βαθμονόμηση των

αποτελεσμάτων της για τον ορισμό των διακριτών τιμών της παραμέτρου εισόδου του «Βαθμού Διατήρησης Στρώματος Γύψου».

Έτσι, στην περίπτωση των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου, ως κατάσταση αναφοράς, προς σύγκριση για κάθε εξεταζόμενο δείγμα μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, λαμβάνονται τα αποτελέσματα του δείγματος Ke6 που προέρχεται από την πρόσθια όψη της ακμής του κίονα.

Στη δε περίπτωση των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τύποι φαιόμαυρης κρούστας. Η πρώτη αναφέρεται στην εύθρυπτη φαιόμαυρη κρούστα (δείγμα Pm1), η οποία αποτελεί κατάσταση αναφοράς για τις επιφάνειες όπου έλαβαν χώρα επεμβάσεις καθαρισμού με κωδικούς Pat2, Pm22c, Pab22, Pnc22, Ps32, Pab12, Pnc12 και Ped12. Η δεύτερη αφορά στη συνεκτική φαιόμαυρη κρούστα (δείγμα Pm2), η οποία αποτελεί κατάσταση αναφοράς για τις επιφάνειες όπου έλαβαν χώρα επεμβάσεις καθαρισμού με κωδικούς Pnc33 και Ps33.

Κατά την επί τοις εκατό βαθμονόμηση της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός διατήρησης στρώματος γύψου», οι επιφάνειες που μετά τον καθαρισμό διατηρούν το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου, καθώς και τμήμα του γύψου που περιέχει τις μαύρες επικαθήσεις δηλ. οι επιφάνειες με κωδικό Pat2, Ps32, Ped12, Ps33, λαμβάνουν τη διακριτή τιμή 95%. Οι δε επιφάνειες Pab12 και Ke3b, όπου μετά τον καθαρισμό διατηρούν μόνο το στρώμα του μικροκρυσταλλικού γύψου (το οποίο είναι και το ζητούμενο), βαθμονομούνται για τη διακριτή τιμή της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός διατήρησης στρώματος γύψου» με 90%.

Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου μετά την εφαρμογή των καθαρισμών δε διατηρείται ο γύψος, (κωδικοί επιφανειών Ke2a, Ke1c, KeG3, Ke4, Pm22c, Pab22, Pnc22, Pnc12, Pnc23) η επί της εκατό έκφραση της αντίστοιχης παραμέτρου εισόδου περιγράφεται με το 1% και όχι με το 0%, έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί ο βαθμός πυροδότησης του ασαφούς κανόνα-κανόνων που περιγράφουν τη συγκεκριμένη ομάδα (σετ) αποτελεσμάτων και να λάβει χώρα η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού, μέσω της εξαγωγής της διακριτής τιμής της παραμέτρου εξόδου ΔΑΕΚ.

Τέλος, στον Πίνακα 9.1.3.4 παρατίθενται οι τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού, καθώς και η διακριτή τιμή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου.

Πίνακας 9.1.3.3: Ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, και επί τοις εκατό βαθμονόμησή τους σε επιφάνειες φαιόμαυρων κρουστών απουσία πάτινας. Παρουσίαση τιμών της παραμέτρου εισόδου του «Βαθμού Διατήρησης Στρώματος Γύψου»

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΜΕΣΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ (μm)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΓΥΨΟΥ & ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ (μm)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)
Ke6	ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	35	15	20	-
Pm1	ΕΥΘΡΥΠΤΗ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, <u>ΕΒΕ</u>	50	30	20	-
Pm2	ΣΥΝΕΚΤΙΚΗ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ, <u>ΕΒΕ</u>	80	50	30	-
Ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	0	0	0	1
Ke1c	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	0	0	0	1
keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	0	0	0	1
Ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	20	0	20	90
Ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	0	0	0	1
Pat2	ΑΤΟΜΙΚΟ ΝΕΡΟ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	30	10	20	95
Pm22c	ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	0	0	0	1
Pab22	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	0	0	0	1
Pnc22	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	0	0	0	1
Ps32	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3,5 h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	50	30	20	95
Pab12	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	20	0	20	90
Pnc12	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	0	0	0	1

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΜΕΣΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ (μm)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΓΥΨΟΥ & ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ (μm)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)
Ped12	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 3%κ.β. ΔΙΝΑΤΡΙΟΥΧΟΥ ΕDΤΑ, 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	55	35	20	95
Pnc23	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	0	0	0	1
Ps33	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3,5 h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, <u>ΕΒΕ</u>	32	12	20	95

Πίνακας 9.1.3.4: Διακριτές τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού. Διακριτή τιμή της παραμέτρου εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, σε φαιόμαυρες κρούστες απουσία πλάτας.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Ke2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 40min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	1	11.40	3.427	39	13.18	3.35
Ke1c	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	1	3.20	2.011	14	16.41	3.35
keG3	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	1	18.10	1.808	15	6.4	3.35
Ke3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	90	13.20	1.422	7	10.21	8.57
Ke4	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ, 18 ΗΜΕΡΩΝ, <u>ΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΑΚΜΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	1	4.30	1.376	7	17.47	3.35

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Pat2	ΑΤΟΜΙΚΟ ΝΕΡΟ, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	95	17.4	2.138	19	3.33	6.37
Pm22c	ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	1	11.4	1.385	7	31.44	3.35
Pab22	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	1	13.8	1.625	13	31.20	3.35
Pnc22	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 2h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	1	16.3	1.427	6	38.40	3.35
Ps32	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3,5 h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	95	10.0	1.350	6	4.52	6.30
Pab12	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	90	10.4	1.428	6	14.70	8.05
Pnc12	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ, ΕΒΕ	1	10.5	1.351	5	37.70	3.35

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Ped12	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 3%κ.β. ΔΙΝΑΤΡΙΟΥΧΟΥ ΕΔΤΑ, 1h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΥΘΡΥΠΤΗΣ</u> <u>ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ,</u> <u>ΕΒΕ</u>	95	12.1	1.324	5	4.89	5.75
Pnc23	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 2h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ</u> <u>ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ</u> <u>ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ,</u> <u>ΕΒΕ</u>	1	13.7	1.891	16	36.80	3.35
Ps33	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3,5 h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ</u> <u>ΦΑΙΟΜΑΥΡΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ,</u> <u>ΕΒΕ</u>	95	11.2	1.380	6	4.21	6.37

Οι τιμές της παραμέτρου εξόδου δηλ. του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ), μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία και σύγκλιση με τις εκτιμήσεις για την καταλληλότητα των εφαρμοσθέντων επεμβάσεων καθαρισμού που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 5.4.6 για τις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, καθώς και στο κεφάλαιο 6.4.6 για τις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Πιο συγκεκριμένα:

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών ke2a, ke1c, keG3, Ke4, Pm22c, Pab22, Pnc22, Pnc12, Pnc23, καταγράφεται στα 3.35 δηλ. είναι μικρότερος από 4.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μη αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μη αποδεκτές επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτοί και αποτελούν τυπικές περιπτώσεις υπέρ-καθαρισμών (over-cleaning), αφού εξαιτίας των επεμβάσεων έλαβε χώρα ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού δηλ. πλήρης απομάκρυνση του στρώματος του μικρό-κρυσταλλικού γύψου. Παράλληλα, από τις τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, αυτή της πυκνότητας ρηγματώσεων παρουσιάζει μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού μειωμένες τιμές σε σχέση με αυτές πριν από τον καθαρισμό σε όλες τις περιπτώσεις των επιφανειών οι οποίες όμως αναφέρονται σε αποκλειστικά ασβεστιπικές επιφάνειες, εκτός από αυτή με κωδικό KeG3 όπου καταγράφεται υψηλότερη τιμή. Στην περίπτωση των παραμέτρων της τραχύτητας Rq και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, διαπιστώνεται ότι οι καταγραφόμενες τιμές είτε παρουσιάζουν μείωση σε σχέση με τις τιμές των αντίστοιχων δειγμάτων πριν την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού (Pm22c, Pnc22, Pnc12), ή αύξηση (Pab22, Pnc23, ke2a, ke1c, ke4, keG3). Σε σχέση δε, με τη συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ, παρατηρείται ότι στη συντριπτική τους πλειοψηφία οι επιφάνειες που δε διατήρησαν το μικρό-κρυσταλλικό γύψο μετά τον καθαρισμό παρουσιάζουν τιμές υψηλότερες από αυτές που ορίζονται από το αποδεκτό ασαφές σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», δηλ. οι τιμές ΔΕ είναι μεγαλύτερες από 15 (επιφάνειες με κωδικό ke1c, Ke4, Pm22c, Pab22, Pnc22, Pnc12, Pnc23). Μόνο οι επιφάνειες με κωδικό ke2a και keG3 στο ΕΑΜ, παρουσιάζουν τιμές ΔΕ που ανήκουν στο ασαφές σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», που έχει οριστεί ως αποδεκτό.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών Pat2, Ps32, Ped12 και Ps33, καταγράφεται γύρω στα 6.3 δηλ. είναι μικρότερος από 7.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μέτρου ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μέτριες επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως μέτριοι διότι διατηρούν τμήμα του γύψου που περιέχει τις μαύρες επικαθήσεις, εκτός από το επιθυμητό στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου. Κατ' ουσία πρόκειται για περιπτώσεις ατελών καθαρισμών (under-cleaning), όπως διαπιστώνεται αφενός από τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις και αφετέρου από τις χαμηλές τιμές της

συνολικής μεταβολής χρώματος ΔΕ, που σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερες του 5. Οι δε παράμετροι της μικροδομής κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών σε σχέση με αυτά που καταγράφονται πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού, (γεγονός λογικό αφού μέρος του εξωτερικού τμήματος της κρούστας έχει απομακρυνθεί), εκτός από την επιφάνεια Pat2 η οποία στις παραμέτρους της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας παρουσιάζει υψηλότερες τιμές από αυτές πριν τον καθαρισμό. Αυτή η 'απόκλιση' της επιφάνειας Pat2, ουσιαστικά καταδεικνύει σε ποια επίπεδα θα κυμαίνονταν οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας αν η τεχνική της laser προφίλομετρίας είχε εφαρμοστεί πριν τον καθαρισμό σε δείγματα όπου το πιο εύθρυπτο τμήμα των μαύρων επικαθίσεων είχε απομακρυνθεί με βούρτσα και νερό (βλ. κεφ. 8), εφόσον, όπως αναλύθηκε στο κεφ. 6.4.7, πρόκειται για μια επέμβαση η οποία απομάκρυνε μόνο τα εύθρυπτα επιφανειακά τμήματα της φαιόμαυρης κρούστας.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών ke3b και Pab12, καταγράφεται στα 8.56 και 8.05 αντιστοίχως δηλ. είναι μεγαλύτερος από 8, που είναι το κάτω όριο του ασαφούς συνόλου του καλού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμούνται ως προτεινόμενες επεμβάσεις καθαρισμού. Η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 30 λεπτά στις ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ΕΑΜ, καθώς και η επέμβαση με πάστα AB57 για 1 ώρα, στις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ, είναι δύο καλές επεμβάσεις καθαρισμού, αφού διατηρούν το στρώμα του μικρό-κρυσταλλικού γύψου με χαρακτηριστικά επιφανειακής μικροδομής σε παρόμοια ή ελαφρώς μειωμένα επίπεδα με αυτά που προϋπήρχαν του καθαρισμού, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται και στις δύο περιπτώσεις στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα.

(β) Αποτελέσματα δοκιμών του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε αποπλυμένες επιφάνειες

Ακολουθεί η εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των αποπλυμένων επιφανειών των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου που συνίσταται σε 9 διαφορετικές περιπτώσεις.

Στον Πίνακα 9.1.3.5 παρατίθενται η ταξινόμηση της δραστηριότητας των 9 επεμβάσεων καθαρισμού βάσει του τύπου δράσης τους (χημικός, μηχανικός) και του χρόνου εφαρμογής τους, καθώς και η ποιοτική εκτίμηση του βαθμού απώλειας αυθεντικού υλικού. Παρουσιάζονται δε, οι διακριτές τιμές της παραμέτρου εισόδου του «Εκτιμώμενου Βαθμού Απώλειας Αυθεντικού Υλικού».

Όπως ήδη αναλύθηκε στο Κεφ. 8, αν δε λάβουμε υπόψη τη δραστηριότητα της επέμβασης καθαρισμού, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου δράσης (φυσικός, χημικός, βιολογικός ή θερμικός) και του χρόνου εφαρμογής, δε μπορούμε να εκτιμήσουμε το βαθμό της απώλειας του αυθεντικού υλικού. Αφού λοιπόν στην συγκεκριμένη επιφάνεια έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές πάστες και η υγρή ψηγματοβολή, οι εξεταζόμενοι τύποι δράσης περιορίζονται στο χημικό και το

μηχανικό (υποκατηγορία του φυσικού τύπου δράσης). Επιπλέον, στις περιπτώσεις εφαρμογής των παστών η συνιστώσα του χρόνου εφαρμογής είναι προφανής, ενώ στην περίπτωση της τεχνικής της υγρής μικροψηγηματοβολής ο παράγοντας του χρόνου εφαρμογής αναφέρεται στα «περάσματα»-επαναλήψεις που πραγματοποιούνται ανά μερικά cm^2 (5-10 cm^2). Η ποιοτική ταξινόμηση των παραπάνω παραγόντων πραγματοποιείται στις τρεις κατηγορίες της υψηλής, μέτριας και χαμηλής δράσης και χρόνου εφαρμογής, από όπου προκύπτουν οι αντίστοιχες κατηγοριοποιήσεις της δραστηριότητας των μεθόδων καθαρισμού, καθώς και ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού, ο οποίος στην τελευταία στήλη αποδίδεται και ποσοτικά. Από τα παραπάνω, αναδεικνύεται για ακόμα μία φορά, η αναγκαιότητα της χρήσης του ασαφούς μοντέλου για την ταξινόμηση και ποσοτική απόδοση καθαρά ποιοτικών πληροφοριών, που η ενσωμάτωσή τους σε ένα κλασσικό παραμετρικό μοντέλο θα ήταν δύσκολη αν όχι αδύνατη.

Υψηλότερη χημική δράση παρουσιάζει η πάστα AB57 (κωδικός επιφάνειας kn3ca), εξαιτίας της εκλεκτικής δράσης του δινατριούχου EDTA κατά την πρόσληψη κατιόντων ασβεστίου που οδηγεί στη δημιουργία σταθερής χηλικής ένωσης. Παρόλο που ο χρόνος εφαρμογής είναι μικρός (5 min), η δραστηριότητα της πάστας χαρακτηρίζεται υψηλή και αντίστοιχα η παράμετρος εισόδου «Εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού» λαμβάνει την διακριτή τιμή 90%. Άλλωστε, συγκρίνοντας τις τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής με τις αντίστοιχες τιμές του δείγματος αναφοράς της διάγνωσης (kn3cd) παρατηρούνται κάποιες από τις μεγαλύτερες αυξήσεις τους.

Η χημική δράση της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό χαρακτηρίζεται ως μέτρια προς χαμηλή, αφού ουσιαστικά αποτελεί μια πιο δραστική μορφή της απλής εφαρμογής νερού με σηπιόλιθο. Με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής όμως, αυξάνεται η δραστηριότητά της και συνεπώς ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού, αφού προσλαμβάνοντας τα ανθρακικά και τα όξινα ανθρακικά ανιόντα που προκύπτουν από τη διάλυση του ασβεστίτη (κυρίως του ανακρυσταλλωμένου που βρίσκεται στην εξώτατη στοιβάδα των αρχιτεκτονικών επιφανειών) παράγονται κατά τόπους βασικά διαλύματα υδροξειδίου του ασβεστίου με υψηλό pH. Συνεπώς, ενώ για την εφαρμογή των 10min η παράμετρος εισόδου «Εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού» ορίζεται ως 30%, στην εικοσάλεπτη εφαρμογή παίρνει την διακριτή τιμή 60%, στη σαραντάλεπτη 80% και στη διπλή εφαρμογή των 20 min 90%.

Η χημική δράση της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με διάλυμα 10% κ.ο. ανθρακικού αμμωνίου χαρακτηρίζεται ως μέτρια προς υψηλή, και αποτελεί μια πιο δραστική επέμβαση καθαρισμού από αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό. Πιο συγκεκριμένα, το δ/μα του ανθρακικού αμμωνίου παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή pH (οι μετρήσεις με πεχάμετρο των παρασκευασμένων δ/μάτων επί τόπου, πριν την προσθήκη της ρητίνης, έδειξαν την τιμή 9), αφού ουσιαστικά συνίσταται από κατιόντα αμμωνίας και ανιόντα όξινων ανθρακικών, τα οποία και προσλαμβάνονται από την ανιονική ρητίνη. Παράλληλα, με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής, αυξάνεται η δραστηριότητά της και συνεπώς η παράμετρος εισόδου «Εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού». Συνεπώς, ενώ για την εφαρμογή των 10min ο

εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού ορίζεται ως 40%, στην εικοσάλεπτη εφαρμογή παίρνει την διακριτή τιμή 75%, και στη διπλή εφαρμογή των 10 λεπτών 80%.

Τέλος, η μέθοδος της υγρής μικροψηγματοβολής παρουσιάζει την ήπια διαλυτική δράση του νερού και μέτρια προς υψηλή μηχανική δράση που προκύπτει από τη βολή του αιωρήματος νερού – σφαιρικών σωματιδίων ανθρακικού ασβεστίου (αναλογία 1:3), παρόλο που κατά την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν χαμηλές πιέσεις της τάξης του 0.5bar. Ο δε χρόνος εφαρμογής χαρακτηρίζεται ως μέτριος αφού έλαβαν χώρα 2 με 3 περάσματα της τεχνικής στην προς καθαρισμό επιφάνεια. Έτσι, η παράμετρος της εισόδου του «Εκτιμώμενου Βαθμού Απώλειας Αυθεντικού Υλικού» βαθμονομήθηκε ως 70%.

Τέλος, στον Πίνακα 9.1.3.6 παρατίθενται οι τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού, καθώς και η διακριτή τιμή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου για τις αποπλυμένες επιφάνειες του ανάγλυφου του κίονα του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου.

Πίνακας 9.1.3.5: Ταξινόμηση της δραστηριότητας των εφαρμοσθέντων μεθόδων καθαρισμού στις αποπλυμένες επιφάνειες των ανάγλυφων κίονα του ΕΑΜ, βάσει της δράσης και του χρόνου εφαρμογής τους, καθώς και ποιοτική εκτίμηση του βαθμού απώλειας του αυθεντικού υλικού σε αποπλυμένες επιφάνειες. Παρουσίαση των διακριτών τιμών της παραμέτρου εισόδου του «Εκτιμώμενου Βαθμού Απώλειας Αυθεντικού Υλικού».

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ			ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ			ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ			ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ			ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ			
		↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	%
Kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	↑	~							↓		~			~	↓	40
Kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	↑	~					↑	~		↑	~		↑	~		75
Kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	↑	~					↑	~		↑			↑			80
Kn3ca	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	↑								↓	↑			↑			90
Kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>			↓	↑	~			~		↑	~		↑	~		70
Kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>		~	↓						↓			↓		~	↓	30
Kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>		~	↓				↑	~		↑	~		↑	~		60

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ			ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ			ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ			ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ			ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ			
		↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	↑	~	↓	%
Kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ</u> <u>ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>		~	↓				↑			↑	~		↑	~		80
Kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ</u> <u>ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>		~	↓				↑			↑			↑			90

ΣΥΜΒΟΛΑ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ
↑	ΥΨΗΛΗ
~	ΜΕΤΡΙΑ
↓	ΧΑΜΗΛΗ

Πίνακας 9.1.3.6: Διακριτές τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού. Διακριτή τιμή της παραμέτρου εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, σε αποπλυμένες επιφάνειες

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Kn1b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	40	16.6	1.360	8	6.48	7.01
Kn1a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	75	19.0	1.606	10	7.93	4.72
Kn1c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	80	22.7	2.280	18	9.90	3.20
Kn3ca	ΠΑΣΤΑ AB57, 5min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	90	24.8	2.220	18	6.33	3.17
Kn2d	ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	70	18.0	1.984	15	4.66	5.41

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Kn3b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ</u> <u>ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	30	16.4	1.288	10	4.82	7.31
Kn2b	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ</u> <u>ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	60	23.3	2.002	20	5.50	4.77
Kn2a	ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40min, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ</u> <u>ΡΑΒΔΩΣΗΣ ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	80	20.6	1.960	15	6.70	3.13
Kn2c	ΔΙΠΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ, <u>ΚΟΙΛΟ ΤΜΗΜΑ ΡΑΒΔΩΣΗΣ</u> <u>ΚΙΟΝΑ, ΕΑΜ</u>	90	19.7	1.927	18	9.17	3.17

Οι τιμές της παραμέτρου εξόδου δηλ. του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ), μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία και σύγκλιση με τις εκτιμήσεις για την καταλληλότητα των εφαρμοσθέντων επεμβάσεων καθαρισμού που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 6.6.6 για τις αποπλυμένες ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ιστορικό κτίριο του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Πιο συγκεκριμένα:

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών kn1a, kn1c, kn3ca, kn2a, kn2b, kn2c, είναι μικρότερος ή στο όριο του 4.5, που είναι το άνω κατώφλι τιμών του ασαφούς συνόλου του μη αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μη αποδεκτές επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτοί και αποτελούν τυπικές περιπτώσεις υπέρ-καθαρισμών (over-cleaning), αφού εξαιτίας των επεμβάσεων έλαβε χώρα ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού δηλ. ασβεστίτη. Πρόκειται για τους καθαρισμούς των οποίων η δραστηριότητα είναι υψηλή (πάστα AB57, και ιοντοανταλλακτική ρητίνη με νερό ή ανθρακικό αμμώνιο με μεγάλους χρόνους εφαρμογής) και συνεπώς ο εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού είναι υψηλός (λαμβάνει τιμές πάνω από 60%). Παράλληλα, από τις τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, αυτή της πυκνότητας ρηγματώσεων παρουσιάζει μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού αυξημένες τιμές (kn1c, kn2b, kn3ca) ή ελαφρά μικρότερες (kn1a, kn2a, kn2c) σε σχέση με αυτές πριν από τον καθαρισμό. Στην περίπτωση των αυξημένων τιμών η υψηλή δραστηριότητα των παστών οδήγησε σε επιφάνειες με μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη φθορά, ενώ στην περίπτωση των ελαφρά μειωμένων τιμών η υψηλή δραστηριότητα των παστών οδήγησε σε μεγαλύτερη από την επιθυμητή απώλεια ασβεστίτη. Στην περίπτωση των παραμέτρων της τραχύτητας Rq και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, διαπιστώνεται ότι οι καταγραφόμενες τιμές παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τις τιμές του αντίστοιχου δείγματος πριν την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού (kn3cd), εκτός από την επιφάνεια kn1a, όπου οι τιμές της επιφανειακής μικροδομής κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα. Σε σχέση όμως με τη συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ, παρατηρείται ότι όλες οι επιφάνειες παρουσιάζουν τιμές ΔΕ που ανήκουν στο ασαφές σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», που έχει οριστεί ως αποδεκτό.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού της επιφάνειας kn2d καταγράφεται στα 5.41 δηλ. είναι μικρότερος από 7.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μέτρου ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμάται ως μέτριας απόδοσης τεχνική. Ο συγκεκριμένος καθαρισμός χαρακτηρίζεται ως μέτριος διότι αφενός πρόκειται για τεχνική σχετικά υψηλής δραστηριότητας (παρόλο που για το είδος της στη συγκεκριμένη υγρή ψηγματοβολή έχουν ελεγχθεί όλες οι σχετικές τεχνικές παράμετροι που διασφαλίζουν την πιο συμβατή εφαρμογή της μεθόδου στο συγκεκριμένο υλικό και τύπο φθοράς) και αφετέρου προκαλεί αύξηση των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας, ενώ η πυκνότητα ρηγματώσεων μετρείται με χαμηλότερη τιμή

από αυτή του δείγματος της διάγνωσης της φθοράς. Επιπλέον, η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε χαμηλά επίπεδα υποδεικνύοντας κατά τόπους υπόλοιπα μαύρων επικαθήσεων.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών kn1b και kn3b, καταγράφεται στα 7.01 και 7.31 αντιστοίχως δηλ. είναι λίγο μεγαλύτερος από 7, που είναι το κάτω όριο του ασαφούς συνόλου του αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμούνται ως επεμβάσεις καθαρισμού που παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τους επιδιωκόμενους στόχους του κάθε κριτηρίου αποτίμησης για το συγκεκριμένο τύπο φθοράς. Πιο συγκεκριμένα, η επέμβαση καθαρισμού της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 λεπτά (kn3b), παρόλο που παρουσιάζει μέτρια προς μικρή δραστηριότητα και συνεπώς η όποια απώλεια του ασβεστίτη φαίνεται να είναι ελεγχόμενη, προκαλεί μείωση (μετρίου επιπέδου) και των τριών παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται σε χαμηλά επίπεδα και συνεπώς δε μπορεί να χαρακτηριστεί ως προτεινόμενη. Παρόμοια με τα παραπάνω ισχύουν και για την επιφάνεια της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού ασβεστίου για 10 λεπτά (kn1b), με μόνες διαφοροποιήσεις τις καταγραφές μεγαλύτερης μείωσης της παραμέτρου της τραχύτητας, ενώ η συνολική μεταβολή χρώματος κυμαίνεται στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα.

(γ) Αποτελέσματα δοκιμών του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου

Ακολουθεί η εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, που συνίσταται σε 7 διαφορετικές περιπτώσεις, όπου δεν υπάρχει πάτινα και συνεπώς οι παράμετροι εισόδου μειώνονται σε 5.

Στον Πίνακα 9.1.3.7 παρατίθενται τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η επί τοις εκατό βαθμονόμησή των αποτελεσμάτων που αποτελούν και τις διακριτές τιμές της παραμέτρου εισόδου του «Βαθμού Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο».

Στην περίπτωση των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί τύποι περικρυσταλλικά ρηγματωμένων επιφανειών. Ο πρώτος αναφέρεται στις περικρυσταλλικά ρηγματωμένες επιφάνειες με έντονες μαύρες επικαθήσεις (δείγμα Pma), ο δεύτερος αφορά στις περικρυσταλλικά ρηγματωμένες επιφάνειες με λιγότερες μαύρες επικαθήσεις (Padf) και ο τρίτος περιλαμβάνει περιοχή με πολύ μικρό ποσοστό επικαθήσεων (σχεδόν αποπλυμένη περιοχή – κωδ. Pa2). Οι θέσεις λήψης των δειγμάτων μετά τον καθαρισμό ανήκουν στην περιοχή μεσαίου ποσοστού μαύρων επικαθήσεων, για τις επιφάνειες Pm24, Pab24, Pnc24. Όμως λόγω

καταστροφής του δείγματος διάγνωσης Padf κατά την κατεργασία εγκιβωτισμού του σε ρητίνη πριν τη μέτρησή του με την τεχνική της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης, σαν κατάσταση αναφοράς των δειγμάτων αποτίμησης αυτών των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού, μπορούν να ληφθούν μόνο οι άλλοι δύο τύποι περικρυσταλλικών ρηγματώσεων. Έτσι, αφού στην περιοχή με τις έντονες μαύρες επικαθήσεις, οι ρηγματώσεις είναι πληρωμένες με μικροκρυσταλλικό γύψο και κατά τόπους εμφανίζεται μικρού πάχους κρούστα γύψου, ενώ στην σχεδόν αποπλυμένη περιοχή η επιφανειακή κρούστα δεν υπάρχει και οι ρηγματώσεις είναι πληρωμένες με γύψο κατά το ήμισυ με ένα τρίτο περίπου, είναι βάσιμη η υπόθεση ότι η επιφάνεια με μέτρια παρουσία επικαθήσεων αποτελεί την ενδιάμεση κατάσταση, όπου οι ρηγματώσεις είναι σχεδόν πληρωμένες με γύψο και η επιφανειακή κρούστα παρουσιάζεται με μικρή συχνότητα.

Όσον αφορά στις υπόλοιπες επιφάνειες (Pab14, Ped14, Pnc14 και Ps34) ως κατάσταση αναφοράς, προς σύγκριση για κάθε εξεταζόμενο δείγμα μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού, λαμβάνονται τα αποτελέσματα του δείγματος Pma που προέρχεται από την αντίστοιχη περιοχή των έντονων μαύρων επικαθήσεων. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ο περιορισμός στην εφαρμογή της τεχνικής της laser προφίλομετρίας που αναλύθηκε στο κεφ. 8. Πιο συγκεκριμένα, στα δείγματα των επιφανειών που παρουσιάζουν μικρές ποσότητες μαύρων επικαθήσεων (Padf και Pa2), καταγράφονται τιμές Rq 26μm και 29μm, ενώ στο δείγμα που προέρχεται από την περιοχή του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου με μεγάλες ποσότητες μαύρων επικαθήσεων (Pma), η τιμή της Rq πέφτει στα 7μm, παρόλο που τα ποιοτικής υφής αποτελέσματα των FOM και SEM δείχνουν ότι η κατάσταση της επιφανειακής μικροδομής είναι αντίστοιχη και στα τρία εξεταζόμενα δείγματα. Συνεπώς, σε σχέση με τις τιμές της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας συνεκτιμώνται τα αποτελέσματα Padf και Pa2 για την αποτίμηση των καθαρισμών των περιοχών Pab14, Ped14, Pnc14 και Ps34.

Κατά την επί τοις εκατό βαθμονόμηση της παραμέτρου εισόδου «Βαθμού Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο», οι επιφάνειες που μετά τον καθαρισμό διατηρούν το μικροκρυσταλλικό γύψο στις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις είναι οι επιφάνειες με κωδικό Pab14, Ped14, και Ps34. Η επιφάνεια Pab14 διατηρεί μεγάλο τμήμα των ρηγματώσεων πληρωμένων με μικρό-κρυσταλλικό γύψο, ενώ εντοπίζεται περιοχή που συγκρατεί την επιφανειακή κρούστα γύψου και συνεπώς λαμβάνει τη διακριτή τιμή 90%. Η επιφάνεια Ped14 που συγκρατεί μικρό-κρυσταλλικό γύψο σε λίγο παραπάνω από το μισό τμήμα των ρηγματώσεων αλλά δεν διατηρεί περιοχή επιφανειακής κρούστας γύψου, λαμβάνει τη διακριτή τιμή 55%. Παράλληλα, η επιφάνεια Ps34 εμφανίζει το σύνολο των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων πληρωμένων με γύψο, ενώ εντοπίζεται περιοχή που συγκρατεί την επιφανειακή κρούστα γύψου με μεγάλο πάχος (40μm), γι' αυτό και η διακριτή τιμή της παραμέτρου εισόδου «Βαθμός Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο» καταγράφεται στα 95%.

Επιπλέον, στις περιπτώσεις όπου μετά την εφαρμογή των καθαρισμών δε διατηρείται γύψος στις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις (κωδικοί επιφανειών Pm24, Pab24, Pnc24, Pnc14), η επί της εκατό έκφραση της αντίστοιχης παραμέτρου εισόδου περιγράφεται με το 1% και όχι με το

0%, έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί ο βαθμός πυροδότησης του ασαφούς κανόνα-κανόνων που περιγράφουν τη συγκεκριμένη ομάδα (σετ) αποτελεσμάτων και να λάβει χώρα η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού, μέσω της εξαγωγής της διακριτής τιμής της παραμέτρου εξόδου ΔΑΕΚ. Τέλος, στον Πίνακα 9.1.3.8 παρατίθενται οι τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού, καθώς και η διακριτή τιμή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου.

Πίνακας 9.1.3.7: Ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροανάλυση Ακτίνων Χ, πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού, και επί τοις εκατό βαθμονόμησή τους σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, απουσία πάτινας. Παρουσίαση τιμών της παραμέτρου εισόδου του «Βαθμού Πλήρωσης Ρηγματώσεων με Γύψο»

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΜΕΣΟ ΜΗΚΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (μm)	ΜΕΣΟ ΜΗΚΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΠΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΓΥΨΟ (μm)	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΓΥΨΟΥ - (μm)	ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΓΥΨΟ (%)
Pam	<u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΟΛΛΕΣ ΜΑΥΡΕΣ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΙΣ, ΕΒΕ</u>	50	50	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΤΑ ΤΟΠΟΥΣ, ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ 15μm	-
Pa2	<u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΛΙΓΕΣ ΜΑΥΡΕΣ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΙΣ, ΕΒΕ</u>	175	75	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	-
Ped14	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 3%κ.β. ΔΙΝΑΤΡΙΟΥΧΟΥ ΕΔΤΑ, 1h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	90	50	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	55
Pm24	ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 1.5h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	100	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	1
Pab24	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1.5h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	120	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	1
Pnc24	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1.5h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	95	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	1
Ps34	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3 h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	100	95	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΣΟΥ ΠΑΧΟΥΣ 40μm	95
Pab14	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	100	80	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΣΟΥ ΠΑΧΟΥΣ 10μm	90
Pnc14	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1h, <u>ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ</u>	100	0	ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ	1

Πίνακας 9.1.3.8: Διακριτές τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε μία επέμβαση καθαρισμού. Διακριτή τιμή της παραμέτρου εξόδου: Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, σε επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου απουσία πάτινας.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΓΥΦΟ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Pm24	ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 1.5h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	1	21.5	3.415	37	13.90	1.24
Pab24	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1.5h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	1	21.2	2.967	28	14.70	1.21
Pnc24	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1.5h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	1	20.1	1.817	16	12.80	1.27
Ps34	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3 h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	95	15.9	2.173	19	5.42	8.07
Pab14	ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	90	21.0	1.790	11	9.58	6.50
Pnc14	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 10%κ.ο. (NH ₄) ₂ CO ₃ , 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	1	17.0	2.405	30	9.47	1.12

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ					ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
		ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΓΥΨΟ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΕ	ΔΑΕΚ
Ped14	ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ Δ/ΜΑ 3%κ.β. ΔΙΝΑΤΡΙΟΥΧΟΥ ΕΔΤΑ, 1h, ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ, ΕΒΕ	55	21.4	2.198	23	9.03	5.75

Οι τιμές της παραμέτρου εξόδου δηλ. του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επέμβασης Καθαρισμού (ΔΑΕΚ), μετά την εφαρμογή του ασαφούς μοντέλου, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία και σύγκλιση με τις εκτιμήσεις για την καταλληλότητα των εφαρμοσθέντων επεμβάσεων καθαρισμού που αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 5.5.6 για τις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος. Πιο συγκεκριμένα:

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών Pm24, Pab24, Pnc24, Pnc14, καταγράφεται στα 1.20 περίπου δηλ. είναι μικρότερος από 4.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μη αποδεκτού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μη αποδεκτές επεμβάσεις καθαρισμού. Οι καθαρισμοί που εφαρμόστηκαν στις παραπάνω επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτοί και αποτελούν τυπικές περιπτώσεις υπέρ-καθαρισμών (over-cleaning), αφού εξαιτίας των επεμβάσεων έλαβε χώρα ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού δηλ. πλήρης απομάκρυνση του μικρού πάχους κρούστα στις περιοχές που υπήρχε (περίπτωση Pnc14), καθώς και του μικρό-κρυσταλλικού γύψου που γέμιζε τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις (όλες οι εφαρμογές). Παράλληλα, από τις τιμές των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής, αυτή της πυκνότητας ρηγματώσεων παρουσιάζει μετά τις επεμβάσεις καθαρισμού αρκετά μειωμένες τιμές σε σχέση με αυτές πριν από τον καθαρισμό σε όλες τις περιπτώσεις των επιφανειών, οι οποίες όμως αναφέρονται σε αποκλειστικά ασβεστιτικές επιφάνειες. Στην περίπτωση των παραμέτρων της τραχύτητας Rq και του λόγου πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, διαπιστώνεται ότι οι καταγραφόμενες τιμές, είτε παρουσιάζουν αύξηση σε σχέση με τις τιμές των αντίστοιχων δειγμάτων πριν την εφαρμογή των επεμβάσεων καθαρισμού (Pm24, Pab24, Pnc14, λαμβάνοντας σαν κατάσταση αναφοράς τα αποτελέσματα Padf και Pa2), υποδεικνύοντας την αύξηση της επιδεκτικότητας στη φθορά, ή μεγάλης τάξης μείωση (Pnc24) που υποδηλώνει την ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού που όντως έλαβε χώρα. Σε σχέση δε, με τη συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ, παρατηρείται ότι στη συντριπτική τους πλειοψηφία οι επιφάνειες που δε διατήρησαν το μικρό-κρυσταλλικό γύψο μετά τον καθαρισμό παρουσιάζουν τιμές υψηλότερες από αυτές που ορίζονται από το αποδεκτό ασαφές σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», δηλ. οι τιμές ΔΕ είναι μεγαλύτερες από 11 (Pm24, Pab24, Pnc24). Μόνο η επιφάνεια με κωδικό Pnc14, παρουσιάζει τιμές ΔΕ που ανήκουν στο ασαφές σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», που έχει οριστεί ως αποδεκτό.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού των επιφανειών Pab14, και Ped14 καταγράφεται γύρω στα 6.5 και τα 5.75 αντιστοίχως δηλ. είναι μικρότερος από 7.5, που είναι το άνω όριο του ασαφούς συνόλου του μέτριου ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμώνται ως μέτριες επεμβάσεις καθαρισμού. Ο καθαρισμός που εφαρμόστηκε στην επιφάνεια με κωδικό Pab14 χαρακτηρίζεται ως μέτριος, διότι εμφανίζει τιμές για τις παραμέτρους της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας κατά πολύ μειωμένες σε σχέση με το δείγμα διάγνωσης, παρόλο που διατηρεί μεγάλο τμήμα γύψου στις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις και περιοχή με επιφανειακή κρούστα γύψου, παρουσιάζει δε τιμή ΔΕ που ανήκει στο αποδεκτό ασαφές

σύνολο της «Μεσαίας συνολικής μεταβολής χρώματος», καθώς και πυκνότητα ρηγματώσεων σε παρόμοια επίπεδα με αυτή πριν την επέμβαση. Ο καθαρισμός που εφαρμόστηκε στην επιφάνεια με κωδικό Ped14 χαρακτηρίζεται ως μέτριος, αφού η συγκεκριμένη επιφάνεια δεν διατηρεί περιοχές με κρούστα γύψου και οι περικρυσταλλικές ρηγματώσεις είναι περίπου κατά το ήμισυ πληρωμένες με γύψο. Παρόλα αυτά, οι παράμετροι της μικροδομής κυμαίνονται σε αποδεκτά χαμηλότερα επίπεδα τιμών σε σχέση με αυτά που καταγράφονται πριν τις επεμβάσεις καθαρισμού και η συνολική διαφορά ΔΕ καταγράφεται στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα.

➤ Ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού της επιφάνειας Ps34, καταγράφεται 8.07 δηλ. είναι μεγαλύτερος από 8, που είναι το κάτω όριο του ασαφούς συνόλου του καλού ΔΑΕΚ και συνεπώς εκτιμάται ως προτεινόμενη επέμβαση καθαρισμού. Η επέμβαση καθαρισμού του σηπιολίθου με απιονισμένο νερό για 3 ώρες στις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ, είναι μια καλή επέμβαση καθαρισμού, αφού διατηρεί τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις πληρωμένες με μικρό-κρυσταλλικό γύψο, ενώ εντοπίζεται και περιοχή επιφανειακής στοιβάδας γύψου από όπου έχουν απομακρυνθεί οι μαύρες επικαθίσεις. Παράλληλα, η συνολική μεταβολή χρώματος καταγράφεται στα αποδεκτά μέτρια επίπεδα. Επισημαίνεται δε, ότι οι παράμετροι της επιφανειακής μικροδομής παρουσιάζουν αποδεκτά επίπεδα μείωσης αν συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές των δειγμάτων αναφοράς (με το Pma για τις τιμές της πυκνότητας ρηγματώσεων και με τα Padf Pa2 για τις τιμές της τραχύτητας και της ενεργής επιφάνειας). Άλλωστε η χαμηλή δραστηριότητα της εφαρμογής επουδενί θα δικαιολογούσε ανεπίτρεπτη απώλεια αυθεντικού υλικού, γεγονός που αποδεικνύεται και από το μεγάλο βαθμό πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο.

9.1.4 Μερικά Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της συγκρότησης της μεθοδολογίας αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού αναδείχθηκε (κεφ. 8) η ανάγκη της απόδοσης ποσοτικών χαρακτηριστικών στους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Αναδείχθηκε δηλ. η αναγκαιότητα της διαμόρφωσης των αποδεκτών και μη αποδεκτών ορίων των κρίσιμων παραμέτρων που ορίζουν το κάθε κριτήριο αποτίμησης, έτσι ώστε να λαμβάνεται σαφής απόκριση για την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού ανά παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ασαφούς λογικής που ανήκει στην κατηγορία των Mamdani μοντέλων με κώδικα γραμμένο σε γλώσσα C++ και έχει την παρακάτω γενική μορφή:

$$\forall r \in R : \text{if } \bigwedge_{1 \leq i \leq m} (x_i \in A_i^r) \text{ then } \bigwedge_{1 \leq j \leq n} (y_j \in B_j^r) \quad (9.1.1.1.2.1)$$

όπου: m : ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου

n : ο αριθμός των μεταβλητών εξόδου

$x_i, 1 \leq i \leq m$: οι μεταβλητές εισόδου

$A_i^r, 1 \leq i \leq m$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου

$y_j, 1 \leq j \leq n$: οι μεταβλητές εξόδου

$B_j^i, 1 \leq j \leq n$: τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εξόδου

Η επιλογή χρήσης μοντέλου ασαφούς λογικής έλαβε χώρα εξαιτίας των δυνατοτήτων του να ενσωματώνει στη διαδικασία μοντελοποίησης πολύπλοκων διεργασιών καθαρά ποιοτικές πληροφορίες (ενίοτε και μεγάλης αβεβαιότητας), εκτός από αριθμητικά δεδομένα, προσομοιάζοντας έτσι την ανθρώπινη λογική σε σχέση με την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη λήψη αποφάσεων.

Έτσι αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα ασαφούς λογικής ανάλογα με τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοζόμενες επεμβάσεις καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν, δηλ. ένα για τις φαιόμαυρες κρούστες, ένα για τις αποπλυμένες επιφάνειες και ένα για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, (β.λ. Εικ. 9.1.4.1, 9.1.4.2, 9.1.4.3, αντιστοίχως).

Πιο συγκεκριμένα, ως **παράμετροι εισόδου** και στις τρεις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι **κρίσιμες παράμετροι των κριτηρίων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού** όπως αυτές διατυπώνονται στο κεφάλαιο 8, ενώ κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των **ασαφών συνόλων** ουσιαστικά **διαμορφώθηκαν τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια** τόσο των παραμέτρων εισόδου, όσο και της παραμέτρου εξόδου που ορίστηκε ο Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ).

Επιπλέον, η ανάπτυξη των **ασαφών κανόνων** βασίστηκε στη γνώση και την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω των εργαστηριακών και επί τόπου αποτελεσμάτων αυτής της διατριβής, λαμβάνοντας υπόψη και τη διεθνή βιβλιογραφία στα θέματα αποτίμησης καθαρισμών, αφού έπρεπε να δοθεί αποτέλεσμα (παράμετρος εξόδου ΔΑΕΚ) σε κάθε δυνατό συνδυασμό κλάσεων κάθε μεταβλητής εισόδου. Η δε λειτουργία και των τριών μοντέλων ασαφούς λογικής βασίστηκε στους μετασχηματισμούς της μονάδας ασαφοποίησης, της μονάδας εξαγωγής συμπεράσματος, και της μονάδας αποασαφοποίησης.

Για να διαπιστωθεί αν τα τρία μοντέλα ασαφούς λογικής είναι σωστά βαθμονομημένα και επιτελεστικά, όσον αφορά στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα σε φαιόμαυρες κρούστες, αποπλυμένες επιφάνειες και σε περιοχές περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, αυτά εφαρμόστηκαν στις αντίστοιχες μελέτες περιπτώσεων:

(α) των φαιόμαυρων κρουστών των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος, των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα και του κιονόκρανου του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (34 διαφορετικές περιπτώσεις),

(β) των αποπλυμένων επιφανειών των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου (9 διαφορετικές περιπτώσεις), καθώς και

(γ) του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών του ιστορικού κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος (7 διαφορετικές περιπτώσεις).

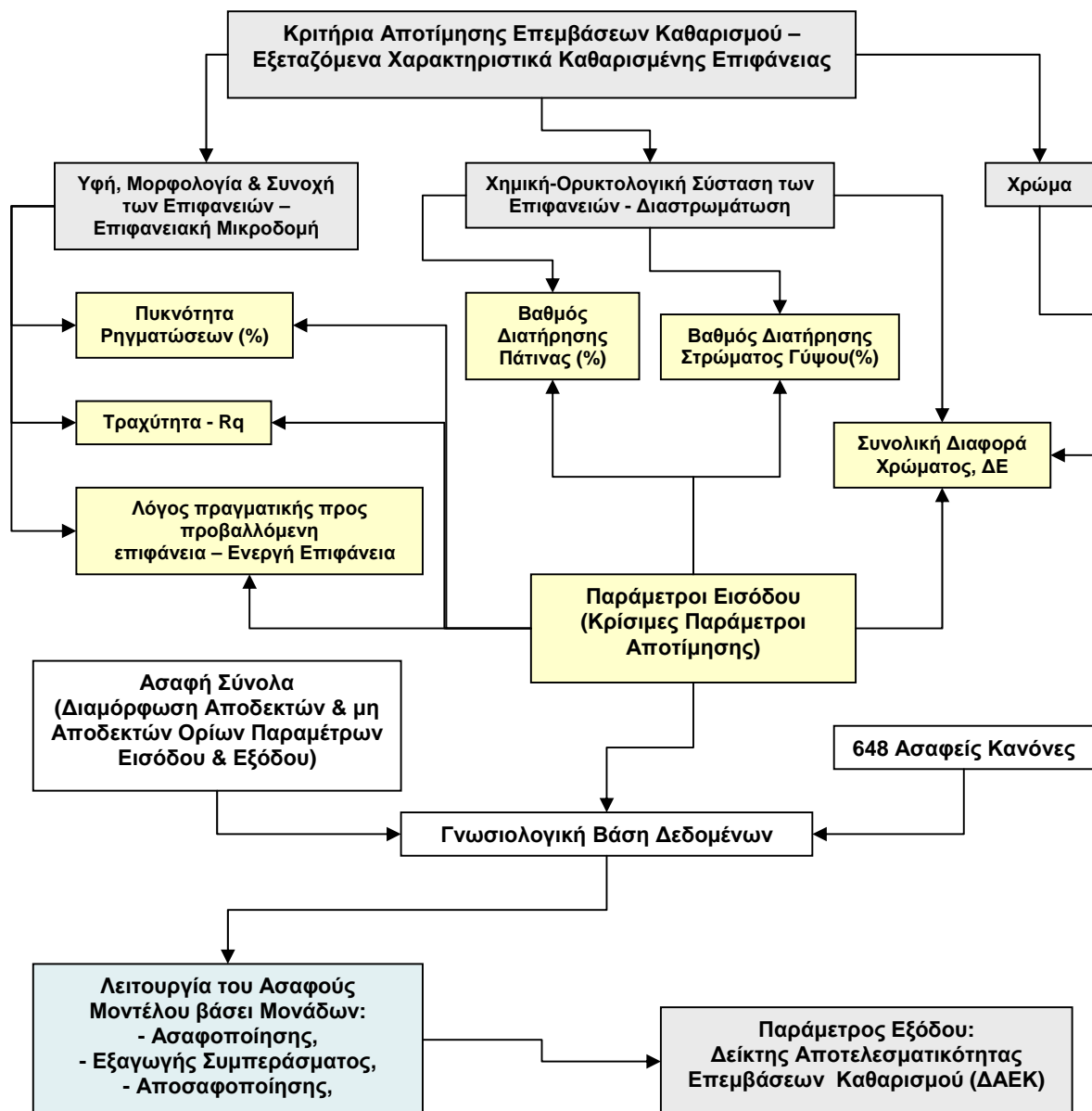
Από την εφαρμογή και των τριών μοντέλων προκύπτει ότι η ταξινόμηση των επεμβάσεων καθαρισμού βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις κρίσεις επί της αποτελεσματικότητάς τους, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στα κεφ. 5.4.6, 5.5.6, 6.4.6, 6.5.6, 6.6.6.

Προκύπτει δηλαδή η δημιουργία τριών εμπειρικών συστημάτων λήψης απόφασης γνωσιολογικής βάσης (ένα για κάθε τύπο φθοράς), που οδηγούν στην απόκριση επί της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού, περιλαμβάνοντας γλωσσολογικές μεταβλητές που συνδυάζουν εμπειρική γνώση, ποιοτικά και αριθμητικά δεδομένα, προσομοιώνοντας έτσι την ανθρώπινη λογική.

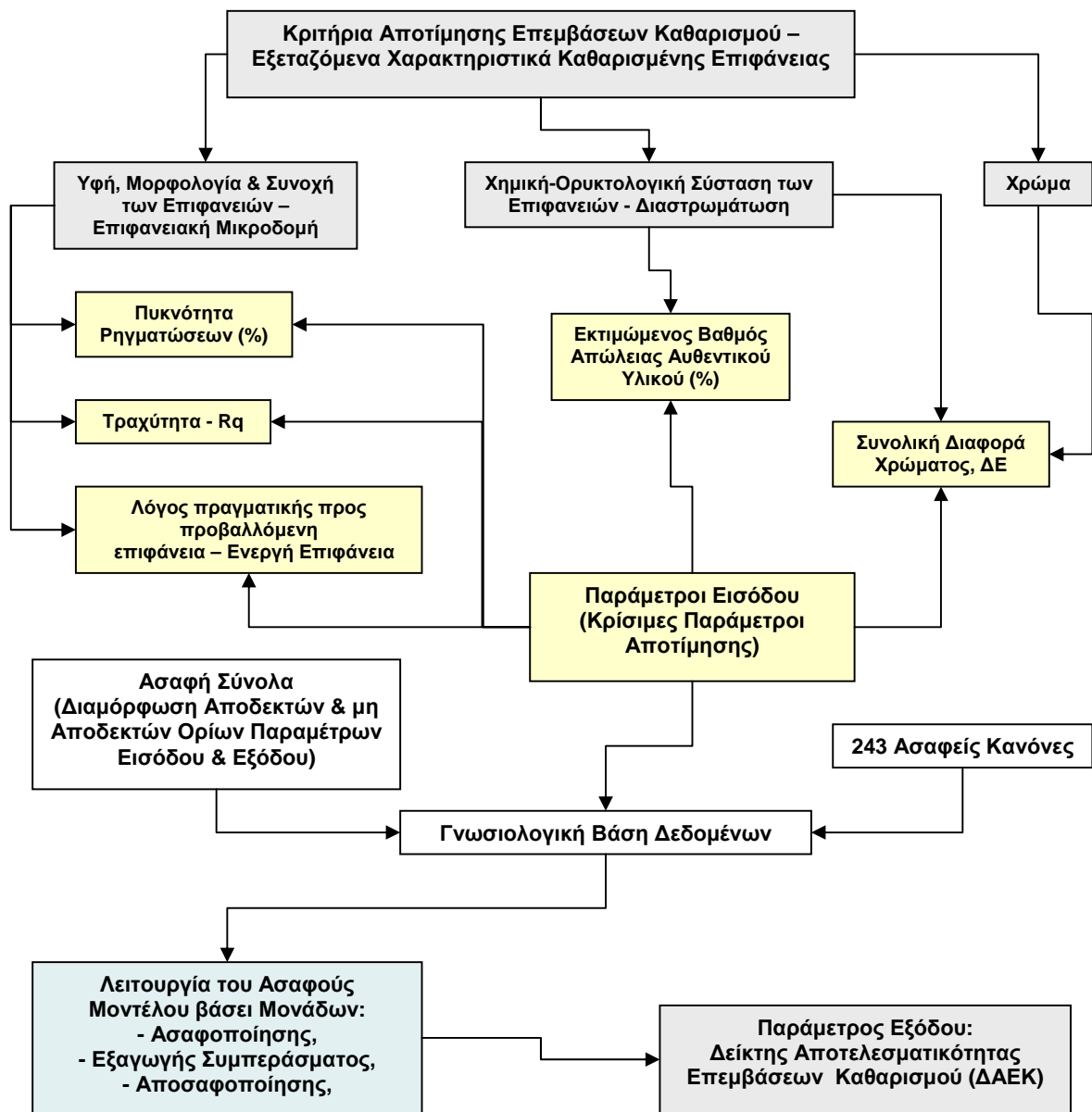
Είναι προφανές ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλες μελέτες περιπτώσεων αντίστοιχων μαρμάρινων υλικών και τύπων φθοράς, με μόνη προϋπόθεση οι παράμετροι εισόδου να μετρηθούν με τις ανάλογες τεχνικές προδιαγραφές.

Πρόκειται δε, για δυναμικά μεθοδολογικά εργαλεία με μεγάλη ευελιξία και δυνατότητες βελτίωσης, αφού μπορούν να τροφοδοτούνται συνεχώς με νέα δεδομένα, συμπληρώνοντας έτσι τη γνωσιολογική βάση, ενώ παράλληλα είναι εφικτή η προσθήκη καινούργιων παραμέτρων εισόδου, ανάλογα με τις νέες επιστημονικές κατευθύνσεις και αναγκαιότητες.

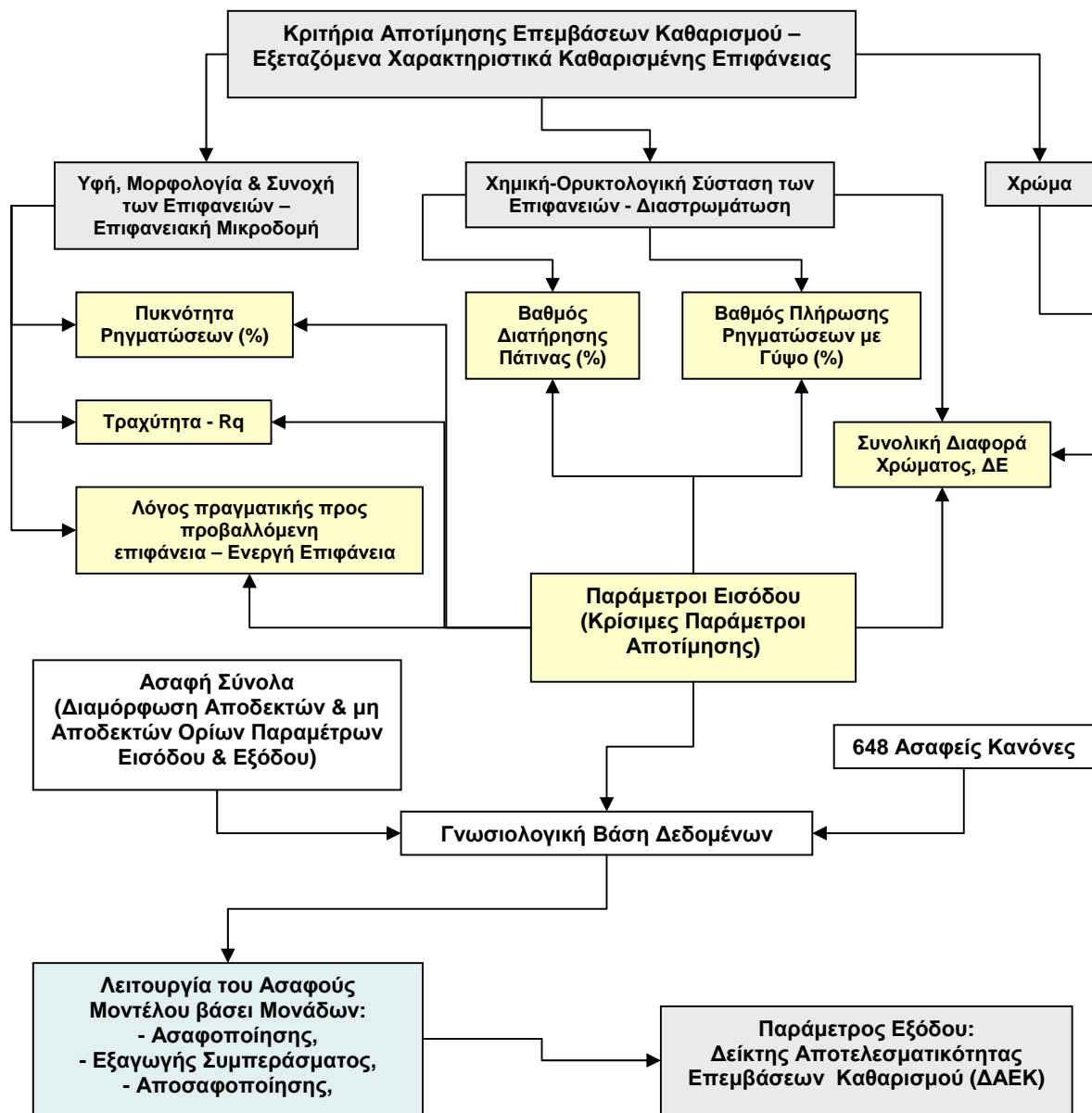
Άρα, η χρήση μοντέλων ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού καθίσταται πολύτιμο μεθοδολογικό εργαλείο εξαιτίας της δυνατότητας που παρουσιάζει για συνεχή αναδιαμόρφωση και βελτίωση.



Εικ. 9.1.4.1 Διάγραμμα Ροής Ανάπτυξης Μοντέλου Ασαφούς Λογικής για Φαιόμαυρες Κρούστες



Εικ. 9.1.4.2 Διάγραμμα Ροής Ανάπτυξης Μοντέλου Ασαφούς Λογικής για Αποπλυμένες Επιφάνειες

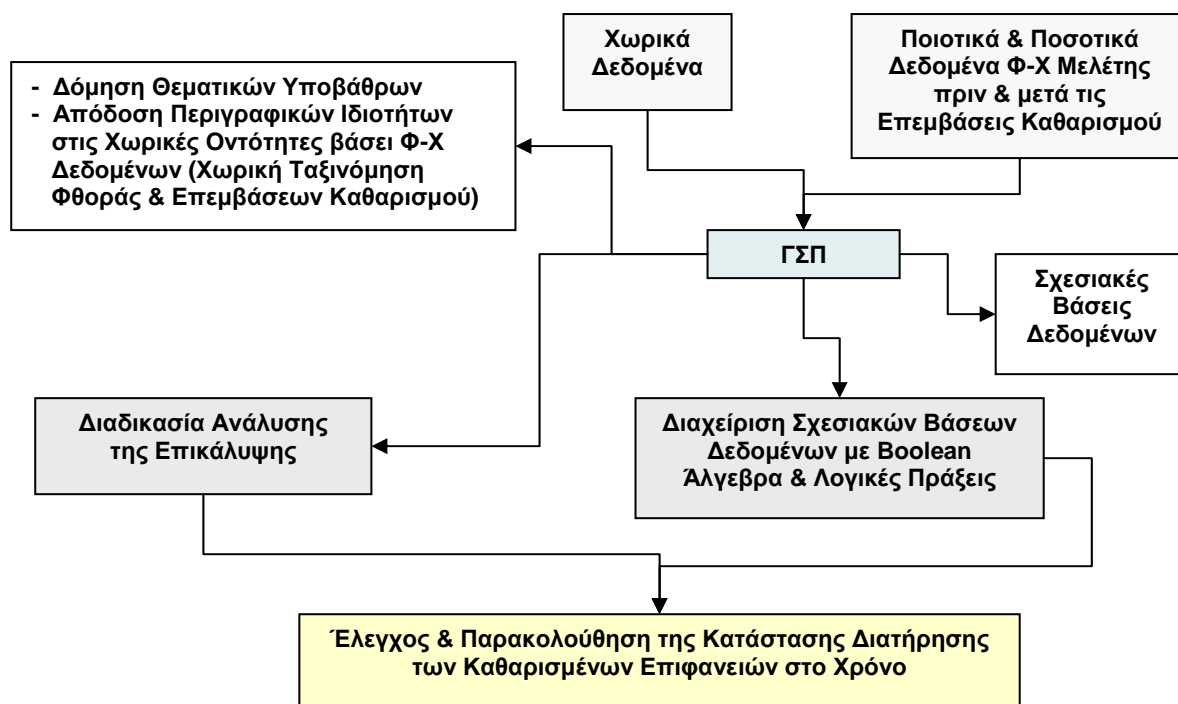


Εικ. 9.1.4.3 Διάγραμμα Ροής Ανάπτυξης Ασαφούς Μοντέλου για επιφάνειες περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου

9.2 Έλεγχος και παρακολούθηση στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών με χρήση ΓΣΠ

9.2.1 Μεθοδολογία Εφαρμογής

Στο πλαίσιο συγκρότησης της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού σε μαρμαρίνες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, αναδείχθηκε (β.λ. κεφ. 8) η ανάγκη χρήσης ενός μεθοδολογικού εργαλείου που θα επιτυγχάνει τον έλεγχο και την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στις δεδομένες χωρικές τους συντεταγμένες και ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό εργαλείο για αυτό το σκοπό είναι το ΓΣΠ, λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων του στην απεικόνιση, συστηματική μελέτη, συσχέτιση, διαχείριση και ανάλυση χωρικών και μη δεδομένων. Η μεθοδολογία της προτεινόμενης εφαρμογής συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



Εικ. 9.2.1 Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εφαρμογής

Πιο συγκεκριμένα, για τη δημιουργία του ΓΣΠ σχεδιάστηκαν τα υποβάθρα των 5 εξεταζόμενων αρχιτεκτονικών επιφανειών, δηλ. έλαβε χώρα η γραφική απόδοση της θέσης και του σχήματος των χωρικών οντοτήτων που εξετάζονται, αρχικώς σε ΣΧΑ και κατόπιν αυτά εισήχθησαν σε περιβάλλον ΓΣΠ. Μετά την **εισαγωγή της χωρικής πληροφορίας** έλαβε χώρα η επεξεργασία και η **δόμηση της τοπολογίας** κατά την οποία (α)δημιουργήθηκαν οι χωρικές σχέσεις ανάμεσα στα χωρικά χαρακτηριστικά, οι οποίες σχετίζονται με τη συνέχεια, την περιεκτικότητα και τη γειτνίαση που είναι απαραίτητες για την κατασκευή ενός χάρτη, καθώς και (β)εισήχθησαν τα γενικά περιγραφικά χαρακτηριστικά του υπό κατασκευή θεματικού επιπέδου. Σε αυτή τη δεύτερη φάση της δόμησης της τοπολογίας

ουσιαστικά οι χωρικές σχέσεις που δημιουργούνται κατά την πρώτη φάση συνδέονται με τη γενική περιγραφική πληροφορία, έτσι ώστε να δομηθούν τα **θεματικά υπόβαθρα της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού** και να επιτευχθεί η **χωρική ταξινόμηση της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού** σε δύο διακριτούς χάρτες.

Κατόπιν κατασκευάστηκαν 2 βάσεις δεδομένων (ΒΔ) για κάθε επιφάνεια, μία για κάθε θεματικό υπόβαθρο (φθοράς και καθαρισμών), που περιλαμβάνουν το σύνολο των φυσικοχημικών αποτελεσμάτων των τεχνικών (μη καταστρεπτικών και αναλυτικών) που εφαρμόστηκαν για τη διάγνωση της φθοράς και την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού.

Πιο συγκεκριμένα, τα **πεδία της βάσης δεδομένων** που εισήχθη στο ΓΣΠ συνίστατο στα εξής φυσικοχημικά και γενικά περιγραφικά χαρακτηριστικά: κωδικός επιφάνειας, τύπος φθοράς, επέμβαση καθαρισμού, εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού (%), βαθμός διατήρησης πάντινας (%), βαθμός διατήρησης γύψου (%), πάχος γύψου της προς μελέτη επιφάνειας, (μετρήσεις ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων Χ), τραχύτητα, λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια, (μετρήσεις laser προφίλομέτρου), συντελεστής μορφής, πυκνότητα ρηγματώσεων, συντελεστής ευθρυπτότητας, (ψηφιακή επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης), καθώς και οι χρωματομετρικές παράμετροι της λαμπρότητας (L^*), της διαφοράς στο κόκκινο πράσινο(a^*), της διαφοράς στο κίτρινο μπλε (b^*) και της συνολικής διαφοράς χρώματος(ΔE), (μετρήσεις χρωτόμετρου). Πρόκειται δηλ. για το σύνολο των ποσοτικά μετρούμενων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, όπως αυτές ορίστηκαν στο κεφ. 8 και ταξινομήθηκαν σε παραμέτρους εισόδου του μοντέλου της ασαφούς λογικής στο κεφ. 9.1.

Αυτές οι ΒΔ συνδέθηκαν με τους αντίστοιχους πίνακες περιγραφικών χαρακτηριστικών του ΓΣΠ, που περιλαμβάνουν τοπολογικά στοιχεία, όπως η περίμετρος επιφάνειας, το εμβαδόν κ.τ.λ., και σχημάτισαν τις νέες **σχεσιακές βάσεις δεδομένων (ΣΒΔ)**, βάσει των οποίων αποδίδονται οι περιγραφικές ιδιότητες (φυσικοχημικά δεδομένα) στις χωρικές οντότητες. Η επιλογή της σχεσιακής δομής έγινε διότι αυτή είναι η πιο κατάλληλη για την ανάκληση οντοτήτων με βάση τα χαρακτηριστικά τους ή για τη δημιουργία νέων χαρακτηριστικών και των τιμών τους από τα υπάρχοντα δεδομένα [135].

Παράλληλα, η ομαδοποίηση των δεδομένων επιτρέπει στο χρήστη να διασυνδέει τα φ-χ δεδομένα της διάγνωσης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού με τα διανυσματικά δεδομένα του χάρτη, εντοπίζοντας την πληροφορία στο ακριβές γεωμετρικό σημείο ή περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπολογικές σχέσεις που υπάρχουν ανάμεσα στις χωρικές οντότητες των χαρτών. Αυτό καθίσταται εφικτό επειδή το πρώτο πεδίο της ΒΔ σημειώνεται με τον ίδιο κωδικό αναγνώρισης του τοπολογικού στοιχείου στο οποίο τα περιγραφικά δεδομένα αναφέρονται και ο χρήστης μπορεί να ανακαλέσει την πληροφορία όποτε το αντίστοιχο θέμα είναι ενεργό.

Η **διαχείριση των ΣΒΔ** στο ΓΣΠ πραγματοποιήθηκε σε σχέση με τη διαδικασία της επιλογής χρησιμοποιώντας τα **κριτήρια τύπου Boolean ή τις λογικές πράξεις**. Αυτές οι διαχειριστικές λειτουργίες εφαρμόζονται τόσο σε περιγραφικά χαρακτηριστικά μιας

οντότητας, όσο και σε χωρικές και τοπολογικές ιδιότητες μιας οντότητας με στόχο την ανάλυση χωρικών και περιγραφικών δεδομένων.

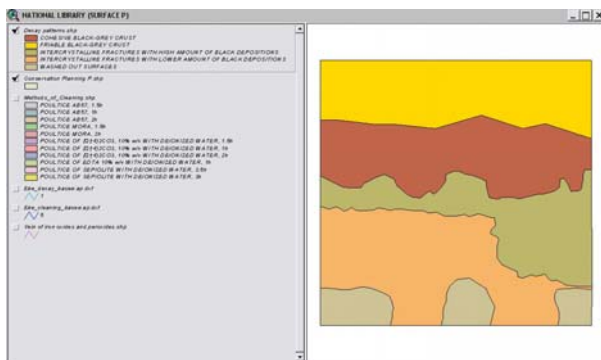
Τέλος, εφαρμόστηκε η διαδικασία ανάλυσης της επικάλυψης, κατά την οποία δημιουργήθηκε ένας νέος θεματικός χάρτης, (σχεδιασμός επεμβάσεων καθαρισμού), ο οποίος προέκυψε μετά από εφαρμογή της τομής των χαρτών της διάγνωσης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού της κάθε εξεταζόμενης επιφάνειας, με αποτέλεσμα να φέρει το σύνολο των χωρικών και των περιγραφικών χαρακτηριστικών των δύο αρχικών χαρτών. Η αναλυτική διαδικασία της επικάλυψης, η οποία κατ' ουσία αποτελεί επέκταση των κανόνων της Boolean Άλγεβρας στον τρόπο με τον οποίο οι χωρικές οντότητες καλύπτουν το γεωγραφικό χώρο, είναι αυτή που επιτρέπει την παρακολούθηση στο χρόνο των χωρικών αλλά και των περιγραφικών δεδομένων που εξετάζονται. Έτσι, καθιστά το ΓΣΠ το μεθοδολογικό εργαλείο που παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, περιλαμβάνοντας χωρικά και φ-χ δεδομένα που καταγράφονται στις αντίστοιχες περιόδους εξέτασης.

Επιπλέον, στο νέο αυτό θεματικό χάρτη εφαρμόστηκαν κριτήρια τύπου Boolean ή και λογικές πράξεις στις ΣΒΔ που πλέον φέρουν περιγραφικές πληροφορίες δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων, της διάγνωσης της φθοράς και της αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, επιτρέποντας έτσι τη σύγκριση των μεταβολών των καταγεγραμμένων φ-χ χαρακτηριστικών.

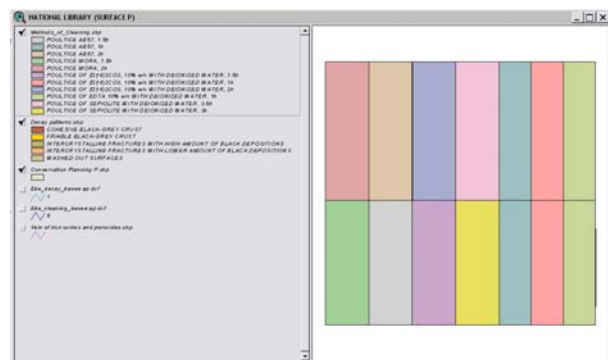
9.2.2 Αποτελέσματα & συζήτηση

(α) Δόμηση Θεματικών Υποβάθρων – Χωρική Ταξινόμηση

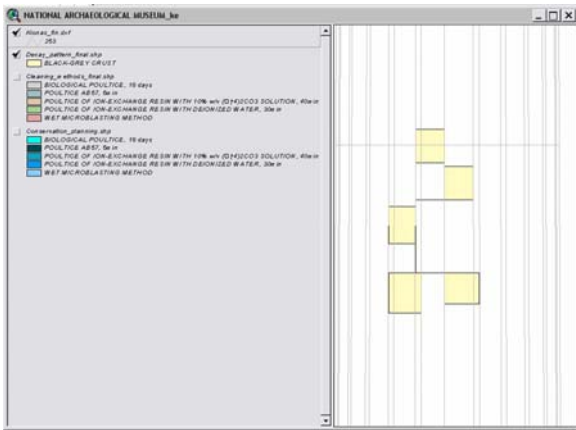
Η καταγραφή της χωρικής πληροφορίας για κάθε εξεταζόμενη αρχιτεκτονική επιφάνεια έλαβε χώρα σε σύστημα χωρικής απεικόνισης (ΣΧΑ) κατόπιν αρχιτεκτονικών επιμετρήσεων. Αφού, η χωρική πληροφορία εισήχθη στο ΓΣΠ και δομήθηκε η τοπολογία, κατασκευάστηκαν οι θεματικοί χάρτες της διάγνωσης της φθοράς και των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού για κάθε μία από τις εξεταζόμενες επιφάνειες, βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών που παρουσιάζονται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή (βλ. εικ. 9.2.1 - περιβάλλον του λογισμικού του ΓΣΠ & Χάρτες P1, P2, ΚΚΕ1, ΚΚΕ2, ΚΕ1, ΚΕ2, ΚΝ1, ΚΝ2). Έτσι, έλαβε χώρα η χωρική ταξινόμηση των τύπων φθοράς, καθώς και των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού που εφαρμόστηκαν.



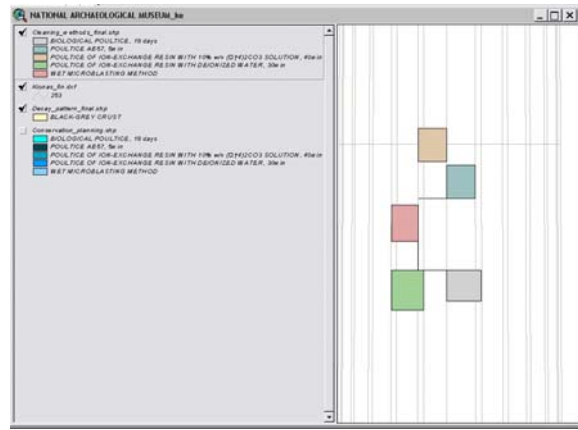
1. Θεματικός χάρτης της φθοράς για τις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ



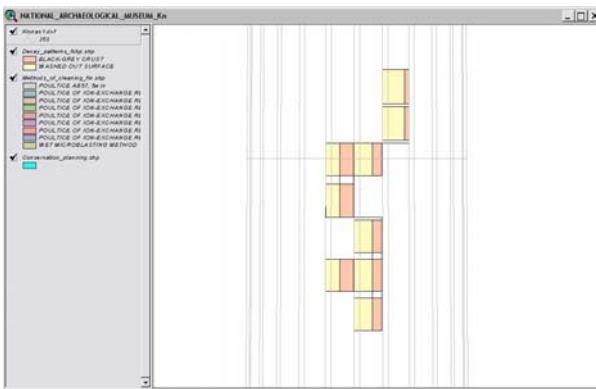
2. Θεματικός χάρτης των επεμβάσεων καθαρισμού για τις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ



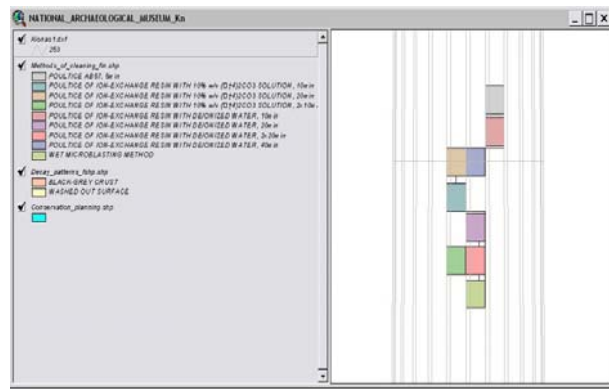
3. Θεματικός χάρτης της φθοράς για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ΕΑΜ (φαιόμαυρη κρούστα – ανατολικός προσανατολισμός)



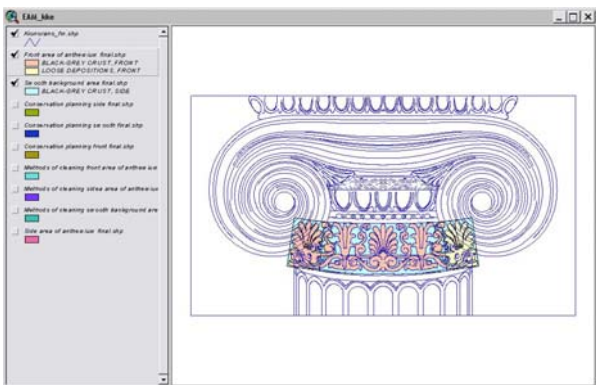
4. Θεματικός χάρτης των επεμβάσεων καθαρισμού για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός)



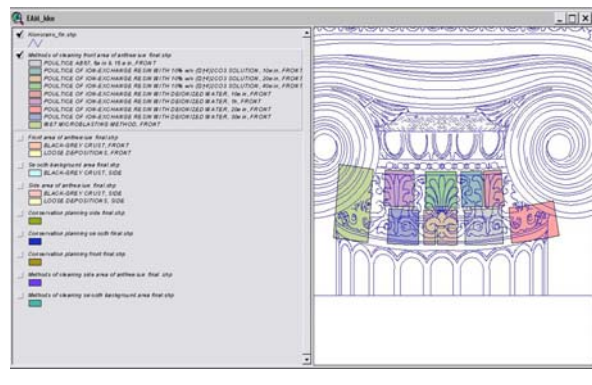
5. Θεματικός χάρτης της φθοράς για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ΕΑΜ (φαιόμαυρη κρούστα & αποπλυμένες επιφάνειες – βόρειος προσανατολισμός)



6. Θεματικός χάρτης των επεμβάσεων καθαρισμού για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα στο ΕΑΜ (βόρειος προσανατολισμός)



7. Θεματικός χάρτης της φθοράς για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ



8. Θεματικός χάρτης επεμβάσεων καθαρισμού για τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ

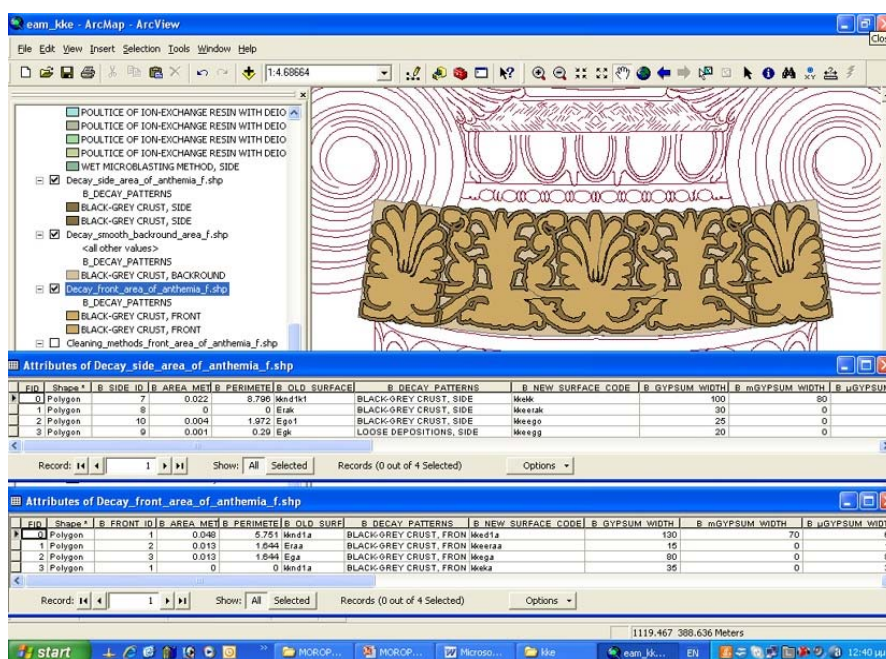
Εικ. 9.2.2.1: Θεματικοί χάρτες των εξεταζόμενων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών

(β) Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων (ΣΒΔ)

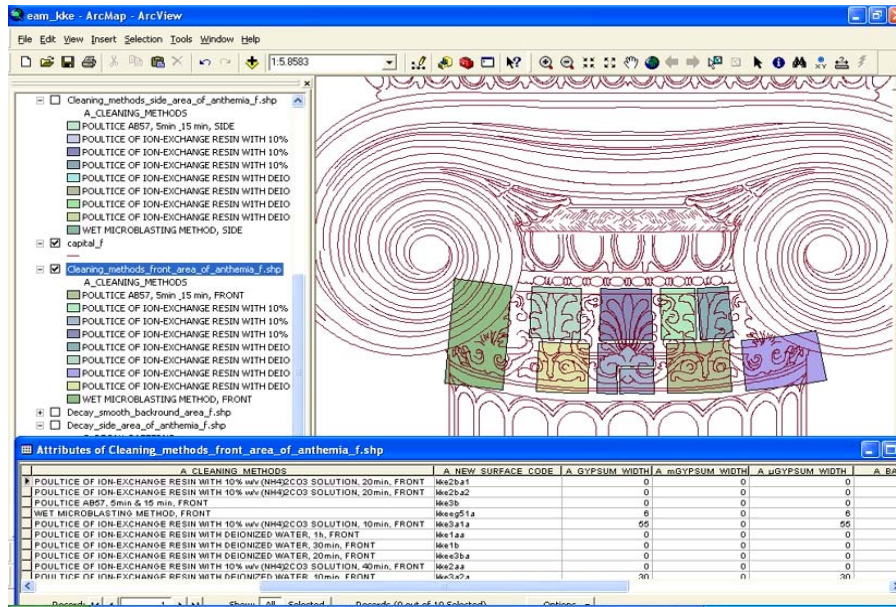
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφού κατασκευάστηκαν οι ΒΔ που περιλαμβάνουν το σύνολο των ποσοτικά μετρούμενων παραμέτρων των κριτηρίων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, αυτές διασυνδέθηκαν με τον πίνακα των περιγραφικών χαρακτηριστικών του ΓΣΠ και δημιουργήθηκαν οι σχεσιακές βάσεις δεδομένων (ΣΒΔ).

Στις εικ. 9.2.2.2 και 9.2.2.3 παρουσιάζονται αντίστοιχα ο θεματικός χάρτης της φθοράς για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων για την πρόσθια και πλάγια περιοχή των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ, (αφού προσδιορίστηκαν 2 τύποι φαιόμαυρης κρούστας διαφορετικών φ-χ χαρακτηριστικών, ανάλογα με τη θέση εξέτασης της ανάγλυφης επιφάνειας), καθώς και ο θεματικός χάρτης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τη σχεσιακή βάση δεδομένων για την πρόσθια περιοχή των ανθεμίων.

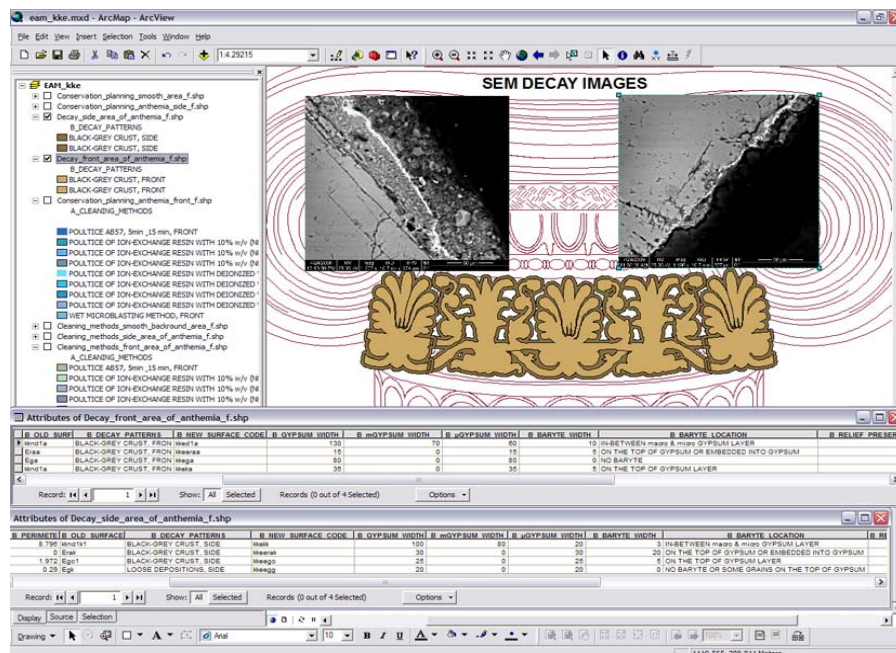
Παράλληλα, μέσω της χρήσης υπερσυνδέσμων είναι δυνατή η εισαγωγή ψηφιακών εικόνων στο περιβάλλον του ΓΣΠ και συνεπώς η ενσωμάτωση ποιοτικών δεδομένων όπως οι εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (β.λ. εικ. 9.2.2.4), εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών και αποτελέσματα φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (β.λ. εικ. 9.2.2.5).



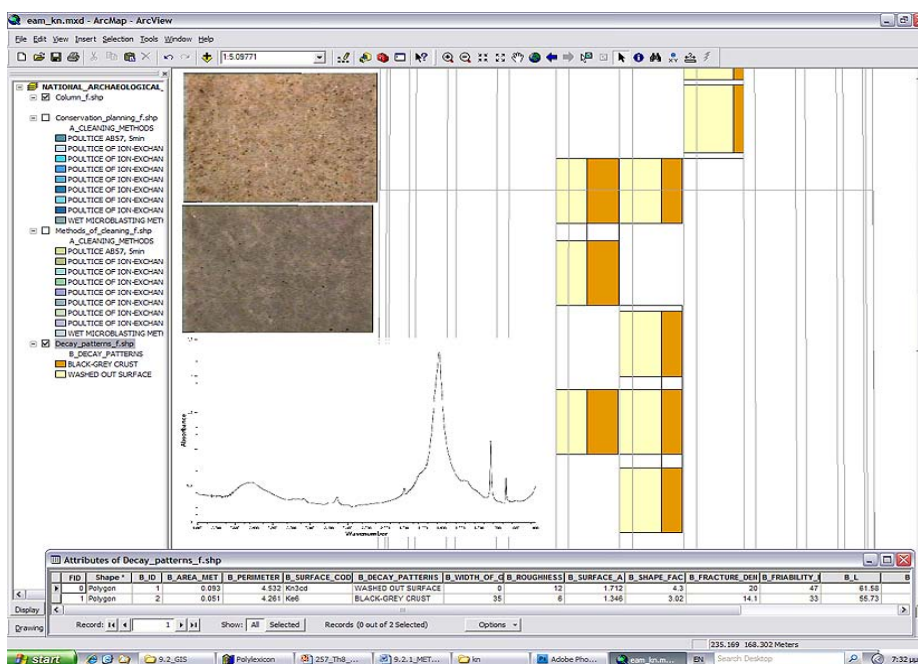
Εικ. 9.2.2.2: Θεματικός χάρτης της φθοράς για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων για την πρόσθια και πλάγια περιοχή των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ



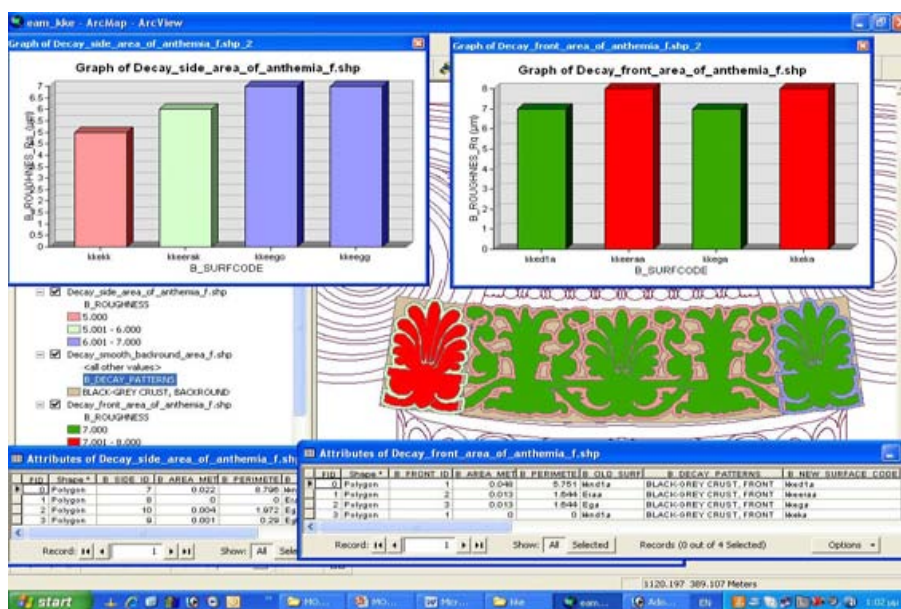
Εικ. 9.2.2.3: Θεματικός χάρτης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τη σχεσιακή βάση δεδομένων για την πρόσθια περιοχή των ανθεμίων του κιονόκρανου στο EAM



Εικ. 9.2.2.4: Θεματικός χάρτης της φθοράς για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων και παρουσίαση των εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της πρόσθιας και πλάγιας όψης των ανθεμίων του κιονόκρανου στο EAM



Εικ. 9.2.2.5: Θεματικός χάρτης της φθοράς για την επιφάνεια των αποπλυμένων περιοχών και φαιόμαυρων κρουστών του κίονα, μαζί με τη σχεσιακή βάση δεδομένων, καθώς και παρουσίαση των εικόνων μικροσκοπίας οπτικών ινών και του φάσματος υπεριώθρου της περιοχής των αποπλυμένων επιφανειών.

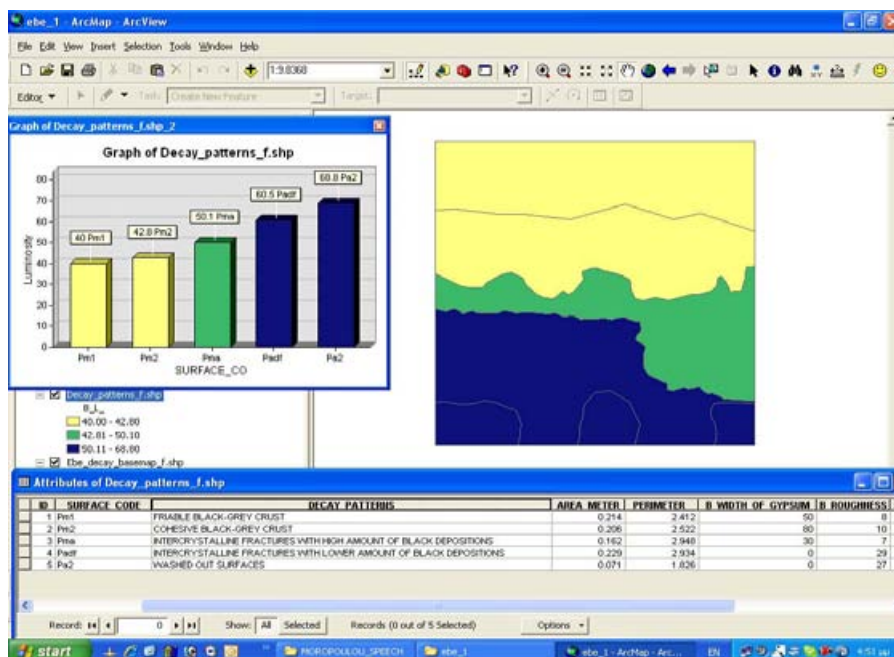


Εικ. 9.2.2.6: Καταγραφή και απόδοση της ιδιότητας της τραχύτητας R_q (μm) στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη των τύπων φθοράς για πρόσθιες και πλάγιες όψεις των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ- Συγκριτικά διαγράμματα

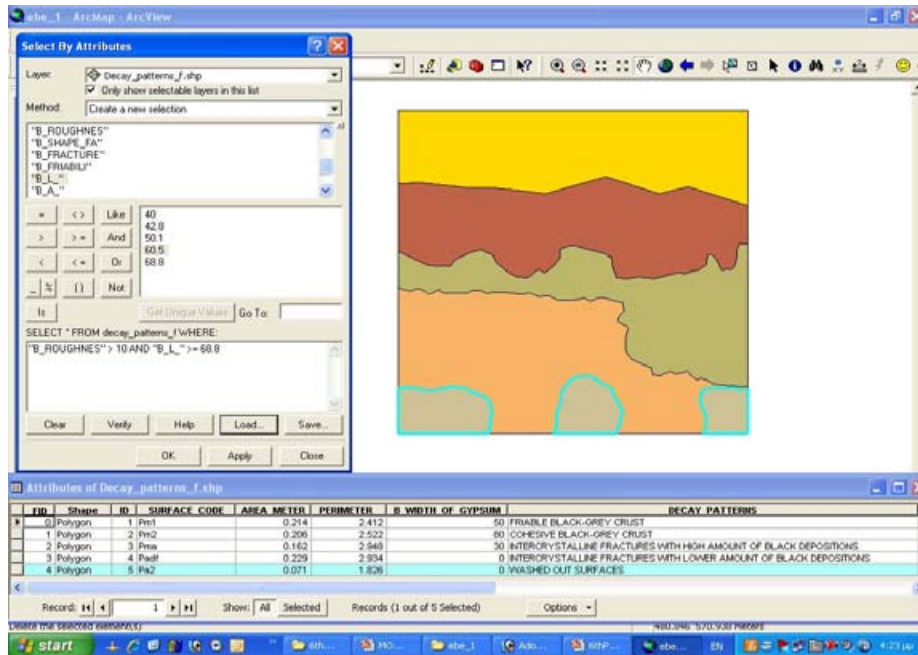
Επίσης, καθίσταται εφικτή η καταγραφή και απόδοση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών - ιδιοτήτων της σχεσιακής βάσης δεδομένων στις χωρικές οντότητες των θεματικών χαρτών μέσω της χρήσης ειδικών εργαλείων του ΓΣΠ και αλγορίθμων που επιτρέπουν την ομαδοποίηση και τη διαμόρφωση κλάσεων ενός προεπιλεγμένου φυσικοχημικού χαρακτηριστικού-ιδιότητας.

Στην εικ. 9.2.2.6, παρουσιάζεται η καταγραφή και απόδοση της ιδιότητας της τραχύτητας R_q (μm) στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη των τύπων φθοράς για τις πρόσθιες και πλάγιες όψεις των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ, καθώς και τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα. Η ομαδοποίηση του φ-χ χαρακτηριστικού της τραχύτητας και η διαμόρφωση 2 & 3 κλάσεων για τις πρόσθιες και πλάγιες όψεις των ανθεμίων αντιστοίχως, έλαβε χώρα βάσει της αλγόριθμου Jenks, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό του ΓΣΠ.

Αντίστοιχα στην εικ. 9.2.2.7, παρουσιάζεται η καταγραφή και απόδοση της ιδιότητας της λαμπρότητας στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη των τύπων φθοράς για τις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ, καθώς και το αντίστοιχο συγκριτικό διάγραμμα. Και σε αυτήν την περίπτωση η ομαδοποίηση του φ-χ χαρακτηριστικού της λαμπρότητας και η διαμόρφωση 3 κλάσεων έλαβε χώρα βάσει του αλγόριθμου Jenks, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό του ΓΣΠ.



Εικ. 9.2.2.7: Καταγραφή και απόδοση της ιδιότητας της λαμπρότητας στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη των τύπων φθοράς για τις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ - Συγκριτικό διάγραμμα



Εικ. 9.2.2.8: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη της διάγνωσης της φθοράς των λείων αρχιτεκτονικών επιφανειών της ΕΒΕ

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση χωρικών και περιγραφικών δεδομένων στο ΓΣΠ μέσω της διαχείρισης των ΣΒΔ με κριτήρια τύπου Boolean ή/και με λογικές πράξεις.

Στην εικ. 9.2.2.8, παρουσιάζεται η δυνατότητα ανάλυσης στο ΓΣΠ μέσω της διαχείρισης της ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη της φθοράς της λείας αρχιτεκτονικής επιφάνειας στην ΕΒΕ. Η χωρική οντότητα που ικανοποιεί την οριζόμενη συνθήκη:

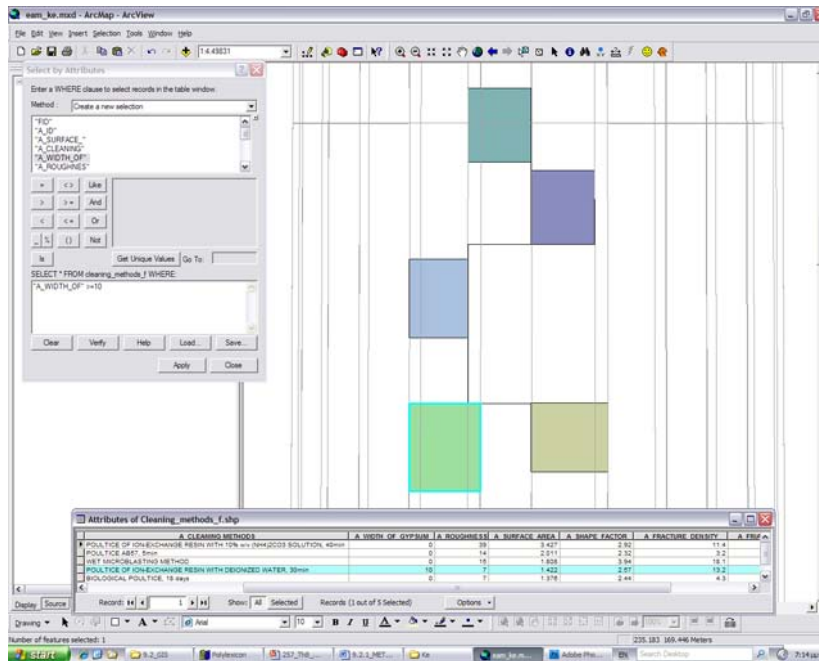
“Τραχύτητα R_q μεγαλύτερη του 10, ΚΑΙ λαμπρότητα L μεγαλύτερη ή ίση του 68.8”

είναι η περιοχή των περικρυσταλλικά ρηγματωμένων επιφανειών με λίγες μαύρες επικαθήσεις, η οποία και εντοπίζεται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα, αποδεικνύοντας την άμεση και δυναμική διασύνδεση της ΒΔ με τα διανυσματικά δεδομένα.

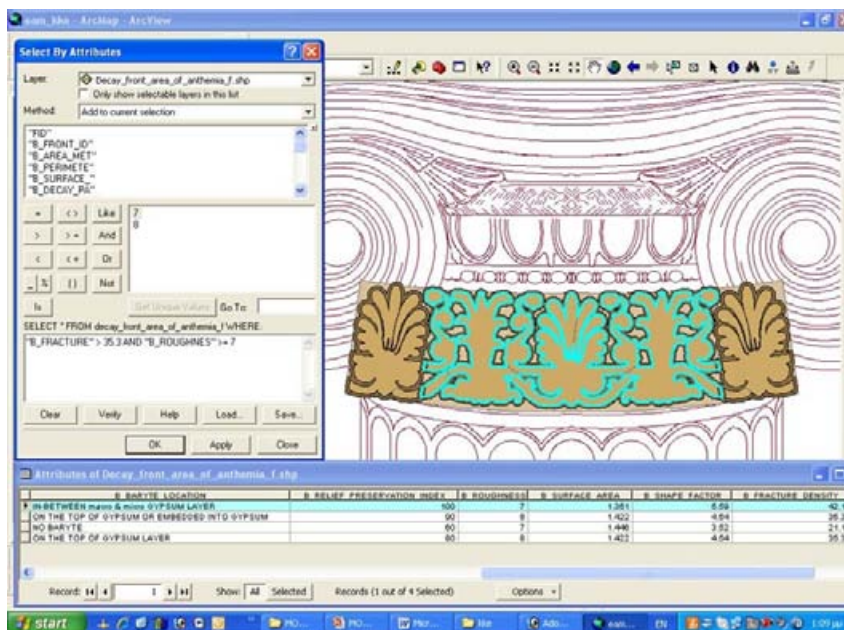
Στην εικ. 9.2.2.9, παρουσιάζεται η εφαρμογή κριτηρίων Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στη ΣΒΔ του θεματικού χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κίονα στο ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός). Η χωρική οντότητα που ικανοποιεί την οριζόμενη συνθήκη:

“πάχος στρώματος γύψου μεγαλύτερο ή ίσο του 10”

είναι η περιοχή εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 30 λεπτά, η οποία και εντοπίζεται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα.



Εικ. 9.2.2.9: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης ΣΒΔ με κριτήρια Βοolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κίονα στο ΕΑΜ (ανατολικός προσανατολισμός)

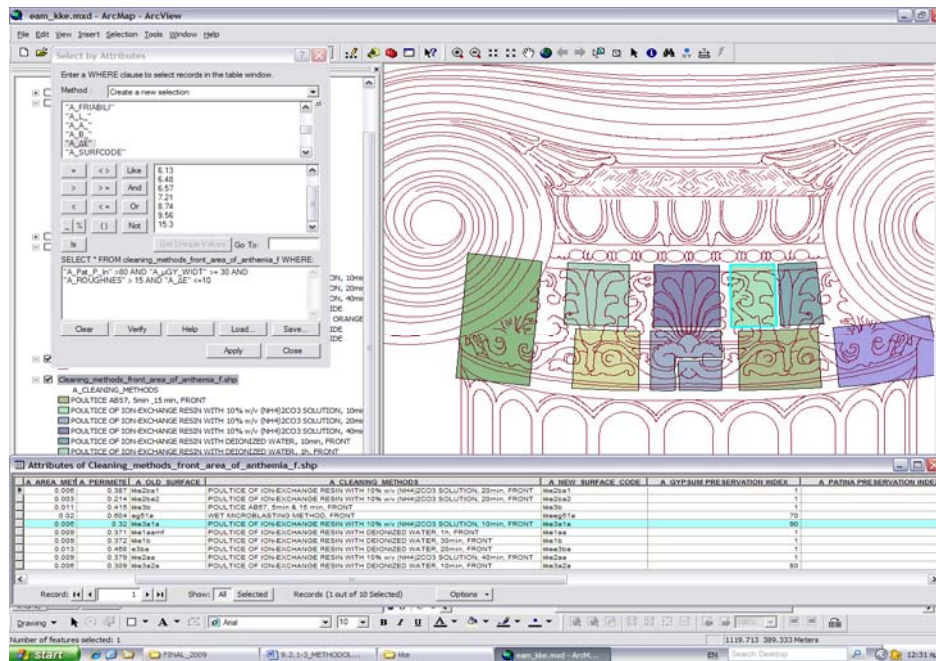


Εικ. 9.2.2.10: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης ΣΒΔ με κριτήρια Βοolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη της φθοράς της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο ΕΑΜ

Στην εικ. 9.2.2.10, παρουσιάζεται η εφαρμογή κριτηρίων Βοolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στη ΣΒΔ του θεματικού χάρτη της φθοράς της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο ΕΑΜ. Η χωρική οντότητα που ικανοποιεί την οριζόμενη συνθήκη:

“πυκνότητα ρηγματώσεων μεγαλύτερη του 35.3, ΚΑΙ τραχύτητα Rq μεγαλύτερη ή ίση του 7”

είναι η κεντρική περιοχή της πρόσθιας όψης των ανθεμίων του εξεταζόμενου κιονόκρανου, η οποία και εντοπίζεται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα, αποδεικνύοντας την άμεση και δυναμική διασύνδεση της ΒΔ με τα διανυσματικά δεδομένα.



Εικ. 9.2.2.11: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο EAM

Στην εικ. 9.2.2.11, παρουσιάζεται η δυνατότητα ανάλυσης στο ΓΣΠ μέσω της διαχείρισης της ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο EAM. Η χωρική οντότητα που ικανοποιεί την οριζόμενη συνθήκη:

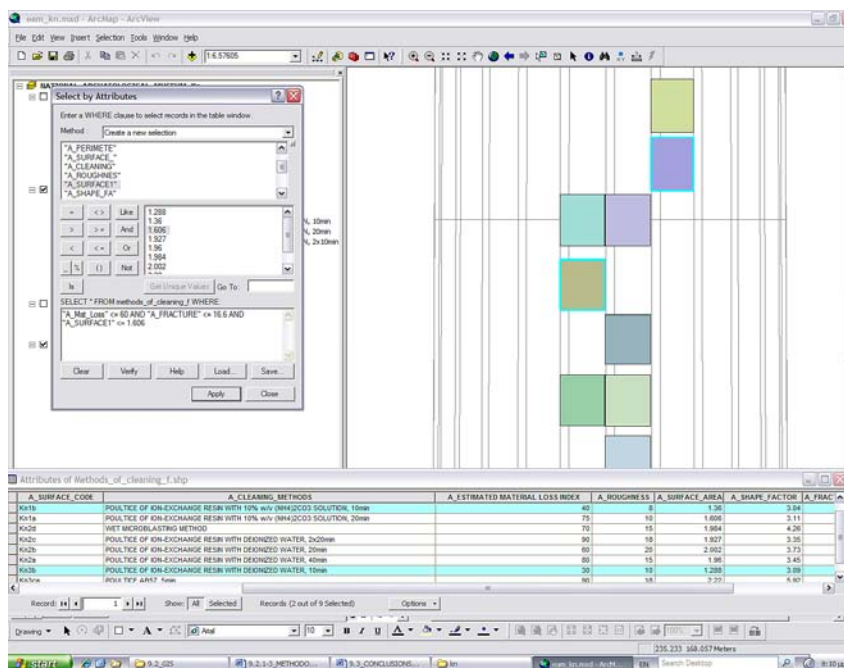
“βαθμός διατήρησης πάτινας μεγαλύτερος του 80%, ΚΑΙ πάχος στρώματος μικροκρυσταλλικού γύψου μεγαλύτερο ή ίσο του 30, ΚΑΙ τραχύτητα Rq μεγαλύτερη του 15, ΚΑΙ συνολική μεταβολή χρώματος μικρότερη ή ίση του 10”

είναι η περιοχή της επέμβασης καθαρισμού με ιοντοανταλλακτική ρητίνη και δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10 λεπτά, η οποία και εντοπίζεται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα. Τα κριτήρια που τίθενται στην ανωτέρω διαδικασία ανάλυσης εκφράζουν κατ’ ουσία τα όρια αποδοχής κάποιων από τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού που υποδεικνύουν τη βέλτιστη επέμβαση για την πρόσθια επιφάνεια του κιονόκρανου του EAM που είναι αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10 λεπτά.

Κατ' αντιστοιχία στην εικ. 9.2.2.12 η εφαρμογή κριτηρίων Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στη ΣΒΔ του θεματικού χάρτη του καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κίονα βόρειου προσανατολισμού στο ΕΑΜ, θέτονται με γνώμονα την οριοθέτηση των ορίων αποδοχής κάποιων από τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού που υποδεικνύουν την αποδεκτή επέμβαση για την εξεταζόμενη επιφάνεια. Οι χωρικές οντότητες που ικανοποιούν την οριζόμενη συνθήκη:

“εκτιμώμενος βαθμός απώλειας αυθεντικού υλικού *μικρότερος ή ίσος του 60%*, *ΚΑΙ* πυκνότητα ρηγματώσεων *μικρότερη ή ίση του 16.6*, *ΚΑΙ* ενεργή επιφάνεια *μικρότερη ή ίση του 1.606*”

είναι δύο, αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 λεπτά και αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 10 λεπτά, οι οποίες και εντοπίζονται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα.

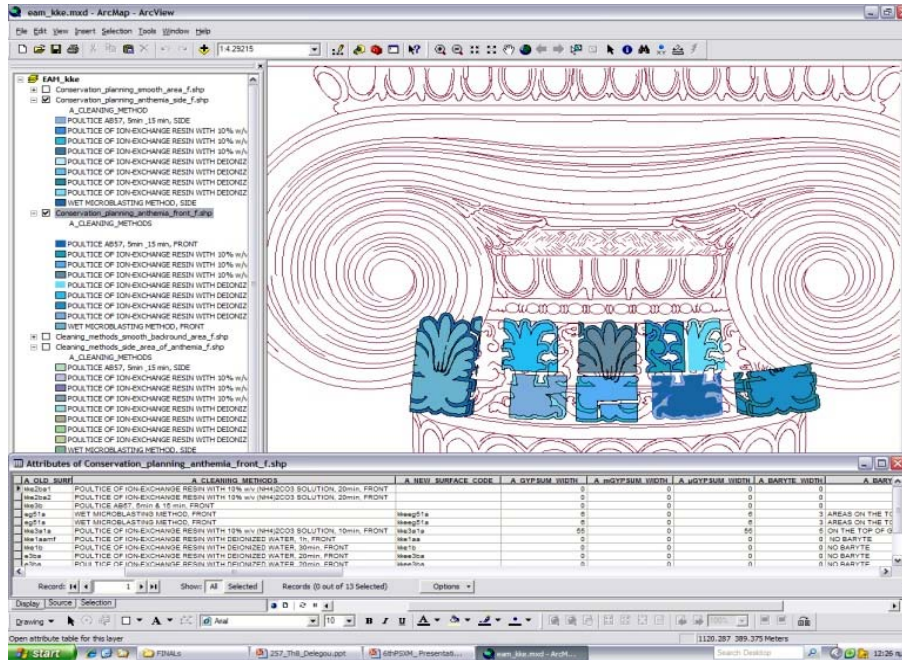


Εικ. 9.2.2.12: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κίονα στο ΕΑΜ (βόρειος προσανατολισμός)

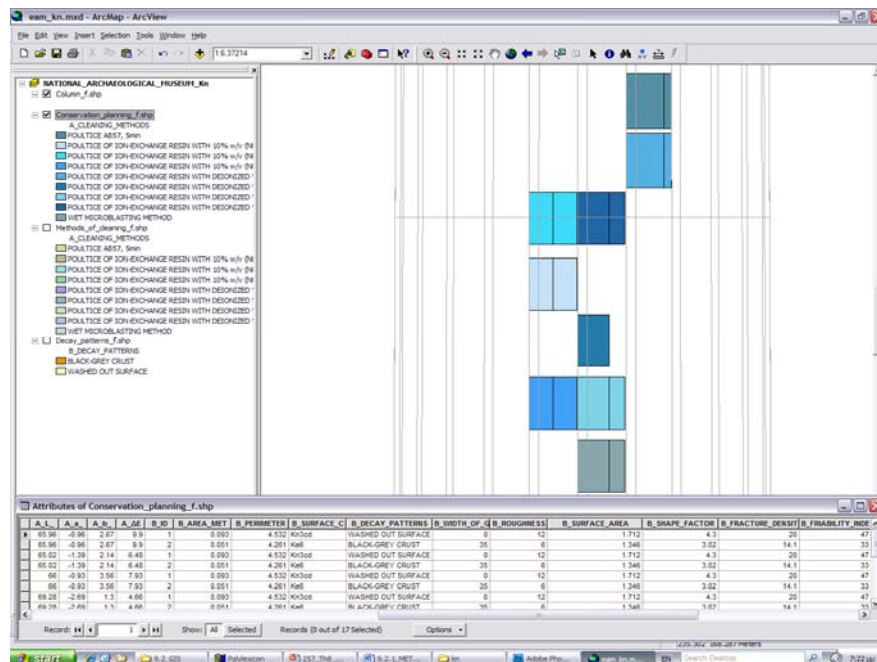
(γ) Διαδικασία ανάλυσης της επικάλυψης

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία ανάλυσης της επικάλυψης, δημιουργήθηκαν οι νέοι θεματικοί χάρτες, του **σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης**, για κάθε εξεταζόμενη αρχιτεκτονική επιφάνεια. Αυτοί οι νέοι χάρτες, που προκύπτουν μετά από εφαρμογή της τομής των χαρτών της διάγνωσης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού της κάθε εξεταζόμενης επιφάνειας, φέρουν το σύνολο των χωρικών και των περιγραφικών δεδομένων των δύο αρχικών χαρτών, επιτρέποντας έτσι τη σύγκριση των μεταβολών τους στις δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους εξέτασης.

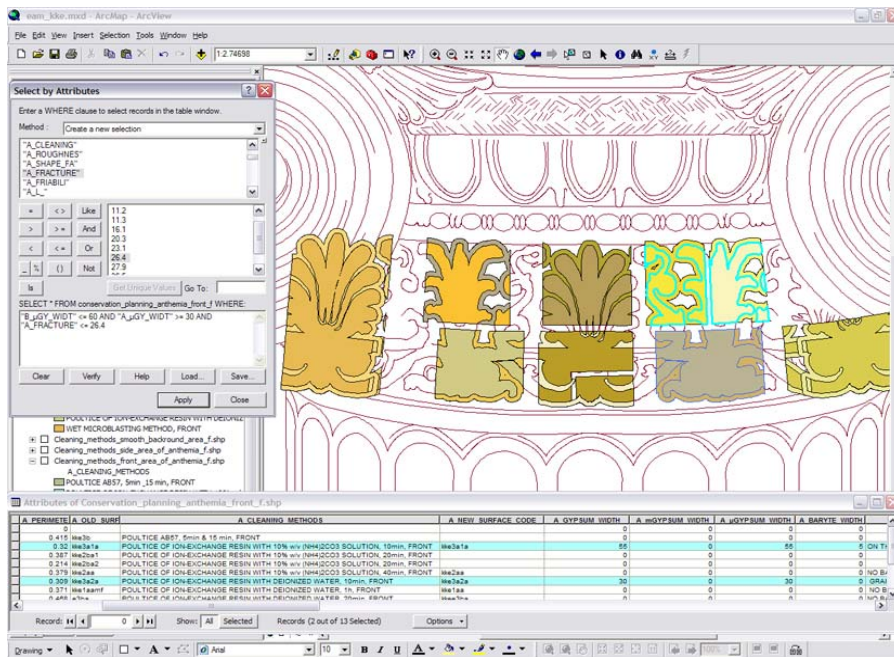
Στις εικόνες 9.2.2.13 και 9.2.2.14, παρουσιάζονται αντιστοίχως οι θεματικοί χάρτες του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την επιφάνεια του κιονόκρανου και του κίονα (βόρειος προσανατολισμός) στο ΕΑΜ, μαζί με τις νέες σχεσιακές βάσεις δεδομένων.



Εικ. 9.2.2.13: Θεματικός χάρτης του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την επιφάνεια του κιονόκρανου, μαζί με τη νέα σχεσιακή βάση δεδομένων για την πρόσθια περιοχή των ανθεμίων, ΕΑΜ



Εικ. 9.2.2.14: Θεματικός χάρτης του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την επιφάνεια του των αποπλυμένων περιοχών του κίονα του ΕΑΜ, μαζί με τη νέα σχεσιακή βάση δεδομένων για την πρόσθια περιοχή των ανθεμίων

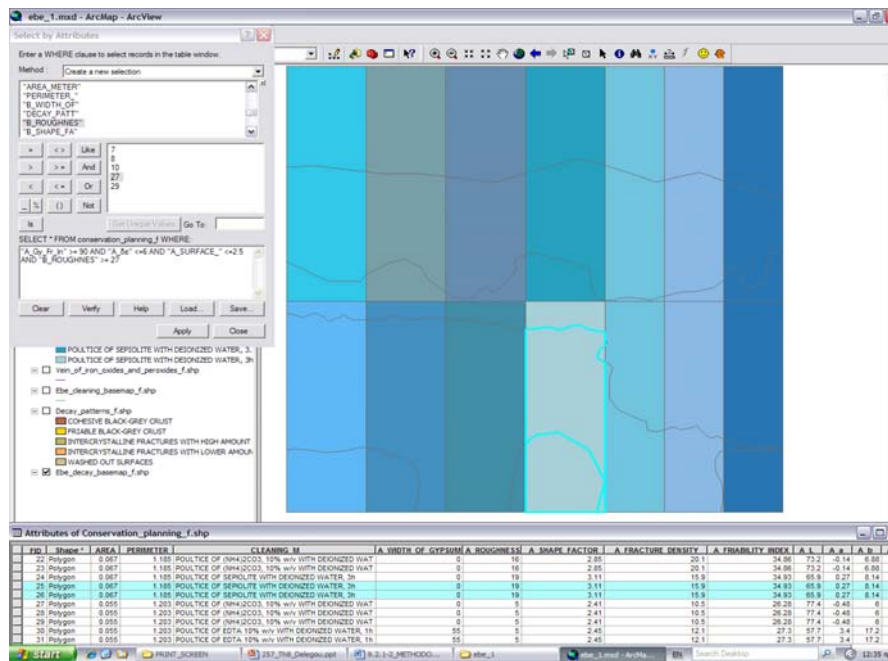


Εικ. 9.2.2.15: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης της νέας ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο EAM

Στην εικ. 9.2.2.15, παρουσιάζεται η δυνατότητα ανάλυσης στο ΓΣΠ μέσω της διαχείρισης της ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κιονόκρανου στο EAM. Οι χωρικές οντότητες που ικανοποιούν την οριζόμενη συνθήκη:

“Περιοχή που το πάχος του στρώματος του μικροκρυσταλλικού γύψου πριν τον καθαρισμό είναι μικρότερο ή ίσο του 60, ΚΑΙ το πάχος του στρώματος του μικροκρυσταλλικού γύψου μετά τον καθαρισμό είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 30, ΚΑΙ η πυκνότητα ρηγματώσεων μετά τον καθαρισμό είναι μικρότερη ή ίση του 26.4”

είναι οι περιοχές της επέμβασης καθαρισμού με ιοντοανταλλακτική ρητίνη και απιονισμένο νερό για 10 λεπτά, καθώς και της επέμβασης καθαρισμού ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου 10% για 10 λεπτά, οι οποίες και εντοπίζονται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα.

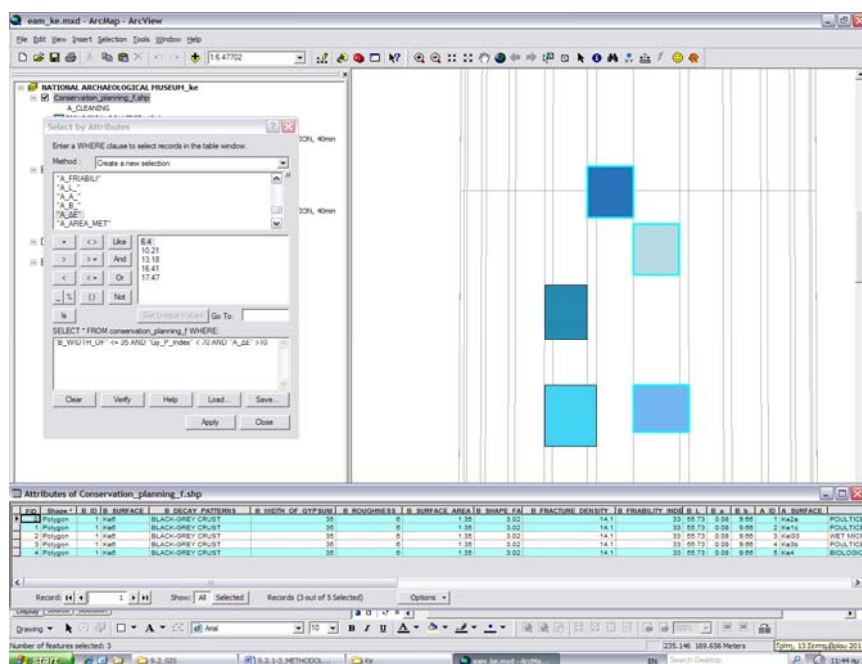


Εικ. 9.2.2.16: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης της νέας ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης της λείας αρχιτεκτονικής επιφάνειας στην ΕΒΕ

Στην εικ. 9.2.2.16, παρουσιάζεται η δυνατότητα ανάλυσης στο ΓΣΠ μέσω της διαχείρισης της ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης της λείας αρχιτεκτονικής επιφάνειας στην ΕΒΕ. Οι χωρικές οντότητες που ικανοποιούν την οριζόμενη συνθήκη:

“Περιοχή που ο βαθμός πλήρωσης των ρηγματώσεων με γύψο μετά τον καθαρισμό είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 90%, ΚΑΙ η συνολική μεταβολή χρώματος είναι μικρότερη ή ίση του 6, ΚΑΙ η ενεργή επιφάνεια μετά τον καθαρισμό είναι μικρότερη ή ίση του 2.5, ΚΑΙ η τραχύτητα πριν τον καθαρισμό είναι μεγαλύτερη ή ίση του 27”

είναι το τμήμα της περιοχής της επέμβασης καθαρισμού με σηπίολιθο και απιονισμένο νερό για 3 ώρες, το οποίο πριν το καθαρισμό άνηκε στις περιοχές των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων με μεσαίο και μικρό ποσοστό μαύρων επικαθήσεων. Η εν λόγω χωρική οντότητα εντοπίζεται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα.

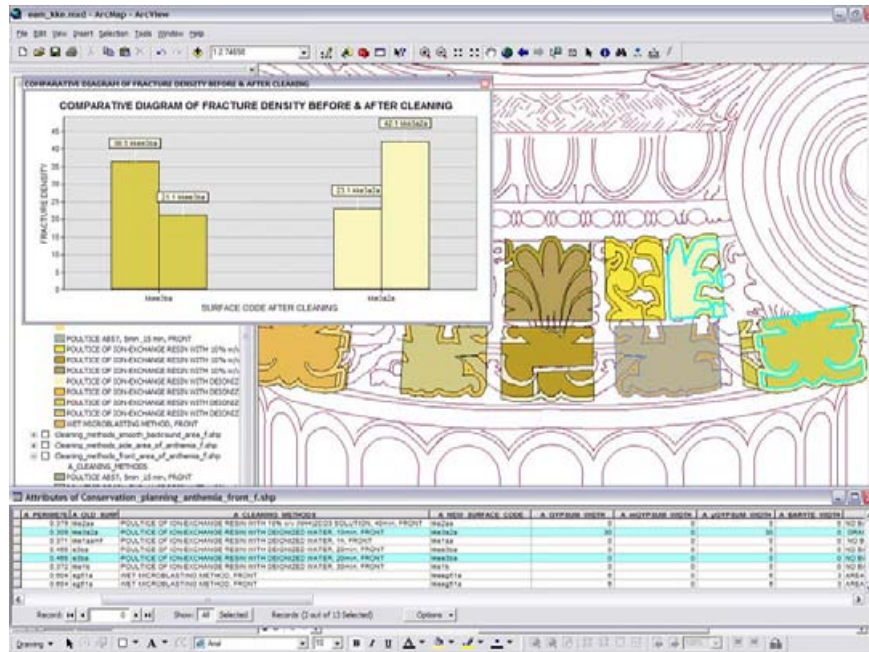


Εικ. 9.2.2.17: Ανάλυση στο ΓΣΠ μέσω διαχείρισης της νέας ΣΒΔ με κριτήρια Boolean άλγεβρας & λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης των ανάγλυφων αρχιτεκτονικών επιφανειών του κίονα (ανατολικός προσανατολισμός) στο EAM

Στην εικ. 9.2.2.17 η εφαρμογή κριτηρίων Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων στη ΣΒΔ του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων καθαρισμού της ανάγλυφης αρχιτεκτονικής επιφάνειας του κίονα ανατολικού προσανατολισμού στο EAM, θέτονται με γνώμονα την οριοθέτηση των ορίων των τιμών κάποιων κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού που υποδεικνύουν τις μη αποδεκτές επεμβάσεις για την εξεταζόμενη επιφάνεια. Οι χωρικές οντότητες που ικανοποιούν την οριζόμενη συνθήκη:

“πάχος στρώματος γύψου πριν τον καθαρισμό *μικρότερο ή ίσο του 35, ΚΑΙ* βαθμός διατήρησης γύψου μετά τον καθαρισμό *μικρότερος του 70, ΚΑΙ* συνολική μεταβολή χρώματος *μεγαλύτερη του 10*”

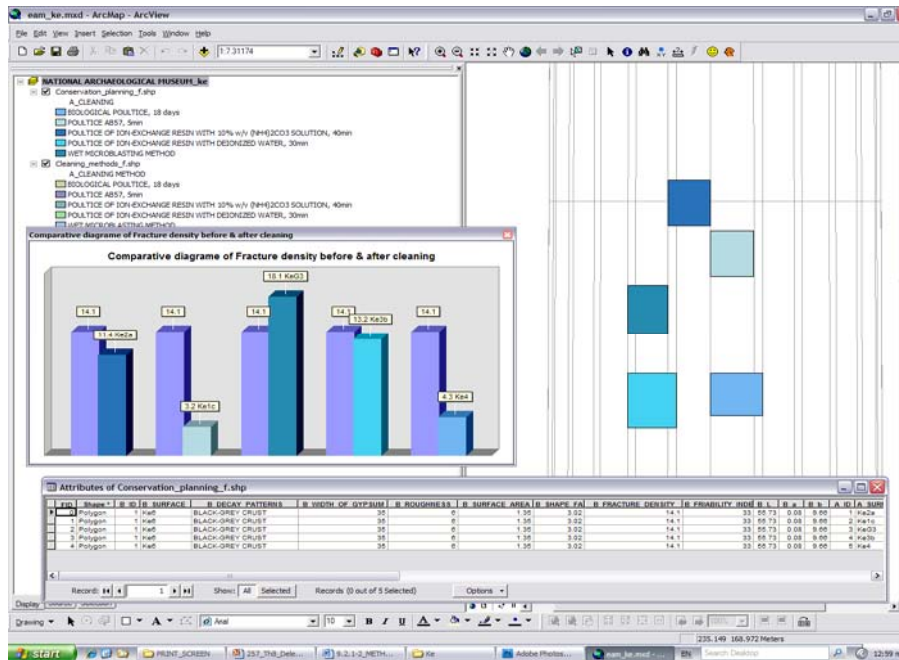
είναι τρεις, αυτή της πάστας AB57 για 5 λεπτά, αυτή της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με δ/μα ανθρακικού αμμωνίου για 40 λεπτά, καθώς και αυτή του βιολογικού επιθέματος, οι οποίες και εντοπίζονται στο χάρτη και τη ΒΔ με μπλε χρώμα.



Εικ. 9.2.2.18: Συγκριτικό διάγραμμα της πυκνότητας ρηγματώσεων πριν και μετά τον καθαρισμό για τις επιφάνειες της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 και 20 λεπτά εφαρμογής, στην πρόσθια ανάγλυφη επιφάνεια των ανθεμίων του κιονόκρανου του ΕΑΜ

Ακόμα μία δυνατότητα διαχείρισης του ΓΣΠ είναι η δημιουργία συγκριτικών διαγραμμάτων περιγραφικών ιδιοτήτων επιλεγμένων χωρικών οντοτήτων. Στην εικ. 9.2.2.18, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα της πυκνότητας ρηγματώσεων πριν και μετά τον καθαρισμό για τις επιφάνειες της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 και 20 λεπτά εφαρμογής, στην πρόσθια ανάγλυφη επιφάνεια των ανθεμίων του κιονόκρανου του ΕΑΜ. Το διάγραμμα δείχνει τη μη αποδεκτή αύξηση της πυκνότητας ρηγματώσεων μετά τον καθαρισμό στην περιοχή εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 20 λεπτά (από 21.1% σε 36.5%), καθώς και τη μείωση σε αποδεκτά επίπεδα της τιμής της πυκνότητας ρηγματώσεων στην περιοχή εφαρμογής της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης με απιονισμένο νερό για 10 λεπτά (από 42.1% σε 23.1%).

Στην εικ. 9.2.2.19, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα της πυκνότητας ρηγματώσεων πριν και μετά τον καθαρισμό για όλες τις περιοχές εφαρμογής στην ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια του κίονα ανατολικού προσανατολισμού στο ΕΑΜ. Έτσι, είναι εφικτή η άμεση και εύκολη σύγκριση του ζητούμενου φ-χ χαρακτηριστικού πριν και μετά τον καθαρισμό στο σύνολο των χαρτογραφημένων περιοχών.



Εικ. 9.2.2.19: Συγκριτικό διάγραμμα της πυκνότητας ρηγματώσεων πριν και μετά τον καθαρισμό για όλες τις περιοχές εφαρμογής στην ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια του κίονα ανατολικού προσανατολισμού στο ΕΑΜ

9.2.3 Μερικά Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η μεθοδολογική συγκρότηση της πλατφόρμας του ΓΣΠ μέσω:

1. της δόμησης των θεματικών υποβάθρων, κατά την οποία λαμβάνει χώρα χωρική ταξινόμηση των τύπων φθοράς και των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού,
2. της κατασκευής των σχεσιακών βάσεων δεδομένων (ΣΒΔ) που φέρουν τα φ-χ χαρακτηριστικά των αντίστοιχων θεματικών χαρτών και συμπεριλαμβάνουν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης του καθαρισμού,
3. της καταγραφής και απόδοσης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών - ιδιοτήτων της σχεσιακής βάσης δεδομένων στις χωρικές οντότητες των θεματικών χαρτών,
4. της διαχείρισης ΣΒΔ με τη χρήση κριτηρίων Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων,
5. της δυνατότητας ενσωμάτωσης ποιοτικών δεδομένων όπως εικόνες μικροσκοπίας κ.ά. και
6. της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης,

δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών.

Η δυνατότητα διαχείρισης των σχεσιακών βάσεων δεδομένων με τη χρήση της άλγεβρας Boolean και των λογικών πράξεων στο θεματικό υπόβαθρο που προκύπτει μέσω της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης, περιλαμβάνει χωρικές και περιγραφικές ιδιότητες πριν και μετά τον καθαρισμό, δηλ. σε διαφορετικούς χρόνους. Είναι προφανές ότι όταν σε μελλοντικές χρονικές περιόδους η σχεσιακή βάση δεδομένων εμπλουτιστεί με νέα στοιχεία

που αφορούν στις κρίσιμες μετρούμενες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια και παράλληλα εφαρμοστεί η διαδικασία ανάλυσης της επικάλυψης, δίνεται η δυνατότητα στον ερευνητή να ελέγχει και να παρακολουθεί στο χρόνο την κατάσταση διατήρησης της καθαρισμένης επιφάνειας (δηλ. την επιδεκτικότητά της στη φθορά) και συνεπώς την ανθεκτικότητά στο χρόνο της επέμβασης καθαρισμού.

Έτσι με τη χρήση του ΓΣΠ δημιουργείται ένα σύστημα διαχείρισης πληροφοριών σχετικών με τα χαρακτηριστικά μια καθαρισμένης επιφάνειας και των μετρούμενων παραμέτρων της, τα οποία καταγράφονται, συσχετίζονται, κατανέμονται, αναλύονται και αποδίδονται στο χώρο σε διαφορετικούς χρόνους.

Επιπλέον, όταν τα κριτήρια που τίθενται από τον ερευνητή, κατά τη διαδικασία ανάλυσης των ΣΒΔ με τη χρήση της άλγεβρας Boolean και των λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού ή/και του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης, εκφράζουν τα όρια των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού που υποδεικνύουν τη βέλτιστη, τη μέτρια ή τη μη αποδεκτή επέμβαση, τότε το ΓΣΠ μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην ταξινόμηση των καθαρισμών σε σχέση με την αποτελεσματικότητά τους.

Η ειδοποιός διαφορά στην ταξινόμηση των επεμβάσεων καθαρισμού βάσει της αποτελεσματικότητάς τους με χρήση ΓΣΠ (σε αντιδιαστολή με τη χρήση του μοντέλου της ασαφούς λογικής) είναι ότι στα ΓΣΠ οι μετρούμενες παράμετροι και τα όρια αποδοχής τους διαμορφώνονται σε διακριτά σύνολα κατά περίπτωση, ανάλογα με τις συνθήκες που ο ερευνητής θέλει να πληρούν οι χωρικές οντότητες που προσπαθεί να εντοπίσει με τη χρήση της Boolean άλγεβρας ή και των λογικών πράξεων. Σε αντιδιαστολή, στο σύστημα λήψης απόφασης με τη χρήση της μη παραμετρικής μεθόδου της ασαφούς λογικής, (που αποτελεί κατ' ουσία επέκταση ή και γενίκευση της παραδοσιακής Boolean λογικής), περιλαμβάνονται μόνο οι συγκεκριμένες κατόπιν επιλογής κρίσιμες μετρούμενες παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια, ενώ τα αποδεκτά όρια των παραμέτρων αυτών είναι προκαθορισμένα, επαναλαμβανόμενα και κατηγοριοποιημένα σε ασαφή σύνολα από τον εμπειρογνώμονα.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη εφαρμογή του ΓΣΠ, ξεπερνά τη συνήθη χρήση του ως εργαλείο απεικόνισης της παθολογίας ενός μνημείου και αναδεικνύει τη δυνατότητα της χρήσης του ως μεθοδολογικό εργαλείο ελέγχου της κατάστασης διατήρησης των μαρμάρινων επιφανειών στο χρόνο. Προτείνεται δηλ. και η εντοπισμένη χρήση του στην κλίμακα των αντιπροσωπευτικών επιφανειών ενός κτιρίου, όπου λαμβάνουν χώρα η διάγνωση της φθοράς και οι πιλοτικές επεμβάσεις καθαρισμού. Δια αυτού του τρόπου η παρακολούθηση στο χρόνο πραγματοποιείται σε ελεγχόμενη κλίμακα εργασίας, βελτιώνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τις χωρικές, χρονικές, διαχειριστικές και οικονομικές παραμέτρους που προκύπτουν σε μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς, όπως η αποτίμηση του κύκλου ζωής των δομικών υλικών και κατασκευών (Life Cycle Assessment - LCA). Παράλληλα, καθίσταται πιο εύκολη η έγκαιρη διάγνωση της επανεμφανιζόμενης φθοράς μετά τον καθαρισμό και η καλύτερη κατανόηση και αποκωδικοποίηση των μηχανισμών φθοράς με στόχο τον καλύτερο σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του κάθε εξεταζόμενου κτιρίου.

ΧΑΡΤΗΣ Ρ1: ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ






ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

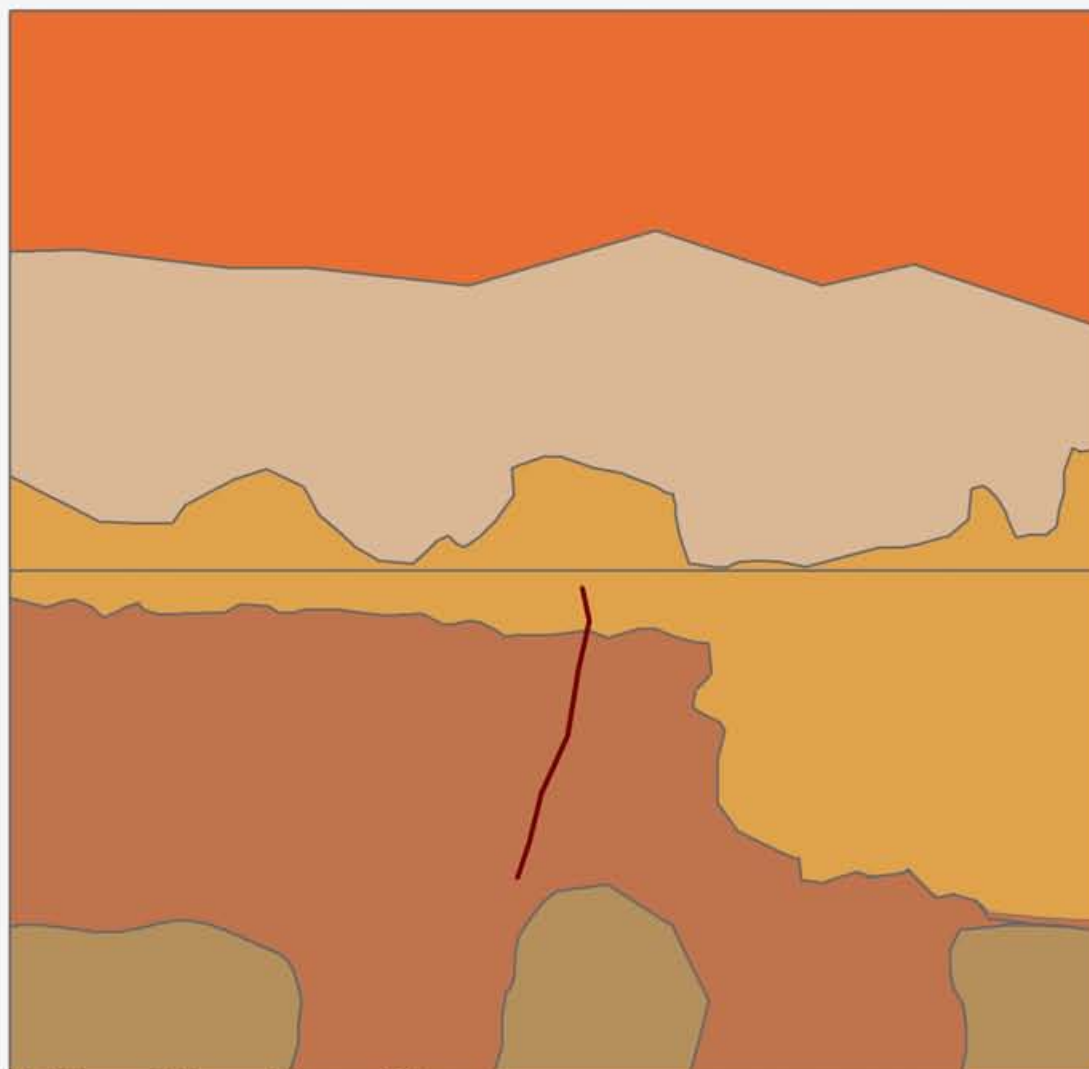
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

— ΦΛΕΒΑ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ

ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ

-  ΣΥΝΕΚΤΙΚΗ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ
-  ΕΥΘΡΥΠΤΗ ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ
-  ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΥΨΗΛΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ
-  ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ
-  ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΥΡΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ



0 0,05 0,1 0,2 0,3 0,4

 Meters

ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ ΕΘΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΧΑΡΤΗΣ Ρ2: ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ











ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

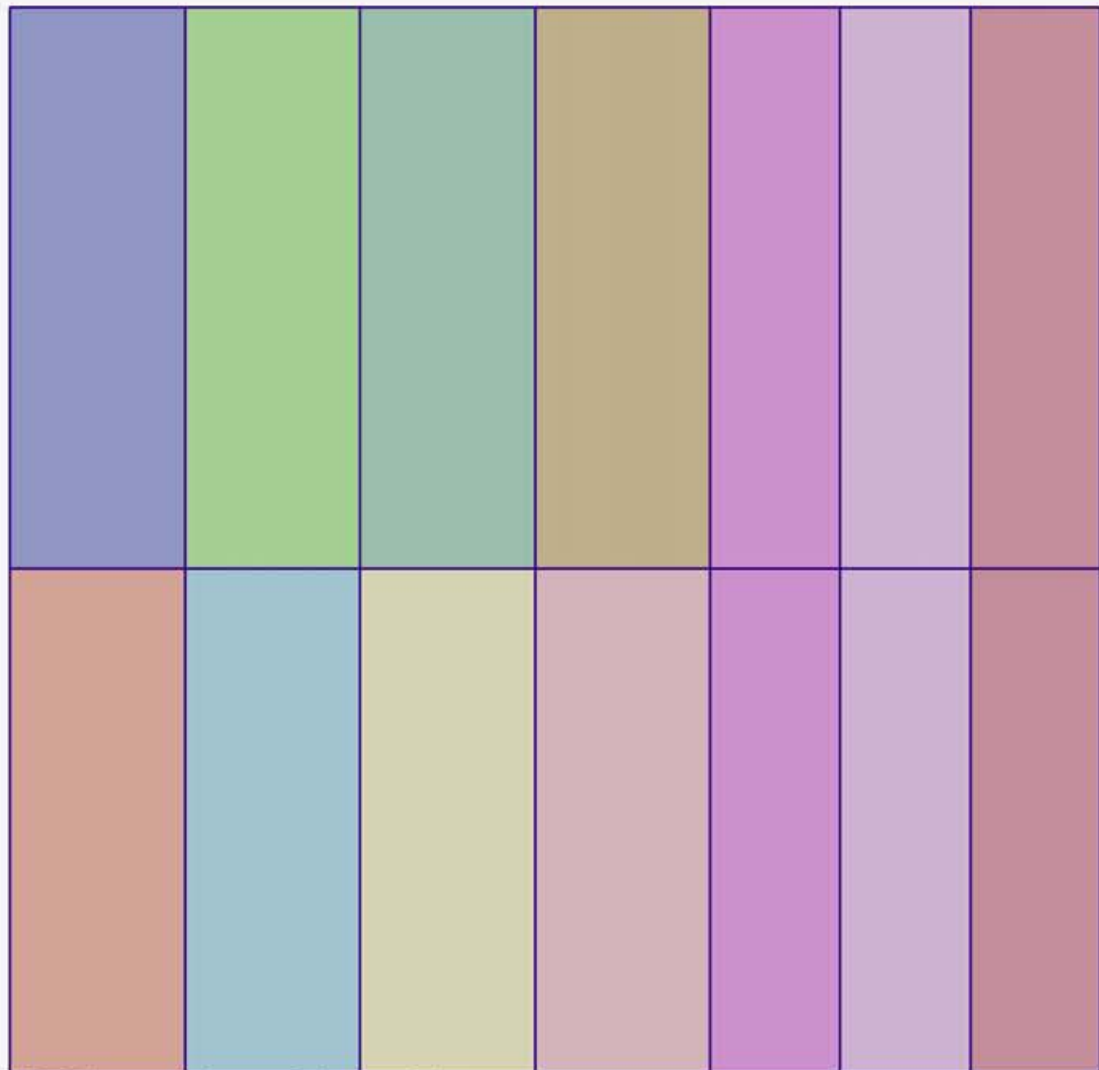
ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

 ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1.5h	 ΠΑΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10% w/v, 1h
 ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 1h	 ΠΑΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ (NH ₄) ₂ CO ₃ , 10% w/v, 2h
 ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 2h	 ΠΑΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ EDTA 10% w/v, 1h
 ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 1.5h	 ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3.5h
 ΠΑΣΤΑ ΜΟΡΑ, 2h	 ΠΑΣΤΑ ΣΗΠΙΟΛΙΘΟΥ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 3h



0 0,05 0,1 0,2 0,3 0,4

 Meters

ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ ΕΘΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΧΑΡΤΗΣ ΚΕ1: ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ



ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΨΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ



ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ

0 5 10 20 30 40
 Centimeters

ΧΑΡΤΗΣ ΚΕ2: ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ



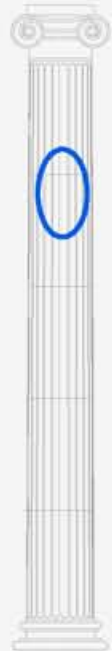
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ






ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

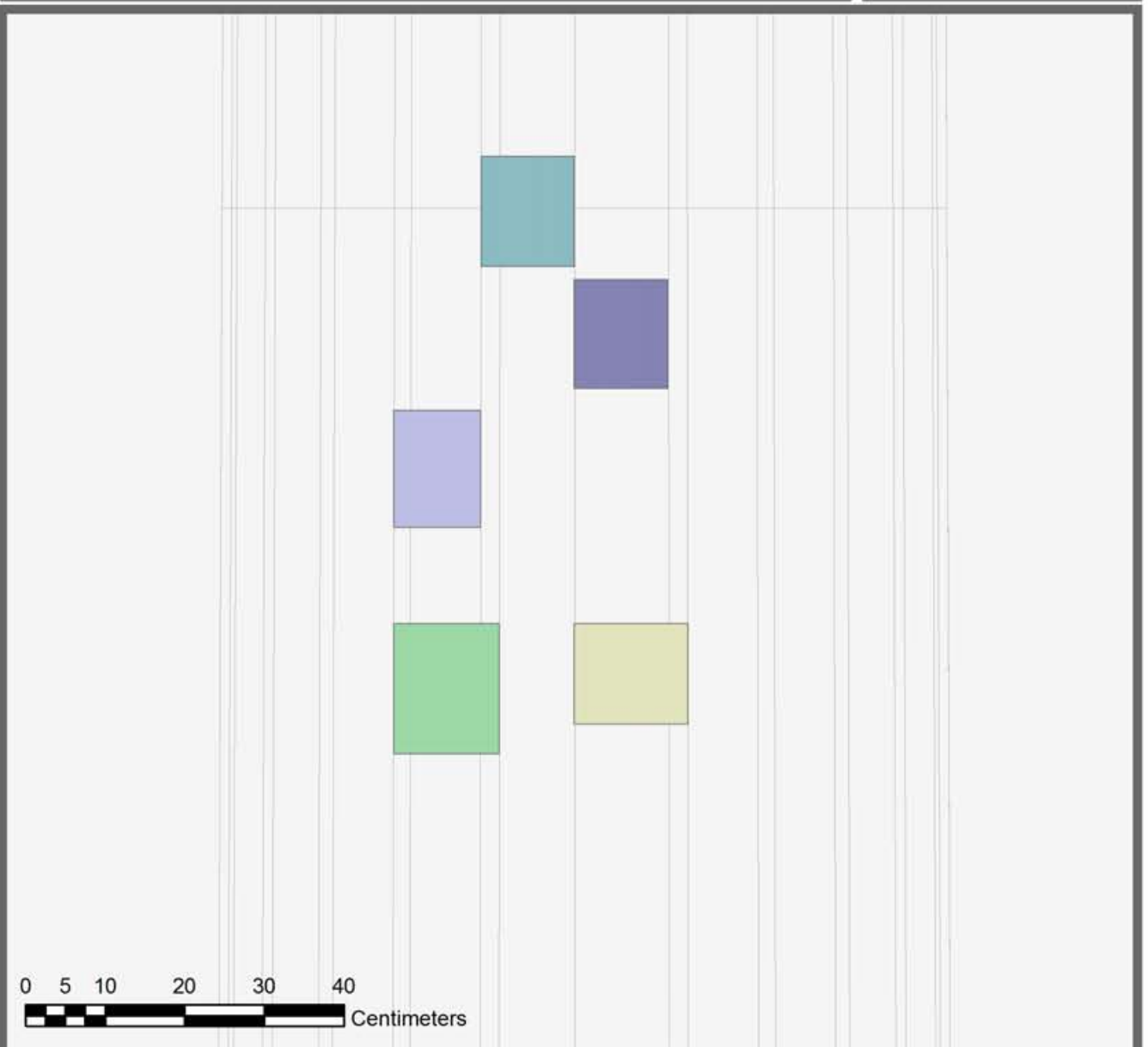


ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΠΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

-  ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ
-  ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min
-  ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, 40min
-  ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min
-  ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ



ΧΑΡΤΗΣ ΚΝ1: ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ



ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΨΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

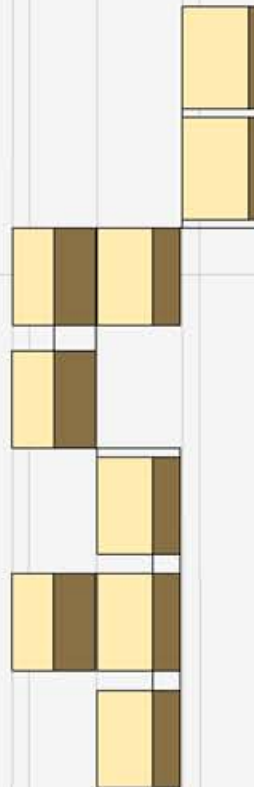
ΥΠΟΜΝΗΜΑ



ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ



ΑΠΟΠΛΥΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ



0 5 10 20 30 40
Centimeters

ΧΑΡΤΗΣ ΚΝ2: ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

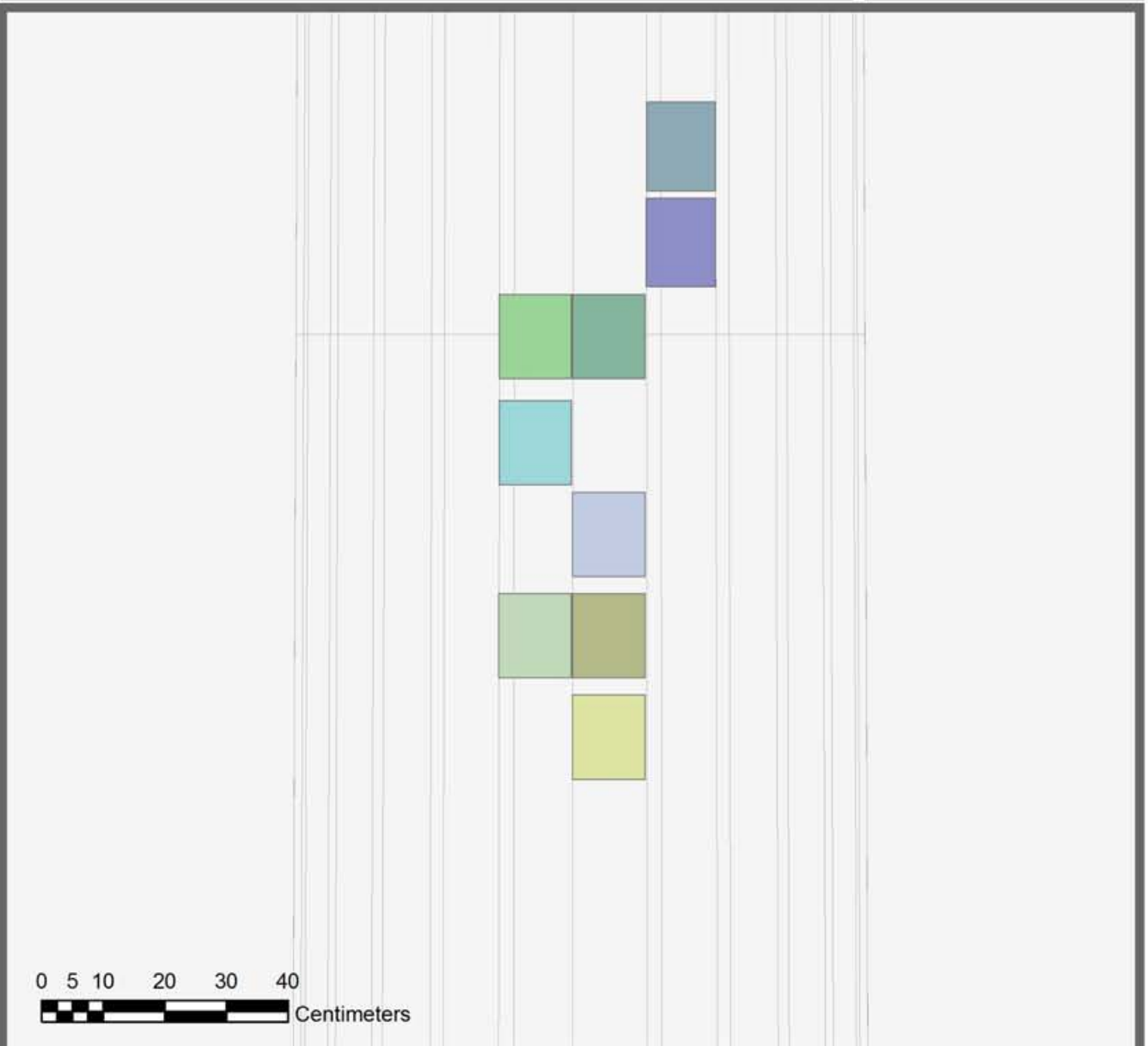


ΒΟΡΕΙΑ ΟΨΗ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΨΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

- ΠΑΣΤΑ ΑΒ57, 5min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 10min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 20min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 2x10min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 2x20min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 40min
- ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ



ΧΑΡΤΗΣ ΚΚΕ1: ΤΥΠΟΙ ΦΘΟΡΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ



ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

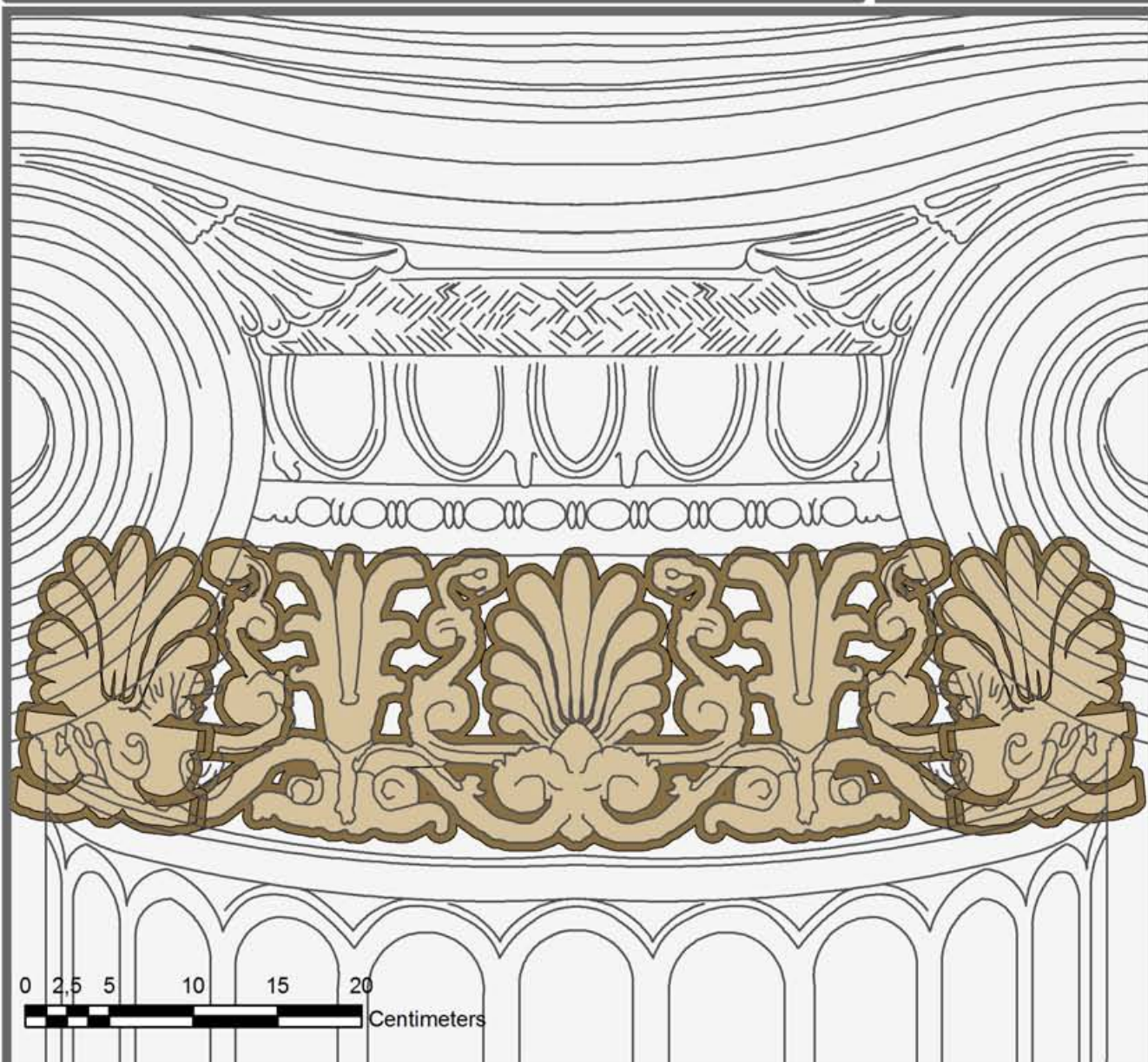
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ



ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΨΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

-  ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ ΠΛΑΓΙΑΣ ΟΨΗΣ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ
-  ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ ΠΡΟΣΘΙΑΣ ΟΨΗΣ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ



ΧΑΡΤΗΣ ΚΚΕ2: ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ



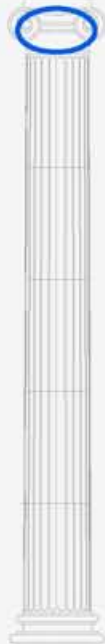
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΑΡΜΑΡΙΝΕΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΙΝΑ Θ. ΔΕΛΕΓΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘ. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ



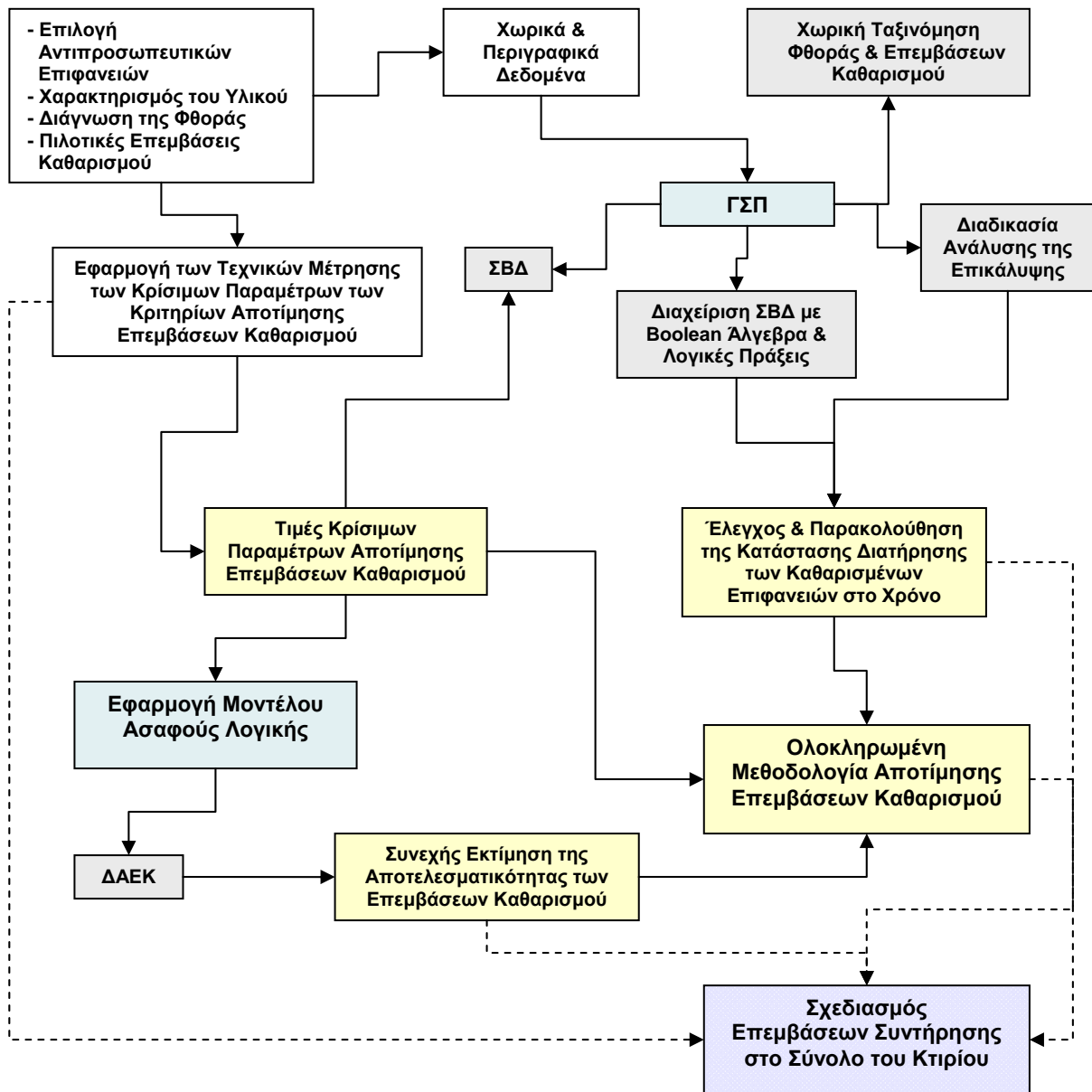
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ ΚΙΟΝΟΚΡΑΝΟΥ
ΒΟΡΕΙΟΥ ΚΙΟΝΑ ΠΡΟΣΩΨΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- ΠΑΣΤΑ AB57, 5min & 15 min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 10min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 20min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ 10% w/v ΔΙΑΛΥΜΑ $(NH_4)_2CO_3$, 40min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 10min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 1h
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 20min
- ΠΑΣΤΑ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ, 30min
- ΥΓΡΗ ΜΙΚΡΟΨΗΓΜΑΤΟΒΟΛΗ



9.3 Συμπεράσματα σε σχέση με την Ολοκληρωμένη Μεθοδολογία Αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού



Εικ. 9.3.1 Διάγραμμα Ροής Ολοκληρωμένης Μεθοδολογίας Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού

Από τη συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων των κεφαλαίων 8, 9.1 και 9.2 σε ότι αφορά επεμβάσεις καθαρισμού που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές μαρμάρου που παρουσιάζουν τους τύπους φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών, των αποπλυμένων επιφανειών και των περικρυσταλλικών ρηγματώσεων, προκύπτει ότι εφόσον:

- έχουν προσδιορισθεί τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, οι κρίσιμες παράμετροι που τα διέπουν, καθώς και οι τεχνικές μέτρησης των παραμέτρων αυτών,
- μπορεί να λάβει χώρα η συνεχής εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού με την εφαρμογή του μοντέλου ασαφούς λογικής,

➤ μπορεί να λάβει χώρα ο έλεγχος και η παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο με τη χρήση του ΓΣΠ, καθίσταται εφικτή η συγκρότηση της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού.

Συνεπώς, η **ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού**, όπως παρουσιάζεται και διαγραμματικά στην εικ.9.3.1, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών επιφανειών στο εξεταζόμενο κτίριο, βάσει προσεκτικών μακροσκοπικών παρατηρήσεων σε σχέση με τα παρουσιαζόμενα δομικά υλικά των όψεων και τους τύπους φθοράς,
2. Χαρακτηρισμός του υλικού και διάγνωση της φθοράς – καταγραφή των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς,
3. Επιλογή υλικών και επεμβάσεων καθαρισμού, βάσει του τύπου φθοράς και του δομικού υλικού, της σχετικής βιβλιογραφίας, της προηγούμενης εμπειρίας, το είδος της αρχιτεκτονικής επιφάνειας,
4. Εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού σε πιλοτική κλίμακα, δηλ. στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες,
5. Εφαρμογή των τεχνικών μέτρησης των κρίσιμων παραμέτρων χαρακτηρισμού των καθαρισμένων επιφανειών στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες ελέγχου,
6. Εισαγωγή των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού στο μοντέλο της ασαφούς λογικής για την εξαγωγή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) και ταξινόμηση των πιλοτικών επεμβάσεων σε μη αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές, καλές – προτεινόμενες, βάσει των αντίστοιχα διαμορφωμένων ορίων,
7. Χρήση της πλατφόρμας του ΓΣΠ για τον έλεγχο και παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, μέσω:
 - Της χωρικής ταξινόμησης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες εξέτασης,
 - Της κατασκευής σχεσιακών βάσεων δεδομένων (ΣΒΔ), που περιλαμβάνουν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού,
 - Της διαχείρισης των ΣΒΔ με κριτήρια άλγεβρας Boolean και λογικών πράξεων,
 - Της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης,
7. Επανάληψη των σταδίων 5,6,7 σε εύλογο χρονικό διάστημα στο μέλλον και σχεδιασμός των επεμβάσεων συντήρησης στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του εξεταζόμενου κτιρίου, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι δυστυχώς το χρονικό πλαίσιο επανελέγχου των πιλοτικών εφαρμογών δεν είναι σαφές εξαιτίας των δυσκολιών που ήδη περιγράφηκαν στο κεφ. 8, οι οποίες και συνοψίζονται κυρίως στην αντικειμενική δυσκολία ακόμα και της απαραίτητης δειγματοληψίας. Δεν είναι σαφές αν η επανεξέταση πρέπει να πραγματοποιηθεί μετά από μήνες και πόσους ή χρόνια και πόσα, από την εφαρμογή των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού. Γνωρίζοντας ότι οι μακροπρόθεσμες αισθητικές και δομικές ιδιότητες του

μαρμάρου συνδέονται στενά με την πλευρική και κάθετη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων και των αλάτων - γύψου, καθώς και με τη συνοχή των κόκκων της μήτρας του υλικού, και συνεπώς με την εκάστοτε επέμβαση καθαρισμού που μεταβάλλει αυτές τις ιδιότητες, καθίσταται βάσιμη η ερώτηση:

Ποιο είναι το κρίσιμο χρονικό διάστημα όπου οι μεταβολές των παραπάνω παραμέτρων θα είναι τέτοιες που θα μπορούν να καταγραφούν αξιόπιστα και θα έχουν λάβει μετρήσιμα διαφορετικές τιμές ανάλογα με την επέμβαση καθαρισμού;

Το γεγονός αυτό (που επαφίεται να διερευνηθεί στο μέλλον), αναδεικνύει για ακόμα μία φορά την αναγκαιότητα της συστηματικής χρήσης τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου και κυρίως της βαθμονόμησής τους. Η βαθμονόμηση των μη καταστρεπτικών τεχνικών θα άρει το πρόβλημα της δειγματοληψίας ή θα το περιορίσει σημαντικά. Προς αυτή την κατεύθυνση μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά και οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης, διαμορφώνοντας τις συνθήκες προσομοίωσης των πιο χαρακτηριστικών τύπων φθοράς, όπως των φαιόμαυρων κρουστών και των αποπλυμένων επιφανειών.

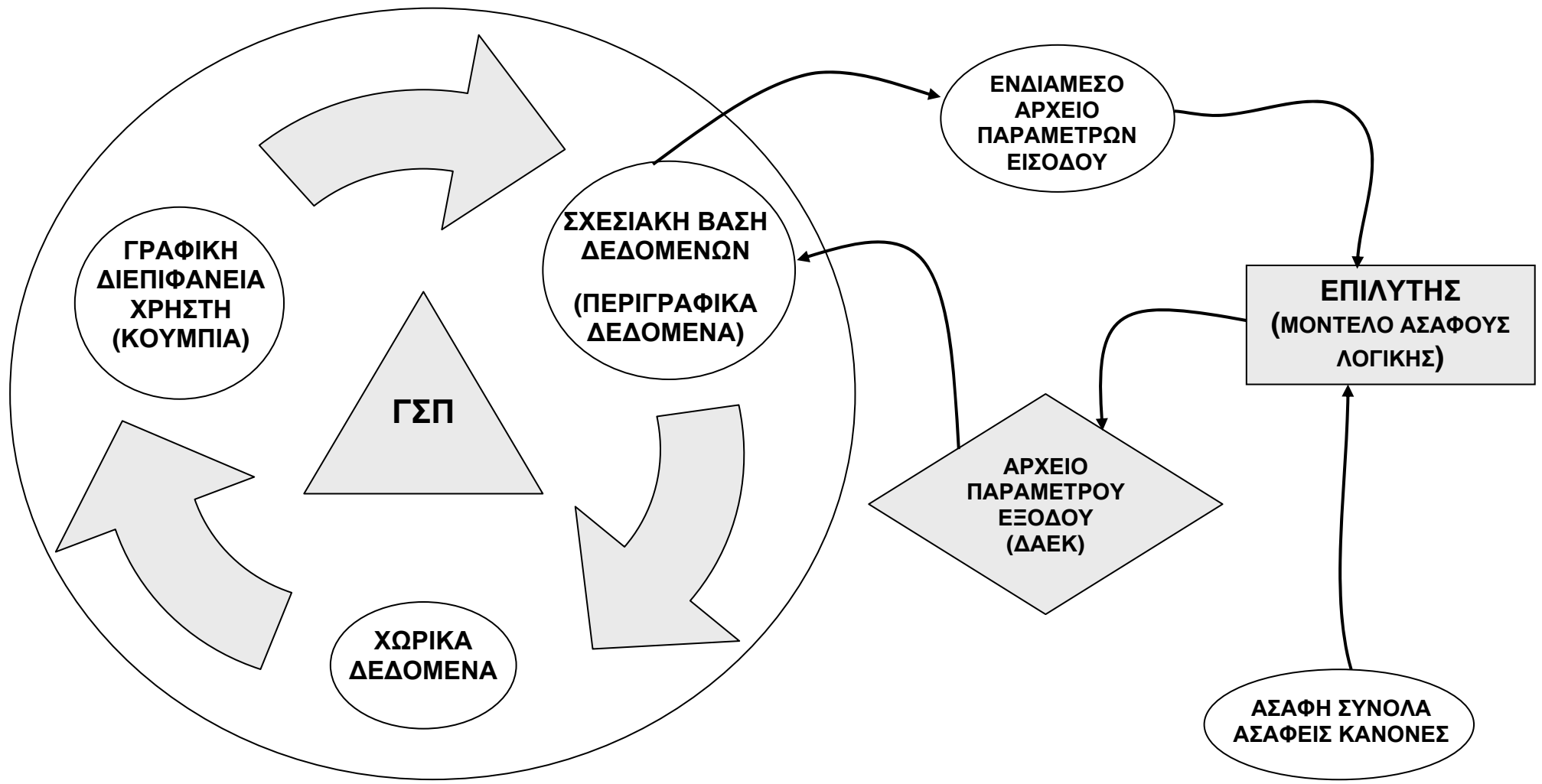
10. Στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων καθαρισμού – Ολοκληρωμένο Σύστημα Λήψης Απόφασης για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού στο χρόνο – Τελικά συμπεράσματα

10.1 Αρχιτεκτονική του Ολοκληρωμένου Συστήματος Λήψης Απόφασης για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού

Ο στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού, ορίζεται και υλοποιείται από το σύνολο των σχεδιασμένων χειρισμών - διαδικασιών που θα επιτύχει το στόχο του ελέγχου και της παρακολούθησης της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, με απώτερο στόχο και σκοπό τον προγραμματισμό των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης. Για να πραγματοποιηθεί λοιπόν, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύστημα το οποίο θα έχει τη δυνατότητα καταγραφής, συσχέτισης και διαχείρισης των κρίσιμων μετρούμενων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια, καθώς και τη δυνατότητα απόκρισης σε σχέση με την αποτελεσματικότητα του εκάστοτε καθαρισμού, με συγκεκριμένες παραμέτρους και όρια αποδοχής σε κάθε χρονική στιγμή, σε συγκεκριμένη χωρικά επιφάνεια. Έτσι, η ενσωμάτωση του μοντέλου ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού στην πλατφόρμα του ΓΣΠ, δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς απόκρισης σε σχέση με την αποτελεσματικότητα των καθαρισμών με δεδομένες παραμέτρους και αποδεκτά όρια σε κάθε χρονική στιγμή, σε συγκεκριμένη χωρικά επιφάνεια, αναπτύσσοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού.

Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος παρουσιάζεται στην εικ. 10.1.1. Πιο συγκεκριμένα, εξάγονται οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης για κάθε μία πιλοτική επέμβαση καθαρισμού από τα αντίστοιχα πεδία της ΣΒΔ του θεματικού χάρτη των επεμβάσεων καθαρισμού σε ενδιάμεσο αρχείο. Το αρχείο αυτό τροφοδοτεί τον επιλύτη (δηλ. το μοντέλο της ασαφούς λογικής) με τις τιμές των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης, οι οποίες και αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου του συστήματος. Στη συνέχεια καλείται ο εκτελέσιμος κώδικας, καθώς και τα ασαφή σύνολα και οι ασαφείς κανόνες από το μοντέλο της ασαφούς λογικής και τα αποτελέσματα της παραμέτρου εξόδου δηλ. του ΔΑΕΚ (Δείκτης Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού) που προκύπτουν για κάθε εξεταζόμενο καθαρισμό, αποθηκεύονται σε νέο ενδιάμεσο αρχείο. Το ενδιάμεσο αυτό αρχείο που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της παραμέτρου εξόδου ανακαλείται από το περιβάλλον του ΓΣΠ και οι τιμές του ΔΑΕΚ αποθηκεύονται στη ΣΒΔ του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης. Για να λάβουν χώρα τα παραπάνω, χρησιμοποιείται κατ' ουσία η γραφική διεπιφάνεια του ΓΣΠ από τον χρήστη, αφού δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον κουμπιά που ενεργοποιούνται για τη δημιουργία των δύο ενδιάμεσων αρχείων. Το πρώτο εξάγει τις τιμές των παραμέτρων εισόδου από τη ΣΒΔ του ΓΣΠ και το δεύτερο εισάγει και αποθηκεύει τις τιμές της παραμέτρου εξόδου στη ΣΒΔ του ΓΣΠ, αφού εκτελεστεί ο κώδικας του μοντέλου της ασαφούς λογικής.

Βάσει της παραπάνω αρχιτεκτονικής, κατασκευάστηκαν 4 ολοκληρωμένα συστήματα λήψης απόφασης για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού, ένα για κάθε μία από τις εξεταζόμενες μαρμάρινες επιφάνειες αυτής της διατριβής, που αφορούν στους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς της φαιόμαυρης κρούστας στο ΕΑΜ



Εικ.10.1.1: Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένου Συστήματος Λήψης Απόφασης για την Αποτίμηση Επεμβάσεων Καθαρισμού



Εικ. 10.1.2: Επιπλέον κουμπιά στη γραφική διεπιφάνεια του ΓΣΠ για τη δημιουργία των ενδιάμεσων αρχείων των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου του επιλύτη

(ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα και του κιονόκρανου) και στην ΕΒΕ (λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες), των αποπλυμένων επιφανειών στο ΕΑΜ (ανάγλυφες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του κίονα) και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου στην ΕΒΕ (λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες).

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι το ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού διαθέτει αφενός τις διαχειριστικές και γραφικές δυνατότητες του ΓΣΠ και αφετέρου τη δυνατότητα του μοντέλου της ασαφούς λογικής για τη συνεχή απόκριση σε σχέση με την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού σε άμεσο χρόνο.

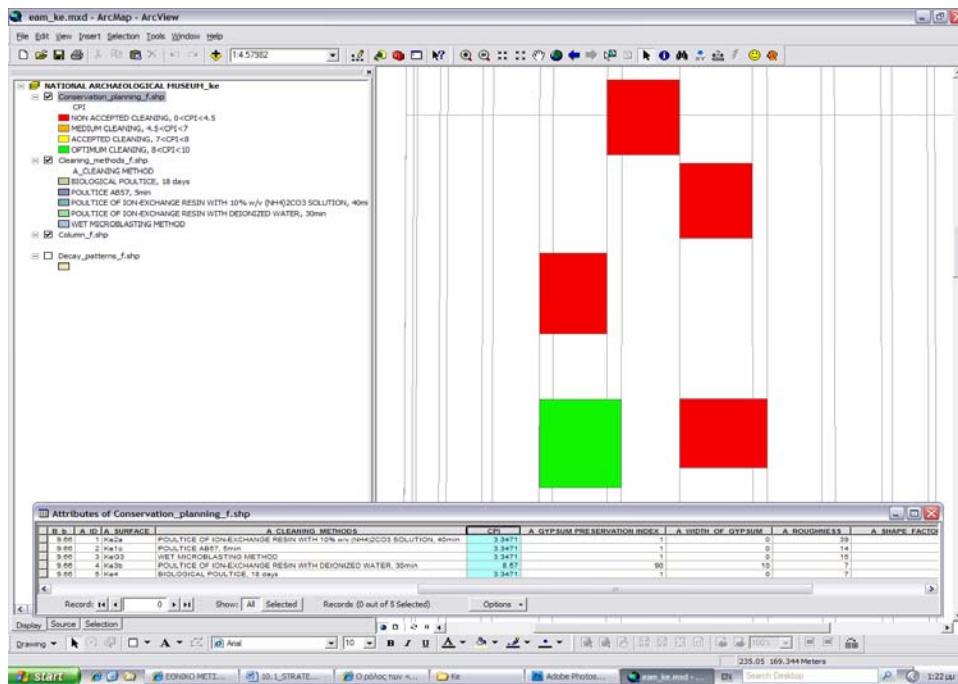
Αξιοποιώντας τις δυνατότητες του ΓΣΠ, έλαβε χώρα χαρτογραφική απόδοση του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης, μέσω της ομαδοποίησης και της διαμόρφωσης κλάσεων των τιμών του, χρησιμοποιώντας την ταξινόμηση και τα όρια της παραμέτρου εξόδου του μοντέλου της ασαφούς λογικής, εκφρασμένα όμως πλέον σε διακριτά σύνολα. Η ομαδοποιημένη χαρτογραφική απόδοση του ΔΑΕΚ έλαβε χώρα για κάθε μία από τις εξεταζόμενες επιφάνειες και παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες 10.1.3, 10.1.4, 10.1.5, 10.1.6, 10.1.7 και 10.1.8. Η ομαδοποίηση του ΔΑΕΚ έγινε χρησιμοποιώντας τις κλάσεις και τα χρώματα του παρακάτω πίνακα για όλες τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

ΧΡΩΜΑ	ΚΛΑΣΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΚΟΚΚΙΝΟ	$0 < \Delta\text{ΑΕΚ} < 4.5$	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	$4.5 < \Delta\text{ΑΕΚ} < 7$	ΜΕΤΡΙΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ
ΚΙΤΡΙΝΟ	$7 < \Delta\text{ΑΕΚ} < 8$	ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ
ΠΡΑΣΙΝΟ	$8 < \Delta\text{ΑΕΚ} < 10$	ΚΑΛΟΣ – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

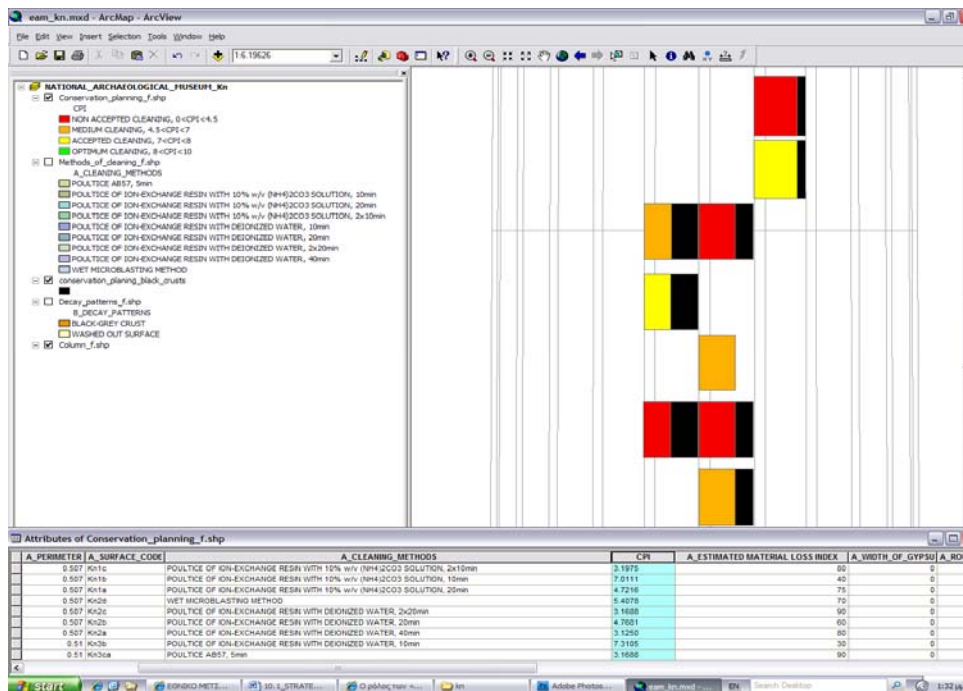
Η δυνατότητα του ΓΣΠ να ομαδοποιεί τα δεδομένα σε κλάσεις, διαθέτει το επιπλέον πλεονέκτημα του ότι, όταν η τιμή του ΔΑΕΚ αλλάξει κλάση (εισάγοντας προφανώς νέα δεδομένα στη ΣΒΔ), αυτόματα διαφοροποιείται στο χάρτη το χρώμα της αντίστοιχης χωρικής οντότητας (δηλ. επέμβασης καθαρισμού) υποδεικνύοντας τη νέα κλάση στην οποία ταξινομείται ο καθαρισμός. Αυτό σηματοδοτεί τη χρήση ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος λήψης απόφασης για την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων καθαρισμού, το οποίο παράλληλα περιλαμβάνει χωρικά και περιγραφικά δεδομένα.

Οι δείκτες παρακολούθησης της κατάστασης διατήρησης της επιφάνειας είναι οι παράμετροι εισόδου στο μοντέλο της ασαφούς λογικής που ορίζονται από τις γλωσσολογικές μεταβλητές του μοντέλου και παράλληλα αποτελούν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού. Όταν ενεργοποιώντας τον επιλύτη οι νέες τιμές των δεικτών αυτών δώσουν για την προτεινόμενη – εφαρμοσθείσα επέμβαση καθαρισμού τιμή $4.5 < \Delta\text{ΑΕΚ} < 7$ (κλάση του

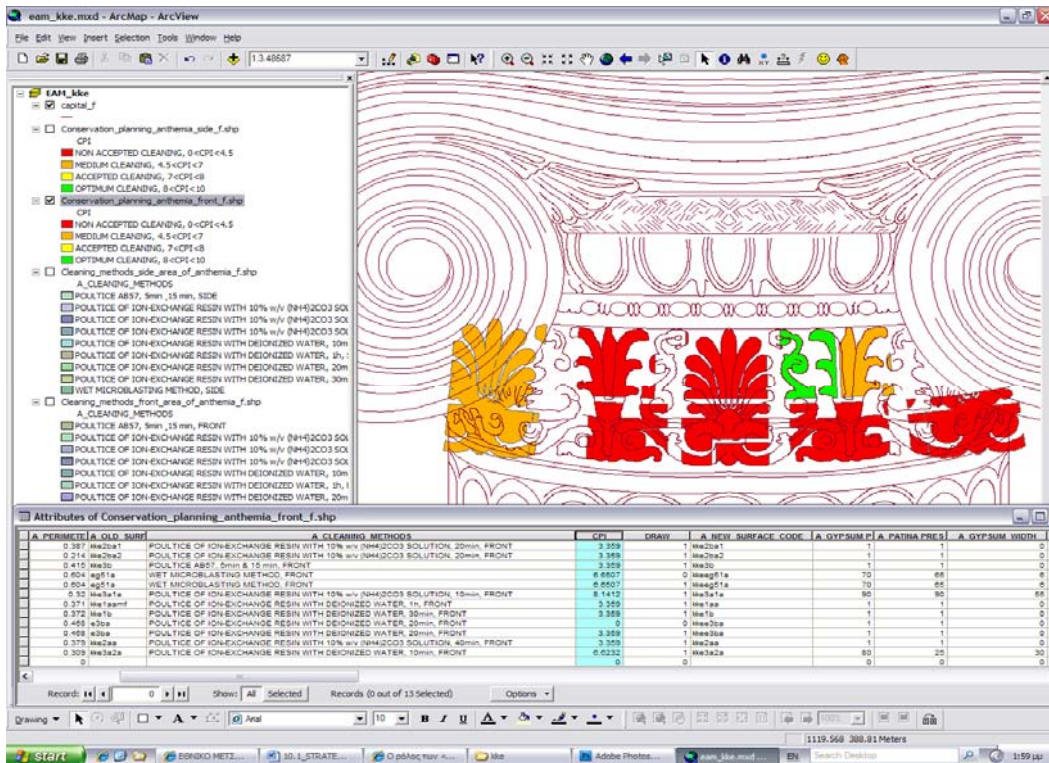
μέτριου καθαρισμού που κυρίως εκφράζει τον ατελή καθαρισμό), τότε πρέπει να προγραμματιστούν νέες επεμβάσεις καθαρισμού, στο πλαίσιο των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης, στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του μνημείου του αντίστοιχου τύπου φθοράς.



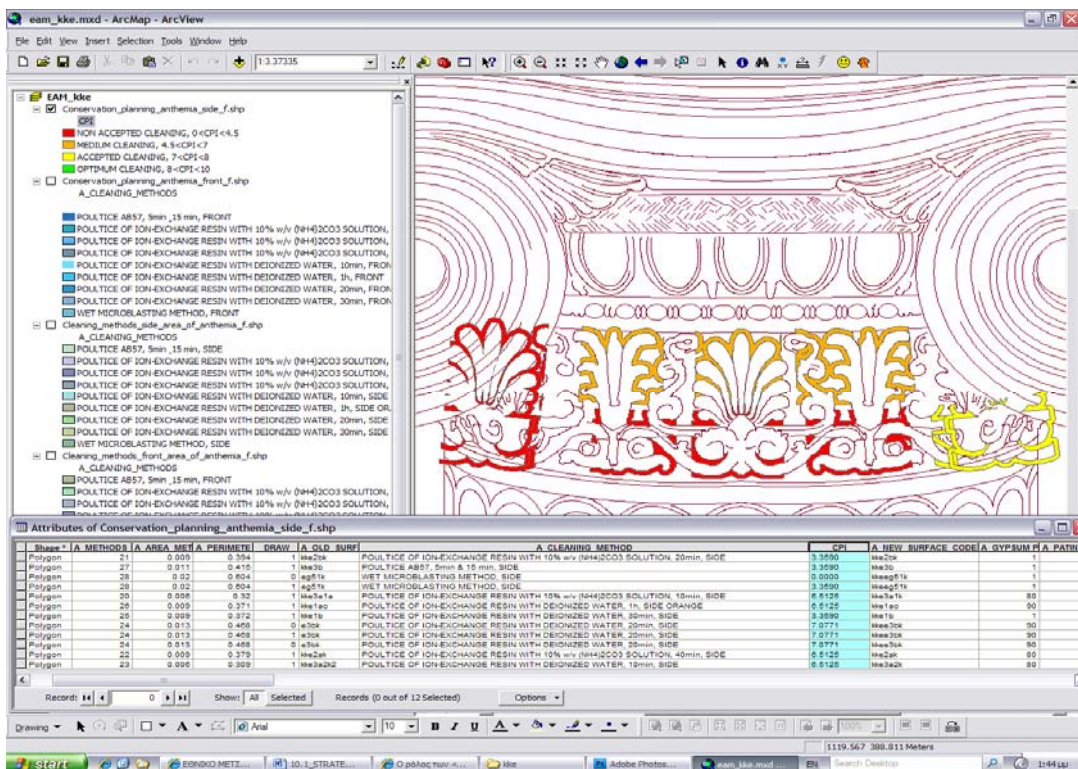
Εικ. 10.1.3: Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την αρχιτεκτονική επιφάνεια των φαιόμαυρων κρουστών του κίονα στο ΕΑΜ



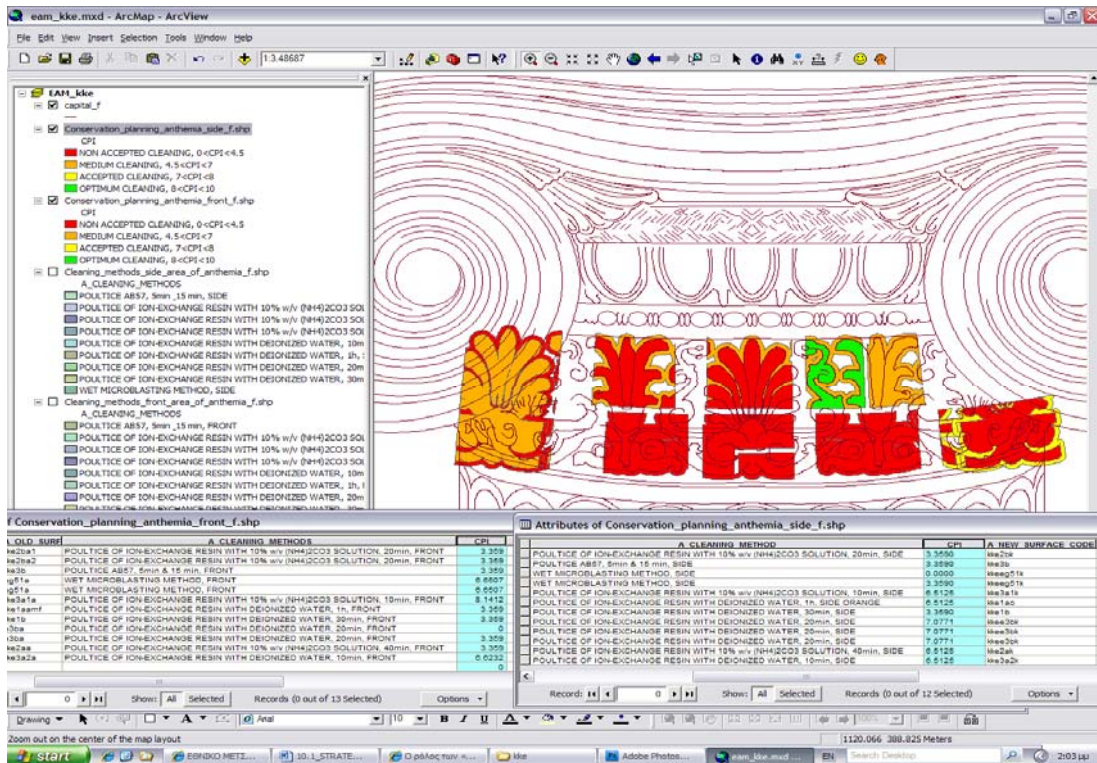
Εικ. 10.1.4: Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την αρχιτεκτονική επιφάνεια των αποπλυμένων περιοχών του κίονα στο ΕΑΜ



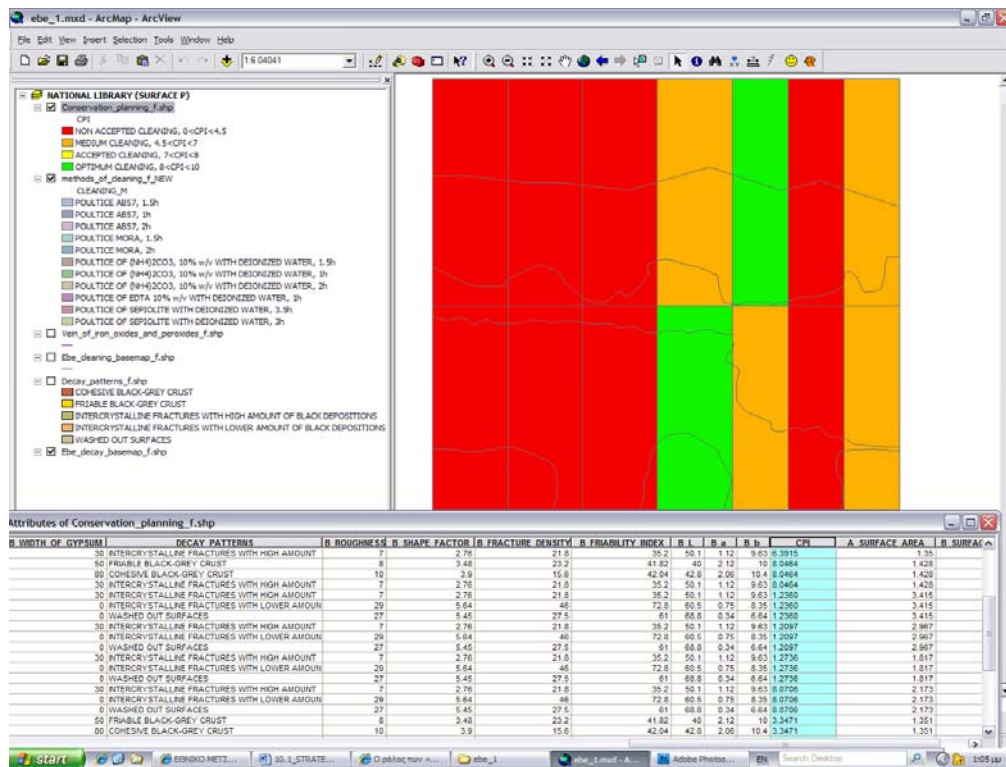
Εικ. 10.1.5: Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια της πρόσθιας όψης των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ



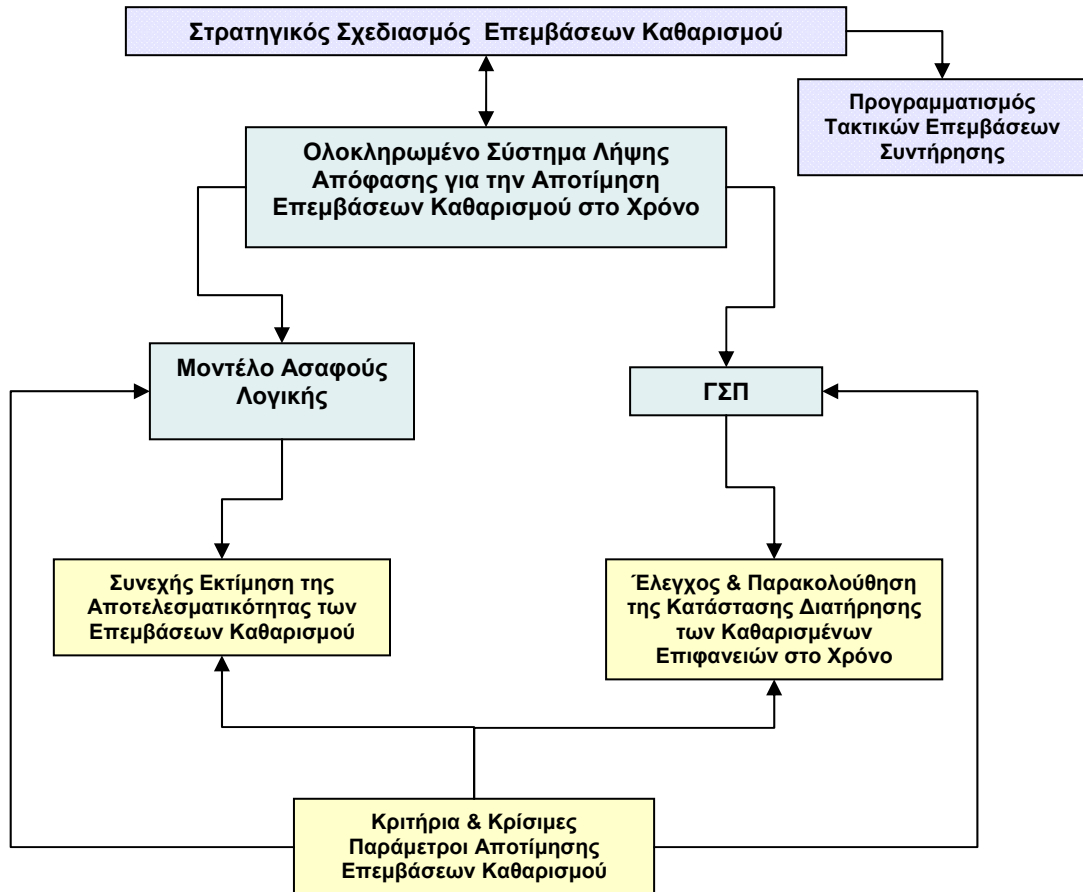
Εικ. 10.1.6 Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια της πλάγιας όψης των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ



Εικ. 10.1.7: Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για την ανάγλυφη αρχιτεκτονική επιφάνεια της πρόσθιας και πλάγιας όψης των ανθεμίων του κιονόκρανου στο ΕΑΜ



Εικ. 10.1.8: Χαρτογραφική απόδοση των κλάσεων του ΔΑΕΚ στις χωρικές οντότητες του θεματικού χάρτη του σχεδιασμού επεμβάσεων συντήρησης για τις λείες αρχιτεκτονικές επιφάνειες φαϊόμαυρης κρούστας & περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου στην ΕΒΕ



Εικ. 10.1.9 Διάγραμμα Ροής Στρατηγικού Σχεδιασμού Επεμβάσεων Καθαρισμού

Όπως διαπιστώνεται από τα παραπάνω και διαγραμματικά απεικονίζεται στην εικ. 10.1.9 ο στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του ολοκληρωμένου συστήματος λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού στο χρόνο, με απώτερο στόχο και σκοπό τον προγραμματισμό των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης. Ενσωματώνοντας το μοντέλο της ασαφούς λογικής στο ΓΣΠ μπορεί να λάβει χώρα ταυτόχρονα η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού και η παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, βασίζοντας τα πορίσματά μας πάντα στα συναγόμενα κριτήρια και τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, όπως αυτά προέκυψαν από την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού στις επί τόπου πιλοτικές εφαρμογές με τη χρήση μη καταστρεπτικών και ενόργανων τεχνικών.

10.2 Τελικά Συμπεράσματα

Σκοπός των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού και της διαδικασίας αποτίμησής τους, είναι να διασφαλιστεί ότι κάθε μεταβολή της επιφάνειας, μετά από τον προτεινόμενο καθαρισμό, θα οδηγήσει σε βελτίωση της ανθεκτικότητας του δομικού υλικού, θα πληρεί τους κοινώς αποδεκτούς και επιδιωκόμενους στόχους για κάθε κριτήριο και τις παραμέτρους που το ορίζουν και θα είναι πλήρως προβλέψιμη και αναπαραγωγίσιμη, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί από τον εργολήπτη υπό τις καθοριζόμενες προδιαγραφές στο σύνολο των αρχιτεκτονικών επιφανειών του μνημείου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του εργαστηριακού ελέγχου που έλαβε χώρα σε πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, καθώς και αυτά που προέκυψαν μετά από τον έλεγχο των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού στις λείες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες της ΕΒΕ και τις ανάγλυφες μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ΕΑΜ, που παρουσίαζαν τους χαρακτηριστικούς τύπους φθοράς των φαιόμαυρων κρουστών, των αποπλυμένων επιφανειών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου, διαπιστώνονται (βλ. κεφάλαιο συμπεράσματος 8, για τη σχετική ανάλυση) τα παρακάτω σε σχέση με τα κριτήρια αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού, τις κρίσιμες παραμέτρους που τα διέπουν, τις τεχνικές μέτρησης που αποδίδουν τις παραμέτρους αυτές πιστότερα και αντικειμενικότερα, καθώς και τους κοινώς αποδεκτούς και επιδιωκόμενους στόχους για το καθένα από τα κριτήρια αποτίμησης:

1^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Χημική-ορυκτολογική σύσταση των επιφανειών, καθώς και διαστρωμάτωση των απαντούμενων υλικών στην επιφάνεια.*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Διατήρηση Πάτινας
- Διατήρηση Αυθεντικού Υλικού:
 - Διατήρηση Στρώματος Γύψου για τις φαιόμαυρες κρούστες
 - Διατήρηση Ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες
 - Διατήρηση Γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου
- Απομάκρυνση Μαύρων Επικαθήσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης & Μικρανάλυση Ακτινών Χ - SEM-EDS,
- Χρωματομετρία

2^ο Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: *Υφή, Μορφολογία και Συνοχή Επιφανειών – Επιφανειακή Μικροδομή*

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Τραχύτητα - Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

3° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: Χρώμα

Κρίσιμες Παράμετροι:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

Τεχνικές Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

4° Κριτήριο Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού: Κατάσταση Διατήρησης - Επιδεκτικότητα στη Φθορά - Ανθεκτικότητα στο Χρόνο

Κρίσιμες Παράμετροι, που παρέχουν σαφείς ενδείξεις:

- Τραχύτητα-Rq
- Λόγος πραγματικής προς προβαλλόμενη επιφάνεια – Ενεργή Επιφάνεια
- Πυκνότητα Ρηγματώσεων

Τεχνικές Μέτρησης:

- Laser Προφίλομετρία - LP
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης – DIP-SEM

Κρίσιμη Παράμετρος, Εφικτά Μετρήσιμη στο Χρόνο:

- Συνολική Διαφορά Χρώματος, ΔΕ

Τεχνική Μέτρησης:

- Χρωματομετρία

Παράλληλα, **οι κοινώς αποδεκτοί και επιδιωκόμενοι στόχοι** για το καθένα από τα κριτήρια αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. διατήρηση της πάτινας, εάν και εφόσον διαπιστώνεται η ύπαρξή της κατά τη διάγνωση της φθοράς,
2. πλήρης απομάκρυνση των μαύρων επικαθήσεων,
3. διατήρηση του αυθεντικού υλικού και πιο συγκεκριμένα:
 - του στρώματος του γύψου στις φαιόμαυρες κρούστες,
 - του γύψου που πληρώνει τις περικρυσταλλικές ρηγματώσεις για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου και
 - ο μικρότερος δυνατός βαθμός απώλειας ασβεστίτη για τις αποπλυμένες επιφάνειες, (ο οποίος μπορεί να προκύψει από επέμβαση καθαρισμού ήπιας δραστηριότητας που παράγει επιφάνεια παρόμοιου επιπέδου επιφανειακής μικροδομής με αυτή που υπήρχε πριν τον καθαρισμό),
4. διατήρηση των τιμών των παραμέτρων της επιφανειακής μικροδομής:
 - σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που υπήρχαν πριν τον καθαρισμό, στην περίπτωση των αποπλυμένων επιφανειών,
 - σε παρόμοια επίπεδα ή/και ελαφρώς μειωμένα σε σχέση με αυτά που υπήρχαν πριν την εφαρμογή του καθαρισμού, στην περίπτωση των φαιόμαυρων κρουστών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου,
5. μεσαία - ενδιάμεση συνολική μεταβολή χρώματος ΔΕ,

Ο καθαρισμός αποτελεί την κατ' εξοχήν μη αντιστρεπτή επέμβαση συντήρησης, οπότε η έννοια της συμβατότητας η οποία πρέπει να τον διέπει, έγκειται στο σαφή προσδιορισμό των ορίων αποδοχής σε σχέση με τους παραπάνω επιδιωκόμενους στόχους του κάθε κριτηρίου αποτίμησης.

Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκαν **τρία μοντέλα ασαφούς λογικής**, ανάλογα με τον τύπο φθοράς που οι εφαρμοζόμενες επεμβάσεις καθαρισμού καλούνται να απομακρύνουν, δηλ. ένα για τις φαιόμαυρες κρούστες, ένα για τις αποπλυμένες επιφάνειες και ένα για τις επιφάνειες του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου.

Η ανάπτυξη αυτών των, τύπου Mamdani, μοντέλων ασαφούς λογικής, οδήγησε στην εκτίμηση του δείκτη αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού (ΔΑΕΚ) σε μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, μέσω της απόδοσης ποσοτικών χαρακτηριστικών στους στόχους κάθε κριτηρίου αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, αφού διαμορφώθηκαν με τη χρήση ασαφών συνόλων τα αποδεκτά και μη αποδεκτά όρια των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Στον πίνακα 10.2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι εισόδου των μοντέλων (που δεν είναι άλλες από τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού), η παράμετρος εξόδου, το πλήθος των ασαφών κανόνων που αναπτύχθηκαν, καθώς και τα ασαφή σύνολα που διαμορφώνουν τα όρια αποδοχής των παραμέτρων εισόδου και της παραμέτρου εξόδου. Με έντονα γράμματα σημειώνονται στον πίνακα τα ασαφή σύνολα (κλάσεις) που ορίζουν τα αποδεκτά όρια των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, καθώς και του ΔΑΕΚ.

Από την εφαρμογή δε, των μοντέλων στις μελέτες περιπτώσεων που εξετάζονται σε αυτή τη διατριβή, διαπιστώθηκε ότι αυτά είναι σωστά βαθμονομημένα και επιτελεστικά, όσον αφορά στην εκτίμηση του ΔΑΕΚ και συνεπώς στην ταξινόμηση σε μη αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές και καλές των επεμβάσεων καθαρισμού που έλαβαν χώρα στις εξετασθείσες επιφάνειες των φαιόμαυρων κρούστων, των αποπλυμένων επιφανειών και του περικρυσταλλικά ρηγματωμένου μαρμάρου στα ιστορικά κτίρια του ΕΑΜ και της ΕΒΕ (50 διαφορετικές περιπτώσεις αποτίμησης).

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλες μελέτες περιπτώσεων αντίστοιχων μαρμάρινων υλικών και τύπων φθοράς, με μόνη προϋπόθεση οι παράμετροι εισόδου να μετρηθούν με τις ανάλογες τεχνικές προδιαγραφές.

Πρόκειται δε, για δυναμικά μεθοδολογικά εργαλεία με μεγάλη ευελιξία και δυνατότητες βελτίωσης, αφού μπορούν να τροφοδοτούνται συνεχώς με νέα δεδομένα, συμπληρώνοντας έτσι τη γνωσιολογική τους βάση, ενώ παράλληλα είναι εφικτή η προσθήκη καινούργιων παραμέτρων εισόδου, ανάλογα με τις νέες επιστημονικές κατευθύνσεις και αναγκαιότητες.

Άρα, η χρήση μοντέλων ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων καθαρισμού καθίσταται πολύτιμο μεθοδολογικό εργαλείο εξαιτίας της δυνατότητας που παρουσιάζει για συνεχή αναδιαμόρφωση και βελτίωση.

Επιπλέον, στο πλαίσιο διερεύνησης του **4^{ου} κριτηρίου αποτίμησης** δηλ. της επιδεκτικότητας στη φθορά των καθαρισμένων επιφανειών, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα της συστηματικής χρήσης τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου και της βαθμονόμησής τους.

Η συστηματική χρήση και βαθμονόμηση των μη καταστρεπτικών τεχνικών έχει σαν

Πίνακας 10.2.1: Παράμετροι εισόδου, παράμετρος εξόδου, τα αντίστοιχα ασαφή σύνολα και κανόνες, για κάθε μοντέλο ασαφούς λογικής, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς

ΤΥΠΟΣ ΦΘΟΡΑΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ - ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ, ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ						
	1 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	2 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	3 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	4 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	5 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	6 ^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ
ΦΑΙΟΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΨΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ (ΔΕ)	ΔΑΕΚ
	2 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	4 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	4 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ
	ΜΙΚΡΟΣ (0-70%) ΜΕΓΑΛΟΣ (50-100%)	ΜΙΚΡΟΣ (0-40%) ΜΕΣΑΙΟΣ (30-70%) ΜΕΓΑΛΟΣ (50-100%)	ΜΙΚΡΗ (0-10%) ΜΕΣΑΙΑ (8-25%) ΜΕΓΑΛΗ (18-35%) ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗ (30-60%)	ΜΙΚΡΟΣ (1-1.5) ΜΕΣΑΙΟΣ (1.25-3) ΜΕΓΑΛΟΣ (2.5-4)	ΜΙΚΡΗ (0-10 μm) ΜΕΣΑΙΑ (5-20 μm) ΜΕΓΑΛΗ (15-50 μm)	ΜΙΚΡΗ (0-6) ΜΕΣΑΙΑ (5-15) ΜΕΓΑΛΗ (13-40)	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (0-4.5) ΜΕΤΡΙΟΣ (4-7.5) ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (7-10) ΚΑΛΟΣ (8-10)
648 ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ							
	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ (ΔΕ)	-	ΔΑΕΚ
	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	-	4 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ
243 ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ	ΜΙΚΡΟΣ (0-40%) ΜΕΣΑΙΟΣ (20-80%) ΜΕΓΑΛΟΣ (50-100%)	ΜΙΚΡΗ (0-20%) ΜΕΣΑΙΑ (15-35%) ΜΕΓΑΛΗ (30-60%)	ΜΙΚΡΟΣ (1-1.8) ΜΕΣΑΙΟΣ (1.25-2.5) ΜΕΓΑΛΟΣ (2-4)	ΜΙΚΡΗ (0-20 μm) ΜΕΣΑΙΑ (10-30 μm) ΜΕΓΑΛΗ (25-50 μm)	ΜΙΚΡΗ (0-6) ΜΕΣΑΙΑ (4.5-11) ΜΕΓΑΛΗ (10-40)	-	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (0-4.5) ΜΕΤΡΙΟΣ (4-7.5) ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (7-10) ΚΑΛΟΣ (8-10)
ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟ ΜΑΡΜΑΡΟ	ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΤΙΝΑΣ (%)	ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΓΥΨΟ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ (%)	ΛΟΓΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣ ΠΡΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ Rq (μm)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ (ΔΕ)	ΔΑΕΚ
	2 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	4 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	3 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ	4 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ
	ΜΙΚΡΟΣ (0-70%) ΜΕΓΑΛΟΣ (50-100%)	ΜΙΚΡΟΣ (0-30%) ΜΕΣΑΙΟΣ (25-75%) ΜΕΓΑΛΟΣ (60-100%)	ΜΙΚΡΗ (0-10%) ΜΕΣΑΙΑ (8-25%) ΜΕΓΑΛΗ (18-35%) ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗ (30-60%)	ΜΙΚΡΟΣ (1-1.5) ΜΕΣΑΙΟΣ (1.25-3) ΜΕΓΑΛΟΣ (2.5-4)	ΜΙΚΡΗ (0-10 μm) ΜΕΣΑΙΑ (5-20 μm) ΜΕΓΑΛΗ (15-50 μm)	ΜΙΚΡΗ (0-6) ΜΕΣΑΙΑ (4.5-11) ΜΕΓΑΛΗ (10-40)	ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (0-4.5) ΜΕΤΡΙΟΣ (4-7.5) ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ (7-10) ΚΑΛΟΣ (8-10)
648 ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ							

στόχο να περιορίσει σε σημαντικό βαθμό τη δειγματοληψία, η οποία είναι σχεδόν απαγορευτική από άποψη δεοντολογίας στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς και αποτελεί τον κυριότερο λόγο (σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο που δίνεται από τους κρατικούς φορείς για την εκπόνηση των μελετών των επεμβάσεων συντήρησης) μη συλλογής δεδομένων για το 4^ο κριτήριο αποτίμησης, αυτό του ελέγχου της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο.

Τα αποτελέσματα της διατριβής προς αυτήν την κατεύθυνση υπέδειξαν ότι:

- υπάρχει μεγάλη συσχέτιση ανάμεσα στα μεγέθη της χρωματικής παραμέτρου της **λαμπρότητας L** και της επιφανειακής μικροδομής της **τραχύτητας Rq**, αφού όπως φαίνεται από την ανάλυση σε κύριες συνιστώσες που έλαβε χώρα για αυτά τα μεγέθη στα πρότυπα δοκίμια πεντελικού μαρμάρου, η αύξηση της τραχύτητας Rq οδηγεί σε μείωση των τιμών της λαμπρότητας L για τις εξεταζόμενες επιφάνειες,
- η μελέτη του φαινομένου της ψύξης του συνόλου των εξεταζόμενων μαρμάρινων επιφανειών, με την εφαρμογή στο εργαστήριο της **παλμικής θερμογραφίας** στα ληφθέντα δείγματα, περιγράφεται από εμπειρικό μοντέλο κινητικής 1^{ης} τάξης, ενώ η σταθερά χρόνου του φαινομένου εξαρτάται, μέσω εκθετικής συνάρτησης, η οποία ενσωματώνει την επίδραση του υλικού, από την πυκνότητα ρηγματώσεων και τη λαμπρότητα των εξεταζόμενων επιφανειών. Η δυνατότητα χρήσης αντίστοιχου εξοπλισμού παλμικής θερμογραφίας επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου, σε συνδυασμό με την επί τόπου εφαρμογή της χρωματομετρίας που παρέχει τις τιμές της λαμπρότητας, καθώς και της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου, μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου. Αυτή η προοπτική του συνολικά μη καταστρεπτικού και ποσοτικού προσδιορισμού της επιφανειακής πυκνότητας ρηγματώσεων του μαρμάρου είναι μεγάλης σημασίας για την παρακολούθηση στο χρόνο της κατάστασης διατήρησης (ανθεκτικότητας) των καθαρισμένων μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου.

Στη συνέχεια της διερεύνησης του 4^{ου} κριτηρίου αποτίμησης, προτείνεται η χρήση του **ΓΣΠ** ως μεθοδολογικού εργαλείου για τον έλεγχο και την παρακολούθηση στο χρόνο της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, μέσω:

1. της δόμησης των θεματικών υποβάθρων της φθοράς και των καθαρισμών, κατά την οποία λαμβάνει χώρα χωρική ταξινόμηση των τύπων φθοράς και των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού,
2. της κατασκευής των σχεσιακών βάσεων δεδομένων (ΣΒΔ) που φέρουν τα φ-χ χαρακτηριστικά των αντίστοιχων θεματικών χαρτών και συμπεριλαμβάνουν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης του καθαρισμού,
3. της καταγραφής και απόδοσης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών - ιδιοτήτων της σχεσιακής βάσης δεδομένων στις χωρικές οντότητες των θεματικών χαρτών,
4. της διαχείρισης ΣΒΔ με τη χρήση κριτηρίων Boolean άλγεβρας και λογικών πράξεων,
5. της δυνατότητας ενσωμάτωσης ποιοτικών δεδομένων όπως εικόνες μικροσκοπίας κ.ά. και
6. της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης.

Η δυνατότητα διαχείρισης των ΣΒΔ με τη χρήση της άλγεβρας Boolean και των λογικών πράξεων στο θεματικό χάρτη του “σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης” που προκύπτει μέσω της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης, (δηλ. την τομή των θεματικών χαρτών της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού) και περιλαμβάνει πλέον χωρικές και περιγραφικές ιδιότητες πριν και μετά τον καθαρισμό, δηλ. δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων, επιτρέπει τη σύγκριση, την απόδοση, την ανάλυση και τη συσχέτιση των μεταβολών των καταγεγραμμένων φ-χ χαρακτηριστικών στο χώρο σε διαφορετικούς χρόνους.

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι, όταν σε μελλοντικές χρονικές περιόδους η σχεσιακή βάση δεδομένων εμπλουτιστεί με νέα στοιχεία που αφορούν στις κρίσιμες μετρούμενες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μια καθαρισμένη επιφάνεια και παράλληλα εφαρμοστεί η διαδικασία ανάλυσης της επικάλυψης, δίνεται η δυνατότητα στον ερευνητή να ελέγχει και να παρακολουθεί στο χρόνο την κατάσταση διατήρησης της καθαρισμένης επιφάνειας (δηλ. την επιδεκτικότητά της στη φθορά) και συνεπώς την ανθεκτικότητα στο χρόνο της επέμβασης καθαρισμού.

Επιπλέον, η προτεινόμενη χρήση της πλατφόρμας του ΓΣΠ στην κλίμακα των αντιπροσωπευτικών επιφανειών ενός κτιρίου, δηλ. σε ελεγχόμενη κλίμακα εργασίας, βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις χωρικές, χρονικές, διαχειριστικές και οικονομικές παραμέτρους που προκύπτουν σε μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς, όπως η αποτίμηση του κύκλου ζωής των δομικών υλικών και κατασκευών. Παράλληλα, καθίσταται πιο εύκολη η έγκαιρη διάγνωση της επανεμφανιζόμενης φθοράς μετά τον καθαρισμό και η καλύτερη κατανόηση και αποκωδικοποίηση των μηχανισμών φθοράς με στόχο τον καλύτερο σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του κάθε εξεταζόμενου κτιρίου.

Συνεπώς, η **ολοκληρωμένη μεθοδολογία αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού**, περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών επιφανειών στο εξεταζόμενο κτίριο, βάσει προσεκτικών μακροσκοπικών παρατηρήσεων σε σχέση με τα παρουσιαζόμενα δομικά υλικά των όψεων και τους τύπους φθοράς,
2. Χαρακτηρισμός του υλικού και διάγνωση της φθοράς – καταγραφή των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς,
3. Επιλογή υλικών και επεμβάσεων καθαρισμού, βάσει του τύπου φθοράς και του δομικού υλικού, της σχετικής βιβλιογραφίας, της προηγούμενης εμπειρίας και το είδος της αρχιτεκτονικής επιφάνειας,
4. Εφαρμογή επεμβάσεων καθαρισμού σε πιλοτική κλίμακα, δηλ. στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες,
5. Εφαρμογή των τεχνικών μέτρησης των κρίσιμων παραμέτρων χαρακτηρισμού των καθαρισμένων επιφανειών στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες ελέγχου,
6. Εισαγωγή των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού στο μοντέλο της ασαφούς λογικής για την εξαγωγή του Δείκτη Αποτελεσματικότητας Επεμβάσεων Καθαρισμού (ΔΑΕΚ) και ταξινόμηση των πιλοτικών επεμβάσεων σε μη

αποδεκτές, μέτριες, αποδεκτές, καλές – προτεινόμενες, βάσει των αντίστοιχα διαμορφωμένων ορίων,

7. Χρήση της πλατφόρμας του ΓΣΠ για τον έλεγχο και παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, μέσω:
 - Της χωρικής ταξινόμησης της φθοράς και των επεμβάσεων καθαρισμού στις αντιπροσωπευτικές επιφάνειες εξέτασης,
 - Της κατασκευής σχεσιακών βάσεων δεδομένων (ΣΒΔ), που περιλαμβάνουν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης των πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού,
 - Της διαχείρισης των ΣΒΔ με κριτήρια άλγεβρας Boolean και λογικών πράξεων,
 - Της διαδικασίας ανάλυσης της επικάλυψης,
7. Επανάληψη των σταδίων 5,6,7 σε εύλογο χρονικό διάστημα στο μέλλον και **σχεδιασμός επεμβάσεων συντήρησης** στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του εξεταζόμενου κτιρίου, ανάλογα με τον παρουσιαζόμενο τύπο φθοράς.

Τέλος, για να πραγματοποιηθεί ο **στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων καθαρισμού**, δηλ. για να ορισθεί και υλοποιηθεί το σύνολο των σχεδιασμένων χειρισμών - διαδικασιών που θα οδηγήσουν στον έλεγχο και την παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών, με απώτερο στόχο και σκοπό τον προγραμματισμό των τακτικών επεμβάσεων συντήρησης, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης για την αποτίμηση των επεμβάσεων καθαρισμού, για κάθε ένα από τους εξεταζόμενους τύπους φθοράς.

Διαπιστώνεται ότι το **ολοκληρωμένο σύστημα λήψης απόφασης**, που προκύπτει από την ενσωμάτωση του μοντέλου της ασαφούς λογικής στο ΓΣΠ, επιτυγχάνει το στόχο του στρατηγικού σχεδιασμού των επεμβάσεων καθαρισμού, αφού μπορεί να λάβει χώρα ταυτόχρονα η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων καθαρισμού και η παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο. Όταν νέες τιμές των δεικτών παρακολούθησης της κατάστασης διατήρησης της επιφάνειας που είναι οι παράμετροι εισόδου στο μοντέλο της ασαφούς λογικής και παράλληλα αποτελούν τις κρίσιμες παραμέτρους αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, δώσουν για την προτεινόμενη – εφαρμοσθείσα επέμβαση καθαρισμού τιμή $4.5 < \Delta A E K < 7$ (κλάση του μέτρου καθαρισμού που κυρίως εκφράζει τον ατελή καθαρισμό), τότε πρέπει να **προγραμματιστούν** νέες επεμβάσεις καθαρισμού στο πλαίσιο των **τακτικών επεμβάσεων συντήρησης** στο σύνολο των μαρμάρινων επιφανειών του μνημείου του αντίστοιχου τύπου φθοράς.

11. Προοπτικές για τη συνέχιση της σχετικής έρευνας

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προέκυψαν πολλαπλά ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, όσον αφορά στο θέμα της αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, τα οποία σχετίζονται κυρίως με το νέο-εισαχθέν κριτήριο της επιφανειακής μικροδομής, καθώς και με το κριτήριο της ανθεκτικότητας των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση των παρακάτω ζητημάτων:

1. των δυνατοτήτων περιγραφής της επιφανειακής μικροδομής μαρμάρινων επιφανειών μέσω μετρήσεων και της άλλης παραμέτρου της υφής, αυτή της κυμάτωσης,
2. της αξιολόγησης της τραχύτητας R_q με χρήση μαθηματικών fractals, έτσι ώστε να αρθεί το μειονέκτημα της εξάρτησης της τραχύτητας από το μήκος αποτίμησης και συνεπώς να δοθεί η δυνατότητα σύγκρισης τιμών που έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες,
3. της ανάπτυξης αλγόριθμου που να περιγράφει τη συσχέτιση ανάμεσα στην τραχύτητα R_q και την λαμπρότητα L μαρμάρινων επιφανειών, στο πλαίσιο εμβάθυνσης της ήδη διαπιστωμένης συσχέτισης των δύο μεγεθών που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή,
4. της ανάπτυξης συστημάτων και τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων μικροσκοπίας οπτικών ινών, καθαρά προσανατολισμένων στη θεματολογία της αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού, έτσι ώστε να καθίσταται εφικτή η λήψη και ποσοτικοποιημένων αποτελεσμάτων από τη μη καταστρεπτική τεχνική της MOI που θα αφορούν τις μεταβολές της μορφολογίας και της υφής της επιφάνειας μετά από τις επεμβάσεις καθαρισμού,
5. της επιβεβαίωσης της χρήσης της παλμικής θερμογραφίας ως μη καταστρεπτικού εργαλείου πρόβλεψης της πυκνότητας ρηγματώσεων των μαρμάρινων επιφανειών, με την εφαρμογή του προτεινόμενου σε αυτή τη διατριβή μοντέλου αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της, αφού προηγηθεί η επί τόπου εφαρμογή της στην κλίμακα του μνημείου,
6. της μελέτης της διαβρεξιμότητας του μαρμάρου με μετρήσεις γωνίας επαφής σε πρότυπα δοκίμια λατομείου στο εργαστήριο και βαθμονόμηση βάσει αυτών, μετρήσεων διαβρεξιμότητας που λαμβάνουν χώρα επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου με σωλήνες Kursten,
7. της ανάπτυξης κατάλληλης οργανολογίας που να επιτρέπει τη μελέτη της χημικής/ορυκτολογικής σύστασης των καθαρισμένων επιφανειών και κυρίως της διαστρωμάτωσής τους επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου με μη καταστρεπτικό τρόπο,

8. της διαμόρφωσης των συνθηκών προσομοίωσης χαρακτηριστικών τύπων φθοράς μαρμάρινων επιφανειών όπως οι φαόμαυρες κρούστες και οι αποπλυμένες επιφάνειες σε δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης,
9. της ανάπτυξης μοντέλου πρόβλεψης για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας των καθαρισμένων επιφανειών στο χρόνο, συνδυάζοντας (α) αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης στο εργαστήριο σε πρότυπα δοκίμια λατομείου διαφορετικής επιφανειακής μικροδομής, καθώς και (β) αποτελέσματα συμπληρωματικών μετρήσεων που θα προκύψουν με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου και αναλυτικών τεχνικών στο εργαστήριο, κατόπιν περιορισμένης δειγματοληψίας. Η διαλεύκανση αυτού του πολύ βασικού ερευνητικού ζητήματος για την αποτίμηση επεμβάσεων καθαρισμού θα οδηγήσει στη θέσπιση του κρίσιμου χρονικού διαστήματος που πρέπει να μεσολαβεί για τον επανέλεγχο των πιλοτικών εφαρμογών καθαρισμού, καθώς και στη σαφή συσχέτιση της τραχύτητας και της διαβρεξιμότητας μιας καθαρισμένης επιφάνειας με την ανθεκτικότητα που αυτή θα παρουσιάζει στο χρόνο. Ο πειραματικός σχεδιασμός αυτού του ζητήματος είναι εξαιρετικά σύνθετος και προϋποθέτει τουλάχιστον τη διαμόρφωση των συνθηκών προσομοίωσης χαρακτηριστικών τύπων φθοράς μαρμάρινων επιφανειών, ενώ θα καθίστατο εξαιρετικά χρήσιμη η πρόοδος στα υπόλοιπα θέματα που τίθενται προς διερεύνηση.

Παράλληλα, η συνέχιση της έρευνας στο θέμα της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού μπορεί να συμπεριλάβει και τα παρακάτω ευρύτερα θέματα:

1. της διατύπωσης των κριτηρίων και των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και για άλλους διαδεδομένους τύπους φθοράς μαρμάρινων επιφανειών, όπως η ζαχαροειδής φθορά, οι φαιοκάστανες κρούστες κ.ά,
2. της διατύπωσης των κριτηρίων και των κρίσιμων παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού και για άλλους τύπους δομικών λίθων όπως οι πωρόλιθοι, σε σχέση πάντα με παρουσιαζόμενους τύπους φθοράς,
3. του ελέγχου της χημικής δράσης παστών και ιοντοανταλλακτικών ρητινών που χρησιμοποιούνται σαν υλικά καθαρισμού στο εργαστήριο, μέσω τροποποιήσεων τους ώστε να ευνοείται η δράση συγκεκριμένων χημικών αντιδράσεων που θα προκαθορίζονται ανάλογα με τον τύπο φθοράς που πρέπει να αντιμετωπιστεί επί τόπου στην κλίμακα του μνημείου. Έτσι, θα καθορίζεται η επιδιωκόμενη δραστηριότητα της επέμβασης καθαρισμού, καθώς και ο χρόνος εφαρμογής των μεθόδων, οδηγώντας σε βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Normal document 20/85, Interventi Conservativi Progettazione Esecuzione e Valutazione Preventiva, ICR-CNR, 1985.
2. Α. Μοροπούλου, Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα «ΥΛΙΚΑ Ι: Φυσικοχημεία της Φθοράς και Τεχνική της Συντήρησης των Δομικών Υλικών», Ε.Μ.Π., Τμ. Χημ.-Μηχ., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα 1998, σελ.166-195.
3. Skoulikidis, Th. , Papakonstantinou, E. , Galanos, A. , Doganis, Y. , «Conservation of the west frieze», Study for the restoration of the Parthenon, Vol. 3c, pp. 3-15
4. V.Fassina, “General criteria for the cleaning of stone: Theoretical aspects and methodology of application”, C.U.M. University School Monument Conservation, Crete, Greece, 1993.
5. Lazzarini, L. ,Laurenzi Tabasso, M. , «The restoration of stone : cleaning», Advanced Workshop, «Analytical methodologies for the investigation of damaged stones» 14-21 Sept. , 1990.
6. J. Delgado Rodrigues, G. Alessandrini, A. Bouinneau, “ Procedure for selection and control of cleaning operations. A proposal.” , 4th Int. Sym. on the conservation of Monuments in the Mediterranean, in Proc. Vol. 3, 1997, pp. 89-98.
7. Π. Μαραβελάκη, Διδακτικές σημειώσεις, «Επεμβάσεις καθαρισμού», ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων».
8. G. Biscontin, E. Zendri, A. Bakolas, G. Longega, G. Driussi, A. Moropoulou, «Alcune considerazioni sullapulitura delle superfici architettoniche», in Proc. of Symb. Scienza e Beni Culturali XI on Pulitura, Bressanone, 1995 pp.625.
9. Amoroso, G. G., Fassina, V., «Stone decay and conservation», Elsevier, 1983, p.254-298, 65-95, 150-153.
10. Μοροπούλου, Α. , «Έκθεση αποτίμησης εφαρμοσμένων μεθόδων καθαρισμού στο κεντρικό κτίριο της Τράπεζας της Ελλάδος» , Αθήνα, Οκτώβριος, 1998.
11. Mossotti V.G., Eldeeb A.R., Fries T.L., Coombs M.J., Naude V. N., Soderberg L. and Wheeler G. S. “The effect of selected cleaning techniques on Berkshire Lee marble; A scientific study at Philadelphia City Hall”, U.S. Geological Survey, Professional Paper 1635, Virginia 2002 (<http://geopubs.wr.usgs.gov/prof-paper/pp1635/>).
12. Π. Θεουλάκης, "Ναός Επικούριου Απόλλωνος Βασσών. Μελέτη Συντηρήσεως του Δομικού Υλικού", Επιτροπή Συντηρήσεως Ναού Επικούριου Απόλλωνος Βασσών, Υπουργείο Πολιτισμού, Αθήνα 1995, σελ. 103.
13. A. De F. Barbosa, C. Santiago, M. De Oliviera, “The use of Brazillian bentonites for cleaning purposes”, Int. UNESCO –RILEM Congress on the Conservation of Stone and Other Materials, Paris, 1993, Proc. Pp. 550.
14. Eddy De Witte, M. Dupas, “Cleaning poultices based on EDTA”, 7th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, 1992, Proc. p. 1023
15. R. Livingston, “Geochemical considerations in the cleaning of carbonate stone”, Stone Cleaning Int. Conference, Endinburgh, 1992, Proc.p.164

16. M.Matteini, A.Moles, M.Oeter, I.Tosini, «Resine a scambio ionico nella pulitura dei manufatti lapidei e delle pitture murali: Verifiche sperimentali e applicazioni », in Proc. of Symb. Scienza e Beni Culturali XI on Pulitura, Bressanone, 1995 pp. 283.
17. G. Pizzigoni, V. Massa, E. Falcone, « Pulitura di superfici lapidee e pittoriche mediante resine scambio-ioniche», in Proc. of Symb. Scienza e Beni Culturali XI on Pulitura, Bressanone, 1995 pp. 211.
18. Gabriel Palma Dias, «Stone conservation: Cleaning and Consolidation», Proc. Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Vol.3, 1992, pp.1263.
19. G. Alessandrini, L. Toniolo, A. Antonioli, A. Di Silvestro, F. Piacenti, S. Righini Ponticelli, L. Formica, «On the cleaning of deteriorated stone minerals», Int. UNESCO –RILEM Congress on the Conservation of Stone and Other Materials, Paris, 1993, Proc. p. 550.
20. Maravelaki,P. ,Biscontin, G. , Polloni, R. , Cecchetti, W. , Zendri, E. , «Investigation on surfaces alteration of limestone related to cleaning processes» Proc. Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Vol.3, 1992, pp.1093 -1101.
21. Verges-Belmin V. «Combarison of three cleaning methods, microblasting, chemical pads and Q-switched YAG laser, on a portal of the cathedral Norte-Dame in Paris, France», in Proc., Lacona I, Lasers in the conservation of artworks, October,1995, Crete, pp.17.
22. Moropoulou, S. Kefalonitou, “Efficiency and countereffects of cleaning treatment on limestone surfaces – Investigation on the Corfu Venetian Fortress”, Building and Environment, 37, 2002, pp. 1181-1191.
23. P. Parrini, G. Pizzgoni, “Politura con resine di scambio ionico”, Quaderni del restauro, 208, 1992.
24. Alessandrini, G., Sansonetti, A. , « The cleaning of stone surfaces : comparison between laser and traditional methods . Evaluation of the harmfulness», 4th Int. Sym. on the conservation of Monuments in the Mediterranean, in Proc. Vol. 3, (1997) pp. 19-30.
25. Devecchi, A. , Fiandaca, O. , «Cleaning and Protection interventions on stone walls» , 4th Int. Sym. on the conservation of Monuments in the Mediterranean, in Proc. Vol. 3, 1997, pp. 89-98.
26. M. I. Cooper, D. C. Emmony, J. H. Larson, «A comparative study of the laser cleaning of limestone», Proc. Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Vol.3, 1992, pp.1307.
27. G. Biscontin, E. Zendri, A. Bakolas, R. Polloni, P.Calvelli, A. Moropoulou, «Valutazione degli effetti della pulitura mediante laser su alcuni supporti lapidei carbonatici», in Proc. of Symb. Scienza e Beni Culturali XI on Pulitura, Bressanone, 1995 pp. 547.
28. Maravelaki, P. , Zafiropoylos, V. , Kilikoglou, V. , Kalaitzali, M. , Fotakis, C. , «Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble.» , Spectrochimika Acta Part B, 52 (1997) 41-53.

29. Ε. Παπακωνσταντίνου, Κ. Φραντζικινάκη, Π. Πούλη, Β. Ζαφειρόπουλος, "Μελέτη καθαρισμού της Δυτικής Ζωοφόρου", Μελέτη Αποκατάστασης του Παρθενώνος, Τόμος 7, Υ.Π.Π.Ο., Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 2002.
30. G. Caneva, Or. Salvatori, "Biodeterioration of Stone", course lectures Venice, 1988.
31. D.Pinna, «La pulitura e il controllo della crescita biologica sui materiali lapidei» in Proc. of Symb. Scienza e Beni Culturali XI on Pulitura, Bressanone, 1995 pp. 620.
32. Th. Skoylikidis, N. Beloyannis, " Inversion of marble sulfation- Reconversion of gypsum films into calcite on the surface of monuments and statues", Studies in Conservation, 29, 197 (1984)
33. Th. Skoylikidis, E. Georgopoulou, P. Adamopoulou, "Orientated inversion of gypsum on the surface of ancient monuments back into calcium carbonate. Further results", 3rd ASMOSIA Int. Conference, Athens, 1993.
34. Th. Skoylikidis, M. Koui, A. Kostudi, "A new non destructive method to differentiate in situ marble from gypsum and CaCO₃ from inversion of gypsum: Use of liquid crystals", Mol. Cryst. Liq. Cryst., 206, 117, (1991).
35. Th. Skoylikidis, P. Papakonstantinou, " Stone cleaning by inversion of gypsum back into CaCO₃, stone cleaning and the nature, soiling and decay mechanisms of stone, in Proc. Vol. 1, (1992) pp.214.
36. K. Lal. Gauri, L. Parks, J. Jaynes, R. Atlas, «Removal of sulphated-crust from marble using sulphate-reducing bacteria», Stone Cleaning Int. Conference, Edinburgh, 1992, Proc.p.160.
37. Δαβή Ν. Ελευθερία: «Πετρολογία», Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Αθήνα (1991).
38. Μπαλατζής Ε.: «Πετρολογία μεταμορφωμένων πετρωμάτων», Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Αθήνα (1994).
39. "Information about the mineral specimen, gem or Crystal" in www.minerals-n-more.com
40. Dolomite, Calcite: "<http://www.minerals.net/mineral/carbonat.htm>"
41. "The Mineral Aragonite, Calcite, Dolomite" in <http://mineral-galleries.com/minerals/carbonate.htm>
42. Marbles Tiles & Slabs in www.deco-marble.co.uk
43. Λεγάκης Α.: «Δομικά υλικά», Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα (1954).
44. Εξαδάκτυλος Γ.Ε.: Σημειώσεις του μαθήματος «Σχεδιασμός λατομείων μαρμάρων και γεωτεχνικών έργων», Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά (2000).
45. Σαπουντζής Σ. Η., Χριστοφίδης Θ. Γ.: «Ορυκτοδιαγνωστική», University studio press, Θεσσαλονίκη (1985).
46. Τσιραμπίδης Α.: «Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα». University studio press, Θεσσαλονίκη (1996).
47. E.M. Winkler: " Stone in architecture", Properties and durability, Springer-Verlag, Third Edition, 1997, p. 121-127, 198.
48. ΕΚΘΕΣΗ 2000: "Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα", ΥΠΕΧΩΔΕ, Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας, Ιούνιος 2001.

49. Th. Skoulikidis, Papakonstantinou: "Mechanism of sulfation by atmospheric SO₂ of limestones and marbles of the ancient monuments and statues, I. Observations in situ and measurements in the laboratory; Activation energy", *British Corrosion Journal* 16 (1981).
50. Th. Skoulikidis, D. Charalambous: "Mechanism of sulfation by atmospheric SO₂ of limestones and marbles of the ancient monuments and statues, II. Hypothesis concerning the rate determining steps in the process of sulphation, and its experimental confirmation", *British Corrosion Journal* 16 (1981), pp. 70– 77.
51. Th. Skoulikidis, Papakonstantinou: "Mechanism of sulfation by atmospheric SO₂ of limestones and marbles of the ancient monuments and statues, III. Further proofs for the Galvanic Cell model", *British Corrosion Journal* 18 (1983).
52. P. Elfving, I. Panas, O. Lindqvist: "Model study of the first steps in the deterioration of calcareous stone: I. Initial surface sulphite formation on calcite", *Appl. Surf. Sci.* 74 (1994) 91–98.
53. H. Boke, H. Gokturk, E.N. Caner-Saltik, S. Demirci: "Effect of airborne particles on SO₂– calcite reaction", *Appl. Surf. Sci.* 140 (1999) 70–82.
54. K.L. Gauri, N.P. Kulshreshtha, A.R. Punuru: "Kinetics of reaction of SO₂ with marble ", *J. Mater. Civ. Eng.* 1 (1989) pp. 60 – 72.
55. K.L. Gauri, N.P. Kulshreshtha, A.R. Punuru, A. Chowdhury: "Rate of decay of marble in laboratory and outdoor exposure", *J. Mater. Civ. Eng.* 1 (1989) pp. 73 – 83.
56. K.L. Gauri, G.C. Doderer, N.T. Limscomp, A.C. Sarma: "Re-activity of treated and untreated marble specimens in an SO₂ atmosphere", *Studies in Conservation* 18 (1973) pp. 25–35.
57. R. Bugini, M.L. Tabasso, M. Realini: "Rate of formation of black crusts on marble. A case study", *Journal Cultural Heirtage*, 2000, Vol 1, pp. 111-116.
58. Α. Μοροπούλου: Διδακτικές Σημειώσεις, ΔΠΜΣ Προστασία Μνημείων, Κατεύθυνση Β': Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, "Φθορά Λίθινων Αρχιτεκτονικών Επιφανειών λόγω Επίδρασης Ατμοσφαιρικών Ρυπαντών. Ο Σχηματισμός Κρουστών", ΕΜΠ, 2004.
59. Α. Moropoulou, K. Bisbikou, K. Torfs, R. Van Grieken, F. Zezza and F. Macri, "Origin and growth of weathering on ancient marbles in industrial atmosphere", *Atmospheric Environment*, Vol. 32, No 6, 1998, pp. 967 – 982.
60. Τελική Τεχνική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος: «Διάγνωση της φθοράς των όψεων του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και μελέτη των υλικών και των επεμβάσεων για τη συντήρησή τους», Δεκέμβρης 2000, Ε.Μ.Π., Επιστημονικά Υπεύθυνη: Καθ. Α. Μοροπούλου, Κύριος Ερευνητής: Καθ. Μ. Κουή.
61. Αικ. Θ. Δελέγκου, Μεταπτυχιακή Εργασία " Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Υλικών και Μεθόδων Καθαρισμού Αρχιτεκτονικών Επιφανειών - Εφαρμογές σε Ιστορικά Κτίρια", Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου, Ε.Μ.Π., Αθήνα Φεβρουάριος 2000.
62. Τελική Τεχνική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος: "Επεμβάσεις Συντήρησης των Αρχιτεκτονικών Επιφανειών της Προσόψεως και του Χώρου Υποδοχής του Ιστορικού

- Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου”, Ε.Μ.Π., Αύγουστος 2002, Επιστημονικά Υπεύθυνη: Καθ. Α. Μοροπούλου, Κύριος Ερευνητής: Καθ. Μ. Κουή.
63. Τελική Τεχνική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος: "Σχεδιασμός και προγραμματισμός των υλικών και επεμβάσεων της συντήρησης των όψεων των ιστορικών κτιρίων της Εθνικής Τράπεζας της Ελλάδος" Ε.Μ.Π., Ιούλιος 2002, Επιστημονικά Υπεύθυνη: Καθ. Α. Μοροπούλου.
 64. Verges – Belmin V., "Towards a definition of common evaluation criteria for the cleaning of porous building materials: a review", *Science and Technology for Cultural Heritage*, 1996; 5:69-83.
 65. V. Fassina "New findings on past treatments carried out on stone and marble monuments surfaces" *The Science of Total Environment* 167(1995), pp.185-203.
 66. P. Maravelaki, V. Zafiropoulos, V. Kilikoglou, M. Kalaitzaki, C. Fotakis, "Diagnostic Techniques for laser cleaning on marble" 8th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, Vol.2, pp1395-1404.
 67. A. Moropoulou, E.T. Delegou, V. Vlahakis, E. Karaviti, " Digital Processing of SEM Images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on Pentelic marble surfaces " *Journal of Materials Characterisation*, corrected proof, 2007.
 68. P. Maravelaki - Kalaitzaki,, D. Anglos, V. Kilikoglou, V. Zafiropoulos, "Compositional characterization of encrustation on marble with laser induced breakdown spectroscopy", *Spectrochimica Acta Part B*, 56 (2001) pp. 887-903.
 69. P. Maravelaki – Kalaitzaki, V. Zafiropoulos, C. Fotakis, "Excimer Laser cleaning of encrustation on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects", *Applied Surface Science*, 148, 1999, pp. 92 – 104.
 70. John H. Larson, Claire Madden, Ian Surtherland: "Ince Blundell: preservation of an important collection of classical sculpture", *Journal of Cultural Heritage*, 1, (2000), pp.79-87
 71. Moropoulou, A. , Biscontin, G. , Tsiourva, Th. , Bisbikou, K. , Longega, P. , Tsantila, V. , Groggia, M. , Dalakis, E. , Petrikaki, A. , «Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the centre of Athens.» , 4th International Sym. On the conservation of Monuments in the Mediterranean, in Proc., Vol.4, (1997) pp. 343-354.
 72. P.Gaspar, C. Hubbard, D. McPhail, A. Cummings, "A topographical assessment and comparison of conservation cleaning treatments", *Journal of Cultural Heritage*, 4 (2003), pp. 294-302.
 73. V. Verges – Belmin, C. Dignard, "Laser yellowing: myth or reality" *Journal of Cultural Heritage*, 4, (2003), pp. 238-244.
 74. C. Andrew, " Towards an aesthetic theory of building soiling" Int. Congress "Stone Cleaning" Edinburgh, 1992 pp. 63
 75. A. Moropoulou, E.T. Delegou, N.P. Avdelidis, M. Kouli, "Assessment of cleaning conservation interventions on architectural surfaces using an integrated methodology", *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Eds: P. Vandiver, M. Goodway, J.R Druzik, J.L Mass, Vol. 712, Publ. Materials Research Society, (2002), pp. 69-76.

76. A. Moropoulou, E.T. Delegou, N.P. Avdelidis, M. Kouli, "Non-destructive investigation of architectural surfaces in polluted urban atmosphere", in NDT 2000 - the 39th Conference of the British Institute of NDT, Buxton – United Kingdom, (2000), pp. 143-148.
77. G. Biscontin, G. Drioussi, A. Valle, In color changes in resin-treated stone materials, edited by P.L. Parrini, Proc. of Symposium on Scientific methodologies applied to works of art, Florence, 1984, pp. 100-103.
78. R. Fort, F. Mingarro, M. C. Lopez de Azcona, J. Rodriguez Blanco, "Chromatic parameters as performance indicators for stone cleaning techniques", Color Research and Applications, (1999), pp. 442-446.
79. L. Appolonia, A. Bertone, A. Brunetto, D. Vaudan, "The St Orso Priory the comparison and testing of cleaning methods", Journal of Cultural Heritage, 14 (2000), pp. 105-110.
80. C. M. Grossi, R. M. Esbert, F. Diaz Pache, F.J. Alonso, "Soiling in building stones in urban environments", Building and Environment, 38, 2003, pp. 147-159.
81. S. Klein, F. Fekrsanati, J. Hildenhagen, K. Dickmann, H. Uphoff, Y. Marakis, V. Zafiroopoulos, "Discolouration of marble during laser cleaning by Nd:YAG laser wavelengths" Applied surface science, 171, 2001, pp. 242-251.
82. G. Biscontin, A. Bakolas, R. Bertoncetto, G. Longega, A. Moropoulou, E. Tontello, E. Zendri, " Investigation of the effects of the cleaning procedures applied to stone surfaces " , Materials Issues in Art and Archaeology IV, Vol. 352, Materials Research Society, Pitsburg, 857-864 (1995).
83. ASTM Standard D2244 – 93 Calculation of Color Differences from instrumentally measured Color Coordinates.
84. ASTM Standard E284 Terminology of Appearance.
85. ASTM Standard E308 Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System.
86. Moropoulou A., Delegou E.T., Avdelidis N.P., Athanasiadou A., in Proc. 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components, (Lyon, 2005), CD-Rom.
87. K. Kouzeli, "Black crust removal methods in use. Their effects on pentelic marble surfaces", 7th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Lisbon, Vol.3, 1992, pp. 1147 -1155.
88. A. Moropoulou, S Kefalonitou, "Efficiency and counter effects of cleaning treatment on limestone surfaces - Investigation of Corfu Venetian Fortress", Building and Environment, 37, 2002, pp. 1181-1191.
89. M. E. Young, J. Ball, R. A. Laing, "Quantification of the long-term effects of stone cleaning on of building sandstones", 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 179 -185.
90. H. Siedel, K. Hubrich, H. G. Kusch, G. Wiedemann, K. Neumeister, R. Sobott, "Results of Laser cleaning on encrusted oolitic limestone of angel sculptures from the Cologne cathedral", 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 583 - 590.

91. R. Pini, S. Siano, R. Salimbeni, "In field tests and operative applications of improved laser techniques for stone cleaning", 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 577 - 582.
92. S. Siano, R. Pini, R. Salimbeni, M. Giamello, A. Scala, F. Fabiani, P. Bianchini, ' Integration of laser with conventional techniques in marble restoration", 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 569 - 576.
93. G. Asimellis, A. Giannoudakos, M. Kompitsas, "New near-infrared LIBS detection technique for sulphur", *Analytical Bioanalytical Chemistry*, (2006), 385, pp. 333-337.
94. V. Guidetti, M. Uminski, "Ion exchange resins for historic marble desulphatation and restoration", 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 327 - 333.
95. C. A. Grissom, T. Power, S. West "Methyl cellulose poultice cleaning of a large marble sculpture", *Stone Cleaning Int. Conference*, Torun, 1988, pp. 551-562.
96. M. Young and D. Uquhart "Abrasive cleaning of sandstone buildings and monuments: an experimental investigation", *Int. Conference in Stone Cleaning*, Edinburgh, 1992, pp. 126 - 138.
97. Avdelidis N.P., Delegou E.T., Almond D.P, Moropoulou A., "Surface roughness evaluation of marble by 3-D laser profilometry and pulsed thermography", *J. NDT&E Intern.* 2004; 37:571-575.
98. Paraskevi Pouli, Vassilis Zafiroopoulos, Costas Balas, Yianna Doganis, Amerimni Galanos: "Laser cleaning of inorganic encrustation on excavated objects: evaluation of cleaning result by means of multi-spectral imaging", *Journal of Cultural Heritage*, 4, (2003), pp. 338-342.
99. J. M. Lee, W. M. Steen: "In-process surface monitoring for laser cleaning processes using a chromatic modulation technique", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2001) 17:281-287, Springer.
100. S. Scherer, Otmar Kolednik, Erich Schmid: "A New System for Automatic Surface Analysis in SEM", *Microscopy and Analysis*, March (2001), pp. 15-17.
101. M.Koui, E.T Delegou, D.Dai, E. Rapti, T. Mavridis, A. Moropoulou, "FTIR for the assessment of Cleaning Interventions on Pentelic marble surfaces", in the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Lisbon, CD-Rom Proc., (2004)
102. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "A Morphological Fusion Algorithm for Optical Detection and Quantification of Decay Patterns on Stone Surfaces", *Construction and Building Materials*, in press, corrected proof.
103. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces", *NDT & E International*, 40, 2007, pp. 2-11.
104. N. P. Avdelidis, A. Moropoulou, "Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures" *J Cultural Heritage*, 5 2004, pp. 119 - 127.

105. N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou, D.P. Almond, "NDT & E for the surface roughness of marble", *Thermosense XXVI*, Eds: D.D. Burleigh, E. Cramer, G.R. Peacock, Vol. 5405, SPIE Publ., (2004), pp. 425-430.
106. N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou, "A thermographic study for the assessment of historic structures", in the 7th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT), Brussels – Belgium, (2004), Book of Proceedings.
107. A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, M. Kouli, E.T. Delegou, Th. Tsiourva, "Infrared thermographic assessment of materials and techniques for the protection of cultural heritage", *Multispectral and Hyperspectral Image Acquisition and Processing*, Eds. Q. Tong, Y. Zhu, Z. Zhu, SPIE Publ., (2001), pp. 313-318.
108. A. Moropoulou, M. Kouli, N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, S. Kouris, "Calculating the emissivity of building materials for infrared thermographic applications", in *Proc. 6th Conf. of the Slovenian Society of NDT*, Portoroz – Slovenia, (2001), pp. 333-337.
109. A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, M. Kouli, "Infrared thermography in the evaluation of cleaning interventions on architectural surfaces", in *Inframation 2001 – International Conference on infrared thermography Orlando – Florida, USA*, (2001), pp. 171-175.
110. H. Dagnall M.A., "Exploring surface texture", Rank Taylor Hobson, 1986, pp 2-56.
111. Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, British Standard BS EN ISO 4287:2000.
112. Jean M. Bennett, "Recent developments in surface roughness characterization", *Meas. Sci. Technology*, 1992, pp1119-1127.
113. Mike. S. Lou, Joseph C. Chen & Caleb M. Li, "Surface roughness prediction technique for CNC End-Milling", *Journal of Industrial Technology* Volume 15, 1999.
114. Jeffrey Alcock, O. Toft Sorensen, Stig Jensen, Per Kjeldsteen, "Comparative wear mapping techniques II. Surface roughness and fractal dimension mapping of tungsten carbide/silicon carbide", *Wear* 194 (1996), pp 228-237.
115. Assessment of surface texture. Part 1: Methods and instrumentation. British Standard BS EN ISO 1134-1:1988.
116. Assessment of surface texture. Part 2: Guidance and general information. British Standard BS EN ISO 1134-2:1990
117. Roughness comparison specimens. Specification for turned, ground, bored, milled, shaped and planed specimens. British Standard International BS EN ISO 2634-1:1987
118. Roughness comparison specimens. Specification for spark-eroded, shot-blasted, grit-blasted and polished specimens. British Standard BS EN ISO 2634-2:1987
119. W.J. Stemp, M. Stemp "UBM Laser Profilometry and Lothic Use – Wear analysis: A Variable Length Scale Investigation of Surface Topography", *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28, pp. 81 - 88.
120. Geometric Product Specification (GPS) – Surface Texture – Profile Method: Rules and Procedures for the assessment of surface texture. British Standard BS EN ISO 4288:1998.

121. P. F. Chauvy, C. Madore, D. Landolt, "Variable length scale analysis of surface topography: characterization of titanium surfaces for biomedical applications" *Surface & Coatings Technology*, 110, 1998, pp. 48- 56.
122. M. G. Orkoula, P. G. Koutsoukos, M. Robin, O. Vizika, L. Cuiec, "Wettability of CaCO₃ surfaces", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 157, 1999, pp. 333 - 340.
123. Adhesives – Wettability – determination by measurement of contact angle and critical surface tension of solid surface, British Standard BS EN 828: 1998.
124. R. J. Good, "Contact angle, wetting and adhesion: a critical review", *Contact angle, wettability and adhesion*, Ed. K. L. Mittal, 1993, pp. 3- 36.
125. R. D. Hazlett, "On surface roughness effects in wetting phenomena", *Contact angle, wettability and adhesion*, Ed. K. L. Mittal, 1993, pp. 173 - 181.
126. A. W. Adamson, A. P. Gast, "Physical Chemistry of surfaces", a Wiley - Interscience Publication, 6th edition, 1997, pp. 352 - 369.
127. D. Myers, "Surfaces, Interfaces, and Colloids. Principles, and Applications", Willey - VCH, 2nd Edition, 1999, pp. 415 - 437.
128. J. Biko, C. Marzolin, D. Quere, "Pearl drops", *Europhysics Letters*, 47, (2), 1999, pp. 220 - 226.
129. J.C. Russ: "Fractal Surfaces", Plenum Press, New York 1994, pp.27-38.
130. J.C. Russ: "Computer – assisted microscopy: The measurement and analysis of images", Plenum Press, New York 1990.
131. V.G. Mossotti, A.R. Eldeeb: "MORPH – 2, A software package for the analysis of scanning electron micrograph (binary formatted) images for the assessment of the fractal dimension of exposed stone surfaces", U.S. Geological Survey, Open file report 00 – 013, 2000 (<http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of00-013>).
132. Π. Ζεντέλης, «Συστήματα Πληροφοριών Γης», 1993
133. Διον. Ρηγόπουλος, «Στοιχεία για το CAD και GIS» Διδακτικές σημειώσεις για τα Μαθήματα της Β' Κατεύθυνσης του ΔΠΜΣ του ΕΜΠ «Προστασία Μνημείων», Αθήνα ΕΜΠ (2001)
134. Δ. Γεωργουλής, «Εισαγωγή στη Θεωρία και στην εφαρμογή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών» Διδακτικές Σημειώσεις για τα μαθήματα του τμήματος Αρχιτεκτόνων (τομέας Πολεοδομίας και Χωροταξίας), Αθήνα ΕΜΠ (1998)
135. Κ. Κουτσόπουλος, "Εφαρμογές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών", Σημειώσεις Μαθήματος, Αθήνα, ΕΜΠ, 2001.
136. "Understanding GIS: The Arc/Info Method", Environmental Systems Research Institute Inc. Redlands, CA USA, 1990.
137. ESRI Environmental Systems Research Institute Inc., «Manual – ARCVIEW»
138. Fitzner B., Heinrichs K., Kownatzki R., Classification and mapping of weathering forms, in Proc. of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol. 2, 15-18 June, Lisbon, 1992, p. 957-968.

139. Warke P.A., Curran J.M., Turkington A.V., Smith B.J., Condition assessment for building stone conservation: a staging system approach, *Building and Environment*, 38, 2003, p. 1113-1123.
140. Laing, R., Ball, J., Scott, J., Al-Hajj, A., Young, M.E., Stonecleaning: Development of a Life-cycle Cost Model, *Durability of Building Materials and Components 8*, NRC Research Press, M.A. Lacasse and D.J. Vanier (Eds) Vancouver, Canada 30th May-3rd June 1999, p.1739-1745.
141. E. Danzi, "Survey of decay of tezzone '105': methodology for acquisition of data", *Journal of Cultural Heritage Vol. 3*, 2002, p.39-43.
142. P. Salonia, A. Negri, "Historical buildings and their decay: Data recording, analyzing and transferring in an ITC environment", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part 5/W12, 2002, p.302-306.
143. Α. Μοροπούλου, Αικ. Θ. Δελέγκου, Μ. Γεραβέλη, Σ. Μιχαήλ, Α. Μπακόλας, "Στρατηγικός Σχεδιασμός Συμβατών Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης. Η Περίπτωση του Μεγάλου Μελά και του πρώην Ξενοδοχείου Excelsior στην Αθήνα", 2ο Εθνικό Συνέδριο: Ήπιες Επεμβάσεις για την Προστασία Ιστορικών Κατασκευών, εκδ. επιμέλεια Κ. Τρακοσοπούλου, Μ. Δούση, Ν.Κ. Χατζητρύφων, 1ος τόμος, σελ. 341 - 352, Θεσσαλονίκη, 2004.
144. F. Ameziane, "An information system for building production management", *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, 2000, 345-358.
145. A. Moropoulou, E.T. Delegou, J. Giannelos, M. Geraveli, K. Tsigkakou, "Data bases for the assessment diagnosis and maintenance of buildings facades", 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon (2005), Proceedings in CD-Rom.
146. Moropoulou A., Delegou E.T., Innovative technologies and strategic planning methodology for assessing and decision making concerning preservation and management of historic cities. Proc. of the 7th International Symposium of the Organization of World Heritage Cities, eds. A. Moropoulou, E. Kollias & G. Papatheodorou, Rhodes, CD-Rom Proc., 2003.
147. S. Lanza, "Flood hazard threat on cultural heritage in the town of Genoa (Italy)", *Journal of Cultural Heritage*, 4, 2003, pp. 159 -167.
148. Yen John, Langari Reza 1999, "Fuzzy Logic, Intelligence, Control and Information", Prentice Hall, N. J.
149. I. Keramitsoglou, C. Cartalis, C. T. Kiranoudis, "Automatic identification of oil spills on satellite images", *Environmental modelling and software*, 21, 2006, pp. 640-652.
150. Konstandinidou M., Nivolianitou Z., Kyranoudis C., Markatos N., "A fuzzy modelling application of CREAM methodology for human reliability analysis", *Reliability engineering & system safety*, 91, 2006, pp. 706-716.
151. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp46116.html>
152. Tanaka, K. (translated by Tak Niimura), "An Introduction to Fuzzy Logic for practical applications", Springer, 1997, pp. 5, 6, 9-12, 82-83.

153. Γ. Τσεκούρας, Διδακτορική Διατριβή, “ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ”, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
154. Γ. Β. Μπάφας, “Μη Γραμμικά και Ασαφή Συστήματα Αυτόματης Ρύθμισης και Πληροφορικής”, Αθήνα 2001.
155. E. Mamdani, S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy Logic controller, International Journal of Man-Machine Studies”, 1975, 7 (1), pp.1-13.
156. G. J. Klir, T. A. Folger, “Fuzzy Sets, Uncertainty and Information”, 1988, State University of New York, Prentice Hall International Editions.
157. P. Loslever, J.C. Popieul, P. Simon, “From classic statistical characterization to fuzzy windowing based characterization for the exploratory analysis of miscellaneous time variables: example in the field of car driving studies”, Fuzzy sets and systems, 2003, 137 (2), pp. 271-296.
158. C. Raptis, C. Siettos, C. Kiranoudis, G. Bafas, “Classification of aged wine distillates using Fuzzy and Neural Network Systems”, Journal of Food Engineering, 2000, 46 (4), pp. 267-275.
159. D. Vakalis, H. Sarimveis, C. Kiranoudis, A. Alexandridis, G. Bafas, “A GIS based operational system for wild land fire crisis management I. Mathematical modelling and simulation”, Applied Mathematical Modelling, 2004, 28 (4), pp. 389-410.
160. E. Tron, M. Margaliot, “Mathematical Modelling of Observed Natural Behaviour: a Fuzzy Logic approach”, Fuzzy sets and systems, 2004, 146 (3), pp. 437-450.
161. Lin Cheng- Jian, “A GA- based neural fuzzy system for temperature control”, Fuzzy sets and systems, 2004, 143 (2), pp. 311-333.
162. Α. Μοροπούλου, Μικροσκοπία Οπτικών Ινών, Σημειώσεις Ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών για το Μάθημα «Δομικά Υλικά» 9^{ου} εξ., Σχ. Χημ.-Μηχ. ΕΜΠ, ακ. έτος 2009-2010.
163. <http://www.nlg.gr>
164. Ζώη Ξανθή: Μεταπτυχιακή Εργασία: «Ιστορική και κριτική Θεώρηση υλικών και επεμβάσεων συντήρησης υλικών και επεμβάσεων συντήρησης σε ιστορικά κτίρια μουσείων, (Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, Βυζαντινό και Χριστιανικό Μουσείο, Μουσείο Μπενάκη)», ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», (Επιβλέπουσα Καθ. Α. Μοροπούλου) (2003).
165. Μ. Κουή Θερμογραφία Υπερύθρου, Σημειώσεις Ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών για το Μάθημα «Δομικά Υλικά» 9^{ου} εξ., Σχ. Χημ.-Μηχ. ΕΜΠ, ακ. έτος 2009-2010.
166. Α. Μπισμπίκου, Διδακτορική Διατριβή: «Μελέτη – Αίτια και μηχανισμοί – της φθοράς των δομικών υλικών του Αρχαιολογικού Χώρου της Ελευσίνας σε σχέση με την ατμοσφαιρική ρύπανση», Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
167. Παπαδημητρίου Γ.: «Μέθοδοι ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και μικροανάλυσης», Διδακτικές σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα (1999).

168. JEOL L.T.D.: «A Guide to Scanning Microscope Observation», εγχειρίδιο για τη χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης: Scanning Electron Microscope JEOL JSM-5600.
169. Reed S.J.B.: «Electron microprobe analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology», Cambridge University Press, Cambridge (1996).
170. Μ. Κουή, Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier, Σημειώσεις Ασκήσεων του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών για το Μάθημα «Φθορά και Προστασία Υλικών» 9^{ου} εξ., Σχ. Χημ.-Μηχ. ΕΜΠ, ακ. έτος 2009-2010.
171. Ε. Καμίτσος, Γ. Χρυσικός, «Στοιχεία φασματοσκοπίας υπερύθρου» Διδακτικές Σημειώσεις ΠΜΣ «Εφαρμοσμένη Μοριακή Φασματοσκοπία», Τμ. Χημείας Παν. Κρήτης, 1999.
172. Αθ. Βαλαβανίβης, «Βασικές αρχές μοριακής φασματοσκοπίας και εφαρμογές στην Οργανική Χημεία», Εκδ. Σύγχρονα Θέματα, Αθήνα, 1990, σελ. 78, 47 – 65.
173. “Proscan – 3D Surface profiling and topography” User Manual, Scantron Industrial Products LTD, U.K.
174. Stout, K.J. Sullivan, P.J. Dong, W.P. Mainsah, E. Luo, N. Mathia, T. Zahouani, H., 1993. The development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. Research Working Paper EUR 15178 EN, Programme for Applied Metrology and Chemical Analysis (BCR), Uni. of Birmingham, pp. 25, 98, 175, 209, 231.
175. D. R. Bickel, “Robust estimators of the mode and skewness of continuous data”, Computational Statistics & Data Analysis”,39 (2002) pp. 153-163.
176. “Contact angle Goniometer Instruction manual”, Rame-Hart, Inc. N. Jersey, USA.
177. Ν. Π. Αβδελίδης, Διδακτορική Διατριβή, «Εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας για τον έλεγχο δομικών υλικών σε κατασκευές», Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου, ΕΜΠ, 2002.
178. Χ. Ρ. V. Maldague, “Nondestructive evaluation of Materials by Infrared Thermography”, Springer, Verlag, 1993.
179. Αικ. Θ. Δελέγκου, Ν. Π. Αβδελίδης, Π. Μπέη, Α. Μοροπούλου, «Χρήση της Παλμικής Υπέρυθρης Θερμογραφίας στην Αποτίμηση Επεμβάσεων Καθαρισμού Μαρμάρινων Αρχιτεκτονικών Επιφανειών», 6^ο Εθνικό Συνέδριο ΜΚΕ της ΕΛΕΜΚΕ Νοέμβριος 2008, Πρακτικά Συνεδρίου σε CD-Rom.
180. N.P. Avdelidis, D.P. Almond, “Transient thermography as a through skin imaging technique for aircraft assembly modeling and experimental results”, Infrared Physics & Technology, 45, 2004, pp. 103-114.
181. H.G.Walther, “Surface roughness influence on photothermal radiometry”, J. Applied Surface Science, 193, 2002, pp. 156-166.
182. Μ. Καρόγλου, Διπλωματική Εργασία, «Βελτιστοποίηση της μέτρησης χρώματος των ζωγραφικών έργων τέχνης μέσω αντιστρεπτής έγχρωμης φωτογραφικής διαφάνειας» Επιβλέπων: Καθ. Ι. Χρυσουλάκης, 1996, ΕΜΠ.
183. G.Wyszecki, W.S. Stiles, Color Science: Concepts and methods, qualitative data and formula, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1982.

184. Colorimeter LMG 159/160 operating instructions, DR LANGE Color – pen (1999).
185. www.fepa-abrasives.org
186. D. Zipperian, "Silicon Carbide Abrasive Grinding", Quality matters Newsletter, PACE Technologies, Vol. 1, Issue 2, Nov. 2002.
187. W.P.W. Lam, C. Kerr, A.J. Chaudhary, S.M. Grimes, "The use of physical grinding with SiC abrasive papers as preparation techniques for increasing the surface area of a substrate material", Structure, Struers Journal of Materialography, 1/2004.
188. S.D. Ross, in: V.C. Farmer (Ed.), The Infrared Spectra of Minerals, Mineralogical Society Monograph 4, London, 1974, p.383, 427.
189. W.B White, in V.C. Farmer (Ed.), The Infrared Spectra of Minerals, Mineralogical Society Monograph 4, London, 1974, p. 227.
190. I. Petrov, B. Soptrajanov, Spectrochimica Acta 31A (1975), p.309.
191. G. Schirripa Spagnolo, G. Guattari, C. Sapia, D. Ambrosini, D. Paoletti, G. Accado: "Three-dimensional optical profilometry for artwork inspection", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, (2000), 353-361
192. Stout K.J., Blunt L.A., J. Intern. Machine Tools Manufact. 1995; 35:219-229.
193. Stemp W.J., Stemp M., J. Archaeol. Sc. 2001; 28: 81-88.
194. R. A. Laing, J. Ball, J. Scott, M. E. Young, "The implications of stone cleaning for planned building maintenance" 9th Int. Congress on Deterioration and conservation of stone, Venice, 2000, pp. 813 - 817.
195. Sansonetti, A. , Passeti, A. , « Comparison between cleaning procedures with laser and other methods. Some application on monuments in Italy.», 4th Int. Sym. on the conservation of Monuments in the Mediterranean, in Proc. Vol. 3, 1997, pp. 345-362.
196. A. Moropoulou, K. Bisbikou, B. Christaras, A. Kassoli-Fournaraki, N. Zouros, Th. Makedon, B. Fitzner, K. Heinrichs, "Examination of the weathering susceptibility of the building stone of Demeter Sanctuary in Eleusis: Origin, petrography and physical, mechanical and microstructural properties", Bollettino Geofisico, anno 18 N. 1, pp37 – 48, 1995.
197. C. Andrew, "Towards an aesthetic theory of building soiling" Int. Congress "Stone Cleaning" Edinburgh, 1992 pp. 63
198. Avdelidis N.P., Almond D. 2004. Transient thermography as a through skin imaging technique for aircraft assembly: modelling and experimental results. Infrared Physics & Technology, 45: 103-114.
199. Vallerand S., Maldague X. 2000. Defect characterization in pulsed thermography: a statistical method compared with Kohonen and Perceptron neural networks. NDT&E International,33: 307-315.
200. Mabrouki F., Genest M., Shi G., Fahr A. 2009. Numerical modelling for thermographic inspection of fiber metal laminates. NDT&E International, 42: 581-588.
201. Bison P.G., Cernuschi F., Grinzato E., Marinetti S., Robba D. 2007. Ageing evaluation of thermal barrier coatings by thermal diffusivity. Infrared Physics & Technology,49: 286-291.

202. Carlomagno G.M., Meola C. 2002. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT. *NDT&E International*, 35: 559-565.
203. Arndt R.W. 2010. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, 53: 246-253.
204. Karoglou M., Moropoulou A., Giakoumaki, A. & Krokida M.K. 2005. Capillary rise kinetics of some building materials. *Journal of Interface and Colloid Science*, 284(1): 260-264.
205. Chatterjee K., Tuli S., Pickering S.G., Almond D. 2011. A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques. *NDT&E International*, in press.
206. N.A. Katsanos, G. Karaiskakis, "Kinetic study of reactivity of marble with sulphur dioxide by reversed-flow gas chromatography", *Journal of Chromatography A*, 1987, pp. 423-435.
207. P. Maravelaki-Kalaiztaki, "Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin" *Analytica Chimica Acta*, 532, (2005), pp. 187-198.
208. Zadeh L., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Trans Syst, Man, Cybern* 1973; 3:28-44.
209. Mamdani E. "Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plants", *Proceedings IEE* 1974; 121 (12):1585-1588.
210. J. Klir, B. Yuan, "Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications", New Jersey, Prentice Hall, 1995.
211. W. Predrycz, "Fuzzy control and Fuzzy systems", 2nd ed. London, Research Study Press LTD, 1993.
212. O. Wrong, C. Harland, "Sevelamer and Other Anion-Exchange Resins in the Prevention and Treatment of Hyperphosphataemia in Chronic Penal Failure", *Nephron Physiol* 2007; 107:17-33.

13. Παράρτημα

13.1 Διπλωματικές & Μεταπτυχιακές Εργασίες που υποστηρίχθηκαν κατά την εκπόνηση της Διδακτορικής Διατριβής στο πλαίσιο της συνέργιας με τα ερευνητικά προγράμματα:

- “Διάγνωση της Φθοράς των Όψεων του Ιστορικού Κτιρίου της Εθνικής Βιβλιοθήκης της Ελλάδος και Μελέτη των Υλικών και των Επεμβάσεων για τη Συντήρησή τους”, (Επ. Υπεύθυνη Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου)
- “Επεμβάσεις Συντήρησης των Αρχιτεκτονικών Επιφανειών της Πρόσοψης και του Χώρου Υποδοχής του Ιστορικού Κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου Αθηνών”, (Επ. Υπεύθυνη Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου)

Διπλωματικές Εργασίες

Σπυριδών Κουρής: «Διάγνωση φθοράς και αποτίμηση πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού σε αρχιτεκτονικές επιφάνειες με μη καταστρεπτικές τεχνικές», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2001.

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή,

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Μπατής

Εμμανουήλ Δεληδάκης: «Διάγνωση της φθοράς και αποτίμηση πιλοτικών επεμβάσεων καθαρισμού με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών, με εφαρμογή στις μαρμάρινες αρχιτεκτονικές επιφάνειες του ιστορικού κτιρίου του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου» Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2003.

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή,

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Μπατής

Νταή Δήμητρα: “Μελέτη της αποτίμησης των επεμβάσεων καθαρισμού στις μαρμάρινες επιφάνειες του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου με Φασματοσκοπία FT-IR” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2003

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου,

Καθ. ΕΜΠ, Φ. Ρουμπάνη – Καλαντζοπούλου,

Αλευροφά Ηρώ: "Εκτίμηση βαθμού καταλληλότητας επεμβάσεων καθαρισμού μαρμάρινων επιφανειών αρχιτεκτονικών μνημείων με τη χρήση της ασαφούς λογικής (fuzzy logic)", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2004.

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Ν. Μαρκάτος,
Αν. Καθ. ΕΜΠ, Χ. Κυρανούδης

Μεταπτυχιακές Εργασίες

Γιαμπάνης Δημήτριος: «Η συμβολή φασματοσκοπικών και χρωματογραφικών μεθόδων στη διάγνωση της φθοράς και στη μελέτη της συντήρησης των όψεων ιστορικών κτιρίων», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Νοέμβριος 2001.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή (Επιβλέπουσα)
Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου
Καθ. ΕΜΠ, Γ. Μπατής
Καθ. ΕΜΠ, Ι. Χολέβας
Καθ. ΕΜΠ, Φ. Γουλιέλμος

Κουρής Σπυρίδων: «Συμβολή των μη καταστρεπτικών μεθόδων στον έλεγχο ποιότητας των υλικών και επεμβάσεων συντήρησης. Εφαρμογή στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Νοέμβριος 2003.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου (Επιβλέπουσα)
Καθ. ΕΜΠ, Ν. Κουλουμπή
Καθ. ΕΜΠ, Γ. Μπατής
Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή
Καθ. ΕΜΠ, Ι. Πρασιανάκης

Μαυρίδης Θεόδωρος: «Μελέτη επιλογής κατάλληλων επεμβάσεων καθαρισμού στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο της Αθήνας – Πιλοτικές Εφαρμογές», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Μάιος 2003.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή (Επιβλέπουσα)
Καθ. ΕΜΠ, Ν. Καλογεράς
Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου
Καθ. ΕΜΠ, Εμ. Μπίρης
Καθ. ΕΜΠ, Μ. Μπεάζη

Υψηλάντη Ελένη: «Χαρακτηρισμός, διάγνωση φθοράς ιστορικών δομικών υλικών και αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης με ορυκτολογικές και πετρογραφικές μεθόδους. Εφαρμογή στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Νοέμβριος 2003.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Παπαδημητρίου

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή

Καθ. ΕΜΠ, Γλ. Κακάλη

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη

Βλαχάκης Βλαδήμπος: «Προσδιορισμός δεικτών αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού με Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Απρίλιος 2004.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Εμ. Μπίρης

Καθ. ΕΜΠ, Ν. Κουλουμπή

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Παπαδημητρίου

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Κουή

Καραβίτη Ελένη: «Ορυκτολογική μελέτη μαρμάρινων αρχιτεκτονικών επιφανειών και ψηφιακή επεξεργασία εικόνων ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με στόχο την εξαγωγή παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Φεβρουάριος 2005.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Βγενόπουλος

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Ε. Μπόσκος

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Παπαδημητρίου

Καθ. ΕΜΠ, Ν. Σπυρέλλης

Παπαποστόλου Φανή: «Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) με στόχο την εξαγωγή παραμέτρων αποτίμησης επεμβάσεων καθαρισμού σε ανάγλυφες μαρμάρινες επιφάνειες», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Απρίλιος 2006.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Γ. Μπατής

Καθ. ΕΜΠ, Π. Τουλιάτος

Καθ. ΕΜΠ, Ι. Πρασιανάκης

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη

Σάνδρη Αικατερίνη: «Ταξινόμηση των τύπων φθοράς των υλικών με τη χρήση Γεωγραφικών συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Υποστήριξη στο στρατηγικό σχεδιασμό των επεμβάσεων

συντήρησης», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Δεκέμβριος 2006.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ:

Καθ. ΕΜΠ, Α. Μοροπούλου, (Επιβλέπουσα)

Καθ. ΕΜΠ, Α. Σιόλας

Καθ. ΕΜΠ, Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη

Επικ. Καθ. ΕΜΠ, Χ. Ιωαννίδης

Επικ. Καθ. ΕΜΠ, Ι. Σαγιάς

13.2 Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από αυτή τη Διδακτορική Διατριβή

13.2.1 Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά με Κριτές

1. N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, D.P. Almond, A. Moropoulou, "Surface roughness evaluation of marble by 3-D laser profilometry and pulsed thermography", J. NDT & E International 37(7), (2004), pp. 571-575.
2. Moropoulou, A. Delegou, E.T. Vlahakis, V. Karaviti, E. 2007, 'Digital processing of SEM images for the assessment of evaluation indexes of cleaning interventions on pentelic marble surfaces', Journal of Materials Characterization, 58[11-12], 1063-1069.
3. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "Optical Inspection for quantification of decay on stone surfaces", J. NDT & E International 40, (2007), pp. 2-11.
4. E. T. Delegou, N. P. Avdelidis, E. Karaviti, A. Moropoulou, "NDT&E techniques and SEM-EDS for the assessment of cleaning interventions on pentelic marble surfaces" J. X-Ray Spectrometry, 2008; 37:435-443.
5. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "A Morphological Fusion Algorithm for Optical Detection and Quantification of Decay Patterns on Stone Surfaces", Journal of Construction and Building Materials, 22, (2008), pp. 228-238.
6. E.T. Delegou, M. Krokida, N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, "Effect of Fracturing and Luminosity on Pulsed Thermography applied on Marble Surfaces", J. NDT & E International, 2011, submitted.
7. E. T. Delegou, M. Konstandinidou, Ch. Kiranoudis, A. Moropoulou, "Decision Making on Cleaning of Marble Artistic Surfaces, Using a Fuzzy Logic Model. Assessment Criteria and Critical Parameters", Journal of Archaeological Science, 2011, submitted.
8. E. T. Delegou, E. Sandri, J. Marakakis, J. Sayas, A. Moropoulou, "Building Durability Control using GIS", Building and Environment, 2011, submitted.

13.2.2 Κεφάλαια σε βιβλία

1. A. Moropoulou, M. Karoglou, E. T. Delegou, "Models and tools to make decisions", in Focus Book, 2006.
2. P. Kapsalas, M. Zervakis, P. Maravelaki-Kalaitzaki, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "Machine Vision Schemes Towards Detecting & Estimating The State Of Corrosion", in "Pattern Recognition and Signal Processing in Archaeometry: Mathematical and Computational Solutions for Archaeology " to be published by IGI Global in press.

13.2.3 Δημοσιεύσεις σε διεθνείς περιοδικές εκδόσεις με κριτές

1. A. Moropoulou, E.T. Delegou, N.P. Avdelidis, M. Kouï, "Assessment of cleaning conservation interventions on architectural surfaces using an integrated methodology", *Materials Issues in Art and Archaeology VI*, Eds: P. Vandiver, M. Goodway, J.R. Druzik, J.L. Mass, Vol. 712, Publ. Materials Research Society, (2002), pp. 69-76.
2. N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou, D.P. Almond, "NDT & E for the surface roughness of marble", *Thermosense XXVI*, Eds: D.D. Burleigh, E. Cramer, G.R. Peacock, Vol. 5405, SPIE Publ., (2004), pp. 425-430.
3. A. Moropoulou, E. T. Delegou, E. Karaviti, V. Vlahakis, "Assessment of atmospheric pollution impact on the microstructure of marble surfaces", 16th European Conference of Fracture (ECF16), Special Symposium Measuring Monitoring and Modeling Concrete Properties: in honor of S.P. Shah (MMMCP), Alexandroupolis, Greece, (2006), pp 695-701.

13.2.4 Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων με Πλήρη Ανάπτυξη, Μετά από Κρίση

1. A. Moropoulou, E.T. Delegou, N.P. Avdelidis, M. Kouï, "Non-destructive investigation of architectural surfaces in polluted urban atmosphere", in *NDT 2000 - the 39th Conference of the British Institute of NDT*, Buxton – United Kingdom, (2000), pp. 143-148.
2. A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, M. Kouï, "Infrared thermography in the evaluation of cleaning interventions on architectural surfaces", in *Inframation 2001 – International Conference on infrared thermography Orlando – Florida, USA*, (2001), pp. 171-175.
3. N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, E.T. Delegou, "A thermographic study for the assessment of historic structures", in the 7th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT), Brussels – Belgium, (2004), Book of Proceedings. (δεν έχει σελίδες)
4. M.Kouï, E.T. Delegou, D.Dai, E. Rapti, T. Mavridis, A. Moropoulou, "FTIR for the assessment of Cleaning Interventions on Pentelic marble surfaces", in the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Lisbon, (2004), Proceedings in CD-Rom, Book of Abstracts: Influence of the Environmental and Defence on the Territory on Recovery of Cultural Heritage, Edited by: L. Aires Barros, F. Zezza, assistant editors: A. Dionisio, M. Rodrigues, p. 128.
5. N.P. Avdelidis, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "A surface roughness investigation on pentelic marble using NDE quantification approaches", 5th National Conference of the Hellenic Society for Non-Destructive Testing, November 2005, Athens, Greece, Proceedings in CD-Rom.
6. A. Moropoulou, E.T. Delegou, H. Aleurofa, M. Konstantinidou, Ch. Kiranoudis, N. Markatos, "A Fuzzy Logic Approach for the Assessment of Cleaning Interventions on Marble Surfaces", 32nd International Conference of Slovak Chemical Engineering Society, High Tatras, Slovakia, (2005), Proceedings in CD-Rom.
7. P. Kapsalas, M. Zervakis, P. Maravelaki-Kalaitzaki, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "NDT detection of decay areas and evaluation of their attributes", XXI CIPA, Conference, Athens, October 2007, Proceedings in CD-Rom.
8. Antonia Moropoulou, Ekaterini T. Delegou, Myrto Konstantinidou, Chris Kiranoudis, "Decision making about cleaning interventions on marble surfaces using a fuzzy logic

- approach”, 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul (2008), Vol. 3, pp 1275-1285.
9. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T Delegou, and A. Moropoulou, “Towards Enriching the Estimation of Stone Degradation through Computer Vision Analysis”, 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, eds. J.W. Lukaszewicz, P. Niemcewicz, September 2008, Torun Poland, Vol. I, pp. 397-406.
 10. Ekaterini T. Delegou, Antonia Moropoulou, “Evaluation, Criteria & Decision Making on Cleaning Interventions of Marble Surfaces”, 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, eds. J.W. Lukaszewicz, P. Niemcewicz, September 2008, Torun Poland, Vol. II, pp. 1179-1188.
 11. P. Kapsalas, P. Maravelaki-Kalaitzaki, M. Zervakis, E.T Delegou, and A. Moropoulou “A computer vision framework for accurately extracting corroded areas and establishing the association between the type of corrosion and its extend and morphology”, 8th Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, 2010, Patras, Greece, in press.
 12. E. T. Delegou, E. Sandri, J. Marakakis, J. Sayas, A. Moropoulou, “From building pathology to durability via GIS”, 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto Portugal, 2011, Vol. IV, pp. 2185-2192.
 13. E.T. Delegou, M. Krokida, N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, “Assessment of cleaning interventions on marble surfaces using pulsed thermography”, 5th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Ioannina, Greece, 2011, in press.

13.2.5 Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Ελληνικών Συνεδρίων με Κριτές

1. Αικ. Θ. Δελέγκου, Αικ. Σάνδρη, Α. Μοροπούλου, Ι. Μαρακάκης, Ι. Σαγιάς, « Διαχείριση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών μαρμάρινων επιφανειών ιστορικών κτιρίων, πριν και μετά από επεμβάσεις καθαρισμού, με χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών», 6ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Αθήνα, 31 Μαΐου- 2 Ιουνίου 2007, Τόμος Α, σελ. 129-132.
2. E. T. Delegou, M. Konstandinidou, Ch. Kiranoudis, A. Moropoulou, “Assessment of Cleaning Interventions on Marble Surfaces Using a Fuzzy Model”, 2nd Symposium “Archaeological Research & Technologies” ARCH_RNT, Department of History, Archaeology and Cultural Resources Management, University of Peloponnese, KALAMATA, Greece, 21-23 October 2010, in press.
3. E. T. Delegou, M. Konstandinidou, Ch. Kiranoudis, A. Moropoulou, “Decision Making System for the Assessment of Cleaning Interventions on Marble Surfaces Using Fuzzy Logic”, 8th Greek Conference of Chemical Engineering, Thessaloniki, May 2011, pp.

13.2.6 Ανακοινώσεις σε Συνέδρια με συγγραφή περίληψης

1. A. Moropoulou, E. T. Delegou, N.P. Avdelidis, “ Laser profilometry for surface roughness and 3-D micro-topography assessment on pentelic marble”, 4th International Conference on NDT of the Hellenic society of NDT (HSNDT) October 2007 Chania, Crete, Greece, Proceedings in CD-Rom.
2. Αικ. Θ. Δελέγκου, Ν. Π. Αβδελίδης, Π. Μπέη, Α. Μοροπούλου, «Χρήση της Παλμικής Υπέρυθρης Θερμογραφίας στην Αποτίμηση Επεμβάσεων Καθαρισμού Μαρμάρινων

Αρχιτεκτονικών Επιφανειών», 6ο Εθνικό Συνέδριο ΜΚΕ της ΕΛΕΜΚΕ Νοέμβριος 2008, Πρακτικά Συνεδρίου σε CD-Rom.

3. P. Kapsalas, M. Zervakis, P. Maravelaki-Kalaitzaki, E.T. Delegou, A. Moropoulou, "Automated Detection of Robust Morphology Regions to Quantify Corrosion Damage & Identify its Type", September, 2010, "Mediterranean Meeting on Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment" Taormina, Italy, Πρακτικά Συνεδρίου σε CD-Rom.

13.2.7 Δημοσιεύσεις σε Ελληνικά Τεχνικά Περιοδικά

1. Α. Μοροπούλου, Α.Θ. Δελέγκου, «Κριτήρια και Μεθοδολογία Αποτίμησης Επεμβάσεων Καθαρισμού σε Αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Εφαρμογές σε Ιστορικά Κτίρια», Ύλη και Κτίριο, Τεύχος 53 (Οκτώβριος – Νοέμβριος 2001), σελ. 129-135.