ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ» ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διαγνωστική μελέτη του Ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο. Πρόταση υλικών στερέωσης και αποκατάστασης».

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΕΡΑΜΙΔΑΣ
Φυσικός
Α.Μ. : 401001741

Επιβλέπουσα : Καθ. Α. Μοροπούλου Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π

Αθήνα 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ» ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

ΜΕΤΑΠΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διαγνωστική μελέτη του Ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο. Πρόταση υλικών στερέωσης και αποκατάστασης».

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΕΡΑΜΙΔΑΣ

Επιτροπή επίβλεψης και υποστήριξης:

- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Καθ. Χ. Ιωαννίδης, Σχ. ΑΤΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Δρ. Α. Καραμπέρη, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Δρ. Μ. Καρόγλου, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Μ. Μιχαηλίδου, Έφορος Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου
- Μ. Πίκουλα, Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου

Επιτροπή Εξέτασης:

- Ομότ. Καθ. Ε. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ
- Καθ. Χ. Ιωαννίδης, Σχ. ΑΤΜ ΕΜΠ
- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Καθ. Ι. Ψυχάρης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν ο χαρακτηρισμός των δομικών υλικών, η μελέτη φθοράς και η δημιουργία προτάσεων επέμβασης και συντήρησης του αρχαίου ναού του πυθίου Απόλλωνος στην ακρόπολη της Ρόδου. Πρόκειται για ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα περιπτέρου ναού, δωρικού ρυθμού του τρίτου αιώνα π.Χ..

Η μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Επιστήμης και τεχνικής των Υλικών της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την επίβλεψη της Καθ. Α. Μοροπούλου Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π και της πολιτικού μηχανικού κ. Μ. Πίκουλα, Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου, στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προστασία Μνημείων» Κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης».

Στην επιστήμονα που θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη και εκτίμηση μου, είναι η Καθ. Α. Μοροπούλου Σχ. ΧΜ Ε.Μ.Π για την καθοδήγηση και την υποστήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, η όποια θα ήταν αδύνατη χωρίς εκείνην.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα κάθε μέλος ξεχωριστά της ερευνητικής ομάδας για την προθυμία τους να μου προσφέρουν τη βοήθειά τους απλόχερα και μου που με έκαναν να νιώσω μέλος μιας επιστημονικής ομάδας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Διδάκτορα Μ. Καρόγλου για την καθοδήγηση της, την Υπ. Δ. Μαίρη Αποστολοπούλου για τη βοήθειά της σε θέματα πειραματικής διαδικασίας, την Υπ. Δ. Ε. Τσιλιμαντού για τη βοήθεια της σε τεχνικά και υπηρεσιακά ζητήματα, το συμφοιτητή μου Ε. Αδαμόπουλο για τη βοήθειά του στη φωτογραφική τεκμηρίωση του ναού. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό της εφορείας αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου για τη συνεργασία που μας παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τους γονείς μου, που είναι ο λόγος που έφτασα ως εδώ και προσπαθώ ακόμα.

Σας ευχαριστώ πολύ

Περίληψη

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκε επί τόπου επίσκεψη στο ναό του πύθιου Απόλλωνα στην ακρόπολη της Ρόδου. Σκοπός της επίσκεψης αυτής ήταν ο χαρακτηρισμός των δομικών υλικών του ναού, η μελέτη φθοράς τους και η δημιουργία προτάσεων επέμβασης αποκατάστασης στον αρχαίο ναό του πυθίου Απόλλωνος.

Στα πλαίσια της ολοκλήρωσης της μελέτης αυτής, πραγματοποιήθηκε μία πρώτη επί τόπου διαγνωστική μελέτη στο χώρο του ναού. Στη συνέχεια αποφασίστηκε βάση των συμπερασμάτων της ερευνητικής ομάδας να πραγματοποιηθούν κάποιες μη καταστρεπτικές επιτόπου διαγνωστικές μέθοδοι καθώς επίσης και αναλυτικές διαγνωστικές τεχνικές στο εργαστήριο ύστερα από την πραγματοποίηση δειγματοληψίας.

Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές, που έλαβαν χώρα, ήταν η φωτογραφική απεικόνιση της υφιστάμενης κατάστασης του ναού με έμφαση στις φθορές του, η μικροσκοπική αναγνώριση τύπων φθοράς με την τεχνική διαδικασία της μικροσκοπίας οπτικών ινών, η λήψη θερμογραφημάτων υπέρυθρου για να τον εντοπισμό φθορών, η κρουσιμέτρηση για τον υπολογισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δομικών λίθων, η χρωματομετρία για την εύρεση χρωματικά συμβατών λίθων αποκατάστασης, η μέτρηση της υγρασίας των κιόνων καθ' ύψος και η μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Οι αναλυτικές τεχνικές αποτίμησης της υφιστάμενης κατάστασης, που έλαβαν χώρα στα δείγματα, ήταν η υδατοαπορρόφηση για τον υπολογισμό της ανερχόμενης υγρασίας, η μέτρηση της συγκέντρωσης των διαλυτών αλάτων στα δείγματα για έναν προσεγγιστικό υπολογισμό της επίδρασης του περιβάλλοντος στο μνημείο, η χρήση οπτικού μικροσκοπίου για την περιγραφή μακροσκοπικά της δομής του λίθου, η ποροσιμετρία υδραργύρου για τον υπολογισμό του πορώδους των λίθων. Για την εύρεση της σύστασης των λίθων του ναού έγινε χρήση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης SEM, της θερμικής μέθοδο ανάλυσης TG και της ορυκτολογικής ανάλυσης XRD.

Όλα τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία και την ανάλυση μοντέλου διακριτών στοιχείων του ναού, που σε συνδυασμό με την εξέταση συμβατών και επιτελεστικών υλικών αποκατάστασης οδήγησε σε προτάσεις για την βελτίωση της συμπεριφοράς του ναού σε σεισμική καταπόνηση.

Από κάθε τεχνική διαγνωστικής μελέτης εξήχθησαν αποτελέσματα τα οποία αφενός συντελούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων συνολικά για τον χαρακτηρισμό των υλικών, τη διάγνωση της φθοράς στα υλικά δόμησης και αφετέρου στη δημιουργία ολοκληρωμένης πρότασης αποκατάστασης του ναού του πυθίου Απόλλωνος. Ο αυθεντικός λίθος κατασκευής του ναού, όπως και ο λίθος αποκατάστασής του είναι βιοκαλκαρενίτης. Η κυρία φθορά που παρατηρείται στο δομικά υλικά είναι η απομοίωση της μάζας του λίθου λόγω συνδυασμού της δράσης των διαλυτών αλάτων και των ισχυρών ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Τα σκυροδέματα που

χρησιμοποιήθηκαν κατά την στερέωση και αποκατάσταση του ναού προτείνεται να αφαιρεθούν καθώς εντείνουν τους μηχανισμούς φθοράς του μνημείου.

Abstract

This master thesis involves the diagnostic study of the building materials of the temple of Pythian Apollo in Rhodes. Part of this thesis was contacted in situ with non-distractive techniques. During this diagnostic study on sight, the results were concluded threw non-distractive technics and analytical techniques were used in lab after selecting representative samples based on the results of the in-situ study.

The non-distractive techniques which were implemented were digital pictures of the temple with emphasis on the decay, digital microscopy in order to recognize the type of decay, infrared thermography in order to detect decay, schmidt hammer test in order to estimate the compressive strength of the stones, as well as colorimetry in order to assess the color parameters of the stones and finally temperature an relative humidity measurements in order to evaluate the impact of the environment on the monument.

The analytical technics which were used on the lab on samples to assess the situation of the temple were optical microscope in order to examine the samples (digital analysis was performed), XRD analysis in order to study the mineralogical composition of the samples, DTA/TG analysis in order to study the composition of the samples, SEM coupled with EDAX in order to study the microstructure and the composition of different areas of the samples, as well as total soluble salts measurements in order to assess the concentration of soluble salts in the samples which are in directly connected to decay and use of incompatible materials.

From each implemented technique of the diagnostic study, results were concluded and from coupling all the results final conclusions were derived. Regarding the characterization of the materials, the diagnosis of their decay and finally the assessment of the currented condition an integrated restoration proposal for the temple of Pythian Apollo was designed. The authentic stone by which the temple was constructed, as well as the restoration stones are the biocalcarenite stones. The main type of the decay which is observed is the loss of the mass of the stone due to the corrosive active action of soluble salts in synergy with the strong winds in this area. The cement mortars and concretes that were used in the previous restoration to consulate the restore of the temple must be removed as they aggravate the decay mechanisms of the monument.

Περιεχόμενα

1 Γενικό Θεωρητικό 1
1.1 Κύρια δομικά υλικά των αρχαίων μνημείων 1
1.1.1 Ορυκτά 1
1.1.2 Πετρώματα 1
1.2 Φθορά στα μνημεία 5
2 Ειδικό Θεωρητικό 7
2.1 Ο ναός του πυθίου Απόλλωνος 7
2.1.1 Η ακρόπολη της Ρόδου 7
2.1.2 Περιγραφή του ναού 9
2.1.3 Προηγούμενες αποκαταστάσεις 11
3 Πειραματικό Μέρος 13
3.1 Μεθοδολογία προσέγγισης. 13
3.2 Μέθοδοι και τεχνικές διαγνωστικής μελέτης 13
3.3.1 Μη καταστρεπτικοί μέθοδοι ανάλυσης 13
3.3.2 Αναλυτικοί μέθοδοι μελέτης 14
3.3 Δειγματοληψία 18
4 Αποτελέσματα- Συζήτηση Αποτελεσμάτων 27
4.1. Μη καταστρεπτικές τεχνικές 27
4.1.1. Μακροσκοπικές παρατηρήσεις 27
4.1.1.1. Μακροσκοπική περιγραφή του πρώτου κίονα 28
4.1.1.2. Μακροσκοπική περιγραφή των υπόλοιπων τριών κιόνων 37
4.1.2. Μικροσκοπία οπτικών ινών 41
4.1.2.1. Επιτόπου μικροσκοπία οπτικών ινών στον κίονα. 41
4.1.2.2. Μικροσκοπία οπτικών ινών στα δείγματα. 48
4.1.3 Μέτρηση σχετικής υγρασίας 54
4.1.4 Κρουσιμέτρηση 60
4.1.5 Θερμογραφία υπέρυθρου 66
4.1.6 Χρωματομετρία 71
4.2. Αναλυτικές μέθοδοι μελέτης 72
4.2.1 Οπτικό μικροσκόπιο 72
4.2.2 Προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων – (XRD) 75
4.2.3 Θερμική ανάλυση TG 80

4.2.4 Ποροσιμετρία Υδραργύρου 86
4.2.5 Μέτρηση υδατοαπορρόφησης λίθου βιοκαλκαρενίτη Ρόδου. 90
4.2.6 Υπολογισμός πορώδους μέσω προγράμματος Mipar. 91
4.2.7 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) 93
4.2.8 Υπολογισμός διαλυτών αλάτων στα δείγματα του λίθου 102
5 Συμπεράσματα Διαγνωστικής Μελέτης 105
6 Πρόταση υλικών στερέωσης και αποκατάστασης του ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο. 106
6.1. Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο διακριτών στοιχείων 107
6.2 Αποτελέσματα από το Μοντέλο Διακριτών Στοιχείων 111
Βιβλιογραφία 113
Παράρτημα 119

1 Γενικό Θεωρητικό

1.1 Κύρια δομικά υλικά των αρχαίων μνημείων

Οι περισσότερες αρχιτεκτονικές κατασκευές που σώζονται μέχρι σήμερα από τον αρχαίο κόσμο έχουν ως κύριο δομικό υλικό τους φυσικούς λίθους[1]. Οι φυσικοί λίθοι προέρχονται απευθείας από το έδαφος χωρίς καμία περαιτέρω χημική επεξεργασία παρά μόνο κατεργασία ως προς το συνολικό όγκο τους και τη μορφή της επιφάνειάς τους.

1.1.1 Ορυκτά

Τα ορυκτά είναι κρυσταλλικά συμπλέγματα χημικών ενώσεων τα οποία κρυσταλλώνονται σε 7 διαφορετικά πλεγματικά συστήματα. Αποτελούνται από ενώσεις χημικών στοιχείων, οι οποίες κάτω από ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας έχουν αποκτήσει συγκεκριμένες φυσικές και χημικές ιδιότητες[2]. Σχηματίζονται μέσα στο εσωτερικό ή την επιφάνεια της γης από διαλύματα ή λιωμένα υλικά πετρωμάτων. Υπάρχουν ορυκτά που σχηματίζονται ταυτόχρονα με το σχηματισμό των πετρωμάτων και ονομάζονται πρωτογενή ορυκτά ενώ κάποια άλλα σχηματίζονται από οξείδωση ή αλλοιώσεις άλλων ορυκτών, τα οποία ονομάζονται δευτερογενή ορυκτά. Η πολυπλοκότητα των χημικών δεσμών που σχηματίζονται μεταξύ των ενώσεων δίνουν τις αντίστοιχες φυσικές και χημικές ιδιότητες στα ορυκτά. Τα ορυκτά χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με το χημικό τους τύπο.

Οι βασικές φυσικές ιδιότητες των ορυκτών είναι το χρώμα, η λάμψη και η σκληρότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται κυρίως από τους χημικούς δεσμούς[3] μεταξύ των στοιχείων, τα πλεγματικά κενά και τις αποστάσεις των πλεγματικών σημείων μέσα στον κρύσταλλο. Οι φυσικές ιδιότητες των ορυκτών αποτελούν στοιχεία ταυτοποίησης από τους ερευνητές. Συγκεκριμένα, η σκληρότητα των ορυκτών εξαρτάται από τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος και το είδος των δεσμών που σχηματίζοντα. Το χρώμα[4] των ορυκτών σχετίζεται με τις ανωμαλίες στο κρυσταλλικό τους πλέγμα ενώ η λάμψη τους διακρίνεται σε μεταλλική ή αμέταλλη.

1.1.2 Πετρώματα

Τα πετρώματα είναι μία στέρεα σύνθεση χημικών ουσιών που αποτελείται από ορυκτολογικά συστατικά[5]. Γενικά, ως πετρώματα χαρακτηρίζονται τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο στερεός φλοιός της γης. Διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το χρώμα τους, τη σύνθεσή τους, την υφή τους, την ποικιλία σύνθεσής τους και ανάλογα με τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά το σχηματισμό τους. Αυτά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα πυριγενή πετρώματα.
- Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα
- Τα ιζηματογενή πετρώματα.

Τα πυριγενή πετρώματα

Τα πυριγενή πετρώματα σχηματίζονται κατά την ψύξη και τη στερεοποίηση του μάγματος. Το μάγμα μεταφέρει μικρότερα κομμάτια λιωμένων πετρωμάτων στο μανδύα του πλανήτη. Τυπικά το λιώσιμο των πετρωμάτων οφείλεται στις εξής τρεις διαδικασίες: την αύξηση της θερμοκρασίας, τη μείωση της πίεσης, και την αλλαγή της ορυκτολογικής σύσταση τους[9]. Τα πυριγενή πετρώματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα πλουτωνικά και τα ηφαιστειογενή πετρώματα. Τα πλουτώνια πετρώματα σχηματίζονται με την ψύξη του μάγματος και στη συνέχεια την κρυσταλλοποίηση τους στο εσωτερικό της γης. Τα ηφαιστειογενή πετρώματα σχηματίζονται όταν το μάγμα έρθει στην επιφάνεια της γης μέσω κάποιας διεξόδου, συνήθως των ηφαιστείων.

Μεταμορφωσιγενή πετρώματα

Στη κατηγορία των μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων[5] ανήκουν τα πετρώματα εκείνα που έχουν ανακρυσταλλωθεί, δηλαδή έχουν μετασχηματισθεί κάτω από θερμότητα και πίεση σε βαθμό τέτοιο, ώστε να εμφανίζουν μορφή πολύ διαφορετική από τα αρχικά πετρώματα.

Συνεπώς και οι τρεις κατηγορίες των πετρωμάτων (ιζηματογενή, πυριγενή και μεταμορφωσιγενή) υπόκεινται σε μετασχηματισμούς. Κατά το στάδιο των μετασχηματισμών αυτών τα εντός αυτών ορυκτά παίρνουν νέο προσανατολισμό και σχηματίζουν κάθετες σειρές προς τη διεύθυνση της ασκούμενης πίεσης[6]. Το αποτέλεσμα είναι μια στρωματοειδής μορφή του πετρώματος. Ο Γνεύσιος, το πιο κοινό από τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα παρουσιάζει χαρακτηριστική τη στρωματοειδή αυτή υφή. Οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι είναι μεταμορφωσιγενή πετρώματα που σχηματίσθηκαν από μαρμαρυγία και χαλαζία με πολύ εμφανή τη φυλλοειδή υφή.

Επίσης τα ορυκτά που εμφανίζουν επίπεδους κρυστάλλους όπως ο μοσχοβίτης, ο Βιοτίτης και ο χλωρίτης βρίσκονται στα συνήθη μεταμορφωσιγενή πετρώματα, στα οποία ανήκουν τα μάρμαρα, οι χαλαζίτες και μερικοί γραφίτες. Ανάλογα με τον βαθμό της μεταμόρφωσης, διακρίνονται σε πετρώματα ισχυρής μεταμόρφωσης και πετρώματα ήπιας μεταμόρφωσης. Συνήθως, η ισχυρή μεταμόρφωση λαμβάνει χώρα με την άμεση επίδραση μάγματος[7] (μεταμόρφωση επαφής), ενώ η ήπια γίνεται σε μεγαλύτερες από το μάγμα αποστάσεις ή υπό την επίδραση υπέρθερμων διαλυμάτων υπόγειου νερού (υδροθερμικά διαλύματα).

Τα ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα αποτελούνται από υλικά που έχουν συνήθως μεταφερθεί από τον τόπο προέλευσής τους στον τόπο απόθεσής τους. Οι κυριότερες κατηγορίες ιζηματογενών πετρωμάτων είναι τα:

√ Κλαστικά ή μηχανικά ιζήματα[8]: παρατηρούνται στις ακτές και τις λίμνες, σε εκβολές ποταμών. Προέρχονται από την αποσάθρωση πετρωμάτων που υπήρχαν προηγουμένως. Έτσι, μεγάλες βραχώδεις μάζες μετασχηματίζονται σε στρογγυλεμένους όγκους μέχρι πολύ απλούστερες μάζες όπως η άμμος και η άργιλος που μεταφέρονται εύκολα από το νερό και τον άνεμο. Στο σημείο που μεταφέρονται, αποτίθενται σε στρώματα. Εκεί τα υλικά αυτά είτε παραμένουν ευκίνητα ως λάσπη ή άμμος είτε συσσωματώνονται με τη βοήθεια του χαλαζία ή άλλων ορυκτών όπως

ασβεστίτη, αιματίτη, λειμωνίτη κλπ. Αυτό συμβαίνει π.χ. στους ψαμμίτες, με διαδικασία που είναι γνωστή ως διαγένεση.

√ Χημικά ιζήματα: Άλλες αποθέσεις ιζηματογενών πετρωμάτων σχηματίζονται με την εξάτμιση του νερού που περιέχει διαλυμένες διάφορες χημικές ουσίες, όπως είναι το ορυκτό αλάτι, η γύψος κλπ., ενώ άλλα σχηματίζονται με χημική κατακρήμνιση, όπως ο ασβεστόλιθος.

√ Οργανογενή ή οργανικά ιζήματα: Σχηματίζονται από την εναπόθεση υπολειμμάτων ζωντανών οργανισμών, όπως π.χ. κελύφη μαλακίων, σκελετούς υδρόβιων όντων, ακόμη και την καταπλάκωση μεγάλων εκτάσεων με ζωντανούς οργανισμούς από μεγάλους όγκους άλλων πετρωμάτων. Παραδείγματα τέτοιων πετρωμάτων είναι οι οργανογενείς ασβεστόλιθοι, οι ορυκτοί άνθρακες.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι η διάταξή τους σε επάλληλα στρώματα τα οποία είναι αντικείμενα μελέτης της στρωματογραφίας. Συχνή είναι, επίσης, η παραμόρφωση αυτών των στρωμάτων, λόγω ενδογενών δυνάμεων, οπότε σχηματίζονται οι πτυχώσεις, οι οποίες δεν παρατηρούνται στις άλλες κατηγορίες πετρωμάτων, παρά μόνο στα μεταμορφωσιγενή που προέρχονται από μεταμόρφωση ιζηματογενών, αλλά και πάλι σε πολύ μικρότερο βαθμό. Εφόσον τα πετρώματα δεν έχουν υποστεί ισχυρή παραμόρφωση, η αλληλουχία των επάλληλων στρωμάτων ορίζει και την (σχετική) ηλικία τους. Επειδή τα ιζηματογενή πετρώματα είναι οι κύριοι φορείς των απολιθωμάτων, ο συνδυασμός τους δίνει μια σχετικά ακριβή εικόνα της γεωλογικής ιστορίας των περιοχών στις οποίες απαντούν.

Τα βιοκλαστικα ιζηματογενή πετρώματα[10,11]

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού των βιοκλαστικών ιζημάτων, αυτά διακρίνονται σε:

- κλασικά ιζήματα.
- οργανικά βιοχημικά ιζήματα.
- χημικά ιζήματα.

Λόγω του ότι οι συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων δεν είναι πάντα ίδιες στη φύση, συχνά παρατηρούνται και ενδιάμεσες κατηγορίες πετρωμάτων. Τα ιζηματογενή πετρώματα αποκτούν τα χαρακτηριστικά τους από τον τρόπο τον οποίο έχουν προκύψει, τις επιδράσεις του περιβάλλοντος τη χρονική περίοδο εναπόθεσης τους, τις επιδράσεις της διέγερσης κατά την οποία γίνονται όλες οι μεταβολές στη χημική σύσταση τους και τη δομή του ιζήματος. Κατά τη διαδικασία της διαγένεσης πραγματοποιείται η δημιουργία συνεκτικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων του υλικού. Η δημιουργία αυτής συνεκτικότητας λαμβάνει χώρα είτε λόγω υψηλών πιέσεων, είτε ανακρυστάλλωσης των χημικών μορίων που βρίσκονταν στο υλικό. Τα κλαστικά ή απολιθωματοφορά ιζήματα είναι τα πετρώματα εκείνα που αποτελούνται από κελύφη ή και σκελετούς οργανισμών χωρίς να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη αναλογία μεταξύ οργανικής και ανόργανης ύλης[13]. Η συγκολλητική ύλη, όλων αυτών των επιμέρους υλικών, ποικίλει στους λίθους αυτούς. Η πιθανότερη συγκολλητική ένωση, είναι τα διαλυμένα στο νερό άλατα που ρέουν στους πόρους του λίθου. Ανάλογα με τον βαθμό συγκόλλησης στη διαγένεση, η σύνδεση μπορεί να διακριθεί σε τρεις κατηγορίες :

- συγκόλληση επαφής, όπου το συγκολλητικό υλικό βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία επαφής των κόκκων. Στην περίπτωση αυτή το υλικό χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες και χαμηλές μηχανικές αντοχές.
- συγκόλληση ημιπληρότητας, όπου το συνδετικό υλικό γεμίζει τους πόρους.
- συγκόλληση πληρότητας, όπου οι κόκκοι «πλέουν» στο συνδετικό υλικό. Στην περίπτωση αυτή το υλικό χαρακτηρίζεται από χαμηλό πορώδες και μέτριες μηχανικές αντοχές.

Συμπερασματικά, το είδος του συγκολλητικού υλικού και ο βαθμός συγκόλλησης χαρακτηρίζουν άμεσα την αντοχή και την ποιότητα των βιοκλαστικών λίθων. Οι κατηγορίες συγκολλητικών υλικών είναι:

- πυριτικής σύστασης, όπου το οξείδιο του πυριτίου παίρνει τη μορφή κρυσταλλικού χαλαζία ή κρυπτό-κρυσταλλικού χαλκηδονιου, ή όμορφου οπάλιου. Οι λίθοι αυτής της κατηγορίας ονομάζονται ορθό-χαλαζίτες και χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική αντοχή.
- Σύστασης οξείδιού ή υδροξείδιού του σιδήρου, όπου το συγκολλητικό υλικό είναι αιματίτης, λειμωνίτης. Ένας λίθος αυτής κατηγορίας χαρακτηρίζεται από χαμηλή μηχανική αντοχή.
- αργιλικής σύστασης, όπου οι λίθοι χαρακτηρίζονται από μέτρια αντοχή σε περιοχές με χαμηλή υγρασία στην ατμόσφαιρα, ενώ χαρακτηρίζονται από χαμηλή μηχανική αντοχή και παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση (λόγω διόγκωσης των αργιλικών ορυκτών, επίδρασης των διαλυτών αλάτων ή του παγετού σε περιβάλλον) σε ατμόσφαιρα με υψηλό ποσοστό υγρασίας.

1.2 Φθορά στα μνημεία

Τα δομικά υλικά των μνημείων με το πέρας του χρόνου έχουν να αντιμετωπίσουν φαινόμενα φθοράς. Με τον όρο φθορά εννοούμε[14] την απομοίωση χρονικά των φυσικών, μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων καθώς επίσης και των χαρακτηριστικών του υλικού όπως η υφή, το χρώμα, η συνοχή του όγκου και η αισθητική της επιφάνειας του υλικού. Υπάρχουν τρεις φαινομενικά τύποι φθοράς[15]:

√ η μηχανική ή φυσική φθορά σχετίζεται άμεσα με την ελάττωση[16] των δυνάμεων συνοχής και την ρηγμάτωση της μάζας του υλικού λόγω θλιπτικών, εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων. Οι αναπτυσσόμενες αυτές δυνάμεις στο εσωτερικό του υλικού δημιουργούνται σε ανισότροπα υλικά ή ισοτροπικά υλικά που όμως η παρουσία ξένων σωμάτων στο υλικό τα καθιστά εν γένει ανισότροπα. Παράδειγμα μηχανικής φθοράς είναι η παρουσία διαλυτών αλάτων σε λίθους, όπου σε συνδυασμό με τους κύκλους ύγρανσης και ψύξης, δημιουργούνται ρηγματώσεις στο λίθο.

√ η χημική φθορά: οι χημικές ενώσεις από τις οποίες αποτελείται το υλικό λόγω θερμοδυναμικής αστάθειας αντιδρούν μεταξύ ή με του περιβάλλοντα χώρου προς το σχηματισμό νέων χημικών ενώσεων, κάτι το οποίο προκαλεί αλλαγή στη σύσταση του υλικού.

√ η βιολογική φθορά οφείλεται στις ευνοϊκές συνθήκες χημικών αντιδράσεων που δημιουργούνται από οργανικές ενώσεις με διαφορετικά χημικά χαρακτηριστικά (π.χ. pH) από το υλικό και στις πιθανόν αναπτυσσόμενες δυνάμεις που προκαλεί η αλληλεπίδραση οργανισμών με το υλικό.

Φαινόμενα φθοράς μπορούν να εκδηλωθούν είτε στο εσωτερικό του δομικού υλικού είτε στην επιφάνεια του υλικού. Τα φαινόμενα φθοράς προκαλούνται από ενδογενείς ή και εξωγενείς παράγοντες φθοράς.

√ Οι ενδογενείς παράγοντες φθοράς σχετίζονται άμεσα με το ίδιο το υλικό δηλαδή με το είδος, τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του, την ομοιομορφία στη δομή της μάζας του.

√ Οι εξωγενείς παράγοντες φθοράς σχετίζονται με τον περιβάλλοντα χώρο του υλικού όπως π.χ. τα χαρακτηριστικά του κλίματος, τη σεισμικότητα της περιοχής στην οποία βρίσκεται η κατασκευή, τη ρύπανση του περιβάλλοντα χώρου, το ποσοστό και το είδος αλληλεπίδρασης οργανισμών με το υλικό και τις συνθήκες χρήσης και μεταχείρισης της κατασκευής.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες φθοράς συντελούν αθροιστικά στη δημιουργία ενός χάρτη παθολογίας των μνημείων. Οι κυριότεροι τύποι φθοράς που παρατηρούνται στα μνημεία είναι οι επιφανειακές κρούστες, η κρυστάλλωση αλάτων, η αποσάθρωση των υλικών, τα ασύμβατα υλικά, τα αποτελέσματα μηχανικών καταπονήσεων και η βιολογική δράση στα δομικά μέρη του μνημείου.

Με τον όρο επιφανειακές κρούστες[17] εννοούμε τη δημιουργία ενός συνήθως λεπτού στρώματος υλικού διαφορετικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών από αυτό της επιφανείας το μνημείο πού μπορεί να προέρχεται όμως από χημικές(αντιδράσεις) ή φυσικές διαδικασίες (αέρια εναπόθεση υλικού). Παραδείγματα τέτοιων κρουστών είναι:

√ η δημιουργία ενός διαλυτού στρώματος από γύψο με τη διαδικασία της γυψοποίησης της επιφάνεια του λίθου, που προκαλεί σταδιακή απαλοιφή των λεπτομερειών της αρχιτεκτονικής επιφάνειας,

√ η όξινη ανθρακική κρουστά όπου το ανθρακικό ασβέστιο του λίθου μετατρέπεται με την εξάτμιση του νερού σε ένα κρυσταλλωμένο ανθρακικό ασβέστιο. Το στρώμα αυτό δεν έχει καλή συνοχή με το υποκείμενο στρώμα του λίθου με αποτέλεσμα, κάποια στιγμή, την τοπική κατάρρευση της αρχιτεκτονικής επιφάνειας,

√ η κρυστάλλωση αλάτων. Στα δομικά υλικά ενός μνημείου είναι πιθανή ύπαρξη διαλυτών αλάτων λόγω τριχοειδής αναρρίχησης του νερού από το έδαφος, αλατονέφωσης (μεταφοράς αλατιού μέσω της ατμόσφαιρας), παρουσίας της ένωσης NaCl κατά τη διαδικασία δημιουργίας του λίθου. Κατά την αφυδάτωση του χλωριούχου νατρίου δημιουργούνται κρύσταλλοι της ένωσης αυτής, οι οποίοι προκαλούν μηχανικές τάσεις στο εσωτερικό τον υλικών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, τη διάρρηξη της συνέχειας του υλικού και την αποσάθρωση του. Εάν, η αφυδάτωση του χλωριούχου νατρίου συμβεί στο εσωτερικό της μάζας του υλικού, τότε παρατηρείται κυψέλωση και στη συνέχεια αποκόλληση και κατάρρευση της ρηγματωμένης μάζας του υλικού.

√ Με τον όρο βιοδιάβρωση εννοούμε όλες τις περιβαλλοντικές διεργασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση χημικών, φυσικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός υλικού. Κύριο χαρακτηριστικό, του λίθου που δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών σε αυτόν, είναι η περιεκτικότητα του σε ανθρακικά συστατικά, η παρουσία χημικά ενεργών ενώσεων και οργανικού υλικού στον ίδιο το λίθο. Για να γίνει ο λίθος ξενιστής μικροοργανισμών θα πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξής αυτών (θερμοκρασία, υγρασία, pH). Ανάλογα με το είδος των μικροοργανισμών που θα αποικήσουν στο λίθο, θα παρατηρηθεί διαφορετικός τύπος φθοράς. Η έκκριση διαβρωτικών οξέων, η δημιουργία ευδιάλυτων αλάτων, η εναπόθεση ενώσεων που περιέχουν θείο είναι μερικά από τα παραδείγματα της διαβρωτικής αλληλεπίδρασης των μικροοργανισμών με το λίθο.

√ Η φθορά από μηχανικούς παράγοντες και θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές προκαλούν αυξομειώσεις στον στη μάζα του υλικού λόγω ανάπτυξης μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών, που όταν υπερβούν την αντοχή του οδηγούν σε αστοχία του, δηλαδή τη ρηγμάτωση και την αποσάθρωση του. Τέτοιες μεταβολές, λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών, συμβαίνουν στην περίπτωση πυρκαγιάς, εναλλαγής υψηλών χαμηλών θερμοκρασιών, της μετατροπής της υγρασίας που υπάρχει στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων σε πάγο καθώς επίσης από τη διόγκωση μεταλλικών στοιχείων εντός του υλικού.

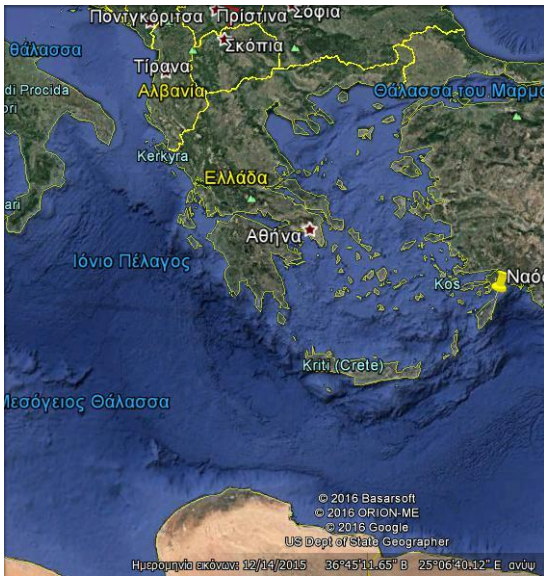
√ Οι επιδεκτικότητα του μνημείου σε σεισμικές δονήσεις είναι πρωτεύων ζήτημα για την ασφάλεια του από κατάρρευση. Η επίδραση ενός σεισμού λειτουργεί αθροιστικά για τη φθορά ενός μνημείου. Αυτό σημαίνει πως μνημεία που έχουν υποστεί ζημίες από σεισμό είναι πιο επιρρεπή σε μεγαλύτερη ζημιά σε σχέση με άλλα.

2 Ειδικό Θεωρητικό

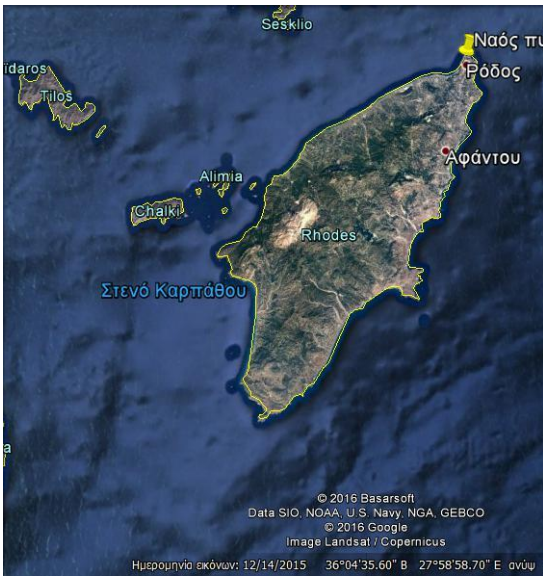
2.1 Ο ναός του πυθίου Απόλλωνος

..λίγα λόγια για τη τοποθεσία της Ρόδου.

Η Ρόδος βρίσκεται στο νοτιοανατολικό θαλάσσιο χωρίο του Αιγαίου σε ένα σύμπλεγμα νησιών που ονομάζεται «Δωδεκάνησα». Στο νησί της Ρόδου εδράζονται μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας αρχαιολογικοί χώροι λόγω του ότι μεγάλα κέντρα του αρχαίου ελληνικού και ρωμαϊκού πολιτισμού άνθισαν κατά την αρχαία περίοδο στο νησί αυτό. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η τοποθεσία του ναού του πυθίου Απόλλωνος με κίτρινη επισήμανση.



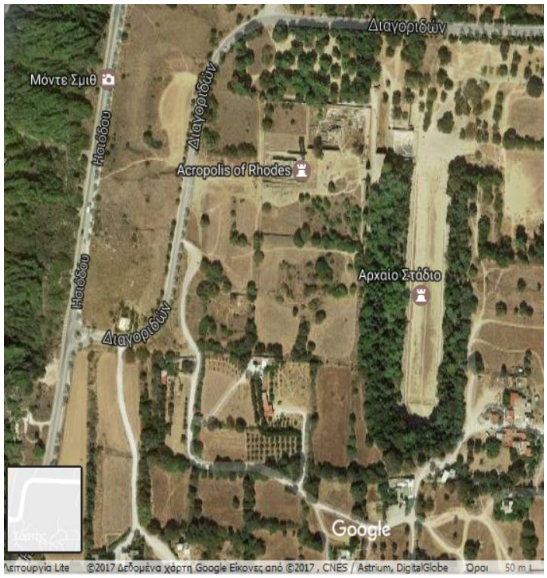
Εικόνα 1: Ελλαδικός θαλάσσιος χώρος. (Πηγή: Google earth).



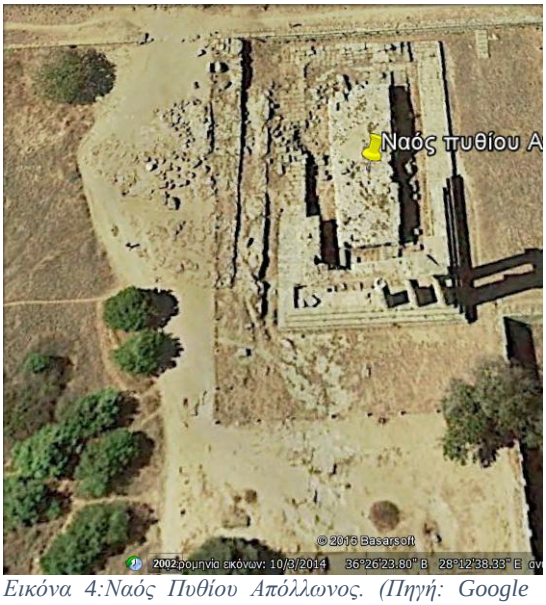
Εικόνα 2: Το νησί της Ρόδου. (Πηγή: Google earth).

2.1.1 Η ακρόπολη της Ρόδου

Ένα από τα σημαντικότερα μνημειακά σύνολα των Δωδεκανήσων είναι η ακρόπολη της Ρόδου. Η ακρόπολη της Ρόδου βρίσκεται στο δυτικό και ψηλότερο μέρος της πόλης της Ρόδου. Η λειτουργία της ακρόπολης αυτής δεν ήταν οχυρωματική αλλά χώρος αθλητισμού, ψυχαγωγίας και λατρείας. Τα σημαντικότερα αρχαιολογικά μνημεία, που βρίσκονται στο χώρο αυτό σήμερα, είναι ο ναός της Αθηνάς Πολιάδος και ο Διός Πολιεώς, τα «Νυμφαία», ο ναός του Πυθίου Απόλλωνος, το Στωϊκό κτίσμα, το Αρτεμίσιο, το στάδιο, το γυμνάσιο και η βιβλιοθήκη.



Εικόνα 3:Ακρόπολη της Ρόδου. (Πηγή: Google earth).



Εικόνα 4:Ναός Πυθίου Απόλλωνος. (Πηγή: Google earth).

Εικόνα 5:Ναός Πυθίου Απόλλωνος. Σημερινή κατάσταση.

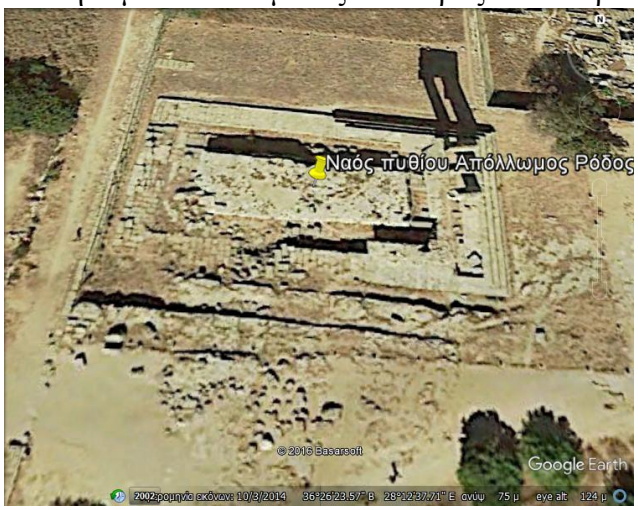
Η ακρόπολης της Ρόδου δεν είναι επίπεδη αλλά αποτελείται από διάφορα υψομετρικά επίπεδα (τα οποία συγκρατούνται από στιβαρούς πετρόχτιστους τοίχους). Στα επίπεδα αυτά, είχαν διαμορφωθεί πλατώματα όπου και ανοικοδομήθηκαν τα διάφορα δημόσια κτίρια. Στην ακρόπολη της Ρόδου, κατά την περίοδο της ιταλικής

κατοχής του νησιού (1912-1945), ξεκίνησαν οι ανασκαφές από την ιταλική αρχαιολογική σχολή. Η ελληνική αρχαιολογική υπηρεσία ξεκίνησε ανασκαφές στον τόπο αυτό μετά το 1946 και οι οποίες δεν έχουν τελειώσει έως σήμερα. Παράλληλα με τις ιταλικές ανασκαφές ξεκίνησαν και αναστηλωτικά έργα στα μνημεία της ακροπόλεως σύμφωνα με τη νοοτροπία της εποχής.

2.1.2 Περιγραφή του ναού

Από ελληνικής πλευράς, η αρχαιολογική υπηρεσία από το 1945 και μετά έλαβε μέτρα για τη συντήρηση των αρχαίων μνημείων της περιοχής και συγκεκριμένα του Ναού του Πύθιου Απόλλωνος, που λόγω των βομβαρδισμών του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και του βάρους των πυροβόλων που είχαν εγκατασταθεί εκεί, υπέστει μεγάλες και ανεπανόρθωτες ζημιές. Κατά τη δεκαετία του 60 και 70 ξεκίνησαν και ολοκληρώθηκαν αντίστοιχα κάποιες αναστηλωτικές εργασίες στη νότια θεμελίωση του ναού. Η αρχαιολογική υπηρεσία προχώρησε σε αναστηλωτικές εργασίες στον ίδιο τον ναό το 1996, οι οποίες συνεχίζονται έως σήμερα.

Σε αυτή την εργασία γίνεται μελέτη για τον ναό του Πύθιου Απόλλωνος, ο οποίος βρίσκεται στο νότιο κομμάτι της ακρόπολης της Ρόδου. Ο ναός είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα στη μορφή και στην τοποθεσία της εποχής του. Πρόκειται για ένα μέτριου όγκου, για την εποχή εκείνη, περίπτερου ναού δωρικού ρυθμού, ο οποίος χρονολογείται από την αρχαιολογική υπηρεσία της Ιταλίας περίπου στον τρίτο αιώνα π.Χ. Σήμερα σώζονται τέσσερίς κίονες, οι οποίοι απαρτίζονται από αυθεντικούς αλλά και πρόσθετους από αναστηλώσεις σπονδύλους, και ένα μέρος του αναστηλωμένου αετώματος που εδράζεται σε τρείς από αυτούς (εικόνα 7).



Εικόνα 6:Ναός Πυθίου Απόλλωνος. (Πηγή: Google earth).

Εικόνα 7:Ναός Πυθίου Απόλλωνος (2001)

Η θεμελίωσή του ναού γίνεται σε έναν σηκό 3,5 μέτρων από πωρόλιθο. Περιμετρικά του σηκού σώζονται τα θεμέλια του πτερού και μια μικρή κυκλική σκάλα που οδηγεί σε ένα πηγάδι λαξευμένο μέσα στο βράχο (εικόνα 8).

Εικόνα 8: Λαξευτή στο βράχο κυκλική σκάλα[18].

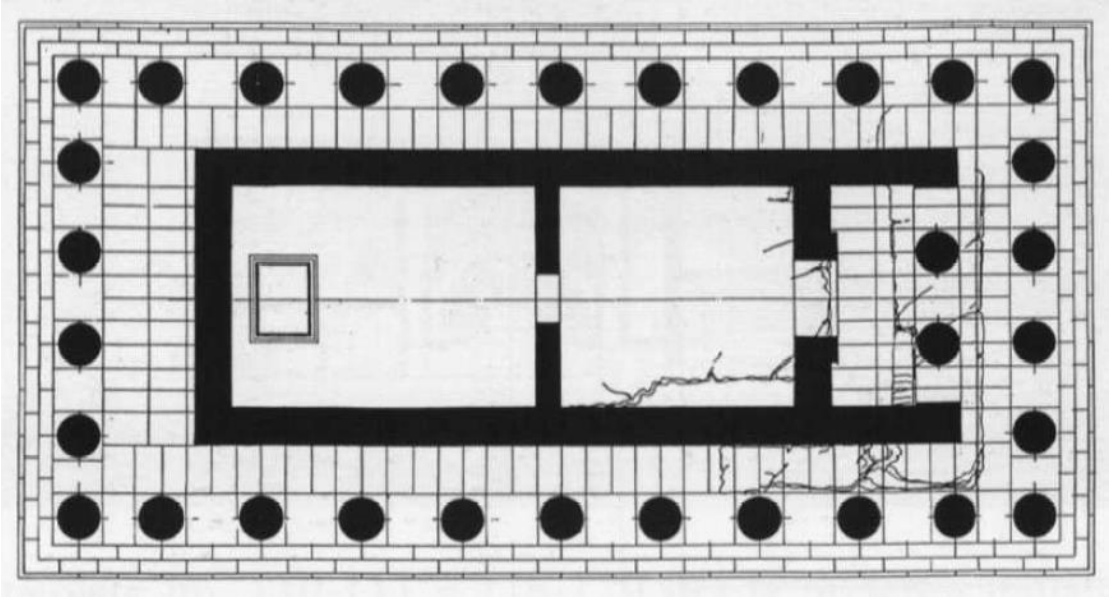
Βάσει κάποιων επιγραφικών ευρημάτων θεωρείται πως ο ναός αυτός είχε διαστάσεις 20,05 x 37,70 μέτρα και αποτελούταν από 6 κίονες στη μικρή πλευρά και 11 στη μεγάλη πλευρά[18]. Έχει προσανατολισμό από την ανατολή προς τη δύση και ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη της τράπεζας σε έναν τεχνητά διαμορφωμένο βράχο στο κέντρο του ναού.

Το 1946 υπήρξε μία έκθεση του Paolini[22], όπου περιγράφεται ο ναός του Πύθιου Απόλλωνος. Στην έκθεση αυτή δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις αναλογίες, στο σύστημα εδραίωσης του ναού καθώς επίσης γίνεται αναφορά στα υπόγεια δωμάτια του ναού. Αναφέρεται πως το υλικό κατασκευής του ναού είναι ο τοπικός πωρόλιθος της Ρόδου, με ασβεστοκονιάματα και επικάλυψη μαρμαρόσκονης. Οι τέσσερεις εναπομείναντες κίονες του ναού αποτελούνται από επτά σπονδύλους διαφορετικού ύψους και διαμέτρου. Τα θεμέλια του ναού αποτελούνται από ένα πετρόχτιστο τύπο τοιχοποιίας και λειτουργεί για τη συγκράτηση του ναού. Η επεξεργασία των ορθογώνιων αυτών λίθων έχει γίνει με μεγάλη προσοχή αφού έχουν τέλεια εφαρμογή και σμιλεμένες άκρες (εικόνα 9).

Εικόνα 9: Αναβαθμοί του ναού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το σύστημα με τα υπόγεια δωμάτια στα θεμέλια της στοάς του ναού. Η είσοδος στη περιοχή αυτή γινόταν από τη λαξευτή σκάλα στο βράχο κυκλικού σχήματος. Τα στοιχεία και τα αρχαία θραύσματα που βρέθηκαν ήταν οι πληροφορίες που χρειαζόντουσαν για να αντλήσει ο Paolini τη γραφική ιδέα του πώς να δημιουργήσει τη γραφική παράσταση του ναού σύμφωνα με το οποίο, ο ναός

αποτελούταν από 6 x 11 κίονες με προθάλαμο και χωρίς οπισθόδομο (εικόνα 10).



Εικόνα 10: Γραφική παράσταση του ναού[22].

Οι κίονες του περιστυλίου παρουσιάζουν 20 ραβδώσεις, κωνικού σχήματος προς το κιονόκρανο και στη συνέχεια στήριζαν το θριγκό. Το ύψος του κάθε κίονα εικάζεται πως ήταν 11,52 μέτρα ενώ η βάση των κιόνων είχε διάμετρο 1,72 μέτρα. Στους κίονες ακόμα και σήμερα παρατηρούνται σε ορισμένα σημεία ίχνη από επίχρισμα με μαρμαρόσκονη κι ασβέστη[18]. Το υλικό του κίονα ήταν μαλακό και πορώδες έτσι το επίχρισμα λειτουργούσε ως ένα στρώμα προστασίας για αυτό.

2.1.3 Προηγούμενες αποκαταστάσεις

Κατά τις πρώτες ιταλικές ανασκαφές[18] (1912-1936) βρεθήκαν κάποια κομμάτια από τα ερείπια του ναού και έτσι το 1938 ξεκίνησε η αναστήλωση του ναού του Πύθιου Απόλλωνος, χωρίς όμως οι ειδικοί να είναι βέβαιοι για την αρχική εικόνα του ναού. Ο επικεφαλής αρχαιολόγος Paolini αποφασίζει πως θα ήταν σωστό να γίνει αποκατάσταση τριών κιόνων στην ανατολική γωνία του ναού ώστε να είναι μία ασφαλής αναστήλωση και η οποία θα είχε όλα τα απαραίτητα κομμάτια του αρχικού ναού.

Όσον αφορά την αποκατάσταση του ναού παρατηρούμε χρήση σύγχρονων υλικών είτε με βάση το τσιμέντο όπως σκυρόδεμα, οπλισμένο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονιάματα και τσιμέντο για επίχρισμα, είτε μεταλλικά υλικά για τη μηχανική στερέωση των λίθων (στερέωση). Στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας στο ναό προστέθηκαν σκαλωσιές για τη στατική του λειτουργία (εικόνα 5).

Εξωτερικά οι κάτω σπόνδυλοι αποτελούνται από τρία ή τέσσερα εξωτερικά τοιχώματα νέου λίθου βιοκαλκαρενίτη και εσωτερικά υπάρχει πυρήνας από σκυρόδεμα. Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από σκυρόδεμα με αμμοχάλικο μικρών και μεσαίων διαστάσεων διαμέτρου από 2 mm έως 50 mm καθώς επίσης και από σκύρα διαμέτρου έως 15 cm. Αυτό το είδος αποκατάστασης απαιτήθηκε για τη μείωση της ποσότητας των αδρανών που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί από το λατομείο[21]. Παράλληλα, έγινε χρήση σκυροδέματος, με χρωστική ουσία, ώστε να συμπληρωθεί η ποσότητα λίθου ανομοιογενούς σχήματος που έλειπε, χωρίς να

δημιουργείται μεγάλη χρωματική αντίθεση στον επισκέπτη. Παρόλα αυτά υπάρχουν πολλές επιφάνειες των κιόνων που επικρατούν οι τσιμεντιτικές αποχρώσεις. Έτσι μειώθηκε ο χρόνος και το κόστος εργασίας συντήρησης του ναού. Συνεχίζοντας τη μελέτη για την κατανόηση των τεχνικών της αναστήλωσης των κιόνων παρατηρούμε πως γίνεται αφαίρεση του κεντρικού πυρήνα των σπονδύλων και η έγχυση σε αυτόν με οπλισμένο σκυρόδεμα (εικόνα 11).

Εικόνα 11: Αφαίρεση του κεντρικού πυρήνα των σπονδύλων και η έγχυση σε αυτόν με οπλισμένο σκυρόδεμα.

Πλευρικές οπές δημιουργήθηκαν στα κέντρα των πλευρικών επιφανειών των σπονδύλων ώστε να τοποθετηθούν ξύλινα ή μεταλλικά στοιχεία, η κύρια λειτουργία των οποίων ήταν η καθοδήγηση για την τέλεια τοποθέτηση των σπονδύλων. Οι παρατηρήσεις του ναού δείχνουν ότι στο τέλος της δεκαετίας του 30 υιοθετήθηκε μία νέα τεχνική για τη μεταφορά των σπονδύλων. Ο κάθε σπόνδυλος κοβόταν σε δύο ή περισσότερα τεμάχια[23]. Στη συνέχεια οι λίθοι μεταφερόταν στο σωστό σημείο εναποθέτησης τους και γινόταν η συγκόλληση μέσω ενός μεταλλικού συνδετήρα σχήματος πεπλατυσμένου «∩» εισερχόμενο σε οπές που βρισκόταν στην κορυφή των λίθων. Ο συνδετήρας παρέμενε στη θέση του με τσιμεντοκονία. Η κατάσταση δεν είναι ίδια στον έβδομο σπόνδυλο του πρώτου κίονα, οποίος αποτελείται από ένα κομμάτι λίθου, το οποίο έχει διατριθεί και τοποθετηθεί μέσα σε αυτό το κενό σκυρόδεμα. Από το σκυρόδεμα αυτό προεξέχουν πέντε μεταλλικοί σύνδεσμοι μορφής «∩» που χρησιμοποιήθηκαν για την ανύψωση και σωστή τοποθέτησή του σπονδύλου στον κίονα24. Την ίδια νοοτροπία αποκατάστασης έχει ακολουθηθεί στους κίονες 2, 3 και 4. Λίθοι αποκατάστασης βιοκαλκαρενίτη έχουν τοποθετηθεί όπου λείπει μεγάλος όγκος γνήσιου υλικού. Έγινε χρήση σκυροδέματος στον πυρήνα των κιόνων και περιμετρικά στην επιφάνεια αυτού με χρωστικές ουσίες ώστε να μην υπάρχει μεγάλη χρωματική αλλαγή. Τέλος, έγινε τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος στην έδραση του επιστυλίου για τη μηχανική σταθεροποίηση του.

3 Πειραματικό Μέρος

3.1 Μεθοδολογία προσέγγισης.

Κατά τη μελέτη ενός μνημείου απαιτείται συγκεκριμένη μεθοδολογία[26,27], για την διάγνωση της υφιστάμενης κατάστασης του. Αρχικά έγινε η ιστορική τεκμηρίωση του μνημείου, όπου συλλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με την ιστορία του μνημείου, των υλικών δόμησης και των προηγούμενων αποκαταστάσεων που είχαν συμβεί. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις και η φωτογραφική τεκμηρίωση για την ταυτοποίηση των δομικών υλικών και κατάσταση διατήρησης τους. Συμπληρωματικά, ελήφθησαν εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών σε σημεία ερευνητικού ενδιαφέροντος. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα αυτών, έγινε η επιλογή 14 σημείων για δειγματοληψία που κρίθηκαν αναγκαία και ικανά για τον χαρακτηρισμό των υλικών[27] και της φθοράς των κιόνων του ναού. Στη συνέχεια, στα εργαστήρια της σχολής του Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκαν οι αναλυτικές μέθοδοι χαρακτηρισμού και ταυτοποίησης των δομικών υλικών στα δείγματα που ελήφθησαν από το ναό. Η μεθοδολογία[28] αυτή καθιστά ολοκληρωμένη, με βάση τη σημερινή τεχνογνωσία, το χαρακτηρισμό των υλικών και τη διάγνωση της φθοράς του οικοδομήματος, δίνοντας παράλληλα στους ερευνητές τα κατάλληλα στοιχεία για την απόδοση μιας εμπεριστατωμένης πρότασης αποκατάστασης.

3.2 Μέθοδοι και τεχνικές διαγνωστικής μελέτης

Πραγματοποιήθηκαν μη καταστρεπτικές αλλά και αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης στο ναό του Πυθίου του Απόλλωνα. Το γεγονός αυτό καθιστά ολοκληρωμένο, με βάση τη σημερινή τεχνολογία και γνώση, το χαρακτηρισμό των υλικών και τη διάγνωση της φθοράς του οικοδομήματος.

3.3.1 Μη καταστρεπτικοί μέθοδοι ανάλυσης

Συγκεκριμένα, οι μη καταστρεπτικοί μέθοδοι ανάλυσης[30] των φθορών που έλαβαν χώρα είναι:

√ η **φωτογραφική αποτύπωση** όπου γίνεται περιγραφή, μέσω εικόνας, της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου Είναι γρήγορη και αντικειμενική περιγραφή του αντικειμένου, μια πρώτη διάγνωση των τύπων της φθοράς.

√ η **Μικροσκοπία Οπτικών Ινών [Fiber Optic Microscopy – FOM]** όπου γίνεται ένας πρώτος χαρακτηρισμός των δομικών υλικών, επι τόπου αναγνώριση τύπων φθοράς, ανίχνευση αστοχιών και ατελειών σε δομικά υλικά, σύγκριση δομικών υλικών που προέρχονται από διαφορετικές οικοδομικές φάσεις, εντοπισμός μη καταγεγραμμένων επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης, περιγραφή μορφολογίας επιφανειών, ταξινόμηση υλικών, μελέτη και ταξινόμηση σύνθετων υλικών / παρατήρηση διεπιφανειακών δράσεων και εκτίμηση πορώδους με τη χρήση του προγράμματος image pro plus.

√ η **θερμογραφία υπέρυθρου[35]** όπου γίνεται ο εντοπισμός κατακρατούμενης υγρασίας, ο εντοπισμός πηγών υγρασίας, η διάγνωση επιφανειακής φθοράς, ο εντοπισμός μη συμβατών υλικών και επεμβάσεων.

√ η χρήση **θερμομέτρου** όπου γίνεται: ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα χώρου του μνημείου και η αποτίμηση των φθορών.

√ η χρήση του **υγρόμετρου** όπου γίνεται η μέτρηση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντα χώρου του μνημείου, αποτίμηση των φθορών, μια πρώτη πρόβλεψη ταχύτητας της φθοράς στα δομικά υλικά και μία πρόβλεψη πιθανών νέων φθορών σε αυτά.

√ η **κρουσιμετρία**[34] όπου γίνεται ο υπολογισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής μιας επιφάνειας.

3.3.2 Αναλυτικοί μέθοδοι μελέτης

Οι αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης, μετά από δειγματοληψία, που έλαβαν χώρα είναι:

√ η ηλεκτροχημική ανάλυση για τον προσδιορισμό (φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών, η σύσταση, η δομή, η προέλευση) των δομικών υλικών (κονιαμάτων και λίθων) με τις μεθόδους **XRD, SEM-EDX**. Οι μέθοδοι αυτοί παίζουν σημαντικό ρόλο αφενός στην ιστορική τεκμηρίωση των πληροφοριών που σχετίζονται με την προέλευση των δομικών υλικών και αφετέρου στον προσδιορισμό των επικαθήσεων (ποια χημικά στοιχεία δομούν τις ουσίες των υλικών) και γενικά στη φύση των ξένων (ως προς την αρχιτεκτονική επιφάνεια) σωμάτων.

Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction)

Η περίθλαση ακτίνων X (XRD)[39] είναι μια μέθοδος για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση κρυσταλλικών υλικών σε μορφή πούδρας ή σε στερεά μορφή. Περίθλαση ακτίνων-x γίνεται με την ανάκλαση μίας ακτίνας- x από μια οικογένεια παράλληλων και ισαπέχοντων ατομικών επιπέδων. Σύμφωνα με τον νόμο του Bragg όταν μία μονοχρωματική δέσμη ακτίνων- x με μήκος κύματος L προσπίπτει στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος υπό γωνία θ, πραγματοποιείται περίθλαση της δέσμης αν η διαδρομή των ακτίνων που αντανακλώνται από διαδοχικά επίπεδα (με απόσταση d) είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος L. Με μέτρηση των γωνιών περίθλασης, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ενδοκρυσταλλικές αποστάσεις d.

Από την καταγραφή της γωνίας περίθλασης και του αντίστοιχου αριθμού ακτίνων x που ανιχνεύτηκαν στην συγκεκριμένη γωνία περίθλασης, προκύπτει το φάσμα περίθλασης του υπό εξέταση υλικού. Το φάσμα συγκρίνεται με μια βάση δεδομένων φασμάτων ενός μεγάλου αριθμού υλικών και έτσι ταυτοποιείται ποιοτικά η δομή του υλικού αλλά και ποσοτικά η περιεκτικότητα κάθε φάσης στο υλικό.

Με τη χρήση της περίθλασης ακτίνων x μπορούν επίσης να προσδιοριστούν πολλές φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών όπως: Παραμένουσες τάσεις, μέγεθος κρυστάλλων και μικροτάσεις, ο προσανατολισμός των κρυστάλλων και η κρυσταλλογραφική δομή του υλικού.

Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)[32] χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη υψηλής ενέργειας ηλεκτρονίων για να δημιουργήσει μια ποικιλία σημάτων στην επιφάνεια των στερεών δειγμάτων. Τα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-δείγματος και αποκαλύπτουν πληροφορίες σχετικά με το

δείγμα συμπεριλαμβανομένων της εξωτερικής μορφολογίας (υφή), της χημικής σύνθεσης, της κρυσταλλικής δομής και τον προσανατολισμό των δομών που αποτελούν το δείγμα. Στις περισσότερες εφαρμογές, τα δεδομένα συλλέγονται σε μια επιλεγμένη περιοχή της επιφάνειας του δείγματος, και δημιουργείτε μία 2-διαστάσεων εικόνα που εμφανίζει χωρικές μεταβολές σε αυτές τις ιδιότητες. Περιοχές που κυμαίνονται από περίπου 1 cm έως 5 μm σε πλάτος μπορεί να απεικονιστούν με ένα τρόπο σάρωσης χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές SEM (η μεγέθυνση κυμαίνεται από 20X σε περίπου 30,000X και η χωρική ανάλυση από 50 έως 100 nm). Το SEM είναι επίσης σε θέση να εκτελέσει ποιοτικές και ποσοτικές αναλύσεις σε επιλεγμένες θέσεις επί του δείγματος. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ποιοτικό ή ημι-ποσοτικό προσδιορισμό χημικών συνθέσεων (χρησιμοποιώντας EDX), κρυσταλλικών δομών και προσανατολισμό κρυστάλλων (χρησιμοποιώντας EBSD).

√ η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση για τον προσδιορισμό των ενώσεων του υλικού και της υδραυλική ή αερικής φύσης του κονιάματος, τη φύση των αδρανών με τη χρήση των Θερμικών μεθόδων (**DTA, TG**).

TG/TDA

Η TG / DTA είναι μια ταυτόχρονη διαδικασία θερμικής ανάλυσης ενός δείγματος που μπορεί να χαρακτηρίζει πολλαπλές θερμικές ιδιότητες ενός υλικού σε ένα μόνο πείραμα. Η συνιστώσα TG μετρά τις θερμοκρασίες όπου λαμβάνουν χώρα φυσικοχημικά φαινόμενα[40] όπως η διάσπαση, η απώλεια ή η οξείδωση των στοιχείων ενός δείγματος. Μετρά ταυτόχρονα τις αλλαγές βάρους που σχετίζονται με διάσπαση, οξείδωση, μεταβάσεις φάσης δεύτερης τάξης, συμπεριλαμβανομένης της εξάτμισης, της εξάχνωσης, της απορρόφησης, της προσρόφησης και της εκρόφησης σε ένα δείγμα και οποιεσδήποτε άλλες φυσικές ή χημικές αλλαγές που οδηγούν σε απώλεια ή αύξηση του βάρους του δείγματος. Η τεχνική TG παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά φαινόμενα. Η συνιστώσα DTA δείχνει αν οι διεργασίες αποσύνθεσης είναι ενδόθερμες ή εξώθερμες. Επίσης, η DTA συνιστώσα μετρά θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σε αλλαγές στη δομή του υλικού όπως η τήξη, η κρυστάλλωση και οι κρυσταλλικές μεταβάσεις χωρίς αυτό να συνεπάγεται κατά ανάγκη απώλεια μάζας[41].

Η πειραματική διαδικασία TG / DTA μετρά την αλλαγή στο βάρος του δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (και / ή χρόνου) σε ελεγχόμενο περιβάλλον (ατμόσφαιρα αερίου και θερμοκρασίας). Σχεδιάζοντας την αλλαγή της επί τοις εκατό κατά βάρος πάνω από ένα προγραμματισμένο εύρος θερμοκρασίας επιτυγχάνεται η μελέτη των φυσικών ή χημικών διεργασιών που έχουν προκαλέσει στο δείγμα απώλεια ή αύξηση βάρους.

Η DTA τεχνολογία αναφέρεται στη διαδικασία διαφορικής θερμικής ανάλυσης. Η τεχνική DTA μετρά τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του δείγματος (Ts) και της θερμοκρασίας ενός δείγματος αναφοράς (Tr). Μια γραφική παράσταση Ts - TR πάνω από ένα προγραμματισμένο εύρος θερμοκρασίας θα δείξει μια σειρά από κορυφές ή απότομες καμπύλες που εκδηλώνονται όπου συμβαίνουν τα θερμικά φαινόμενα. Ωστόσο, η ποσότητα της θερμότητας που απορροφάτε ή απελευθερώνεται από το δείγμα ενώ υφίσταται φυσικοχημικές μεταβολές δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια από το όργανο TG / DTA[42]. Αυτή η ποσότητα θερμότητας, που είναι γνωστή

ως μεταβολή της ενθαλπίας (δέλτα Η), μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης (DSC).

√ η **Ποροσιμετρία υδραργύρου**[46]. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους ανάλυσης και εκτίμησης της μικροδομής, των πορωδών υλικών και προσδιορισμού του πορώδους τους. Η χρήση της αποσκοπεί στην εύρεση συμβατών υλικών (κονιάματα και λίθοι) αποκατάστασης και αποτίμησης υφιστάμενης κατάστασης. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δίνουν επιπρόσθετες πληροφορίες για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της Θερμογραφίας υπέρυθρου. Παράλληλα οι πληροφορίες για το πορώδες αξιοποιούνται στην αποτίμηση της αναρριχόμενης υγρασίας.

Ο όρος «ποροσιμετρία» χρησιμοποιείται συχνά για να συμπεριλάβει τις μετρήσεις του μεγέθους των πόρων, τον όγκο, τη διανομή, την πυκνότητα και άλλα χαρακτηριστικά πορώδους ενός υλικού. Το πορώδες είναι ιδιαίτερα σημαντική έννοια για την κατανόηση του σχηματισμού, τη δομή, και δυνητική χρήση πολλών ουσιών. Το πορώδες ενός υλικού επηρεάζει τις φυσικές του ιδιότητες και τη συμπεριφορά του στο γύρω περιβάλλον του.

Η προσρόφηση, η διαπερατότητα, η αντοχή του υλικού, η πυκνότητα και άλλα χαρακτηριστικά επηρεάζονται άμεσα από το πορώδες. Δεδομένου ότι ο υδράργυρος δεν διαβρέχει τα περισσότερα υλικά και δεν εισχωρεί αυθόρμητα στους πόρους με τριχοειδή δράση καταστά το στοιχείο κατάλληλο για την ποροσιμετρία. Για να εισέλθει ο υδράργυρος εντός των πόρων και να γίνει μέτρηση πρέπει να ασκείται εξωτερική πίεση στο σύστημα. Η απαιτούμενη εξισορροπημένη πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος των πόρων. Η ανάλυση του πορώδους γίνεται με την προοδευτική διείσδυση του υδραργύρου σε μια πορώδη δομή υπό αυστηρά ελεγχόμενες πιέσεις. Από την πίεση σε σχέση με τα δεδομένα εισχώρησης, το όργανο δημιουργεί κατανομές όγκου και μεγέθους χρησιμοποιώντας την εξίσωση Washburn. Σαφώς, όσο πιο ακριβείς οι μετρήσεις της πίεσης, τόσο πιο ακριβή τα δεδομένα που προκύπτουν για το μέγεθος των πόρων. Σε κάθε επιφάνεια ενός υγρού δημιουργούνται τάσεις που δρουν εφαπτομενικά ως προς τη διεπιφάνεια. Οι τάσεις αυτές ονομάζονται επιφανειακές και λειτουργούν σαν μια ελαστική μεμβράνη σε επαφή με την επιφάνεια έως ότου οι δυνάμεις της επιφάνειας βρεθούν σε ισορροπία με τις δυνάμεις που τείνουν να αυξήσουν το εμβαδόν της επιφάνειας του υγρού. Η Επιφανειακή τάση μπορεί να οριστεί ως η δύναμη ανά μονάδα μήκους που ενεργεί κατά μήκος της επιφάνειας ενός υγρού σε ορθή γωνία προς μία γραμμή που χωρίζει τις δύο φάσεις. Αν ο υδράργυρος τοποθετείται σε επαφή με ένα άνοιγμα πόρου, η επιφανειακή ένταση του υδραργύρου ενεργεί κατά μήκος της γραμμής επαφής με το άνοιγμα ίσο σε μήκος με την περίμετρο του ανοίγματος δημιουργώντας δυνάμεις που αντιστέκονται στη διείσδυση του στους πόρους. Το μέγεθος της δύναμης αντίστασης είναι ανάλογο με το μήκος της γραμμής επαφής, την επιφανειακή τάση του υδραργύρου και το συνημίτονο της γωνίας επαφής (θ). Για ένα πόρο με ένα κυκλικό άνοιγμα στην επιφάνεια, η δύναμη αντίστασης εκφράζεται ως $FR = \pi D\gamma\cos\theta$. Μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση τείνει να αναγκάσει τον υδράργυρο να εισέλθει στον πόρο. Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη, επομένως, είναι το προϊόν της πίεσης (P) και η περιοχή (A) επί του οποίου εφαρμόζεται η πίεση. Για πόρος κυκλικής διατομής $FEXT = PA = P\pi D2 / 4$. Σε ισορροπία, λίγο πριν ξεπεραστεί η δύναμη αντίστασης, η εξίσωση είναι $-\pi D\gamma\cos\theta = \pi D2P / 4$. Ως εκ τούτου, σε οποιαδήποτε πίεση, οι πόροι μέσα στην οποία ο υδράργυρος έχει παρεισφρήσει έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από $D = -4\gamma\cos\theta / P$. Με τη μέτρηση του όγκου του

υδραργύρου που διεισδύει στο δείγμα υλικού με κάθε αλλαγή της πίεσης, ο όγκος των πόρων γίνεται γνωστός. Ο όγκος του υδραργύρου που εισέρχεται στους πόρους μετριέται με εισδυσιόμετρο υδραργύρου. Οι συσκευές αυτές είναι πολύ ευαίσθητες και μπορούν να ανιχνεύσουν μια αλλαγή στον όγκο του υδραργύρου κάτω 0.1μL.

√ τα **Διαλυτά άλατα.** Το ποσοστό επί τοις εκατό των διαλυτών αλάτων κατά βάρος που βρίσκεται στο υπό μελέτη δείγμα ανά μονάδα μάζας αποτελεί δείκτη βαθμού φθοράς της εξεταζόμενης επιφάνειας ή του υλικού δόμησης. Αν είναι μεγάλη η συγκέντρωση των διαλυτών αλάτων στη δόμηση τότε δημιουργούνται πρόσθετες επιμέρους φθορές λόγω κρυστάλλωσης αυτών. Η συνεχείς αλλαγές θερμοκρασίας προκαλούν αλλαγή του όγκου των κρυστάλλων και άρα αύξηση των ενδο-μοριακών τάσεων, η οποία οδηγεί μακροπρόθεσμα σε ρηγμάτωση των υλικών. Παράλληλα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα διαλυτά άλατα παρουσιάζουν χημική συμβατότητα με τα υλικά του κτίσματος και αντιδρούν με αυτά.

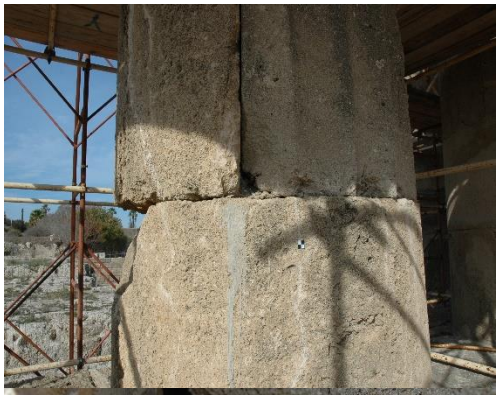
3.3 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία στο ναό του πυθίου Απόλλωνος στο νησί της Ρόδου πραγματοποιήθηκε από την αρχαιολόγο κ. Δέσποινα Μαρσινοπούλου, με την ταυτόχρονη παρουσία της προϊστάμενης της αρχαιολογικής υπηρεσίας της Ρόδου κ. Μαρία Πίκουλα και της ερευνητικής ομάδας του Ε.Μ.Π.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται τα σημεία δειγματοληψίας. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται ο σπόνδυλος της δειγματοληψίας, στην δεύτερη εικόνα γίνεται εστίαση στο δείγμα, στην τρίτη εικόνα στιγματίζεται το δείγμα και στη τέταρτη εικόνα γίνεται η φωτογράφιση του με κλίμακα.

Στα δείγματα δόθηκε κωδική ονομασία για την γρηγορότερη αναφορά τους στις πειραματικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα, οι συμβολισμοί είναι : το a συμβολίζει το ναό του πυθίου Απόλλωνος, το I συμβολίζει τον πρώτο κίονα, ο πρώτος αριθμός συμβολίζει τον σπόνδυλο (με πρώτο αυτόν της βάσης, τα λατινικά κεφαλαία γράμματα E,W,S,N παριστάνουν τον προσανατολισμό (E=νότια, W= βόρεια ,S= δυτικά ,N=ανατολικά) του σημείου δειγματοληψίας, ο δεύτερος αριθμός συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό του δείγματος και τέλος το _ χρησιμοποιείται για διαχωριστικό μεταξύ των γραμμάτων και αριθμών. Στην εικόνα 12 παρουσιάζονται σε ορθοφωτογραφίες, ανά κατεύθυνση του κίονα, οι ακριβείς θέσεις της δειγματοληψίας.

Εικόνες δειγματοληψίας 1:Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_1_W_1



Εικόνες δειγματοληψίας 2: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_2_N_2.

Εικόνες δειγματοληψίας 3: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_1_E_3.

Εικόνες δειγματοληψίας 4: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_2_W_4.

Εικόνες δειγματοληψίας 5: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_3_W_5.

Εικόνες δειγματοληψίας 6: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_W_6.

Εικόνες δειγματοληψίας 7: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_W_7.

Εικόνες δειγματοληψίας 8: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_N_8.

Εικόνες δειγματοληψίας 9: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_N_9.

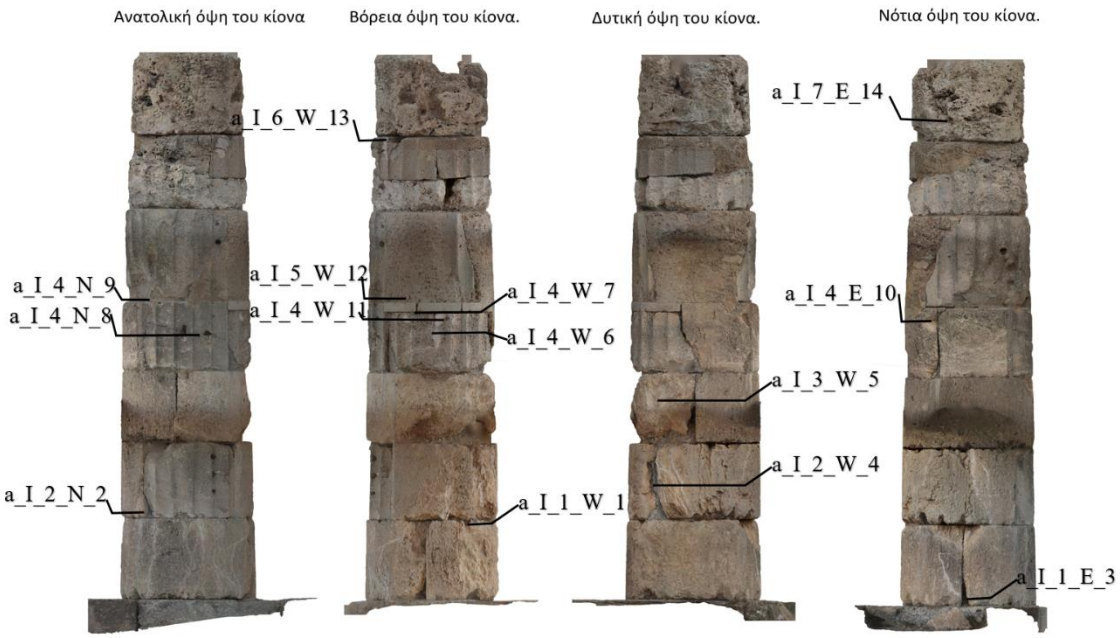
Εικόνες δειγματοληψίας 10: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_E_10.

Εικόνες δειγματοληψίας 11: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_4_W_11.

Εικόνες δειγματοληψίας 12: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_5_W_12.

Εικόνες δειγματοληψίας 13: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_6_W_13.

Εικόνες δειγματοληψίας 14: Σημείο λήψης δείγματος και φωτογράφιση δείγματος με την κωδική ονομασία a_I_7_E_14.



Εικόνα 12: Ορθοφωτογραφίες, ανά κατεύθυνση του πρώτου κίονα, όπου παρουσιάζονται οι ακριβείς θέσεις της δειγματοληψίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δείγματα σε σχέση με το είδος του υλικού του και με το αν είναι αυθεντικό ή αποκατάστασης το δείγμα.

Πίνακας 1: Δείγματα και χαρακτηρισμός υλικών.

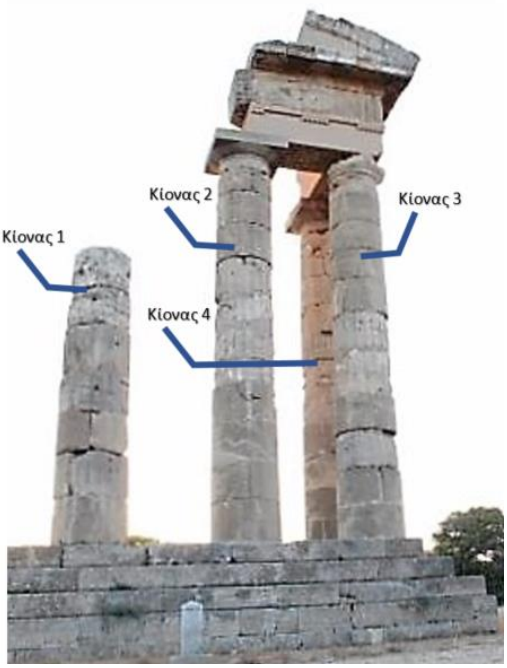
Δείγμα	Χαρακτηρισμός υλικού
a_I_1_W_1	Λίθος αποκατάστασης
a_I_2_N_2	Λίθος αποκατάστασης
a_I_1_E_3	Λίθος αποκατάστασης
a_I_2_W_4	Λίθος αποκατάστασης
a_I_3_W_5	Λίθος αποκατάστασης
a_I_4_W_6	Κονίαμα αποκατάστασης
a_I_4_W_7	Επίχρισμα αυθεντικό
a_I_4_N_8	Λίθος αυθεντικός
a_I_4_N_9	Τσιμέντο πλήρωσης
a_I_4_E_10	Λίθος αποκατάστασης
a_I_4_W_11	Λίθος αυθεντικός
a_I_5_W_12	Τσιμεντιτικό επίχρισμα
a_I_6_W_13	Λίθος αυθεντικός
a_I_7_E_14	Λίθος αυθεντικός

4 Αποτελέσματα- Συζήτηση Αποτελεσμάτων

4.1. Μη καταστρεπτικές τεχνικές

4.1.1. Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Κατά τη μελέτη της σύστασης και της φθοράς των δομικών υλικών του ναού του Πυθίου Απόλλωνα ελήφθησαν φωτογραφίες με απώτερο σκοπό την τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου και της περαιτέρω έρευνας επι αυτής. Η φωτογράφιση που πραγματοποιήθηκε είχε θεματικές ενότητες ανά κίονα και ανά σπόνδυλο. Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται η αρίθμηση που δόθηκε στους κίονες του ναού.



Εικόνα 13: Αρίθμηση των κιόνων του ναού.

Δόθηκε περισσότερη έμφαση στον πρώτο κίονα λόγω του ότι αφενός ήταν πιο ασφαλής και εύκολη η πρόσβαση σε αυτόν και αφετέρου είχε περισσότερο εμβαδόν επιφάνειας ερευνητικού ενδιαφέροντος Παρακάτω παρουσιάζεται η μακροσκοπική περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης του πρώτου κίονα ανά σπόνδυλο καθ΄ ύψος. Στο πρώτο κίονα παρατηρήθηκε μικρότερης έκτασης επεμβάσεις συντήρησης σε σχέση με τους υπόλοιπους κίονες και αυτό έχει ως συνέπεια περισσότερα τετραγωνικά μέτρα αυθεντικής αρχιτεκτονικής επιφάνειας.

4.1.1.1. Μακροσκοπική περιγραφή του πρώτου κίονα

Φωτογραφίες περιμετρικά του πρώτου σπονδύλου.

Εικόνα 14: Ανατολική όψη 1ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 15: Βόρεια όψη 1ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 16: Δυτική όψη 1ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 17: Νότια όψη 1ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Ο πρώτος σπόνδυλος βρίσκεται σε αρκετά δυσμενή κατάσταση λόγω όχι μόνο της φυσιολογικής φθοράς του λίθου αλλά και της κακής ποιότητας του. Συγκεκριμένα, μεγάλοι όγκοι λίθου έχουν αποκολληθεί από το σώμα του κίονα λόγω διόγκωσης του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε σε παλαιότερη προσπάθεια συντήρησης-στερέωσης (εικόνα 18) ενώ παράλληλα σε πολλά σημεία υπάρχει απομοίωση ή και μεγάλη απώλεια αυθεντικού υλικού (εικόνες 19,20) λόγω αποσάθρωσης της επιφάνειας του λίθου.

Εικόνα 18:Αποκόλληση μεγάλου όγκου του λίθου.

Εικόνα 19:Απομοίωση αυθεντικού υλικού.

Εικόνα 20:Απώλεια αυθεντικού υλικού.

Σε σημεία όπου γίνεται δυνατή η οπτική επαφή με το εσωτερικό του κίονα (εικόνα 21) διαφαίνονται οι μεταλλικοί οξειδωμένοι σύνδεσμοι. Τέλος γίνεται φανερή η χρήση ενεμάτων και η επικάλυψη των λίθων με κονιάματα (εικόνα 22).

Εικόνα 21:Μεταλλικοί οξειδωμένοι σύνδεσμοι.

Εικόνα 22:Χρήση ενέματος και επικάλυψη του μερικώς από κονίαμα.

Φωτογραφίες περιμετρικά του δεύτερου σπονδύλου.

Εικόνα 23: Ανατολική όψη 2ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 24: Ανατολική όψη 2ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 25: Δυτική όψη 2ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 26: Νότια όψη 2ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Στο δεύτερο σπόνδυλο παρατηρήθηκαν εκτενείς φθορές όπως και στον πρώτο σπόνδυλο. Συγκεκριμένα, ο δεύτερος σπόνδυλος διατρέχεται από διάφορα είδη φθοράς όπως ρηγματώσεις (εικόνα 27-32) που εκτείνονται προς το εσωτερικού του λίθου, μικρές και μεγάλες οπές λόγω αποσάθρωσης ή και αποκόλλησης υλικού (εικόνα 29), μεγάλη φθορά λόγω της κονιορτοποίησης (εικόνα 32) των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού καθώς επίσης και κυψέλωση στα τσιμεντιτικά υποστρώματα (εικόνα 34). Παρατηρήθηκαν ανομοιομορφίες στο χρώμα της επιφάνειας του πολυσύνθετου

σπονδύλου και συγκεκριμένα, λευκές κρούστες που μπορεί να είναι λευκό τσιμέντο ή και διαλυτά άλατα (εικόνα 35), σκουροχρωμίες στις ακμές της τσιμεντιτικής επιφάνειας και ανομοιογένεια στο χρώμα του τσιμέντου όπου στις ακμές γίνεται πιο σκούρο.

Εικόνα 27:Ρηγματώσεις του λίθου.

Εικόνα 28: Ρηγματώσεις του λίθου.

Εικόνα 29: Ρηγματώσεις του λίθου.

Εικόνα 30 Ρηγματώσεις του λίθου.

Εικόνα 31 Ρηγματώσεις του λίθου.

Εικόνα 32:Αποσάθρωση και αποκόλληση υλικού.

Εικόνα 33:κιονορτοποίηση του λίθου.

Εικόνα 34: κυψέλωση τσιμεντιτικών υποστρωμάτων..

Εικόνα 35: Λευκές κρούστες στην επιφάνεια του λίθου.

Φωτογραφίες περιμετρικά του τρίτου σπονδύλου.

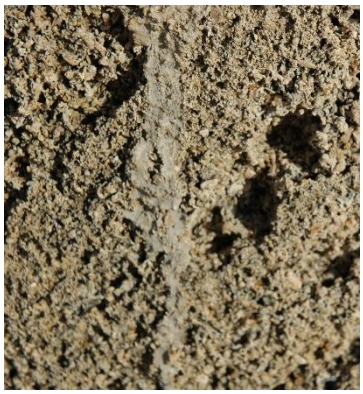
Εικόνα 36: Λευκές κρούστες στην επιφάνεια του λίθου[44].

Εικόνα 37: Βόρεια όψη 3ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 38: Δυτική όψη 3ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 39: Νότια όψη 3ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Στον τρίτο σπόνδυλο παρατηρήθηκαν λιγότερες φθορές από ότι στους άλλους δύο προαναφερθείς σπονδύλους. Συγκεκριμένα, στην επιφάνεια του λίθου εντοπίστηκαν οπές μικρού όγκου (εικόνα 40), έντονη αποσάθρωση πολλών επιφανειακών στρωμάτων αυθεντικού υλικού (εικόνα 41) διόγκωση και οξείδωση των μεταλλικών συνδέσμων (εικόνα 42).



Εικόνα 40:Οπές μικρού όγκου στην επιφάνεια του λίθου.

Εικόνα 41:Έντονη αποσάθρωση αυθεντικού υλικού.

Εικόνα 42:Διόγκωση και οξείδωση των μεταλλικών συνδέσμων.

Φωτογραφίες περιμετρικά του τέταρτου σπονδύλου.

Εικόνα 43: Ανατολική όψη 4ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

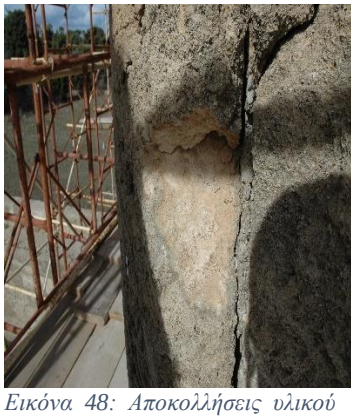
Εικόνα 44: Βόρεια όψη 4ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 45: Δυτική όψη 4ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 46: Νότια όψη 4ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Στον τέταρτο σπόνδυλο παρατηρήθηκε η εκτενής χρήση σκυροδέματος από τους αναστηλωτές που σκοπό είχε την συμπλήρωση καθ΄ ύψος του όγκου των λίθων (εικόνα 47) . Στα χωρία όπου η επιφάνεια του σπονδύλου είναι λίθινη λαμβάνουν χώρα μεγάλες αποκολλήσεις υλικού λόγω διόγκωσης του σκυροδέματος (εικόνα 48), βιολογικές επικαθίσεις που πληθαίνουν σε σημεία δυσήλια (εικόνα 49), αποσάθρωσή του αρχαίου επιχρίσματος (εικόνα 47) και η οξείδωση των μεταλλικών συνδέσμων από το εσωτερικό του κίονα. Η βόρεια όψη του δεύτερου σπονδύλου είναι η μοναδική στην οποία σώζεται αυθεντικό επίχρισμα (εικόνα 44). Τέλος, χαρακτηριστική φθορά του σπονδύλου αυτού είναι μία επιμήκης οριζόντια ρηγματώση του λίθου από άγνωστα αίτια (εικόνα 43).

Εικόνα 47: Αποσάθρωσή του αυθεντικού επιχρίσματος.



Εικόνα 48: Αποκολλήσεις υλικού λόγω διόγκωσης του σκυροδέματος.

Εικόνα 49: Βιολογικές επικαθίσεις στην επιφάνεια του λίθου.

Φωτογραφίες περιμετρικά του πέμπτου σπονδύλου.

Εικόνα 50: Ανατολική 5ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 51: Βόρεια όψη 5ου σπονδύλου του 1ου κίονα.

Εικόνα 52: Δυτική όψη 5ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 53: Νότια όψη 5ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Στον πέμπτο σπόνδυλο παρατηρήθηκε η συμπλήρωση του όγκου του σπονδύλου από αποσπασμένους αυθεντικούς λίθους οι οποίοι εναποτέθηκαν μέσα και πάνω στη τσιμεντιτική επιφάνεια (εικόνα 54) ενώ παράλληλα έγινε χρήση σκυροδέματος από τους συντηρητές για την ομογενοποίηση και τη μηχανική στήριξη του λίθου. Στο σώμα του σπονδύλου παρατηρήθηκαν πολλαπλές αποκολλήσεις λίθινων όγκων από την αρχιτεκτονική επιφάνεια (εικόνα 55), μια στρογγυλής διατομής στο λίθο οπή και έντονη βιοδιάβρωση με τη μορφή γκρι κρουστών που σκουραίνουν στις ακμές του

λίθου (εικόνα 56). Γενικά, ο πέμπτος σπόνδυλος παρουσιάζει τις λιγότερες φθορές σε σχέση με τους υπόλοιπους τέσσερις σπονδύλους του πρώτου κίονα.

Εικόνα 54 Συμπλήρωση του όγκου του σπονδύλου από αυθεντικούς λίθους.

Εικόνα 55:Αποκολλήσεις λίθινων όγκων από την αρχιτεκτονική επιφάνεια.

Εικόνα 56:Βιοδιάβρωση γκρι κρουστές που σκουραίνουν στις ακμές του λίθου.

Φωτογραφίες περιμετρικά του έκτου σπονδύλου.

Εικόνα 57: Ανατολική όψη 6ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 58: Βόρεια όψη 6ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 59: Δυτική όψη 6ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 60: Νότια όψη 6ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Στον έκτο σπόνδυλο παρατηρήθηκε έντονη αποσάθρωση υλικού πιο έντονη στην νοτιοανατολική πλευρά ενώ καλύτερη ήταν η εικόνα στων δυτική όψη (εικόνες περιμετρικά του σπονδύλου). Επίσης εντοπίστηκαν οπές μικρού και μεγάλου όγκου

περιμετρικά της επιφάνειας του κίονα (εικόνα 61), έντονες μαύρες κρούστες στις κοιλότητες των οπών (εικόνα 62) καθώς επίσης και η χρήση σκυροδέματος για την συμπλήρωση του όγκου του λίθου (εικόνα 63).

Εικόνα 61:Οπές μικρού και μεγάλου όγκου περιμετρικά της επιφάνειας του σπονδύλου.

Εικόνα 62:Μαύρες κρούστες στις κοιλότητες των οπών του λίθου.

Εικόνα 63:Χρήση σκυροδέματος για την συμπλήρωση του όγκου της πέτρας.

Φωτογραφίες περιμετρικά του έβδομου σπονδύλου.

Εικόνα 64: Ανατολική όψη 7ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 65: Βόρεια όψη 7ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 66: Δυτική όψη 7ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Εικόνα 67: Ανατολική όψη 7ου σπονδύλου του 1ου κίονα[44].

Ο έβδομος σπόνδυλος είναι ογκομετρικά μικρότερος των υπόλοιπων χωρίς να έχει γίνει προσπάθεια συμπλήρωσης του από τους συντηρητές. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν στο

σπόνδυλο μεγάλο ποσοστό απώλειας λίθου και οπές διαμέτρου έως 20cm (εικόνα 68), μαύρες επικαθίσεις στις κοινότητες των οπών (εικόνα 69) καθώς επίσης και βιοκατάλυπα οργανισμών που πιθανόν ζούνε σε αυτόν. Στην πάνω πλευρά του λίθου εντοπίστηκαν μεταλλικοί κρίκοι που χρησίμευαν για τη μεταφορά του λίθου (εικόνα 70).

Εικόνα 68:Απώλεια αυθεντικού υλικού και μεγάλες οπές.

Εικόνα 69:Απώλεια αυθεντικού υλικού και μεγάλες οπές.

Εικόνα 70:Απώλεια αυθεντικού υλικού και μεγάλες οπές.

4.1.1.2. Μακροσκοπική περιγραφή των υπόλοιπων τριών κιόνων

Η κατάσταση των κιόνων 2, 3 και 4 είναι ελαφρώς καλύτερη από αυτή του κίονα 1. Στις εικόνες 71,72 παρουσιάζεται το πώς ήταν οπτικά ο ναός πριν 10 χρόνια σε σχέση με τη σημερινή εικόνα του, όπου σε αυτή περιλαμβάνονται πλέον και οι σκαλωσιές.

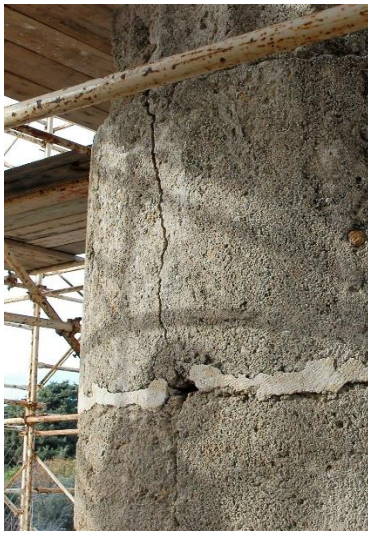
Εικόνα 71:Φωτογραφία του ναού του πυθίου Απόλλωνος 2004.

Εικόνα 72:Φωτογραφία του ναού του πυθίου Απόλλωνος 2004.

Παρατηρείται ότι στους κίονες 2, 3 και 4 σώζονται τα κιονόκρανα, ένα μέρος του επιστύλιου και της ζωφόρου με τη μετόπη καθώς επίσης και το ακρωτήριο. Οι σπόνδυλοι των κιόνων 2, 3 και 4 παρουσιάζουν παρόμοιους τύπους φθοράς με τον κίονα 1. Ο βαθμός και το είδος της φθοράς είναι εφάμιλλο για αυτούς τους τρεις κίονες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά, από τους τρεις κίονες, χαρακτηριστικές φθορές και φωτογραφίες αυτών.

Παρατηρήθηκαν στους λίθους των σπονδύλων σε διάφορα σημεία κάθετες (εικόνες 73,74) και οριζόντιες ρωγμές (εικόνα 75) που αυτό προκαλεί άμεσα πρόβλημα στην στατική λειτουργία του κίονα.

Εικόνα 73:Κάθετες ρωγμές στην επιφάνεια του λίθου.

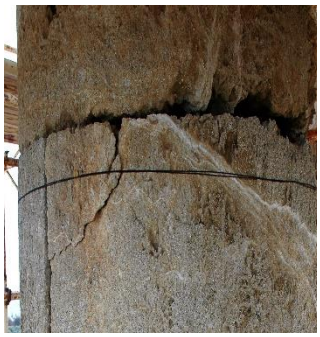


Εικόνα 74: Κάθετες ρωγμές στην επιφάνεια του λίθου.

Εικόνα 75:Ορίζοντιες ρωγμές στην επιφάνεια του λίθου.

Οι συντηρητές για το λόγο αυτό πρόσθεσαν μεταλλικούς σφικτήρες για την περίσφιξη των σπονδύλων όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο (εικόνες 76,77).

Εικόνα 76:Μεταλλικά σύρματα δεμένα περιμετρικά του σπονδύλου.

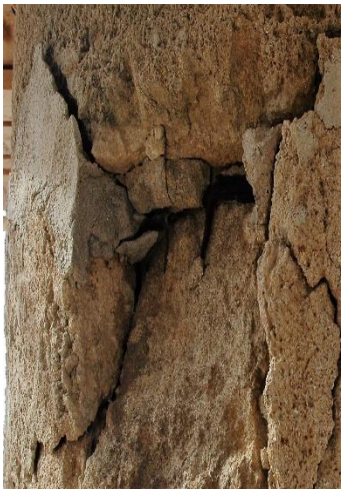


Εικόνα 77: Μεταλλικά σύρματα δεμένα περιμετρικά του σπονδύλου.

Εικόνα 78:Χρήση μεταλλικών πλεγμάτων για τη μηχανική στήριξη του επιστυλίου.

Παράλληλα, γίνεται χρήση μεταλλικών πλεγμάτων (εικόνα 78) για την μηχανική στερέωση του επιστύλιου, τα οποία όμως έχουν οξειδωθεί και διογκωθεί με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί ρωγμές και αποκολλήσεις στον αυθεντικό λίθο (εικόνα 79). Αποκολλήσεις και ρωγμές στον αυθεντικό λίθο προκαλούνται και από τη διόγκωση των οξειδωμένων συνδέσμων (εικόνα 80). Παρατηρούνται κυλινδρικές οπές βάθους περίπου 15 cm οι οποίες δημιουργήθηκαν για την σωστή έδραση των σπονδύλων στη θέση τους (εικόνες 81).

Εικόνα 79: ρωγμές και αποκολλήσεις στον αυθεντικό λίθο από διόγκωση οξειδωμένου πλέγματος.



Εικόνα 80:Αποκολλήσεις στον αυθεντικό λίθο από διόγκωση οξειδωμένου συνδέσμου.

Εικόνα 81: κυλινδρική οπή στην επιφάνεια του λίθου.

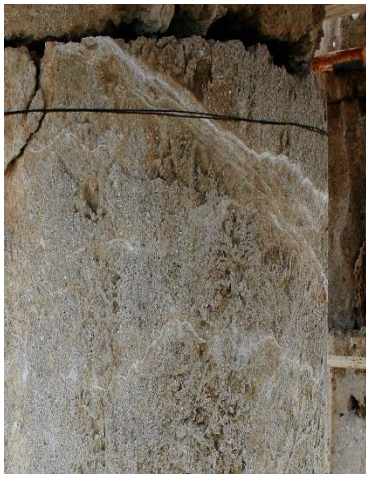
Γίνεται εκτενής χρήση τσιμεντιτικών υλικών στους κίονες αυτούς με κύριο σκοπό την συμπλήρωση του όγκου των λίθων του κίονα (εικόνες 82,83) ή της αρχιτεκτονικής επιφάνειας του καθώς επίσης και για το κλείσιμο των αρμών (εικόνα 84).

Εικόνα 82:Χρήση τσιμέντου για τη πλήρωση λίθων.

Εικόνα 83:Χρήση τσιμέντου για τη πλήρωση λίθων.

Εικόνα 84:Χρήση τσιμέντου για τη πλήρωση των αρμών.

Είναι φανερή η προσπάθεια ομογενοποίησης και δομικά σταθεροποίησης του κίονα με τη χρήση ενεμάτων (εικόνα 85). Εντοπίστηκε έντονη κυψέλωση (εικόνα 86 έως 90) στις επιφάνειες των σπονδύλων πού βρίσκονται στην βορειοδυτική πλευρά του ναού.



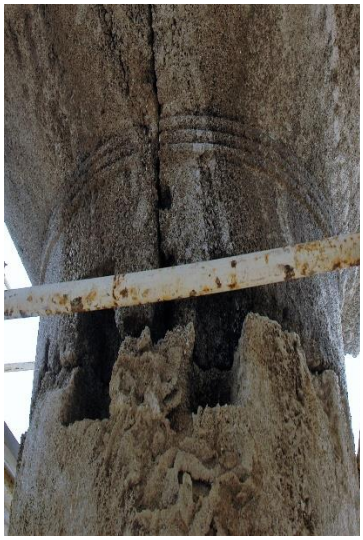
Εικόνα 85:Χρήση ενεμάτων στη λίθο.

Εικόνα 86:Κυψέλωση επιφάνειας λίθου.

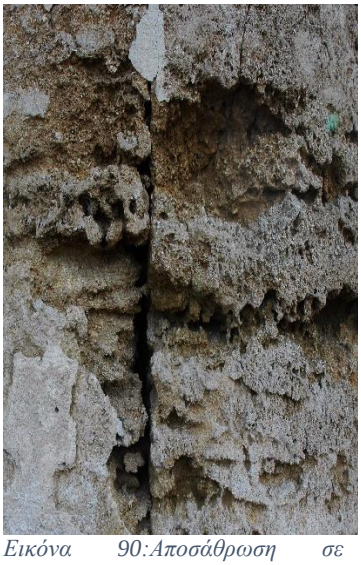
Εικόνα 87: Κυψέλωση επιφάνειας λίθου.

Η έντονη αυτή κυψέλωση οδήγησε στην αποσάθρωση επιφανειακών στρωμάτων υλικού (εικόνες 385 353) αλλά και αποσάθρωση σε βάθος του λίθου (εικόνα 393 45 343 384 359).

Εικόνα 88:Αποσάθρωση επιφανειακών στρωμάτων υλικού.



Εικόνα 89: Αποσάθρωση επιφανειακών στρωμάτων υλικού.



Εικόνα 90:Αποσάθρωση σε βαθύτερα στρώματα του λίθου.

Έντονη αποσάθρωση και αποκόλληση γνήσιου λίθου παρατηρήθηκε περιμετρικά από τις βάσεις των σπονδύλων η οποία σχετίζεται άμεσα με μηχανισμό φθοράς.

4.1.2. Μικροσκοπία οπτικών ινών

4.1.2.1. Επιτόπου μικροσκοπία οπτικών ινών στον κίονα.

Ελήφθησαν εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών μεγέθυνσης 30x περιμετρικά και καθ' ύψος του πρώτου κίονα. Επιλέχθηκαν για να παρατηρηθούν μέσω της μικροσκοπίας οπτικών ινών χαρακτηριστικές θέσεις τόσο ως προς τα δομικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί όσο και ως προς τις εφαρμοζόμενες τύπους φθοράς. Ο σχολιασμός των εικόνων, της μικροσκοπίας οπτικών ινών, που πάρθηκαν σχετίζονται με το χρώμα, την ύφη, τη συνεκτικότητα, τα αδρανή, τον σχηματισμό κόκκων, και πιθανά υπολείμματα ξένων σωμάτων καθώς επίσης και τον πιθανόν τύπο φθοράς όπως βιολογικές κρούστες και χρωματισμοί του λίθου λόγω των διαλυτών αλάτων κ.α.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 1ου σπονδύλου

Εικόνα 91: apollo_I_1 E_x30 stonesurface .

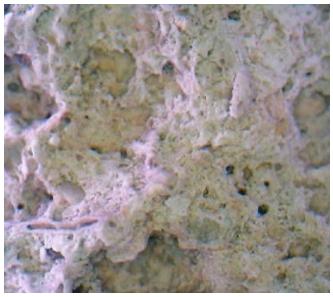
Εικόνα 92: apollo_I_1w_ x30 stonesurface4.

Εικόνα 93: apollo_I_1w_ x30 stonesurface7.

Εικόνα 94: apollo_I_1E_ x30 stonesurface@2.

Εικόνα 95: apollo_I_1w_ x30 stonesurface3.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 2ου σπονδύλου.



Εικόνα 96: apollo_I_2e_ x30 enema1.

Εικόνα 97: apollo_I_2S_x30 skyrodema.

Εικόνα 98: apollo_I_2S_x30 stone surface2.

Εικόνα 99: apollo_I _2S_ x30 stonesurface4.

Εικόνα 100: apollo_I_2e_ x30 stonesurface4.

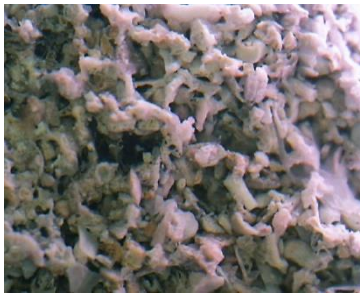
Εικόνα 101: apollo_I_2w_x30 cement surfaceblack.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 3^{ου} σπονδύλου.

Εικόνα 102: apollo_I_3e_x30 cement.

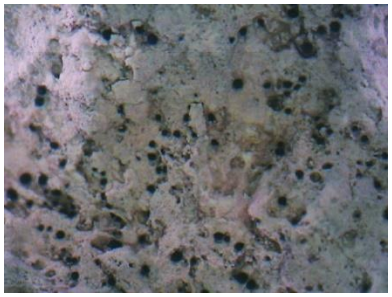
Εικόνα 103: apollo_I_3nx 30 stone surface2.

Εικόνα 104: apollo_I_3sw 30 stone surface.

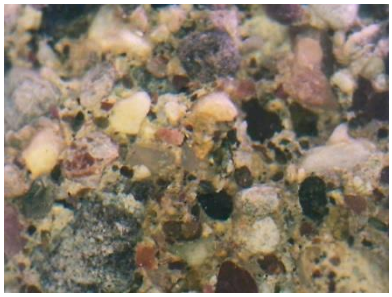


Εικόνα 105: apollo_I _3sx30 stonesurfacedexia pleura.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 4^{ου} σπονδύλου.

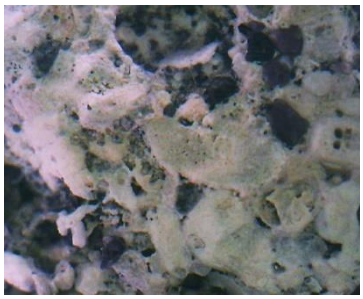


Εικόνα 106: apollo_I_4ex30 aspri flevosi.

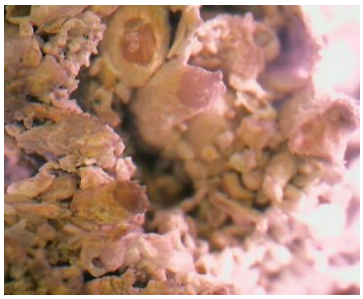


Εικόνα 107: apollo_I4wx30 beton sympliroma.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 5ου σπονδύλου.

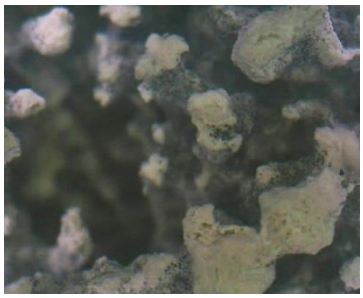


Εικόνα 108: apollo_I_5ex0 beton.



Εικόνα 109: apollo_I_ 5sx30 stones urface.

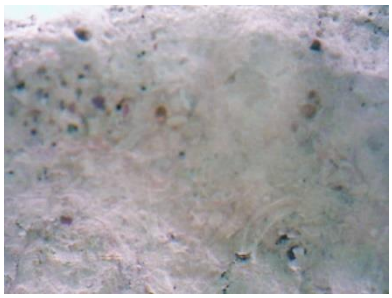
Εικόνα 110: apollo_I_5 wx30 stonesurface1.



Εικόνα 111: apollo_I_5nx 30 betonskouro.

Εικόνα 112: apollo_I_5wx 30 stonesurface1.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 6ου σπονδύλου.



Εικόνα 113: apollo_I_6ex30 beton white.

Εικόνα 114: apollo_I_6sx30 betongrey.

Εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών 7ου σπονδύλου.

Εικόνα 115: apollo_I_7 nx30beton2.

Εικόνα 116:apollo_I_7sx30betonleukomeskoura apoxrosi.

Σχολιασμός των εικόνων της μικροσκοπίας οπτικών ινών.

apollo_I_1E_x30_stonesurface	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.
apollo_I_1E_x30stonesurface@2	Πρόκειται πιθανών για ένεμα χρώματος λευκό. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_1E_x30stonesurface4	Πρόκειται πιθανών για ένεμα χρώματος λευκό. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_1n_x30stonesurface3	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.
apollo_I_1w_x30stonesurface7	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.
apollo_I_2e_x30enema1	Πρόκειται πιθανών για ένεμα χρώματος λευκό. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_2S_x30skyrodema	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική.

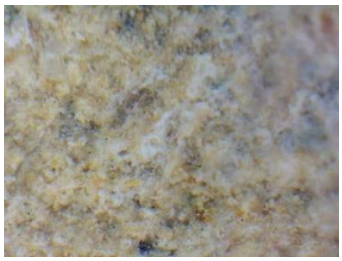
apollo_I_2e_x30stonesurface4	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.
apollo_I_2S_x30stonesurface4	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.
apollo_I_2S_x30stonesurface2	Πρόκειται για τσιμεντοκονίαμα αποκατάστασης μπεζ σκούρο χρώματος. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών.
apollo_I_2w_x30cementsurfaceblack	Πρόκειται για τσιμεντοκονίαμα αποκατάστασης γκρίζου χρώματος. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. κυριαρχούν τα άσπρα αδρανή. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_3e_x30cement	Πρόκειται για τσιμεντοκονίαμα αποκατάστασης γκρίζου χρώματος. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. κυριαρχούν τα άσπρα αδρανή. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_3nx30stonesurface2	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.

apollo_I_3sx30stonesurface dexiapleura	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.
apollo_I_3sw30stonesurface	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική.
apollo_I4wx30betonsy mpliroma	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική.
apollo_I_4ex30aspri flevosi	Πρόκειται πιθανών για ένεμα χρώματος λευκό. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές. Παρατηρούνται πολλά μαύρα στίγματα που πιθανών είναι βιοδιάβρωση.
apollo_I_5ex30beton	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. λευκή απόχρωση. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.
apollo_I_5nx30beton skouro	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.

apollo_I_5sx30stone surface	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.
apollo_I_5wx30stone surface1	Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης χρώματος πορτοκαλί. Η επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένη και εύθρυπτη. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Είναι εμφανή τα διαλυτά άλατα στην επιφάνεια του δείγματος.
apollo_I_6ex30betonwhite	Πρόκειται για σκυρόδεμα άσπρου χρώματος. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μικρών διαστάσεων. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική.
apollo_I_6sx30betongrey	Πρόκειται για τσιμεντοκονίαμα αποκατάστασης γκρίζου χρώματος. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. κυριαρχούν τα άσπρα αδρανή. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές.
apollo_I_7sx30betonleukomeskouraapoxrosi	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Η επιφάνεια είναι αρκετά αποσαθρωμένη. Η επιφάνεια εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.
apollo_I_7nx30beton2	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Η επιφάνεια είναι συμπαγής και συνεκτική. Παρατηρούνται μικρο-ρηγματώσεις και οπές. Στην επιφάνεια είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.

4.1.2.2. Μικροσκοπία οπτικών ινών στα δείγματα.

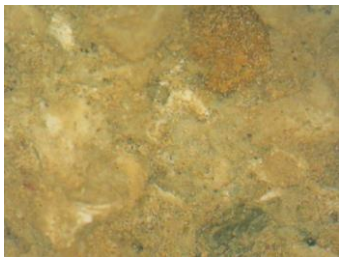
Ελήφθησαν εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών μεγέθυνσης 30x 50x 120x από τα 14 δείγματα που ελήφθησαν περιμετρικά και καθ' ύψος του πρώτου κίονα. Ο σχολιασμός των εικόνων της μικροσκοπίας οπτικών ινών που ελήφθησαν σχετίζονται με το χρώμα, την ύφη, τη συνεκτικότητα, τα αδρανή, τον σχηματισμό κόκκων, και πιθανά υπολείμματα ξένων σωμάτων καθώς επίσης και τον πιθανόν τύπο φθοράς όπως βιολογικές κρούστες και χρωματισμοί του λίθου λόγω των διαλυτών αλάτων κ.α.



Εικόνα 117:Δείγμα A_I_1_W_1.30x

Εικόνα 118:Δείγμα A_I_1_W_1. 50x

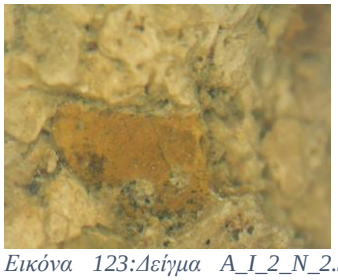
Εικόνα 119:Δείγμα A_I_1_W_1. 120x



Εικόνα 120:Δείγμα A_I_2_N_2.30x

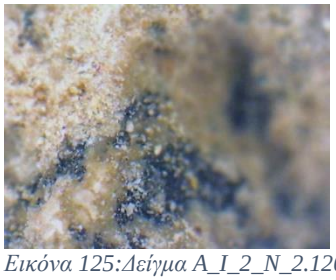
Εικόνα 121:Δείγμα A_I_2_N_2. 50x

Εικόνα 122:Δείγμα A_I_2_N_2.120x



Εικόνα 123:Δείγμα A_I_2_N_2.30x (2)

Εικόνα 124:Δείγμα A_I_2_N_2. 50x (2)



Εικόνα 125:Δείγμα A_I_2_N_2.120x (2)

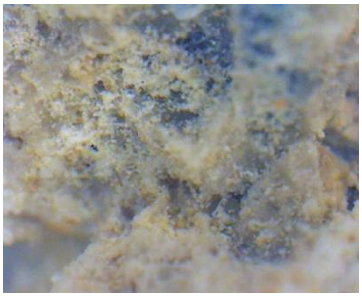
Εικόνα 126:Δείγμα A_I_1_E_3.30x

Εικόνα 127:Δείγμα A_I_1_E_3. 50x

Εικόνα 128:Δείγμα A_I_1_E_3.120x

Εικόνα 129:Δείγμα A_I_2_W_ 4.30x

Εικόνα 130:Δείγμα A_I_2_W_4. 50x



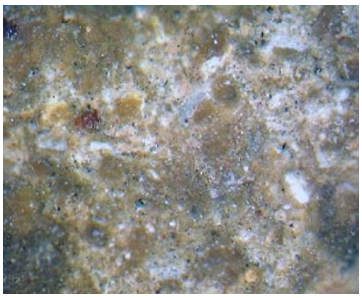
Εικόνα 131:Δείγμα A_I_2_W_ 4. 120x

Εικόνα 132:Δείγμα A_I_13_W_ 5.30x

Εικόνα 133:Δείγμα A_I_13_ W_5.50x

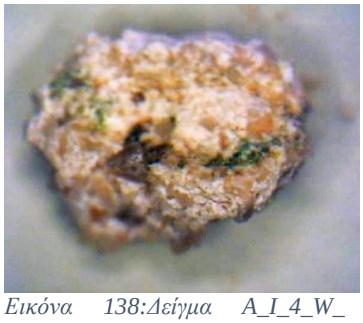
Εικόνα 134:Δείγμα A_I_13_W_5. 120x

Εικόνα 135:Δείγμα A_I_4_ W_6. 30x

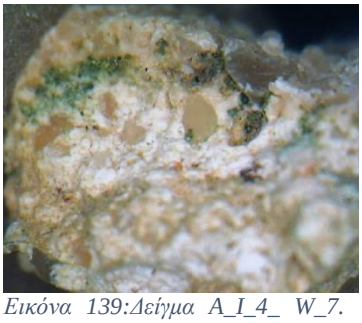


Εικόνα 136:Δείγμα A_I_4_ W_6. 50x

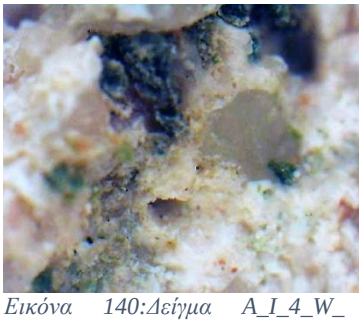
Εικόνα 137:Δείγμα A_I_4_W_ 6. 120x



Εικόνα 138:Δείγμα A_I_4_W_ 7.30x



Εικόνα 139:Δείγμα A_I_4_ W_7. 50x



Εικόνα 140:Δείγμα A_I_4_W_ 7.120x

Εικόνα 141:Δείγμα A_I_4_N_8.30x

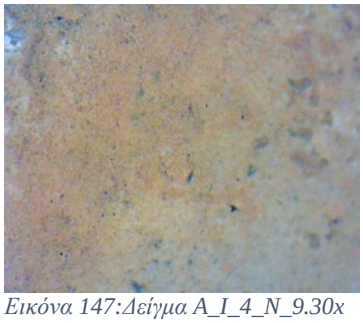
Εικόνα 142:Δείγμα A_I_4_N_8.50x

Εικόνα 143:Δείγμα A_I_4_N _8. 120x

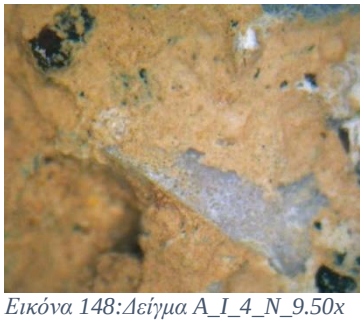
Εικόνα 144:Δείγμα A_I_4_N_8.30x (2)

Εικόνα 145:Δείγμα A_I_4_N_8.30x (2)

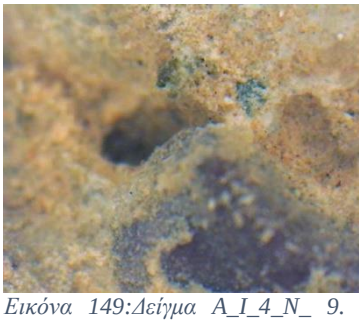
Εικόνα 146:Δείγμα A_I_4_N _8. 120x (2)



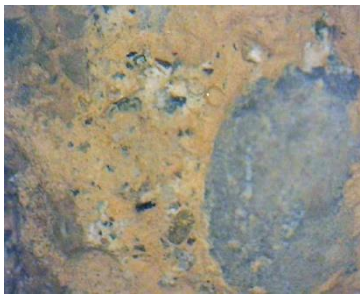
Εικόνα 147:Δείγμα A_I_4_N_9.30x



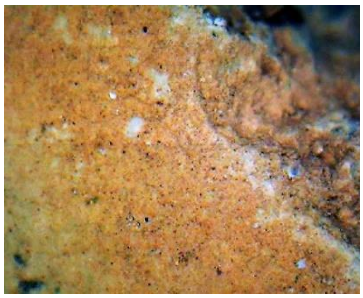
Εικόνα 148:Δείγμα A_I_4_N_9.50x



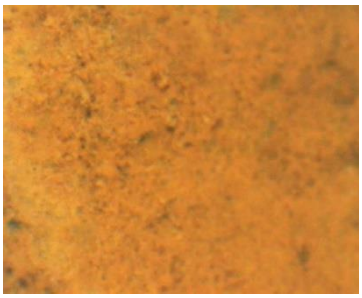
Εικόνα 149:Δείγμα A_I_4_N_ 9. 120x



Εικόνα 150:Δείγμα A_I_4_N_9.30x (2)

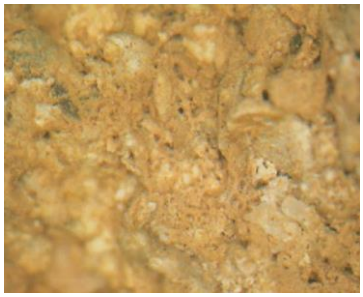


Εικόνα 151:Δείγμα A_I_4_N_9.50x (2)



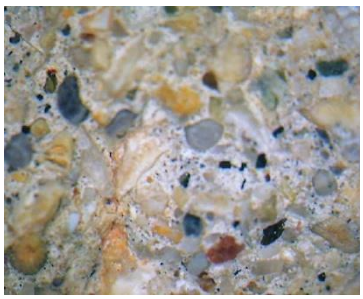
Εικόνα 152:Δείγμα A_I_4_N _9. 120x (2)

Εικόνα 153:Δείγμα A_I_4_E _10. 30x

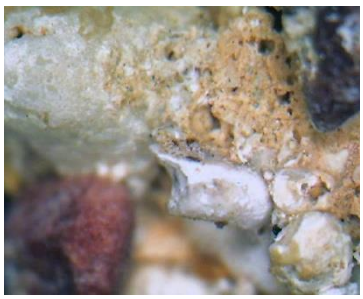


Εικόνα 154:Δείγμα A_I_4_E _10. 50x

Εικόνα 155:Δείγμα A_I_4_E_10. 120x

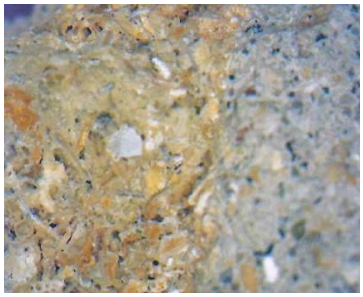


Εικόνα 156:Δείγμα A_I_4_W_11. 30x

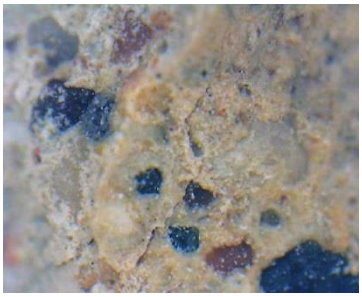


Εικόνα 157:Δείγμα A_I_4_W_11. 50x

Εικόνα 158:Δείγμα A_I_4_W_11. 120x



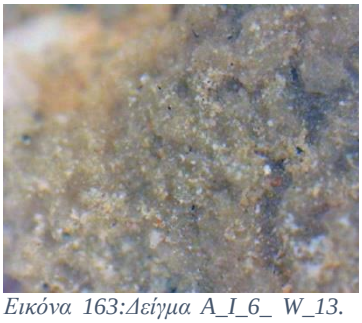
Εικόνα 159:Δείγμα A_I_5_W_ 12. 30x



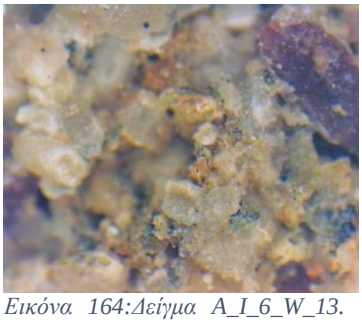
Εικόνα 160:Δείγμα A_I_5_W _12. 50x

Εικόνα 161:Δείγμα A_I_5_W_12. 120x

Εικόνα 162:Δείγμα A_I_6_W _13. 30x



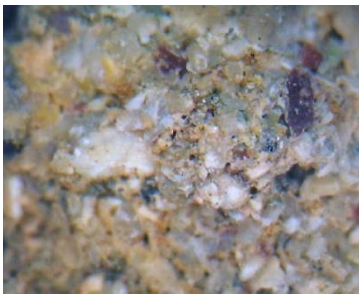
Εικόνα 163:Δείγμα A_I_6_ W_13. 50x



Εικόνα 164:Δείγμα A_I_6_W_13. 120x

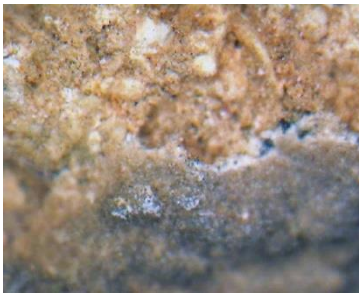
Εικόνα 165:Δείγμα A_I_6_W _13. 30x (2)

Εικόνα 166:Δείγμα A_I_6_W _13. 50x (2)



Εικόνα 167:Δείγμα A_I_6_W_13. 120x (2)

Εικόνα 168:Δείγμα A_I_7_E_14. 30x



Εικόνα 169:Δείγμα A_I_7_E _14. 50x

Εικόνα 170:Δείγμα A_I_7_E_14. 120x

Σχολιασμός των εικόνων της μικροσκοπίας οπτικών ινών.

a_I_1_W_1 Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης βιοκαλτερίτη, χρώματος πορτοκαλί. Το δείγμα είναι αρκετά αποσαθρωμένο. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Είναι εμφανή τα διαλυτά άλατα στην επιφάνεια του δείγματος. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.

a_I_2_N_2 Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης βιοκαλτερίτη, χρώματος σκούρο πορτοκαλί. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Το

δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.

a_I_1_E_3 Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης βιοκαλτερίτη, χρώματος πορτοκαλί. Το δείγμα δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένο και εύθρυπτο. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.

a_I_2_W_4 Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης βιοκαλτερίτη, χρώματος σκούρο πορτοκαλί. Το δείγμα δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένο και εύθρυπτο. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.

a_I_3_W_5 Πρόκειται για λίθο αποκατάστασης βιοκαλτερίτη, χρώματος πορτοκαλί. Το δείγμα είναι αρκετά αποσαθρωμένο. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Είναι εμφανή τα διαλυτά άλατα στην επιφάνεια του δείγματος. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.

a_I_4_W_6 Πρόκειται για τσιμεντοκονίαμα αποκατάστασης χρώματος καφετί. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Το δείγμα είναι αρκετά αποσαθρωμένο. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με πράσινο χρώμα.

a_I_4_W_7 Πρόκειται για αυθεντικό επίχρισμα χρώματος μπεζ. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με πράσινο και πράσινο χρώμα.

a_I_4_N_8 Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος σκούρο πορτοκαλί. Το δείγμα δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένο και εύθρυπτο. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με πράσινο χρώμα. και Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.

a_I_4_N_9 Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου χαλίκι, άμμο και βότσαλα. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση.

a_I_4_E_10 Πρόκειται για αποκατάστασης λίθο χρώματος σκούρο πορτοκαλί. Το δείγμα δεν παρουσιάζει καμία συνεκτικότητα είναι δηλαδή αποσαθρωμένο και εύθρυπτο. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου.

a_I_4_W_11 Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος σκούρο πορτοκαλί. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση.

	Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Υπάρχουν συσσωματωμένα όστρακα στο σώμα του λίθου. Το δείγμα είναι αρκετά αποσαθρωμένο. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.
a_I_5_W_12	Πρόκειται για σκυρόδεμα που αποτελείται από κονία τσιμέντου και θραύσματα πέτρας για αδρανή. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Παρατηρούνται μικρορηγματώσεις και οπές.
a_I_6_W_13	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με πράσινο χρώμα.
a_I_7_E_14	Πρόκειται για αυθεντικό λίθο χρώματος γκρι. Το δείγμα είναι συμπαγή και συνεκτικό. Παρατηρούνται αρκετά αδρανή διαφόρων χρωμάτων, σχηματισμών και μεγεθών. Το δείγμα εξωτερικά εμφανίζει μια πιο σκούρα απόχρωση. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με πράσινο χρώμα. Στο δείγμα είναι εμφανής η βιοδιάβρωση με μαύρο χρώμα.

4.1.3 Μέτρηση σχετικής υγρασίας

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας στον πρώτο κίονα του ναού του πυθίου Απόλλωνος. Οι προς μελέτη επιφάνειες ήταν λίθοι αποκατάστασης και αυθεντικοί λίθοι του μνημείου. Οι μετρήσεις έγιναν ανά κατεύθυνση και ανά σπόνδυλο, καθ' ύψος ανά 10 cm. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν προς μελέτη ήταν όσο το δυνατόν πιο συνεκτικές. Οι θέσεις των προς μελέτη καθ' ύψος επιφανειών παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 26,3^{o}C, ενώ η σχετική υγρασία μετρήθηκε 58,3 %. Το ψηφιακό υγρασιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη αυτή ήταν της Flir το μοντέλο MR77. Δεν ορίζεται κάποιο ευρωπαϊκό πρότυπο για τη διαδικασία αυτή της μελέτης. Στον πίνακα 2 καταγράφεται ο μέσος όρος της σχετικής υγρασίας και της αντίστοιχης μέσης θερμοκρασίας ανά όψη σπονδύλων.

Εικόνα 171:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

Εικόνα 172:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

Εικόνα 173:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

Εικόνα 174:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

Εικόνα 175:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 2ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 176:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 2ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 177: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 2ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 178: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 2ου σπονδύλου[44].

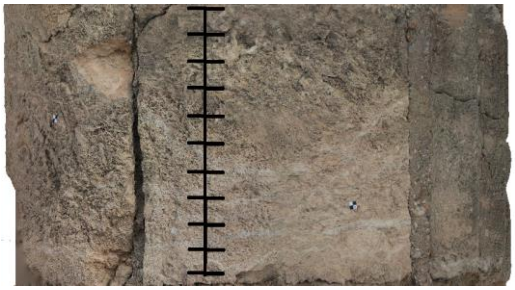
Εικόνα 179: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 3ου σπονδύλου.

Εικόνα 180: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 3ου σπονδύλου.

Εικόνα 181: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 3ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 182:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 3ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 183: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 4ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 184: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 4ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 185: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 4ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 186: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 4ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 187: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 188: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 189: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 190: θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 191:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 192:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 193:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 194:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 195:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Βόρεια όψη 7ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 196:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Νότια όψη 7ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 197:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Ανατολική όψη 7ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 198:θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας. Δυτική όψη 7ου σπονδύλου[44].

Πίνακας 2: Μέσος όρος της σχετικής υγρασίας και της αντίστοιχης μέσης θερμοκρασίας ανά όψη σπονδύλων.

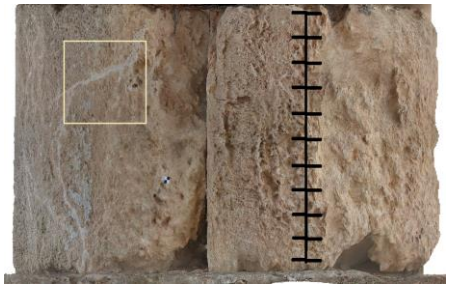
	Μέσος όρος επιφανειακής υγρασίας % καθ΄ ύψος.	Μέση επιφανειακή θερμοκρασία (^{0}C) καθ΄ ύψος.
1 S	12,56	25,15
1 W	12,56	25,15
1 N	20,76	22,26
1 E	15,20	23,22
2 S	13,55	25,76
2 W	15,71	26,98
2 N	16,29	22,22
2 E	15,54	22,39
3 S	14,23	23,53
3 W	15,89	24,18
3 N	16,98	23,85
3 E	16,31	23,49
4 S	13,03	23,46
4 W	13,18	23,14
4 N	18,03	23,29
4 E	12,87	24,23
5 S	13,95	29,17
5 W	18,35	23,23
5 N	22,05	23,05
5 E	16,92	22,78
6 S	11,52	23,05
6 W	15,54	22,56
6 N	15,61	22,87
6 E	10,84	22,81
7 S	9,54	23,10
7 W	10,32	22,22
7 N	14,28	22,61
7 E	11,96	23,78

Οι μετρήσεις της σχετικής υγρασίας, στους λίθους των σπονδύλων, έγιναν σε ομάδες ανά ημέρα. Στις 13,14 και 15 /11/2016 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των σπονδύλων 1-2 , 3-4-5 και 6-7 αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον πίνακα 2, παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά μέσης επιφανειακής υγρασίας στη βόρεια όψη του πρώτου σπονδύλου ένα σε σχέση με τις υπόλοιπες όψεις του. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι, οι άνεμοι που πνέουν συνηθέστερα στο νησί είναι βορειοανατολικοί και λόγω της θάλασσας φέρουν μεγάλες ποσότητες νερού. Παρατηρήθηκε μεγαλύτερος μέσος όρος επιφανειακής υγρασίας στο δεύτερο σπόνδυλο, γεγονός που οφείλεται στη χαμηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία του. Οι θέσεις ελέγχου σχετικής υγρασίας, στην ανατολική όψη του δεύτερου σπονδύλου, βρίσκονται πάνω σε αυθεντικό λίθο και δεν παρουσίασαν σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές τους σε σχέση με τις υπόλοιπες

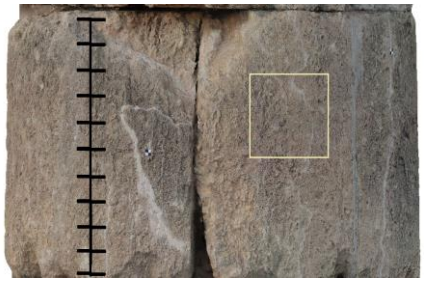
όψεις που είναι λίθοι αποκατάστασης. Οι μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στην ανατολική όψη του τέταρτου σπόνδυλου, ήταν σε αυθεντικό λίθο και ο μέσος όρος επιφανειακής υγρασίας του ήταν ανεπαίσθητα μικρότερος από τους υπόλοιπους λίθους αποκατάστασης του σπονδύλου αυτού. Στον πέμπτο σπόνδυλο, οι τιμές της μέσης επιφανειακής υγρασίας, στη δυτική και βόρεια όψη, είναι αυξημένες κατά πολύ σε σχέση με την νότια όψη, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις έγιναν σε σκυρόδεμα. Στον έκτο σπόνδυλο, οι μετρήσεις έγιναν σε γνήσιο λίθο και πιθανόν για αυτό παρατηρείται μικρός μέσος όρος επιφανειακής υγρασίας. Δεν μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη βόρεια και δυτική όψη του έκτου σπονδύλου διότι ο λίθος χωριζόταν οριζόντια σε δύο κομμάτια γνήσιου λίθου αλλά διαφορετικής σίγουρα επιφανειακής κατάστασης. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές σχετικής υγρασίας στον γνήσιο λίθο με τις αρχιτεκτονικές ακμές σε σχέση με το γνήσιο λίθο πού η επιφάνεια του έχει αποσάθρωση. Ο έβδομος σπόνδυλος αποτελείται από έναν ενιαίο γνήσιο λίθο με πυρήνα από σκυρόδεμα με μέσο όρο σχετικής υγρασίας μικρότερο των υπολοίπων σπονδύλων. Παρατηρώντας τον κίονα συνολικά, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι, στην βόρεια πλευρά του, οι τιμές της σχετικής υγρασίας είναι αισθητά αυξημένες σε σχέση με τις υπόλοιπες πλευρές κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο ότι οι άνεμοι που πνέουν συνηθέστερα στο νησί είναι βορειοανατολικοί και λόγω της θάλασσας φέρουν μεγάλες ποσότητες νερού.

4.1.4 Κρουσιμέτρηση

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κρουσιμέτρησης στον πρώτο κίονα του ναού του πυθίου Απόλλωνος, όπου αυτό ήταν εφικτό. Οι προς μελέτη επιφάνειες ήταν λίθοι αποκατάστασης και λίθοι αυθεντικοί του μνημείου. Οι μετρήσεις έγιναν ανά κατεύθυνση και ανά σπόνδυλο, αρχικά σε περιοχή τετράγωνου σχήματος διαστάσεων 30cm x 30cm και στη συνέχεια καθ' ύψος ανά 10 cm, οι περιοχές που επιλέχθηκαν προς μελέτη ήταν όσο το δυνατόν πιο λείες και παρουσιάζονται οι ακριβείς τους θέση στις παρακάτω εικόνες. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 26,3^{o}C, ενώ η σχετική υγρασία μετρήθηκε 58,3%. Το κρουσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη αυτή ήταν η σφύρα Schmid. Εφαρμόστηκε το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12-504-2:2012 «έλεγχος σκυροδέματος στις κατασκευές - μη καταστροφικός έλεγχος αντοχής με κρουσιμέτρηση». Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, οι τιμές που απέχουν 20% από τη μέση τιμή των μετρήσεων θλιπτικής αντοχής απορρίπτονται από τα αποτελέσματα. Στον πίνακα 3 καταγράφονται ο μέσος όρος της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε τετράγωνο σχήματος 30cm x 30cm καθώς επίσης και ο μέσος όρος μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής καθ΄ ύψος ανά διεύθυνση σπονδύλου.

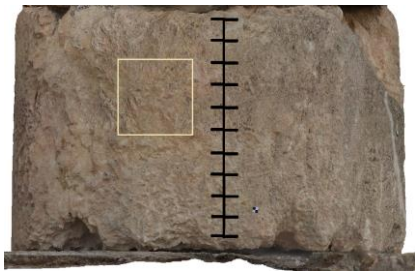


Εικόνα 199:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

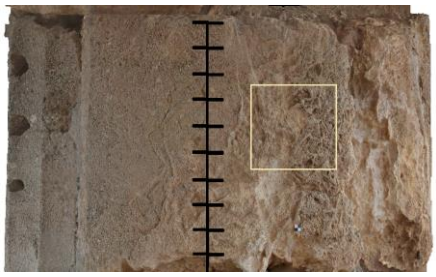


Εικόνα 200:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].

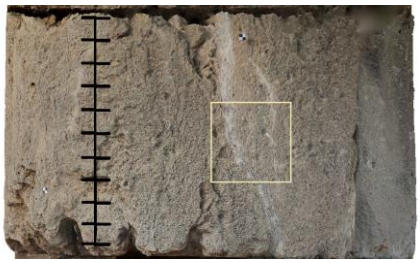
Εικόνα 201:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].



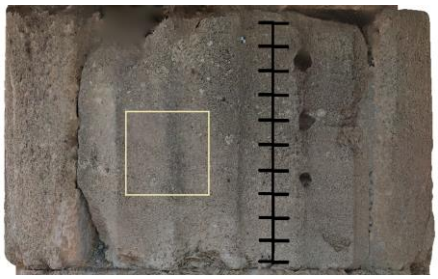
Εικόνα 202:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 1^{ου} σπονδύλου[44].



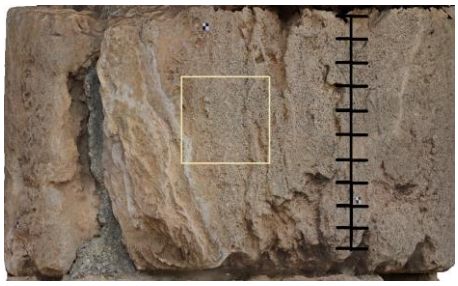
Εικόνα 203:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 2ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 204:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 2ου σπονδύλου[44].



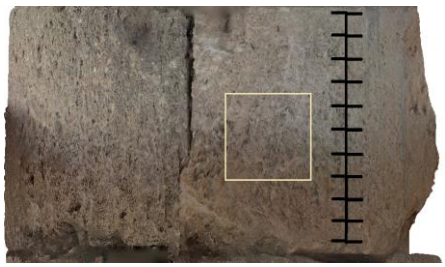
Εικόνα 205:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 2ου σπονδύλου[44].



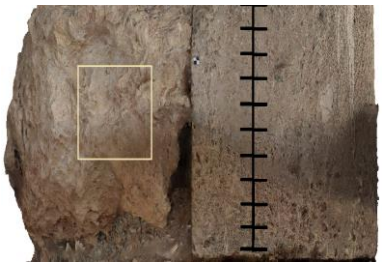
Εικόνα 206:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 2ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 207:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 3ου σπονδύλου[44].

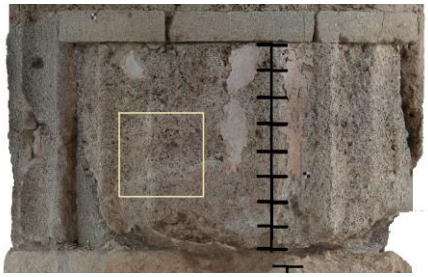
Εικόνα 208:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 3ου σπονδύλου[44].



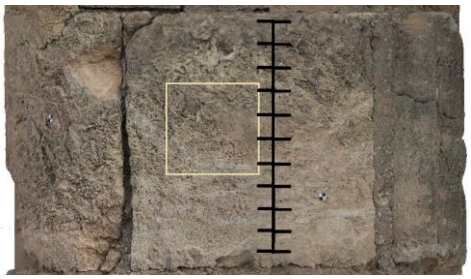
Εικόνα 209:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 3ου σπονδύλου[44].



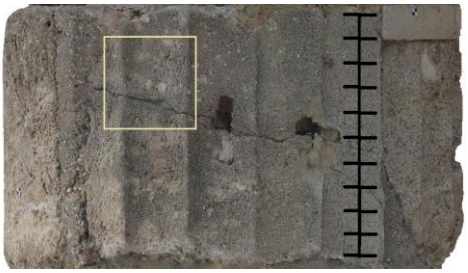
Εικόνα 210:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 3ου σπονδύλου[44].



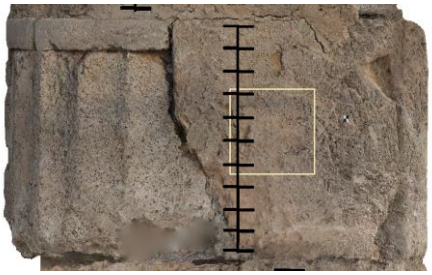
Εικόνα 211:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 4ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 212:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 4ου σπονδύλου[44].



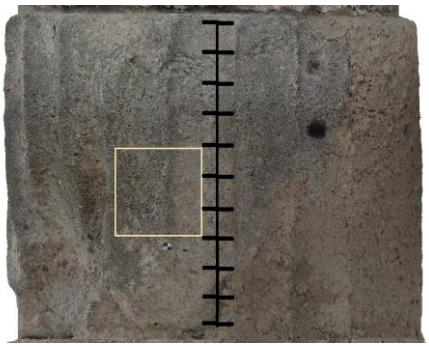
Εικόνα 213:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 4ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 214:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 4ου σπονδύλου[44].

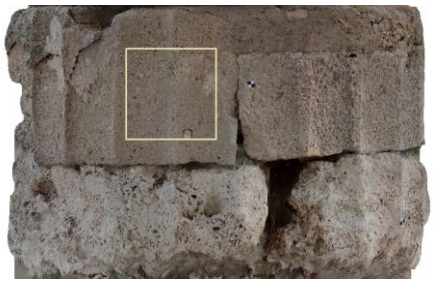
Εικόνα 215:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 216:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 5ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 217:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 5ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 218:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 5ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 219:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 6ου σπονδύλου[44].

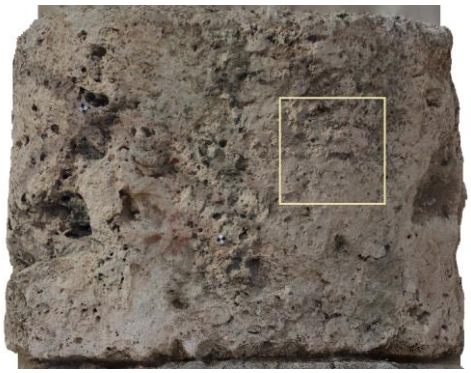
Εικόνα 220:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 221:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 6ου σπονδύλου[44].

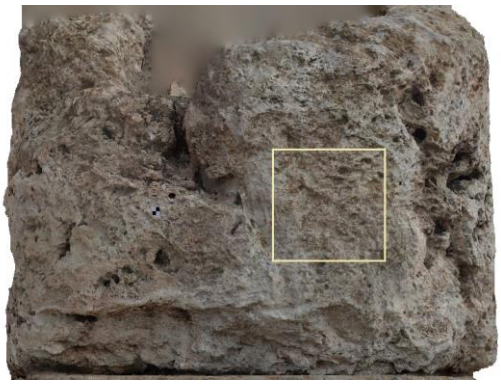
Εικόνα 222:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 6ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 223:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Βόρεια όψη 7ου σπονδύλου[44].

Εικόνα 224:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Νότια όψη 7ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 225:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Ανατολική όψη 7ου σπονδύλου[44].



Εικόνα 226:θέσεις ελέγχου θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής. Δυτική όψη 7ου σπονδύλου[44].

Πίνακας 3:Μέσος όρος μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σε τετράγωνο σχήματος 30cm x 30cm και μέσος όρος μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής καθ΄ ύψος ανά διεύθυνση σπονδύλου. Είδος λίθου.

όψη	Μέσος όρος μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (MP) σε τετράγωνο 30cm x 30cm	Αντικείμενο ελέγχου	Μετρήσεις μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (MP) καθ' ύψος	Αντικείμενο ελέγχου
1 S	8,12	Λίθος αποκατάστασης	7,89	Λίθος αποκατάστασης
1 W	7,40	Λίθος αποκατάστασης	7,21	Λίθος αποκατάστασης
1 N	6,98	Λίθος αποκατάστασης	7,45	Λίθος αποκατάστασης
1 E	7,84	Λίθος αποκατάστασης	8,68	Λίθος αποκατάστασης
2 S	7,53	Λίθος αποκατάστασης	7,21	Λίθος αποκατάστασης
2 W	7,23	Λίθος αποκατάστασης	7,31	Λίθος αποκατάστασης
2 N	6,98	Λίθος αποκατάστασης	7,05	Λίθος αποκατάστασης
2 E	11,24	Αυθεντικός λίθος	7,89	Αυθεντικός λίθος
3 S	6,98	Λίθος αποκατάστασης	7,06	Λίθος αποκατάστασης
3 W	6,78	Λίθος αποκατάστασης	6,78	Λίθος αποκατάστασης
3 N	8,47	Λίθος αποκατάστασης	6,99	Λίθος αποκατάστασης
3 E	8,76	Λίθος αποκατάστασης	7,68	Λίθος αποκατάστασης
4 S	8,24	Λίθος αποκατάστασης	10,26	Λίθος αποκατάστασης
4 W	7,19	Λίθος αποκατάστασης	11,47	Λίθος αποκατάστασης
4 N	7,02	Λίθος αποκατάστασης	11,11	Λίθος αποκατάστασης
4 E	7,45	Αυθεντικός λίθος	10,67	Αυθεντικός λίθος
5 S	10,09	Αυθεντικός λίθος	16,16	Αυθεντικός λίθος
5 W	14,09	Λίθος αποκατάστασης	14,96	Λίθος αποκατάστασης
5 N	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.		15,31	Αυθεντικός λίθος
5 E	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.		14,64	Αυθεντικός λίθος
6 S	11,38	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
6 W	12,61	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
6 N	8,76	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
6 E	12,28	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7 S	18,00	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7 W	18,71	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7 N	16,16	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7 E	16,98	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	

Οι μετρήσεις έγιναν με ιδιαίτερη προσοχή. Όγκοι του λίθου που περιείχαν διαλυτά άλατα και ενέματα παρουσίαζαν πολύ αυξημένες μετρήσεις θλιπτικής αντοχής έως 54MPa και για αυτό το λόγο είναι δύσκολο να ειπωθεί πως οι μετρήσεις είναι αντικειμενικές και όχι ελαφρώς υπερεκτιμημένες. Όπως παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα δεν ήταν η εφικτή η μέτρηση σε τετράγωνο σχήμα 30cm x 30cm στο σπόνδυλο 5 με κατεύθυνση βόρεια και ανατολικά καθώς επίσης και η μέτρηση καθ' ύψος θλιπτικής αντοχής στους σπονδύλους 6 και 7 αφού η επιφάνειά τους ήταν τραχιά, με πολλές οπές και θα δημιουργούσε φθορά στον λίθο η σφύρα ή οι τιμές θλιπτικής αντοχής ήταν κάτω του ορίου δυνατοτήτων του οργάνου. Παραπλήσιες τιμές με αυτές της θλιπτικής αντοχής που μετρήθηκαν στο τετράγωνο σχήμα χωριό 30cm x 30cm παρουσιάζονται και στις μετρήσεις θλιπτικής αντοχής καθ΄ ύψος. Οι λίθοι αποκατάστασης παρουσιάζουν μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τον αυθεντικό λίθο. Στους λίθους αποκατάστασης παρατηρούνται πολύ χαμηλές μέσες τιμές

μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής καθώς οι τιμές κυμαίνονται από 6,8 MPa και φτάνουν έως τα 8,8 MPa. Σε αντίθεση με τους λίθους αυτούς, οι αυθεντικοί λίθοι παρουσιάζουν έναν εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής από 7,5 MPa έως 18,8 MPa. Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής που μετρήθηκαν φέρουν σφάλμα διότι ο λίθος είναι πωρόλιθος και χαρακτηρίζεται από μεγάλους πόρους και τραχεία επιφάνεια, στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα τη μέτρηση της σφύρας.

Στον πίνακα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων ανά κατεύθυνση. Οι μικρότερες τιμές καθ' ύψος θλιπτικής αντοχής μετρήθηκαν στη βόρεια πλευρά του κίονα ενώ μεγαλύτερες τιμές μετρήθηκαν στη νότια πλευρά. Η εξάρτηση της θλιπτικής αντοχής ανά κατεύθυνση μπορεί να οφείλεται άμεσα στις περιβαλλοντικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή. Οι κατώτεροι υψομετρικά σπόνδυλοι παρουσιάζουν μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τους υπόλοιπους σπονδύλους ανεξάρτητου κατευθύνσεως. Ο έκτος και έβδομος σπόνδυλος παρουσιάζουν μεγάλες τιμές θλιπτικής αντοχής.

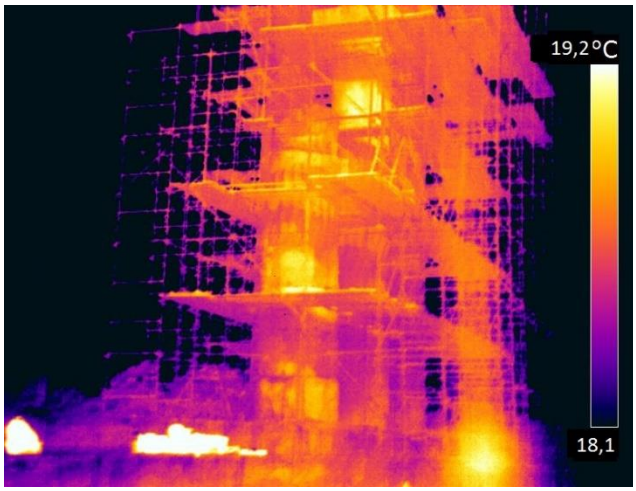
Πίνακας 4: Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής ανά κατεύθυνση.

Όψη		Μέσος όρος μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (MP) σε τετράγωνο 30cm x 30cm	Αντικείμενο ελέγχου	μετρήσεις μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (MP) καθ' ύψος	Αντικείμενο ελέγχου
1	S	8,12	Λίθος αποκατάστασης	7,89	Λίθος αποκατάστασης
2	S	7,53	Λίθος αποκατάστασης	7,21	Λίθος αποκατάστασης
3	S	6,98	Λίθος αποκατάστασης	7,06	Λίθος αποκατάστασης
4	S	8,24	Λίθος αποκατάστασης	10,26	Λίθος αποκατάστασης
5	S	10,09	Αυθεντικός λίθος	16,16	Αυθεντικός λίθος
6	S	11,38	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7	S	18,00	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
1	W	7,40	Λίθος αποκατάστασης	7,21	Λίθος αποκατάστασης
2	W	7,23	Λίθος αποκατάστασης	7,31	Λίθος αποκατάστασης
3	W	6,78	Λίθος αποκατάστασης	6,78	Λίθος αποκατάστασης
4	W	7,19	Λίθος αποκατάστασης	11,47	Λίθος αποκατάστασης
5	W	14,09	Λίθος αποκατάστασης	14,96	Λίθος αποκατάστασης
6	W	12,61	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7	W	18,71	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
1	N	6,98	Λίθος αποκατάστασης	7,45	Λίθος αποκατάστασης
2	N	7,18	Λίθος αποκατάστασης	7,05	Λίθος αποκατάστασης
3	N	8,47	Λίθος αποκατάστασης	6,99	Λίθος αποκατάστασης
4	N	7,02	Λίθος αποκατάστασης	11,11	Λίθος αποκατάστασης
5	N	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.		15,31	Αυθεντικός λίθος
6	N	8,76	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7	N	16,16	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
1	E	7,84	Λίθος αποκατάστασης	8,68	Λίθος αποκατάστασης
2	E	11,24	Αυθεντικός λίθος	7,89	Αυθεντικός λίθος
3	E	8,76	Λίθος αποκατάστασης	7,68	Λίθος αποκατάστασης
4	E	7,45	Αυθεντικός λίθος	10,67	Αυθεντικός λίθος
5	E	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.		14,64	Αυθεντικός λίθος
6	E	12,28	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	
7	E	16,98	Αυθεντικός λίθος	Δεν ήταν εφικτή η μέτρηση.	

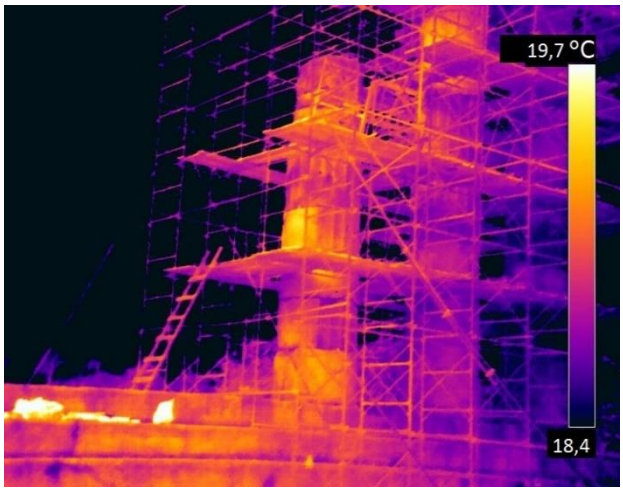
4.1.5 Θερμογραφία υπέρυθρου

Πραγματοποιήθηκε η λήψη θερμογραφημάτων υπέρυθρου στους κίονες του ναού του πυθίου Απόλλωνος με τη χρήση της θερμοκάμερας της εταιρείας Flir, μοντέλο vue pro 640 19mm. Η ομάδα ερευνητών του Ε.Μ.Π. σχεδίασε τη λήψη θερμογραφημάτων ανά τακτά χωρικά διαστήματα, περιμετρικά του κίονα σε απόσταση 25m από αυτόν, ανά μία ώρα (εικόνες 227 έως 233). Οι εικόνες που παρατίθενται παρακάτω φέρουν και τη σκαλωσιά περιμετρικά του ναού.

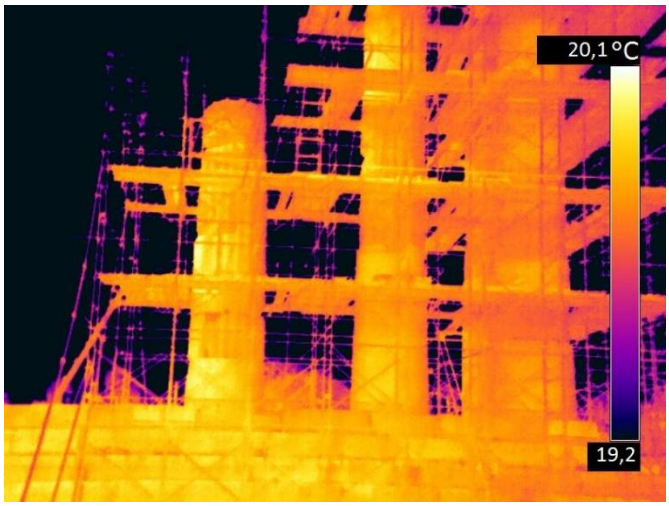
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας, ταυτόχρονα με το υγρασιόμετρο της Flir M 77 και τη θερμογραφική μηχανή, σε σταθερά σημεία ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν μικρότερα σφάλματα στις μετρήσεις. Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του θερμογραφήματος, καθώς επίσης και οι τιμές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που μετρήθηκαν επι τόπου.



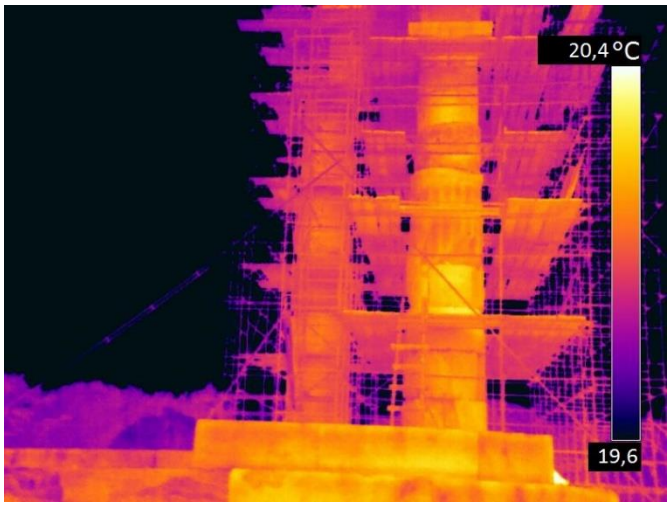
Εικόνα 227: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 10:00.



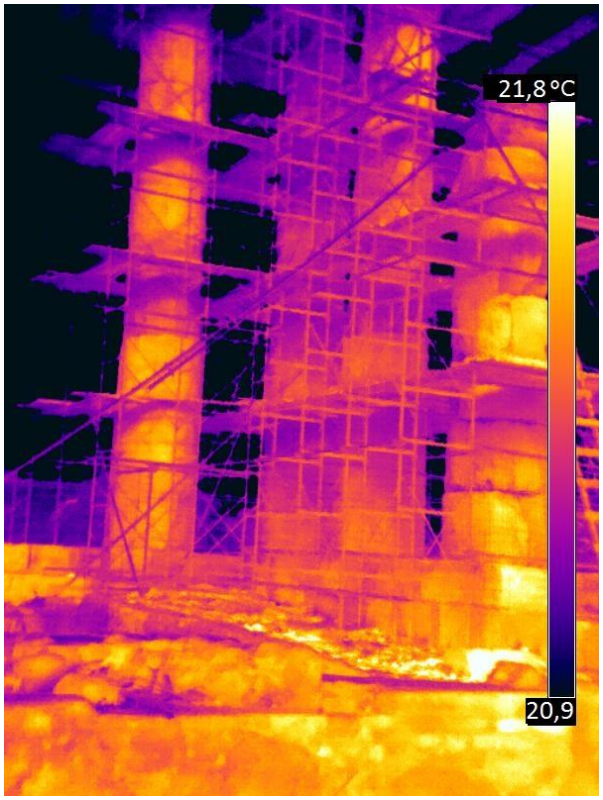
Εικόνα 228: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 11:00.



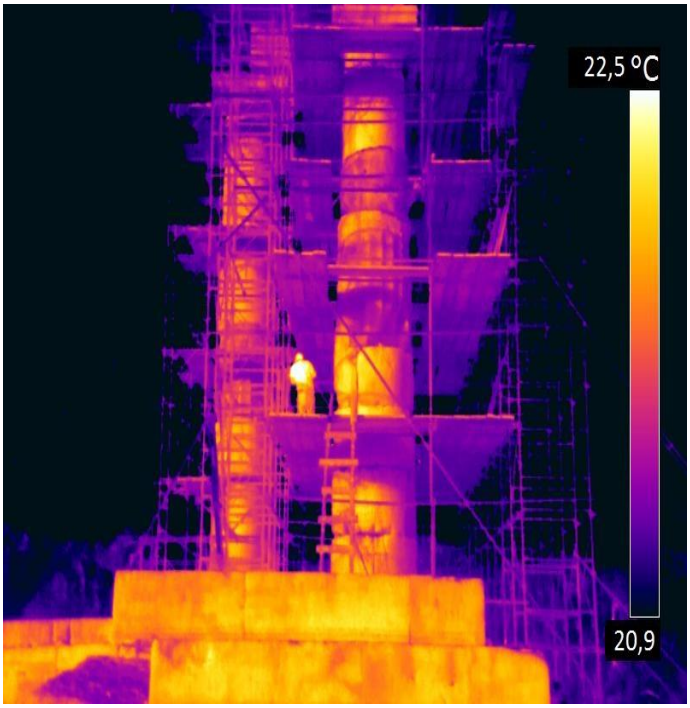
Εικόνα 229: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 12:00.



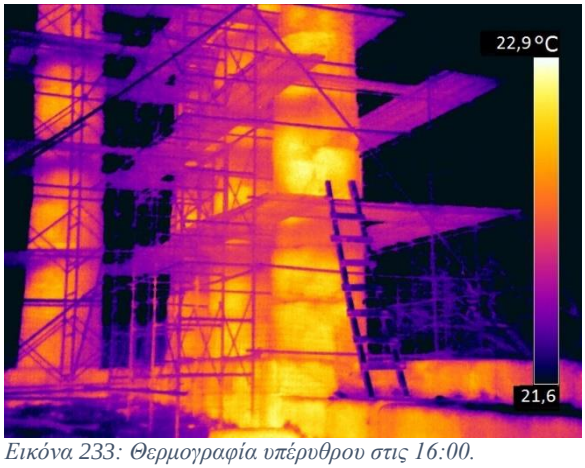
Εικόνα 230: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 13:00.



Εικόνα 231: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 14:00.



Εικόνα 232: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 15:00.



Εικόνα 233: Θερμογραφία υπέρυθρου στις 16:00.

Σχολιασμός θερμογραφημάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας ανά ώρα στο ναό.

Στις 10:00 π.μ. δεν είχε προλάβει να αυξηθεί η επιφανειακή θερμοκρασία των κιόνων του ναού λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρήθηκαν σημεία με λαμπερό κίτρινο χρώμα, που στην πραγματικότητα ήταν τα σημεία που είχαν άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και άρα τη μεγαλύτερη θερμοκρασία. Με σκούρο μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα σημεία τα οποία είναι σχεδόν κατά 10C πιο ψυχρά. Τα σημεία αυτά, στις εικόνες των θερμογραφημάτων, ήταν τα σημεία που επικαλύπτονταν από τα ξύλινα μαδέρια της σκαλωσιάς και σημεία που σκιάζονταν λόγο ύπαρξης άλλου κίονα μεταξύ αυτών των σημείων και του ήλιου. Καθώς η ώρα άλλαζε και ο ήλιος μετακινιόταν στον ορίζοντα, παρατηρήθηκε να αυξάνεται γρήγορα η θερμοκρασία και σε άλλα σημεία των κιόνων, λόγω είτε άμεσης έκθεσής τους στην ηλιακή ακτινοβολία είτε διάχυσης της θερμότητας στον όγκο του κίονα. Στην θερμογραφία που ελήφθησε

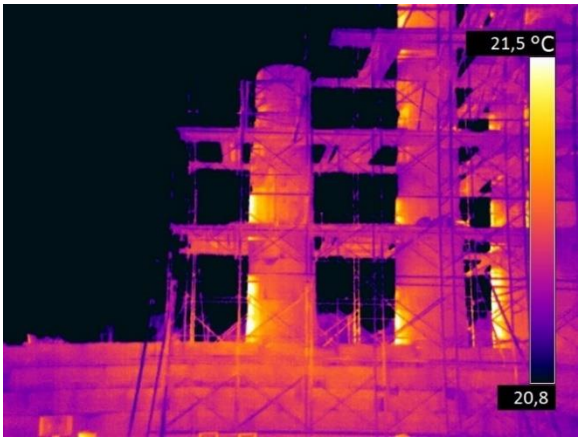
στις 12 παρατηρήθηκε μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σημείων των κιόνων με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πλέον σκούρο μπλε χρώμα επί των σπονδύλων παρά μόνο στα σημεία όπου σκιάζονταν από τα μαδέρια της σκαλωσιάς. Η επιφάνεια των λίθων αποκατάστασης παρουσιάζονται στις εικόνες με πιο θερμά χρώματα από ότι του αυθεντικού λίθου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορά του πορώδους που έχουν αυτοί οι λίθοι. Χαρακτηριστικό γνώρισμα, των θερμογραφημάτων αυτών, είναι η πιο ψυχρή απόχρωση που δίνεται στους αυθεντικούς λίθους μεταξύ των ακμών της αρχιτεκτονικής τους επιφάνειας. Αυτό είναι συνέπεια του ότι όγκος των ακμών είναι πολύ μικρότερος και πιο εκτεθειμένοι σε σχέση με τον όγκο του λίθου και άρα η υγρασία που εμπεριέχεται σε αυτές αποβάλλεται πιο εύκολα κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες του κίονα[46]. Παρότι, η μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας καταγράφηκε στις 2 μ.μ. η επιφανειακή θερμοκρασία σε σημεία του κίονα παρουσιάζεται υψηλή μέχρι τις 4μμ.. Αυτό συμβαίνει λόγω συνδυασμού δράσης της θερμικής αγωγιμότητας του λίθου και του σκυροδέματος στο εσωτερικό των κιόνων.

Πίνακας 5:Επιφανειακό θερμοκρασιακό εύρος και θερμοκρασία περιβάλλοντος, ανά ώρα.

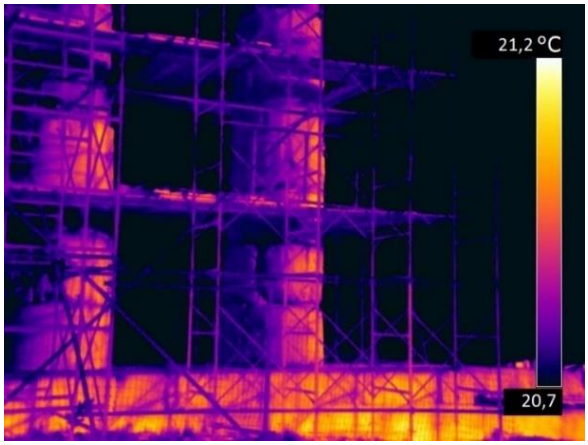
Ώρα	Tmin(^{0}C)	Tmax(^{0}C)	Tπεριβάλλοντος(^{0}C)
10:00	18,1	19,2	17,5
11:00	18,4	19,7	18,0
12:00	19,2	20,1	18,3
13:00	19,6	20,4	18,7
14:00	20,9	21,8	19,1
15:00	20,9	22,5	19,0
16:00	21,6	22,9	18,8

Οι εικόνες 234 έως 237 παρουσιάζουν την θερμική απεικόνιση του ναού στις 2 μμ. από διάφορες διευθύνσεις.

Εικόνα 234: Θερμογραφία υπέρυθρου. Νότια όψη του ναού.



Εικόνα 235: Θερμογραφία υπέρυθρου. Δυτική όψη του ναού.

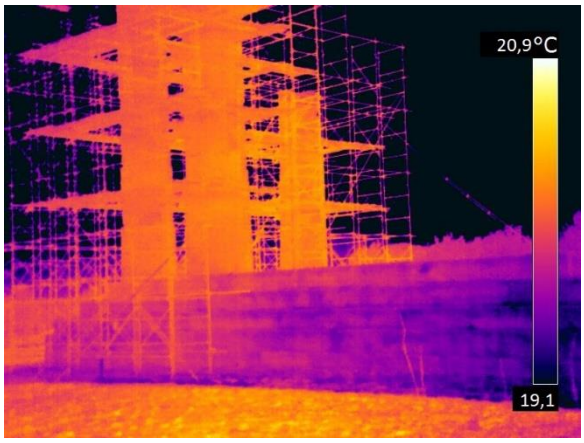


Εικόνα 236: Θερμογραφία υπέρυθρου. Βόρια όψη του ναού.

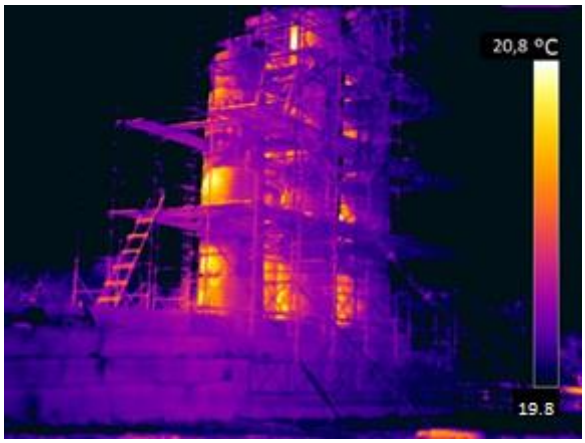
Εικόνα 237: Θερμογραφία υπέρυθρου. Βορειοδυτική όψη του ναού.

Στα θερμογραφήματα υπέρυθρης ακτινοβολίας που ελήφθησαν περιμετρικά του κίονα, με χρονική διαφορά κάποιων λεπτών μεταξύ τους, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία στις πλευρές όπου ο ναός ήταν εκτεθειμένος στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα σημεία που βρίσκονταν υπό σκιά. Η διαφορά θερμοκρασίας των δύο αυτών κατηγοριών περιοχών είναι περίπου 0,5 ^{0}C. Οι δύο τελευταίοι σπόνδυλοι του πρώτου κίονα παρουσιάζονται με πιο ψυχρά χρώματα σε σχέση με τους υπόλοιπους σπονδύλους, κάτι που μπορεί να οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό βιολογικών επικαθήσεων και υγρασίας που εμπεριέχουν.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα θερμογραφήματα υπέρυθρης ακτινοβολίας(εικόνες 238 έως 241), που ελήφθησαν στις 2μμ περιμετρικά του ναού, με θέμα τα σκαλοπάτια, στη βάση των κιόνων. Παρατηρήθηκε έντονη υγρασία στις ακμές των λίθων, όπου γίνεται η ένωση των δύο λίθων, καθώς επίσης και σε διάφορα σημεία στον όγκο του λίθου. Στη θερμογραφία, των κατώτερων υψομετρικά σκαλοπατιών της νοτιοανατολικής όψης του ναού, γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της ανερχόμενης υγρασίας, καθώς τα κατώτερα σκαλοπάτια παρουσιάζονται με πιο έντονο σκουρόχρωμα σε σχέση με τα υψηλότερα σκαλοπάτια όπου το χρώμα της αποτυπωμένης θερμοκρασία τείνει προς το πορτοκάλι.



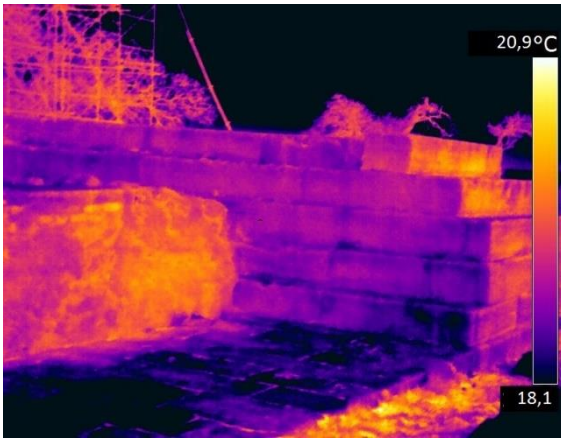
Εικόνα 238: Θερμογραφία υπέρυθρου στα σκαλοπάτια. Βορειοανατολική όψη ναού.



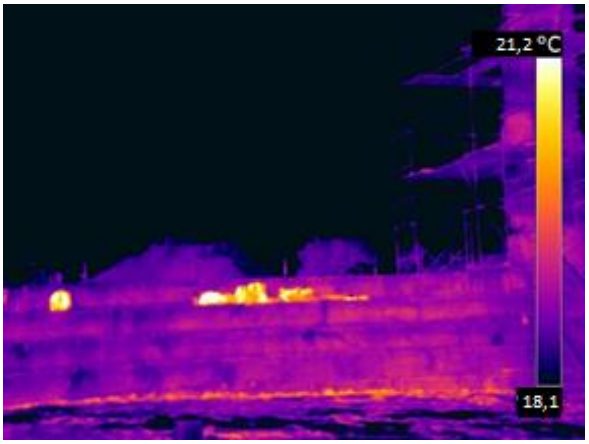
Εικόνα 239: Θερμογραφία υπέρυθρου στα σκαλοπάτια. Νοτιοανατολική όψη ναού.

Επίσης, στην ίδια εικόνα γίνεται σύγκριση της όψης που έχει προσανατολισμό προς τον ήλιο σε σχέση με την όψη που βρίσκεται ακριβώς από πίσω. Και στις δύο πλευρές

παρατηρήθηκαν τα φαινόμενα της βιοδιάβρωσης και της παραμένουσας υγρασίας ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας, η πλευρά που ήταν εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία ήταν πιο θερμή σε σχέση με την άλλη.



Εικόνα 240: Θερμογραφία υπέρυθρου στα σκαλοπάτια. Νοτιοανατολική όψη ναού.



Εικόνα 241: Θερμογραφία υπέρυθρου στα σκαλοπάτια. Νοτιοανατολική όψη ναού

4.1.6 Χρωματομετρία

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χρωματομετρία από τα 14 δείγματα που ελήφθησαν περιμετρικά και καθ' ύψος του πρώτου κίονα του ναού πύθιο του Απόλλωνος. Το χρωματόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Dr Lange το μοντέλο LMG268. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα της μελέτης αυτής.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα μέτρησης χρώματος στα δείγματα που ελήφθησαν από το ναό.

Δείγμα	l	a	b	l	a	b
a_I_1_W_1	70,53	4,36	17,26	70,57	4,26	16,99
a_I_2_N_2	61,75	4,51	15,52	63,54	3,04	14,59
a_I_1_E_3	61	6,07	21,49	60,04	5,72	20,79
a_I_2_W_4	61	6,07	21,49	60,04	5,72	20,79
a_I_3_W_5	61	6,07	21,49	60,04	5,72	20,79
a_I_4_W_6	43,34	2,2	8,93	39,99	2,19	8,83
a_I_4_W_7	68,8	6,37	16,86	69,74	6,44	17,08
a_I_4_N_8	43,34	2,2	8,93	39,99	2,19	8,83
a_I_4_N_9	55,94	2,92	12,04	56,38	3	11,39
a_I_4_E_10	65,83	4,4	16,83	64,9	3,53	17,1
a_I_4_W_11	62,08	6,02	19,75	64,64	5,27	17,94
a_I_5_W_12	61	6,07	21,49	60,04	5,72	20,79
a_I_6_W_13	51,74	4,31	13,48	51,51	4,41	13,53
a_I_7_E_14	48,73	3,47	11,47	53,36	4,99	14,77

Στη συνέχεια της μελέτης αυτής, έγινε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υλικών δείγματος με τη χρήση της σχέσης dE=$\sqrt{dL^2 + dA^2 + dB^2}$, όπου d η διαφορά της αντίστοιχης ποσότητας.

Πίνακας 7: Χρωματικές συγκρίσεις μεταξύ δειγμάτων διαφόρων υλικών.

Συγκρίνοντας τα δείγματα	Είδος υλικού	dE	dL^2	dA^2	dB^2
a_I_4_N_8 με a_I_4_N_9	Αυθεντικός λίθος, τσιμέντο πλήρωσης.	12,9981	158,76	0,5184	9,6721
a_I_1_W_1 με a_I_4_N_8	Λίθος αποκατάστασης, αυθεντικός λίθος	15,56246	212,8681	2,0736	27,2484
a_I_5_W_12 με a_I_7_E_14	Τσιμεντιτικό επίχρισμα, αυθεντικός λίθος	16,05345	150,5529	6,76	100,4004
a_I_4_W_7 με a_I_5_W_12	Αυθεντικό επίχρισμα, Τσιμεντιτικό επίχρισμα	9,075621	60,84	0,09	21,4369

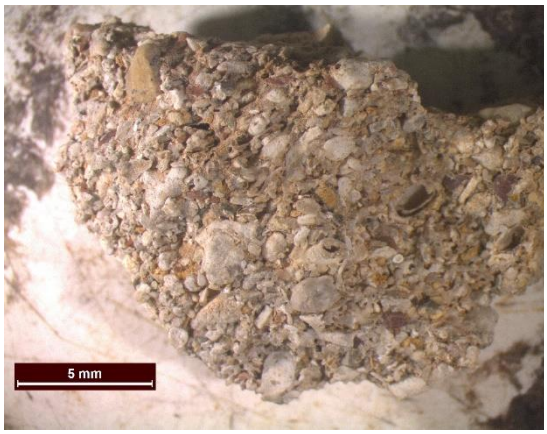
Κατά τη σύγκριση δύο δειγμάτων, αν η ποσότητα dE είναι μικρότερη του 5[38], τότε δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά χρώματος μεταξύ αυτών. Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, όλα τα υλικά είναι μεταξύ τους αισθητικά ασύμβατα. Μεγαλύτερη διαφορά χρώματος εμφανίζεται μεταξύ των δειγμάτων αυθεντικού λίθου και τσιμεντιτικού επιχρίσματος, ενώ η μικρότερη διαφορά χρώματος παρατηρείται στο αυθεντικό επίχρισμα σε σύγκριση με το τσιμεντιτικό επίχρισμα που εμπεριέχει χρωστικές.

4.2. Αναλυτικές μέθοδοι μελέτης

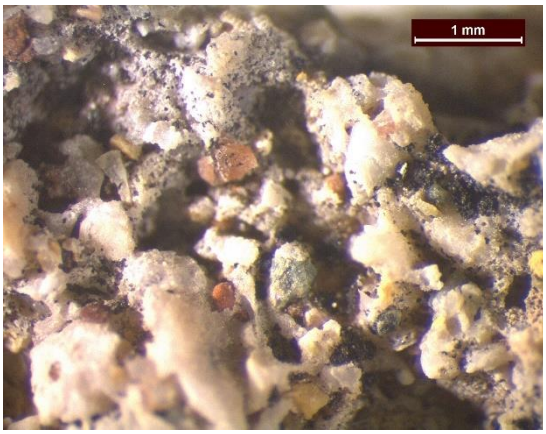
4.2.1 Οπτικό μικροσκόπιο

Πραγματοποιήθηκαν οπτικές παρατηρήσεις μεγέθυνσης έως 64x, στα δείγματα που ελήφθησαν από το ναό του πυθίου Απόλλωνος στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Το Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας Leica το μοντέλο MZ6 με ψηφιακό μετατροπέα εικόνας dfc 290 της ίδιας εταιρίας.

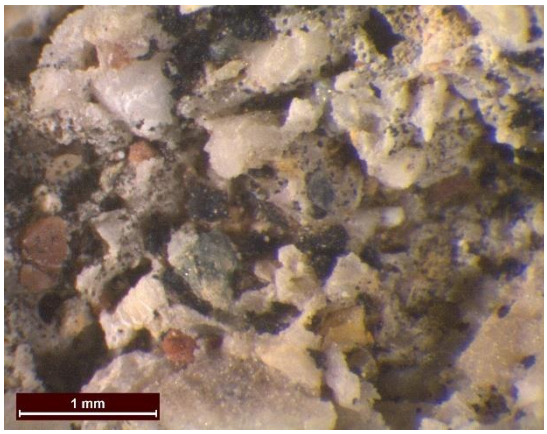
Στις εικόνες 242 έως 245 γίνεται φωτογραφική απεικόνιση μέσω οπτικού μικροσκοπίου σε μεγέθυνσης x2,56 x16 x51,2 του δείγματος με κωδική ονομασία a_I_4_N_8. Στις φωτογραφίες που ελήφθησαν παρατηρήθηκε έντονη αποσάθρωση των υλικών και σχετικά μικρή συνεκτικότητα μεταξύ των κόκκων του λίθου. Οι κόκκοι σχηματίζουν μεγάλα συμπλέγματα αδρανών έως και 2mm, ενώ οι χρωματισμοί τους ποικίλουν. Υπάρχουν κόκκοι χρώματος άσπρου, κόκκινο, πράσινο, μαύρο, και μπλε, ενώ με κίτρινο χρώμα εντοπίζονται κάποιες πιθανών βιολογικές επικαθήσεις.



Εικόνα 242: Δείγμα **a_I_4_N_8** *εσωτερική πλευρά x2.56. Γενική αποτύπωση δείγματος.*



Εικόνα 243: Δείγμα **a_I_4_N_8** *εξωτερική πλευρά x51.2. Βιολογικές μαύρες επικαθήσεις.*

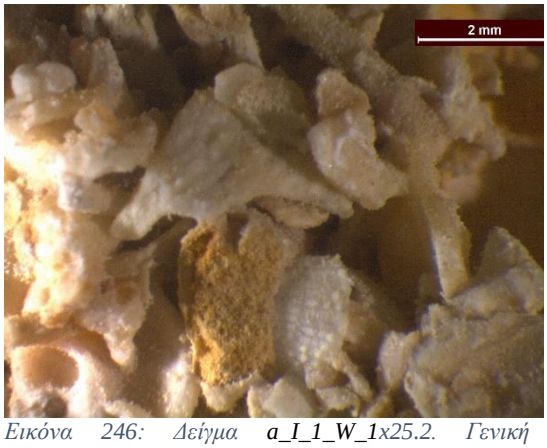


Εικόνα 244: Δείγμα **a_I_4_N_8** *εξωτερική πλευρά x51.2. Αποκόλληση κόκκων.*

Εικόνα 245: Δείγμα **a_I_4_N_8** *εσωτερική πλευρά x25.2. Βιολογικές κίτρινες επικαθήσεις*

Στις εικόνες 246 και 247 γίνεται φωτογραφική απεικόνιση μέσω οπτικού μικροσκοπίου σε μεγέθυνσης x2,56 και x64 του δείγματος με κωδική ονομασία a_I_1_W_1. Στις φωτογραφίες που ελήφθησαν, παρατηρήθηκαν απολιθώματα στη

μάζα του δείγματος άσπρου χρωματισμού καθώς επίσης κίτρινοι σφαιρικοί σχηματισμοί στην επιφάνεια των απολιθωμάτων πιθανόν βιολογικής προέλευσης. Το δείγμα ήταν σαθρό και δεν παρουσίαζε σχεδόν καθόλου συνεκτικότητα στη δομή του. Το πορώδες με μια πρώτη οπτική εκτίμηση φάνηκε να είναι αρκετά μεγάλο, κάτι όμως που θα μελετηθεί στις επόμενες παραγράφους.

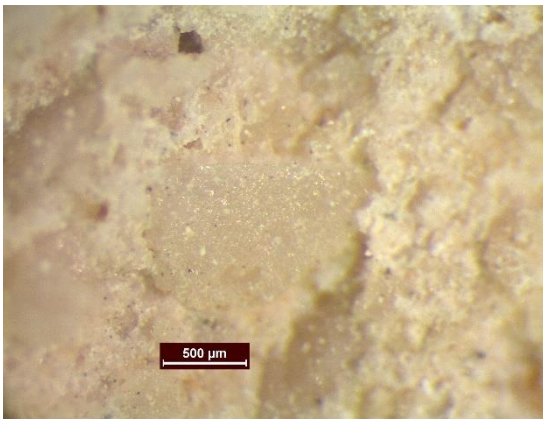


Εικόνα 246: Δείγμα a_I_1_W_1x25.2. Γενική αποτύπωση δείγματος. Απολιθώματα στη μάζα του λίθου.

Εικόνα 247: Δείγμα a_I_1_W_1 x64. Απολιθώματα στη μάζα του λίθου.

Στις εικόνες 2488 και 249 γίνεται φωτογραφική απεικόνιση του δείγματος ιστορικού επιχρίσματος με κωδική ονομασία a_I_4_W_7. μέσω του μικροσκοπίου σε μεγέθυνσης 16 και 64. Στην εικόνα 214 παρατηρήθηκαν μικρορηγματώσεις στην επιφάνεια του δείγματος, ενώ το δείγμα δεν παρουσίασε σαθρότητα. Στην ίδια εικόνα, το δείγμα είχε δύο διαφορετικούς τόνους ροζ χρώματος, που στην εικόνα 215 παρατηρήθηκε ότι αυτοί οι χρωματισμοί οφείλονται σε κάποιους μικροκρυστάλλους διαστάσεων 700 μm στην επιφάνεια του δείγματος.

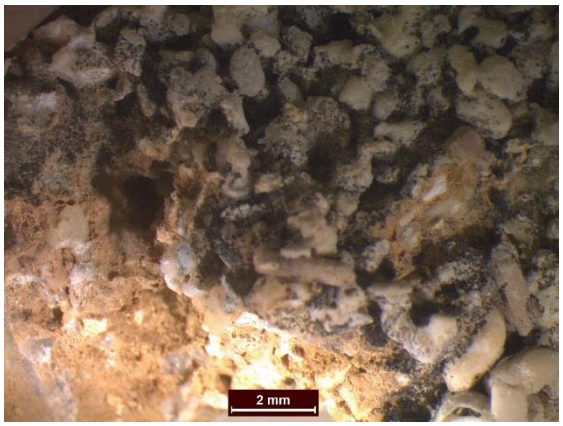
Εικόνα 248: Δείγμα a_I_4_W_7x25.2. Μικρορηγματώσεις στην επιφάνεια του δείγματος.



Εικόνα 249: Δείγμα a_I_4_W_7 x64. Κρύσταλλοι την επιφάνεια του δείγματος.

Στην εικόνα 250 έγινε φωτογραφική αποτύπωση μέσω του μικροσκοπίου του δείγματος με κωδική ονομασία a_I_6_W_13, με μεγέθυνση x16. Στην εικόνα αυτή απεικονίζονται οι κίτρινες και μαύρες βιολογικές επικαθίσεις στην επιφάνεια του λίθου. Στο δείγμα αυτό δίνεται η εντύπωση πως το πορώδες είναι μικρότερο σε σχέση

με τους άλλους λίθους κάτι όμως που μπορεί να είναι εσφαλμένο διότι οι μαύρες επικαθίσεις μπορεί να καλύπτουν τους πόρους.

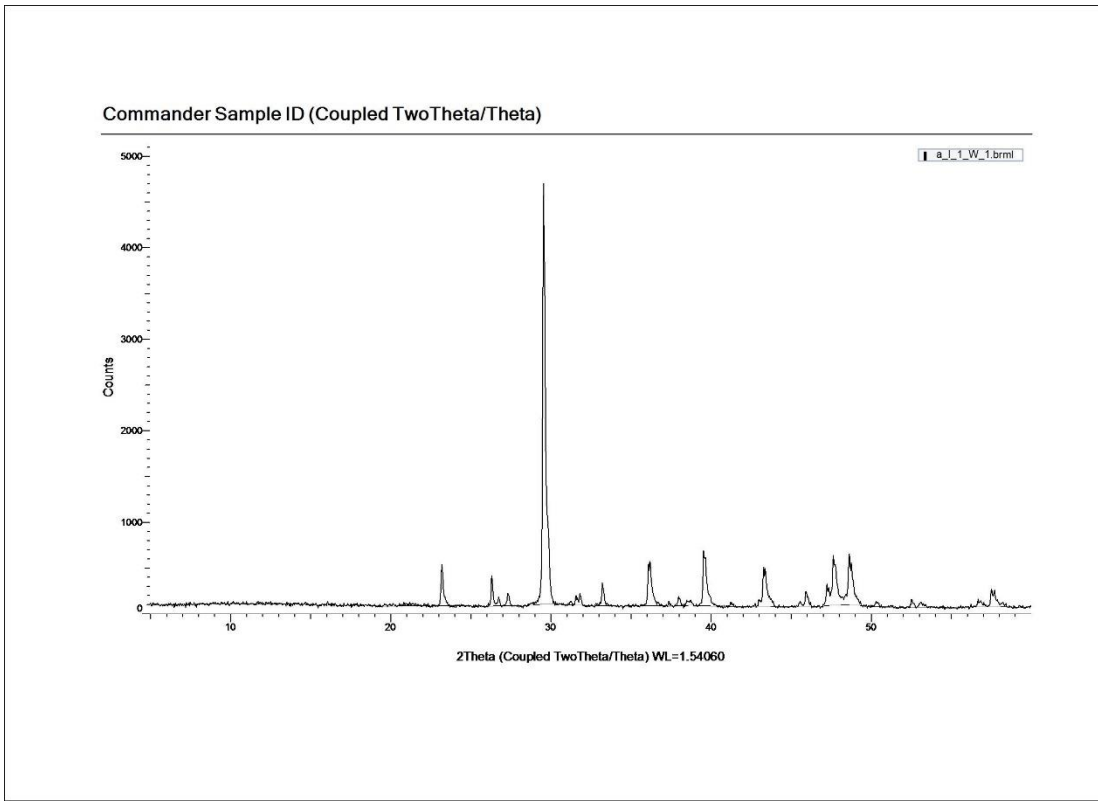


Εικόνα 250: Δείγμα a_I_6_W_13 x16 διεπιφάνεια. Βιολογικές κίτρινες και μαύρες επικαθήσεις.

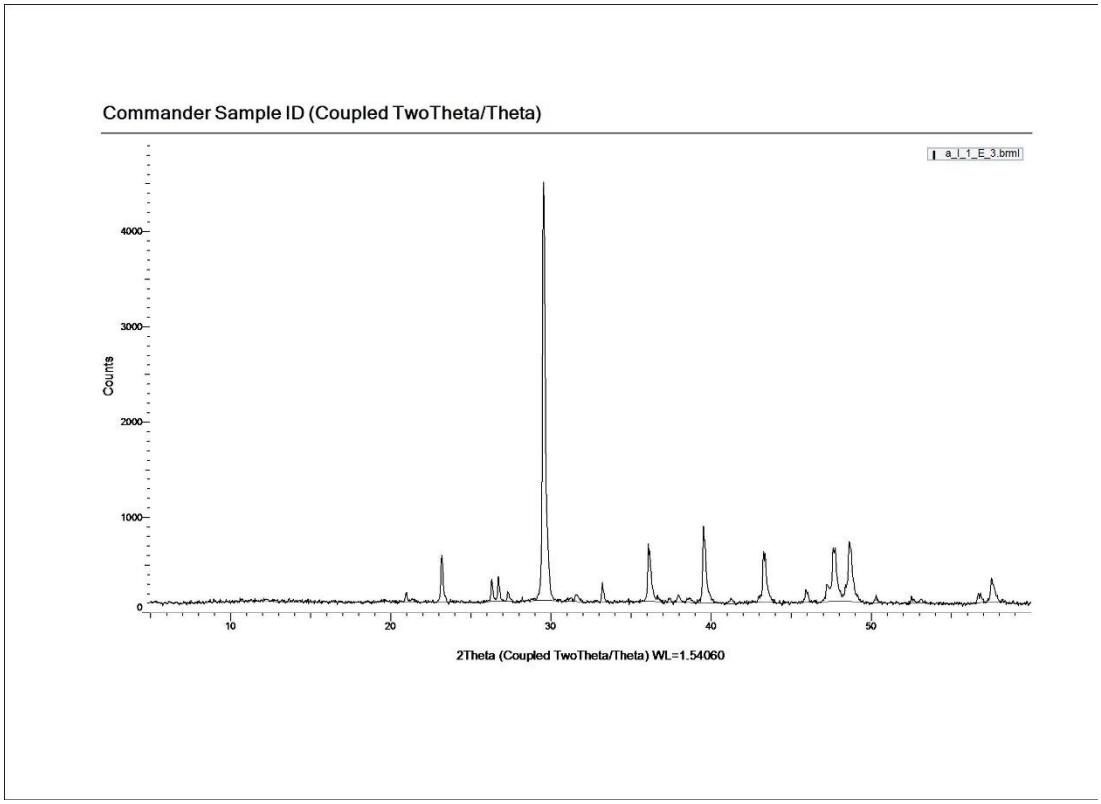
4.2.2 Προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων – (XRD)

Η ποιοτική ταυτοποίηση των κρυσταλλικών ενώσεων που εμπεριέχονται σε ένα δείγμα όταν η συγκέντρωσή τους έχει μία ορισμένη τιμή και πάνω γίνεται με τη διαδικασία της περίθλασης ακτίνων x. Το μειονέκτημα της μελέτης αυτής είναι το ότι δεν μας επιτρέπει την ποσοτική ανάλυση των δεδομένων αυτών. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει δυνατότητα μιας πρώτης προσέγγισης της αναλογίας του δείγματος σε κρυσταλλικές ενώσεις μέσω της σύγκρισης των εντάσεων των αντίστοιχων κορυφών στα διάφορα φάσματα. Για την ορυκτολογική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε συσκευή XRD της εταιρείας Bruker το μοντέλο D8 Advance με τις εξής ρυθμίσεις: V=40kV, I=40A, με 2θ=0,04 και συνολικά 1377 βήματα για να ολοκληρωθεί η διαδικασία μέτρησης ενός δείγματος.

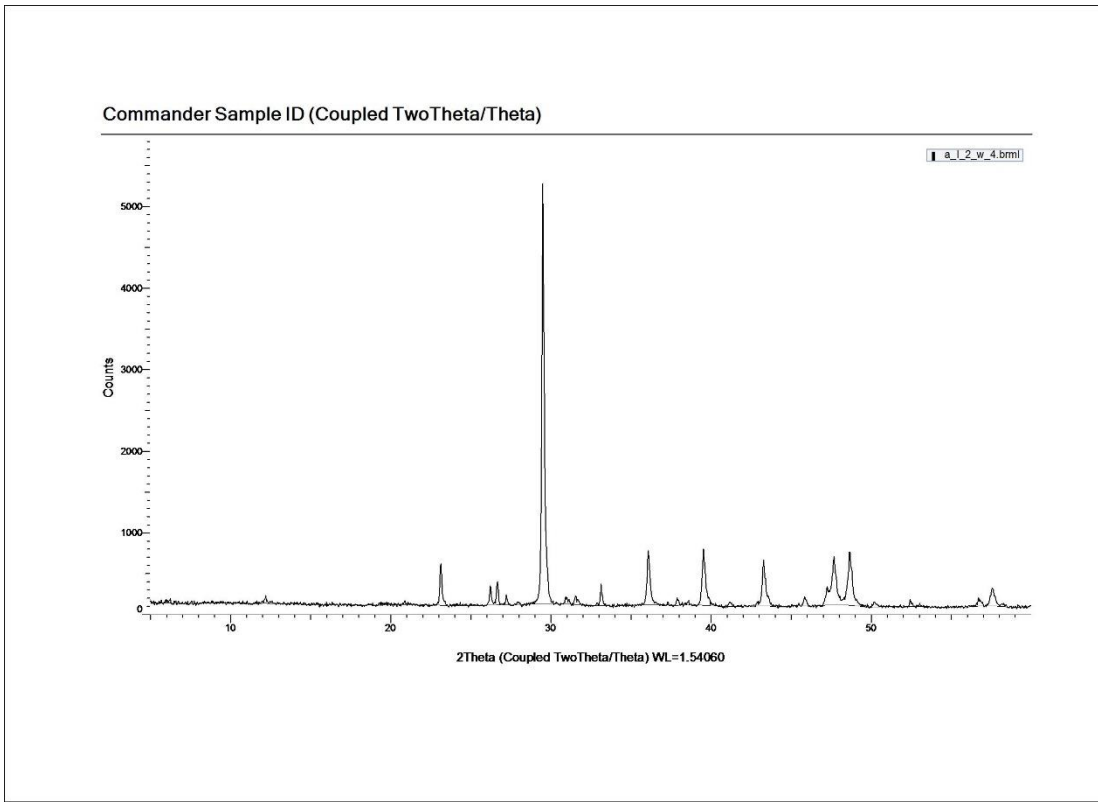
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε σε μεγάλο μέρος του φάσματος λίγα μετρήματα ανά συχνότητα. Αυτό οφείλεται στις μη κρυσταλλικές φάσεις των συμπλεγμάτων των χημικών ενώσεων του δείγματος, δηλαδή σε άμορφα υλικά. Σημαντικά στοιχεία ενός τέτοιου διαγράμματος είναι οι κορυφές που παρατηρούνται στο δείγμα καθώς επίσης και η συχνότητα αυτών. Κάθε χημικό κρυσταλλικό σύμπλεγμα έχει μία ή περισσότερες χαρακτηριστικές κορυφές που μέσω αυτών γίνεται η ταυτοποίηση τους στο δείγματα. Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού των ορυκτολογικών φάσεων στα δείγματα μέσω της τεχνικής διαδικασίας της περίθλασης ακτίνων X - (XRD) παρουσιάζονται στον πίνακα 8. Τα περιθλασιογράμματα των δειγμάτων που εξετάστηκαν παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες.



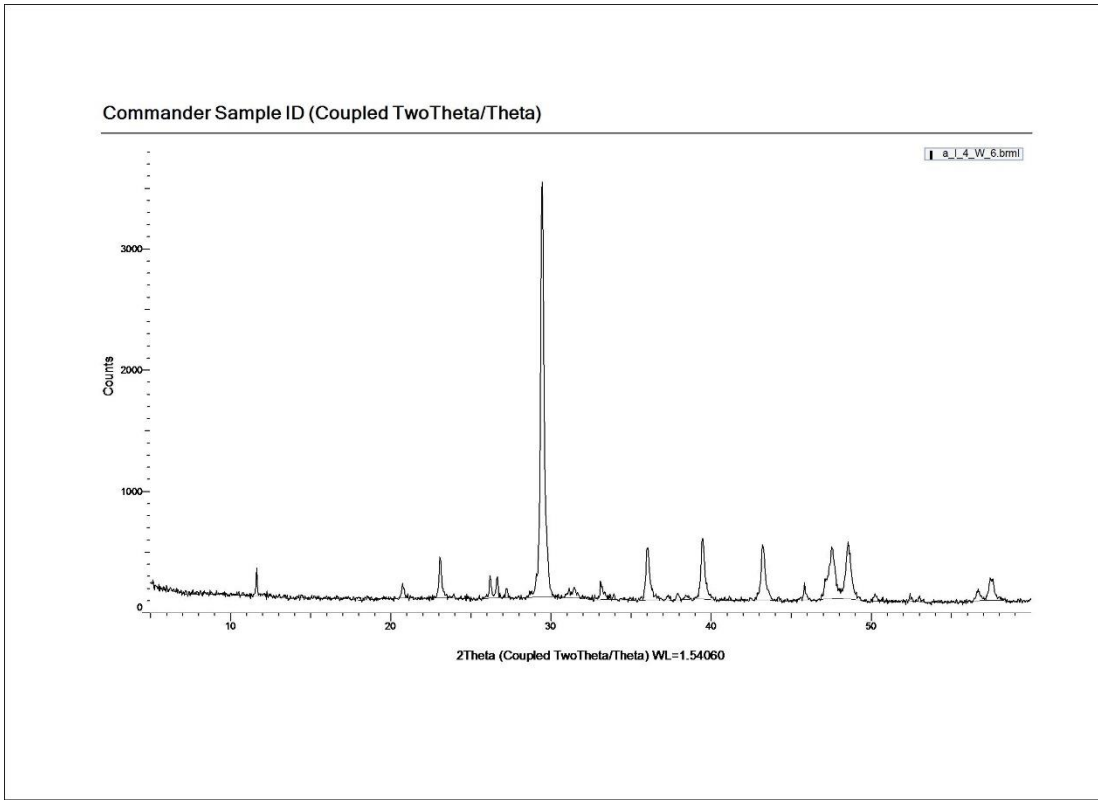
Εικόνα 251: Περιθλασιόγραμμα δείγματος a_I_1_W_1.



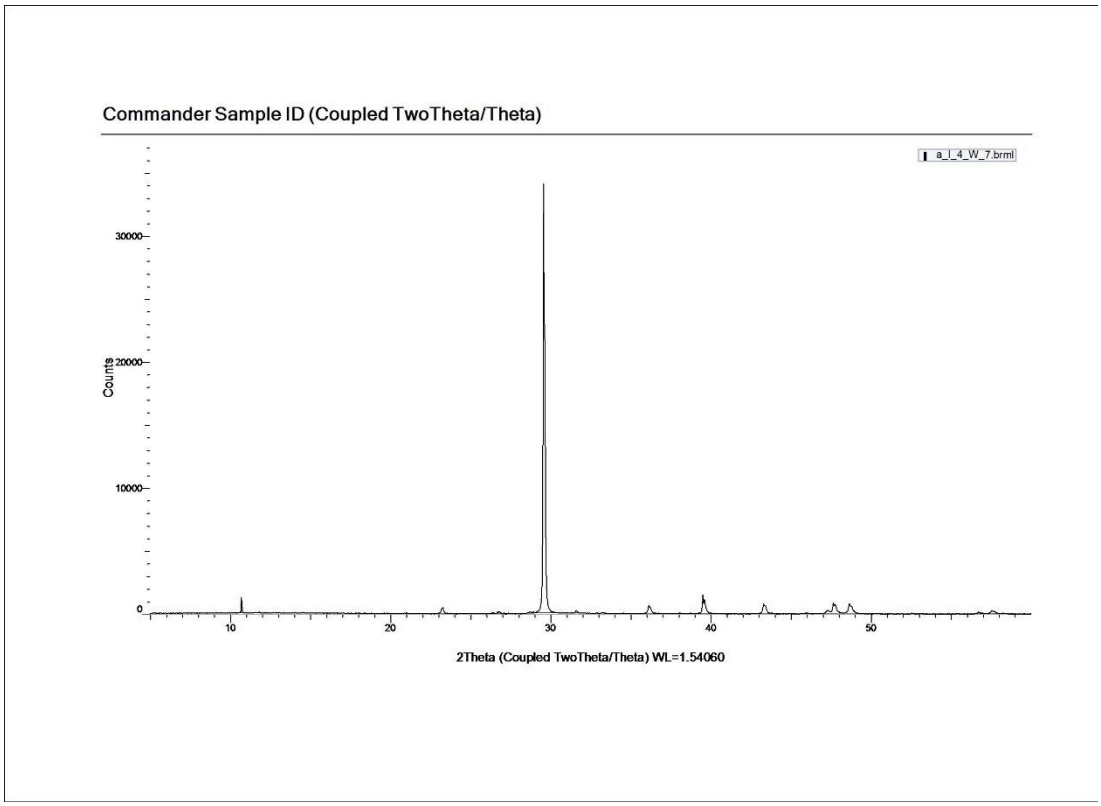
Εικόνα 252: Περιθλασιόγραμμα δείγματος ***a_I_1_E_3***



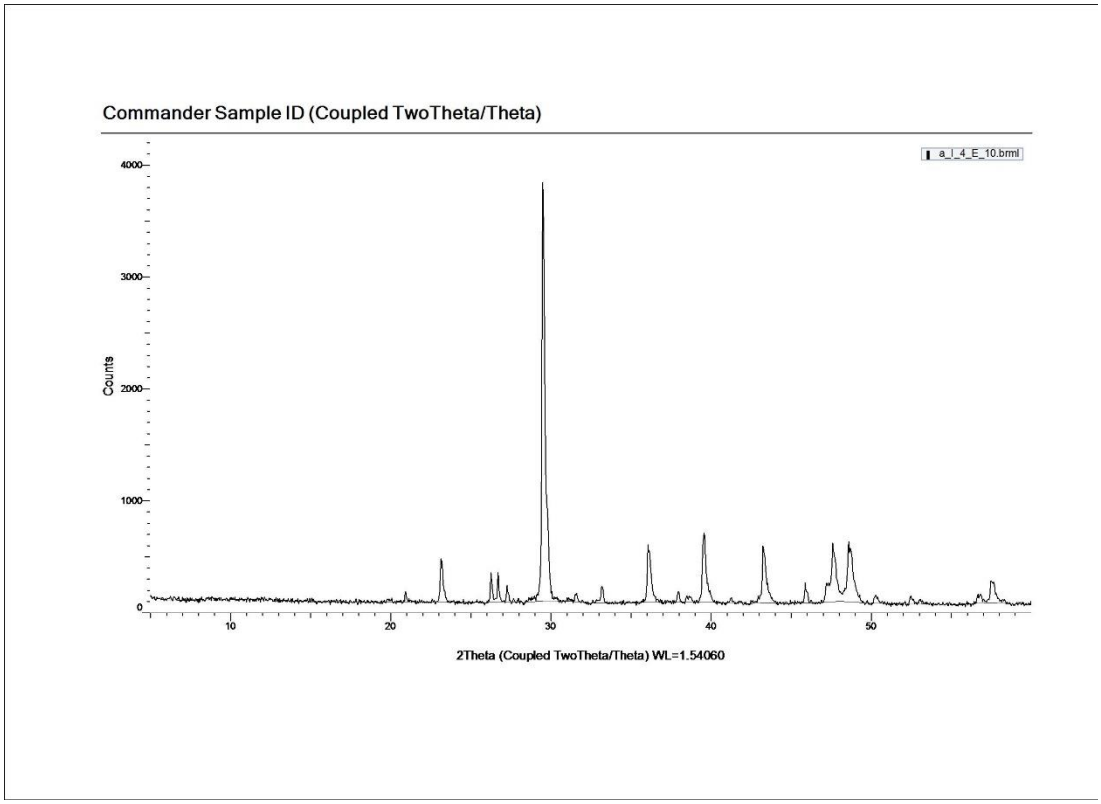
Εικόνα 253: Περιθλασιόγραμμα δείγματος ***_I_2_W_4.***



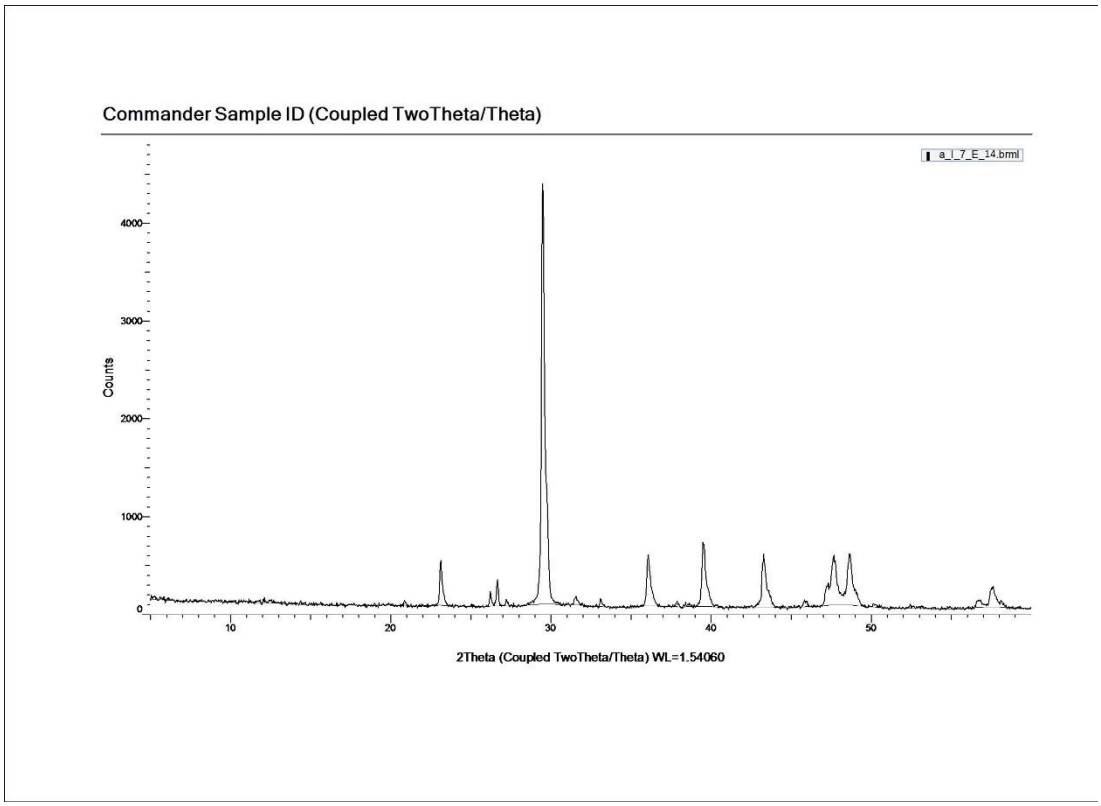
Εικόνα 254: Περιθλασιόγραμμα δείγματος a_I_4_W_6.



Εικόνα 255: Περιθλασιόγραμμα δείγματος a_I_4_W_7.



Εικόνα 256: Περιθλασιόγραμμα δείγματος a_I_4_E_10.



Εικόνα 257: Περιθλασιόγραμμα δείγματος a_I_7_E_14.

Πίνακας 8: Περιθλασιογράμματα προσδιορισμού των ορυκτολογικών φάσεων στα δείγματα μέσω της τεχνικής διαδικασίας της περίθλασης ακτίνων Χ - (XRD).

Δείγμα	Ορυκτολογική σύσταση
a_I_1_W_1	Ασβεστίτης, χαλαζίας, αλίτης, αραγωνίτης.
a_I_1_E_3	Ασβεστίτης, χαλαζίας, αλίτης, αραγωνίτης.
a_I_2_W_4	Ασβεστίτης, αραγωνίτης, χαλαζίας, καολίνη μοντμοριλλονίτη, αλίτης.
a_I_3_W_5	Ασβεστίτης, χαλαζίας, αραγωνίτης, αλίτης.
a_I_4_W_6	Ασβεστίτης, γύψος, χαλαζίας, αραγωνίτης.
a_I_4_W_7	Ασβεστίτης.
a_I_4_E_10	Ασβεστίτης, αραγωνίτης, χαλαζίας.
a_I_7_E_14	Ασβεστίτης, χαλαζίας, αραγωνίτης.

Τα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ορυκτολογικό φάσεων κατά τη μελέτη με το μηχάνημα XRD είναι κατά κύριο λόγο λίθοι. Εξαίρεση αποτελεί το δείγμα a_I_4_W_7 που είναι επίχρισμα στην επιφάνεια του αρχαίου κίονα.

Στο δείγμα από το επίχρισμα του κίονα προσδιορίστηκε ως κύρια ορυκτολογική φάση ελαφρώς μαγνησιακός ασβεστίτης. Όλα τα δείγματα (με εξαίρεση το a_I_4_W_7) είναι δείγματα λίθων κυρίως ασβεστιτικής φύσεως με κύρια ορυκτολογική φάση τον μαγνησιακό ασβεστίτη. Εξαίρεση αποτελούν το δείγμα a_I_4_W_6 που ως πρώτη ορυκτολογική φάση ταυτοποιείται ο ασβεστίτης, ο οποίος προέρχεται είτε από κάποιο κονίαμα που έχει αφήσει υπολείμματα στον κίονα είτε από τη γυψοποίηση του λίθου, και το δείγμα a_I_7_E_14 που ως κύρια ορυκτολογική φάση ταυτοποιείται ο ασβεστίτης.

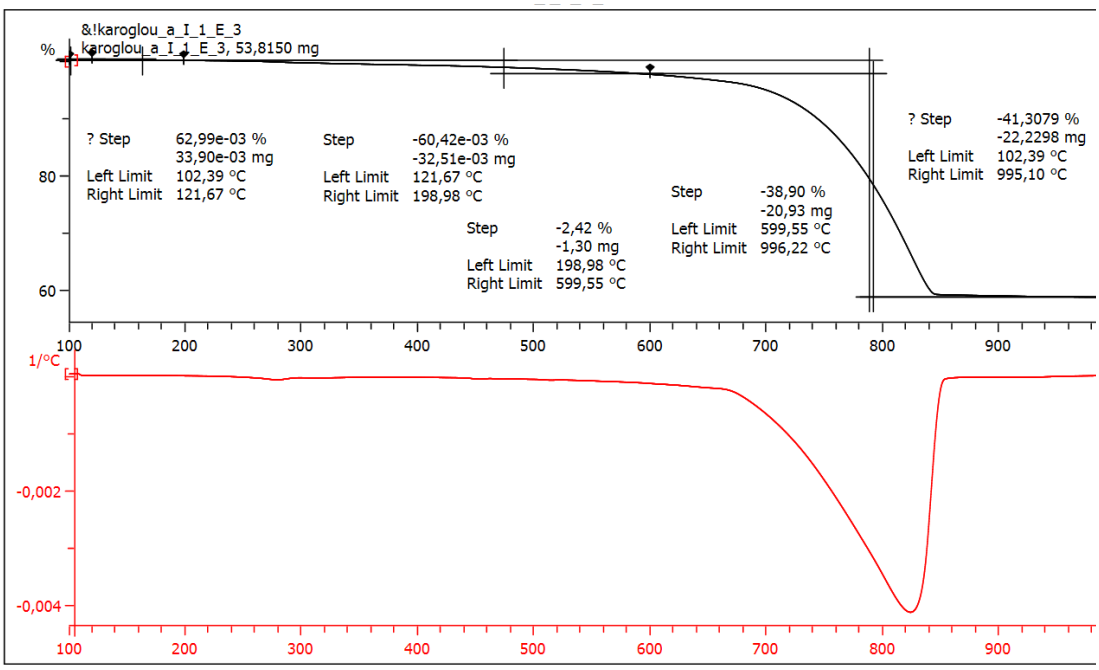
Όλα τα δείγματα λίθου ταυτοποιούνται με δεύτερη ορυκτολογική φάση το χαλαζία και τον αραγωνίτη (ανακρυσταλλωμένος). Στα δείγματα που προέρχονται από τους τρεις πρώτους σπονδύλους ταυτοποιούνται κρυσταλλικές ενώσεις αλίτη. Ο αλίτης είναι το γνωστό χλωριούχο νάτριο και προέρχεται από τη θάλασσα (αλατονέφωση) και σχετίζεται άμεσα με μηχανισμό φθοράς. Τέλος, ταυτοποιείται καολίνης μοντμοριλλονίτη στο δείγμα a_I_2_W_4 και χλωριούχο ασβέστιο ενυδατωμένο στο δείγμα a_I_3_W_5.

4.2.3 Θερμική ανάλυση TG

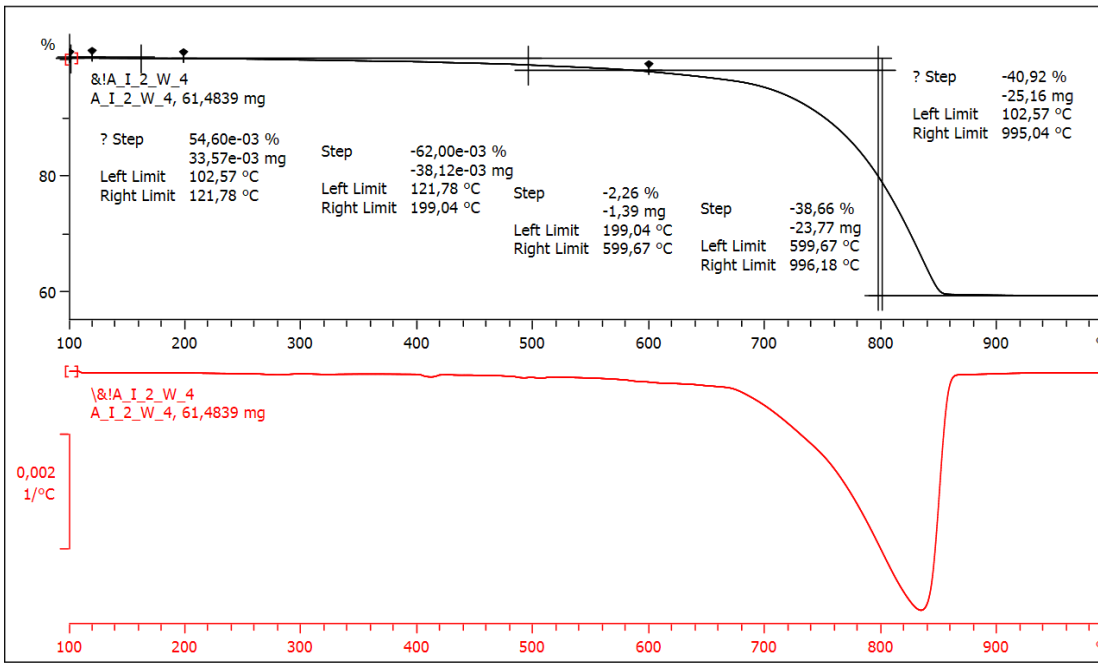
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο θερμικής ποσοτικής ανάλυσης TG στο μηχάνημα Mettler Toledo 851, ώστε να γίνει χαρακτηρισμός των υλικών και η αποτίμηση της συμβατότητας των διαφόρων υλικών αποκατάστασης σε σχέση με τα υλικά των κιόνων. Η καμπύλη που δημιουργείται στα διαγράμματα των δειγμάτων με την μέθοδο αυτή, περιγράφει ένα πολύ σύνθετο σύστημα θερμοδυναμικών, φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ενώσεων που απαρτίζουν τα δείγματα. Στη θερμοβαρυμετρικής ανάλυση TG γίνεται καταγραφή της μεταβολής της μάζας του δείγματος κατά τη διάρκεια της θέρμανσης του, υπό ελεγχόμενο ρυθμό αύξησης (10^0C/min) της θερμοκρασίας του συστήματος, από τους 25^0C έως τους 1000^0C, σε ατμοσφαιρική πίεση. Η τεχνική της παρέχει πληροφορίες σχετικά με φυσικά φαινόμενα όπως η απορρόφηση, η προσρόφηση, η εκρόφηση, η ξήρανση, η εξάτμιση, η αποσύνθεση, οι μεταβολές στην στερεάς κατάσταση των ατομικών πλεγμάτων και οι αντιδράσεις μεταβολής στερεάς-υγρής φάσης.

Έγινε υπολογισμός του λόγου CO_2/H_2O, (όπου H_2O το χημικά δεσμευμένο νερό) που ισούται με το κλάσμα της ποσοστιαίας απώλειας βάρους στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^0$C προς της ποσοστιαίας απώλειας βάρους στο θερμοκρασιακό διάστημα 200^0C-600^0C. Ο λόγος αυτός χαρακτηρίζει το δείγμα ως προς την υδραυλικότητα του.

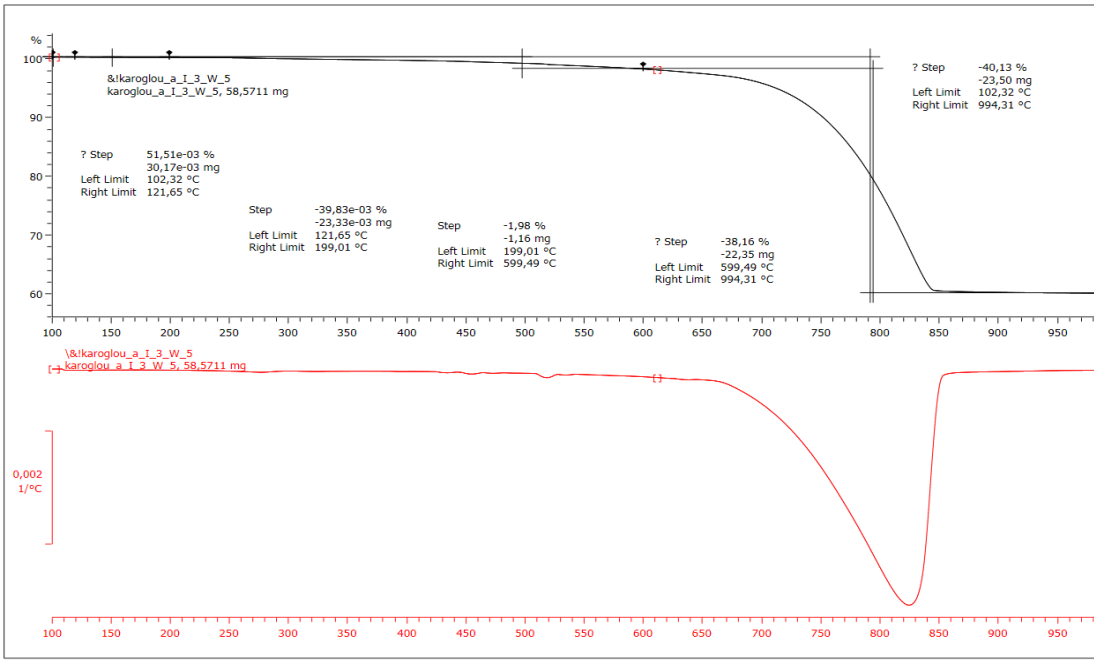
Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των θερμογραφημάτων, των δειγμάτων, που μελετήθηκαν με τη μέθοδο της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης TG στις εικόνες 259 έως 267. Στον πίνακα 9 παρουσιάστηκε το ποσοστό απώλειας μάζας επί τοις εκατό ανά δείγμα και ανά διαστήματα θερμοκρασιών, που το καθένα από αυτά κρίνεται σημαντικό για το χαρακτηρισμό των υλικών.



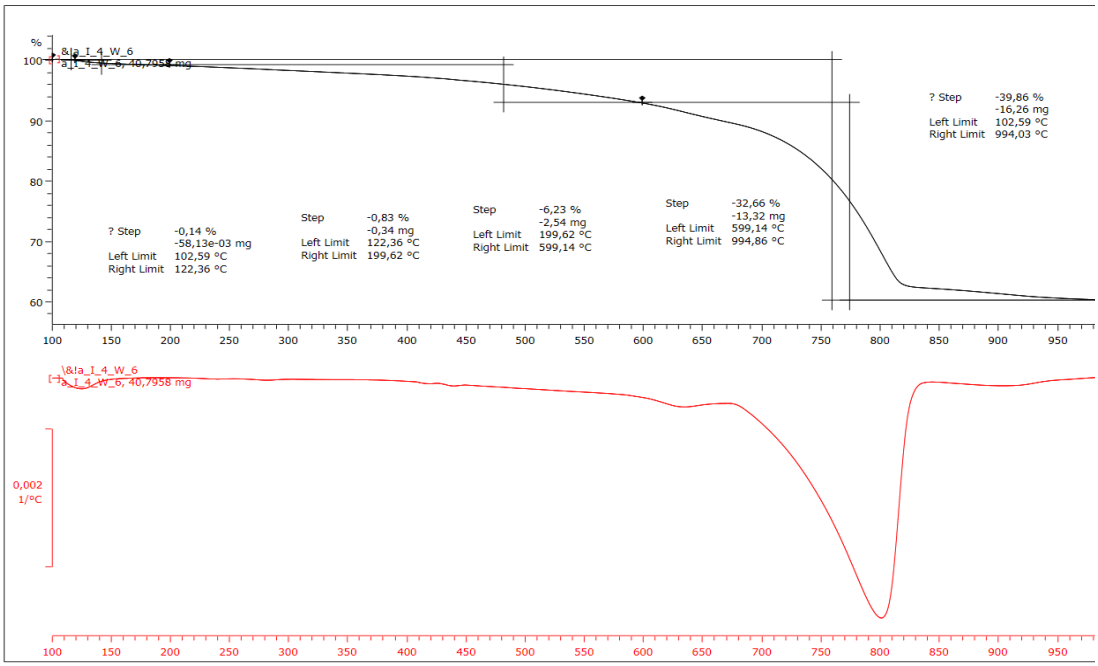
Εικόνα 258: Θερμογραφήματα δείγματος ***a_I_1_E_3.***



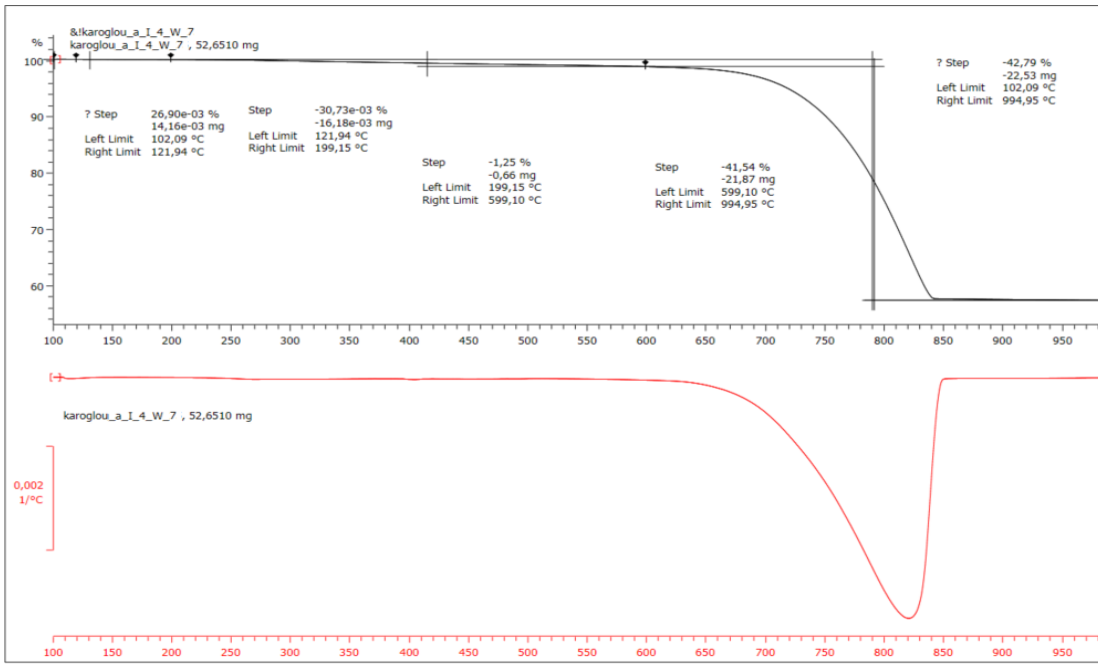
Εικόνα 259: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_2_W_4.



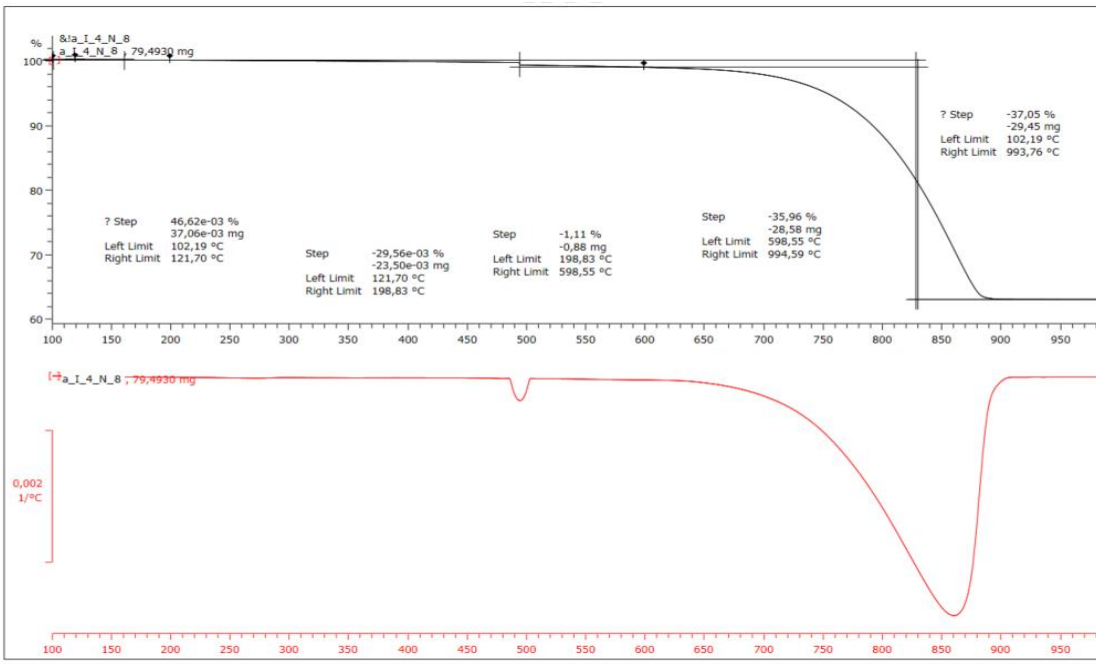
Εικόνα 260: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_3_W_5.



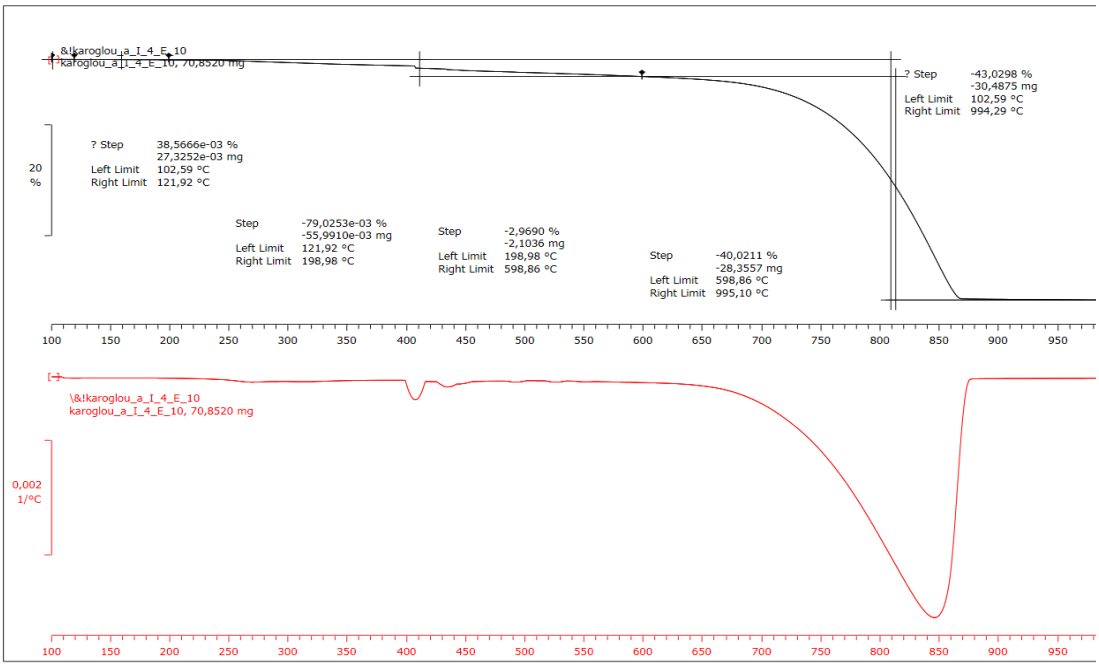
Εικόνα 261: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_4_W_6.



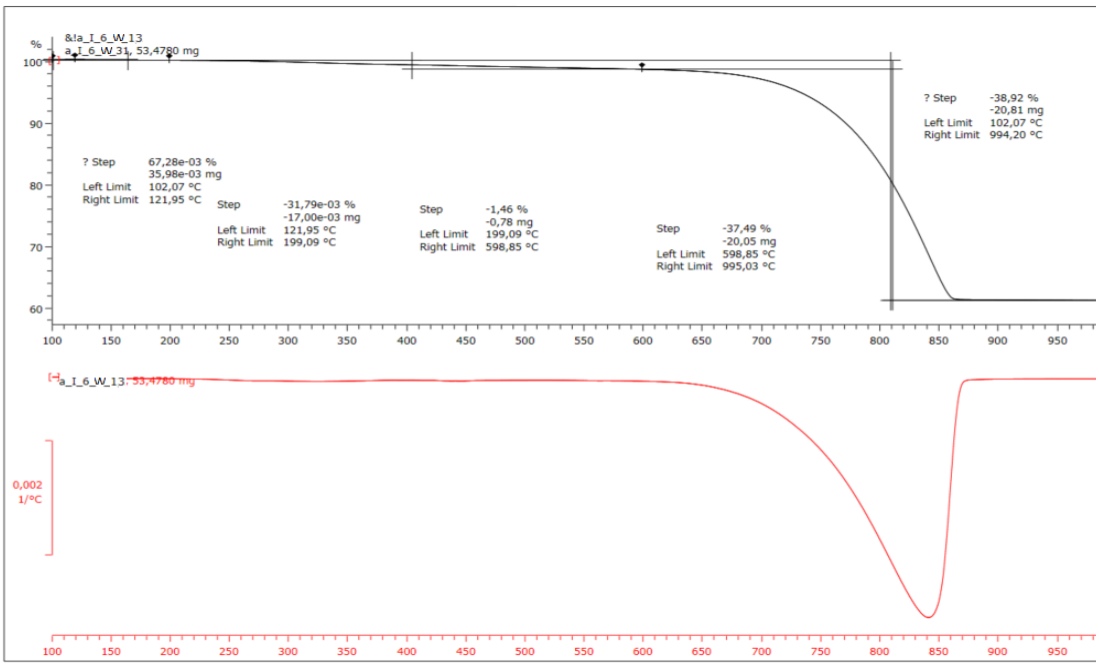
Εικόνα 262: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_4_W_7.



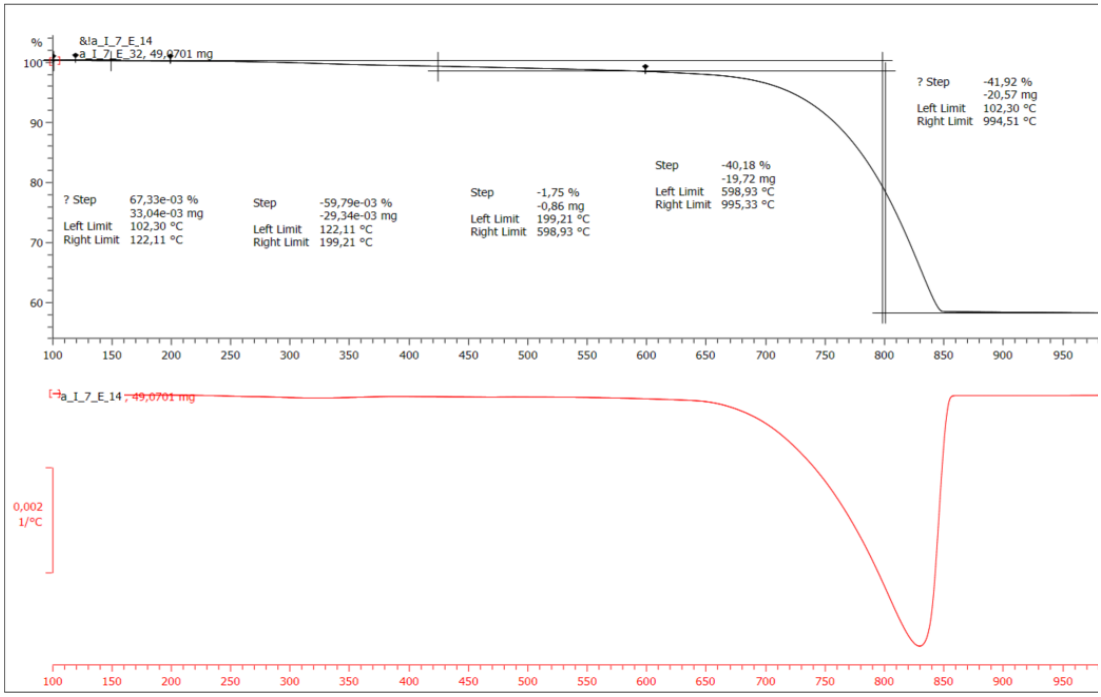
Εικόνα 263: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_4_N_8.



Εικόνα 264: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_4_E_10.



Εικόνα 265: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_6_W_13.



Εικόνα 266: Θερμογραφήματα δείγματος a_I_7_E_14.

Πίνακας 9: Ποσοστό απώλειας μάζας (%) ανά δείγμα και ανά διαστήματα θερμοκρασιών.

Δείγμα	<120ºC	120ºC-200ºC	200ºC-600ºC	>600ºC	CO_2/H_2O	$CaCO_3$ % στο δείγμα
a_I_1_E_3	0,06	0,00	2,42	38,90		88,41
a_I_2_W_4	0,05	0,06	2,26	38,66		87,86
a_I_3_W_5	0,05	0,04	1,98	38,17		86,75
a_I_4_W_6	0,14	0,83	6,23	32,66	5,24	74,23
a_I_4_W_7	0,03	0,03	1,25	41,54	33,23	94,41
a_I_4_N_8	4,04	0,03	1,11	35,96		81,73
a_I_4_E_10	0,04	0,08	2,97	40,02		90,96
a_I_6_W_13	0,07	0,03	1,46	37,49		85,20
a_I_7_E_14	0,07	0,06	1,75	40,18		91,32

Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν πολύ μικρό ποσοστό φυσικό ροφημένου νερού εκτός του δείγματος a_I_4_N_8 που παρουσιάζει 4,04% υγρασία. Αυτό οφείλεται πιθανότητα στην μεγαλύτερη διάβρωση που έχει υποστεί ό λίθος στην βόρεια όψη. Πολύ χαμηλές τιμές απώλειας βάρους παρατηρήθηκαν στο θερμοκρασιακό διάστημα 120ºC-200ºC σε όλα τα δείγματα εκτός του δείγματος a_I_4_W_6. Συγκεκριμένα, την υψηλότερη τιμή με διαφορά παρουσιάζει το δείγμα a_I_4_W_6 0,83% που βρέθηκε γύψος μέσω της μελέτης XRD.

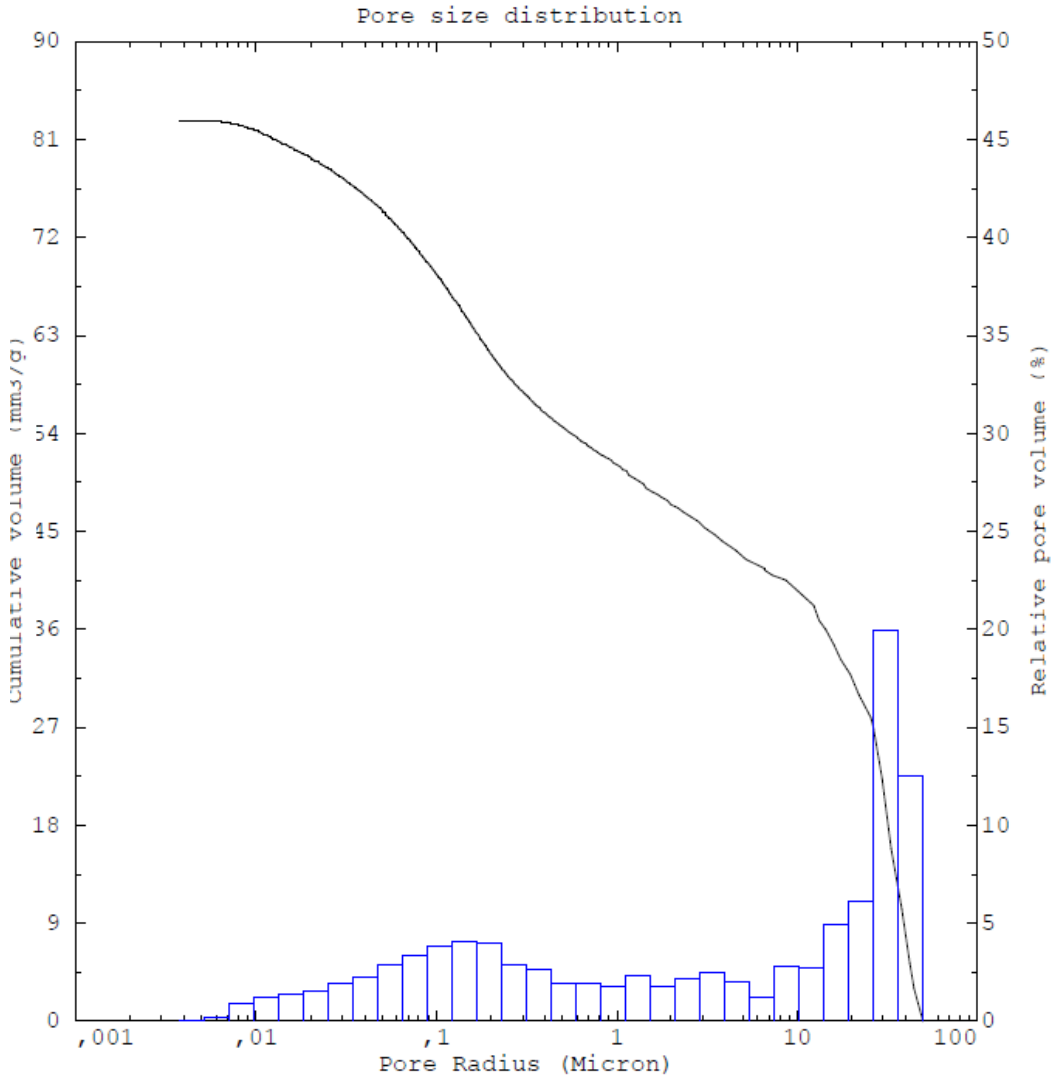
Έγινε υπολογισμός του λόγου αντίστροφης υδραυλικότητας CO_2/H_2O στα δείγματα κονιαμάτων, ο οποίος είναι χαμηλός στο δείγμα a_I_4_W_6, κάτι που αποδεικνύει ότι πρόκειται για κονίαμα υδραυλικής φύσεως <7,5. Για ποσοστά αντίστροφης υδραυλικότητας >10, το δείγμα a_I_4_W_7 δεν παρουσιάζει υδραυλικότητα.

Μέσω της στοιχειομετρικής εξίσωσης $CaCO_3 \rightarrow CaO+O_2$ έγινε υπολογισμός του ποσοστού του ανθρακικού ασβεστίου που βρίσκεται στο δείγμα. Το υπόλοιπο ποσοστό μέχρι το 100% είναι προσμίξεις στη μάζα του λίθου που προήρθαν είτε από το περιβάλλον είτε από της χημικές αντιδράσεις του $CaCO_3$

4.2.4 Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Οι μετρήσεις ποροσιμετρίας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπα Normal 4/80 και Normal 27/88 σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιελάβανε μετρήσεις στο μηχάνημα Macropores unit 120 corporation, ενώ το στάδιο περιελάβανε μετρήσεις στο μηχάνημα Pascal 440 series Electron, όπου υπήρξε η δυνατότητα, συνδυαστικά, υπολογισμού του πορώδους των δειγμάτων με ακτίνα από 37,5A έως 100μm. Οι παράμετροι μικρό δομής που προσδιορίζονται με την ποροσιμετρία υδραργύρου είναι ο ειδικός ολικός όγκος, η φαινόμενη πυκνότητα, το ολικό πορώδες, η μέση ακτίνα πόρων και ειδική επιφάνεια.

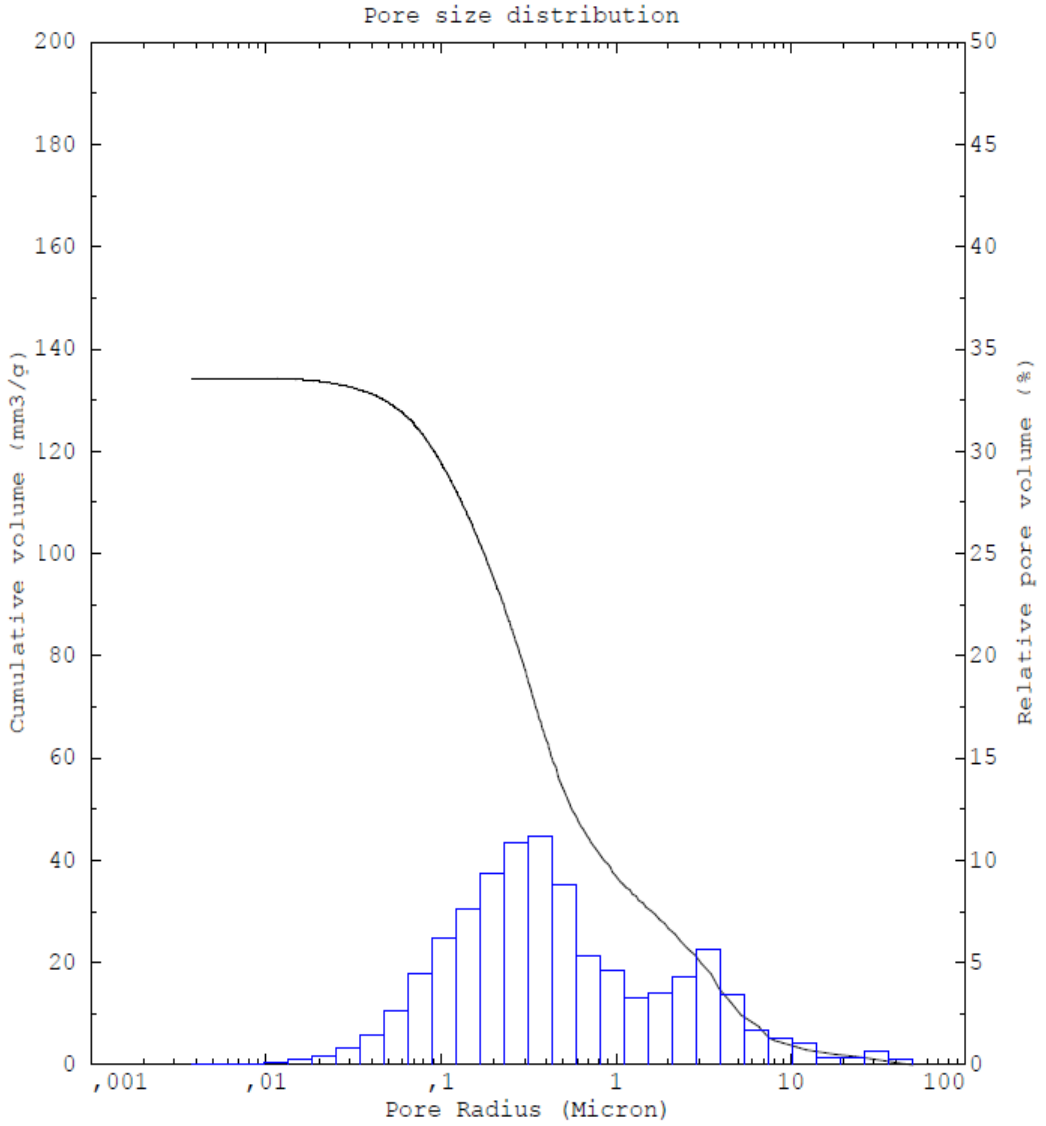
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα κατανομής του ολικού όγκου των κενών σα συνάρτηση της ακτίνας των πόρων για τα τρία δείγματα που επιλέχθηκαν προς μελέτη. Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων μικρό δομής που προσδιορίστηκαν με την τεχνική της ποροσιμετρίας υδράργυρου στα δείγματα.



Διάγραμμα κατανομής 1: Κατανομή ολικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων. Δείγμα a_I_1_W_1.

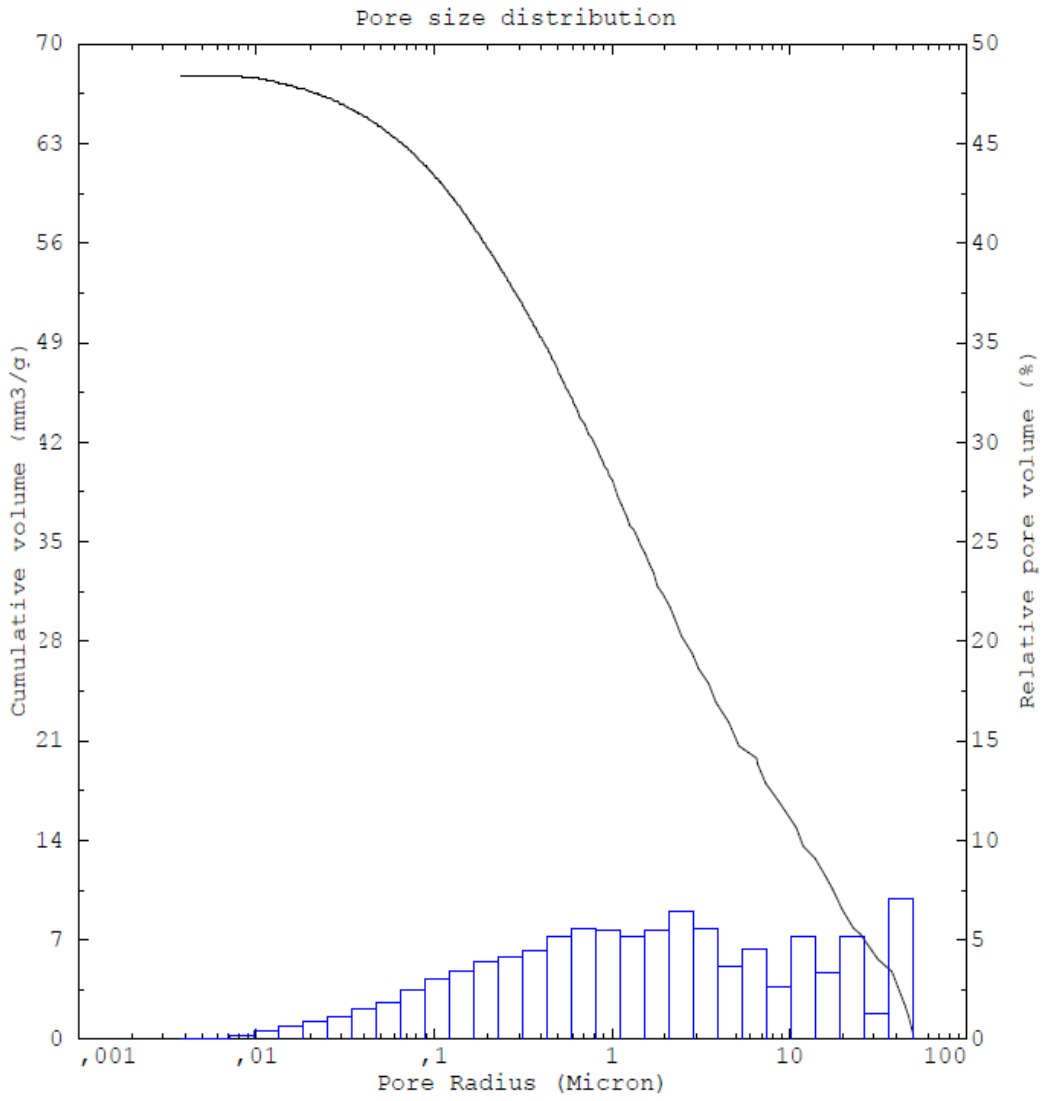
Στο διάγραμμα κατανομής 1 ολικού όγκου των κενών σα συνάρτηση της ακτίνα των πόρων, στο δείγμα a_I_1_W_1, παρατηρήθηκε σχετικά ομοιόμορφη κατανομή πόρων

σε ακτίνες από 0,1 μm έως και 12 μm, ενώ απότομη ήταν η αύξηση του ποσοστού των πόρων με ακτίνα από 20 μm έως 50 μm.



Διάγραμμα κατανομής 2: Κατανομή ολικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων. Δείγμα a_I_4_W_7.

Στο διάγραμμα κατανομής 2 ολικού όγκου των κενών σα συνάρτηση της ακτίνα των πόρων, στο δείγμα a_I_4_W_7, παρατηρήθηκε μεγάλο ποσοστό πόρων με ακτίνα 0,1 μm έως 0,5 μm. Στο δείγμα αυτό δεν παρατηρήθηκαν μεγάλο ποσοστό πόρων με ακτίνα μεγαλύτερη τον 10 μm.



Διάγραμμα κατανομής 3: Κατανομή ολικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων. Δείγμα a_I_4_N_8.

Στο διάγραμμα κατανομής 3 ολικού όγκου των σα συνάρτηση της ακτίνα των πόρων, στο δείγμα a_I_4_N_8. παρατηρείται ομοιόμορφη αύξηση των πόρων από 0,1 μm έως 1 μm και σχετικά ίση κατανομή πόρων με ακτίνες από 0,8 μm έως 30 μm.

Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποροσιμετρίας για τα τρία δείγματα που ελήφθησαν από το ναό. Παρατηρείται ότι το δείγμα a_I_4_W_7 έχει κατά πολύ μικρότερη μέση ακτίνα πόρων σε σχέση με τα δύο δείγματα των λίθων. Ο αυθεντικός λίθος (a_I_4_N_8) έχει μέχρι μέση ακτίνα πόρων 1,5μm, ενώ ο λίθος αποκατάστασης έχει μέση ακτίνα πόρων 6.6μm. Παρότι η μέση ακτίνα πόρων του δείγματος a_I_4_W_7 είναι μικρότερη σε σχέση με τα άλλα δύο δείγματα το συνολικό πορώδες του δείγματος αυτού (ιστορικό επίχρισμα) είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τα άλλα δύο δείγματα. Επίσης, στα διαγράμματα κατανομής 1 και 3 παρατηρείται απότομη αύξηση ποσοστού πόρων με ακτίνα >30μm, γεγονός που πιθανών να

οφείλεται στη διάρρηξη των πόρων από της μηχανικές τάσεις, που δημιουργούνται από την κρυστάλλωση αλάτων.

Πίνακας 10:Αποτελέσματα ποροσιμετρίας.

Δείγμα	Ολικός ειδικός όγκος (mm^3 /g)	Ειδική επιφάνεια (m^2/g)	Μέση ακτίνα πόρων (Micron)	Ολικό πορώδες (%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g / cm^3)
a_I_1_W_1	82,729	1,22	6,59	18,16	2,19
a_I_4_N_8	67,73	0,58	1,55	15,10	2,23
a_I_4_W_7	134,329	1,32	0,37	24,75	1,84

Το δείγμα a_I_4_W_7, παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερη τιμή φαινόμενης πυκνότητας. Ο λίθος αποκατάστασης και ο αυθεντικός λίθος παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές.

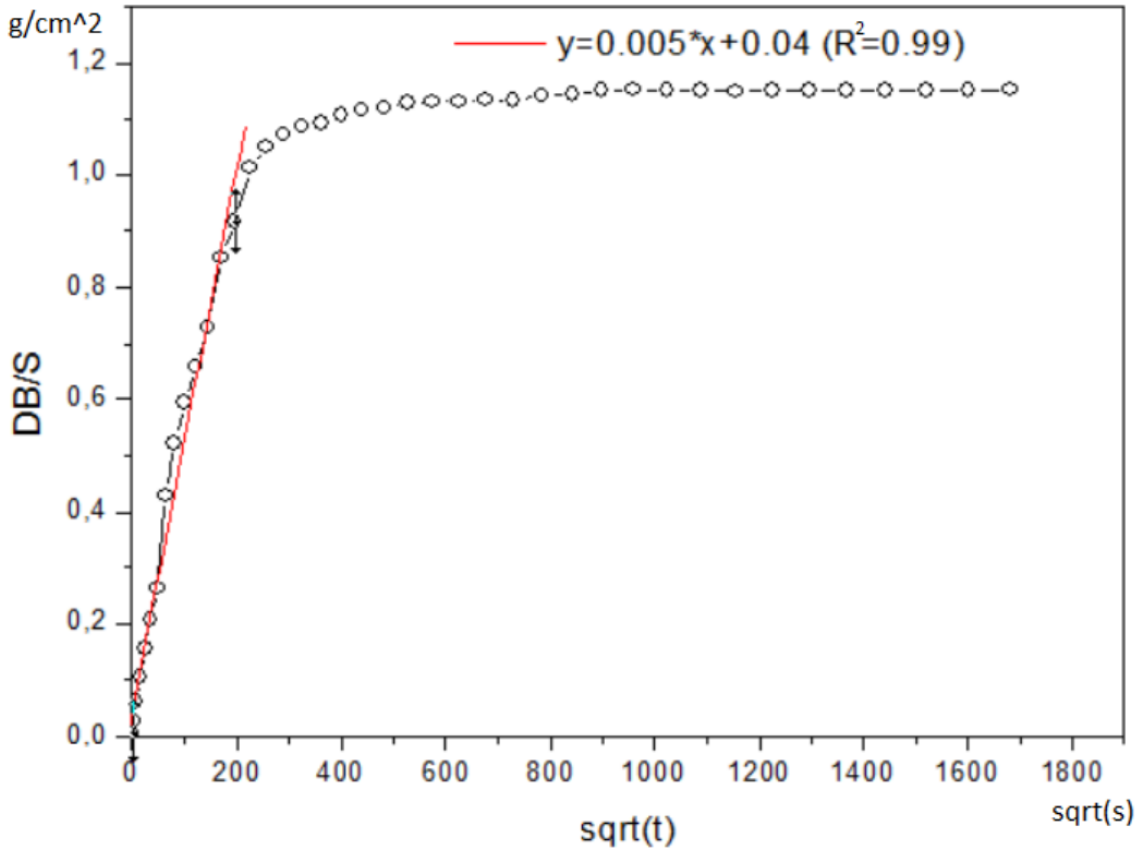
Το ολικό πορώδες του λίθου αποκατάστασης είναι υψηλότερο από του αυθεντικού λίθου. Το δείγμα a_I_4_W_7 παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή, το οποίο είναι λογικό καθώς πρόκειται για κονίαμα.

Μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων παρουσιάζει το δείγμα a_I_1_W_1 λίθου αποκατάστασης, κάτι που ίσως να σχετίζεται άμεσα με το πόσο εύθρυπτο ήταν το δείγμα αυτό. Τη μικρότερη μέση ακτίνα πόρων παρουσιάζει το δείγμα a_I_4_W_7 ιστορικού επιχρίσματος.

Συνολικά, τα χαρακτηριστικά μικροδομής του επιχρίσματος είναι τυπικά ενός υδραυλικού επιχρίσματος. Οποιαδήποτε διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων, των μετρήσεων, από αυτά της βιβλιογραφίας των συγχρόνων υλικών, οφείλεται στην επίδραση των φυσικοχημικών διεργασιών που έλαβαν χώρα στα συστατικά των υλικών, στο πέρασμα του χρόνου. Δηλαδή, η μικροδομή των δειγμάτων δεν είναι ενδεικτική λόγω φθοράς αυτών.

4.2.5 Μέτρηση υδατοαπορρόφησης λίθου βιοκαλκαρενίτη Ρόδου.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υδατοαπορρόφησης σε δείγματα λίθου βιοκαλκαρενίτη διαστάσεων 5cm x 5cm. Αρχικά, τοποθετήθηκε υδατοαπορροφητικό χαρτί μέσα σε πλαστικό δίσκο 10 cm x 10cm και στη συνέχεια ποτίστηκε με απιονισμένο νερό. Το ξηρό δείγμα ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε στον παραπάνω δίσκο. Ελήφθησαν μετρήσεις βάρους του δείγματος ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Δόθηκε προσοχή στο συχνό εμποτισμό του χαρτιού με απιονισμένο νερό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ΔB/S=f(√t) διάγραμμα.



Διάγραμμα ΔB/S=f(√t) για το δείγμα εργαστηρίου βιοκαλκαρενίτη Ρόδου διαστάσεων 5cm x 5cm.

Υπολογίστηκε ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης ίσος με C=5 mg*cm^2/s$^{1/2}$ μέσω του συντελεστή διεύθυνσης $C = \frac{\Delta B}{S\sqrt{t}}$ της ευθείας που προσομοιάζει, με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, τα σημεία του διαγράμματος στο διάστημα απότομης αύξησης των τιμών της ποσότητας ΔB/S (όπου ΔB η διαφορά βάρους εμποτισμένου ξηρού δείγματος, s η επιφάνεια του δείγματος σε cm^2).

Μετρήθηκε το τελικό βάρος του δείγματος και υπολογίστηκε πως υπήρξε 15,7% αύξηση βάρους του λόγω απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης.

Στη συνέχεια το δείγμα ξηράθηκε και εμβαπτίστηκε σε απιονισμένο νερό για 5 λεπτά. Μετρήθηκε το βάρος του δείγματος και υπολογίστηκε πως υπήρξε 18,2% αύξηση βάρους του λόγω απορρόφησης νερού μέσω εμβάπτισής του σε δοχείο με απιονισμένο νερό.

4.2.6 Υπολογισμός πορώδους μέσω προγράμματος Mipar.

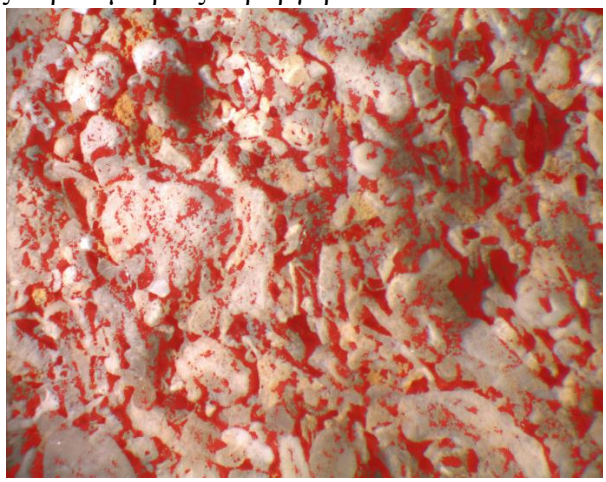
Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν οπτικοποσοτικοποίησεις των πόρων και της κατανομής αυτών μέσω του προγράμματος Mipar, λόγω του ότι με την ποροσιμετρία υδραργύρου δεν είναι δυνατή η μέτρηση των «τυφλών» πόρων, των πόρων επιφάνειας και των πόρων διαμέτρου μεγαλύτερης των 7,5μm. Τα αποτελέσματα από αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 11: Υπολογισμός του πορώδες μέσω προγράμματος ανάλυσης εικόνας.

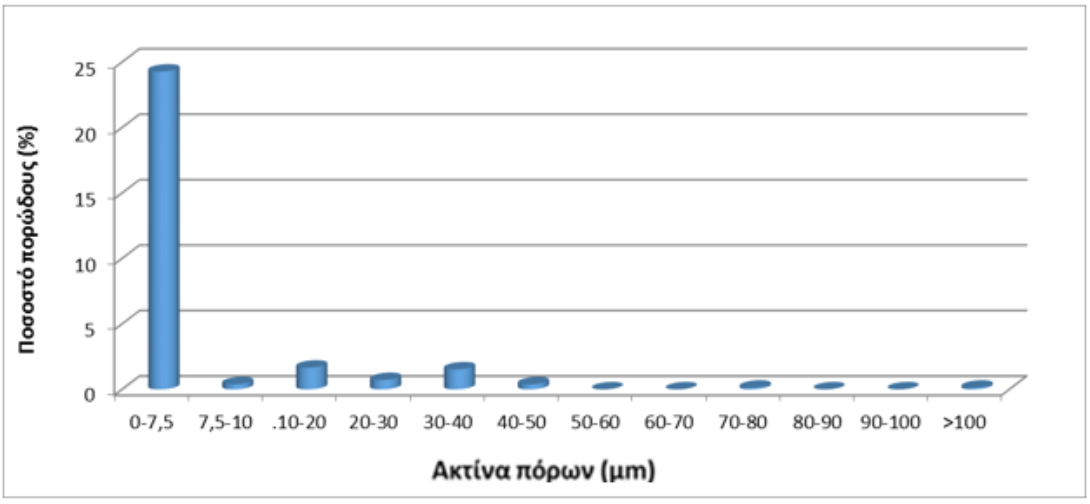
Δείγμα	Ολικό πορώδες (%)
a_I_1_W_1	29.9
a_I_4_N_8	36.9

Οι τιμές του ολικού πορώδους ήταν υψηλότερες σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο όπως αναμενόταν. Η πρώτη στήλη παρουσιάζει τον υπολογισμό του πορώδους στην ίδια περιοχή ακτίνας πόρων με αυτή της ποροσιμετρίας υδραργύρου.

Εικόνα 267: Δείγμα a_I_4_N_8 .

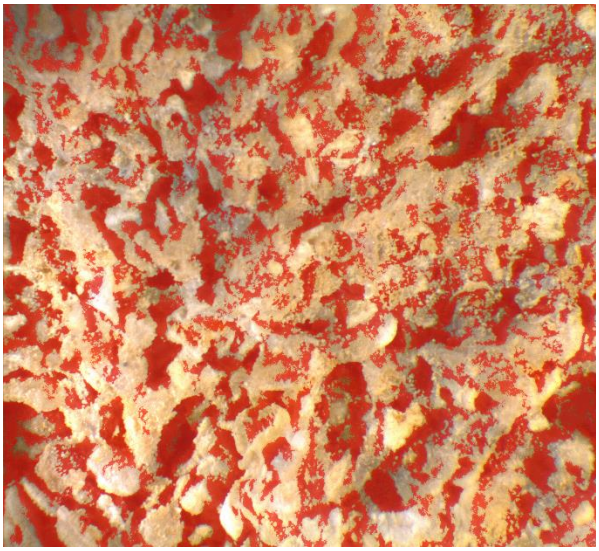


Εικόνα 268: Δείγμα a_I_4_N_8 μετά την επεξεργασία εικόνας.

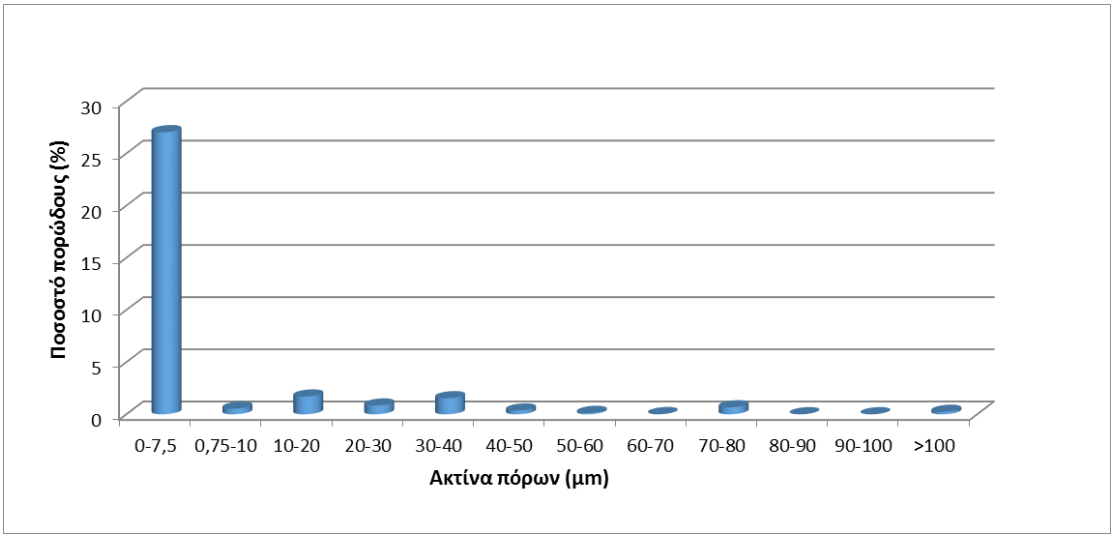


Διάγραμμα κατανομής πορώδους 1: Ποσοστό πορώδους σα συνάρτηση της ακτίνας πόρων του λίθου στο δείγμα a_I_4_N_8 .

Εικόνα 269: Δείγμα a_I_1_W_1.



Εικόνα 270: Δείγμα a_I_1_W_1 μετά την επεξεργασία εικόνας.

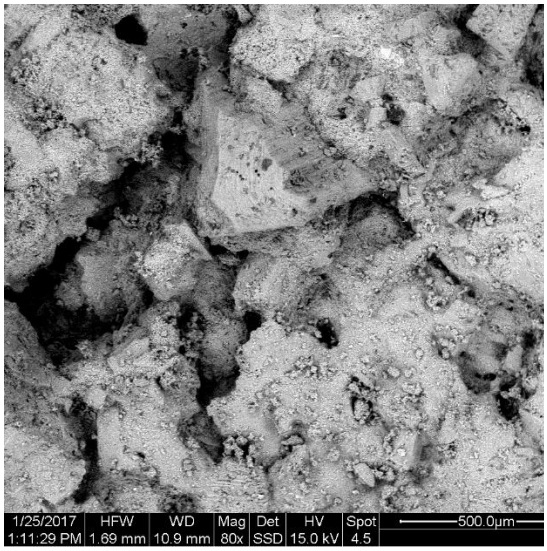


Διάγραμμα κατανομής πορώδους 2: Ποσοστό πορώδους σα συνάρτηση της ακτίνας πόρων του λίθου στο δείγμα a_I_1_W_1 .

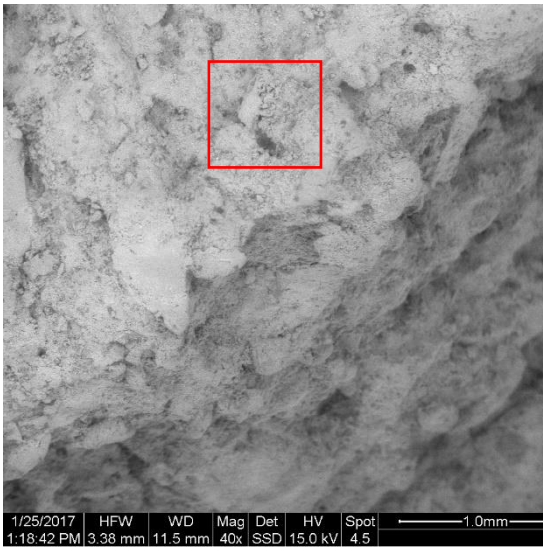
4.2.7 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης SEM στα δείγματα που ελήφθησαν από το ναό, ώστε να γίνει ποιοτική και ποσοτική ανάλυση επί συγκεκριμένης θέσης ή χωρίων στα δείγματα. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για την τεχνική αυτή είναι το JEOL JSM 6380LV με στοιχειακό αναλυτή EDX το μηχάνημα Oxford Instruments INCAx-sight. Η ερευνητική προσέγγιση με την τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον προσδιορισμό χημικών συνθέσεων κρυσταλλικών δομών.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης του δείγματος ιστορικού επιχρίσματος a_I_4_W_7.



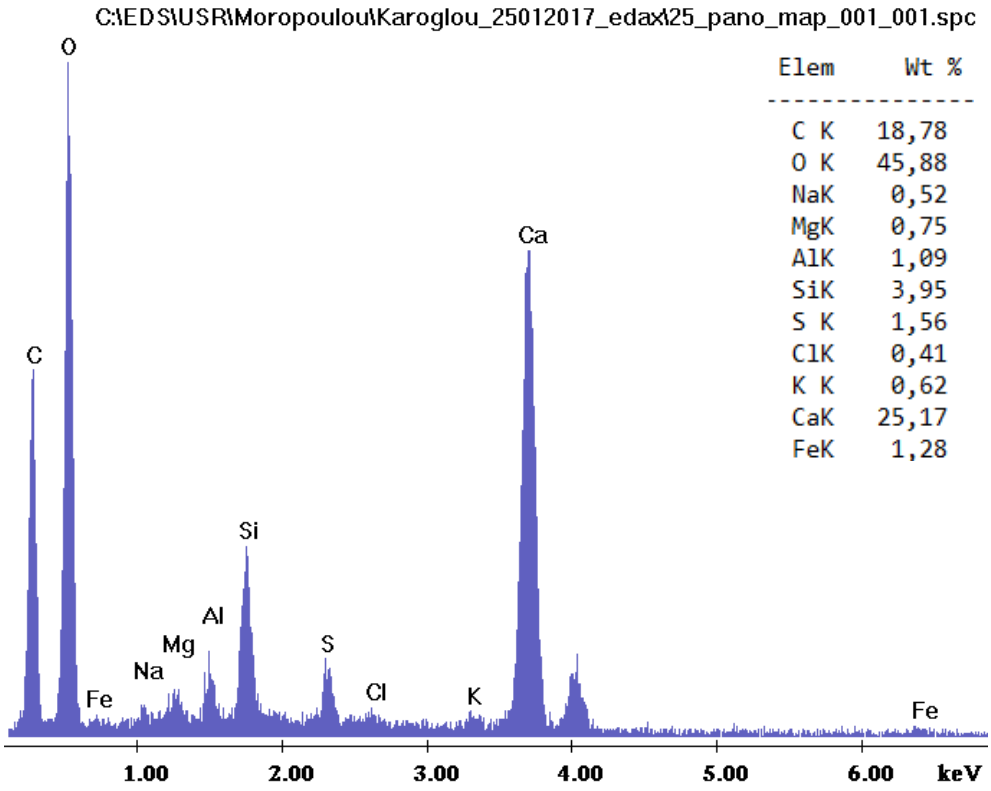
Εικόνα 271: Ιστορικό επίχρισμα. Δείγμα a_I_4_W_7 (X80).



Εικόνα 272: Διεπιφάνεια εσωτερική εξωτερική. Σχηματισμοί $CaCO_3$. Δείγμα a_I_4_W_7. (x40).

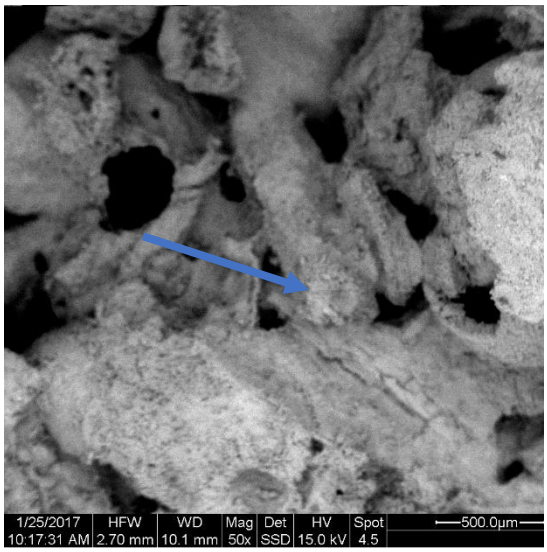
Στην εικόνα 271 παρουσιάζεται η επιφάνεια του ιστορικού επιχρίσματος σε μεγέθυνση x80. Παρατηρείται ακανόνιστη μορφή κόκκων, αρκετοί πόροι μεγάλης διαμέτρου και πολλές δομές προσκολλημένες στο κυρίως σώμα του επιχρίσματος. Στην εικόνα 272 παρουσιάζεται η διεπιφάνεια μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής επιφανειακής όψης του δείγματος σε μεγέθυνση x40, όπου σύμφωνα με τη στοιχειακή μικροστοιχειακής ανάλυσης (εικόνα 273) οι σχηματισμοί που φαίνεται είναι $CaCO_3$. Η επιλεγμένη περιοχή της εικόνας 272 είναι πλούσια σε άνθρακα και οξυγόνο, ενώ παράλληλα έχει υψηλή συγκέντρωση πυρίτιού, αργιλίου, θείου και μαγνήσιού.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης του δείγματος λίθου αποκατάστασης a_I_1_W_1.

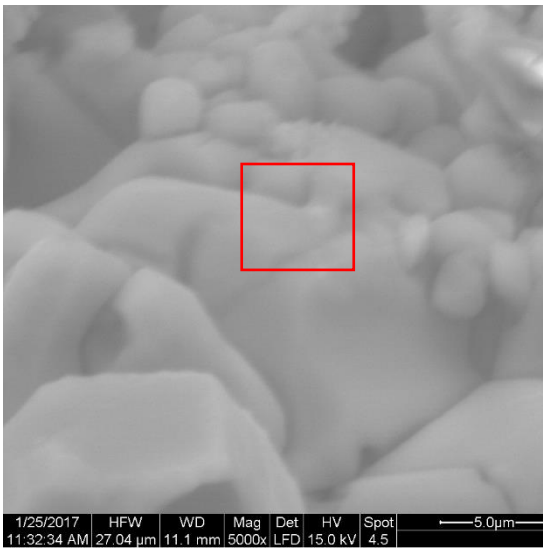


Εικόνα 273:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του πλαισίου της εικόνας 272.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης του δείγματος λίθου αποκατάστασης a_I_1_W_1.



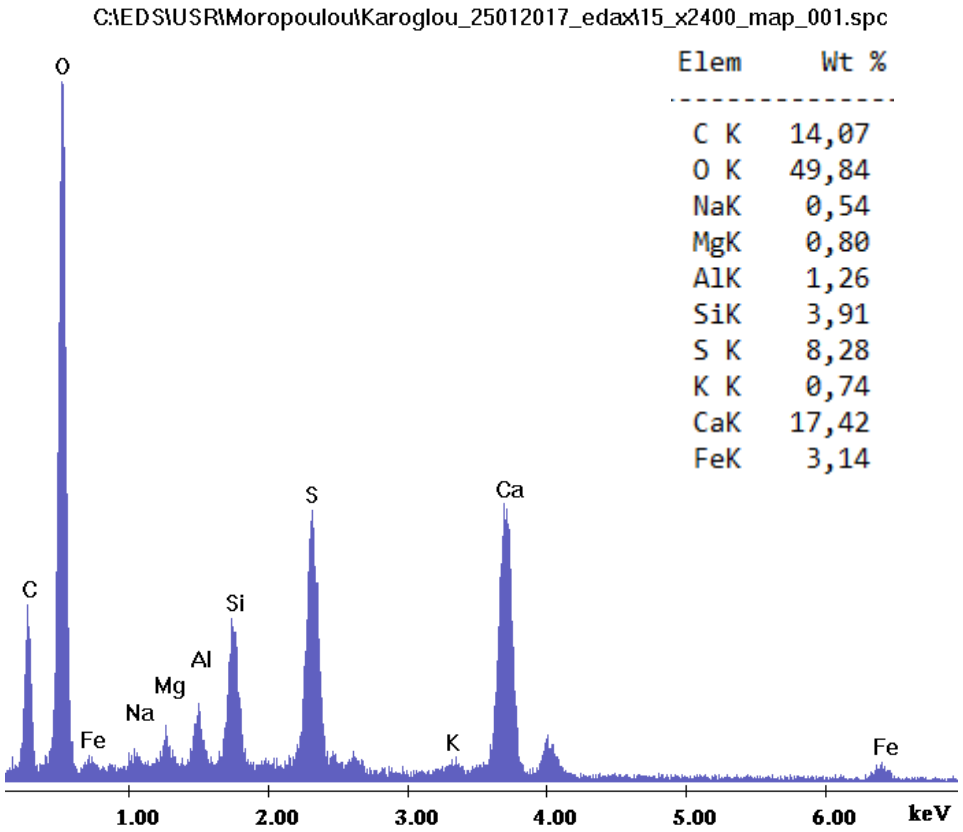
Εικόνα 274: Γενική bsed εικόνα επιφάνειας λίθου αποκατάστασης. a_I_1_W_1 (x50).



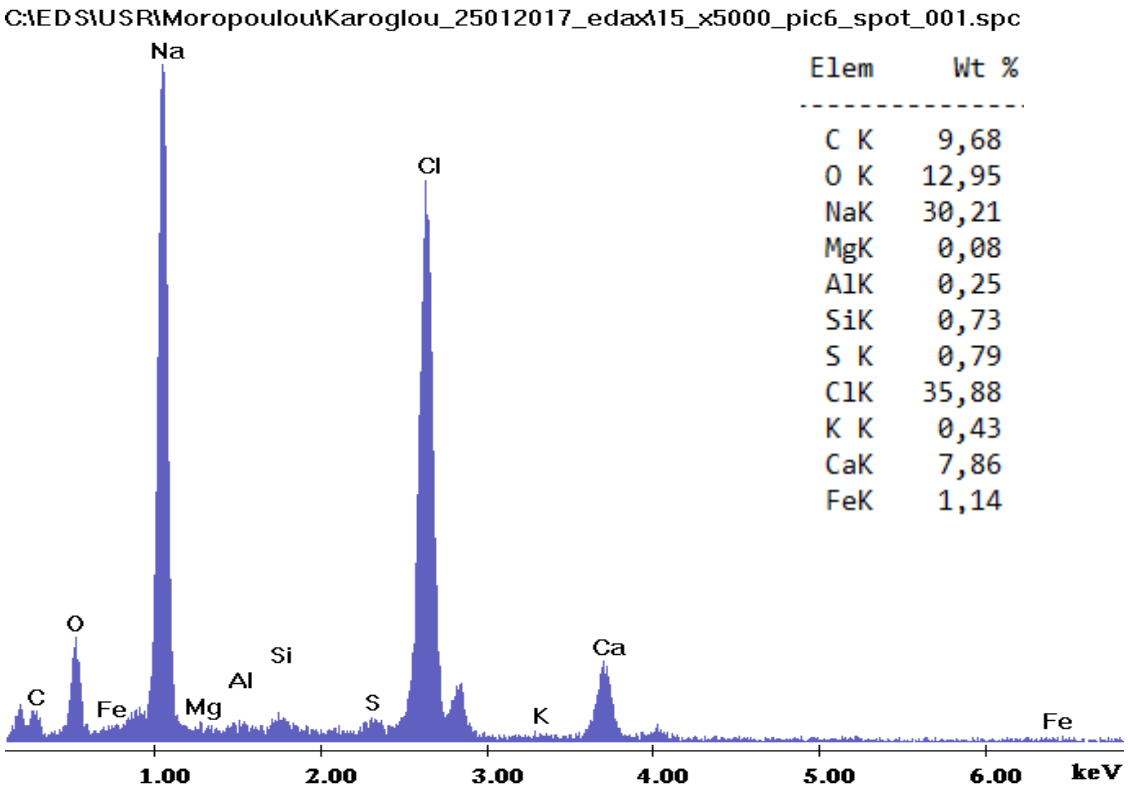
Εικόνα 275: Sed εικόνα μικροκρυστάλλων NaCl. a_I_1_W_1. (x6000).

Στην εικόνα 274 παρουσιάζεται μία γενική bsed εικόνα της επιφάνειας της αποκατάστασης με μεγέθυνση x50. Χαρακτηριστικό της εικόνας αυτής είναι οι μεγάλες οπές και το ακανόνιστο σχήμα της δομής της επιφάνειας του. Πολλοί εξωγενείς σχηματισμοί φαίνεται να έχουν προσκολληθεί πάνω στο λίθο. Στην sed εικόνα 275 φαίνονται οι μικροκρύσταλλοι χλωριούχου νατρίου σε μεγέθυνση x6.000,

που ταυτοποιούνται από την στοιχειακή μικροανάλυση (εικόνα 277). Όπως παρουσιάζεται και στο φάσμα της μικροστοιχειακής ανάλυσης (εικόνα 276) της εικόνας 274 σε συγκεκριμένο σημείο το δείγμα αποτελείται από μεγάλο ποσοστό ασβεστίου, άνθρακα και οξυγόνου ενώ έχει μεγάλη ποσότητα πυριτίου.

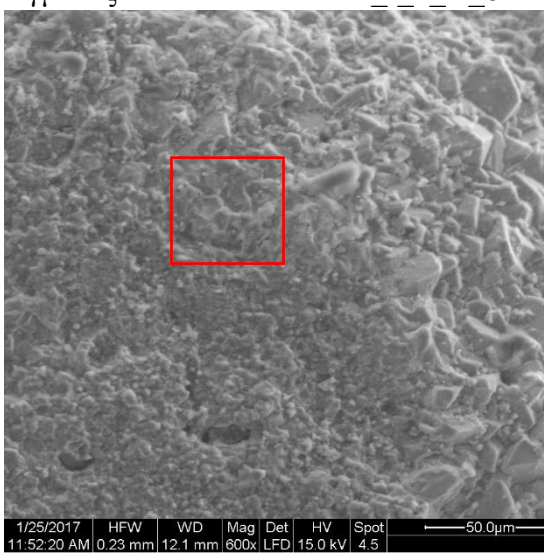


Εικόνα 276:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του πλαισίου της εικόνας 274.

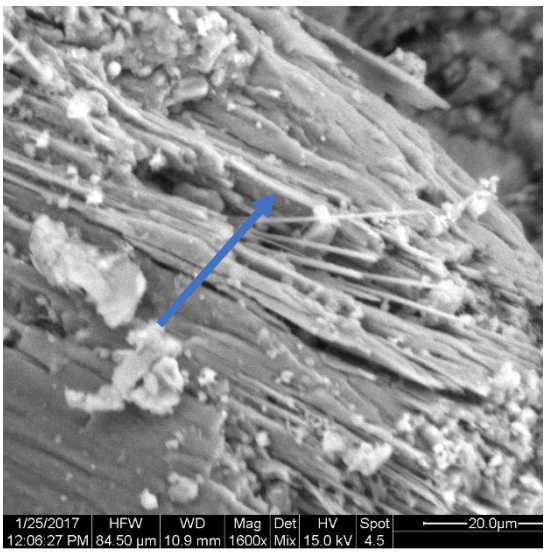


Εικόνα 277:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του επισημασμένου σημείου της εικόνας 275.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης του δείγματος αυθεντικού λίθου a_I_4_N_8.



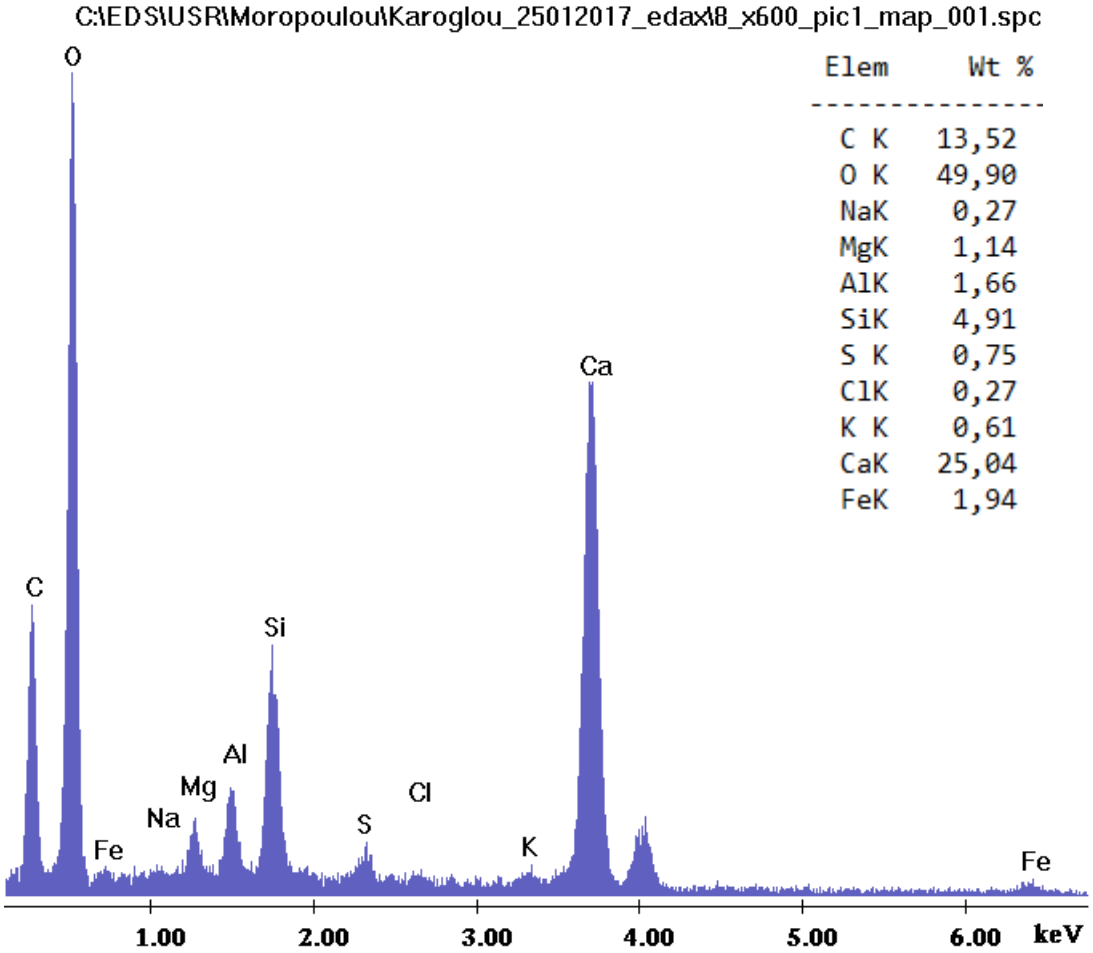
Εικόνα 278: sed εικόνα επιφάνειας δείγματος a_I_4_N_8 X 00.



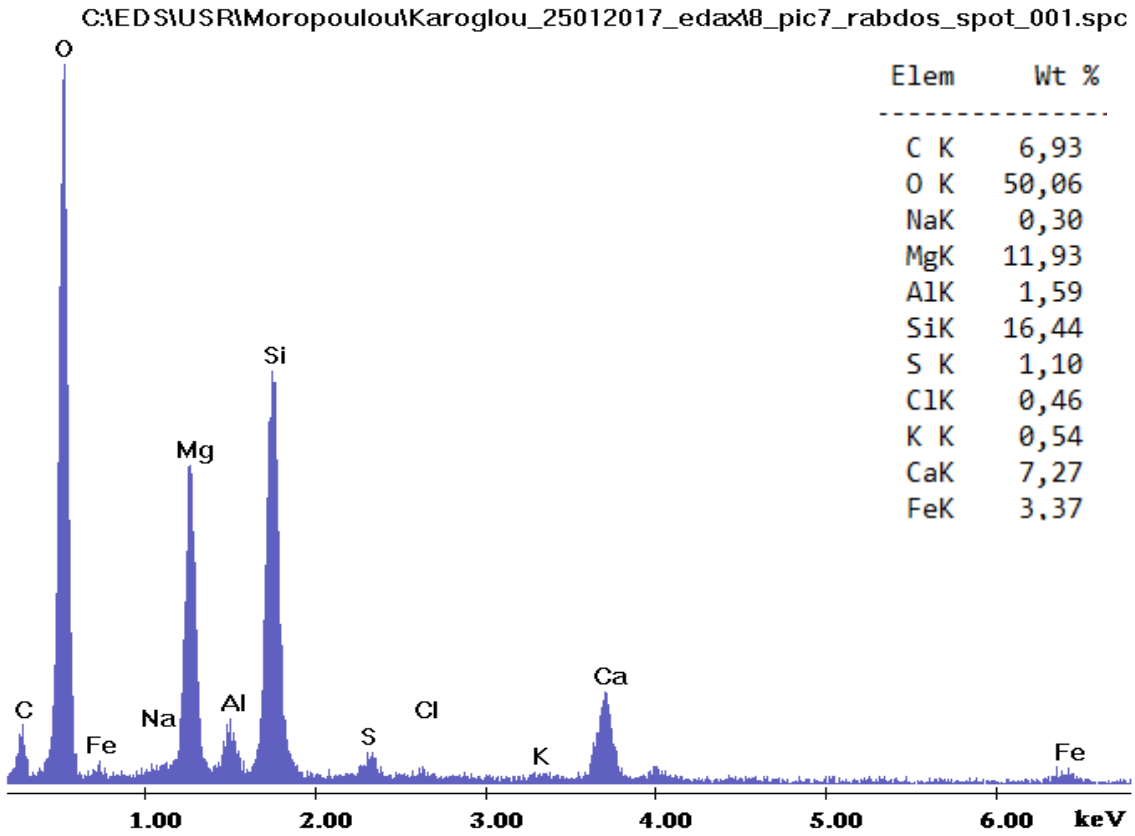
Εικόνα 279: mix εικόνα x1600 δείγματος a_I_4_N_8. Σχηματισμοί Μαγνησίου.

Στην εικόνα 278 παρουσιάζεται η επιφάνεια του δείγματος σε μεγέθυνση x80. Η μορφή της επιφάνειας αυτής είναι ακανόνιστη με πολλούς σχηματισμός κρυστάλλων. Στην mix εικόνα 279 του δείγματος με μεγέθυνση x1600 φαίνονται οι ραβδόμορφοι σχηματισμοί μαγνησίου. Στην εικόνα 281 μικροστοιχειακής ανάλυσης παρουσιάζεται η σύσταση του δείγματος αυτού, το οποίο είναι πλούσιο σε ασβέστιο, οξυγόνου, πυρίτιο και άνθρακα ενώ έχει μικρές ποσότητες αργιλίου, μαγνησίου και νατρίου.

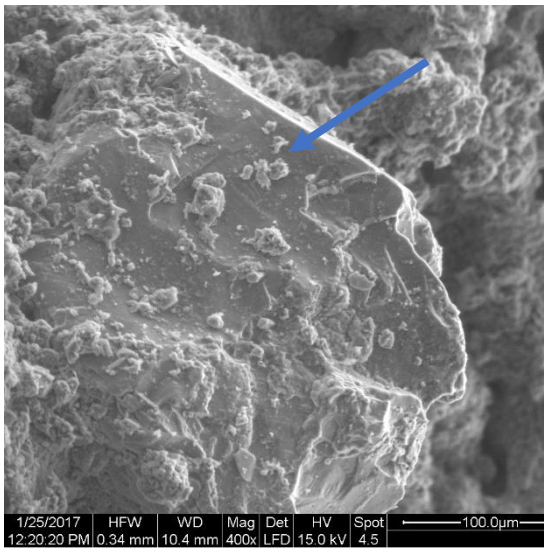
Στην εικόνα 280 της μικροστοιχειακής ανάλυσης παρουσιάζεται η σύσταση του επισημασμένου σημείου της εικόνας 278, το οποίο είναι πλούσιο σε πυρίτιο και μαγνήσιο ενώ περιέχει μικρότερο ποσοστό ασβεστίου, αργιλίου και άνθρακα.



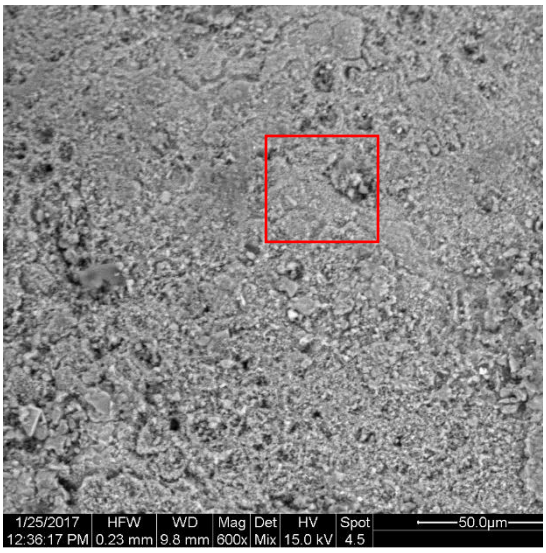
Εικόνα 280:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του πλαισίου της εικόνας 279.



Εικόνα 281:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του επισημασμένου σημείου της εικόνας 280.

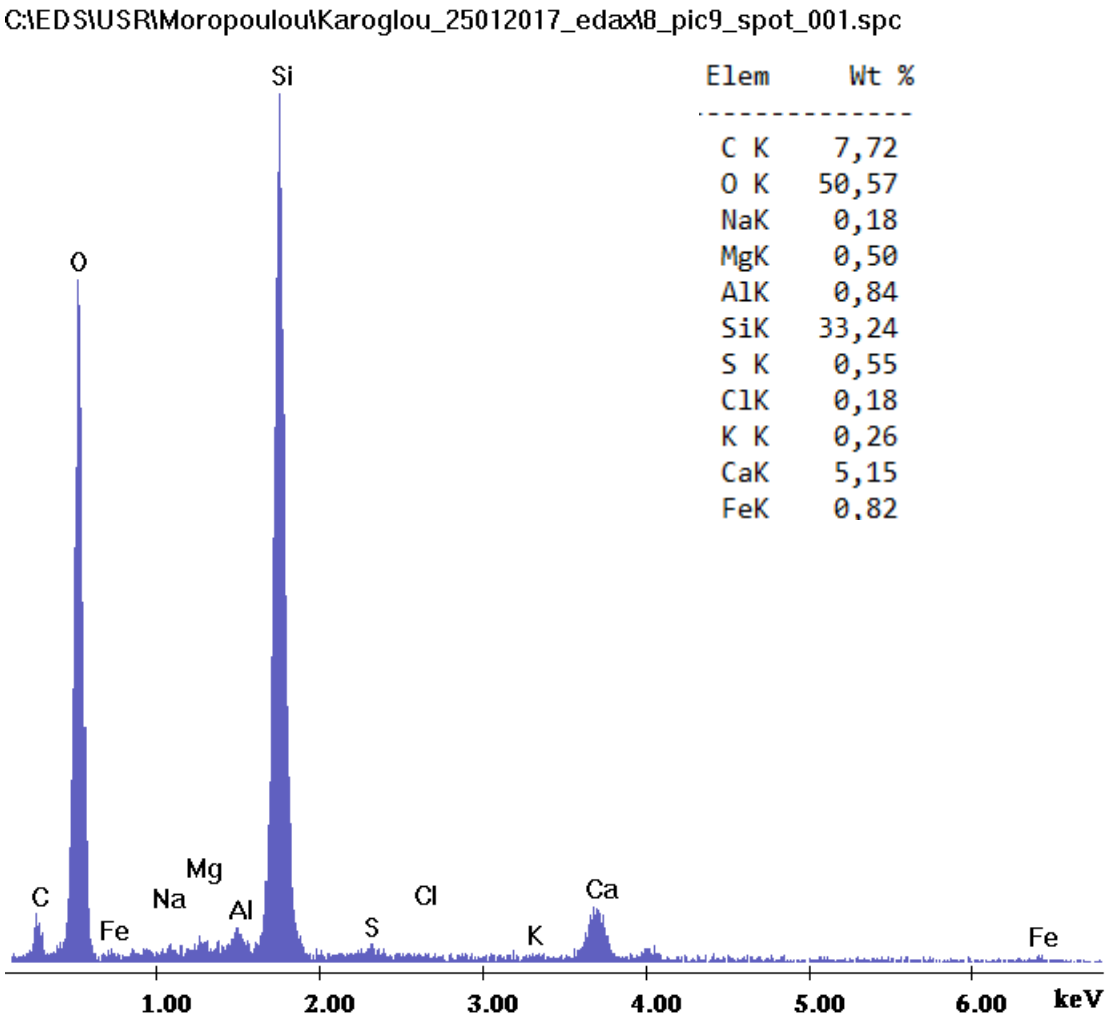


Εικόνα 282: sed εικόνα x400 επιφάνειας δείγματος a_I_4_N_8. Σχηματισμοί πυριτίου.

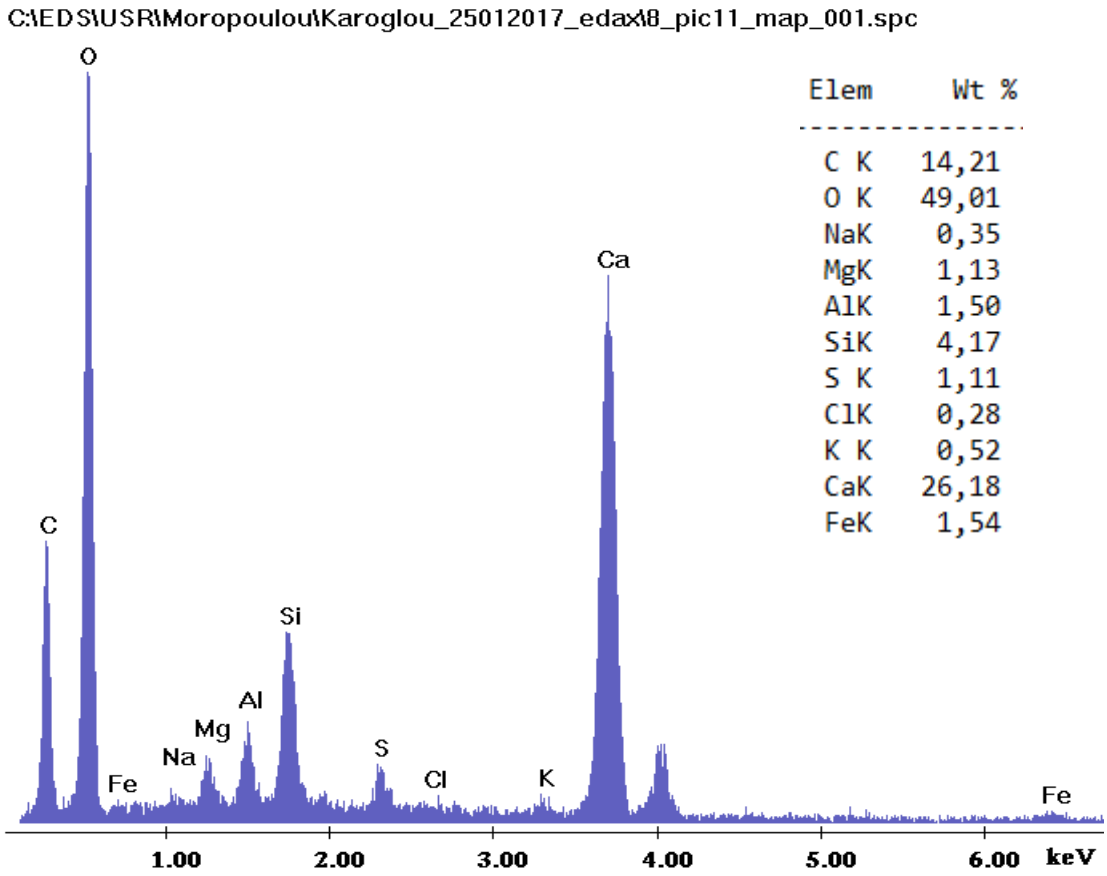


Εικόνα 283: mix γενική εικόνα x600 δείγματος a_I_4_N_8.

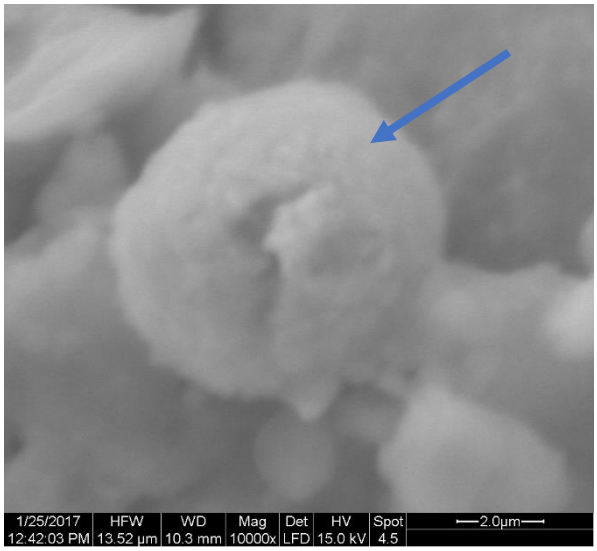
Στην sed εικόνα 282 της επιφάνειας του δείγματος με μεγέθυνση x400 φαίνονται οι σχηματισμοί πυριτίου σαν ανομοιόμορφες δομές προσκολλημένες στο λίθο. Στην mix εικόνα 283 παρουσιάζεται η γενική μορφή της επιφάνειας του δείγματος σε μεγέθυνση x600. Στην μικροστοιχειακής ανάλυσης εικόνα 284 του επισημασμένο σημείου της εικόνας 282 παρουσιάζεται η σύσταση του επιλεγμένου σημείου να είναι πλούσιο σε πυρίτιο.



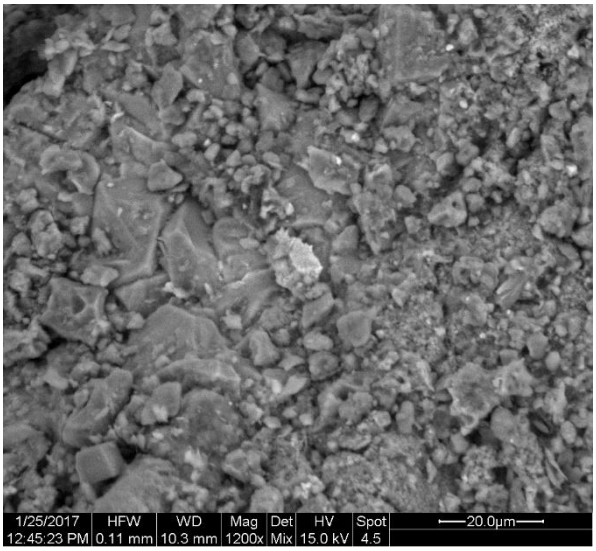
Εικόνα 284:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του επισημασμένου σημείου της εικόνας 282.



Εικόνα 285:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του επισημασμένου σημείου της εικόνας 283.



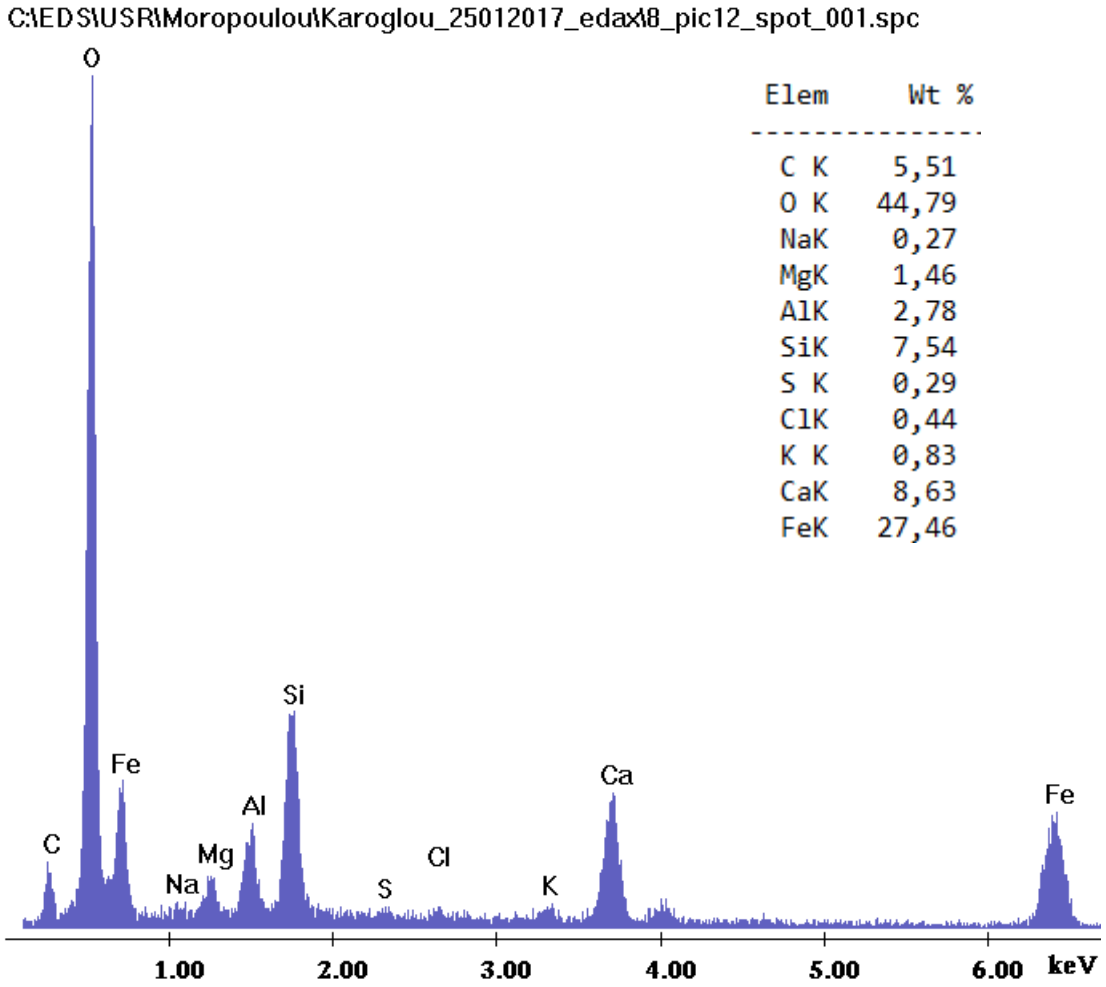
Εικόνα 286: sed εικόνα του δείγματος a_I_4_N_8 x10000. Μήτρα ασβεστίτη. Σφαιροειδής σχηματισμός σιδήρου.



Εικόνα 287: mix εικόνα του δείγματος a_I_4_N_8 x1200. Διάσπαρτος εντοπισμός σφαιρικών σχηματισμών σιδήρου.

Στην sed εικόνα 286 της επιφάνειας του δείγματος με μεγέθυνση x10000 φαίνεται η μήτρα ασβεστίτη και ένας σφαιροειδής σχηματισμός σιδήρου, ο οποίος παρουσιάζεται διάσπαρτος σε όλη την επιφάνεια του συγκεκριμένου δείγματος στην mix εικόνα 287. Στη μικροστοιχειακή ανάλυση της εικόνας 286 (εικόνα 288)

παρουσιάζεται η σύσταση του επιλεγμένου σημείου να είναι πλούσιο σε σίδηρο, πυρίτιο και ασβέστιο.



Εικόνα 288:Στοιχειακή μικροανάλυση EDX του επισημασμένου σημείου της εικόνας 286.

4.2.8 Υπολογισμός διαλυτών αλάτων στα δείγματα του λίθου

Πραγματοποιήθηκε τεχνική μελέτη προσδιορισμού της περιεκτικότητας διαλυτών αλάτων σε μέρος των δειγμάτων που ελήφθησαν από το ναό. Η μελέτη έγινε σύμφωνα με το ιταλικό πρότυπο "Dosaggio dei sall solubele, Normal 13/83". Η τεχνική προσδιορισμού της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα έχει ως εξής: κονιορτοποιούμε 100 γραμμάρια υλικού και τα τοποθετούμε σε 100ml απιονισμένου νερού. Μετά το πέρας ακριβώς 24 ωρών μετράμε την αγωγιμότητα C του δείγματος σε μS με το αγωγιμόμετρο. Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε βήματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον τύπο:

$$SST\%=(C*6.88)/m$$

,όπου C η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε mS και m το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg. Η θερμοκρασία όλων των δειγμάτων παρέμεινε στο εύρος θερμοκρασιών 17,4^{o}C έως 18,2 ^{o}C καθόλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12:Μετρήσεις αγωγιμότητα των μέρους των δειγμάτων του ναού και υπολογισμός της περιεκτικότητας αυτών σε διαλυτά άλατα.

Δείγμα	Αγωγιμότητα (μS)	T (◦C)	Μάζα (g)	SST%
a_I_1_W_1	52,8	17,7	0,0997	3,64
a_I_1_E_3	41,7	18,2	0,1013	2,83
a_I_2_W_4	45,8	18,2	0,0990	3,18
a_I_3_W_5	41,3	18,1	0,1038	2,74
a_I_4_W_7	42,1	17,4	0,1025	2,83
a_I_4_N_8	32,4	17,6	0,1019	2,19
a_I_4_E_10	36,7	18,1	0,1011	2,50
a_I_5_W_12	40,4	17,5	0,0990	2,81
a_I_6_W_13	37,8	17,7	0,1011	2,57
a_I_7_E_14	36,7	17,6	0,1031	2,45

Παρατηρείται στους λίθους καθ' ύψος μείωση της σχετικής περιεκτικότητάς τους σε διαλυτά άλατα, με εξαίρεση το δείγμα a_I_2_W_4 στο οποίο παρατηρείται αυξημένη, σε σχέση με τα υπόλοιπα, περιεκτικότητα. Τα δείγματα a_I_4_W_7 και a_I_5_W_12, που είναι αυθεντικό και τσιμεντιτικό επίχρισμα αντίστοιχα, φέρουν μεγάλη ποσότητα διαλυτών αλάτων σε σχέση με τη μάζα τους. Οι αυθεντικοί λίθοι έχουν ποσοστό διαλυτών αλάτων μικρότερο του 2,6% ενώ οι λίθοι αποκατάστασης κυμαίνονται από 2,7% έως 3,7% περιεκτικότητα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων και θειικών αλάτων.

- Για τον προσδιορισμό των χλωριούχων αλάτων κάθε δείγματος τοποθετήθηκε μέρος του υδατικού του διαλείμματος εντός δοκιμαστικού σωλήνα και προστέθηκαν λίγες σταγόνες νιτρικού αργυρού ($AgNO_3$) περιεκτικότητας 1M. Η χημική αντίδραση χλωριόντων στο διάλυμα δείκτη σχηματίζει χλωριούχο αργυρό με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα.

Η ποσότητα των περιεχομένων χλωριόντων καθορίζει την ένταση του παρατηρούμενο ονόματος. η ένταση του παρατηρούμενο θολώματος χωρίστηκε σε 5 κλίμακες πολύ υψηλή, υψηλή, μικρή, άχνη.

Τα αποτελέσματα, των παραπάνω παρατηρήσεων, παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13:Παρατηρούμενο θόλωμα σε υδατικό διάλυμα κονιορτοποιημένου δείγματος, παρουσία δείκτη AgNO3.

Δείκτης $AgNO_3$	Εύρος παρατηρούμενου θολώματος				
Δείγμα	πολύ υψηλό	υψηλό	μέτριο	μικρό	αχνό
a_I_1_W_1			•		
a_I_1_E_3			•		
a_I_2_W_4			•		
a_I_3_W_5			•		
a_I_4_W_7			•		
a_I_4_N_8	•				
a_I_4_E_10			•		
a_I_5_W_12			•		
a_I_6_W_13			•		
a_I_7_E_14		•			

- Για τον προσδιορισμό των θειικών αλάτων κάθε δείγματος τοποθετήθηκε μέρος του υδατικού του διαλείμματος εντός δοκιμαστικού σωλήνα και προστέθηκαν λίγες σταγόνες χλωριούχου βαρίου ($BaCl_2$) περιεκτικότητας 1M. Η χημική αντίδραση θειικών ιόντων στο διάλυμα δείκτη σχηματίζει θειικό βάριο ($BaSO_4$) με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα. Η ποσότητα των περιεχομένων χλωριόντων καθορίζει την ένταση του παρατηρούμενο ονόματος. η ένταση του παρατηρούμενο θολώματος χωρίστηκε σε 5 κλίμακες πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, μικρή, άχνη.

Τα αποτελέσματα, των παραπάνω παρατηρήσεων, παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 14:Παρατηρούμενο θόλωμα σε υδατικό διάλυμα κονιορτοποιημένου δείγματος, παρουσία δείκτη BaCl2.

Δείκτης $BaCl_2$	Εύρος παρατηρούμενου θολώματος				
Δείγμα	πολύ υψηλό	υψηλό	μέτριο	μικρό	αχνό
a_I_1_W_1			•		
a_I_1_E_3					•
a_I_2_W_4					•
a_I_3_W_5					•
a_I_4_W_7					•
a_I_4_N_8		•			
a_I_4_E_10					•
a_I_5_W_12					•
a_I_6_W_13	•				
a_I_7_E_14				•	

Στο δείγμα a_I_4_N_8 παρότι παρουσίασε μικρότερη περιεκτικότητά από τα υπόλοιπα σε διαλυτά άλατα στον οπτικό έλεγχο, παρουσίασε το μεγαλύτερο θόλωμα. Αυτό, πιθανών, οφείλεται στο ότι υπάρχουν και άλλα διαλυτά άλατα στον λίθο από όπου ελήφθησαν το δείγματα εκτός των θειικών και χλωρικών αλάτων.

5 Συμπεράσματα Διαγνωστικής Μελέτης

Ο ναός του πυθίου Απόλλωνος αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη: το βράχο στο κέντρο του ναού (πυρήνας), τους αναβαθμούς, τους κίονες και κομμάτι του πτερού. Ο πυρήνας του ναού είναι φυσικός βράχος και χρήζει μονάχα καθαρισμού για την αισθητική ανάδειξη του μνημείου. Ο λίθος κατασκευής του μνημείου είναι βιοκλαστικών ψαμμιτικός ασβεστόλιθος, με ασβεστιτική συγκολλητική ουσία, με κλαστικούς κρυστάλλους κυρίως χαλαζία και ασβεστίτη. Οι αναβαθμοί του μνημείου είναι δομημένοι από τον ίδιο πωρόλιθο του αρχαίου ναού. Παρατηρείται σε αυτά έντονη βιοδιάβρωση λόγω υγρασίας και ρηγμάτωση στις ακμές του λίθου. Οι κίονες του ναού είναι δομημένοι από δυο διαφορετικούς λίθους, τον αυθεντικό λίθο και τον λίθο αποκατάστασης οι οποίοι έχουν παρόμοια φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο λίθος αποκατάστασης κυριαρχεί στους κίονες αυτούς, αφού λίγα κομμάτια αφεντικού λίθου σώζονται. Ο αυθεντικός λίθος, όπου αυτός υπάρχει, είναι σε καλύτερη κατάσταση από τον λίθο αποκατάστασης που είναι αποσαθρωμένος και ρηγματομένος. Η μηχανική στήριξη των λίθων, μεταξύ τους, έγινε με τη χρήση τσιμεντοκονιάματος και τη χρήση μεταλλικών συνδέσμων, οι οποίοι έχουν οξειδωθεί και διογκωθεί με αποτέλεσμα την περαιτέρω φθορά των λίθων[50]. Η χρήση σκυροδέματος αυξάνει το ρυθμό φθοράς των λίθων διότι το τσιμέντο φέρει μεγάλη ποσότητα διαλυτών αλάτων τα οποία τα εισάγει στα δομικά υλικά[35]. Η κατάσταση αυτή εμποδίζει την διαπνοή των αυθεντικών υλικών, λόγω ασύμβατης μικροδομής και εντείνει την συσσώρευση υγρασίας στα αυθεντικά υλικά[29]. Παράλληλα, λόγω ασυμβατότητας των υλικών ασκούνται τάσεις στα αυθεντικά υλικά. Για την στήριξη του επιστυλίου χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά πλέγματα τα οποία αφού οξειδώθηκαν και διογκώθηκαν προκάλεσαν ρηγματώσεις στην αυθεντική αρχιτεκτονική επιφάνεια. Από τα πειραματικά αποτέλεσμα γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη του μηχανισμού τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας από τους αναβαθμούς του ναού στους κίονες, ο οποίος επιταχύνει την αποσάθρωση των σπονδύλων βάσης και την μηχανική αστάθεια των κιόνων.

6 Πρόταση υλικών στερέωσης και αποκατάστασης του ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο.

Για τη συντήρηση του Ναού του Πυθίου Απόλλωνος, έπειτα από την ανάλυση των δειγμάτων που ελήφθησαν, προτείνονται τα εξής:

- Αφαίρεση των υπαρχόντων τσιμεντιτικών κονιαμάτων συμπλήρωσης, καθώς προκαλούν και εντείνουν τα φαινόμενα φθοράς λόγω ασυμβατότητας φυσικοχημικών, μηχανικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών μικροδομής. Επιπροσθέτως, είναι ασύμβατα από αισθητικής απόψεως, όπως δείχνει η ανάλυση των χρωματικών παραμέτρων που μετρήθηκαν.
- Χρήση συμβατού κονιάματος αποκατάστασης, για τη μηχανική ενίσχυση των κιόνων και την προσαρμογή νέων τμημάτων λίθων.
- Χρήση τιτανίου για τη στατική ενίσχυση των κιόνων.
- Χρήση ενεμάτων για την αποκατάσταση της συνοχής της μάζας των λίθων.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η χρήση τσιμεντιτικού κονιάματος, θεωρείται τελείως ασύμβατη με τον πωρόλιθο της Ρόδου. Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις που έγιναν, ως συμβατά κονιάματα αποκατάστασης, θεωρούνται τα κονιάματα υδραυλικής άσβεστου, τα ασβεστιτικά και τα ασβέστη-ποζολάνης.

6.1. Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο διακριτών στοιχείων

Ως δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο διακριτών στοιχείων, σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση εισήχθησαν τα εξής:

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά υπαρχόντων υλικών στο μνημείο.

Τύπος υλικού	**Θλιπτική Αντοχή (MPa)**	**Αντοχή σε κάμψη (MPa)**	**Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)**	**Πρόσφυση στο υπόστρωμα -EN 1015-12 (με άμεσο εφελκυσμό)**	**Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm^3)**
Αυθεντικός λίθος	**12,50**	-	-	-	2,00
Λίθος αποκατάστασης (υπάρχον στο μνημείο)	**7,98**	-	-	-	2,23
Μέτρηση πυρήνα σκυροδέματος	**11,71** (Μέση αντοχή σε θλίψη) **7,35** (Χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη)	-	-	-	-

Πιο αναλυτικά:

- Μηχανικές αντοχές από κρουσιμέτρηση
  - ✓ Μέσος όρος θλιπτικής αντοχής για αυθεντικό λίθο:
    12,50 MPa, με τυπική απόκλιση 3,53 σε πλήθος 10 διαφορετικών τετραγώνων διαστάσεων 30cm x 30cm
  - ✓ Μέσος όρος θλιπτικής αντοχής για λίθο αποκατάστασης (που υπάρχει στο μνημείο):
    7,98 MPa, με τυπική απόκλιση 1,77 σε πλήθος 15 διαφορετικών τετραγώνων διαστάσεων 30cm x 30cm
- Μετρήσεις καρότων από το μνημείο:
  - ✓ Το 1997 έγιναν 10 πυρηνοληψίες από σφονδύλους του Ναού

Αντοχή πυρήνα σκυροδέματος σε θλίψη

- ✓ Μέση αντοχή σε θλίψη **11.71 MPa**
- ✓ Χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη **7.35 MPa**

Εικόνα 289: Πυρηνοληψία από τους σπονδύλους του Ναού το 1997,

- Πυκνότητα υλικών, όπως μετρήθηκαν μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου:
  - ✓ Αυθεντικός λίθος, φαινόμενη πυκνότητα: **2,20** g/cm^3
  - ✓ Λίθος αποκατάστασης, φαινόμενη πυκνότητα: **2,23** g/cm^3

Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος διαφόρων υλικών αποκατάστασης του μνημείου ώστε να αποφασιστεί, με κριτήριο την βελτίωση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου, το κονίαμα αποκατάστασης που θα ήταν καταλληλότερο για χρήση.
Τα κονιάματα αποκατάστασης που ελέγχθηκαν είναι τα κάτωθι:

- Κονίαμα αποκατάστασης φυσικής υδραυλικής ασβέστου M15
- Κονίαμα αποκατάστασης φυσικής υδραυλικής ασβέστου M10
- Κονίαμα αποκατάστασης ασβεστοποζολανικό M15
- Κονίαμα αποκατάστασης έγχρωμο μίξης ασβέστη και υδραυλικής ασβέστου M10
- Τσιμεντιτικό κονίαμα αποκατάστασης M20

Τα πρώτα τέσσερα είναι συμβατά με τα δομικά υλικά του Ναού, ενώ το τελευταίο κονίαμα τσιμέντου είναι ασύμβατο από φυσικοχημικής απόψεως και συμπεριλήφθηκε στην εξέταση μέσω FEM λόγω πληρότητας των αποτελεσμάτων.
Η συμβατότητα ελέγχθηκε ως προς τη χημική σύσταση, τα χαρακτηριστικά υγρικής συμπεριφοράς και την αποφυγή της δημιουργίας μηχανικής ανισοτροπίας.
Συγκεντρωτικά, τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΑΑ	**Τύπος κονιάματος**	**Θλιπτική Αντοχή (MPa)**	**Αντοχή σε κάμψη (MPa)**	**Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)**	**Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)**	**Πρόσφυση στο υπόστρωμα (MPa)**	**Συντελεστής διάχυσης υδρατμών, μ**	**Συντελεστής τριχοειδούς ρόφησης ($kg.m^{-2}.min^{-0.5}$)**	**Ειδικό βάρος κονιάματος μετά την σκλήρυνση (kg/m^3)**
1	*Φυσικής υδραυλικής ασβέστου M15*	**16** *(EN 1015-11)*	**5** *(EN 1015-11)*	**13** *(EN 13412)*	**-**	**> 0,5 MPa** *θραύση τύπου A (διεπιφάνεια κονίαμα-υπόστρωμα) (EN 1015-12 - με άμεσο εφελκυσμό)*	**15/35** *(EN 1015-19)*	**0.2** *(EN 1015-18)*	**1700**
2	*Φυσικής υδραυλικής ασβέστου M10*	**12** *(EN 12190)*	**-**	**7** *(EN 13412)*	**11,5** *(UNI 9771)*	**> 0,5 MPa** *θραύση τύπου A (διεπιφάνεια κονίαμα-υπόστρωμα) (EN 1015-12 - με άμεσο εφελκυσμό)*	**<35** *(EN 1015-19)*	**0.2** *(EN 1015-18)*	**1650**
3	*Ασβεστο-ποζολανικό M15*	**18** *(EN 1015-11)*	**-**	**16** *(EN 13412)*	**-**	**> 0,6 MPa** *θραύση τύπου A (διεπιφάνεια κονίαμα-υπόστρωμα) (EN 1015-12 - με άμεσο εφελκυσμό)-*	**<8** *(EN 1015-19)*	**<18** *(EN 1015-18)*	**1950**
4	*Έγχρωμο μίξης ασβέστη και υδραυλικής ασβέστου M10*	**10** *(EN 1015-11)*	**4** *(EN 1015-11)*	**8**	**-**	**> 0,5 MPa** *θραύση τύπου A (διεπιφάνεια κονίαμα-υπόστρωμα) (EN 1015-12 - με άμεσο εφελκυσμό)*	**14** *(EN 1745)*	**<0.30** *(EN 1015-18)*	**1800**
5	*Τσιμεντιτικό M20*	**20**	**8**	**15**	**-**	**-**	**20**		**1850**

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης.

Παράλληλα, τα χαρακτηριστικά του τιτανίου που προτείνεται σαν υλικό ενίσχυσης, αλλά και τα χαρακτηριστικά του ενέματος είναι τα κάτωθι:

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά άλλων υλικών ενίσχυσης.

ΑΑ	**Υλικό ενίσχυσης**	**Θλιπτική Αντοχή (MPa)**	**Αντοχή σε κάμψη (MPa)**	**Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)**	**Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)**	**Πρόσφυση στο υπόστρωμα (MPa)**	**Πυκνότητα υλικού (kg/m^3)**	**Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)**
1	*Titanium ASTM B348 Grade*	**300 (yield strength)**	**-**	**105**	**-**	**-**	**4510**	**420**
2	*Ένεμα ασβέστη - μετακαολίνη*	**10** *(EN 1015-11)*	**-**	**6** *(EN 13412)*	-	**> 0,15 MPa** *θραύση τύπου Α (διεπιφάνεια κονίαμα-υπόστρωμα)* *(EN 1015-12 - με άμεσο εφελκυσμό)*	-	-

Η τελική επιλογή πρέπει να γίνει σύμφωνα με τις απαιτήσεις που θα ορίσει η μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία, διασφαλίζοντας πάντα τη φυσικοχημική, μηχανική και αισθητική συμβατότητα.

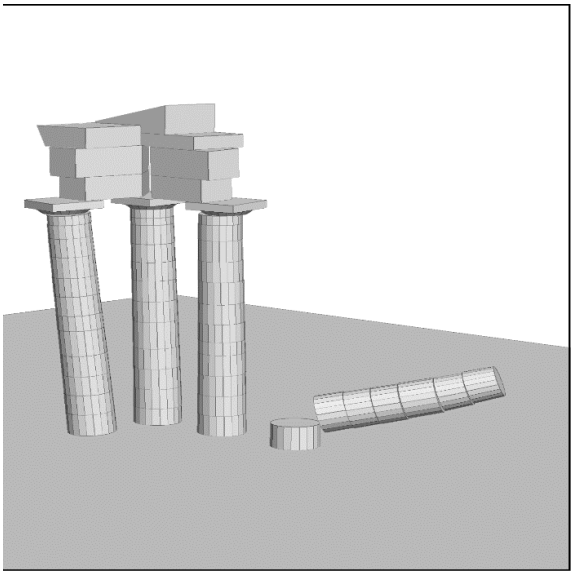
6.2 Αποτελέσματα από το Μοντέλο Διακριτών Στοιχείων

Πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της δομοστατικής επάρκειας των κιόνων με τη χρήση μοντέλου Διακριτών στοιχείων (FEM), από τον καθ. Ιωάννη Ψυχάρη στο *Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.* Στο μοντέλο εισήχθησαν τα δεδομένα της ανάλυσης των υλικών σε γενικευμένη μορφή.

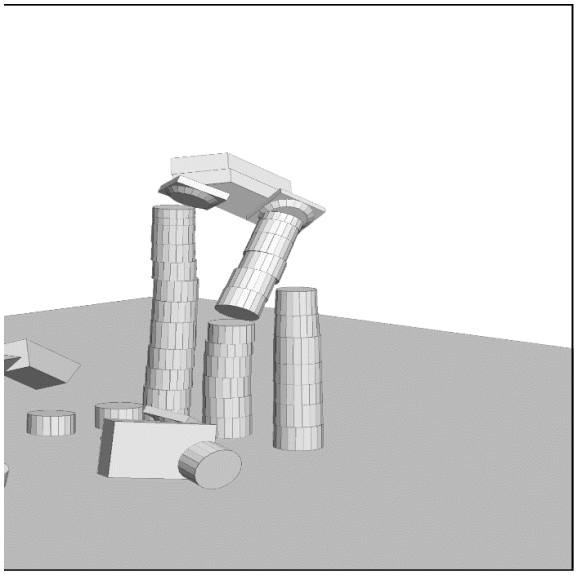
Οι αριθμητικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης βασίστηκαν σε ένα προσομοίωμα του μνημείου που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία. Είναι πιθανόν, λόγω έλλειψης πληροφοριών, κάποιοι λίθοι της ανωδομής να μην έχουν αποδοθεί σωστά. Στο προσομοίωμα δεν ελήφθησαν υπόψη βλάβες.

Αρχικά, συγκρίθηκαν δυο σενάρια, τα οποία αφορούν στην δομική ενοποίηση ή μη των σπονδύλων των κιόνων, ώστε να ληφθεί απόφαση σχετικά με το αν προτείνεται ή όχι ή χρήση τιτανίου που να διατρέχει τα κεντρικά τμήματα των σπονδύλων του κάθε κίονα. Τα αποτελέσματα ελέγχου FEM έδειξαν, σε γενικές γραμμές, καλύτερη συμπεριφορά σε σεισμική καταπόνηση στην περίπτωση που ο κίονας 1 θεωρηθεί πολυσπόνδυλος.

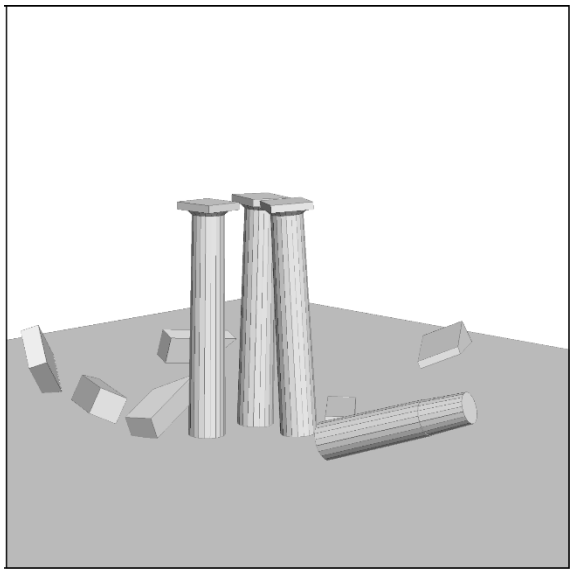
Στην μελέτη των άλλων τριών κιόνων (1,2 και 3) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην απόκριση τους σε σεισμό, στις περιπτώσεις που αυτοί λειτουργούν σα μονολιθικό στοιχείο σε σχέση μα το να λειτουργούν σαν πολυσπόνδυλοι κίονες. Συγκεκριμένα, όταν οι σπόνδυλοι είναι ελεύθεροι, παρατηρούνται μεγαλύτερες μόνιμες μετακινήσεις μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω των ολισθήσεων που συμβαίνουν μεταξύ των σπονδύλων. Παρόλα αυτά υπήρξαν μελέτες σεισμικών δονήσεων σε μονοσπόνδυλη θεώρηση με τη χρήση σκυροδέματος όπου παρατηρήθηκαν ακόμα μεγαλύτερες μέγιστες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού απ’ ό,τι στους πολυσπόνδυλους κίονες.



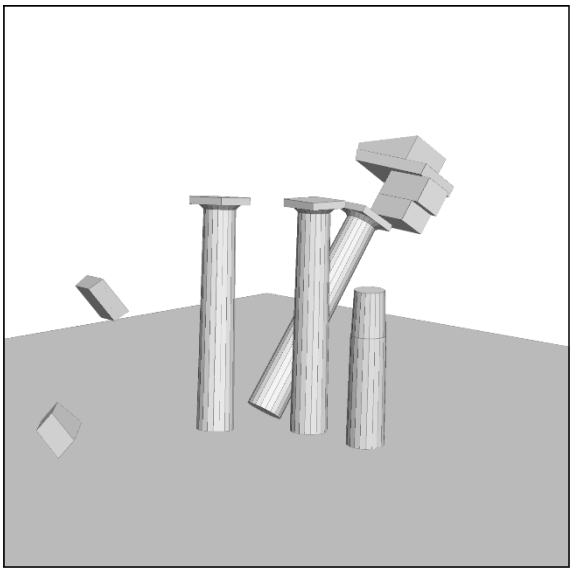
Εικόνα 290: Κατάρρευση του μεμονωμένου κίονα 1 στο 2-πλάσιο σεισμό TAB (πολυσπόνδυλοι κίονες).



Εικόνα 291: Κατάρρευση του συμπλέγματος των τριών κιόνων 2, 3 και 4 στο 2-πλάσιο σεισμό BSC. Ο μεμονωμένος κίονας 1 διασώζεται (πολυσπόνδυλοι κίονες).



Εικόνα 292:Κατάρρευση της ανωδομής των τριών κιόνων 2, 3 και 4 και του μεμονωμένου κίονα 1 στο 2-πλάσιο σεισμό BSC (μονολιθικοί κίονες)..



Εικόνα 293:Κατάρρευση τμήματος του συμπλέγματος των τριών κιόνων 2, 3 και 4 στο 2-πλάσιο σεισμό TAB. Ο μεμονωμένος κίονας 1 διασώζεται (μονολιθικοί κίονες).

Συμπερασματικά, το μνημείο δε καταρρέει σε καμία μελέτη που να ήταν κανονικοποιημένο το φάσμα του Ευρωκώδικα, παρότι σημειώθηκαν σε αρκετές περιπτώσεις μεγάλες μέγιστες μετατοπίσεις (10cm έως 20 cm).

Ακολουθεί στο παράρτημα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας η πλήρης έκθεση σχετικά με τη δομοστατική επάρκεια των κιόνων που έγινε βάση του μοντέλου Διακριτών στοιχείων.

Βιβλιογραφία

1. *Wenderhorst R., «Δομικά Υλικά». Αθήνα, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδα, 1981, σελ 168-285.*
2. *Chesterman, C.W.. Lowe, K.E. (2008). Field guide to North American rocks and minerals. Toronto: Random House of Canada.*
3. *Dyar, M.D.. Gunter, M.E. (2008). Mineralogy and Optical Mineralogy. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America.*
4. *Busbey, A.B.. Coenraads, R.E.. Roots, D.. Willis, P. (2007). Rocks and Fossils. San Francisco: Fog City Press.*
5. *Blatt, Harvey; Tracy, Robert J. (1996). Petrology (2nd ed.). W. H. Freeman.*
6. *Bucher, Kurt; Grapes, Rodney (2011), Petrogenesis of Metamorphic Rocks, Springer, pp. 23–24,*
7. *Blatt, Harvey and Robert J. Tracy, Petrology, W.H.Freeman, 2nd ed., 1996, p.355*
8. *Fisher, R. V. & Schmincke H.-U., (1984) Pyroclastic Rocks, Berlin, Springer-Verlag.*
9. *Wicander R. & Munroe J. (2005). Essentials of Geology. Cengage Learning. pp. 174–177.*
10. *E.W.Winkler, "Stone properties, durability in Man's environment", Springer-Verlag 1975.*
11. *Χ.Χ.Τσακίρογλου, «Βελτιωμένη μέθοδος ανάλυσης της πορώδους δομής διαπερατών στερεών», Πάτρα 1990.*
12. *Π. Θεουλάκης, «Μελέτη των αιτιών και των μηχανισμών διάβρωσης του ψαμμίτη του κάστρου και της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου», Αθήνα 1993.*
13. *P.Carydis, M.Tsipoura, o. Vagelatou, "The engineering behavior in reference ti the petrological study of the building materials of the Knight Palace.", Patra 1988.*
14. *Καθ. Α. Μοροπούλου, Επιστημονικές ημερίδες για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς: «Προβλήματα φθοράς και παθολογίας μνημείων: Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης Ι, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης : κριτήρια, μεθοδολογία και τεχνικές αποτίμησης και σχεδιασμού», Αθήνα*
15. *Καθ. Α. Μοροπούλου, Επιστημονικές ημερίδες για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς: «Προβλήματα φθοράς και παθολογίας μνημείων: Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης Ι, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης : κριτήρια, μεθοδολογία και τεχνικές αποτίμησης και σχεδιασμού», Αθήνα 2014.*
16. *Καθ. Α. Μοροπούλου, «Περιβαλλοντικά αίτια, Φαινόμενα φθοράς και μηχανισμοί φθοράς, Σχέση φθοράς και παθολογίας», ανοικτά ακαδημαϊκά μαθήματα.*
17. *Καθ. Α. Μοροπούλου, «Evaluation Methodology», σημειώσεις μαθήματος 2.3 ΔΙΠΜΣ Προστασία Μνημείων.*
18. *Elisa Fain, " Comprtamento e durarbilita delle «strutture miste» in area archeolica. Il Tempio Di Apollo Pizio D Rodi", 2015*
19. *E. LEKKAS, D. SAKELLARIOU, S. LOZIOS, "Observations on the action of geologically induced hazards in the ancient town of Rhodes (Greece)",*
20. *A. MOROPOULOU (a cura di), Proceedings of 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, (Rodi, 6-11 Maggio 1997), Technical Chamber of Greece, Atene, 1997, pp. 239-246.*
21. *M. SEGRE, L'Oracolo di Apollo Pythaeus a Rodi, in «La Parola del Passato», n. 4, 1949, pp. 72-82.*
22. *Mario Paolini che rappresentano la sezione longitudinale e la pianta del Tempio di Apollo dopo lo scavo datati al 1938 (ASAIA, Fondo Paolini, p 217 -211).*
23. *W. HOEPFNER, Zur Gründüngund zur Architektur von, in «Ρόδος 2400 χρόνια», Atti del convegno internazionale (Rodi, 24-29 Ottobre 1993), p 51-58.*

24. *R. CECCHI (a cura di), Roma Archæologia, cit., p. 40.*
25. *M. LIVADIOTTI, G. ROCCO, «La presenza italiana nel Dodecaneso...», cit., p. 64.*
26. *Καθ. Α. Μοροπούλου, Ν.Π. Αβδελίδης, Μ. Καρόγλου, Ε. Αγγελακοπούλου, «Τυποποίηση και πρότυπα για έλεγχο ποιότητας στις κατασκευές με μη καταστρεπτικές μεθόδους».*
27. *Καθ. Α. Μοροπούλου, «Πρότυπα, μεθοδολογία και τεχνικές για τον ολικό έλεγχο ποιότητας στις κατασκευές και τα έργα υποδομών με μη καταστρεπτικές μεθόδους».*
28. *Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. Χημικών Μηχ: «Δομικά Υλικά»*
29. *A. Moropoulou, A. Bakolas, S. Anagnostopoulou, « Composite materials in ancient structures», Cement and Concrete Composites, Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 295–300.*
30. *Beatrice Faggiano, Anna Marzo, Federico M. Mazzolani «The Diplomatic Hall of the Royal Palace of Naples: Structural characterization of the timber roof by in situ NDT investigations».*
31. *S Piro, D Peloso, R Gabrielli, «Integrated geophysical and topographical investigation in the territory of Ancient Tarquinia", (Viterbo, central Italy), Archaeological Prospection, Italy 2007.*
32. *Michael A Sutton1, Ning Li1, "Metrology in a scanning electron microscope: theoretical developments and experimental validation". Measurement Science and Technology, Volume 17, 2006.*
33. *Skramtaev B.G-Leshchinsky M.Y «Complex methods of NDT of concrete in constructions and structural works».*
34. *Δρ Κων/νος Γ Τρέζος «Εκτίμηση της επιτόπου αντοχής του σκυροδέματος» Εργαστήριο Ωπλισμένου σκυροδέματος ΕΜΠ.*
35. *N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, « Emissivity considerations in building thermography», Energy and Buildings,Volume 35, Issue 7, August 2003, Pages 663–667.*
36. *Maierhofer, M. Röllig, J. Schlichting. «Active thermography for evaluation of reinforced concrete structures C».*
37. *Ngoc Tan Nguyen, Zoubir-Mehdi Sbartaï, Jean-François Lataste, Denys Breysse, Frédéric Bos. «Assessing the spatial variability of concrete structures using NDT techniques – Laboratory tests and case study» Construction and Building Materials, Volume 49, Pages 240-250, December 2013.*
38. *Anonymous, "CIE L* a * b* Color Scale», HunterLab, Applications Note, Vol. 8, No. 7, 2007*
39. *Arthur D. Broadbent "Colorimetry Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry", 2006. A.* Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, «Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques», Thermochimica Acta Volumes 269–270, 20 December 1995, Pages 779–795.
40. Bhadeshia H.K.D.H. "Thermal analyses techniques. Differential thermal analysis". University of Cambridge, Material Science and Metallurgy.
41. Robert Bud, Deborah Jean Warner. Instruments of Science. pp. 170–171.
42. Ramachandran V.S. "Applications of differential thermal analysis in cement chemistry". Chap. V, Chemical Publishing Co., Inc., New York (1969).
43. Journal of Molecular Structure, Volume 1128, Pages 520-533 «Synthesis, XRD crystal structure, spectroscopic characterization (FT-IR,), DFT studies, chemical

reactivity and bond dissociation energy studies using molecular dynamics simulations and evaluation of antimicrobial and antioxidant activities of a novel*»,2017.*

44. Αδαμόπουλος, Ε., "Γεωμετρική τεκμηρίωση στο πλαίσιο ολοκληρωμένης διαγνωστικής μελέτης του Αρχαίου Ναού του Πυθίου Απόλλωνα στη Ρόδο", Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τομέας Επιστήμης & Τεχνικής των Υλικών, ΣΧΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2017 .
45. *Bodhisatwa Hazra, Atul Kumar Varma, Anup Kumar Bandopadhyay, Sanchita Chakravarty, John Buragohain, Suresh Kumar Samad, Amal Kishore Prasa «FTIR, XRF, XRD and SEM characteristics of Permian shales, India» Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 32, May 2016, Pages 239-255.*
46. *Antonia Moropoulou, Asterios Bakolas, Eleni Aggelakopoulou, « Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis», Thermochimica Acta, Volume 420, Issues 1–2, 1 October 2004, Pages 135–140.*
47. *Β. Μπουγιούρη, 2009, 16ο Συνέδριο σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ: «Διαγνωστικός έλεγχος υλικών και φθοράς – Υλικά επεμβάσεων συντήρησης σε κτήριο Αρχιτεκτονικής κληρονομιάς από φέρουσα λιθοδομή και οπλισμένο σκυρόδεμα. Η βιομηχανία ΕΜΑΓΕ στην ΚΕΑ», Πάφος Κύπρου*
48. *A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, «Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques», Thermochimica Acta Volumes 269–270, 20 December 1995, Pages 779–795.*
49. *P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, A. Moropoulou, « Physico-chemical study of Cretan ancient mortars», Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 5, May 2003, Pages 651–661.*
50. *A. Moropoulou, A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, « Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries», Cement and Concrete Composites, Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 289–294.*
51. *Σαλμάς, Εθνικό κέντρο Τεκμηρίωσης: «Χαρακτηρισμός πορωδών υλικών:Development of novel calculation methods for pore structure analysis and evaluation». C Cardell, F Delalieux, K Roumpopoulos, A Moropoulou, F Auger, R Van Grieken, « Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France», Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 3, April 2003, Pages 165–179.*
52. *Dasiou, M.E., Mouzakis, H.P., Psycharis, I.N., Papantonopoulos, C., Vayas, I. (2009a) Experimental Investigation of the Seismic Response of Parts of Ancient Temples, Prohitech Conference, Rome, 21-24 June.*
53. *Dasiou, M.E., Psycharis, I.N., Vayas, I. (2009b) Verification of Numerical Models Used for the Analysis of Ancient Temples", Prohitech Conference, Rome, 21-24 June.*
54. *European Strong Motion Database, http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm*
55. *Mouzakis, H., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Carydis, P. G., Papantonopulos, C. and Zambas, C. (2002) Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 1681-1698.*
56. *NGA (New Generation Attenuation) Strong Motion Database, http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html*
57. *Papantonopoulos, C., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Lemos, J.V. and Mouzakis, H. (2002) Numerical prediction of the earthquake response of classical*

columns Using the Distinct Element Method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 1699-1717.

58. *Psycharis I. N. (1990) Dynamic Behaviour of Rocking Two-Block Assemblies, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 555-575.*
59. *Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y. and Alexandris, A. (2000) Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 1093-1109.*
60. *Psycharis, I. N. (2007) A Probe into the Seismic History of Athens, Greece from the Current State of a Classical Monument, Earthquake Spectra, 23(2), 393-415.*

Παράρτημα

Μοντέλο Διακριτών Στοιχείων και Ανάλυση.

Πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της δομοστατικής επάρκειας των κιόνων με τη χρήση μοντέλου Διακριτών στοιχείων (FEM) *και συντάχθηκε η παρακάτω έκθεση* από τον καθ. Ιωάννη Ψυχάρη στο *Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.*

Σεισμική απόκριση αρχαίων μνημείων

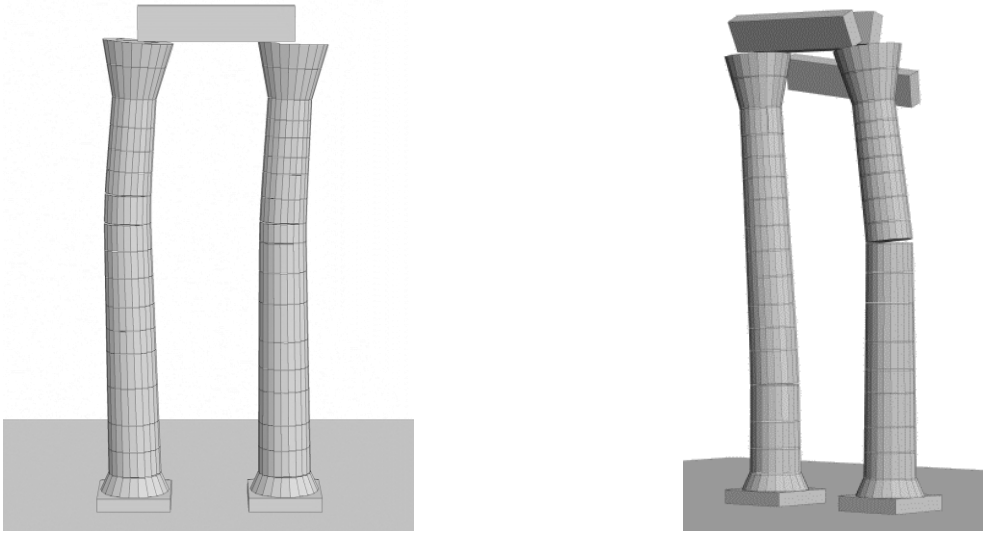
Τα αρχαία μνημεία αποτελούνται από ανεξάρτητους δομικούς λίθους (σπονδύλους στην περίπτωση των κιόνων), οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο χωρίς συνδετικό υλικό, γι' αυτό συμπεριφέρονται ως σπονδυλωτές κατασκευές. Σε ένα ισχυρό σεισμό, τα επιμέρους δομικά στοιχεία μπορούν να λικνίζονται και/ή να ολισθαίνουν μεταξύ τους, ανεξάρτητα ή σε ομάδες. Σε περιπτώσεις κιόνων και κιονοστοιχιών, ο λικνισμός αποτελεί τη δεσπόζουσα μορφή ταλάντωσης ενώ η ολίσθηση των σπονδύλων περιορίζεται συνήθως στο ανώτερο τμήμα των κιόνων, όπου αναπτύσσονται σημαντικές επιταχύνσεις ικανές να υπερνικήσουν τις δυνάμεις τριβής.

Υπάρχουν πολλές μορφές ταλάντωσης ενός πολυσπόνδυλου κίονα. Για παράδειγμα, μπορεί να συμβεί άνοιγμα αρμών ταυτόχρονα σε πολλούς σπονδύλους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(α), ή να ανοίξουν οι αρμοί σε ορισμένες μόνο θέσεις και ολόκληρα τμήματα του κίονα να συμπεριφέρονται ως να ήταν μονολιθικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(β).

Η σεισμική απόκριση των αρχαίων μνημείων είναι πολύπλοκη, μη-γραμμική και πολύ ευαίσθητη ακόμη και σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων που αφορούν στη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης. Τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών, τόσο θεωρητικών όσο και πειραματικών, δείχνουν ότι η απόκριση των κλασικών μνημείων σε σεισμικές διεγέρσεις (και επομένως και ο κίνδυνος κατάρρευσης) επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες: (α) από τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής κίνησης και (β) από το μέγεθος της κατασκευής. Όσον αφορά την περίοδο της εδαφικής κίνησης, η απόκριση μεγαλώνει σχεδόν εκθετικά όσο η περίοδος μεγαλώνει. Έτσι, ενώ ένα μνημείο μπορεί να έχει πολύ μικρή παραμόρφωση σε έναν υψίσυχνο σεισμό, είναι πιθανόν να καταρρεύσει σε ένα πολύ μακροπερίοδο σεισμό με την ίδια ή μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση. Στην πρώτη περίπτωση, η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως σε ολισθήσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων, ενώ στη δεύτερη επικρατεί ο λικνισμός. Όσον αφορά το μέγεθος της κατασκευής, η απόκριση αλλάζει σημαντικά όταν αλλάζουν οι απόλυτες διαστάσεις, ακόμη και εάν διατηρηθεί η ίδια αναλογία διαστάσεων. Γενικώς, κατασκευές μεγάλου μεγέθους είναι περισσότερο ευσταθείς από αντίστοιχες μικρότερου μεγέθους παρόμοιας γεωμετρίας.

Γενικώς, τα κλασικά μνημεία παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη ευστάθεια σε σεισμικά φορτία, παρά τη σπονδυλωτή δομή τους και την έλλειψη οποιουδήποτε συνδετικού υλικού μεταξύ των δομικών λίθων. Η ευστάθειά τους όμως μειώνεται σημαντικά όταν υπάρχουν βλάβες στην κατασκευή, όπως αποτμήσεις τμημάτων σπονδύλων, αποκλίσεις κιόνων από την κατακόρυφο, μετατοπίσεις σπονδύλων, κλπ. Τέτοιες βλάβες είναι συνήθεις σε αρχαία μνημεία και μπορούν να εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους σε περίπτωση κάποιου ισχυρού μελλοντικού σεισμού. Γι' αυτό και το γεγονός ότι ένα μνημείο έχει επιβιώσει για τόσο

μεγάλο χρονικό διάστημα δεν αποτελεί εγγύηση ότι δεν θα κινδυνεύσει και σε μία μελλοντική, ισχυρή σεισμική δόνηση.



(α) (β)

Σχήμα 1. Σεισμική απόκριση κιόνων: (α) άνοιγμα αρμών σε πολλές θέσεις, (β) άνοιγμα αρμών σε περιορισμένες θέσεις (Psycharis 2007).

Μέθοδοι ανάλυσης

Λόγω της πολύπλοκης και μη-γραμμικής σεισμικής συμπεριφοράς των αρχαίων μνημείων, ο υπολογισμός της απόκρισής τους σε σεισμικές διεγέρσεις μπορεί να γίνει μόνο με χρήση κατάλληλων λογισμικών προγραμμάτων, τα οποία μπορούν να λάβουν υπόψη τους το λικνισμό και την ολίσθηση των δομικών στοιχείων. Προηγούμενες μελέτες και συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method – DEM) μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκρισή τους. Λόγω όμως της ευαισθησίας της συμπεριφοράς, είναι πολύ σημαντική η χρησιμοποίηση των σωστών παραμέτρων στους αρμούς και η επιλογή των κατάλληλων σεισμικών διεγέρσεων.

Όλες οι αναλύσεις που γίνονται στην παρούσα εργασία βασίζονται σε αριθμητικές επιλύσεις με τον κώδικα 3DEC της εταιρείας Itasca Consulting Group, Inc., ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων και μπορεί να υπολογίσει ικανοποιητικά τη δυναμική απόκριση τέτοιων κατασκευών στο χώρο και το χρόνο. Ο κώδικας έχει επαληθευτεί (Papantonopoulos *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009b) με σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα που αφορούν στη σεισμική απόκριση ενός προσομοιώματος ενός μεμονωμένου κίονα και μιας κιονοστοιχίας τριών κιόνων του Παρθενώνα υπό κλίμακα 1:3 (Mouzakis *et al.* 2002, Dasiou *et al*. 2009a).

Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων

Στις αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης αρχαίων μνημείων για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με πιθανές επεμβάσεις σε αυτά, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθούν σενάρια σεισμικών διεγέρσεων που να είναι συμβατά με τα σεισμοτεκτονικά δεδομένα της περιοχής

και να καλύπτουν όλο το εύρος του αναμενόμενου συχνοτικού περιεχομένου (κυρίως της δεσπόζουσας περιόδου) της εδαφικής κίνησης.

Η επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων είναι μία σημαντική απόφαση σε τέτοιες αναλύσεις, αφού, εάν συμπεριλάβει κανείς διεγέρσεις που δεν είναι πιθανόν να συμβούν μπορεί να οδηγηθεί σε λανθασμένα συμπεράσματα, ενώ εάν περιορίσει πολύ τις πιθανές διεγέρσεις μπορεί να οδηγηθεί σε εξαγωγή συμπερασμάτων που είναι εναντίον της ασφάλειας.

Μεταξύ των παραμέτρων που θα πρέπει κανείς να εξετάσει είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα και η δεσπόζουσα περίοδος της εδαφικής κίνησης καθώς και φαινόμενα κατευθυντικότητας (directivity) σε περιπτώσεις γειτνίασης με ενεργά σεισμικά ρήγματα, παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση αρχαίων μνημείων.

Στην παρούσα εργασία αναλύσεις έγιναν για έξι επιταχυνσιογραφήματα που επιλέχθηκαν από τις βάσεις δεδομένων European Strong Motion Data Base και NGA Strong Motion Data Base, τα οποία έχουν προέλθει από κανονικά ή ανάστροφα ρήγματα και έχουν καταγραφεί σε σκληρό ή βραχώδες έδαφος, είναι επομένως συμβατά με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Ταυτόχρονα, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δεσποζουσών περιόδων.

Τα χαρακτηριστικά των έξι σεισμικών διεγέρσεων που επιλέχθηκαν δίνονται στον Πίνακα 1 με χρονολογική σειρά των σεισμικών γεγονότων ενώ στο Σχήμα 2 δίνονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων συνιστωσών των καταγραφών.

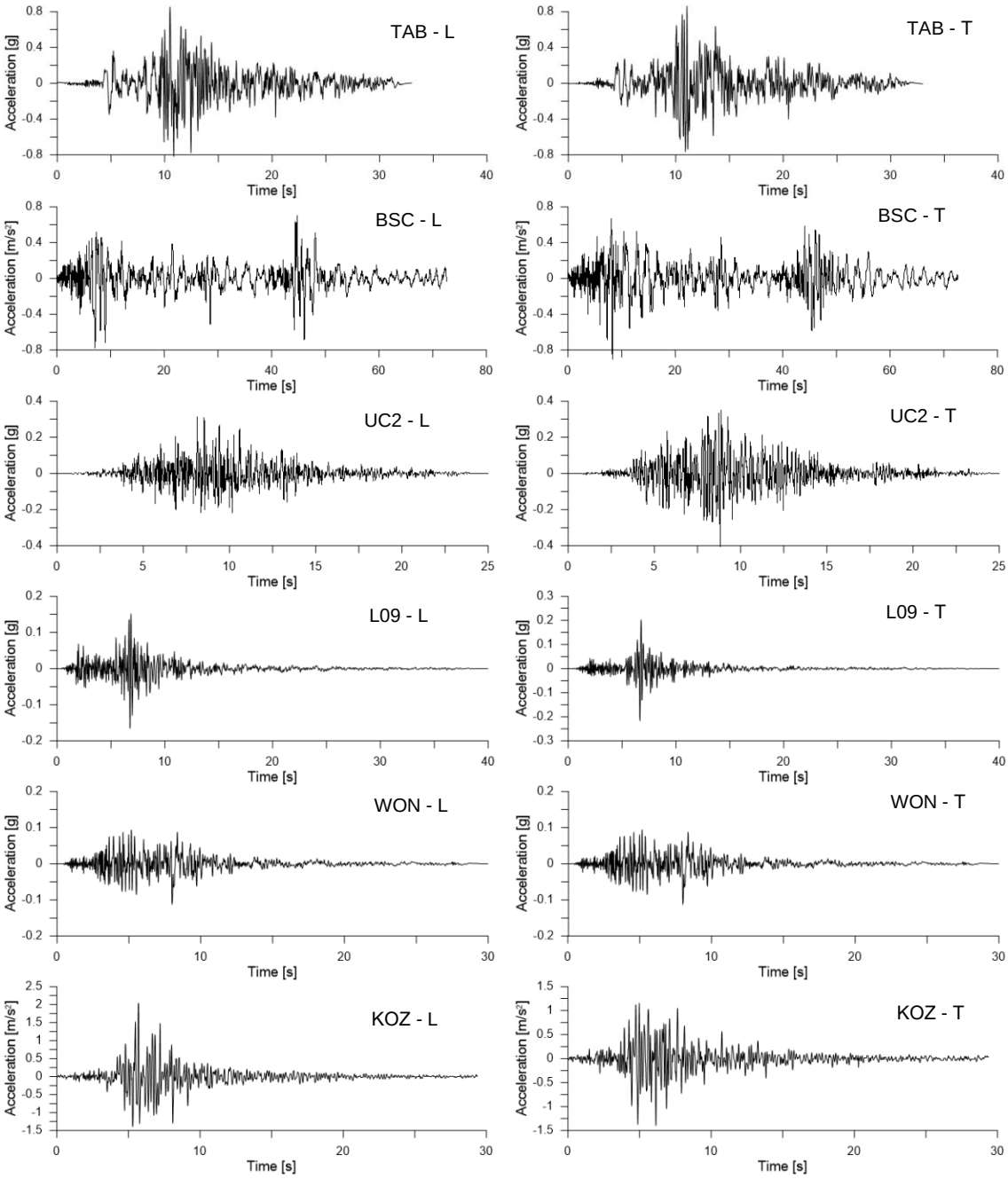
Οι αναλύσεις έγιναν μετά την κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων με κατάλληλο συντελεστή, έτσι ώστε, στην περιοχή περιόδων από 0.4 s έως 2.0 s η διαφορά του φάσματος της συνδυασμένης (SRSS) χρονοϊστορίας των δύο οριζόντιων καταγραφών από το ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για έδαφος κατηγορίας Α και εδαφική επιτάχυνση $\gamma_I a_g$ = 1.2×0.24 g = 0.288 g (για συντελεστή σπουδαιότητας γ_I=1.2) να είναι ελάχιστη. Η μέθοδος αυτή της κανονικοποίησης επελέγη έναντι της προτεινόμενης στον Ευρωκώδικα για το συγκεκριμένο τύπο κατασκευής, ώστε τα φάσματα των διεγέρσεων να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο φάσμα του Ευρωκώδικα στο κρίσιμο εύρος περιόδων T = 0.4 ÷ 2.0 s. Οι συντελεστές κλιμάκωσης που προκύπτουν δίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 1. Σημειώνεται ότι αναλύσεις γίνονται τόσο για τους σεισμούς μετά την κλιμάκωσή τους σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, όσο και για διπλάσιους, οι οποίοι αντιστοιχούν περίπου στο ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα συν μία τυπική απόκλιση.

Τα κανονικοποιημένα φάσματα των σεισμών (μετά την κλιμάκωση) δίνονται στο Σχήμα 3, όπου συγκρίνονται και με το φάσμα του κανονισμού.

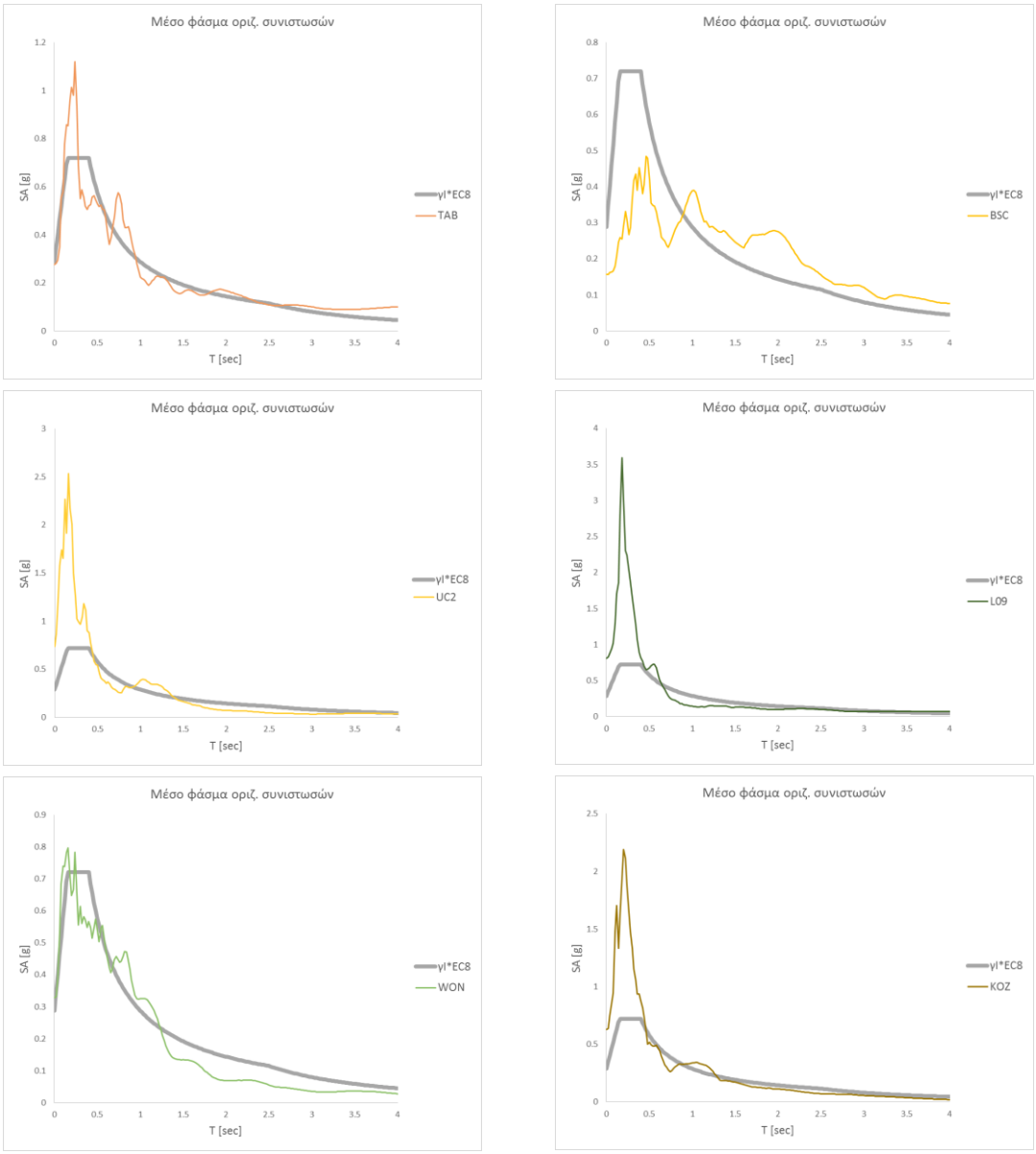
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά σεισμικών διεγέρσεων.

No.	**Σεισμός**	**Ημερ/νία**	M_w	**Καταγραφή**	**Συμβο-λισμός**	**Απόστ. από ρήγμα (km)**	**Έδαφος**	***pga*** **(g)**	T_p[(1)] **(sec)**	**Συντ. κλιμά-κωσης**
1	Tabas Iran	16/09/1978	7.35	Tabas	TAB	2	Rock	L: 0.854 T: 0.862	0.86 4.88	0.322
2	Campano Lugano, Italy	23/11/1980	6.9	Bisaccia	BSC	19	Rock	L: 0.079 T: 0.092	1.02 2.02	1.817
3	Loma Prieta, California	18/10/1989	6.9	UCSC	UC2	12	Rock	L: 0.312 T: 0.406	0.38 2.06	2.036
4	Northridge, California, USA	17/01/1994	6.7	Lake Hughes #9	L09	27	A	L: 0.165 T: 0.217	0.19 0.18	4.209
5	Northridge, California, USA	17/01/1994	6.7	Los Angeles Wonderland Ave.	WON	23	A	L: 0.112 T: 0.172	1.17 0.84	2.259
6	Kozani, Greece	13/05/1995	6.5	Kozani Prefecture Blg.	KOZ	14	A	L: 0.208 T: 0.143	0.23 0.39	3.535

(1) Δεσπόζουσα περίοδος. Αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος ψευδοταχυτήτων για απόσβεση 5%



Σχήμα 2. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των καταγραφών του Πίνακα 1.



Σχήμα 3. Φάσματα επιταχύνσεων (ζ=5%) των καταγραφών του Πίνακα 1 μετά την κλιμάκωσή τους.

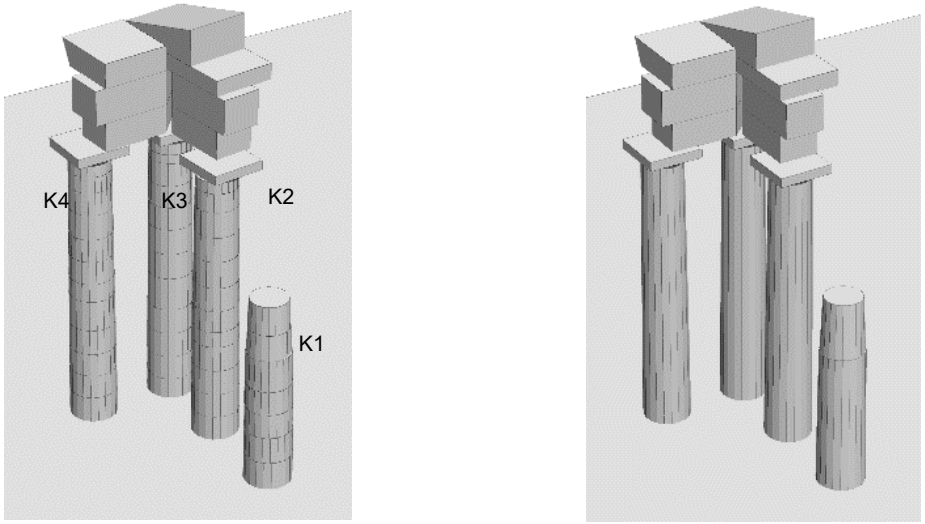
Αριθμητικές αναλύσεις – Αποτελέσματα.

Οι αριθμητικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης βασίστηκαν σε ένα προσομοίωμα του μνημείου που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία. Είναι πιθανόν, λόγω έλλειψης πληροφοριών, κάποιοι λίθοι της ανωδομής να μην έχουν αποδοθεί σωστά. Στο προσομοίωμα δεν ελήφθησαν υπόψη (στην παρούσα φάση) βλάβες. Επιλύσεις έγιναν για δύο περιπτώσεις:

- Πολυσπόνδυλοι κίονες, στους οποίους λήφθηκαν υπόψη οι σπόνδυλοι κάθε κίονα, χωρίς οποιαδήποτε σύνδεση μεταξύ τους.
- Μονολιθικοί κίονες, στους οποίους οι σπόνδυλοι των κιόνων θεωρήθηκαν μολιθικά συνδεδεμένοι μεταξύ τους λόγω του εσωτερικού πυρήνα από Ο.Σ.

Και στις δύο περιπτώσεις, η ανωδομή ήταν ίδια. Η απεικόνηση των δύο μοντέλων φαίνεται στο Σχήμα 4.

Όλες οι επιλύσεις έγιναν με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method) και συγκεκριμένα με χρήση του προγράμματος 3DEC.

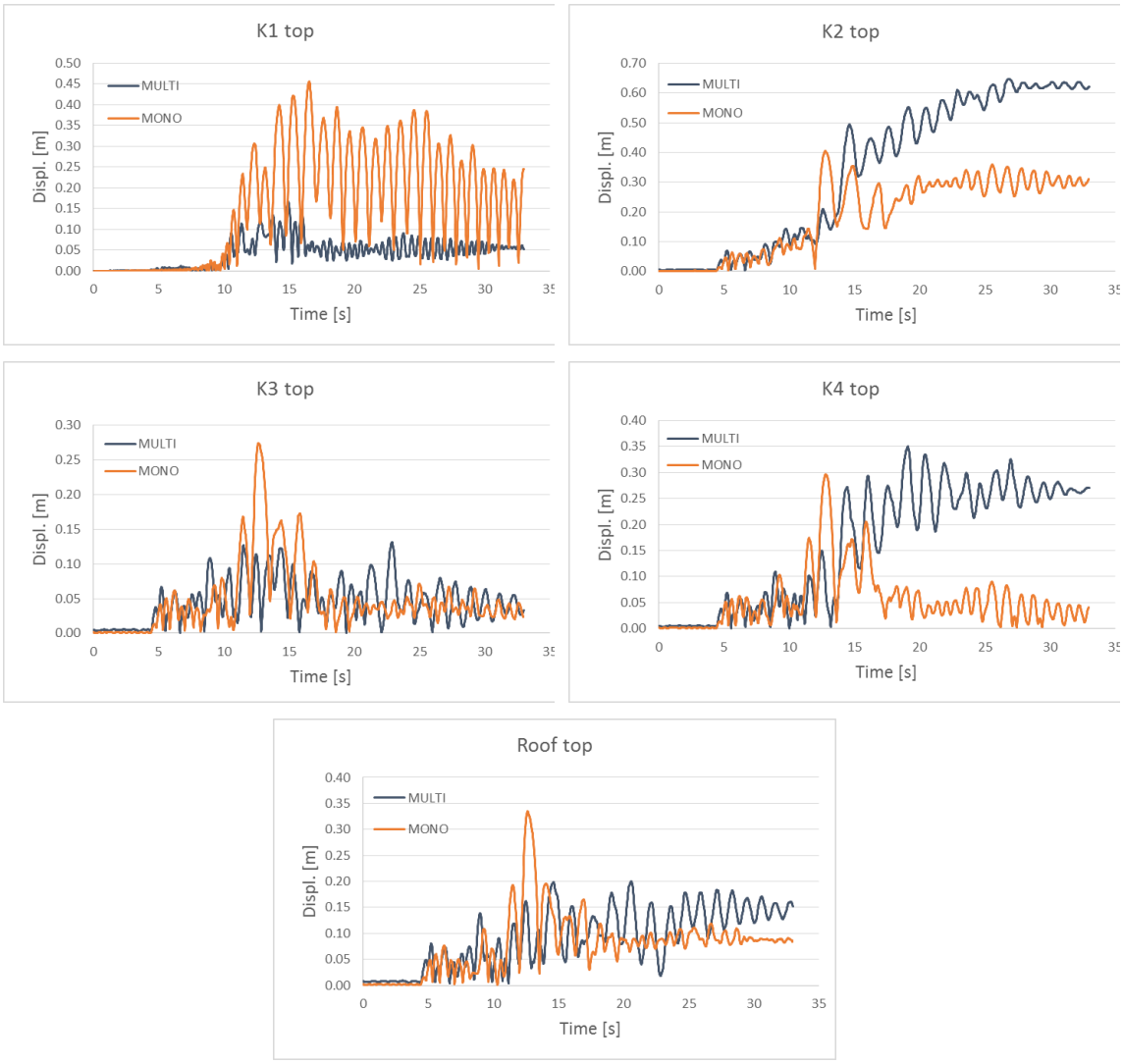


(α) (β)

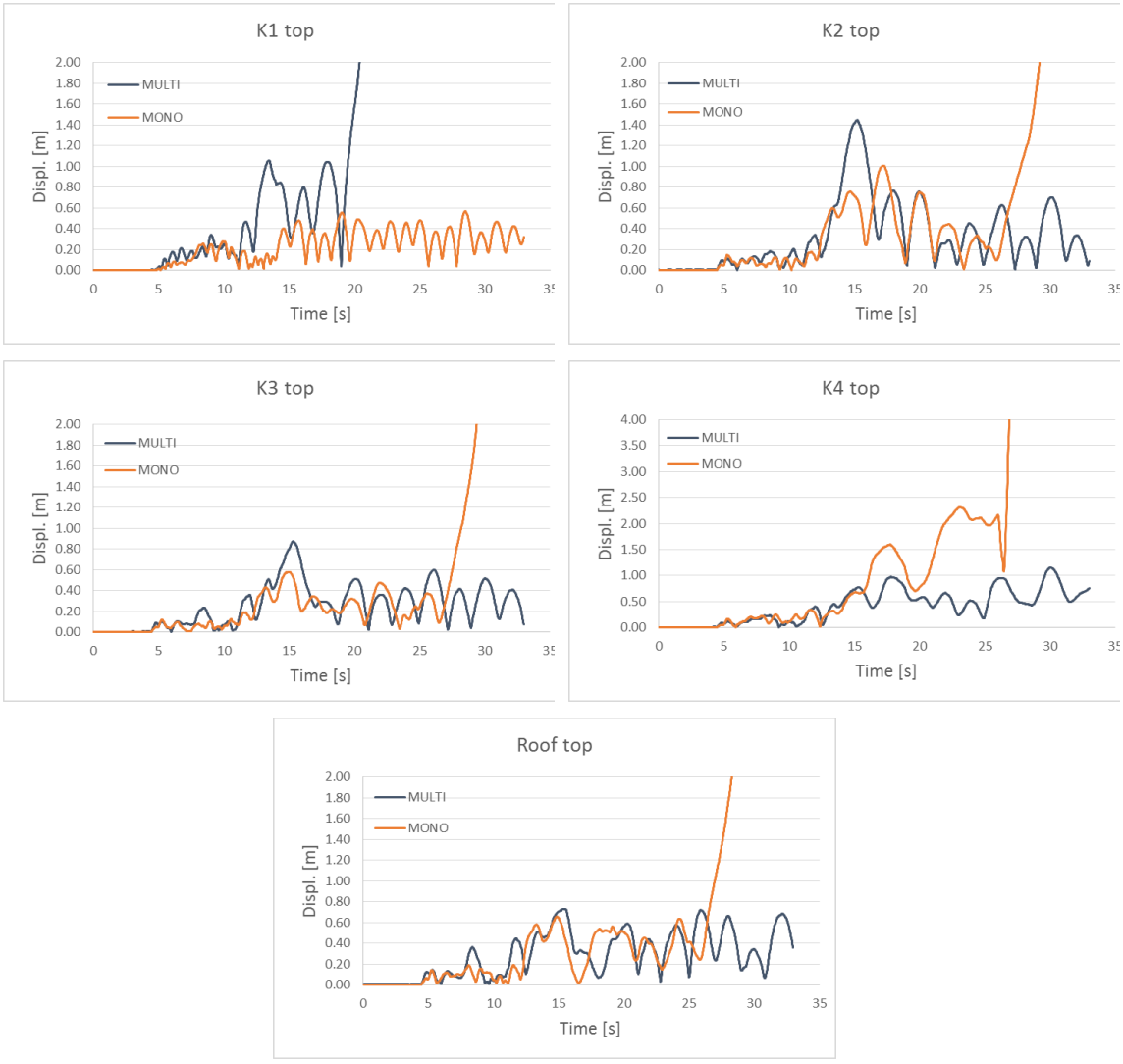
Σχήμα 4. Αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις: (α) πολυσπόνδυλοι κίονες, (β) μονολιθικοί κίονες.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5 έως 16 για τις κανονικοποιημένες διεγέρσεις και για τις διπλάσιες από αυτές. Παρουσιάζονται χρονοϊστορίες της συνισταμένης μετακίνησης $d = (d_x^2 + d_y^2)^{0.5}$ στην κορυφή των κιόνων Κ1, Κ2, Κ3 και Κ4, καθώς και στο πάνω μέρος της ανωδομής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκριτικά για τις δύο περιπτώσεις των πολυσπόνδυλων και των μονολιθικών κιόνων.

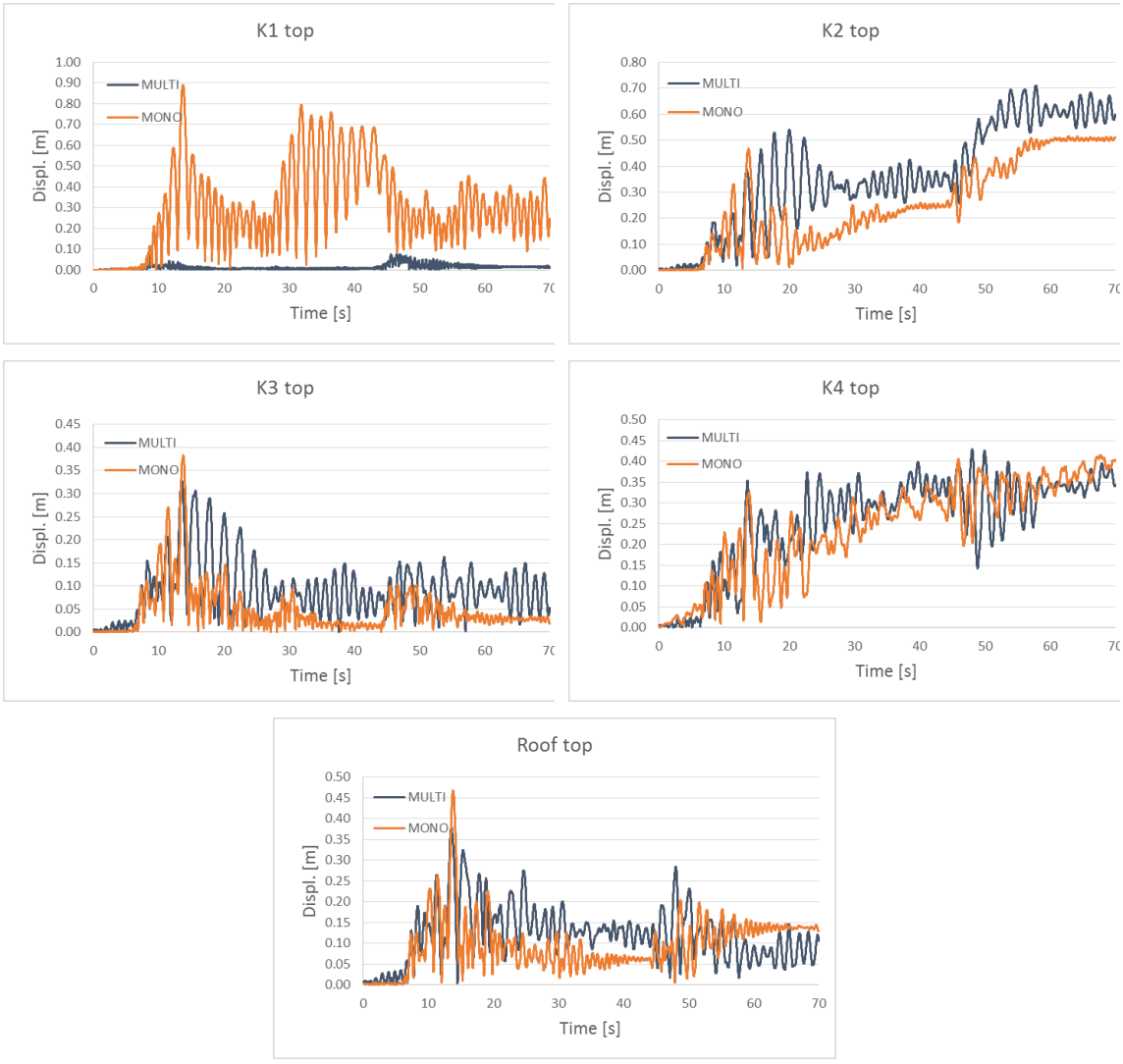
Ενδεικτικές εικόνες καταρρεύσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 17 έως 20.



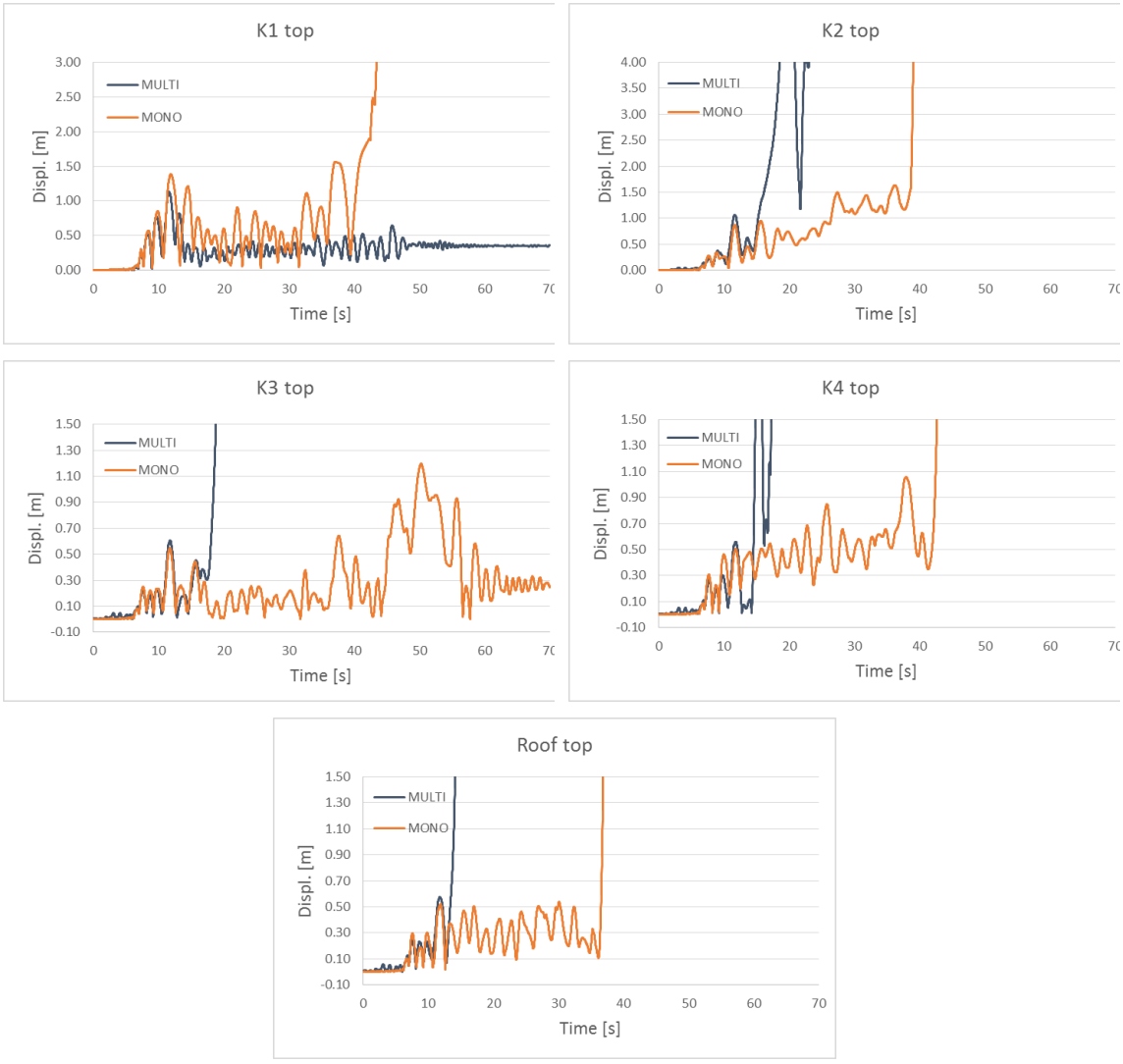
Σχήμα 5. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό TAB για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



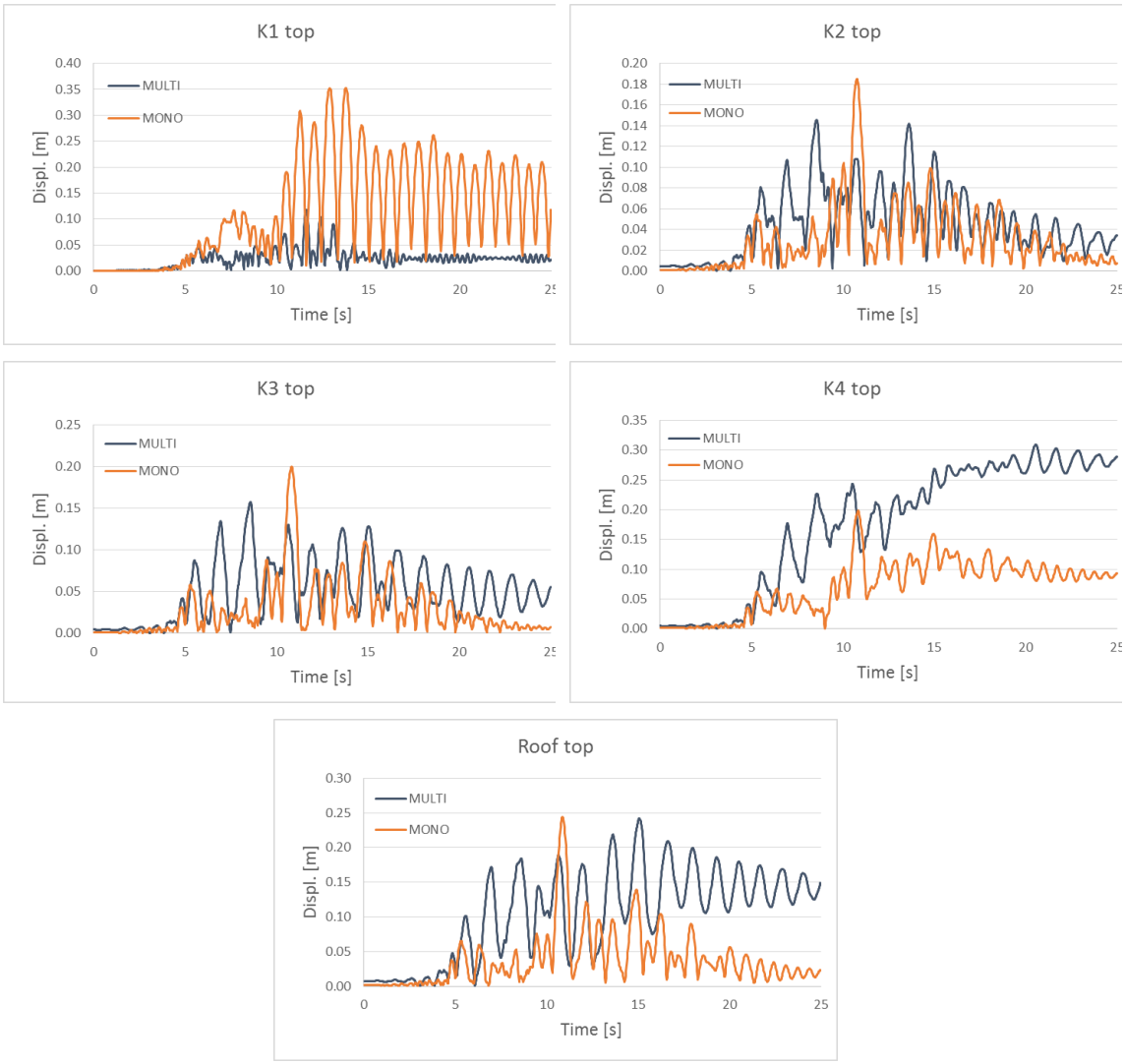
Σχήμα 6. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό TAB για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



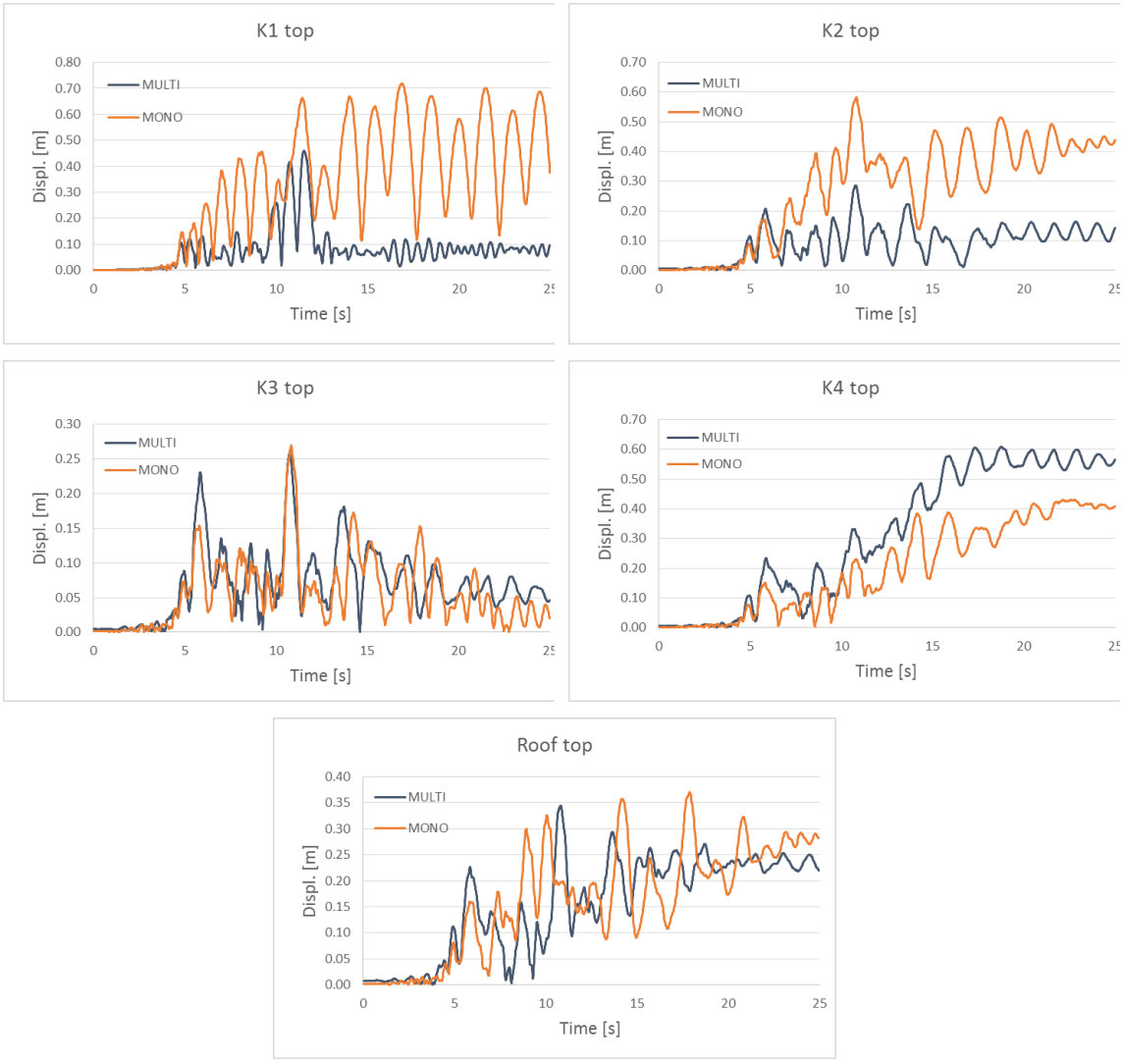
Σχήμα 7. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό BSC για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



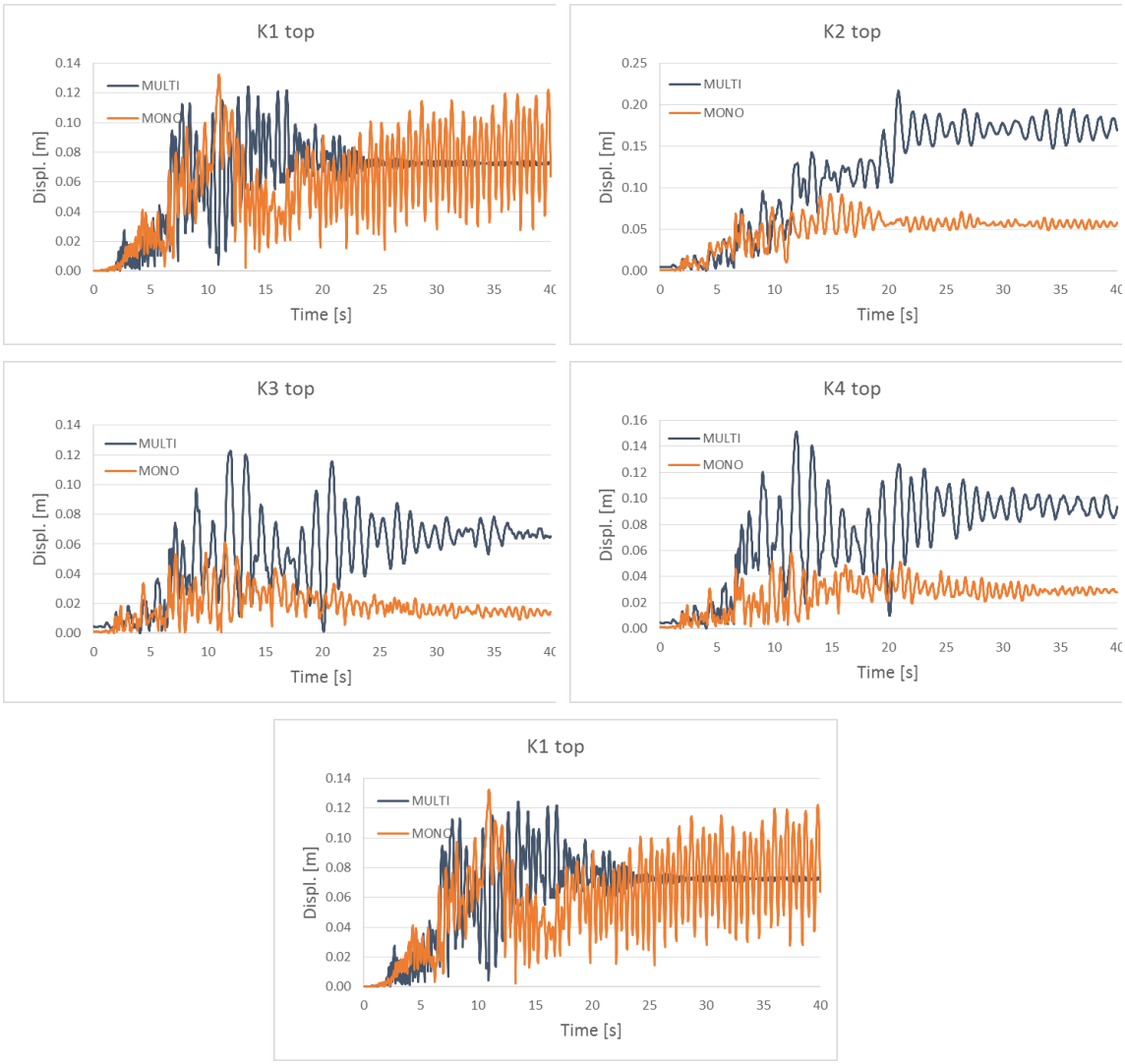
Σχήμα 8. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό BSC για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



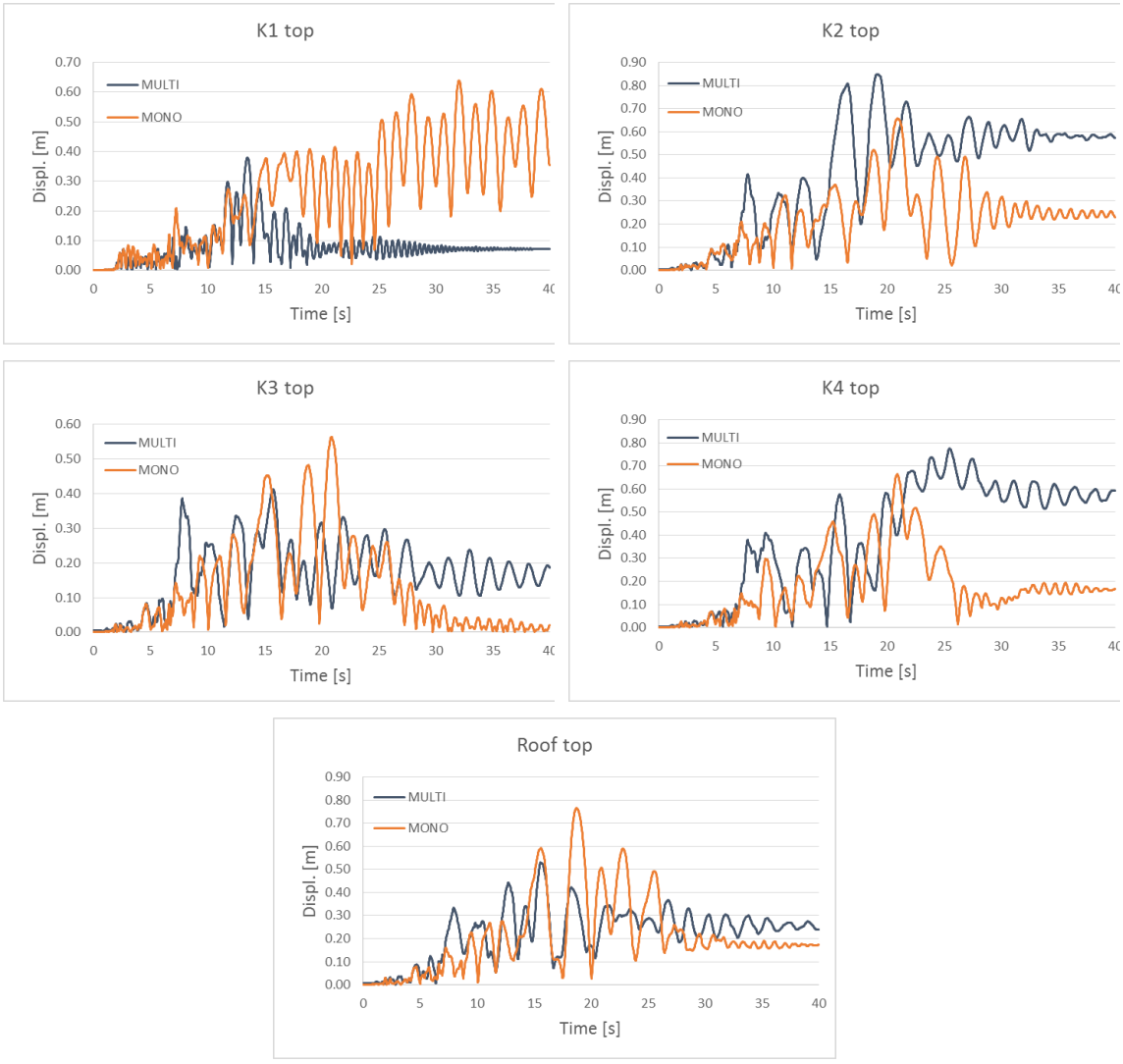
Σχήμα 9. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό UC2 για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



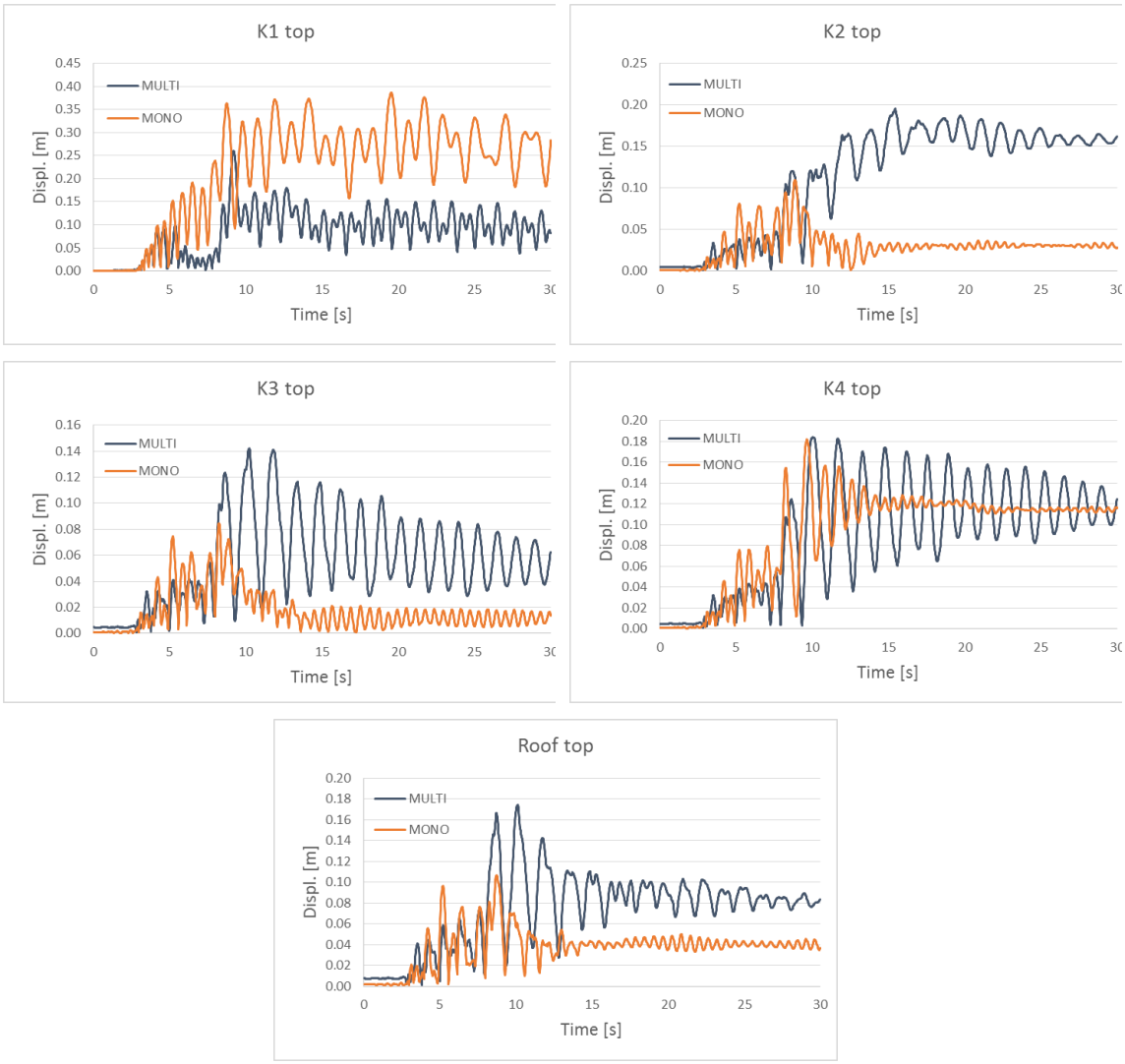
Σχήμα 10. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό UC2 για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



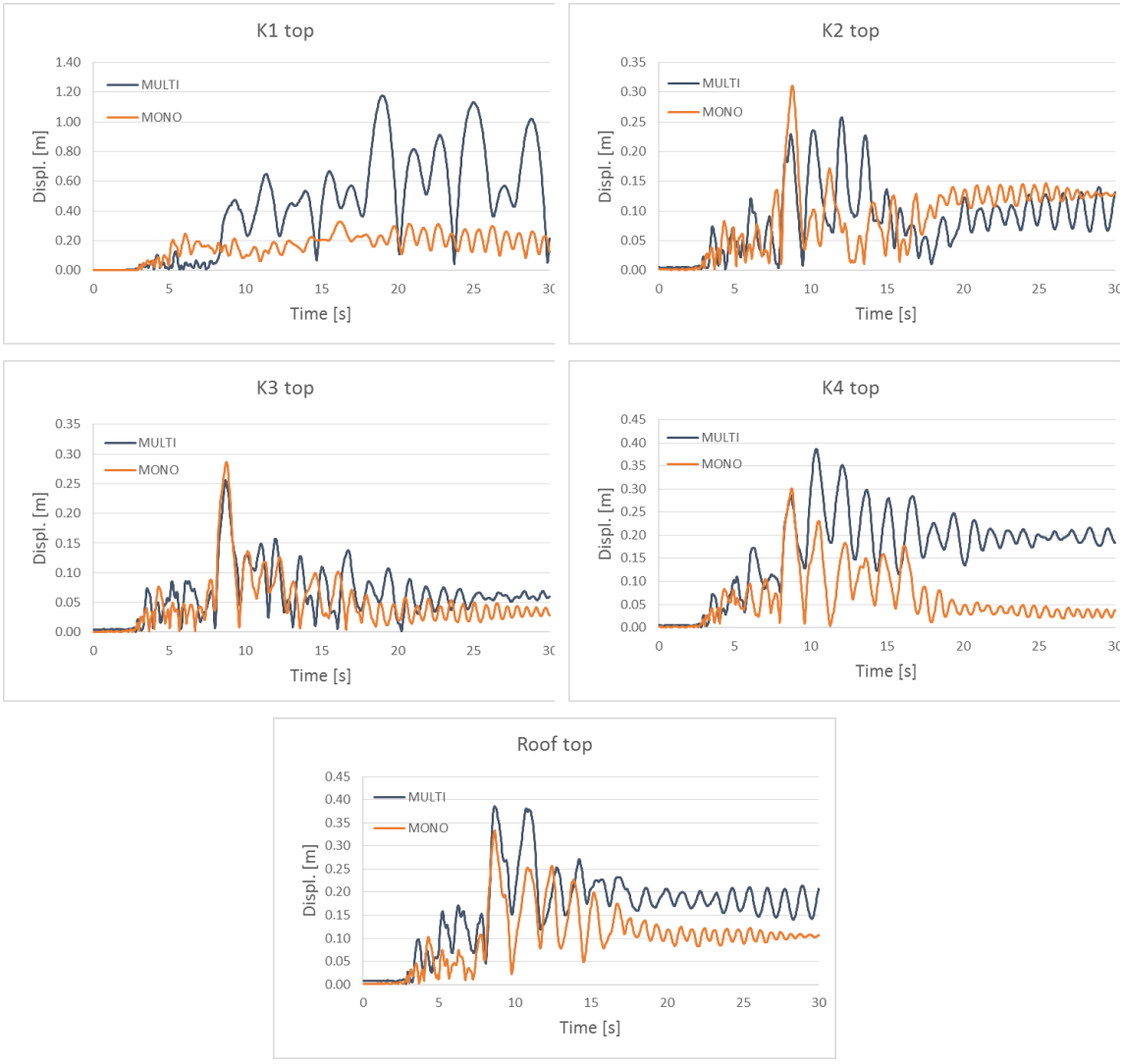
Σχήμα 11. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό L09 για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



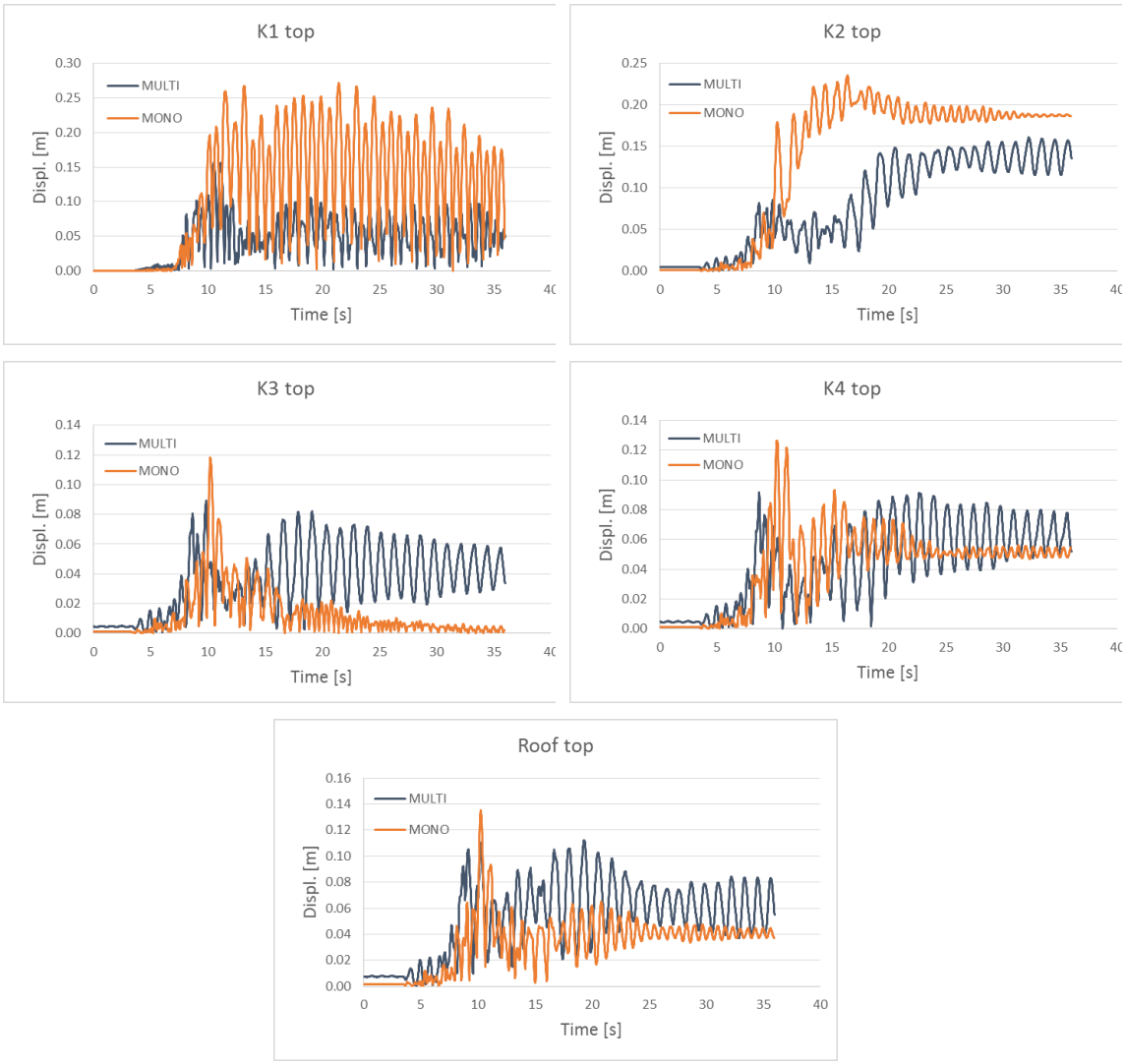
Σχήμα 12. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό L09 για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



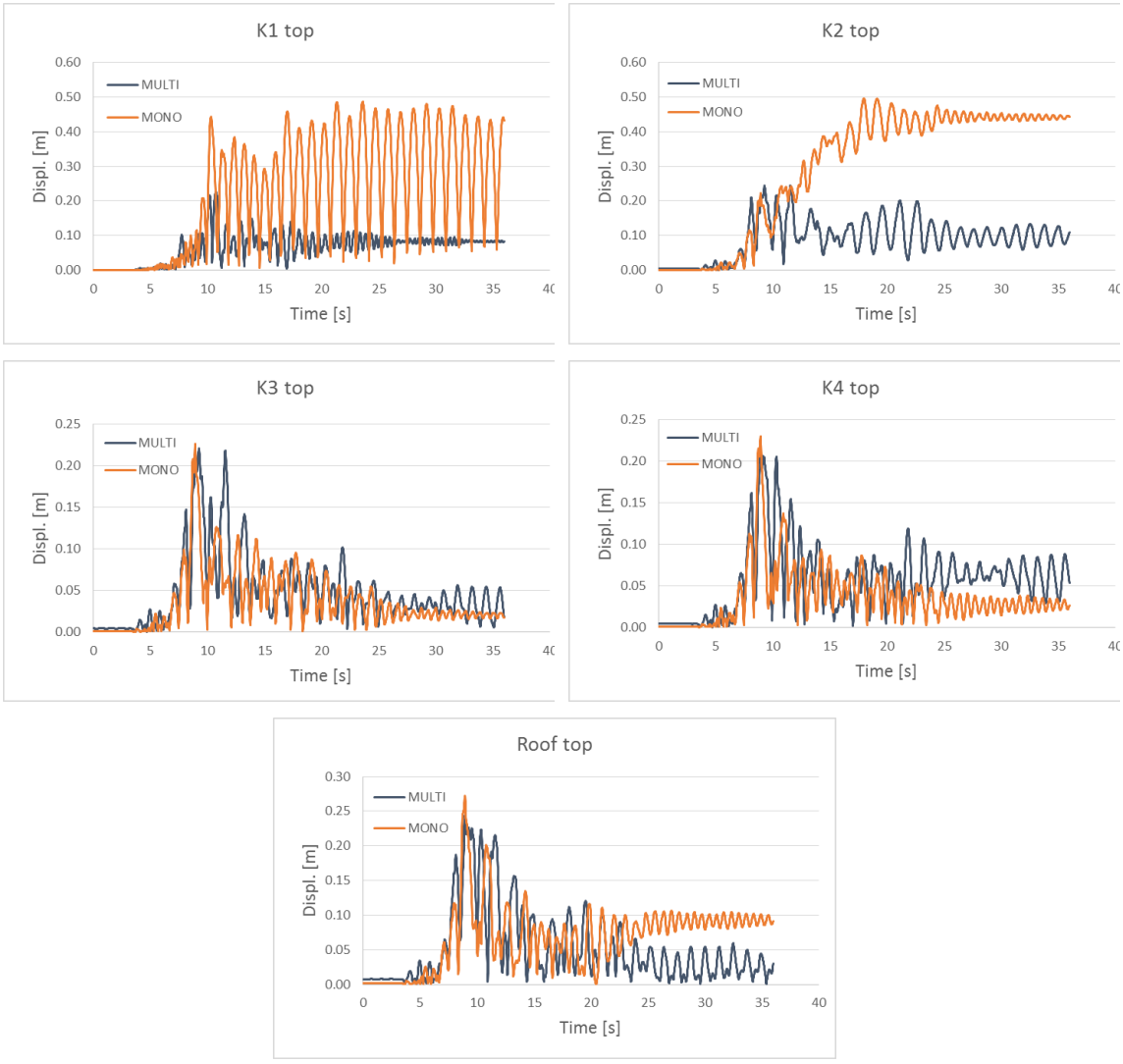
Σχήμα 13. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό WON για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



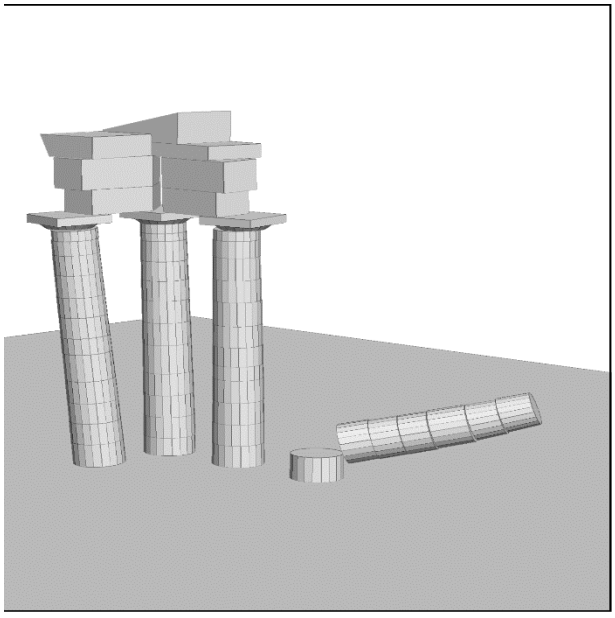
Σχήμα 14. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό WON για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



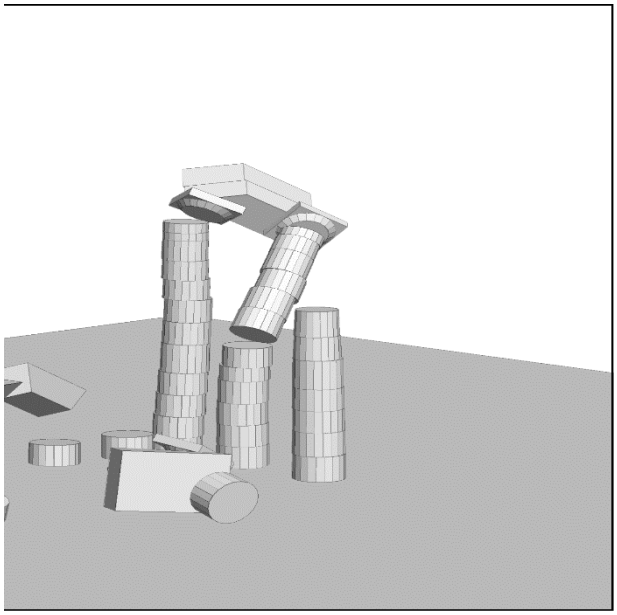
Σχήμα 15. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον κανονικοποιημένο σεισμό KOZ για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



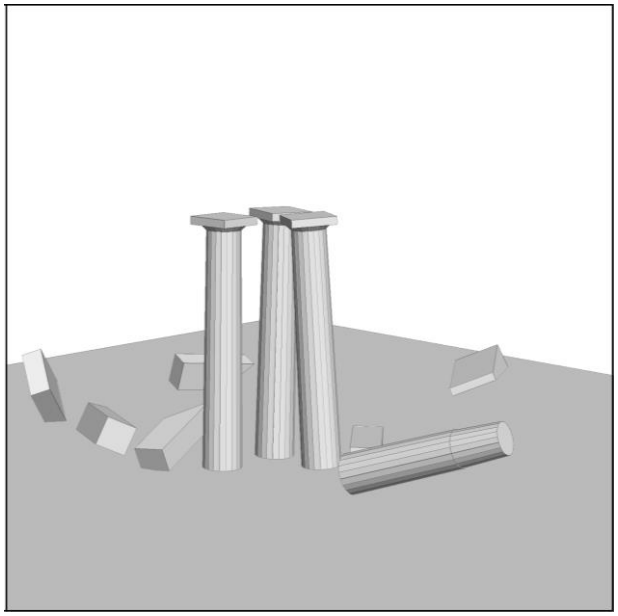
Σχήμα 16. Σύγκριση χρονοϊστοριών μετατοπίσεων στη κορυφή των κιόνων και το άνω μέρος της ανωδομής στον 2-πλάσιο κανονικοποιημένο σεισμό KOZ για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες.



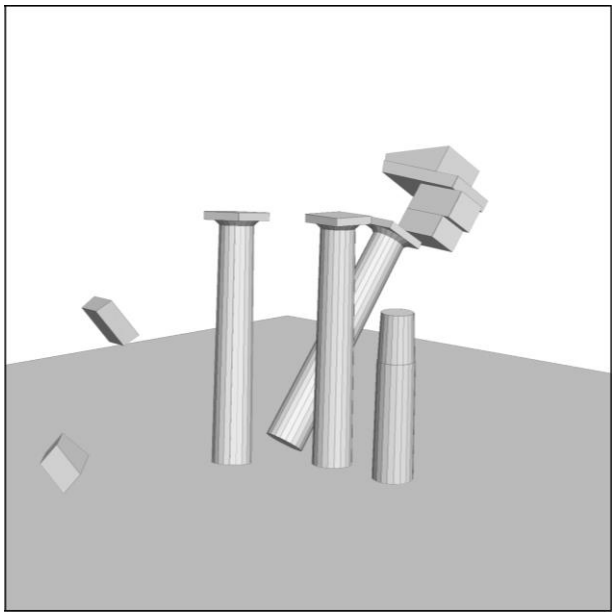
Σχήμα 17. Κατάρρευση του μεμονωμένου κίονα Κ1 στο 2-πλάσιο σεισμό TAB (πολυσπόνδυλοι κίονες).



Σχήμα 18. Κατάρρευση του συμπλέγματος των τριών κιόνων Κ2, Κ3, Κ4 στο 2-πλάσιο σεισμό BSC. Ο μεμονωμένος κίονας Κ1 διασώζεται (πολυσπόνδυλοι κίονες).



Σχήμα 19. Κατάρρευση της ανωδομής των τριών κιόνων K2, K3, K4 και του μεμονωμένου κίονα K1 στο 2-πλάσιο σεισμό BSC (μονολιθικοί κίονες).



Σχήμα 20. Κατάρρευση τμήματος του συμπλέγματος των τριών κιόνων K2, K3, K4 στο 2-πλάσιο σεισμό TAB. Ο μεμονωμένος κίονας K1 διασώζεται (μονολιθικοί κίονες).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των επιλύσεων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όσον αφορά τον μεμονωμένο κίονα Κ1, η απόκρισή του στις σεισμικές διεγέρσεις που εξετάστηκαν είναι γενικώς περισσότερο έντονη εάν είναι μονολιθικός απ' ό,τι εάν είναι πολυσπόνδυλος.
- Στην περίπτωση του συμπλέγματος των τριών κιόνων Κ2, Κ3 και Κ4, η απόκριση είναι γενικώς παρόμοια για πολυσπόνδυλους και μονολιθικούς κίονες. Στους πολυσπόνδυλους κίονες παρατηρούνται μεγαλύτερες μόνιμες μετακινήσεις μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω των ολισθήσεων που συμβαίνουν μεταξύ των σπονδύλων. Πέραν αυτού όμως, δεν μπορούμε να πούμε ότι η σύνδεση των σπονδύλων με τον πυρήνα οπλισμένου σκυροδέματος βελτιώνει τη σεισμική τους συμπεριφορά, αφού σε πολλές περιπτώσεις η μέγιστες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι μεγαλύτερες απ' ό,τι στους πολυσπόνδυλους κίονες.
- Γενικώς, το μνημείο δεν καταρρέει σε κανένα από τους σεισμούς που εξετάστηκαν, κανονικοποιημένο στο φάσμα του Ευρωκώδικα, αν και σε αρκετές περιπτώσεις επιβιώνει με σημαντικές μόνιμες μετατοπίσεις (10 – 20 cm και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη μεγαλύτερες). Εάν οι σεισμοί πολλαπλασιαστούν επί δύο, τότε σε ορισμένους καταρρέει. Υπενθυμίζεται ότι στις αναλύσεις που έγιναν δεν λήφθηκαν υπόψη βλάβες, οι οποίες, γενικώς, μειώνουν σημαντικά την ευστάθεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dasiou, M.E., Mouzakis, H.P., Psycharis, I.N., Papantonopoulos, C., Vayas, I. (2009a) Experimental Investigation of the Seismic Response of Parts of Ancient Temples, *Prohitech Conference*, Rome, 21-24 June.

Dasiou, M.E., Psycharis, I.N., Vayas, I. (2009b) Verification of Numerical Models Used for the Analysis of Ancient Temples", *Prohitech Conference*, Rome, 21-24 June.

European Strong Motion Database, http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm

Mouzakis, H., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Carydis, P. G., Papantonopulos, C. and Zambas, C. (2002) Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 1681-1698.

NGA (New Generation Attenuation) Strong Motion Database, http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html

Papantonopoulos, C., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Lemos, J.V. and Mouzakis, H. (2002) Numerical prediction of the earthquake response of classical columns Using the Distinct Element Method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 1699-1717.

Psycharis I. N. (1990) Dynamic Behaviour of Rocking Two-Block Assemblies, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 555-575.

Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y. and Alexandris, A. (2000) Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 1093-1109.

Psycharis, I. N. (2007) A Probe into the Seismic History of Athens, Greece from the Current State of a Classical Monument, *Earthquake Spectra*, 23(2), 393-415.