



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ»

Β' ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

ΤΟΜΕΑΣ (ΙΙΙ) ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Χαρακτηρισμός ιστορικών κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου
του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα και διερεύνηση πιθανών
κονιαμάτων αποκατάστασης**

Καλοφώνου Μυρτώ

Χημικός Μηχανικός

Επιβλέπων Καθηγητής: Καθ. Αντωνία Μοροπούλου,

Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2019

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

Καθ. Α.Μοροπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. (επιβλέπουσα)

Αν. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

Δρ. Αικ. Δελέγκου, ΕΔΠΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

Δρ. Χ. Παπατρέχας, Υπεύθυνος Ποιότητας Εργ. Λίθος, ΙΓΜΕ

Επιτροπή Εξέτασης

Καθ. Α.Μοροπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π (επιβλέπουσα)

Αν. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

Ομ. Καθ. Γ. Μπατής, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Ομ. Καθ. Στ. Τσίμας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

“To die will be an awfully big adventure.”
— **J.M. Barrie, *Peter Pan and Wendy***

Πρόλογος

Ο σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός και η μελέτη ιστορικών κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα και η διερεύνηση πιθανών κονιαμάτων αποκατάστασης. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση «Υλικά Και Επεμβάσεις Συντήρησης» (Τομέας (III) Επιστήμης Και Τεχνικής Των Υλικών) σε συνέργεια με το έργο της Συντήρησης, Ενίσχυσης και Αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, το οποίο ολοκληρώθηκε και παραδόθηκε πρόσφατα στις τρεις Χριστιανικές Κοινοότητες. Η δειγματοληψία των ιστορικών κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των εργασιών συντήρησης, ενίσχυσης και αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου από την ομάδα αναστηλωτών του έργου και ελήφθησαν εκατόν τέσσερα (104) δείγματα κονιαμάτων από τη δυτική, ανατολική, βόρεια και νότια όψη του μνημείου. Οι μέθοδοι ανάλυσης των ιστορικών κονιαμάτων που πραγματοποιήθηκαν έγιναν στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών Α1 στη σχολή Χημικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η παρασκευή των νωπών κονιαμάτων αποκατάστασης, όπως επίσης και οι μετρήσεις αντοχής θλίψης και κάμψης των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ελέγχου κονιαμάτων του TITAN Α.Ε. στο Καμάρι. Το έργο της Συντήρησης, Ενίσχυσης και Αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα διεξήχθη βάσει της ολοκληρωμένης διεπιστημονικής μελέτης της Διεπιστημονικής Ομάδας του ΕΜΠ με Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου, κατόπιν πρωτοβουλίας της Μακαριότητάς του, Πατριάρχη Ιεροσολύμων, Θεόφιλου ΙΙΙ, με την κοινή συναίνεση των τριών Χριστιανικών Κοινοτήτων. Η Συντήρηση, Ενίσχυση και Αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα ολοκληρώθηκε υπό την ευθύνη της επιστημονικής επιστασίας της Διεπιστημονικής Ομάδας του ΕΜΠ (Καθ. Ε. Κορρές, Καθ. Α. Γεωργόπουλος, Καθ. Α. Μοροπούλου, Καθ. Κ. Σπυράκος, Αν. Καθ. Χ. Μουζάκης) με Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου και τη διαρκή συνεργασία με τους προκαθήμενους των τριών Χριστιανικών Κοινοτήτων: τον Πατριάρχη Ιεροσολύμων, Θεόφιλο ΙΙΙ, τον Κουστωδό της Αγίας Γης του Τάγματος των Φραγκισκανών, Pierbattista Pizzaballa (έως Μάιο 2016), σημερινό Λατίνο Πατριάρχη στα Ιεροσόλυμα, και Fransesco Patton (από Ιούνιο 2016), καθώς και τον Αρμένιο Πατριάρχη στα Ιεροσόλυμα, κ.κ. Nourhan Manougian.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς την κυρία Αντωνία Μοροπούλου, καθηγήτρια της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας, όπως επίσης για την αμέριστη υποστήριξη και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Με τη δική της βοήθεια και καθοδήγηση, από τα προπτυχιακά μου χρόνια έως και σήμερα, απέκτησα τον ενθουσιασμό, τη θέληση και τη γνώση για να αναπτύξω και να ολοκληρώσω το θέμα της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς την Υποψήφια Διδάκτορα κυρία Μαίρη Αποστολοπούλου για τη βοήθειά της κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, δίχως αυτήν δε θα ήταν δυνατή η πραγματοποίησή της. Με την εμπειρία, τη γνώση της και τον πάντα χαρούμενο χαρακτήρα της μου έδωσε τα εργαλεία για να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Οι στιγμές στο εργαστήριο και στο γραφείο της, όπως επίσης, η στήριξη, καθοδήγησή της και οι πολύτιμες συμβουλές της όλα αυτά τα χρόνια θα είναι κάτι που θα έχω για το υπόλοιπο της ζωής μου.

Ακόμη, θα ήθελα να επισημάνω τις σημαντικές υποδείξεις, συμβουλές και την διορατικότητά της Δρ. Αικατερίνη Δελέγκου που με κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης, ο οποίος με βοήθησε να φέρω εις πέρας αυτή μου την εργασία. Την ευχαριστώ πολύ για αυτό. Με την υπομονή και επιμονή της Κατερίνας έγινε εφικτό να λυθούν πολλές από τις απορίες μου, να με καθοδηγήσει σε ένα σωστό τρόπο σκέψης και να μου δώσει όλα τα απαραίτητα εφόδια για να γίνω μία σωστή ερευνήτρια, δε θα ξεχάσω ποτέ τη βοήθειά της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ Νίκο Παναγιώτου για τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις του κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων στο XRD. Ακόμη, αυτή η εργασία δε θα ήταν δυνατόν να διεκπερωθεί χωρίς τη βοήθεια του προσωπικού του εργαστηρίου ελέγχου κονιαμάτων του TITAN A.E. στο Καμάρι. Σημαντική ήταν και η συμβολή του κύριου Αστερίου Μπακόλα. Τον ευχαριστώ πολύ για τη βοήθειά του όσον αφορά τις ποροσιμετρίες Hg και για τις συμβουλές που προσέφερε στους συμφοιτητές μου και εμένα όλα αυτά τα χρόνια στο εργαστήριο A1. Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω ένα θερμό 'ευχαριστώ' στο κύριο Χρήστο Παπατρέχα και το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών για την πολύτιμη βοήθειά τους στην Οπτική Μικροσκοπία. Με την εκπληκτική εμπειρία, μεταδοτικότητα, τον ενθουσιασμό και τον ευχάριστο χαρακτήρα του κύριου Παπατρέχα, καταφέραμε να λύσουμε πολλές από τις απορίες μας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη κυρία Ελένη Ρακαντά για τις συμβουλές της και τη διορατικότητάς της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους συμφοιτητές τους οποίους γνώρισα και με τους οποίους δέθηκα κατά τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος και της εργασίας αυτής. Ένα προς ένα όλα τα παιδιά βοήθησαν το ένα το άλλο για να μάθουμε και να μοιραστούμε εμπειρίες. Μέσω της όμορφης αυτής συνεργασίας εμπλουτίσαμε τόσο τις γνώσεις όσο και τις καρδιές μας. Εδραιώθηκαν καινούριες και παλιές φιλίες. Ελπίζω στο μέλλον ο καθένας από εμάς να βρει το δρόμο του, χωρίς να απομακρυνθούμε σα φίλοι. Νίκη, Μαρίνα, και Γιάννη σας ευχαριστώ πολύ.

Ένα μεγάλο 'ευχαριστώ' οφείλω σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου ηλεκτροχημείας του τομέα ΙΙΙ της σχολής μας. Όλα τα παιδιά προσέφεραν τη βοήθειά τους σε όλο το πέρασ της εργασίας αυτής. Με τη παρέα τους, τις συμβουλές τους και τα λίτρα και λίτρα απιονισμένου νερού που μας προσέφεραν έγινε δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Τους ευχαριστώ από καρδιάς για τη στήριξή τους σε αυτή τη περίοδο της ακαδημαϊκής ζωής μου. Δημήτρη, Γιάννη, Γιώργο και φυσικά κύριε Καραντώνη σας ευχαριστώ πολύ.

Και τέλος, οφείλω ένα μεγάλο 'ευχαριστώ' στους γονείς μου, Άντα και Αντώνη, που με στήριξαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου και που μου έμαθαν όλα όσα χρειαζόμαστε για να γίνω ο άνθρωπος που είμαι σήμερα. Με τη δική τους καθοδήγηση και στήριξη δε θα έκανα τις επιλογές που έχω κάνει μέχρι σήμερα. Οι συμβουλές τους και η υπομονή τους ήταν καταλυτικός παράγοντας για το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας. Σας ευχαριστώ για την αμέριστη στήριξή σας. Και φυσικά δεν ξεχνώ τους φίλους μου που μου συμπαραστάθηκαν ολόψυχα σε όλη την σπουδαστική μου πορεία, που άντεξαν όλες τις συζητήσεις για αυτή την εργασία και για τις όμορφες στιγμές που μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια. Μαρία, Ντέμη σας ευχαριστώ πολύ.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, καθώς και ο σχεδιασμός, η παρασκευή και η μελέτη πιθανών συνθέσεων κονιαμάτων αποκατάστασης για την αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου. Τα εξεταζόμενα ιστορικά κονιάματα ανήκουν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη θέση και τη χρήση τους στο μνημείο: τα κονιάματα συμπλήρωσης και τα κονιάματα αρμολόγησης, τα οποία προέρχονται από όλες τις όψεις του μνημείου και αντιστοιχούν σε διαφορετικά ύψη του δομήματος. Ο προσδιορισμός των μορφολογικών ορυκτολογικών και φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των ιστορικών κονιαμάτων έλαβε χώρα με τη χρήση των παρακάτω τεχνικών: Μικροσκοπία Οπτικών Ινών, Κοκκομετρική Ανάλυση, Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD), Οπτική Μικροσκοπία, Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG-DTA), Δοκιμές Εμβάπτισης σε Νερό για τον Προσδιορισμό του Ολικού Ανοιχτού Πορώδους Προσβάσιμου στο Νερό και του Ποσοστού Ροφημένου Νερού, Χρωματομετρία, Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων (TSS%), pH, καθώς και Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων.

Βάσει των αποτελεσμάτων τα ιστορικά κονιάματα διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: 1) κονιάματα Ασβέστη, 2) Γυψοκονιάματα, 3) μικτά κονιάματα Ασβέστη - Γύψου και 4) κονιάματα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Τα κονιάματα ασβέστη ταξινομούνται περαιτέρω σε τυπικά κονιάματα αερικής ασβέστου, υδραυλικής ασβέστου και ασβέστη-τεχνητής ποζολάνης. Τα δε, κονιάματα ασβέστη με σημαντική περιεκτικότητα πορτλαντίτη εντοπίζονται σε περιοχές του μνημείου που το μικροκλίμα δεν ευνόησε την ενανθράκωση τους. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλά από τα κονιάματα που εξετάστηκαν, εντοπίστηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, σε διάφορα ποσοστά, ανεξαρτήτως κατηγορίας κονιαμάτων. Ο λόγος κονιάς/αδρανών, είναι υψηλός με τιμές αναλογίας που κυμαίνονται σε ευρύ διάστημα [1,25-3,6].

Κατά την εξέταση της μικροδομής των κονιαμάτων παρατηρήθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά, με το ολικό πορώδες προσβάσιμο στο νερό και το ποσοστό του ολικά ροφημένου νερού να κυμαίνονται ανάμεσα σε τιμές μεγάλου εύρους, ωστόσο πάντα σε σχετικά υψηλά ποσοστά. Ο συνδυασμός των υψηλών τιμών του ποσοστού ολικών διαλυτών αλάτων και των διαφορετικών τιμών pH ανάμεσα στα ιστορικά κονιάματα, δικαιολογεί την κακή κατάσταση διατήρησής τους. Το παραπάνω γεγονός σε συνέργεια με ένα έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, υψηλής υγρασίας, όπως αυτό του Ιερού Κουβουκλίου, καθιστά το ιστορικό κονίαμα ως έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος άγει, αλλά και δέχεται τη φθορά που προκύπτει εξαιτίας της ανάπτυξης διαφορετικού δυναμικού στην τοιχοποιία.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν, παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πιθανές συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης για την αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου. Τα κονιάματα αυτά σχεδιάστηκαν σύμφωνα με την αντίστροφη μηχανική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μνημείου (ιστορικά υλικά, περιβάλλον, επιταγές έργου αποκατάστασης, δυναμική και στατική απόκριση). Έτσι, μελετήθηκαν πέντε (5) συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης, τέσσερα κονιάματα ασβέστη με προσθήκη μετακαολίνη, σε διαφορετική ποσοστιαία αναλογία, και ένα κονίαμα ασβέστη με προσθήκη φυσικής ποζολάνης, ενώ εξετάστηκε και ένα εμπορικό κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη χωρίς παρουσία τσιμέντου. Η εμπορική σύνθεση εξετάστηκε με την προσθήκη δύο διαφορετικών ποσοτήτων νερού. Η αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης έγινε με τη χρήση των παρακάτω τεχνικών: Συνεκτικότητα νωπού κονιαμάτος (με τράπεζα εξάπλωσης), Προσδιορισμός Της Φαινόμενης Πυκνότητας νωπού κονιαμάτος, Προσδιορισμός του Συγκρατούμενου Νερού νωπού κονιαμάτος, Μικροσκοπία Οπτικών Ινών, Κοκκομετρική Ανάλυση, Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD), Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (TG-DTA), Προσδιορισμός Αγωγιμότητας και pH, Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων, Ποροσιμετρία Υδραργύρου (MIP), Δοκιμές Εμβάπτισης σε Νερό για τον Προσδιορισμό του Ολικού Ανοιχτού Πορώδους Προσβάσιμου στο Νερό και του Ποσοστού Ροφημένου Νερού, Δοκιμές Τριχοειδούς Αναρρίχησης για το προσδιορισμό του Συντελεστή Τριχοειδούς Αναρρίχησης και του Πορώδους των Τριχοειδών Πόρων των κονιαμάτων, Υπερηχοσκόπηση για το προσδιορισμό της Ταχύτητας Διάδοσης Υπερήχων, Δοκιμές Αντοχών Θλίψης

και Κάμψης, Προσδιορισμός Συρρίκνωσης ή Μεγέθυνσης των κονιαμάτων και Χρωματομετρία. Τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων αποκατάστασης μελετήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης, και πιο συγκεκριμένα στις 14, 28 και 90 ημέρες.

Από την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης προκύπτει ότι η προσθήκη μετακαολίνη σε σχέση με την προσθήκη φυσικής ποζολάνης, προσδίδει υψηλότερες μηχανικές αντοχές, αλλά και βελτιωμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά.

Τέλος, μετά την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης διερευνήθηκε η συμβατότητα και η επιτελεστικότητά τους σε σχέση με τα ιστορικά κονιάματα, όπως επίσης και με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του μνημείου και του έργου, σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής τουλάχιστον 15 MPa
- Πρώιμη ανάπτυξη επαρκών μηχανικών αντοχών
- Γρήγορη κατανάλωση πορτλαντίτη
- Χαμηλός αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας
- Χαμηλός συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης και χαμηλό ποσοστό ροφημένου νερού μέσω ολικής εμβάπτυσης
- Τιμές πορώδους χαρακτηριστικές υδραυλικών κονιαμάτων

Βάσει των ανωτέρων κριτηρίων το εμπορικό κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη προκρίνεται ως το πλέον συμβατό και επιτελεστικό και πιο συγκεκριμένα προτιμάται η σύνθεση με την προσθήκη της χαμηλότερης ποσότητας νερού κατά την παρασκευή. Τέλος, η χρήση ενός εμπορικού κονιάματος εγγυάται την αναπαραγωγισιμότητα του κονιάματος αποκατάστασης σε συνθήκες εργοταξίου, μειώνοντας την περιπλοκότητα και τον χρόνο των εργασιών.

Λέξεις κλειδιά: Ιστορικά Κονιάματα, Κονιάματα Αποκατάστασης, Ιερό Κουβούκλιο, Ιεροσόλυμα, Περίθλαση Ακτίνων Χ, Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση

Abstract

The main goal of this master thesis is the examination and characterization of historic mortar samples from the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre in Jerusalem, as well as the design, production and assessment of possible restoration mortars for the restoration of the Holy Aedicule. The historic mortars that were examined belong to two categories, depending on their use and their location in the structure; they are either filling mortars or joint mortars, from different predefined heights of the monument, selected from all facades.

The following analytical methods were used for the examination of the historic mortar samples in order to determine their morphological, chemical and physical characteristics: Digital Microscopy (FOM), Sieve Analysis (examination of Grain Size Distribution), XRay Diffraction (XRD), Optical Microscopy (OM), Thermal Analysis (DTA-TG), Total Immersion in Water Test for the determination of the Total Open Porosity Accessible to Water and the Percentage of the Water Absorption Capacity, Total Soluble Salts (TSS%), Spot tests and Colorimetry.

According to the experimental results, the historic mortars can be categorized into four groups: 1) Lime mortars 2) Gypsum mortars 3) mixed Lime and Gypsum mortars 4) Lime mortars with Portlandite. The Lime mortars can be further categorized in “non hydraulic typical lime mortars”, “hydraulic lime mortars” and “artificial pozzolan lime mortars”. The presence of portlandite in the Lime mortars with Portlandite, indicate areas of the monument, where the microclimate does not favor carbonation. It is notable that in many cases, ettringite or/and thaumasite was found as part of the mortar composition, independently of the category the mortars belong to. The binder/aggregates ratio was found to be quite high and the values measured cover a wide range [1,25-3,6].

Total immersion results indicated different microstructural characteristics amongst the historic mortars; high values were determined for total open porosity accessible to water, as well as the percentage of the water absorption capacity, however the values of the different mortars examined covered a wide range of values. The combination of high percentages of total soluble salts and different pH values explains the poor conservation state of the building materials. This, in addition to the high humidity corrosive environment, results in the historic mortar acting as an electrolyte, which conducts anions, at the same time receiving the corrosive action of the dynamic conditions developed.

In addition, possible restoration mortars were designed, produced and assessed for the restoration of the Holy Aedicule. These restoration mortars were designed according to the reverse engineering methodology, at the same time taking into account the specific characteristics of the monument (historic materials, environment, requirements of the restoration project, dynamic and static response). Five different restoration mortar mixes were designed; four lime mortars with the addition of metakaolin, in different percentages, as well as one lime mortar with the addition of a natural pozzolan. Additionally, a commercial lime-metakaolin restoration mortar, without cement, was also examined. The commercial mortar was tested with two different quantities of added water. The analytical methods that were used in order to evaluate the restoration mortars were: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Determination of bulk density of fresh mortar, Determination of retained water of fresh mortar, Digital Microscopy (FOM), Sieve Analysis for the examination of Grain Size Distribution, X-ray Diffraction (XRD), Thermal Analysis (DTA-TG), Specific Conductivity and pH, Spot tests, Mercury Immersion Porosimetry (MIP), Capillary Rise, Total Immersion in Water Test for the determination of the Total Open Porosity Accessible to Water and the Percentage of the Water Absorption Capacity, Ultrasound Measurements, Flexural and Compressive Strength, Shrinkage percentage and Colorimetry. The characteristics of the restoration mortars were tested in different curing times and more specifically at 14, 28 and 90 days.

After the evaluation of the restoration mortars it can be concluded that the addition of metakaolin in relation to the addition of a natural pozzolan, is beneficial, as it leads to higher mechanical strengths and improved physical and chemical characteristics.

Finally, the compatibility and the performance of the restoration mortar, in relation to the historic mortars, as well as in relation to the specific characteristics of the monument, were investigated. The compatibility and performance criteria set for the optimum restoration mortar were the following:

- High compressive strength, at least 15MPa
- Early development of mechanical strength
- Fast calcium hydroxide consumption
- Low inverse hydraulicity index
- Low capillary rise coefficient and low percentage of total water absorption capacity
- Porosity values characteristic of hydraulic mortars

According to the set criteria, the commercial lime-metakaolin mortar is assessed as the most compatible and performing mortar for the restoration of the Holy Aedicule, and, more specifically, the mortar with the least amount of added water. Finally, the use of the commercial mortar guarantees the reproducibility of the restoration mortar in construction site conditions.

Key words: Historic mortars, Restoration Mortars, Aedicule of Holy Sepulchre, Jerusalem, X-Ray Diffraction Analysis, Thermal Analysis.

Περιεχόμενα

1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος	12
1.1 Γενικά Στοιχεία	12
1.2 Ιστορική Αναδρομή	13
1.3 Είδη Κονιών	15
1.4 Αδρανή.....	19
1.5 Πρόσθετα-Πρόσμεικτα.....	20
1.6 Είδη Ιστορικών Κονιαμάτων.....	22
1.7 Φθορά Κονιαμάτων	24
2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος	28
2.1 Μελέτη ιστορικών κονιαμάτων και αντίστροφη μηχανική προσέγγιση για τον σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης.....	28
2.2 Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα	31
3. Πειραματικό Μέρος.....	38
3.1 Πειραματικός Σχεδιασμός.....	38
3.2 Αρχές πειραματικών μεθόδων.....	40
3.2.1 Μικροσκοπία Οπτικών Ινών.....	40
3.2.2 Φυσικός Διαχωρισμός κονίας και αδρανών (Κοκκομετρική Ανάλυση).....	41
3.2.3 Περίθλαση Ακτίνων Χ.....	42
3.2.4 Οπτική Μικροσκοπία	43
3.2.5 Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG).....	46
3.2.6 Εξέταση υγρομετρικής συμπεριφοράς:.....	46
3.2.7 Προσδιορισμός υδατοδιαλυτών αλάτων- pH - Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων	48
3.2.8 Ποροσιμετρία (MIP).....	49
3.2.9 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων.....	50
3.2.10 Μελέτη διαστάσεων των δοκιμίων.....	51
3.2.11 Χρωματομετρία.....	51
3.2.12 Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών Νωπών Κονιαμάτων	52
3.3 Δειγματοληψία Ιστορικών Κονιαμάτων	55
4. Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	61
4.1 Ιστορικά Κονιάματα	61
4.1.1. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων	61
4.1.2 Φυσικός Διαχωρισμός Κονίας αδρανών (Κοκκομετρική Ανάλυση)	94
4.1.3 Αποτελέσματα Ορυκτολογικής Ανάλυσης με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	109
4.1.4 Οπτική Μικροσκοπία	134

4.1.5	Θερμοβαρουμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG).....	151
4.1.6	Ολική Εμβάπτιση σε Νερό	177
4.1.7	Ολικά Διαλυτά Άλατα-pH-Ποιοτικές Δοκιμές Spot Test	180
4.1.8	Χρωματομετρία	189
4.1.9	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα και Σύγκριση των Ιστορικών Κονιαμάτων	191
4.1.10	Μερικά Συμπεράσματα για τα ιστορικά κονιάματα	200
4.2.	Κονιάματα Αποκατάστασης.....	202
4.2.1	Σχεδιασμός Συνθέσεων	202
4.2.2	Ιδιότητες Νωπών Κονιαμάτων	205
4.2.3	Εξέταση Μορφολογίας Κονιαμάτων με ψηφιακή μικροσκοπία	206
4.2.3	Μελέτη εξέλιξης χημικών αντιδράσεων κατά τη πήξη και τη σκλήρυνση.....	208
4.2.3.1	Περίθλαση Ακτίνων Χ	208
4.2.3.2	Θερμοβαρουμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG).....	212
4.2.3.3	Εξέλιξη Αγωγιμότητας και pH κατά την σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης	220
4.2.4	Μελέτη Μικροδομής.....	225
4.2.5	Μελέτη υγρομετρικής συμπεριφοράς.....	230
4.2.5.1	Τριχοειδής Αναρρίχηση.....	230
4.2.5.2	Ολική Εμβάπτιση Δοκιμίων σε Νερό	235
4.2.6	Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων.....	239
4.2.6.1	Μετρήσεις Υπερηχοσκόπησης	239
4.2.6.2	Μετρήσεις μηχανικών αντοχών	239
4.2.7.	Συρρίκνωση Δοκιμίων.....	243
4.2.8.	Χρωματομετρία	244
4.2.9	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα και Μερικά Συμπεράσματα των Κονιαμάτων Αποκατάστασης.....	245
4.3.	Αποτίμηση συμβατότητας και επιτελεστικότητας των κονιαμάτων αποκατάστασης	249
5.	Συμπεράσματα.....	251
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	253
	Βιβλιογραφία	258

1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος

1.1 Γενικά Στοιχεία

Ορισμός

Κονιάματα ονομάζονται τα μίγματα που αποτελούνται από μία ή περισσότερες συνδετικές ύλες (κονίες), λεπτόκοκκα αδρανή (διάμετρος $\leq 4\text{mm}$) και νερό. Εάν τα μίγματα αυτά περιέχουν πιο χονδρόκοκκα αδρανή ονομάζονται κονιοδέματα ή σκυροδέματα.. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης.

Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και εφαρμογής και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης. (1)

Κατηγορίες Κονιαμάτων

Τα κονιάματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια. Αυτοί είναι οι εξής:

Σύμφωνα με το τρόπος πήξης-σκλήρυνσης της κονιάς (2), (3):

- Υδραυλικά, πήζουν και σκληρύνονται με την παρουσία νερού, με ή χωρίς την παρουσία αέρα και παραμένουν σκληρές ακόμα και κάτω από το νερό (υδραυλική άσβεστος, τσιμέντο).
- Αερικά, πήζουν και σκληρύνονται μόνο όταν έρχονται σε επαφή με τον αέρα (γύψος, αερική άσβεστος).

Σύμφωνα με τη φαινόμενη πυκνότητα :

- ελαφριά ($<1500\text{Kg/m}^3$)
- βαριά ($>1500\text{Kg/m}^3$)

Σύμφωνα με το είδος της κονιάς ή των αδρανών:

- Τσιμεντοκονιάματα με συνδετική ύλη το τσιμέντο
- Ασβεστοκονιάματα με συνδετική ύλη τον πολτό άσβεστου ή την κονιοποιημένη υδράσβεστο.
- Τσιμέντο-ασβεστοκονιάματα ή μικτά κονιάματα με μίγμα τσιμέντου και άσβεστου ως συνδετική ύλη.
- Ποζολανικά κονιάματα με συνδετική ύλη άσβεστο (με μερική υποκατάσταση με τσιμέντο) και ποζολάνη (φυσική ή τεχνητή).
- Μαρμαροκονιάματα με κύριο αδρανές την μαρμαρόσκονη αντί της άμμου και συνδετική ύλη ασβέστη ή τσιμέντο (με ενδεχόμενη μικρή προσθήκη γύψου)
- Γυψοκονιάματα με κύριο συνδετικό υλικό την γύψο.

Σύμφωνα με την χρήση τους:

- κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας,
- κονιάματα επιχρισμάτων,
- ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων
- συγκολλητικά όπου υπάγονται οι διάφορες κόλλες
- θερμομονωτικά,

- ηχομονωτικά,
- πυράντοχα

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ανάγκη της στέγασης οδήγησε από τη Νεολιθική περίοδο 8^η χιλιετία π.Χ. στην εκμετάλλευση πρώτων υλών για την παραγωγή κονιαμάτων. Συγκεκριμένα, η χρήση των κονιαμάτων συναντάται για πρώτη φορά στην περιοχή της Μεσοποταμίας, όπου είχαν παρόμοια ίδιες πρώτες ύλες με πήλινα τούβλα, αλλά διαφορετική επεξεργασία. (4), ωστόσο έχουν χρησιμοποιηθεί και από τους Ίνκας, τους Μάγια, τους Κινέζους στο Σινικό Τείχος και τους Μογγόλους και μετά από αρκετές χιλιάδες χρόνια από τους Αιγυπτίους. (5) Τα κονιάματα που έχουν ενταχθεί σε αρχαίες κατασκευές είναι σύνθετα υλικά τα οποία έχουν παρουσιάσει εξαιρετική αντοχή στο πέρασμα του χρόνου. Χρησιμοποιήθηκαν ως υποστρωματικά υλικά σε κύστες, πηγάδια αποχετεύσεις και υδραγωγεία, ως στηρικτικά υλικά σε μωσαϊκά και πεζοδρόμια, ως πλάστες (σοβάδες) εσωτερικά και εξωτερικά σε τοίχους και ως συνδετικά υλικά σε τοιχοποιίες (αρμοί). (6)

Η λάσπη φαίνεται να είναι το πρώτο συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή κονιαμάτων στα αρχαία κτίρια, η οποία χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα σε ορισμένες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Στην αρχαία Αίγυπτο χρησιμοποιήθηκαν κονιάματα λάσπης για την σύνδεση των πλίνθων λάσπης, ενώ για την σύνδεση σκαλισμένων πέτρινων πλίνθων προτιμάται ο γύψος. Τα κονιάματα γύψου που τοποθετήθηκαν μεταξύ των προσεκτικά τετραγωνισμένων τετραγωνικών λίθων δεν χρησιμοποιήθηκαν στην πραγματικότητα ως αρμοί, αλλά κυρίως ως λιπαντικό υλικό για να τοποθετηθούν με ακρίβεια οι πέτρινοι πλίνθοι στη κατασκευή. Υλικά όπως άργιλοι και λάσπη που αναμειγνύονται με ψιλοκομμένο άχυρο ή ζαχαροκάλαμο χρησιμοποιήθηκαν στην αρχαιότητα για την παρασκευή κονιάματος στη Μέση Ανατολή και μέχρι σήμερα θεωρούνται τυπικά παραδοσιακά κονιάματα. (6)

Τουλάχιστον από το 3000 π.Χ. ασφαλικές κονίες εμφανίζονται στη Μεσοποταμία ως κονιάματα αρμών. Σε μετέπειτα κατασκευές κατά την περίοδο του Ναβουχοδονόσορ στη Βαβυλώνα οι άσφαλοι αντικαθίστανται από κονιάματα υδράβεστου, στα οποία προστίθενται πηλός, στάχτες, άσφαλτος και άλλα υλικά. Φαίνεται ότι η πρακτική της ασβεστολιθικής ασβεστοποίησης ήταν γνωστή ακόμα και από το 2450 π.Χ. στην αρχαία Μεσοποταμία, ενώ στο Khafaje βρέθηκαν τα ερείπια ενός φούρνου, που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ασβέστη. Επιπλέον, η χρήση γυψοσανίδων στη Μέση Ανατολή διήρκεσε πάνω από 4000 χρόνια. Θεωρείται ότι η τεχνολογία των κονιαμάτων διαδόθηκε στους Έλληνες και μετά στους Ρωμαίους από την περιοχή της Μέσης Ανατολής. Η περίοδος κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά άσβεστος στα κονιάματα δεν έχει προσδιοριστεί ακόμη, αν και πιθανές ημερομηνίες μπορούν να βρεθούν από ιστορικές πηγές. (6)

Η Ελλάδα αποτελεί σταυροδρόμι για τη μετακίνηση πολιτιστικών στοιχείων από την ανατολή στη δύση, συνεπώς διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο και στην περίπτωση της διάδοσης της χρήσης των κονιαμάτων για κατασκευαστικούς σκοπούς. Οι Έλληνες διέδωσαν την τεχνολογία στους Ρωμαίους και στον υπόλοιπο Δυτικό κόσμο. Τα πρώτα παραδείγματα στον ελλαδικό χώρο χρονολογούνται κατά τη διάρκεια της 6^{ης} χιλιετίας π.Χ. στους Νεολιθικούς οικισμούς Σέσκλο και Διμήνι. Τα κονιάματα κατασκευάζονταν κοντά στα κατασκευαστικά έργα και ο πηλός συχνά αναμειγνύονταν με οργανικά (βότανα, ρίζες, άχυρα και καλάμια) και ανόργανα (άμμο, χαλίκια) πρόσθετα, προκειμένου να αυξηθεί η μαζική σταθερότητα και ανθεκτικότητά τους. (4) (5)

Μεταξύ άλλων, οι Ρωμαίοι ανέπτυξαν κυρίως την εκτεταμένη χρήση κονιαμάτων και σκυροδέματος για οικοδομικούς σκοπούς. Το σκυρόδεμα ή «opus caementitium», θεωρείται ότι είναι ρωμαϊκή διαδικασία. Η χρήση κονιαμάτων και σοβάδων σε ελληνικά κτίρια δείχνει ότι το σκυρόδεμα ήταν πιθανότατα γνωστό στις προ-ρωμαϊκές περιόδους. Μελέτες της δεξαμενής νερού στην Κάμειρο της Ρόδου (500 π.Χ.), όπου οι τοίχοι του ήταν κατασκευασμένοι από ποζολανικό τσιμέντο, επιβεβαιώνουν αυτή την υπόθεση. (6)

Πριν από τους Ρωμαίους, οι Έλληνες χρησιμοποίησαν τη Θηραϊκή Γη για την οικοδόμηση. Τα ποζολανικά κονιάματα που βρέθηκαν σε παλιές κατασκευές στο νησί της Δήλου, κοντά στο νησί Θήρα, χρονολογούνται από τον 2ο αιώνα π.Χ. Στη ρωμαϊκή περίοδο η τεχνική της προσθήκης ποζολανικών

υλικών σε ασβεστοκονιάματα και σκυροδέματα με βάση το ασβέστιο εξαπλώθηκε σε όλη την αυτοκρατορία. (6)

Αρχαίες διατριβές (μελέτες), περιγράφουν τη χρήση θρυμματισμένων τούβλων σε ασβεστοκονιάματα. Αυτά τα υλικά υποδείχθηκαν με διάφορα ονόματα, όπως το *opus testaceum*, το οποίο φαίνεται να είναι το πιο σημαντικό. Οι Ρωμαίοι εξάπλωσαν τη χρήση τους σε όλη την αυτοκρατορία τους στην Ευρώπη, τη Βόρεια Αφρική και τη Δυτική Ασία (Τουρκία). Αυτά τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν για διάφορους σκοπούς. Η σκόνη τούβλων (κεραμάλευρο) χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την επίστρωση και για τα ανώτερα στρώματα των δαπέδων, αλλά συντριμμένα τούβλα με μεγάλο μέγεθος κόκκων δεν χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τοιχοποιίες, καμάρες και θεμέλια, όπου υπήρχε υψηλή υγρασία ή νερό, αλλά και για τη βελτίωση των επιδόσεων κονιαμάτων υπό κανονικές συνθήκες. (6)

Κατά τη διάρκεια της ρωμαϊκής περιόδου (2^{ος} αι. π.Χ. - 3^{ος} αι. μ.Χ.), η χρήση ασβεστίου και ποζολάνης κυριαρχούσε στις κατασκευές, ενώ άρχισε να χρησιμοποιείται σκόνη από τούβλα και θρυμματισμένο τούβλο. Σύμφωνα με τον Vitruvius, κατασκευάστηκαν δομικά κονιάματα με 1 μέρος ασβέστη και 3 μέρη ποταμίσιας άμμου, ή 1 μέρος ασβέστη, 2 μέρη ποταμίσιας άμμου και 1 μέρος θρυμματισμένου τούβλου. Στο Galerius Palace (Θεσσαλονίκη, 3^{ος} αι. μ.Χ.) τα δομικά κονιάματα αποτελούνται από ασβέστη, ποζολάνη και φυσικά αδρανή (κοκκομετρική διαβάθμιση 0-8mm) σε λόγο κονιάς/αδρανών από 1:2 έως 1:2,5, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις σκόνη από τούβλα και θρυμματισμένα τούβλα ανιχνεύθηκαν επίσης. (4)

Στη βυζαντινή εποχή γίνεται εμφανής η χρήση θρυμματισμένων τούβλων και κονιάς ασβεστίτη και χαρακτηρίζονται από το κοκκινωπό χρώμα τους. Αυτά τα κονιάματα που εμφανίζονται στην Αγία Σοφία και σε άλλα βυζαντινά μνημεία περιέχουν υδραυλικούς άμορφους αλκαλικούς και πυριτικούς σχηματισμούς που είναι ο λόγος που παρουσιάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και είναι ανθεκτικά στο χρόνο. Για αυτό το λόγο μπορούν να θεωρηθούν ως πρώιμα παραδείγματα οπλισμένου σκυροδέματος. (7) Ακόμη, εμφανίζονται σε αυτήν την εποχή διάφορες τεχνολογίες παραγωγής κονιαμάτων με λόγους κονιάς-αδρανών να κυμαίνονται από 1:4 μέχρι και 1:2. Να σημειωθεί ότι λόγω φθοράς και απομάκρυνσης της κονιάς με την πάροδο του χρόνου είναι ο λόγος για τον οποίο εμφανίζονται οι τιμές 1:4 του λόγου κονιάς-αδρανών συνεπώς δεν είναι απαραίτητο να ληφθεί το συμπέρασμα ότι γινόταν χρήση κονιαμάτων φτωχών σε κονία. Ο πιο αντιπροσωπευτικός λόγος κονιάς/αδρανών είναι ο 1:3, καθώς αυτός εμφανίζεται σε πολλά μνημεία που κατασκευάστηκαν εκείνη την περίοδο στην Ρόδο και στην Κρήτη, όπως επίσης και στην Αγία Σοφία. (8)

Κατά τη διάρκεια της οθωμανικής περιόδου (15^{ος} - 19^{ος} αιώνας), τα δομικά κονιάματα κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας συχνά τις διαθέσιμες πρώτες ύλες. Αποτελούνταν κυρίως ασβέστιο (καθαρός ασβέστης ή άσβεστος με πηλό), ενώ σε ειδικές κατασκευές που απαιτούσαν αντοχή στην υγρασία (λουτρά, δεξαμενές), γινόταν επίσης προσθήκη ποζολάνης και σκόνης από τούβλα (κεραμάλευρο). Τα αδρανή ήταν φυσικής προέλευσης (σε μερικές περιπτώσεις προστέθηκε επίσης θρυμματισμένο τούβλο), με κοκκομετρία 0-8mm και λόγο κονιάς-αδρανών 1:2. Στα ελληνικά μεσαιωνικά μνημεία (15^{ος}-19^{ος} μ.Χ., Δωδεκάνησα, Ιόνια νησιά, Κρήτη), τα δομικά κονιάματα αποτελούνταν κυρίως από ασβέστη (σε ορισμένες περιπτώσεις προστέθηκε ποζολάνη), με φυσικά ή θρυμματισμένα αδρανή και θρυμματισμένο τούβλο σε διαβαθμίσεις στη κοκκομετρία 0-4mm έως 0-8mm και λόγο κονιάς-αδρανών από 1:1 έως 1:2. Όπως αποδείχθηκε από την έρευνες, τα κονιάματα αυτά είχαν καλή αντίσταση στο θαλάσσιο περιβάλλον, στο οποίο έχουν εκτεθεί εδώ και αιώνες. (4) (8)

Την περίοδο του Μεσαίωνα τα κονιάματα ήταν κατά βάση ασβεστιτικά, τα οποία περιείχαν φυσικά αδρανή και σπασμένα κεραμίδια, καθώς και ποζολάνη, σε ορισμένες περιπτώσεις, αλλά για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνταν πρώτες ύλες χαμηλής ποιότητας, γεγονός που οδήγησε στην υποβάθμιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. (6) Οι Αναγεννησιακές μελέτες φαίνεται να προτείνουν πάλι τις απόψεις του Vitruvius σχετικά με την επιλογή και την προετοιμασία των πρώτων υλών, με μικρές αποκλίσεις όσον αφορά τους συντελεστές συνθέσεως των μιγμάτων και τις τεχνικές εφαρμογής. Οι μελέτες αναφέρονται επίσης στη χρήση λευκού ασβεστίου που προέρχεται από την πύρωση των βότσαλων του ποταμού και στη χρήση σκούρου ασβεστίου (υδραυλικό ασβέστη) που λαμβάνεται από την πύρωση γκρίζων και σκοτεινών ασβεστόλιθων ως υποκατάστατων των ποζολάνων. (6)

Οι φωτιστικές και νεοκλασικές μελέτες του 18^{ου} αιώνα, που αφορούσαν πάντοτε τις τεχνικές κατασκευής των προηγούμενων χρόνων, πρότειναν και πάλι την αρχαία τεχνολογία. Κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα ανακαλύφθηκε το τσιμεντοκονίαμα, τα εγχειρίδια εξακολουθούν να υποδεικνύουν τη χρήση παραδοσιακών υλικών, αλλά μόνο μετά από την εξήγηση σε επαγγελματίες για τη σωστή χρήση, σύνθεση και εφαρμογή τους. Χάρη στις μελέτες της γαλλικής εταιρίας τσιμέντου Vicat υπήρχαν πλέον τα κατάλληλα επιστημονικά όργανα, αλλά και οι παράμετροι για ευκολότερη διάκριση αερικών και υδραυλικών κονιών, που μέχρι τότε γίνονταν μόνο εμπειρικά. Μέχρι και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα στις κατασκευές χρησιμοποιούνταν διάφορα είδη κονιαμάτων, ανάλογα με τον τόπο και το είδος του κτιρίου. Τα σπίτια κατασκευάζονταν κυρίως από κονίαμα με βάση άσβεστο ή πηλό ή συνδυασμό των δύο, ενώ σε σημαντικά κτίρια τα κονιάματα ήταν υψηλότερης ποιότητας με βάση την άσβεστο και περιείχαν ποζολάνη. (6)

Στο τέλος του 20^{ου} αιώνα στις κατασκευές επικρατεί το τσιμέντο Portland που αποτελείται από άσβεστο, άμμο, κονιοποιημένα αδρανή και νερό. Το Portland αποτελεί ένα πολύ ισχυρό κονίαμα γι' αυτό και είναι μέχρι και σήμερα το πλέον διαδεδομένο κονίαμα της οικοδομικής βιομηχανίας. Κονιάματα που παράγονταν πριν την εμφάνιση του τσιμέντου Portland στον κατασκευαστικό τομέα, αναφέρονται ως ιστορικά κονιάματα. (4)

1.3 Είδη Κονιών

Κονίες ονομάζονται τα υλικά, τα οποία μετά από ανάμιξη με κάποιο ρευστό μέσο γίνονται εύπλαστος πολτός με συγκολλητικές ιδιότητες. Η πλειοψηφία αυτών των υλικών αποκτούν πλαστικότητα μετά από ανάμιξη με νερό και στερεοποιούνται λόγω εξάτμισης αυτού (π.χ. πηλός) ή λόγω χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα (π.χ. τσιμέντο). Το νερό παίζει μεγάλο ρόλο τόσο στην πλαστικότητα και εργασιμότητα του κονιάματος, όσο και στην σκλήρυνσή του. Οι κονίες διαχωρίζονται σε αερικές και υδραυλικές και αναπτύσσονται παρακάτω. (9)

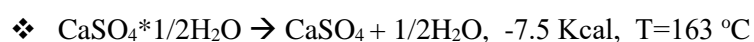
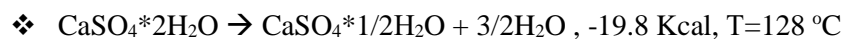
1. Αερικές Κονίες:

Οι αερικές κονίες είναι οι κονίες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν με μόνη την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα, και γι' αυτό το λόγο τα κονιάματα που έχουν παρασκευαστεί με αερικές κονίες δεν παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε υγρά περιβάλλοντα. Παρακάτω αναπτύσσονται οι κύριες αερικές κονίες που υπάρχουν. (3)

Γύψος

Κατά την αρχαιότητα και αρχικά στην ανατολή, χρησιμοποιήθηκε η γύψος, κυρίως για διακοσμητικούς δεδομένου ότι είναι υλικό που χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλαστικότητα. Η γύψος είναι στην ουσία το θειικό ασβέστιο είτε στην άνυδρη (CaSO_4), είτε στην διένυδρη μορφή του ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), που βρίσκεται με την μορφή ορυκτών στην φύση και μπορεί να περιέχουν προσμίξεις (CaCO_3 , MgCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 κ.α.).

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την έψηση-όπτηση του $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ είναι:



Από την πρώτη αντίδραση λαμβάνεται ημιυδρίτης ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Ονομάζεται, επίσης, πλαστική γύψος και χρησιμοποιείται ευρέως στην οικοδομική, χάρη στην ιδιότητα της, όταν αναμιγνύεται με νερό, να σκληρύνεται γρήγορα και να μεταπίπτει πάλι σε γύψο. Το προϊόν της δεύτερης αντίδρασης είναι ο ανυδρίτης, ο οποίος με περαιτέρω θέρμανση μεταπίπτει σε νεκρά γύψο. Σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες ($>700^\circ\text{C}$) η γύψος διασπάται σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα προϊόντα της όπτησης ολοκληρώνονται σε δύο στάδια την πήξη και την σκλήρυνση. Η αντοχές του υλικού επηρεάζονται από την ποσότητα του νερού, τον τρόπο ανάμιξης καθώς και από την θερμοκρασία. Κατά τη διαδικασία της πήξης του ημιυδρίτη μπορεί να παρατηρηθεί εμφανής αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και διόγκωση της μάζας. Με ανάμιξη του ανυδρίτη ή του ημιυδρίτη με 60-

70% κ.β. νερό παρατηρείται πήξη της κονιάς. Το CO₂ του αέρα δεν συμμετέχει στην σκλήρυνση της κατατάσσεται στις αερικές κονίες, διότι δεν διατηρείται σε υγρό περιβάλλον. Ο χρόνος πήξης και σκλήρυνσης μπορεί να ελεγχθεί με χρήση πρόσθετων υλικών (επιταχυντών ή επιβραδυντών), ενώ με προσθήκη λεπτής άμμου μπορούμε να αυξήσουμε τις αντοχές του κονιάματος.

Οι κυριότερες χρήσεις της γύψου είναι στα κονιάματα επιχρισμάτων και αρμών, στην κατασκευή και την ένωση δομικών πλακών, σε διακοσμητικά στοιχεία και ψευδοροφές, αλλά και σε αντικείμενα που μορφοποιούνται σε καλούπια. (2)

Υδράσβεστος

Η πιο γνωστή και διαδεδομένη μεταξύ των αερικών συνδετικών κονιών είναι η υδράσβεστος (Ca(OH)₂), που παράγεται από τους αρχαίους χρόνους μέσω της διεργασίας όπτησης των ασβεστόλιθων σε θερμοκρασίες περίπου 900-950 °C και της επακόλουθης σβέσης του προϊόντος της καύσης (άσβεστος, CaO) και μπορεί να έχει μορφές καθαρού (CaCO₃) ή δολομιτικού (CaMg(CO₃)₂). Ανάλογα με την μορφή του αρχικού πετρώματος λαμβάνεται διαφορετική ποιότητα ασβέστη. Κατά κανόνα δεν σκληραίνονται κάτω από το νερό καθόσον δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες.

Η παραγωγή της γίνεται σε 3 στάδια:

1. Έψηση- όπτηση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων και παραγωγή του CaO
2. Σβέση του CaO και παραγωγή του Ca(OH)₂
3. Πήξη και σκλήρυνση του Ca(OH)₂ και παραγωγή του CaCO₃

Η έψηση ασβεστολιθικών πετρωμάτων γίνεται με την ενδόθερμη αντίδραση:



Ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό σε MgCO₃ στον αρχικό ασβεστόλιθο παράγεται άσβεστος πλούσια σε Ca (2-5%), παράγεται μαγνησιακή (δολομιτική) άσβεστος (>5%). Χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, η άσβεστος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ασβεστοπυριτικών πλίνθων και αεριοσκυροδεμάτων.

Στη συνέχεια η σβέση της παραγόμενης ασβέστου και παραγωγή της υδρασβέστου γίνεται με την εξώθερμη αντίδραση:



Ανάλογα με την ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται η σβέση διακρίνεται σε υγρή και ξηρή. Στην υγρή σβέση, η παραγόμενη υδράσβεστος είναι υπό μορφή πολτού, ενώ στην ξηρή σβέση προκύπτει ως σκόνη με μικρό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας (<1% κ.β.)

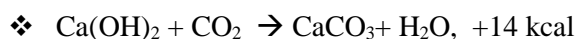
Η ποιότητα του ασβέστη μπορεί να χαρακτηριστεί ανάλογα με το δείκτη απόδοσης R που υπολογίζεται από τη σχέση (3):

$$R = \frac{\text{όγκος υδρασβέστου (m}^3\text{)}}{\text{βάρος αρχικού CaO (t)}}$$

Εάν:

- ❖ R > 2.5, παράγεται παχιά άσβεστος υψηλής ποιότητας
- ❖ R = 1.5-2.5, παράγεται ισχνή άσβεστος χαμηλής ποιότητας
- ❖ R < 1.5, η παραγόμενη άσβεστος είναι ακατάλληλη για δομική χρήση

Τέλος η πήξη και σκλήρυνση της υδρασβέστου (ενανθράκωση) γίνεται με την αντίδραση:



Μετά το πέρας της σκλήρυνσης, η άσβεστος μετατρέπεται σε στερεό και αποκτά τις τελικές αντοχές της. Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την σκλήρυνση είναι η παρουσία CO₂ και το ξηρό περιβάλλον για την εξάτμιση του νερού.

Η αερική άσβεστος δίνει εύπλαστα κονιάματα, ενώ παρουσιάζει καλή εργασιμότητα και υψηλή πρόσφυση. Χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή κονιαμάτων τοιχοδομών και επιχρισμάτων, είτε αυτούσια, είτε σε συνδυασμό με τσιμέντο γύψο ή ποζολάνη. (10) (2)

2. Υδραυλικές Κονίες:

Υδραυλικές, ονομάζονται οι κονίες που πήζουν και σκληρύνονται και κάτω από την επίδραση του νερού, με ή χωρίς την παρουσία αέρα και παραμένουν σκληρές ακόμα και κάτω από το νερό. Στις υδραυλικές κονίες ανήκουν η υδραυλική άσβεστος και το τσιμέντο. Παρακάτω αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους.

Υδραυλική Άσβεστος

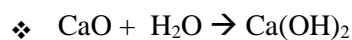
Είναι άσβεστος που κυρίως συνίστανται από πυριτικά άλατα του ασβεστίου και του αργιλίου καθώς και υδροξείδιο του ασβεστίου. Παράγεται από την έψηση αργιλικών ασβεστόλιθων που αποτελούνται από μίγμα ανθρακικού ασβεστίου και αργίλων (μάργες). Η έψηση γίνεται σε κλιβάνους ανάλογους με αυτούς της παραγωγής της αερικής άσβεστου. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται μέσα στον κλίβανο πρέπει να διατηρείται στους 900-950°C. Έχουν την ιδιότητα να πήζουν και να σκληραίνουν όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Το διοξείδιο του άνθρακα συμβάλλει θετικά στην διαδικασία της σκλήρυνσης. Διακρίνονται στις υδραυλικές και στις φυσικές υδραυλικές ασβέστους. Οι υδραυλικές ιδιότητες της οφείλονται στις διάφορες προσμίξεις της, κυρίως το πυρίτιο, το αργίλιο και το σίδηρο, οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο και στην πήξη. (2), (3) (10)

Μειονεκτεί, όμως, σημαντικά λόγω του μεγάλου ποσοστού του ελεύθερου CaO που περισεύει. Για τον λόγο αυτόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στα διάφορα κονιάματα, αλλά απαιτεί ποζολάνες, ώστε να δεσμευτεί το ελεύθερο CaO με το ενεργό SiO₂ που αυτές περιέχουν. Οι παρακάτω χημικές αντιδράσεις περιγράφουν το φαινόμενο που παρατηρείται κατά την έψηση των πετρωμάτων ανθρακικού ασβεστίου και αργίλου (μάργες):



Τα ποσοστά των παραγόμενων CA και C₂S εξαρτώνται από τις αρχικές συγκεντρώσεις των οξειδίων του αργιλίου και του πυριτίου στο πέτρωμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου και αποτελούν ένδειξη της υδραυλικότητας της ασβέστου.

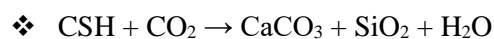
Η διαδικασία της σβέσης της υδραυλικής ασβέστου είναι η εξής. Κατά το πρώτο στάδιο, δηλαδή κατά την διάρκεια της ξηρής σβέσης, το CaO μετατρέπεται σε Ca(OH)₂ κατά την οποία προστίθεται νερό 60-65% κατά βάρος.



Κατά το δεύτερο στάδιο, και όταν προστεθεί επιπλέον νερό οι αργιλοπυριτικές ενώσεις ενυδατώνονται και παράγουν ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH) και ένυδρο πυριτικό αργίλιο (CAH). Αυτές οι ενώσεις είναι που προκαλούν και την γρήγορη σκλήρυνση του μείγματος κατά την αντίδραση:



Η διαδικασία της ενανθράκωσης (πήξης και σκλήρυνσης) του προϊόντος περιγράφεται με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Μπορεί να γίνει κατάταξη των ασβέστων με βάση τον δείκτη υδραυλικότητας Vicat ο οποίος υπολογίζεται μέσω του τύπου:

Δείκτης υδραυλικότητας: $(i) = (Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3) / (CaO + MgO)$, Ανάλογα με την τιμή του i γίνεται η εξής κατάταξη:

Πίνακας 1 Χαρακτηρισμός υδραυλικότητας κονιών

Δείκτης υδραυλικότητας i	Χαρακτηρισμός
0.00-0.01	αερική άσβεστος
0.10-0.16	άσβεστος χαμηλής υδραυλικότητας
0.16-0.32	άσβεστος μεσαίας υδραυλικότητας
0.32-0.42	υδραυλική άσβεστος
0.42-0.50	άσβεστος υψηλής υδραυλικότητας
>0.5	τσιμέντο

Η υδραυλική άσβεστος συνήθως αναμιγνύεται με ποζολάνες και χρησιμοποιείται κυρίως σε κονιάματα επισκευών (επίστρωση, αρμολόγημα, επιχρίσματα), κυρίως σε κατασκευές μνημειακού χαρακτήρα. Τέλος, οι υδραυλικοί άσβεστοι διακρίνονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

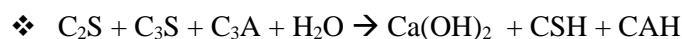
- **NHL**: Πρόκειται για φυσικές υδραυλικές άσβεστοι, χωρίς προσθήκη άλλων υλικών.
- **FHL**: Πρόκειται για τεχνητές υδραυλικές άσβεστοι, οι οποίες αποτελούνται από αερική άσβεστο και/ή υδραυλική άσβεστο και πρόσθετα υλικά που βελτιώνουν τις υδραυλικές ιδιότητες και/ή ποζολάνη.
- **HL**: Πρόκειται για άσβεστοι με προσθήκη υλικών, όπως τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα κ.α..

Τσιμέντο

Τσιμέντο ονομάζεται η τεχνητή, λεπτόκοκκη κονία που παρασκευάζεται με άλεση του κλίνκερ, όπως ονομάζεται διεθνώς είναι προϊόν της όπτησης μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων σε ποσοστό. Η παραγωγή του τσιμέντου γίνεται με τα εξής βήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται η εξόρυξη πρώτων υλών (ασβεστόλιθος και άργιλος). Στη συνέχεια γίνεται η άλεση και η παραγωγή φαρίνας. Έπειτα, γίνεται η έψησή της σε υψικάμινο σε θερμοκρασίες 1400-1450°C και η παραγωγή κλίνκερ, όπου όλο το CaO δεσμεύεται από τις αργιλοπυριτικές ενώσεις, σε αντίθεση με την υδραυλική άσβεστο, που μετά την έψηση περιέχει ελεύθερο CaO το οποίο πρέπει να σβηστεί. Η διαδικασία γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάμιξη με διάφορα πρόσθετα (κυρίως γύψος, αλλά και ποζολάνες, ιπτάμενη τέφρα). Τέλος, πραγματοποιείται η άλεση και παραγωγή λεπτόκοκκης σκόνης (τσιμέντο). Κατά την αντίδραση του τσιμέντου με το νερό λαμβάνει χώρα παραγωγή των ένυδρων CSH, CAH, τα οποία με την μορφή gel προσδίδουν πολύ γρήγορη σκλήρυνση στο μίγμα. Η χημική αντίδραση που εκφράζει το φαινόμενο είναι:



Τα είδη κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο είναι κονιάματα τσιμέντου-ασβέστη για την βελτίωση μια σειρά ιδιοτήτων όπως η πρόσφυση, η στεγανότητα, η πλαστικότητα, η εργασιμότητα, η μείωση πιθανότητας εμφάνισης εξανθημάτων, κ.τ.λ. και κονιάματα τσιμέντου-ποζολάνης για τη μείωση ποσοστού ελεύθερου $Ca(OH)_2$ όπως επίσης και τσιμέντο υψηλών αντοχών, υψηλής συγκέντρωσης πυριτίου, λευκό τσιμέντο, ανθεκτικό στα θειικά, κ.τ.λ.

Η πήξη του τσιμέντου προκαλείται λόγω των αλληλοεμπλεκόμενων δομών των προϊόντων ενυδάτωσης. Το χρονικό διάστημα μεταξύ της ενυδάτωσης και της σκλήρυνσης του τσιμέντου ονομάζεται χρόνος πήξης (setting time). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο πήξης είναι η λεπτότητα του τσιμέντου, τα ποσοστά του αργλικού τριασβεστίου (C_3A) και της ελεύθερης ασβέστου (% CaO) καθώς και από το λόγο W/C (νερό/τσιμέντο). Η ρύθμιση του χρόνου πήξης πραγματοποιείται με την προσθήκη γύψου κατά την άλεση του κλίνκερ. (11)

1.4 Αδρανή

Τα αδρανή είναι υλικά τα οποία προέρχονται από την φυσική αποσάθρωση ή την τεχνητή θραύση των πετρωμάτων, καθώς και διάφορα υλικά όπως σκουριές από υψικαμίους, βιομηχανικά παραπροϊόντα, κ.α. Έτσι, ανάλογα με την προέλευση τους διακρίνονται σε φυσικά, θραυστά και βιομηχανικά αδρανή. Αποτελούνται από κόκκους ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους και χρησιμοποιούνται σαν πληρωτικά υλικά στα κονιάματα. Κατά την σκλήρυνση της κονιάς οι κόκκοι αυτοί συνδέονται μεταξύ τους κι έτσι προκύπτει ένα στερεό σώμα κατάλληλο για κατασκευές, του οποίου οι ιδιότητες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της κονιάς. (12) (13) (2) (5)

Τα αδρανή των λατομείων πλεονεκτούν ως προς το γωνιώδες σχήμα των κόκκων και την καθαρότητα τους, όταν προέρχονται από καθαρό πέτρωμα. Μετά την εξόρυξη, τα πετρώματα τεμαχίζονται στα επιθυμητά μεγέθη με θραυστήρες, τριβεία ή μύλους διαφόρων τύπων. Εν συνεχεία διαχωρίζονται σε διάφορα κλάσματα μεγεθών με κόσκινα. Όταν τα υλικά τα προερχόμενα είτε από ορυχεία είτε από λατομεία περιέχουν άργιλο και γενικά όταν δεν είναι καθαρά και σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μετά από πλύση.

Η άμμος είναι το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα. Δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που να είναι ικανές να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων, να επηρεάσουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες των και να προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη. Κατά τον Βιτρούβιο, η καλύτερη ποιότητα άμμου είναι αυτή που προέρχεται από τα λατομεία, αλλά γνωρίζοντας ότι δεν βρίσκεται εύκολα παντού, δίνει στο έργο του συμβουλές και για τα άλλα είδη άμμου. Αναφέρει ακόμη ότι η άμμος θαλασσινής προέλευσης πρέπει κατ' αρχήν να κοσκινίζεται, και μετά να πλένεται προσεκτικά, πριν οποιαδήποτε χρήση της, διαφορετικά θα μεταφέρει μέσω του κονιάματος στην τοιχοποιία άλατα, γεγονός το οποίο μπορεί να αποβεί καταστροφικό γι' αυτήν.

Κατά την επιλογή και την χρήση των αδρανών, έμφαση δίνεται :

- Στη κοκκομετρική διαβάθμιση όπου προτιμάται η χρήση αδρανών με σχετικά μεγάλο εύρος προκειμένου να καλύπτουν οι μικροί κόκκοι τα κενά που αφήνουν οι μεγαλύτεροι. Επιδιώκεται το <math><250\mu\text{m}</math> κλάσμα να είναι το 10-25% του συνολικού βάρους της άμμου. Εάν το κλάσμα αυτό αντιπροσωπεύει ποσοστό μικρότερο του 10%, τότε θα υπάρχουν κενά και τότε θα πρέπει να προστεθεί κονία για να βελτιωθεί η εργασιμότητα. Αυξημένο όμως ποσοστό κονιάς θα οδηγήσει σε ρωγμές λόγω του αυξημένης συστολής ξήρανσης. Όταν όμως υπάρχουν αδρανή υλικά με αυξημένο λεπτόκοκκο κλάσμα (δηλαδή με μέγεθος κόκκου μικρότερο των $63\mu\text{m}$) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5%, τότε δημιουργείται έντονο πρόβλημα καθόσον καλύπτονται οι κόκκοι του αδρανούς και εμποδίζεται η ένωση του με τον πολτό. Το λεπτόκοκκο αυτό κλάσμα λέγεται παιπάλη.
- Στην παρουσία προσμίξεων. Τα οργανικά υλικά παρεμβάλλονται μεταξύ των αδρανών και της κονιάς εμποδίζουν την άμεση ανάληψη των ιδιοτήτων του μίγματος. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την ενυδάτωση της νωπής πάστας με τρόπο ανεξέλεγκτο σε συνάρτηση με την ποιότητα και την ποσότητα τους, με τυχαίο τρόπο και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η παρουσία οργανικών υλικών οδηγεί στην επιβράδυνση της διαδικασίας ενυδάτωσης της πάστας και την μείωση της μηχανικής αντίστασης του μίγματος. Άλλα συστατικά που προκαλούν μείωση της αντοχής είναι οι γαιάνθρακες ή οι λιγνίτες και διάφορα αποσαθρωμένα συστατικά, όπως ο αργλικός σχιστόλιθοι. Τα πυριτικά υλικά μπορεί να παρεμποδίσουν το σχηματισμό σημαντικών ρωγμών, αλλά και να διαφοροποιήσουν τη δομή του αρχικού μίγματος με την πάροδο του χρόνου καταλαμβάνοντας τη θέση άλλων συστατικών. Ακόμη, οι ενώσεις του θείου όπως ο γύψος μπορούν να προκαλέσουν διόγκωση του κονιάματος, κάτι που με τη σειρά του προκαλεί επιπρόσθετες τάσεις στη κατασκευή ή και μικρορηγματώσεις κατά τη πήξη. Όμοια επίδραση έχουν και οι ενώσεις

σιδήρου οι οποίες προκαλούν διόγκωση και εμφανίζουν κηλίδες στο κονίαμα. Η παιπάλη απαιτείται να είναι σε περιεκτικότητα κάτω του 5% καθώς εμποδίζει την επιθυμητή συνεκτικότητα μεταξύ αδρανούς και κονιάς καθώς παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο όπως επίσης αυξάνει την ανάγκη σε νερό. Τα θειικά ιόντα, τα χλωριόντα και γενικά τα νιτρικά άλατα και τα αλογόνα είναι επίσης ανεπιθύμητες προσμίξεις, καθώς μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά του κονιάματος.

- Στην υγρασία όπου οι αναλογίες μίξης των συστατικών των κονιαμάτων που δίνονται στα διάφορα πρότυπα, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι η άμμος περιέχει υγρασία περίπου 3%. Ιδιαίτερα ξηρές ή πολύ υγρές άμμοι καταλαμβάνουν διαφορετικό χώρο. Για τον λόγο αυτό κατά τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος οι ποσότητες των άμμων πρέπει να διορθώνονται ανάλογα με την υγρασία που έχουν.

Η κατηγοριοποίηση των αδρανών μπορεί να γίνει με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που αναπτύσσονται παρακάτω.

- Ανάλογα με την φύση τους σε: **Φυσικά αδρανή** όπως πέτρες, βότσαλα, χαλίκια χωρίς επεξεργασία ή θραυσμένα., **Βιομηχανικά αδρανή**: διογκωμένη άργιλος, διογκωμένος περλίτης, βερμικουλίτης κ.τ.λ. , **Ανακυκλωμένα**: προκύπτουν από ανακύκλωση (επεξεργασία και επανάχρηση) δομικών υλικών που έχουν ληφθεί από άλλες κατασκευές, π.χ. υλικά κατεδαφίσεως τοιχοποιιών.
- Ανάλογα την πηγή λήψης τους: **Φυσικά ή Συλλεκτά**, όπως υλικά κοίτης ποταμού, υλικά αναβαθμίδων, κορήματα κλιτύων, **Αδρανή Λατομείων**
- Ανάλογα με το μέγεθός τους: **Λεπτόκκοκα αδρανή** ($D < 4\text{mm}$, άμμοι), **Χονδρόκκοκα αδρανή** ($D > 4\text{mm}$, κροκάλες, γαρμπίλι, χαλίκια, σκύρα), **Παιπάλη** (filler) ($D < 2\text{mm}$, $70 - 100\% < 0,063\text{mm}$)
- Ανάλογα με το ειδικό βάρος τους: **Κανονικού ειδικού βάρους** ($2-3\text{ g/cm}^3$ 3g/cm^3), **Ελαφροβαρή** ($< 2\text{g/cm}^3$), Φυσικά ελαφρά αδρανή, επεξεργασμένα, παραπροϊόντα, επεξεργασμένα μονωτικά, υπέρλαφρα, **Βαρέα** ($> 3\text{ g/cm}^3$) Προέρχονται από ορυκτά όπως ο βαρύτης, μαγνητίτης, αιματίτης, ιλμενίτη
- Ανάλογα με τη χρήση τους: Αδρανή για σκυρόδεμα, Σκύρα έρματος σιδηροδρομικών γραμμών, Αδρανή για ασφαλτομίγματα, Αδρανή με ή χωρίς συνδετικά υλικά για βάσεις και υποβάσεις, Ελαφρά αδρανή, Αδρανή για κονιάματα.

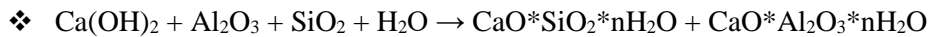
Συνηθισμένα αδρανή που χρησιμοποιούνται στα δομικά υλικά είναι, άμμος (θαλασσινή-ανθρακικής σύστασης, ποταμίσια-χαλαζιακής σύστασης, λατομείου), θραύσματα από ασβεστολιθικά πετρώματα, από γρανίτες, δολομίτες, χαλαζία κ.τ.λ., θραύσματα κεραμικού για τη δημιουργία ενυδατωμένων αργιλοπυριτικών προϊόντων του ασβεστίου τα οποία έχουν καλύτερη πρόσφυση και καλύτερες μηχανικές αντοχές, κίσηρη για την παραγωγή ελαφρού κονιάματος το οποίο έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα.

1.5 Πρόσθετα-Πρόσμεικτα

Τα πρόσθετα ή πρόσμεικτα είναι υλικά που προστίθενται στο κονίαμα σε μικρές ποσότητες ($< 2\%$) σε σχέση με τη μάζα της κονιάς με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού, αλλά και του σκληρυμένου κονιάματος. Τα υλικά αυτά βελτιώνουν την ρευστότητα, την πλαστικότητα και επιβραδύνουν ή επιταχύνουν την πήξη του κονιάματος. Μπορούν να διαχωριστούν σε ανόργανα και οργανικά. Η κυριότερη κατηγορία πρόσθετων με εκτεταμένη χρήση στις κατασκευές είναι οι ποζολάνες οι οποίες ανήκουν στη κατηγορία των ανόργανων. (2) (10) (5) (14)

1. Ποζολανικά Πρόσθετα

Ο επίσημος ορισμός της ποζολάνης δίνεται από τους κανονισμούς ASTM C618, ως "πυριτικό ή αργιλοπυριτικό υλικό, το οποίο καθαυτό δεν παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες αλλά σε λεπτοαλεσμένη μορφή και με την παρουσία υγρασίας αντιδρά με το Ca(OH)_2 σε συνήθη θερμοκρασία και δημιουργεί ενώσεις με συνδετικές ιδιότητες". Η δραστηριότητα τους οφείλεται στο περιεχόμενο άμορφο πυρίτιο και αργίλιο που περιέχουν. Η δράση της ποζολάνης στον ασβέστη δίνεται με την αντίδραση:



Όπου $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ και $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ γράφονται και ως CSH και CAH αντίστοιχα και είναι υπεύθυνα για την γρήγορη σκλήρυνση του κονιάματος και συμβάλλει στην ανάπτυξη υψηλών αντοχών.

Οι ποζολάνες μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε φυσικές και τεχνητές.

Οι φυσικές ποζολάνες προέρχονται από πυροκλαστικά πετρώματα (υλικά ηφαιστειακής προέλευσης), υαλώδους μορφής με περιεχόμενο ποσοστό ενεργού πυριτίου 45-60%. Αποτελούνται κυρίως από πυρίτιο, αργίλιο και από μικρότερες και ποικίλες ποσότητες άλλων ορυκτών που περιέχουν Ca, Mg, Fe, K και Na, τα οποία εκτινάσσονται από ηφαιστειακή με τη μορφή λεπτόκοκκων, υαλωδών υλικών. Ανάλογα με τη φύση των ορυκτολογικών συστατικών τους μπορεί να είναι ηφαιστειογενείς ύαλοι, ζεόλιθοι ή μερικά ζεολιθοποιημένοι ύαλοι ή δραστικές μορφές ένυδρων πυριτικών. Κύριες φυσικές ποζολάνες είναι η Θηραϊκή γη, τόφφοι, οι Ιταλικές ποζολάνες και η ηφαιστειακή τέφρα από τη Γαλλία.

Οι τεχνητές ποζολάνες είναι τα αργιλοπυριτικά υλικά που λαμβάνονται μετά από συγκεκριμένη θερμική κατεργασία. Οι σημερινές τεχνητές ποζολάνες που χρησιμοποιούνται είναι οι ιπτάμενες τέφρες, οι σκωρίες υψικαμίνων, η πυριτική παιπάλη και ο μετακαολινίτης, που προκύπτει από έψηση του καολινίτη. Στην αρχαιότητα χρησιμοποιούνταν ως τεχνητές ποζολάνες θραύσματα από κεραμικά, κεραμίδια, πλίνθους, αγγεία κ.α., η δραστικότητα των οποίων εξαρτάται από την αρχική σύνθεση της αργίλου, τη θερμοκρασία έψησης και το μέγεθος των κόκκων. Γενικά, οι ποζολάνες είναι πιο ενεργές όταν το μέγεθος των σωματιδίων τους είναι μικρότερο από 75μm, ενώ, εάν το μέγεθος των σωματιδίων τους είναι μεγαλύτερο από 300μm συνήθως δρουν ως αδρανή. Προσθήκη ποζολάνας μπορεί να γίνει και σε κονία υδραυλικής άσβεστου που περιέχει μικρή ποσότητα ενεργού πυριτίου προκειμένου να βελτιώσουμε τις ποζολανικές της ιδιότητες.

Μετακαολίνης

Η χρήση ψημένης αργίλου, με τη μορφή του μετακαολίνης, ως ποζολανικό υλικό για κονιάματα και σκυροδέματα έχει προκαλέσει σημαντικό επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Με τη χρήση του μετακαολίνης επιτυγχάνεται αυξημένη ανθεκτικότητα στα κονιάματα και σκυροδέματα και μειώνεται η κατανάλωση τσιμέντου Πόρτλαντ, του οποίου η παραγωγή είναι βλαβερή για το περιβάλλον. Ο μετακαολίνης χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο στο τσιμέντο για την αποτελεσματική απομάκρυνση του ελεύθερου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH), που παράγεται από την ενυδάτωση αυτού. (5)

Ο μετακαολίνης είναι ένα άνυδρο αργιλοπυριτικό στερεό που παράγεται από την όπτηση υψηλής καθαρότητας καολίνης σε μέτριες θερμοκρασίες (650-800 °C), όπου λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση του καολινίτη $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Ο μετακαολινίτης μπορεί επίσης να παραχθεί από την έψηση λατεριτικών γαιών (750-800°C). Μια άλλη πηγή παραγωγής μετακαολίνης είναι η έψηση των αποβλήτων της ανακύκλωσης χαρτιού. Η θερμική αποσύνθεση του καολινίτη διακρίνεται στα στάδια:

- i. <100°C: απομάκρυνση φυσικά ροφημένου νερού
- ii. 100-400°C: αφυδροξυλίωση (απομάκρυνση χημικά δεσμευμένου νερού ή απομάκρυνση κρυσταλλικών νερών ή αρχική απομάκρυνση OH^-)
- iii. 400-700°C: τελική απομάκρυνση OH^- : $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (καολινίτης) \rightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_x\text{O}_{(2-x)}$ (μετακαολινίτης) + $(2-x/2) \text{H}_2\text{O}$
- iv. 700-1000°C: απομάκρυνση των υπολοίπων OH^- του μετακαολινίτη και σχηματισμός $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, άμορφης πυριτίας, σπινελίου Al-Si, και των πρώτων κρυστάλλων μουλίτης:
 - ❖ $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$ (μετακαολινίτης) \rightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_x\text{O}_{(2-x)}$ (σπινέλιο Al-Si) + $(2-x/2) \text{H}_2\text{O}$
 - ❖ $2(\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12})$ (σπινέλιο Al-Si) \rightarrow $2(3\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2)$ (μουλίτης) + 7SiO_2 (χριστοβαλίτης) (110°C)

Ποζολανική Αντίδραση μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης (AS_2) πληροί και τις δύο απαιτούμενες προϋποθέσεις, ώστε να χαρακτηριστεί ποζολανικό υλικό, μία από τις οποίες είναι να αντιδρά με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$, και παράγει ενυδατωμένες ενώσεις ασβεστίου, αργιλίου και πυριτίου, κάτι το οποίο κάνει με τις αντιδράσεις (14):

- ❖ AS_2 (μετακαολίνης) + $6CH + 9H \rightarrow C_4AH_{13}$ (ένυδρο αργιλικό τετρασβέστιο) + $2CSH$ (τομπερμορίτης ή $CSH1$)
- ❖ AS_2 (μετακαολίνης) + $5CH + 3H \rightarrow C_3AH_6$ (ένυδρο αργιλικό τρισβέστιο) + $2CSH$
- ❖ AS_2 (μετακαολίνης) + $3CH + 6H \rightarrow C_4ASH_8$ (ένυδρος γελενήτης) + CSH

Μερικοί παράγοντες που καθορίζουν τα προϊόντα και τον ρυθμό παραγωγής (κινητική της ποζολανικής αντίδρασης του μετακαολίνης με το $Ca(OH)_2$) είναι:

- Θερμοκρασία και χρόνος αντίδρασης
- Αναλογία Μετακαολίνη/ $Ca(OH)_2$
- Κοκκομετρία του μετακαολίνης, αυξημένη λεπτότητα \rightarrow αυξημένη δραστηριότητα
- Το περιβάλλον (pH, προσμίξεις) Τα αλκάλια και ενώσεις αυτών επιταχύνουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης στα πρώιμα στάδια
- Ορυκτολογική σύνθεση μετακαολίνης ειδικότερα η περιεκτικότητα σε Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , SO_4
- Κρυσταλλικότητα του καολινίτη. Μεγάλη κρυσταλλικότητα \rightarrow μετακαολινίτης μικρότερης δραστηριότητας

2. Οργανικά Πρόσθετα

Οι χτίστες κατά την διάρκεια των αιώνων προσπαθούσαν συνέχεια να καλυτερεύσουν τις ιδιότητες των κονιαμάτων. Οι χτίστες βασισμένοι στην εμπειρία ή σε πληροφορίες που είχαν μεταδοθεί προφορικά, προσπαθούσαν να καταλάβουν και να μάθουν τις ιδιότητες των οργανικών υλικών και τα αποτελέσματα που αυτά παρήγαγαν με την χρήση τους στα κονιάματα. Αναφέρεται λοιπόν πως εκτός από τα ανόργανα πρόσθετα, έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης και οργανικά. Η πρόσθεση ενώσεων οργανικής φύσης έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση μιας σειράς ιδιοτήτων όπως η εργασιμότητα, οι μηχανικές αντοχές, η ανθεκτικότητα στον πάγο κ.τ.λ. Παρακάτω εμφανίζονται τα κυριότερα πρόσθετα που έχουν χρησιμοποιηθεί (15) (1) (10) (2) (3):

- Αερακτικό/Σταθεροποιητής: Βελτιώνει την ανθεκτικότητα και σε μικρές ποσότητες λειτουργεί σαν σταθεροποιητής (βύνη, μπύρα, δέρμα ζώων κρόκος αυγού, λίπη, κερί).
- Filler: Βελτιώνει την σκληρότητα (κόλλα, αραβική μαστίχα, αλκής, ζάχαρη, χυμούς φρούτων, γλουτένη, ρύζι, ζάχαρη).
- Ανθεκτικό στην πήξη του νερού: Αντίσταση στη φθορά από πάγο, κύκλους τήξης-πήξης (ζάχαρη)
- Πρόσθετο Διαστολής: Προκαλεί διαστολή κατά την πήξη (ζωϊκές και φυτικές κόλλες).
- Μετατροπέας: Βελτιώνει τις συγκολλητικές ιδιότητες (ασπράδι αυγού, αίμα, αλευρόκολλα, κερατίνη, κολλαγόνο, καζεΐνη, βόραξ, φυτικές ρητίνες).
- Αναστολέας μεταβολής όγκου: Δρα ανασταλτικά στην συστολή (μεταβολή όγκου) (κερί μέλισσας).
- Πλαστικοποιητής: Παρέχει πλαστικότητα, μειώνει την ψαθυρότητα, αυξάνει την εργασιμότητα (ζάχαρη, γάλα, ασπράδι αυγών, λάδι λιναρόσπορου, λίπος χοίρου, γάλα σύκου, ζωϊκή κόλλα).
- Επιβραδυντής: Επιβραδύνει την ταχύτητα πήξης (ζάχαρη, γάλα, ασπράδι αυγών, σακχαρίνη, αλευρόκολλα, βόραξ).
- Σταθεροποιητής: Αυξάνει την σκληρότητα και την ακαμψία (ζάχαρη, φυτικές και ζωϊκές κόλλες, μελάσα).
- Πρόσθετο που βελτιώνει τις αντοχές: Αυξάνει την αντοχή του διαλύματος (κερατίνη, καζεΐνη, τανίνη, κόλλα, λάδι λιναρόσπορου, τρίχες αγελάδος/βοδιού/ανθρώπου, άχυρο, ρύζι, ζύμη σικάλεως, ίνες βαμβακιού, ζωϊκές κόλλες, χυμός σύκου με κρόκο αυγού, ζάχαρη, ασπράδι αυγού).
- Πηκτικό γαλακτώματος: Επιταχύνει την πήξη του μίγματος (αίμα, ξυνισμένο γάλα, καζεΐνη, τυρί, κολλαγόνο, ζελατίνη).

1.6 Είδη Ιστορικών Κονιαμάτων

Όπως ήδη αναφέρθηκε και στην ιστορική αναδρομή, τα κονιάματα έχουν εμφανιστή από την 8^η χιλιετία π.Χ. και εμφανίζονται με μεγάλη ποικιλομορφία ανάλογα με τη περιοχή και τη χρονολογία που κατασκευάζονται, που δείχνει το μεγάλο εύρος που είχαν στη τεχνολογία παραγωγής κονιαμάτων. Τα

ιστορικά κονιάματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν πιο αναλυτικά ανάλογα με τη σύστασή τους τόσο της κονιάς όσο και των αδρανών τους. (6) (2) (16)

Ασβεστιτικά Κονιάματα

Πρόκειται για ένα από τα πιο συχνά κονιάματα στις ιστορικές κατασκευές.

Τα ασβεστιτικά κονιάματα παράγονται με ασβεστίτη (CaCO_3) ως υλικό κονιάς και ασβεστιτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά ως αδρανή. Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά κυμαίνεται από 1:1 μέχρι 1:4 με μέσο όρο 1:3, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε CO_2 μεγαλύτερη του 32% και έως και το 40% σε μερικές περιπτώσεις. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές μικρότερες του 1%, το χημικά δεσμευμένο νερό το οποίο υπάρχει σε αδρανή και όχι στην κονία κυμαίνεται σε τιμές χαμηλότερες του 3%. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι συνήθως μεγαλύτερος του 10 όταν έχει ασβεστιτικά αδρανή, και χαμηλότερες τιμές 7,5-10 όταν έχει κυρίως αργιλοπυριτικά αδρανή.

Τα δεδομένα της μικροδομής είναι φαινόμενη πυκνότητα 1,5-1,8 g/cm^3 , ολικό ειδικό όγκο 170-320 mm^3/g , μέση διάμετρο πόρων 0,8-3,3 μm , ειδική επιφάνεια 1,3-3,3 m^2/g και ολικό πορώδες 18-40%. Εμφανίζουν εφελκυστική τάση κάτω των 0,35 MPa.

Ασβεστιτικά Κονιάματα μη μετασχηματισμένο ασβεστίτη

Πρόκειται για κονιάματα στη κονία των οποίων, στο εξωτερικό, τους έχει γίνει ο μετασχηματισμός του πορτλαντίτη σε ασβεστίτη αλλά στο εσωτερικό τους το μεγαλύτερο μέρος του κονιάματος να μην έχει ενανθρακωθεί ακόμη (αργή διαδικασία).

Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά κυμαίνεται από 1:1 μέχρι 1:2.

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε CO_2 18% και έως και 34%. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές μεγαλύτερες του 1%, το χημικά δεσμευμένο νερό κυμαίνεται σε 4-12% λόγω του υδροξειδίου του ασβεστίου. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι συνήθως 1,5-9. Τα δεδομένα της μικροδομής είναι φαινόμενη πυκνότητα 1,8-1,9 g/cm^3 , ολικό ειδικό όγκο 105-241 mm^3/g , μέση διάμετρο πόρων 0,03-6,5 μm , ειδική επιφάνεια 1,67-10,63 m^2/g και ολικό πορώδες 20-43%. Εμφανίζουν εφελκυστική τάση 0,06-0,7 MPa.

Κονιάματα υδραυλικής ασβέστου

Πρόκειται για κονιάματα που έχουν ως κονία το προϊόν της αργής καύσης ασβεστόλιθου σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά κυμαίνεται από 1:1 μέχρι 1:4.

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν περιεκτικότητα σε CO_2 24% και έως και 34%. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές κοντά στο 1%, το χημικά δεσμευμένο νερό κυμαίνεται στα 3,5-6,5%. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι συνήθως 4,5-9,5. Τα δεδομένα της μικροδομής είναι φαινόμενη πυκνότητα 1,7-2,1 g/cm^3 , ολικό ειδικό όγκο 90-230 mm^3/g , μέση διάμετρο πόρων 0,1-3,5 μm , ειδική επιφάνεια 2,5-13,5 m^2/g και ολικό πορώδες 18-40%. Εμφανίζουν εφελκυστική τάση 0,35-0,55 MPa.

Ασβεστοπηλοκονιάματα

Πρόκειται για κονιάματα που έχουν ως κονία ένα συνδυασμό πηλού και υδρασβέστου.

Τα κονιάματα αυτού του είδους παρουσιάζουν περιεκτικότητα σε CO_2 κάτω των 32% και έως και 34%. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές κοντά κάτω του 1%, το χημικά δεσμευμένο νερό κυμαίνεται σε τιμές χαμηλότερες του 3,5%. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας εμφανίζει διακυμάνσεις καθώς αυτά τα κονιάματα αποτελούνται από ασβέστη και φυλλοπυριτικές ορυκτές φάσεις (πηλός). Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά είναι περίπου 1:1 και το πορώδες του είναι μεγαλύτερο από 30%

Κονιάματα Φυσικής Ποζολάνας

Τα κονιάματα αυτά έχουν ως κονία φυσική ποζολάνη.

Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά κυμαίνεται από 1:4 μέχρι 1:5. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε CO₂ από 12% και έως και 20%. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές 4,5-5%, το χημικά δεσμευμένο νερό κυμαίνεται στα 5-14%. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι μικρότερος του 3 (πολύ υδραυλικό). Τα δεδομένα της μικροδομής είναι φαινόμενη πυκνότητα 1,6-1,9g/cm³, ολικό ειδικό όγκο 160-265mm³/g, μέση διάμετρο πόρων 0,1-1,5μm, ειδική επιφάνεια 3-14m²/g και ολικό πορώδες 30-42%. Εμφανίζουν εφελκυστική τάση μεγαλύτερη των 0,6 MPa.

Κονιάματα Τεχνητής Ποζολάνας

Τα κονιάματα αυτά έχουν ως αδρανή είτε θραύσματα κεραμικού είτε περιέχουν κεραμάλευρο.

Ο λόγος κονιάς/αδρανή με τον οποίον αναμειγνύονται τα υλικά κυμαίνεται στο 1:3, για σκυρόδεμα με θραυσμένο κεραμικό στο 1:2. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε CO₂ από 22% και έως και 29%. Το φυσικά δεσμευμένο νερό παρουσιάζεται σε τιμές 1-4%, το χημικά δεσμευμένο νερό κυμαίνεται στα 3,5-8,5%. Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι μεταξύ των 3 και 6. Τα δεδομένα της μικροδομής είναι φαινόμενη πυκνότητα 1,5-1,9g/cm³, ολικό ειδικό όγκο 170-265mm³/g, μέση διάμετρο πόρων 0,1-0,8μm, ειδική επιφάνεια 3,5-9m²/g και ολικό πορώδες 30-40%. Εμφανίζουν εφελκυστική τάση μεγαλύτερη των 0,55 MPa.

1.7 Φθορά Κονιαμάτων

Η φθορά των κονιαμάτων είναι η αλλοίωση των συστατικών τους με την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον, η οποία γίνεται εμφανής με την πάροδο του χρόνου και επηρεάζει την λειτουργικότητα του υλικού και την αισθητική της κατασκευής. Λόγω της διαφορετικής σύστασης των δομικών υλικών, παρουσιάζουν και διαφορετική αντίσταση στη φθορά η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το υλικό, καθώς και από τη φύση του υλικού. Οι παράγοντες που προκαλούν την φθορά των κονιαμάτων είναι πολυάριθμοι, αλλά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη φύση τους στις εξής τρεις κατηγορίες: μηχανικές ή φυσικές, χημικές και βιολογικές δράσεις. Αυτοί οι παράγοντες δρουν είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά και μπορεί να είναι ενδογενείς ή εξωγενείς. (2) (12)

I. Μηχανικές Δράσεις

Εξωτερικής προέλευσης

Πρόκειται για τα τις καταπονήσεις του υλικού από:

- Τα φορτία που καταπονούν τα υλικά σαν μέρος του δομικού συνόλου,
- Τις θερμοκρασιακές μεταβολές που μπορεί να είναι ημερήσιες ή εποχιακές.
- Τις διαστολές και συστολές στα υλικά,
- Τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ γειτονικών υλικών.
- Την ανάπτυξη τάσεων που καταπονούν τα υλικά,
- Τη διαστολή λόγω προσρόφησης - εξάτμισης της υγρασίας του περιβάλλοντος,
- Τις καταπονήσεις που οφείλονται στον κακό σχεδιασμό του οικοδομήματος που προκαλούν γρήγορη αστοχία του υλικού
- Τις καταπονήσεις από φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, βομβαρδισμοί, πόλεμοι, κατακλυσμοί, πυρκαγιές, βανδαλισμοί, κ.τ.λ.

Εσωτερικής προέλευσης

Υπάρχουν δύο μηχανικές δράσεις εσωτερικής προέλευσης, ο παγετός και η κρυστάλλωση των αλάτων.

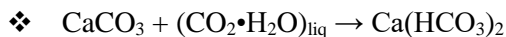
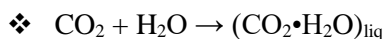
- Παγετός: Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η κατακρατούμενη από το υλικό υγρασία μετατρέπεται σε πάγο όταν η θερμοκρασία κατέβει κάτω του μηδενός και με αποτέλεσμα να διογκώνεται το υλικό προκαλώντας τάσεις στο κονίαμα.
- Κρυστάλλωση των αλάτων: Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο υγρασία που διεισδύει στο κονίαμα μεταφέρει διαλυτά άλατα, τα οποία κρυσταλλώνονται μέσα στους πόρους του κονιάματος και έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσεων στο εσωτερικό του και εξανθήσεων, εάν η εξάτμιση του νερού γίνει κοντά στην επιφάνεια. Οι πηγές της υγρασίας μπορεί να είναι τριχοειδής αναρρίχηση (από το έδαφος), γειτονικά υλικά όπως το τσιμέντο, από το ίδιο το κονίαμα, από τη βροχή και από τον ατμοσφαιρικό αέρα. (17)

II. Χημικές Δράσεις

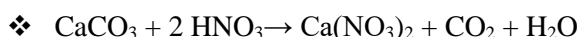
Ανάλογα με το είδος του κονιάματος και το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, λαμβάνουν χώρα διαφορετικές χημικές δράσεις.

Ασβεστιτικά Κονιάματα

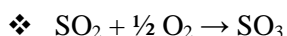
➤ Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂): Το διοξείδιο του άνθρακα όταν διαλυτοποιείται στο νερό δίνει (CO₂·H₂O) και στη συνέχεια αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) και σχηματίζεται το Ca(HCO₃)₂, που είναι προϊόν αρκετά ευδιάλυτο, το οποίο ξεπλένεται εύκολα με το νερό της βροχής με αποτέλεσμα την σταδιακή αποικοδόμηση των κονιαμάτων, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



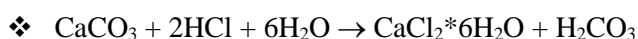
➤ Οξειδία του αζώτου (NO_x): Τα οξειδία του αζώτου μετατρέπονται σε NO₂, το οποίο διαλυτοποιείται στο νερό σχηματίζοντας νιτρικό οξύ (HNO₃) και αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο, παράγοντας το επίσης ευδιάλυτο Ca(NO₃)₂. Η δράση αυτή λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την αντίδραση:



➤ Διοξείδιο του θείου (SO₂): Πρόκειται για το φαινόμενο της γυψοποίησης κατά το οποίο το CaCO₃ προσβάλλεται από SO₂ με αποτέλεσμα την παραγωγή γύψου. Ο γύψος είναι πιο ευδιάλυτος από το CaCO₃, με αποτέλεσμα το κονίαμα να χάσει την αρχική του συνοχή και γίνεται ευπαθές στην βροχή και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το φαινόμενο πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



➤ Προσβολή από HCl: Το HCl έχει διαλυτική δράση στο ανθρακικό ασβέστιο η οποία πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντίδραση:



Υδραυλικά κονιάματα

➤ Δημιουργία μεγαλομοριακών ενώσεων: Κατά το φαινόμενο αυτό η υδράσβεστος και οι υδραυλικές ενώσεις των κονιαμάτων αντιδρούν με τα διαλυτά άλατα K₂SO₄ και Na₂SO₄ που προέρχονται από πλίνθους, κονιάματα ή και το νερό που εισέρχεται μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης με αποτέλεσμα

την παραγωγή γύψου. Έπειτα, ο γύψος αντιδρά με τις υδραυλικές ενώσεις παρουσία υγρασίας και δημιουργεί τις μεγαλομοριακές ενώσεις του ετριγκίτη και θωμασίτη. Η διόγκωση των ενώσεων αυτών ασκεί τάσεις στο υλικό που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε ρηγματώσεις. Το φαινόμενο πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

❖ Παραγωγή γύψου:

- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{KOH}$
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{NaOH}$
- $\text{CSH} + \text{MgSO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{Mg(OH)}_2$

❖ Δημιουργία μεγαλομοριακής ένωσης ετριγκίτη: $3[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 20\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

❖ Δημιουργία μεγαλομοριακής ένωσης θωμασίτη: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + \text{CaSiO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$

➤ Διάσπαση υδραυλικών φάσεων: Οι υδραυλικές ενώσεις όταν έρχονται σε επαφή με το CO_2 αποικοδομούνται σύμφωνα με μια αντίδραση με πολύ αργή κινητική η οποία μπορεί να κρατήσει και χιλιάδες χρόνια. Η αντίδραση αυτή είναι (2):

❖ $\text{CSH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Άλλοι παράγοντες χημικής φθοράς:

➤ Αλκαλική προσβολή: Κατά το φαινόμενο αυτό τα οξείδια του νατρίου, καλίου που περιέχονται σε υδραυλικά, τσιμεντιτικά κονιάματα ή σαν πρόσμιξη στα αδρανή αντιδρούν με το οξείδιο του πυριτίου που υπάρχει στους πλίνθους της τοιχοποιίας ή στα αδρανή του κονιάματος. Μετά την πραγματοποίηση του φαινομένου ακολουθεί αύξηση του όγκου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία ρωγμών. Η αντίδραση που λαμβάνουν χώρα είναι:

❖ $\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$

❖ $\text{K}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{K}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$

➤ Κύκλοι ύγρανσης-ξηράνσης: Υπάρχουν δύο φάσεις στο φαινόμενο αυτό. Η υγρή φάση κατά την οποία λαμβάνει χώρα η δημιουργία ενός φιλμ νερού λόγω συμπύκνωσης και η ταυτόχρονη διαλυτοποίηση ρυπαντών. Το νερού εισχωρεί στο εσωτερικό του υλικού. Και η ξηρή φάση κατά την οποία λαμβάνει χώρα η μετακίνηση νερού προς την επιφάνεια του υλικού και η εξάτμισή του. Υπάρχουν δύο δυνατότητες εξάτμισης. Η πρώτη συμβαίνει η στο εσωτερικό της μάζας του υλικού. Ως αποτέλεσμα πραγματοποιείται κρυστάλλωση αλάτων με συνέπεια την διόγκωση του υλικού, την δημιουργία τάσεων και τέλος την ρήξη του υλικού. Η δεύτερη συμβαίνει στην επιφάνεια του υλικού με συνέπεια την δημιουργία εξανθημάτων και την δημιουργία σκληρής κρούστας. (2)

III. Βιολογικές Δράσεις

Στις βιολογικές δράσεις κατατάσσονται οι δράσεις των βακτηρίων, μυκήτων, φυκιών, βρύων, λειχήνων μανιταριών και ανώτερων φυτικών οργανισμών, που επηρεάζονται τόσο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού. Οι ανώτεροι φυτικοί οργανισμοί αποτελούν απειλή για τα κονιάματα, όταν βρίσκονται σε άμεση επαφή με αυτά, γιατί δημιουργούν μηχανικές τάσεις στο υλικό.

Τα βακτήρια κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Τα αυτότροφα τα οποία λαμβάνουν τον άνθρακα από το CO_2 και παράγουν ενέργεια μέσω του φωτός και τα ετερότροφα που χρησιμοποιούν οργανικές ουσίες για να λάβουν την ποσότητα άνθρακα που χρειάζονται. Έχει παρατηρηθεί ότι σε υλικό που έχει ήδη υποστεί φθορά υπάρχει υψηλός αριθμός βακτηριδίων σε σύγκριση με ένα υλικό το οποίο δεν έχει υποστεί φθορά το οποίο διαθέτει χαμηλό αριθμό βακτηριδίων. Έτσι συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα

βακτήρια παίζουν ρόλο στην αποσύνθεση των δομικών υλικών αν και έχει υποθεί ότι τα βακτήρια έχουν προτίμηση σε υλικά τα οποία έχουν ήδη υποστεί φθορά.

Τα προϊόντα του μεταβολισμού των μικροοργανισμών είναι όξινα και δρα διαλυτικά για τα κονιάματα. Σε συνδυασμό η παρουσία μικροοργανισμών είναι επιζήμια, καθώς μπορεί να δράσει καταλυτικά σε κάποιες χημικές δράσεις που οδηγούν στη φθορά του υλικού. Ακόμη οι ανώτεροι φυτικοί οργανισμοί έχουν τη δυνατότητα να ασκήσουν μηχανικές τάσεις στο υλικό εάν βρίσκονται σε συνεχή επαφή με αυτούς. (2) (1) (18) (19)

2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος

2.1 Μελέτη ιστορικών κονιαμάτων και αντίστροφη μηχανική προσέγγιση για τον σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης

Ένα από τα βασικότερα βήματα στη διάγνωση/επέμβαση/αποκατάσταση ενός μνημείου ή μίας κατασκευής της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι η μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων και ο σχεδιασμός/παρασκευή συνθέσεων κονιαμάτων αποκατάστασης. Πρόκειται για μία περίπλοκη διαδικασία, κυρίως, γιατί κάθε περίπτωση αντιμετωπίζεται με διαφορετικό τρόπο. Όταν αναφερόμαστε στη πολιτιστική κληρονομιά έχουμε πάντα υπόψη ότι κάθε μνημείο ή κτίριο έχει πλούσια ιστορία η οποία επηρεάζει την υφιστάμενη κατάσταση του μνημείου, από τις Α' ύλες που χρησιμοποιήθηκαν, στις φορτίσεις που έχει δεχτεί το κτίριο (περιβαλλοντικές ή και ανθρωπογενής), μέχρι και προηγούμενες επεμβάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο κτίριο. Συνεπώς δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία η οποία έχει προτυποποιηθεί μέχρι στιγμής για τη μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων και το σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης.

Ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων είναι μία αρκετά χρήσιμη διαδικασία στο τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς γιατί επιτρέπει να εξεταστούν οι διαφορετικές φάσεις ενός κτιρίου, μας επιτρέπει να λάβουμε σωστές (ή βέλτιστες) αποφάσεις για την αποκατάσταση ενός κτιρίου και μας επιτρέπει να κάνουμε χρονολόγηση του κτιρίου που εξετάζεται κάθε φορά, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για το χαρακτηρισμό κονιαμάτων. Κάθε μία μας δίνει διαφορετικές πληροφορίες για το δείγμα που εξετάζουμε και συνδυαστικά μεταξύ τους μπορούν να δώσουν αποτελέσματα σύμφωνα με τα οποία ο κάθε αναλυτής μπορεί να βγάλει πολλά συμπεράσματα. Ο κάθε αναλυτής χρησιμοποιεί διαφορετική μεθοδολογία, ανάλογα με τη περίπτωση που εξετάζει και τα μέσα που έχει (οικονομικά και εργοληπτικά). Είναι πολύ σημαντικό να έχει γίνει σωστή δειγματοληψία. Παρακάτω αναπτύσσονται κάποιες από τις κυριότερες μεθόδους για το χαρακτηρισμό αυτό. (2) (20) (21) (22) (6) (5) (19) (23)

Μακροσκοπικές-Μικροσκοπικές Παρατηρήσεις: Ο αναλυτής με τις πληροφορίες που έχει για το δείγμα από τη δειγματοληψία, με παρατήρηση στο στερεοσκόπιο ή σε μικροσκόπιο οπτικών ινών. Μπορεί να καταλάβει ποια χρήση είχε το κονίαμα (αρμολόγησης, συμπλήρωσης, κτλ), να δει τη ποικιλία των αδρανών ή εάν υπήρχαν άλλα πρόσθετα (πχ άχυρο, γιδότριχες κτλ). Η παρατήρηση στο μικροσκόπιο μπορεί να γίνει και είτε με στιλπνές είτε λεπτές τομές είτε χωρίς κάποια προεργασία στο κονίαμα, ανάλογα με το μικροσκόπιο το οποίο χρησιμοποιεί ο αναλυτής.

Φυσικός διαχωρισμός αδρανών-συνδετικού υλικού (Κοκκομετρική Ανάλυση): Πρόκειται για μία από τις πιο σημαντικές διαδικασίες κατά το χαρακτηρισμό. Με αυτή τη τεχνική γίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών από τη κονία του κονιάματος. Προσδιορίζεται η κοκκομετρική κατανομή του κονιάματος, δηλαδή με ποιο τρόπο είναι κατανεμημένα στο χώρο τα αδρανή του κονιάματος. Η πληροφορία αυτή μας δίνει ένδειξη των αντοχών του κονιάματος, της τεχνικής παρασκευής του και κατά συνέπεια της περιόδου κατασκευής του. Πέρα από τα παραπάνω μας δίνει τη δυνατότητα να εξετάσουμε το είδος της κονιάς περαιτέρω. Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ο πιο αποδοτικός και ασφαλής όμως είναι με κόσκινα συγκεκριμένης διαμέτρου.

Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD): Με τη περίθλαση ακτίνων Χ γίνεται ανίχνευση των κρυσταλλικών ενώσεων στο κονίαμα που εξετάζεται. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ορυκτολογική σύσταση του κονιάματος. Είναι μία μέθοδος η οποία είναι σχετικά σημαντική για τον προσδιορισμό των κονιαμάτων, καθώς είναι οικονομική, γρήγορη και δίνει αποτελέσματα που είναι εύκολο να ερμηνευτούν.

Θερμική Ανάλυση (DTA-TG): Με αυτή τη τεχνική μπορεί να γίνει ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός σημαντικών χημικών ενώσεων (CaCO_3 , Ca(OH)_2 , Mg(OH)_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, οργανικά πρόσθετα, Χαλαζίας, κτλ). Εκτός από αυτό το προσδιορισμό μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση των δειγμάτων με βάση την υδραυλικότητα, με βάση τον αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας. Η τεχνική αυτή είναι σημαντικό να ακολουθηθεί και στη κονία, εάν έχει προηγηθεί ο διαχωρισμός των αδρανών από τη κονία. Η τεχνική αυτή είναι μία από τις πιο σημαντικές που μπορεί να εφαρμοστεί καθώς δίνει πληροφορίες οι οποίες σημαντικότερες για τα κονιάματα.

Ολική εμφάνιση σε νερό: Μέσω αυτής της τεχνικής εξετάζεται η συμπεριφορά του κονιάματος σε σχέση με το νερό. Μέσω αυτής της τεχνικής μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ποσότητα νερού μπορεί να απορροφηθεί από το δείγμα, το ολικό πορώδες προσβάσιμο στο νερό. Είναι αρκετά εύκολη μέθοδος και απαιτεί ελάχιστο εξοπλισμό, εάν ο αναλυτής θεωρεί απαραίτητο να βρεθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά τότε είναι επιθυμητό να γίνει, είναι χρήσιμη τεχνική, αλλά όχι απολύτως απαραίτητη. Δίνει μία καλή εικόνα τις μικροδομής του υλικού, χωρίς να είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν άλλες μέθοδοι που απαιτούν αρκετή προεργασία, εξοπλισμό, είναι χρονοβόρες και απαιτούν κάποιο κόστος.

Αγωγιμομετρία-Spot Test-PH: Η μέτρηση αγωγιμότητας στο δείγμα μπορεί να μας δώσει το ποσοστό των διαλυτών αλάτων που περιέχονται στο δείγμα. Η περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα (πρέπει να είναι <3% για 'υγιές' δείγμα) και η τιμή του pH (ένα κονίαμα το οποίο δεν έχει υποστεί διάβρωση εμφανίζει ελαφρώς βασικές τιμές ~9) είναι ένδειξη της φθοράς του κονιάματος συνεπώς είναι ένα σημαντικό βήμα στο χαρακτηρισμό των κονιαμάτων. Με τα spot test γίνεται προσδιορισμός του είδους των αλάτων. (24)

Χρωματομετρία: Πρόκειται για τεχνική η οποία αποτυπώνει το χρώμα μίας επιφάνειας ή ενός υλικού με αριθμητικά μεγέθη. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει αντικειμενική αναφορά στο χρώμα ενός αντικειμένου. Χρησιμεύει ιδιαίτερα όταν μελετούνται επιχρίσματα ή κονιάματα τα οποία είναι φανερά σε ένα κτίριο. Πρόκειται για μία εύκολη και γρήγορη μέτρηση.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για το χαρακτηρισμό των κονιαμάτων οι οποίες όμως δεν είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν (πχ FTIR, Raman, XRF, SEM-EDX, MIP, πετρογραφικός έλεγχος, χημικές αναλύσεις, δοκιμές θλίψης, κτλ). Σε ορισμένες περιπτώσεις και υπό προϋποθέσεις (πχ επαρκής ποσότητα δείγματος, γεωμετρία δείγματος, κτλ) ίσως είναι χρήσιμο να εφαρμοστούν.

Για το σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης χρησιμοποιείται κατά κόρον ή μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering), όπου πρακτικά με βάση τα χαρακτηριστικά του ήδη υπάρχον ιστορικού κονιάματος, σχεδιάζεται το κονίαμα αποκατάστασης. Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης είναι (7) (25) (26):

- 1) Χαρακτηρισμός/αποτίμηση ιστορικών κονιαμάτων, όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω παραγράφους, με επιλογή στη συνέχεια των πρώτων υλών και των συνθέσεων των κονιαμάτων αποκατάστασης
- 2) Προετοιμασία συνθέσεων κονιαμάτων με συντήρηση σε ελεγχόμενες συνθήκες κατά τη πήξη
- 3) Αποτίμηση ιδιοτήτων κονιαμάτων αποκατάστασης σε διάφορες φάσεις τις πήξης και μετά το πέρας της πήξης των κονιαμάτων με βάση τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον χαρακτηρισμό/αποτίμηση ιστορικών κονιαμάτων.
- 4) Αριστοποίηση / τυποποίηση των συνθέσεων βάσει της αποτίμησης των κονιαμάτων αποκατάστασης
- 5) Πιλοτική επί τόπου εφαρμογή και αποτίμηση της πιλοτικής εφαρμογής.

Η μεθοδολογία αυτή ακολουθείται, όταν πρέπει να κατασκευαστεί ένα κονίαμα αποκατάστασης, έτσι ώστε να γίνει η επιλογή μίας σύνθεσης ενός συμβατού κονιάματος αποκατάστασης. Η έννοια του συμβατού κονιάματος είναι αρκετά περίπλοκη. Πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να γίνει σχεδιασμός ενός κονιάματος το οποίο να μη βλάπτει ή επηρεάζει αρνητικά την υπάρχουσα κατάσταση του κτιρίου, να μην επηρεάζει μελλοντικές επεμβάσεις οι οποίες υπάρχει περίπτωση να λάβουν χώρα στο κτίριο, ενώ παράλληλα πρέπει να είναι αποδοτικό όσον αφορά τη λειτουργία του τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Καθώς κάθε περίπτωση είναι διαφορετική, στόχος είναι να προσδιοριστούν συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία θα διατυπώνουν τα εύρη τιμών που μπορούν να έχουν συγκεκριμένα μεγέθη ή θα αναλύουν τα ποιοτικά στοιχεία που πρέπει να έχει το υλικό αποκατάστασης. Όταν γίνεται αναφορά σε ιστορικά δομικά υλικά δε μπορεί να διατυπωθεί συγκεκριμένες τιμές των διάφορων μεγεθών (αντοχή θλίψης, ολικό πορώδες κτλ), αλλά εύρη τιμών. (5)

Τα κριτήρια τα οποία θα λάβουμε υπόψη θα είναι διαφορετικά κάθε φορά, αλλά θα έχουν κυρίως σχέση με την αισθητική, φυσικοχημική και μηχανική συμβατότητα του υλικού. Κατά τη διαδικασία της

επιλογής των κριτηρίων ένα από τα βήματα που ακολουθούνται είναι η δειγματοληψία ιστορικών κονιαμάτων από το κτίριο για το χαρακτηρισμό τους. Τις περισσότερες φορές η δειγματοληψία μπορεί να γίνει είναι περιορισμένη, συνεπώς συνήθως δεν υπάρχει αντιπροσωπευτικός πληθυσμός δειγμάτων για μία στατιστική ανάλυση έτσι ώστε να έχουμε απόλυτους αριθμούς των διάφορων χαρακτηριστικών των κονιαμάτων αποκατάστασης, π.χ. συγκεκριμένο πορώδες, συντελεστή τριχοειδή αναρρίχησης κτλ. Στόχος σε αυτή τη διαδικασία είναι η τοποθέτηση των κονιαμάτων σε συγκεκριμένες κατηγορίες, π.χ. ασβεστιτικά, φυσικής ή τεχνητής ποζολάνας κτλ, και μετά ο ορισμός συγκεκριμένων ορίων στα επιμέρους χαρακτηριστικά των κονιαμάτων αποκατάστασης. Να σημειωθεί εδώ ότι δεν λαμβάνονται υπόψη μόνο τα χαρακτηριστικά των ιστορικών κονιαμάτων, αλλά και των άλλων δομικών στοιχείων, π.χ. λίθοι. Η επιλογή των κριτηρίων μπορεί να γίνει με βάση διάφορα χαρακτηριστικά. (27)

Επιλογή κριτηρίων με βάση τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών της κατασκευής (κονιάματα, λίθοι, τοιχοποιίες), δηλαδή με βάση τη συμβατότητα. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να έχουν σχέση με την επιλογή και το χαρακτηρισμό των πρώτων υλών, την αποτίμηση των νωπών κονιαμάτων (ελάχιστη ποσότητα νερού, εργασιμότητα, φαινόμενη πυκνότητα, περιεχόμενος αέρας, εύκολη εφαρμογή στη τοιχοποιία), την αποτίμηση στις φάσεις πήξης και πρόσληψης των αντοχών (συμβατότητα-μικροδομή, επιτελεστικότητα-μηχανικές αντοχές, εξέλιξη ενανθράκωσης-ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων), και τέλος με την αποτίμηση των κονιαμάτων μετά το πέρας της πήξης τους, όπου τα χαρακτηριστικά αυτά αναπτύσσονται παρακάτω.

Επιλογή κριτηρίων με βάση τα χαρακτηριστικά των παραγόντων του περιβάλλοντος και της φθοράς, δηλαδή με βάση την επίδοσή τους στους εξωτερικούς παράγοντες.

Τα κύρια κριτήρια που λαμβάνουμε υπόψη μετά το πέρας της σκλήρυνσης των κονιαμάτων είναι τα παρακάτω.

Αισθητικά Κριτήρια: Πρέπει τα τελικά χρώμα των κονιαμάτων να μην έχει μεγάλη διαφορά σε σχέση με το ιστορικό κονίαμα και τη λιθοδομή, με βάση το ΔΕ*, ειδικά στη περίπτωση που δε μπει επίχρισμα στη τοιχοποιία και ο αρμός είναι εμφανής. Όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη και σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή με το πέρασμα του χρόνου να μην έχουμε αλλαγή του χρώματος του κονιάματος.

Χημικά Κριτήρια: Πρέπει τα κονίαμα να μην έχει παραπροϊόντα που να βλάπτουν την υπάρχουσα κατασκευή. Ανάλογα με το περιβάλλον γίνεται η κατάλληλη επιλογή κονιάς και αδρανών, ώστε να καθυστερήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τη φθορά του υλικού, ενώ παράλληλα εάν στο κτίριο παραμένει κάποια ποσότητα από το ιστορικό κονίαμα να δημιουργηθούν χημικοί δεσμοί μεταξύ των δύο κονιαμάτων, χωρίς όμως να βλάπτει το ιστορικό υλικό. Πάντα έχουμε υπόψη και το παράγοντα του χρόνου, δηλαδή να μην έχουμε παραγωγή βλαβερών για τη κατασκευή προϊόντων. Είναι πολύ σημαντική η επιλογή των πρώτων υλών.

Φυσικά Κριτήρια: Είναι πολύ σημαντικό τα υλικά να έχουν όμοια χαρακτηριστικά μικροδομής έτσι ώστε να μην έχουμε ανεπιθύμητα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας και διαλυτών αλάτων. Πρέπει δηλαδή η μικροδομή να επιτρέπει τη διαπνοή της υγρασίας, σε καμία περίπτωση δε πρέπει να έχει μικρότερη μικροδομή (πορώδες ακτίνα πόρων κτλ) από τους λίθους και το ιστορικό κονίαμα. Ως συνέπεια πρέπει να έχουμε όμοιους (δηλαδή σε ίδια εύρη τιμών) συντελεστές διαπνοής και τριχοειδής αναρρίχησης. Ακόμη, στα κονιάματα αρμολόγησης παίζει σημαντικό ρόλο και η κοκκοδιαβάθμιση, πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να είναι συμβατή με το μέγεθος του αρμού, να μπορεί να γίνει έλεγχος τοποθέτησης (ή επανατοποθέτησης) των λίθων (ρεολογικά χαρακτηριστικά).

Μηχανικά Κριτήρια: Είναι σημαντικό το καινούριο υλικό που θα τοποθετηθεί στη κατασκευή να έχει τουλάχιστον ελαφρώς μικρότερες αντοχές από το ιστορικό, είτε αναφερόμαστε σε λίθο είτε σε κονίαμα. Αυτό είναι απαραίτητα γιατί πρωταρχική δουλειά του κονιάματος αποκατάστασης είναι η προστασία του ιστορικού υλικού, συνεπώς επιθυμούμε να θυσιάσουμε το καινούριο έναντι του παλιού. Ειδικά στη περίπτωση του κονιάματος αρμολόγησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο αφού είναι

Ανάλογα με τα ήδη υπάρχον κονιάματα, τη κατασκευή και το περιβάλλον τα κριτήρια αυτά αλλάζουν. Στόχος είναι ανάλογα τη περίπτωση να οριστούν όρια αποδοχής συγκεκριμένων μετρήσιμων χαρακτηριστικών και με βάση αυτά να γίνει η αποτίμηση του κονιάματος αποκατάστασης.

2.2 Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Μπορούν να διακριθούν επτά ιστορικές περιόδους του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα (28) (29) (30):

1. Η Ιουδαϊκή Χριστιανική περίοδος όπου έγινε η κατασκευή και η χρήση του αρχικού βράχου ως ταφικός θάλαμος μέχρι την κάλυψή του από τις εργασίες του Αδριανού το 135μ.Χ.
2. Η ρωμαϊκή περίοδος όπου ο τάφος καλύπτεται από το 135μ.Χ. έως το 325-6μ.Χ. από τις εργασίες του Αδριανού.
3. Η βυζαντινή περίοδος όπου το Κουβούκλιο δημιουργείται από τον Κωνσταντίνο γύρω από τον τάφο μέχρι την καταστροφή του από τον Αλ-Χακίμ το 1009μ.Χ.
4. Η σταυροφορική περίοδος όπου το Κουβούκλιο κατασκευάζεται- επισκευάζεται από τους Σταυροφόρους (3^η Οικοδομική Φάση), στην αρχή του 11^{ου} αιώνα. Σε αυτή την περίοδο το μνημείο υποστεί αρκετές φθορές, χωρίς να έχουν γίνει εκτεταμένες επεμβάσεις έως την ανακατασκευή του το 1555μ.Χ.
5. Η μεσαιωνική-αναγεννησιακή περίοδος κατά την οποία το Κουβούκλιο επισκευάστηκε από τον Μπονιφάτσιο το 1555μ.Χ. και η μορφή διατηρήθηκε έως το 1808 όπου υπόκειται ζημιές από πυρκαγιά.
6. Αρχές του 19^{ου} αιώνα, το Κουβούκλιο επισκευάζεται από τον Έλληνα αρχιτέκτονα Κομνηνό το 1809-10μ.Χ..
7. Η σύγχρονη περίοδος όπου έγινε πλήρης αναστήλωση του μνημείου από το Ε.Μ.Π. με ολοκλήρωση του έργου τον Μάρτιο του 2017.

Ιουδαϊκή Χριστιανική Περίοδος 33-135μ.Χ.

Αυτή την περίοδο δεν υπάρχουν χριστιανικά κτήρια, καθώς τα θρησκευτικά καθήκοντα λαμβάνουν χώρα σε ιδιωτικούς χώρους. Θρησκευτικές τελετές γίνονται στον Γολγοθά με τη λατρεία του Σταυρού ο οποίος έχει τοποθετηθεί πάνω στον Βράχο. Αυτό γίνεται έως το 135μ.Χ. όπου καταστέλλεται η επανάσταση των Ιουδαίων οι οποίοι τελούν υπό την καθοδήγηση του Βαρ Κοχέβα. Ο Αδριανός απαγόρευσε τη χριστιανική λατρεία με θανατική ποινή.

Ρωμαϊκή- Ειδωλολατρική Περίοδος 135-325/6μ.Χ.

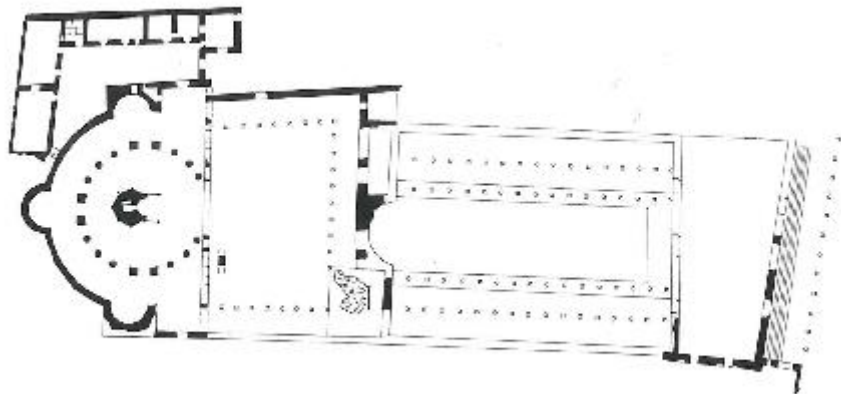
Η πόλη των Ιεροσολύμων, αυτή τη χρονική περίοδο κατοικείται από Ρωμαίους ειδωλόλατρες και ευγενείς χριστιανούς. Για την εξάλειψη του χριστιανισμού ο Αδριανός καλύπτει τον Πανάγιο Τάφο και τον Γολγοθά με μεγαλοπρεπείς ειδωλολατρικούς ναούς. Πιο συγκεκριμένα, στον Πανάγιο Τάφο κατασκευάστηκε ένα Καπιτώλιο, όπου λατρεύονταν οι θεότητες του Δία, της Αθηνάς και της Ήρας, ενώ στην κορυφή του Γολγοθά λατρεύεται το άγαλμα της Αφροδίτης.

Βυζαντινή Περίοδος 325/6-1009μ.Χ.

Μετά την Οικουμενική Σύνοδο στη Νίκαια στις 25 Αυγούστου του 325μ.Χ. η χριστιανική θρησκεία γίνεται επίσημη και ο αυτοκράτορας Κωνσταντίνος δίνει εντολή να αποκαλυφθούν οι Άγιοι Τόποι, και ο Πατριάρχης Μακάριος επιχειρεί την κατεδάφιση του Καπιτωλίου. Με την απομάκρυνση των ειδωλολατρικών κατασκευών αποκαλύπτεται ο Πανάγιος Τάφος και το σημείο του Γολγοθά. Στα δύο αυτά σημεία χτίστηκαν τα κωνσταντίνια οικοδομήματα.

Τα οικοδομήματα χτίστηκαν στη βάση του λόφου Gareb και αποτελούνταν από πέντε κτήρια: το ανατολικό αίθριο, το Μαρτύριο ή Βασιλική, το Τρικάμαρο, τη Ροτόντα και το Πατριαρχείο. Το συγκρότημα αυτό είχε συνολικό μήκος 150 μέτρα και πλάτος 59 μέτρα. Οι αρχιτέκτονες του Κωνσταντίνου έσκαψαν σε βάθος 8 με 9 μέτρα από τη στάθμη του Παναγίου Τάφου για την εξασφάλιση της θεμελίωσης των κτηρίων. Ο Γολγοθάς λαξεύτηκε ακόμα περισσότερο στη νότια και δυτική πλευρά του για την ενσωμάτωση του Τρικάμαρου. Στην είσοδο βρισκόταν το εξωτερικό

κλιμακοστάσιο που οδηγούσε στο Αίθριο. Το Αίθριο με τη σειρά του οδηγούσε στη Βασιλική που ήταν πεντάκλιτη με διπλούς γυναικωνίτες.



Εικόνα 1 1η Οικοδομική Φάση της εποχής του Μ. Κωνσταντίνου.

Η μορφή αυτή διατηρήθηκε για 278 χρόνια. Τον Μάιο του 614μ.Χ. περσικά στρατεύματα του βασιλιά Χοσρόη Β' εισβάλουν στα Ιεροσόλυμα και καταστρέφουν το συγκρότημα. Το 622μ.Χ. με διάταγμα του Χοσρόη επιτρέπεται η ανοικοδόμηση των κατεστραμμένων εκκλησιών. Ο ηγούμενος Μόδεστος το 617μ.Χ. οργανώνει αναστήλωση των προσκνημάτων, αλλά δεν ολοκληρώνει το έργο και περιορίζεται στη Ροτόντα και την εκκλησία του Γολγοθά και του Τίμιου Σταυρού.

Το Κουβούκλιο αποτελούνταν από δύο μέρη. Στο μπροστινό μέρος υπήρχε αυλή που στηριζόταν με τέσσερις πυλώνες με ένα αέτωμα και σκεπαστή οροφή. Πίσω βρισκόταν ο Ταφικός Θάλαμος ο οποίος ήταν στρογγυλός ή πολυγωνικός καλυμμένος με μάρμαρο και διακοσμημένος με πέντε πυλώνες και σκεπασμένος από κωνική οροφή και σταυρό στην κορυφή.

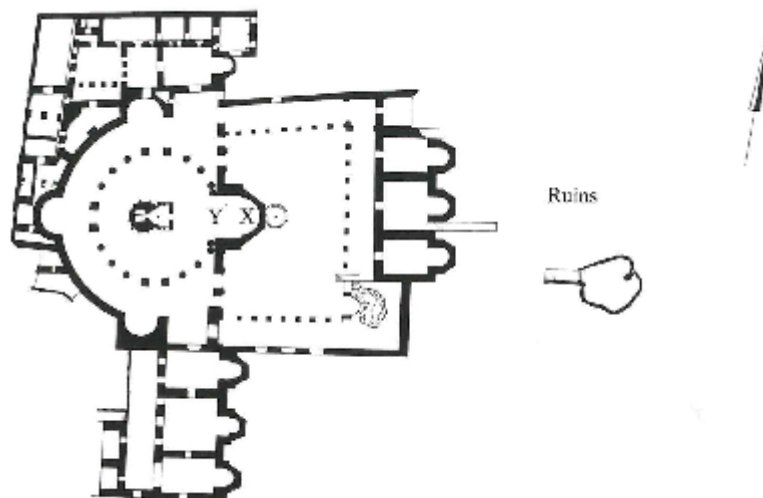


Εικόνα 2 Απεικόνιση 1η Οικοδομικής Φάσης του Κουβουκλίου.

Το συγκρότημα πλήττεται από καταστροφικούς σεισμούς του 746μ.Χ., 1016μ.Χ. και 1033μ.Χ, ενώ το 938μ.Χ. και 966μ.Χ. πλήττεται από εμπρησμούς από φανατικούς μουσουλμάνους οι οποίοι καταλαμβάνουν το Αίθριο και τη Βασιλική.

Το 1009μ.Χ. λαμβάνει χώρα η μεγαλύτερη καταστροφή των προσκνημάτων από τον χαλίφη της Αιγύπτου Al-Hakem σε βαθμό που ο Ναός, αλλά τας της Αναστάσεως καταλήγει σε ερείπια. Υπήρξαν προσπάθειες για αναστήλωση των μνημείων, αλλά ήταν περιορισμένες λόγω έλλειψης χρηματικών πόρων. Επί της βασιλείας του Κωνσταντίνου του Μονομάχου και επί της πατριαρχίας του Νικηφόρου

έγινε η ανοικοδόμηση των μνημείων η οποία σε βασικές γραμμές ακολούθησε τα σχέδια του Μόδεστου. Αυτή αποτελεί τη 2^η οικοδομική φάση του μνημείου.



Εικόνα 3 2η Οικοδομική Φάση της εποχής του Κωνσταντίνου του Μονομάχου

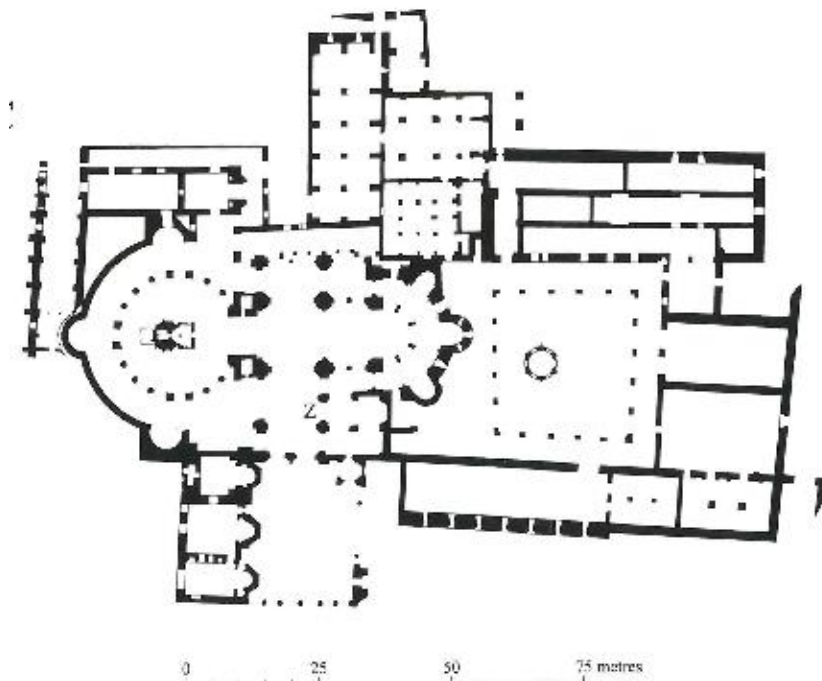
Στο Κουβούκλιο οι αλλαγές που έγιναν είναι οι εξής. Αρχικά, στην ανατολική πλευρά προσαρμόστηκε μία κατασκευή η οποία στο μέλλον θα γίνει το Παρεκκλήσι των Αγγέλων. Στη συνέχεια, ο τρούλλος στηρίζεται σε πυλώνες και τοποθετείται πάνω από την δυτική κατασκευή πάνω από τον Ταφικό Θάλαμο. Μετά, στη δυτική πλευρά προστέθηκε ένα Παρεκκλήσι που στο μέλλον θα γίνει το Παρεκκλήσι των Κοπτών. Τέλος, προστέθηκαν πάγκοι στην μπροστινή πόρτα του Κουβουκλίου.



Εικόνα 4 Απεικόνιση 2η Οικοδομικής Φάσης του Κουβουκλίου.

Σταυροφορική Περίοδος-3^η Οικοδομική Φάση

Στις 15 Ιουλίου του 1099μ.Χ. γίνεται η κατάληψη της Ιερουσαλήμ και το 1140μ.Χ.-1149μ.Χ επιχειρείται ανοικοδόμηση του Ναού της Αναστάσεως από τους Σταυροφόρους. Οι επεμβάσεις των σταυροφόρων έχουν ρωμαϊκή τεχνοτροπία και όλα τα προσκυνήματα ενσωματώνονται σε ένα οικοδόμημα. Διατηρείται η προηγούμενη οικοδομική φάση αλλά το Τρικάμαρο αντικαθίσταται με το Καθολικό. Το 1119μ.Χ. το Κουβούκλιο επισκευάζεται από τον Renghiera Renghieri, όπου προστίθεται και ο κλειστός πλέον προθάλαμος του Παρεκκλησίου των Αγγέλων.

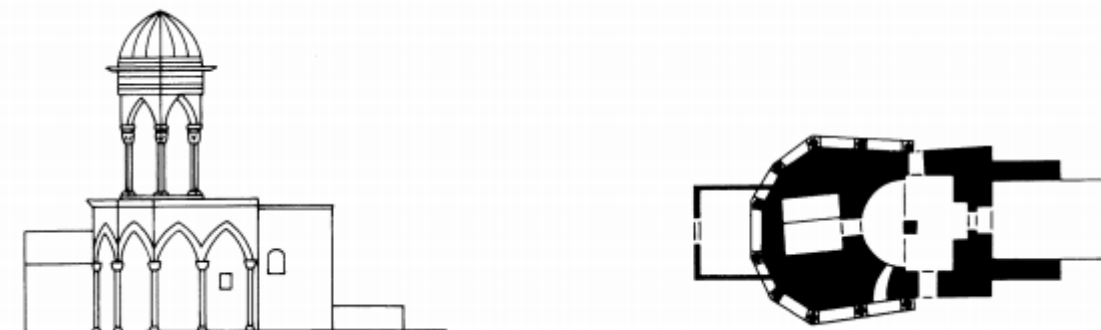


Εικόνα 5 3η Οικοδομική Φάση της εποχής των Σταυροφόρων

Μεσαιωνική Περίοδος-Επισκευές του Μπονιφάτσιο 1555μ.Χ.

Η ανακατασκευή του Κουβουκλίου από τον Μπονιφάτσιο το 1555μ.Χ. χαρακτηρίζεται ως δευτερεύουσας σημασίας. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποίησε κάποια προηγούμενα στοιχεία το έργο του Μπονιφάτσιο φαίνεται να εμπεριέχει την κατεδάφιση και την ανακατασκευή του. Ο Μπονιφάτσιο ανακαίνισε το θόλο της Ροτόντας κάτι που υποδηλώνει ότι ξανάχτισε και τον τρούλλο πάνω από το Κουβούκλιο, σύμφωνα με τον Αναγεννησιακό διάκοσμο.

Κατά το πέρασμα των αιώνων το Κουβούκλιο υποβλήθηκε σε φθορές. Κάποιους από τους λίθους αποκολλήθηκαν ή απομακρύνθηκαν. Τον Μάιο του 1728 οι Φράγκοι έκαναν κάποιες επισκευές στο εσωτερικό του Ταφικού Θαλάμου οι οποίες δε διήρκησαν για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά δεν είναι σίγουρο σε ποια σημεία και από ποιον έγιναν οι επισκευές αυτές.



Εικόνα 6 Απεικόνιση του Κουβουκλίου μετά τις εργασίες του Μπονιφάτσιο

Ανακατασκευές Νικόλαου Κομνηνού- 1809/10.

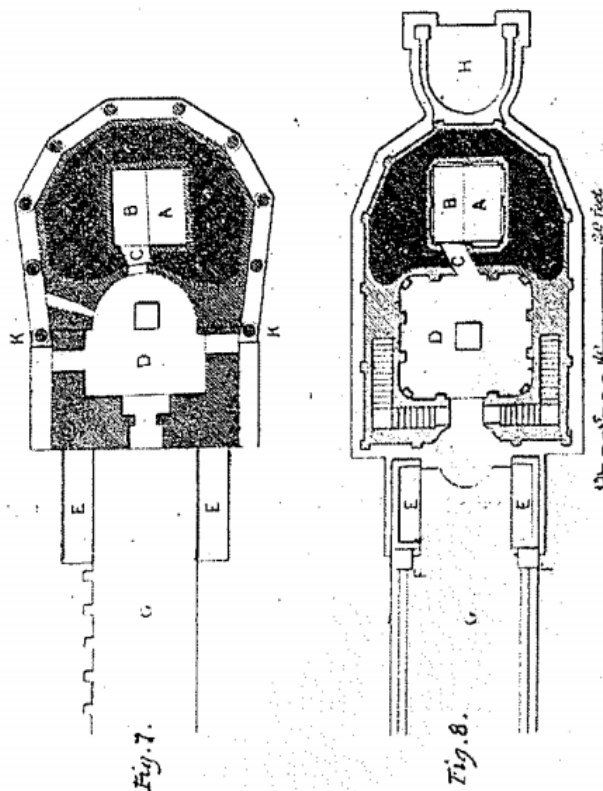
Το 1808 η εκκλησία του Παναγίου Τάφου καταστράφηκε εκτενώς από πυρκαγιά. Η οροφή της Ροτόντας κατέρρευσε πάνω στο Κουβούκλιο με αποτέλεσμα να καταστραφεί ο τρούλλος του και αρκετό από το μάρμαρο και την ασβεστολιθική επένδυση, αφήνοντας όμως σχετικά άθικτο το εσωτερικό του. Η πόρτα του Κουβουκλίου, όμως δεν καταστράφηκε από την πυρκαγιά και διατηρείται μέχρι σήμερα στο μουσείο του Ελληνικού Ορθόδοξου Πατριαρχείου. Η πόρτα αυτή αν και μαυρισμένη και ελαφρώς καμένη στο εξωτερικό κάτω μέρος της, φαίνεται να προστάτευε το εσωτερικό από την υψηλή θερμοκρασία και τον καπνό της πυρκαγιάς. Παρ'όλ'αυτά, οι μισές κρεμασμένες απεικονίσεις του Παρεκκλησίου των Αγγέλων υπέστησαν φθορές.

Το Μάρτιο του 1809 η Ελληνική Ορθόδοξη Κοινότητα απέκτησε από τον Σουλτάνο Μαχμούντ τον 2^ο (1809-39) άδεια που επέτρεπε την ανακατασκευή της εκκλησίας. Το έργο ολοκληρώθηκε μέσα στον επόμενο χρόνο κάτω από την διεύθυνση (επίβλεψη) του Έλληνα αρχιτέκτονα από την Κωνσταντινούπολη, Νικόλαου Κομνηνού. Ο Νικόλαος Κομνηνός (1770-1821) είχε καταγωγή από τη Μυτιλήνη και εργάστηκε στην Κωνσταντινούπολη από το 1790 για την αποκατάσταση της εκκλησίας Ζωοδόχου Πηγής (Balıklı Kilesi) το 1797, και το 1807 στην εκκλησία της Παναγίας (Παρθένου της Πέρα) καθώς και στην κατασκευή άλλων μεγάλων δημόσιων και ιδιωτικών κτηρίων. Ακόμη ήταν ένα από τα πρώτα μέλη της Φιλικής Εταιρείας και δολοφονήθηκε από τον όγκλο στην Κωνσταντινούπολη μαζί με τον Πατριάρχη Γεώργιο τον 5^ο και μέλη της ελληνικής κοινότητας στις 21 Απριλίου 1821 την επομένη ημέρα που έφτασαν τα νέα της ελληνικής επανάστασης στην πόλη.

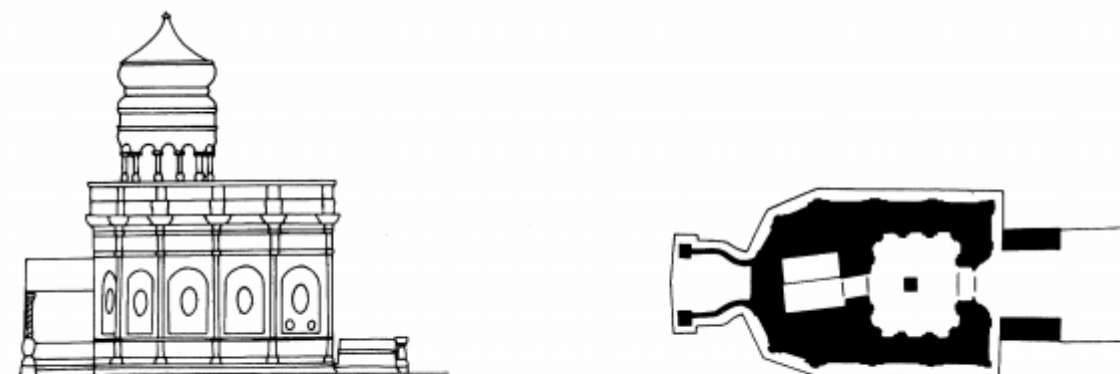
Ο Κομνηνός έφυγε από την Κωνσταντινούπολη στις 3 Μαΐου του 1809 και ολοκλήρωσε το έργο στις 13 Σεπτεμβρίου του 1810. Το έργο εκτελέστηκε από ορθόδοξους τεχνίτες του Πατριαρχείου των Ιεροσολύμων με την επίβλεψη του Κομνηνού και του Δράκου, ενός αρχικτίστη από τη Ρόδο. Στις επιγραφές του Κουβουκλίου αναφέρονται και οι Αντώνογλου Πότος από τον Άγιο Στέφανο στην Καισαρεία, Λάζος γιός του Θεόδωρου από το χωριό του Λούδρου και Κουλούμογλου Πότος από την Καπαδοκία.

Η αναστήλωση της εκκλησίας του Παναγίου Τάφου επί του Κομνηνού ήταν εκτενής και αποτελούνταν από το καθολικό, την ανατολική του αψίδα που ξαναχτίστηκε σε σχήμα κογχυλίου και την Ροτόντα. Οι κολώνες και οι πεσσοί τις Ροτόντας που ασβεστοποιήθηκαν στην πυρκαγιά καλύφθηκαν με κονίαμα από χαλίκια, ο θόλος ξαναχτίστηκε και το εσωτερικό ξαναδιακοσμήθηκε. Η κεντρική επιγραφή στην κορυφή του ανατολικού μετώπου του Κουβουκλίου αναφέρει ότι το Κουβούκλιο ξαναχτίστηκε εξ ολοκλήρου από τα θεμέλιά του τον Μάρτιο του 1810. Μόνο η μαρμάρινη επένδυση του Ταφικού Θαλάμου και του χαμηλότερου εξωτερικού σημείου δεν αποκαταστάθηκαν. Το Παρεκκλήσι των Αγγέλων, οι θόλοι πάνω από τον Ταφικό Θάλαμο και πάνω από το Παρεκκλήσι, οι εξωτερικοί τοίχοι και ο τρούλλος ξαναχτίστηκαν με καινούρια σχέδια.

Το Παρεκκλήσι των Κοπτών φαίνεται να παραλείφθηκε κατά την αναστήλωση του 1809-10. Οι αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες του δυτικού φατώματος του Κουβουκλίου συνεχίζονται χωρίς να διακόπτονται πίσω από το παρεκκλήσι, το οποίο είναι ευθύγραμμο ενωμένο με το Κουβούκλιο και διαφέρει ελαφρώς από αυτό στο προφίλ των γείσων του. Το Παρεκκλήσι των Κοπτών πρέπει να κατασκευάστηκε πριν το 1818, καθώς εμφανίζεται πριν σε σχέδια του Κουβουκλίου το 1825 από τον αρχιτέκτονα J.J. Scoles.



Εικόνα 7 Απεικόνιση του Κουβουκλίου πριν και μετά την πυρκαγιά του 1808 από τον J.J. Scalas



Εικόνα 8 Απεικόνιση του Κουβουκλίου μετά τις εργασίες του Κομνηνού

Σύγχρονη Περίοδος-Σημερινή Κατάσταση του Κουβουκλίου (23)

Στο τέλος του 20^ο και στον 21^ο αιώνα το Ιερό Κουβούκλιο ήταν φανερό ότι είχε υποστεί πολλές φθορές και παρουσίαζε έντονες παραμορφώσεις οι οποίες είχαν μεγάλη επίδραση στην στατικότητα του μνημείου σε σημείο που το 1947 προστέθηκε εξωτερικός μεταλλικός σκελετός από την Βρετανική Αρμοστεία για την στήριξή του. Επιπρόσθετα, τα φατνώματα του μνημείου και οι εσωτερικοί τοίχοι ήταν καλυμμένα από επικαθήσεις αιθάλης από το συνεχές κάψιμο κεριών στο εσωτερικό και εξωτερικό του Ιερού Κουβουκλίου κάτι που επηρέαζε την όψη και τη λειτουργικότητα του μνημείου. Ήταν λοιπόν εμφανώς απαραίτητη η αναστήλωση του μνημείου.

Έτσι, με την πρωτοβουλία του Μακαριότατου, Πατριάρχη Ιεροσολύμων, Θεόφιλου III, ξεκίνησαν οι εργασίες τον Μάρτιο του 2016 στο Ιερό Κουβούκλιο για τη συντήρησή του. Πιο συγκεκριμένα, έγινε η Συντήρηση, Ενίσχυση και Αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα

Ιεροσόλυμα, οι εργασίες ολοκληρώθηκαν και το Ιερό Κουβούκλιο παραδόθηκε πρόσφατα στις τρεις Χριστιανικές Κοινότητες. Το έργο διεξήχθη βάσει της ολοκληρωμένης διεπιστημονικής μελέτης της Διεπιστημονικής Ομάδας του ΕΜΠ με Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου, κατόπιν πρωτοβουλίας της Μακαριότητάς του, Πατριάρχη Ιεροσολύμων, Θεόφιλου ΙΙΙ, με την κοινή συναίνεση των τριών Χριστιανικών Κοινοτήτων. Η Συντήρηση, Ενίσχυση και Αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα ολοκληρώθηκε υπό την ευθύνη της επιστημονικής επιστασίας της Διεπιστημονικής Ομάδας του ΕΜΠ (Καθ. Ε. Κορρές, Καθ. Α. Γεωργόπουλος, Καθ. Α. Μοροπούλου, Καθ. Κ. Σπυράκος, Αν. Καθ. Χ. Μουζάκης) με Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. ΕΜΠ Α. Μοροπούλου και τη διαρκή συνεργασία με τους προκαθήμενους των τριών Χριστιανικών Κοινοτήτων: τον Πατριάρχη Ιεροσολύμων, Θεόφιλο ΙΙΙ, τον Κουστωδό της Αγίας Γης του Τάγματος των Φραγκισκανών, Pierbattista Pizzaballa (έως Μάιο 2016), σημερινό Λατίνο Πατριάρχη στα Ιεροσόλυμα, και Fransesco Patton (από Ιούνιο 2016), καθώς και τον Αρμένιο Πατριάρχη στα Ιεροσόλυμα, κ.κ. Nourhan Manougian.

Για την σωστή συντήρηση, αποκατάσταση και ενίσχυση του μνημείου έγινε επιλογή και εφαρμογή συμβατών και επιτελεστικών υλικών, με σκοπό την επίτευξη της αειφορίας των εργασιών συντήρησης & αποκατάστασης. Αυτό αποτελεί σημαντική καινοτομία και καθιστά το έργο αυτό ως υπόδειγμα καινοτόμου σχεδιασμού με βάση τα υλικά. Η δομοστατική ακεραιότητα του μνημείου έχει πλέον επανέλθει και έχει επιτευχθεί η αποκάλυψη και διατήρηση των αξιών. Για την διασφάλιση της αειφόρου ισορροπίας του Ιερού Κουβουκλίου με το περιβάλλον του, είναι απαραίτητη η παρακολούθησή του. Στο μέλλον, είναι αναγκαίο να προβλεφθεί μια περίοδος πέντε ετών για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και την απόκριση του μνημείου. Η παρακολούθηση θα επιτρέψει την επιστημονική υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων και θα δώσει κατευθύνσεις για τη διασφάλιση της αειφορίας.

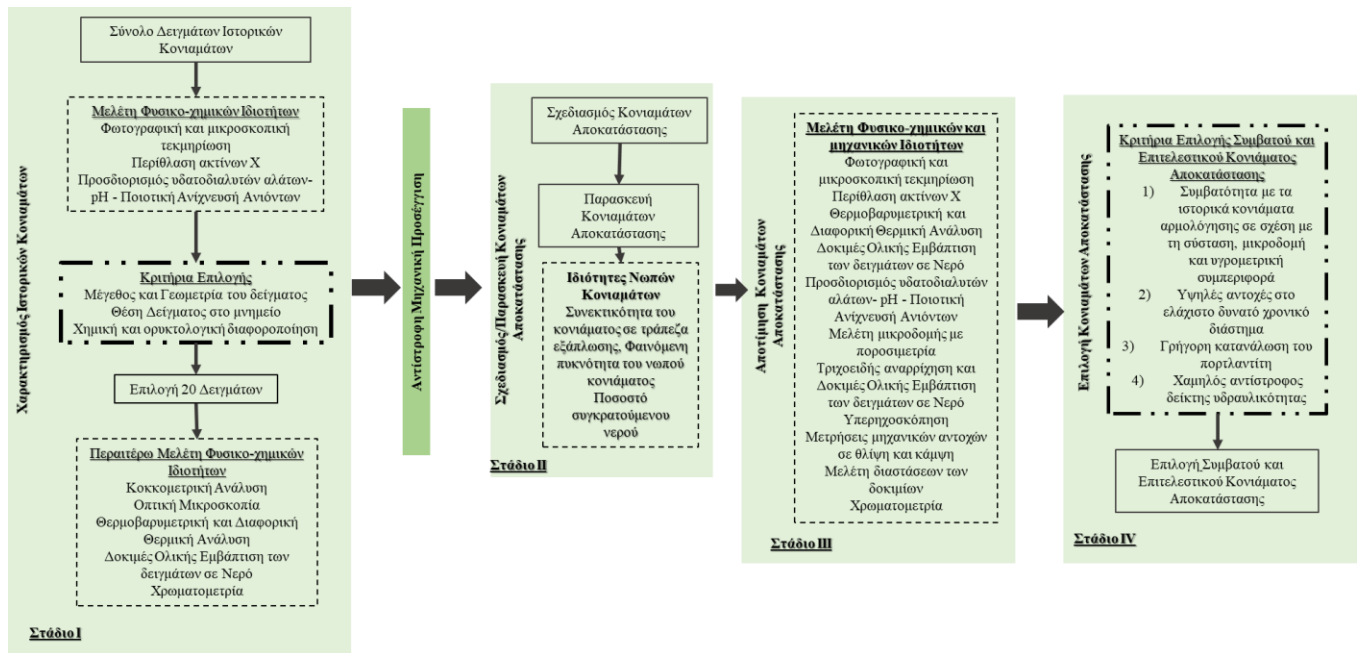
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το Ιερό Κουβούκλιο μετά την ολοκλήρωση του έργου.



Εικόνα 9 Κατάσταση Κουβουκλίου μετά από την τελευταία αναστήλωση

3. Πειραματικό Μέρος

3.1 Πειραματικός Σχεδιασμός



Εικόνα 10 Διάγραμμα Ροής Πειραματικής Διαδικασίας

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται διακριτή η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία. Στις παρακάτω παραγράφους αναλύονται ενδελεχώς οι επιμέρους φάσεις της πειραματικής διαδικασίας.

Στάδιο I Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν τα ιστορικά κονιάματα του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, όπως λήφθηκαν από τη διαδικασία της δειγματοληψίας που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο, ώστε να ληφθούν πληροφορίες για την τεχνολογία παρασκευής, τις ιδιότητες (μηχανικές και φυσικοχημικές) και την κατάσταση διατήρησης του μνημείου. Από το μνημείο λήφθηκαν κονιάματα συμπλήρωσης και κονιάματα αρμού, από όλες τις όψεις του μνημείου και από διάφορα ύψη (πλήθος δειγμάτων: 104). Μετά τη σωστή κωδικοποίησή τους και μεταφορά τους στο εργαστήριο, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τεχνικές για έναν πρώτο χαρακτηρισμό των ιστορικών κονιαμάτων:

- 1) Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων (σε όλα τα δείγματα)
- 2) Περίθλαση ακτίνων Χ
- 3) Προσδιορισμός υδατοδιαλυτών αλάτων- pH - Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων, για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των κονιαμάτων σε ολικά διαλυτά άλατα και σε επιβλαβή χλωριόντα, θειικά και νιτρικά ιόντα. Κονιαμάτων.

Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας έγινε περαιτέρω επιλογή 20 δειγμάτων από τα ιστορικά κονιάματα (περίπου το ένα πέμπτο εκ του συνόλου), ώστε να εξεταστούν πιο ενδελεχώς, προκειμένου να αποκαλυφθούν η τεχνολογία παρασκευής και οι ιδιότητές τους, ώστε να σχεδιαστούν συνθέσεις πιθανών κονιαμάτων αποκατάστασης. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν τα είκοσι αυτά δείγματα αυτά είναι:

- A. Το μέγεθος του δείγματος (γεωμετρία και ποσότητα κονιαματος)
- B. Η θέση του κονιαματος στο μνημείο

Γ. Η χημική και ορυκτολογική διαφοροποίηση του κονιάματος

Μετά την επιλογή τους, τα δείγματα αυτά κόπηκαν σε όσο το δυνατό πιο κυβικό σχημά για τη βέλτιστη δυνατή παρατήρησή τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω πειραματικές τεχνικές.

- 1) Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων, αυτή ξαναέγινε στα κομμένα δείγματα για τη λήψη περισσότερων πληροφοριών
- 2) Φυσικός Διαχωρισμός κονιάς και αδρανών (Κοκκομετρική Ανάλυση)
- 3) Οπτική Μικροσκοπία με τη χρήση πολωτικού μικροσκόπιο
- 4) Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)
- 5) Χρωματομετρία

Στάδιο II Σχεδιασμός και Παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης

Ο σχεδιασμός των κονιαμάτων αποκατάστασης έγινε βάση της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης, η οποία αναφέρθηκε και στο ειδικό θεωρητικό μέρος της εργασίας αυτής, και με βάση τις ειδικές απαιτήσεις του μνημείου αυτού. Επιπροσθέτως, λόγω της συνεχούς λειτουργίας του Ιερού Κουβουκλίου κατά τη διάρκεια του έργου αποκατάστασης, του στενού χρονικού πλαισίου για την ολοκλήρωση του έργου και των υψηλών φορτίων υγρασίας που βάζουν το μνημείο, οι συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης που θα εξεταστούν θα έπρεπε να πλήρουν τα παρακάτω κριτήρια: 1) υψηλές αντοχές στο ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα (γρήγορη ανάπτυξη μηχανικών αντοχών), 2) γρήγορη κατανάλωση του πορτλαντίτη, 3) χαμηλός αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας. Παράλληλα, το κονίαμα αποκατάστασης που θα επιλεγεί θα πρέπει να αναπτύσσει ικανές μηχανικές αντοχές, ώστε να εξασφαλίζεται η δυναμική και στατική απόκριση του μνημείου σε περίπτωση σεισμικής δράσης, καθώς η Ιερουσαλήμ είναι περιοχή υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που ανέπτυξαν οι Spyarakos et al, το κονίαμα αποκατάστασης θα πρέπει να αναπτύσσει θλιπτική αντοχή ίση με 15MPa. (31) (32)

Πιο αναλυτικά, στόχος για τα κονιάματα αποκατάστασης είναι η γρήγορη δέσμευση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, η ανάπτυξη επαρκών αντοχών σε γρήγορο χρόνο ωρίμανσης (14 ημέρες) και καλή συμπεριφορά σε περιβάλλον με διαλυτά άλατα. Τα κονιάματα αποκατάστασης σχεδιάστηκαν με βάση την αερική άσβεστο. Στα κονιάματα εξετάστηκε και η προσθήκη ποζολανικού πρόσθετου (μετακαολίνη και φυσικής ποζολάνης), λόγω της επιταγής για γρήγορη δέσμευσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και πρόωμη ανάπτυξη αντοχών του κονιάματος. (33) (34) Ακόμη, εξετάστηκε και η περίπτωση προσθήκης υπερρυστοποιητή στα κονιάματα αποκατάστασης, εξετάστηκε και ένα εμπορικό ασβεστοποζολανικό κονίαμα, με τεχνητό ποζολανικό πρόσθετο τον μετακαολίνη, το οποίο έχει υποδείξει εξαιρετική συμπεριφορά σε μνημεία που έχει εφαρμοστεί.

Όλες οι συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο κονιαμάτων του ΤΙΤΑΝ Α.Ε. στο Καμάρι. Ακόμη, μετά τη παρασκευή των κονιαμάτων ακολουθεί και ο προσδιορισμός των νωπών κονιαμάτων κονιαμάτων, δηλαδή ο προσδιορισμός της αναλογίας του απαιτούμενου νερού προς την κονία, ο προσδιορισμός της συνεκτικότητας του κονιάματος σε τράπεζα εξάπλωσης, ο προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας του νωπού κονιάματος και ο προσδιορισμός του ποσοστού του συγκρατούμενου νερού.

Όλες οι συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο κονιαμάτων του ΤΙΤΑΝ Α.Ε. στο Καμάρι. Ακόμη, μετά τη παρασκευή των κονιαμάτων ακολουθεί και ο προσδιορισμός των νωπών κονιαμάτων κονιαμάτων, δηλαδή ο προσδιορισμός της αναλογίας του απαιτούμενου νερού προς την κονία, ο προσδιορισμός της συνεκτικότητας του κονιάματος σε τράπεζα εξάπλωσης, ο προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας του νωπού κονιάματος και ο προσδιορισμός του ποσοστού του συγκρατούμενου νερού.

Στάδιο III Αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης

Μετά από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα πήξης και σκλήρυνσης των κονιαμάτων αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο πειραματικών τεχνικών για την αποτίμησή τους. Οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Εξέταση Μορφολογίας Κονιαμάτων με ψηφιακή μικροσκοπία
2. Μελέτη εξέλιξης χημικών αντιδράσεων κατά τη πήξη και τη σκλήρυνση, σύμφωνα με τις τεχνικές:
 - a) Περίθλαση Ακτίνων X
 - b) Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)
 - c) Προσδιορισμός υδατοδιαλυτών αλάτων- pH - Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων
3. Μελέτη μικροδομής με ποροσιμετρία (MIP)
4. Εξέταση υδρομετρικής συμπεριφοράς με Τριχοειδής αναρρίχηση και Δοκιμές Ολικής Εμβάπτιση των δειγμάτων σε Νερό
5. Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων με Υπερηχοσκόπηση και Μετρήσεις μηχανικών αντοχών σε θλίψη και κάμψη
6. Μελέτη διαστάσεων των δοκιμίων
7. Χρωματομετρία

Στάδιο IV Επιλογή Συμβατού Και Επιτελεστικού Κονιάματος Αποκατάστασης

Με βάση το χαρακτηρισμό των ιστορικών κονιαμάτων και την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης που παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν, έγινε δυνατή η επιλογή ενός συμβατού και επιτελεστικού κονιάματος αποκατάστασης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση και συντήρηση του Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου στα Ιεροσόλυμα. Τα κριτήρια με βάση τα οποία έγινε αυτή η επιλογή είναι τα εξής:

- I. Συμβατότητα με τα ιστορικά κονιάματα αρμολόγησης σε σχέση με τη σύσταση, μικροδομή και υδρομετρική συμπεριφορά.
- II. Υψηλές Αντοχές στο ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα και επίτευξη επιθυμητών αντοχών κατά το πέρας της σκλήρυνσης
- III. Γρήγορη κατανάλωση του πορτλαντίτη
- IV. Χαμηλός Αντίστροφος Δείκτης Υδραυλικότητας

Η αισθητική συμβατότητα σε σχέση με τις χρωματικές παραμέτρους, παρόλο που είναι εξέχουσας σημασίας σε έργα συντήρησης και αποκατάστασης μνημείων και ιστορικών συνόλων, στην παρούσα έρευνα δεν ελήφθη υπόψη ως κρίσιμος παράγοντας αποτίμησης, αφενός λόγω της διασποράς που παρουσίασαν τα ιστορικά κονιάματα σε σχέση με αυτήν την παράμετρο και αφετέρου καθώς τα κονιάματα αρμολόγησης τοιχοποιίας βρίσκονται σε μη εμφανή περιοχές του μνημείου, καλυμμένες με ορθομαρμαρώσεις.

3.2 Αρχές πειραματικών μεθόδων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αρχές των πειραματικών μεθόδων μέσω των οποίων έγινε ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων και η αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης.

3.2.1 Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

Η μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM: Fiber Optics Microscopy) αποτελεί μια νέα μη καταστρεπτική μέθοδο εξέτασης επιφανειών, η οποία παρέχει μια αρχική εκτίμηση της μικροδομής των υλικών και σύνθετων υλικών. Καθώς πρόκειται για φορητή διάταξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επί τόπου παρατήρηση, για την αναγνώριση των τύπων φθοράς και την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού και προστασίας του υλικού. Οι εκτιμήσεις των αποτελεσμάτων της μεθόδου αυτής χρησιμοποιούνται συνδυαστικά και με άλλες μη καταστρεπτικές μεθόδους οι οποίες μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το δομικό υλικό. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την διάκριση των κονιαμάτων ανάλογα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και την υφή, αλλά και τον έλεγχο ποιότητας των δομικών υλικών.

Η αρχή της μεθόδου είναι η εξής. Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από υαλώδη κυλινδρικό πυρήνα και περίβλημα από το ίδιο υλικό με ελαφρά μικρότερο δείκτη διάθλασης από εκείνον του πυρήνα. Συνεπώς, όταν μια ακτίνα φωτός εισέλθει στην ίνα υπό κατάλληλη γωνία ανακλάται διαδοχικά στο περίβλημα και μεταδίδεται μέσα στην ίνα. Η οπτική μετάδοση χρησιμοποιεί φως ως φορέα των σημάτων, αντί για

ηλεκτρικό ρεύμα. Το προς μετάδοση ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε ακολουθία ψηφιακών παλμών, η οποία μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας και στη συνέχεια οι παλμοί αυτοί μετατρέπονται και πάλι σε ηλεκτρικό σήμα.

Η διάταξη της μικροσκοπίας οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκε είναι το i-score της Moritex σε μεγεθύνσεις x30, x50 και x120. Κατά την εξέταση των δειγμάτων παίζουν μεγάλο ρόλο η μορφή και ο βαθμός τραχύτητας της επιφάνειας, καθώς το φως πρέπει να προσπίπτει στην επιφάνεια κατακόρυφα και να ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών, ώστε να λαμβάνονται εικόνες καλύτερης ποιότητας. Άρα είναι σημαντικό κατά την πειραματική διαδικασία το φως να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος. Το μικροσκόπιο διαθέτει έξοδο τυποποιημένου βίντεο σήματος (PAL) που επιτρέπει την εισαγωγή εικόνας και σε H/Y με περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας. (2)

3.2.2 Φυσικός Διαχωρισμός κονιάς και αδρανών (Κοκκομετρική Ανάλυση)

Τα κονιάματα αποτελούνται κυρίως από κονία και αδρανή υλικά, τα οποία συναντώνται σε διαφορετικά μεγέθη κόκκου. Με την κοκκομετρική ανάλυση μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τόσο την πυκνότητα όσο και τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του κονιάματος. Η ανάλυση πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές, μεταξύ των οποίων ο χειρωνακτικός διαχωρισμός εν ξηρώ που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο Determination of Particle size distribution (by sieve analysis): EN 1015-1:1999. Με τη συγκεκριμένη δοκιμή γίνεται η κατανομή ενός υλικού σε κλάσματα μεγέθους μέσω της διέλευσης του από κόσκινα με μειούμενη διάμετρο, στη συνέχεια ζυγίζεται η ποσότητα του υλικού σε κάθε κόσκινο και με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή μεγέθους σωματιδίων (ταξινόμηση) στο κάθε δείγμα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής απεικονίζονται σε λογαριθμική κλίμακα για την παραγωγή ενός διαγράμματος κατανομής. Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο κόσκινο με μεγαλύτερη οπή το οποίο ανάλογα με το είδος του δείγματος, διέρχεται όλη η ποσότητα. Στη συνέχεια, με οριζόντιες και κάθετες κινήσεις με σκληρό πινέλο, που περιοδικά συνοδεύονται με προσεκτικές ανακινήσεις του δείγματος, γίνεται το κοσκίνισμα του υλικού. Το υλικό που διέρχεται από κάθε κόσκινο συλλέγεται σε κατάλληλους πλατύστομους συλλέκτες. Το κοσκίνισμα θεωρείται ότι έληξε όταν τοποθετώντας ένα άσπρο χαρτί κάτω από το κόσκινο διαπιστώνεται ότι δεν διέρχεται άλλο υλικό. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν (ISO 565) είχαν άνοιγμα οπών 8mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0.5mm, 0.25mm, 0.125mm και 0.063mm. (13) (2) (35)

Η ποσότητα του υλικού που παραμένει σε κάθε κόσκινο καλείται συγκρατούμενο και αυτή που πέρασε διερχόμενο. Τα συγκρατούμενα σε κάθε κόσκινο ζυγίζονται με ακρίβεια και στη συνέχεια μέσω υπολογισμών προσδιορίζεται το διερχόμενο βάρος και το ποσοστό (%) του διερχόμενου. Ο υπολογισμός του % διερχόμενου υλικού στο κόσκινο i δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Διερχόμενο \% στο κόσκινο } i = \frac{\text{διερχόμενο στο κόσκινο } i}{\text{αρχικό βάρος δείγματος}} * 100$$

Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Στο διάγραμμα στον οριζόντιο άξονα x εμφανίζεται η διάμετρος της οπής των κοσκίνων και στον κατακόρυφο άξονα y το ποσοστό του διερχόμενου υλικού. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα δεδομένου ότι είναι επιθυμητή η ανάπτυξη της περιοχής των μικρών διαμέτρων. Η συνένωση των σημείων του διαγράμματος δίνει μια πολυγωνική γραμμή που καλείται κοκκομετρική καμπύλη.

Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα γίνεται και ο προσδιορισμός του ποσοστού επί τοις εκατό της σύνθεσης του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών. Ο υπολογισμός του % διερχόμενου υλικού στο κόσκινο i προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Συγκρατούμενο \% στο κόσκινο } i = \frac{\text{συγκρατούμενο στο κόσκινο } i}{\text{αρχικό βάρος δείγματος}} * 100$$

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης αποτυπώνονται και σε ιστόγραμμα κατανομής κόκκων. Στο διάγραμμα στον οριζόντιο άξονα x εμφανίζεται διάμετρος της οπής των κοσκίων (mm) κοσκίων και στον κατακόρυφο άξονα y το ποσοστό (%) του συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο.

Από τις κατανομές συχνότητας των στατιστικά μεταβλητών χαρακτήρων λαμβάνονται ποσοτικά δεδομένα και ειδικότερα υπολογίζονται οι εξής κρίσιμοι δείκτες:

Q3: Δείκτης που υπολογίζεται γραφικά από την κοκκομετρική καμπύλη και αφορά στο μέγεθος των κόκκων σε mm που αντιστοιχεί στο 75% του αθροιστικά διερχόμενου υλικού.

Q1: Δείκτης που υπολογίζεται γραφικά από την κοκκομετρική καμπύλη και αφορά στο μέγεθος των κόκκων σε mm που αντιστοιχεί στο 25% του αθροιστικά διερχόμενου υλικού.

So: Δείκτης ταξινόμησης (Sorting Index) ο οποίος υπολογίζεται ως το κλάσμα των συντελεστών Q3/Q1.

D60: Δείκτης που υπολογίζεται γραφικά από την κοκκομετρική καμπύλη και αφορά στο μέγεθος των κόκκων σε mm που αντιστοιχεί στο 60% του αθροιστικά διερχόμενου υλικού.

D10: Δείκτης που υπολογίζεται γραφικά από την κοκκομετρική καμπύλη και αφορά στο μέγεθος των κόκκων σε mm που αντιστοιχεί στο 10% του αθροιστικά διερχόμενου υλικού.

Cu: Συντελεστής ομοιομορφίας (uniformity coefficient) ο οποίος υπολογίζεται ως το κλάσμα των συντελεστών D60/D10.

3.2.3 Περίθλαση Ακτίνων X

Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει πληροφορίες για την τρισδιάστατη διάταξη των ατόμων ή μορίων σε ένα κρυσταλλικό υλικό πραγματοποιώντας με αυτόν τον τρόπο μία στοιχειακή ή ορυκτολογική σε αυτή την περίπτωση ανάλυση. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ερευνητικό και βιομηχανικό επίπεδο, παρέχοντας εκτενής πληροφορίες για τη δομή και χημικοί σύσταση διάφορων υλικών. Η αρχή της μεθόδου αναπτύσσεται παρακάτω.

Οι ακτίνες X είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (περιοχή 10-5-100Å), η οποία παράγεται μετά την επιβράδυνση ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας ή κατά τις ηλεκτρονιακές μεταπτώσεις στις εσωτερικές στοιβάδες των ατόμων. Κατά την πρόσκρουση ακτινοβολίας X σε μια επιφάνεια με γωνία θ , τμήμα της σκεδάζεται από το επιφανειακό στρώμα ατόμων και τμήμα εισέρχεται στο υλικό, το οποίο με τη σειρά του αλληλεπιδρά με το δεύτερο στρώμα ατόμων κ.ο.κ.. Το αθροιστικό αποτέλεσμα της σκέδασης από τα τακτικά χωροθετημένα κέντρα του κρυστάλλου ονομάζεται περίθλαση. Η θέση περίθλασης εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή της επαναλαμβανόμενης δομικής μονάδας του κρυστάλλου, ενώ η ένταση της εξαρτάται από το είδος των ατόμων και τη θέση τους στη δομική μονάδα. Επομένως είναι αδύνατο δύο ουσίες να παρουσιάζουν το ίδιο μοτίβο περίθλασης, έτσι αποτελεί δακτυλικό αποτύπωμα της ένωσης. Η μέθοδος XRD βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων X, γνωστού μήκους κύματος λ , στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος. Προσδιορίζει την γωνία θ της περιθλώμενης ακτινοβολίας και υπολογίζει τα διαστήματα των κρυσταλλικών επιπέδων (d), μέσω του νόμου Bragg: (36)

$$n\lambda = 2 * d * \sin\theta$$

Με τον προσδιορισμό των κρυσταλλικών επιπέδων γίνεται ποιοτική ανάλυση, αφού είναι χαρακτηριστικά της ένωσης, ενώ η ποιοτική ανάλυση γίνεται μέσω της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας για συγκεκριμένη γωνία θ . Κατά την ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων όπως τα κονιάματα η ποσοτική ανάλυση είναι δύσκολη, οπότε στην ουσία γίνεται μόνο ποιοτική. Είναι, όμως, δυνατό να εξαγάμε συμπεράσματα για τη σχετική ποσότητα των ορυκτών φάσεων με την σύγκριση των κορυφών τους στα φάσματα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το όργανο D 5000 X-Ray Diffractometer της εταιρείας Siemens.

3.2.4 Οπτική Μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία αποσκοπεί στην αναλυτικότερη οπτική μελέτη διαφόρων αντικειμένων υπό μεγέθυνση. Η εικόνα από ένα οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να ληφθεί από κανονικές, φωτοευαίσθητες κάμερες για τη δημιουργία μιας μικρογραφίας. Αρχικά, οι εικόνες λαμβάνονταν με φωτογραφική ταινία, αλλά οι σύγχρονες εξελίξεις με μηχανές CMOS και CCD, επιτρέπουν τη λήψη ψηφιακών εικόνων. Τα καθαρά ψηφιακά μικροσκόπια είναι τώρα διαθέσιμα, τα οποία χρησιμοποιούν μια κάμερα CCD για την εξέταση ενός δείγματος, δείχνοντας την προκύπτουσα εικόνα απευθείας σε μια οθόνη υπολογιστή χωρίς την ανάγκη προσοφθάλμιων φακών. Εναλλακτικές λύσεις της οπτικής μικροσκοπίας οι οποίες δεν χρησιμοποιούν ορατό φως, είναι η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης και μικροσκοπία ανίχνευσης σάρωσης. (37) (38)

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία έγινε πετρογραφικός έλεγχος μέσω πολωτικού μικροσκόπιου. Το πολωτικό ή πετρογραφικό μικροσκόπιο διαφέρει από τα υπόλοιπα μικροσκόπια, καθώς αποτελείται από στρεφόμενη τράπεζα και δύο πολωτικά φίλτρα, τον πολωτή και τον αναλυτή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πολωτικών ή πετρογραφικών μικροσκοπίων που μοιούνται διαφέρουν μεταξύ τους σε κάποιες λεπτομέρειες έχουν βασικά την ίδια σχεδίαση και κατασκευή. Ένα πολωτικό μικροσκόπιο αποτελείται από τα εξής μέρη:

- 1) Φωτιστική πηγή: Η φωτιστική πηγή βρίσκεται στη βάση του μικροσκοπίου και αποτελείται από μία λάμπα αλογόνου λευκού φωτός και ένα σύστημα φακών και κατόπτρων, που κατευθύνουν το φως προς τα επάνω. Η ένταση του φωτός ρυθμίζεται με ένα ροοστάτη.
- 2) Πολωτής: Το πολωμένο φως κραδαίνει μόνο σε ένα επίπεδο. Σε αυτό το επίπεδο ανήκει και η διεύθυνση διάδοσής του. Το πολωμένο φως παράγεται από το απλό φως αφού περάσει μέσα από ανισότροπο υλικό, πολύ λεπτές σχισμές ή κάτω από ειδικές φυσικές διεργασίες (π.χ. λείζερ, ολική ανάκλαση κ.τ.λ.) και στη προκύπτουσα περίπτωση είναι ο πολωτής. Ο πολωτής είναι τοποθετημένος αμέσως πάνω από τη φωτιστική πηγή. Αποτελείται από ένα πολωτικό φίλτρο που μετατρέπει το φυσικό φως σε ευθύγραμμο πολωμένο. Ο πολωτής έχει τη δυνατότητα περιστροφής ώστε η διεύθυνση κράδασης του πολωμένου φωτός να λαμβάνει διάφορες θέσεις.
- 3) Διάφραγμα ίριδας: Το διάφραγμα ίριδας ή απλώς διάφραγμα βρίσκεται πάνω από τον πολωτή και ρυθμίζει τη διάμετρο της φωτεινής δέσμης, που περνά από το μικροσκόπιο. Κλείνοντας το διάφραγμα μειώνεται η διάμετρος της φωτεινής δέσμης και τα όρια των ορυκτών διαγράφονται εντονότερα. Η δέσμη αποτελείται από σχεδόν παράλληλες φωτεινές ακτίνες και η παρατήρηση που γίνεται με τέτοιο φωτισμό ονομάζεται ορθοσκοπική παρατήρηση. Κατά την ορθοσκοπική παρατήρηση το διάφραγμα πρέπει να είναι ελαφρώς κλειστό, ενώ αντίθετα κατά την κωνοσκοπική παρατήρηση πρέπει να είναι τελείως ανοικτό.
- 4) Συγκεντρωτικός φακός: Ο συγκεντρωτικός ή συγκλίνων φακός είναι τοποθετημένος πάνω από το διάφραγμα και κάτω από την τράπεζα του μικροσκοπίου και περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα έτσι ώστε να παρεμβάλλεται κατά βούληση στην πορεία του φωτός. Δημιουργεί μία ισχυρώς συγκλίνουσα δέσμη φωτός και χρησιμοποιείται για την κωνοσκοπική παρατήρηση, κατά την οποία σχηματίζονται κωνοσκοπικές εικόνες που εξετάζονται με το μεγάλης μεγέθυνσης αντικειμενικό φακό και το φακό Bertrand. Ο πολωτής, το διάφραγμα και ο συγκεντρωτικός φακός αποτελούν συνήθως ένα ενιαίο σύστημα τοποθετημένο κάτω από την τράπεζα του μικροσκοπίου. Το σύστημα αυτό σε ορισμένα μικροσκόπια είναι εφοδιασμένο με έναν ανυψωτικό μηχανισμό που του επιτρέπει να ανεβοκατεβαίνει κατά βούληση.
- 5) Τράπεζα μικροσκοπίου: Η στρεφόμενη τράπεζα ή απλώς τράπεζα του πολωτικού μικροσκοπίου είναι κυκλική και τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφεται περί κατακόρυφο άξονα. Στην εξωτερική της πλευρά είναι βαθμολογημένη σε μοίρες και στο πλάι υπάρχει ένας βερνιέρος για την ακριβή μέτρηση διαφόρων γωνιών. Η λεπτή τομή του πετρώματος τοποθετείται στο κέντρο της τράπεζας όπου υπάρχει μία οπή για να επιτρέπει τη διέλευση του φωτός.
- 6) Αντικειμενικοί φακοί: Οι αντικειμενικοί φακοί είναι μεγεθυντικοί φακοί προσαρμοσμένοι σ' ένα περιστρεφόμενο σύστημα. Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν μεγεθύνσεις X2,5, X5, X10, X20 και X50.
- 7) Αντισταθμιστής: Ο αντισταθμιστής τοποθετείται σε μία σχισμή υπό γωνία 45° ως προς το σταυρόνημα ακριβώς πάνω από το περιστρεφόμενο σύστημα των αντικειμενικών φακών και κάτω

από τον αναλυτή. Οι αντισταθμιστές είναι πλακίδια διπλοθλαστικών ορυκτών τοποθετημένα σε μεταλλικό ή πλαστικό πλαίσιο, τα οποία παρέχουν ορισμένη διαφορά πορείας στο διερχόμενο φως. Στο πλαίσιο του αντισταθμιστή είναι χαραγμένη η διεύθυνση κράδανσης της αργής ακτίνας (μεγάλος δείκτης διάθλασης) του ορυκτού, η οποία συνήθως γίνεται κάθετα στη μεγάλη διάσταση του αντισταθμιστή. 1) Αντισταθμιστής γύψου ή λ: Αποτελείται συνήθως από ένα πλακίδιο γύψου ή χαλαζία συγκεκριμένου πάχους που επιφέρει σταθερή διαφορά πορείας ενός μήκους κύματος - περίπου 550 nm - παράγοντας έτσι το ερυθρό χρώμα πρώτης τάξης. 2) Αντισταθμιστής μοσχοβίτη ή λ/4: Αποτελείται συνήθως από ένα πλακίδιο μοσχοβίτη ή χαλαζία συγκεκριμένου πάχους που επιφέρει σταθερή διαφορά πορείας ενός τετάρτου μήκους κύματος λ/4 - περίπου 140 nm - παράγοντας το γκριζό χρώμα πρώτης τάξης. 3) Αντισταθμιστής Berek : Αποτελείται από ένα πλακίδιο ασβεσίτη που στρέφεται γύρω από ένα οριζόντιο άξονα μεταβάλλοντας έτσι τη διπλοθλαστικότητά του και κατ' επέκταση τη διαφορά πορείας που επιφέρει. Με αυτόν τον αντισταθμιστή μπορούμε να προσδιορίσουμε ακριβώς τη διπλοθλαστικότητα του εξεταζόμενου ορυκτού. 4) Σφήνα χαλαζία: Αποτελείται από ένα σφηνοειδές πλακίδιο χαλαζία που λόγω μεταβαλλόμενου πάχους επιφέρει μεταβαλλόμενη διαφορά πορείας από 0 έως 4λ παράγοντας χρώματα πόλωσης μέχρι τετάρτης τάξης.

- 8) **Αναλυτής:** Ο αναλυτής βρίσκεται πάνω από τους αντικειμενικούς φακούς και παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός κατά βούληση. Είναι όμοιος με τον πολωτή, έχει όμως διεύθυνση κράδανσης B-N δηλαδή κάθετη σε αυτή του πολωτή. Ο πολωτής και ο αναλυτής αναφέρονται και ως Nicols, διότι στα πρώτα μικροσκόπια για την πόλωση του φωτός χρησιμοποιούνταν πρίσματα Nicol. 1) Διασταυρωμένα Nicols (Nicols X, N+): Όταν ο αναλυτής παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός, τότε ο πολωτής και ο αναλυτής είναι διασταυρωμένοι και η παρατήρηση γίνεται με πολωτή και αναλυτή ή με διασταυρωμένα Nicols. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τίποτε στην τράπεζα του μικροσκοπίου το πεδίο παρατήρησης φαίνεται σκοτεινό, διότι το πολωμένο φως που φθάνει στον αναλυτή έχει διεύθυνση κράδανσης κάθετη και επομένως δεν περνά. 2) Παράλληλα Nicols (Nicols //, N-): Όταν ο αναλυτής απομακρυνθεί από την πορεία του φωτός, τότε το πεδίο είναι φωτεινό. Ο πολωτής και ο αναλυτής είναι παράλληλοι και η παρατήρηση γίνεται μόνο με πολωτή ή με παράλληλα Nicols.
- 9) **Φακός Bertrand:** Ο φακός Bertrand είναι ένας μικρός φακός ακριβώς πάνω από τον αναλυτή και παρεμβάλλεται στην πορεία του φωτός κατά βούληση. Χρησιμεύει για την παρατήρηση των κωνοσκοπικών εικόνων.
- 10) **Προσοφθάλμιος φακός:** Ο προσοφθάλμιος φακός βρίσκεται στο πάνω μέρος του σωλήνα του μικροσκοπίου και μεγεθύνει το είδωλο που δημιουργείται από τους αντικειμενικούς φακούς. Η μεγέθυνση του προσοφθάλμιου που χρησιμοποιήθηκε είναι 10x. Η ολική μεγέθυνση του μικροσκοπίου ισούται με το γινόμενο της μεγέθυνσης του αντικειμενικού επί τη μεγέθυνση του προσοφθάλμιου, στις προκείμενες περιπτώσεις δηλαδή X25, X50, X100, X200 και X500. Ο προσοφθάλμιος περιέχει το σταυρόνημα που αποτελείται από δύο κάθετα νήματα και εστιάζεται με την περιστροφή του ανώτερου τμήματος του προσοφθάλμιου.
- 11) **Μηχανισμός εστίασης:** Η εστίαση πραγματοποιείται ανεβάζοντας ή κατεβάζοντας την τράπεζα με τη βοήθεια ενός ή δύο κοχλιών που βρίσκονται στον κορμό του μικροσκοπίου. Υπάρχει δυνατότητα για δύο εστιάσεις, μία κατά προσέγγιση με μεγάλες μετακινήσεις και μία λεπτομερή με πάρα πολύ μικρές μετακινήσεις.

Για την εξέταση των δειγμάτων μέσω πολιτικού μικροσκοπίου, έγινε επεξεργασία των δειγμάτων σε λεπτές τομές. Η κατασκευή των λεπτών τομών γίνεται από ειδικά εκπαιδευμένο τεχνικό προσωπικό στο Ι.Γ.Μ.Ε.. Τα βήματα όμως κατασκευής μιας λεπτής τομής, συνοπτικά, είναι τα εξής:

- Κοπή του δείγματος σε πλακίδιο ορθογωνίου σχήματος διαστάσεων 2X4 cm
- Στερεοποίηση του πλακιδίου σε γυάλινη πλάκα (αντικειμενοφόρος πλάκα) με ρητίνη
- Λείανση του πλακιδίου μέχρις ότου αποκτήσει το επιθυμητό πάχος των 0.02 – 0.03 mm
- Κάλυψη του παρασκευάσματος με λεπτό γυάλινο πλακίδιο (καλυπτρίδα) με τη βοήθεια ρητίνης

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στα δείγματα κατά την εξέτασή τους μέσω των παράλληλων Nicols είναι οι εξής:

- Διαφάνεια

- Σχήμα της τομής
- Σχισμός
- Χρώμα
- Πλεοχρωισμός
- Εξαλλοιώσεις

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στα δείγματα κατά την εξέτασή τους μέσω των διασταυρωμένων Nicols είναι οι εξής:

- Ισοτροπία – Ανισοτροπία
- Ορθή και πλάγια κατάσβεση
- Χρώμα πόλωσης της τομής
- Επιμήκυνση
- Διδυμία – πολυδυμία
- Ζωνώδης δομή

3.2.5 Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)

Οι μέθοδοι θερμικής ανάλυσης μελετούν την συμπεριφορά ενός υλικού (φυσική ή χημική) συνάρτηση της θερμοκρασίας, όταν αυτό υποβάλλεται σε θερμοκρασιακό πρόγραμμα υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Το θερμοκρασιακό πρόγραμμα μπορεί να περιέχει ψύξη ή θέρμανση του δείγματος με καθορισμένο ρυθμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος, το οποίο ονομάζεται θερμογράφημα και είναι χαρακτηριστικό του κάθε υλικού. Με τη μελέτη του θερμογραφήματος λαμβάνονται πληροφορίες για την δομή του δείγματος και τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτό κατά την εκάστοτε θερμοκρασιακή μεταβολή, οπότε χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον χαρακτηρισμό υλικών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν η Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA) και η Θερμοβαρμετρική ανάλυση- Θερμοζυγός (TG) οι οποίες εξυπηρετούν τις απαιτήσεις που είναι απαραίτητες για την αποτίμηση των κονιαμάτων.

Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

Όταν ένα υλικό υπόκειται σε θέρμανση ή ψύξη λαμβάνουν χώρα χημικές ή φυσικές μεταβολές κατά την διάρκεια των οποίων παρατηρούνται ενδόθερμα ή εξώθερμα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Η Διαφορική Θερμική Ανάλυση ή DTA (Differential Thermal Analysis) μετρά την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εξεταζόμενης ουσίας και ενός υλικού αναφοράς (TR) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, όταν τα δυο υλικά υπόκεινται σε προγραμματισμένη θερμοκρασιακή μεταβολή (συνήθως θέρμανση, γραμμικά με το χρόνο). Το όργανο καταγράφει την διαφορά $\Delta T = T_S - T_R$ και την παρουσιάζει σε θερμογράφημα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του δείγματος (T_S). Οι κορυφές ενός θερμογραφήματος αντιστοιχούν σε φυσικές ή χημικές μεταβολές του υλικού κατά την θέρμανσή του και η κατεύθυνση των κορυφών αυτών εξαρτάται από το αν η μεταβολή είναι εξώθερμη ή ενδόθερμη. Φυσικές ενδόθερμες μεταβολές είναι η τήξη, η εξάτμιση, η εξάχνωση, η απορρόφηση και η εκρόφηση, ενώ εξώθερμες είναι η προσρόφηση και η κρυστάλλωση. Αντίστοιχα, χημικές ενδόθερμες μεταβολές αποτελούν η αφυδάτωση, η διάσπαση και η αναγωγή, ενώ η οξείδωση, ο πολυμερισμός και οι καταλυτικές αντιδράσεις αποτελούν εξώθερμες. Η DTA χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό σημείων βρασμού και τήξης, τον εντοπισμό μετασχηματισμών φάσεων, και γενικότερα για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς και της σύνθεσης υλικών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο όργανο Regulus 2500 της Netzsch, σε θερμοκρασιακό εύρος 30-1000°C με ρυθμό αύξησης θερμοκρασίας 10°C/min.

Θερμοβαρμετρική ανάλυση- Θερμοζυγός (TG)

Κατά την θερμοβαρμετρική ανάλυση γίνεται συνεχής καταγραφή της μάζας του δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου, καθώς το δείγμα υποβάλλεται σε αύξηση της θερμοκρασίας με συγκεκριμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα, σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Η διάταξη αποτελείται από αναλυτικό ζυγό τοποθετημένο μέσα σε φούρνο, του οποίου το εσωτερικό ρυθμίζεται σε αδρανή ή και δραστική ατμόσφαιρα, ανάλογα με το δείγμα. Το σύστημα αυτό συνδέεται με H/Y για έλεγχο του οργάνου και συλλογή δεδομένων, τα οποία παρουσιάζει σε μορφή θερμογραφήματος. Τα θερμογραφήματα ονομάζονται και καμπύλες θερμικής διάσπασης και είναι διαγράμματα που απεικονίζουν το ποσοστό απώλειας μάζας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Βασικότερες εφαρμογές της μεθόδου είναι η μελέτη θερμικής σταθερότητας και θερμικής διάσπασης, αλλά αποτελεί χρήσιμο εργαλείο και για τον χαρακτηρισμό υλικών. Με τη δημιουργία της διαφορικής καμπύλης (DTG) είναι δυνατός και ο ακριβής υπολογισμός της μεταβολής της μάζας και της αντίστοιχης θερμοκρασίας στην οποία έγινε η μεταβολή.

3.2.6 Εξέταση υγρομετρικής συμπεριφοράς:

Τριχοειδής Αναρρίχηση

Η απορρόφηση νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης, η οποία αποκαλύπτει την υγρομετρική συμπεριφορά ενός υλικού, μελετήθηκε σύμφωνα με το EN 15801 (2010). Μέσω αυτής της τεχνικής προσδιορίζονται διάφορα μεγέθη που έχουν να κάνουν με τους τριχοειδείς πόρους των δομικών υλικών. Μέσω τις τριχοειδούς αναρρίχησης μελετούνται τα φαινόμενα μεταφοράς υγρασίας σε ένα μνημείο, καθώς αυτά επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την ανερχόμενη υγρασία.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται ως εξής: Δείγμα συγκεκριμένων κυβικών διαστάσεων τοποθετείται αρχικά σε φούρνο 60°C για 24h και στη συνέχεια σε ξηραντήρα μέχρι σταθερού βάρους το οποίο καταγράφεται ως αρχική ξηρή μάζα του δείγματος. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται η εξής διάταξη: δοχείο το οποίο περιέχει κάποιο απορροφητικό μέσο (χαρτί, διηθητικό χαρτί) το οποίο είναι εμποτισμένο με απιονισμένο νερό. Έπειτα, το δείγμα τοποθετείται στη διάταξη αυτή (από πλευρά της οποίας το εμβαδόν έχει προσδιοριστεί) και ανά συγκεκριμένα διαστήματα προσδιορίζεται η μάζα του δείγματος. Κατά το πέρας του πειράματος το απιονισμένο νερό του απορροφητικού μέσου διέρχεται από τους τριχοειδείς πόρους στο εσωτερικό του δείγματος και κατά συνέπεια η μάζα του δείγματος αυξάνεται. (39)

Αφού πραγματοποιηθεί η πειραματική διαδικασία υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

1. Η τετραγωνική ρίζα του χρόνου
2. Το μέγεθος $dB/S = \frac{B_t - B_0}{B_0} / S_{sample}$

Όπου : B_t : η μάζα του δείγματος μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, B_0 : η ξηρή μάζα του δείγματος και S : η επιφάνεια του δείγματος

Στη συνέχεια κατασκευάζεται το διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα έχει τη ρίζα του χρόνου και στο κάθετο άξονα έχει το μέγεθος dB/S . Μέσω της κλίσης του διαγράμματος προσδιορίζεται ο συντελεστής της τριχοειδούς αναρρίχησης $C(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}^{1/2})$, ο οποίος προσδιορίζει με ποια 'ταχύτητα' το δείγμα ροφά νερό μέσω των τριχοειδών πόρων του.

Εκτός από αυτό το μέγεθος μπορεί να υπολογιστεί και το η ικανότητα ρόφησης νερού μέσω τριχοειδών πόρων, μέσω του τύπου:

$$WAC_{cap}\% = 100 * (B_{max} - B_0) / B_0$$

Όπου B_{max} : η μέγιστη μάζα που μετριέται κατά τη πειραματική διαδικασία.

Μπορεί να υπολογιστεί και το πορώδες λόγω τριχοειδών πόρων. Αρχικά, υπολογίζεται ο όγκος των δειγμάτων, μέσω των διαστάσεών τους. Έπειτα, υπολογίζεται ο όγκος του ανοιχτού πορώδους. Καθώς η πυκνότητα του νερού στους 4°C είναι $1\text{g}/\text{cm}^3$ ο όγκος υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$V_{cap} = B_{max} - B_0$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ποσοστό του πορώδους σύμφωνα με τον τύπο:

$$\% P_{cap} = 100 * \left(\frac{V_{cap}}{V_{sample}} \right)$$

Ολική Εμβάπτιση των δειγμάτων σε Νερό

Ο στόχος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι ο χαρακτηρισμός του πορώδους προσβάσιμο στο νερό των δειγμάτων. (22)

Αρχικά, τα δείγματα πλύθηκαν με απιονισμένο νερό για τη μείωση σκόνης από την επιφάνεια του κάθε δείγματος. Στη συνέχεια, ακολούθησε η ξήρανση των δειγμάτων σε φούρνο στους 60°C για 24 ώρες και μετά τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel για την μείωση της θερμοκρασίας τους. Έπειτα, ακολουθεί η ζύγιση των ξηρών δειγμάτων (m_0) και η τοποθέτησή τους σε γυάλινα δοχεία (ποτήρια ζέσεως). Στη συνέχεια, τοποθετείται απιονισμένο νερό σε κάθε δοχείο μέχρι την πλήρη κάλυψη του κάθε δείγματος. Μετά από καθορισμένα χρονικά διαστήματα, που εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες, τα δείγματα απομακρύνονται από τα δοχεία, σκουπίζονται γρήγορα με καθαρό πανί και καταγράφεται η μάζα τους (m_i) και ο χρόνος στον οποίο πάρθηκε η μέτρηση. Τα δείγματα, έπειτα, επανατοποθετούνται στα αντίστοιχα δοχεία με απιονισμένο νερό και οι μετρήσεις συνεχίζονται έως ότου να υπάρξει διαφορά μικρότερη του 1% του απορροφούμενου νερού.

Στη συνέχεια, καταγράφηκε ο φαινόμενος όγκος των δειγμάτων (V_a). Σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο των 500mL τοποθετήθηκε συγκεκριμένη ποσότητα απιονισμένου νερού. Μετά, τοποθετήθηκε το δείγμα με προσοχή μέσα στον ογκομετρικό κύλινδρο και σημειώθηκε η διαφορά ύψους του νερού πριν και μετά την τοποθέτηση του δείγματος.

Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας τα δείγματα ξηράθηκαν πάλι σε φούρνο στους 60°C για 24 ώρες και τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel για την μείωση της θερμοκρασίας τους. Τέλος καταγράφηκε η τελική μάζα των δειγμάτων (m_d) και ακολούθησαν οι κατάλληλοι υπολογισμοί.

Οι υπολογισμοί που έγιναν είναι οι εξής. Αρχικά υπολογίστηκε η ποσότητα του νερού που απορροφήθηκε στη ξηρή μάζα του δείγματος σε ποσοστό, μέσω του τύπου:

$$M_i\% = 100 * (m_i - m_o)/m_o$$

Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε γραφική παράστασή με τον άξονα τον x να αναπαριστά τον χρόνο και τον άξονα των y να αναπαριστά το $M_i\%$.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ικανότητα απορρόφησης νερού (water absorption capacity, WAC), μέσω του τύπου:

$$WAC\% = 100 * (m_{max} - m_d)/m_d$$

Όπου m_{max} είναι η μέγιστη μάζα του απορροφημένου νερού.

Ακόμα υπολογίστηκε ο όγκος του ανοιχτού πορώδους. Καθώς η πυκνότητα του νερού στους 4°C είναι 1g/cm³ ο όγκος υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$V_{op} = m_{max} - m_o$$

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ποσοστό του ανοιχτού πορώδους σύμφωνα με τον τύπο:

$$\% \text{ open porosity} = 100 * \left(\frac{V_{op}}{V_a}\right)$$

Τέλος υπολογίστηκε η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων μέσω του τύπου:

$$\rho_\phi = m_o/V_a$$

3.2.7 Προσδιορισμός υδατοδιαλυτών αλάτων- pH - Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών είναι τα διαλυτά άλατα μαζί με το νερό έναν από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών. Τα άλατα αυτά μπορεί είναι θειικά, νιτρικά, ανθρακικά, χλωριούχα αλκάλια και αλκαλικές γαίες, τα οποία μπορεί να προέρχονται από υπόγεια νερά με τριχοειδή αναρρίχηση, τους όξινους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές που προσβάλλουν τα δομικά υλικά, τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου. Τα κυριότερα από αυτά που συναντώνται στα μνημεία είναι τα θειικά, χλωριούχα, νιτρικά και ανθρακικά και η παρουσία τους είναι καταστρεπτική για τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, αυτά παγιδεύονται στο εσωτερικό των δομικών υλικών και μέσω της κρυστάλλωσης και ανακρυστάλλωσης τους μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη φθορά. (19) (40)

Η δράση των θεικών αλάτων εκδηλώνεται είτε ως σταδιακή απώλεια μάζας και αντοχών του κονιάματος είτε λόγω της διόγκωσης, που οφείλεται στη δημιουργία ογκωδών προϊόντων, και της συνεπακόλουθης μείωσης της ανθεκτικότητας της κατασκευής λόγω εσωτερικών ρηγματώσεων. Τα χλωριόντα υπάρχουν στο κονίαμα είτε από τις πρώτες ύλες (π.χ. άμμος θαλάσσης, χαλίκια ποτάμου) ή μεταφέρονται στο εσωτερικό του από το περιβάλλον. Δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του κονιάματος, αλλά έχουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στους μεταλλικούς συνδέσμους που τοποθετούνται στην πλειοψηφία των μνημείων του ελλαδικού χώρου για την στήριξή τους κατά τη διάρκεια επεμβάσεων συντήρησης.

Για τον προσδιορισμό των διαλυτών αλάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αγωγιμομετρίας, σύμφωνα με το ιταλικό πρότυπο ‘‘Dosaggio dei sali solubili, Normal 13/83’’ και για τον προσδιορισμό

του είδους των αλάτων που βρίσκονται στα δείγματα χρησιμοποιήθηκαν οι δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (spot tests).

Για τη μέθοδο προσδιορισμού των διαλυτών αλάτων λαμβάνει χώρα ζύγιση 100 ± 5 mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο διαλύεται σε 100 ml απιονισμένου νερού. Παράλληλα, παρασκευάζεται και ένα διάλυμα blank, το οποίο περιέχει μόνο 100ml απιονισμένο νερό. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετρείται η αγωγιμότητά τους και το pH τους, η οποία εκφράζεται σε $\mu\text{Siemens}$. Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$TSS\% = (C * 6,88)/m$$

Όπου:

C: η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε μS με αφαιρεμένη την αγωγιμότητα του blank.

m: το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg

Η θερμοκρασία όλων των διαλυμάτων και του τυφλού ήταν $20-21^\circ\text{C}$ κατά τη μέτρηση της αγωγιμότητάς τους.

Συμπληρωματικά του προσδιορισμού των ολικών διαλυτών αλάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων (Cl^-), θεικών αλάτων (SO_4^{2-}) και νιτρικών αλάτων (NO_2^-), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα υδατικά διαλύματα βάσει των οποίων έγινε ο προσδιορισμός της αγωγιμότητας. Γενικά, για την παρασκευή των διαλυμάτων απαιτείται η χρήση απιονισμένου νερού υψηλής καθαρότητας.

Για τον προσδιορισμό των χλωριούχων αλάτων κάθε δείγματος τοποθετήθηκε μέρος του υδατικού του διαλύματος εντός δοκιμαστικού σωλήνα και προστέθηκε μικρή ποσότητα (λίγες σταγόνες) νιτρικού αργύρου (AgNO_3) 0,1 N. Παρουσία χλωριόντων σχηματίζεται χλωριούχος άργυρος (AgCl) που δημιουργεί χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα. Η ποσότητα των περιεχομένων χλωριόντων καθορίζει την ένταση του παρατηρούμενου θολώματος.

Για τον προσδιορισμό των θεικών ιόντων προστέθηκε, βάσει της ίδιας διαδικασίας, μικρή ποσότητα χλωριούχου βαρίου (BaCl_2) 0,1 M. Παρουσία θεικών ιόντων παράγεται θεικό βάριο (BaSO_4), που και αυτό προκαλεί λευκό θόλωμα. Η ποσοτική παρουσία των θεικών ιόντων καθορίζει την ένταση του θολώματος.

Για τον προσδιορισμό των νιτρικών ιόντων προστέθηκε βάση της διαδικασίας μικρή ποσότητα διαλύματος διφενυλαμίνης το οποίο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα, 0,5g διφενυλαμίνης (Diphenylamine) προστέθηκαν σε 20mL απιονισμένου νερού και 100mL πυκνού θεικού οξέος. Η παρουσία νιτρικών ιόντων οξειδώνει την διφενυλαμίνης δίνοντάς της χαρακτηριστικό μπλε χρώμα στο μνήσκο του δοκιμαστικού σωλήνα. Η ένταση του μπλε χρώματος δεν καθορίζει την ποσότητα των ιόντων στο διάλυμα.

3.2.8 Ποροσιμετρία (MIP)

Η ποροσιμετρία υδραργύρου είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ και πολλές δεκαετίες για την μελέτη πορώδων υλικών. Οι θεωρητικές βάσεις της τεχνικής αυτής, τέθηκαν από τον E. Washburn, όταν, το 1921 πρότεινε τον μαθηματικό υπολογισμό των χαρακτηριστικών της πορώδους δομής στερεών υλικών, με την χρήση μη διαβρεχόντων υγρών σε επαφή με στερεά. Η πορομετρία υδραργύρου χρησιμοποιεί την ιδιότητα της μη διαβροχής του Hg για τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών της μικροδομής των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, ο υδράργυρος χαρακτηρίζεται ως μη - διαβρέχον υγρό, λόγω της ιδιότητάς του να μην διαβρέχει τα στερεά υλικά όταν έρχεται σε επαφή με αυτά, σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Η διαβροχή ενός στερεού υλικού από ένα υγρό, εξαρτάται την σχέση των δυνάμεων συνάφειας (στερεού - υγρού) και συνοχής (του υγρού) που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του στερεού και του υγρού. Στην περίπτωση του υδράργυρου, λόγω της υψηλής επιφανειακής του τάσης, οι δυνάμεις συνοχής που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του υγρού είναι μεγαλύτερες από τις ελκτικές δυνάμεις (συνάφειας) που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του στερεού με τα μόρια

του υγρού, όταν αυτά έρχονται σε επαφή. Για να εισέλθει ο υδράργυρος σε ένα πορώδες υλικό θα πρέπει να ασκηθεί εκτός της ατμοσφαιρικής πίεσης, επιπλέον εξωτερική πίεση. Η αρχή της μεθόδου, λοιπόν, συνίσταται στην πλήρωση των πόρων ενός πορώδους υλικού με υδράργυρο, υπό την άσκηση εξωτερικής πίεσης. Η ακτίνα των πόρων στο υλικό αυτό μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της πίεσης που ασκήθηκε, μέσω της εξίσωσης του Washburn. Η εξίσωση αυτή αποτελεί μαθηματική έκφραση της θεωρίας της μη διαβροχής, που υποστηρίζει ότι για να εισχωρήσει υδράργυρος σε ένα κυλινδρικό πόρο ακτίνας r (m), θα πρέπει να ασκηθεί πίεση P (N/m²) (41):

$$r = \frac{-2 * \gamma_m * \cos \theta}{P}$$

Όπου: γ_m είναι η επιφανειακή τάση του υδραργύρου ($\gamma_m = 0,48$ N/m στους 25°C) και θ η γωνία επαφής του υδραργύρου ($\theta = 140^\circ$).

Η πορομετρία υδραργύρου εστιάζει στον προσδιορισμό του ανοιχτού πορώδους ενός στερεού υλικού (και άλλων μεγεθών της μικροδομής των δομικών υλικών) τα οποία παίζουν μεγάλο ρόλο κατά τη μεταφορά υγρασίας, της παθολογίας του υλικού και της σχέσης που έχει αυτό με το περιβάλλον, συνεπώς αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των ερευνητών που μελετούν την ανάπτυξη της πορώδους δομής στα δομικά υλικά.

Οι μετρήσεις ποροσιμετρίας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπα Normal 4/80 και Normal 27/88 σε δύο στάδια, χρησιμοποιώντας το όργανο Macropores unit 120 corporation για την μέτρηση του μακροπορώδους (>10 μm), το όργανο Pascal 440 series Electron, για τον έλεγχο του μέσο- και μικροπορώδους (0.001-10 μm). Τα φυσικά μεγέθη που μπορούμε να προσδιορίσουμε με τη μέθοδο αυτή είναι ο ολικός ειδικός όγκος, η φαινόμενη πυκνότητα, η πραγματική πυκνότητα, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα των πόρων και το ολικό πορώδες (%). Με την ποροσιμετρία Hg προσδιορίζουμε ακτίνες πόρων στην περιοχή 37.5Å-100Å. Η προετοιμασία των δειγμάτων για την συγκεκριμένη μέτρηση ήταν η εξής: αρχικά αφαιρούνται τα πρώτα 4-5 mm της επιφάνειας των δειγμάτων και στην συνέχεια τα δείγματα τοποθετούνται σε ξηραντήρα για 48 ώρες.

3.2.9 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων Υπερηχοσκόπηση

Η τεχνική των υπερήχων αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική ελέγχου των υλικών με την οποία προσδιορίζεται η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στα υλικά. Για κάθε σύνθεση και για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των διαμηκών υπερηχητικών κυμάτων στις τρεις διευθύνσεις του κάθε δοκιμίου, εφαρμόζοντας την άμεση μέθοδο. Οι μετρήσεις έγιναν με το όργανο PUNDIT 6, CNS Farneil, μορφοτροπείς παραγωγής διαμηκών κυμάτων, συχνότητα μορφοτροπέων: 54 KHz. Αρχικά το όργανο βαθμονομείται και στη συνέχεια αφού έχουν προσδιοριστεί οι διαστάσεις του δείγματος μετρείται ο χρόνος που απαιτείται για τη διάδοση των υπερήχων στη κάθε διεύθυνση. Αφού οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου είναι γνωστές με μία απλή διαίρεση της απόστασης που διανύουν οι υπέρηχοι προς το χρόνο που χρειάζονται για να διανύσουν αυτή την απόσταση υπολογίζεται η κάθε ταχύτητα διάδοσης υπερήχων. Πριν από την μέτρηση γίνεται εφαρμογή ειδικού gel ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη πρόσφυση των πομπών με τις επιφάνειες του δοκιμίου.

Μετρήσεις μηχανικών αντοχών σε θλίψη και κάμψη

Οι μηχανικές αντοχές μελετήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015:11, χρησιμοποιώντας πρέσσα της Toni Technik εφαρμόζοντας ρυθμό φόρτισης στην περίπτωση της κάμψης 50 N/sec και στην περίπτωση της θλίψης 2400 N/sec. (42). Τα δοκίμια έμειναν στην μεταλλική μήτρα μετά την παρασκευή τους για δυο ημέρες σε θάλαμο σταθερών συνθηκών (95%RH και 20°C), εν συνεχεία ξεκαλουπώθηκαν και έμειναν άλλες πέντε μέρες στον θάλαμο, ενώ μετά τις 7 ημέρες αφαιρέθηκαν από τον θάλαμο και διατηρήθηκαν σε συνθήκες εργαστηρίου μέχρι την ημέρα δοκιμής. Οι διαστάσεις των δοκιμίων που ελέγχθησαν σε κάμψη ήταν 160 mm x 40mm x 40mm, ενώ σε θλίψη υπεβλήθησαν κυβικά δοκίμια προερχόμενα από την κάμψη, διαστάσεων 40 mm x 40mm x 40mm. Η κάμψη προκύπτει ως ο μέσος όρος 3 δοκιμίων, ενώ η θλίψη ως ο μέσος όρος 6 δοκιμίων.

3.2.10 Μελέτη διαστάσεων των δοκιμίων

Τα κονιάματα αποκατάστασης εμφανίζουν μετατροπές των διαστάσεων τους κατά τη πήξη τους. Συνεπώς είναι δόκιμο να γίνεται καταγραφή των αλλαγών των διαστάσεων των κονιαμάτων αποκατάστασης σε διάφορα χρονικές στιγμές της πήξης τους. Μετρούνται, λοιπόν με παχύμετρο όλες οι διαστάσεις των κυβικών δοκιμίων των κονιαμάτων αποκατάστασης και υπολογίζεται ο όγκος τους. Με την αφαίρεση από τον αρχικό όγκο των δοκιμίων (5cmx5cmx5cm, λόγω της μήτρας στα οποία τοποθετήθηκαν) και με διαίρεση με τον αρχικό όγκο, προσδιορίζεται η επί τις εκατό συρρίκνωση ή μεγέθυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης.

3.2.11 Χρωματομετρία

Το χρώμα είναι μια φυσική ιδιότητα των σωμάτων, η οποία γίνεται μεν κατανοητή με απόλυτη ακρίβεια από το ανθρώπινο μάτι, πλην όμως δεν είναι δυνατό να μετρηθεί. Η ακρίβεια μεγέθους αντίληψης της ιδιότητας αυτής εξαρτάται όχι μόνο από την ακρίβεια διέγερσης των φωτοευαίσθητων κυττάρων του παρατηρητή, αλλά και από τον τρόπο φωτισμού και τις συνθήκες παρατήρησης. (43) (44)

Η χρωματομετρία ως επιστήμη εμφανίστηκε το 1930 από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού CIE (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE) με την διεξαγωγή πειραμάτων οπτικής. Τα χρωματομετρικά συστήματα της CIE είναι τα μόνα παγκοσμίως αποδεκτά για την μέτρηση του χρώματος με συνέπεια όλα τα διεθνή πρότυπα να είναι βασισμένα σε αυτά που ορίζονται από αυτή.

Το χρώμα εκφράζεται από την CIE με μαθηματικές τιμές οι οποίες προκύπτουν από μαθηματικές εξισώσεις. Η προσπάθεια να προσδιοριστεί επακριβώς το χρώμα ξεκίνησε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα με την δημιουργία χρωματικών μοντέλων, χώρων δηλαδή που σε κάθε χρώμα αντιστοιχούν αριθμητικές συντεταγμένες. Τελικά, περίπου το 1930, η CIE εισαγάγει το χρωματικό μοντέλο RGB με βάση την αρχή των τριών διεγέρσεων του ανθρώπινου οφθαλμού στο κόκκινο (Red) στο πράσινο (Green) και στο μπλε (Blue).

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το χρωματικό μοντέλο CIELab το οποίο περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Μοντέλο CIELab

Το χρωματικό μοντέλο CIELab ή L^* , a^* , b^* παρουσιάστηκε από την CIE το 1976. Πρόκειται για ένα ομοιόμορφο οπτικά χρωματικό χώρο (uniform color space) ο οποίος προσομοιάζει καλύτερα από όλα τα χρωματικά συστήματα ή μοντέλα στην ανθρώπινη αντίληψη των χρωματικών διαφορών. Το κάθε χρώμα περιγράφεται από 3 κανάλια ή συντεταγμένες ή παράγοντες όπως και στον χρωματικό χώρο RGB. Στο CIELab χρωματικό μοντέλο ή σύστημα οι χρωματικές συντεταγμένες ή χρωματικοί παράγοντες ονομάζονται L^* , a^* και b^* , (γι' αυτό και η ονομασία) και απεικονίζονται σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ο παράγοντας L^* (Lightness) αποθηκεύει όλη την πληροφορία φωτεινότητας της εικόνας παίρνοντας τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό) ενώ οι παράγοντες a^* και b^* την πληροφορία χρώματος χωρίς να υπάρχουν για αυτά κάποια αριθμητικά όρια. Θετικές τιμές του a^* αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κόκκινου. Αρνητικές τιμές του a^* αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του πράσινου. Θετικές τιμές του b^* αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κίτρινου. Αρνητικές τιμές b^* αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του μπλε.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτού του χρωματικού μοντέλου είναι η ανεξαρτησία των πληροφοριών φωτεινότητας και χρώματος, που μας δίνει πάρα πολλές δυνατότητες. Ο παράγοντας L^* δηλαδή περιγράφει την άσπρη μαύρη εκδοχή του προς εξέταση αντικειμένου με διευρυμένο συνήθως φάσμα.

Το μοντέλο CIELab είναι ένας τεράστιος χρωματικός χώρος. Είναι υπερσύνολο όλων των υπόλοιπων χρωματικών μοντέλων. Αν φτάσουμε στα όριά του, προκύπτουν χρώματα πρωτόγνωρα ή εξωπραγματικά, έξω από τις δυνατότητες πολλών συσκευών απεικόνισης. Τέλος πολύ σημαντικό είναι ότι το χρωματικό μοντέλο CIELab είναι 'device independent' ανεξάρτητο δηλαδή από ιδιότητες συσκευών καταγραφής ή απεικόνισης κάτι που δεν συμβαίνει με τα υπόλοιπα χρωματικά μοντέλα.

Το χρωματικό μοντέλο που περιγράφεται CIELab, μπορεί να αναπαρασταθεί και σε κυλινδρικό σύστημα πολικών συντεταγμένων με το μοντέλο CIE L^* , C^* , h , όπου:

- ❖ L^* είναι η φωτεινότητα (Lightness)
- ❖ C^* (Chroma): Χρωματική πυκνότητα: Προσδιορίζει την συγκέντρωση δηλαδή την ένταση ή την καθαρότητα του χρώματος ή αλλιώς τη σχέση μεταξύ της έντασης και της φωτεινότητας της μελετώμενης απόχρωσης. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

- ❖ Χροιά h (hue angle): Μετράται σε μοίρες και προσδιορίζει την απόχρωση παίρνοντας τιμές 0° για το κόκκινο-πορφυρό, 90° για το κίτρινο, 180° για το γαλαζοπράσινο και 270° για το μπλέ. Για τον υπολογισμό του υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις:

- $h = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$, όταν $a^* > 0$ και $b^* \geq 0$
- $h = 0^\circ$, όταν $a^* = 0$ και $b^* = 0$
- $h = 90^\circ$, όταν $a^* = 0$ και $b^* > 0$
- $h = 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$, όταν $a^* < 0$
- $h = 270^\circ$, όταν $a^* = 0$ και $b^* < 0$
- $h = 360^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$, όταν $a^* > 0$ και $b^* < 0$

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Σε κάθε δείγμα λήφθηκε μέτρηση με την συσκευή σε 5 αντιπροσωπευτικά σημεία του δείγματος. Εάν κάποιο δείγμα εμφάνισε περιοχές με εμφανές διαφορετικά χρώμα (π.χ. περιοχές διάβρωσης, περιοχές με κάποια επικάλυψη) λήφθηκαν διαφορετικές μετρήσεις για κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες. Στη συνέχεια λήφθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών και με βάση τα τελικά αποτελέσματα έγινε ο προσδιορισμός των υπόλοιπων παραμέτρων σύμφωνα με τις παραπάνω μαθηματικές εξισώσεις.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να γίνει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του χρώματος που κατείχαν τα δείγματα και ψηφιακά, έγινε μετατροπή των τιμών L , a , b σε ψηφιακή εικόνα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με δωρεάν λογισμικό από το διαδίκτυο και πιο συγκεκριμένα το nix Color Sensor. Το πρόγραμμα αυτό σαν είσοδο δέχεται τις τιμές L , a , b που εμφάνισε το δείγμα όπως επίσης και τη γωνία αναφοράς και παρατηρητή που προσδιορίζονται από το όργανο που χρησιμοποιήθηκε. Ως έξοδο, το πρόγραμμα δίνει τις τιμές RGB, τον αριθμό HEX του χρώματος, και τις τιμές των μοντέλων CMYK, CIELAB, XYZ και φυσικά την ψηφιακή εικόνα του χρώματος.

3.2.12 Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών Νωπών Κονιαμάτων

Συνεκτικότητα νωπού κονιάματος (με τράπεζα εξάπλωσης) (45)

Η ποσότητα του νερού που προσθέτουμε επηρεάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κονιάματος. Ειδικότερα, η αύξηση της ποσότητας νερού, βελτιώνεται η εργασιμότητα του κονιάματος, αλλά μειώνονται οι τελικές μηχανικές αντοχές όπως επίσης αυξάνεται η συρρίκνωση κατά την πήξη που μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μικρορωγμών. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να γίνει προσθήκη της βέλτιστης ποσότητας νερού, ώστε το κονίαμα να παρουσιάζει ικανοποιητική εργασιμότητα, μικρή συρρίκνωση κατά την πήξη και σκλήρυνση και υψηλές τελικές μηχανικές αντοχές.

Η δοκιμή έγινε βάσει του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN1 015. Methods of test for mortar for masonry - Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Στο πρότυπο αυτό αναφέρεται ότι η συνεκτικότητα ενός νωπού κονιάματος είναι μέτρο της ρευστότητας και της παραμορφωσιμότητας του, όταν αυτό υπόκειται σε συγκεκριμένου τύπου καταπόνηση. Ωστόσο, η συνεκτικότητα δεν συνδέεται απ' ευθείας με την εργασιμότητα του κονιάματος από τους τεχνίτες.

Με τη μέθοδο αυτή, λοιπόν, υπολογίζεται η κατάλληλη αναλογία απαιτούμενου νερού ανάμιξης προς την κονία, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συγχρόνως και καλή εργασιμότητα και η απαιτούμενη συνεκτικότητα στην τράπεζα εξάπλωσης (15 ± 1 cm).



Εικόνα 11 Προσδιορισμός συνεκτικότητας νωπού κονιάματος

Φαινόμενη Πυκνότητα (46)

Ο προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας των νωπών κονιαμάτων έγινε βάσει του Ευρωπαϊκού Προτύπου, EN1015-Methods of test for mortar for masonry-Part 6. Determination of bulk density of fresh mortar. Η φαινόμενη πυκνότητα προσδιορίζεται με ζύγιση της μάζας του νωπού κονιάματος που απαιτείται για την πλήρωση μεταλλικού δοχείου συγκεκριμένου όγκου. Μέσω της διαίρεσης της μετρούμενης μάζας με το συγκεκριμένο όγκο του δοχείου, προσδιορίζεται η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού κονιάματος. Πρόκειται για σημαντική παράμετρο, καθώς γίνεται ο προσδιορισμός της μάζας των πρώτων υλών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή του κάθε κονιάματος καθώς και η εκτίμηση του πόσο ελαφρύ είναι το κονίαμα.



Εικόνα 12 Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας νωπού κονιάματος

Συγκρατούμενο νερό (47)

Με την αυτή την τεχνική προσδιορίζεται το ποσοστό του νερού, που συγκρατείται στη μάζα του κονιάματος σε σχέση με την συνολική ποσότητα νερού που προστέθηκε στο κονίαμα. Η δοκιμή έγινε βάσει του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN1015. Methods of test for mortar for masonry - Part 8. Determination of retained water of fresh mortar. Τα κονιάματα είναι απαραίτητο να συγκρατούν τη μέγιστη δυνατή ποσότητα νερού στην μάζα τους, ώστε να ευνοηθεί η ποζολανική αντίδραση κατά τη σκλήρυνση του κονιάματος. Παράλληλα, ένα μέρος του συγκρατούμενου νερού θα απορροφηθεί από τα δομικά στοιχεία τα οποία βρίσκονται υπό γεινίαση στην τοιχοποιία. Στην περίπτωση, που το συγκρατούμενο ποσοστό του νερού είναι μικρό, είναι δυνατή η εμφάνιση μικρορωγμών στην μάζα του κονιάματος, οι οποίες θα αλλοιώσουν και την τελική του φυσικό μηχανική συμπεριφορά. Στη διάταξη που εμφανίζεται παρακάτω τοποθετείται συγκεκριμένη ποσότητα μάζα του νωπού κονιάματος (μετράται), στη συνέχεια τοποθετείται ειδικό φίλτρο, γνωστής μάζας, στη μία επιφάνεια του κονιάματος και έπειτα τοποθετείται ένα βάρος 1kg για 4 λεπτά πάνω από το δείγμα. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του φίλτρου, έτσι μπορεί να προσδιοριστεί το νερό που έχει απορροφηθεί από το φίλτρο, δηλαδή η ποσότητα του νερού που δεν συγκράτησε το νωπό κονίαμα. Άρα με μία απλή αφαίρεση από το ολικό νερό που προστέθηκε στη σύνθεση προσδιορίζεται η ποσότητα του νερού που συγκράτησε το νωπό κονίαμα. Το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού υπολογίζεται ως το κλάσμα επί της εκατό της μάζας του νερού που συγκράτησε το κονίαμα προς τη μάζα του νωπού κονιάματος.



Εικόνα 13 Προσδιορισμός συγκρατούμενου νερού νωπού κονιάματος

3.3 Δειγματοληψία Ιστορικών Κονιαμάτων

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των εργασιών συντήρησης, ενίσχυσης και αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου από την ομάδα αναστηλωτών του έργου. Ελήφθησαν εκατόν τέσσερα (104) δείγματα κονιαμάτων από τη δυτική, ανατολική, βόρεια και νότια όψη του μνημείου. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε πριν την αναστήλωση του μνημείου που ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2016. Στη πρώτη φάση της δειγματοληψίας ανοίχθηκαν τα τρία πρώτα φατνώματα της νότιας όψης (MN1, MN2, MN3). Μετά από τη μελέτη των εν λόγω δειγμάτων παρατηρήθηκε ότι επρόκειτο για διαφορετικά είδη κονιαμάτων μεταξύ τους. Με αφορμή τα αποτελέσματα αυτά η δειγματοληψία εντατικοποιήθηκε, έτσι ώστε να υπάρχει μία συνέχεια στη διαδικασία της δειγματοληψίας. Λήφθηκαν λοιπόν συγκεκριμένα δείγματα ανά όψη, ανά φάτνωμα, ανά ύψος και ανά είδος κονιάματος (πλήρωσης ή αρμολόγησης). Μέσω της κωδικοποίησης των δειγμάτων φανερώνεται και η διαδικασία της δειγματοληψίας.

Ο κωδικός των δειγμάτων αποτελείται από τέσσερα μέρη. Το 1ο μέρος αναφέρεται στο μνημείο από το οποίο πάρθηκαν τα δείγματα JHS: το οποίο είναι ένα ακρώνυμο για την φράση: Jerusalem Holy Sepulchre. Το 2ο μέρος χαρακτηρίζει από ποιο στοιχείο του μνημείου πάρθηκε το δείγμα και από ποια πλευρά του μνημείου πάρθηκε. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η κωδικοποίηση MW: Masonry West, η κωδικοποίηση MES: Masonry East South, MEN: Masonry East North, MN1 έως MN5: Mansonry North στα φατνώματα 1 έως 5 και MS1 έως MS5: Mansonry South στα φατνώματα 1 έως 5. Το 3ο μέρος χαρακτηρίζει το είδος του στοιχείου που λήφθηκε από το μνημείο το οποίο μπορεί να είναι fm: filling mortar που αναφέρεται σε κονίαμα πλήρωσης και jm: joint mortar που αναφέρεται σε κονίαμα αρμού δομικών στοιχείων. Τέλος, το 4ο μέρος χαρακτηρίζει το ύψος από το οποίο πάρθηκαν τα δείγματα από τη βάση του φατνώματος. Τα δείγματα λήφθηκαν σε ύψη 50cm, 85cm, 135cm, 200cm και 280cm, όπου ήταν δυνατό. Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται οι θέσεις της δειγματοληψίας και στο πίνακα εμφανίζονται οι κωδικοί των δειγμάτων

Πίνακας 2 Δείγματα της Βόρειας Όψης που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας

Βόρεια Όψη		
Φάτνωμα	Κονιάματα συμπλήρωσης	Κονιάματα Αρμού
N1	JHS_MN1_fm_50	JHS_MN1_jm_50
	JHS_MN1_fm_85	JHS_MN1_jm_85
	JHS_MN1_fm_135	JHS_MN1_jm_135
	JHS_MN1_fm_200	JHS_MN1_jm_200
	JHS_MN1_fm_280	-
N2	-	JHS_MN2_jm
	-	JHS_MN2_jm_50
	-	JHS_MN2_jm_85
	-	JHS_MN2_jm_135
N3	JHS_CN3_m	JHS_N3_m3
	JHS_N3_m2	-
N4	-	JHS_N4_m1
	-	JHS_N4_m2
	-	JHS_N4_m3
	-	JHS_MN4_jm2
N5	JHS_N5_m1	JHS_MN5_jm_50
	JHS_N5_m2	JHS_MN5_jm_85
	JHS_MN5_fm_50	JHS_MN5_jm_135
	JHS_MN5_fm_85	JHS_MN5_jm_200

	JHS_MN5_fm_135	-
	JHS_MN5_fm_200	-
	JHS_MN5_fm_280	-

Πίνακας 3 Δείγματα της Νότιας Όψης που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας

Νότια Όψη		
Φάτνωμα	Κονιόματα συμπλήρωσης	Κονιόματα Αρμού
S1	JHS_MS1_fm_50	JHS_MS1_jm_50
	JHS_MS1_fm_85	JHS_MS1_jm_85
	JHS_MS1_fm_135	JHS_MS1_jm_135
	JHS_MS1_fm_200	JHS_MS1_jm_200
	JHS_MS1_fm_280	JHS_MS1_jm_280
S2	JHS_MS2_fm_50	JHS_MS2_jm_200
	JHS_MS2_fm_85	JHS_MS2_jm_280
	JHS_MS2_fm_135	-
	JHS_MS2_fm_200	-
S3	JHS_MS3_fm_50	JHS_MS3_jm_50
	JHS_MS3_fm_85	JHS_MS3_jm_85
	JHS_MS3_fm_135	JHS_MS3_jm_135
	JHS_MS3_fm_200	JHS_MS3_jm_200
	JHS_MS3_fm_280	JHS_MS3_jm_280
S4	JHS_MS4_fm_50	JHS_MS4_jm_50
	JHS_MS4_fm_85	JHS_MS4_jm_85
	JHS_MS4_fm_135	JHS_MS4_jm_135
	JHS_MS4_fm_200	JHS_MS4_jm_200
	JHS_MS4_fm_280	JHS_MS4_jm_280
S5	JHS_MS5_fm_50	JHS_MS5_jm_50
	JHS_MS5_fm_85	JHS_MS5_jm_85
	JHS_MS5_fm_135	JHS_MS5_jm_135
	JHS_MS5_fm_200	JHS_MS5_jm_200
	JHS_MS5_fm_280	JHS_MS5_jm_280

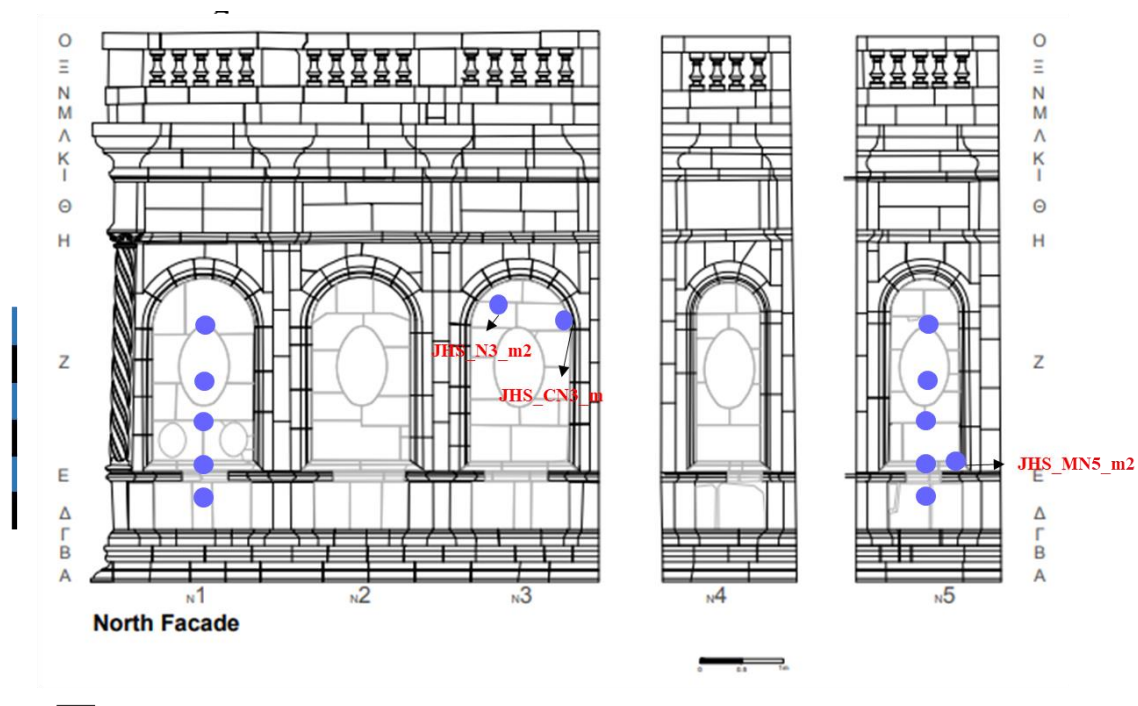
Πίνακας 4 Δείγματα της Δυτικής Όψης που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας

Δυτική Όψη			
Φάτνωμα	Κονιάματα συμπλήρωσης	Κονιάματα Αρμού	Κονιάματα Αποκατάστασης
W	JHS_MW_fm_50	JHS_MW_jm_50	JHS_MW_m
	JHS_MW_fm_85	JHS_MW_jm_85	-
	JHS_MW_fm_135	JHS_MW_jm_135	-
	JHS_MW_fm_200	JHS_MW_jm_200	-
	JHS_MW_fm_280	-	-

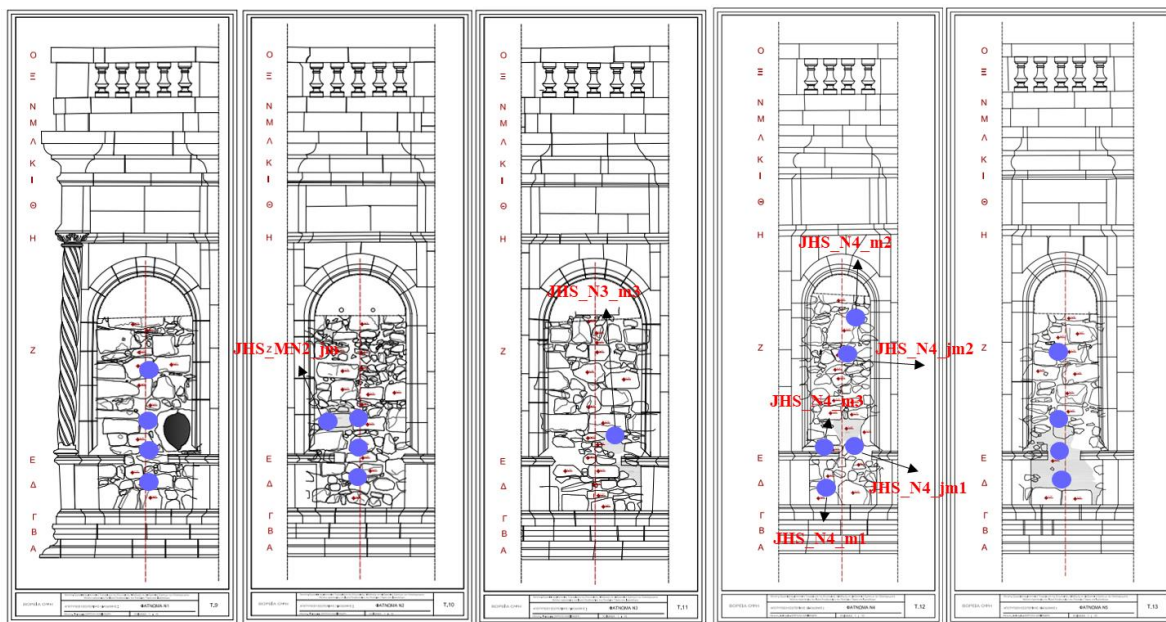
Πίνακας 5 Δείγματα της Ανατολικής Όψης που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας

Ανατολική Όψη			
Φάτνωμα	Κονιάματα συμπλήρωσης	Κονιάματα Αρμού	Κονιάματα Αποκατάστασης
MES	JHS_MES_fm_50	JHS_MES_jm_50	-
	JHS_MES_fm_85	JHS_MES_jm_85	-
	JHS_MES_fm_135	JHS_MES_jm_135	-
	JHS_MES_fm_200	JHS_MES_jm_200	-
MEN	JHS_MEN_fm_50	JHS_MEN_jm_50	JHS_MEN_rm
	JHS_MEN_fm_85	JHS_MEN_jm_85	-
	JHS_MEN_fm_135	JHS_MEN_jm_135	-
	JHS_MEN_fm_200	JHS_MEN_jm_200	-

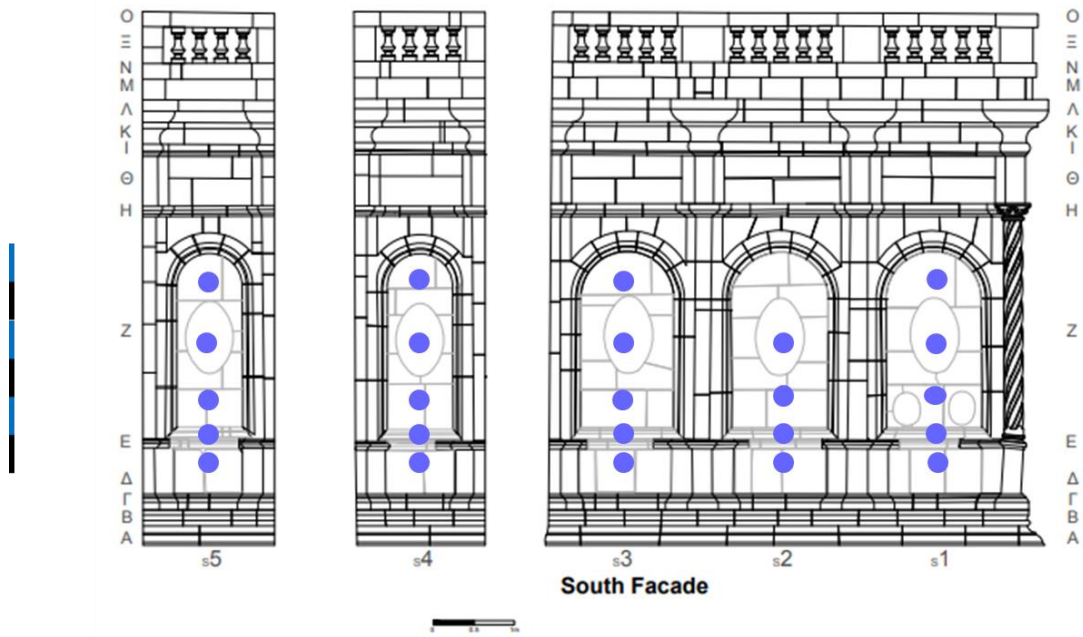
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η Βόρεια όψη λήφθηκαν συνολικά 31 δείγματα εκ των οποίων τα 17 είναι πλήρωσης και 14 είναι αρμού. Αντίστοιχα, στη Νότια υπάρχουν 46 δείγματα εκ των οποίων τα 24 είναι πλήρωσης και 22 είναι αρμού. Ακόμη στη Δυτική όψη υπάρχουν 10 δείγματα από τα οποία τα 5 είναι πλήρωσης, τα 4 είναι αρμού και υπάρχει και ένα κονίαμα από προηγούμενη αποκατάσταση (JHS_MW_m). Τέλος, η Ανατολική Όψη έχει 17 δείγματα, 8 από τα οποία είναι πλήρωσης, άλλα 8 είναι αρμού και υπάρχει και ένα από προηγούμενη αποκατάσταση (JHS_MEN_rm). Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση των δειγμάτων πάνω στα σχέδια του μνημείου. (48) (49)



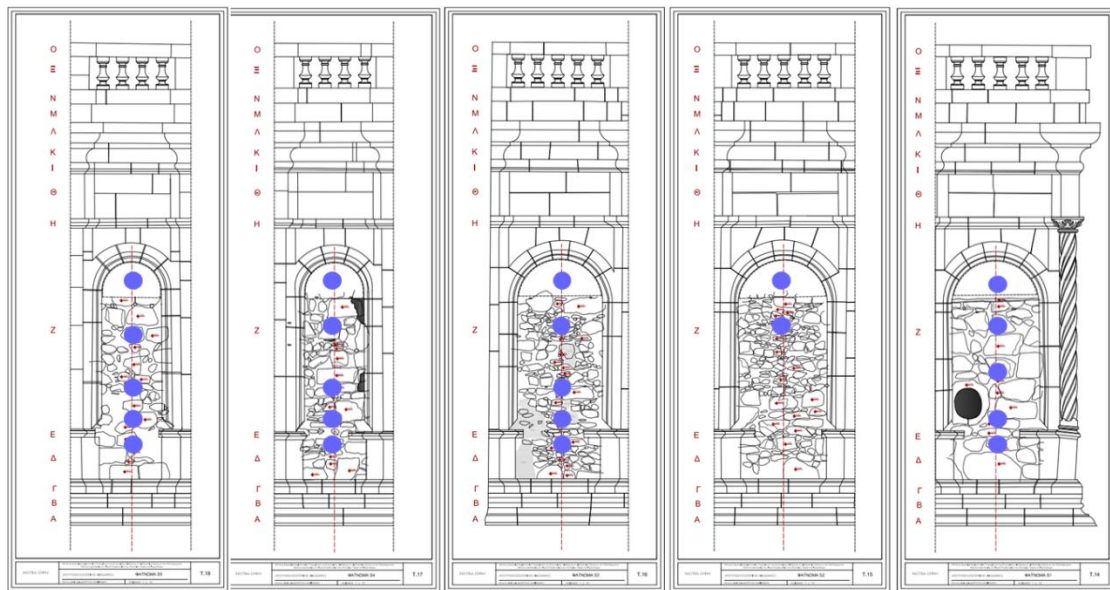
Εικόνα 14 Δειγματοληψία στη Βόρεια Όψη, κονιάματα συμπλήρωσης



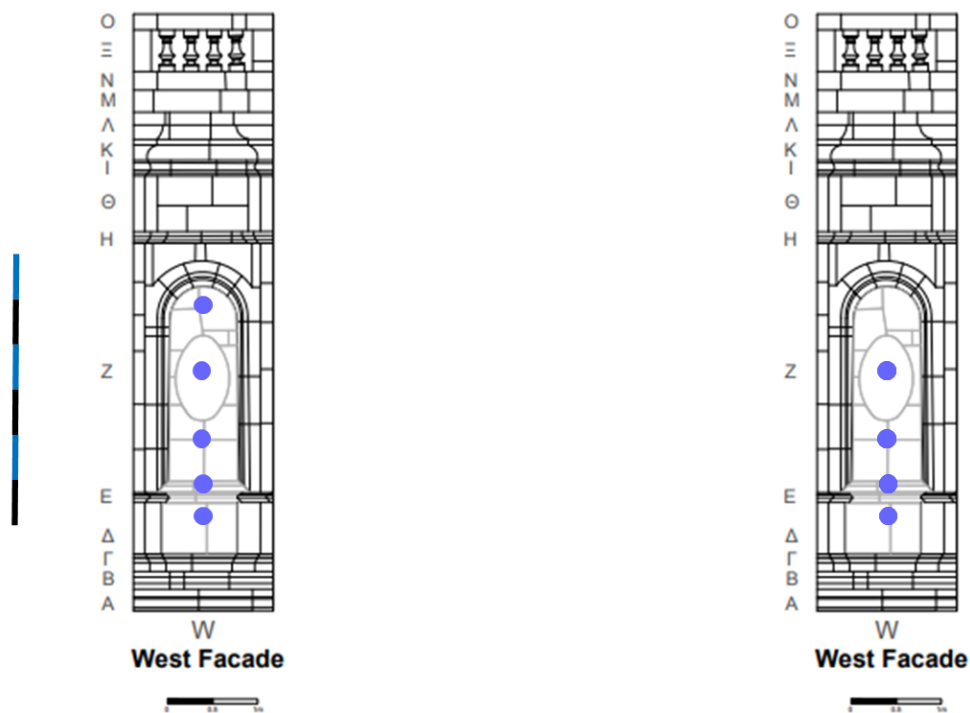
Εικόνα 15 Δειγματοληψία στη Βόρεια Όψη, κονιάματα αρμού



Εικόνα 16 Δειγματοληψία στη Νότια Όψη, κονιάματα συμπλήρωσης



Εικόνα 17 Δειγματοληψία στη Νότια Όψη, κονιάματα αρμού



Εικόνα 18 Δειγματοληψία στη Δυτική Όψη, κονιάματα συμπλήρωσης (αριστερά) και αρμού (δεξιά)



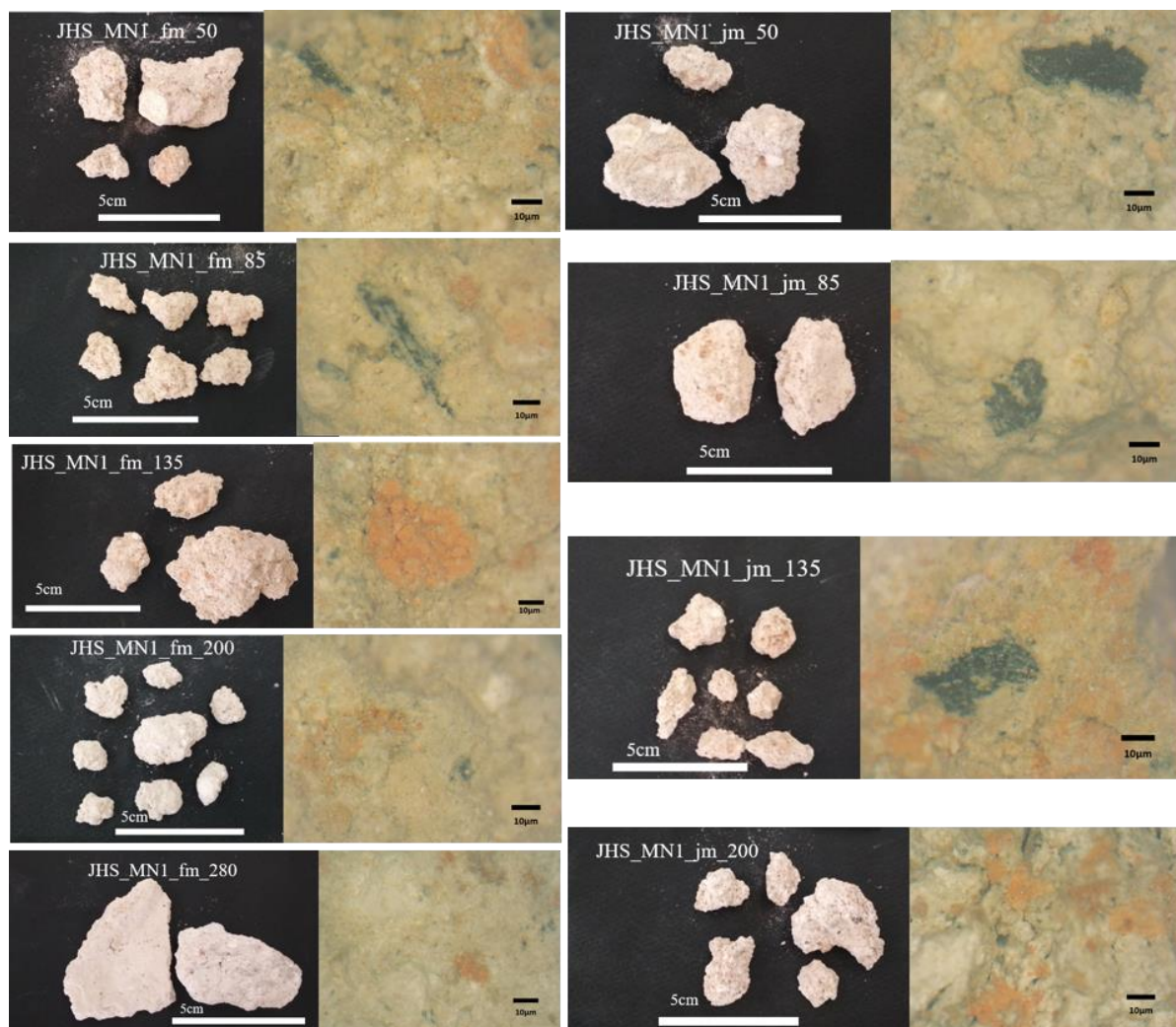
Εικόνα 19 Δειγματοληψία στη Ανατολικής Όψης, κονιάματα συμπλήρωσης (αριστερά) και αρμού (δεξιά)

4. Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

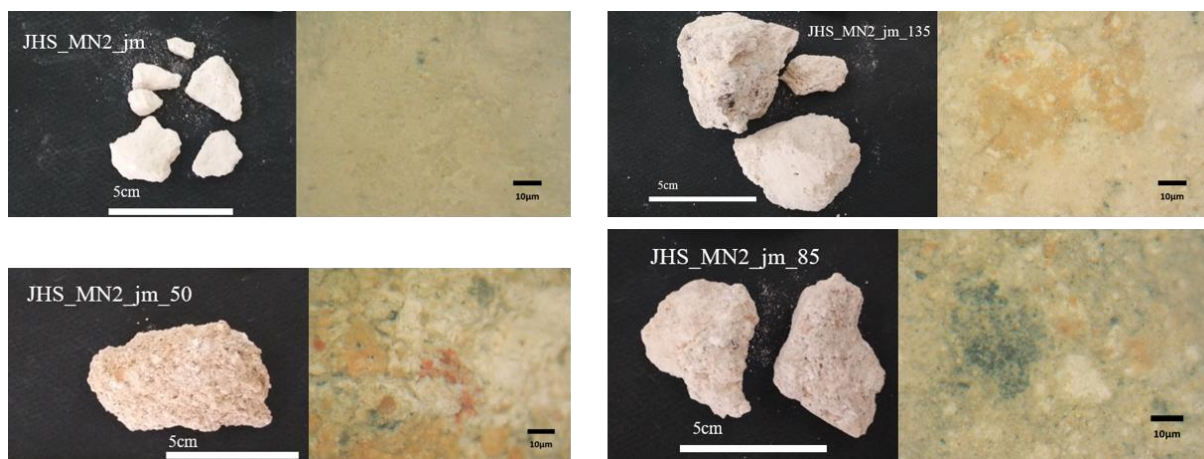
4.1 Ιστορικά Κονιάματα

4.1.1. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων
 Παρακάτω παρουσιάζονται ανά όψη και ανά φάτνωμα τις τοιχοποιίας μία αντιπροσωπευτική φωτογραφία του κάθε δείγματος και μία αντιπροσωπευτική εικόνα που λήφθηκε από ψηφιακή μικροσκοπία οπτικών ινών.

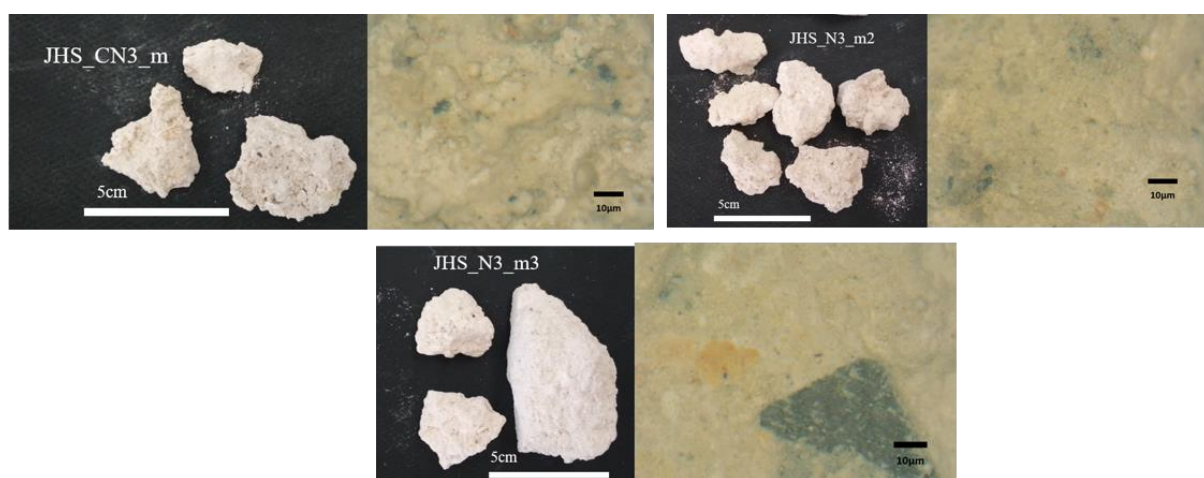
Βόρεια Όψη



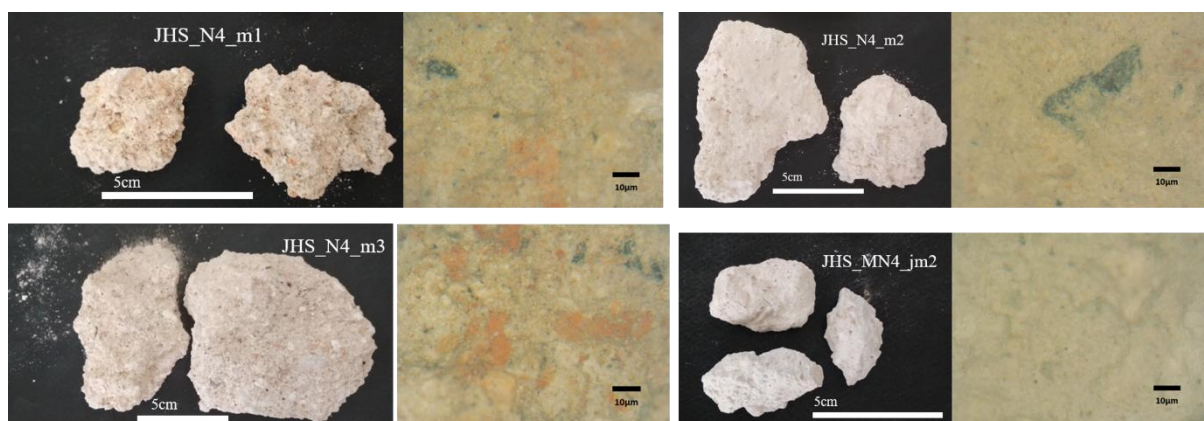
Εικόνα 20 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φαντώματος Ν1



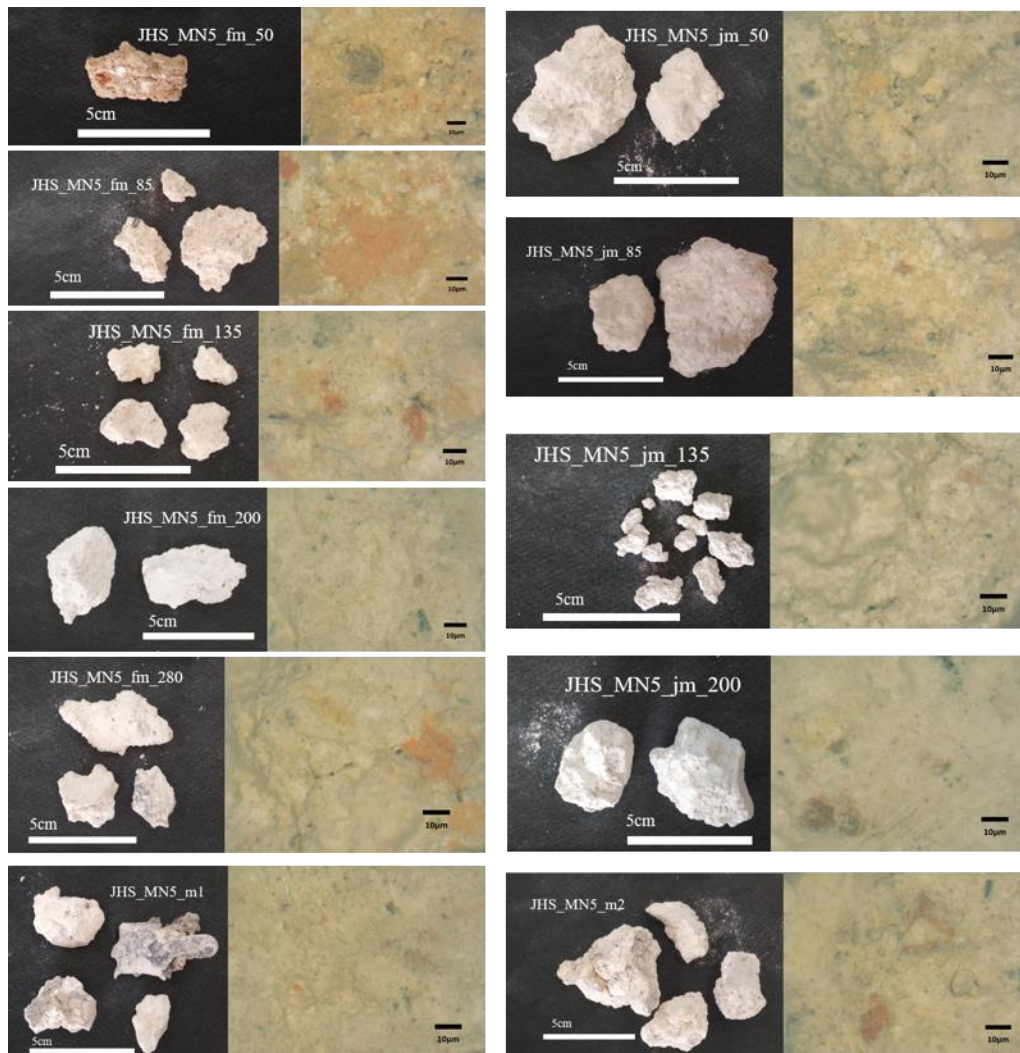
Εικόνα 21 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος N2



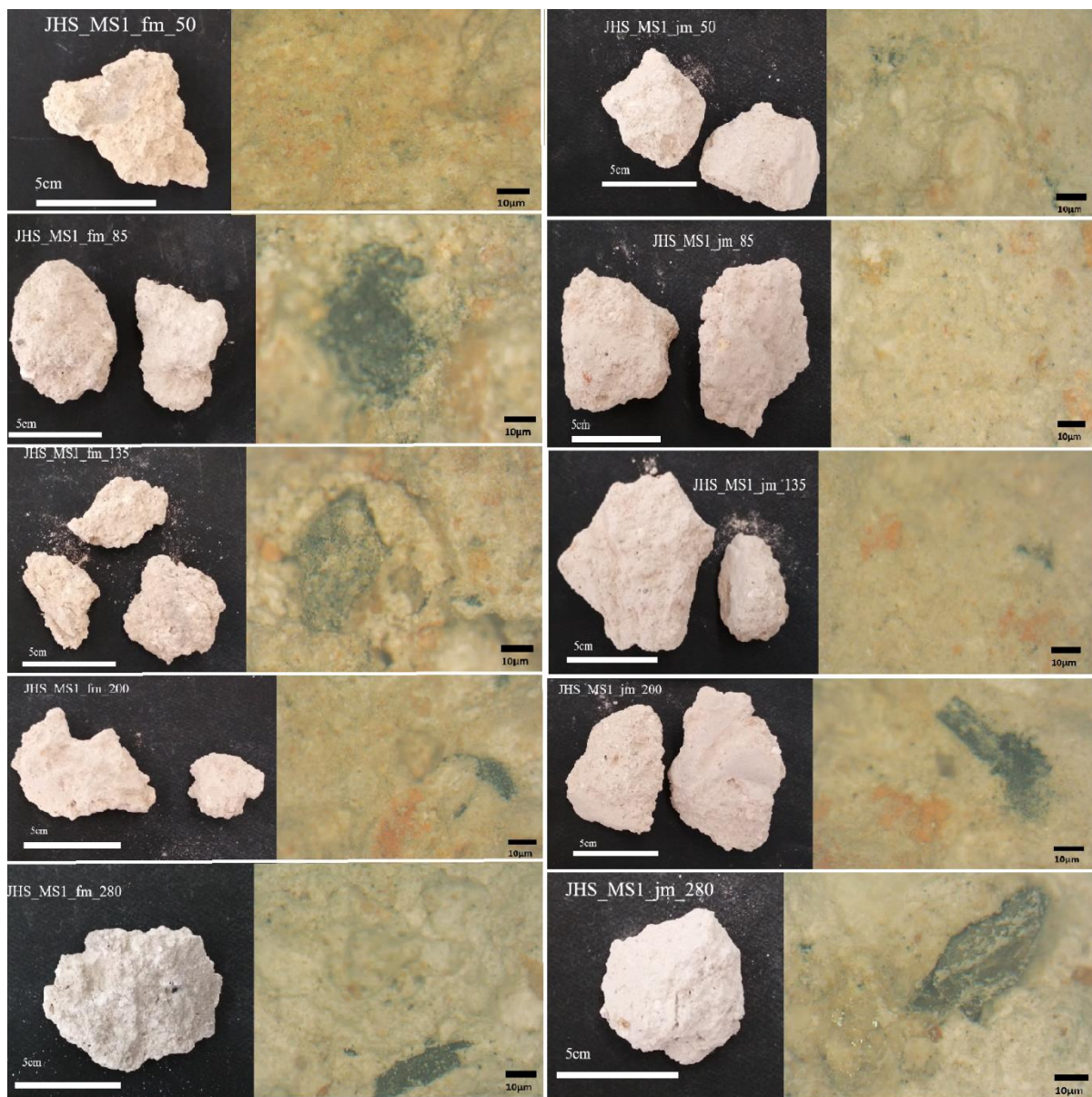
Εικόνα 22 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος N3



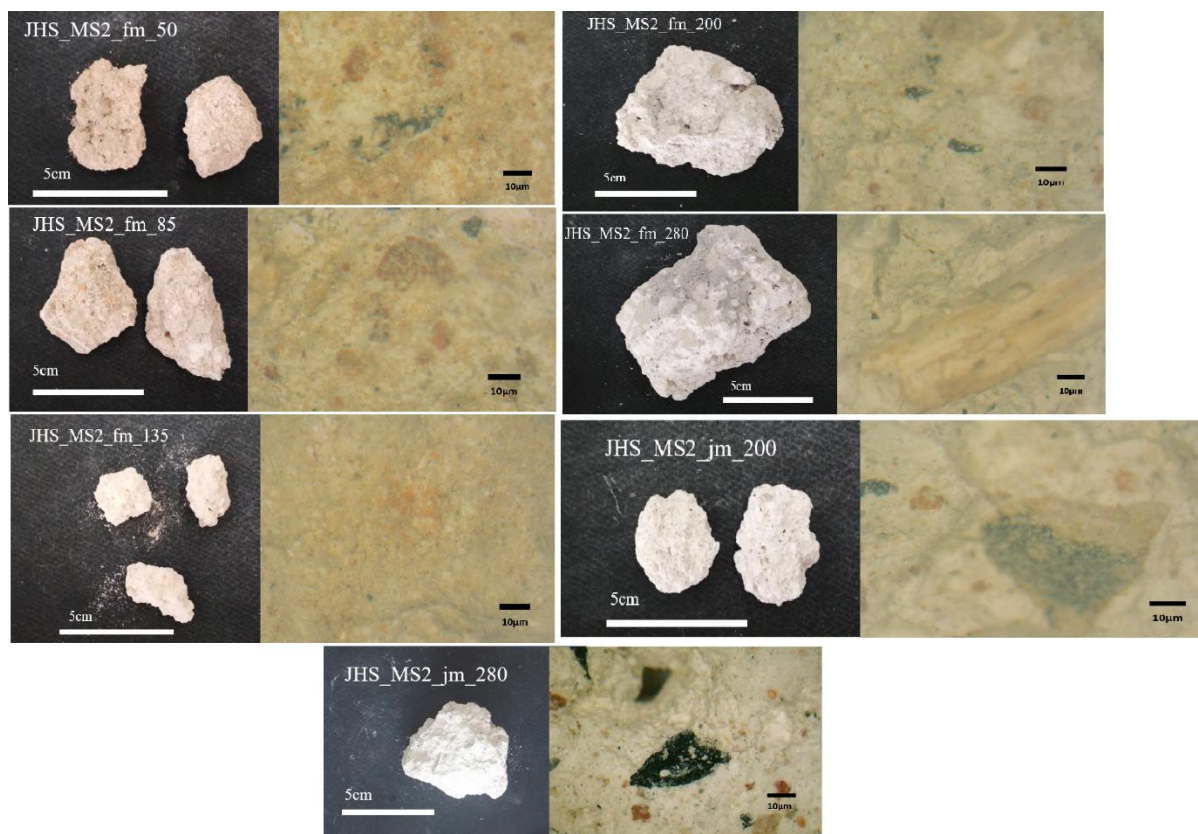
Εικόνα 23 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος N4



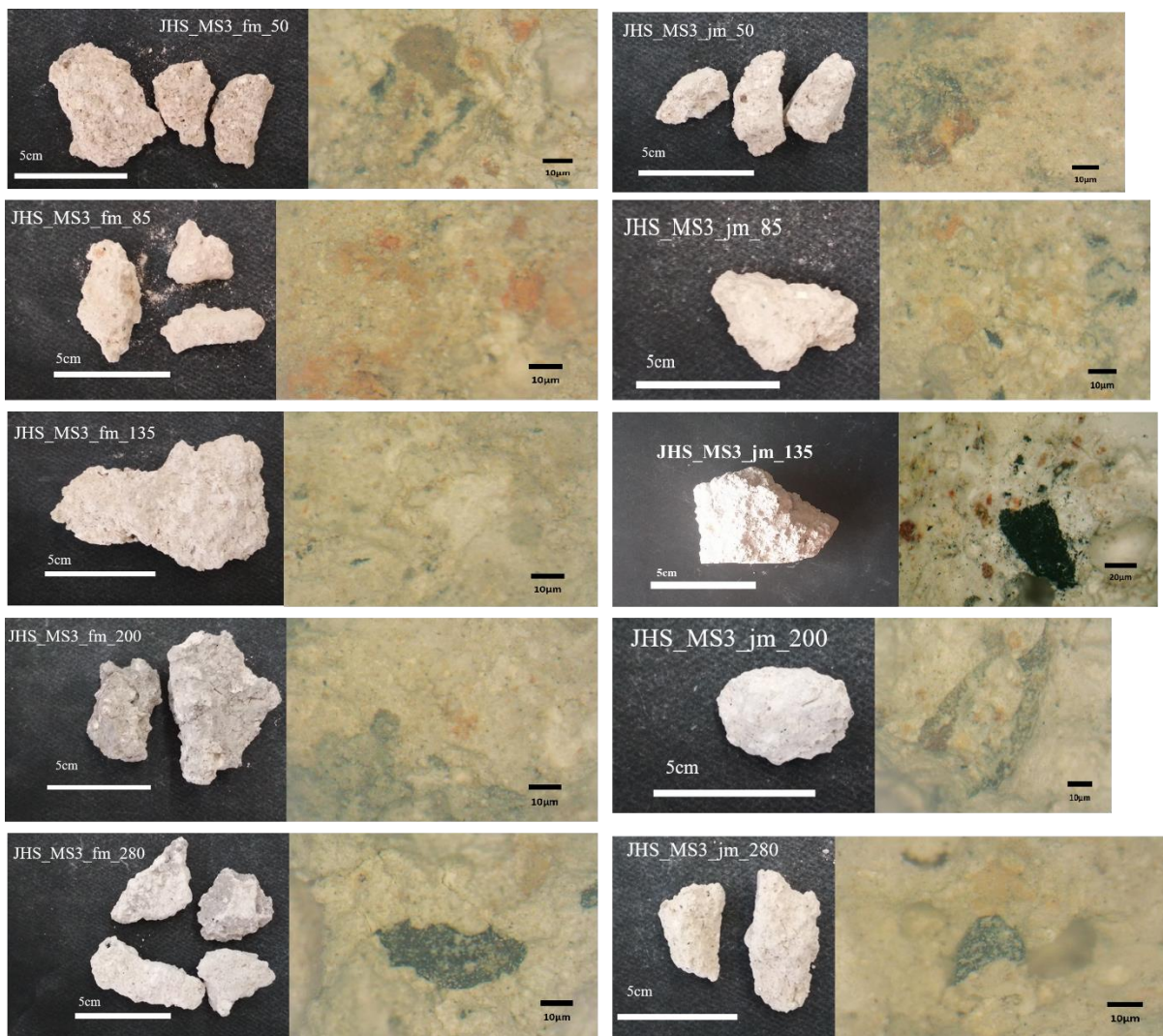
Εικόνα 24 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φαινομένου N5

Νότια Όψη

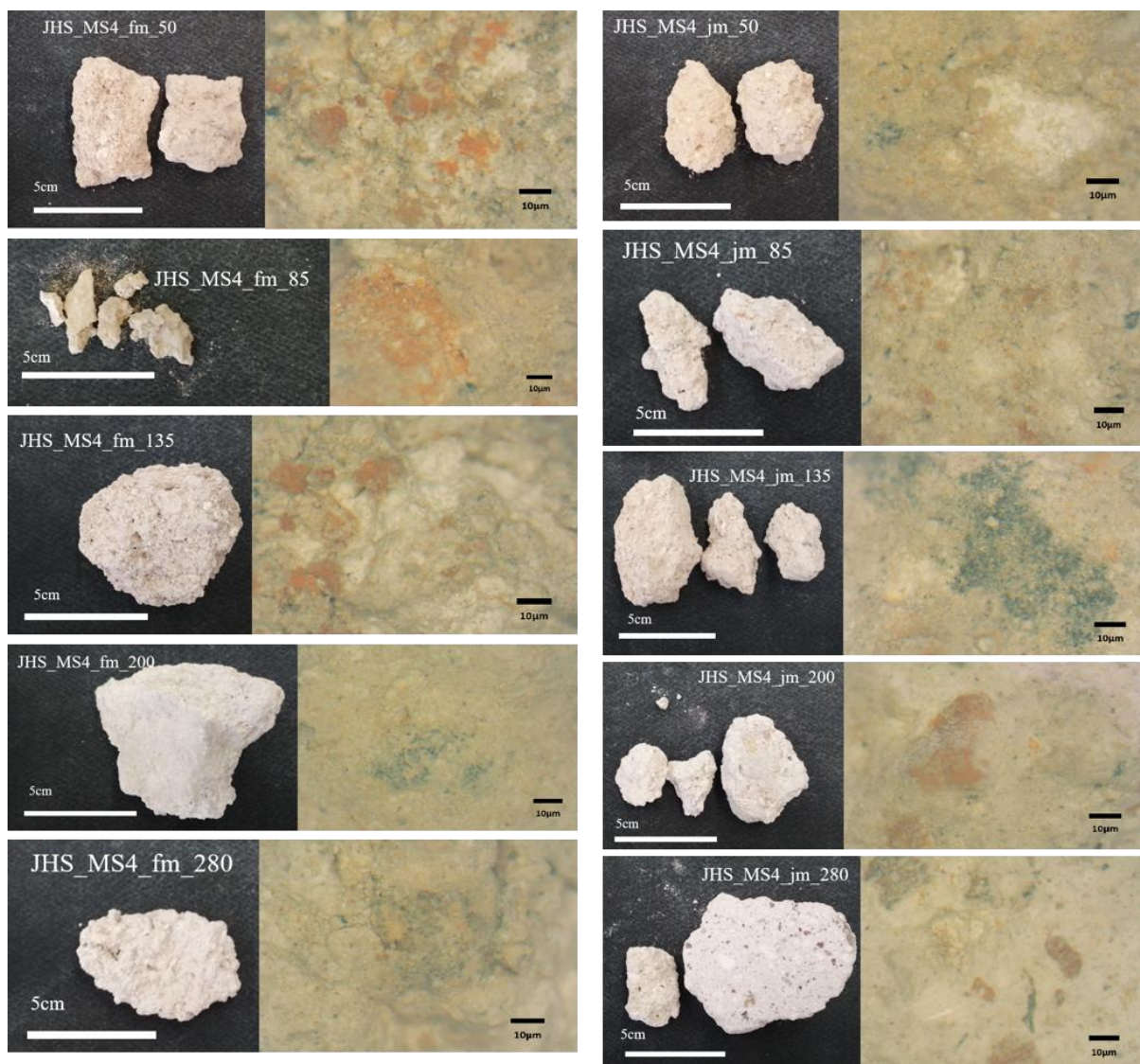
Εικόνα 25 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S1



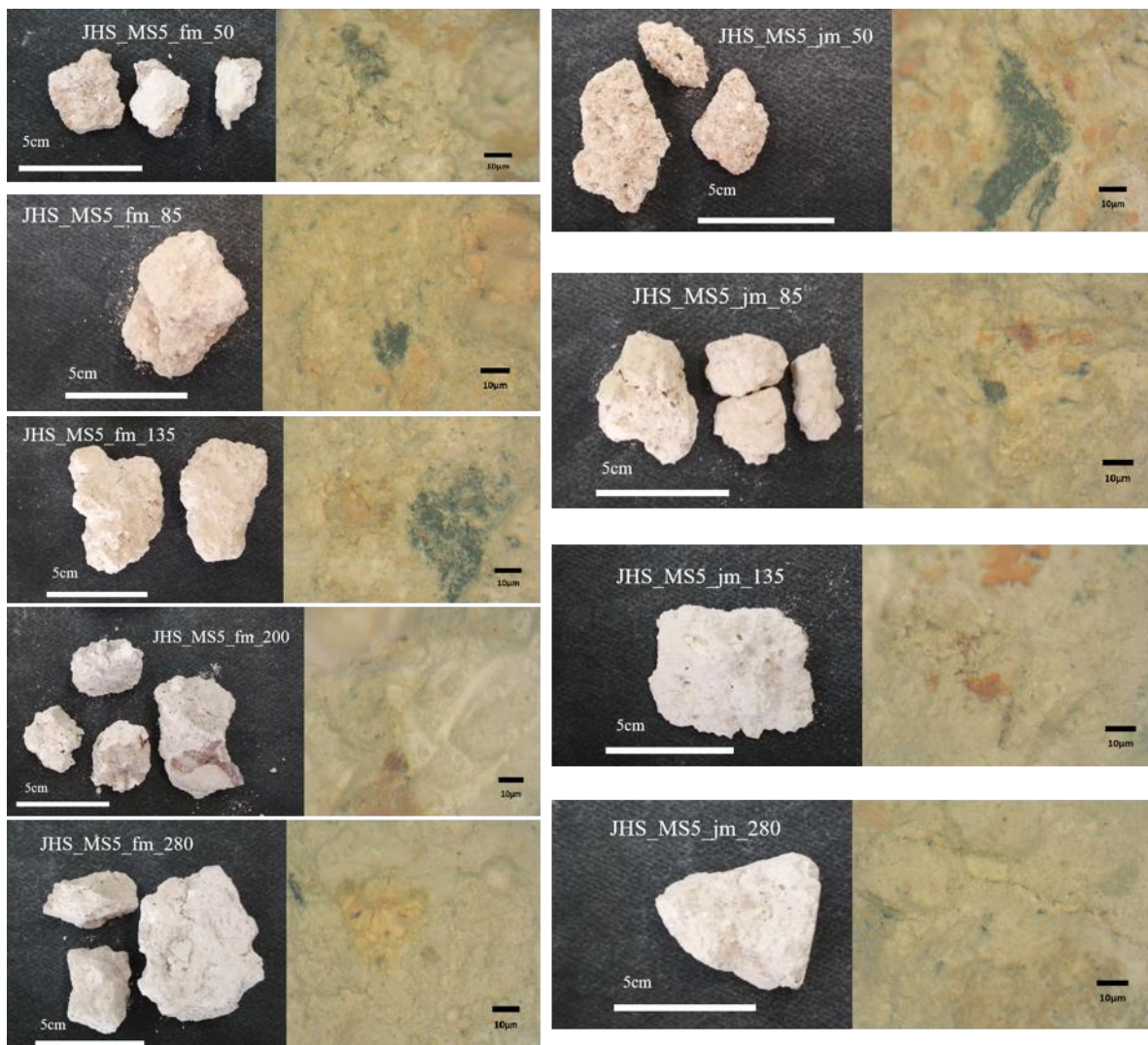
Εικόνα 26 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S2



Εικόνα 27 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S3

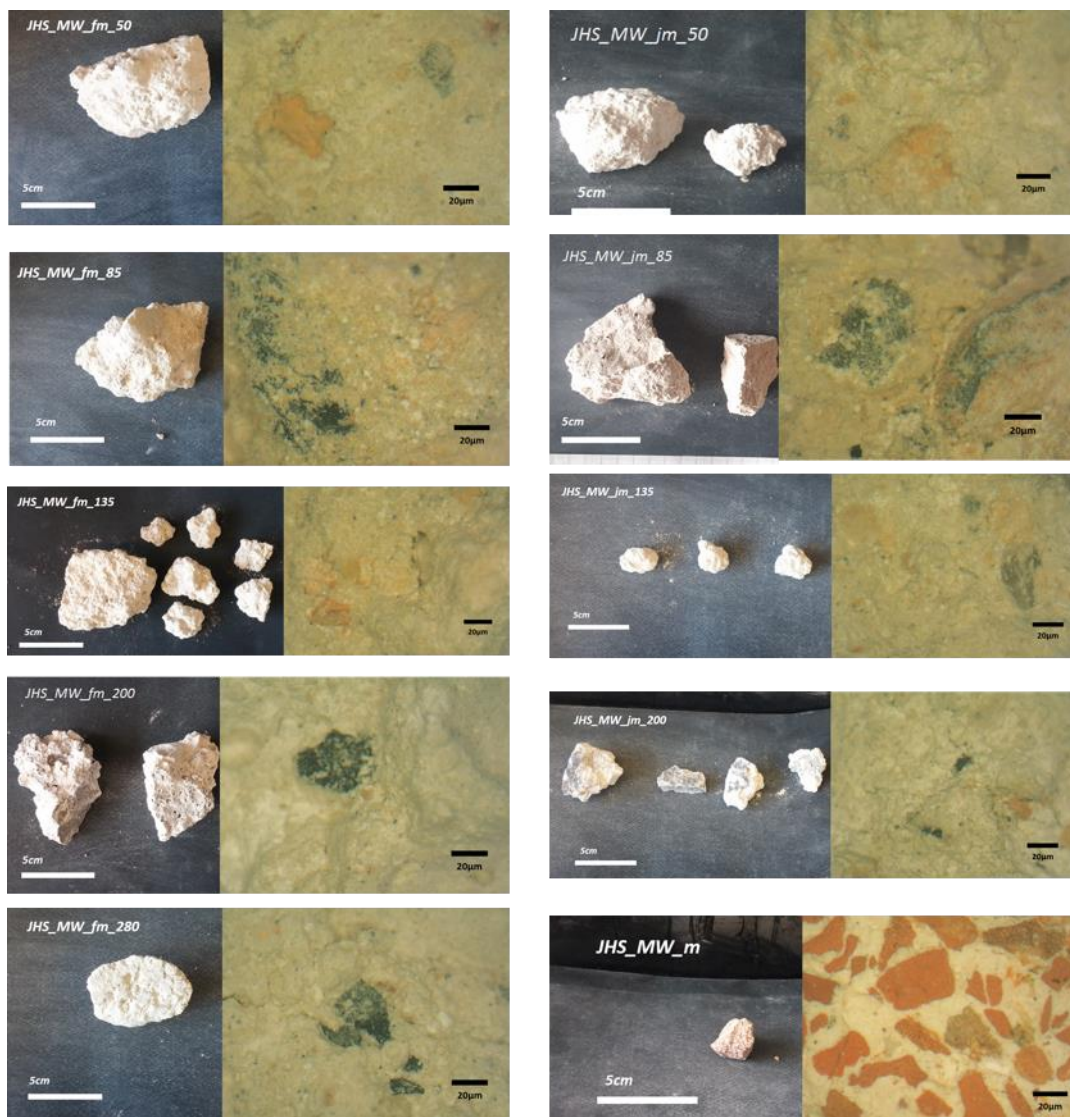


Εικόνα 28 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S4

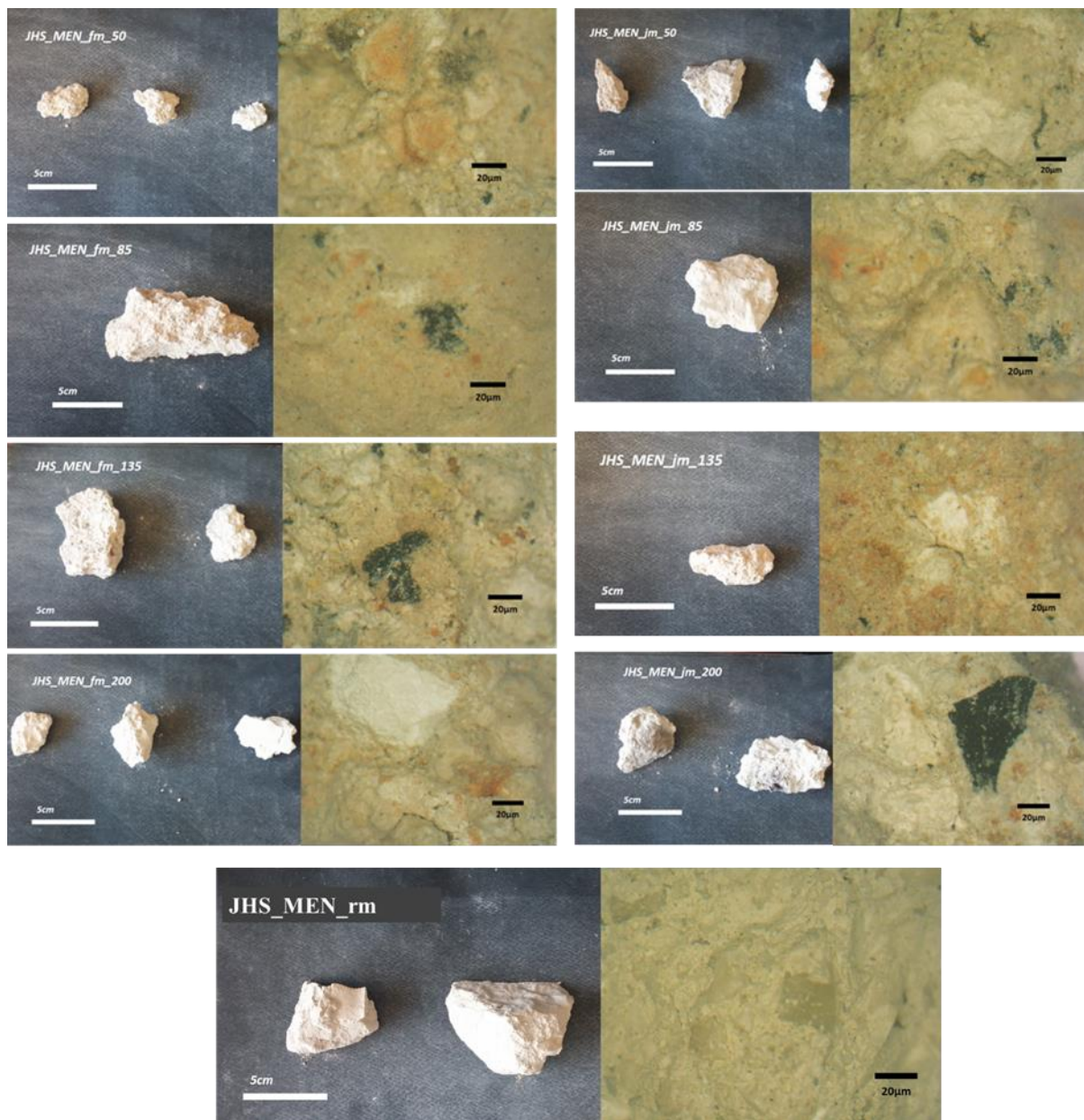


Εικόνα 29 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S5

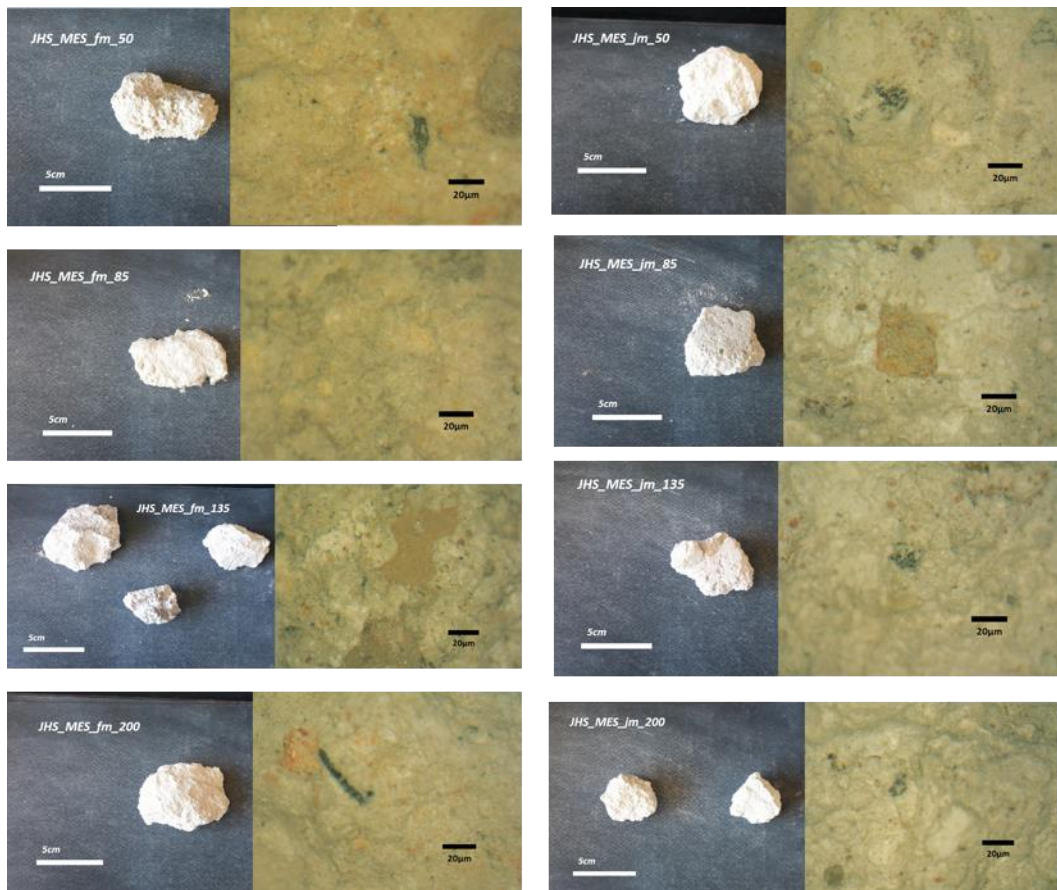
Δοτική Όψη



Εικόνα 30 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος S5

Ανατολική όψη

Εικόνα 31 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φατνώματος EN



Εικόνα 32 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση φαινόμετος ES

Παρουσίαση Κανονικοποιημένων Δειγμάτων

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας επιλέχθηκαν είκοσι (20) από τα δείγματα των κονιαμάτων. Στη συνέχεια, έγινε η προσπάθεια κανονικοποίησης του σχήματος αυτών των δειγμάτων, δηλαδή τα δείγματα αυτά κόπηκαν σε κυβικό σχήμα. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν τα δείγματα αυτά είναι:

1. Εάν υπήρχε επαρκής ποσότητα κονιάματος η οποία να μπορεί να κοπεί σε κυβικό σχήμα
2. Η θέση του κονιάματος στο μνημείο
3. Η διαφοροποίηση του κονιάματος με βάση τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις και τις παρατηρήσεις από τη ψηφιακή μικροσκοπία οπτικών ινών

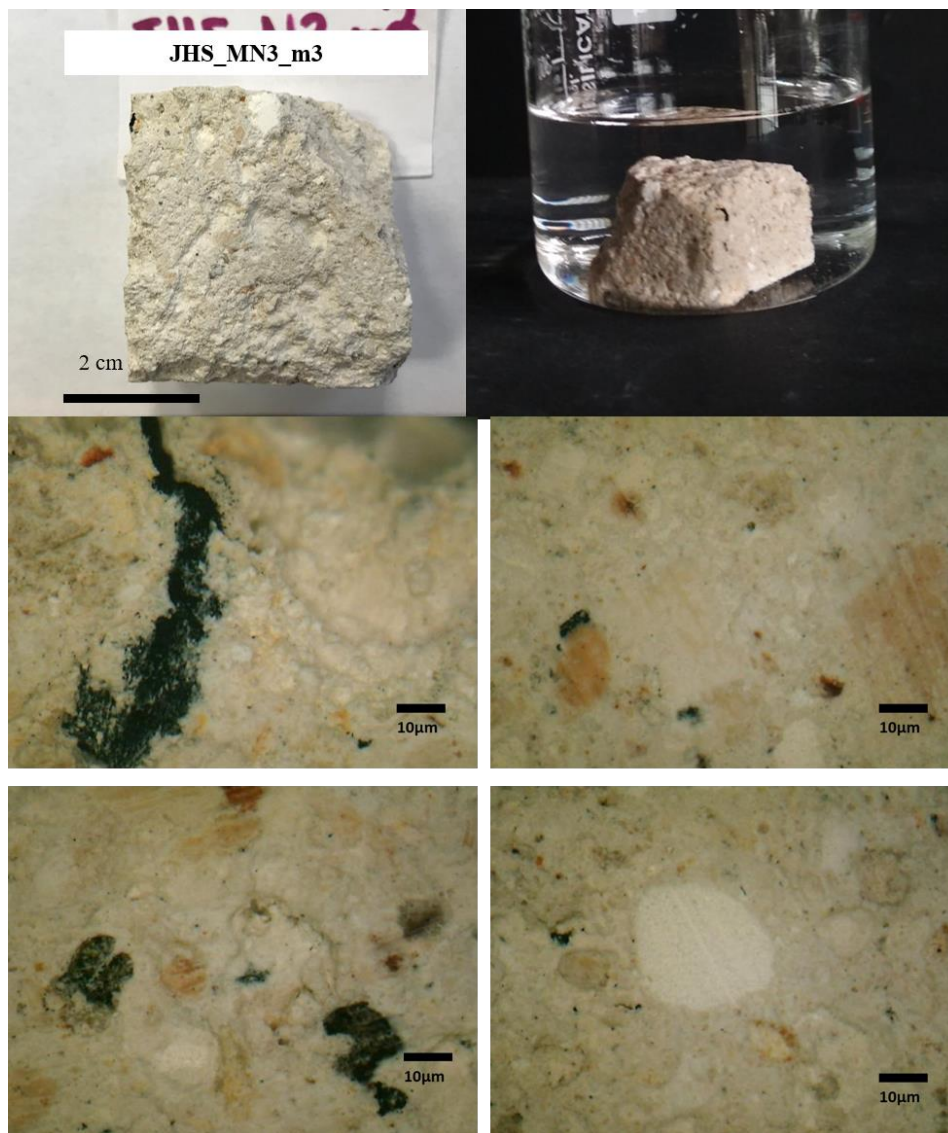
Μετά την κανονικοποίηση και τη φωτογράφιση των δειγμάτων αυτών, έλαβε χώρα πιο ενδελεχής εξέταση μέσω ψηφιακής μικροσκοπίας, ενώ εμποτίστηκαν και σε απιονισμένο νερό για την καλύτερη παρατήρησή τους. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δείγματα αυτά.

Πίνακας 6 Κανονικοποιημένα Δείγματα

Βόρεια όψη	Νότια όψη	Δυτική όψη	Ανατολική όψη
JHS_MN3_m3	JHS_MS1_fm_130	JHS_MW_fm_80	JHS_MEN_fm_80
JHS_MN5_jm_85	JHS_MS1_fm_200	JHS_MW_fm_130	JHS_MEN_jm_80
JHS_MN5_jm_200	JHS_MS2_jm_280	JHS_MW_jm_80	JHS_MEN_jm_200
	JHS_MS3_jm_80		JHS_MES_jm_50
	JHS_MS3_jm_135		JHS_MES_jm_80
	JHS_MS3_jm_200		
	JHS_MS4_jm_280		
	JHS_MS5_jm_200		
	JHS_MS5_jm_285		

Βόρεια Όψη

JHS_MN3_m3

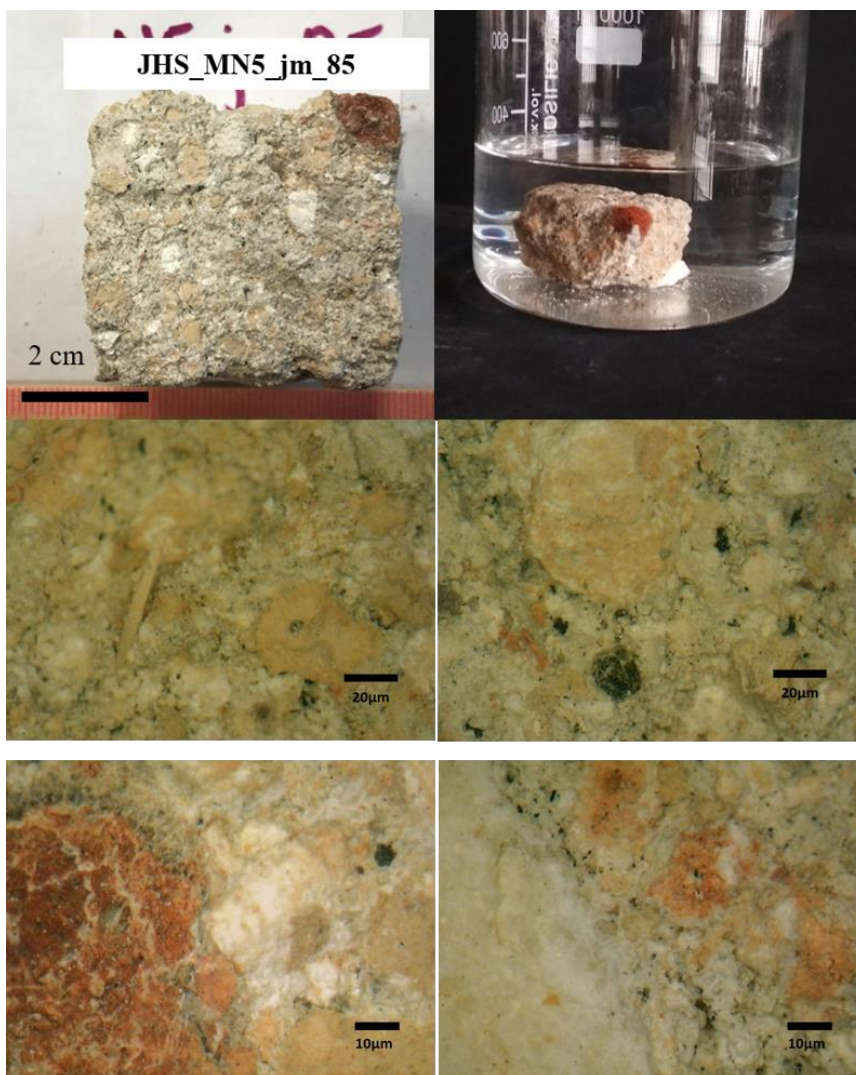


Εικόνα 33 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MN3_m3

Πρόκειται για λευκό κονίαμα αρμού που εμφανίζει ελάχιστα αδρανή. Το κονίαμα είναι σχετικά συνεκτικό. Από τις μικροσκοπία παρατηρείται ότι τα αδρανή που έχει έχουν οξειδωθεί, εμφανίζουν ανοιχτό πορτοκαλί χρώμα, εμφανίζονται κάποιες ενδείξεις κάρβουνου στη δομή του και υπάρχουν και κάποια συσσωματώματα κονιάς στο εσωτερικό του.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3,5cm x 3,5cm x 2,5cm

JHS_MN5_jm_85

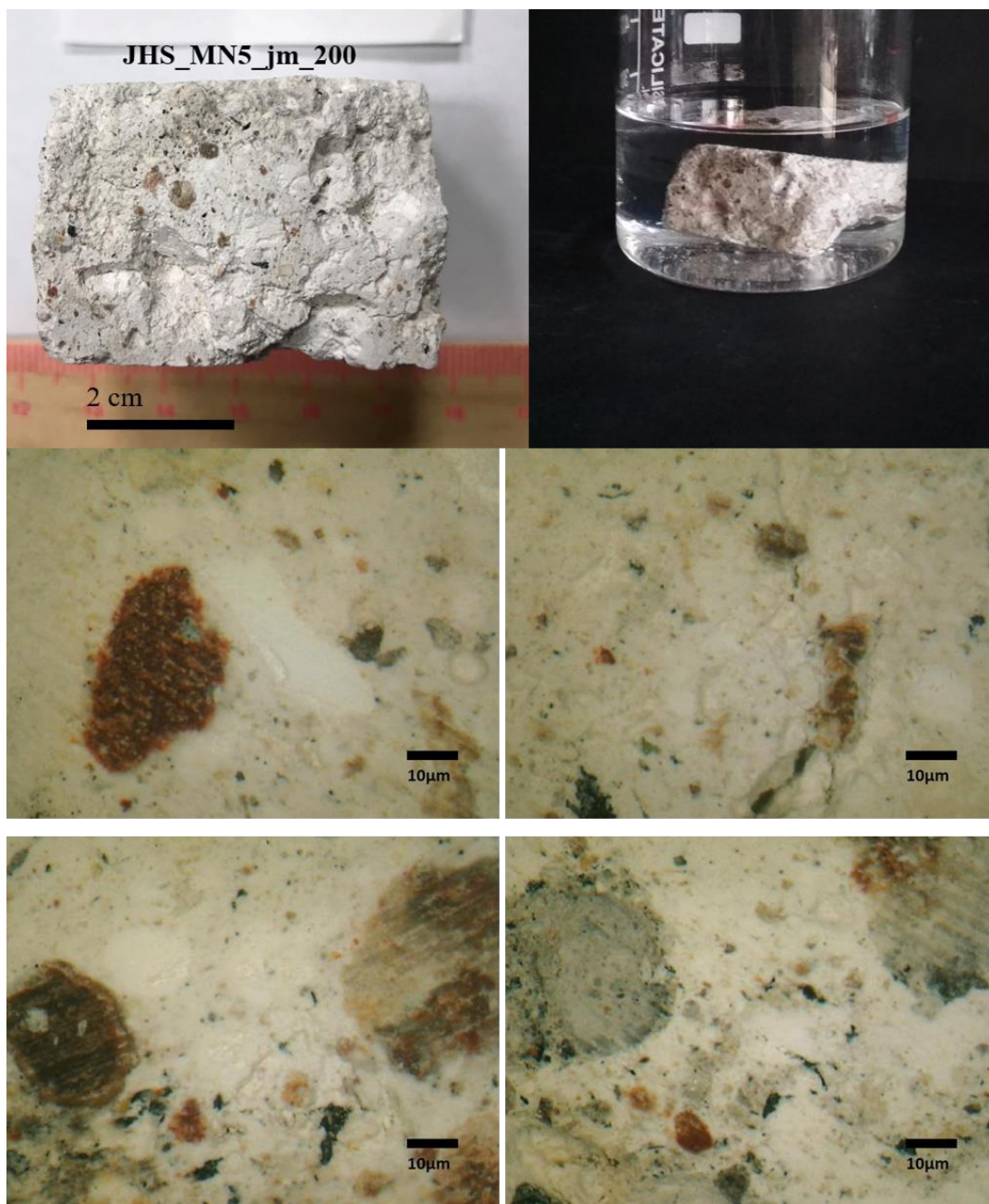


Εικόνα 34 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MN5_jm_85

Το συγκεκριμένο κονίαμα αρμού εμφανίζει πάρα πολλά ανοιχτόχρωμα αδρανή. Εμφανίζει συσσωματώματα ασβέστη, ενώ παρατηρείται και ένα μεγάλο μεγέθους κεραμικό, αρκετά εύθρυπτο. Πρόκειται για κονίαμα μπεζ χρώματος το οποίο εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά με το κονίαμα JHS_MS1_fm_130, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, με τη διαφορά ότι το δεύτερο είναι πιο συνεκτικό. Το κονίαμα αυτό είναι αρκετά εύθρυπτο. Μέσω της μικροσκοπίας παρατηρείται ότι υπάρχουν μικρά σωματίδια κάρβουνου και κεραμικά.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 3cm x 2,5cm

JHS_MN5_jm_200



Εικόνα 35 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MN5_jm_200

Πρόκειται για κονίαμα αρμού που εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά με το δείγμα JHS_MES_jm_80, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, με τη διαφορά ότι έχει περισσότερες ρηγματώσεις. Το κονίαμα περιέχει ένα μεγάλο μαύρο αδρανές και παρατηρούνται λιγότερα κόκκινα αδρανή. Κατά τη μικροσκοπική μελέτη παρατηρούνται πολλά αδρανή διάφορων χρωμάτων και μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται αρκετά καφέ-ερυθρά αδρανή τα οποία είτε πρόκειται για λίθο slayeb είτε για οξειδωμένα αδρανή. Ακόμη, παρατηρούνται και αδρανή γκριζου και μαύρου χρώματος, όπως επίσης και συσσωματώματα κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 2,5cm x 4cm x 3cm

Νότια Όψη

JHS_MS1_fm_130

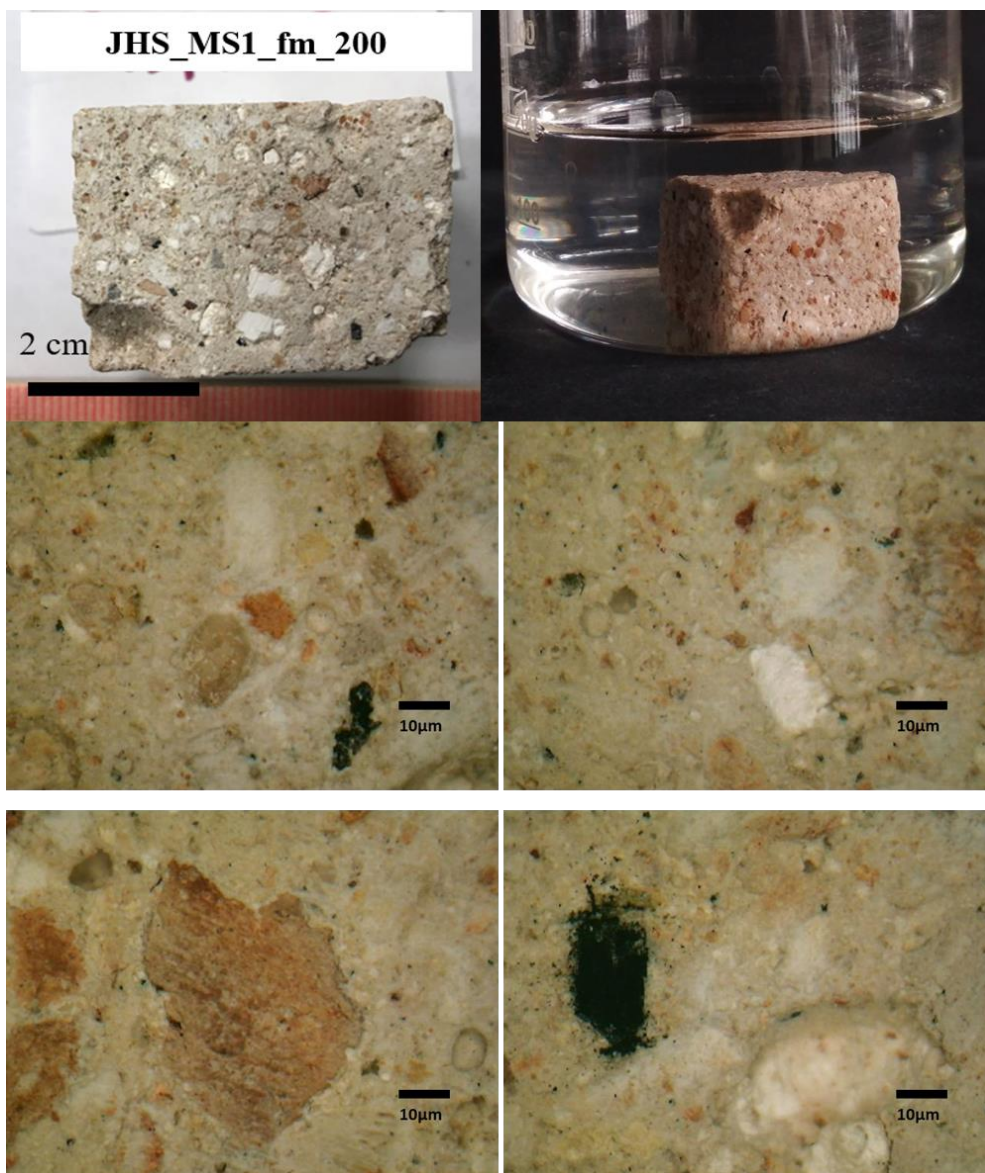


Εικόνα 36 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS1_fm_130

Πρόκειται για κονίαμα συμπλήρωσης μεζ ανοιχτού χρώματος με μεγάλα συσσωματώματα κονιάς, κάποια σωματίδια κάρβουνου και πάρα πολλά πορτοκαλί κεραμικά. Περιέχεται ένα ευμεγέθης πορτοκαλί αδρανές. Ακόμη, παρατηρείται απώλεια συνάφειας μεταξύ των αδρανών και της κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2cm x 2,5cm

JHS_MS1_fm_200

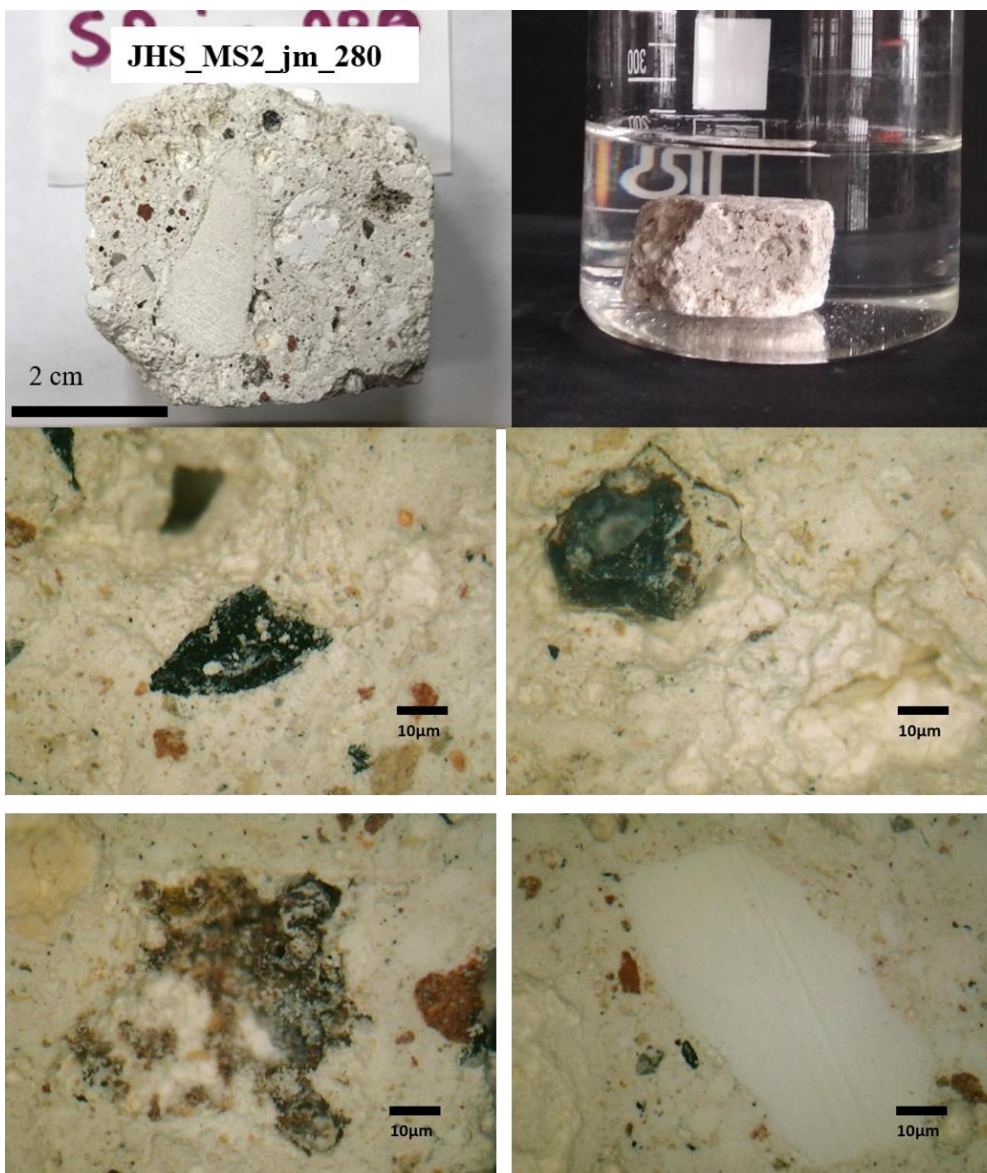


Εικόνα 37 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS1_fm_200

Πρόκειται για κονίαμα συμπλήρωσης που έχει εξαιρετική συνεκτικότητα και πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και κονιάς. Περιέχει πολλούς πορτοκαλί λίθους, και κεραμικά όπως επίσης και πολλά συσσωματώματα κονιάς ή γύψινα αδρανή. Ακόμη, περιέχονται και σωματίδια κάρβουνου ή και μαύρα αδρανή. Το κονίαμα αυτό είναι πιο μπεζ (όμοιο χρώμα με το κονίαμα JHS_MS1_fm_130). Τα δύο αυτά κονιάματα εμφανίζουν πολλές ομοιότητες, αλλά το JHS_MS1_fm_130 έχει αποσαθρωθεί εμφανώς πολύ περισσότερο. Με την ψηφιακή μικροσκοπία παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετά αδρανή τα οποία έχουν οξειδωθεί.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3,2cm x 2,5cm x 2cm

JHS_MS2_jm_280

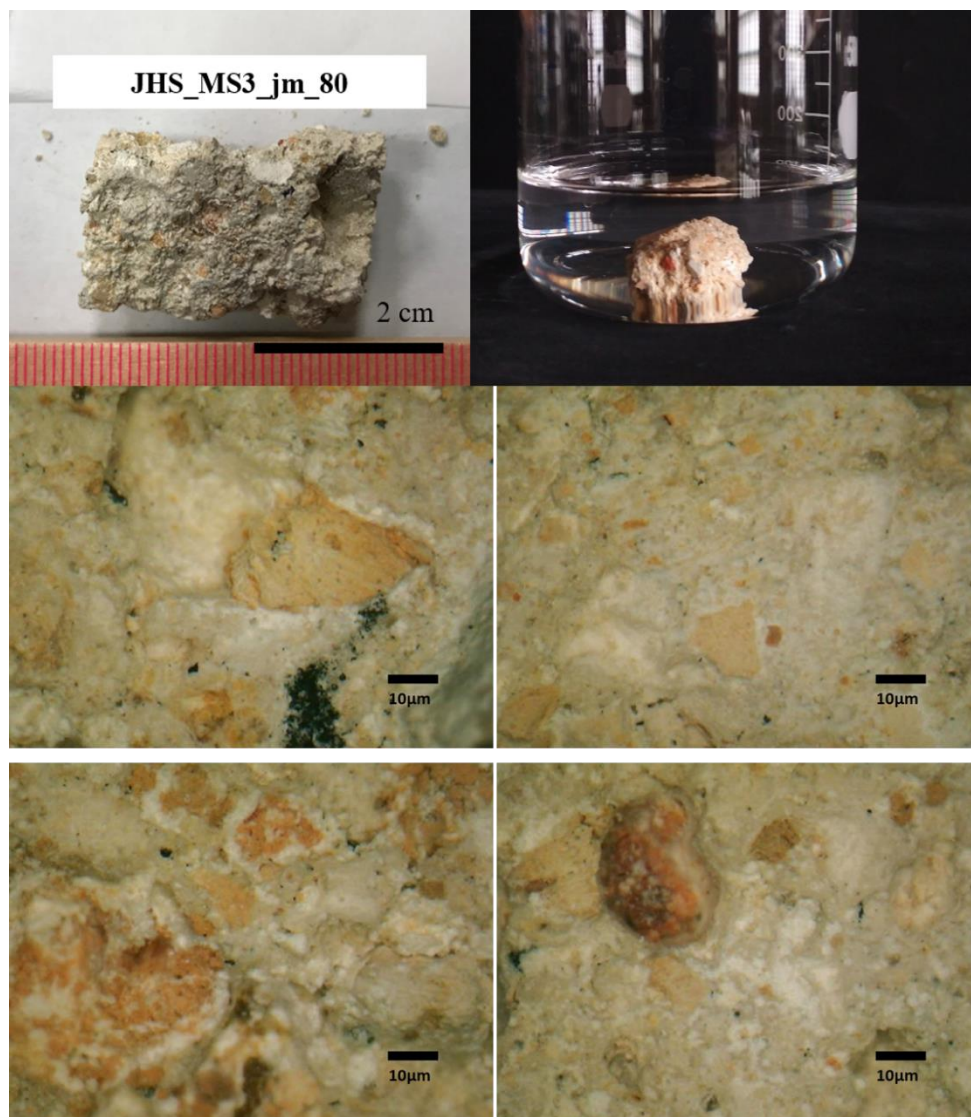


Εικόνα 38 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS2_jm_280

Πρόκειται για κονίαμα αρμολόγησης λευκού χρώματος. Τα πιο σκούρα μπορντό αντικείμενα μάλλον πρόκειται για λίθο είτε slayeb είτε οξειδωμένα αδρανή, ενώ εμφανίζονται και αδρανή καφέ-μαύρου χρωματισμού. Εμφανίζονται συσσωματώματα κονιάς και μάλλον ένα γύψου. Υπάρχουν και κάποια μεγάλα ασβεστιτικά αδρανή. Είναι σχετικά συνεκτικό και εμφανίζει πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και της κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3,5cm x 2cm x 2cm

JHS_MS3_jm_80

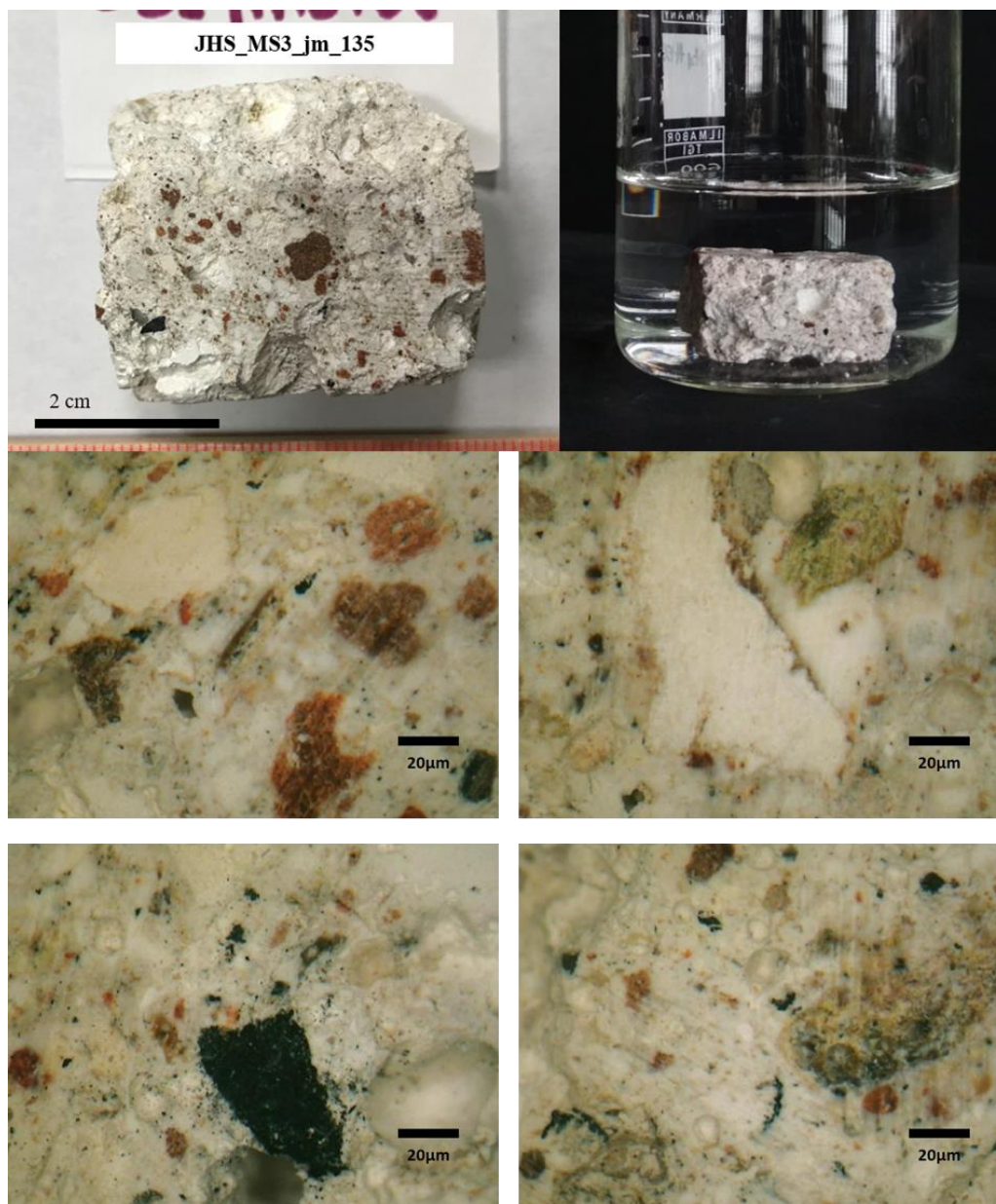


Εικόνα 39 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS3_jm_80

Πρόκειται για ένα κονίαμα αρμού μπεζ απόχρωσης με πολλά κεραμικά, πιο μικρά όμως του δείγματος JHS_MN5_jm_85. Πρόκειται για πάρα πολύ εύθρυπτο κονίαμα. Εκτός των κεραμικών εμφανίζονται και αδρανή από ερυθρό, πορτοκαλί και μπεζ λίθο. Ακόμη εμφανίζονται και σωματίδια κάρβουνου.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3cm x 1cm x 1cm

JHS_MS3_jm_135

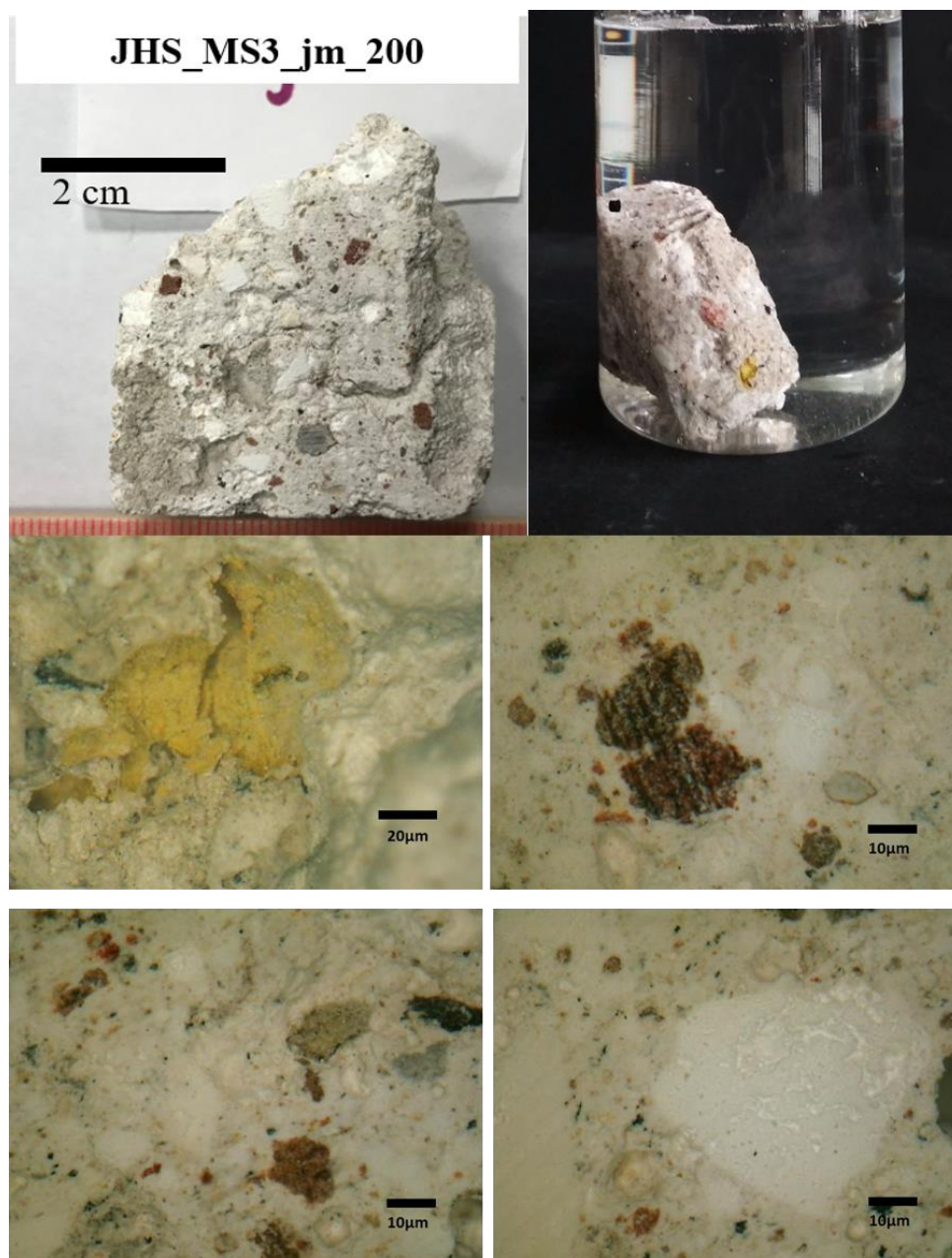


Εικόνα 40 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS3_jm_135

Πρόκειται για κονίαμα αρμολόγησης λευκού χρώματος. Στο εσωτερικό του παρουσιάζεται μία ποικιλομορφία σε αδρανή τόσο σε χρώμα όσο σε μέγεθος. Τα αδρανή εμφανίζονται σε ερυθρό, κίτρινο μαύρο, πράσινο και λευκό χρώμα. Κάποια από τα λευκά αντικείμενα που παρατηρούνται πρέπει να είναι είτε συσσωματώματα κονίας είτε αδρανή γύψου. Ακόμη, μέσα στη δομή του κονιάματος εμφανίζονται και σωματίδια κάρβουνου. Παρουσιάζει καλή συνεκτικότητα.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3,5cm x 2,5cm x 2cm

JHS_MS3_jm_200

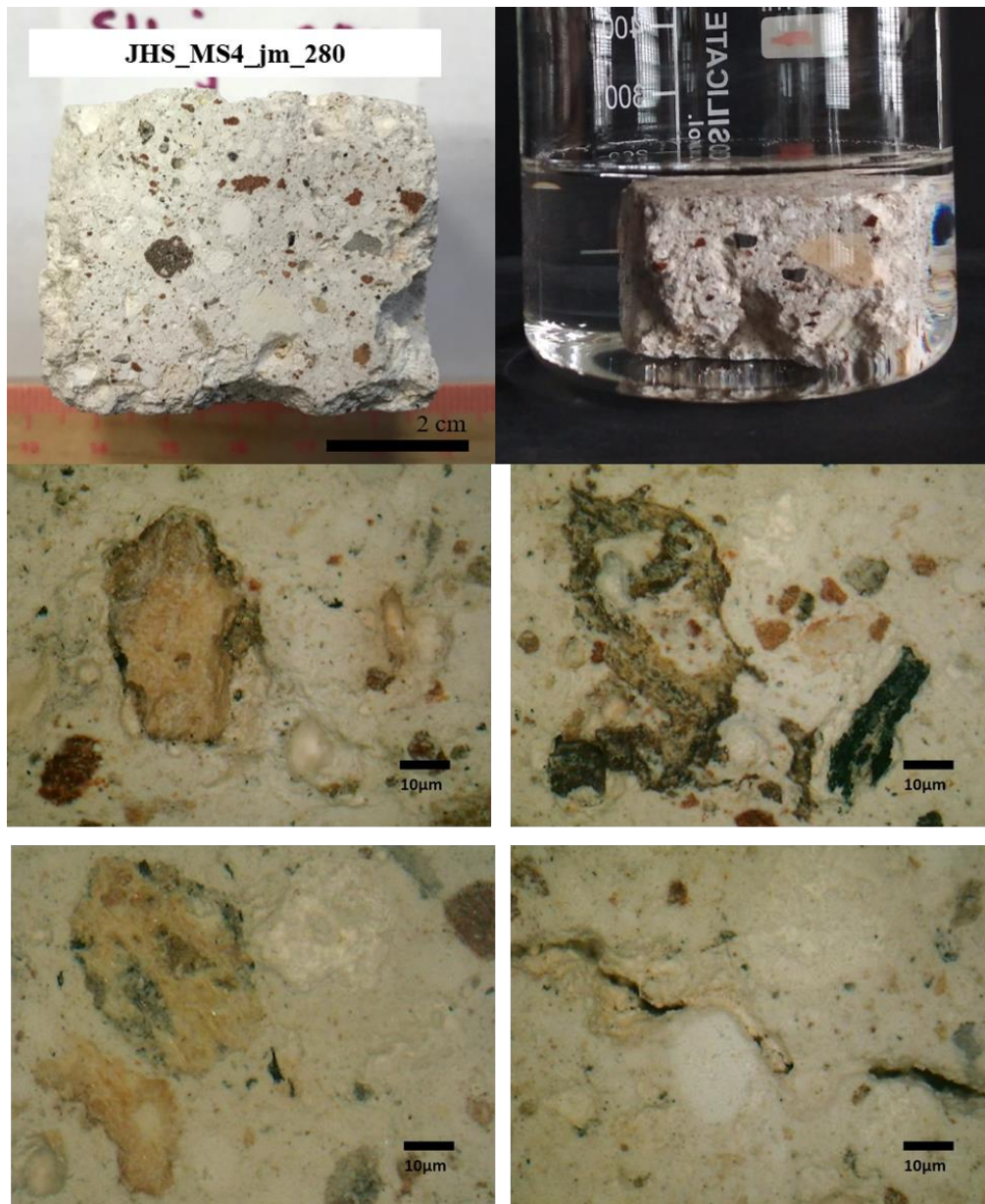


Εικόνα 41 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS3_jm_200

Πρόκειται για λευκό κονίαμα αρμού με μεγάλη συνεκτικότητα. Εμφανίζει πολλές ομοιότητες με το JHS_MS5_jm_200 που θα παρουσιαστεί παρακάτω, αλλά εμφανίζεται ένα κίτρινο ορυκτό. Το κονίαμα περιέχει κόκκινα προς μπορντό κεραμικά. Τα πιο σκούρα μπορντό αντικείμενα μάλλον πρόκειται για λίθο είτε slayeb είτε οξειδωμένα αδρανή. Ακόμη, σε κάποια αδρανή εμφανίζεται κάποιου είδους κρούστας στο εξωτερικό τους, μάλλον λόγω οξείδωσης. Εκτός από αυτά υπάρχουν γκρίζου και λευκά αδρανή. Κάποια από τα λευκά αντικείμενα, ειδικά τα μεγαλύτερα πρέπει να είναι συσσωματώματα κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 2cm x 2cm x 3,5cm

JHS_MS4_jm_280

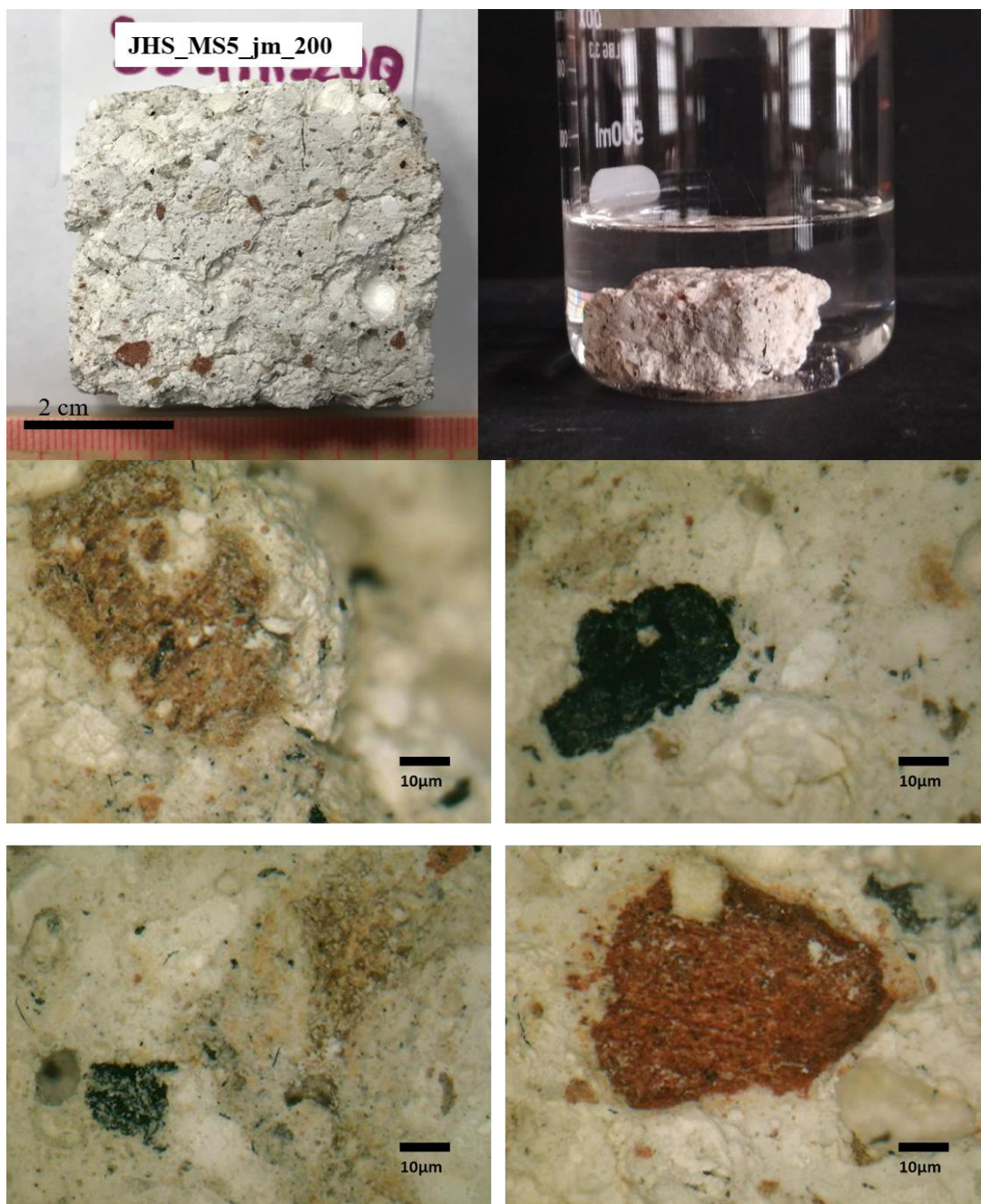


Εικόνα 42 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS4_jm_280

Πρόκειται για λευκό κονίαμα αρμού. Στο εσωτερικό του παρουσιάζεται μία ποικιλομορφία σε αδρανή τόσο σε χρώμα όσο σε μέγεθος. Τα αδρανή εμφανίζονται σε ερυθρό, κίτρινο μαύρο, πράσινο και λευκό χρώμα. Παρουσιάζει μεγάλη συνεκτικότητα και πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και της κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 4cm x 3cm

JHS_MS5_jm_200

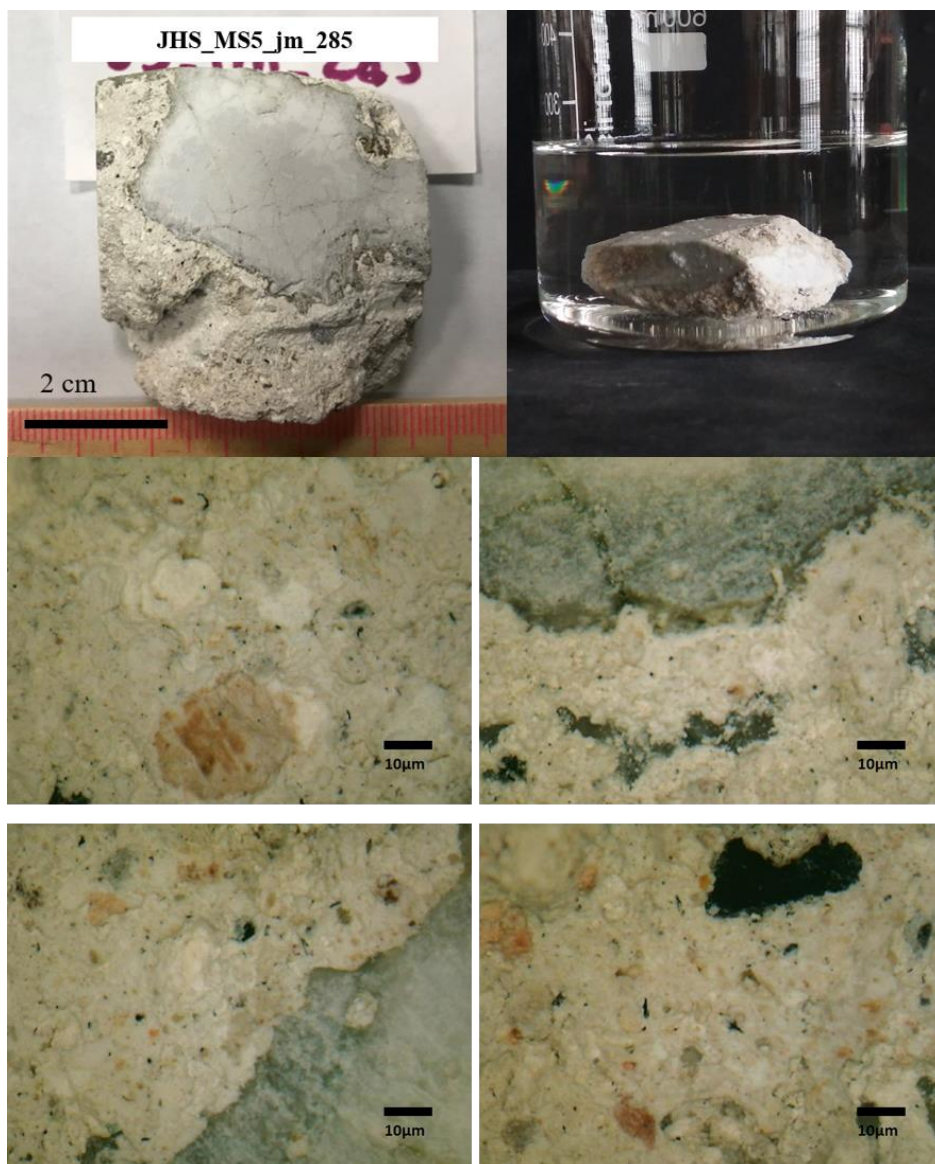


Εικόνα 43 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS5_jm_200

Πρόκειται για λευκό κονίαμα αρμού με μεγάλη συνεκτικότητα. Περιέχει κόκκινα – καφέ αδρανή, που μάλλον πρόκειται για λίθο είτε slayeb είτε οξειδωμένα αδρανή, λευκά, μαύρα και μπεζ. Μέσω της ψηφιακής μικροσκοπίας παρατηρούνται συσσωματώματα κονιάς τα οποία έχουν ρωγμές. Επίσης, εμφανίζονται σωματίδια κάρβουνου.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2cm x 2cm

JHS_MS5_jm_285



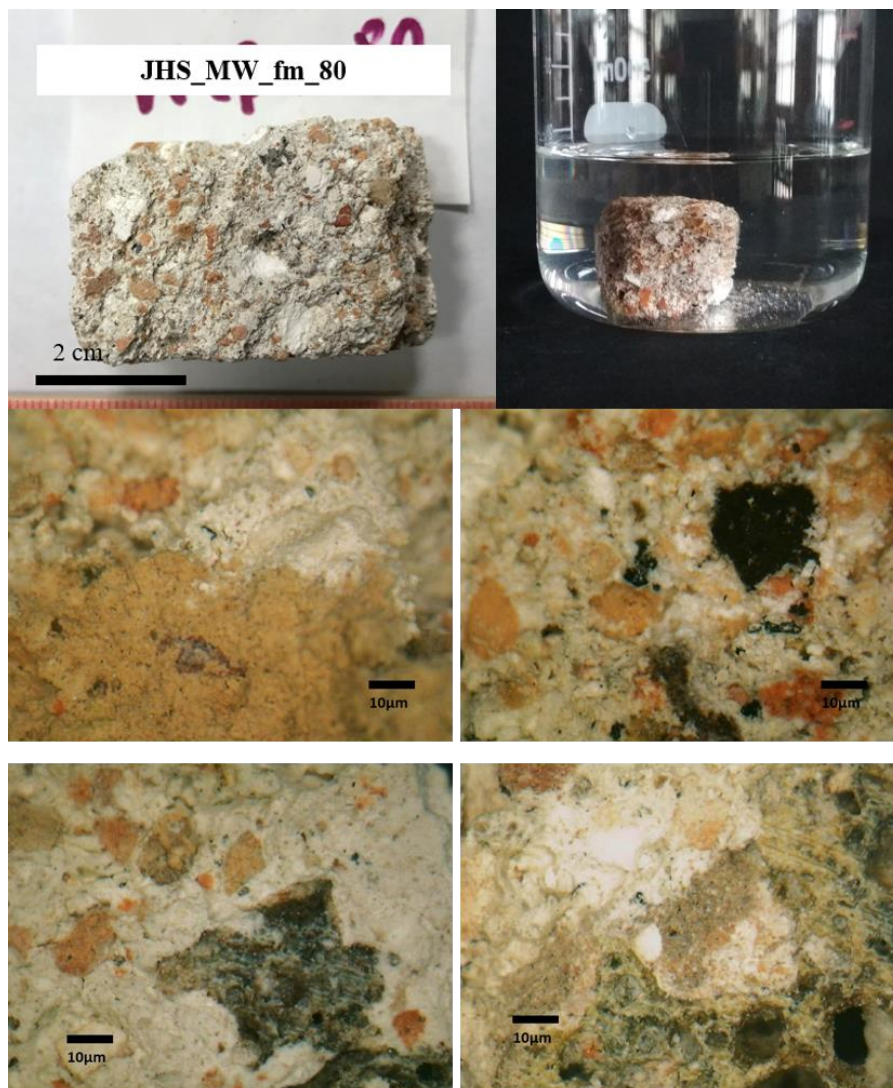
Εικόνα 44 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MS5_jm_285

Πρόκειται για λευκό κονίαμα αρμού το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο λευκό προς γκρίζο μαρμαροειδές αδρανές και εμφανίζονται ελάχιστα κυρίως μαύρα και μπλε αδρανή. Πρέπει να έχει διαβρωθεί το μάρμαρο στη διεπιφάνειά του με το υπόλοιπο κονίαμα. Εμφανίζονται στο εσωτερικό του σωματίδια κάρβουνου και συσσωματώματα κονιάς. Πιθανώς να περιέχεται άχυρο.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 4cm x 2cm

Δοτική Όψη

JHS_MW_fm_80

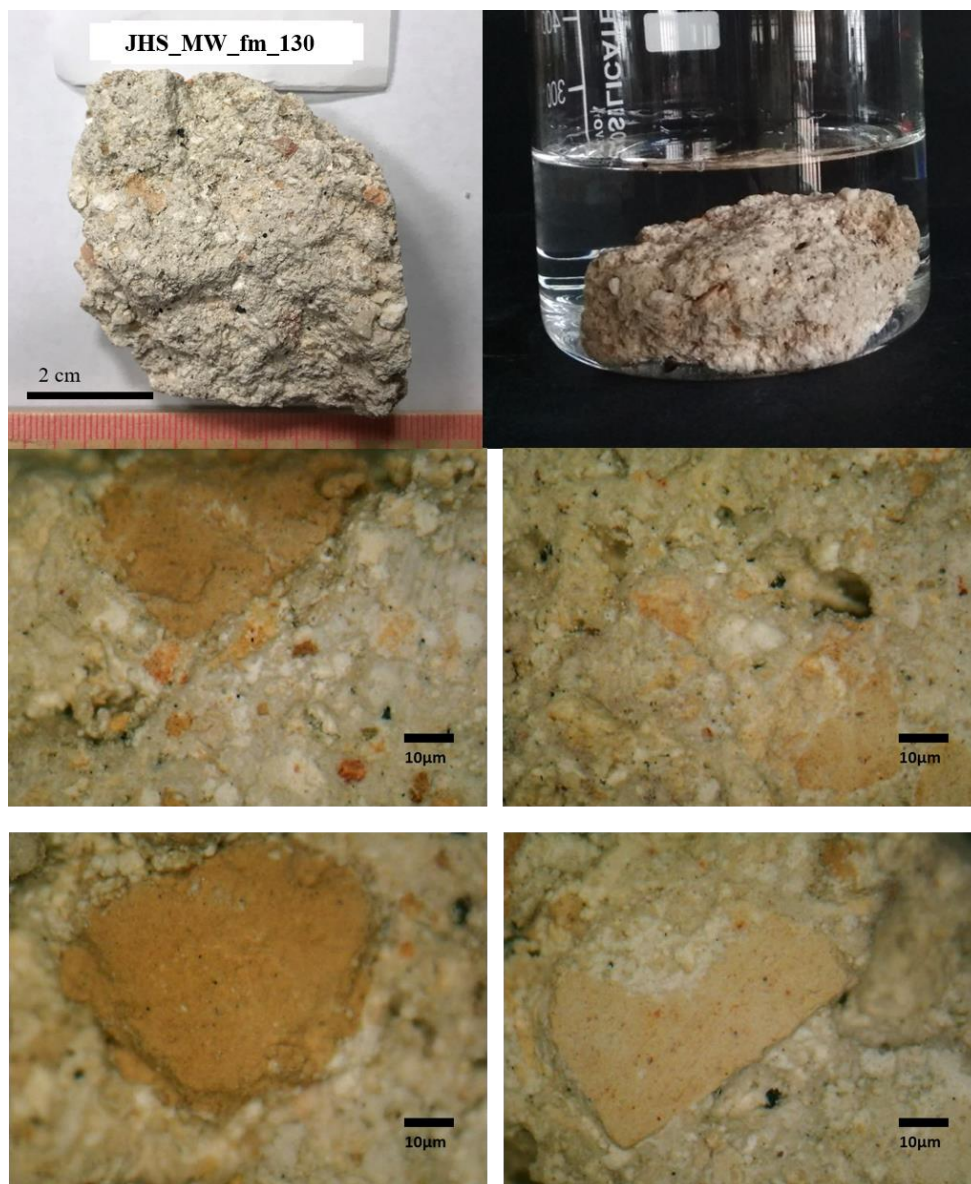


Εικόνα 45 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MW_fm_80

Πρόκειται για κονίαμα συμπλήρωσης μεζ απόχρωσης το οποίο εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά με το κονίαμα JHS_MS1_fm_130. Περιέχει αδρανές που μοιάζει με ελαφρόπετρα, όπως επίσης και πολλά πορτοκαλί κεραμικά. Έχει μέτρια προς κακή συνοχή και εμφανίζει απώλεια συνάφειας. Από τη διαδικασία της ψηφιακής μικροσκοπίας παρατηρείται ένα μεγάλο πορώδες αδρανές πράσινου χρώματος. Μέσα στη δομή του δείγματος παρουσιάζονται και σωματίδια κάρβουνου, αδρανή διάφορων χρωμάτων (μεζ, γκρίζα, λευκά κτλ.), όπως επίσης και συσσωματώματα κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2cm x 2,5cm

JHS_MW_fm_130

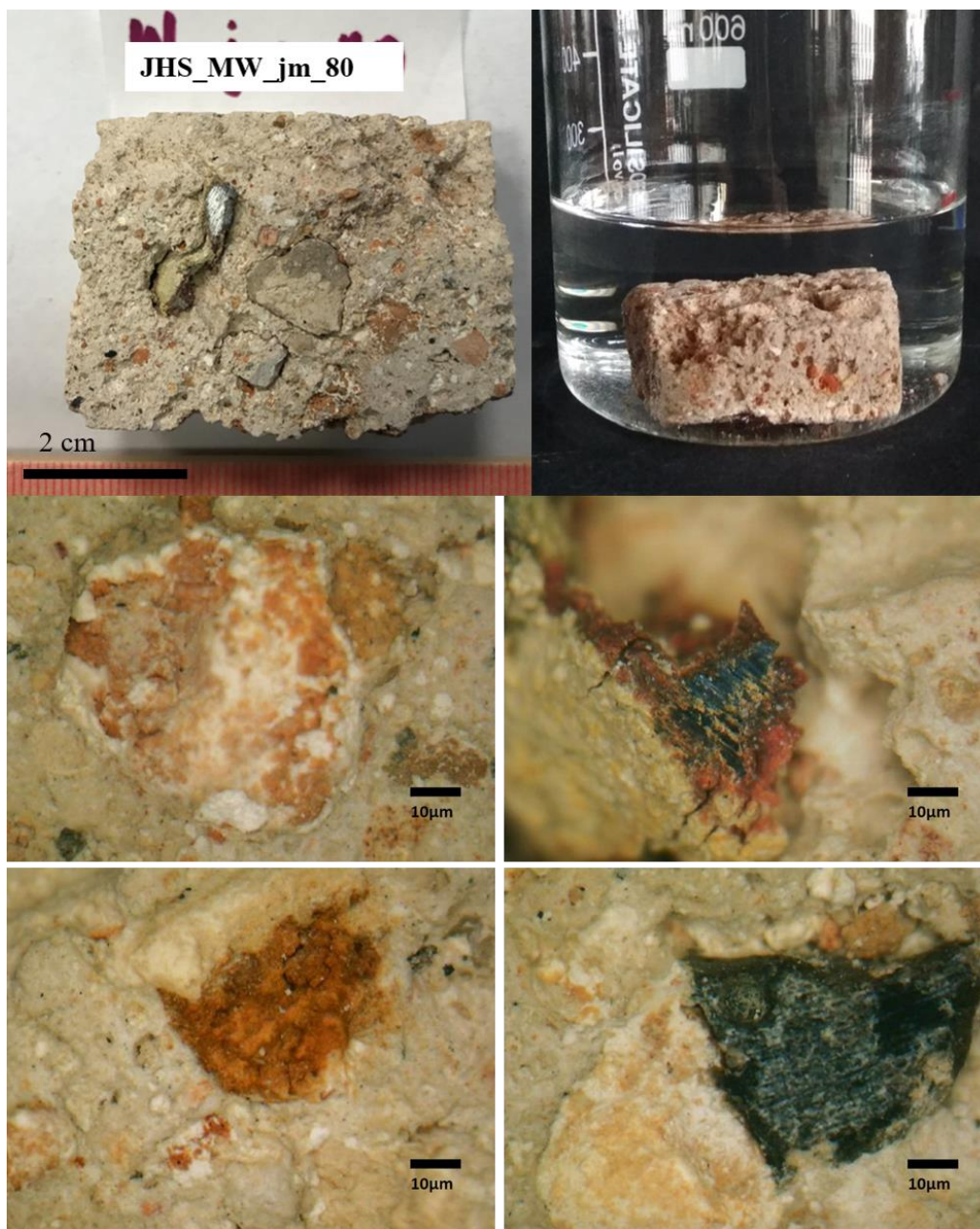


Εικόνα 46 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MW_fm_130

Πρόκειται για μπεζ κονίαμα συμπλήρωσης που εμφανίζει αρκετά όμοια χαρακτηριστικά με το κονίαμα JHS_MS1_fm_130. Είναι σχετικά συνεκτικό και έχει πολλά κεραμικά, τα οποία έχουν ανοιχτή πορτοκαλί απόχρωση και εμφανίζονται πολύ εύθρυπτα. Εμφανίζει σωματίδια κάρβουνου, συσσωματώματα κονιάς, όπως επίσης και αδρανή από λίθο slayeb.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 5cm x 5cm x 2cm

JHS_MW_jm_80



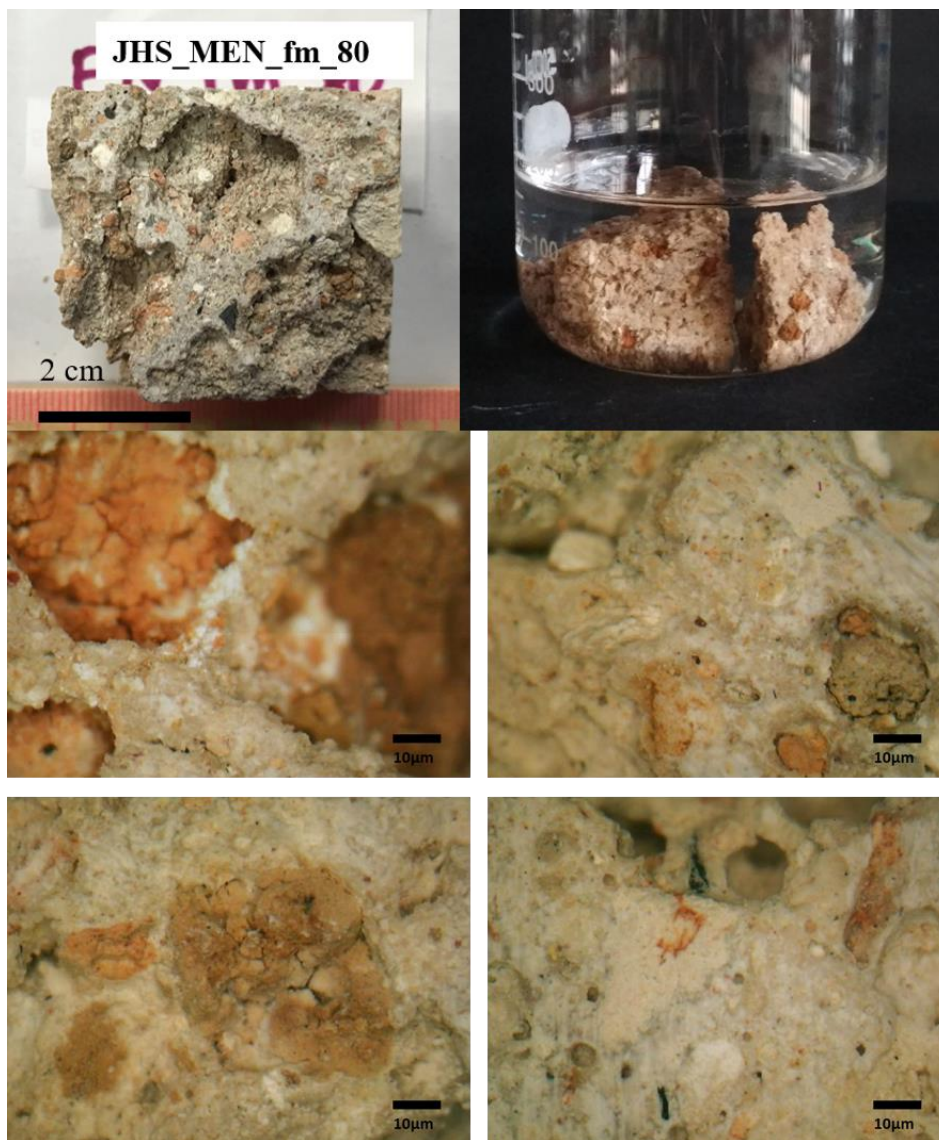
Εικόνα 47 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MW_jm_80

Το συγκεκριμένο κονίαμα αρμού παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το JHS_MS1_fm_200, με τη διαφορά ότι αυτό το κονίαμα εμφανίζει μεγαλύτερα πορτοκαλί κεραμικά. Παρουσιάζονται μεγάλα αδρανή, ένα από τα οποία πιθανώς να πρόκειται για γύψο, ένα για μάρμαρο και ένα άλλο είναι μπλε απόχρωσης. Παρατηρούνται ευμεγέθη εγκλείσματα μετάλλου (ασημί απόχρωση), ένα από τα οποία φαίνεται να είναι τοποθετημένο πάνω σε ξύλο. Στο κονίαμα περιέχονται πορτοκαλί λίθοι. Επίσης, είναι σχετικά συνεκτικό με μέτρια πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4,5cm x 3cm x 2cm

Ανατολική Όψη

JHS_MEN_fm_80



Εικόνα 48 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MEN_fm_80

Το κονίαμα συμπλήρωσης αυτό περιέχει πορτοκαλί αδρανή, πολλά σωματίδια κάρβουνου και μπορντό αδρανή. Επιπλέον, παρατηρείται ένα κομμάτι μαρμάρου και ίσως υπάρχει μεταλλικό έγκλεισμα. Το κονίαμα έχει μπεζ χρώμα. Το δείγμα έχει πολλές ρωγμές και κενά όπως επίσης είναι εύθρυπτο με κακή πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και κονιάς σε τέτοιο βαθμό που το κομμάτι έσπασε σε δύο μέρη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ακόμη εμφανίζονται και σημεία οξείδωσης στα αδρανή του.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 3cm x 3cm

JHS_MEN_jm_80

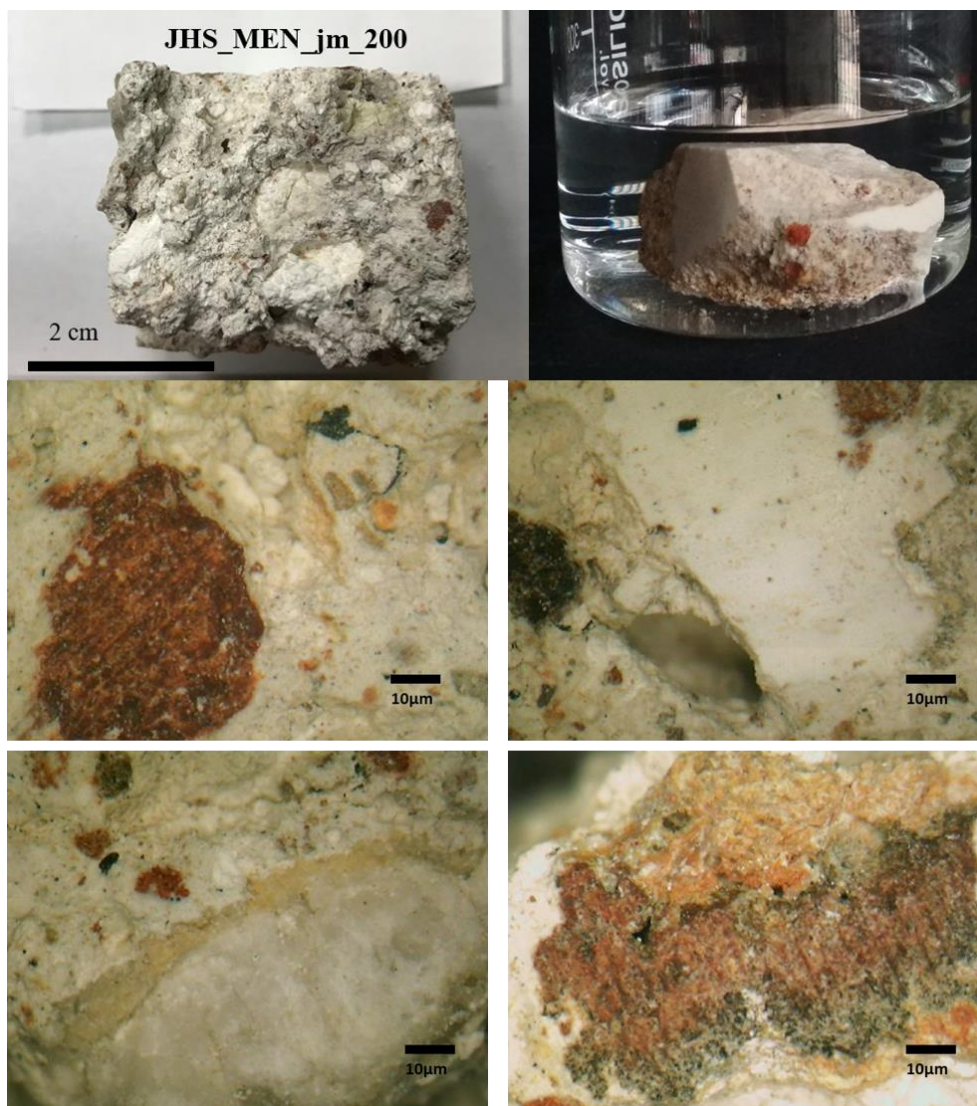


Εικόνα 49 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MEN_jm_80

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού το οποίο αποτελείται κυρίως από συμπαγή λίθο που πιθανός είναι μάρμαρο. Παρουσιάζει ομοιότητες με το δείγμα JHS_MS1_fm_130. Στο εσωτερικό του υπάρχουν κεραμικά, συσσωματώματα κονίας και αδρανή σκούρων και ανοιχτών χρωμάτων. Στη διεπιφάνεια του κονιάματος με το μεγάλο μαρμάρινο αδρανές δίνεται η εντύπωση της διάχυσης των οξειδίων από το αδρανές στη κονία.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2,5cm x 2,5cm

JHS_MEN_jm_200

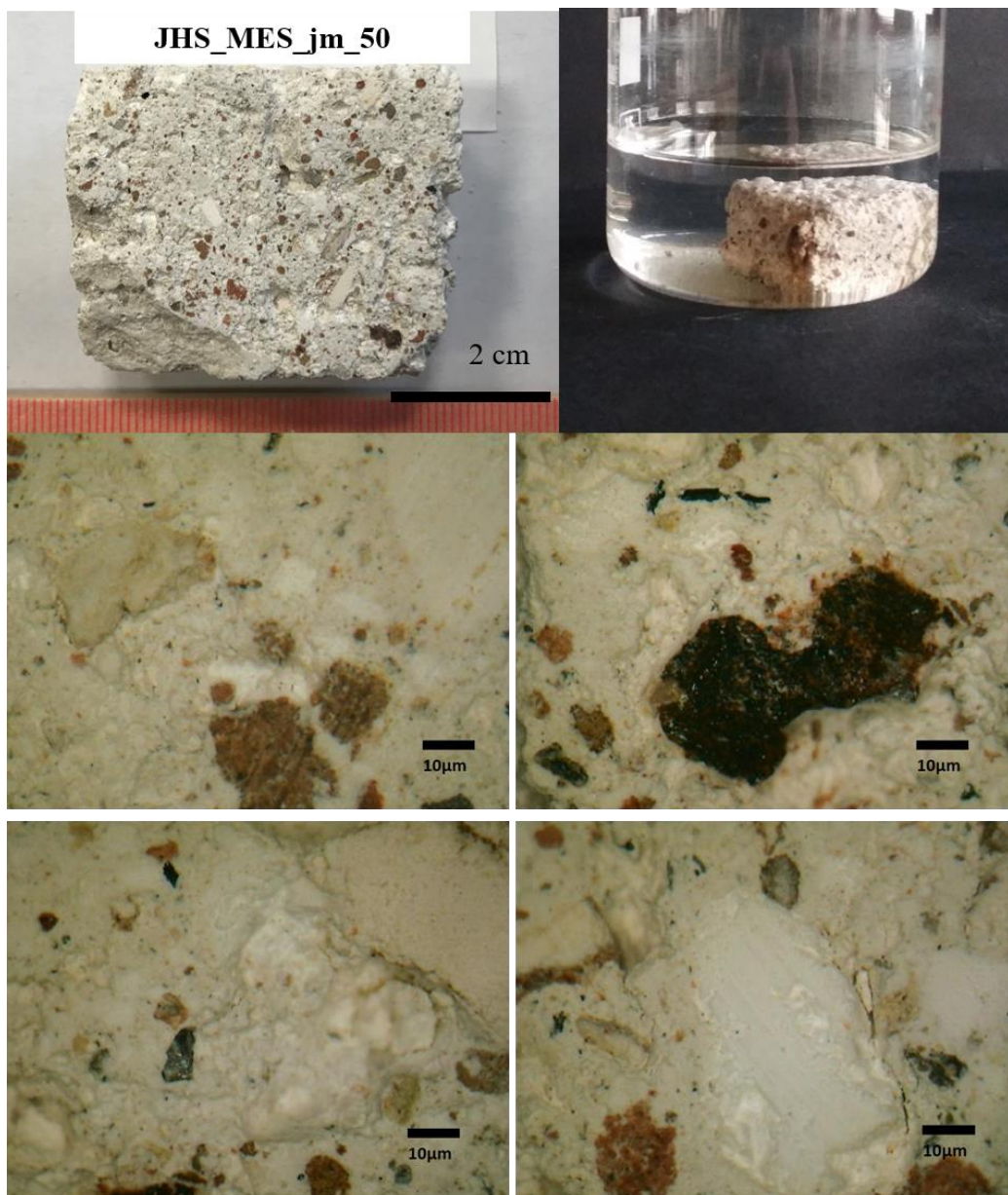


Εικόνα 50 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MEN_jm_200

Πρόκειται για κονίαμα αρμού λευκού χρώματος. Το κονίαμα περιέχει κόκκινα προς μπορντό κεραμικά. Τα πιο σκούρα μπορντό αντικείμενα μάλλον πρόκειται για λίθο. Τα αδρανή που έχει είναι σαν μέταλλο, δηλαδή καφέ-μαύρου χρώματος σαν μπρούντζο ή χαλκό όπου μάλλον πρόκειται για έντονα οξειδωμένα αδρανή ή λίθο slayeb. Ακόμη, το κονίαμα περιέχει κάτασπρα αδρανή μεγάλου μεγέθους ένα από τα οποία μάλλον είναι μάρμαρο. Εμφανίζονται συσσωματώματα κονιάς και μάλλον είναι γύψου. Στο εσωτερικό του εμφανίζονται και σωματίδια κάρβουνου. Είναι σχετικά συνεκτικό και εμφανίζει πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ των αδρανών και της κονιάς.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 3cm x 2,5cm x 2cm

JHS_MES_jm_50

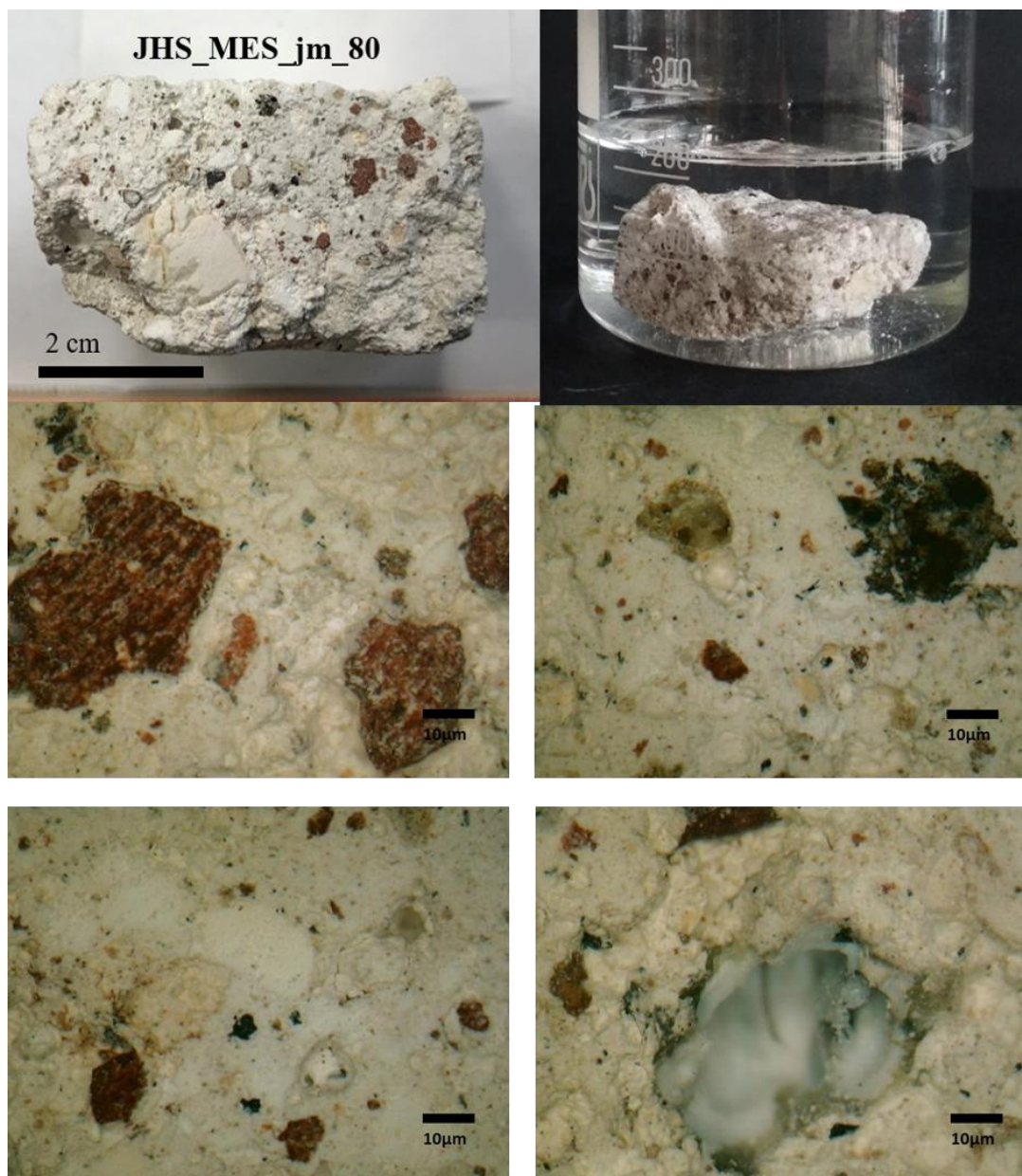


Εικόνα 51 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MES_jm_50

Πρόκειται για συνεκτικό λευκό κονίαμα αρμού το οποίο έχει όμοια χαρακτηριστικά με το κονίαμα JHS_MEN_jm_200. Εμφανίζονται μπορντό, γκρίζα, μπες αδρανή και μαύρα στοιχεία που παρομοιάζουν μέταλλο. Στο εσωτερικό του υπάρχουν σωματίδια κάρβουνου. Αρκετά από τα αδρανή του έχουν υποστεί οξείδωση.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2cm x 2cm

JHS_MES_jm_80



Εικόνα 52 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος JHS_MES_jm_80

Το κονίαμα αρμού αυτό παρουσιάζει ομοιότητες με το JHS_MEN_jm_200 με τη διαφορά ότι δεν είναι καθόλου εύθρυπτο. Το κονίαμα περιέχει λιγότερα κεραμικά, αποτελείται κυρίως από κόκκινο λίθο. Τα αδρανή που έχει είναι σαν μέταλλα, δηλαδή καφέ-μαύρου χρώματος σαν μπρούντζο ή χαλκό. Περιέχονται αρκετά συσσωματώματα κονίας και κάποια σωματίδια κάρβουνου.

Οι διαστάσεις του μετά την κοπή του είναι: 4cm x 2cm x 2cm

Σύμφωνα με της παραπάνω παρατηρήσεις τα 20 αυτά δείγματα μπορούν να χωριστούν σε ομάδες σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται μέχρι στιγμής. Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται αυτές οι ομάδες. Στη 1^η ομάδα βρίσκονται τα κονιάματα τα οποία συνήθως έχουν ανοιχτό χρώμα (λευκό ή υπόλευκο), δεν έχουν κεραμικά και τα αδρανή τους είναι κυρίως γκρίζα, μαύρα, μπεζ και ερυθρού χρώματος είτε λόγω της χρήσης λίθου slayeb είτε λόγω οξείδωσης. Σε αυτή την ομάδα εμφανίζονται συχνά σωματίδια κάρβουνου και συσσωματώματα κονιάς. Συνήθως πρόκειται για συνεκτικά κονιάματα. Στη 2^η ομάδα κατατάσσονται τα κονιάματα που έχουν μπεζ προς ερυθρό χρώμα κυρίως λόγω της ύπαρξης κεραμικών, καθώς η ποσότητά τους σε αυτή την ομάδα είναι αρκετά μεγάλη. Σε αυτά τα κονιάματα εμφανίζονται αρκετά συχνά τα συσσωματώματα κονιάς και συνήθως πρόκειται για κονιάματα χαμηλής συνεκτικότητας ή αρκετά εύθρυπτα. Στη 3^η ομάδα βρίσκονται τα κονιάματα που παρουσιάζουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά της 1^{ης} και της 2^{ης} ομάδας, δηλαδή περιέχουν και κεραμικά και κόκκινα αδρανή, όπως επίσης και άλλων ειδών αδρανή, σωματίδια κάρβουνου και συσσωματώματα κονιάς. Στη 4^η ομάδα βρίσκεται ένα κονίαμα αρμού, το οποίο δεν παρουσίαζε παρόμοια χαρακτηριστικά με τις άλλες ομάδες, ούτε μακροσκοπικά ούτε στο ψηφιακό μικροσκόπιο.

Πίνακας 7 Ομαδοποίηση Κανονικοποιημένων δειγμάτων με βάση τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους

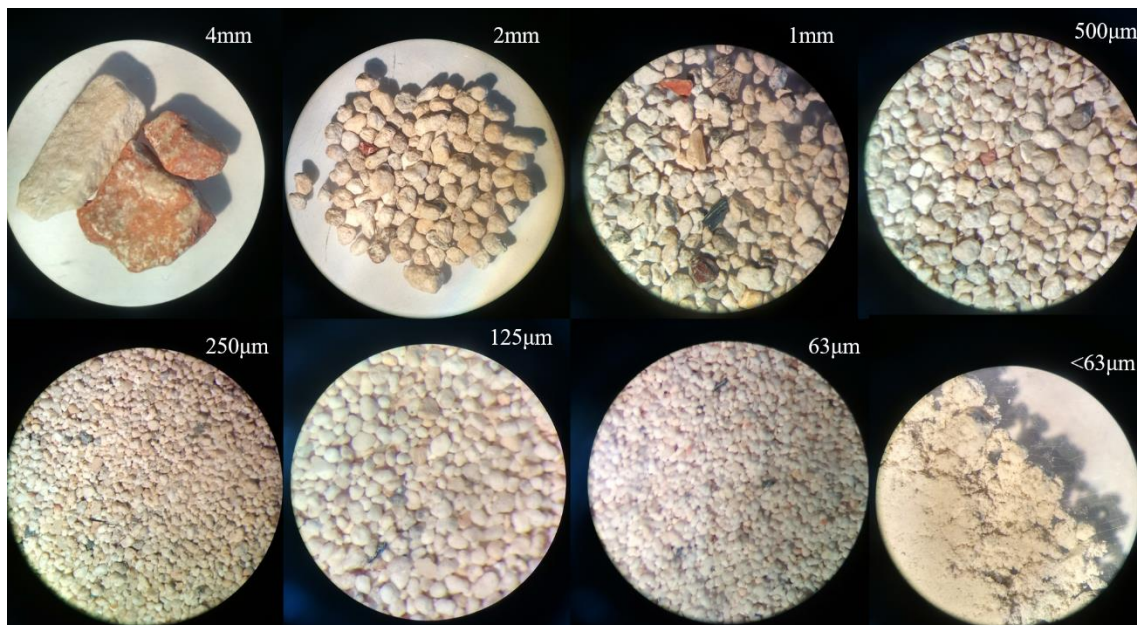
Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3	Ομάδα 4
JHS_MN5_jm_200	JHS_MN5_jm_85	JHS_MW_fm_130	JHS_MN3_m3
JHS_MS2_jm_280	JHS_MS1_fm_130	JHS_MEN_jm_80	
JHS_MS3_jm_135	JHS_MS1_fm_200		
JHS_MS3_jm_200	JHS_MS3_jm_80		
JHS_MS4_jm_280	JHS_MW_jm_80		
JHS_MS5_jm_200	JHS_MEN_fm_80		
JHS_MS5_jm_285	JHS_MEN_jm_200		
JHS_MW_fm_80			
JHS_MES_jm_50			
JHS_MES_jm_80			

4.1.2 Φυσικός Διαχωρισμός Κονίας αδρανών (Κοκκομετρική Ανάλυση)

Ο διαχωρισμός της κονίας από τα αδρανή έγινε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο πειραματικό μέρος και πραγματοποιήθηκε σε έξι δείγματα. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού εμφανίζονται παρακάτω.

Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS MN3 m3

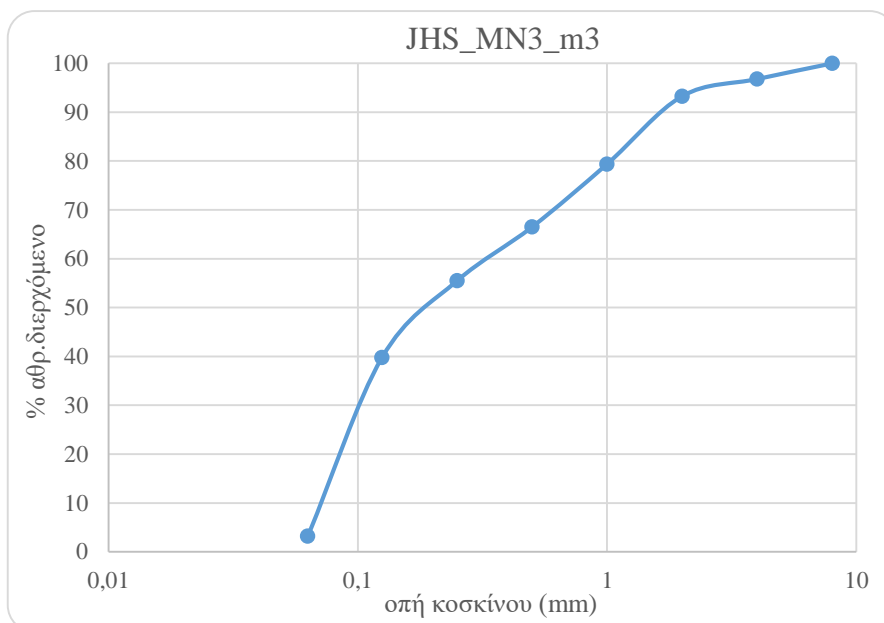
Στη παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα αδρανή και η κονία του δείγματος μετά το διαχωρισμό, όπως εμφανίζονται στο στερεοσκόπιο.



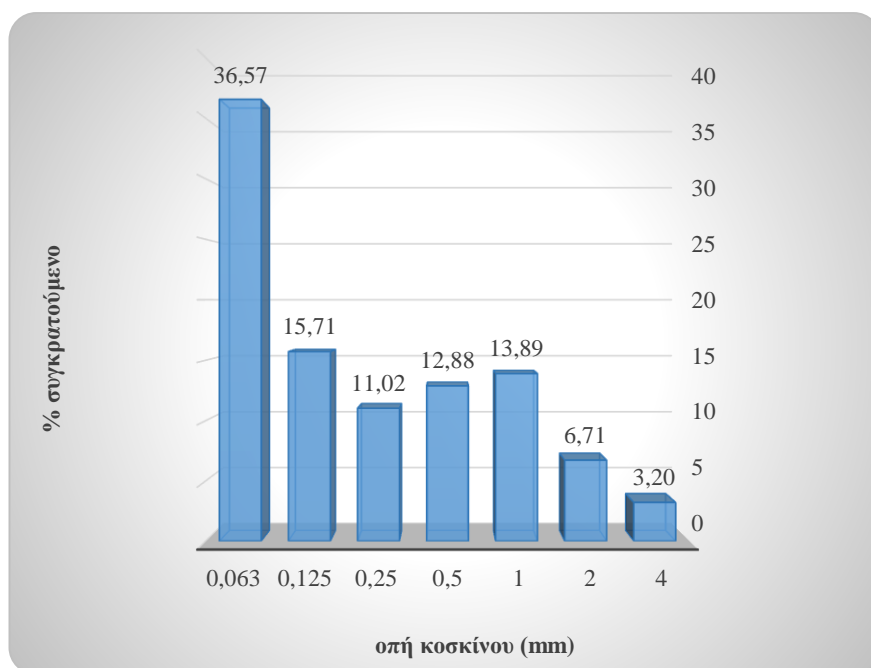
Εικόνα 53 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MN3_m3 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 8 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MN3_m3

Gradation Curve JHS_MN3_m3					
Μάζα αρχική (g)	56,62				
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο	
8	0	0,00	0,00	100,00	
4	0,8046	3,20	3,20	96,80	
2	1,6863	6,71	6,71	93,29	
1	3,4894	13,89	20,61	79,39	
0,5	3,2348	12,88	33,49	66,51	
0,25	2,7676	11,02	44,51	55,49	
0,125	3,9457	15,71	60,22	39,78	
0,063	9,1853	36,57	96,80	3,20	
<0,063	28,6789	53,31			
Σύνολο	53,7926				
Συνολικά αδρανή	25,11	κονία (g)	31,51		
απώλειες (g)	2,83	κονία (%)	55,65		
απώλειες (%)	4,99	<5%			



Διάγραμμα 1 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MN3_m3

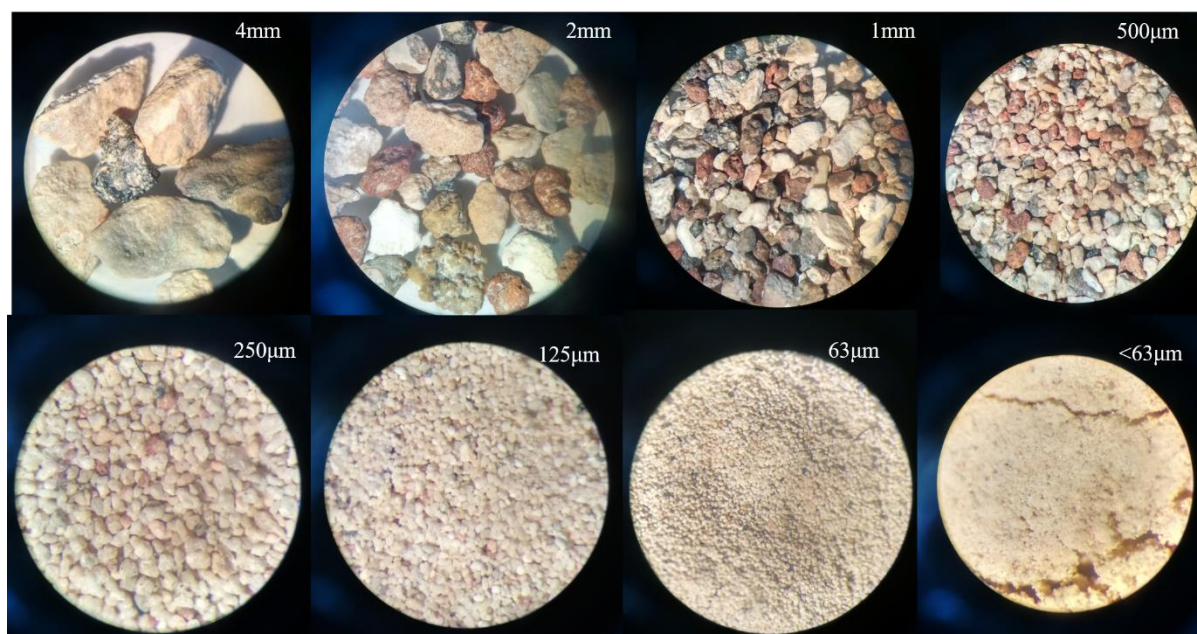


Διάγραμμα 2 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών του δείγματος JHS_MN3_m3

Ο λόγος κόνιας/αδρανών είναι **1,25** ή αλλιώς **2,5:2** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **1,26cm**. Η πλειονότητα των αδρανών είναι συμπαγή αδρανή λευκού, υπόλευκου και μπεζ χρωματισμού, ενώ εμφανίζονται και κάποια αδρανή μαύρου και ερυθρού χρωματισμού, τα οποία ωστόσο είναι ελάχιστα. Στο κλάσμα των 125 μm εμφανίζεται ένα επίμηκες αδρανή μαύρου χρωματισμού, μικρής διαμέτρου και σχετικά μεγάλου μήκους. Στο κλάσμα των 63μm εμφανίζεται το αδρανή αυτό με μεγαλύτερη συχνότητα. Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής και το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα μεγάλο μέγιστο στα 63μm και ένα μικρότερο στα 1mm.

Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS MN5 jm 85

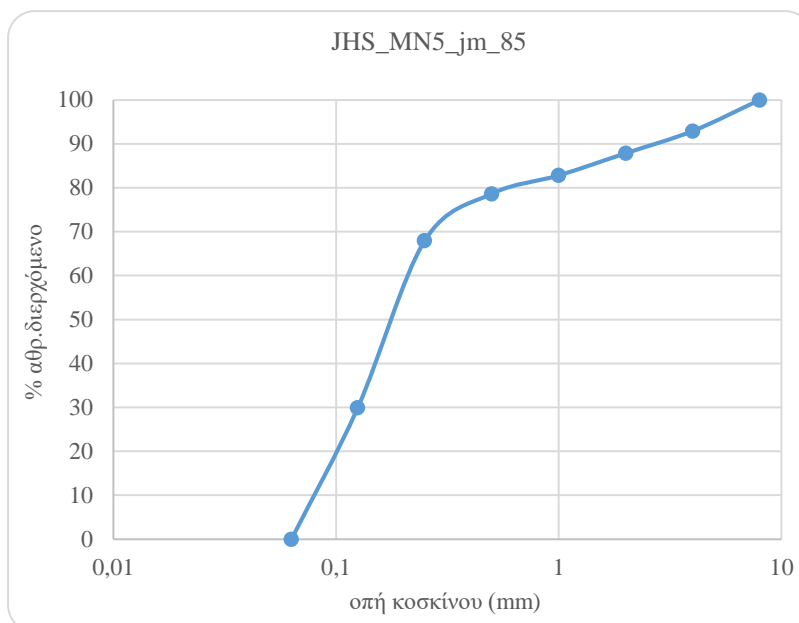
Στη παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα αδρανή και η κονία του δείγματος μετά το διαχωρισμό, όπως εμφανίζονται στο στερεοσκόπιο.



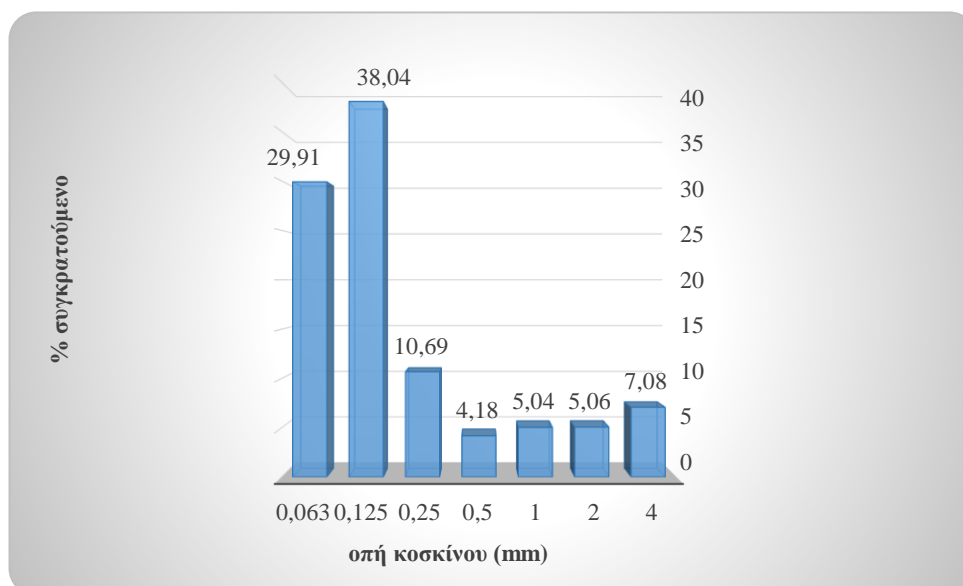
Εικόνα 54 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MN5_jm_85 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 9 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MN5_jm_85

Gradation Curve JHS_MN5_jm_85				
Μάζα αρχική (g)	44,48			
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο
8	0	0,00	0,00	100
4	1,3765	7,08	7,08	92,92
2	0,9848	5,06	12,14	87,86
1	0,9813	5,04	17,18	82,82
0,5	0,8134	4,18	21,36	78,64
0,25	2,079	10,69	32,05	67,95
0,125	7,4006	38,04	70,09	29,91
0,063	5,8175	29,91	100,00	0,00
<0,063	23,7489	54,97		
Σύνολο	43,202			
Συνολικά αδρανή	19,45	κονία (g)	25,03	
απώλειες (g)	1,28	κονία (%)	56,27	
απώλειες (%)	2,88	<5%		



Διάγραμμα 3 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MN5_jm_85

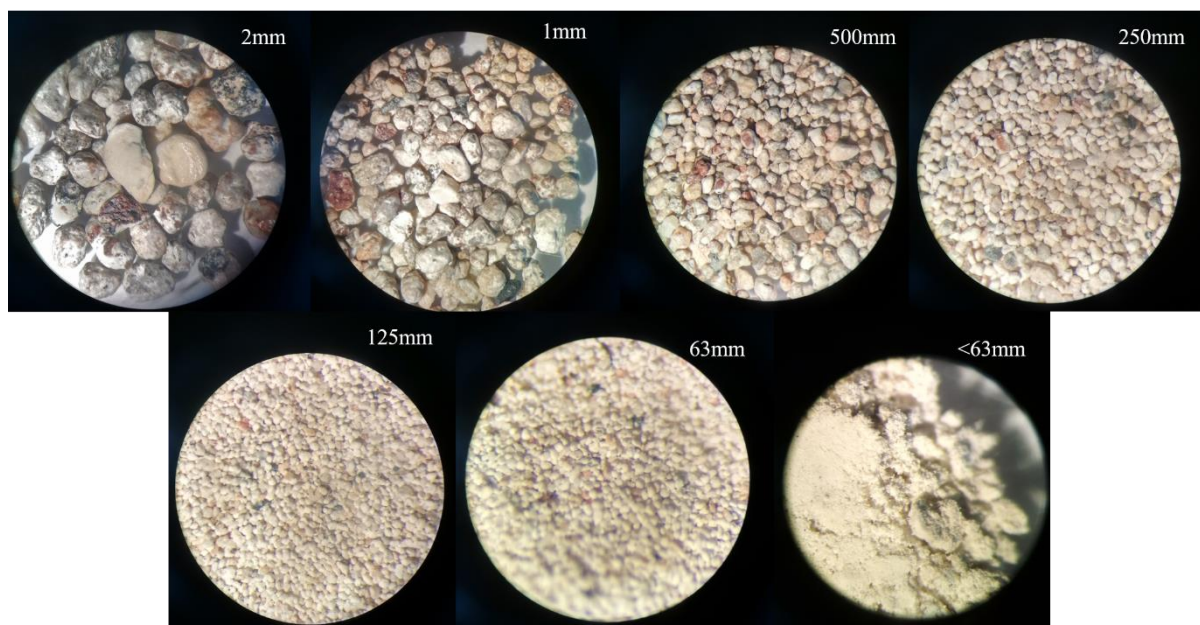


Διάγραμμα 4 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών του δείγματος JHS_MN5_jm_85

Ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι **1,29** ή αλλιώς **~1:1** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **1,02cm**. Το κονιάμα αυτό εμφανίζεται εντελώς διαφορετική εικόνα, όσον αφορά στα αδρανή, σε σχέση με το N3_m3. Τα αδρανή του κονιάματος είναι διαφόρων χρωματισμών (ερυθρά, γκρίζα, λευκά, μαύρα, πράσινα) με τη πλειονότητα αυτών να είναι ερυθρά και γκρίζου χρωματισμού. Κάποια αδρανή φαίνονται συμπαγή, άλλα έχουν πιο πορώδη υφή, ενώ εμφανίζονται και κεραμικά. Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής και εμφανίζει μία μεγάλη αλλαγή κλίσης μετά τα 0,1mm. Το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα ευρύ μέγιστο στα 63μm και 125μm ένα μικρότερο στα 4mm.

Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS MN5 jm 200

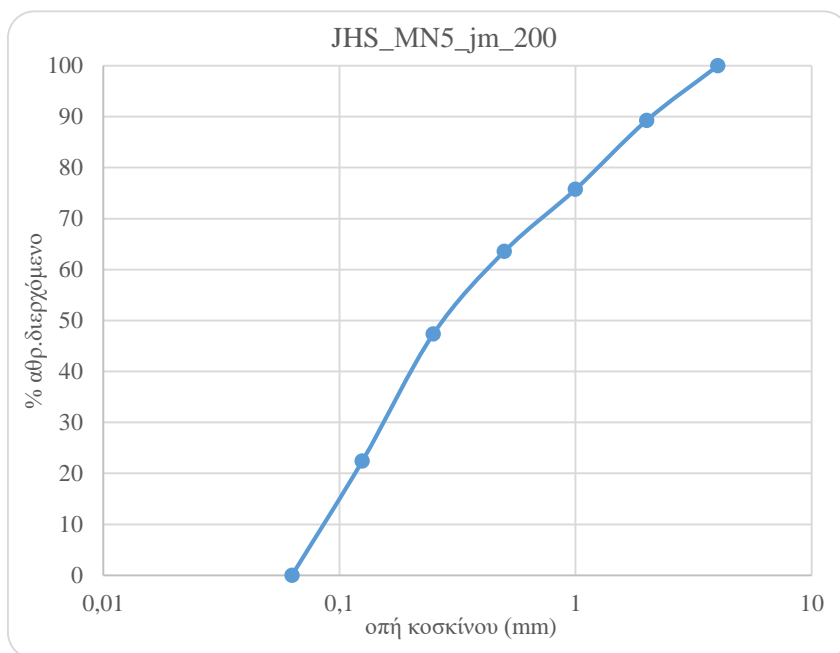
Στη παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα αδρανή και η κονία του δείγματος μετά το διαχωρισμό, όπως εμφανίζονται στο στερεοσκόπιο.



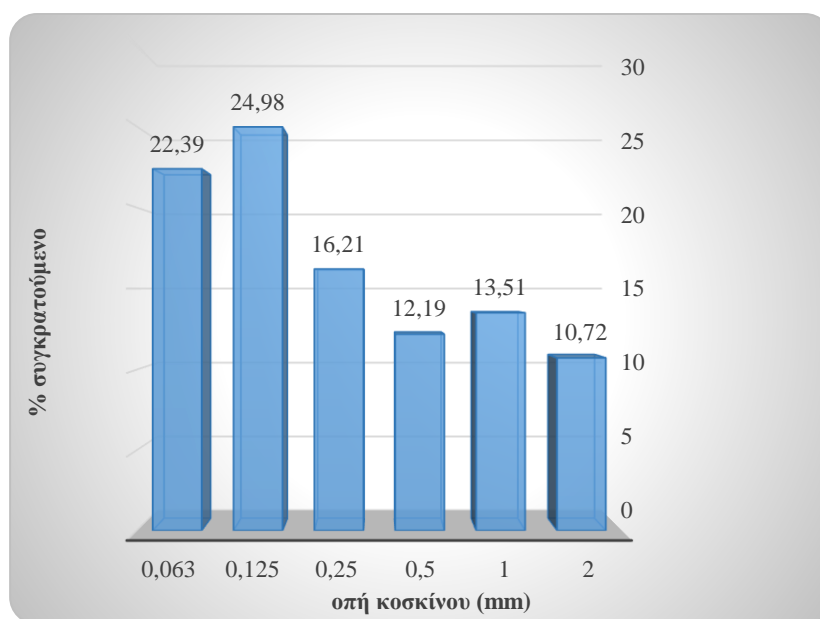
Εικόνα 55 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MN5_jm_200 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 10 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MN5_jm_200

Gradation Curve JHS_MN5_jm_200					
Μάζα αρχική (g)	28,24				
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο	
4	0	0,00	0,00	100,00	
2	1,1773	10,72	10,72	89,28	
1	1,4829	13,51	24,23	75,77	
0,5	1,3381	12,19	36,42	63,58	
0,25	1,7798	16,21	52,63	47,37	
0,125	2,7425	24,98	77,61	22,39	
0,063	2,4586	22,39	100,00	0,00	
<0,063	16,8947	60,61			
Σύνολο	27,8739				
Συνολικά αδρανή	10,98	κονία (g)	17,26		
απώλειες (g)	0,37	κονία (%)	61,12		
απώλειες (%)	1,30	<5%			



Διάγραμμα 5 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MN5_jm_200

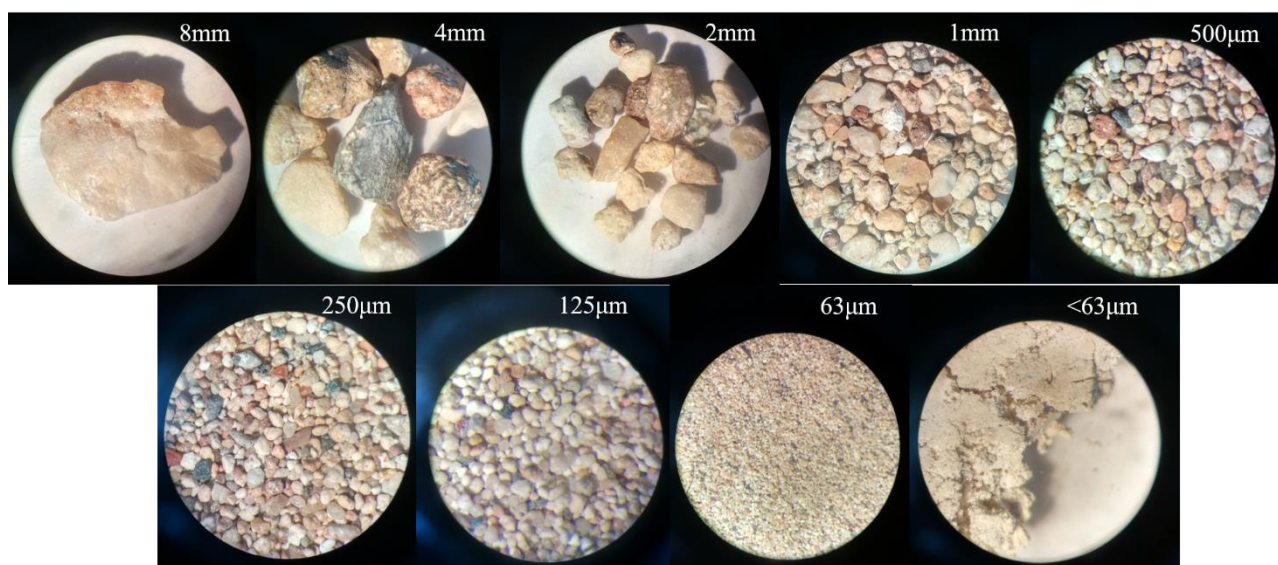


Διάγραμμα 6 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών του δείγματος JHS_MN5_jm_200

Ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι **1,57** ή αλλιώς **~1,3:1** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **0,64cm**. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα αρχικά ότι τα αδρανή του κονιάματος αυτού είναι διαφόρων χρωμάτων (ερυθρά, γκριζα, λευκά, υπόλευκα, μπες) με τη πλειονότητα αυτών να είναι σκούρου γκριζου χρωματισμού ειδικά στα μεγαλύτερα κλάσματα. Κεραμικά δεν εμφανίζονται. Η κονία φαίνεται σαν να έχει ναλώσει πάνω στα αδρανή, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα εμφανές στα μεγαλύτερα κλάσματα (γαλακτώδης επικάλυψη). Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής, αλλά η καμπύλη έχει μία τάση προς την ευθεία. Το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα μέγιστο στα 125μm ένα μικρότερο στα 1mm.

Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS_MS5_jm_280

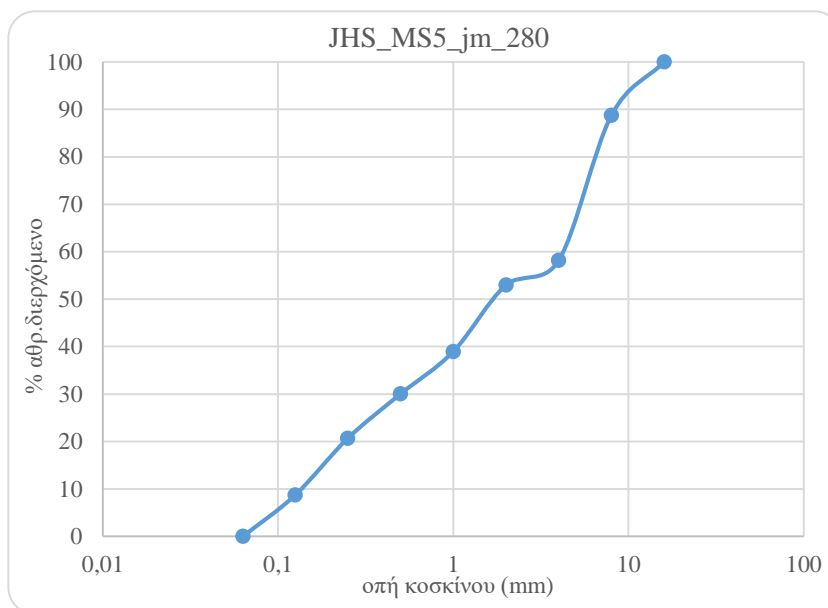
Στη παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα αδρανή και η κονία του δείγματος μετά το διαχωρισμό, όπως εμφανίζονται στο στερεοσκόπιο.



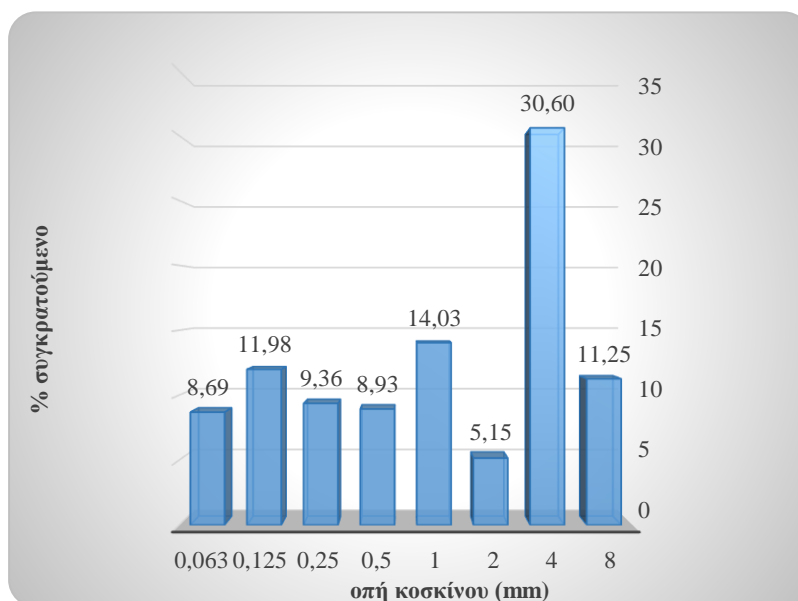
Εικόνα 56 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MS5_jm_280 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 11 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MS5_jm_280

Gradation Curve JHS_MS5_jm_280					
Μάζα αρχική (g)	30,63				
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο	
16	0	0,00	0,00	100,00	
8	0,823	11,25	11,25	88,75	
4	2,2382	30,60	41,85	58,15	
2	0,3768	5,15	47,01	52,99	
1	1,0265	14,03	61,04	38,96	
0,5	0,653	8,93	69,97	30,03	
0,25	0,6848	9,36	79,33	20,67	
0,125	0,8765	11,98	91,31	8,69	
0,063	0,6353	8,69	100,00	0,00	
<0,063	22,0434	75,09			
<i>Σύνολο</i>	29,3575				
<i>Συνολικά αδρανή</i>	7,31	<i>κονία (g)</i>	23,31		
<i>απώλειες (g)</i>	1,27	<i>κονία (%)</i>	76,12		
<i>απώλειες (%)</i>	4,14	<5%			



Διάγραμμα 7 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MS5_jm_280

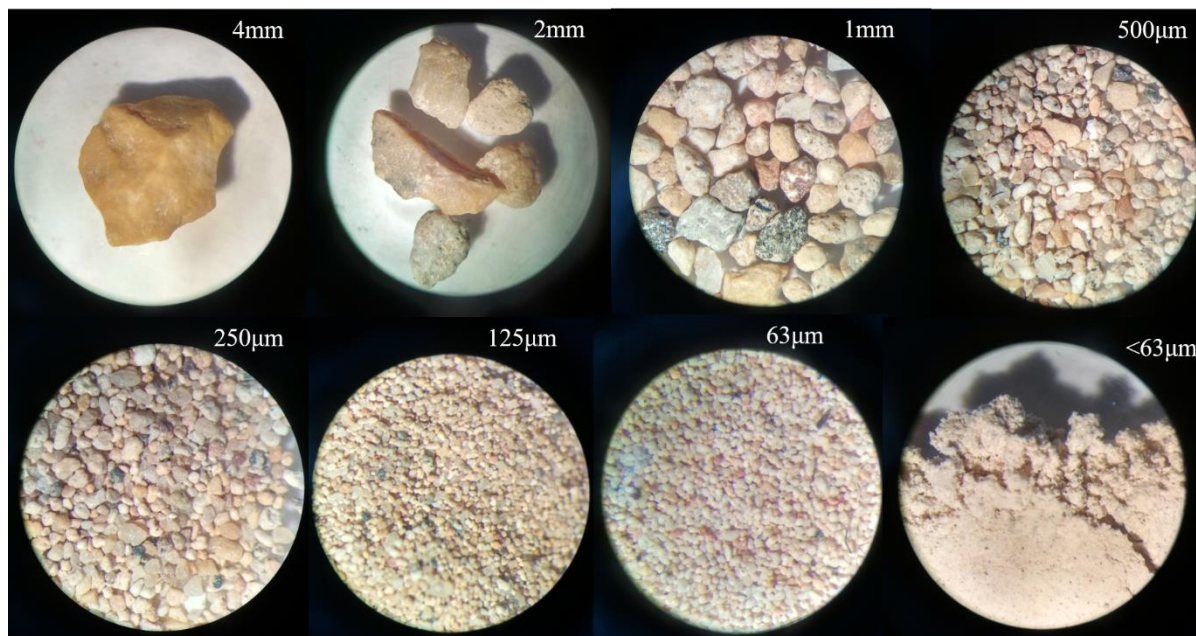


Διάγραμμα 8 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών του δείγματος JHS_MS5_jm_280

Ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι **3,19** ή αλλιώς **~2,6:1** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **1,56cm**. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα αρχικά ότι τα αδρανή του κονιάματος αυτού είναι διαφόρων χρωμάτων (ερυθρά, γκριζα, λευκά, μαύρα, μπες, κίτρινα, πράσινα) με μεγαλύτερη ποικιλία από τα υπόλοιπα δείγματα, ενώ τα αδρανή εμφανίζονται και συμπαγή και πορώδη. Στο κλάσμα των 63 μm εμφανίζονται επιμήκη μαύρα αδρανή (ελάχιστα), ιδιαίτερης υφής, διαφορετικής από το N3_m3, ίσως οργανικής φύσεως. Παράλληλα, εμφανίζονται στα 500μm και στα 250μm αδρανή, διάφανης σχετικά υφής και ανοιχτού ερυθρού χρωματισμού. Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής και εμφανίζει μία αλλαγή από την ευθεία σε ένα πιο ακανόνιστο μοτίβο μετά τα 1mm. Το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα μέγιστο στα 4mm και δύο μικρότερα στα 125μm και 1mm. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι αρκετά αυξημένος, ειδικά σε σχέση με τα προηγούμενα δείγματα.

Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS MW jm 80

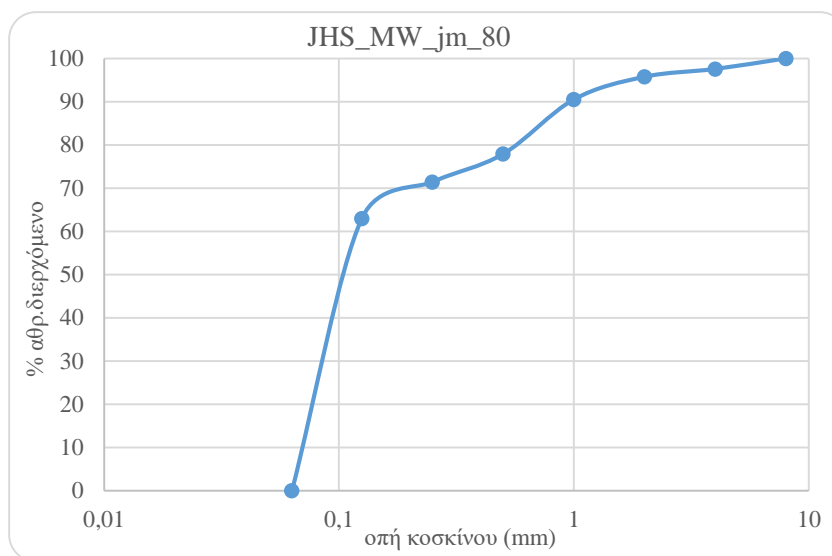
Στη παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα αδρανή και η κονία του δείγματος μετά το διαχωρισμό, όπως εμφανίζονται στο στερεοσκόπιο.



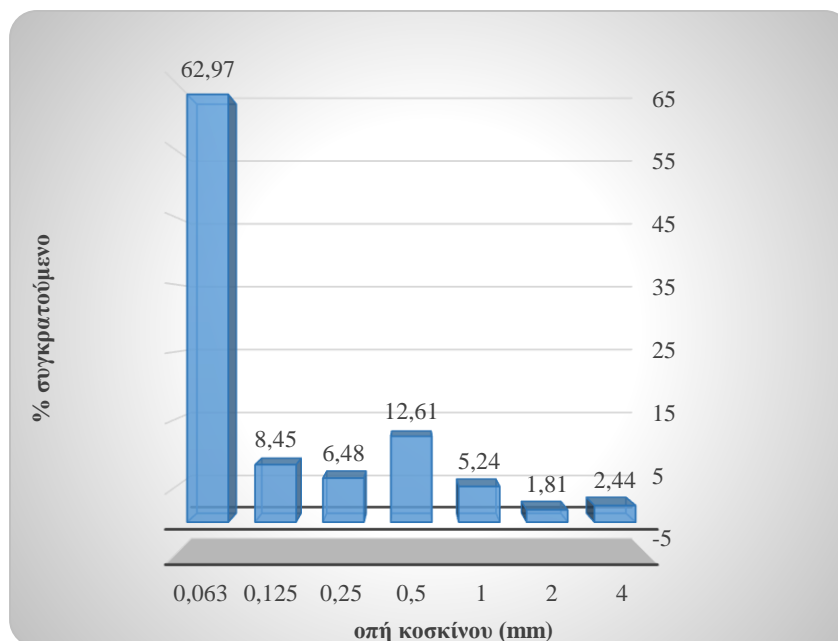
Εικόνα 57 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MW_jm_80 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 12 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MW_jm_80

Gradation Curve JHS_MW_jm_80					
Μάζα αρχική (g)	33,83				
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο	
8	0	0,00	0,00	100,00	
4	0,1284	2,44	2,44	97,56	
2	0,0949	1,81	4,25	95,75	
1	0,2755	5,24	9,49	90,51	
0,5	0,6625	12,61	22,10	77,90	
0,25	0,3403	6,48	28,58	71,42	
0,125	0,4439	8,45	37,03	62,97	
0,063	3,3087	62,97	100,00	0,00	
<0,063	27,0046	83,71			
Σύνολο	32,2588				
Συνολικά αδρανή	5,25	κονία (g)	28,58		
απώλειες (g)	1,57	κονία (%)	84,47		
απώλειες (%)	4,65	<5%			



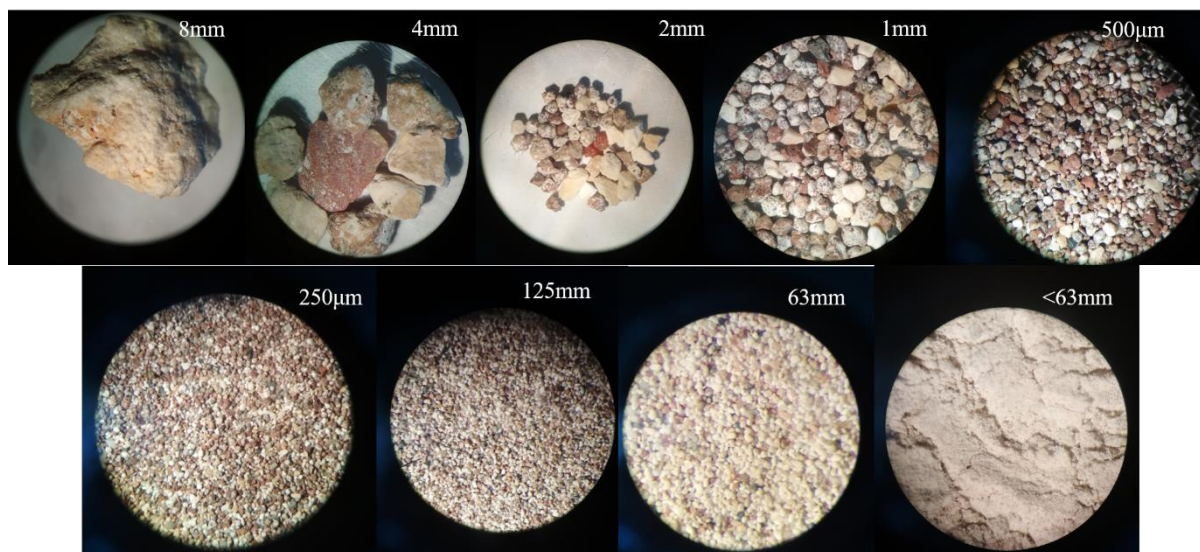
Διάγραμμα 9 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MW_jm_80



Διάγραμμα 10 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών (δεξιά) του δείγματος JHS_MW_jm_80

Ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι **5,44** ή αλλιώς **~3.6:1** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **0,79cm**. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα αρχικά ότι τα αδρανή του κονιάματος αυτού είναι διαφόρων χρωμάτων (κίτρινα, ερυθρά, γκριζα, λευκά, μαύρα, πράσινα). Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής και εμφανίζει μία αλλαγή από την ευθεία σε ένα πιο ακανόνιστο μοτίβο μετά τα 0.1mm. Το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα μέγιστο στα 4mm και δύο μικρότερα στα 125μm και 1mm. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι αρκετά αυξημένος, ειδικά σε σχέση με τα προηγούμενα δείγματα, γεγονός που ίσως οφείλεται στην διάλυση και μεταφορά στην κονία των εξαιρετικά εύθρυπτων κεραμικών που περιείχε το κονίαμα, όπως παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά.

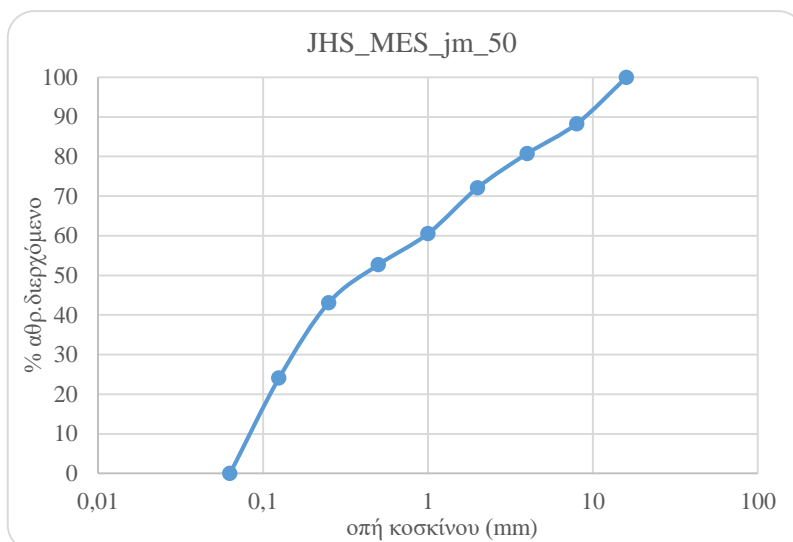
Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος JHS MES jm 50



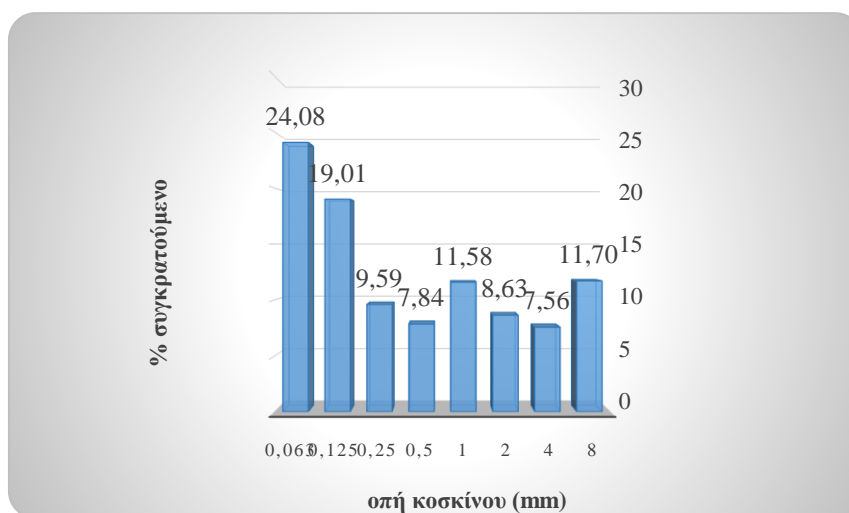
Εικόνα 58 Αδρανή και κονία του δείγματος JHS_MES_jm_50 μετά το φυσικό διαχωρισμό

Πίνακας 13 Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης Δείγματος JHS_MES_jm_50

<i>Gradation Curve JHS_MES_jm_50</i>					
Μάζα αρχική (g)	33,37				
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο	
16	0,00	0,00	0,00	100,00	
8	1,50	11,70	11,70	88,30	
4	0,97	7,56	19,26	80,74	
2	1,11	8,63	27,89	72,11	
1	1,49	11,58	39,47	60,53	
0,5	1,01	7,84	47,31	52,69	
0,25	1,23	9,59	56,91	43,09	
0,125	2,45	19,01	75,92	24,08	
0,063	3,10	24,08	100,00	0,00	
<0,063	19,2801	59,99			
Σύνολο	32,1408				
Συνολικά αδρανή	12,86	κονία (g)	20,51		
απώλειες (g)	1,23	κονία (%)	61,46		
απώλειες (%)	3,68	<5%			



Διάγραμμα 11 Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος JHS_MES_jm_50

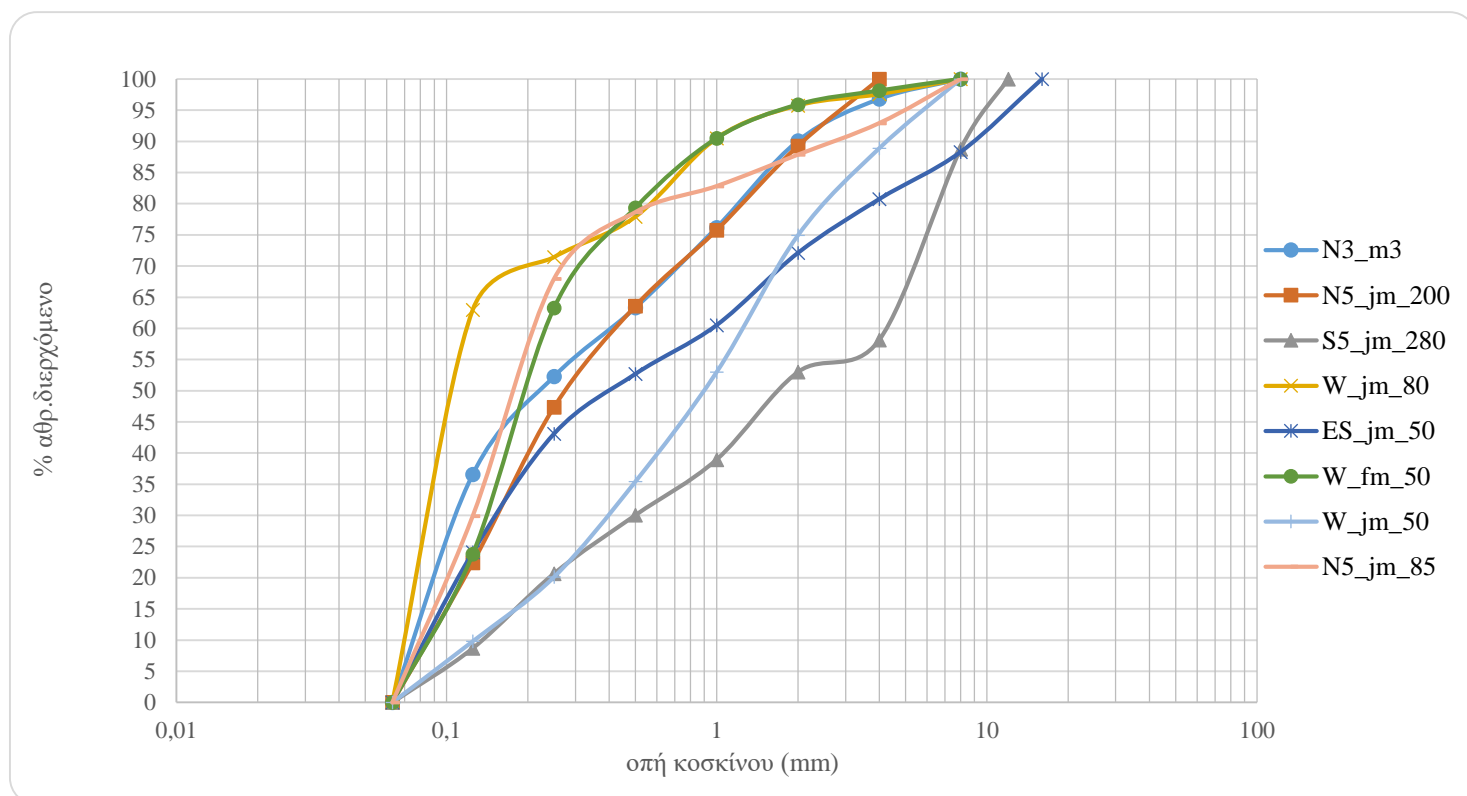


Διάγραμμα 12 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών του δείγματος JHS_MES_jm_50

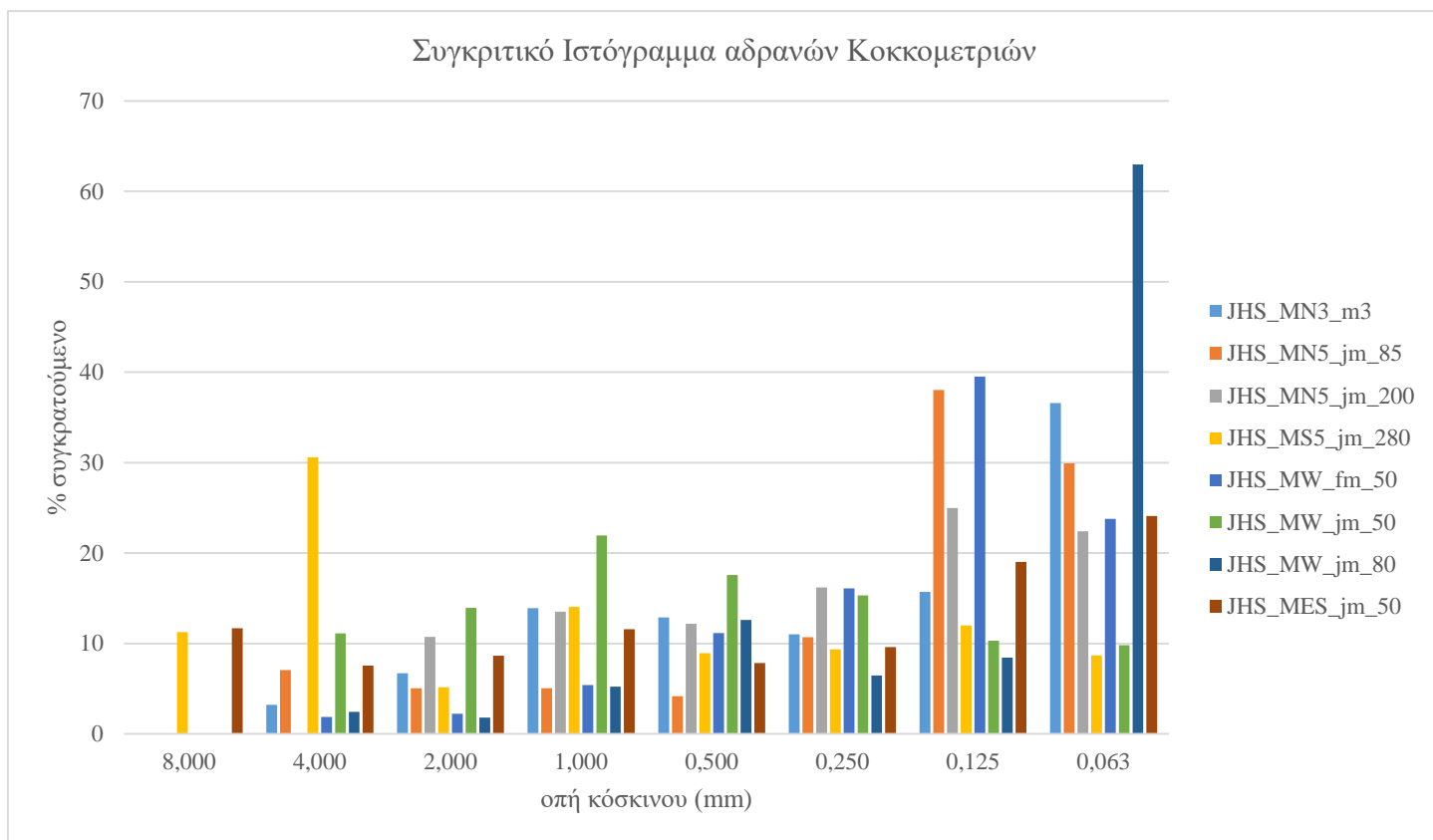
Ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι **1,59** ή αλλιώς **~1,3:1** και η μέγιστη διάσταση του μέγιστου αδρανούς είναι **1,65cm**. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα αρχικά ότι τα αδρανή του κονιάματος αυτού είναι διαφόρων χρωμάτων (ερυθρά, γκριζα, λευκά, μαύρα,, μπεζ) με κυρίως ερυθρά αδρανή στα μεσαία κλάσματα. Τα αδρανή, κυρίως στα μεγαλύτερα κλάσματα, εμφανίζουν μια ελαφριά υάλωση (σαν γαλακτώδης επικάλυψη), ωστόσο σε μικρότερο βαθμό από ό,τι το N5_jm_200. Στα 2mm εμφανίζονται 2 αδρανή, διάφανης σχετικά υφής και ανοιχτού ερυθρού χρωματισμού. Η κοκκομετρική καμπύλη που παρουσιάζεται δεν είναι σιγμοειδής, αλλά εμφανίζει σχεδόν ευθεία κατανομή. Το ιστόγραμμα της κατανομής εμφανίζει ένα μέγιστο στα 0,63mm και δύο μικρότερα στα 1mm και 8mm. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι αρκετά αυξημένος και είναι ίδιος με το δείγμα JHS_MN5_jm_200. Επίσης, αυτό το δείγμα και το JHS_MS5_jm_280 είναι τα μόνα που έχουν και ένα αδρανές μεγαλύτερο των 8mm.

Συγκριτική μελέτη κοκκομετρικής κατανομής των αδρανών

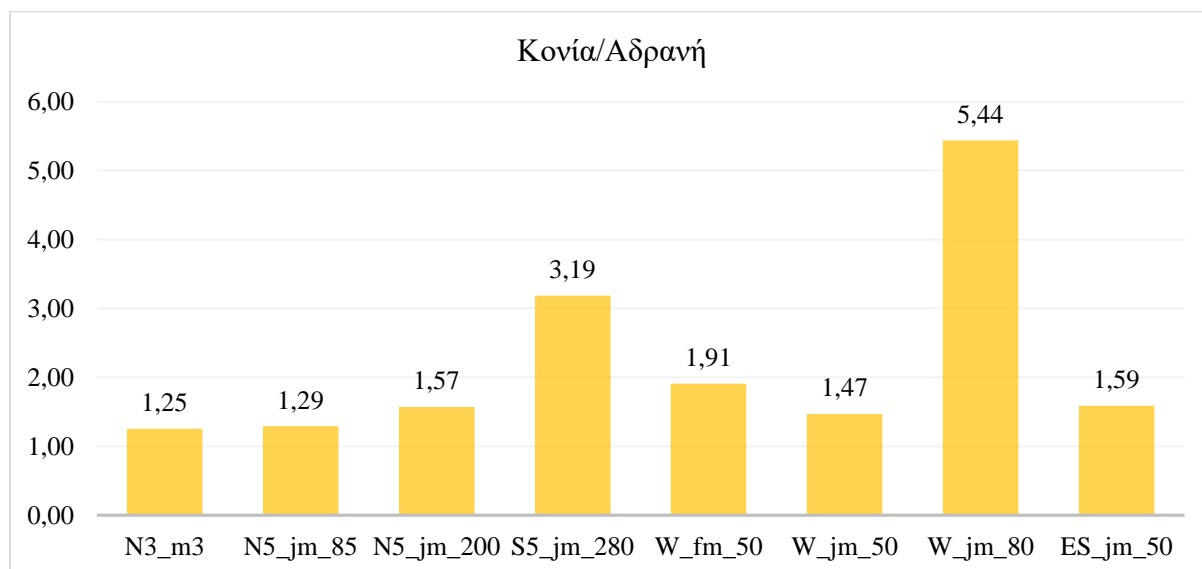
Παρακάτω εμφανίζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών και ένα του συνολικού ιστογράμματος κατανομής των αδρανών όλων των δειγμάτων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, ενώ, για λόγους πληρότητας, παρατίθενται και οι κοκκομετρικές καμπύλες δυο επιπλέον δειγμάτων (JHS_MW_fm_50 και JHS_MW_jm_50) από τα αποτελέσματα της Διπλωματικής εργασίας: *Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων Της Τοιχοποιίας Της Ανατολικής Και Δυτικής Όψης Του Ιερού Κουβουκλίου Του Πανάγιου Τάφου Στα Ιεροσόλυμα (50)*. Εκτός από αυτό το διάγραμμα εμφανίζεται και ένα ιστόγραμμα το οποίο παρουσιάζει τους διαφορετικούς λόγους κονιάς/αδρανών που εμφάνισαν τα κονιάματα. Τέλος, παρουσιάζεται και ένας πίνακας με διάφορους στατιστικούς δείκτες, όπως αναλύθηκαν και παραπάνω, για την αξιολόγηση των κοκκομετρικών καμπυλών.



Διάγραμμα 13 Κοκκομετρική καμπύλη όλων των δειγμάτων προς σύγκριση



Διάγραμμα 14 Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών όλων των δειγμάτων



Διάγραμμα 15 Ιστόγραμμά Απεικόνισης λόγου Κονίας/Αδρανών

Πίνακας 14 Κρίσιμοι Δείκτες Κοκκομετρικής Ανάλυσης

Κωδικός Δείγματος	Κονία/Αδρανή	So	Cu
JHS_MN3_m3	1,25	10,54	10,54
JHS_MN5_jm_85	1,29	2,74	2,75
JHS_MN5_jm_200	1,57	6,99	6,99
JHS_MS5_jm_280	3,19	14,99	32,34
JHS_MW_fm_50	1,91	3,08	2,22
JHS_MW_jm_50	1,47	6,25	0,88
JHS_MW_jm_80	5,44	4,48	1,71
JHS_MES_jm_50	1,59	20,00	20,36

Από τη συνολική κοκκομετρική καμπύλη μπορεί να παρατηρηθεί, αρχικά, ότι τα δείγματα JHS_MW_fm_50, JHS_MW_jm_80 και JHS_MN5_jm_85, έχουν όμοιες καμπύλες. Και τα τρία έχουν μία απότομη αύξηση στην αρχή του διαγράμματος με μία μείωση της κλίσης προς τα μεγαλύτερα αδρανή. Η μόνη διαφορά σε αυτά τα τρία είναι ότι το JHS_MW_fm_80 έχει την πιο ομαλή αλλαγή στη κλίση. Πιο συγκεκριμένα τα δείγματα JHS_MW_fm_50 και JHS_MN5_jm_85 ξεκινάνε μαζί, στη συνέχεια διαχωρίζονται με το JHS_MN5_jm_85 να εμφανίζει πιο έντονη κλίση. Ταυτόχρονα, το δείγμα JHS_MW_jm_80 αφού έχει ξεκινήσει σχετικά ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, μετά την αλλαγή κλίσης του, ακολουθεί τη πορεία του JHS_MW_fm_50. Στη συνέχεια, όμοια πορεία στη καμπύλη εμφανίζουν τα JHS_MN3_m3 και JHS_MN5_jm_200. Και τα δύο παρουσιάζουν μία πιο ευθεία καμπύλη σε σχέση με τα υπόλοιπα. Έπειτα, τα JHS_MES_jm_50, JHS_MW_jm_50 και JHS_MS5_jm_280 δεν εμφανίζουν να ακολουθούν κάποιο μοτίβο μεταξύ τους ή με κάποιο άλλο δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το JHS_MES_jm_50 στην αρχή ακολουθεί τα προηγούμενα δείγματα (JHS_MN3_m3 και JHS_MN5_jm_200) και μετά αλλάζει πορεία, ενώ τα JHS_MW_jm_50 και JHS_MS5_jm_280 ξεκινάνε μαζί, αλλά στη συνέχεια το καθένα ακολουθεί άλλο μοτίβο.

Από το συγκριτικό ιστόγραμμα κατανομής των αδρανών παρατηρείται ότι τα περισσότερα δείγματα εμφανίζουν μέγιστα στα πιο μικρά κόσκινα (125μm και 63μm). Τα δείγματα τα οποία εμφάνισαν μεγαλύτερα αδρανή (έως και 8mm) έχουν μία τάση να εμφανίζουν μέγιστα και σε μεγαλύτερα αδρανή.

Στη συνέχεια κατατάσσονται με αύξουσα σειρά τα δείγματα με βάση το λόγο κονία/αδρανή:

JHS_MN3_m3 < JHS_MN5_jm_85 < JHS_MW_jm_50 < JHS_MN5_jm_200 < JHS_MES_jm_50 < JHS_MW_fm_50 < JHS_MS5_jm_280 < JHS_MW_jm_80

Στη παραπάνω ταξινόμηση να σημειωθεί ότι τα δύο τελευταία δείγματα JHS_MS5_jm_280 και JHS_MW_jm_80 εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, ειδικά το JHS_MW_jm_80.

Όπως αναφέρθηκε και στο Πειραματικό μέρος οι δείκτες So (Δείκτης ταξινόμησης) και Cu (Συντελεστής ομοιομορφίας) μας δίνουν τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε μια κοκκομετρική καμπύλη. Από ότι έχει αναφερθεί παραπάνω γνωρίζουμε ότι οι βέλτιστες τιμές των δεικτών είναι [2,5-4,5] και >5 αντίστοιχα για το κάθε δείκτη. Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι κανένα δείγμα δεν ικανοποιεί και τα δύο κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, μόνο για το So ιδανικές τιμές παίρνουν τα JHS_MN5_jm_85, JHS_MW_fm_50 και JHS_MW_jm_80, μόνο για το Cu τιμές παίρνουν τα JHS_MN3_m3, JHS_MN5_jm_200, JHS_MS5_jm_280 και JHS_MES_jm_50, ενώ κανένα κριτήριο από τα δύο δεν ικανοποιεί το JHS_MW_jm_50.

4.1.3 Αποτελέσματα Ορυκτολογικής Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων X (XRD)

Η διαδικασία Ορυκτολογικής Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων X έγινε για όλα τα δείγματα, όπως επίσης και για κάθε κλάσμα που προέκυψε από τον φυσικό διαχωρισμό μέσω κοκκομετρικής διαβάθμισης που έγινε σε έξι δείγματα. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ανά όψη (Βόρεια, Νότια, Δυτική, Ανατολική) και ανά φάτνωμα. Ακόμη, με βάση τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης τα δείγματα κατηγοριοποιήθηκαν στις εξής κατηγορίες: 1) Ασβέστη, 2) Ασβέστη-Γύψου, δηλαδή ασβεστιτικά κονιάματα που έχουν ως πρόσθετο το γύψο 3) Γυψοκονιάματα, δηλαδή κονιάματα που έχουν ως πρωτεύουσα φάση το γύψου με μία αρκετά χαμηλότερη ποσότητα ασβεστίτη και 4) Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη με τις πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις του κάθε δείγματος. Να σημειωθεί ότι η μέθοδος της περίθλασης ακτίνων X είναι ημιποσοτική, συνεπώς η παραπάνω κατηγοριοποίηση είναι σχετική με τις κορυφές των γωνιαγραμμάτων που προκύπτουν από τη μεθοδο. Στο τέλος κάθε όψης θα παρουσιάζονται σε τι ποσοστό εμφανίζεται η κάθε ομάδα τόσο συνολικά στο φάτνωμα όσο και ανά είδος κονιάματος (συμπλήρωσης, αρμού). Στο τέλος των αποτελεσμάτων θα γίνει η ίδια διαδικασία για όλα τα δείγματα και τέλος τα αποτελέσματα αυτά θα παρουσιαστούν στα σχέδια του μνημείου.

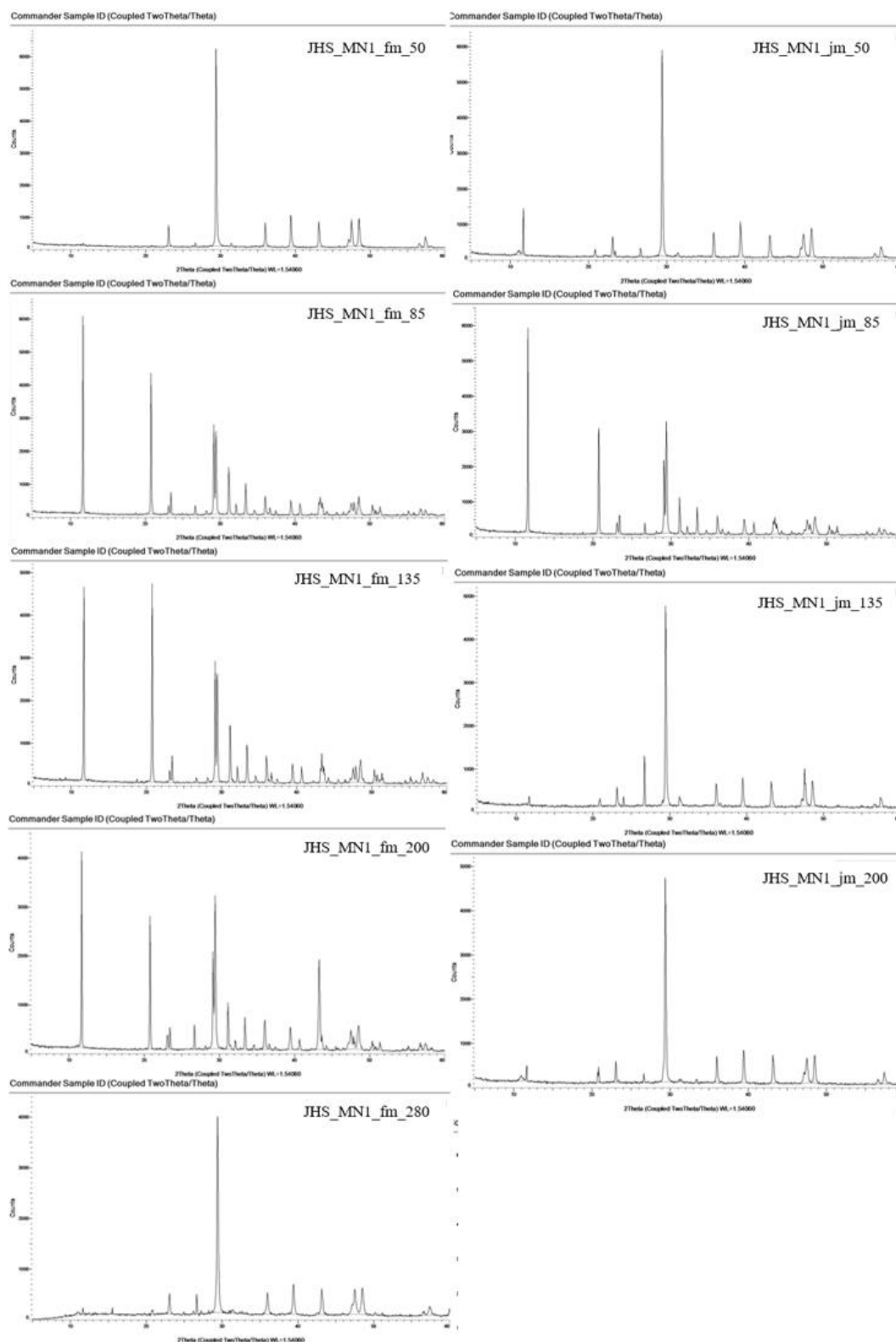
Βόρεια όψη

Αρχικά, στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κοιταμάτων της Βόρειας Όψης.

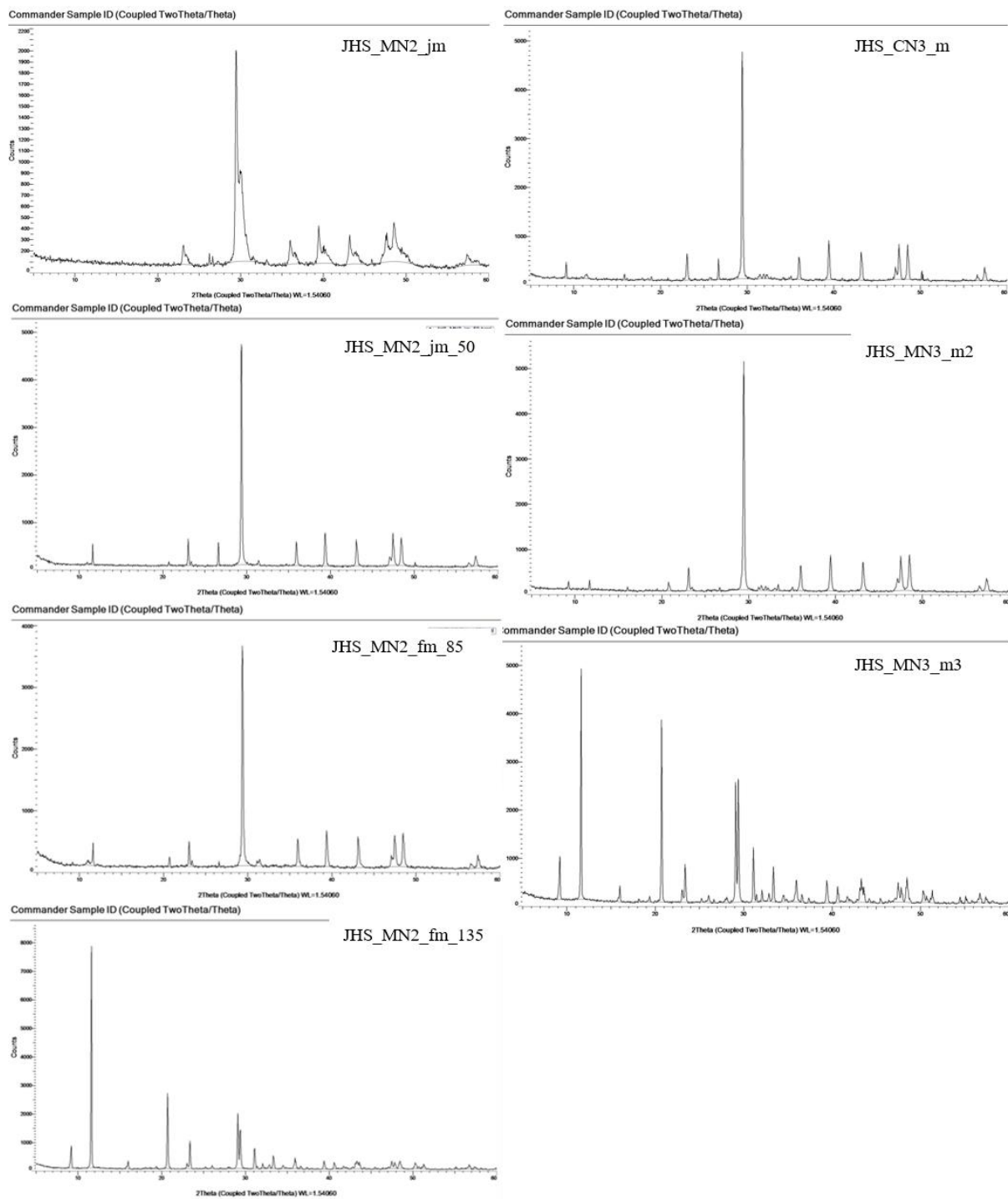
Πίνακας 15 Πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις της Βόρειας Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
N1	JHS_MN1_fm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MN1_fm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MN1_fm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MN1_fm_200	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MN1_fm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γύψος, Γελενίτης
	JHS_MN1_jm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MN1_jm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MN1_jm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γύψος, Ακερμανίτης
	JHS_MN1_jm_200	Ασβεστίτης	Γύψος, Χαλαζίας
N2	JHS_MN2_jm	Ασβεστίτης	Αλίτης, Χαλαζίας
	JHS_MN2_jm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γύψος
	JHS_MN2_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MN2_jm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης
N3	JHS_CN3_m	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Εντριγγίτης
	JHS_N3_m2	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_N3_m3	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης, Εντριγγίτης
N4	JHS_MN4_jm2	Ασβεστίτης, Πορτλαντίτης	Εντριγγίτης, Βρουσίτης
	JHS_N4_m1	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_N4_m2	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_N4_m3	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
N5	JHS_N5_m1	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Δολομίτης, Γύψος
	JHS_N5_m2	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MN5_fm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MN5_fm_85	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γύψος, Θωμασίτης
	JHS_MN5_fm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης
	JHS_MN5_fm_200	Ασβεστίτης, Πορτλαντίτης	Εντριγγίτης, Χαλαζίας
	JHS_MN5_fm_280	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MN5_jm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MN5_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MN5_jm_135	Ασβεστίτης, Πορτλαντίτης	Χαλαζίας, Εντριγγίτης
	JHS_MN5_jm_200	Πορτλαντίτης, Ασβεστίτης	Εντριγγίτης, Βρουσίτης

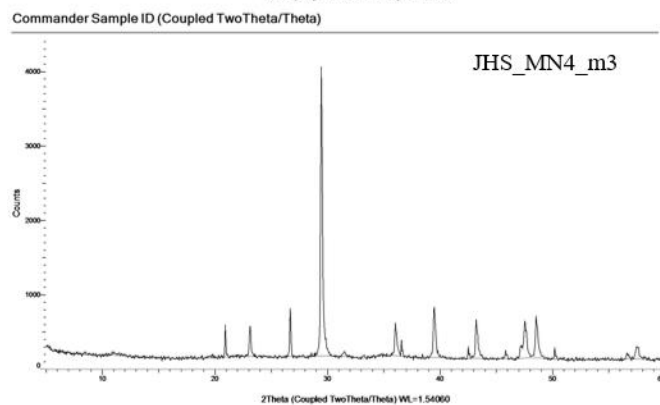
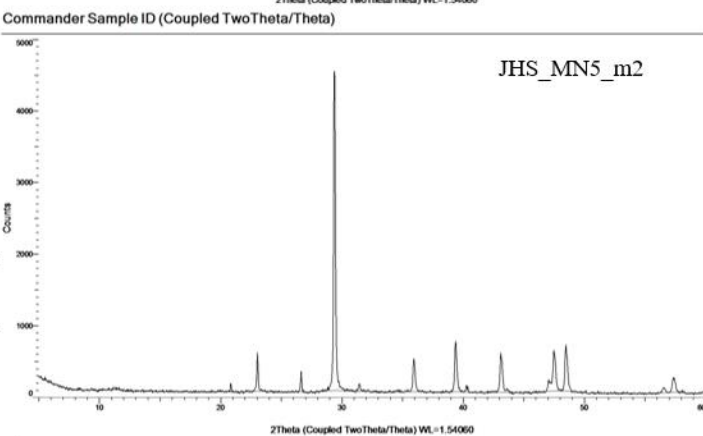
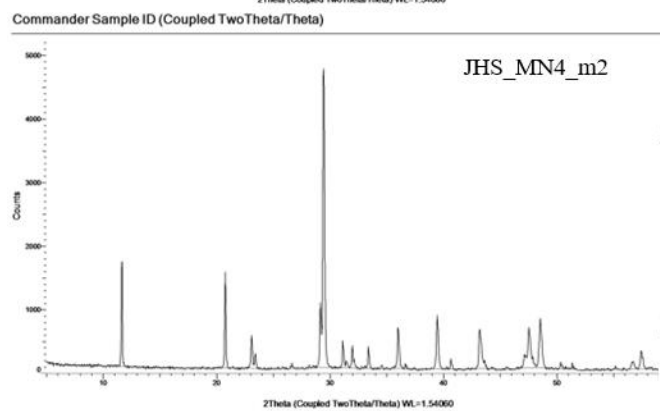
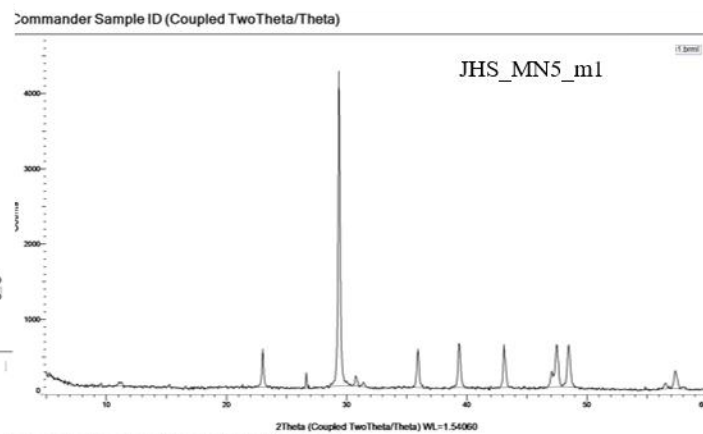
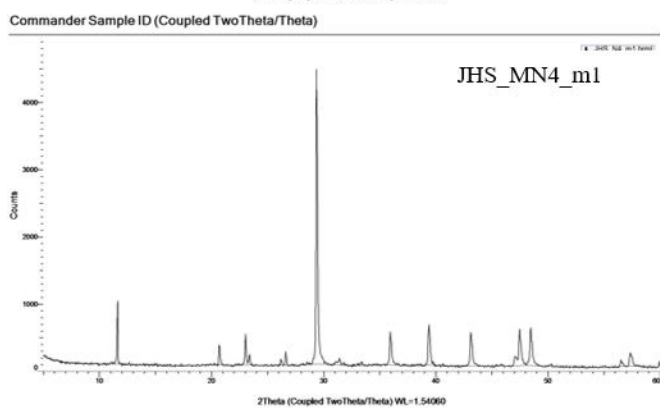
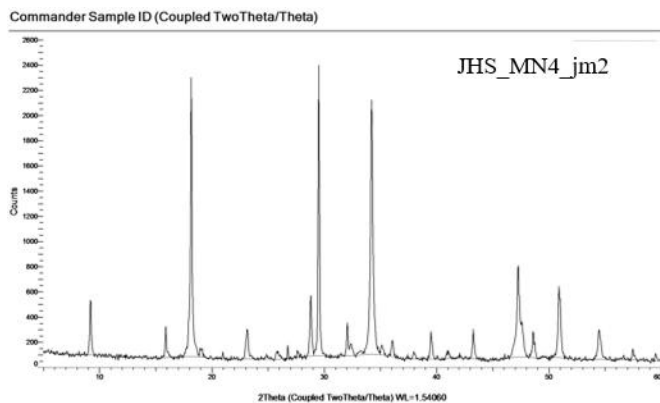
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γωνιογράμματα της όψης ανά φάτνωμα.



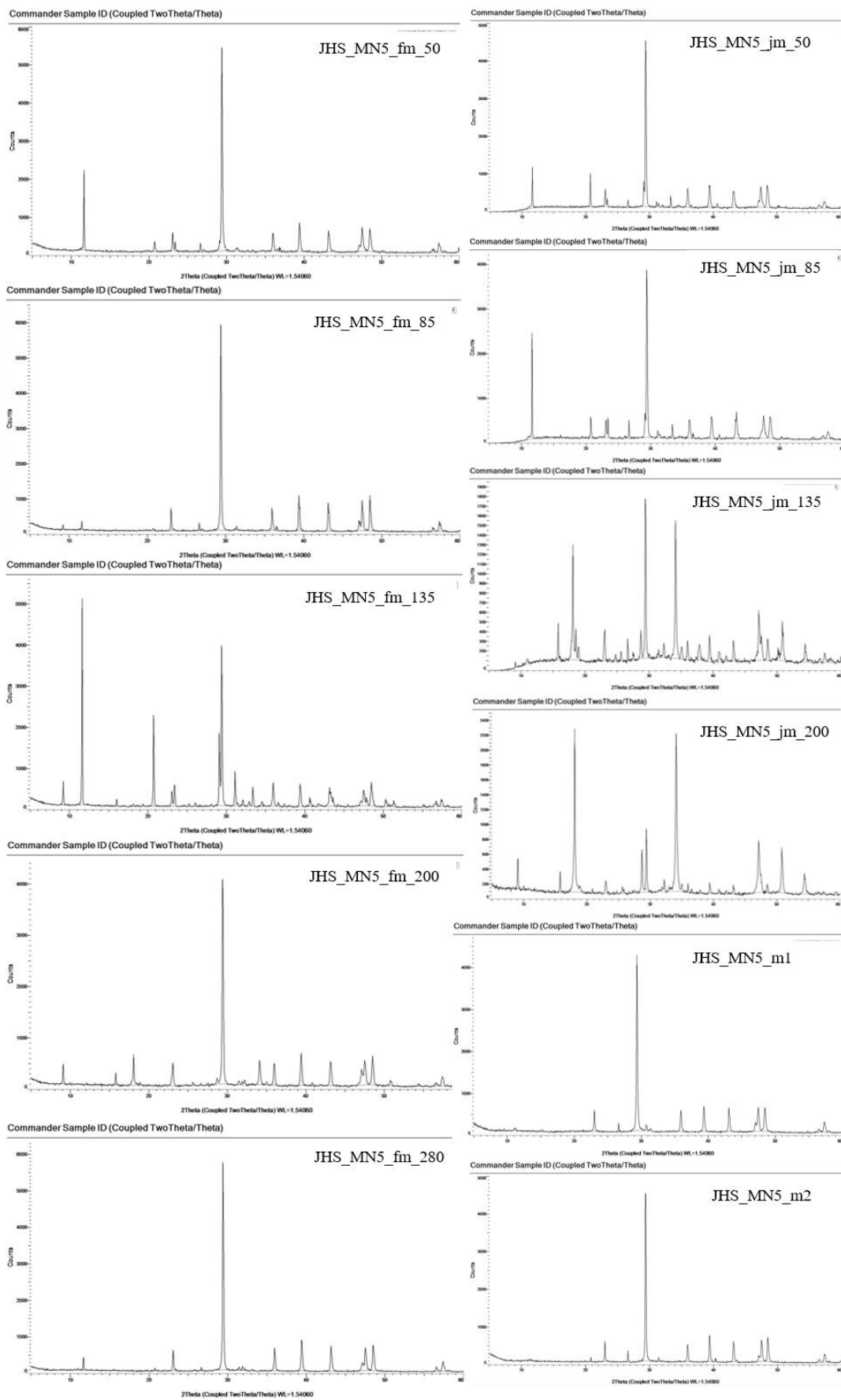
Διάγραμμα 16 Γωνιογράμματα Φατνώματος JHS_MN1



Διάγραμμα 17 Γωνιογράμματα Φατνώματος JHS_MN2 και JHS_MN3



Διάγραμμα 18 Γωνιογράμματα Φατνόματος JHS_MN4 και δύο από το JHS_MN5 (πριν την εφαρμογή της κανονικοποιημένης δειγματοληψίας)



Διάγραμμα 19 Γωνιογράμματα Φαινόματος JHS_MN5 (από τη κανονικοποιημένη δειγματοληψία)

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά στα οποία εμφανίζεται η κάθε ομάδα ανά φάτνωμα, ανά είδος κονιάματος και συνολικά.

Πίνακας 16 Ποσοστά Κατηγοριοποίησης Κονιαμάτων Βόρειας όψης

Φάτνωμα	Είδος κονιάματος	% Κατηγοριών			
		Ασβέστη	Ασβέστη παρουσία Γύψου	Γυψοκονίαμα	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη
N1	Συμπλήρωσης	40	0	60	0
	Αρμού	50	25	25	0
N2	Αρμού	25	50	25	0
N3	Συμπλήρωσης	100	0	0	0
	Αρμού	0	0	100	0
N4	Αρμού	25	50	0	25
N5	Συμπλήρωσης	57	14	14	14
	Αρμού	0	50	0	50
Βόρεια Όψη (N1-N5)	Συμπλήρωσης	57	7	29	7
	Αρμού	24	41	18	18
	Συνολικά	39	26	23	13

Από το παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι στο φάτνωμα N1 τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης είναι Γυψοκονιάματα, ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι Ασβέστη. Αντίστοιχα, τα μισά από τα κονιάματα αρμολόγισης είναι Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα μοιράζονται στη μέση σε Ασβέστη-Γύψου και Γυψοκονιάματα. Στο φάτνωμα N2 υπάρχουν δείγματα μόνο στα κονιάματα αρμού όπου τα μισά είναι Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα μοιράζονται στη μέση σε Ασβέστη παρουσία Γύψου και σε Γυψοκονιάματα. Στο φάτνωμα N3 υπάρχουν μόνο δύο κονιάματα συμπλήρωσης που είναι Ασβέστη, και ένα κονίαμα αρμού που είναι Γυψοκονιάματα. Τα μισά κονιάματα αρμού του N4 εμφανίζεται να είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου, ενώ τα υπόλοιπα να χωρίζονται σε Ασβέστη και Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Στο φάτνωμα N5 εμφανίζεται ότι τα κονιάματα συμπλήρωσης είναι κυρίως Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα είναι σε Ασβέστη παρουσία Γύψου και Γυψοκονιάματα. Αντίστοιχα, τα μισά κονιάματα αρμού είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου και ενώ τα υπόλοιπα είναι Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη.

Έτσι, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης της βόρειας τοιχοποιίας είναι Ασβέστη (λίγο περισσότερα από τα μισά) και ακολουθούν τα Γυψοκονιάματα και τέλος τα Ασβέστη παρουσία Γύψου και παρουσία Πορτλαντίτη σε ίσα ποσοστά (κάτω του 10%). Στα κονιάματα αρμού εμφανίζεται μία πλειονότητα σε αυτά του Ασβέστη παρουσία Γύψου, καθώς έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό (λιγότερα όμως του 50%), αλλά τα υπόλοιπα με φθίνουσα σειρά εμφανίζεται να είναι Ασβέστη και Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη (σε ίδια ποσοστά). Συνολικά, λοιπόν, σε όλη τη Βόρεια Όψη γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα κονιάματα είναι Ασβέστη και στη συνέχεια ακολουθούν τα Ασβέστη παρουσία Γύψου και Γυψοκονιάματα με πολύ κοντινά ποσοστά και τέλος ακολουθούν τα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Καμία όμως από τις κατηγορίες αυτές δε ξεπερνά το 40% των δειγμάτων, αλλά καμία δεν είναι και χαμηλότερη του 10%.

Στα 14 εκ των 31 δειγμάτων ταυτοποιήθηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, δηλαδή στο 45% των δειγμάτων.

Νότια Όψη

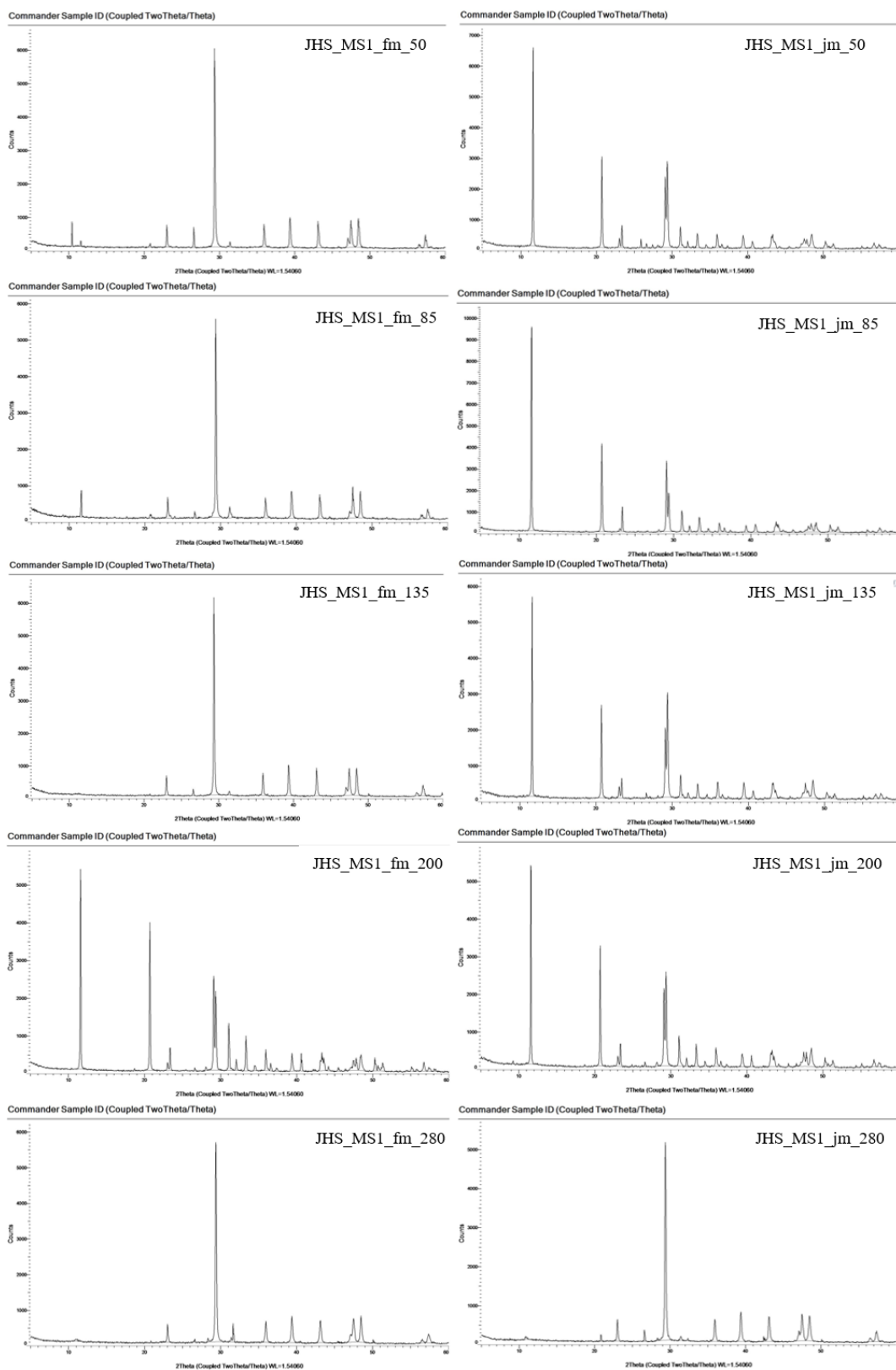
Αρχικά, στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κοιταμάτων της Νότιας Όψης.

Πίνακας 17 Πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις της Νότιας Όψης

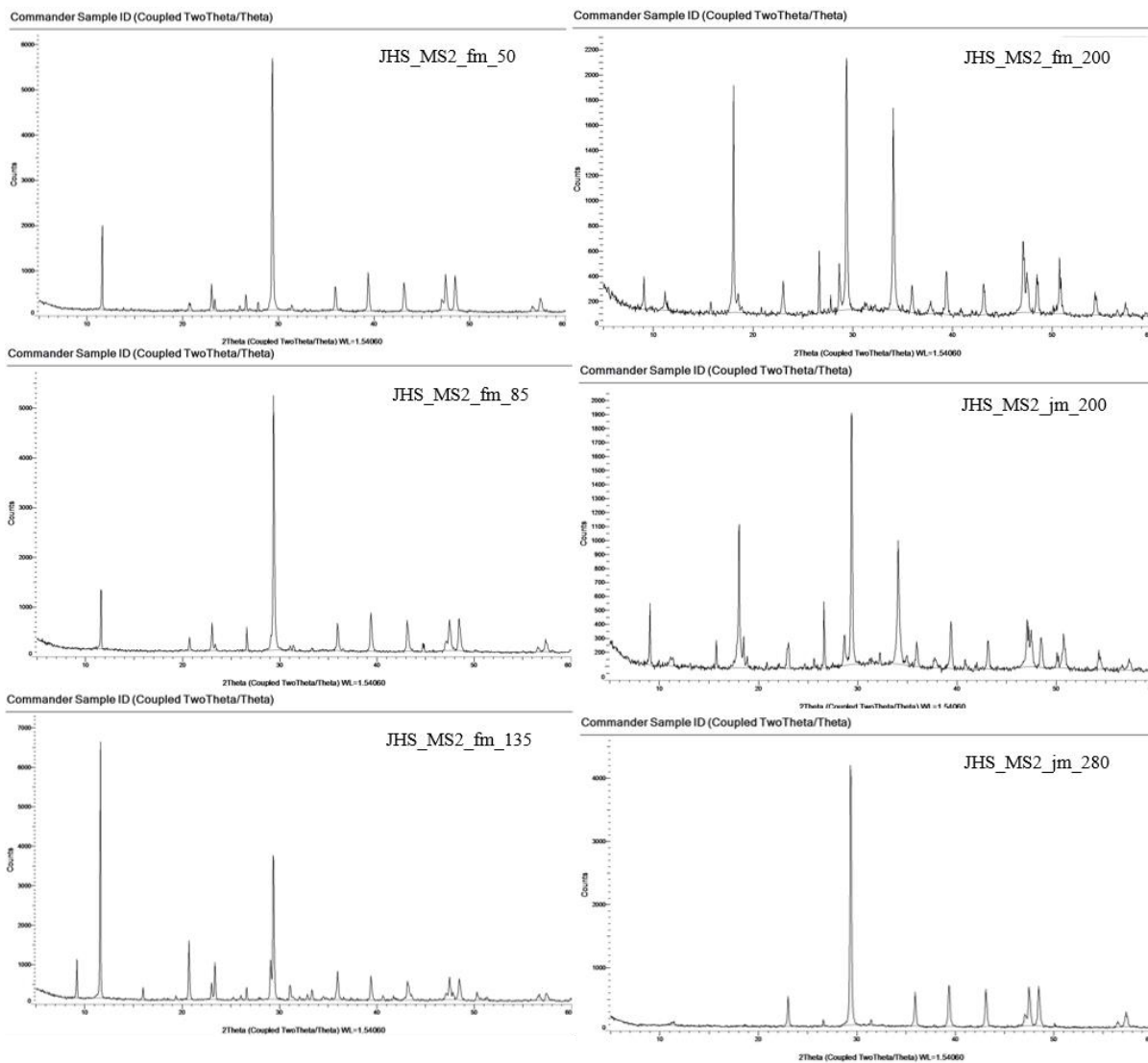
Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
S1	JHS_MS1_fm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γύψος
	JHS_MS1_fm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS1_fm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS1_fm_200	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS1_fm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS1_jm_50	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS1_jm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	
	JHS_MS1_jm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS1_jm_200	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MS1_jm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
S2	JHS_MS2_fm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS2_fm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS2_fm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης, Χαλαζίας
	JHS_MS2_fm_200	Ασβεστίτης, Πορτολαντίτης	Χαλαζίας, Εντρινγίτης, Γύψος
	JHS_MS2_jm_200	Ασβεστίτης, Πορτολαντίτης	Χαλαζίας, Εντρινγίτης, Βρουσίτης
	JHS_MS2_jm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
S3	JHS_MS3_fm_50	Ασβεστίτης	
	JHS_MS3_fm_85	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS3_fm_135	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS3_fm_200	Ασβεστίτης, Πορτολαντίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS3_fm_280	Πορτολαντίτης, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Βρουσίτης, Θωμασίτης
	JHS_MS3_jm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS3_jm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης, Χαλαζίας
	JHS_MS3_jm_135	Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Πορτολαντίτης	Εντρινγίτης, Βρουσίτης
	JHS_MS3_jm_200	Ασβεστίτης, Πορτολαντίτης	Χαλαζίας, Βρουσίτης, Εντρινγίτης, Θωμασίτης
	JHS_MS3_jm_280	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης
S4	JHS_MS4_fm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS4_fm_85	Ασβεστίτης	Γύψος, Χαλαζίας
	JHS_MS4_fm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS4_fm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MS4_fm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS4_jm_50	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS4_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας

	JHS_MS4_jm_135	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS4_jm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS4_jm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
S5	JHS_MS5_fm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS5_fm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MS5_fm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MS5_fm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS5_fm_280	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MS5_jm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS5_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS5_jm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης
	JHS_MS5_jm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MS5_jm_280	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης

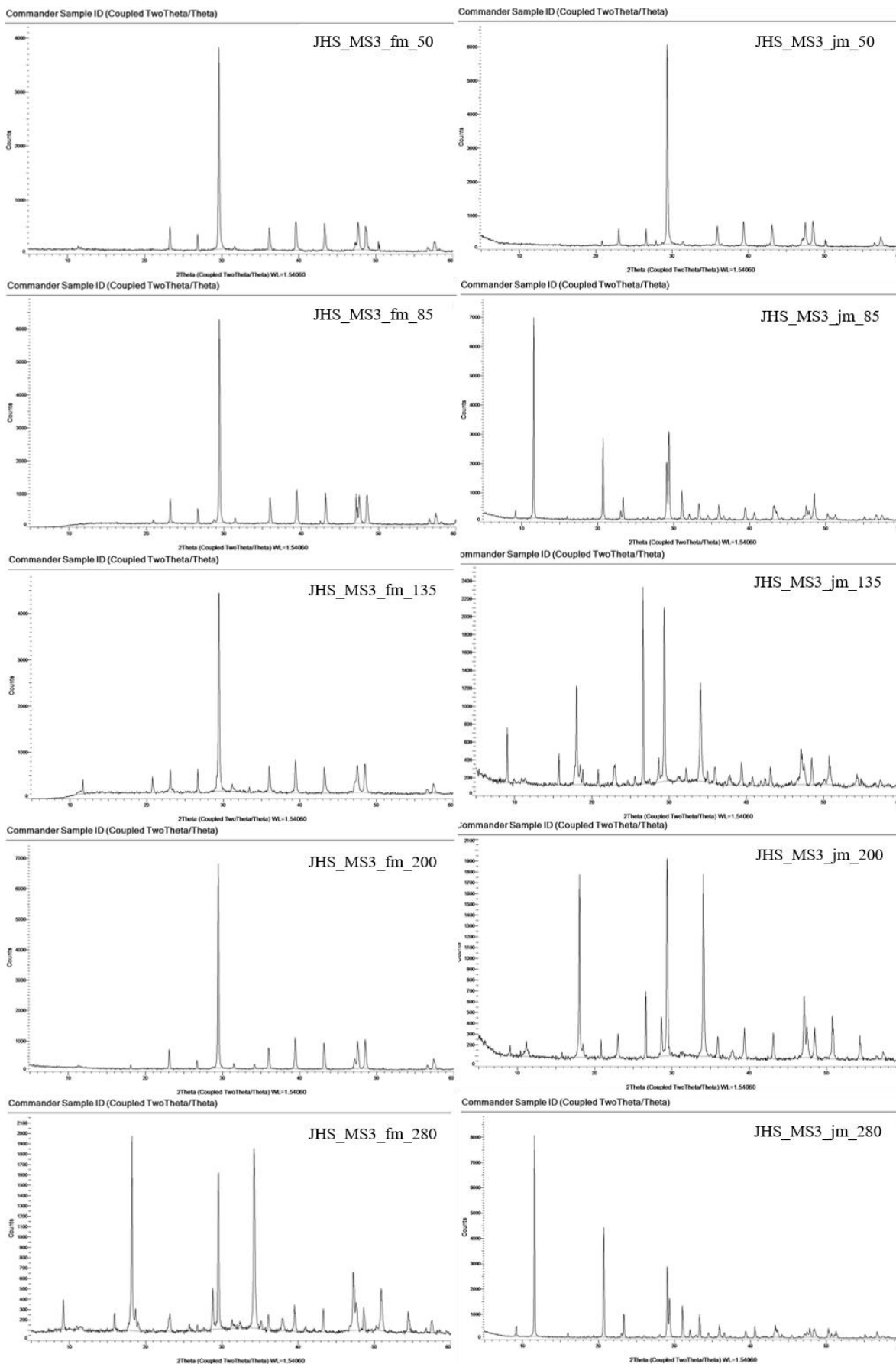
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γωνιογράμματα της όψης ανά φάτνωμα.



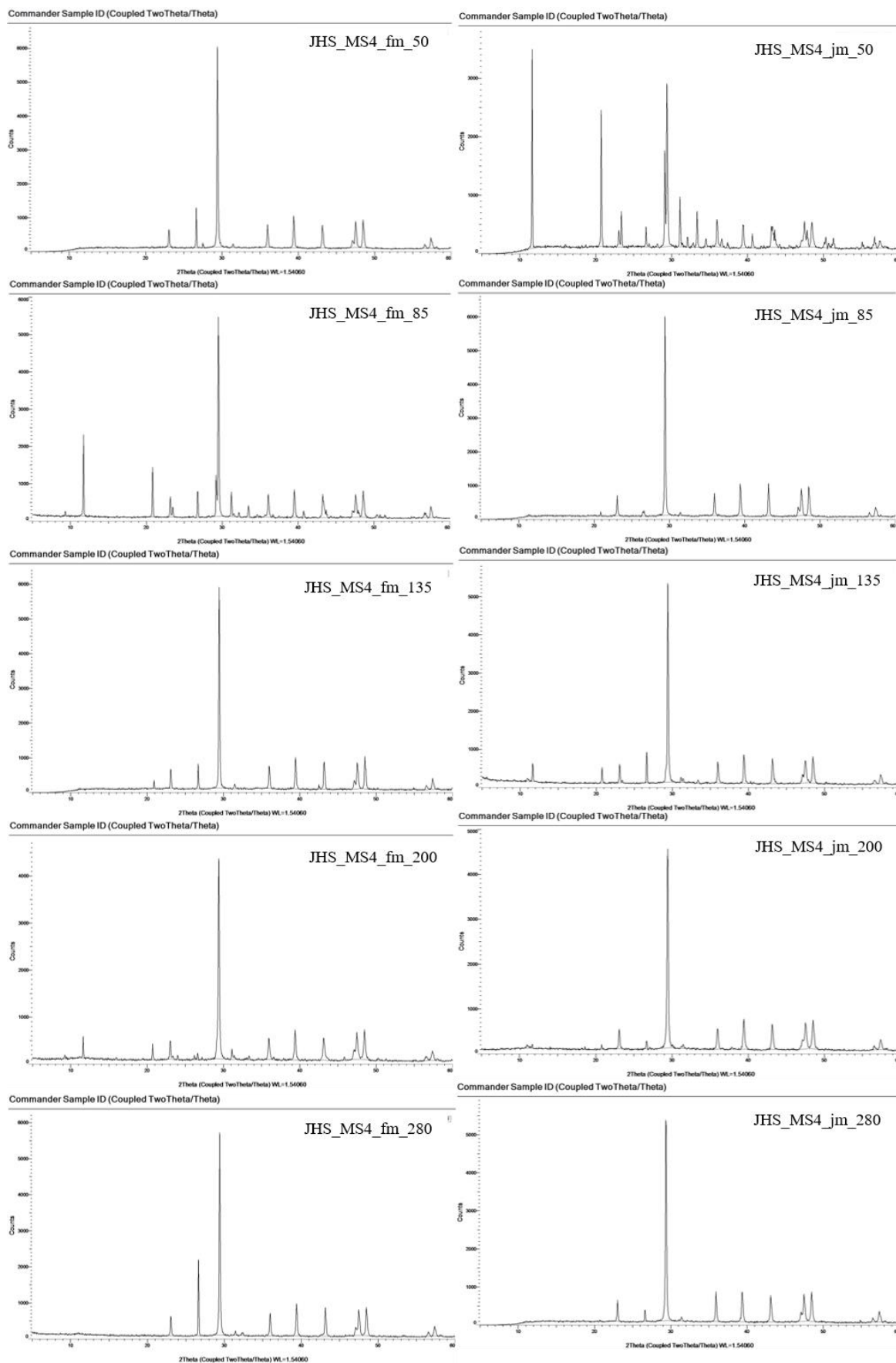
Διάγραμμα 20 Γωνιογράμματα Φατνώματος JHS_MS1



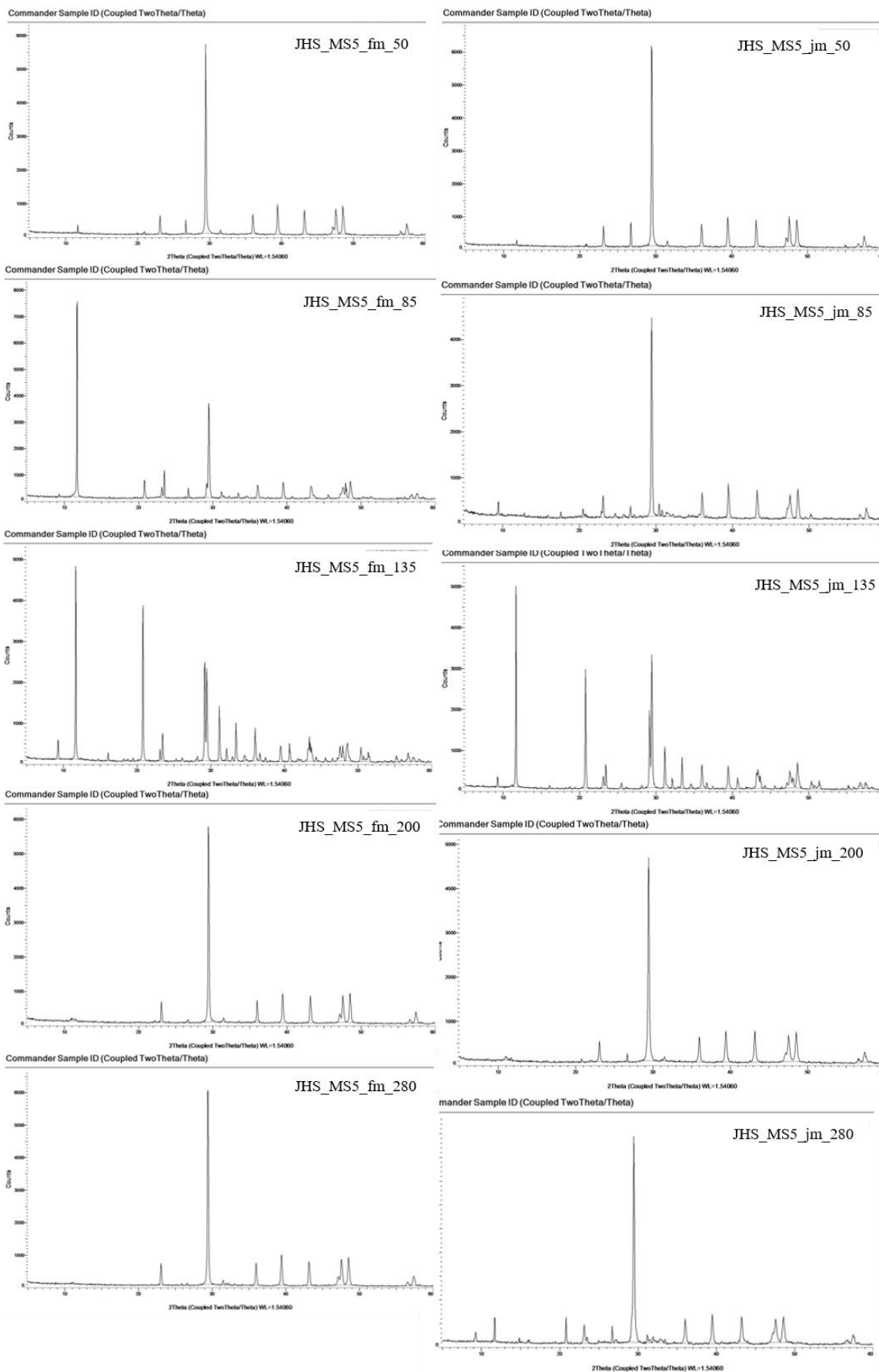
Διάγραμμα 21 Γωνιογράμματα Φατνόματος JHS_MS2



Διάγραμμα 22 Γωνιογράμματα Φατόματος JHS_MS3



Διάγραμμα 23 Γωνιογράμματα Φατνόματος JHS_MS4



Διάγραμμα 24 Γωνιογράμματα Φατνόματος JHS_MS4

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά στα οποία εμφανίζεται η κάθε ομάδα ανά φάτνωμα, ανά είδος κονιάματος και συνολικά.

Πίνακας 18 Ποσοστά Κατηγοριοποίηση Κονιαμάτων Νότια Όψη

Φάτνωμα	Είδος κονιάματος	% Κατηγοριών			
		Ασβέστη	Ασβέστη παρουσία Γύψου	Γυψοκονίαμα	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη
S1	Συμπλήρωσης	60	20	20	0
	Αρμού	20	0	80	0
S2	Συμπλήρωσης	0	50	25	25
	Αρμού	50	0	0	50
S3	Συμπλήρωσης	80	0	0	20
	Αρμού	20	0	40	40
S4	Συμπλήρωσης	60	40	0	0
	Αρμού	60	20	20	0
S5	Συμπλήρωσης	60	0	40	0
	Αρμού	60	20	20	0
Νότια Όψη (S1-S5)	Συμπλήρωσης	54	21	17	8
	Αρμού	41	9	36	14
	Συνολικά	48	15	26	11

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης του S1 είναι Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα είναι Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Γύψου, σε αντίθεση τα κονιάματα αρμού του ίδιου φατνώματος είναι κυρίως Γυψοκονιάματα, ενώ τα υπόλοιπα είναι Ασβέστη.

Στο φάτνωμα S2 φαίνεται ότι τα μισά κονιάματα συμπλήρωσης είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου, ενώ τα υπόλοιπα μοιράζονται στη μέση σε Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Τα κονιάματα αρμού του ίδιου φατνώματος φαίνεται εξ ολοκλήρου Ασβέστη με τα μισά να έχουν παρουσία Πορτλαντίτη, αλλά να σημειωθεί ότι υπάρχουν μόνο δύο δείγματα. Στο φάτνωμα S3 εμφανίζεται ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης είναι Ασβέστη με τα υπόλοιπα να είναι Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη (πρόκειται για δύο δείγματα). Τα περισσότερα κονιάματα αρμού του S3 είναι Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη σε ίσα ποσοστά, ενώ τα υπόλοιπα είναι Ασβέστη. Στο φάτνωμα S4 φαίνεται ότι η πλειονότητα των κονιαμάτων συμπλήρωσης και αρμού είναι Ασβέστη και τα υπόλοιπα είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου για τα συμπλήρωσης και Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Γύψου για τα αρμού (σε ίσα ποσοστά). Στο φάτνωμα S5 εμφανίζεται μία όμοια κατάσταση όπου τα περισσότερα κονιάματα και συμπλήρωσης και αρμού είναι Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα είναι Γυψοκονιάματα για τα συμπλήρωσης και Γυψοκονιάματα και Ασβέστη παρουσία Γύψου για τα αρμού (σε ίσα ποσοστά).

Συνολικά, παρουσιάζεται ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης είναι Ασβέστη, ενώ τα υπόλοιπα με φθίνουσα σειρά είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου, Γυψοκονιάματα και τέλος Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Ομοίως, η πλειονότητα των κονιαμάτων αρμού φαίνεται να είναι Ασβέστη (λιγότερο ποσοστό από αυτό των συμπλήρωσης) και τα υπόλοιπα να είναι Γυψοκονιάματα μετά Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη και τέλος Ασβέστη παρουσία Γύψου. Τέλος, συνολικά η Νότια Όψη φαίνεται να έχει κυρίως κονιάματα Ασβέστη, μετά να ακολουθούν τα Γυψοκονιάματα, έπειτα τα Ασβέστη παρουσία Γύψου και τέλος τα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη.

Στα 14 εκ των 46 δειγμάτων ταυτοποιήθηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, δηλαδή στο 30% των δειγμάτων.

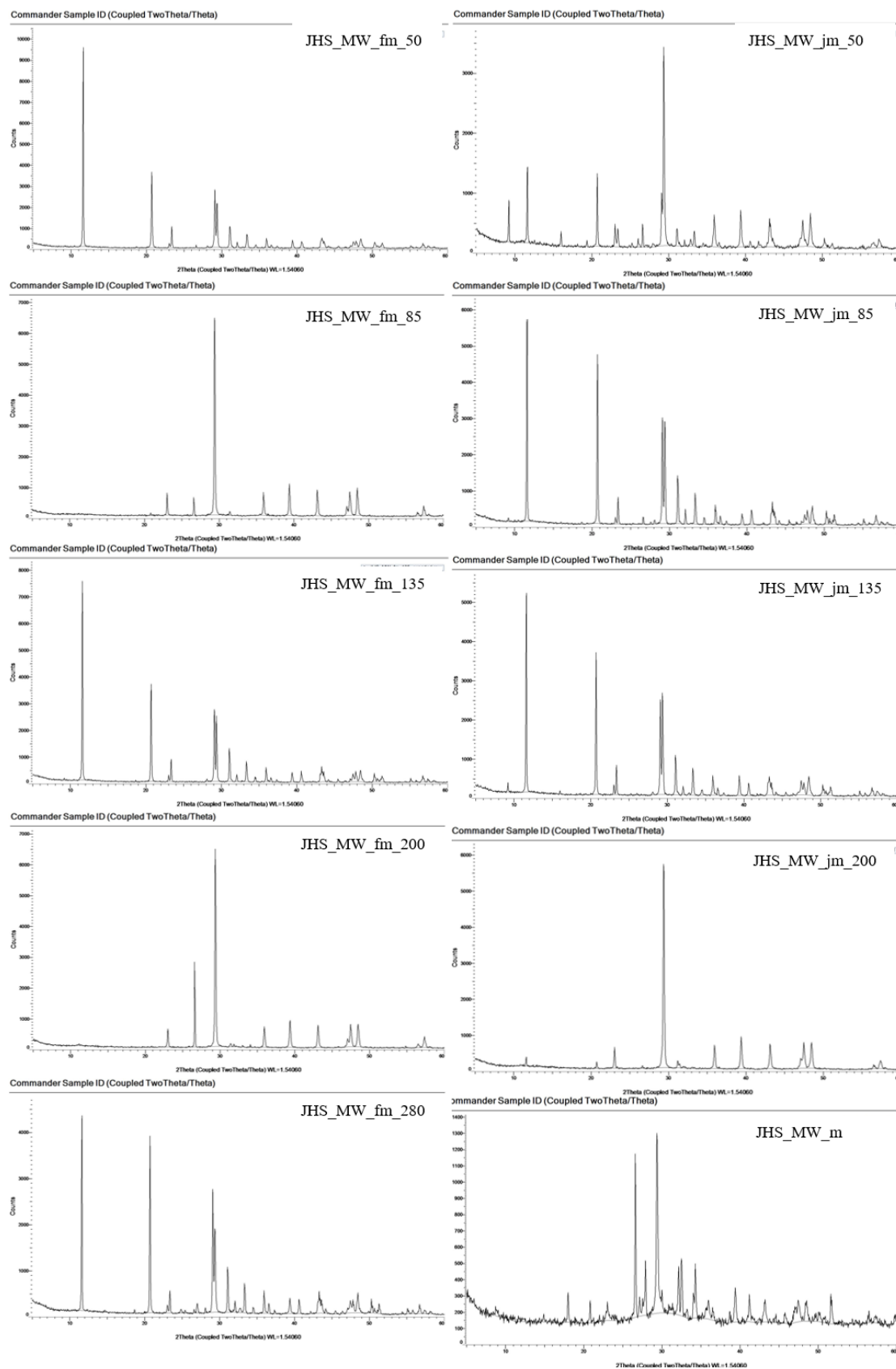
Δυτική Όψη

Αρχικά, στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κοιταγμάτων της Δυτικής Όψης.

Πίνακας 19 Πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις της Δυτικής Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
W	JHS_MW_fm_50	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MW_fm_85	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MW_fm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	
	JHS_MW_fm_200	Ασβεστίτης	
	JHS_MW_fm_280	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MW_jm_50	Ασβεστίτης, Γύψος	Θωμασίτης, Χαλαζίας
	JHS_MW_jm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης, Χαλαζίας
	JHS_MW_jm_135	Γύψος, Ασβεστίτης	Ζουραυσκίτης
	JHS_MW_jm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας,
	JHS_MW_m	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Αλβίτης

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γωνιογράμματα της όψης.



Διάγραμμα 25 Γωνιογράμματα Φατώματος της Δυτικής Όψης

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά στα οποία εμφανίζεται η κάθε ομάδα ανά φάτνωμα, ανά είδος κονιάματος και συνολικά.

Πίνακας 20 Ποσοστά Κατηγοριοποίηση Κονιαμάτων Δυτικής όψης

Φάτνωμα	Είδος κονιάματος	% Κατηγοριών			
		Ασβέστη	Ασβέστη παρουσία Γύψου	Γυψοκονίαμα	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη
W	Συμπλήρωσης	40	0	60	0
	Αρμού	25	25	50	0
	Συνολικά	33	11	56	0

Από το παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης της δυτικής όψης είναι Γυψοκονιάματα και τα υπόλοιπα είναι Ασβεστίτη. Ομοίως τα μισά κονιάματα αρμού της όψης αυτής είναι Γυψοκονιάματα, αλλά τα υπόλοιπα μοιράζονται στη μέση σε Ασβέστη και Ασβέστη παρουσία Γύψου. Συνολικά στην όψη αυτή τα περισσότερα κονιάματα είναι Γυψοκονιάματα και ακολουθούν αυτά του Ασβέστη και τέλος του Ασβέστη παρουσία Γύψου.

Στα 2 εκ των 10 δειγμάτων ταυτοποιήθηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, δηλαδή στο 20% των δειγμάτων.

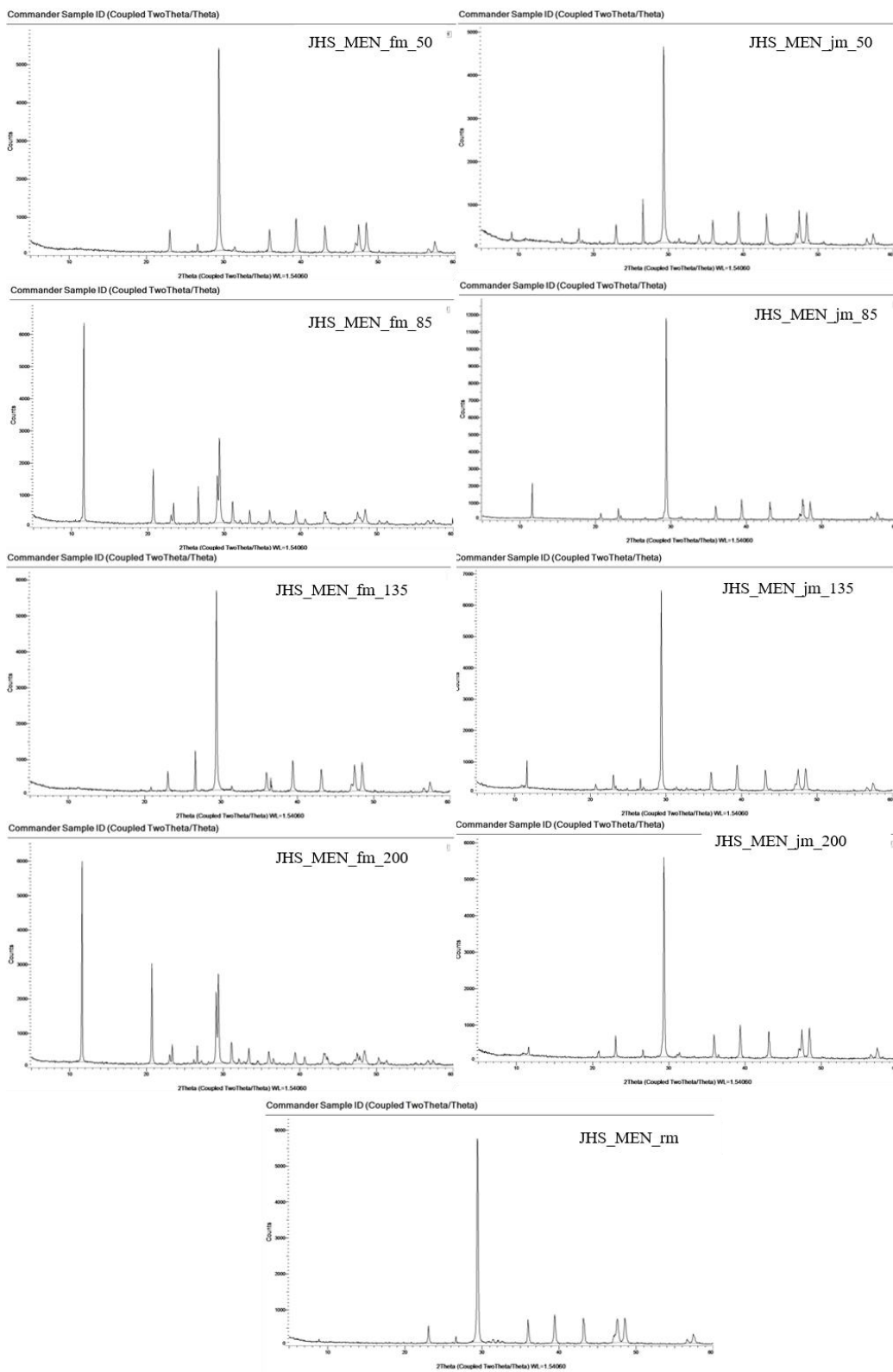
Ανατολική Όψη

Αρχικά, στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων της Δυτικής Όψης.

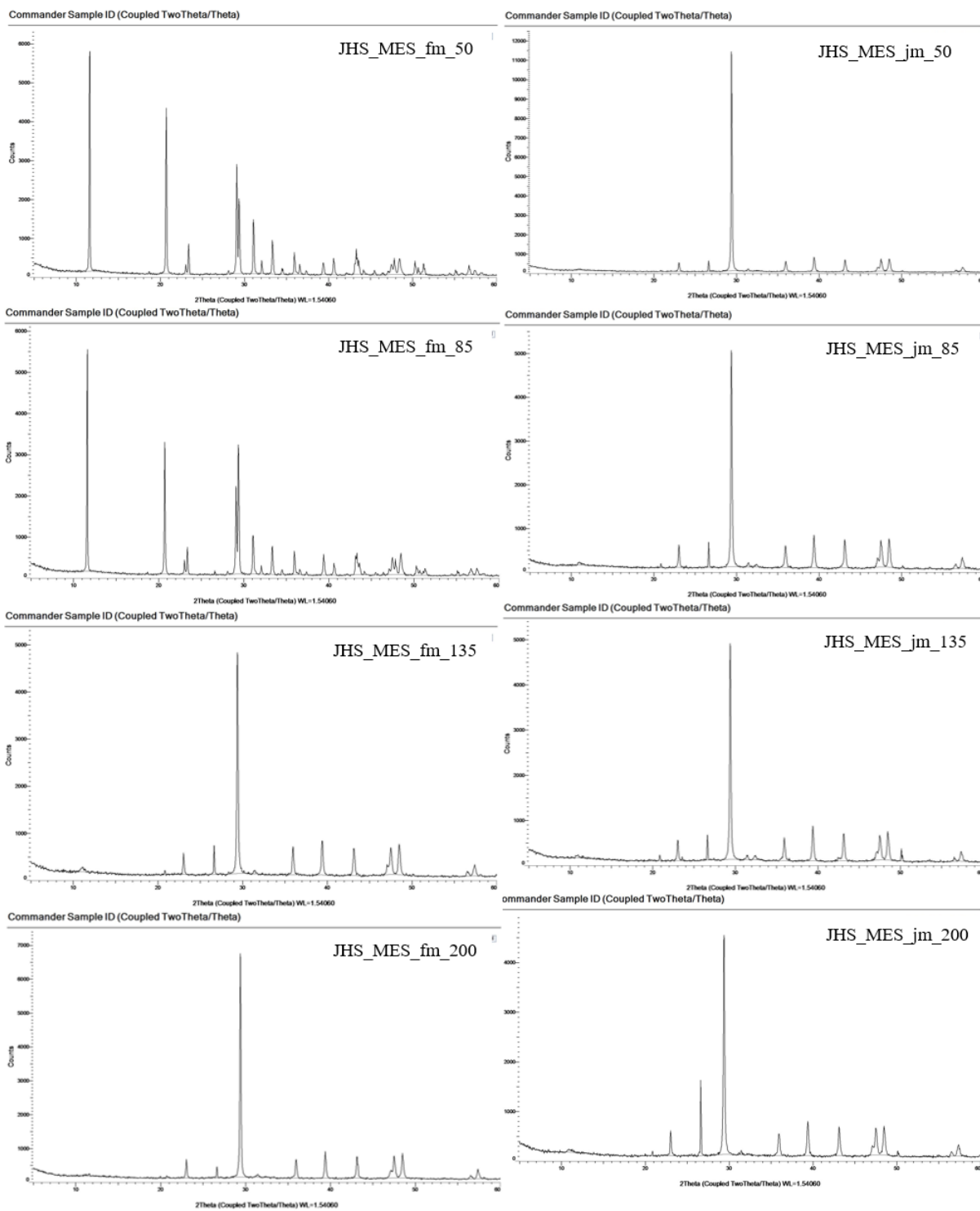
Πίνακας 21 Πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις της Ανατολικής Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
ES	JHS_MES_fm_50	Γύψος, Ασβεστίτης	
	JHS_MES_fm_85	Γύψος, ,Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MES_fm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας,
	JHS_MES_fm_200	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MES_jm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MES_jm_85	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Γελενίτης
	JHS_MES_jm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MES_jm_200	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
EN	JHS_MEN_fm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MEN_fm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας,
	JHS_MEN_fm_135	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
	JHS_MEN_fm_200	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Αραγονίτης
	JHS_MEN_jm_50	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Πορτλαντίτης, Ετρινγκίτης
	JHS_MEN_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MEN_jm_135	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MEN_jm_200	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας
	JHS_MEN_rm	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Χλωριούχο Νάτριο, Δολομίτης

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γωνιογράμματα της όψης ανά φάτνωμα.



Διάγραμμα 26 Γωνιογράμματα Φατνώματος JHS_MEN (Βόρειο-Ανατολική όψη)



Διάγραμμα 27 Γωνιογράμματα Φατνώματος JHS_MES (Νότιο-Ανατολική όψη)

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά στα οποία εμφανίζεται η κάθε ομάδα ανά φάτνωμα, ανά είδος κονιάματος και συνολικά.

Πίνακας 22 Ποσοστά Κατηγοριοποίηση Κονιαμάτων Ανατολικής όψης

Φάτνωμα	Είδος κονιάματος	% Κατηγοριών			
		Ασβέστη	Ασβέστη παρουσία Γύψου	Γυψοκονίαμα	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη
ES	Συμπλήρωσης	50	0	50	0
	Αρμού	100	0	0	0
EN	Συμπλήρωσης	50	0	50	0
	Αρμού	50	50	0	0
Ανατολική Όψη (ES-EN)	Συμπλήρωσης	50	0	50	0
	Αρμού	75	25	0	0
	Συνολικά	63	13	25	0

Από το παραπάνω πίνακα συνάγεται το συμπέρασμα ότι στο νοτιοανατολικό φάτνωμα τα μισά κονιάματα συμπλήρωσης είναι Ασβέστη, ενώ τα άλλα μισά είναι Γυψοκονιάματα. Σε αντίθεση όλα τα κονιάματα αρμού αυτού του φάτνωματος είναι Ασβέστη. Στο βορειοανατολικό φάτνωμα τα κονιάματα συμπλήρωσης και αρμού εμφανίζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με τα κονιάματα συμπλήρωσης του νοτιοανατολικού φάτνωματος, δηλαδή τα μισά είναι Ασβέστη, ενώ τα άλλα μισά είναι Γυψοκονιάματα. Στα κονιάματα αρμού όμως τα μισά είναι Ασβέστη και τα άλλα μισά είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου. Έτσι, όλα τα κονιάματα συμπλήρωσης της ανατολικής όψης εμφανίζονται να είναι τα μισά Ασβέστη και τα άλλα μισά Γυψοκονιάματα, ενώ η πλειονότητα των αρμού φαίνεται να είναι Ασβέστη και τα υπόλοιπα να είναι Ασβέστη παρουσία Γύψου. Συνολικά σε όλη την Ανατολική όψη η πλειονότητα βρίσκεται στα κονιάματα Ασβέστη, με τα Γυψοκονιάματα να ακολουθούν και τέλος το χαμηλότερο ποσοστό να το έχουν τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία Γύψου.

Σε ένα εκ των 8 δειγμάτων του EN ταυτοποιήθηκε εντριγκίτης, ενώ στο φάτνωμα ES δεν παρατηρείται κορυφή που να αντιστοιχεί σε αυτήν την ορυκτολογική ένωση, σε κανένα δείγμα.

Στον επόμενο πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης των κονιαμάτων όλου του μνημείου ανά είδος κονιάματος και συνολικά.

Πίνακας 23 Ποσοστά Κατηγοριοποίηση Κονιαμάτων όλου του μνημείου

Είδος κονιάματος	% Κατηγοριών			
	Ασβέστη	Ασβέστη παρουσία Γύψου	Γυψοκονίαμα	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη
Κονιάματα Συμπλήρωσης	53	10	32	5
Κονιάματα Αρμού	44	24	22	10
Συνολικά	48	17	27	8

Από τον παραπάνω πίνακα συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα περισσότερα κονιάματα συμπλήρωσης και αρμού είναι Ασβέστη με τα συμπλήρωσης να εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό. Στα κονιάματα συμπλήρωσης η επόμενη μεγάλη κατηγορία είναι τα Γυψοκονιάματα και ακολουθούν τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία Γύψου και τέλος τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Στα κονιάματα αρμού αντίστοιχα, σε όμοια ποσοστά μεταξύ τους, ακολουθούν τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία Γύψου και Γυψοκονιάματα και τέλος του Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Συνεπώς, εξετάζοντας της

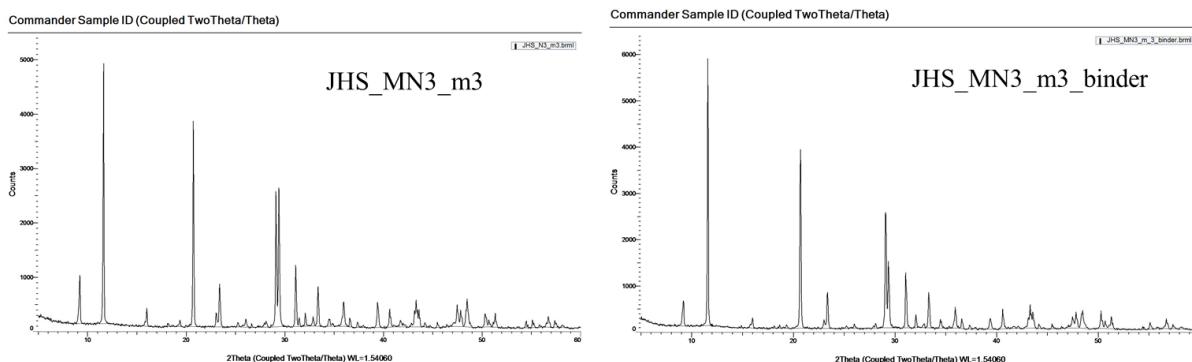
κατηγορίες σε όλες της όψεις και σε όλα τα είδη κονιαμάτων στο μνημείο (συμπλήρωσης και αρμού) γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα κονιάματα είναι Ασβέστη στο 48%, ακολουθούν τα Γυψοκονιάματα στο 27%, έπειτα τα Ασβέστη παρουσία Γύψου στο 17% και τέλος τα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη στο 8%.

Εξέταση Κονιών με την Περίθλαση Ακτίνων Χ

Πίνακας 24 Πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κονιών σε σύγκριση με το ολικό κονίαμα

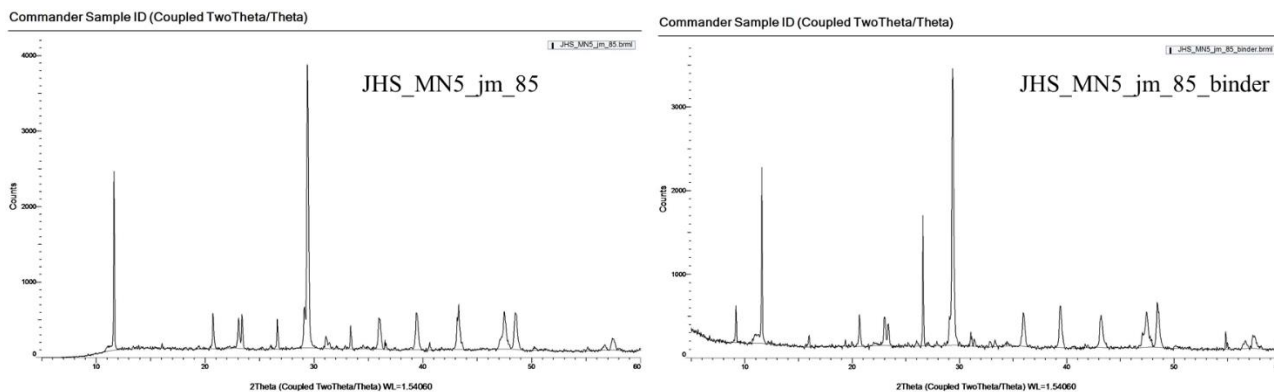
Κωδικός Δείγματος	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
JHS_N3_m3	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, Θωμασίτης, Εντριγκίτης
JHS_N3_m3_binder	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης
JHS_MN5_jm_85	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
JHS_MN5_jm_85_binder	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
JHS_MN5_jm_200	Πορτλαντίτης, Ασβεστίτης	Εντριγκίτης, Βρουσίτης
JHS_MN5_jm_200_binder	Πορτλαντίτης, Ασβεστίτης	Εντριγκίτης
JHS_MS5_jm_280	Ασβεστίτης, Γύψος	Χαλαζίας, Θωμασίτης
JHS_MS5_jm_280_binder	Ασβεστίτης, Γύψος	Θωμασίτης
JHS_MW_jm_85	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης, Χαλαζίας
JHS_MW_jm_85_binder	Γύψος, Ασβεστίτης	Θωμασίτης
JHS_MES_jm_50	Ασβεστίτης	Χαλαζίας
JHS_MES_jm_50_binder	Ασβεστίτης	Χαλαζίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γωνιογράμματα που προέκυψαν από τη περίθλαση ακτίνων Χ των κονιών των κονιαμάτων στα οποία έγινε ο φυσικό διαχωρισμός των αδρανών και της κονιάς. Τα γωνιογράμματα τοποθετούνται σε σύγκριση με την ολικό κονίαμα του κάθε δείγματος.



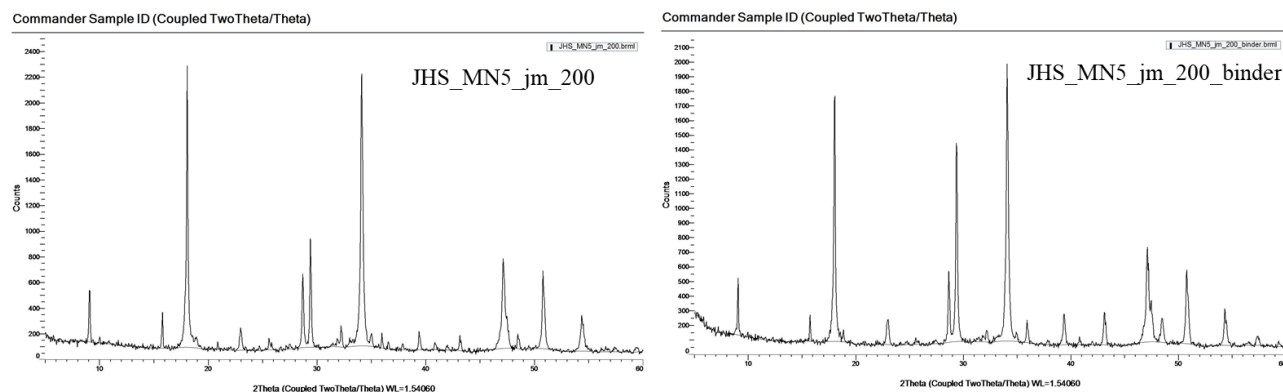
Διάγραμμα 28 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MN3_m3 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του N3_m3 παρατηρείται ότι η κορυφή του Γύψου είναι ελαφρώς αυξημένη, ενώ του ασβεστίτης ελαφρώς μειωμένη στο γωνιόγραμμα της κονιάς. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι στα αδρανή του συγκεκριμένου κονιάματος είναι κυρίως ασβεστιτικά. Ακόμη, η κορυφή του θωμασίτη είναι ελαφρώς αυξημένη στο γωνιόγραμμα του συνολικού κονιάματος, άρα ο θωμασίτης που περιέχεται στο κονίαμα δεν προκύπτει από φθορά του κονιάματος, αλλά πιθανώς να βρίσκεται ως ορυκτό στα αδρανή του κονιάματος.



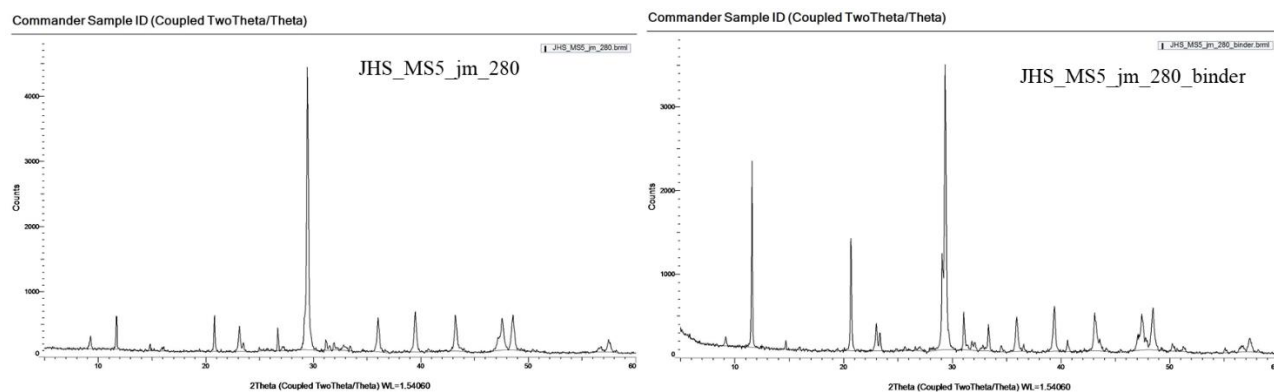
Διάγραμμα 29 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MN5_jm_85 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του N5_jm_85 παρατηρείται η εμφάνιση της κορυφής του θωμασίτη στο γωνιόγραμμα της κονιάς του δείγματος, άρα ο θωμασίτης που περιέχεται στο κονιάμα προκύπτει από φθορά του κονιάματος.



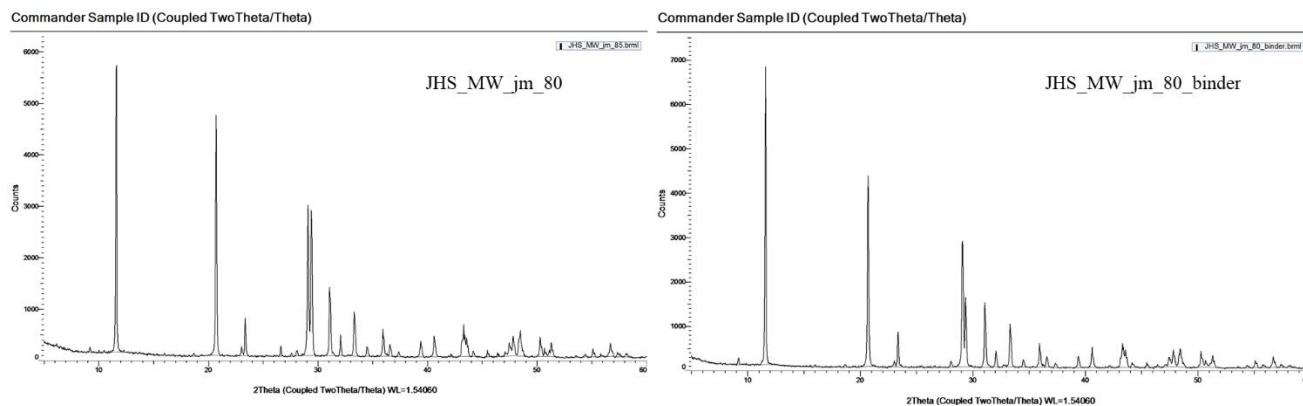
Διάγραμμα 30 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MN5_jm_200 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του N5_jm_200 παρατηρείται ότι η κορυφή του ασβεστίτη είναι ελαφρώς μειωμένη στη κονία του δείγματος και ότι υπάρχει αυξημένη ποσότητα εντριγκίτη και πορτλαντίτη τόσο στη κονία όσο και στο ολικό γωνιόγραμμα του κονιάματος.



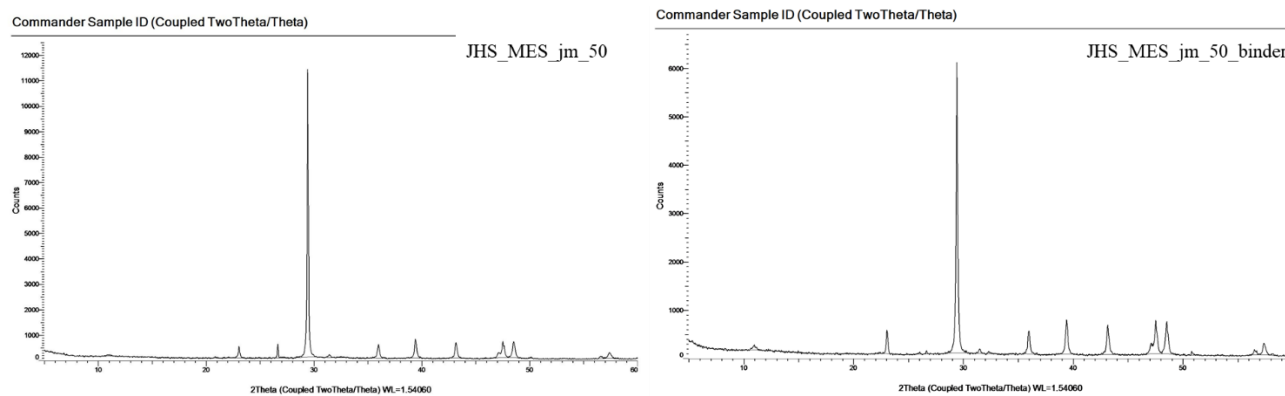
Διάγραμμα 31 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MS5_jm_280 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του S5_jm_280 παρατηρείται ότι η κορυφή του Γύψου είναι αυξημένη, στο γωνιόγραμμα της κονιάς. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι στα αδρανή του συγκεκριμένου κονιάματος είναι κυρίως ασβεστιτικά. Ο θωμασίτης εμφανίζεται με την ίδια ένταση τόσο στη κονία όσο και στο ολικό κονίαμα, άρα μάλλον παρουσιάζεται και ως φθορά και ως ορυκτό στα αδρανή του κονιάματος.



Διάγραμμα 32 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MW_jm_80 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του W_jm_80 παρατηρείται ότι η κορυφή του Γύψου είναι ελαφρώς αυξημένη, στο γωνιόγραμμα της κονιάς. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι στα αδρανή του συγκεκριμένου κονιάματος είναι κυρίως ασβεστιτικά.



Διάγραμμα 33 Γωνιόγραμμα του δείγματος JHS_MES_jm_50 (αριστερά) και της κονιάς του (δεξιά)

Από τη σύγκριση των κορυφών στα παραπάνω διαγράμματα του ES_jm_50 παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ του ολικού κονιάματος και της κονιάς του. Και τα δύο διαγράμματα εμφανίζουν κορυφές κυρίως του ασβεστίτη και μία μικρή ποσότητα χαλαζία.

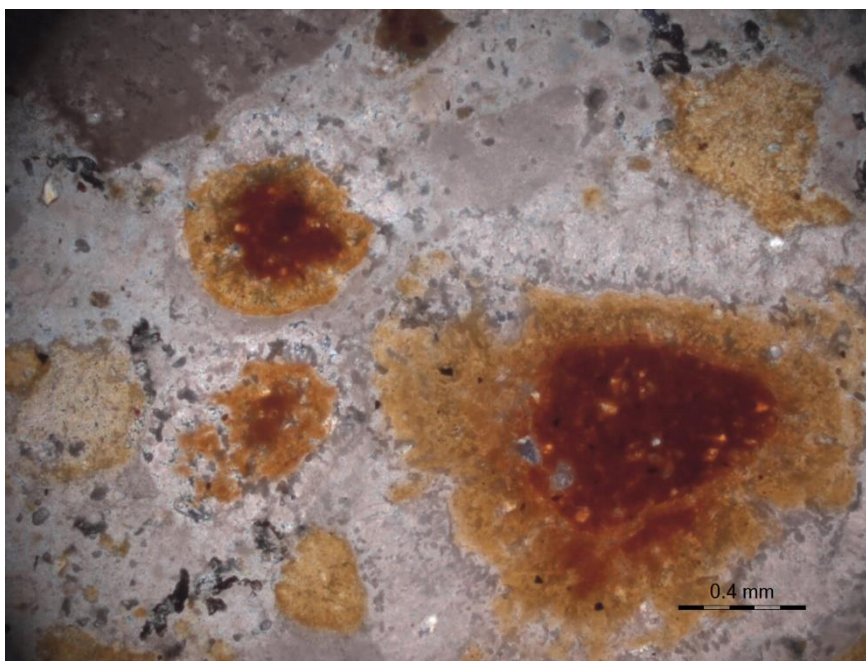
4.1.4 Οπτική Μικροσκοπία

Οπτική μικροσκοπία εφαρμόστηκε για τον πετρογραφικό έλεγχο δυο δειγμάτων (αφού διαμορφώθηκαν σε λεπτές τομές), χρησιμοποιώντας ένα πολωτικό μικροσκόπιο ZEISS-AXIOSKOP 40, ενώ για την λήψη των εικόνων που παρατίθενται στην παρούσα ενότητα, χρησιμοποιήθηκε μια ProgRes-C14PLUS κάμερα και το λογισμικό ProgRes Capture Pro2.1. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του ΙΓΜΕ, όπου και διαμορφώθηκαν οι λεπτές τομές.

Δείγμα JHS MW jm 50

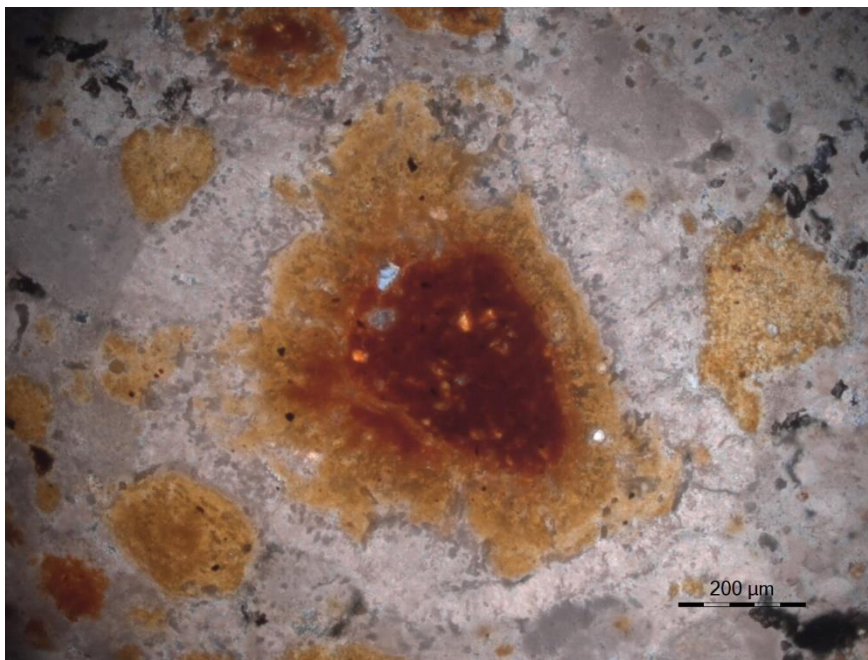
Πρόκειται για κονίαμα αρμού που ελήφθη από την δυτική τοιχοποιία του Ιερού Κουβουκλίου, σε ύψος 50 cm από την κατώτατη κορνίζα, όπως εμφανίζεται και στο κεφάλαιο της δειγματοληψίας. Στο κονίαμα παρατηρήθηκαν πλήθος αδρανών, ενώ παρατηρήθηκε και η κονία. Παράλληλα, εντοπίστηκαν και συσσωματώματα διαφόρων ειδών.

Αρχικά, όπως παρουσιάζεται και στις επόμενες εικόνες, εμφανίζεται συστηματικά ένα συγκεκριμένο είδος συσσωματώματος στη κονία. Πρόκειται για συσσωμάτωμα το οποίο περιέχει μίγμα χαλαζία και ασβεστίτη, καθώς και οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου. Παράλληλα, παρατηρούνται και υγιή οξειδία σιδήρου, τα οποία πρόκεινται για το ίδιο σιδηρούχο υλικό, χωρίς όμως να έχει υποστεί οξείδωση (πιθανότατα πρόκειται για αιματίτη ή τιτανοαιματίτη), όπως εμφανίζεται και σε επόμενη εικόνα με ανακλώμενο φως. Τα μη οξειδωμένα οξειδία του σιδήρου κυμαίνονται σε μέγεθος μεταξύ 4-5µm. Αυτά πιθανότατα αποτελούν πρόσθετο του κονιάματος και ίσως πρόκειται για ρινίσματα μεταλλικού υλικού που προστέθηκαν κατά την ανάμιξη και παρασκευή του κονιάματος, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι εντοπίζονται κυρίως στην μάζα του συσσωματώματος, συνεπώς ίσως να αποτελούν πρόσθετο του τεχνητού αυτού συσσωματώματος.



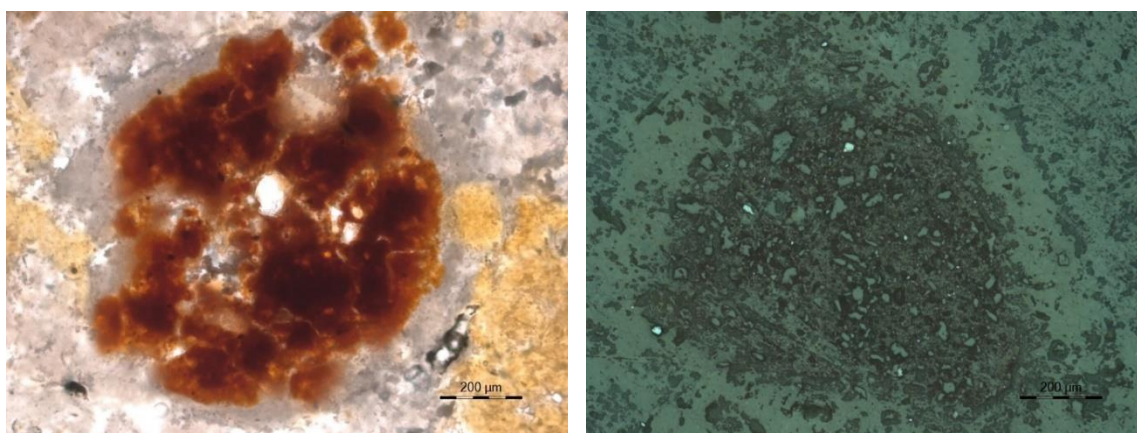
Εικόνα 59 Συσσωματώματα με μίγμα οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου, χαλαζία και ασβεστίτη, (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό, μεγέθυνση X50),

Το συσσωμάτωμα αυτό παρατηρείται να έχει μία διακριτή και βαθμιαία διάχυση οξειδωμένου υλικού από το συσσωμάτωμα προς την κονία που το περιβάλλει, κάτι το οποίο παρατηρείται συστηματικά στα συσσωματώματα αυτού του τύπου στο JHS_MW_jm_50.



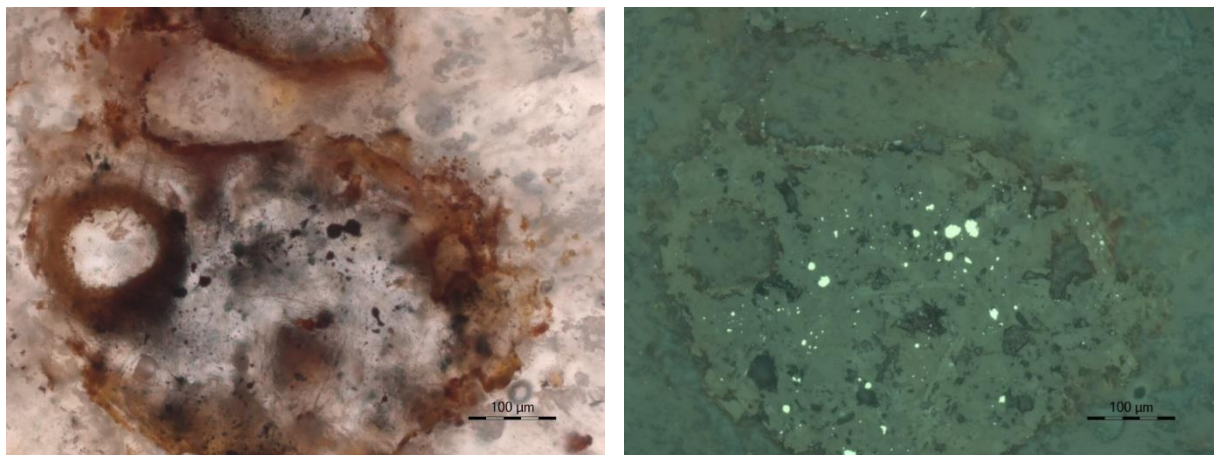
Εικόνα 60 Σταδιακή διάχρωση του οξειδωμένου υλικού (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X100),

Λόγω της δομής και του χρώματος αυτού του συσσωματώματος συνάγεται το συμπέρασμα ότι πρόκειται για κεραμικό στοιχείο το οποίο έχει φθαρθεί. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται πλήρως η δομή του μείγματος αυτού, ενώ μπορούν να παρατηρηθούν και τα αυτούσια υγιή μεταλλικά στοιχεία μέσω του ανακλώμενου φωτός.

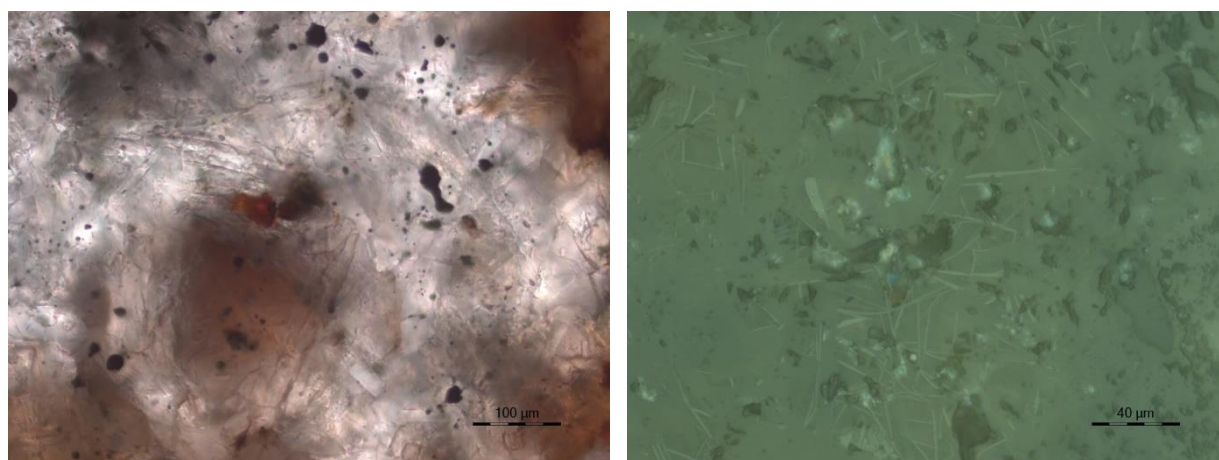


Εικόνα 61 Δομή φθαρμένου κεραμικού υλικού (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols (αριστερά) και με ανακλώμενο φως (δεξιά), μεγέθυνση X100)

Εκτός από τη δομή του κεραμικού που περιεγράφηκε παραπάνω, παρατηρείται και ένα άλλο είδος συσσωματώματος. Πρόκειται για ένα δευτερογενές υλικό (συσσωμάτωμα) με αρκετά μεταλλικά στοιχεία, όπως φαίνεται και στην επόμενη αντίστοιχη εικόνα με ανακλώμενο φως. Το συσσωμάτωμα αυτό διαφοροποιείται από τον τύπο συσσωματώματος που περιεγράφηκε στις προηγούμενες εικόνες. Εσωτερικά εμφανίζει πρισματικούς και βελονοειδείς (tabular) κρυστάλλους και πιθανώς πρόκειται για κρυστάλλους εντριγκίτη, πιθανότατα με ταυτόχρονη παρουσία κρυστάλλων γύψου.

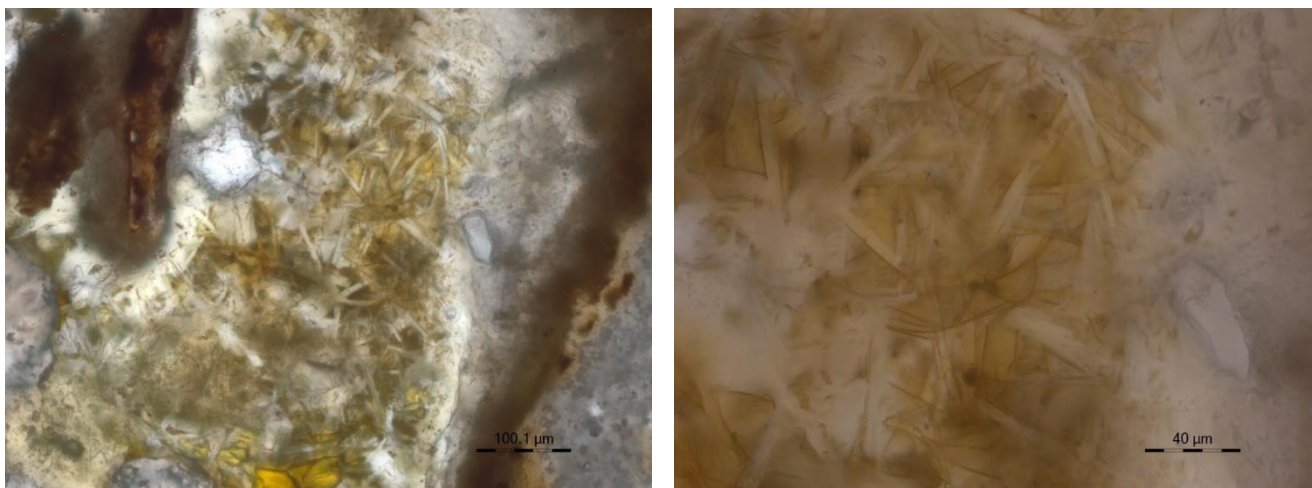


Εικόνα 62 Συσσωμάτωμα εντριγκίτη-γύψου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό (αριστερά) και με ανακλώμενο φως(δεξιά), μεγέθυνση X200)



Εικόνα 63 Συσσωμάτωμα εντριγκίτη-γύψου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό(αριστερά) μεγέθυνση X200, και με ανακλώμενο φως(δεξιά), μεγέθυνση X500)

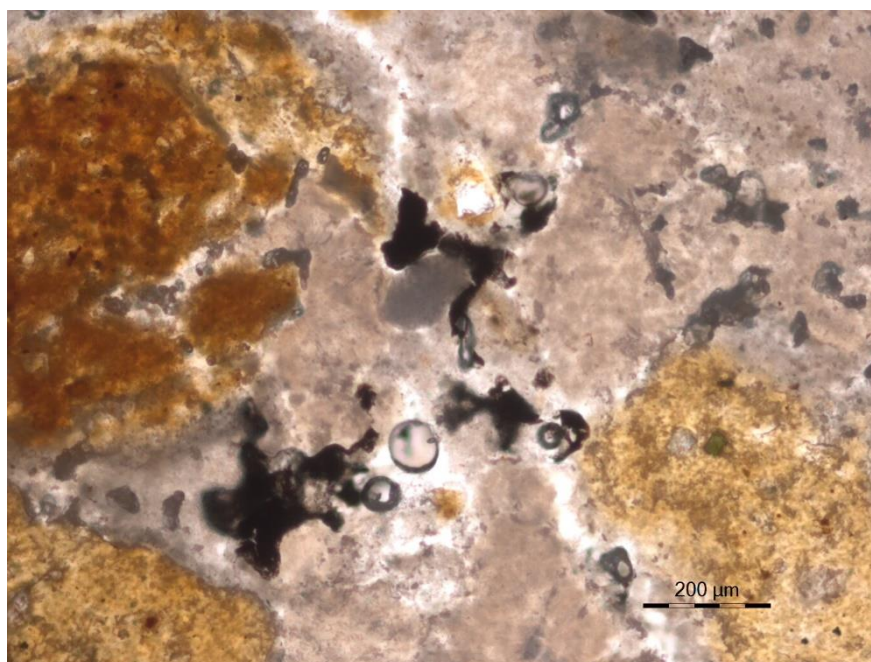
Στην ίδια περιοχή του δείγματος, αλλά αυτή τη φορά υπό ανακλώμενο φως, παρατηρούνται και πάλι οι κρύσταλλοι του εντριγκίτη και γύψου. Οι διαστάσεις των βελονοειδών κρυστάλλων (πιθανότατα εντριγκίτη) φτάνουν έως $1,4\mu\text{m}$ σε πλάτος και $41,45\mu\text{m}$ σε μήκος, ενώ οι κρύσταλλοι γύψου εμφανίζονται με μεγαλύτερη διάμετρο. Το συσσωμάτωμα αυτού του τύπου εμφανίζεται και σε άλλες περιοχές, διάσπαρτα στην μάζα του κονιάματος. Στις παρακάτω εικόνες είναι ευδιάκριτοι τα διαφορετικά είδη κρυστάλλων αυτού του συστήματος



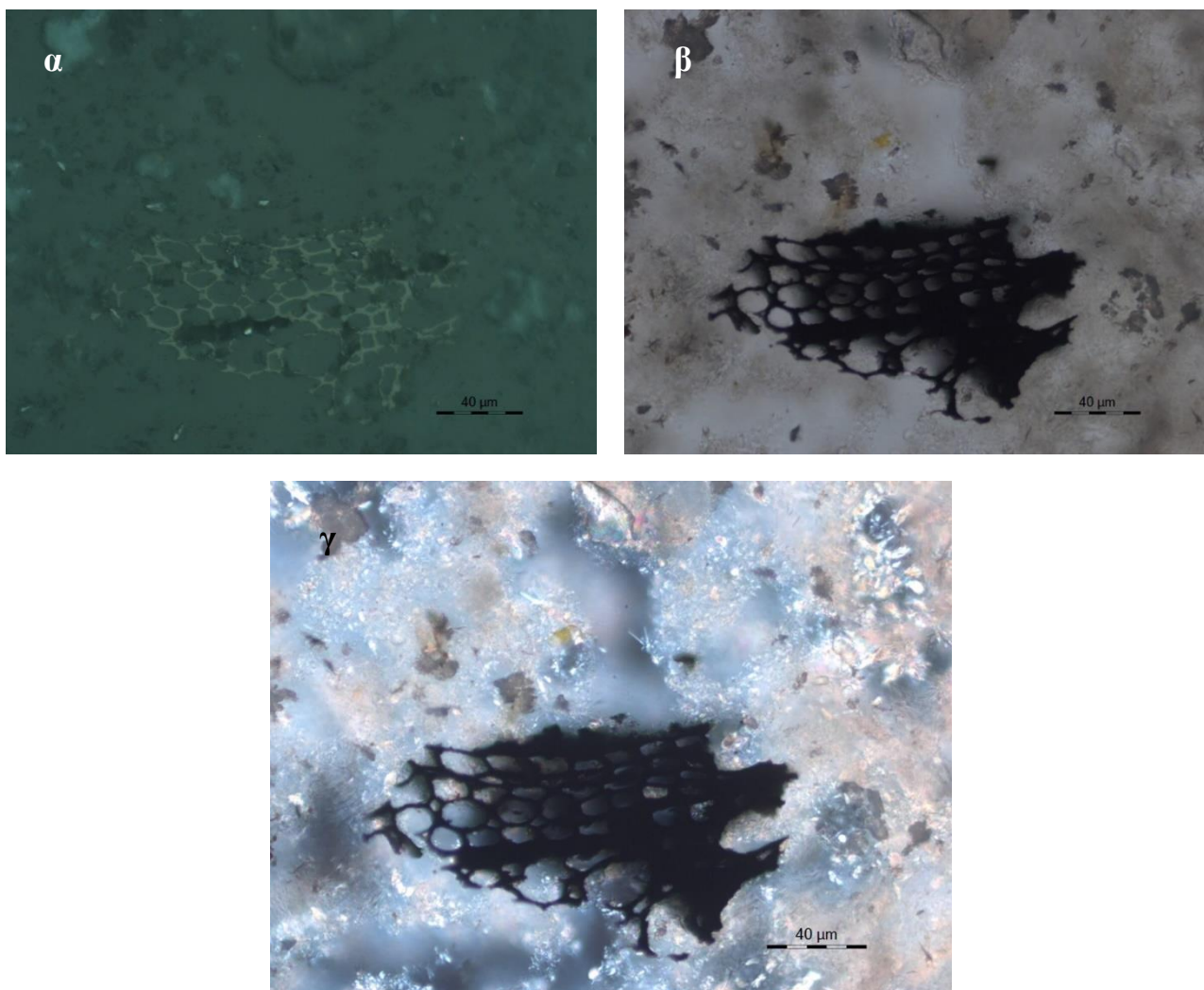
Εικόνα 64 Συσσωμάτωμα εντριγκίτη-γύψου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό, μεγέθυνση X200 (αριστερά) και X500 (δεξιά))

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούνται οι πρισματικοί και βελονοειδής κρύσταλλοι του γύψου και του εντριγκίτη. Καθώς το συσσωμάτωμα αυτού του τύπου φαίνεται να αποτελείται από δευτερογενές υλικό, που αναπτύχθηκε σε κενό χώρο, πιθανότατα η ταυτόχρονη παρουσία γύψου και εντριγκίτη να οφείλεται σε αντίδραση φθοράς σε αυτές τις περιοχές. Το πλάτος των κρυστάλλων του γύψου εμφανίζεται από 5 έως 16μm, ενώ παρουσιάζουν μήκος έως και 40μm, συνεπώς αρκετά μεγαλύτερο πλάτος από τους κρυστάλλους του εντριγκίτη.

Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, παρατηρούνται στη δομή του κονιάματος και σωματίδια κάρβουνου. Τα σωματίδια αυτά παρατηρήθηκαν και μακροσκοπικά. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάποια από τα σωματίδια αυτά, τα οποία, λόγω της δομής τους, πιθανότητα πρόκειται για καμμένα τμήματα ξύλου



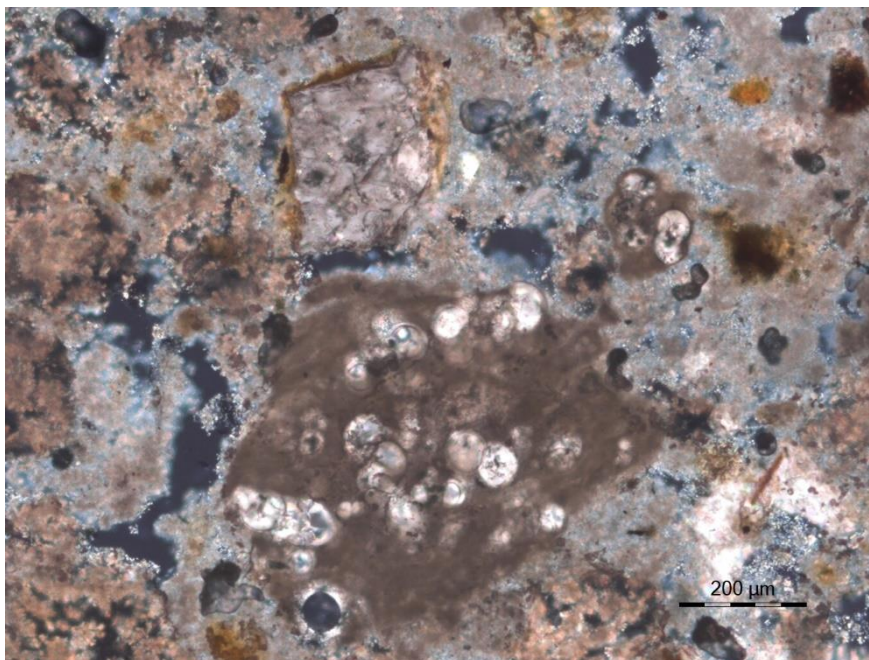
Εικόνα 65 Σωματίδια κάρβουνου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό, μεγέθυνση X100)



Εικόνα 66 Στοιχείο ξύλου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με ανακλώμενο φως (α), με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό (β), με διασταυρωμένα Nicols (γ), μεγέθυνση X500)

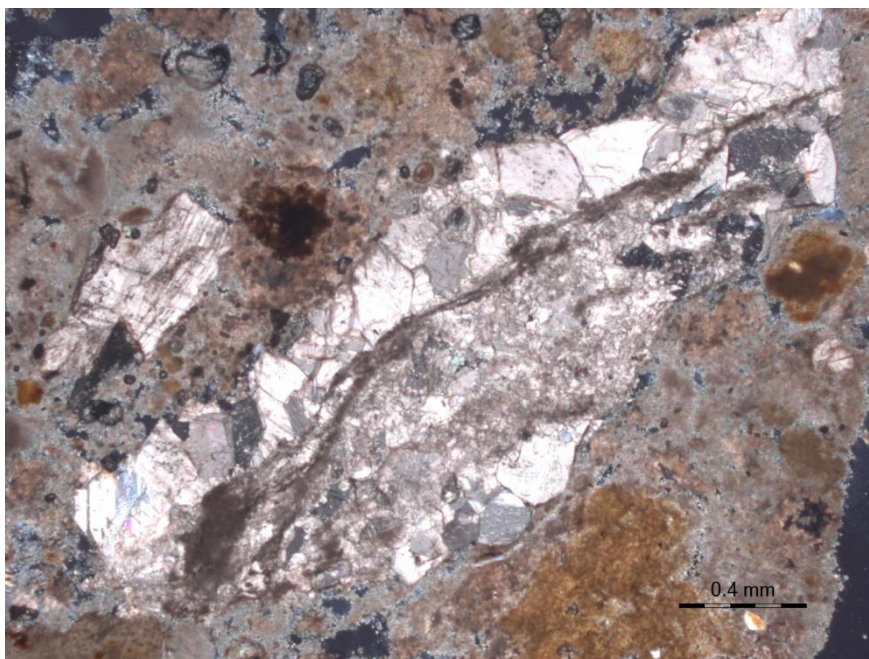
Στις παραπάνω τρεις εικόνες παρατηρείται ένα στοιχείο ξύλου το οποίο έχει καεί (κάρβουνο). Στη τελευταία από αυτές τις εικόνες παρατηρείται ότι η κονία γύρω από το ξύλο περιέχει ασβεστίτη, γύψο, εντριγκίτη και αργιλικά στοιχεία στη μάζας της, αναδεικνύοντας μια περίπλοκη δομή από άποψη σύστασης, τουλάχιστον ανά περιοχές.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα διάφορα αδρανή του δείγματος αυτού, όπως φαίνονται και στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 67 Ασβεστικό αδρανές με απολιθώματα (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X100).

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούνται αρκετά αδρανή ασβεστιτικής φύσεως με εμφανή απολιθώματα κρητιδικής περιόδου (foraminifera). Παράλληλα, η κονία εμφανίζεται ως ασβεστιτικής φύσεως, ενώ παρατηρείται υψηλή παρουσία υπέρλεπτου (ultrafine) αργλικού υλικού, όπως θα σχολιαστεί και παρακάτω. Ακόμη, πάνω από το αδρανές ασβεστιτικής σύστασης παρατηρείται και ένας οξειδωμένος κρύσταλλος ασβεστίτη.



Εικόνα 68 Μεγάλο ασβεστικό αδρανές με αργλικές φλεβώσεις (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X50)

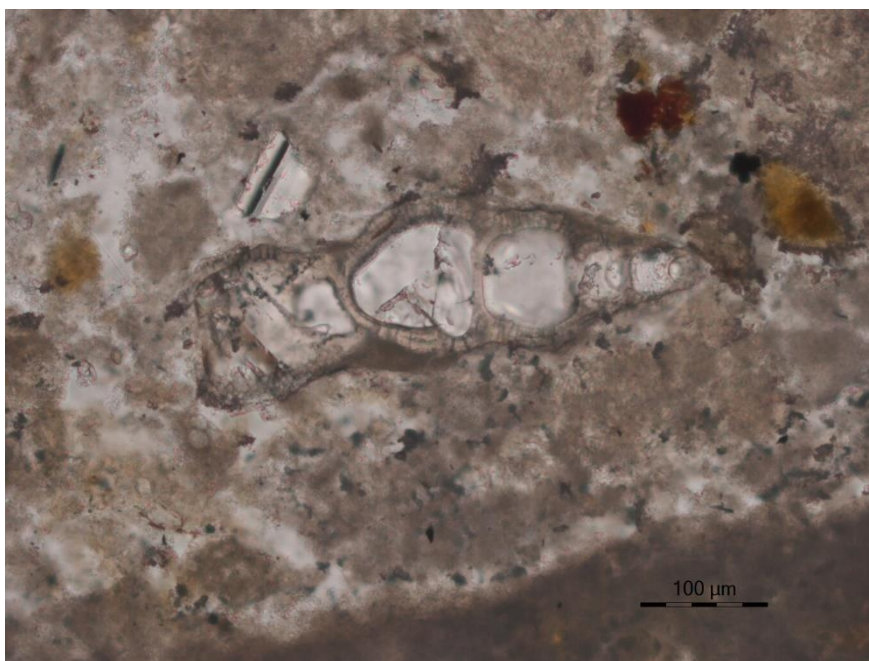
Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούνται αδρανή ασβεστιτικής σύστασης σε διάφορα μεγέθη, που φτάνουν και 2,7mm μήκος. Τα ασβεστικά αδρανή διατρέχονται, ανά περίπτωση, από φλέβες πλούσιες

σε αργιλικό υλικό. Στην παραπάνω εικόνα εμφανίζονται επίσης ένας ασβεστιτικός κρύσταλλος και δύο συσσωματώματα κονιάς (καφέ στοιχεία).



Εικόνα 69 Χαλαζιακό αδρανές (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X100)

Το κίτρινο στοιχείο που παρατηρείται στη μέση της παραπάνω εικόνας είναι θραύσμα χαλαζία (0,33mm). Σε όλη το κονίαμα υπάρχουν διάσπαρτα θραύσματα χαλαζία μεγέθους 100μm-500μm.



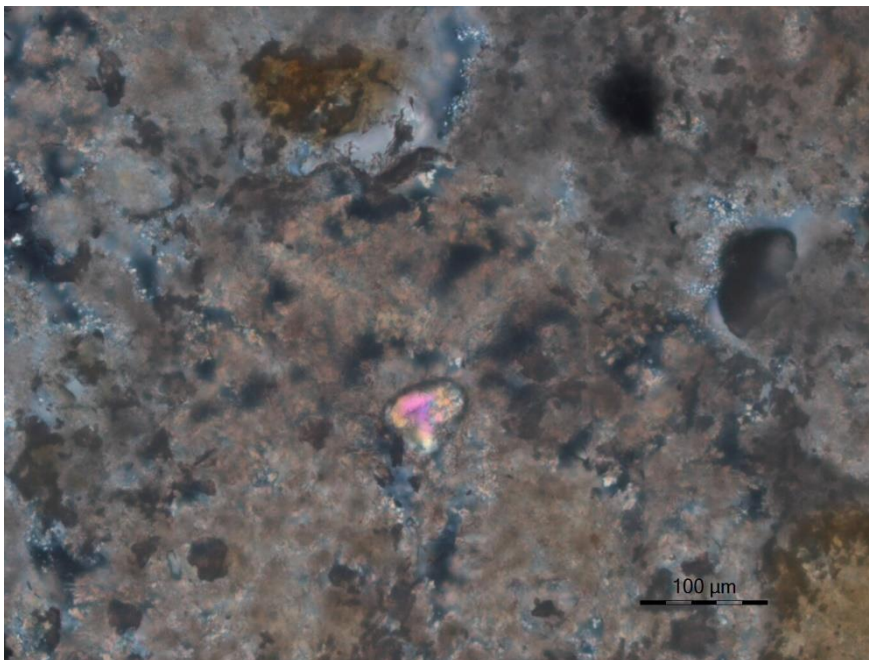
Εικόνα 70 Πλήρες τριματοφόρο απολίθωμα (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φωτισμό, μεγέθυνση X200)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ένα πλήρες τριματοφόρο απολίθωμα. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι πρέπει να χρησιμοποιήθηκε άμμος θαλάσσης (της κρητιδικής ζώνης) ως αδρανές υλικό για την παρασκευή του κονιάματος.



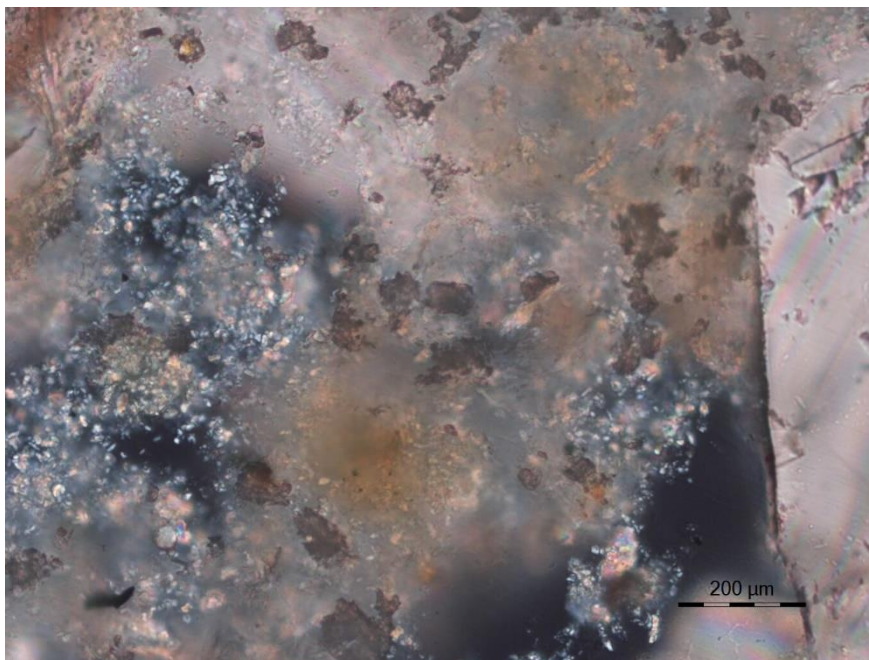
Εικόνα 71 Συλλογή απολιθωμάτων (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X200)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται μία συγκέντρωση πολλών απολιθωμάτων τόσο μέσα σε αδρανή ασβεστιτικής φύσης όσο και μόνα τους μέσα στη κονία του δείγματος.



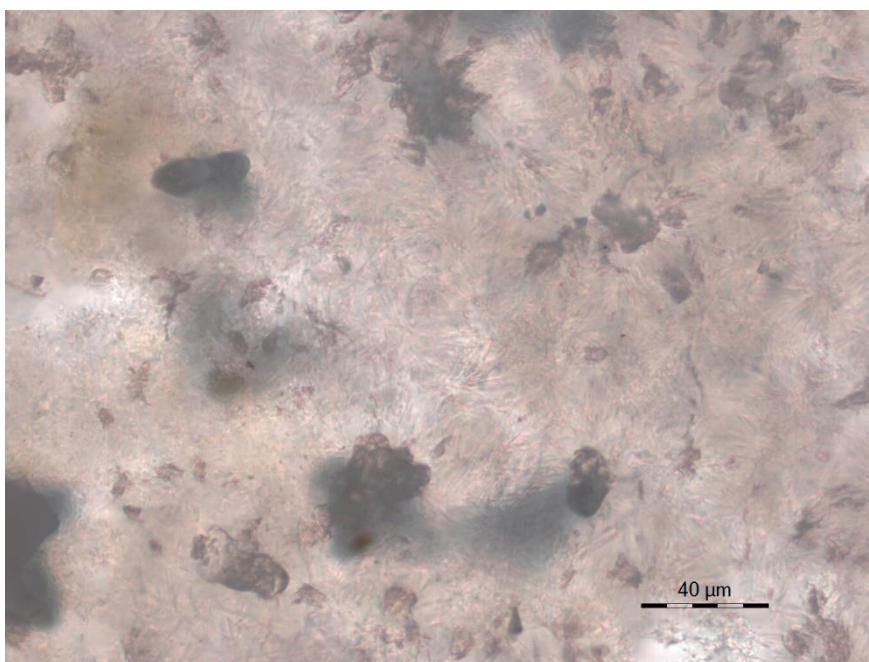
Εικόνα 72 Θραύσμα ζιρκονίου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X200)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ένα θραύσμα ζιρκονίου.



Εικόνα 73 Κονία δείγματος (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols , μεγέθυνση X100)

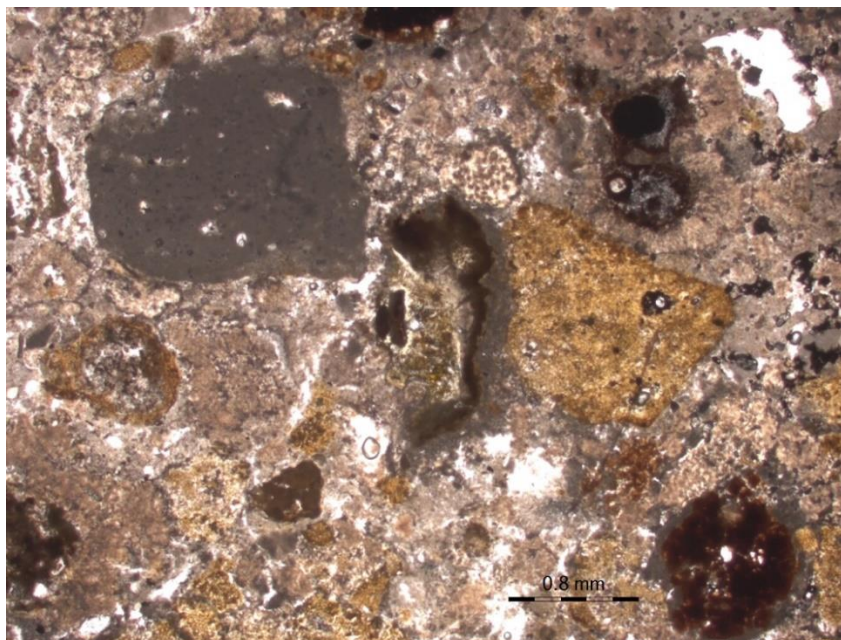
Φαίνεται πως η κονία του JHS_MW_jm_50 είναι ασβεστιτικής σύστασης με έντονη παρουσία υπέρλεπτου (ultrafine) αργλικού υλικού. Στο δεξί τμήμα της παραπάνω εικόνας παρατηρείται μία μεγάλη μάζα ασβεστίτη, η οποία είτε είναι μονοκρυσταλλος είτε είναι ασβεστιτικό αδρανές.



Εικόνα 74 Κονία δείγματος, θύσανοι γύψου (δείγμα JHS_MW_jm_50 με παράλληλα Nicols , μεγέθυνση X500)

Όπως προαναφέρθηκε, σε περιοχές της κονιάς παρατηρείται μια πιο περίπλοκη δομή. Στην παραπάνω εικόνα παρατηρείται περιοχή της κονιάς του κονιάματος η οποία αποτελείται από σχηματισμό θυσανοειδούς μορφής γύψου. Στην ίδια εικόνα παρατηρούνται και αργλικά στοιχεία, τα οποία εμφανίζονται κυρίως στις πυκνές περιοχές της κονιάς.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται μία γενική απεικόνιση του συγκεκριμένου δείγματος.



Εικόνα 75 Γενική εικόνα δείγματος (δείγμα JHS_MW_jm_50 με διασταυρωμένα Nicols, μεγέθυνση X25)

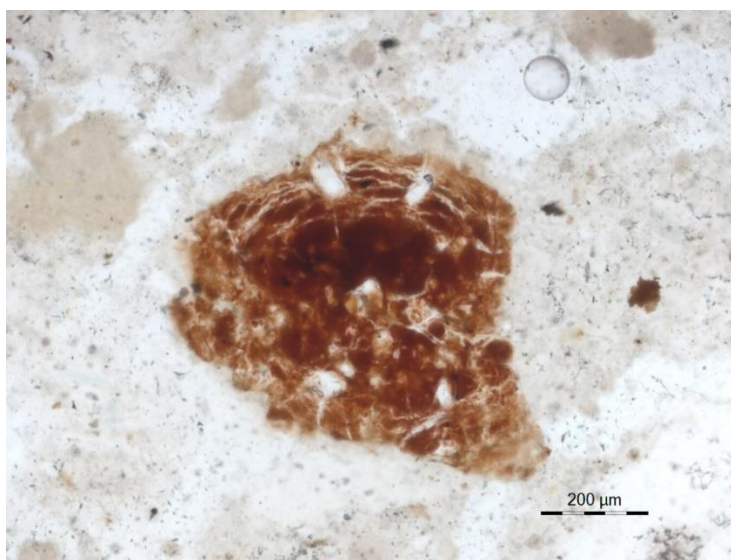
Στη συγκεκριμένη εικόνα μπορούν να παρατηρηθούν πολλά από τα διάφορα στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως σε όλη τη δομή του κονιάματος. Πάνω αριστερά υπάρχει αδρανές βιομικριτικό ασβεστόλιθου, στη μέση και πάνω δεξιά παρατηρούνται συσσωματώματα του συστήματος εντριγκίτη-γύψου που προαναφέρθηκε, δεξιά υπάρχει ένα κεραμικό στοιχείο και κάτω δεξιά εμφανίζεται η δομή/συσσωμάτωμα του θραυσμένου κεραμικού ασβεστιτικής σύστασης με τα οξειδωμένα στοιχεία και τα μεταλλικά υγιή στοιχεία, ενώ η κονία είναι, ως επί το πλείστον, ασβεστιτικής σύστασης με παρουσία υπέρλεπτου αργιλικού υλικού.

Συνεπώς, σε αυτό το δείγμα παρατηρήθηκε ότι η κονία είναι ασβεστιτικής σύστασης με παρουσία υπέρλεπτου αργιλικού υλικού, ενώ ανά περιοχές παρατηρείται μια πιο περίπλοκη δομή, με παράλληλη παρουσία γύψου ή και γύψου και εντριγκίτη. Τα αδρανή του δείγματος αυτού αποτελούνται από βιομικριτικό απολιθωματοφόρο ασβεστόλιθο, χαλαζία και πλήρη τριματοφόρα απολιθώματα. Η τελευταία παρατήρηση υποδεικνύει ότι για τη παρασκευή του κονιάματος έχει χρησιμοποιηθεί και άμμος θαλάσσης. Κάποια από τα αδρανή ασβεστιτικής σύστασης παρατηρείται ότι διατρέχονται από αργλικές φλεβώσεις και διαφοροποιούνται από τον απολιθωματοφόρο ασβεστόλιθο. Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, στο κονίαμα παρουσιάστηκαν συστηματικά υγιή κεραμικά, αλλά και αποσαθρωμένα κεραμικά άλλης μορφολογίας, με εμφανή οξειδία και υδροξειδία σιδήρου, όπως επίσης και υγιή μεταλλικά στοιχεία. Τα αποσαθρωμένα κεραμικά παρουσιάζουν ζώνη βαθμιαίας διάχυσης οξειδίων προς την κονία που τα περιβάλλει. Ακόμη, στη μάζα της κονίας εμφανίζεται διάσπαρτα ένα συσσωμάτωμα, το οποίο αποτελείται από βελονοειδείς και πρισματικούς κρυστάλλους εντριγκίτη-γύψου. Το σύστημα αυτό είναι δευτερογενές, χωρίς όμως να είναι ξεκάθαρο εάν είναι προϊόν φθοράς ή αν είναι ορυκτό εντριγκίτη από την γύρω περιοχή, δηλαδή ορυκτό το οποίο έχει δημιουργηθεί από κάποιο έντονο γεωλογικό φαινόμενο. Επιπρόσθετα, σε όλη τη μάζα του κονιάματος εμφανίζονται και σωματίδια κάρβουνου, τα οποία, λόγω της ποσότητάς τους μπορούν να θεωρηθούν ως πρόσθετο στο κονίαμα. Κάποια από αυτά τα σωματίδια παρουσιάζουν τη δομή καμένου ξύλου.

Δείγμα JHS MN5 jm 135

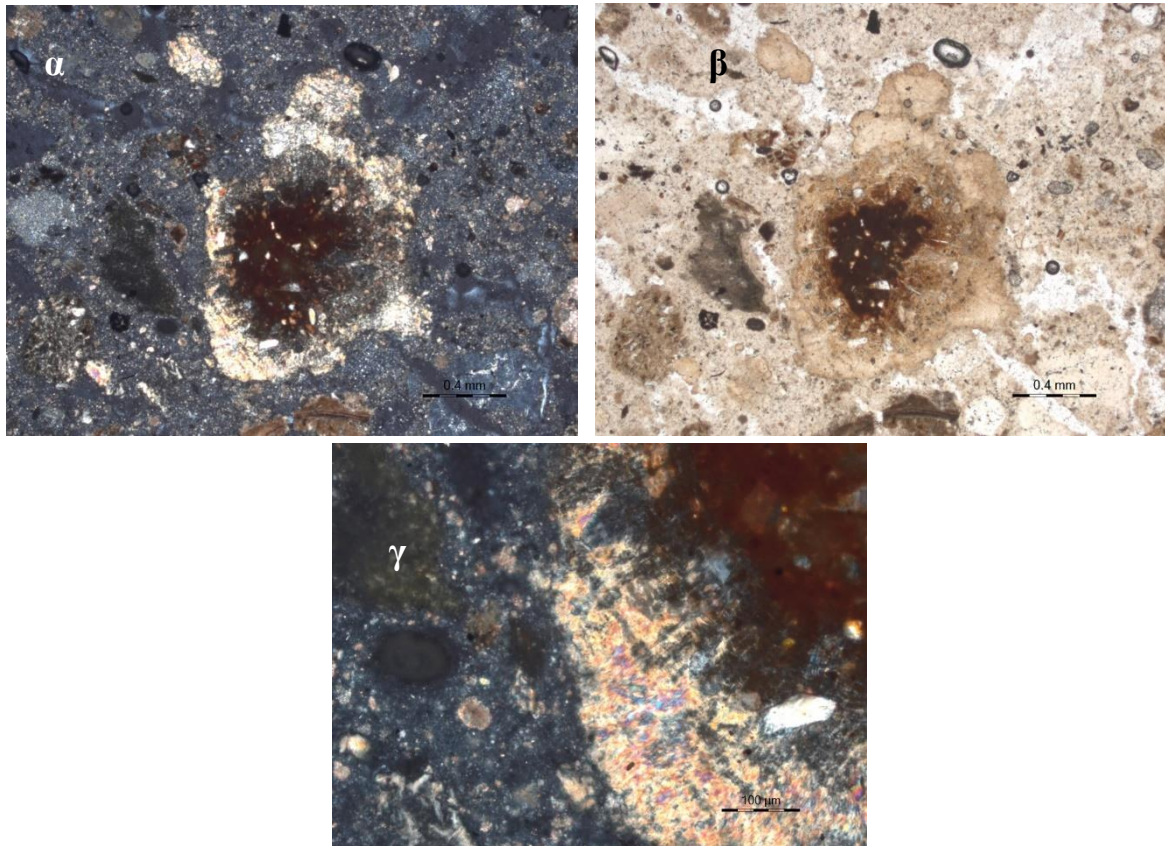
Πρόκειται για κονίαμα αρμού που ελήφθη από την βόρεια τοιχοποιία του Ιερού Κουβουκλίου και πιο συγκεκριμένα από το N5, σε ύψος 135 cm από την κατώτατη κορνίζα, όπως εμφανίζεται και στο κεφάλαιο της δειγματοληψίας. Στο κονίαμα παρατηρήθηκαν πλήθος αδρανών, παρατηρήθηκε και η κονία, ενώ εντοπίστηκαν και διάφορα συσσωματώματα.

Όπως και στο προηγούμενο δείγμα, έτσι και σε αυτό παρατηρείται ένα συσσωμάτωμα το οποίο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε οξείδια και υδροξείδια σιδήρου, ενώ εμπεριέχει και χαλαζιακά αδρανή. Πρόκειται και πάλι για ένα κεραμικό υλικό το οποίο έχει υποστεί φθορά. Μία γενική εικόνα τις δομής αυτής είναι η παρακάτω



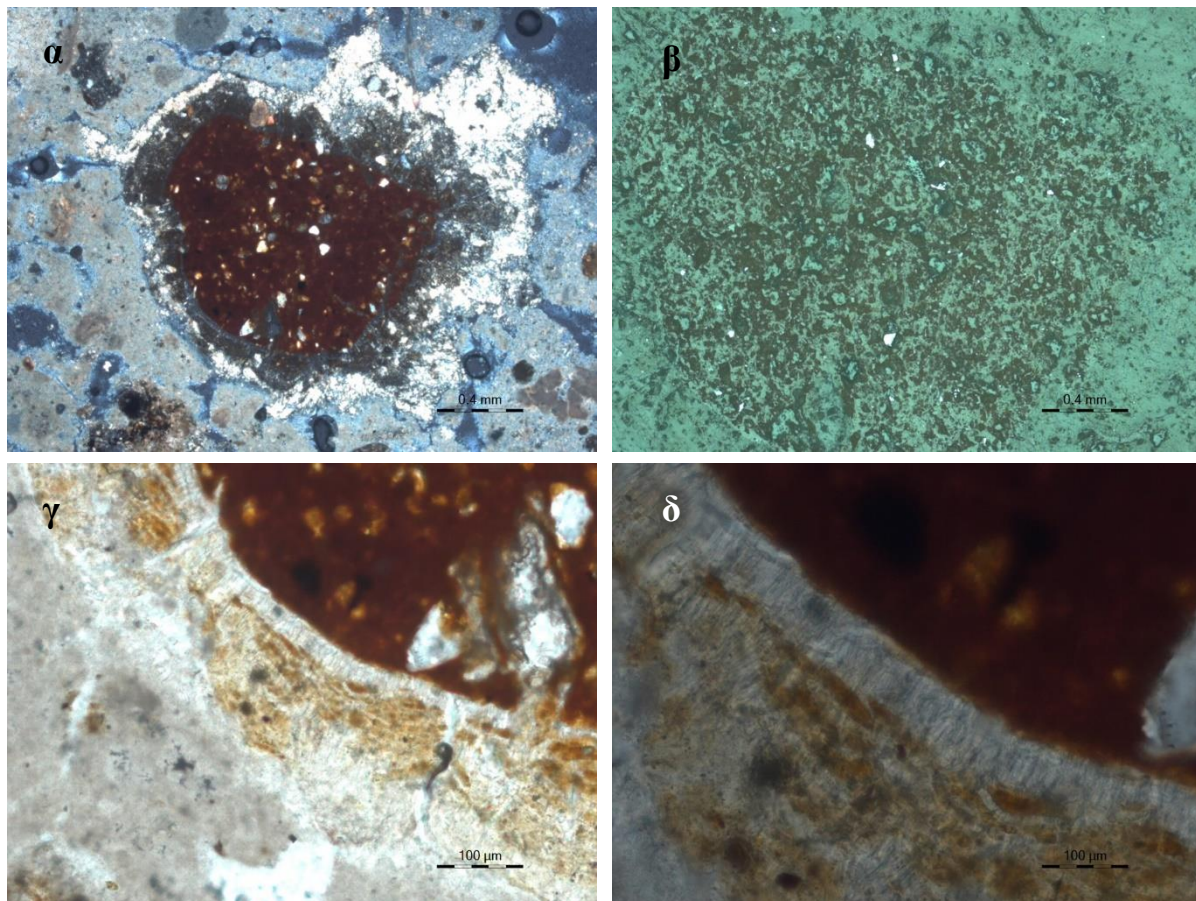
Εικόνα 76 Κεραμικό με αρκετές ρωγμές (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φως, μεγέθυνση X100)

Σε αντίθεση, όμως με την αντίστοιχη δομή στο δείγμα του δυτικού φατώματος, σε αυτό το δείγμα παρατηρείται περιμετρικά ένα δευτερογενές υλικό, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες. Στη 3^η από τις παρακάτω εικόνες μπορούν να παρατηρηθούν με ακρίβεια οι στρώσεις του κεραμικού, του δευτερογενούς υλικού και της κονίας.



Εικόνα 77 Αποσαθρωμένο κεραμικό υλικό (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols (α), με παράλληλα Nicols (β) μεγέθυνση X50, με διασταυρωμένα Nicols και μεγέθυνση X200 (γ))

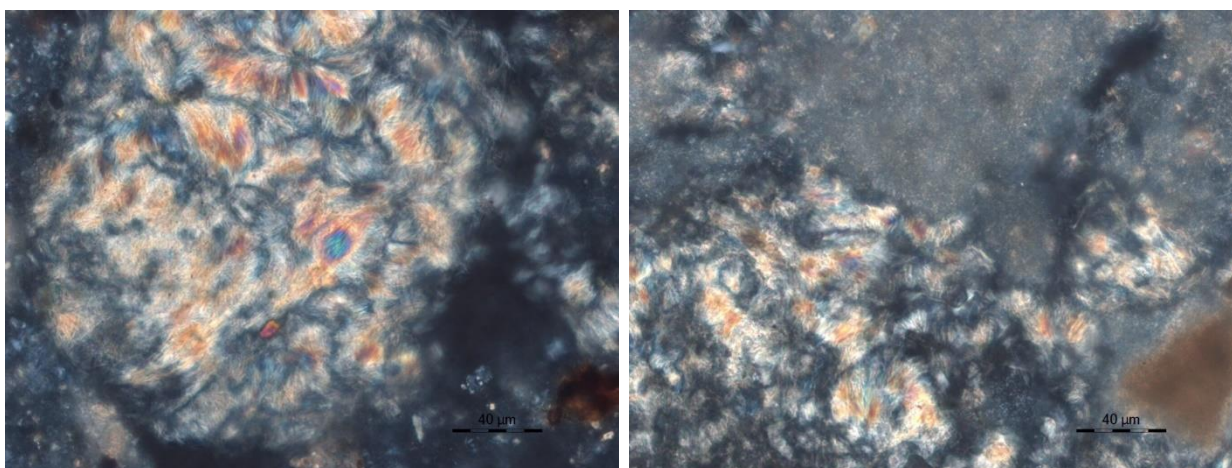
Στις παρακάτω εικόνες εξετάζεται πιο αναλυτική η διαστρωμάτωση των διαφορετικών υλικών.



Εικόνα 78 Ζώνες αποσαθρωμένο κεραμικού υλικού (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols (α), με ανακλώμενο φως (β) μεγέθυνση X50, με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φως μεγέθυνση X200 (γ) και με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φως μεγέθυνση X500)

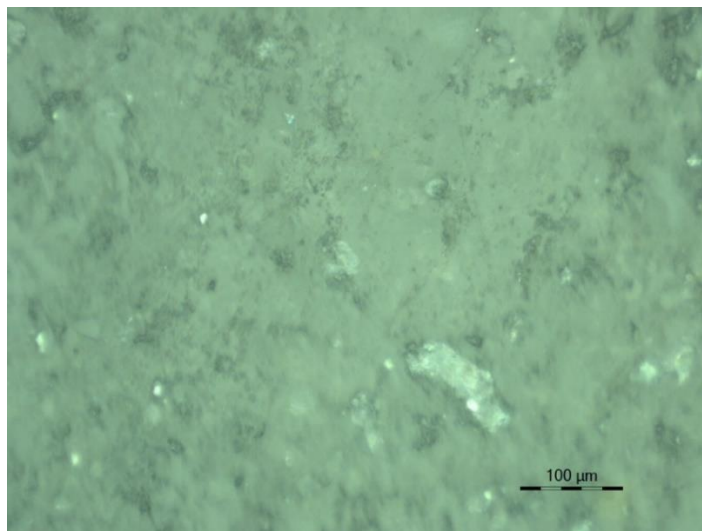
Στις παραπάνω τέσσερις εικόνες εξετάζονται τα διαφορετικά στοιχεία και οι διαφορετικές ζώνες που εμφανίζονται σε αυτή τη δομή. Το συγκεκριμένο κεραμικό έχει διάμετρο 1,2mm χωρίς τις εξωτερικές ζώνες. Επιπρόσθετα, στην εικόνα του κεραμικού με το ανακλώμενο φως (εικόνα β) εμφανίζονται υγιή μεταλλικά στοιχεία, δηλαδή μεταλλικά στοιχεία που δεν έχουν οξειδωθεί, με διάμετρο 2-3μm.

Στην εικόνα γ και δ γίνονται διακριτές με λεπτομέρεια οι τρεις διαφορετικές στρώσεις στη περιφέρεια του κεραμικού. Πιο συγκεκριμένα, στην περιφέρεια εμφανίζεται πρώτα μία ζώνη δευτερογενούς υλικού, το οποίο αποτελείται από θυσανοειδής κρυστάλλους, κάθετους στο κεραμικό, η διεύθυνση των οποίων δίνει την εικόνα «συρραφής» του κεραμικού με την κονία. Δηλαδή, σαν να αποκολλήθηκε το κεραμικό και το δευτερογενές αυτό υλικό να αποκαθιστά τη συνοχή κεραμικού-κονίας. Το υλικό αυτό πιθανώς να πρόκειται για πορτλαντίτη, όπως θα αναλυθεί και σε παρακάτω εικόνες. Γύρω από τη ζώνη του δευτερογενούς αυτού υλικού, παρατηρείται ζώνη διάχυσης οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου από το κεραμικό, παρατήρηση που εντείνει την υπόθεση ότι η ενδιάμεση ζώνη είναι δευτερογενούς σχηματισμού. Στην κονία του δείγματος αυτού, εκτός από το παραπάνω ιδιαίτερο στοιχείο, παρουσιάζεται σε περιοχή της κονίας, δομή θυσανοειδών κρυστάλλων ιριδίζον χρώματος. Στις παρακάτω εικόνες εξετάζεται αυτή η δομή.



Εικόνα 79 Θυσανοειδής κρύσταλλοι πορτλαντίτη (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X500)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στις παραπάνω εικόνες παρατηρούνται συσσωματώματα θυσανοειδών κρυστάλλων στη κονία του κονιάματος. Οι κρύσταλλοι αυτοί είναι ιριδίζον χρωματισμού και μεγέθους της κλίμακας του nano και πρόκειται για κρυστάλλους πορτλαντίτη ή βρουσίτη. Είναι εμφανές ότι τα συσσωματώματα αυτά περικλείονται από κονία ασβεστιτικής φύσης, κάτι που παρατηρείται και στη παρακάτω εικόνα.



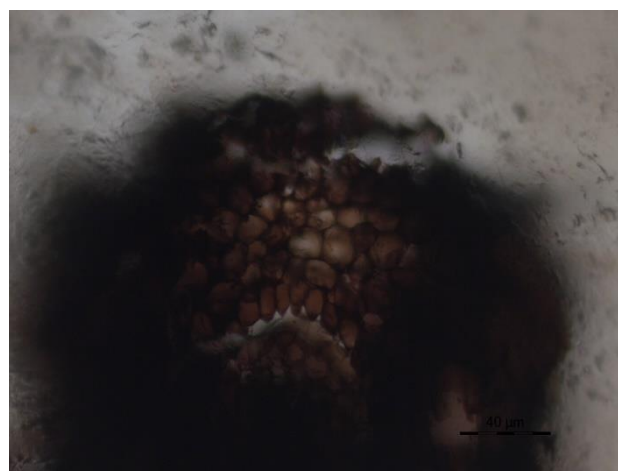
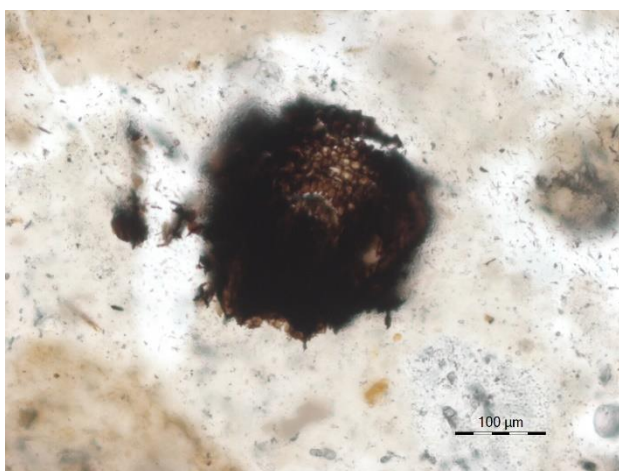
Εικόνα 80 Κονία Δείγματος (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με ανακλώμενο φως, μεγέθυνση X200)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ότι η κονία είναι ασβεστιτικής φύσεως, με πολλά μικρά μεταλλικά στοιχεία.

Εκτός από όλα τα παραπάνω στοιχεία, παρατηρούνται στη δομή του κονιάματος και σωματίδια κάρβουνου, όπως εμφανίζονται και στις παρακάτω εικόνες, ενώ σε ένα εξ αυτών, εντοπίστηκε η κυτταρική δομή του ξύλου (χαρακτηριστικά εξάγωνα), προφανώς λόγω ημιτελούς καύσης του..

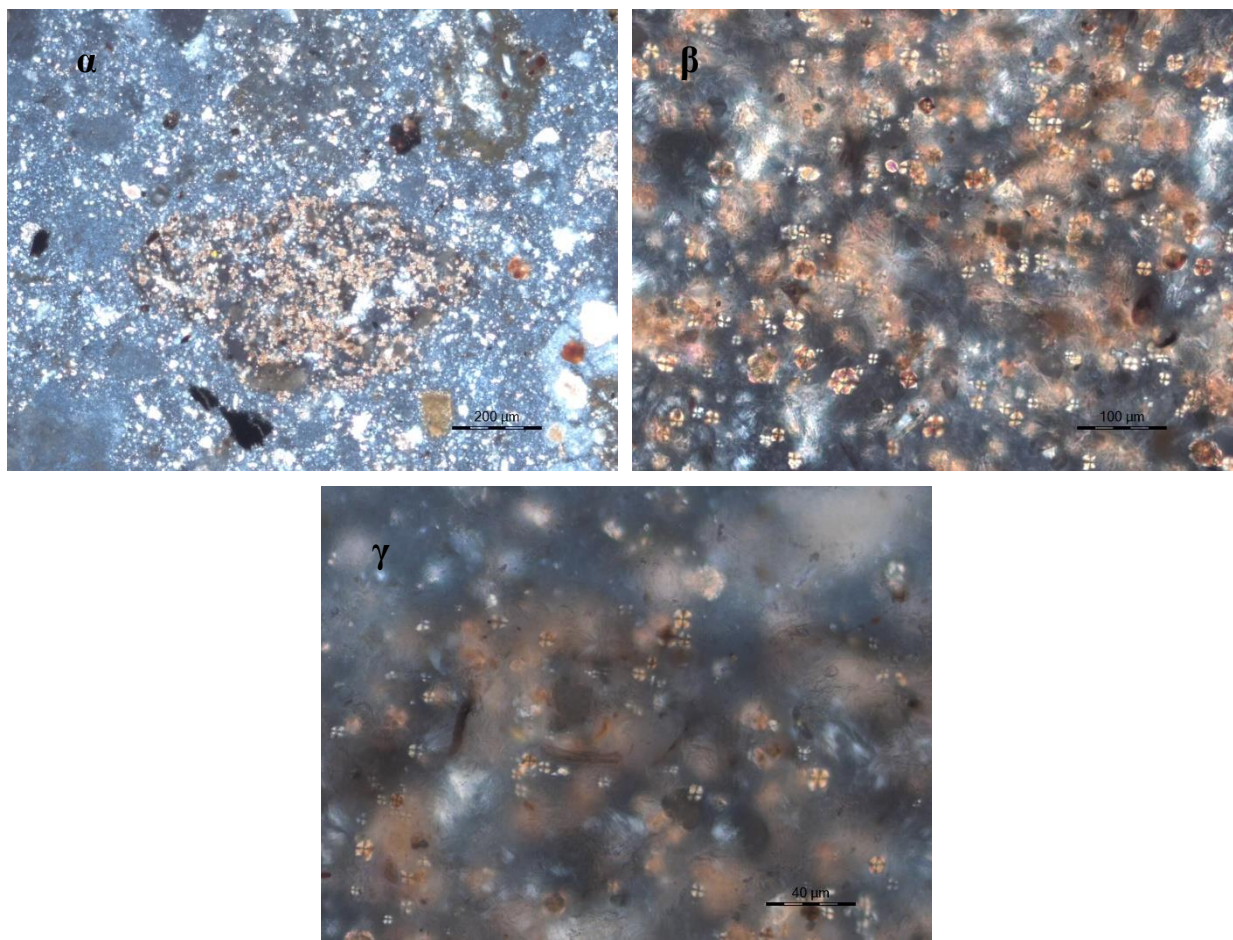


Εικόνα 81 Στοιχεία κάρβουνου (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με παράλληλα Nicols μεγέθυνση X500)



Εικόνα 82 Στοιχείο ξύλου με εμφανής κυτταρική δομή (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με παράλληλα Nicols και συγκεντρωμένο φως μεγέθυνση X200 (αριστερά), μεγέθυνση X500 (δεξιά))

Ακόμη, στη δομή του κονιάματος παρατηρήθηκαν κάποια στοιχεία τα οποία μεγάλη μεγέθυνση εμφάνισαν μία δομή όμοιες με ροζέτες. Η δομή αυτή εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες.



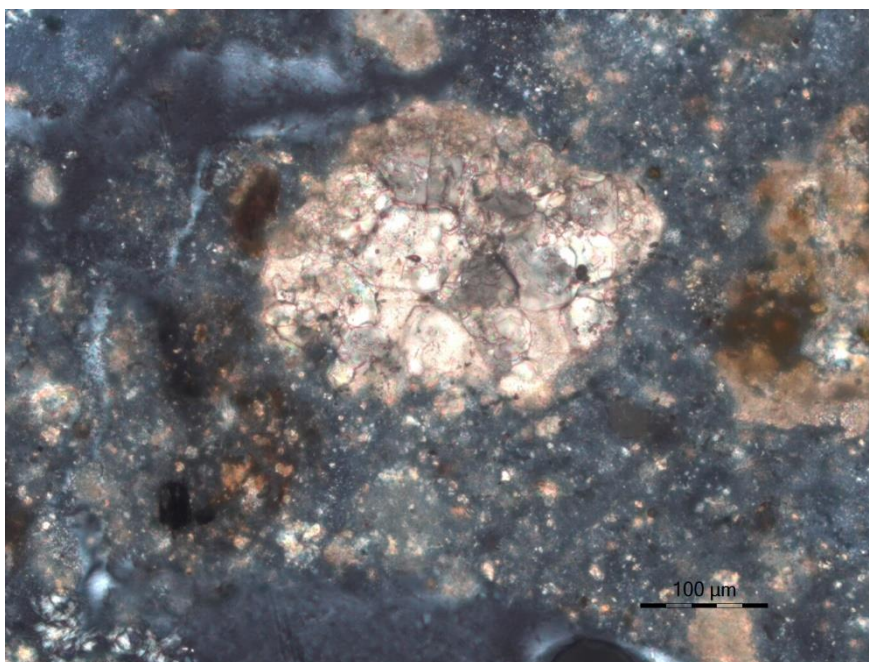
Εικόνα 83 Δομή στο κονίαμα με μορφή ροζετών (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols και συγκεντρωμένο φως μεγέθυνση X100 (α), με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X200 (β), με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X500 (γ))

Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία εξετάστηκε και το είδος των αδρανών που περιέχονται σε αυτό το δείγμα. Στις επόμενες εικόνες, λοιπόν, παρουσιάζονται τα διάφορα αδρανή που παρατηρήθηκαν στο κονίαμα αυτό.



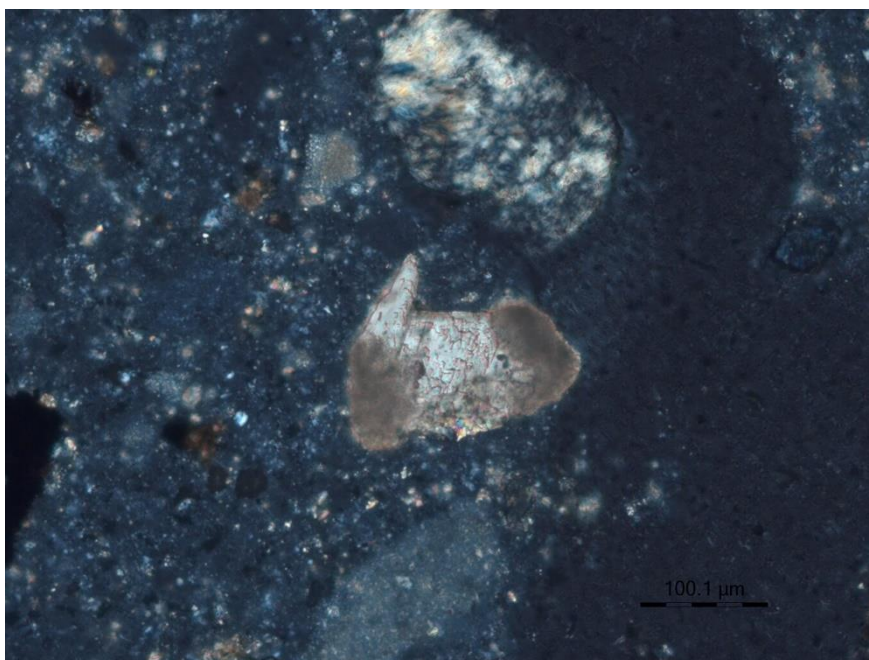
Εικόνα 84 Μεγάλο ασβεστίτικο βιομικροκρυσταλλικό Αδρανής(δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X50)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ένα μεγάλο βιομικρικό αδρανές ασβεστίτικης σύστασης. Η κονία που εμφανίζεται εκτός του αδρανούς είναι και αυτή ασβεστίτικης σύστασης. Ακόμη εμφανίζονται και αρκετά αδρανή που αποτελούνται από χαλαζία.



Εικόνα 85 Συνάθροισμα ασβεστίτικόν κόκκων (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X200)

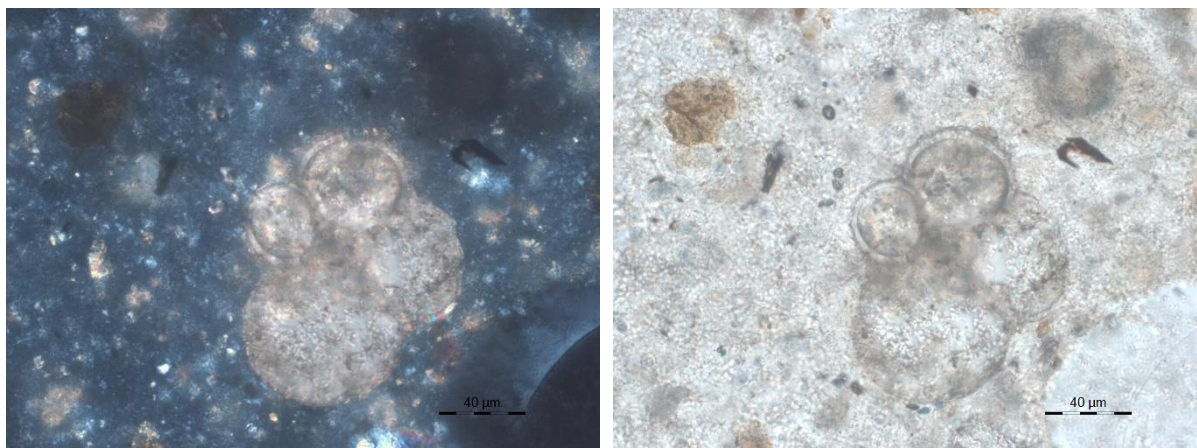
Στη παραπάνω εικόνα εμφανίζεται ένα συνάθροισμα ασβεστίτικόν κόκκων ποικίλης κοκκομετρίας, και πιθανότατα πρόκειται για θραύσμα μαρμάρου.



Εικόνα 86 Ασβεστίτης με διάφορες κοκκομετρίες (δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διασταυρωμένα Nicols μεγέθυνση X200)

Και σε αυτή την εικόνα παρατηρείται ένα στοιχείο ασβεστίτη με διάφορες κοκκομετρίες, συνεπώς πάλι βλέπουμε ένα θραύσμα μαρμάρου. Ακόμη, δεξιά και αριστερά του μαρμάρου παρουσιάζεται και

υπέρλεπτο (ultrafine) αργιλικό υλικό ως μέρος της σύστασης της κονιάς. Επιπρόσθετα, παρατηρείται και πάλι ένα συσσωμάτωμα πορτλαντίτη, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενες εικόνες.



Εικόνα 87 Πλήρες τριματοφόρο απολίθωμα(δείγμα JHS_MN5_jm_135 με διαστρωμένα Nicols (αριστερά) και με παράλληλα Nicols (δεξιά), μεγέθυνση X500)

Στη παραπάνω εικόνα παρατηρείται ένα πλήρες τριματοφόρο απολίθωμα, όπως και στο προηγούμενο δείγμα της δυτικής τοιχοποιίας του μνημείου. Συνεπώς, και σε αυτό το κονίαμα πρέπει να έχει χρησιμοποιηθεί άμμος θαλάσσης κατά τη παρασκευή του κονιάματος.

Συμπερασματικά, σε αυτό το δείγμα παρατηρείται ότι υπάρχει κονία ασβεστιτικής φύσεως με συσσωμάτωμα θυσανοειδούς κρυστάλλων πορτλαντίτη στη κλίμακα του nano. Τα αδρανή που παρατηρούνται σε αυτό το κονίαμα είναι βιομικροϊκτικού ασβεστόλιθου, μαρμάρου και άμμου θαλάσσης. Παρατηρείται συνεπώς, μία βασική ομοιότητα μεταξύ αυτού και του προηγούμενου δείγματος, ότι έχουν χρησιμοποιηθεί και εδώ όμοια αδρανή. Εκτός των παραπάνω στοιχείων, το κονίαμα εμφανίζει αποσαθρωμένα κεραμικά με οξειδία και υδροξειδία σιδήρου, όπως επίσης και υγιή σωματίδια μεταλλικού υλικού, όπως και στο προηγούμενο δείγμα, με τη διαφορά ότι σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει διαφορετική διαστρωμάτωση, καθώς το κεραμικό περιβάλλεται από ζώνη δευτερογενούς υλικού (πιθανώς πορτλαντίτης). Ακόμη, παρατηρήθηκαν στη δομή του κονιάματος σωματίδια κάρβουνου, αρκετά από τα οποία προέρχονται από καμένο ξύλο. Συγκριτικά με το προηγούμενο δείγμα, παρατηρείται ότι βρίσκονται σε μεγαλύτερη ποσότητα. Τέλος, παρατηρείται μία ιδιαίτερη δομή στο κονίαμα υπό τη μορφή ροζέτας

4.1.5 Θερμοβαρομετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)

Η μέθοδος DTA-TG εφαρμόστηκε σε όλα τα κανονικοποιημένα δείγματα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων σε σχέση με την επί της εκατό απώλεια μάζας ανά θερμοκρασιακό διάστημα για κάθε δείγμα που εξετάστηκε. Στο παρακάτω πίνακα συμπεριλαμβάνονται και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν και παρουσιάζονται στη Διπλωματική εργασία: *Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων Της Τοιχοποιίας Της Ανατολικής Και Δυτικής Όψης Του Ιερού Κουβουκλίου Του Πανάγιου Τάφου Στα Ιεροσόλυμα (50)*

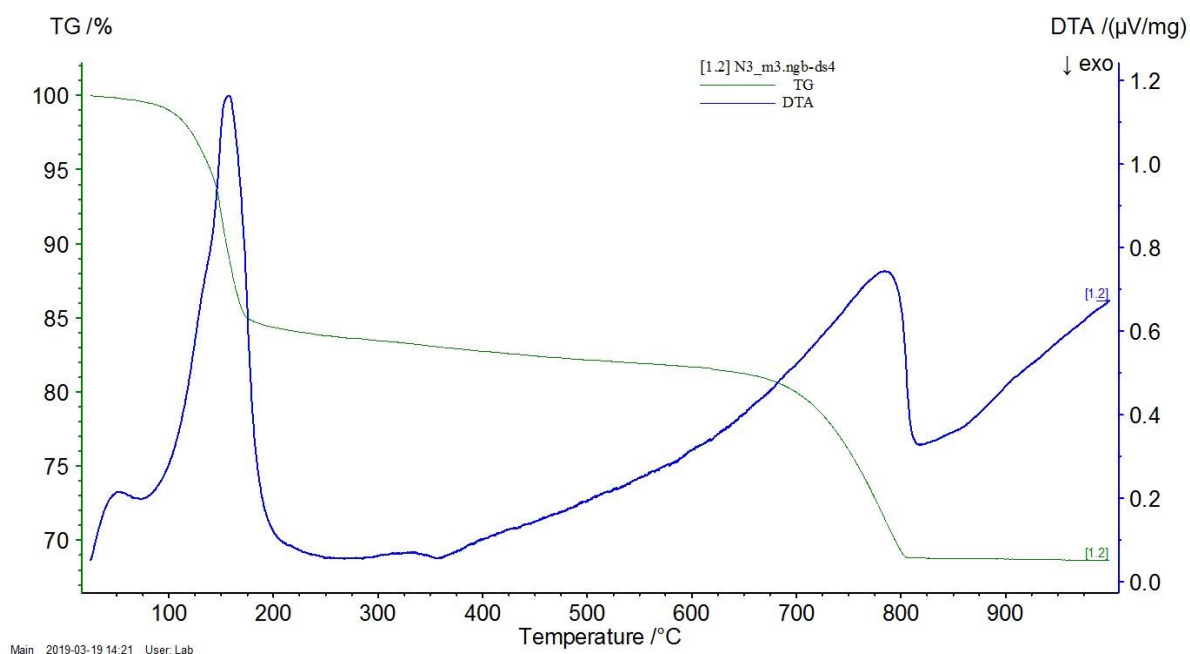
Πίνακας 25 Αποτελέσματα Θερμοβαρομετρικής Ανάλυσης

Κωδικός Δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα (°C)			
	<120°C	120-200°C	200-600°C	600-1000°C
JHS_MN3_m3	0,41*	11,3*	2,67	13,05
JHS_MN5_jm_85	1,26	5,51	4,38	22,6
JHS_MN5_jm_200	4,25*	2,66*	13,12	9,67
JHS_MS1_fm_130	2,09	0,72	5,6	30,96
JHS_MS1_fm_200	0,85	12,9	3,23	11,04
JHS_MS2_jm_280	1,41	0,78	5,48	30,61
JHS_MS3_jm_80	0,58*	10,68*	2,06	16,06
JHS_MS3_jm_135	0,74	7,38	8,94	12,79
JHS_MS3_jm_200	2,25*	1,47*	10,8	16,3
JHS_MS4_jm_280	1,66	1	5,96	29,66
JHS_MS5_jm_200	1,48	1,07	5,96	31,07
JHS_MS5_jm_285	2,17*	2,75*	2,91	29,66
JHS_MW_fm_80	2,01	0,48	2,83	33,72
JHS_MW_fm_130	0,51	13,44	1,13	12,01
JHS_MW_jm_80	0,44*	13,53*	2,43	9,64
JHS_MEN_fm_80	1,49	7,46	4,49	17,39
JHS_MEN_jm_80	0,38	1,51	1,74	36,76
JHS_MEN_jm_200	2,85	1,23	7,04	26,62
JHS_MES_jm_50	1,63	0,72	6,49	29,75
JHS_MES_jm_80	1,48	1,11	7,35	30,34
JHS_MW_fm_50 (50)	0,67	13,56	1,44	10,71
JHS_MW_fm_200 (50)	1,21	0,6	3,86	34,22
JHS_MW_jm_50 (50)	1,03	8,71	4,32	21,64
JHS_MW_jm_135 (50)	0,59	12,51	2,12	13,74
JHS_MW_jm_200 (50)	1,1	1,28	3,26	32,04
JHS_MES_fm_85 (50)	0,68	11,04	2,29	15,29
JHS_MES_fm_135 (50)	3,29	1,06	8,31	27,17
JHS_MES_jm_135 (50)	1,66	1,42	8,9	26,64
JHS_MES_jm_200 (50)	1,73	1,03	7,52	29,43
JHS_MEN_fm_135 (50)	2,68	0,7	6,35	29,26
JHS_MEN_jm_50 (50)	3	1,42	4,45	30,56
JHS_MEN_jm_135 (50)	1,19	1,94	4,1	31,32
JHS_MW_m (50)	3,02	1,85	3,8	10,29
JHS_FEN_rm (50)	0,62	0,3	1,14	37,06

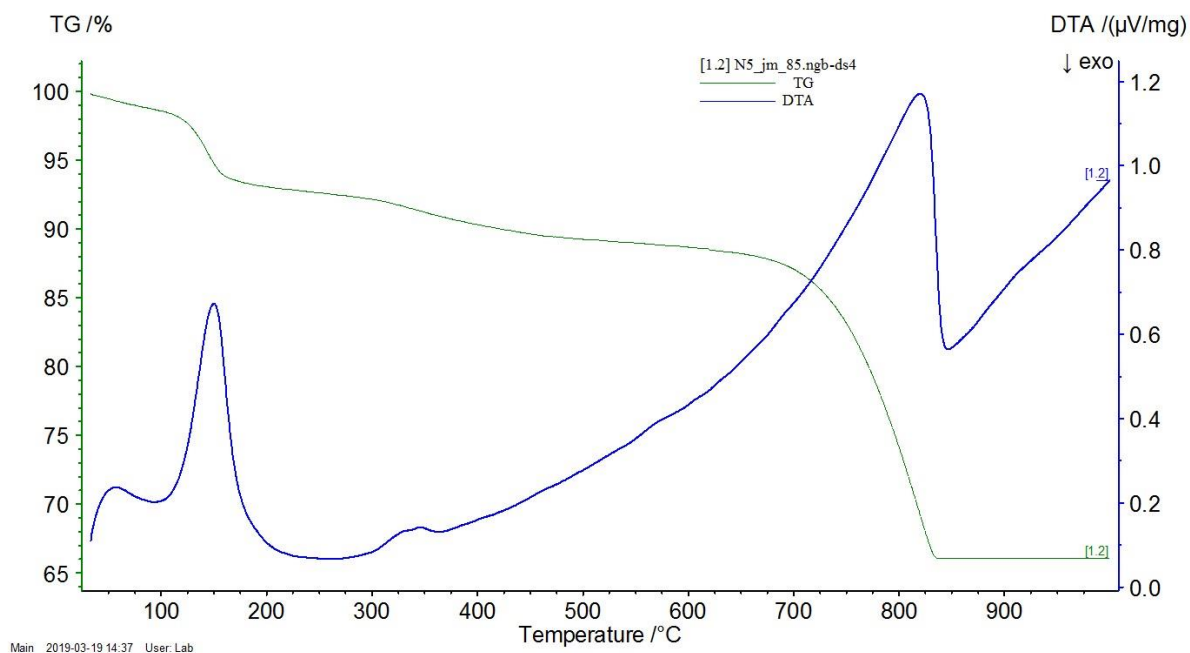
Το θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ 25-120 °C αντιστοιχεί στο φυσικά προσροφημένο νερό των συστατικών του δείγματος, ενώ αυτό των 120-200 °C αντιστοιχεί στα κρυσταλλικά νερά ενυδατωμένων αλάτων που περιέχονται στο μείγμα. Οι απώλειες βάρους στο διάστημα των 200 – 600 °C που προέρχονται από ενδόθερμες κορυφές αποδίδονται στο χημικά δεσμευμένο νερό που μπορεί να προέρχεται από τις υδραυλικές ενώσεις του ένυδρου αργιλοπυριτικού ασβεστίου της κονιάς, από ένυδρες ορυκτές φάσεις των αδρανών, από τον πορτλαντίτη ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), και από το βρουσίτη ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Στο ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα απώλειες βάρους που προέρχονται από εξώθερμες κορυφές αντιστοιχούν σε οργανικά συστατικά του δείγματος. Μία εξώθερμη στους 350 °C -360 °C, χωρίς απώλεια μάζας, οφείλεται στη μετατροπή του γύψου από ανυδρίτη α σε ανυδρίτη β. Μία ενδόθερμη στους 575°C οφείλεται στη μετατροπή του χαλαζία από α σε β φάση και δε συνοδεύεται από απώλεια μάζας. Τέλος, οι απώλειες βάρους στο θερμοκρασιακό διάστημα 600 – 1000 °C, αντιστοιχούν στη διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων του μείγματος, όπως ο ασβεστίτης (CaCO_3) και ο δολομίτης ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), καθώς και σε μερικό διαχωρισμό του θειικού ασβεστίου (έως 3%).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα θερμογραφήματα που λήφθηκαν στο πέρας αυτής της πειραματικής διαδικασίας.

Βόρεια Όψη

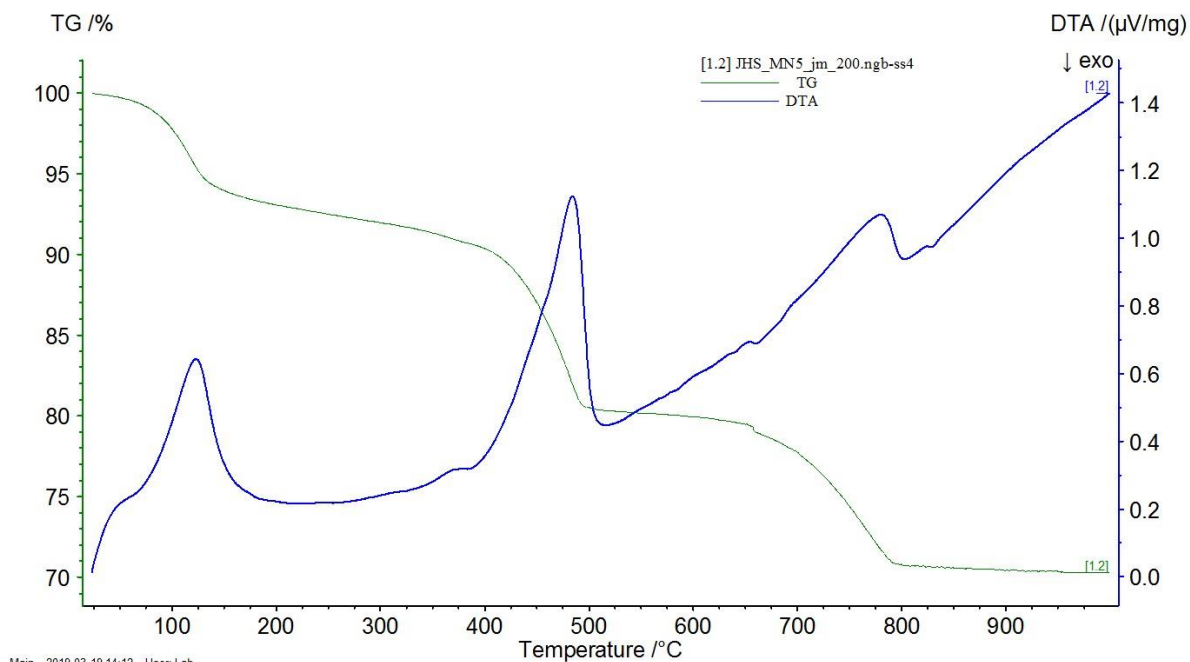


Διάγραμμα 34 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MN3_m3



Main 2019-03-19 14:37 User: Lab

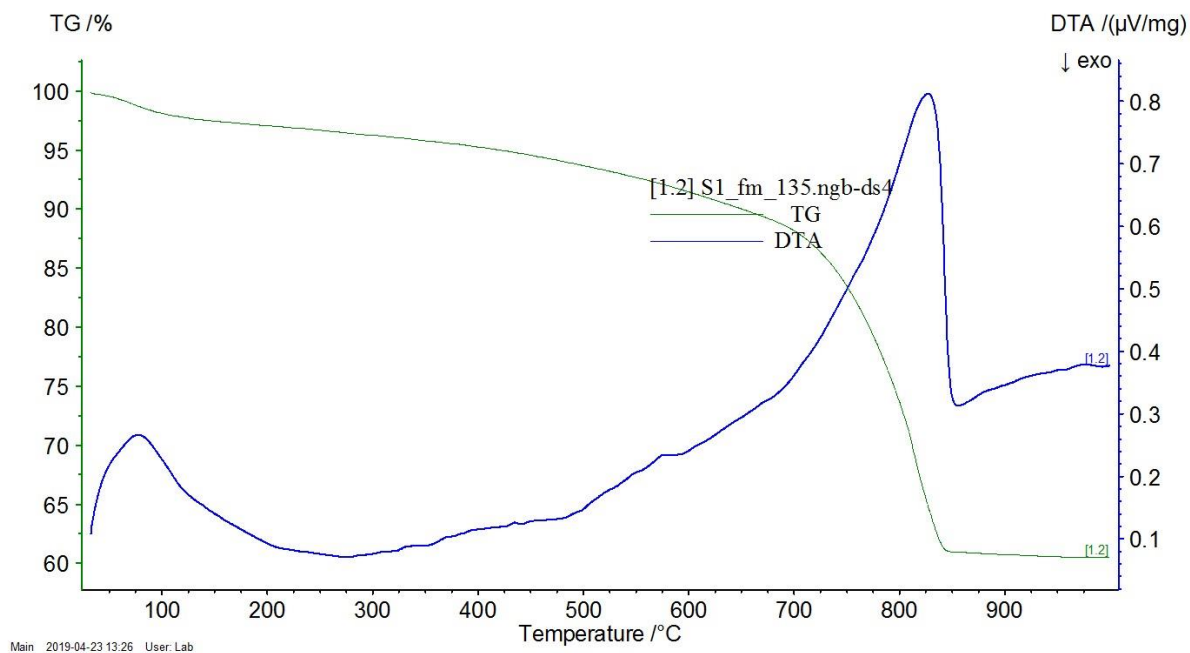
Διάγραμμα 35 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MN5_jm_85



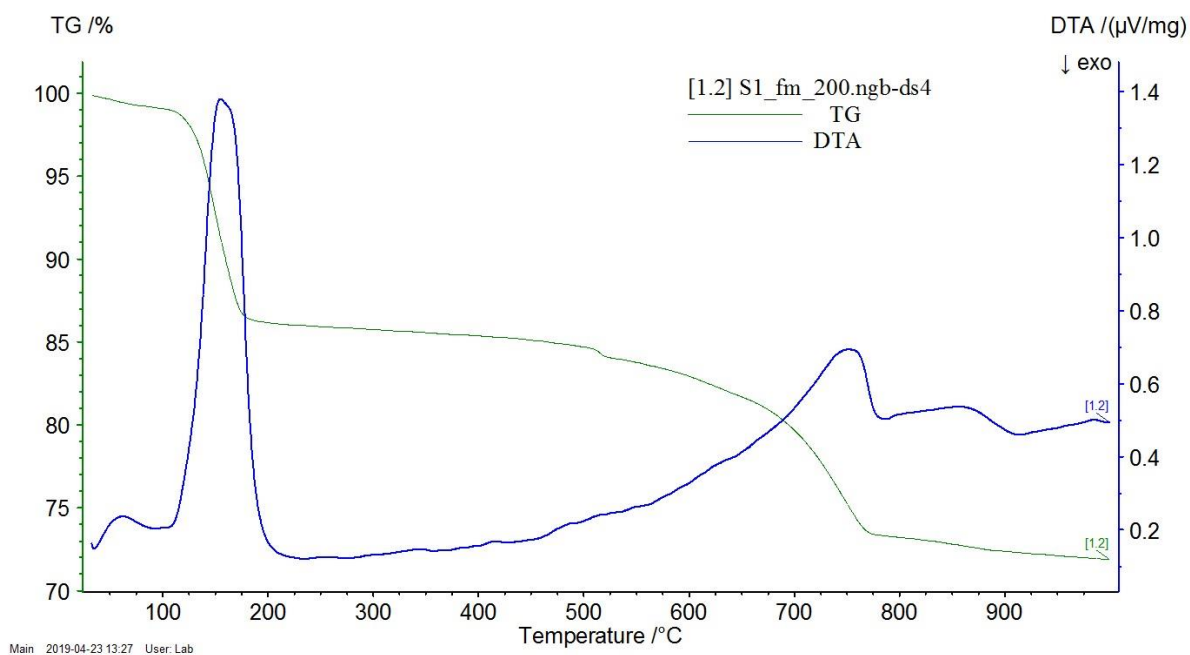
Main 2019-03-19 14:12 User: Lab

Διάγραμμα 36 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MN5_jm_200

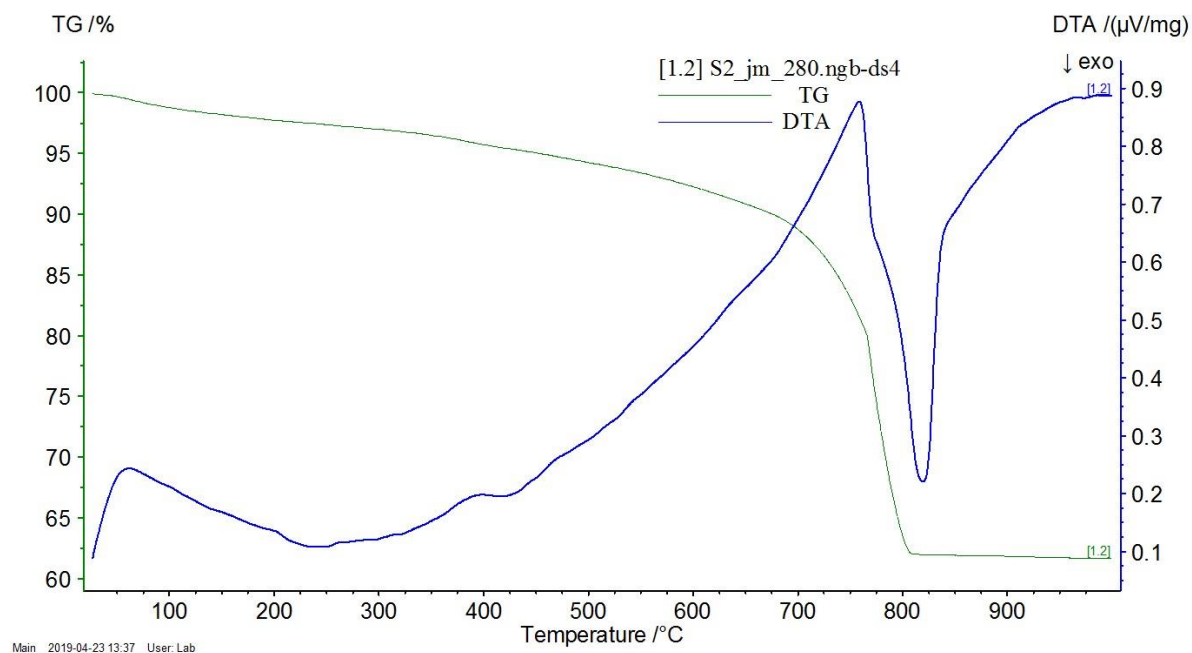
Νότια Όψη



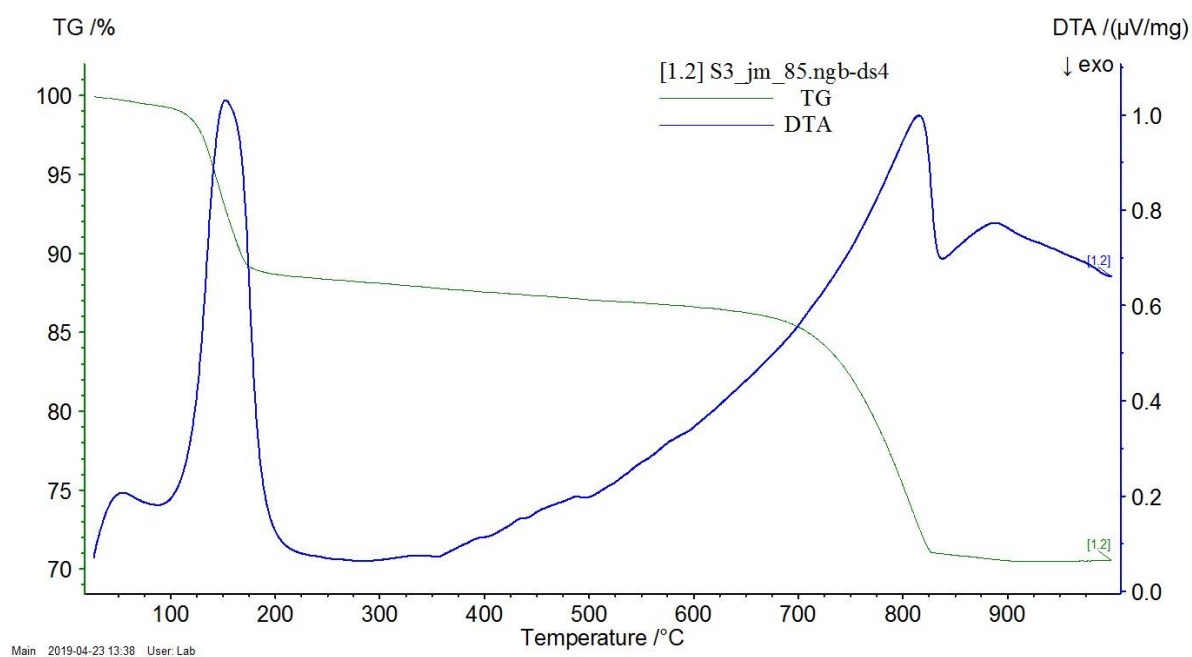
Διάγραμμα 37 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS1_fm_130



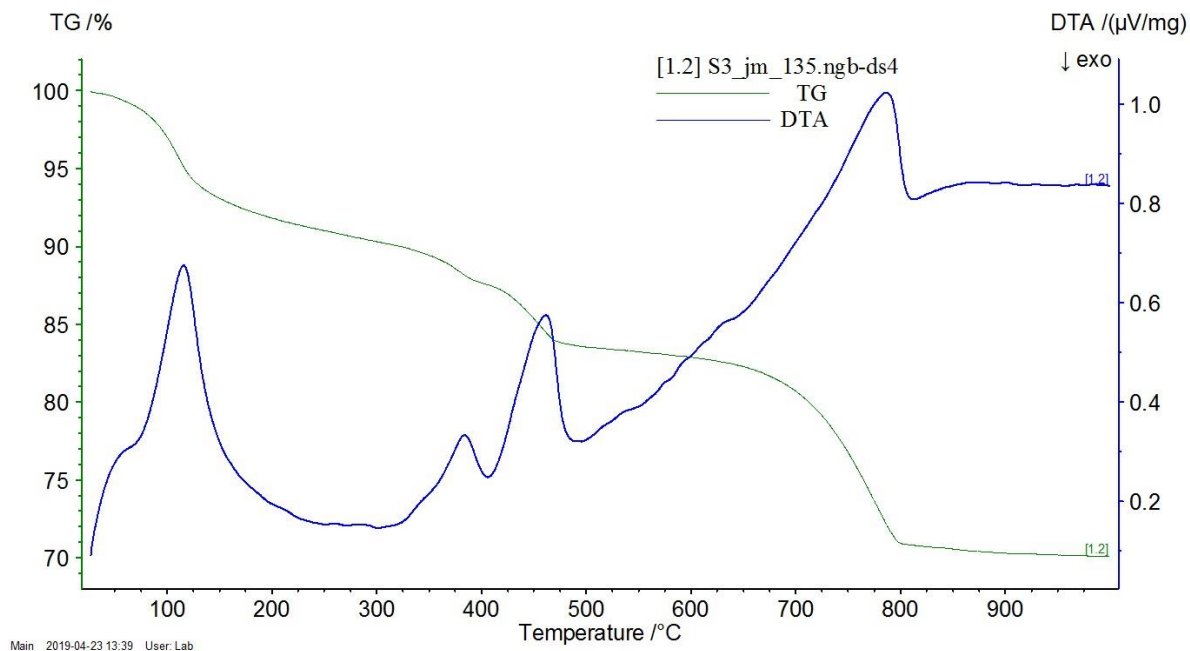
Διάγραμμα 38 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS1_fm_200



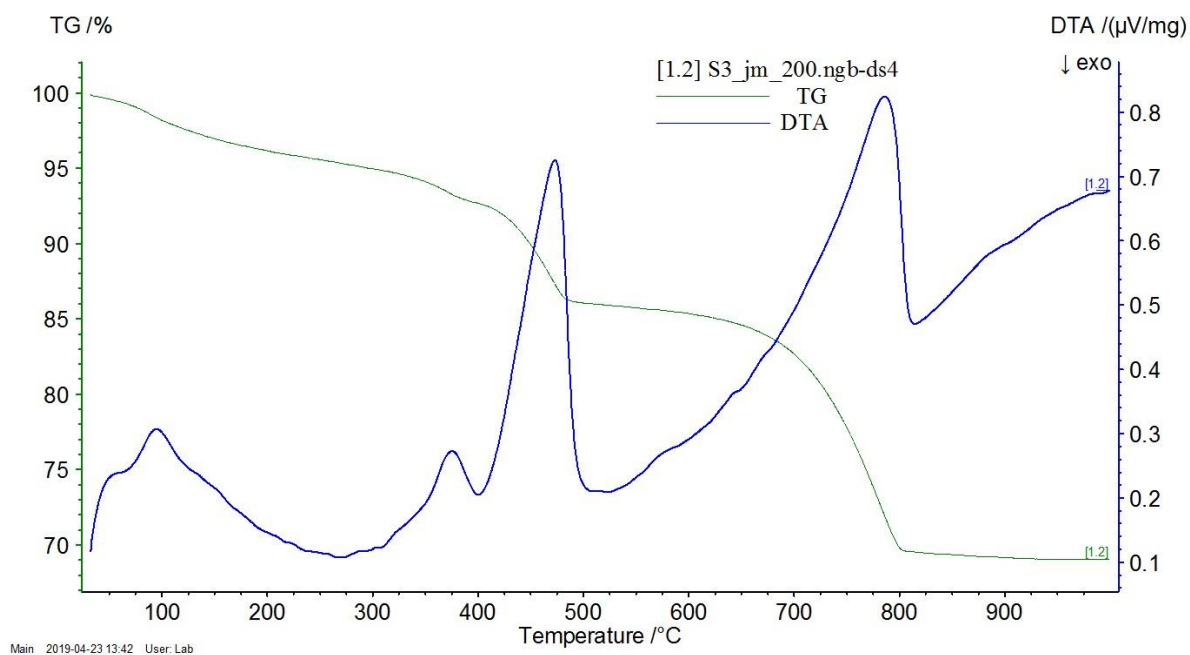
Διάγραμμα 39 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS2_jm_280



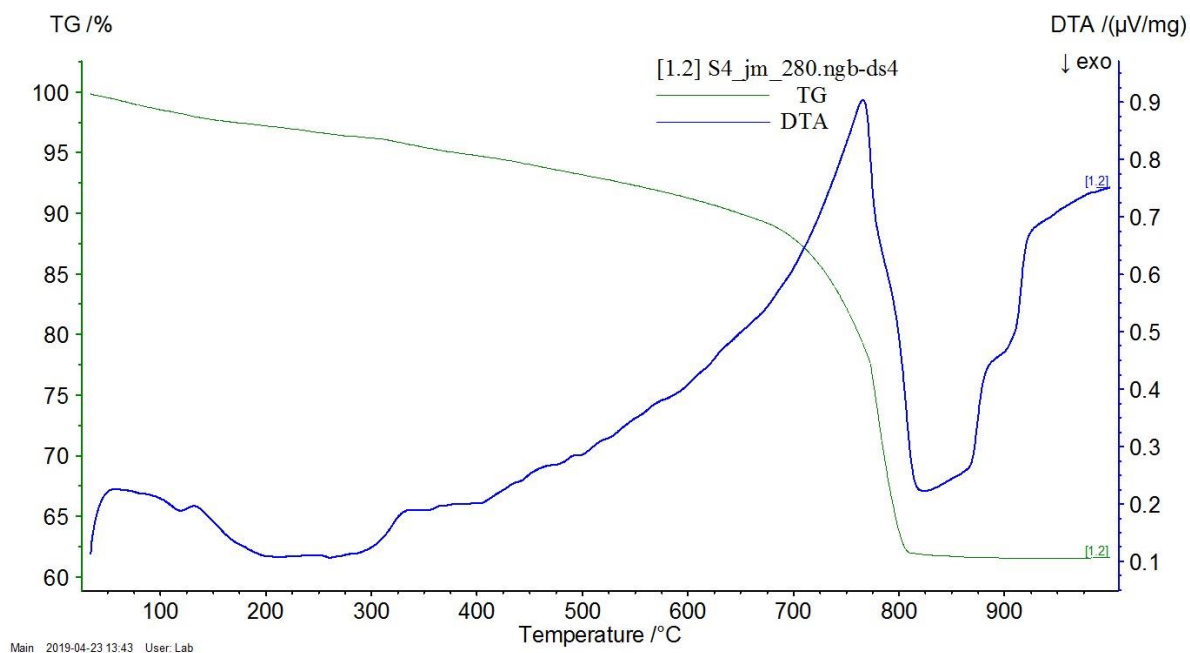
Διάγραμμα 40 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS3_jm_80



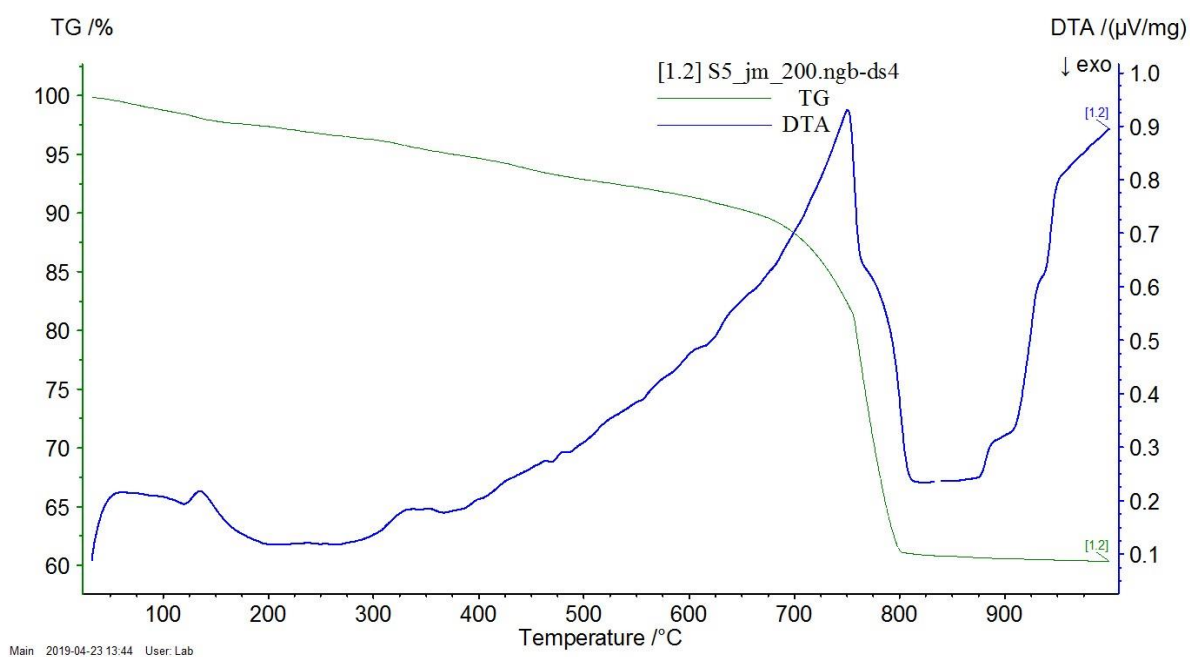
Διάγραμμα 41 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS3_jm_135



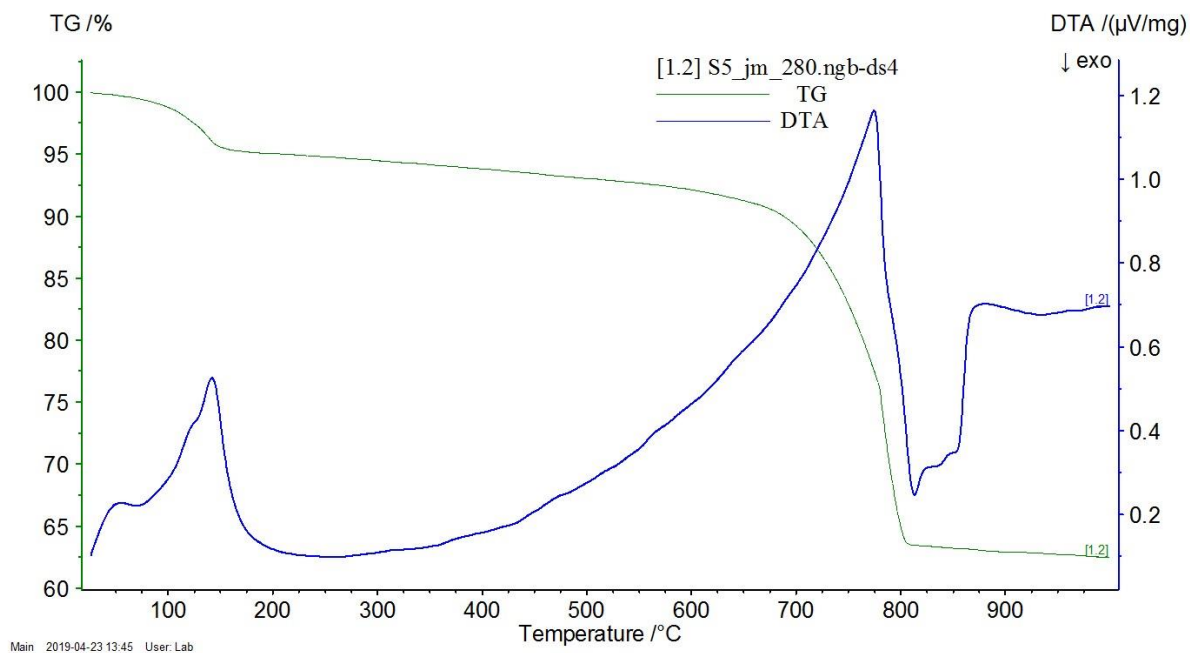
Διάγραμμα 42 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS3_jm_200



Διάγραμμα 43 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS4_jm_280

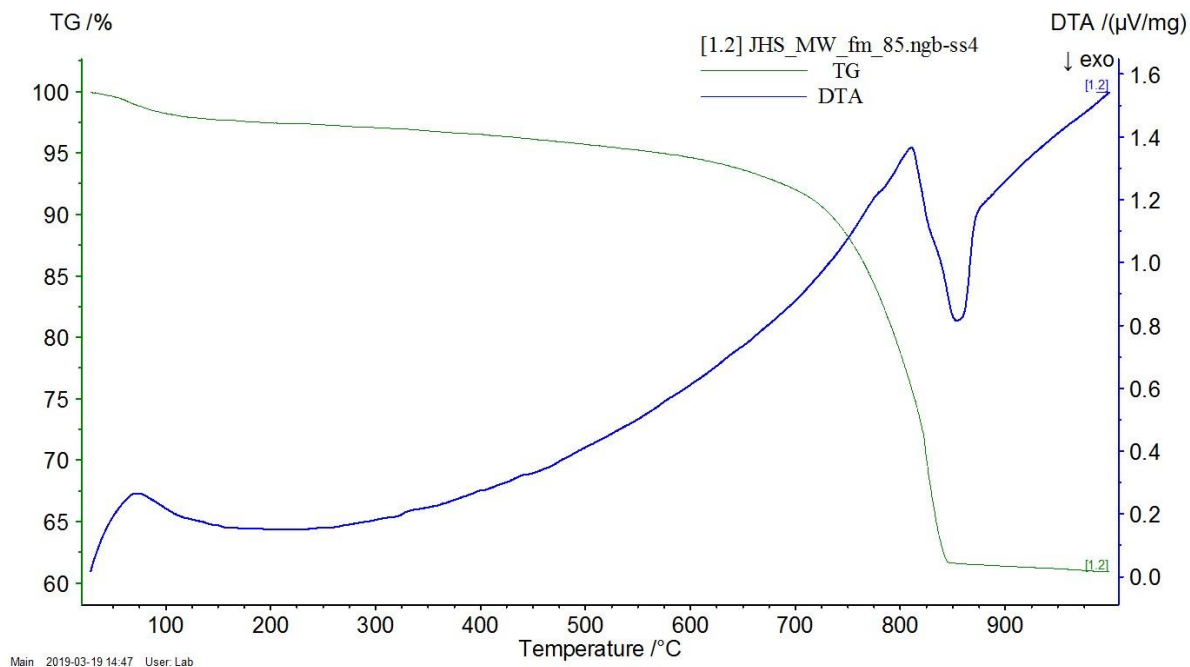


Διάγραμμα 44 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS5_jm_200

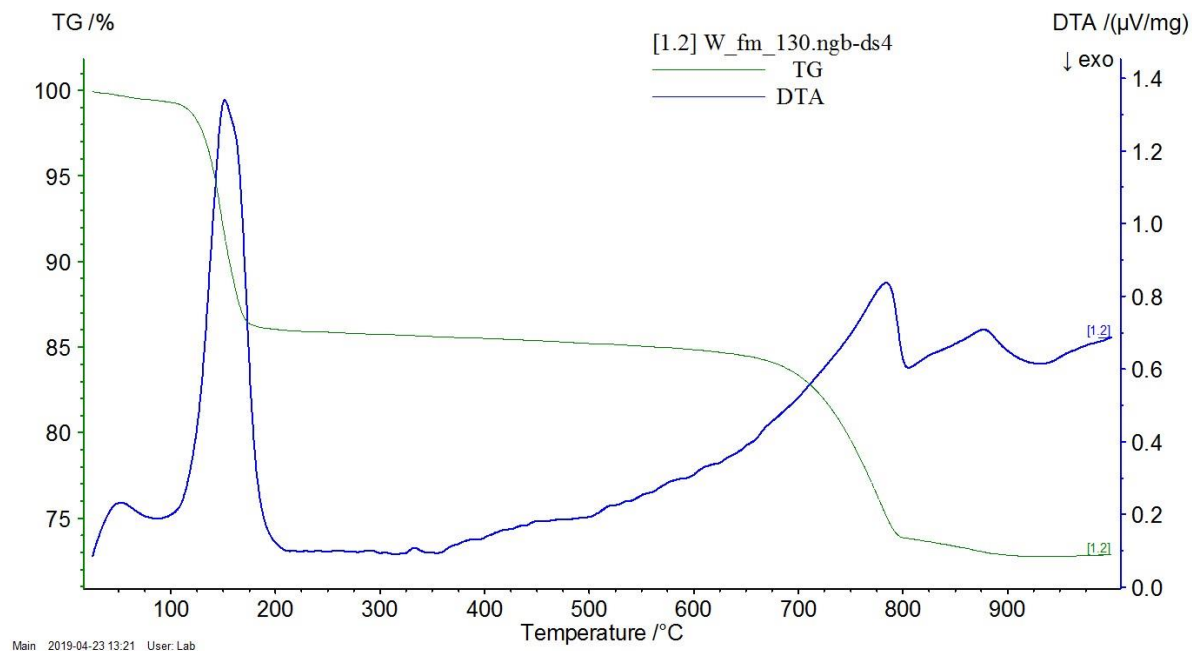


Διάγραμμα 45 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MS5_jm_280

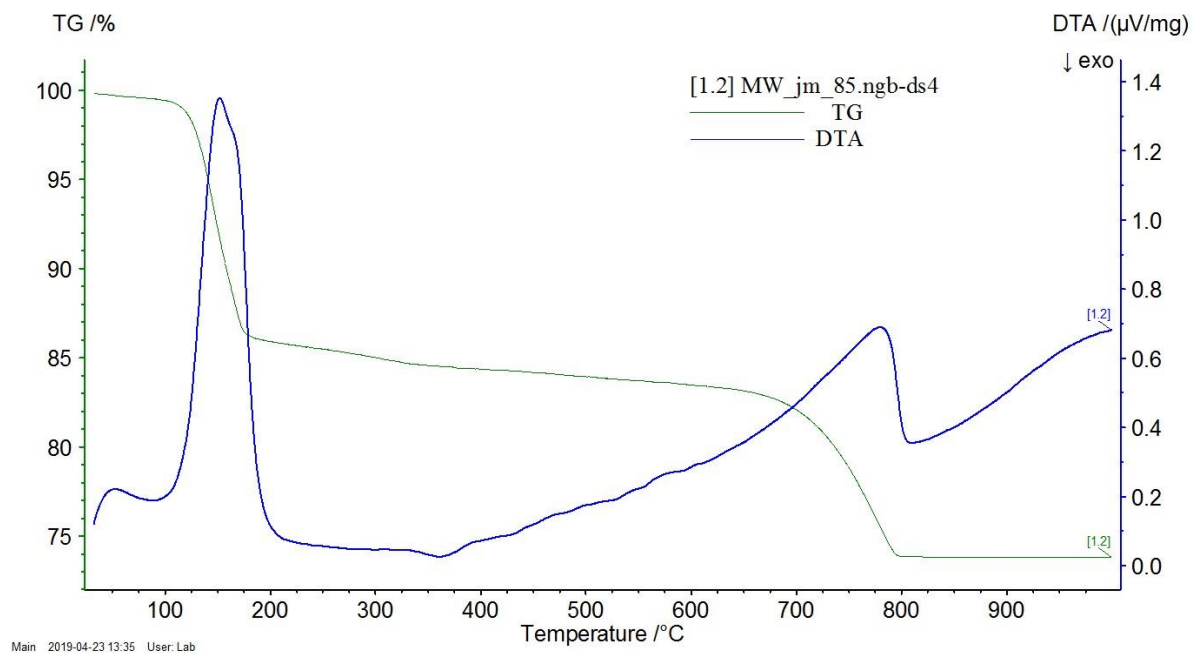
Δοτική Όψη



Διάγραμμα 46 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MW_fm_80

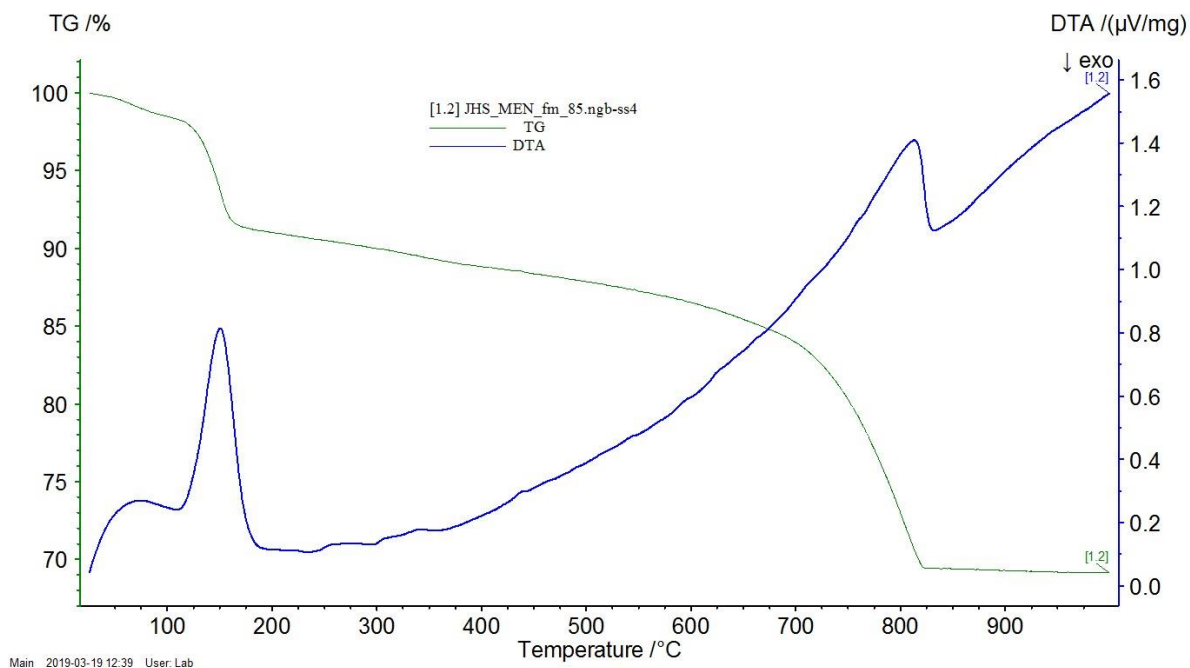


Διάγραμμα 47 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MW_fm_130

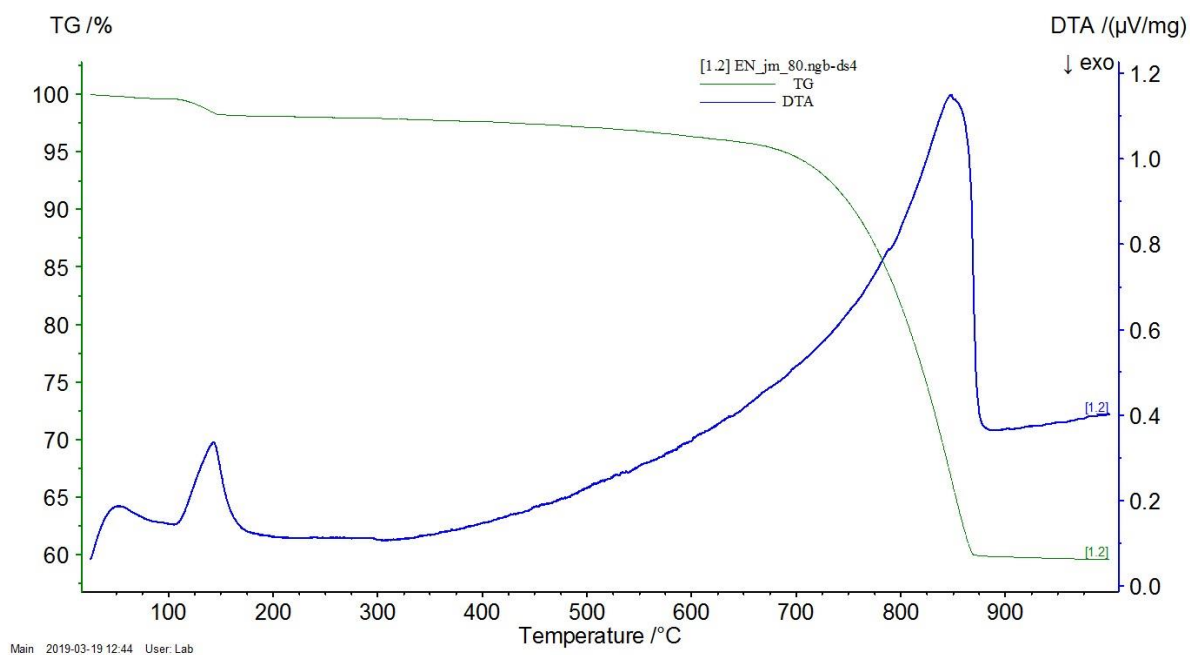


Διάγραμμα 48 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MW_fm_80

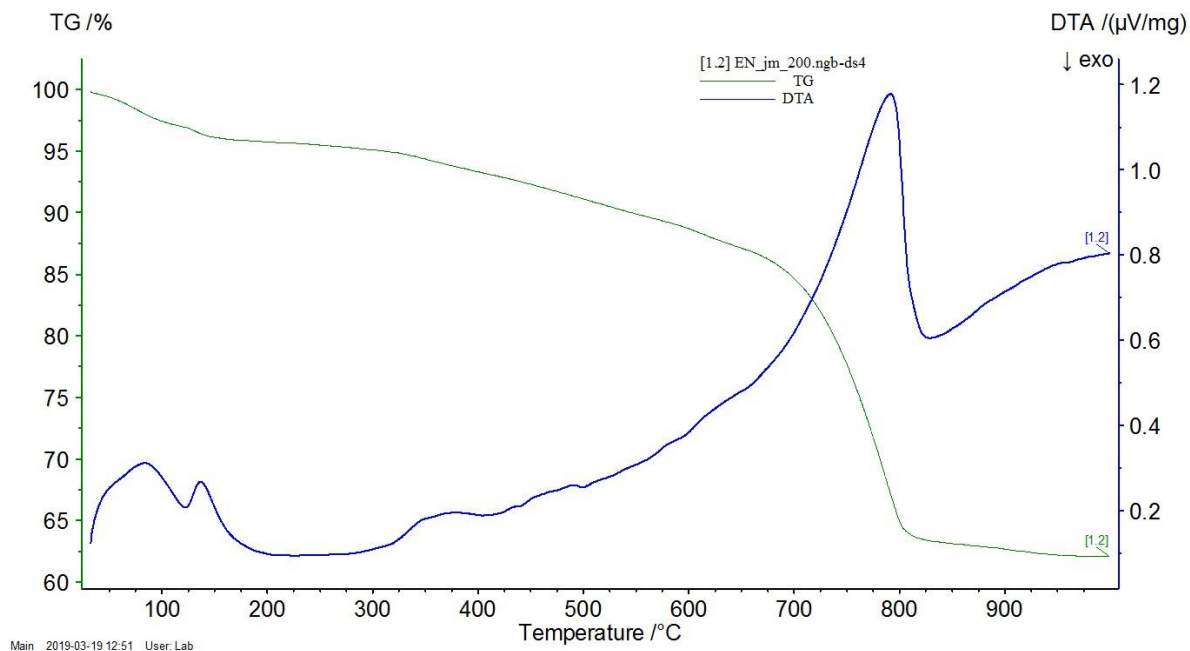
Ανατολική Όψη



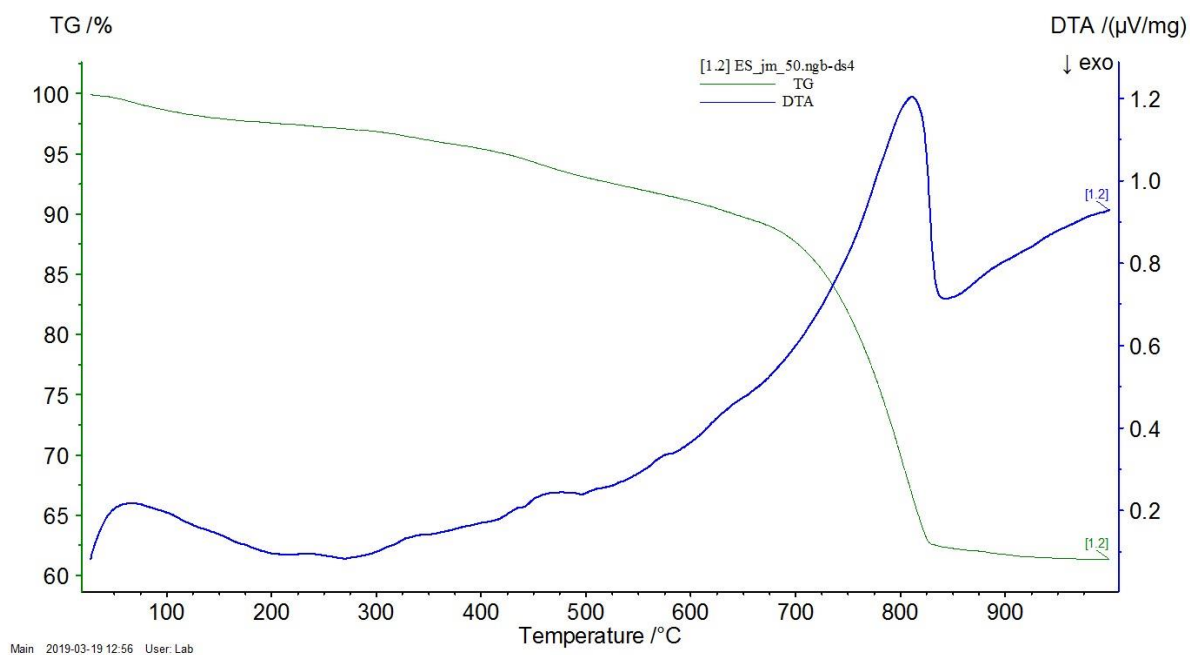
Διάγραμμα 49 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MEN_fm_80



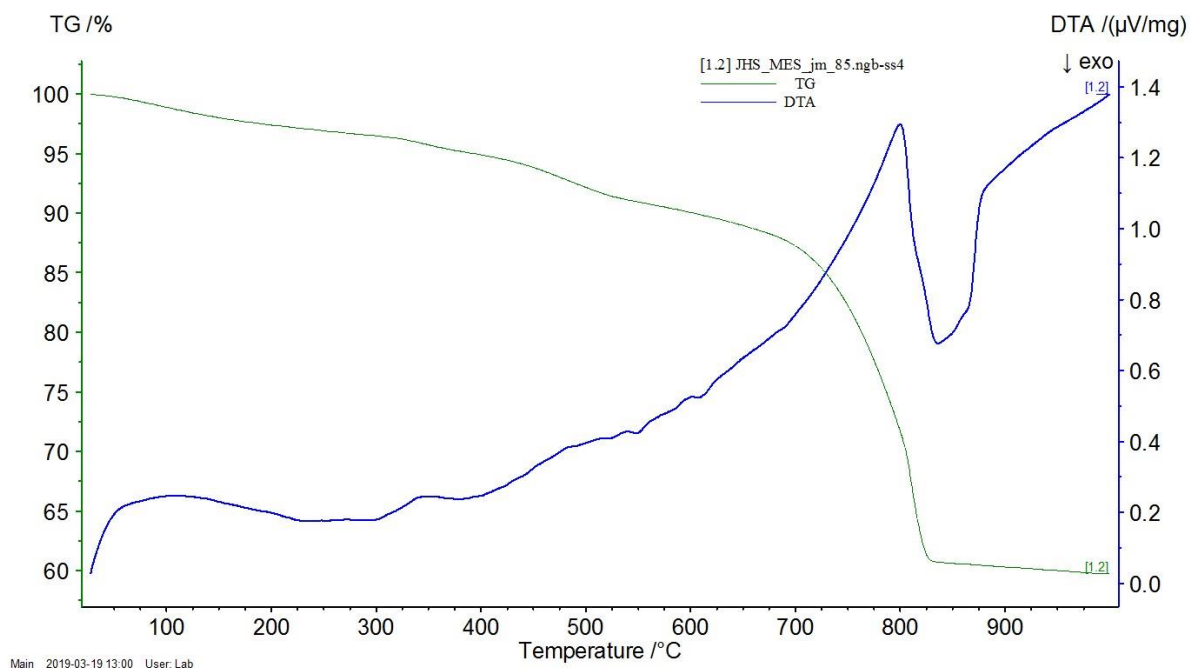
Διάγραμμα 50 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MEN_fm_80



Διάγραμμα 51 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MEN_jm_200



Διάγραμμα 52 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MES_jm_50



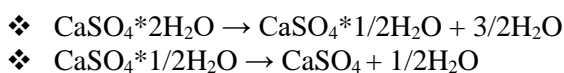
Διάγραμμα 53 Θερμογράφημα Δείγματος JHS_MES_jm_80

Επεξεργασία Αποτελεσμάτων DTA-TG

Από τις ποσοστιαίες απώλειες μάζας στα δύο τελευταία διαστήματα, οι οποίες αντιστοιχούν στην μάζα του χημικά δεσμευμένου νερού και του διοξειδίου του άνθρακα που αποδεσμεύεται από τη διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων, υπολογίζεται η αναλογία $\text{CO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ χημικά δεσμευμένο, που ταυτοποιεί την υδραυλικότητα του κονιάματος. Υψηλές τιμές υποδηλώνουν μη υδραυλικά κονιάματα (τιμή υψηλότερη του 7,5), ενώ χαμηλές υδραυλικά κονιάματα. Βέβαια, εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη εάν το δείγμα περιέχει και άλλες ενώσεις που περιέχουν χημικά δεσμευμένο νερό οι οποίες πρέπει να αφαιρεθούν από το ποσοστό των χημικών νερών πριν τον υπολογισμό του αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας.

Ακόμη από τις ποσοστιαίες απώλειες μάζας μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό γύψου και ασβεστίτη που περιέχεται στα δείγματα. Το ποσοστό αυτό, έχει υπολογιστεί στα δείγματα που εμφάνισαν γύψο στο XRD και θεωρώντας ότι όλη η ποσότητα της απώλειας μάζας στο διάστημα 120-200°C προέρχεται από την αφυδάτωση του γύψου, ενώ στην πραγματικότητα, είναι πιθανό να υπάρχει και ποσοστό ημιυδρίτη και ως εκ τούτους η ποσότητα να είναι ακόμα μεγαλύτερη. Ακόμη μπορεί να προσδιοριστεί και το ποσοστό βρουσίτη και πορτλαντίτη εάν υπάρχουν στο δείγμα μέσω του νερού (H_2O) που απελευθερώνεται κοντά στις θερμοκρασίες 300-400°C και 450-500°C αντίστοιχα. Παράλληλα, το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου έχει υπολογιστεί από την απώλεια μάζας λόγω διάσπασης και έκλυσης του CO_2 θεωρώντας ότι προέρχεται όλο από αυτήν την ένωση, ενώ στην πραγματικότητα, υπάρχουν και μικρές προσμίξεις δολομίτη σε κάποιες περιπτώσεις, που είναι ωστόσο δύσκολο να διαχωριστούν, και παράλληλα κάποιο ποσοστό της απώλειας μάζας οφείλεται και σε μερική διάσπαση του ανυδρίτη σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Στα διαγράμματα των δειγμάτων που περιέχουν γύψο παρουσιάζονται δύο ενδόθερμες κορυφές στο διάστημα θερμοκρασιών 120-200°C που ταυτοποιούν την διάσπαση γύψου σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

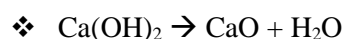


Μέσω της στοιχειομετρίας των αντιδράσεων και των μοριακών βαρών των στοιχείων το ποσοστό του γύψου μπορεί να υπολογιστεί από το ποσοστό του απομακρυσμένου νερού μέσω των τύπων:

$$m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \% = \frac{172}{36} * m_{H_2O} \%$$

Ο υπολογισμός αυτός έγινε στα δείγματα τα οποία εμφάνισαν ύπαρξη γύψου στη διαδικασία της περίθλασης ακτίνων X.

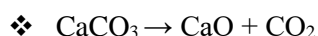
Με την ίδια λογική μπορεί να προσδιοριστεί και το ποσοστό πορτλαντίτη ($Ca(OH)_2$), όπου αυτό υπάρχει, αφού πρώτα έχει οριστεί το ποσοστό του αντίστοιχου χημικά δεσμευμένου νερού που απελευθερώνεται από την αντίστοιχη αντίδραση (το θερμοκρασιακό εύρος που λαμβάνει χώρα η συγκεκριμένη αντίδραση είναι πιο συγκεκριμένο). Έτσι η διάσπαση του πορτλαντίτη γίνεται μέσω της αντίδρασης:



Μέσω της στοιχειομετρίας των αντιδράσεων και των μοριακών βαρών των στοιχείων το ποσοστό του πορτλαντίτη μπορεί να υπολογιστεί από το ποσοστό του απομακρυσμένου H_2O μέσω του τύπου:

$$m_{Ca(OH)_2} \% = \frac{74}{18} * m_{H_2O} \%$$

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα των δειγμάτων που περιέχουν ασβεστίτη παρουσιάζεται μία ενδόθερμη κορυφή στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^\circ C$. Με τη θεώρηση που έγινε παραπάνω ταυτοποιείται η διάσπαση ασβεστίτη μέσω της αντίδρασης:



Μέσω της στοιχειομετρίας της αντίδρασης και των μοριακών βαρών των στοιχείων το ποσοστό του ασβεστίτη μπορεί να υπολογιστεί από το ποσοστό του απομακρυσμένου CO_2 μέσω του τύπου:

$$m_{CaCO_3} \% = \frac{100}{44} * m_{CO_2} \%$$

Σύμφωνα, λοιπόν, με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και με τους αντίστοιχους υπολογισμούς κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι για να υπολογιστούν τα ποσοστά του γύψου γίνεται η υπόθεση ότι η απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $[120^\circ C - 200^\circ C]$ οφείλεται μόνο στη διάσπαση των δύο κρυσταλλικών νερού του γύψου και για το ποσοστό του ασβεστίτη γίνεται η υπόθεση ότι η απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^\circ C$ οφείλεται μόνο στη διάσπαση του $CaCO_3$. Πάντα λαμβάνεται υπόψη ότι στα δείγματα τα οποία έχουν περιέχουν αξιοσημείωτη ποσότητα γύψου, έως και 3% της απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^\circ C$, οφείλεται στη διάσπαση του $CaSO_4$, συνεπώς το ποσοστό του $CaCO_3$ έχει υπερεκτιμηθεί. Επιπρόσθετα, λαμβάνεται υπόψη ότι οι ενώσεις του εντριγκίτη ή και θωμασίτη παρουσιάζουν απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $[120^\circ C - 200^\circ C]$ λόγω των πολλών κρυσταλλικών νερών που περιέχουν. Συνεπώς, όπου περιέχονται οι ενώσεις αυτές έχει γίνει υπερεκτίμηση του ποσοστού του $CaSO_4 \cdot H_2O$. Ακόμη, έχει υπολογιστεί και ο λόγος $\% CO_2 / X_{\text{χημ. Δεσμ. Νερό}}$, πιο συγκεκριμένα ο λόγος της απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^\circ C$ προς την απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $[200^\circ C - 600^\circ C]$. Ο λόγος αυτός δεν ονομάζεται αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας, διότι στις περιπτώσεις των κονιαμάτων που περιέχουν γύψο ο δείκτης αυτός δεν υφίσταται.

Πίνακας 26 Ποσοστά CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, και $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του λόγου $\% \text{CO}_2$ / Χημ. Δεσμ. Νερό των Δειγμάτων

Κωδικός Δείγματος	Ποσοστό CaCO_3 (%)	Ποσοστό $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (%)	Ποσοστό $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	$\% \text{CO}_2$ / Χημ. Δεσμ. Νερό
JHS_MN3_m3	29,66	72,67*	-	4,89
JHS_MN5_jm_85	51,36	26,33*	-	5,16
JHS_MN5_jm_200	21,98	-	42,59	3,50
JHS_MS1_fm_130	70,36	-	-	5,53
JHS_MS1_fm_200	25,09	61,63	-	3,42
JHS_MS2_jm_280	69,57	-	-	5,59
JHS_MS3_jm_80	36,50	51,03*	-	7,80
JHS_MS3_jm_135	29,07	-	17,02	2,66
JHS_MS3_jm_200	37,05	-	27,59	3,99
JHS_MS4_jm_280	67,41	-	-	4,98
JHS_MS5_jm_200	70,61	5,11	-	5,21
JHS_MS5_jm_285	67,41	13,14*	-	10,19
JHS_MW_fm_80	76,64	-	-	11,92
JHS_MW_fm_130	27,30	64,21	-	10,63
JHS_MW_jm_80	21,91	64,64*	-	3,97
JHS_MEN_fm_80	39,52	35,64	-	3,87
JHS_MEN_jm_80	83,55	7,21	-	21,13
JHS_MEN_jm_200	60,50	5,88	-	3,78
JHS_MES_jm_50	67,61	-	-	4,58
JHS_MES_jm_80	68,95	-	-	4,13
JHS_MW_fm_50	24,34	64,79	-	7,44
JHS_MW_fm_200	77,77	-	-	8,87
JHS_MW_jm_50	49,18	41,61	-	5,01
JHS_MW_jm_135	31,23	59,77	-	6,48
JHS_MW_jm_200	72,82	6,12	-	9,83
JHS_MES_fm_85	34,75	52,75	-	6,68
JHS_MES_fm_135	61,75	-	-	3,27
JHS_MES_jm_135	60,55	-	-	2,99
JHS_MES_jm_200	66,89	-	-	3,91
JHS_MEN_fm_135	66,50	-	-	4,61
JHS_MEN_jm_50	69,45	-	-	6,87
JHS_MEN_jm_135	71,18	9,27	-	7,64
JHS_MW_m	23,39	-	-	2,71
JHS_FEN_rm	84,23	-	-	32,51

*Στις περιπτώσεις αυτές, το ποσοστό του γύψου που έχει υπολογιστεί, δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτικό, λόγω της αφυδάτωσης και επακόλουθης απώλειας μάζας των νερών του εντριγκίτη ή/και θωμασίτη

Χαρακτηρισμός Κορυφών Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης

Βόρεια Όψη

JHS_MN3_m3

Η 1^η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 53,7°C. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία μικρή κορυφή στους 137°C και μία πιο μεγάλη στους 156,5°C. Αυτές οι ενδόθερμες οφείλονται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου και του εντρινγκίτη. Έπειτα, παρουσιάζεται μία εξώθερμη κορυφή στους 357,1°C, λόγω της ύπαρξης γύψου στο δείγμα. Τέλος, παρατηρείται μία ενδόθερμη στους 784,1°C λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων.

Εδώ να σημειωθεί ότι η κορυφή του εντρινγκίτη όταν χάνει τα κρυσταλλικά του νερά βρίσκεται στους 133,9°C και το αντίστοιχο ποσοστό απώλειας μάζας, που είναι στο θερμοκρασιακό διάστημα [70°C - 135°C], είναι 3,91%. Συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί πιο αποτελεσματικά το ποσοστό του γύψου, αφαιρώντας δηλαδή το 3,91% από το ποσοστό του θερμοκρασιακού διαστήματος [120°C-200 °C]. Έτσι το ποσοστό του γύψου που προκύπτει είναι : **53,99%**.

JHS_MN5_jm_85

Η 1^η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA στους 150°C και οφείλεται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου, να σημειωθεί ότι μερικές φορές τα κρυσταλλικά νερά του γύψου και του θωμασίτη. Αντί για δύο κορυφές εμφανίζονται σε μία κορυφή σε λίγο μικρότερες θερμοκρασίες, πρόκειται για ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου γύψου. Έπειτα, παρουσιάζονται δύο ενδόθερμες στους 329,6°C και 345°C, λόγω της ύπαρξης χημικά δεσμευμένου νερού στο δείγμα και μία εξώθερμη στους 360°C λόγω του μετασχηματισμού του γύψου. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 574,1 °C λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος, παρατηρείται μία ενδόθερμη στους 820°C λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων.

JHS_MN5_jm_200

Η 1^η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 55°C. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη κορυφή στους 123°C. Αυτή η ενδόθερμη οφείλεται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του εντρινγκίτη. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να υπολογιστεί και το ποσοστό απώλειας των κρυσταλλικών νερών του. Αυτό βρίσκεται στο διάστημα [55°C-200°C] και είναι 6,57%. Έπειτα, παρουσιάζεται μία ενδόθερμη κορυφή στους 378,2°C, λόγω της αφυδάτωσης του βρουσίτη ή του υδρομαγνησίτη και μία στους 484,3°C, λόγω της αφυδάτωσης του πορτλαντίτη. Να σημειωθεί ότι παρατηρείται μία αλλαγή κλίσης στους 457,5°C στη κορυφή του πορτλαντίτη. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 582,2°C λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Μετά, εμφανίζεται μία ενδόθερμη κορυφή στους 654,4°C, μάλλον λόγω διάσπασης του CaSO₄, που ακολουθείται από τη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων στους 780°C.

Στις θερμοκρασίες που χάνεται το χημικά δεσμευμένο νερό παρατηρούνται κάποια επιμέρους διαφορετικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μία απώλεια μάζας στο διάστημα [325°C-383°C] με ποσοστό 0,98% η οποία ίσως να οφείλεται στην απώλεια των υδροξυλίων του βρούσιτη. Αντίστοιχα, η απώλεια μάζας του πορτλαντίτη μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα, λόγω αυτής της αλλαγής στη κλίση του διαγράμματος, που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Αυτά τα διαστήματα είναι : [384°C -453°C]→4,02% και [453°C -525°C]→6,38%. Το συνολικό ποσοστό είναι **10,4%**, με βάση του οποίου έγινε και ο υπολογισμός του ποσοστού του πορτλαντίτη.

Νότια Όψη

JHS_MS1_fm_130

Η 1^η και η 2^η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 51°C και 77,3°C. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 575,8°C λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος, παρατηρείται μία ενδόθερμη στους 827°C, λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων.

JHS_MS1_fm_200

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 61,8°C. Έπειτα, παρουσιάζεται μία ενδόθερμη στους 120°C, μάλλον λόγω κάποιου υγροσκοπικού άλατος. Στη συνέχεια, εμφανίζονται δύο ενδόθερμες κορυφές στους 154,8°C και 171,3°C. Αυτές οφείλονται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 575°C λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Ακόμη, παρατηρείται μία ενδόθερμη στους 751°C λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων. Τέλος, ακολουθούν άλλες δύο ενδόθερμες κορυφές στους 856,4°C και 984,8°C, μάλλον λόγω διάσπασης του CaSO₄.

JHS_MS2_jm_280

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 61,8°C. Μετά εμφανίζεται μία σειρά από ενδόθερμες κορυφές λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Αυτές εμφανίζονται στους 201,8°C, 261,4°C, 398,4°C και 471,7°C. Έπειτα, παρουσιάζονται δύο ενδόθερμες λόγω της αποσύνθεσης του ασβεστίτη και του CaSO₄, στους 758,6°C και 785°C. Τέλος, παρατηρείται μία εξώθερμη στους 819,6°C.

JHS_MS3_jm_80

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 54,3°C. Στη συνέχεια, εμφανίζονται δύο ενδόθερμες κορυφές στους 152,6°C και 169,8°C. Αυτές οφείλονται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου και του εντρινγκίτη ή και θωμασίτη. Έπειτα, παρουσιάζεται μία εξώθερμη κορυφή στους 354,4°C, λόγω της ύπαρξης γύψου στο δείγμα. Ακόμη παρουσιάζεται μία ενδόθερμη στους 488,2°C λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Έπειτα, παρουσιάζεται μία ενδόθερμη λόγω της αποσύνθεσης του ασβεστίτη στους 815,4°C. Τέλος, η ενδόθερμη στους 888,3°C όπου πιθανώς να οφείλεται στη διάσπαση του CaSO₄.

JHS_MS3_jm_135

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 56,3°C. Η ενδόθερμη στους 115,7°C οφείλονται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του εντρινγκίτη ή και θωμασίτη. Στους 284°C η ενδόθερμη εμφανίζεται λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Έπειτα, παρουσιάζεται μία ενδόθερμη κορυφή στους 383,6°C, λόγω της αφυδάτωσης του βρουσίτη ή υδρομαγνησίτη και μία στους 461,6°C, λόγω της αφυδάτωσης του πορτλαντίτη. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 573,6°C, λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος, οι ενδόθερμες στους 603,2°C και 786,6°C οφείλονται στην αποσύνθεση ανθρακικών ενώσεων.

Να σχολιαστεί σε αυτό το σημείο ότι μπορούν να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απώλειας μάζας του εντρινγκίτη ή και θωμασίτη. Αυτό αντιστοιχεί στο θερμοκρασιακό διάστημα [62°C -250°C] και είναι ίσο με **8,25%**. Ακόμη, μπορεί να προσδιοριστεί και η απώλεια μάζας λόγω της διάσπασης των υδροξυλίων του βρουσίτη στο θερμοκρασιακό διάστημα [315°C -403,5°C] και είναι ίσο με **2,51%**. Τέλος, παρατηρείται και μία ακόμη απώλεια μάζας στο διάστημα [403,5°C -510,5°C] που οφείλεται στο πορτλαντίτη το οποίο είναι **4,11%**, με βάσει του οποίου έγινε και ο υπολογισμός του ποσοστού του πορτλαντίτη.

JHS_MS3_jm_200

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 52,9°C. Η ενδόθερμη στους 95°C οφείλονται στην διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του εντρινγκίτη ή και θωμασίτη. Έπειτα, παρουσιάζεται μία ενδόθερμη κορυφή στους 375,6°C, λόγω της αφυδάτωσης του βρουσίτη και μία στους 473°C, λόγω της αφυδάτωσης του πορτλαντίτη. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 578,4°C, λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος, οι ενδόθερμες στους 642,7°C και 786,1°C οφείλονται στην αποσύνθεση ανθρακικών ενώσεων.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι μπορούν να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απώλειας μάζας του εντριγκίτη ή και θωμασίτη. Αυτό αντιστοιχεί στο θερμοκρασιακό διάστημα [54,5°C -176°C] και είναι ίσο με **3%**. Ακόμη, μπορεί να προσδιοριστεί και η απώλεια μάζας λόγω της διάσπασης των υδροξυλίων του βρουσίτη στο θερμοκρασιακό διάστημα [301,7°C -399,5°C] και είναι ίσο με **2,26%**. Τέλος, παρατηρείται και μία ακόμη απώλεια μάζας στο διάστημα [399,5°C -519,5°C] που οφείλεται στο πορτλαντίτη το οποίο είναι **6,74%**, με βάση του οποίου έγινε και ο υπολογισμός του ποσοστού του πορτλαντίτη.

JHS_MS4_jm_280

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 57,7°C. Οι επόμενες δύο στους 92,9°C και 131,8°C ίσως οφείλονται στη διάσπαση κρυσταλλικών νερών από υγροσκοπικά αλάτια. Έπειτα, εμφανίζονται άλλες δύο ενδόθερμες στους 247,6°C και 337,1°C λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία σειρά από ενδόθερμες οι οποίες οφείλονται στη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων και εξώθερμες κορυφές (οι δύο τελευταίες). Οι ενδόθερμες βρίσκονται στους 765,7°C και 792,5°C και οι εξώθερμες στους 866,8°C και 906,8°C.

JHS_MS5_jm_200

Η πρώτη ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 60,8°C. Η επόμενη ενδόθερμη βρίσκεται στους 135°C και οφείλεται στη διάσπαση κρυσταλλικών νερών που βρίσκονται στη δομή του γύψου. Οι ενδόθερμες στους 337,6°C και 362,5°C υπάρχει λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία σειρά από ενδόθερμες και εξώθερμες κορυφές οι οποίες οφείλονται στη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄. Οι ενδόθερμες είναι στους 605°C, 750,6°C και 778,7°C και οι εξώθερμες είναι στους 875,4°C, 907,9°C και 937,9°C.

JHS_MS5_jm_285

Η πρώτη ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 55,2°C. Οι επόμενες δύο ενδόθερμες βρίσκονται στους 123,9°C και 142°C και οφείλονται στη διάσπαση κρυσταλλικών νερών που βρίσκονται στη δομή του γύψου και του θωμασίτη, δε μπορούν όμως να διαχωριστούν με ασφάλεια. Οι ενδόθερμες στους 774,5°C και 791,7°C οφείλονται στη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄. Τέλος, παρατηρούνται τρεις εξώθερμες στους 814,6°C, 837,5°C και 854,9°C.

Δυτική Όψη

JHS_MW_fm_80

Η πρώτη ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 73,2°C. Η ενδόθερμη στους 326,3°C υπάρχει λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Ακόμη, εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 580,2°C, λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Οι ενδόθερμες στους 776,5°C, 810,3°C και 831,4°C οφείλονται στη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄. Τέλος παρατηρείται μία εξώθερμη στους 853,9°C, μετά από αυτή τη κορυφή το διάγραμμα έχει ανοδική πορεία.

JHS_MW_fm_130

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 52,2°C. Οι επόμενες δύο ενδόθερμες οφείλονται στη διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου και βρίσκονται στους 151,5°C και 163,2°C. Στη συνέχεια, ακολουθεί η εξώθερμη κορυφή του γύψου στους 354,8°C. Τέλος, έχουμε την ενδόθερμη της αποσύνθεσης του ασβεστίτη στους 784,2°C και της διάσπασης του CaSO₄ στους 877,3°C.

JHS_MW_jm_80

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 52,6°C. Οι επόμενες δύο ενδόθερμες οφείλονται στη διάσπαση των κρυσταλλικών νερών του γύψου και του θωμασίτη και βρίσκονται στους 151,8°C και 174,7°C. Η κορυφή του θωμασίτη φαίνεται να υπερκαλύπτεται από αυτή του γύψου. Έπειτα, ακολουθεί η εξώθερμη κορυφή του γύψου στους 360,8°C. Στη συνέχεια, εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 575,9°C, λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος, έχουμε την ενδόθερμη της αποσύνθεσης του ασβεστίτη στους 779,5°C

Ανατολική Όψη

JHS_MEN_fm_80

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 73°C. Η επόμενη ενδόθερμη εμφανίζεται στους 150,7°C και οφείλεται στην αποσύνθεση των κρυσταλλικών νερών του γύψου. Τέλος εμφανίζονται δύο ενδόθερμες λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄ στους 760°C και 813,2°C.

JHS_MEN_jm_80

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 53,4°C. Η επόμενη ενδόθερμη εμφανίζεται στους 141,9°C και οφείλεται στην αποσύνθεση των κρυσταλλικών νερών του γύψου. Έπειτα, ακολουθεί η εξώθερμη κορυφή του γύψου στους 306,1°C. Τέλος εμφανίζονται δύο ενδόθερμες λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄ μία μικρότερη στους 785,4°C και μία μεγάλη στους 847,9°C.

JHS_MEN_jm_200

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 57,3°C. Αμέσως μετά εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 83,8°C μάλλον λόγω διάσπασης κρυσταλλικών νερών από υδροσκοπικά άλατα. Η επόμενη ενδόθερμη εμφανίζεται στους 136,8°C και οφείλεται στην αποσύνθεση των κρυσταλλικών νερών του γύψου. Στη συνέχεια, εμφανίζεται μία ενδόθερμη στους 580°C, λόγω αλλαγής φάσης του χαλαζία. Τέλος εμφανίζονται δύο ενδόθερμες λόγω της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων μία μεγάλη στους 785,4°C και μία μικρότερη στους 847,9°C.

JHS_MES_jm_50

Η 1η ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 66,6°C. Και η 2^η οφείλεται στην αποσύνθεση ανθρακικών ενώσεων στους 811°C.

JHS_MES_jm_80

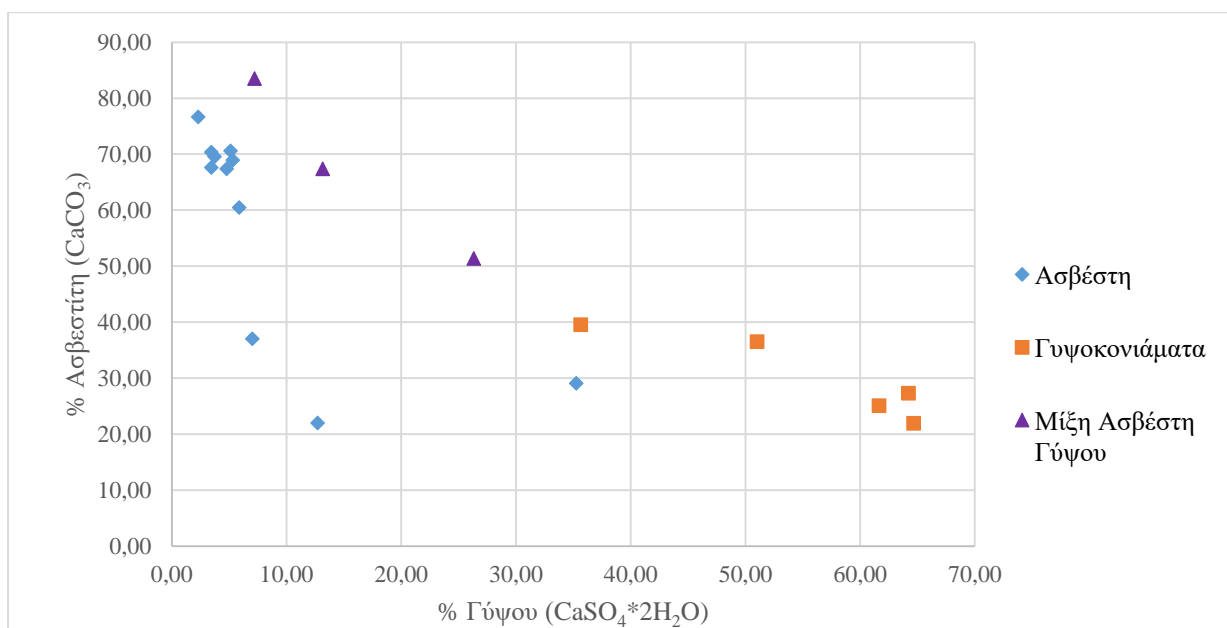
Η πρώτη ενδόθερμη κορυφή της καμπύλης της DTA οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του δείγματος στους 108,2°C. Οι ενδόθερμες στους 340,4°C και 540°C υπάρχουν λόγω χημικά δεσμευμένου νερού. Ακόμη, οι ενδόθερμες στους 604,9°C, 799,6°C, 827,3°C και μία μικρότερη στους 857°C οφείλεται στην αποσύνθεση ανθρακικών ενώσεων και του CaSO₄. Τέλος, παρατηρείται μία εξώθερμη στους 870°C

Συσχέτιση Αποτελεσμάτων DTA-TG

Από τα αποτελέσματα τις θερμοβαρυμετρικής πειραματικής διαδικασίας υπολογίστηκαν προσεγγιστικά τα ποσοστά των του γύψου και του ασβεστίτη. Από αυτά τα αποτελέσματα τα δείγματα διαχωρίστηκαν σε τρεις ομάδες. Η μία έχει κονιόματα με βάση των ασβεστίτη, η 2^η έχει βάση το γύψο και η 3^η είναι μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της 1^{ης} και 2^{ης} ομάδας. Στο παρακάτω διάγραμμα είναι εμφανής αυτός ο διαχωρισμός. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της περίθλασης ακτίνων X τα αντίστοιχα κονιόματα έχουν χαρακτηριστεί ως 1) Ασβέστη ή Ασβέστη Παρουσία Γύψου 2) Γυψοκονιόματα 3) Ασβέστη παρουσία Γύψου

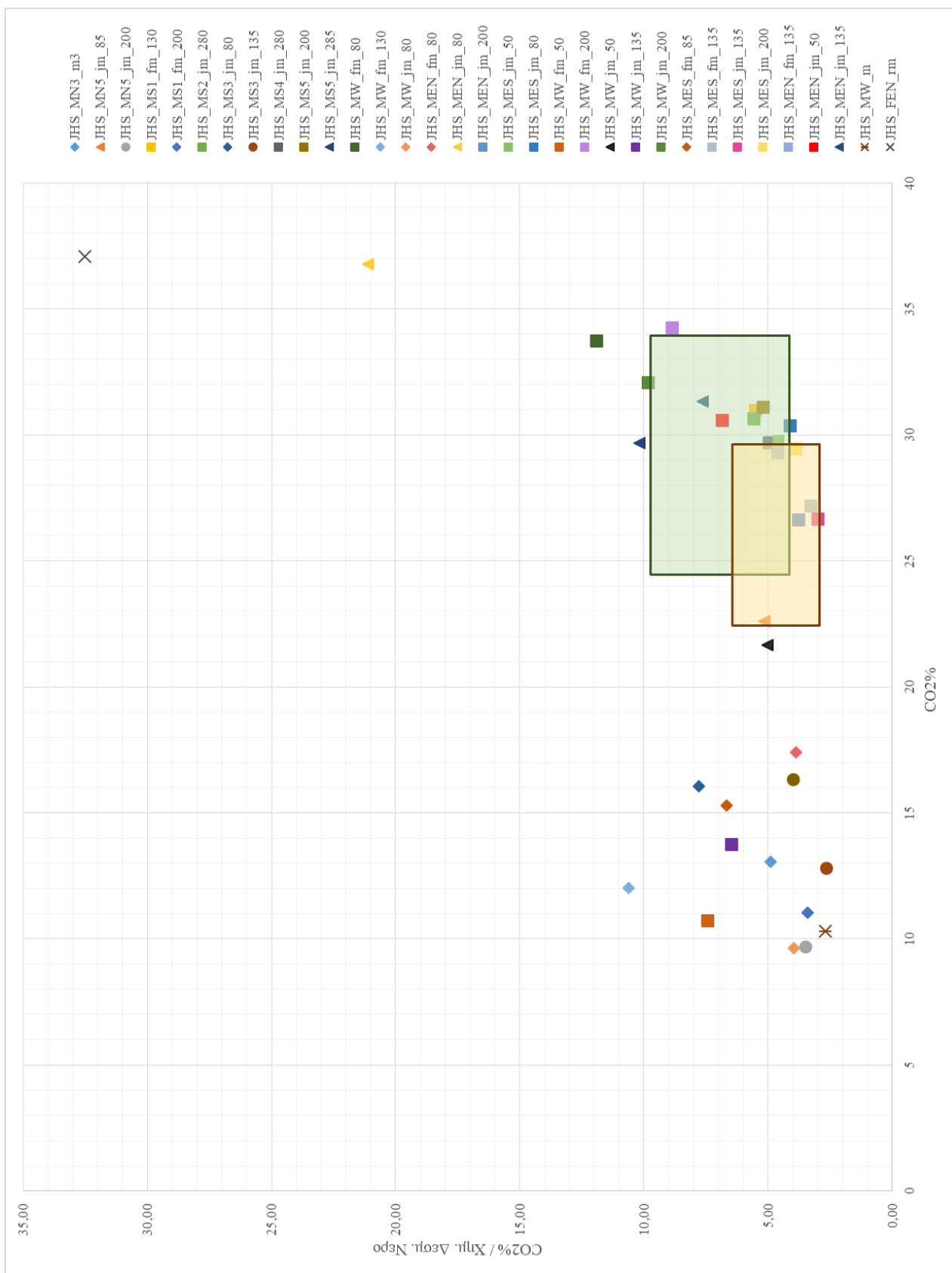
Πίνακας 27 Ομαδοποίηση δειγμάτων μέσω της DTA-TG

Ασβέστη	Γυψοκονιάματα	Μίξη Ασβέστη Γύψου
JHS_MN5_jm_200	JHS_MS1_fm_200	JHS_MN5_jm_85
JHS_MS1_fm_130	JHS_MS3_jm_80	JHS_MS5_jm_285
JHS_MS2_jm_280	JHS_MW_fm_130	JHS_MEN_jm_80
JHS_MS3_jm_135	JHS_MW_jm_80	
JHS_MS3_jm_200	JHS_MEN_fm_80	
JHS_MS4_jm_280		
JHS_MS5_jm_200		
JHS_MW_fm_80		
JHS_MEN_jm_200		
JHS_MES_jm_50		
JHS_MES_jm_80		



Διάγραμμα 54 Διαχωρισμός δειγμάτων σε τρεις ομάδες

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου σε σχέση με το ποσοστό του γύψου, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Στα κονιάματα ασβέστη συμπεριλαμβάνονται τα κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη, είναι τα τρία σημεία που εμφανίζονται σχετικά απομακρισμένα από τα υπόλοιπα του ασβέστη. Αυτό συμβαίνει διότι περιέχουν χαμηλότερο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου και έχουν υψηλό ποσοστό απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα [120°C-200°C] καθώς περιέχουν αρκετή ποσότητα εντριγκίτη ή και θωμασίτη.

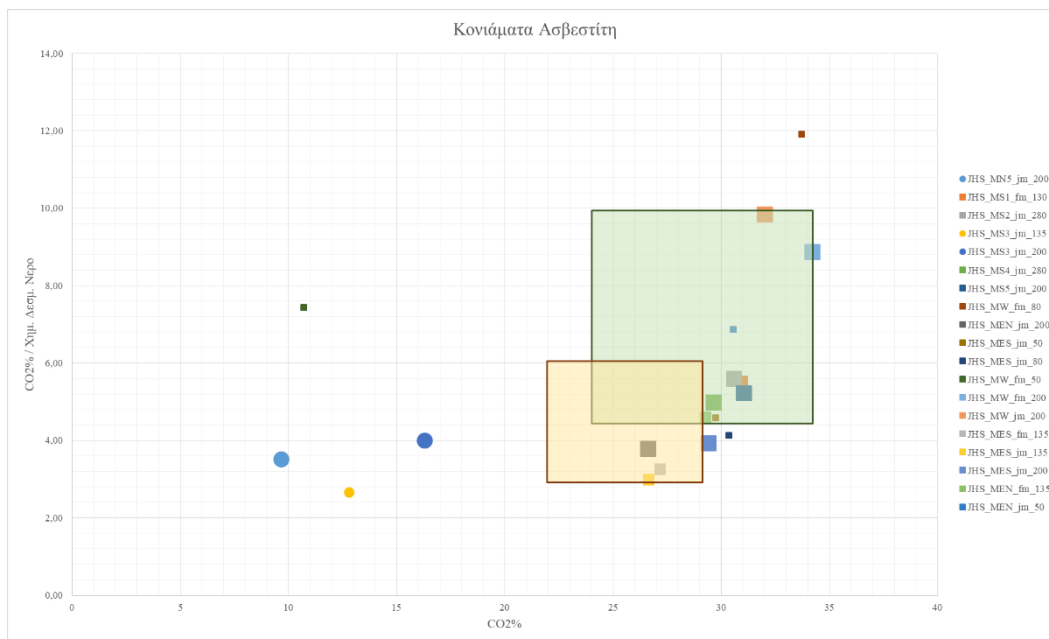


Διάγραμμα 55 Απόλεια %CO₂ – Λόγος Απόλειας %CO₂ / %Απόλεια Χημ. Δεσμ. Νερού. Με τετράγωνο εμφανίζονται τα Κονιάματα Ασβέστη, με ρόμβο τα Γυψοκονιάματα, με τρίγωνο τα μικτά κονιάματα ασβέστη-γύψου και με κύκλο τα κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του XRD

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται το ποσοστό της απώλειας μάζας των δειγμάτων στο θερμοκρασιακό διάστημα $>600^{\circ}\text{C}$, όπου αντιστοιχεί στην **απώλεια $\% \text{CO}_2$** των δειγμάτων ως προς το λόγο $\% \text{CO}_2 / \% \text{Απώλεια Χημ. Δεσμ. Νερού}$, όπου η ποσοστιαία απώλεια μάζας χημικά δεσμευμένου νερού αντιστοιχεί στην απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα $[200^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}]$, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Στα κονιάματα με ασβεστιτική σύσταση ο λόγος αυτός είναι ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας. Στο παραπάνω διάγραμμα ακόμη έχουν σημειωθεί και δύο περιοχές ιδιαίτερης σημασίας. Η πράσινα χρωματισμένη περιοχή αντιστοιχεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στα εύρη τιμών των υδραυλικών ασβεστιτικών κονιαμάτων (Hydraulic lime Mortars), ενώ η κίτρινα χρωματισμένη περιοχή αντιστοιχεί στα εύρη τιμών των κονιαμάτων με τεχνητή ποζολάνα (Artificial pozzolanic mortars). Επιπρόσθετα, τα ασβεστιτικής φύσης κονιάματα που εμφανίζουν $\% \text{CO}_2$ μεγαλύτερη το 32% και αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας κοντά στη τιμή του 10 πρόκειται για κονιάματα αερικής ασβέστου (Lime Mortars). (6)

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η πλειονότητα των κονιαμάτων ασβέστη βρίσκεται στη 1^η και 2^η κατηγορία, πιο συγκεκριμένα πρόκειται είτε για κονιάματα υδραυλικής ασβέστου (Hydraulic lime Mortars) είτε για κονιάματα με τεχνητή ποζολάνα (Artificial pozzolanic mortars). Παρατηρούνται ακόμη τρία κονιάματα αερικής ασβέστου, τα οποία βρίσκονται στη δυτική όψη του μνημείου (MW_fm_80, MW_fm_200 και MW_jm_200). Το χημικά δεσμευμένο νερό των ασβεστιτικών κονιαμάτων κυμαίνεται στα ποσοστά $[1,44\% - 8,9\%]$ Τα κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη εμφανίζονται κάτω αριστερά στο διάγραμμα, πιο συγκεκριμένα εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά $\% \text{CO}_2$, που είναι λογικό καθώς δεν έχει ολοκληρωθεί η μετατροπή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε CaCO_3 και εμφανίζουν χαμηλές τιμές του αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας. Το χημικά δεσμευμένο νερό των ασβεστιτικών κονιαμάτων με παρουσία πορτλαντίτη κυμαίνεται στα ποσοστά $[8,94\% - 13,12\%]$.

Στην ίδια περιοχή με τα κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη, παρατηρούνται και τα γυψοκονιάματα, όπου και πάλι εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά $\% \text{CO}_2$, καθώς δεν περιέχουν μεγάλες ποσότητες CaCO_3 , αλλά $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Το χημικά δεσμευμένο νερό των γυψοκονιαμάτων κυμαίνεται στα ποσοστά $[1,13\% - 4,49\%]$. Τα μικτά κονιάματα Ασβέστη-Γύψου παρατηρούνται σε περιοχές μεγαλύτερου $\% \text{CO}_2$, καθώς αυξάνεται και η ποσότητα του CaCO_3 . Το χημικά δεσμευμένο νερό των μικτών κονιαμάτων ασβέστη-γύψου κυμαίνεται στα ποσοστά $[1,74\% - 4,38\%]$ Άρα τα κονιάματα που περιέχουν είτε μικρή είτε μεγάλη ποσότητα γύψου εμφανίζουν όμοια εύρη χημικά δεσμευμένου νερού. Τέλος, τα κονιάματα από προηγούμενες αποκαταστάσεις εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά. Το νεότερο κονίαμα αποκατάστασης που ελήφθη από το δυτικό φάτνωμα, το οποίο περιείχε μεγάλη ποσότητα θραυσμένο κεραμικού, παρατηρείται αρκετά κάτω αριστερά στο διάγραμμα. Το νεότερο κονίαμα λευκού χρωματισμού με κόκκινη επίστρωση, το οποίο ελήφθη από το βορειοανατολικό φάτνωμα εμφανίζει υψηλές τιμές και $\% \text{CO}_2$ και του αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας.



Διάγραμμα 56 Απώλεια %CO₂ – Λόγος Απώλειας %CO₂ / %Απώλεια Χημ. Δεσμ. Νερού Κονιαμάτων Ασβεστίτη

Μετρήσεις DTA-TG στις κονίες των δειγμάτων

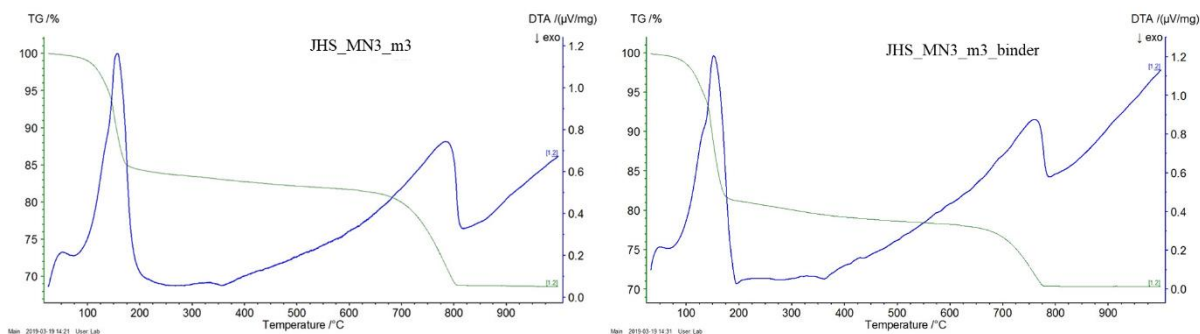
Η μέτρηση της θερμοβαρυμετρίας και διαφορικής θερμικής ανάλυσης έγινε και στις κονίες των δειγμάτων στις οποίες πραγματοποιήθηκε ο φυσικός διαχωρισμός τις κονίας και των αδρανών. Παρακάτω παρουσιάζεται ο αντίστοιχος πίνακας των απωλειών μάζας κατά τη θερμοβαρυμετρική μέτρηση.

Πίνακας 28 Αποτελέσματα Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης κονιών

Κωδικός Δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα (°C)			
	<120°C	120-200°C	200-600°C	600-1000°C
JHS_MN3_m3_binder	0,22	15,72	1,58	7,67
JHS_MN5_jm_85_binder	3,03	4,11	4,83	24,06
JHS_MN5_jm_200_binder	4	1,42	11,73	15,03
JHS_MS5_jm_285_binder	1,92	5,61	3,16	24,52
JHS_MW_jm_80_binder	1,42	14,51	1,58	7,67
JHS_MES_jm_50_binder	1,98	0,82	7,96	32,46

Παρακάτω ακολουθούν τα θερμογραφήματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις συγκριτικά με το ολικό κονίαμα, μαζί με τον επιμέρους σχολιασμό τόσο για την DTA όσο και για την TG. Μετά τον επιμέρους σχολιασμό, εμφανίζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα τα ποσοστά του πορτλαντίτη, ασβεστίτη, γύψου και ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας.

JHS_MN3_m3

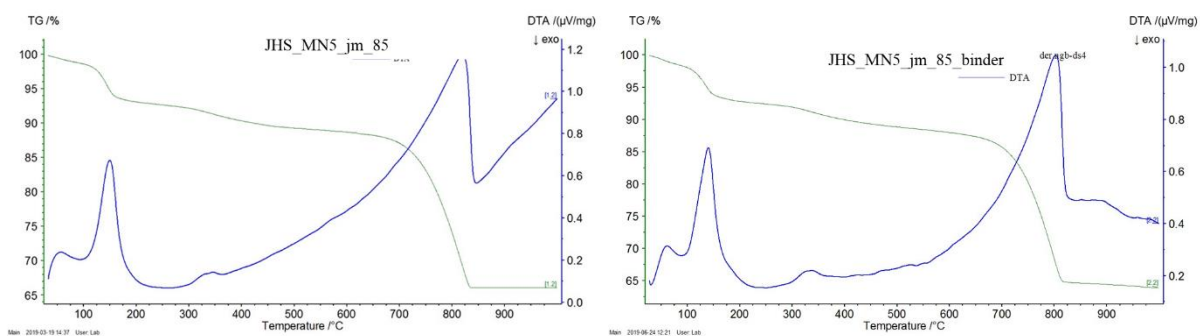


Διάγραμμα 57 Θερμογραφήματα κονιάματος και κονιάς του JHS_MN3_m3

Στο θερμογράφημα του DTA γίνονται οι εξής παρατηρήσεις. Στους 51,2°C η ενδόθερμη κορυφή οφείλεται στο ροφημένο νερό. Στη συνέχεια, οι κορυφές στους 132,5°C και 152,3°C οφείλονται στην απώλεια των κρυσταλλικών νερών του γύψου και του θωμασίτη ή εντρινγκίτη που περιέχεται στη κονία του δείγματος. Ακόμη μπορεί να προσδιοριστεί με καλύτερη ακρίβεια ότι η κορυφή του θωμασίτη ή εντρινγκίτη βρίσκεται στους 133,9°C και η αντίστοιχη απώλεια μάζας, που υπολογίζεται από το θερμοκρασιακό διάστημα [70°C -140°C] είναι ίση με 5,97%. Έπειτα, εμφανίζεται η εξώθερμη του γύψου στους 361,7°C και τέλος η ενδόθερμη της αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων στους 760,8°C.

Εάν αφαιρεθεί από το διάστημα [120°C -200°C] το ποσοστό του θωμασίτη ή εντρινγκίτη μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό του γύψου στη κονία το οποίο είναι: **46,58%**. Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα θωμασίτη ή εντρινγκίτη στη κονία σε σχέση με το ολικό κονίαμα.

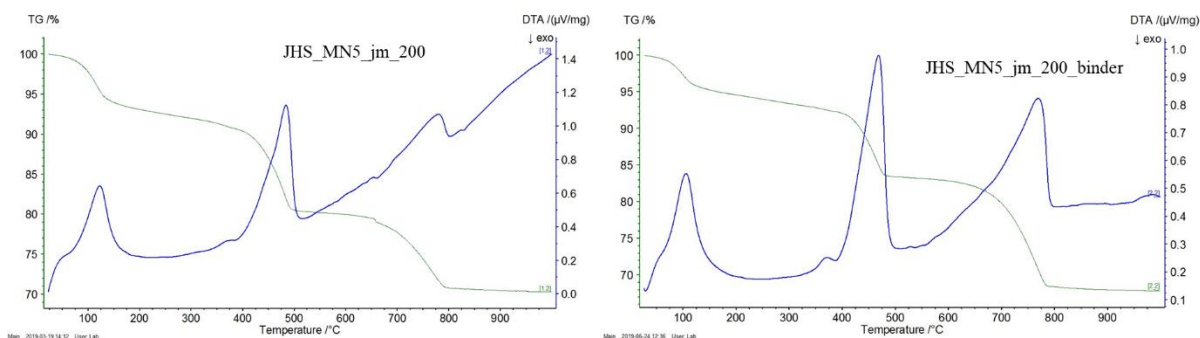
JHS_MN5_jm_85



Διάγραμμα 58 Θερμογραφήματα κονιάματος και κονιάς του JHS_MN5_jm_85

Στο θερμογράφημα της κονιάς του δείγματος καταγράφονται οι κορυφές της DTA, οι οποίες είναι οι παρακάτω. Αρχικά, η ενδόθερμη λόγω του ροφημένου νερού εμφανίζεται στους 61,5°C. Η ενδόθερμη κορυφή λόγω της απώλειας κρυσταλλικών νερών του γύψου εμφανίζεται στους 140,1°C. Στη συνέχεια, εμφανίζονται δύο ενδόθερμες κορυφές στους 328,5°C και 338°C που συνοδεύονται και με αντίστοιχη απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα [275°C -395°C] το οποίο είναι ίσο με 2,15%. Τέλος, εμφανίζεται η ενδόθερμη λόγω αποσύνθεσης ανθρακικών ενώσεων στους 802,8°C

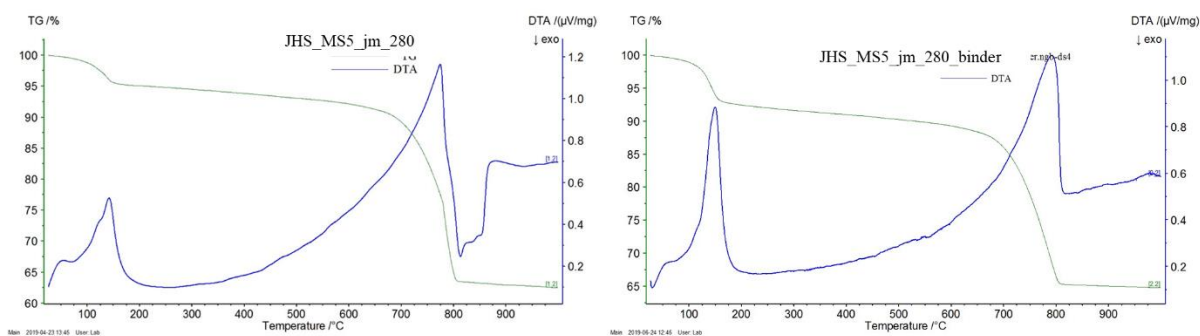
JHS_MN5_jm_200



Διάγραμμα 59 Θερμογραφήματα κονιάματος και κονιάς του JHS_MN5_jm_200

Στο θερμογράφημα της κονιάς του δείγματος καταγράφονται οι κορυφές της DTA, οι οποίες είναι οι παρακάτω. Τα ροφημένα νερά εμφανίζονται στους 55,4°C. Ο εντριγκίτης ή θωμασίτης εμφανίζεται στους 105,7°C ο οποίος συνοδεύεται και από την αντίστοιχη απώλεια μάζας στο διάγραμμα της TG στο θερμοκρασιακό διάστημα [55°C-200°C] και είναι ίσο με 5,04%. Η κορυφή του υδρομαγνησίτη ή βρουσίτη εμφανίζεται στους 371,5°C και συνοδεύεται από μία απώλεια μάζας στο διάστημα [325°C-383°C] με ποσοστό 0,62% ή οποία ίσως να οφείλεται στην απώλεια των υδροξυλίων. Έπειτα, ακολουθεί η ενδόθερμη της αποσύνθεσης του πορτλαντίτη στους 468,7°C που συνοδεύεται από την αντίστοιχη απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα [397°C-512°C] και είναι ίσο με 8,79%, με βάσει του οποίου έγινε και ο υπολογισμός του ποσοστού του πορτλαντίτη. Στο ολικό κονίαμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είχε παρατηρηθεί μία αλλαγή κλίσης στο σημείο της αποσύνθεσης του πορτλαντίτη. Το φαινόμενο παρατηρείται και στη κονία, αλλά με λιγότερη ένταση. Τέλος, παρατηρείται η ενδόθερμη της αποσύνθεσης των ανθρακικών ενώσεων στους 769,3°C.

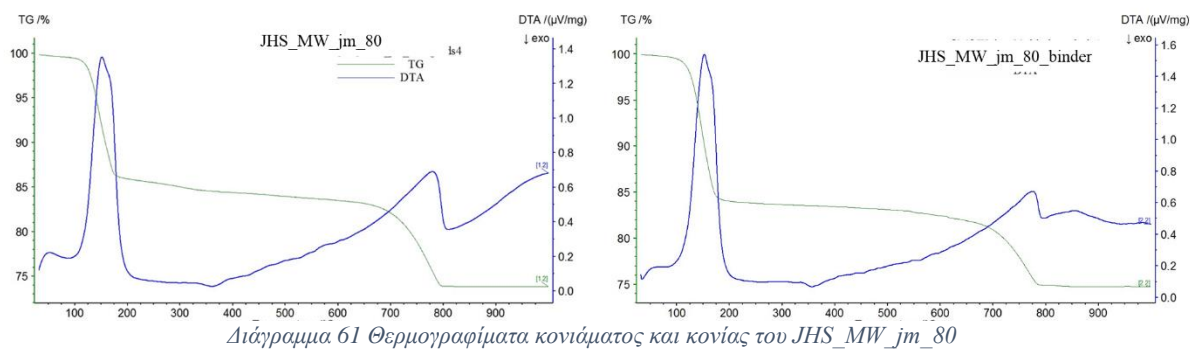
JHS_MS5_jm_280



Διάγραμμα 60 Θερμογραφήματα κονιάματος και κονιάς του JHS_MS5_jm_280

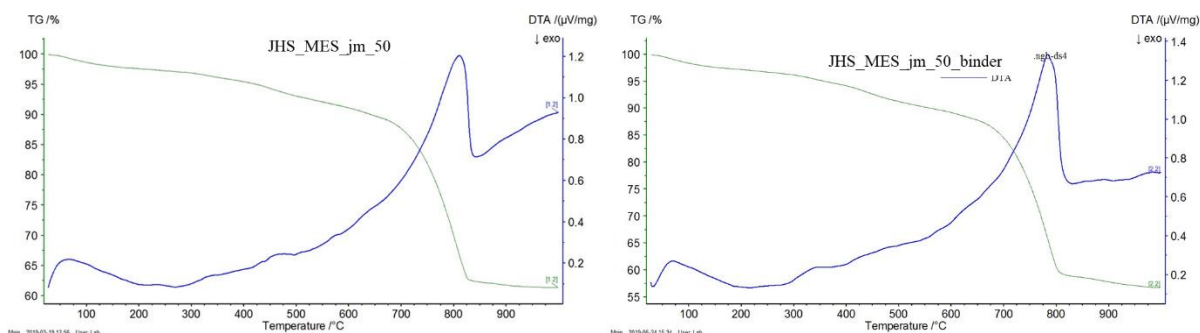
Στο θερμογράφημα της κονιάς του δείγματος καταγράφονται οι κορυφές της DTA, οι οποίες είναι οι παρακάτω. Τα ροφημένα νερά εμφανίζονται στους 60,8°C. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ενδόθερμη κορυφή της απώλειας των κρυσταλλικών νερών του θωμασίτη και γύψου, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει καλός διαχωρισμός των δύο. Πιθανώς, η κορυφή λόγω της απώλειας των κρυσταλλικών νερών του θωμασίτη είναι στους 114°C, καθώς εκεί εμφανίζεται μία αλλαγή κλίσης και του γύψου στους 150,2°C. Η αντίστοιχη απώλεια μάζας για τα κρυσταλλικά νερά του θωμασίτη και του γύψου εμφανίζεται στο διάστημα [78,5°C-200°C] και είναι ίσο με 6,94%. Τέλος, παρατηρείται η ενδόθερμη της αποσύνθεσης των ανθρακικών ενώσεων στους 791,9°C.

JHS_MW_jm_80



Στο θερμογράφημα της κονιάς του δείγματος καταγράφονται οι κορυφές της DTA, οι οποίες είναι οι παρακάτω. Η 1^η και 2^η ενδόθερμη που παρατηρούνται είναι λόγω της αποσύνθεσης των κρυσταλλικών νερών και είναι στους 152,8°C και 167°C. Η κορυφή του θωμασίτη φαίνεται να υπερκαλύπτεται από αυτή του γύψου. Στους 357,2°C παρατηρείται η εξώθερμη κορυφή του γύψου. Στους 549,6°C εμφανίζεται μία ενδόθερμη που μπορεί να οφείλεται στο καολίνη. Στους 586,7°C εμφανίζεται η αλλαγή φάσης του χαλαζία. Τέλος, παρατηρείται η ενδόθερμη της αποσύνθεσης των ανθρακικών ενώσεων στους 776°C.

JHS_MES_jm_50



Στο θερμογράφημα της κονιάς του δείγματος καταγράφονται οι κορυφές της DTA, οι οποίες είναι οι παρακάτω. Τα ροφημένα νερά εμφανίζονται στους 69,8°C. Ακολουθούν μετά δύο μικρές ενδόθερμες στους 345,8°C και 455,1°C, οι οποίες συνοδεύονται από απώλεια μάζας στο διάγραμμα της TG στα διαστήματα [289°C -370°C]→1,54% και [370°C-500°C]→3,53% που ίσως να οφείλεται και σε υδρομαγνησίτη. Έπειτα, στους 575,6°C εμφανίζεται η αλλαγή φάσης του χαλαζία. Στη συνέχεια, παρατηρείται η ενδόθερμη της αποσύνθεσης των ανθρακικών ενώσεων στους 627,8°C. Τέλος ακολουθούν δύο ενδόθερμες στους 783,8°C και 793,4°C που λίγο αλληλοκαλύπτονται οι οποίες ίσως οφείλονται στην αποσύνθεση ανθρακικών ενώσεων του MgCO₃.

Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους υπολογισμών.

Πίνακας 29 Ποσοστά γύψου, πορτλαντίτη και ασβεστίτη και Αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας των
κονιών

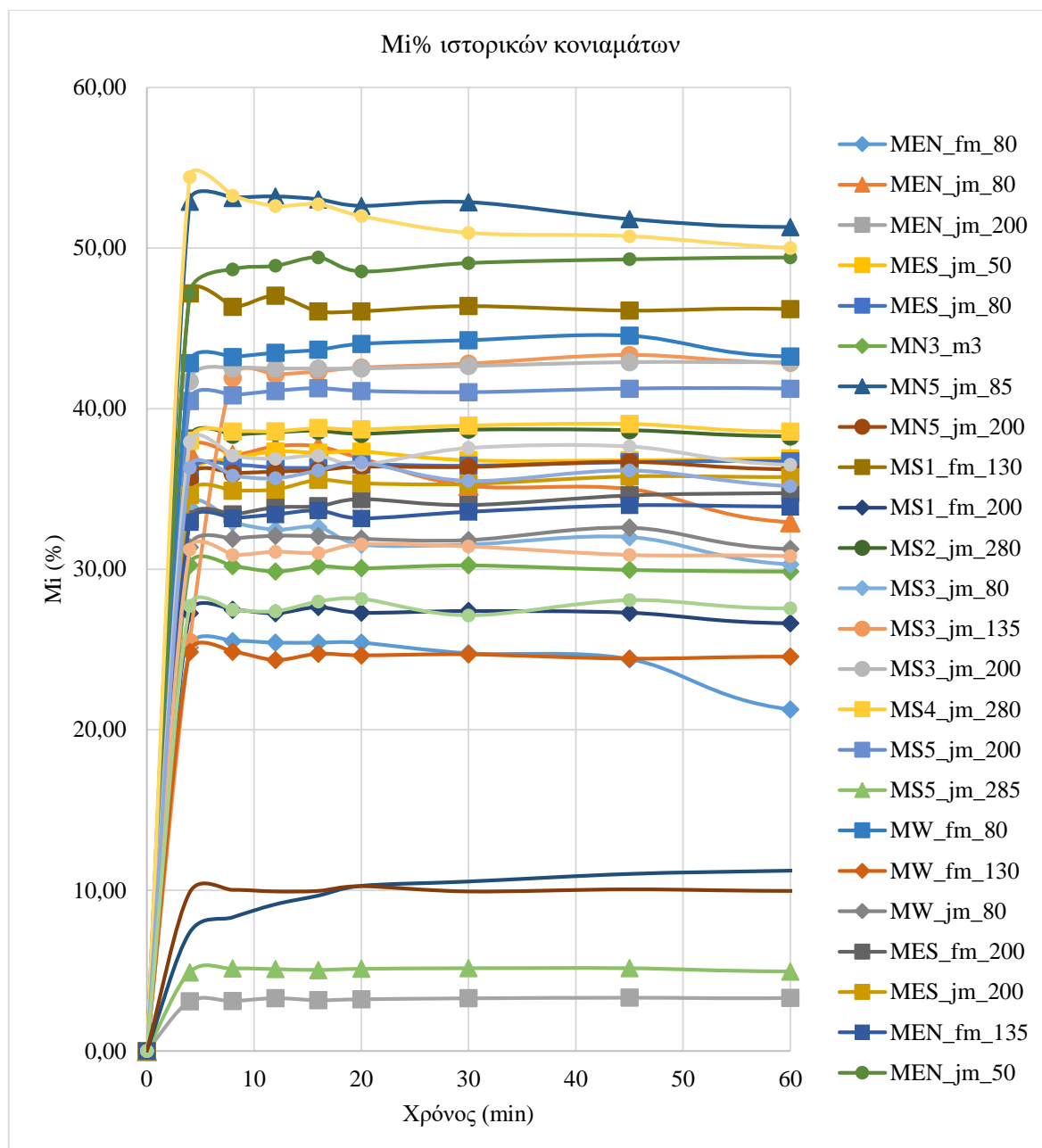
Κωδικός Δείγματος	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	CaSO ₄ *H ₂ O (%)	%CO ₂ / Χημ. Δεσμ. Νερό
JHS_MN3_m3_binder	-	17,43	46,58	4,85
JHS_MN3_m3	-	29,66	72,67	4,89
JHS_MN5_jm_85_binder	-	54,68	19,64	4,98
JHS_MN5_jm_85	-	51,36	26,33	5,16
JHS_MN5_jm_200_binder	36,14	34,16	-	5,11
JHS_MN5_jm_200	42,59	21,98	-	3,50
JHS_MS5_jm_285_binder	-	55,73	26,80	7,76
JHS_MS5_jm_285	-	67,41	13,14	10,19
JHS_MW_jm_80_binder	-	17,43	69,33	4,85
JHS_MW_jm_80	-	21,91	64,64	3,97
JHS_MES_jm_50_binder	-	73,77	-	4,08
JHS_MES_jm_50	-	67,61	-	3,78

4.1.6 Ολική Εμβάπτιση σε Νερό

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε και η ολική εμβάπτιση των δειγμάτων σε νερό σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στο πειραματικό μέρος. Η εμβάπτιση έγινε στα ήδη επιλεγθέντα κανονικοποιημένα δείγματα, είκοσι σε αριθμό. Να σημειωθεί, όμως, ότι για λόγους πληρότητας έχουν συμπληρωθεί στα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη Διπλωματική εργασία: *Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων Της Τοιχοποιίας Της Ανατολικής Και Δυτικής Οψης Του Ιερού Κουβουκλίου Του Πανάγιου Τάφου Στα Ιεροσόλυμα (50)*. Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα τις πειραματικής διαδικασίας με τα αποτελέσματα των κύριων ιδιοτήτων τους που προκύπτουν από τη πειραματική διαδικασία και το διάγραμμα ποσοστού απορρόφησης νερού για κάθε δείγμα Mi%. Προκειμένου τα αποτελέσματα να εμφανιστούν ελαφρώς πιο ευανάγνωστα το διάγραμμα παρουσιάζεται μέχρι το χρόνο των 60 λεπτών.

Πίνακας 30 Πειραματικοί υπολογισμοί της απορρόφησης νερού

Κωδικός Δείγματος	WAC%	Ανοιχτό Πορώδες (%)	ρφ (g/mL)	Απώλεια μάζας (%)
JHS_MN3_m3	34,75	38,03	1,09	2,17
JHS_MN5_jm_85	61,73	60,31	0,98	6,86
JHS_MN5_jm_200	38,53	39,23	1,02	1,36
JHS_MS1_fm_130	50,10	52,45	1,05	3,64
JHS_MS1_fm_200	34,68	39,08	1,13	2,66
JHS_MS2_jm_280	44,98	46,57	1,04	1,02
JHS_MS3_jm_80	40,79	47,40	1,16	10,20
JHS_MS3_jm_135	43,77	44,40	1,01	0,29
JHS_MS3_jm_200	47,36	46,56	0,98	1,92
JHS_MS4_jm_280	43,74	49,77	1,14	1,66
JHS_MS5_jm_200	48,71	67,16	1,38	2,49
JHS_MS5_jm_285	5,97	10,77	1,80	1,37
JHS_MW_fm_50	38,48	41,77	1,09	5,68
JHS_MW_fm_80	50,07	53,25	1,06	2,03
JHS_MW_fm_130	56,56	57,30	1,01	17,04
JHS_MW_fm_200	44,54	45,30	1,02	3,33
JHS_MW_jm_50	67,45	57,20	0,85	10,92
JHS_MW_jm_80	37,16	45,50	1,22	2,29
JHS_MW_jm_135	48,01	53,00	1,10	10,10
JHS_MW_jm_200	33,69	38,20	1,13	2,66
JHS_MW_m	12,86	27,14	2,11	0,14
JHS_MEN_fm_80	28,76	33,00	1,15	5,28
JHS_MEN_fm_135	38,34	44,48	1,16	1,22
JHS_MEN_jm_50	56,11	52,56	0,94	2,20
JHS_MEN_jm_80	46,79	55,93	1,20	9,85
JHS_MEN_jm_200	4,69	10,47	2,23	1,18
JHS_MES_fm_200	39,22	36,64	0,93	2,46
JHS_MES_jm_50	43,28	51,33	1,19	2,55
JHS_MES_jm_80	42,56	48,94	1,15	2,14
JHS_MES_jm_200	39,30	44,90	1,14	1,72
JHS_MEN_rm	10,86	22,00	2,03	0,46



Διάγραμμα 63 Ποσοστό απορρόφησης νερού των δειγμάτων συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα με τετράγωνο σχήμα έχουν σημειωθεί τα δείγματα Ασβέστη, με ρόμβο τα Γυψοκονιάματα, με τρίγωνο τα μικτά κονιάματα Ασβέστη γύψου και με κύκλο τα κονιάματα Ασβέστη με παρουσία Πορτλαντίτη. Τα δύο δείγματα τα οποία δεν έχει δείκτη είναι τα κονιάματα αποκατάστασης. Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι η πλειονότητα των δειγμάτων βρίσκεται ανάμεσα στα 25%-55% του Mi%, με την εξαίρεση τεσσάρων δειγμάτων, εκ των οποίων τα δύο πρώτα είναι κονιάματα αποκατάστασης και τα δύο τελευταία είναι δύο δείγματα που αποτελούνται σε μεγάλο μέρος από ένα μαρμαρίνο αδρανές. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι κατά των υπολογισμών των παραπάνω μεγεθών στο πίνακα ως ξηρή μάζα έχει χρησιμοποιηθεί η ξηρή μάζα μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και ως κορεσμένη τιμή μάζας η τελευταία μάζα που λήφθηκε για κάθε δείγμα. Έγινε η χρήση αυτών των τιμών επειδή, όπως εμφανίζεται και στη τελευταία στήλη του παραπάνω πίνακα, τα δείγματα εμφανίζουν μεγάλη απώλεια μάζας κατά το πέρας του πειράματος, με αυτό τον τρόπο προκύπτουν πιο αντικειμενικές τιμές των παραπάνω μεγεθών.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα μεγέθη, παρατηρείται ότι τις μικρότερες τιμές σε ολικό ροφημένο νερό και ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό τις έχουν τα κονιάματα αποκατάστασης και τα κονιάματα που

περιέχουν στη δομή τους ένα μεγάλο μαρμάρινο αδρανές. Παράλληλα, τα ίδια δείγματα παρουσιάζουν και τις υψηλότερες τιμές στη φαινόμενη πυκνότητα. Το φαινόμενο αυτό είναι απόλυτα λογικό καθώς πρόκειται για κονιάματα εντελώς διαφορετικής κατηγορίας. Συνεπώς, εξαιρούνται από τον παρακάτω σχολιασμό.

Όσον αφορά το ποσοστό ολικού ροφημένου νερού εμφανίζονται κάποιες διαφοροποιήσεις σε σύγκριση με τη σύσταση των κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα Ασβέστη φαίνεται να κυμαίνονται στις τιμές 38%-56%, πλην μίας εξαίρεσης ενός κονιάματος που εμφανίζει ποσοστό ολικού ροφημένου νερού στο 33%. Συγκριτικά με τα κονιάματα των άλλων συστάσεων, αυτό είναι και το πιο ευρύ. Οι τρεις περιπτώσεις των ασβεστιτικών κονιαμάτων με παρουσία πορτλαντίτη παρατηρείται να είναι διάσπαρτες μέσα στο εύρος τιμών των ασβεστιτικών κονιαμάτων με τιμές ~47%, ~44% και ~38%. Τα γυψοκονιάματα εμφανίζουν ένα πιο μικρό φάσμα τιμών από 28% έως και 38% με δύο εξαιρέσεις στα ~40% και ~48%. Τα μικτά κονιάματα του Ασβέστη-Γύψου παρατηρείται ότι παίρνουν κοντινές τιμές της αυτής της παραμέτρου με ποσοστά μεγαλύτερα το 60%, εκτός από ένα κονίαμα που παρουσιάζει ~47%.

Όσον αφορά το ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό και πάλι εμφανίζεται να υπάρχει κάποια μικρή συσχέτιση με τη σύσταση. Στα κονιάματα Ασβέστη παρατηρείται και πάλι ένα μεγάλο εύρος τιμών από ~39% έως και ~53% με δύο εξαιρέσεις στο ~38% και ~67%. Μέσα σε αυτό το διάστημα τιμών παρατηρούνται και οι τιμές του πορώδους των κονιαμάτων ασβέστη με παρουσία πορτλαντίτη στα ~46% (δύο από τα τρία δείγματα) και ~42%, συνεπώς σε σχετικά κοντινές τιμές μεταξύ τους. Βιβλιογραφικά τα κονιάματα αερικής ασβέστου εμφανίζουν ως ολικό πορώδες 30%-45%, τα υδραυλικής ασβέστου 18%-40% και τα τεχνικής ποζολάνης 30%-40%. Κάποια από τα δείγματα εμφανίζουν πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσα σε αυτά τα εύρη, αρκετά όμως το ξεπερνάνε. Τα γυψοκονιάματα αυτή σε αυτή τη παράμετρο εμφανίζονται ελαφρώς πιο διεσπαρμένα με το εύρος των τιμών του πορώδους αυτού να κυμαίνεται από ~33% στο ~39%, υπάρχει δηλαδή μεγαλύτερη υπερκάλυψη με το εύρος τιμών των ασβεστιτικών κονιαμάτων, αλλά σε αυτό το μέγεθος παρατηρούνται τρία δείγματα εκτός αυτού του εύρους στο ~45,5%, ~47% και ~53%. Τα μικτά κονιάματα Ασβέστη-Γύψου εμφανίζουν και τα τρία πολύ κοντινές τιμές του ανοιχτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό από ~56% έως και ~60%.

Στη φαινόμενη πυκνότητα παρατηρείται το αντίθετο φαινόμενο, αν και σε όλα τα δείγματα δεν υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στη φαινόμενη πυκνότητα. Τα κονιάματα Ασβέστη εμφανίζουν ένα μεγάλο εύρος τιμών της φαινόμενης πυκνότητας από 0,93 g/mL έως και 1,19 g/mL με μία εξαίρεση στο 1,38 g/mL συμπεριλαμβανομένου και των κονιαμάτων Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη τα οποία έχουν τιμές στα 0,98 g/mL έως και 1,02 g/mL. Κάποια από τα γυψοκονιάματα παρατηρείται να έχουν πιο κοντινές τιμές μεταξύ τους από το 1,09 g/mL έως και το 1,13 g/mL, ενώ εμφανίζονται και τέσσερις ελαφρώς πιο διάσπαρτες περιπτώσεις στα 1,01 g/mL, 1,15 g/mL και 1,16 g/mL που είναι σχετικά κοντινά μεταξύ τους και στο 1,22 g/mL. Όλα, όμως τα γυψοκονιάματα εμφανίζουν πυκνότητες άνω της μονάδας. Τέλος, τα μικτά κονιάματα Ασβέστη-Γύψου παρουσιάζουν δύο περιπτώσεις με πυκνότητα κάτω τις μονάδας, 0,85 g/mL και 0,98 g/mL και μία περίπτωση άνω της μονάδας στο 1,20 g/mL.

Ως μία γενική παρατήρηση εμφανίζεται ότι στο ποσοστό ολικού ροφημένου νερού και στο ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό τα κονιάματα ασβέστη εμφανίζουν υψηλότερα σχετικά ποσοστά με μεγαλύτερα εύρη τιμών στη πυκνότητα ισχύει και πάλι το ίδιο απλώς εμφανίζουν περισσότερο χαμηλές πυκνότητες, με τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία πορτλαντίτη να κατατάσσονται διάσπαρτα μέσα σε αυτά τα εύρη τιμών. Τα γυψοκονιάματα παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές στα μεγέθη αυτά (πλην της πυκνότητας) με μικρότερα εύρη τιμών και τέλος τα μικτά κονιάματα να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές του ποσοστού ολικού ροφημένου νερού και στο ανοιχτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό, αλλά παράλληλα να εμφανίζουν και από τις μικρότερες τιμές στη φαινόμενη πυκνότητα.

4.1.7 Ολικά Διαλυτά Άλατα-pH-Ποιοτικές Δοκιμές Spot Test

Ολικά Διαλυτά Άλατα

Ο προσδιορισμός των ολικών διαλυτών αλάτων και του pH έγινε σύμφωνα με το πρότυπο Normal 13/83 και εφαρμόστηκε σε όλα τα δείγματα. Οι μάζες οι μετρήσεις αγωγιμότητας και pH κάθε διαλύματος συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες, καθώς και το ποσοστό διαλυτών αλάτων σε καθένα από αυτά, το οποίο θα υπολογιστεί με βάση τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω.

Πίνακας 31 Μετρήσεις Αγωγιμότητας-TSS%-pH της Βόρειας Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα C(μS)	TSS%	pH
N1	JHS_MN1_fm_50	66,00	4,21	8,74
	JHS_MN1_fm_85	559,00	38,17	8,21
	JHS_MN1_fm_135	572,00	39,07	8,4
	JHS_MN1_fm_200	430,00	29,29	8,66
	JHS_MN1_fm_280	146,70	9,95	9,1
	JHS_MN1_jm_50	87,10	5,68	8,85
	JHS_MN1_jm_85	501,00	34,32	5,56
	JHS_MN1_jm_135	67,70	4,33	8,77
	JHS_MN1_jm_200	142,40	9,52	8,83
N2	JHS_MN2_jm	55,10	3,48	9,37
	JHS_MN2_jm_50	61,70	4,06	9,14
	JHS_MN2_jm_85	103,10	6,95	9,12
	JHS_MN2_jm_135	520,00	35,75	8,85
N3	JHS_CN3_m	63,20	4,03	9,65
	JHS_N3_m2	102,20	6,80	8,89
	JHS_N3_m3	532,00	36,52	9,13
N4	JHS_MN4_jm2	2150,00	148,43	11,8
	JHS_N4_m1	138,40	9,16	8,91
	JHS_N4_m2	297,40	20,09	8,69
	JHS_N4_m3	61,70	3,99	8,78
N5	JHS_N5_m1	68,50	4,56	9,33
	JHS_N5_m2	79,10	5,29	9,32
	JHS_MN5_fm_50	98,10	6,58	8,18
	JHS_MN5_fm_85	79,50	5,30	8,62
	JHS_MN5_fm_135	394,00	26,92	8,72
	JHS_MN5_fm_200	433,00	29,75	10,36
	JHS_MN5_fm_280	90,30	6,05	8,02
	JHS_MN5_jm_50	185,80	12,55	8,41
	JHS_MN5_jm_85	282,10	19,22	8,61
	JHS_MN5_jm_135	384,00	26,35	11,02
JHS_MN5_jm_200	1949,00	134,00	10,00	

Πίνακας 32 Μετρήσεις Αγωγιμότητας-TSS%-pH της Νότιας Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα C(μS)	TSS%	pH
S1	JHS_MS1_fm_50	81,30	5,49	8,43
	JHS_MS1_fm_85	88,20	5,90	9,06
	JHS_MS1_fm_135	61,60	4,06	9,02
	JHS_MS1_fm_200	639,00	43,84	8,09
	JHS_MS1_fm_280	113,00	7,62	8,75
	JHS_MS1_jm_50	543,00	37,26	8,38
	JHS_MS1_jm_85	680,00	46,57	7,8
	JHS_MS1_jm_135	415,00	28,38	7,82
	JHS_MS1_jm_200	520,00	35,61	7,98
	JHS_MS1_jm_280	86,00	5,75	9,45
S2	JHS_MS2_fm_50	99,00	6,44	8,14
	JHS_MS2_fm_85	123,30	8,29	8,89
	JHS_MS2_fm_135	304,00	20,71	9,05
	JHS_MS2_fm_200	1330,00	91,55	11,39
	JHS_MS2_jm_200	59,80	3,89	11,36
	JHS_MS2_jm_280	65,60	4,19	9,31
S3	JHS_MS3_fm_50	57,80	3,82	8,85
	JHS_MS3_fm_85	53,90	3,55	8,83
	JHS_MS3_fm_135	111,50	7,49	9,38
	JHS_MS3_fm_200	52,00	3,43	9,6
	JHS_MS3_fm_280	175,70	11,95	10,61
	JHS_MS3_jm_50	77,90	5,20	9,56
	JHS_MS3_jm_85	517,00	35,48	8,45
	JHS_MS3_jm_135	985,00	67,81	11,36
	JHS_MS3_jm_200	1463,00	100,14	11,59
	JHS_MS3_jm_280	644,00	44,14	8,98
S4	JHS_MS4_fm_50	60,80	4,02	8,85
	JHS_MS4_fm_85	304,00	20,75	8,19
	JHS_MS4_fm_135	47,50	3,12	9,36
	JHS_MS4_fm_200	172,40	11,75	9,01
	JHS_MS4_fm_280	68,80	4,51	9,21
	JHS_MS4_jm_50	442,00	30,32	8,78
	JHS_MS4_jm_85	60,40	3,83	9,21
	JHS_MS4_jm_135	136,70	9,10	8,3
	JHS_MS4_jm_200	100,20	6,56	8,99
	JHS_MS4_jm_280	89,80	5,85	9,1
S5	JHS_MS5_fm_50	76,00	4,90	8,72
	JHS_MS5_fm_85	68,70	4,40	8,94
	JHS_MS5_fm_135	445,00	30,41	8,72
	JHS_MS5_fm_200	63,70	4,23	9,26
	JHS_MS5_fm_280	186,00	12,49	8,94

	JHS_MS5_jm_50	73,50	4,89	8,77
	JHS_MS5_jm_85	64,00	4,23	9,23
	JHS_MS5_jm_135	555,00	38,13	8,6
	JHS_MS5_jm_200	88,50	5,94	9,04
	JHS_MS5_jm_280	183,20	12,47	8,9

Πίνακας 33 Μετρήσεις Αγωγιμότητας-TSS%-pH της Δυτικής Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα C(μS)	TSS%	pH
W	JHS_MW_fm_50	623,00	42,91	7,51
	JHS_MW_fm_85	47,00	2,82	8,98
	JHS_MW_fm_135	609,00	42,15	8,88
	JHS_MW_fm_200	52,90	3,22	8,65
	JHS_MW_fm_280	542,00	37,01	8,91
	JHS_MW_jm_50	257,40	17,35	8,81
	JHS_MW_jm_85	648,00	43,90	8,78
	JHS_MW_jm_135	502,00	34,42	8,68
	JHS_MW_jm_200	85,50	5,48	9,05
	JHS_MW_m	898,00	61,21	10,70

Πίνακας 34 Μετρήσεις Αγωγιμότητας-TSS%-pH της Δυτικής Όψης

Φάτνωμα	Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα C(μS)	TSS%	pH
MES	JHS_MES_fm_50	665,00	45,61	8,47
	JHS_MES_fm_85	501,00	34,00	8,61
	JHS_MES_fm_135	101,50	6,38	8,80
	JHS_MES_fm_200	79,30	5,08	8,89
	JHS_MES_jm_50	76,30	5,15	8,86
	JHS_MES_jm_85	65,20	4,34	8,74
	JHS_MES_jm_135	70,60	4,65	9,40
	JHS_MES_jm_200	69,90	4,65	8,86
MEN	JHS_MEN_fm_50	77,10	5,00	8,94
	JHS_MEN_fm_85	343,00	23,84	9,12
	JHS_MEN_fm_135	73,50	4,95	8,96
	JHS_MEN_fm_200	442,00	30,50	8,82
	JHS_MEN_jm_50	225,00	15,45	8,92
	JHS_MEN_jm_85	117,40	7,80	8,74
	JHS_MEN_jm_135	96,10	6,43	8,74
	JHS_MEN_jm_200	118,90	7,79	8,90
	JHS_MEN_rm	88,00	5,51	9,20

Με βάση τη τιμή του TSS% υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστεί εάν ένα κονίαμα έχει υποστεί φθορά από διαλυτά άλατα στη τοιχοποιία. Το κριτήριο αναφέρει ότι εάν το ποσοστό των ολικών διαλυτών αλάτων είναι μεγαλύτερο από 3% τότε το κονίαμα έχει υποστεί φθορά. Στο συγκεκριμένο μνημείο όμως μόνο ένα από τα 104 δείγματα εμφανίζει ποσοστό κάτω από 3%. Επιλέχθηκε, λοιπόν στη συνέχεια το 5% ως κριτήριο του ποσοστού των TSS, που δηλώνει μικρή φθορά του κονιάματος

από τα διαλυτά άλατα. (24) Προκειμένου να προσδιοριστεί εάν έχει υποστεί το μνημείο φθορά από διαλυτά άλατα τίθεται τα κριτήρια: 1) TSS% < 5% και 2) pH > 9. Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζεται σε τι ποσοστό πληρούνται αυτά τα κριτήρια ανά όψη και ανά είδος κονιάματος (πλήρωσης ή αρμού).

Πίνακας 35 Κατάσταση φθοράς των κονιαμάτων

		TSS% (<5%)	pH (>9)
Βόρεια Όψη	Κονιάματα Συμπλήρωσης	17%	33%
	Κονιάματα Αρμού	15%	54%
	Συνολικά	16%	42%
Νότια Όψη	Κονιάματα Συμπλήρωσης	42%	46%
	Κονιάματα Αρμού	27%	50%
	Συνολικά	35%	48%
Δυτική Όψη	Κονιάματα Συμπλήρωσης	33%	17%
	Κονιάματα Αρμού	0%	25%
	Συνολικά	20%	20%
Ανατολική Όψη	Κονιάματα Συμπλήρωσης	11%	22%
	Κονιάματα Αρμού	38%	13%
	Συνολικά	24%	18%
Όλες οι Όψεις	Κονιάματα Συμπλήρωσης	28%	35%
	Κονιάματα Αρμού	23%	43%
	Συνολικά	26%	38%

Στη Βόρεια όψη είναι φανερό ότι λιγότερο από το 20% των δειγμάτων πληρούν το κριτήριο των διαλυτών αλάτων, τόσο της πλήρωσης όσο και της αρμού, ενώ κάτι παραπάνω από το 40% των δειγμάτων πληρούν τις προϋποθέσεις για τις τιμές του pH, με τα κονιάματα πλήρωσης να είναι στο 33% και της αρμού στο 54%.

Στη Νότια όψη βρίσκονται περισσότερα κονιάματα που πληρούν τα κριτήρια των διαλυτών αλάτων και ελαφρώς πιο αυξημένα στο pH από αυτά του της βόρειας όψης (σχεδόν τα μισά), τόσο στα κονιάματα πλήρωσης όσο και της αρμού.

Στη Δυτική όψη έχουμε λίγα κονιάματα που πληρούν και τα δύο κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα στα κονιάματα πλήρωσης μόνο το 1/3 των δειγμάτων έχει ποσοστό των TSS χαμηλότερο του 5% και κάτω από 20% pH μεγαλύτερο του 9. Στα κονιάματα αρμού κανένα δε ικανοποιεί το κριτήριο των διαλυτών αλάτων, ενώ το 1/4 των δειγμάτων αυτών έχει pH μεγαλύτερο του 9. Συνολικά στην όψη αυτή το 20% των δειγμάτων πληρούν και τα δύο κριτήρια.

Στην Ανατολική όψη μόλις το 11% και 22% των κονιαμάτων πλήρωσης ικανοποιούν το κριτήριο των TSS% και pH αντίστοιχα. Σε αντίθεση, στα κονιάματα αρμού το 38% των δειγμάτων έχει TSS% κάτω του 5% και μόλις 13% παρουσιάζει pH πάνω του 9. Συνολικά για αυτή την όψη παρατηρείται ότι σχεδόν το 1/4 των δειγμάτων εμφανίζει ικανοποιητικές τιμές διαλυτών αλάτων, αλλά κάτω του 20% εμφανίζει κατάλληλες τιμές pH.

Κοιτώντας συνολικά της όψης του μνημείου γίνεται αντιληπτό ότι στα κονιάματα πλήρωσης υπάρχουν περισσότερα δείγματα που ικανοποιούν το κριτήριο των διαλυτών αλάτων σε σχέση με αυτά της αρμού, ενώ εμφανίζεται το ίδιο ποσοστό για το κριτήριο του pH. Και στις δύο περιπτώσεις (κονιάματα πλήρωσης και αρμού) φαίνεται ότι λιγότερα δείγματα ικανοποιούν το κριτήριο του TSS% σχέση με αυτό του pH. Εξετάζοντας όλα τα κονιάματα είναι φανερό ότι λιγότερο από το 40% των δειγμάτων πληρούν τα κριτήρια που τέθηκαν.

Εκτός από τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί και συσχέτιση ανάμεσα στη σύσταση των κονιαμάτων και στη τιμή pH και TSS% της κάθε όψης. Στη βόρεια όψη παρατηρείται ότι τα κονιάματα με pH μεγαλύτερο του 9 είναι κυρίως ασβεστιτικής φύσης ή και με πορτλαντίτη με εξαίρεση μόνο ένα γυψοκονίαμα και δύο μικτά κονιάματα ασβέστη-γύψου. Τα κονιάματα ασβέστη που έχουν pH μεγαλύτερο του 9, εμφανίζουν ολικά διαλυτά άλατα κάτω του 5,5% εκτός από ένα δείγμα που έχει ποσοστό διαλυτών αλάτων ~10%. Στη νότια όψη και πάλι τα κονιάματα με pH μεγαλύτερο του 9 είναι ασβεστιτικά κονιάματα και τα κονιάματα με πορτλαντίτη με την εξαίρεση ενός γυψοκονιάματος και δύο μικτών πάλι κονιαμάτων ασβέστη-γύψου. Από τα ασβεστιτικά κονιάματα με pH μεγαλύτερο του 9 εμφανίζουν ποσοστό διαλυτών αλάτων μικρότερο του 6% με εξαίρεση ένα δείγμα που έχει ποσοστό διαλυτών αλάτων 7,5%. Στη δυτική όψη μόνο ένα κονίαμα έχει pH μεγαλύτερο του 9 το οποίο είναι ασβεστιτικό και έχει ποσοστό διαλυτών αλάτων κάτω από 5,5%. Στην ανατολική όψη υπάρχουν μόνο τρεις δείγματα με pH μεγαλύτερο του 9 εκ των οποίων το ένα είναι το κονίαμα αποκατάστασης, το άλλο είναι γυψοκονίαμα και το τελευταίο είναι ασβεστιτικό με ποσοστό διαλυτών αλάτων κάτω από 5%.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να γίνει η εξής παρατήρηση. Όσα δείγματα παρουσιάζουν υψηλή ποσότητα γύψου εμφανίζουν και υπερβολικά μεγάλη αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ιόντα SO_4^{2-} που υπάρχουν στη δομή του γύψου. Αυτό θα φανερωθεί και στα αποτελέσματα των ποιοτικών δοκιμών, spot test. Για αυτό το λόγο στις περιπτώσεις που υπάρχει σημαντική ποσότητα γύψου, στις περιπτώσεις δηλαδή που δε πρόκειται για φθορά, αλλά για υλικό του κονιαματος, είναι πιο αντικειμενικό να λαμβάνεται υπόψη μόνο η τιμή του pH και όχι η τιμή της αγωγιμότητας. Το ίδιο πρέπει να ειπωθεί και για τα κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη. Λόγω της αυξημένης ποσότητας σε ιόντα OH^- εμφανίζεται μεγάλη τιμή αγωγιμότητα συνοδευόμενη με μεγάλη τιμή του pH.

Είναι εμφανές ότι μία από τις ιδιαιτερότητες αυτού του μνημείου είναι η μεγάλη διαφοροποίηση των ποσοστών των ολικών διαλυτών αλάτων και των τιμών του pH στις διαφορετικές όψεις και διαφορετικά ύψη της κατασκευής. Ο μέσος όρος του ποσοστού των διαλυτών αλάτων είναι στο ~20% με διακύμανση τιμών από 2,88-148,43% και τυπική απόκλιση ίση με ~25%, κάτι που είναι ένδειξη του πόσο διαφορετικά ποσοστά εμφανίζονται σε όλο το μνημείο. Αντίστοιχα, ο μέσος όρος των τιμών του pH σε όλο το μνημείο είναι στο 8,94 με διακύμανση τιμών από 5.56-118, εμφανίζοντας τυπική απόκλιση 0,84. Το γεγονός ότι υπάρχουν τόσα πολλά κονιάματα με pH χαμηλότερο του 9 έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των περιεχόμενων μεταλλικών στοιχείων της κατασκευής, συνεπώς είναι αναπόφευκτη η διάβρωση των στοιχείων αυτών και η περαιτέρω φθορά των υπόλοιπων υλικών. Ακόμη, οι υψηλές τιμές του TSS% και της αγωγιμότητας υποδεικνύει τη παρουσία διαλυτών υγροσκοπικών αλάτων που έχουν την δυνατότητα να δεσμεύουν την ανιούσα υγρασία (τριχοειδής) ή τη κατερχόμενη υγρασία. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση ύπαρξης μεταλλικών στοιχείων, οι έντονες και απότομες αλλαγές στις τιμές των TSS% και pH δημιουργούν μικρογαλβανικά κελιά τα οποία μπορούν να αναχθούν στη κλίμακα του μακρογαλβανικού κελιού στη περίπτωση που τα κονιάματα όλων των όψεων είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η παραπάνω παρατήρηση σε συνέργεια με ένα περιβάλλον υψηλής υγρασίας καθιστά το ιστορικό κονίαμα ως έναν ηλεκτρολύτη σε ένα μεγάλο γαλβανικό στοιχείο. Με αυτό τον τρόπο γίνεται δυνατή η μεταφορά ιόντων και ηλεκτρονίων μέσα σε αυτόν τον ηλεκτρολύτη, κάτι που εκτός της διάβρωσης των διάφορων μεταλλικών στοιχείων, προκαλεί τη φθορά των υλικών, μεταβάλλοντας τη σύσταση, καθώς και τη μικροδομή τους. (51)

Συνολικά, η ύπαρξη αυτών των έντονων διαφοροποιήσεων σε pH και αγωγιμότητα στις διάφορες περιοχές του μνημείου υποδεικνύει το βίαιο διαβρωτικό περιβάλλον του δομήματος, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μηχανισμών διάβρωσης, την επιτάχυνση της φθοράς των δομικών υλικών και προφανώς αποτέλεσε και αιτία για την έντονη διάβρωση που παρουσίαζαν τα ιστορικά μεταλλικά στοιχεία της κατασκευής (αγκύρια, κλπ) που βρέθηκαν εντός της εσωτερικής δομής του Ιερού Κουβουκλίου.

Δοκιμές Spot Test για την ποιοτική ανίχνευση ανιόντων

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ποιοτικών δοκιμών ανίχνευσης ανιόντων σε όλες τις όψεις σύμφωνα με την κλίμακα που εμφανίζεται αμέσως μετά.

Βόρεια Όψη

Πίνακας 36 Spot Test Βόρειας Όψης

Κωδικός Δείγματος	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ⁻² ₃
JHS_MN1_fm_50	++	-	-
JHS_MN1_fm_85	+	+++++	-
JHS_MN1_fm_135	+	+++++	-
JHS_MN1_fm_200	+	+++++	-
JHS_MN1_fm_280	++	++	-
JHS_MN1_jm_50	+	++	-
JHS_MN1_jm_85	+	+++++	-
JHS_MN1_jm_135	++	+	-
JHS_MN1_jm_200	+++	+++	-
JHS_MN2_jm	++	++	-
JHS_MN2_jm_50	+	-	-
JHS_MN2_jm_85	+	++	-
JHS_MN2_jm_135	-	+++++	-
JHS_CN3_m	+	+	-
JHS_N3_m2	+	+	-
JHS_N3_m3	-	+++++	-
JHS_MN4_jm2	κίτρινο-καφέ ίζημα	-	-
JHS_N4_m1	+	++	-
JHS_N4_m2	-	++++	-
JHS_N4_m3	+++	+	-
JHS_N5_m1	+++	-	-
JHS_N5_m2	++	-	-
JHS_MN5_jm_50	+	+	-
JHS_MN5_jm_85	++	-	-
JHS_MN5_jm_135	+	++++	-
JHS_MN5_jm_135_2	+	+++	-
JHS_MN5_jm_200	++++ (κίτρινο- καφε ίζημα)	-	-
JHS_MN5_jm_280	++	+	-
JHS_MN5_jm_50	+	++++	-
JHS_MN5_jm_85	-	++++	-
JHS_MN5_jm_135	++++ (και ελαφρώς κίτρινο)	-	-
JHS_MN5_jm_200	κίτρινο-καφέ ίζημα	+	-

Νότια Όψη

Πίνακας 37 Spot Test Νότιας Όψης

Κωδικός Δείγματος	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ⁻² ₃
JHS_MS1_fm_50	++	-	-
JHS_MS1_fm_85	+	+	-
JHS_MS1_fm_135	+	+	-
JHS_MS1_fm_200	+	+++++	-
JHS_MS1_fm_280	+++	+	-
JHS_MS1_jm_50	+++	++++	-
JHS_MS1_jm_85	++	++++	-
JHS_MS1_jm_135	++	+++++	-
JHS_MS1_jm_200	+	++++	-
JHS_MS1_jm_280	+++	-	-
JHS_MS2_fm_50	+++	++++	-
JHS_MS2_fm_85	+	+++	-
JHS_MS2_fm_135	+	++++	-
JHS_MS2_fm_200	κίτρινο-καφέ ίζημα	+	-
JHS_MS2_jm_200	+++	+	-
JHS_MS2_jm_280	+++	+	-
JHS_MS3_fm_50	-	-	-
JHS_MS3_fm_85	-	-	-
JHS_MS3_fm_135	+	+++	-
JHS_MS3_fm_200	+++	-	-
JHS_MS3_fm_280	++++ (ελαφρώς κίτρινο)	-	-
JHS_MS3_jm_50	+++	+	-
JHS_MS3_jm_85	-	+++++	-
JHS_MS3_jm_135	+++++ (κίτρινο καφέ)	-	-
JHS_MS3_jm_200	+++++ (κίτρινο καφέ)	+	-
JHS_MS3_jm_280	-	+++++	-
JHS_MS4_fm_50	+	-	-
JHS_MS4_fm_85	++	+++	-
JHS_MS4_fm_135	-	-	-
JHS_MS4_fm_200	-	+++	-
JHS_MS4_fm_280	+++	-	-
JHS_MS4_jm_50	+	++++	-
JHS_MS4_jm_85	++	++	-
JHS_MS4_jm_135	+	++++	-
JHS_MS4_jm_200	++	++	-
JHS_MS4_jm_280	+	+	-
JHS_MS5_fm_50	+	+	-
JHS_MS5_fm_85	+	+	-
JHS_MS5_fm_135	-	+++++	-
JHS_MS5_fm_200	+	-	-
JHS_MS5_fm_280	+	++++	-

Κωδικός Δείγματος	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ₃ ⁻²
JHS_MS5_jm_50	+	+	-
JHS_MS5_jm_85	+	-	-
JHS_MS5_jm_135	-	+++++	-
JHS_MS5_jm_200	++	+	-
JHS_MS5_jm_280	+	++++	-

Δυτική Όψη

Πίνακας 38 Spot Test Δυτικής Όψης

Κωδικός Δείγματος	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ₃ ⁻²
JHS_MW_fm_50	-	+++++	-
JHS_MW_fm_85	+++	+	-
JHS_MW_fm_135	-	++++	-
JHS_MW_fm_200	++	-	-
JHS_MW_fm_280	++++	+++++	-
JHS_MW_jm_50	+	++	+
JHS_MW_jm_85	-	+++++	-
JHS_MW_jm_135	+	++++	-
JHS_MW_jm_200	++	+	-
JHS_MW_m	Κίτρινο-Καφέ	+	-

Ανατολική Όψη

Πίνακας 39 Spot Test Ανατολικής Όψης

Κωδικός Δείγματος	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ₃ ⁻²
JHS_MES_fm_50	+	+++++	-
JHS_MES_fm_85	-	++++	-
JHS_MES_fm_135	++++	-	+
JHS_MES_fm_200	++	+	-
JHS_MES_jm_50	+++++	+	-
JHS_MES_jm_85	++++	-	-
JHS_MES_jm_135	++++	-	-
JHS_MES_jm_200	++++	-	-
JHS_MEN_fm_50	++++	-	-
JHS_MEN_fm_85	+	++++	-
JHS_MEN_fm_135	++++	++	+
JHS_MEN_fm_200	++	+++++	-
JHS_MEN_jm_50	Κίτρινο	+	-
JHS_MEN_jm_85	-	+++	-
JHS_MEN_jm_135	-	++	-
JHS_MEN_jm_200	+++	+	-
JHS_MEN_rm	++++	+	-

Πίνακας 40 Κλίμακας περιεκτικότητας ιόντων

Κλίμακα περιεκτικότητας	
++++++	Πολύ υψηλή
+++++	Υψηλή
++++	Μέτρια
+++	Χαμηλή
++	Πολύ χαμηλή
+	Ίχνη
-	Καθόλου

Από τους παραπάνω πίνακες λαμβάνονται τα εξής συμπεράσματα:

- Όσα δείγματα περιέχουν μεγάλη ποσότητα γύψου περιέχουν και υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά ιόντα, κάτι που αναφέρθηκε παραπάνω.
- Όσα δείγματα περιέχουν κάποια αξιοσημείωτη ποσότητα πορτλαντίτη εκτός της μεγάλης περιεκτικότητάς τους στο spot test των χλωριόντων, αντί του σύνηθες αποτελέσματος (γαλακτερό διάλυμα) εμφανίζεται ένα καφέ ή κίτρινο ίζημα. Σε κάποιες περιπτώσεις όπου υπάρχει λιγότερη ποσότητα πορτλαντίτη το διάλυμα παίρνει μία ελαφρώς κίτρινη απόχρωση. Αυτό συμβαίνει διότι το διάλυμα των spot test που προστίθεται στο δείγμα είναι νιτρικός άργυρος (AgNO_3), ο οποίος αντιδρά με τον πορτλαντίτη του δείγματος και παράγει υδροξείδιο του αργύρου, AgOH , το οποίο είναι μη διαλυτό στο νερό και εμφανίζεται ως ένα καφέ-κίτρινο ίζημα.
- Στα υπόλοιπα δείγματα, τα οποία είναι κυρίως ασβεστιτικής φύσης, όταν εμφανίζεται υψηλή αγωγιμότητα του διαλύματος ($\text{TSS}\% > 5\%$) εμφανίζεται θολό γαλακτερό διάλυμα κυρίως στο spot test των χλωριόντων.

Άρα η φθορά των κονιαμάτων οφείλεται κυρίως από την επίδραση των διαλυτών αλάτων που περιέχουν Cl^- .

4.1.8 Χρωματομετρία

Έγινε χρωματομετρία σε όλα τα κανονικοποιημένα δείγματα. Με τη διάταξη του χρωματόμετρου πάρθηκαν πέντε μετρήσεις από κάθε δείγμα, σε διάφορα σημεία του δείγματος και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων. Έπειτα, σύμφωνα με το χρωματικό μοντέλο CIELab που περιεγράφηκε παραπάνω υπολογίστηκαν οι συντελεστές C* (Chroma) κορεσμός και χροιά h (hue angle). Επιλέχθηκε να γίνει η χρωματομετρία μόνο σε αυτά τα δείγματα καθώς η λείες επιφάνειες των δοκιμίων θα δώσουν τις πιο αντικειμενικές τιμές όσο αφορά τη λαμπρότητα. Πιο συγκεκριμένα, επειδή δε θα έχουμε έντονα ανομοιόμορφες επιφάνειες, δε θα υπάρχει έντονη σκέδαση του φωτός του οργάνου σε διαφορετικές γωνίες, κάτι το οποίο οδηγεί σε μη αντικειμενική απόδοση του χρώματος.

Πίνακας 41 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

	Κωδικός Δείγματος	L*	a*	b*	C*	h*
Βόρεια Όψη	JHS_MN3_m3	83,81	2,20	9,37	9,63	1,34
	JHS_MN5_jm_85	74,73	3,08	11,26	11,67	1,30
	JHS_MN5_jm_200	87,64	0,81	4,61	4,68	1,40
Νότια Όψη	JHS_MS1_fm_130	72,39	3,91	9,98	10,72	1,20
	JHS_MS1_fm_200	77,74	4,69	12,02	12,90	1,20
	JHS_MS2_jm_280	87,70	1,90	6,99	7,24	1,31
	JHS_MS3_jm_80	75,41	3,62	12,01	12,54	1,28
	JHS_MS3_jm_135	84,13	1,88	6,60	6,87	1,29
	JHS_MS3_jm_200	87,44	1,64	5,63	5,86	1,29
	JHS_MS4_jm_200	88,81	1,56	8,18	8,33	1,38
	JHS_MS5_jm_200	85,29	1,51	7,99	8,13	1,38
	JHS_MS5_jm_280	85,82	0,86	5,03	5,10	1,40
Δυτική Όψη	JHS_MW_fm_80	74,25	3,94	10,78	11,48	1,22
	JHS_MW_fm_130	79,63	2,75	11,06	11,39	1,33
	JHS_MW_jm_80	73,04	5,57	13,99	15,06	1,19
Ανατολική Όψη	JHS_MES_jm_50	82,65	2,63	10,36	10,69	1,32
	JHS_MES_jm_80	85,21	1,94	7,34	7,59	1,31
	JHS_MEN_fm_80	72,52	5,07	12,17	13,18	1,18
	JHS_MEN_jm_80	80,77	2,28	8,37	8,67	1,30
	JHS_MEN_jm_200	72,34	4,22	13,43	14,07	1,27

Η χρωματομετρία έγινε σε κονιάματα τα οποία μακροσκοπικά εμφανίζουν λευκό, μπεζ ή ελαφρώς ερυθρό ή πορτοκαλί χρώμα λόγω των κεραμικών που περιέχουν, συνεπώς είναι λογικό να μην εμφανιστούν μεγάλες διαφορές στην απόδοση του χρώματός τους.

Οι τιμές της λαμπρότητας κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 72,3 και 88,8. Πρόκειται για μικρή διαφορά κάτι που επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση, δηλαδή ότι λόγω των κομμένων επιφανειών. Όσον αφορά τις ίδιες τις τιμές είναι απόλυτο φυσιολογικό να εμφανίζονται σχετικά υψηλές τιμές καθώς πρόκειται για ανοιχτόχρωμα κονιάματα. Οι τιμές του μεγέθους a* κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 0,8 και 5,8. Η τιμές a* φανερώνουν τη διακύμανση του χρώματος από το πράσινο (αρνητικές τιμές) στο κόκκινο (θετικές τιμές). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα κονιάματα που εξετάζονται σε αυτή τη πειραματική διαδικασία κυμαίνονται από λευκά σε ελαφρώς ερυθρά, άρα είναι λογικό τα δείγματα να έχουν τιμές είτε κοντά στο μηδέν είτε ελαφρώς μεγαλύτερες. Προφανώς τα κονιάματα με a* αρκετά μεγαλύτερες από το μηδέν, δηλαδή κοντά στη τιμή του 5, πρέπει να περιέχουν αρκετά κεραμικά στη δομή τους. Οι τιμές του μεγέθους b* κυμαίνεται ανάμεσα στα 4,6 και 14. Η τιμές b* φανερώνουν τη διακύμανση του χρώματος από το μπλε (αρνητικές τιμές) στο κίτρινο (θετικές τιμές). Και πάλι το γεγονός ότι έχουν αυξημένες θετικές τιμές δηλώνει ότι τα κονιάματα έχουν μπεζ, πορτοκαλί η ερυθρό χρώμα. Ακόμη να

σημειωθεί ότι αυτό το ζεύγος των a^* και b^* ανήκει στο ίδιο δείγμα. Καθώς η λαμπρότητα δεν εμφανίζει τόσο μεγάλες διαφορές θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να εξεταστεί η διαφορά χρώματος αυτών των δύο κονιαμάτων, ως η μέγιστη διαφορά χρώματος που εμφανίζεται σε αυτή την ομάδα κονιαμάτων. Το ΔE^* προκύπτει από τα παραπάνω δύο δείγματα (JHS_MN5_jm_200 και JHS_MW_jm_80) είναι 17,99. Αντικείμενα με αυτή τη διαφορά χρώματος είναι αρκετά ανιχνεύσιμα από το ανθρώπινο μάτι όπως φαίνεται και στη παρακάτω απεικόνιση.



Εικόνα 88 Ψηφιακή απεικόνιση της μέγιστης διαφοράς χρωμάτων στα εξεταζόμενα δείγματα. JHS_MN5_jm_200 (αριστερά) και JHS_MW_jm_80 (δεξιά)

Οι τιμές του κορεσμού κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 4,7 και 15,1. Αντίστοιχα οι τιμές της χροιάς από το 1,17 έως το 1,4. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι οι μεγαλύτερες διαφορές στο χρώμα εμφανίζονται λόγω του κορεσμού των δειγμάτων.

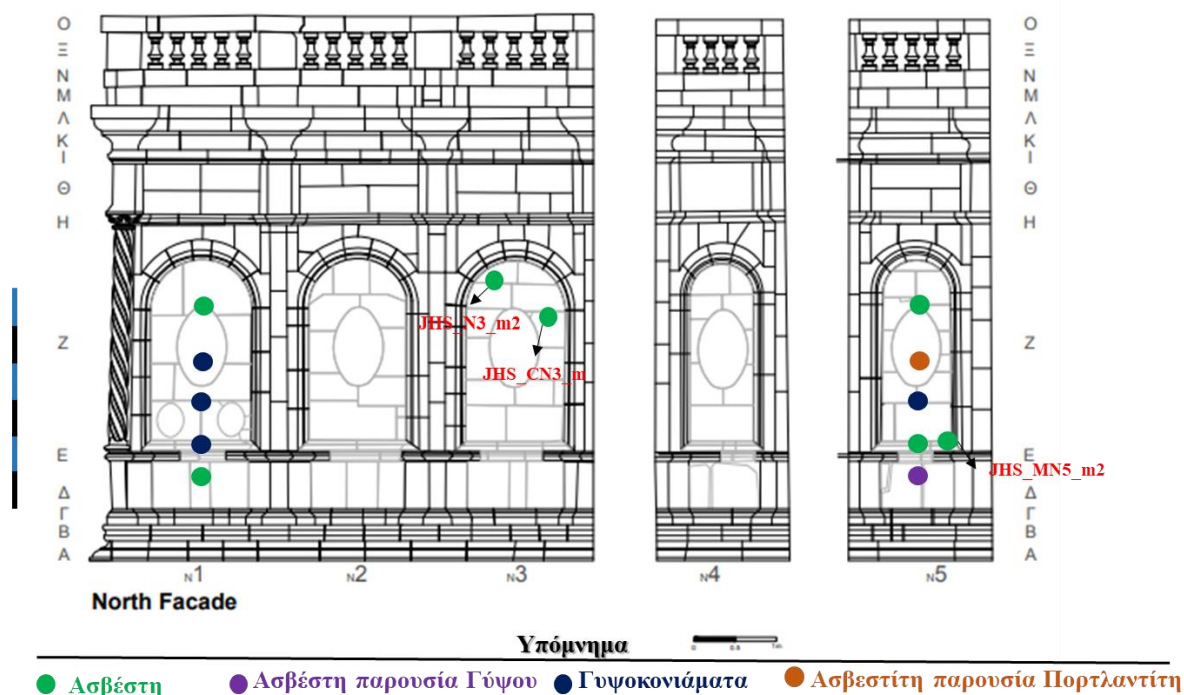
4.1.9 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα και Σύγκριση των Ιστορικών Κονιαμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω κεφάλαια, εξετάστηκαν συνολικά 104 ιστορικά κονιάματα από το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα. Σε όλα τα κονιάματα πραγματοποιήθηκε οπτική μικροσκοπία, περίθλαση ακτίνων X και προσδιορισμός των ολικών διαλυτών αλάτων, της οξύτητας και ο προσδιορισμός ιόντων μέσω spot test.

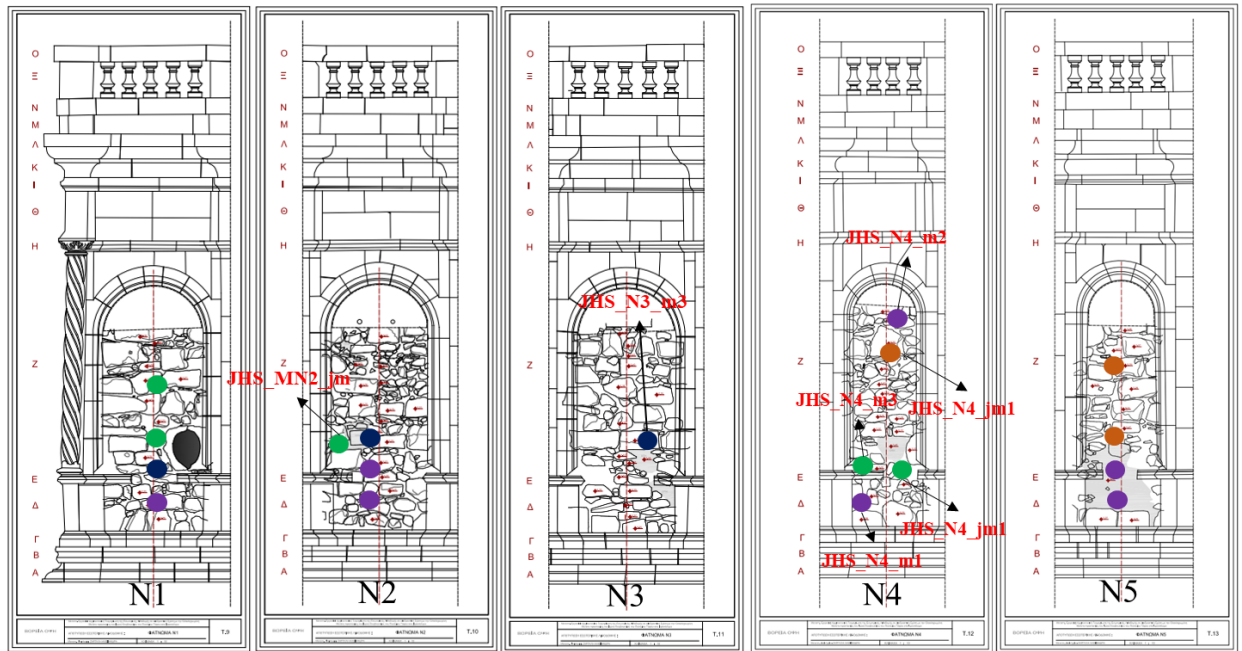
Κατά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας διαπιστώθηκε ότι εμφανίζονται τέσσερις κατηγορίες κονιαμάτων με βάση τη σύστασή τους. Οι κατηγορίες αυτές εμφανίζονται σε διαφορετικά ύψη και φατνώματα τόσο στα κονιάματα συμπλήρωσης όσο και στα κονιάματα αρμού. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται οι θέσεις δειγματοληψίας (θέσεις των κονιαμάτων) των κατηγοριών σύστασης αυτών πάνω στα αρχιτεκτονικά σχέδια του μνημείου. Το κάθε δείγμα παρουσιάζεται με ένα χρωματισμένο κύκλο στην αντίστοιχη θέση του στο μνημείο, όπως παρουσιάστηκαν και στο κεφάλαιο της δειγματοληψίας. Όπως εμφανίζεται και στο παρακάτω πίνακα, τα κονιάματα της κατηγορίας του Ασβέστη παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα, με ιώδες χρώμα εμφανίζονται τα δείγματα Ασβέστη παρουσία Γύψου, με μπλε χρώμα εμφανίζονται τα Γυψοκονιάματα και με ερυθρό τα κονιάματα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Τα σχέδια εμφανίζονται δύο φορές, μία για τα κονιάματα συμπλήρωσης και μία για τα κονιάματα αρμού.

Πίνακας 42 Χρωματική Κωδικοποίηση Κύριων ορυκτολογικών φάσεων

Χρώμα	Πρωτεύουσες ορυκτολογικές Φάσεις
Πράσινο	Ασβέστη
Ιώδες	Ασβέστη παρουσία Γύψου
Μπλε	Γυψοκονίαμα
Ερυθρό	Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη



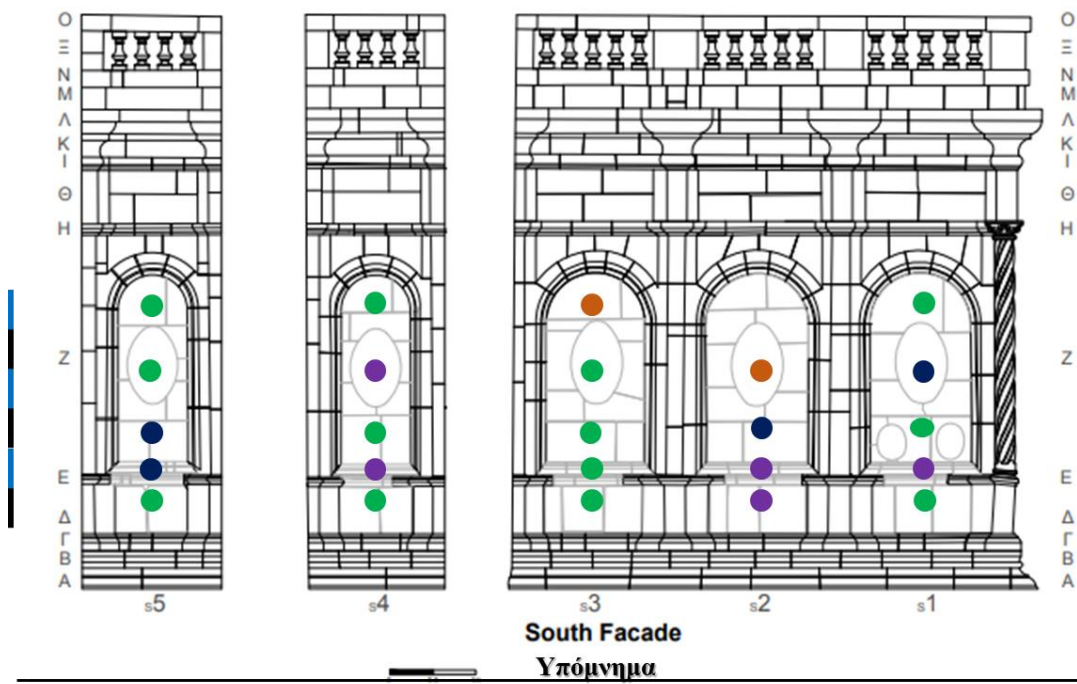
Εικόνα 89 Κύριες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων συμπλήρωσης της Βόρειας Όψης



Υπόμνημα

- Ασβέστη
- Ασβέστη παρουσία Γύψου
- Γυψοκονιάματα
- Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη

Εικόνα 90 Κύριες ορνκοτολογικές φάσεις των κονιαμάτων αρμού της Βόρειας Όψης

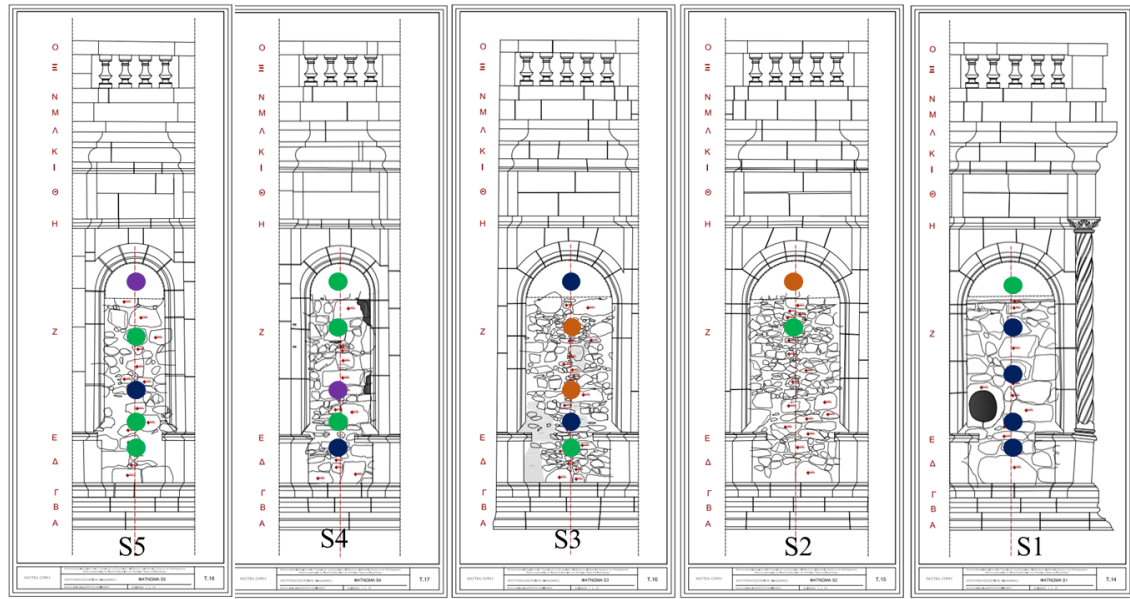


South Facade

Υπόμνημα

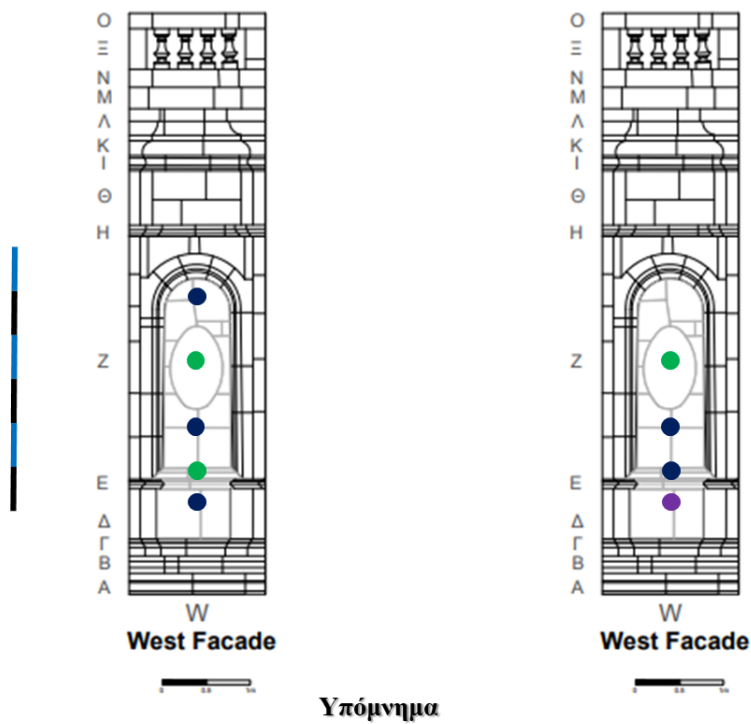
- Ασβέστη
- Ασβέστη παρουσία Γύψου
- Γυψοκονιάματα
- Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη

Εικόνα 91 Κύριες ορνκοτολογικές φάσεις των κονιαμάτων συμπλήρωσης της Νότιας Όψης



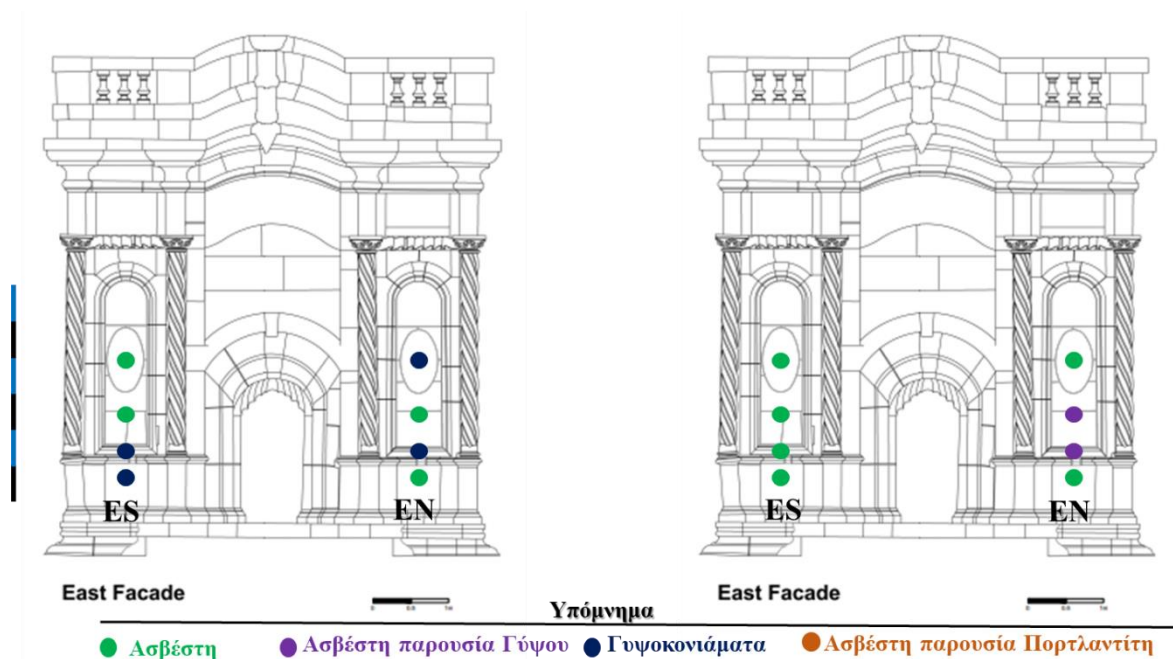
- Υπόμνημα**
- Ασβέστη
 - Ασβέστη παρουσία Γύψου
 - Γυψοκονιάματα
 - Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη

Εικόνα 92 Κύριες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων αρμού της Νότιας Όψης



- Υπόμνημα**
- Ασβέστη
 - Ασβέστη παρουσία Γύψου
 - Γυψοκονιάματα
 - Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη

Εικόνα 93 Κύριες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων συμπλήρωσης (αριστερά) και των κονιαμάτων αρμού (δεξιά) της Δυτικής Όψης



Εικόνα 94 Κύριες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων συμπλήρωσης (αριστερά) και των κονιαμάτων αρμού (δεξιά) της Ανατολικής Όψης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι εμφανές και στα σχέδια του μνημείου ότι η πλειονότητα των κονιαμάτων περιέχουν κυρίως ασβεστίτη, αλλά είναι έντονη και η παρουσία του γύψου σε διάφορα ύψη του μνημείου, τόσο στα κονιάματα συμπλήρωσης όσο και στα κονιάματα αρμού. Σε κάποιες περιπτώσεις (εννέα δείγματα) και κυρίως σε πιο μεγάλα ύψη (από 135cm και πάνω) υπάρχει και παρουσία πορτλαντίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανιχνεύτηκε εντριγκίτης στο 33% των κονιαμάτων που εξετάστηκαν, ο οποίος οφείλεται είτε σε χρήση αδρανών με περιεχόμενο ορυκτό εντριγκίτη από την γύρω περιοχή (π.χ. Hatgurim) (52) είτε σε μηχανισμό διάβρωσης της κονιάς που ενεργοποιείται λόγω της έντονης παρουσίας γύψου, της διαφοροποίησης των κονιαμάτων και της ταυτόχρονης ύπαρξης υψηλών ποσοστών υγρασίας. Επιπρόσθετα, με βάση τα παραπάνω σχέδια, παρατηρείται ότι δεν ακολουθείται κάποιο μοτίβο στις συστάσεις των κονιαμάτων καθ' ύψος τόσο στα κονιάματα συμπλήρωσης όσο και στα κονιάματα αρμού.

Στη συνέχεια, σε 20 επιλεγμένα δείγματα πραγματοποιήθηκαν περεταίρω αναλυτικές μέθοδοι. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στα 20 αυτά δείγματα, προκειμένου να διεξαχθούν τα μερικά συμπεράσματα των ιστορικών κονιαμάτων πριν γίνει ο σχεδιασμός των κονιαμάτων αποκατάστασης..

Πίνακας 43 Αποτελέσματα Μακροσκοπικών Παρατηρήσεων και Περίθλασης Ακτίνων X και κοκκομετρίας

Κωδικός Δείγματος	Μακροσκοπική Ομαδοποίηση	Βασική Ορυκτολογική Σύσταση	Παρουσία θωμασίτη/ εντριγκίτη	% Κονιάς στο κονίαμα
MN3_m3	Ομάδα 4	Gy	Ettr	55,65
MN5_jm_85	Ομάδα 2	Cc-Gy	-	56,27
MN5_jm_200	Ομάδα 1	Cc-P	Ettr	61,12
MS1_fm_130	Ομάδα 2	Cc	-	-
MS1_fm_200	Ομάδα 2	Gy	-	-
MS2_jm_280	Ομάδα 1	Cc	-	-
MS3_jm_80	Ομάδα 2	Gy	Ettr/Th	-
MS3_jm_135	Ομάδα 1	Cc-P	Ettr	-
MS3_jm_200	Ομάδα 1	Cc-P	Ettr	-

MS4_jm_280	Ομάδα 1	Cc	-	-
MS5_jm_200	Ομάδα 1	Cc	-	-
MS5_jm_285	Ομάδα 1	Cc-Gy	Th	76,12
MW_fm_80	Ομάδα 1	Cc	-	-
MW_fm_130	Ομάδα 3	Gy	-	-
MW_jm_80	Ομάδα 2	Gy	Th	84,47
MEN_fm_80	Ομάδα 2	Gy	-	-
MEN_jm_80	Ομάδα 3	Cc-Gy	-	-
MEN_jm_200	Ομάδα 2	Cc	-	-
MES_jm_50	Ομάδα 1	Cc	-	61,46
MES_jm_80	Ομάδα 1	Cc	-	-

Στο παραπάνω πίνακα αναφέρονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, η κατηγορία στην οποία ανήκει το κάθε κονίαμα ανάλογα με τη σύστασή του (Cc: Ασβέστη, Cc-Gy: μίκτο κονίαμα Ασβέστη-Γύψου, Gy: γυψοκονίαμα, Cc-P: κονίαμα Ασβέστη παρουσία Γύψου) η ύπαρξη ή μη του εντρικγίτη ή και του θωμασιτή και το ποσοστό της κονιάς στο κονίαμα, όπου αυτή έχει προσδιοριστεί.

Πίνακας 44 Αποτελέσματα Θερμοβαρμετρικής και Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης

Κωδικός Δείγματος	120-200°C	200-600°C	600-1000°C	CaCO ₃ (%)	CaSO ₄ *2H ₂ O (%)	Αντ. Δ. Υδραυλ.	Ca(OH) ₂ (%)
MN3_m3	15,21	2,67	13,05	29,66	72,67	-	-
MN5_jm_85	5,51	4,38	22,60	51,36	26,33	-	-
MN5_jm_200	2,66	13,12	9,67	21,98	-	3,50	42,59
MS1_fm_130	0,72	5,60	30,96	70,36	-	5,53	-
MS1_fm_200	12,90	3,23	11,04	25,09	61,63	-	-
MS2_jm_280	0,78	5,48	30,61	69,57	-	5,59	-
MS3_jm_80	10,68	2,06	16,06	36,50	51,03	-	-
MS3_jm_135	7,38	8,94	12,79	29,07	-	2,66	17,02
MS3_jm_200	1,47	10,80	16,30	37,05	-	3,99	27,59
MS4_jm_280	1,00	5,96	29,66	67,41	-	4,98	-
MS5_jm_200	1,07	5,96	31,07	70,61	5,11	-	-
MS5_jm_285	2,75	2,91	29,66	67,41	13,14	-	-
MW_fm_80	0,48	2,83	33,72	76,64	-	11,92	-
MW_fm_130	13,44	1,13	12,01	27,30	64,21	-	-
MW_jm_80	13,53	2,43	9,64	21,91	64,64	-	-
MEN_fm_80	7,46	4,49	17,39	39,52	35,64	-	-
MEN_jm_80	1,51	1,74	36,76	83,55	7,21	-	-
MEN_jm_200	1,23	7,04	26,62	60,50	5,88	-	-
MES_jm_50	0,72	6,49	29,75	67,61	-	4,58	-
MES_jm_80	1,11	7,35	30,34	68,95	-	4,13	-

*Στα κονιάματα που υπάρχει γύψος δε μπορεί να γίνει αντικειμενική εκτίμηση του Αντίστροφου Δείκτη Υδραυλικότητας.

Πίνακας 45 Αποτελέσματα Ολικής Εμβάπτισης και Ολικών Διαλυτών Αλάτων-pH

Κωδικός Δείγματος	WAC%	Ολ. Ανοιχτό Πορώδες%	ρφ(g/mL)	TSS%	pH
MN3_m3	34,75	38,03	1,09	36,52	9,13
MN5_jm_85	61,73	60,31	0,98	5,30	8,62
MN5_jm_200	38,53	39,23	1,02	29,75	10,36
MS1_fm_130	50,10	52,45	1,05	4,06	9,02
MS1_fm_200	34,68	39,08	1,13	43,84	8,09
MS2_jm_280	44,98	46,57	1,04	4,19	9,31
MS3_jm_80	40,79	47,40	1,16	35,48	8,45
MS3_jm_135	43,77	44,40	1,01	67,81	11,36
MS3_jm_200	47,36	46,56	0,98	100,14	11,59
MS4_jm_280	43,74	49,77	1,14	5,85	9,10
MS5_jm_200	48,71	67,16	1,38	5,94	9,04
MS5_jm_285	5,97	10,77	1,80	12,47	8,90
MW_fm_80	50,07	53,25	1,06	2,82	8,98
MW_fm_130	56,56	57,30	1,01	42,15	8,88
MW_jm_80	37,16	45,50	1,22	43,90	8,78
MEN_fm_80	28,76	33,00	1,15	23,84	9,12
MEN_jm_80	46,79	55,93	1,20	7,80	9,06
MEN_jm_200	4,69	10,47	2,23	7,79	8,90
MES_jm_50	43,28	51,33	1,19	5,15	8,86
MES_jm_80	42,56	48,94	1,15	4,34	8,74

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι 8 από τα 20 δείγματα είναι Ασβέστη (40% των δειγμάτων), 6 από τα 20 κονιάματα είναι Γυψοκονιάματα (30%), 3 από τα 20 κονιάματα είναι μικτά κονιάματα Ασβέστου Γύψου (15%) και 3 από τα δείγματα αυτά περιέχουν αξιοσημείωτη ποσότητα πορτλαντίτη (15% των δειγμάτων). Κανένα από τα ασβεστιτικά κονιάματα δεν περιέχουν θωμασίτη ή εντριγκίτη, ενώ σε αυτά που περιέχουν κάποια ποσότητα γύψου εμφανίζεται θωμασίτης ή εντριγκίτης σε τέσσερις περιπτώσεις και εμφανίζεται εντριγκίτης σε όλα τα δείγματα που περιέχουν πορτλαντίτη. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε με βάση τα αποτελέσματα της περίθλασης ακτίνων X και της θερμικής ανάλυσης.

Ακόμη γίνεται η παρατήρηση ότι τα κονιάματα που χάνουν μεγάλο ποσοστό της μάζας τους κατά τη πειραματική διαδικασία της ολικής εμβάπτισης (>5%), ανήκουν κυρίως στη 2^η ομάδα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, δηλαδή περιέχουν μεγάλη ποσότητα κεραμικών και είναι αρκετά εύθρυπτα και μη συνεκτικά. Σε αντίθεση τα κονιάματα που ανήκουν στη 1^η ομάδα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, που είναι κυρίως λευκά και υπόλευκα κονιάματα και περιέχουν αδρανή διαφόρων χρωματισμών, αλλά και κάποια που πιθανώς να είναι οξειδωμένα, εμφανίζουν απώλεια μάζας μικρότερη του 4%.

Ακόμη, σε έξι από τα είκοσι δείγματα πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση, όπου έγινε διαχωρισμός των αδρανών από τη κονία των κονιαμάτων. Όλα τα κονιάματα παρουσίασαν υψηλό λόγο κονία/ αδρανή με τιμές να κυμαίνονται στο διάστημα [1,25-5,44]. Τα αδρανή που αποκαλύφθηκαν μετά το διαχωρισμό ήταν διαφόρων χρωματισμών. Σε κάποια δείγματα εμφανίστηκε πλειονότητα στα λευκά ή υπόλευκα αδρανή, αλλά υπήρχαν και αρκετές περιπτώσεις όπου τα αδρανή είχαν ερυθρό, πορτοκαλί, πράσινο ή και μαύρο χρωματισμό. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίστηκε και ένα πεπλατυσμένο αδρανές ερυθρού προς πορτοκαλί χρωματισμού μικρής διαμέτρου (250μm-125μm). Μετά το φυσικό διαχωρισμό της κονίας από τα αδρανή, πραγματοποιήθηκε η περίθλαση ακτίνων X και η θερμική

ανάλυση στις κονίες των κονιαμάτων. Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα από αυτές τις αναλύσεις.

Πίνακας 46 Αποτελέσματα XRD και DTA-TG των κονιών των δειγμάτων

Κωδικός Δείγματος	Κορυφές XRD	120-200°C	200-600°C	600-1000°C	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	CaSO ₄ *2H ₂ O (%)	Αντ. Δ. Υδρα υλ.
N3_m3_binder	Γύψος, Ασβεστίτης, Θωμασίτης	15,72	1,58	7,67	-	17,43	46,58	-
N5_jm_85_binder	Ασβεστίτης, Γύψος, Χαλαζία, Θωμασίτης	4,11	4,83	24,06	-	54,68	19,64	-
N5_jm_200_binder	Πορτλαντίτης, Ασβεστίτης, Εντρινγίτης	1,42	11,73	15,03	36,14	34,16	-	5,11
S5_jm_280_binder	Ασβεστίτης, Γύψος, Θωμασίτης	5,61	3,16	24,52	-	55,73	26,8	-
W_jm_85_binder	Γύψος, Ασβεστίτης, Θωμασίτης	14,51	1,58	7,67	-	17,43	69,33	-
ES_jm_50_binder	Ασβεστίτης	0,82	7,96	32,46	-	73,77	-	4,08

Με την ταυτόχρονη εξέταση των χαρακτηριστικών της κονίας και των συνολικών κονιαμάτων υποδεικνύεται επαγωγικά και η φύση των επιμέρους αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για τη παρασκευή του κάθε κονιάματος. Οι παρατηρήσεις αυτές προκύπτουν τόσο από τη θερμική ανάλυση όσο και από τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης και της περίθλασης ακτίνων X.

Αρχικά, στη περίπτωση του κονιάματος N3_m3, η κονία του δείγματος περιέχει σημαντική ποσότητα του CaSO₄*2H₂O, και ταυτόχρονα από τα ποσοστά του CaSO₄*2H₂O στη κονία και το ολικό κονίαμα, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος των αδρανών του συγκεκριμένου κονιάματος είναι γύψου, ενώ εμφανίζονται και αδρανή ασβεστιτικής σύστασης σε μικρότερη ποσότητα.

Στη περίπτωση του δείγματος N5_jm_85, η κονία εμφανίζεται να περιέχει αρκετή ποσότητα CaCO₃ και λιγότερη ποσότητα CaSO₄*2H₂O. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του συνολικού κονιάματος, συνάγεται το συμπέρασμα ότι το κονίαμα αυτό περιέχει αρκετή ποσότητα ασβεστιτικών αδρανών και σε λιγότερο βαθμό αδρανή γύψου. Ακόμη, περιέχονται και χαλαζιακά αδρανή η ποσότητά τους, όμως, δε μπορεί να συγκριθεί των ασβεστιτικών και του γύψου καθώς δεν υπάρχει τρόπος υπολογισμού του ποσοστού του χαλαζία με τη θερμοβαρυμετρική μέθοδο, αλλά μόνο η ανίχνευσή του μέσω της θερμικής ανάλυσης και της περίθλασης ακτίνων X.

Όσον αφορά το δείγμα N5_jm_200, παρατηρείται ότι η κονία του αποτελείται από CaCO₃ και Ca(OH)₂ σε ίσο βαθμό. Μετά από την εξέταση των ποσοστών της κονίας στο συνολικό κονίαμα και των ποσοστών CaCO₃ και Ca(OH)₂ τόσο στη κονία όσο και στο συνολικό κονίαμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα αδρανή του κονιάματος αυτού περιέχουν CaCO₃ και Ca(OH)₂.

Στη περίπτωση του δείγματος S5_jm_280 παρατηρείται ότι η κονία του συγκεκριμένου κονιάματος αποτελείται κυρίως από CaCO₃ και μετά από CaSO₄*2H₂O, Μετά, λοιπόν, από την εξέταση των μετρήσεων της κονίας και του συνολικού κονιάματος προκύπτει ότι τα αδρανή του δείγματος

αποτελούνται από μία μίξη ασβεστιτικών και χαλαζιακών αδρανών και ότι όλη η ποσότητα του $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ βρίσκεται στη κονία.

Όσον αφορά το δείγμα W_jm_85 παρατηρείται ότι η κονία αποτελείται κυρίως από $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ και σε λιγότερο ποσοστό από CaCO_3 . Μετά την εξέταση των επιμέρους μετρήσεων της κονίας και όλου του κονιάματος συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα αδρανή είναι γύψου, ασβεστιτικά και χαλαζιακά.

Στη περίπτωση του δείγματος ES_jm_50 παρατηρείται ότι η κονία είναι ασβεστιτική, δε περιέχεται ούτε $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ούτε $\text{Ca}(\text{OH})_2$, παρά μόνο CaCO_3 . Μετά την επεξεργασία των επιμέρους μετρήσεων του κονιάματος και της κονίας προκύπτει ότι τα αδρανή αποτελούνται από μία μίξη ασβεστιτικών και χαλαζιακών αδρανών.

Από την αρχή αυτού του κεφαλαίου διατυπώθηκε ότι εμφανίζονται τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες κονιαμάτων. Στις παρακάτω παραγράφους αναφέρονται συνολικά τα επιμέρους φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του κάθε είδους.

Κονιάματα Ασβέστη

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο 8 από τα 20 επιλεγμένα δείγματα είναι ασβεστιτικά, δηλαδή δε περιέχου γύψο ή πορτλαντίτη. Οι κωδικοί των δειγμάτων αυτών είναι: JHS_MS1_fm_130, JHS_MS2_jm_280, JHS_MS4_jm_280, JHS_MS5_jm_200, JHS_MW_fm_80, JHS_MEN_jm_200, JHS_MES_jm_50 και JHS_MES_jm_80. Τα περισσότερα από αυτά τα δείγματα βρίσκονται στη βόρεια όψη. Ακόμη από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις τα περισσότερα κονιάματα (πλην δύο) ανήκουν στη 1^η ομάδα των οποίων τα κονιάματα είναι λευκού ή υπόλευκου χρωματισμού, αρκετά συνεκτικά και περιέχουν αδρανή τα οποία είναι οξειδωμένα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κανένα από τα δείγματα δε περιέχει θωμασίτη ή εντρινγκίτη. Σε ένα από τα δείγματα έγινε διαχωρισμός μέσω κοκκομετρίας και βρέθηκε ότι η κονία βρίσκεται σε ποσοστό ~61%. Όλα τα κονιάματα εμφανίζουν αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας κάτω του 7,5, αλλά πάνω από 4, εκτός του JHS_MW_fm_80 που εμφανίζει μεγαλύτερο από 10. Μέσω της θερμικής ανάλυσης όλα τα κονιάματα αυτά υπολογίστηκε ότι εμφανίζουν πάνω από 60% ανθρακικό ασβέστιο (η απώλεια μάζας στους >600°C είναι πάνω από 30%).

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της μικροδομής τα δείγματα εμφανίζουν WAC% που κυμαίνεται στις ανάμεσα στις τιμές [42,56%-50,10%], το ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό παρουσιάζεται στο εύρος [46,57%-67,16%] και η φαινόμενη πυκνότητα κυμαίνεται στις τιμές [1,04g/mL-1,19g/mL].

Τέλος, δύο από τα δείγματα μόνο εμφανίζουν ολικά διαλυτά άλατα λίγο μεγαλύτερα από 5% και εμφανίζουν pH κοντά στις τιμές του 9.

Γυψοκονιάματα και Μικτά κονιάματα Ασβέστη-Γύψου

Τα κονιάματα που έχουν γύψο είναι της κατηγορίας είτε Ασβέστη-Γύψου ή Γυψοκονιάματα. Έξι από τα έντεκα δείγματα (~55% αυτών των δειγμάτων) βρίσκονται στη κατηγορία των γυψοκονιαμάτων. Τα δείγματα αυτά είναι τα JHS_MN3_m3, JHS_MS1_fm_200, JHS_MS3_jm_80, JHS_MW_fm_130, JHS_MW_fm_80, JHS_MEN_fm_80. Τα υπόλοιπα δείγματα ανήκουν στη κατηγορία των μικτών κονιαμάτων και αυτά τα δείγματα είναι τα JHS_MN5_jm_85, JHS_MS5_jm_285 και JHS_MEN_jm_80. Τα περισσότερα δείγματα ανήκουν στη 2^η ομάδα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, δηλαδή περιέχουν αρκετή ποσότητα κεραμικών και είναι αρκετά εύθρυπτα. Από όλα τα δείγματα αυτά (11) μόνο τα τέσσερα περιέχουν θωμασίτη ή εντρινγκίτη όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Σε δύο κονιάματα από τη κάθε ομάδα έγινε φυσικός διαχωρισμός της κονίας από τα αδρανή. Για τα γυψοκονιάματα βρέθηκε ότι το ποσοστό της κονίας κυμάνθηκε ανάμεσα στα ποσοστά 55% και 84%, ενώ στα μικτά κονιάματα το ποσοστό της κονίας κυμάνθηκε στις τιμές 56% με 76%.

Από τις θερμικές αναλύσεις υπολογίστηκε το ποσοστό του $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ που περιέχεται στα δείγματα και κυμαίνεται στις τιμές [7,21%-26,33%] για τα μικτά κονιάματα και στις τιμές [35,64%-72,67%]. Να σημειωθεί ότι τα δείγματα που περιέχουν θωμασίτη ή εντρινγκίτη περιέχουν λιγότερο γύψο από αυτόν που υπολογίζεται, καθώς αυτές οι ενώσεις παρουσιάζουν χάνουν κρυσταλλικά νερά στο ίδιο

θερμοκρασιακό διάστημα που χάνει και ο γύψος δύο κρυσταλλικά νερά. Το ποσοστό του CaCO_3 που υπολογίζεται κυμαίνεται στις τιμές [51,36%-83,53%] για τα μικτά κονιάματα και στις τιμές [21,91%-39,52%] για τα γυψοκονιάματα, το οποίο και πάλι εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό CaCO_3 από αυτό που υπάρχει στη πραγματικότητα, καθώς στο ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα που πραγματοποιείται η αποσύνθεση των ανθρακικών ενώσεων γίνεται και η αποσύνθεση του ανυδρίτη.

Όσον αφορά τα υγρομετρικά χαρακτηριστικά εμφανίζεται ένα μεγάλο εύρος τιμών σε όλα τα μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, το WAC% κυμαίνεται στις τιμές [46,79%-61,73%] για τα μικτά και στις τιμές [28,76%-56,56%] για τα γυψοκονιάματα, το ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό κυμαίνεται κυμαίνεται στις τιμές [55,93%-60,31%] για τα μικτά και στις τιμές [33,00%-57,30%] για τα γυψοκονιάματα, η φαινόμενη πυκνότητα κυμαίνεται στις τιμές [0,98 g/mL -1,20 g/mL] για τα μικτά και στις τιμές [1,01 g/mL -1,22 g/mL] για τα γυψοκονιάματα. Στα παραπάνω διαστήματα δεν έχουν ληφθεί υπόψη δύο δείγματα τα οποία αποτελούνται κυρίως από ασβεστιτικό λίθο, συνεπώς οι τιμές των αντίστοιχων μεγεθών δεν είναι αντιπροσωπευτικά όλου του δείγματος.

Τέλος, τα ποσοστά των ολικών αλάτων εμφανίζονται αρκετά υψηλά, μέχρι και 43,90%, κάτι που οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε γύψο που έχουν τα κονιάματα και οι τιμές του pH κυμαίνονται στις τιμές [8,09-9,13].

Κονιάματα που περιέχουν πορτλαντίτη

Πρόκειται για ένα πολύ μικρό ποσοστό των δειγμάτων που εξετάστηκαν, μόλις τρία από τα 20 δείγματα περιέχουν αξιοσημείωτη ποσότητα πορτλαντίτη. Όλα τα κονιάματα μαζί με τον πορτλαντίτη περιέχουν και εντριγκίτη στη δομή τους. Ακόμη όλα ανήκουν στη 1^η ομάδα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, δηλαδή πρόκειται για συνεκτικά λευκά ή υπόλευκα κονιάματα που περιέχουν αδρανή που ίσως να είναι οξειδωμένα. Τα δείγματα αυτά είναι τα JHS_MN5_jm_200, JHS_MS3_jm_135, JHS_MS3_jm_200. Σε ένα από τα δείγματα έγινε φυσικός διαχωρισμός της κονιάς από τα αδρανή και βρέθηκε ότι η κονία αποτελούσε το 61% του κονιάματος..

Μέσω των θερμικών αναλύσεων υπολογίστηκε ότι τα κονιάματα περιέχουν [17,02%-42,59%] Ca(OH)_2 , [21,98%-37,05%] CaCO_3 , ενώ εμφανίζουν και χαμηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας (<4).

Όσον αφορά τα υγρομετρικά χαρακτηριστικά είναι αρκετά όμοια με αυτά των ασβεστιτικών. Πιο συγκεκριμένα το WAC% βρίσκεται ανάμεσα στα ποσοστά [38,53%-47,36%], το ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό κυμαίνεται στις τιμές [39,23%-46,56%] και η φαινόμενη πυκνότητα βρίσκεται στις πιο χαμηλές τιμές [0,98 g/mL -1,02 g/mL].

Τέλος, το ποσοστό των διαλυτών αλάτων εμφανίζεται αρκετά αυξημένο λόγω της περιεκτικότητας πορτλαντίτη, αλλά έχουμε και υψηλές τιμές του pH (>10), λόγω του περιεχόμενου Ca(OH)_2 .

4.1.10 Μερικά Συμπεράσματα για τα ιστορικά κονιάματα

Η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου (τοιχοποιίας και γαμίματος) αναδεικνύει την περιπλοκότητα του μνημείου. Σε κάθε φάτνωμα απαντώνται κονιάματα διαφορετικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών. Η συνύπαρξη διαφορετικών κονιαμάτων σε συνδυασμό με την ανερχόμενη από το υπέδαφος υγρασία, έχει επηρεάσει τη σύσταση και μικροδομή των εξεταζόμενων κονιαμάτων.

Συγκριμένα, τα κονιάματα παρουσιάζουν έντονες διαφοροποιήσεις στην ορυκτολογική τους σύσταση, καθώς εμφανίζονται κονιάματα (i) με πρωτεύουσα κορυφή τον ασβεστίτη, (ii) με πρωτεύουσα κορυφή τον γύψο, (iii) με πρωτεύουσα κορυφή τον πορτλαντίτη, (iv) με πρωτεύουσα κορυφή τον ασβεστίτη, παρουσία γύψου, καθώς και (v) με πρωτεύουσα κορυφή τον χαλαζία σε ένα μόνο δείγμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα τα κονιάματα διαχωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες: 1) κονιάματα Ασβέστη 2) Γυψοκονιάματα, 3) μικτά κονιάματα Ασβέστη - Γύψου και 4) κονιάματα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο 33% των κονιαμάτων εντοπίστηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, σε διάφορα ποσοστά, ανεξαρτήτως κατηγορίας κονιαμάτων. Μετά από την εξέταση επιλεγμένων κονιαμάτων με θερμοβαρμετρική και θερμική ανάλυση, προκύπτει ότι τα κονιάματα ασβέστη ταξινομούνται περαιτέρω σε τυπικά κονιάματα αερικής ασβέστου, υδραυλικής ασβέστου και ασβέστη-τεχνητής ποζολάνας. Επιπλέον, σε περιοχές του μνημείου που το μικροκλίμα δεν ευνόησε την ενανθράκωση, παρατηρούνται κονιάματα ασβέστη με σημαντική περιεκτικότητα σε πορτλαντίτη.

Ο φυσικός διαχωρισμός κάποιων εκ των εξεταζόμενων κονιαμάτων υπέδειξε την μεγάλη διαφοροποίηση στην τεχνολογία παρασκευής τους, καθώς, πέραν των διαφοροποιήσεων στη σύσταση, παρατηρούνται και διαφορές στον λόγο κονιάς/αδρανών. Συγκεκριμένα, όλα τα κονιάματα παρουσίασαν υψηλό λόγο κονιάς/αδρανών, ωστόσο με τιμές αναλογίας που κυμαίνονται σε ευρύ διάστημα [1,25-3,6]. Συνεπώς, σε όλα τα εξεταζόμενα μέσω κοκκομετρικής ανάλυσης κονιάματα, παρατηρείται ή ίση ή μεγαλύτερη συμμετοχή κονιάς έναντι των αδρανών, σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική, όπου τα αδρανή υπερσχύουν της κονιάς, ιδιαίτερα στην περίπτωση ασβεστιτικών κονιαμάτων. Στα κονιάματα που πραγματοποιήθηκε φυσικός διαχωρισμός διαπιστώθηκε ότι η κονία, ανά περίπτωση, μπορεί να είναι ασβεστιτικής σύστασης, μίξης γύψου και ασβέστη, (σε ποικίλες αναλογίες), ενώ σε κάποια ασβεστιτικά κονιάματα η κονία είναι μίξη πορτλαντίτη και ανθρακικού ασβεστίου σε ποικίλες αναλογίες. Σε δύο από τις οκτώ εξεταζόμενες περιπτώσεις βρέθηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης στην κονία (τα οποία αποτελούν προϊόντα διάβρωσης), ενώ σε μία περίπτωση ο εντριγκίτης βρισκόταν αποκλειστικά στα αδρανή των κλασμάτων 1mm, 500μm και 250μm, και πιθανά οφείλεται στη χρήση αδρανών με περιεχόμενο ορυκτό εντριγκίτη από την γύρω περιοχή (π.χ. Hatrurim Formation). Ο φυσικός διαχωρισμός και η ανάλυση των κονιαμάτων που εξετάστηκαν υπέδειξε ότι τα αδρανή τους μπορεί να είναι ασβεστιτικά, χαλαζιακά, εντριγκίτη, ή/και γύψου, ανάλογα με τη περίπτωση.

Η εξέταση δύο κονιαμάτων, ενός μικτού κονιαματος ασβέστη-γύψου και ενός ασβέστη-πορτλαντίτη, σε πολωτικό μικροσκόπιο έδειξε ότι και στα δύο χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές η ίδια άμμος θαλάσσης, καθώς και ο ίδιος απολιθωματοφόρος ασβεστόλιθος. Παράλληλα, παρατηρήθηκαν στη μάζα και των δύο εξεταζόμενων κονιαμάτων, αρκετά μεταλλικά στοιχεία, τα οποία κατά τόπους παρουσίαζαν ζώνη διάβρωσης.

Στα είκοσι δείγματα που εξετάστηκε η μικροδομή τους, μέσω ολικής εμφάνισης σε νερό, παρατηρήθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροδομής με το ολικό πορώδες προσβάσιμο στο νερό να κυμαίνεται ανάμεσα σε τιμές μεγάλου εύρους [30%-70%]. Είναι εμφανές ότι τα υπό εξέταση κονιάματα εμφανίζουν υψηλές τιμές πορώδους, υποδεικνύοντας την κακή κατάσταση διατήρησής τους. Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα ασβέστη εμφάνισαν το μεγαλύτερο εύρος τιμών πορώδους και ταυτόχρονα παρουσίασαν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα γυψοκονιάματα. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο ποσοστό του ολικά ροφημένου νερού, ενώ σε σχέση με τη φαινόμενη πυκνότητα παρατηρείται ότι τα κονιάματα ασβέστη παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα γυψοκονιάματα.

Οι τιμές των ολικών διαλυτών αλάτων του συνόλου των δειγμάτων των κονιαμάτων που ελήφθησαν από τη τοιχοποιία του Ιερού Κουβουκλίου, είναι μεγαλύτερες του κρίσιμου κατωφλίου του 3%, γεγονός που αποδεικνύει ότι τα κονιάματα βρίσκονται σε ένα έντονα διαβρωτικό περιβάλλον που ενεργοποιεί τους μηχανισμούς διάβρωσης, επιταχύνοντας τη φθορά των δομικών υλικών. Τα παραπάνω εξηγούν την έντονη διάβρωση που παρουσίαζαν τα ιστορικά μεταλλικά στοιχεία της κατασκευής (αγκύρια, κλπ) που βρέθηκαν εντός της εσωτερικής δομής του Ιερού Κουβουκλίου. Παράλληλα, η παρουσία έντονων διαφορών στην αγωγιμότητα και στο pH των εξεταζόμενων κονιαμάτων που βρίσκονται σε γειτονικές περιοχές της τοιχοποιίας του μνημείου, υποδεικνύει τη δημιουργία μικρογαλβανικού στοιχείου, το οποίο μπορεί να επηρεάσει όλη την κατασκευή σε βάθος χρόνου. Το παραπάνω γεγονός σε συνέργεια με ένα περιβάλλον υψηλής υγρασίας, όπως αυτό του Ιερού Κουβουκλίου, καθιστά το ιστορικό κονίαμα ως έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος άγει, αλλά και δέχεται τη φθορά που προκύπτει εξαιτίας της ανάπτυξης διαφορετικού δυναμικού στην τοιχοποιία.

4.2. Κονιάματα Αποκατάστασης

4.2.1 Σχεδιασμός Συνθέσεων

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στα ιστορικά κονιάματα του μνημείου, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφοροποίηση τόσο στα χημικά όσο και στα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Η συνύπαρξη κονιαμάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος. Παράλληλα, τα κονιάματα αυτά βρέθηκαν αρκετά επιδεκτικά στους εξωτερικούς παράγοντες, για αυτό πρέπει και τα κονιάματα πλήρωσης και τα κονιάματα αρμού να αντικατασταθούν από ένα κονίαμα το οποίο να είναι ανθεκτικό στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επιβαρύνουν αρνητικά το μνημείο και να είναι συμβατό με τα ιστορικά δομικά υλικά στον μέγιστο βαθμό. Έτσι, στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, σχεδιάστηκαν πέντε (5) συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης, ενώ εξετάστηκε και ένα εμπορικό κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη χωρίς παρουσία τσιμέντου, το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία τις τελευταίες δεκαετίες σε πληθώρα μνημείων με εξαιρετικά αποτελέσματα. Συνολικά, λοιπόν, μελετήθηκαν έξι (6) συνθέσεις κονιαμάτων, όσον αφορά τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητές τους προκειμένου να συσχετιστούν με τις επιθυμητές ιδιότητες που είναι επιθυμητό να έχει ένα κονίαμα αποκατάστασης για αυτό το μνημείο. (53)

Σύμφωνα με τη μελέτη των πολιτικών μηχανικών (αναφορές από πειραματικό σχεδιασμό) μέσω μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την διερεύνηση σεναρίων αποκατάστασης του μνημείου, αναδείχθηκε ότι το κονίαμα αποκατάστασης που θα εφαρμοστεί, θα πρέπει να παρουσιάζει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 15 MPa, ώστε να εξασφαλίζεται η ικανοποιητική απόκριση του μνημείου σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Συνεπώς, και λαμβάνοντας την κρίσιμη από αυτήν την άποψη κατάσταση του μνημείου προ της αποκατάστασης, είναι απαραίτητη η επίτευξη του κατάλληλου επιπέδου επιτελεστικότητας του κονιαμάτος αποκατάστασης. Παράλληλα με την επιτελεστικότητα, πρέπει να διασφαλιστεί και η συμβατότητα του κονιαμάτος αποκατάστασης, καθώς πιθανή ασυμβατότητα μεταξύ του κονιαμάτος αποκατάστασης και των ιστορικών υλικών μπορεί να οδηγήσει στην πυροδότηση ή επιδείνωση μηχανισμών φθοράς με αρνητικές επιπτώσεις και στην επιτελεστικότητα των υλικών και την απόκριση του μνημείου εν τω συνόλω σε μηχανικές και φυσικοχημικές καταπονήσεις, όπως έχει αναδειχθεί στην περίπτωση της υφιστάμενης κατάστασης των ιστορικών κονιαμάτων.

Για αυτό το σκοπό, σχεδιάστηκαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις, χρησιμοποιώντας αερική άσβεστο CL-90 ως βασική συνδετική κονία, ποζολανικό πρόσθετο και αδρανή πυριτικής άμμου κοκκομετρίας 0-2mm, ώστε το κονίαμα να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις. Σαν ποζολανικό πρόσθετο χρησιμοποιήθηκε αφενός ο μετακαολίνη, σε τρία διαφορετικά ποσοστά, και αφετέρου μία φυσική ποζολάνη, ώστε να γίνει σύγκριση της επίδρασης των διαφορετικών ποζολανικών προσθέτων στα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων. Ακόμη σε μία από τις συνθέσεις του μετακαολίνη εξετάστηκε και η προσθήκη υπερρυστοποιητή. Τα ποσοστά του μετακαολίνη στις συνθέσεις επιλέχθηκαν βάση της σχετικής βιβλιογραφίας και την επιθυμητή τελική αντοχή του κονιαμάτος αποκατάστασης.

Ο ασβέστης που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης, ήταν τύπου CL-90 σύμφωνα με το EN 459-1, με περιεχόμενο $\text{CaCO}_3 > 80\%$. Η χημική ανάλυση της υδρασβέστου παρατίθεται στον αντίστοιχο πίνακα:

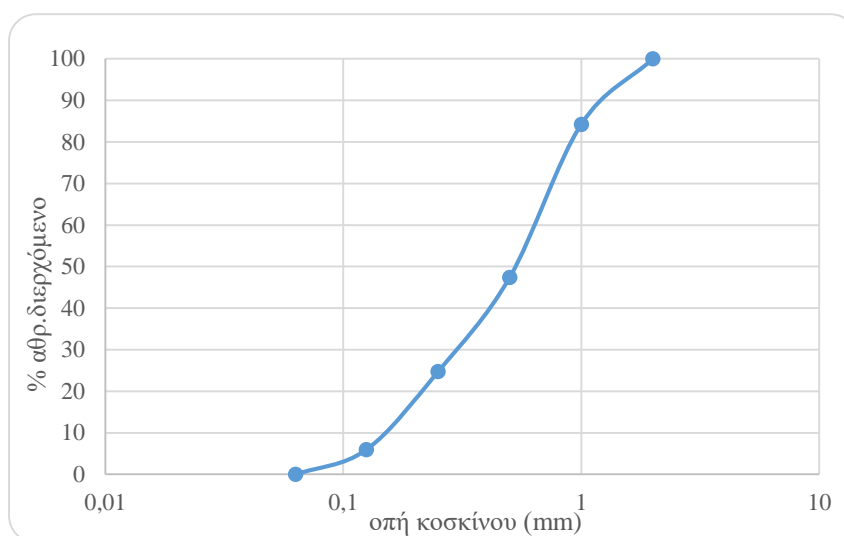
Πίνακας 47 Χημική ανάλυση της υδρασβέστου του κονιαμάτος αποκατάστασης

Στοιχεία	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₄
(%)	0,1-0,2	0,05-0,9	ίχνη	0,5-0,8	1,5-2,3	0,1-0,25

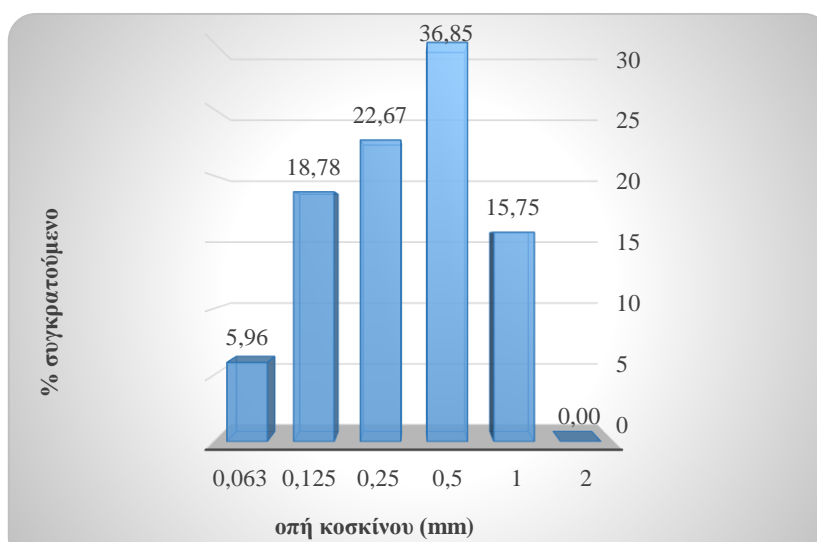
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης της πυριτικής άμμου που χρησιμοποιήθηκε ως αδρανή στα κονιάματα αποκατάστασης που κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 48 Διαβάθμιση κόκκων αδρανών κονιαμάτων αποκατάστασης

Gradation Curve Πορτιτικής Άμμων Κονιαμάτων Αποκατάστασης				
Μάζα αρχική (g)	200,59			
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα (g)	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο
2	0	0,00	0,00	100,00
1	31,27	15,75	15,75	84,25
0,5	73,19	36,85	52,60	47,40
0,25	45,02	22,67	75,27	24,73
0,125	37,29	18,78	94,04	5,96
0,063	11,83	5,96	100,00	0,00
<0,063	1,97	0,98		



Διάγραμμα 64 Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών κονιαμάτων αποκατάστασης



Διάγραμμα 65 και Ιστόγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης κονιαμάτων αποκατάστασης

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι η κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών έχει σιγμοειδή μορφή. Από το ιστόγραμμα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα περισσότερα αδρανή βρίσκονται στα 500μm. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικότεροι δείκτες για την αξιολόγηση της κοκκομετρικής καμπύλης.

Πίνακας 49 Κρίσιμοι Δείκτες Κοκκομετρικής Καμπύλης

Q3 (75%) (mm)	0,84
Q1 (25%) (mm)	0,27
So	3,07
D60 (60%) (mm)	0,64
D30 (30%) (mm)	0,32
D10 (10%) (mm)	0,14
Cu	4,43

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ο δείκτης So έχει επιθυμητή τιμή, δηλαδή ανάμεσα στις τιμές [2,5-4,5], και ο δείκτης Cu είναι πολύ κοντά στις επιθυμητές τιμές, δηλαδή μεγαλύτερος του 5.

Άρα η διαβάθμιση των κονιαμάτων που κατασκευάστηκαν έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι παρουσιάζονται τα τεχνικά δελτία των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για τη παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθέσεις που περιεγράφηκαν παραπάνω, εκτός της σύνθεσης του έτοιμου κονιάματος. Επιλέχθηκε η εξέταση κονιαμάτων με υψηλά σχετικά ποσοστά ποζολάνης (είτε μετακαολίνη, είτε φυσικής ποζολάνης), λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι επιθυμητό ένα κονίαμα υψηλού υδραυλικού χαρακτήρα, καθώς επίσης είναι σημαντικό να δεσμευτεί ο πορτλαντίτης μέσω της ποζολανικής αντίδρασης, λόγω των ορθομαρμαρώσεων και της μειωμένης διάχυσης CO₂ στο κονίαμα μετά την επανατοποθέτηση των ορθομαρμαρώσεων και την επακόλουθη αδυναμία ενανθράκωσής του. Παράλληλα, τα υδραυλικά κονιάματα παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στην δράση διαλυτών αλάτων.

Πίνακας 50 Συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης (% κατά βάρος)

Κωδικός σύνθεσης	Ασβέστης (%)	Μετακαολίνης (%)	Φυσική ποζολάνη	Άμμος πυριτική (0-2mm) (%)	Υπερρευστοποιητής (%)*
L_M8.5	16,5	8,5	-	75	-
L_M10.5	14,5	10,5	-	75	-
L_M12.5	12,5	12,5	-	75	-
L_NP12.5	12,5	-	12,5	75	-
L_M8.5s	16,5	8,5	-	75	0,20

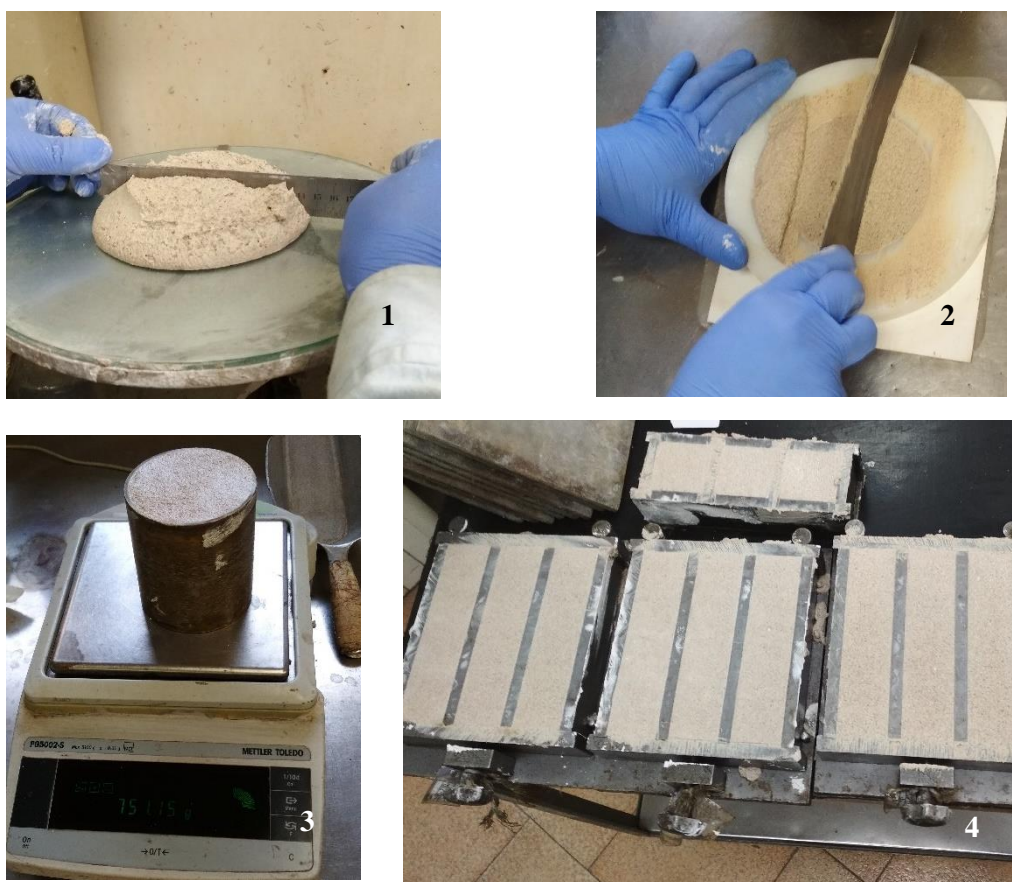
* Σε σχέση με την κονία (ασβέστης+μετακαολίνης)

Όλες οι συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης (Πίνακας 2) παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο κονιαμάτων του TITAN A.E. στο Καμάρι. Η διαδικασία ανάμιξης ήταν η ίδια σε όλα τα ασβεστοποζολανικά κονιάματα, είτε ήταν παρασκευασμένα με μετακαολίνη είτε με φυσική ποζολάνη. Τα κονιάματα αναμείχθηκαν με το ποζολανικό πρόσμικτο χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ποσότητα νερού έτσι ώστε η εξάπλωση στη τράπεζα εξάπλωσης να παρουσιάζει τιμές 15cm ± 1cm. Στη συνέχεια, η άμμος προστέθηκε σταδιακά. Ο συνολικός χρόνος ανάμιξης ήταν περίπου 3 λεπτά για όλες τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν. Αμέσως μετά την παρασκευή και πριν την χύτευση σε μήτρες (διαστάσεων 16x4x4 cm και διαστάσεων 5x5x5cm), ελέγχθηκαν οι ιδιότητες των νωπών κονιαμάτων. Στη συνέχεια, σε διάφορους χρόνους ωρίμανσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με διάφορες τεχνικές ώστε να αποτιμηθούν τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων αποκατάστασης κατά τη πήξη και

σκλήρυνση και σε σχέση με τον χρόνο ωρίμανσης. Τα κονιάματα διατηρήθηκαν σε θάλαμο σταθερών συνθηκών (99% RH (σχετική υγρασία), 25°C) μέσα στην μεταλλική μήτρα για 2 ημέρες. Στη συνέχεια ξεκαλουπώθηκαν και παρέμειναν στις ίδιες συνθήκες για άλλες 5 μέρες. Εν συνεχεία τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου σε σταθερές συνθήκες (65%RH, 25°C).

4.2.2 Ιδιότητες Νωπών Κονιαμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των νωπών κονιαμάτων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η αναλογία του απαιτούμενου νερού προς την κονία (αναλογία κατά βάρος), όπου σαν κονία λογίζεται το σύνολο του ασβέστη, και όπου υπάρχει ποζολανικό πρόσθετο, το σύνολο του ασβέστη και του ποζολανικού πρόσθετου, η συνεκτικότητα του κονιάματος σε τράπεζα εξάπλωσης (εξάπλωση), η οποία είναι ενδεικτική της συνεκτικότητας και της εργασιμότητας (χωρίς να συνδέεται απευθείας με την εργασιμότητα από τους τεχνίτες), η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού κονιάματος, κρίσιμη παράμετρος κατά την ογκομέτρηση και παραγγελία των πρώτων υλών και ενδεικτική ως προς την τελική φαινόμενη πυκνότητά τους, και το ποσοστό συγκρατούμενου νερού, δηλαδή το ποσοστό του νερού που συγκρατείται στη μάζα του κονιάματος σε σχέση με την συνολική ποσότητα νερού που προστέθηκε στο κονίαμα.



Εικόνα 95 1) Τράπεζα εξάπλωσης 2) Προσδιορισμός συγκρατούμενου νερού 3) Υπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας 4) Τοποθέτηση δειγμάτων στις αντίστοιχες μήτρες

Πίνακας 52 Αποτελέσματα Χαρακτηριστικών Νωπών Κονιαμάτων

Κωδικός σύνθεσης	w/b (w/w)	Εξάπλωση (cm)	$\rho_{\text{φαιν}}$ (g/cm ³)	Συγκρατούμενο νερό (%)
L_M8,5	1,100	15,50	1,88	93,7
L_M10,5	1,100	15,60	1,89	92,99
L_M12,5	1,100	15,50	1,90	92,42
L_NP12,5	0,890	15,10	1,96	89,37
L_M8,5s	1,010	15,10	1,92	94,56
ME_0,19	0,194*	15,80	2,02	91,93
ME_0,15	0,152*	15,00	2,09	98,81

*Στην περίπτωση του έτοιμου κονιάματος, η αναλογία του απαιτούμενου νερού, δεν είναι ως προς την κονία, αλλά προς το συνολικό ξηρό βάρος του έτοιμου κονιάματος.

Συγκρίνοντας την ποσότητα νερού που απαιτείται για τα κονιάματα υδρασβέστου-ποζολανικού προσμίκτου, παρατηρείται ότι τα κονιάματα με αυξημένη περιεκτικότητα σε μετακαολίνη απαιτούν τη μεγαλύτερη ποσότητα σε νερό σε σχέση με τη σύνθεση που περιέχει φυσική ποζολάνη, κάτι που πιθανώς αποδίδεται στην λεπτή κοκκομετρία και στην μεγάλη ειδική επιφάνεια που παρουσιάζει ο μετακαολίνης. Ακόμη, όπως είναι αναμενόμενο, η προσθήκη υπερρυστοποιητή σε μία από τις συνθέσεις ασβέστη-μετακαολίνη μειώνει την απαιτούμενη ποσότητα νερού. Η σύνθεση που απαιτεί τη μικρότερη ποσότητα νερού είναι το έτοιμο κονίαμα ME, γνωρίζοντας ότι έχει υπολογιστεί με βάση το ξηρό βάρος όλου του κονιάματος (αδρανή και κονία). Στο υπόλοιπο της εργασίας στη περίπτωση του έτοιμου κονιάματος η σύνθεση με τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού θα έχει το κωδικό ME_19 και η σύνθεση με τη μικρότερη ποσότητα νερού θα έχει το κωδικό ME_15.

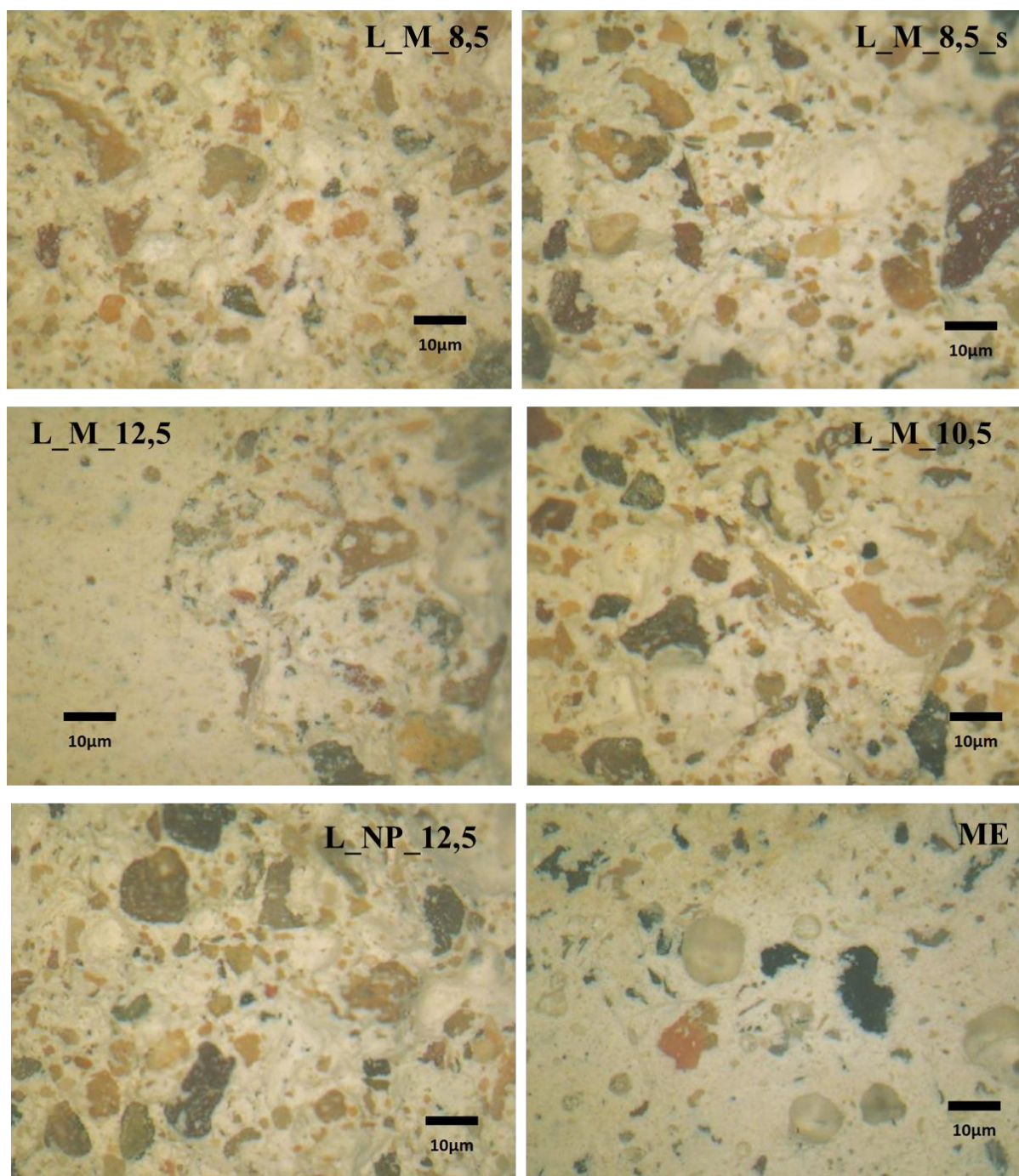
Όλες τα κονιάματα αποκατάστασης που παρασκευάστηκαν παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά συγκρατούμενου νερού (>89%). Η αύξηση της περιεκτικότητας του μετακαολίνη φαίνεται να μειώνει το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Παράλληλα, το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και με τη φυσική ποζολάνη η οποία εμφανίζει το μικρότερο ποσοστό. Η προσθήκη του υπερρυστοποιητή φαίνεται να αυξάνει το ποσοστό του συγκρατούμενου νερού. Τη μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται ότι την έχει το έτοιμο κονίαμα.

Εξετάζοντας στη συνέχεια τη φαινόμενη πυκνότητα του νωπού κονιάματος, παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας του μετακαολίνη αυξάνεται και η φαινόμενη πυκνότητα του κονιάματος. Στο κονίαμα που έχει προστεθεί φυσική ποζολάνη αντί του μετακαολίνης φαίνεται να υπάρχει αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας, συγκριτικά με την αντίστοιχη σύνθεση του μετακαολίνης. Ακόμη, η προσθήκη υπερρυστοποιητή σε μία από τις συνθέσεις ασβέστη-μετακαολίνης φαίνεται να αυξάνει τη φαινόμενη πυκνότητα, σε σχέση με την αντίστοιχη σύνθεση χωρίς υπερρυστοποιητή. Το έτοιμο κονίαμα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα.

Τέλος, το έτοιμο κονίαμα ME, έχει ελεγχθεί με δυο ποσοστά προστιθέμενου νερού. Είναι εμφανές ότι η αύξηση νερού στο κονίαμα προκαλεί μικρή μείωση στο ποσοστό συγκρατούμενου νερού, ενώ προκαλεί και μείωση στην φαινόμενη πυκνότητα του νωπού κονιάματος.

4.2.3 Εξέταση Μορφολογίας Κονιαμάτων με ψηφιακή μικροσκοπία

Τρεις μήνες μετά τη κατασκευή των κονιαμάτων έλαβε χώρα ψηφιακή μικροσκοπία για να εξεταστεί η μορφολογία τους.



Εικόνα 96 Ψηφιακή Μικροσκοπία με μικροσκόπιο οπτικών ινών στα κονιάματα αποκατάστασης

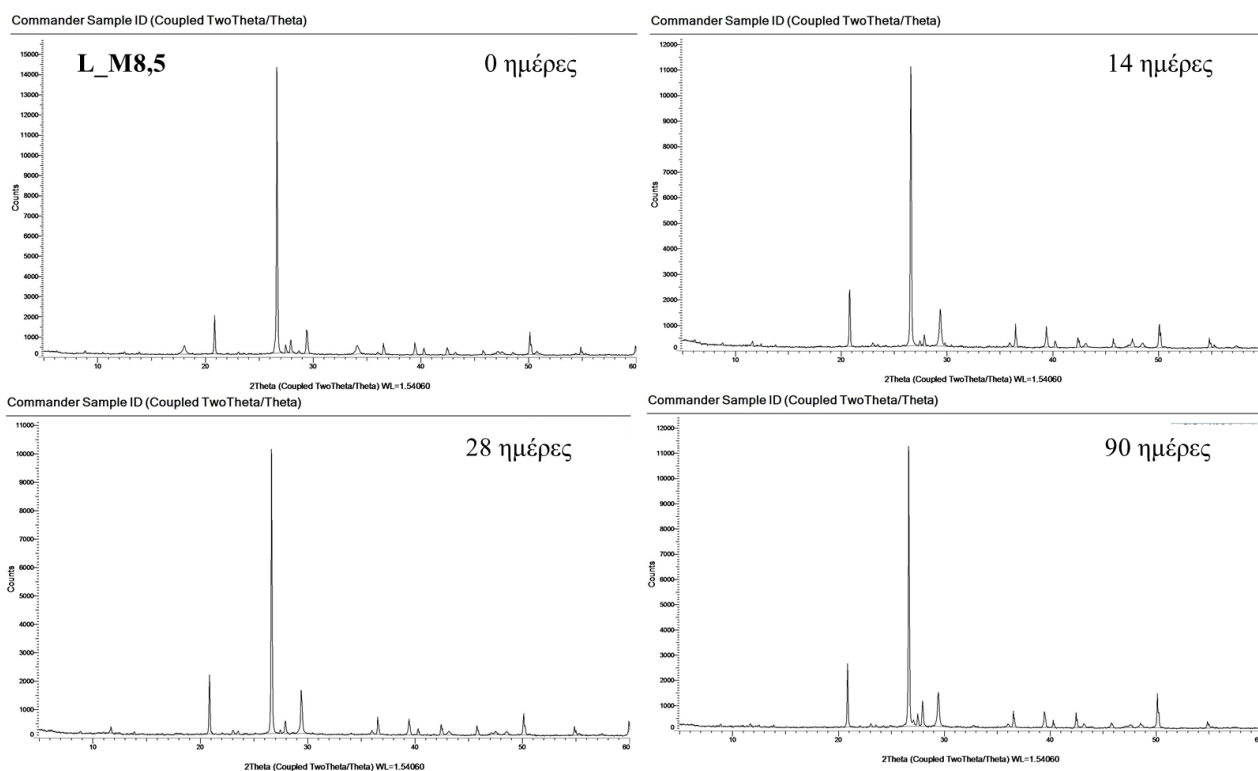
Από τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται ότι σε όλα τα δείγματα έχει γίνει καλή προσρόφηση της κονίας στα αδρανή. Οπτικά δεν εμφανίζουν κάποια διαφορά τα κονιάματα αποκατάστασης, ούτε στο χρωματισμό ούτε στα αδρανή. Ακόμη δεν εμφανίζονται ατέλειες στους 3 μήνες πήξης τους. Οι μόνες διαφορές εμφανίζονται στο έτοιμο κονίαμα το οποίο έχει έναν ελαφρύ γκρι χρωματισμό.

4.2.3 Μελέτη εξέλιξης χημικών αντιδράσεων κατά τη πήξη και τη σκλήρυνση

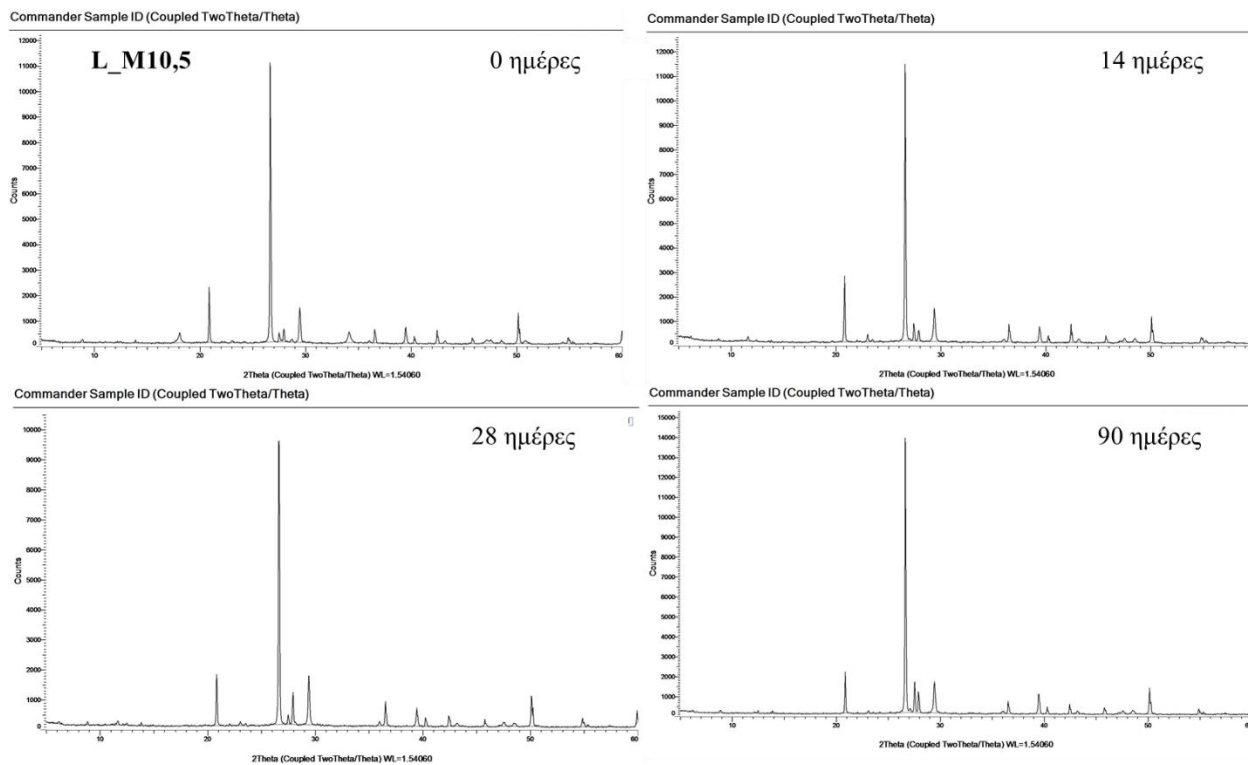
4.2.3.1 Περίθλαση Ακτίνων Χ

Η μελέτη της εξέλιξης των χημικών αντιδράσεων κατά τη πήξη και τη σκλήρυνση πραγματοποιήθηκε σε διάφορους χρόνους ωρίμανσης με διάφορες αναλυτικές μεθόδους, μία εκ των οποίων είναι η περίθλαση ακτίνων Χ. Μέσω αυτής προσδιορίστηκαν οι ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων στις 0, 14, 28 και 90 ημέρες.

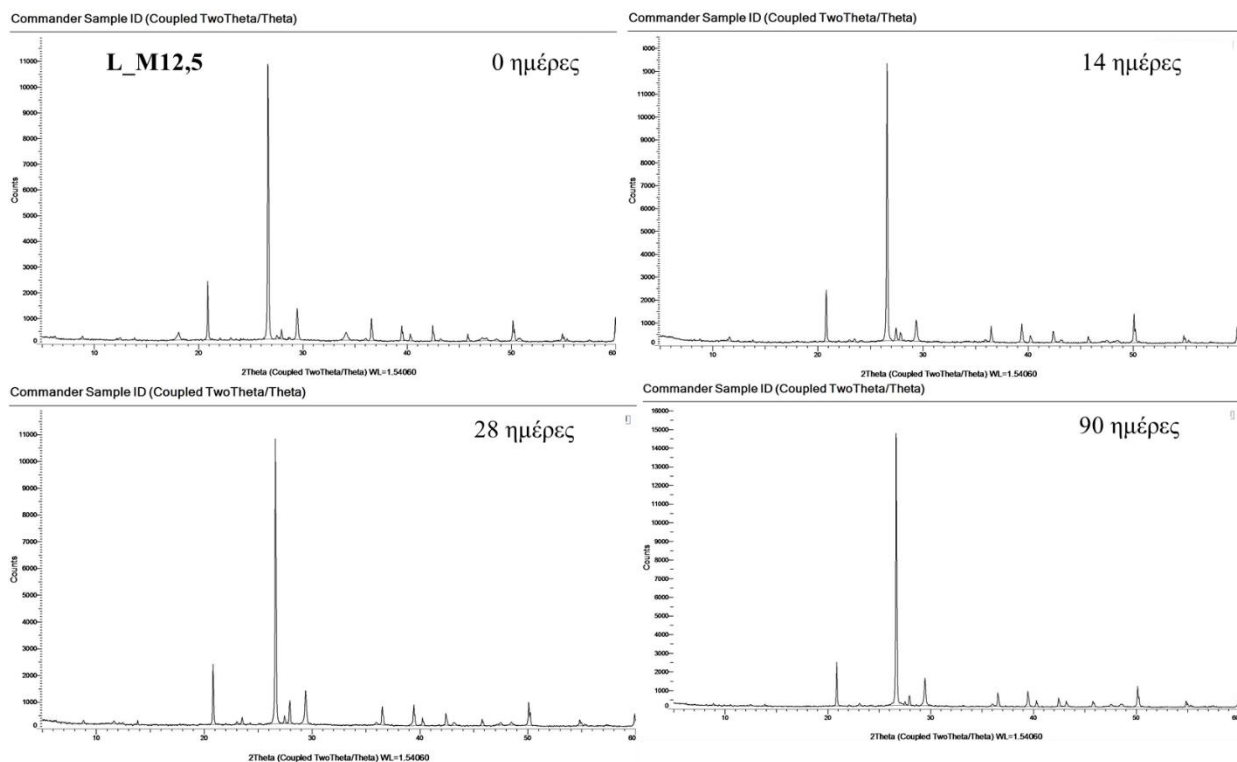
Πριν από τη μέτρηση, σε κάθε χρόνο, λαμβάνεται τμήμα του δοκιμίου που αντιστοιχεί στα 0.5cm του εξωτερικού του δοκιμίου, το οποίο γίνεται σκόνη και τοποθετείται στον φούρνο για 2 ώρες και στον ξηραντήρα για μια ώρα, ώστε να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις σε κάθε χρόνο ωρίμανσης. Στη περίπτωση του χρόνου των 0 ημερών, κατασκευάζεται η κάθε σύνθεση του κονιαματος όπως αναφέρεται παραπάνω και μετά από χρόνο 60 λεπτών το δείγμα τοποθετείται για 60 λεπτά στο φούρνο, μετά γίνεται σκόνη, επανατοποθετείται στο φούρνο για άλλη μία ώρα και τέλος τοποθετείται στον ξηραντήρα για μια ώρα. Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



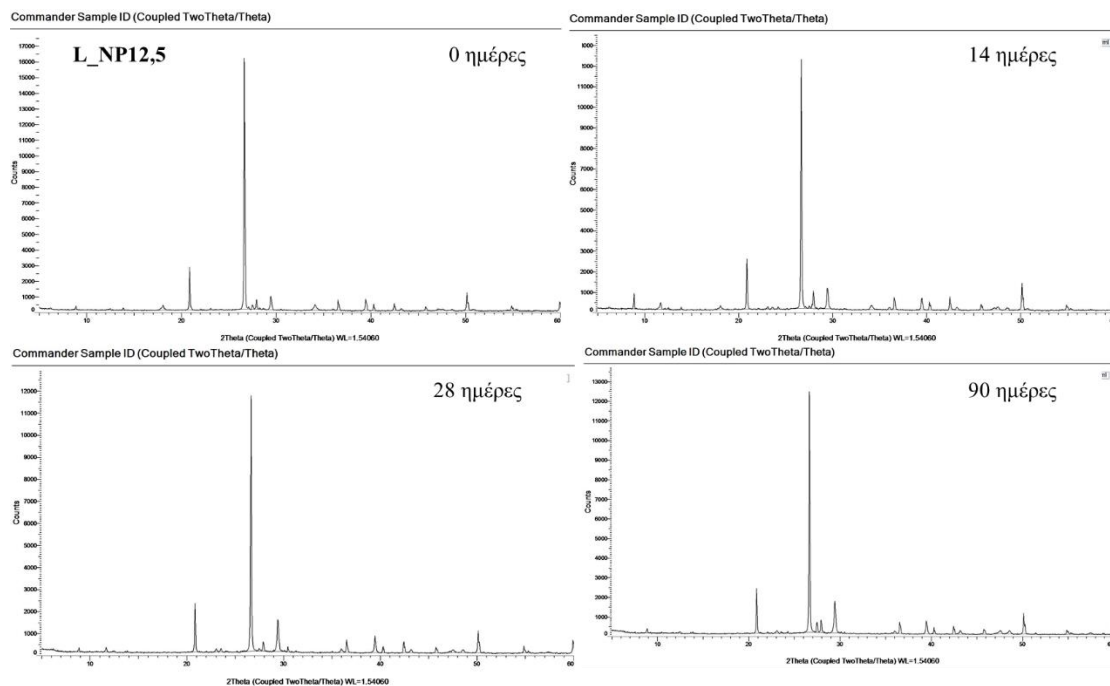
Διάγραμμα 66 Γωνιογράμματα σύνθεσης L_M8,5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



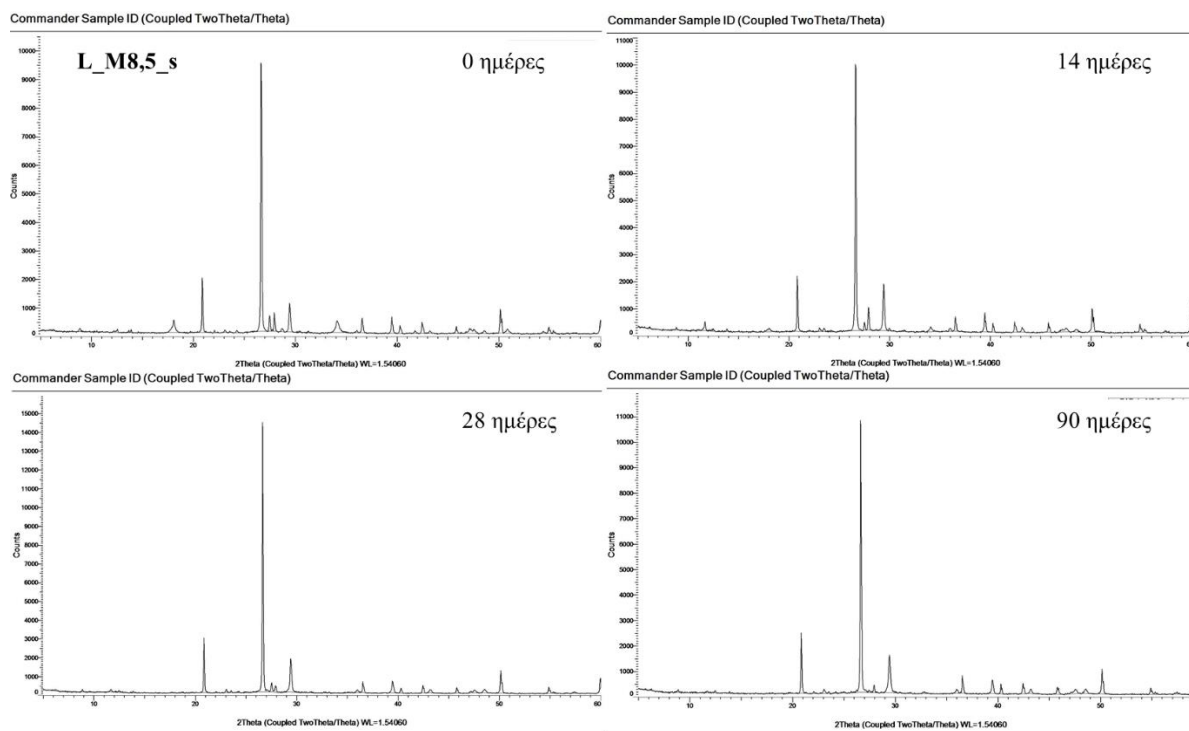
Διάγραμμα 67 Γωνιογράμματα σύνθεσης L_M10,5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



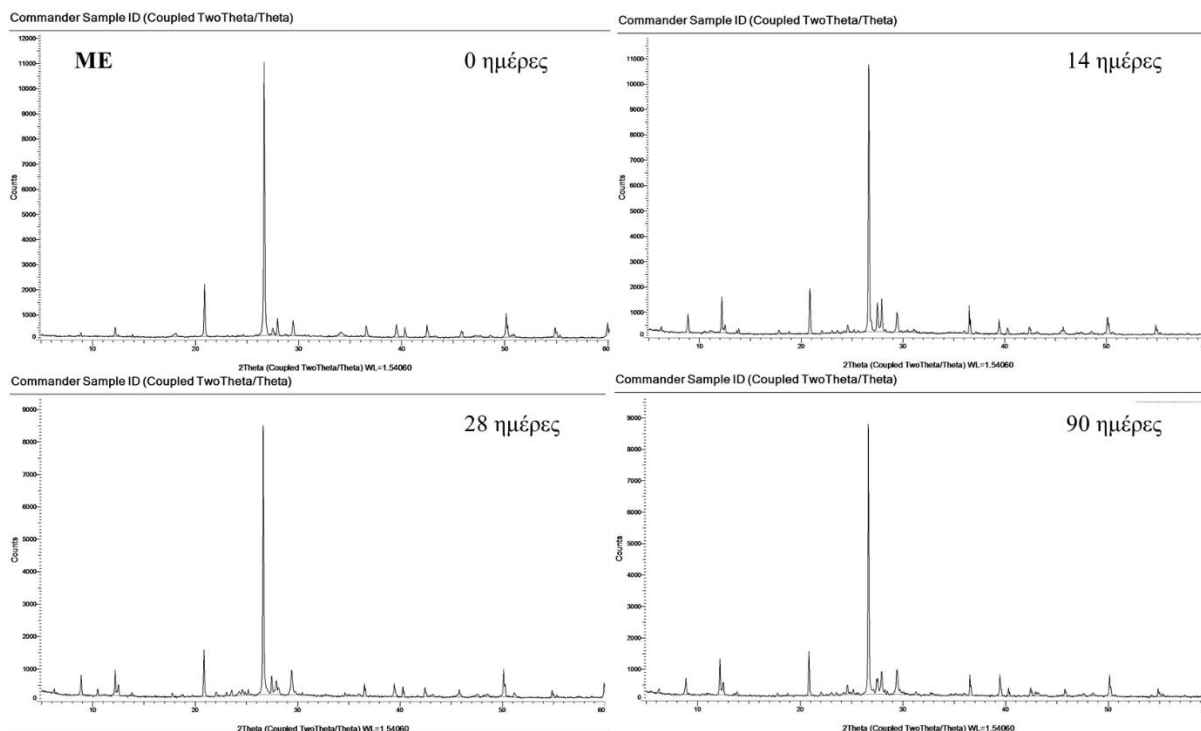
Διάγραμμα 68 Γωνιογράμματα σύνθεσης L_M12,5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



Διάγραμμα 69 Γωνιογράμματα σύνθεσης L_NP12,5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



Διάγραμμα 70 Γωνιογράμματα σύνθεσης L_M8,5_s στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



Διάγραμμα 71 Γωνιογράμματα της έτοιμης σύνθεσης ME στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης

Τα διαγράμματα εμφανίζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους, τόσο ανά σύνθεση όσο και στους διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά 75% όλα τα κονιάματα αποτελούνται από τα ίδια αδρανή. Όλα τα διαγράμματα ως πρωτεύουσα ορυκτολογική φάση εμφανίζουν το χαλαζία. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς χρησιμοποιήθηκε πυριτική άμμος για τη παρασκευή των κονιαμάτων.

Οι δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις που εμφανίζονται στα κονιάματα αποκατάστασης είναι αρχικά ο ασβεστίτης και ο πορτλαντίτης. Από τις 0 ημέρες μόλις φαίνεται να έχει ξεκινήσει η μετατροπή του πορτλαντίτη σε ασβεστίτη. Από τις 14 ημέρες μόλις, αρχίζει να μην εμφανίζεται πλέον η ορυκτολογική φάση του πορτλαντίτη, συνεπώς δεν είναι ανιχνεύσιμος από το όργανο, βρίσκεται δηλαδή σε περιεκτικότητα κάτω του 5%. Στα μόνα δείγματα που παρουσιάζεται μία ελάχιστη ποσότητα πορτλαντίτη στις 14 ημέρες είναι στις συνθέσεις L_M8,5_s και L_NP12,5. Μετά από τις 14 ημέρες δεν εμφανίζεται σε κανένα δείγμα η κορυφή του πορτλαντίτη.

Άλλες δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις που εμφανίζονται είναι ο αλβίτης, το σανίδινο και ο μοσχοβίτης. Τα ορυκτά αυτά περιέχονται στα αδρανή με τα οποία παρασκευάστηκαν τα κονιάματα αποκατάστασης. Τέλος, σε κάποια από τα κονιάματα με ποζολανικό πρόσθετο το μετακαολίνη, εμφανίζεται και μία μικρή ποσότητα καολίνιτη. Τη μέγιστη κορυφή την εμφανίζει η σύνθεση του έτοιμου κονιάματος. Η ορυκτολογική φάση του καολίνιτη αρχίζει να εμφανίζεται από τις 14 ημέρες ωρίμανσης και μετά.

4.2.3.2 Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)

Η μελέτη της εξέλιξης των χημικών αντιδράσεων κατά τη πήξη και τη σκλήρυνση πραγματοποιήθηκε σε διάφορους χρόνους ωρίμανσης και μέσω θερμοβαρυμετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, τα διάφορα κονιάματα μελετήθηκαν σε χρόνους ωρίμανσης 0, 14, 28 και 90 ημερών. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα Regulus 2500 της Netzsch και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας ρυθμό αύξησης θερμοκρασίας 10°C/min από θερμοκρασία 30 °C μέχρι θερμοκρασία 1000 °C.

Πριν από τη μέτρηση, σε κάθε χρόνο, λαμβάνεται τμήμα του δοκιμίου που αντιστοιχεί στα 0.5cm του εξωτερικού του δοκιμίου, το οποίο γίνεται σκόνη και τοποθετείται στον φούρνο για 2 ώρες και στον ξηραντήρα για μια ώρα, ώστε να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις σε κάθε χρόνο ωρίμανσης. Στη περίπτωση του χρόνου των 0 ημερών, κατασκευάζεται η κάθε σύνθεση του κονιάματος όπως αναφέρεται παραπάνω και μετά από χρόνο 60 λεπτών το δείγμα τοποθετείται για 60 λεπτά στο φούρνο, μετά γίνεται σκόνη, επανατοποθετείται στο φούρνο για άλλη μία ώρα και τέλος τοποθετείται στον ξηραντήρα για μια ώρα.

Σκοπός είναι να μελετηθεί η εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν αφενός τη δημιουργία υδραυλικών ενώσεων και αφετέρου την κατανάλωση του Ca(OH)_2 . Η απώλεια μάζας (%) στα διάφορα θερμοκρασιακά διαστήματα, μας αποκαλύπτει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων. Συγκεκριμένα, στο διάστημα <120°C, απελευθερώνεται το φυσικά ροφημένο νερό (φυσική υγρασία), ενώ στο διάστημα 120-200°C απελευθερώνονται κρυσταλλικά νερά, καθώς και νερά που είναι δεσμευμένα σε πρώιμες υδραυλικές ενώσεις. Στο διάστημα από 200-600°C η απώλεια μάζας που παρατηρείται οφείλεται στην απελευθέρωση χημικά δεσμευμένου νερού σε υδραυλικές ενώσεις ή/και σε ενώσεις Ca(OH)_2 που τυχόν δεν έχουν ακόμα αντιδράσει. Στις θερμοκρασίες άνω των 600°C, η απώλεια μάζας που παρατηρείται οφείλεται στην απελευθέρωση CO_2 λόγω της διάσπασης του CaCO_3 , όπως έχουν αναφερθεί και στο Α μέρος των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων σε σχέση με την επί της εκατό απώλεια μάζας ανά θερμοκρασιακό διάστημα για κάθε σύνθεση στην αντίστοιχη χρονική στιγμή που εξετάστηκε:

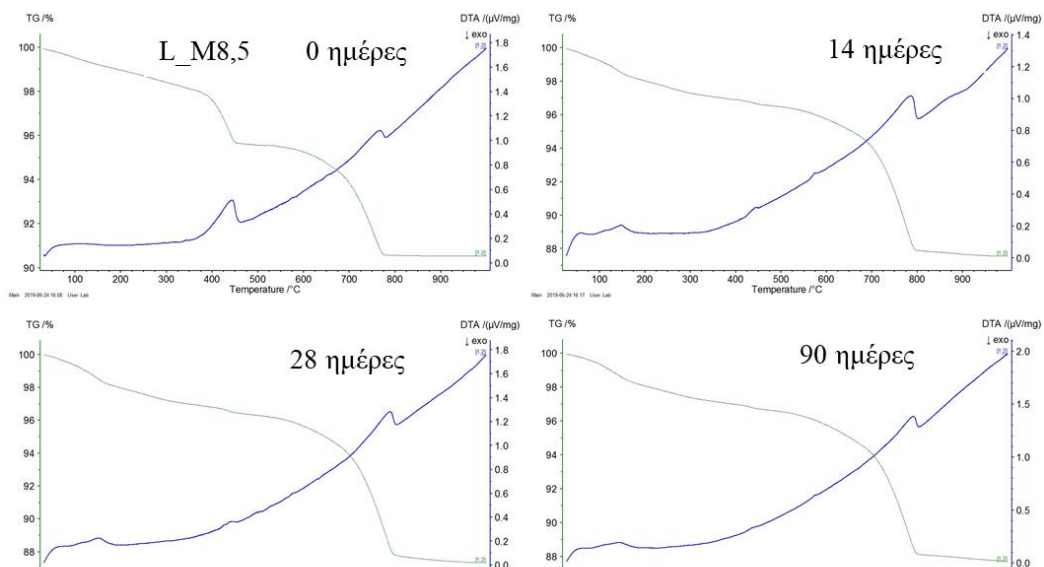
Πίνακας 53 Αποτελέσματα θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης κονιαμάτων αποκατάστασης στους διάφορους χρόνους πήξης

Ηλικία δοκιμίου	Κωδικός Δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα (°C)			
		<120°C	120-200°C	200-600°C	600-1000°C
0 ημέρες	L_M8,5_0d	0,55	0,43	3,71	4,71
	L_M10,5_0d	0,48	0,21	2,83	4,19
	L_M12,5_0d	0,52	0,35	2,76	4,69
	L_NP12,4_0d	0,44	0,23	3,05	4,17
	L_M8,5_s_0d	0,62	0,47	3,83	4,43
	ME_0d	0,31	0,13	2,57	2,85
14 ημέρες	L_M8,5_14d	0,97	0,96	2,28	8,19
	L_M10,5_14d	1,15	1,14	2,70	7,11
	L_M12,5_14d	1,24	1,18	2,27	5,45
	L_NP12,4_14d	0,65	0,60	2,51	5,63
	L_M8,5_s_14d	1,02	1,26	2,92	7,16
	ME_14d	0,87	0,84	2,33	4,38
28 ημέρες	L_M8,5_28d	0,99	1,05	2,32	8,28
	L_M10,5_28d	0,99	0,95	2,21	7,61
	L_M12,5_28d	0,93	1,02	2,11	6,52
	L_NP12,4_28d	0,64	0,53	1,75	7,77
	L_M8,5_s_28d	0,94	0,98	2,72	8,75
	ME_28d	0,83	0,73	2,24	5,07
3 μήνες	L_M8,5_3m	0,90	0,99	2,31	8,06
	L_M10,5_3m	0,98	0,88	2,36	8,14
	L_M12,5_3m	0,90	0,82	2,50	6,39
	L_NP12,4_3m	0,55	0,44	2,16	7,39
	L_M8,5_s_3m	1,01	0,81	2,21	9,29
	ME_3m	0,87	0,67	2,44	6,02

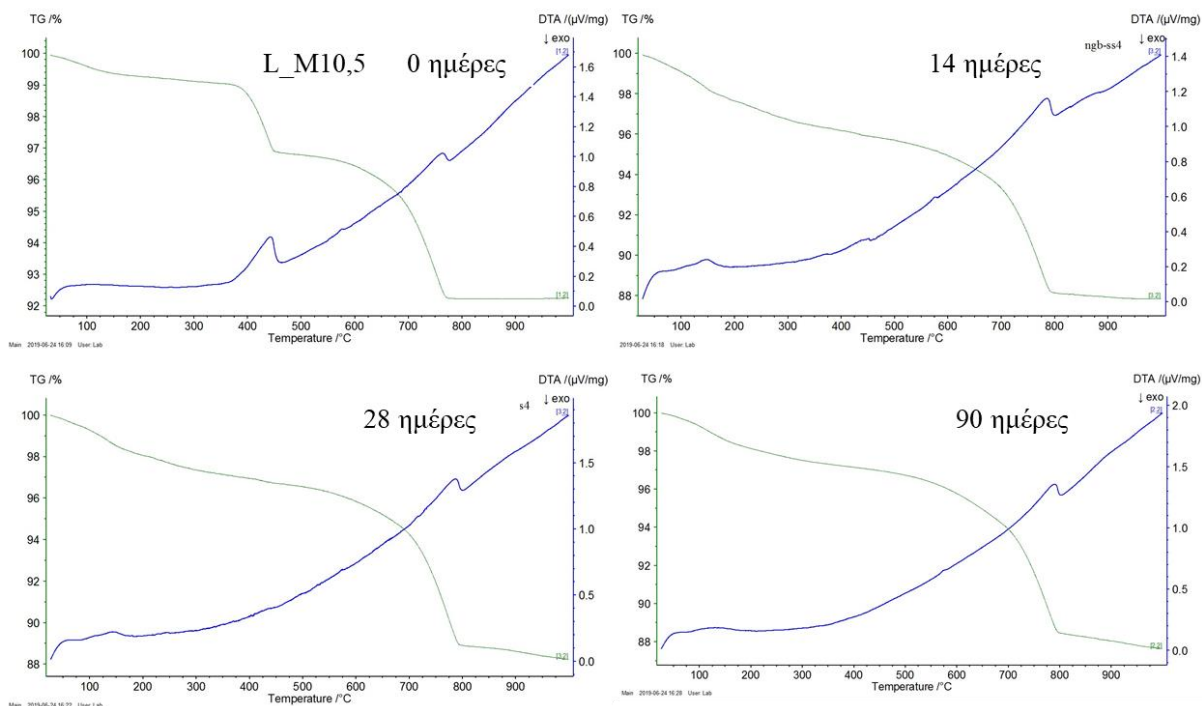
Η απώλεια μάζας που οφείλεται στο φυσικά ροφημένο νερό είναι σχετικά χαμηλή σε όλες τις συνθέσεις και σε όλους τους χρόνους (<1%). Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στις 0 ημέρες, ενώ ήδη από τις 14 ημέρες όλα τα κονιάματα, εκτός του κονιάματος με φυσική ποζολάνη και του έτοιμου κονιάματος, εμφανίζουν τιμές κοντά στο 1%. Μια παρόμοια τάση παρατηρείται και για το θερμοκρασιακό διάστημα (120-200°C). Στο θερμοκρασιακό διάστημα 200-600 °C, η απώλεια μάζας αρχικά μειώνεται (0-14 ημέρες) και στη συνέχεια αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός καταναλώνεται ο πορτλαντίτης, με συνέπεια την μείωση της απώλειας μάζας λόγω της διάσπασής του σε αυτό το διάστημα, και αφετέρου δημιουργούνται υδραυλικές ενώσεις, των οποίων το χημικά δεσμευμένο νερό απελευθερώνεται σε αυτό το θερμοκρασιακό διάστημα. Στο θερμοκρασιακό διάστημα >600°C, όπου απελευθερώνεται το CO₂ από τη διάσπαση του ασβεστίτη, παρατηρείται μια έντονη αύξηση απώλειας μάζας από τις 0 στις 14 ημέρες, και μια πιο ήπια στους επόμενους χρόνους, ενδεικτική της δημιουργίας ανθρακικού ασβεστίου προϊόν της αντίδρασης του Ca(OH)₂ με το διοξείδιο του άνθρακα του αέρα.

Αντίστοιχα, στις καμπύλες της διαφορικής θερμικής ανάλυσης, ταυτοποιούνται οι ενώσεις του πορτλαντίτη (ενδόθερμη κορυφή στους ~440 °C), του χαλαζία (ενδόθερμη κορυφή στους ~575 °C, η οποία οφείλεται στην μετατροπή του χαλαζία από α→β και δεν συνοδεύεται από απώλεια μάζας) και του ασβεστίτη (ενδόθερμη κορυφή στους ~780°C). Τα διαγράμματα της θερμοβαρυμετρικής και

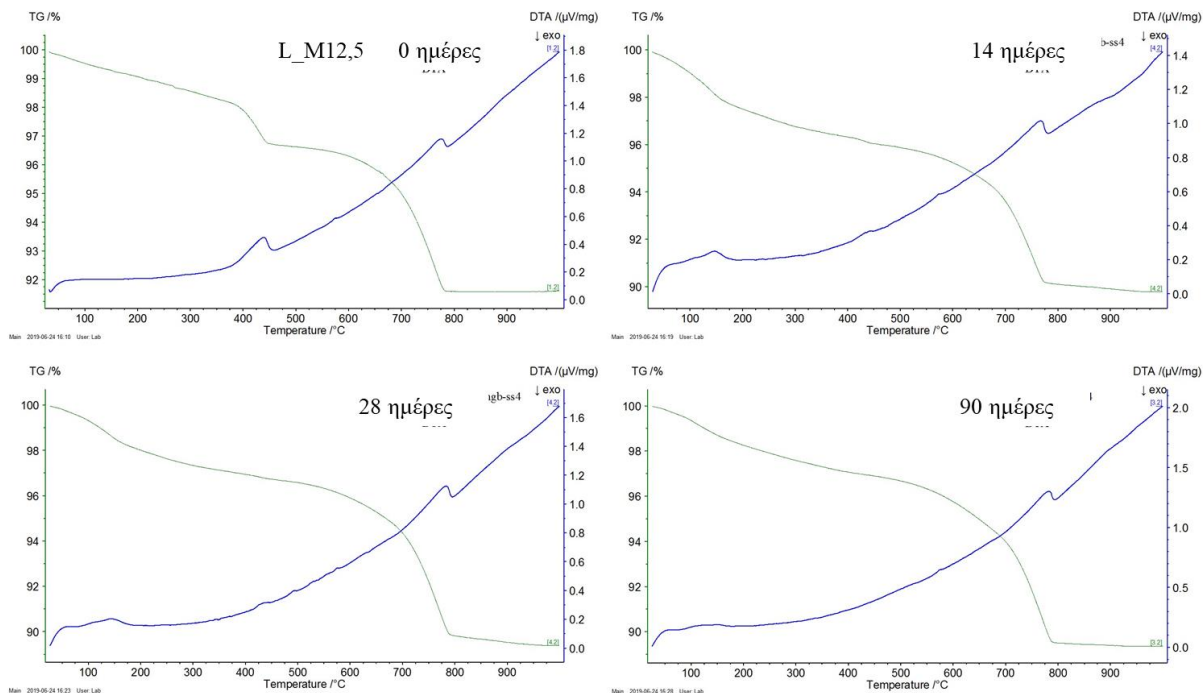
διαφορικής θερμικής ανάλυσης ανά κονίαμα αποκατάστασης και στους εξεταζόμενους χρόνους, παρατίθενται στις επόμενες εικόνες.



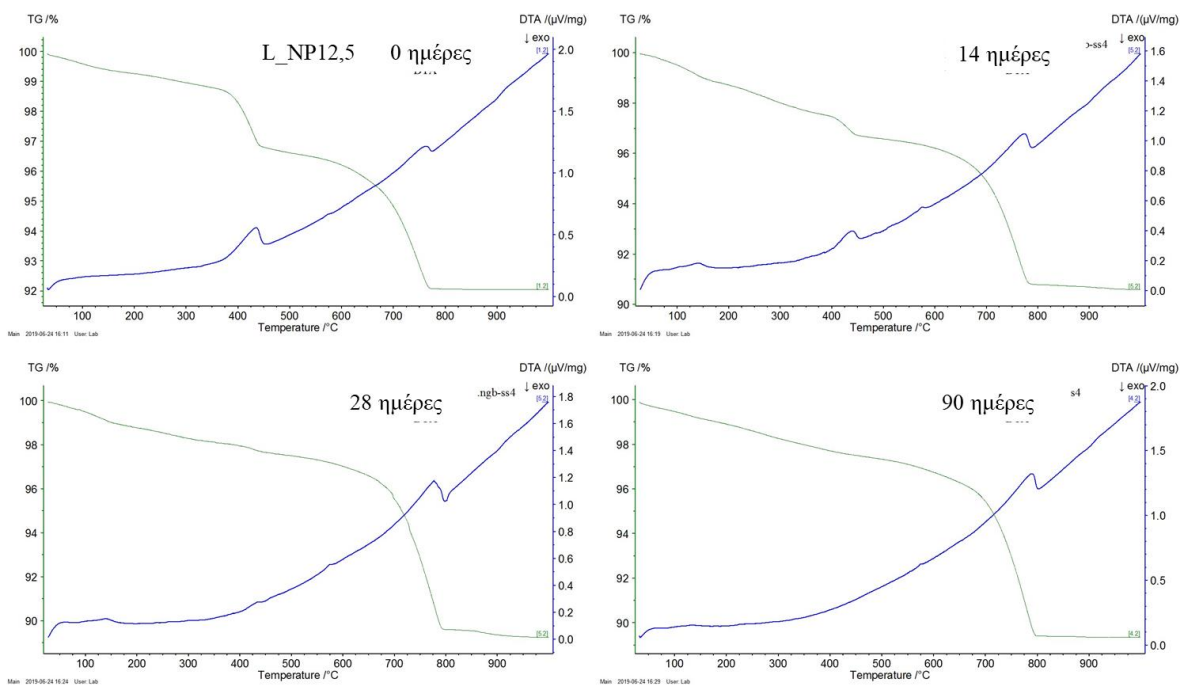
Διάγραμμα 72 Θερμογραφήματα του κονιάματος L_M8.5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



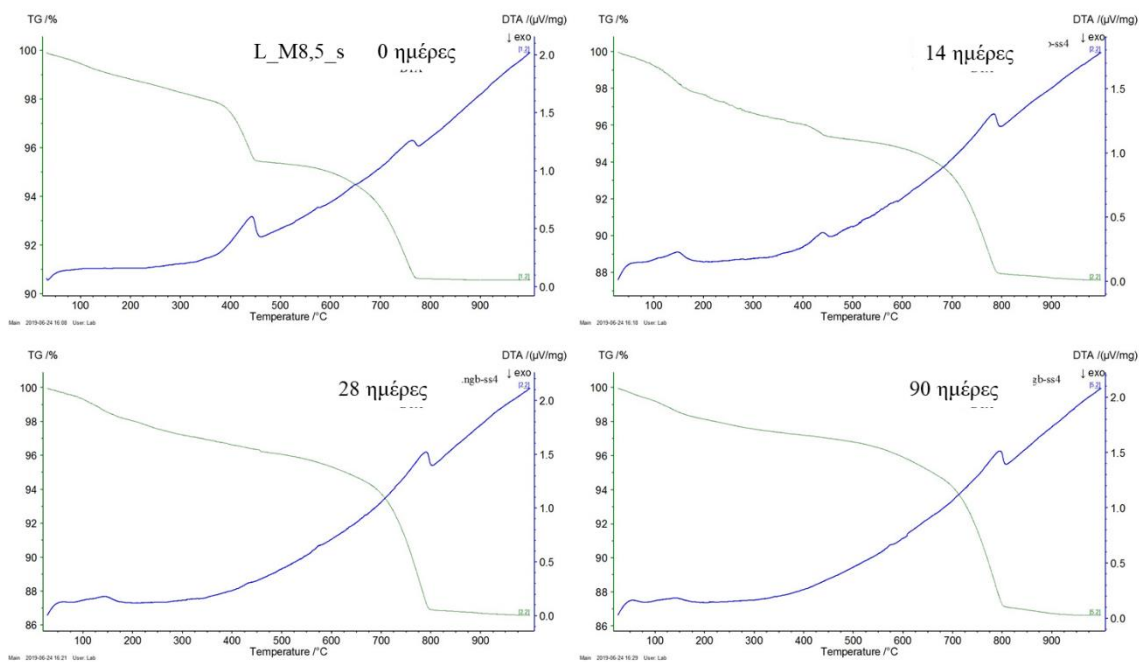
Διάγραμμα 73 Θερμογραφήματα του κονιάματος L_M10.5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



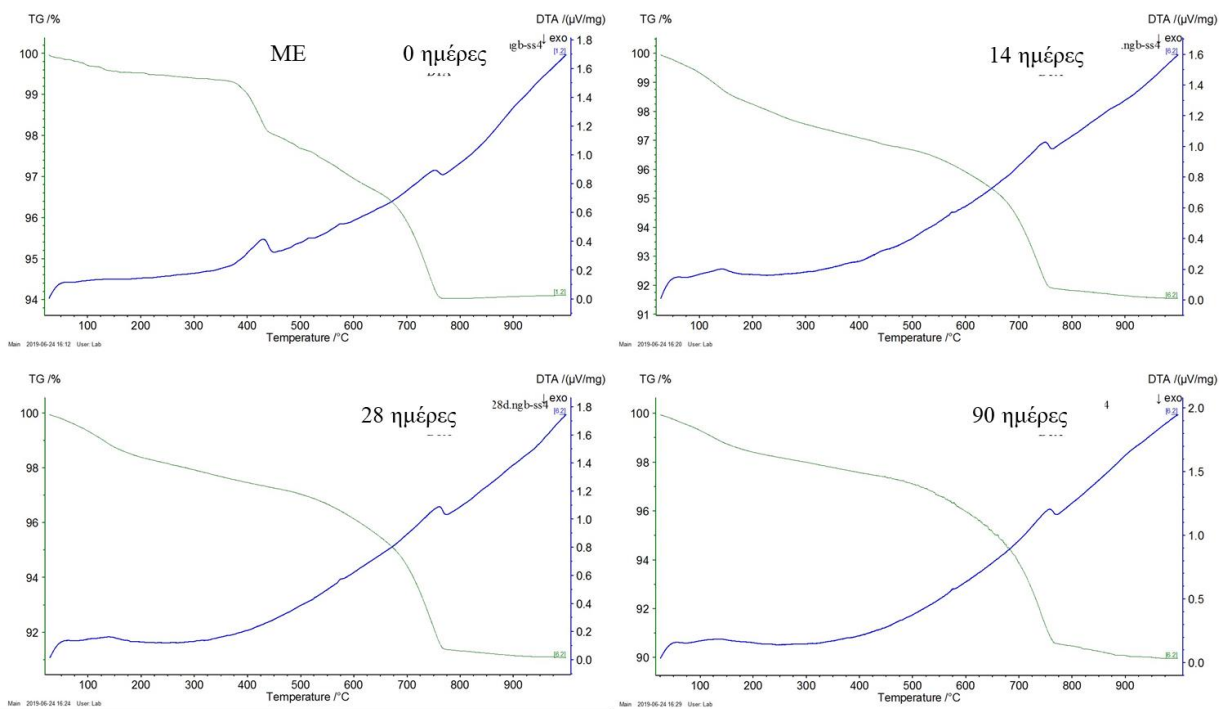
Διάγραμμα 75 Θερμογραφήματα του κονιάματος L_M12.5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



Διάγραμμα 74 Θερμογραφήματα του κονιάματος L_NP12.5 στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



Διάγραμμα 76 Θερμογραφήματα του κονιάματος L_M8.5_s στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης



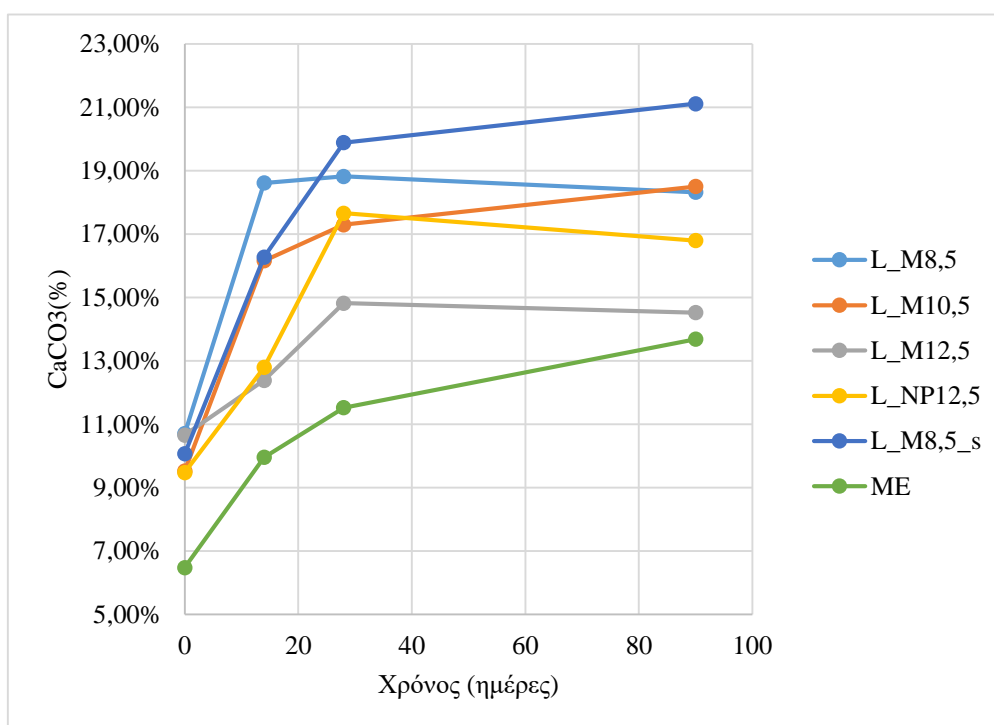
Διάγραμμα 77 Θερμογραφήματα του κονιάματος έτοιμου κονιάματος ME στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης

Μέσω τις στοιχειομετρίας των επιμέρους αντιδράσεων και των σχέσεων που προκύπτουν από αυτές, όπως αυτές εμφανίζονται στα Α) μέρος των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, υπολογίζονται τα ποσοστά του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και του CaCO_3 και ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας κατά την πήξη και σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης που κατασκευάστηκαν.

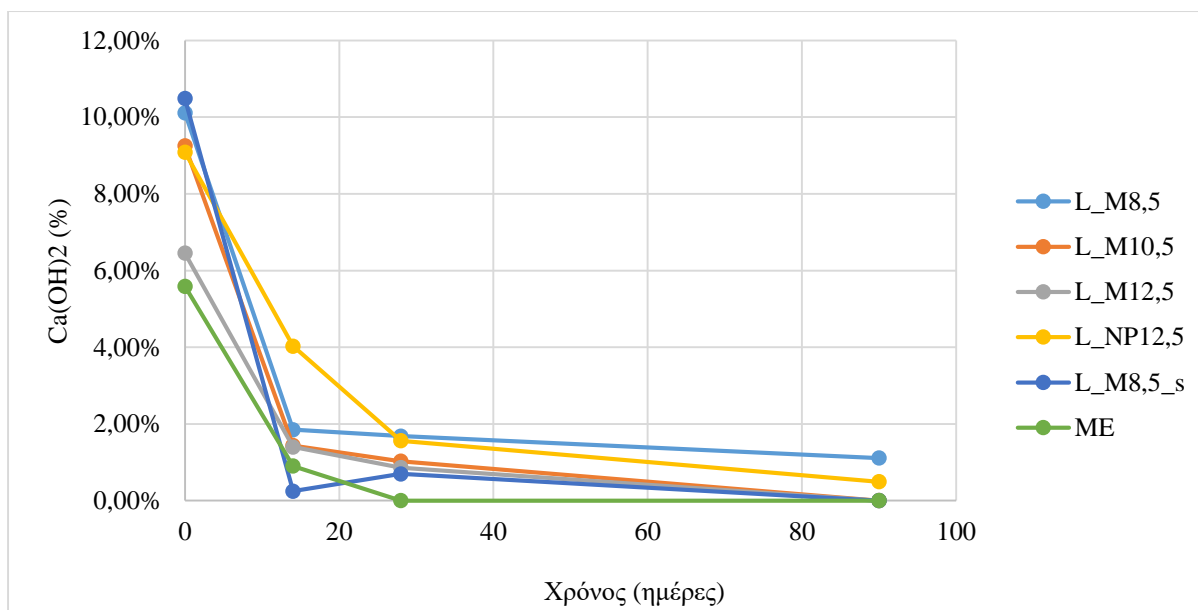
Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα ποσοστά των $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και CaCO_3 και στη συνέχεια αυτά απεικονίζονται σε διάγραμμα.

Πίνακας 54 Ποσοστά $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και CaCO_3 κατά την πήξη των κονιαμάτων αποκατάστασης

Κωδικός Δείγματος	Ποσοστό CaCO_3 (%)				Ποσοστό $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)			
	Χρόνος Πήξης (days)				Χρόνος Πήξης (days)			
	0	14	28	90	0	14	28	90
L_M8,5	10,70	18,61	18,82	18,32	10,11	1,85	1,69	1,11
L_M10,5	9,52	16,16	17,30	18,50	9,25	1,44	1,03	0,00
L_M12,5	10,66	12,39	14,82	14,52	6,45	1,40	0,86	0,00
L_NP12,5	9,48	12,80	17,66	16,80	9,09	4,03	1,56	0,49
L_M8,5_s	10,07	16,27	19,89	21,11	10,48	0,25	0,70	0,00
ME_19	6,48	9,95	11,52	13,68	5,59	0,90	0,00	0,00



Διάγραμμα 78 Εξέλιξη ποσοστού ασβεστίτη κατά την πήξη των κονιαμάτων



Διάγραμμα 79 Εξέλιξη ποσοστού πορτλαντίτη κατά την πήξη των κονιαμάτων

Από τον παραπάνω πίνακα και διαγράμματα μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι με το πέρασμα του χρόνου παρατηρείται αύξηση του ανθρακικού ασβεστίου με τη ταυτόχρονη πτώση του πορτλαντίτη (υδροξείδιο του ασβεστίου) με τη μεγαλύτερη αύξηση και πτώση αντίστοιχα να γίνεται στις πρώτες 14 ημέρες. Για κάθε σύνθεση στις ίδιες χρονικές στιγμές παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με λιγότερο ποσοστό μετακαολίνη εμφανίζουν μεγαλύτερα ποσοστά ανθρακικού ασβεστίου και πορτλαντίτη. Σε αντίθεση το έτοιμο κονίαμα εμφανίζει τα μικρότερα ποσοστά και στις δύο ενώσεις συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις για τις ίδιες χρονικές στιγμές, καθώς ευνοείται ο σχηματισμός υδραυλικών ενώσεων έναντι της ενανθράκωσης. Το κονίαμα, στο οποίο έχει προστεθεί φυσική ποζολάνη αντί του μετακαολίνη, εμφανίζει όμοια ποσοστά τόσο στο ανθρακικό ασβέστιο όσο και στο πορτλαντίτη με το αντίστοιχο κονίαμα με μετακαολίνη. Το κονίαμα στο οποίο έχει προστεθεί ο υπερρευστοποιητής εμφανίζει τα υψηλότερα ποσοστά ανθρακικού ασβεστίου και όμοια ποσοστά πορτλαντίτη με το έτοιμο κονίαμα στους 3 μήνες πήξης.

Από τις παραπάνω μετρήσεις μπορεί να υπολογιστεί και το ποσοστό κατανάλωσης του πορτλαντίτη μέσω του μαθηματικού τύπου:

$$P_{\text{καταν}}\% = \frac{P_0\% - P_{t_i}\%}{P_0\%} * 100\%$$

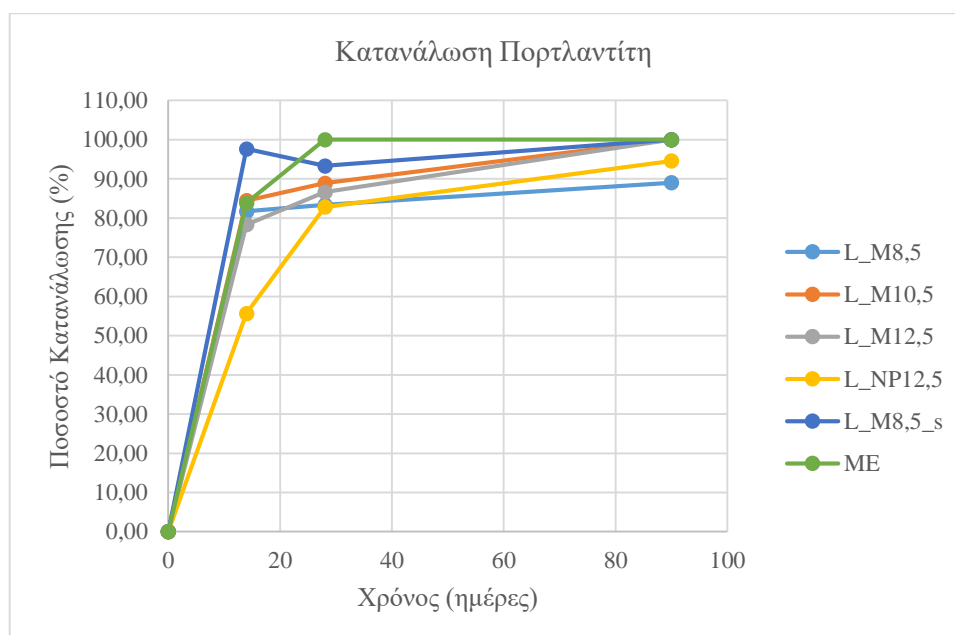
Όπου: $P_{\text{καταν}}\%$: ποσοστό κατανάλωσης του πορτλαντίτη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, $P_{t_i}\%$: ποσοστό απώλειας μάζας λόγω αποσύνθεσης πορτλαντίτη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, $P_0\%$: ποσοστό απώλειας μάζας λόγω αποσύνθεσης πορτλαντίτη τη χρονική στιγμή 0 ημέρες

Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 55 Ποσοστό κατανάλωσης πορτλαντίτη κατά την πήξη των κονιαμάτων αποκατάστασης

Χρόνος (ημέρες)	Ποσοστό Κατανάλωσης Ca(OH) ₂ (%)					
	L_M8,5	L_M10,5	L_M12,5	L_NP12,5	L_M8,5_s	ME_19
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	81,71	84,44	78,34	55,66	97,65	83,82
28	83,33	88,89	86,62	82,81	93,33	100,00
90	89,02	100,00	100,00	94,57	100,00	100,00

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να απεικονιστούν και με το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 80 Ποσοστό κατανάλωσης πορτλαντίτη κατά την πήξη των κονιαμάτων αποκατάστασης

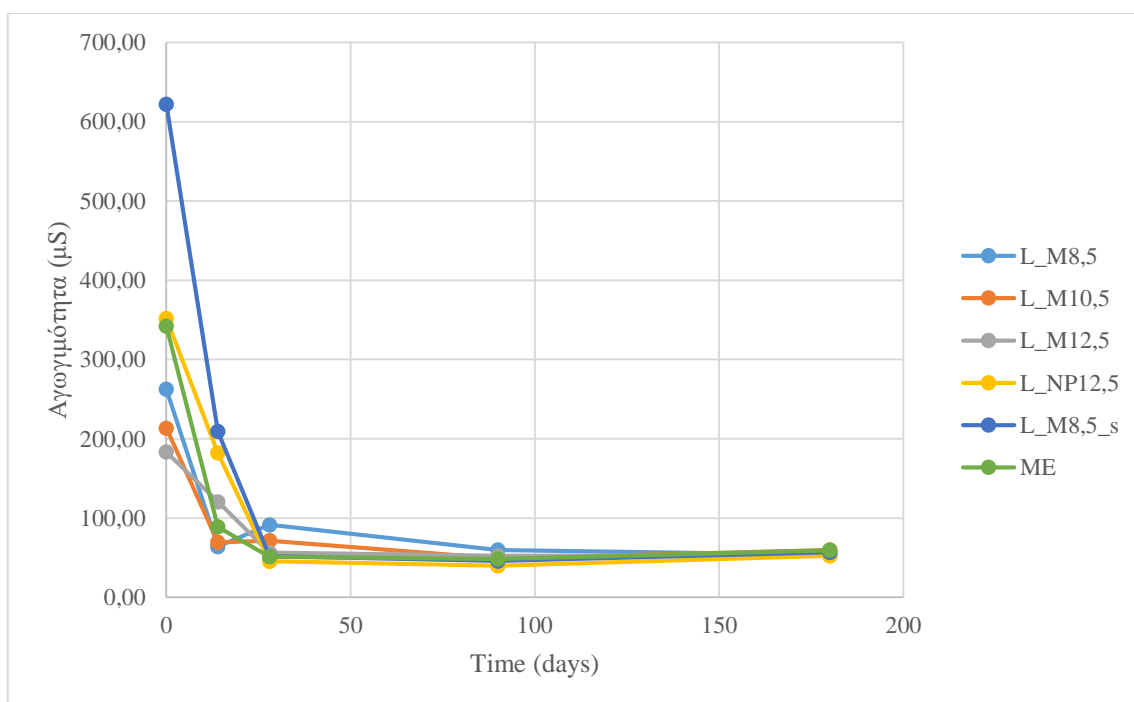
Από το παραπάνω πίνακα και διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι με το πέρασμα του χρόνου πραγματοποιείται η σκλήρυνση του κονιάματος, δηλαδή η εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων της μετατροπής του πορτλαντίτη σε ασβεστίτη. Είναι φανερό ότι όσο περνάει ο χρόνος αυξάνεται η κατανάλωση του πορτλαντίτη και μάλιστα σχεδόν σε όλες συνθέσεις φαίνεται να έχει καταναλωθεί πλήρως η ποσότητά του, σύμφωνα με τις μετρήσεις τις TG, εξαίρεση αποτελούν μόνο οι συνθέσεις L_M8,5 και L_NP12,5 όπου και αυτές παρουσιάζουν κατανάλωση μεγαλύτερη του 85%. Τις μεγαλύτερες καταναλώσεις τις εμφανίζουν το κονίαμα με τον υπερρευστοποιητή και το έτοιμο κονίαμα.

4.2.3.3 Εξέλιξη Αγωγιμότητας και pH κατά την σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης

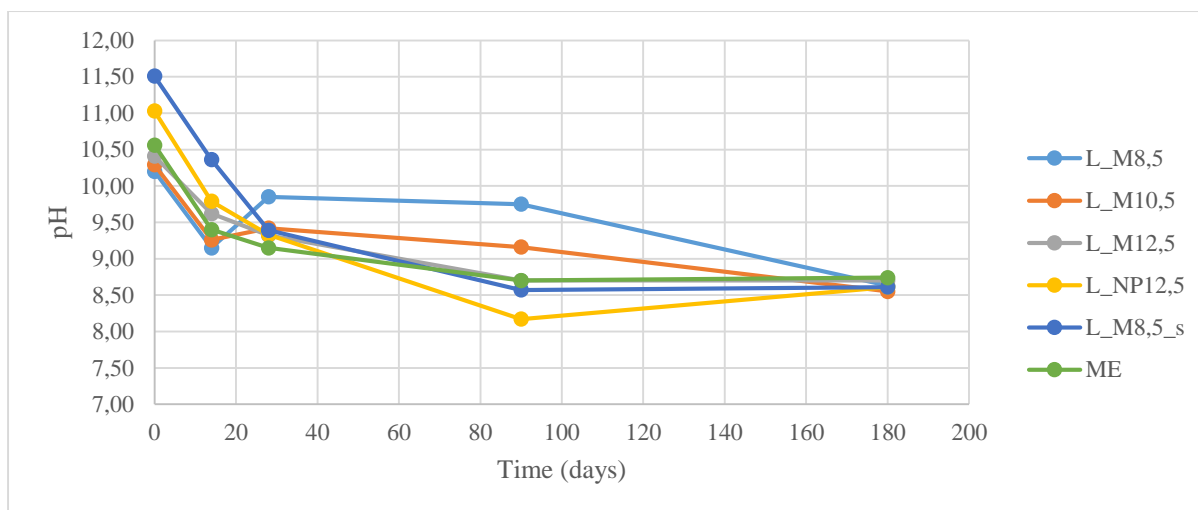
Έγινε προσδιορισμός της αγωγιμότητας και της οξύτητας των διάφορων συνθέσεων κονιαμάτων αποκατάστασης σε διάφορα χρονικά διαστήματα από τη μέρα παρασκευής τους. Για την πραγματοποίηση του πειράματος λαμβάνει χώρα ζύγιση 100 ± 5 mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο διαλύεται σε 100 ml απιονισμένου νερού. Παράλληλα, παρασκευάζεται και ένα διάλυμα blank, το οποίο περιέχει μόνο 100ml απιονισμένο νερό. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετρείται η αγωγιμότητά τους, η οποία εκφράζεται σε $\mu\text{Siemens}$ και η οξύτητά τους με πεχάμετρο. Να σημειωθεί ότι δεν επιχειρήθηκε να υπολογιστεί το ποσοστό των διαλυτών αλάτων των κονιαμάτων, καθώς αυτό δεν υφίσταται σε αυτή τη περίπτωση, γιατί τα κονιάματα δεν έχουν βρεθεί σε περιβάλλον το οποίο να εμφανίζει διαλυτά άλατα και γιατί τα κονιάματα θα εμφανίσουν ούτως ή άλλως υψηλή αγωγιμότητα, ειδικά της πρώτες ημέρες πήξης τους, λόγω του περιεχόμενου πορτλαντίτη. Αντιθέτως, χρησιμοποιείται η μέθοδος της αγωγιμομετρίας για να γίνει η παρακολούθηση της μετατροπής του πορτλαντίτη σε ασβεσίτη. Στον παρακάτω πίνακα και διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε σχέση με το χρόνο.

Πίνακας 56 Εξέλιξη αγωγιμότητα και pH κατά την σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης

Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα (μS)					pH				
	Χρόνος (days)					Χρόνος (days)				
	0	14	28	90	180	0	14	28	90	180
L_M8,5	262,60	64,10	91,50	59,80	53,60	10,20	9,15	9,85	9,75	8,63
L_M10,5	213,50	69,60	71,60	49,30	59,80	10,29	9,26	9,42	9,16	8,55
L_M12,5	183,40	120,60	56,40	52,30	53,30	10,41	9,62	9,32	8,70	8,70
L_NP12,5	352,00	182,10	45,50	39,80	52,30	11,03	9,79	9,33	8,17	8,61
L_M8,5_s	622,00	209,30	52,00	46,00	56,80	11,51	10,36	9,39	8,57	8,61
ME_19	342,00	89,00	51,40	48,51	59,50	10,56	9,40	9,15	8,70	8,74



Διάγραμμα 81 Εξέλιξη Αγωγιμότητας κατά την πήξη και σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης



Διάγραμμα 82 Εξέλιξη οξύτητας κατά την πήξη και σκλήρυνση των κονιαμάτων αποκατάστασης

Παρατηρείται ότι με το πέρασμα του χρόνου μειώνεται δραματικά η αγωγιμότητα σε όλα τα δείγματα. Τη μεγαλύτερη πτώση την εμφανίζει το κονίαμα L_M8,5_s, ενώ τη μικρότερη πτώση την εμφανίζει το κονίαμα L_M12,5. Αυτό οφείλεται στη πορεία της σκλήρυνσης των κονιαμάτων, δηλαδή τη μετατροπή του πορτλαντίτη σε ανθρακικό ασβέστιο. Πιο συγκεκριμένα, ο πορτλαντίτης έχει αρκετά αυξημένη αγωγιμότητα, έτσι με την κατανάλωσή του μειώνεται και η περιεκτικότητά του στο κονίαμα. Ως αποτέλεσμα, όταν γίνεται η μέτρηση της αγωγιμότητας του κάθε κονιάματος, εμφανίζονται και χαμηλότερες τιμές αγωγιμότητας.

Τα δείγματα με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πορτλαντίτη εμφανίζουν μεγαλύτερη αγωγιμότητα στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Η προσθήκη υπερρευστοποιητή αυξάνει τη τιμή της αγωγιμότητας.

Το ίδιο παρατηρείται και με το pH, δηλαδή με το πέρασμα του χρόνου μειώνονται δραματικά οι τιμές του pH. Τη μεγαλύτερη πτώση εμφανίζουν τα L_NP12,5 και L_M8,5_s, ενώ τη μικρότερη την εμφανίζει το L_M8,5. Αυτό πάλι μπορεί να αποδοθεί στο ότι ο πορτλαντίτης εμφανίζει μεγάλη τιμή pH και με την κατανάλωσή του παρουσιάζονται μικρότερες τιμές κατά τη σκλήρυνση των κονιαμάτων.

Τις μεγαλύτερες τιμές pH εμφανίζουν τα L_NP12,5 και L_M8,5_s και η αύξηση της περιεκτικότητας σε μετακαολίνη αυξάνει την τιμή του pH. Η προσθήκη υπερρευστοποιητή αυξάνει τη τιμή του pH. Εν τέλει όλα τα κονιάματα αποκατάστασης τείνουν προς όμοιες τιμές.

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι ο πορτλαντίτης παρουσιάζει υψηλές τιμές αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί καθώς η διαδικασία μέτρησης της αγωγιμότητας και της οξύτητας των δοκιμών ακολουθήθηκε και για τις πρώτες ύλες και παρουσιάστηκε ότι όντως τη μεγαλύτερη αγωγιμότητα την έχει η υδράσβεστος η οποία αποτελείται σχεδόν εξολοκλήρου από πορτλαντίτη, ενώ ο μετακαολίνης και η φυσική ποζολάνη εμφανίζουν πολύ μικρότερες τιμές (λιγότερο από το 0,5% της τιμής της υδρασβέστου). Κάτι όμοιο παρατηρείται και με τη μέτρηση του pH, όπου η υδράσβεστος εμφανίζει τη μέγιστη τιμή με διαφορά.

Πίνακας 57 Αγωγιμότητα και οξύτητα Α υλών

Κωδικός Α' ύλης	Α' ύλη	Αγωγιμότητα C(μS)	pH
Lime_powder	Αερική άσβεστος	3190	11,97
Metakaolin	Μετακαολίνης	4,76	9,62
Natural_Pozzolan	Φυσική ποζολάνη	15,66	7,92

Εκτός από τις μετρήσεις αγωγιμομετρίας και οξύτητας έγιναν και οι ποιοτικές μετρήσεις spot test των συνθέσεων των κονιαμάτων για την ανίχνευση χλωριόντων, θεικών και νιτρικών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

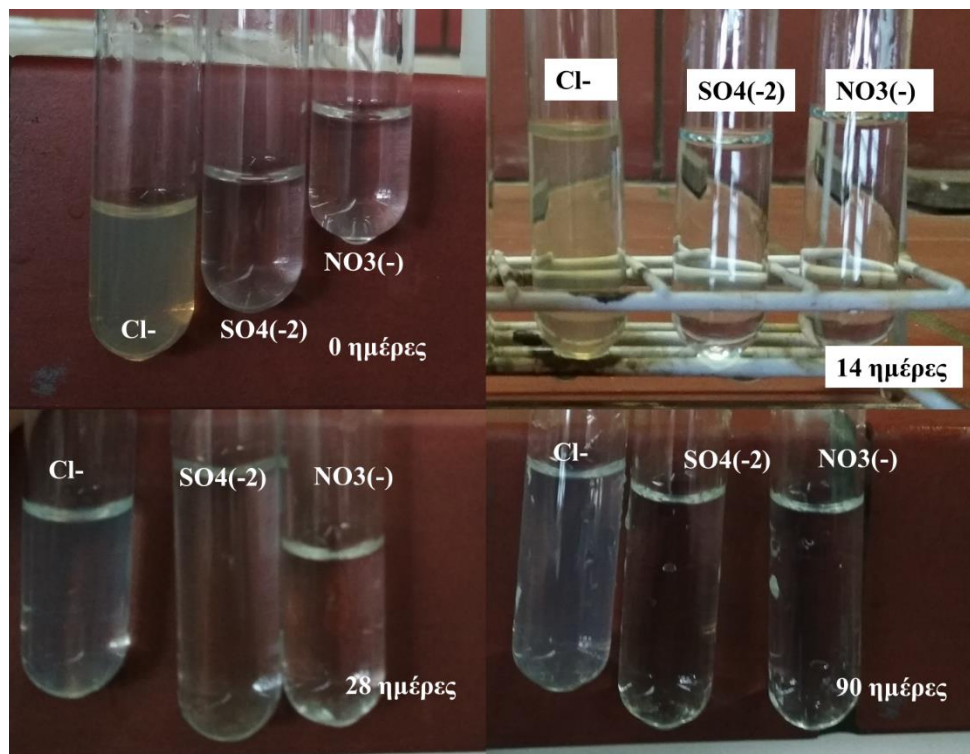
Πίνακας 58 Spot Test κονιαμάτων αποκατάστασης κατά τη πήξη τους

	Κωδικός Δείγματος	Spot Test		
		Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ⁻² ₃
0 ημέρες	L_M8,5_0d	++++ κίτρινο	-	-
	L_M10,5_0d	++++ κίτρινο	-	-
	L_M12,5_0d	++++ κίτρινο	-	-
	L_NP12,5_0d	++++ κίτρινο	-	-
	L_M8,5_s_0d	++++ κίτρινο	-	-
	ME_0d	++++ κίτρινο	-	-
14 ημέρες	L_M8,5_14d	++	-	-
	L_M10,5_14d	++	-	-
	L_M12,5_14d	+++ κίτρινο	-	-
	L_NP12,5_14d	++++ κίτρινο	-	-
	L_M8,5_s_14d	++++ κίτρινο	-	-
	ME_14d	++(+)	-	-
28 ημέρες	L_M8,5_28d	+++ κίτρινο	-	-
	L_M10,5_28d	+++ κίτρινο	-	-
	L_M12,5_28d	+++ κίτρινο	-	-
	L_NP12,5_28d	++	-	-
	L_M8,5_s_28d	+	-	-
	ME_28d	++	-	-
90 ημέρες	L_M8,5_3m	++	-	-
	L_M10,5_3m	++	-	-
	L_M12,5_3m	++	-	-
	L_NP12,5_3m	+	-	-
	L_M8,5_s_3m	+	-	-
	ME_3m	+	-	-

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι τα κονιάματα δεν περιέχουν καθόλου νιτρικά και θειικά ιόντα. Σε αντίθεση, είναι έντονη η ανίχνευση των χλωριόντων, ιδιαίτερα στους αρχικούς χρόνους πήξης των κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα, το διάλυμα των κονιαμάτων μετά τη προσθήκη του νιτρικού αργύρου εμφανίζεται μία κίτρινη απόχρωση αντί του σύνηθες αποτελέσματος (γαλακτερό διάλυμα). Κατά την πήξη των κονιαμάτων εμφανίζεται η μείωση αυτής της κίτρινης απόχρωσης.

Αυτό συμβαίνει διότι το διάλυμα των spot test που προστίθεται στο δείγμα είναι νιτρικός άργυρος (AgNO₃), ο οποίος αντιδρά με τον πορτλαντίτη του δείγματος και παράγει υδροξείδιο του αργύρου, AgOH, το οποίο είναι μη διαλυτό στο νερό και εμφανίζεται ως ένα καφέ-κίτρινο ίζημα.

Στις παρακάτω φωτογραφίες εμφανίζονται τα αποτελέσματα ενός από τα δείγματα των spot test για να παρουσιαστεί αυτή η μείωση της κίτρινης απόχρωσης.



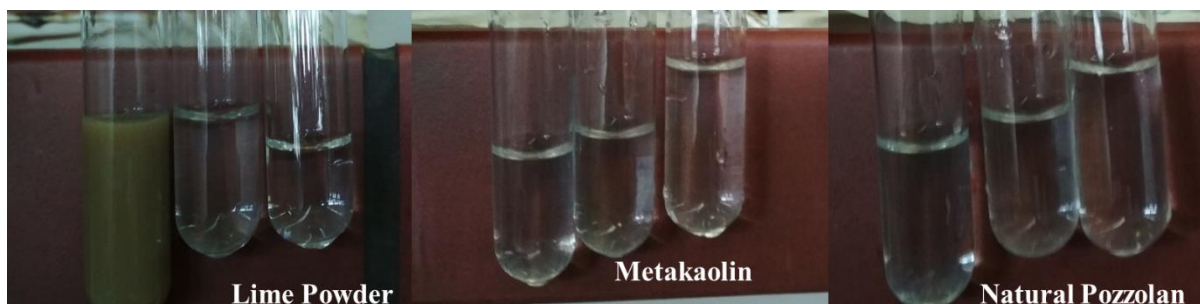
Εικόνα 97 Spot Test Κονιαμάτων αποκατάστασης

Με τον ίδιο τρόπο εξετάστηκαν και οι πρώτες ύλες της υδρασβέστου, μετακαολίνη και φυσικής ποζολάνης.

Πίνακας 59 Spot Test Α υλών

Κωδικός Α' ύλης	Spot Test		
	Cl ⁻	SO ⁻² ₄	NO ⁻² ₃
Lime_powder	καφέ ίζημα (+++++)	-	-
Metakaolin	-	-	-
Natural_Pozzolan	+	-	-

Ακόμη, παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 98 Spot Test Α υλών

Εικόνα 99 Spot Test Α' υλών

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι μπορεί να γίνει η παρακολούθηση της αντίδρασης της μετατροπής του πορτλαντίτη σε ασβεσίτη και μέσω του διαλύματος του νιτρικού αργύρου (AgNO₃) που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση χλωριόντων.

Παρακάτω εμφανίζεται η κλίμακα με την οποία χαρακτηρίζεται η περιεκτικότητα των ιόντων στα διαλύματα.

Πίνακας 60 Κλίμακα περιεκτικότητας ανίχνευσης ιόντων

Κλίμακα περιεκτικότητας	
++++++	Πολύ υψηλή
+++++	Υψηλή
++++	Μέτρια
+++	Χαμηλή
++	Πολύ χαμηλή
+	Ίχνη
-	Καθόλου

4.2.4 Μελέτη Μικροδομής

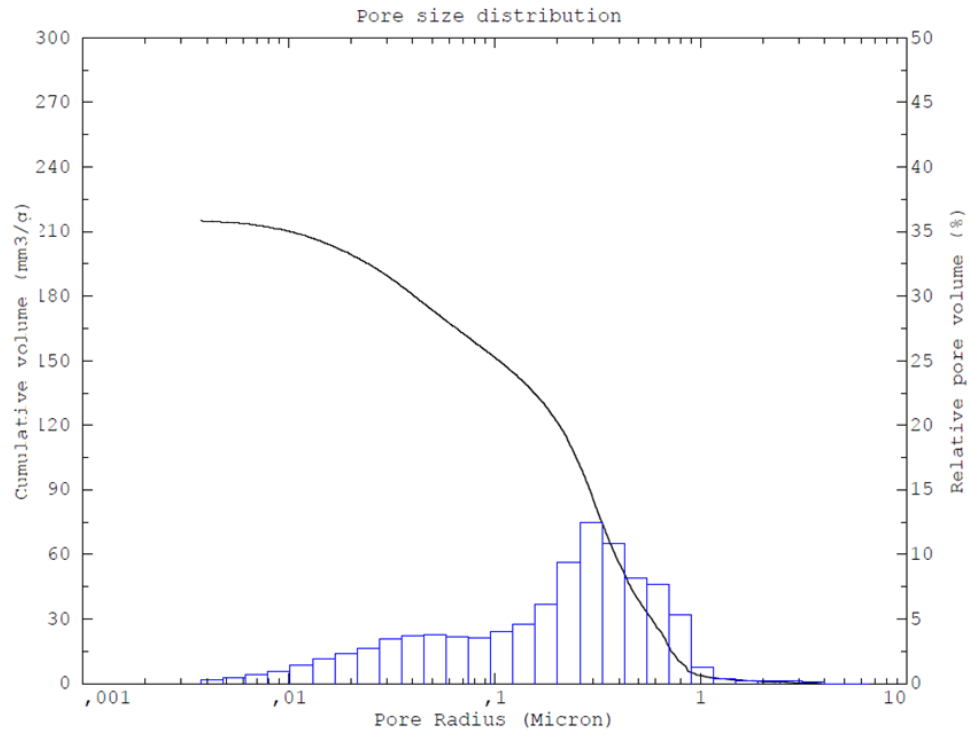
Η μικροδομή των κονιαμάτων αποκατάστασης, μελετήθηκε μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου (MIP). Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των κονιαμάτων στις 90 ημέρες, όπως μελετήθηκαν μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου, παρατίθενται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα, ενώ παρουσιάζονται και οι καμπύλες κατανομής όγκου πόρων σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων.

Πίνακας 61 Αποτελέσματα μετρήσεων MIP των συνθέσεων

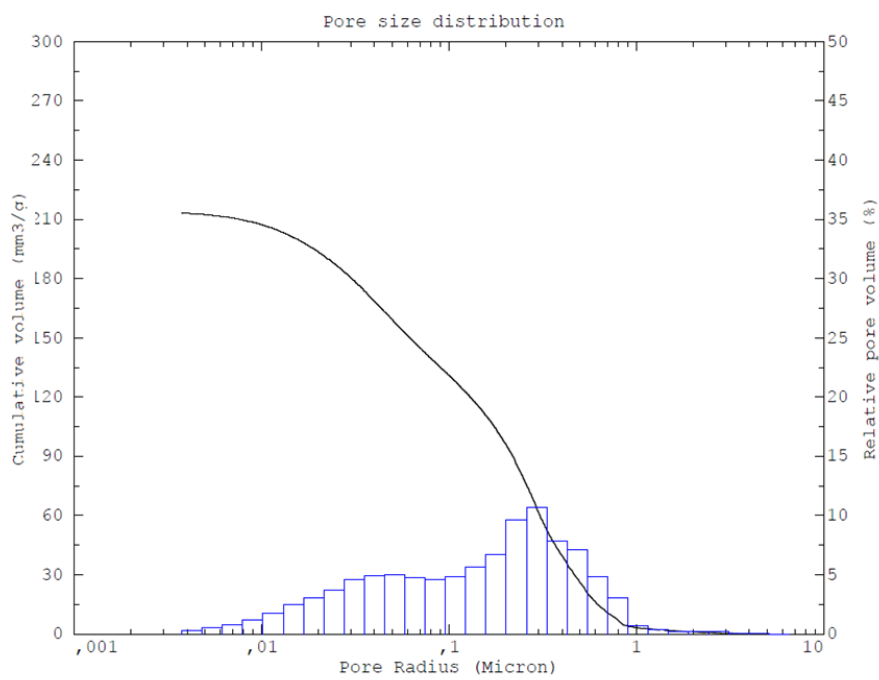
Κωδικός Δείγματος	Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Πορώδες (%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)
L_M8,5	215,11	6,32	0,29	35,44	1,65
L_M10,5	213,24	7,69	0,29	35,19	1,65
L_M12,5	218,01	9,83	0,26	35,34	1,62
L_NP12,5	193,97	3,36	0,62	33,15	1,71
L_M8,5_s	214,58	9,06	0,48	34,87	1,62
ME_19	146,45	9,73	0,04	27,18	1,86
ME_15*	119,11	8,43	0,04	23,38	1,96

*Το ME_15 μετρήθηκε στους 18 μήνες ωρίμανσης

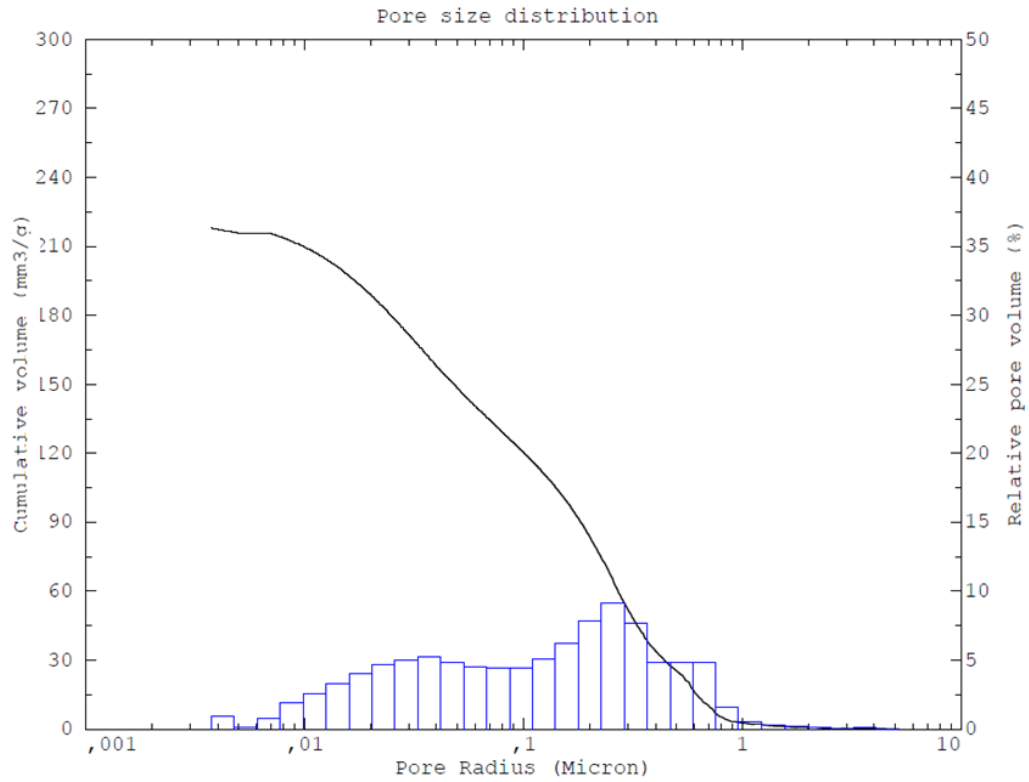
Τα κονιάματα που σχεδιάστηκαν με ασβέστη-μετακαολίνη παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές στα χαρακτηριστικά μικροδομής. Φαίνεται ότι με την αύξηση του ποσοστού μετακαολίνη προκαλείται μικρή αύξηση στην ειδική επιφάνεια του κονιάματος, ελάχιστη μείωση στη μέση ακτίνα πόρων και ελάχιστη μείωση στην φαινόμενη πυκνότητα του. Η χρήση φυσικής ποζολάνης αντί για μετακαολίνη έχει σαν αποτέλεσμα την παρασκευή ενός κονιάματος με μικρότερη τιμή ολικού ειδικού όγκου, αισθητά χαμηλότερη ειδική επιφάνεια, περισσότερο από διπλάσια μέση ακτίνα πόρων, μικρότερο πορώδες, ωστόσο όχι αισθητά μικρότερο, και μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα. Η προσθήκη του υπερρευστοποιητή στο κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη, συγκρίνοντας τις αντίστοιχες συνθέσεις L_M8,5 και L_M8,5_s, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας, την αύξηση της μέσης ακτίνας πόρων και μια ελαφριά μείωση στον ολικό ειδικό όγκο και το πορώδες. Παράλληλα, η χρήση του υπερρευστοποιητή μειώνει την φαινόμενη πυκνότητα του κονιάματος. Όσον αφορά στο έτοιμο κονίαμα, η αύξηση του προστιθέμενου νερού αναμίξεως φαίνεται να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ολικού ειδικού όγκου, όπως ήταν αναμενόμενο, τη μείωση της ειδικής επιφάνειας και την αύξηση του πορώδους, προφανώς λόγω των κενών που δημιουργούνται λόγω της εξάτμισης της επιπλέον ποσότητας νερού. Παράλληλα, η μεγαλύτερη ποσότητα νερού αναμίξεως μειώνει τη φαινόμενη πυκνότητα, όπως είναι αναμενόμενο, ωστόσο δεν φαίνεται να επηρεάζεται η μέση ακτίνα πόρων.



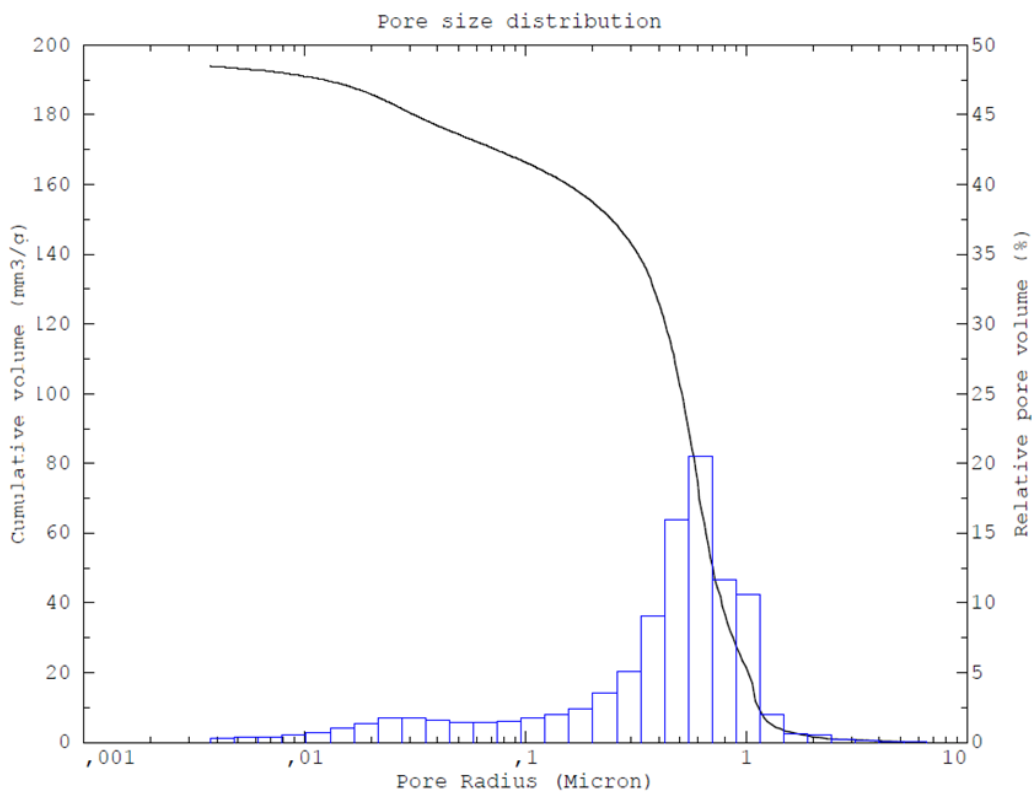
Διάγραμμα 83 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος L_M8.5 στις 90 ημέρες



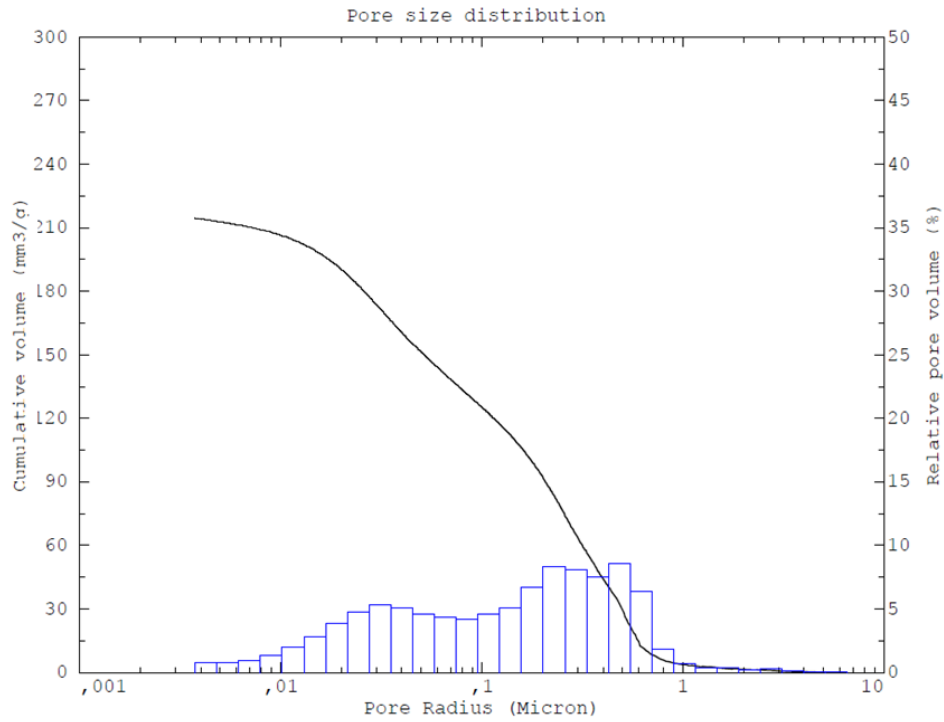
Διάγραμμα 84 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος L_M10.5 στις 90 ημέρες



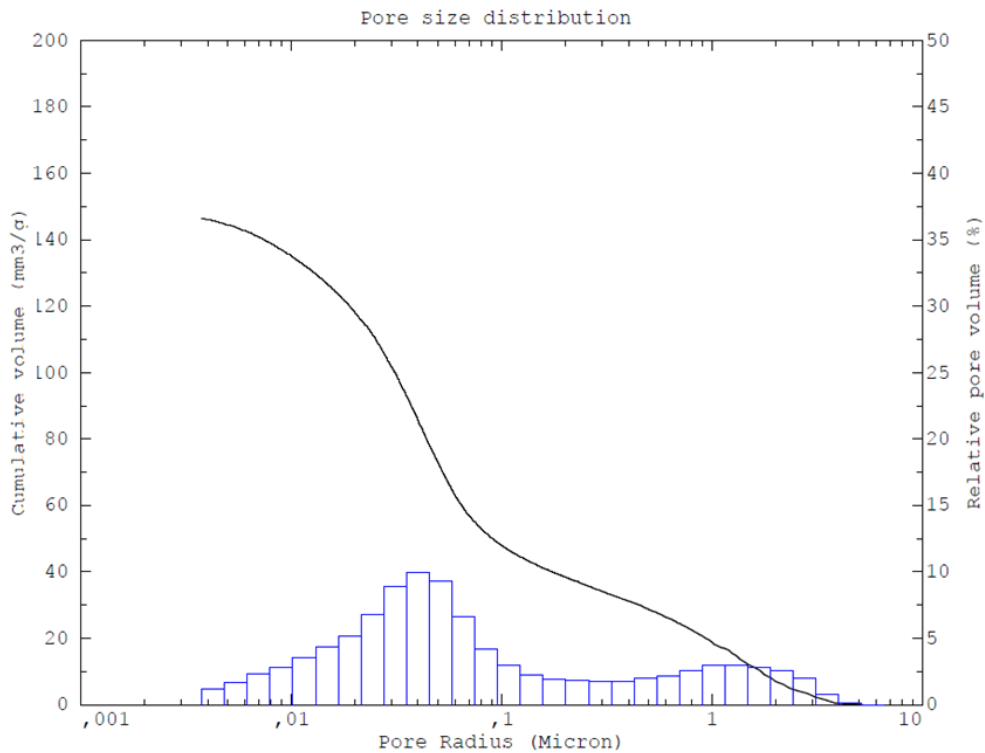
Διάγραμμα 85 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος L_M12.5 στις 90 ημέρες



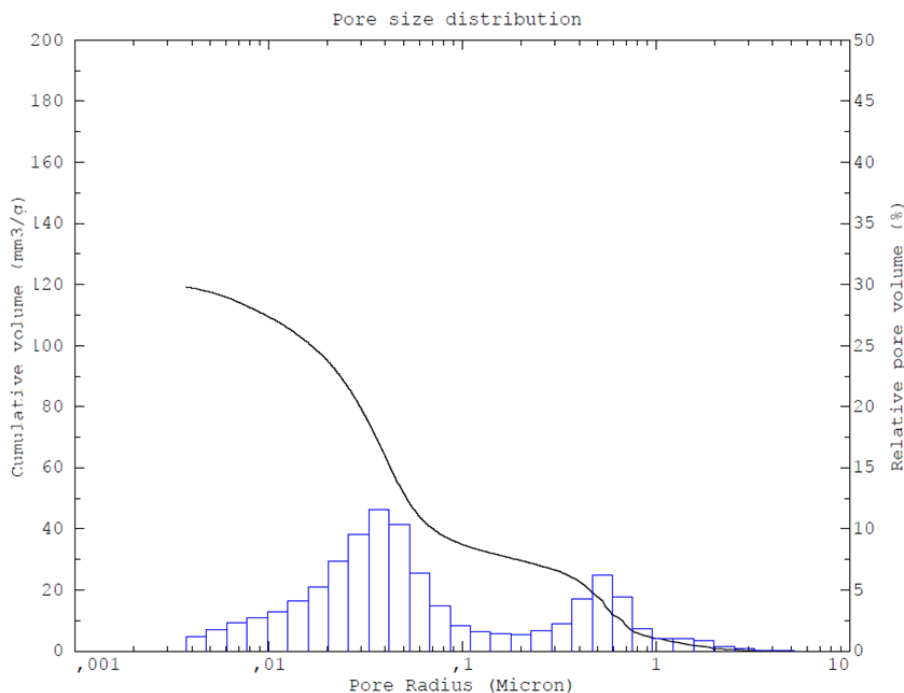
Διάγραμμα 86 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος L_NP12.5 στις 90 ημέρες



Διάγραμμα 87 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος L_M8.5_s στις 90 ημέρες



Διάγραμμα 88 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος ME_20 στις 90 ημέρες



Διάγραμμα 89 Κατανομή όγκου πόρων ως προς τη μέση ακτίνα πόρων του δείγματος ME_15 στους 18 μήνες

Συγκρίνοντας τις καμπύλες κατανομής του πορώδους σε σχέση με την ακτίνα των πόρων, είναι εμφανές ότι τα τρία κονιάματα ασβέστη-μετακαολίνη που σχεδιάστηκαν, παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή του πορώδους, με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση πόρων στα διαστήματα 0,01-0,1 μm και 0,1-1 μm , με το δεύτερο διάστημα να υπερτερεί σε όλες τις περιπτώσεις. Παρόλο που η κατανομή είναι παρόμοια, αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μειώνεται το ποσοστό του μετακαολίνη, τόσο περισσότερο υπερτερεί το ποσοστό πορώδους που αντιστοιχεί σε πόρους με ακτίνα 0,1-1 μm σε σχέση με το ποσοστό των πόρων που αντιστοιχεί σε πόρους με ακτίνα 0,01-0,1 μm . Σε χαμηλότερες ακτίνες πόρων, κάτω των 0,01 μm , καθώς και στις μεγαλύτερες, 1-10 μm , δεν υπάρχει σημαντική παρουσία πορώδους.

Το κονίαμα με χρήση φυσικής ποζολάνης αντί για μετακαολίνη (L_NP12.5), παρουσιάζει μια εντελώς διαφορετική κατανομή του πορώδους, καθώς σαφέστατα μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους (~82%) αντιστοιχεί σε πόρους μεταξύ 0,1-1 μm . Το ποσοστό του συνολικού πορώδους που αντιστοιχεί στο διάστημα μεταξύ 0,01 και 0,1 μm είναι εμφανώς χαμηλότερο (~13%), ενώ Σε χαμηλότερες ακτίνες πόρων, κάτω των 0,01 μm , καθώς και στις μεγαλύτερες, 1-10 μm , δεν υπάρχει σημαντική παρουσία πορώδους.

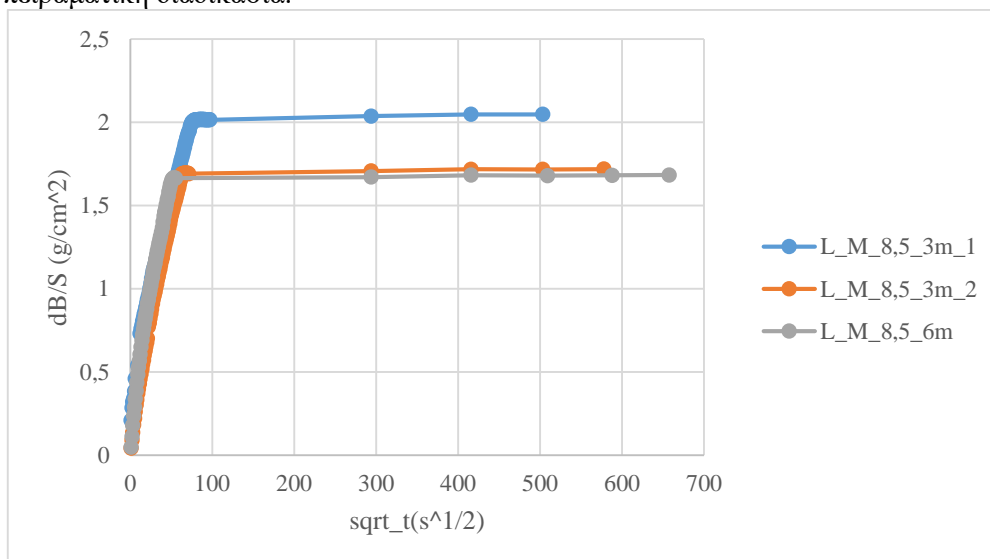
Η χρήση υπερρυστοποιητή σε σύνθεση αντίστοιχη του κονιάματος ασβέστη-μετακαολίνη με το χαμηλότερο ποσοστό μετακαολίνη, φαίνεται να επιδρά στην κατανομή του πορώδους, αφού στο κονίαμα με τον υπερρυστοποιητή παρατηρείται μια μείωση στο πορώδες που αντιστοιχεί σε ακτίνες πόρων 0,1-1 μm , ενώ αυξάνεται το ποσοστό πορώδους που αντιστοιχεί σε ακτίνες 0,01-0,1 μm (L_M8.5_s). Ωστόσο, συνεχίζει να υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους που αντιστοιχεί σε πόρους στο διάστημα 0,1-1 μm .

Όσον αφορά στο έτοιμο κονίαμα, η κατανομή διαφοροποιείται και από την κατανομή των κονιαμάτων ασβέστη-μετακαολίνη που σχεδιάστηκαν και από την κατανομή του κονιάματος με φυσική ποζολάνη, καθώς είναι σαφές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του πορώδους αντιστοιχεί σε πόρους με ακτίνα 0,01-0,1 μm . Το κονίαμα αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους σε πόρους με ακτίνες <0,01 μm σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας νερού ανάμιξης κατά την παρασκευή, επηρέασε την κατανομή του πορώδους, με την εμφάνιση ικανού ποσοστού πορώδους που αντιστοιχεί σε πόρους με ακτίνα άνω του 1 μm .

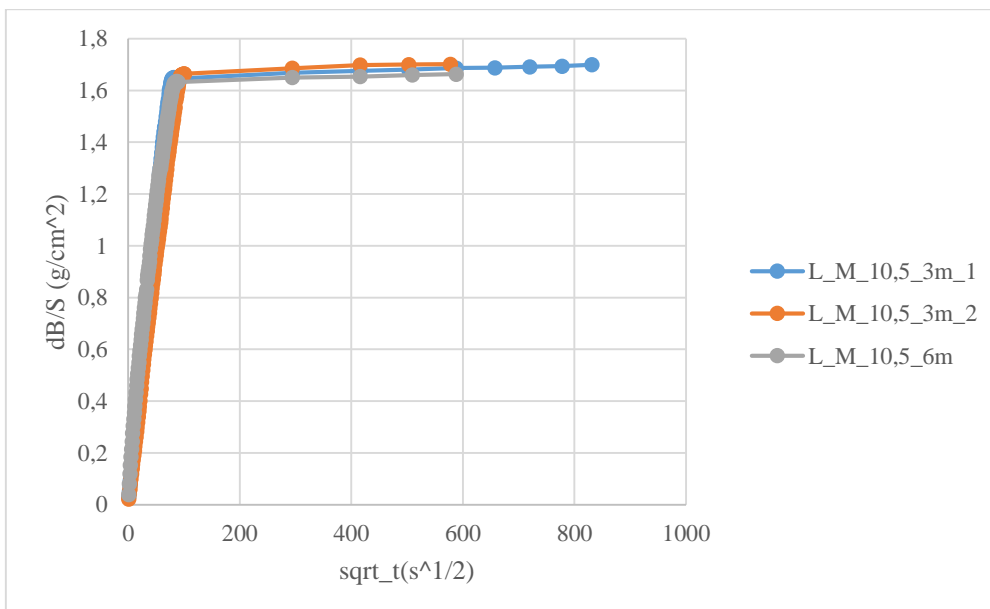
4.2.5 Μελέτη υγραμετρικής συμπεριφοράς

4.2.5.1 Τριχοειδής Αναρρίχηση

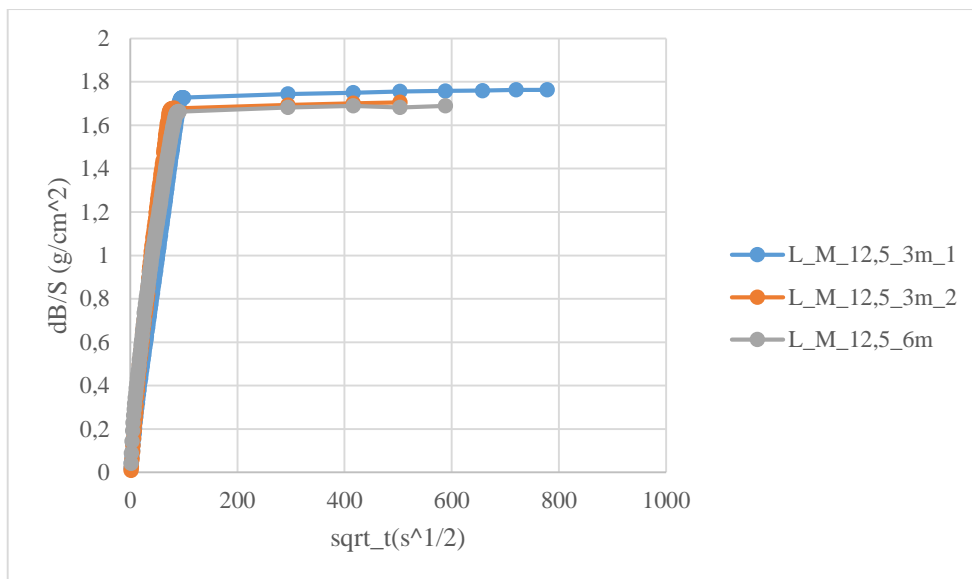
Μετά από 3 μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης για δύο κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cmX5cmX5cm για τη κάθε σύνθεση. Η μέτρηση επαναλήφθηκε για ένα ακόμη δοκίμιο μετά από 6 μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων και στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από αυτή τη πειραματική διαδικασία.



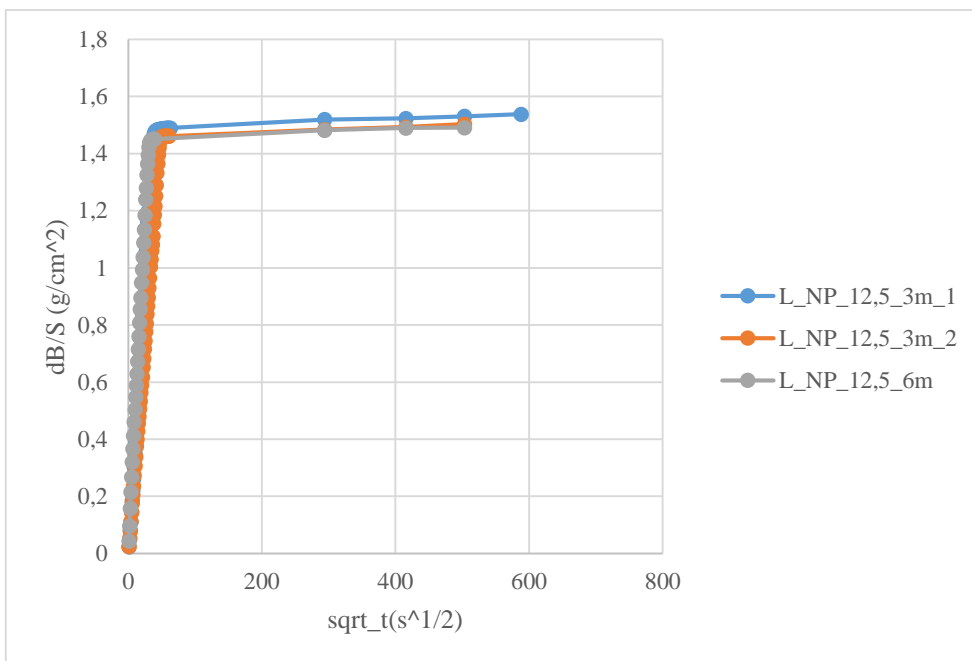
Διάγραμμα 90 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης L_M_8.5 στους 3 και 6 μήνες



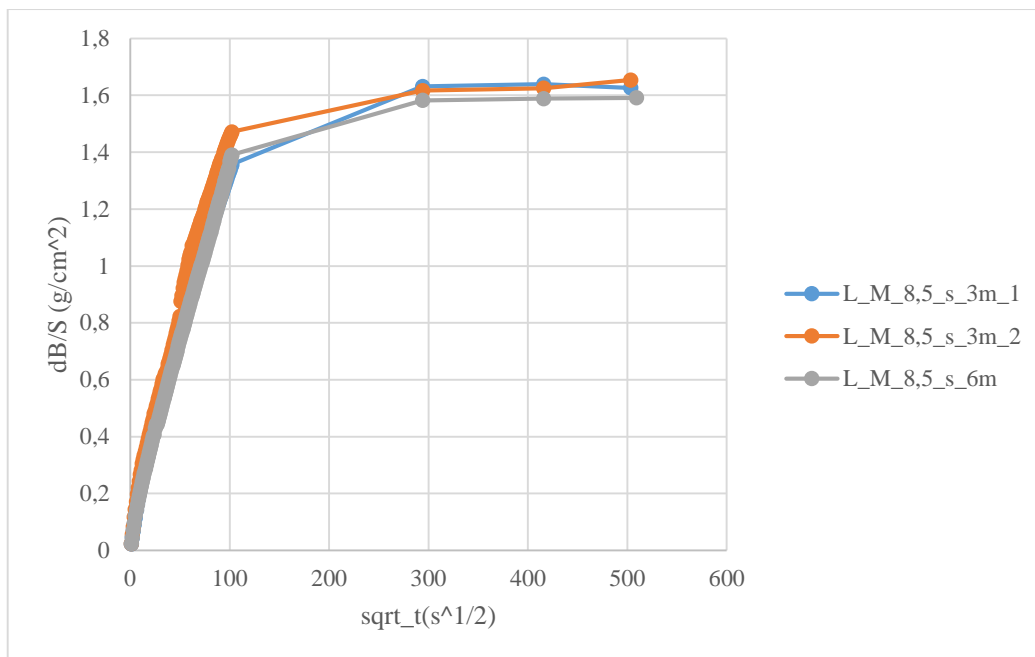
Διάγραμμα 91 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης L_M_10.5 στους 3 και 6 μήνες



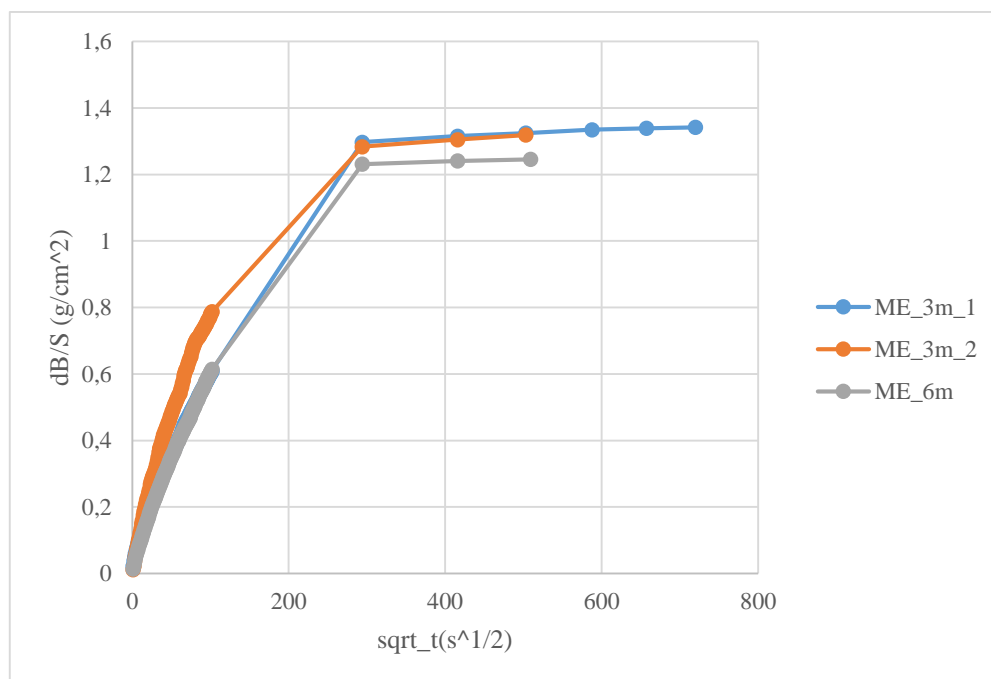
Διάγραμμα 92 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης L_M_12.5 στους 3 και 6 μήνες



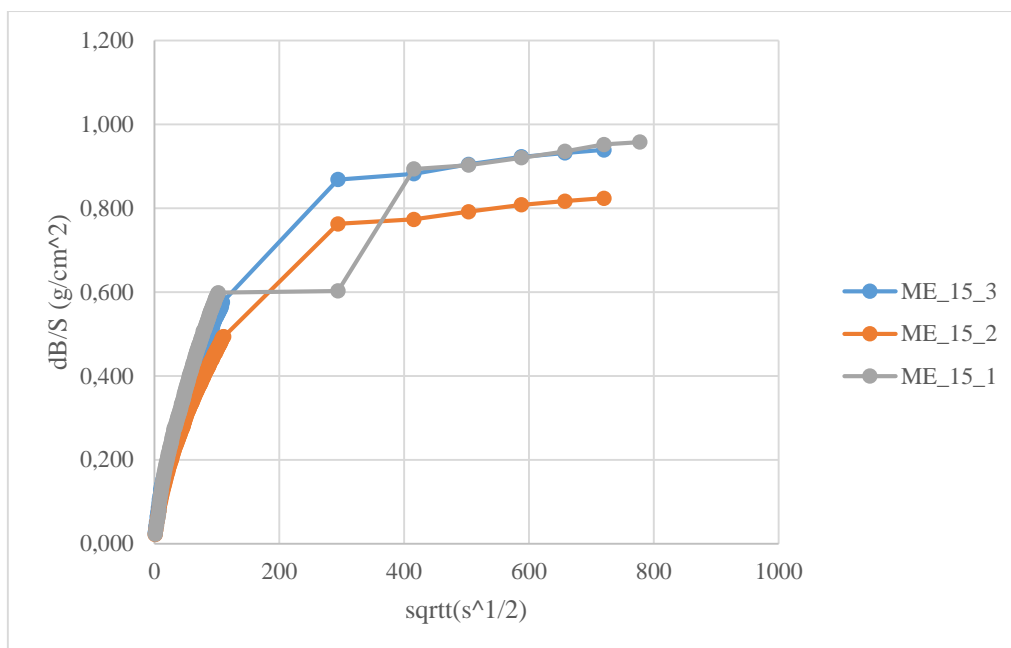
Διάγραμμα 93 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης L_NP_12.5 στους 3 και 6 μήνες



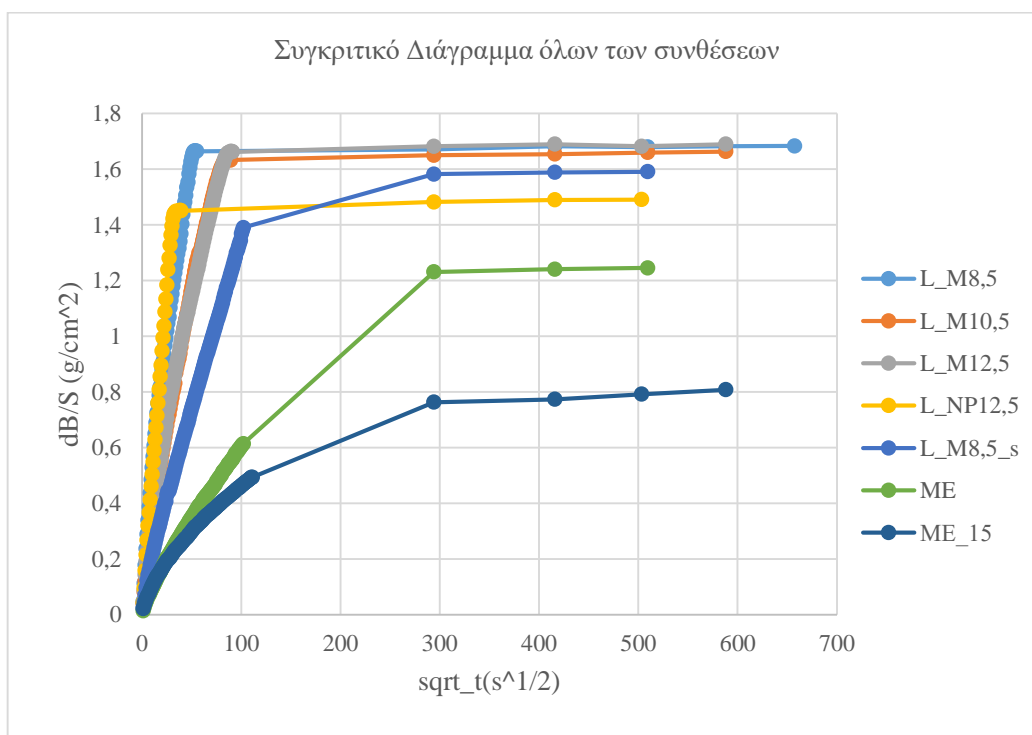
Διάγραμμα 94 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης L_M_8.5_s στους 3 και 6 μήνες



Διάγραμμα 95 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης ME στους 3 και 6 μήνες



Διάγραμμα 96 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης Σύνθεσης ME_15 στους 18 μήνες



Διάγραμμα 97 Διαγράμματα Τριχοειδούς Αναρρίχησης όλων των συνθέσεων στους 6 μήνες

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι οι επιμέρους συνθέσεις εμφανίζουν λίγες διαφορές μεταξύ των τριών και έξι μηνών, όπως επίσης εμφανίζονται και μικρές διαφορές μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} δοκιμίου. Μεταξύ τους οι συνθέσεις εμφανίζουν κάποιες διαφοροποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα που έχουν ως ποζολανικό πρόσθετο τον μετακαολίνη εμφανίζονται στις υψηλότερες τιμές του διαγράμματος. Στο διάγραμμα ακολουθεί το δείγμα το οποίο περιέχει τον

υπερρευστοποιητή. Συνεπώς, συγκριτικά με το κονίαμα που δεν περιέχει τον υπερρευστοποιητή, εμφανίζεται χαμηλότερα στο διάγραμμα. Ακριβώς από κάτω εμφανίζεται το κονίαμα που έχει ως ποζολανικό πρόσθετο τη φυσική ποζολάνη. Συγκριτικά με τα υπόλοιπα κονιάματα, παρόλο που βρίσκεται πιο κάτω στο διάγραμμα εμφανίζει μεγαλύτερη κλίση. Τέλος, με αρκετά μεγάλη διαφορά εμφανίζεται το έτοιμο κονίαμα και ιδιαίτερα η σύνθεση με τη μικρότερη προσθήκη νερού στους 18 μήνες ωρίμανσης.

Πίνακας 62 Αποτελέσματα τριχοειδούς αναρρίχησης κονιαμάτων αποκατάστασης

Κωδικός Δείγματος	Συντ. Τριχ. Αναρ. (g/cm ² /s ^(1/2))		WAC% μέσω τριχοειδών		P% μέσω τριχοειδών	
	3 μήνες	6 μήνες	3 μήνες	6 μήνες	3 μήνες	6 μήνες
L_M8,5	0,0251 ±0,0009	0,0299	24,64 ±2,95	21,02	38,00 ±3,43	33,88
L_M10,5	0,0203 ±0,00016	0,0185	21,47 ±0,06	20,94	34,45 ±0,14	33,94
L_M12,5	0,0206 ±0,0023	0,0177	21,48 ±0,17	20,85	35,12 ±0,23	34,11
L_NP12,5	0,0358 ±0,0052	0,0456	17,97 ±0,14	17,51	30,77 ±0,29	30,49
L_M8,5 s	0,0133 ±0,0007	0,0129	20,20 ±0,07	19,38	33,54 ±0,11	32,37
ME_19	0,0065 ±0,001	0,0057	14,85 ±0,06	13,87	26,48 ±0,10	25,05
*ME_15	0,0047±0,001	-	12,12±0,08	-	22,81±1,10	-

*Το ME_15 μετρήθηκε στους 18 μήνες ωρίμανσης,

Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των μεγεθών για τους 3 μήνες έχουν υπολογιστεί από τους μέσους όρους δύο κυβικών δοκιμίων, ενώ στους 6 μήνες ενός κυβικού δοκιμίου, για αυτό και δεν υπάρχει τυπική απόκλιση.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μέγιστο συντελεστή υδατοαπορρόφησης μέσω τριχοειδών πόρων το διαθέτει η σύνθεση με φυσική ποζολάνη, κάτι που παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα της τριχοειδούς αναρρίχησης. Οι επόμενες συνθέσεις είναι αυτές του μετακαολίνης και πιο συγκεκριμένα των αμέσως επόμενων συντελεστή τον εμφανίζει το κονίαμα με την αντίστοιχη ποσότητα μετακαολίνης, δηλαδή το L_NP12,5. Αμέσως μετά ακολουθούν τα κονιάματα που έχουν ως ποζολανικό πρόσθετο τον μετακαολίνη. Μεταξύ τους εμφανίζουν αρκετά όμοιες τιμές με το μεγαλύτερο από αυτά να είναι το L_M8,5 και να ακολουθούν τα L_M10,5 και L_M12,5. Οι συνθέσεις με τους μικρότερους συντελεστές είναι αυτά με το υπερρευστοποιητή και το έτοιμο κονίαμα. Συγκριτικά με τα υπόλοιπα εμφανίζουν πολύ χαμηλότερες τιμές. Σε σχέση με τους 6 μήνες δεν υπάρχουν πολλές διαφορές, τα L_M8,5 και L_NP12,5 έχουν υποστεί μία μικρή αύξηση, ενώ τα υπόλοιπα μία μικρή μείωση. Το έτοιμο κονίαμα εμφανίζει σταδιακή πτώση με το δείγμα ME_15 (με τη μικρότερη προσθήκη νερού) να εμφανίζει το μικρότερο συντελεστή, ανάμεσα σε όλα τα δείγματα. Κατά την πήξη των κονιαμάτων αλλάζει και η κατανομή των πόρων στο εσωτερικό των κονιαμάτων, για αυτό και εμφανίζονται αυτές οι διαφορές στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης.

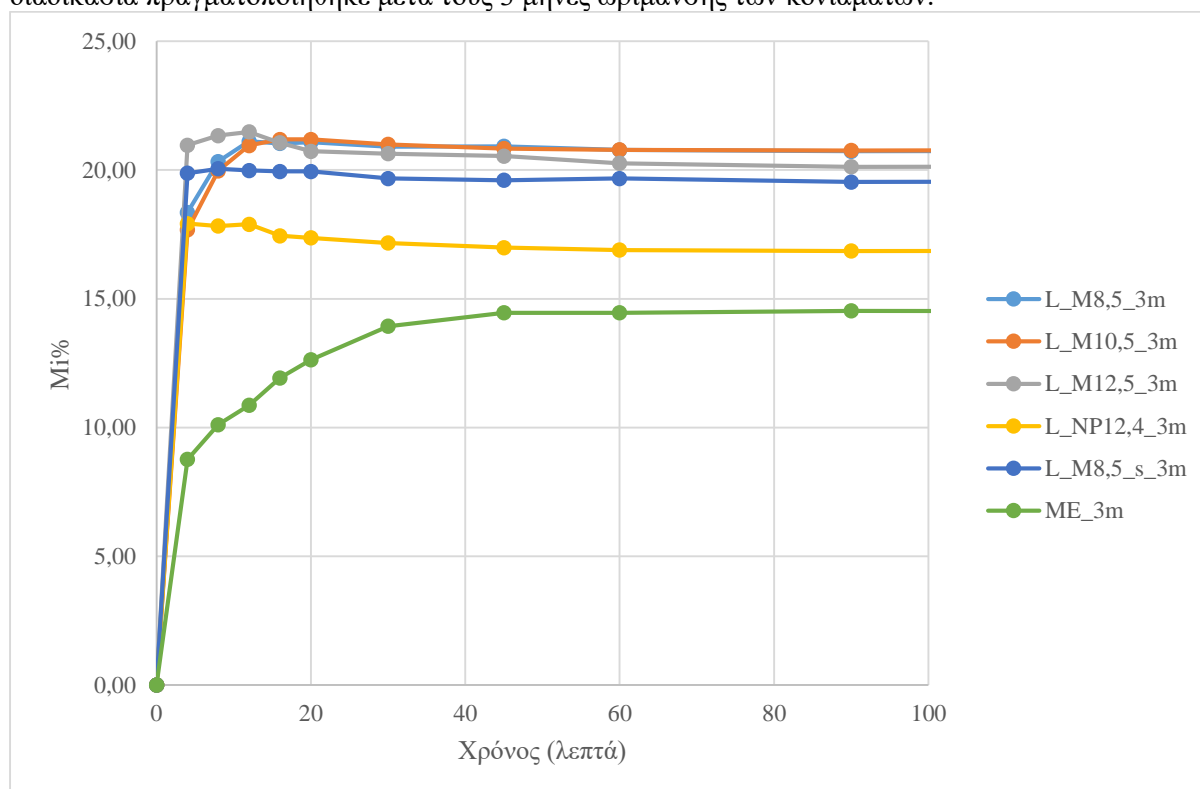
Το ποσοστό του ολικού ροφημένου νερού μέσω τριχοειδών που παρουσιάζουν τα κονιάματα εμφανίζουν όμοια συμπεριφορά με αυτή που αναλύθηκε στα διαγράμματα. Τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζονται στα κονιάματα με ποζολανικό πρόσθετο το μετακαολίνης με το L_M8,5 να έχει το μεγαλύτερο ποσοστό. Μετά με μικρή διαφορά εμφανίζεται το κονίαμα με ποζολανικό πρόσθετο τη φυσική ποζολάνη, συγκριτικά με το κονίαμα που περιέχει ίδια ποσότητα μετακαολίνης, η φυσική ποζολάνη έχει ~3% διαφορά. Το επόμενο ποσοστό το εμφανίζει το κονίαμα με τον υπερρευστοποιητή, το οποίο συγκριτικά με το ίδιο κονίαμα χωρίς υπερρευστοποιητή είναι ~4% μικρότερο. Τέλος, το μικρότερο ποσοστό το εμφανίζει το έτοιμο κονίαμα. Στους 6 μήνες όλα τα κονιάματα απλώς έχουν υποστεί μία μικρή μείωση. Μέσα στο διάστημα των 3 μηνών, συνεχίζεται η εξέλιξη των αντιδράσεων μέσα στο κονίαμα. Συνεπώς, μέρος των πόρων που υπάρχουν στους 3 μήνες πήξης έχουν συμπληρωθεί από τα προϊόντα της πήξης του κονιαμάτος στους 6 μήνες πήξης. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από τη μείωση του ποσοστού αυτού στους 18 μήνες ωρίμανσης του έτοιμου κονιαμάτος.

Μέσω της ολικής ποσότητας νερού που συγκρατήθηκε στη μάζα του κονιάματος μέσω των τριχοειδών υπολογίστηκε και το πορώδες των κονιαμάτων λόγω των τριχοειδών πόρων. Και πάλι ακολουθείται ένα όμοιο μοτίβο με αυτό του ολικά ροφημένου νερού. Ειδικότερα, τα υψηλότερα ποσοστά τα εμφανίζουν τα κονιάματα με ποζολανικό πρόσθετο το μετακαολίνη με υψηλότερο πορώδες να έχει η σύνθεση με το μικρότερο κονίαμα. Μετά ακολουθούν οι συνθέσεις με τον υπερρευστοποιητή και τη φυσική ποζολάνη, με 3% διαφορά μεταξύ τους. Τέλος, ακολουθεί το έτοιμο κονίαμα. Στους 6 μήνες όλα τα κονιάματα απλώς έχουν υποστεί μία μικρή μείωση. Η μείωση αυτή υπάρχει για τον ίδιο λόγο που υπάρχει και η μείωση στο WAC%.

Συνεπώς, μπορεί να ληφθεί το συμπέρασμα ότι τα κονιάματα που περιέχουν μετακαολίνη μπορούν να συγκρατήσουν μεγαλύτερη ποσότητα νερού, ενώ τα κονιάματα με φυσική ποζολάνη απορροφούν με γρηγορότερους ρυθμούς νερό, μέσω των τριχοειδών πόρων. Το κονίαμα με υπερρευστοποιητή και το έτοιμο κονίαμα, απορροφούν με πιο αργούς ρυθμούς το νερό και δεν έχουν υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού στη μάζα τους.

4.2.5.2 Ολική Εμβάπτιση Δοκιμίων σε Νερό

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα πρώτα 100 λεπτά των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη πειραματική διαδικασία της ολικής εμβάπτισης των δειγμάτων σε νερό. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε μετά τους 3 μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων.



Διάγραμμα 98 Καμπύλες ρόφησης νερού με ολική εμβάπτιση

Παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα ένα όμοιο μοτίβο με αυτό της τριχοειδούς αναρρίχησης. Αναλυτικότερα, τις υψηλότερες τιμές στο διάγραμμα τις παίρνουν οι συνθέσεις που ως ποζολανικό πρόσθετο έχουν το μετακαολίνη. Σε αντίθεση με τις τριχοειδείς σε αυτά τα δείγματα αυτή τη φορά συμπεριλαμβάνεται και το δείγμα με τον υπερρευστοποιητή. Αμέσως μετά ακολουθεί η σύνθεση με τη φυσική ποζολάνη και τέλος το έτοιμο κονίαμα.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος όλα τα κονιάματα έχασαν λιγότερο από το 2% της μάζας τους. Συνεπώς, δε χρειάζεται να γίνει η αλλαγή στους υπολογισμούς όπως έγινε στα ιστορικά κονιάματα. Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα μεγέθη που υπολογίζονται από μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 63 Αποτελέσματα ολικής εμφύπτισης σε νερό

Κωδικός Δείγματος	WAC%	Ανοιχτό Πορώδες (%)	ρ_{ϕ} (g/mL)
L_M8,5	22,14	32,88	1,56
L_M10,5	22,62	35,46	1,67
L_M12,5	23,08	29,60	1,43
L_NP12,4	19,69	28,76	1,65
L_M8,5_s	21,24	29,25	1,45
ME_19	15,48	27,88	1,88
*ME_15	-	-	-

*Η τελευταία σύνθεση πρόκειται για τη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος που προστέθηκε χαμηλότερη ποσότητα νερού.

Όπως και στο παραπάνω διάγραμμα έτσι και στα επιμέρους μεγέθη του ποσοστού του ολικού ροφημένου νερού και του πορώδους προσβάσιμο στο νερό, παρατηρείται ότι τις μεγαλύτερες τιμές τις έχουν τα κονιάματα που έχουν ως ποζολανικό πρόσθετο το μετακαολίνη και ακολουθεί με μικρή διαφορά το κονίαμα με φυσική ποζολάνη. Τέλος, με διαφορά περίπου 5% πιο κάτω βρίσκεται το έτοιμο κονίαμα.

Σύγκριση δεδομένων μικροδομής

Στα δύο παραπάνω κεφάλαια των αποτελεσμάτων της ποροσιμετρίας Hg και των υγρικών χαρακτηριστικών κάποια μεγέθη υπολογίστηκαν με διαφορετικές μεθόδους πάνω από μία φορά. Αυτά είναι η φαινόμενη πυκνότητα, το πορώδες και η ολική ικανότητα ρόφησης νερού (WAC%).

Η φαινόμενη πυκνότητα δίνεται άμεσα από τη μέθοδο της MIP. Κατά τη πειραματική διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δοκιμίων και η αρχική ξηρή μάζα. Μέσω των διαστάσεων υπολογίστηκε ο όγκος και με απλή διαίρεση της μάζας με τον όγκο υπολογίστηκε η φαινόμενη πυκνότητα. Κατά τη πειραματική διαδικασία της ολικής εμφύπτισης των δοκιμίων σε νερό, μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας μετρήθηκε ο όγκος των ακανόνιστων γεωμετρικά δοκιμίων μέσω της εκτόπισης νερού σε ογκομετρικό κύλινδρο, όπως αναφέρεται και στο πειραματικό μέρος. Ακόμη, προσδιορίζεται και η ξηρή μάζα του κάθε δείγματος. Συνεπώς, και πάλι με μία απλή διαίρεση γίνεται ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας. Στο παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα της φαινόμενης πυκνότητας ανά μέθοδο.

Πίνακας 64 Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας με διάφορες πειραματικές μεθόδους

Κωδικός Δείγματος	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)		
	Ποροσιμετρία	Μέσω κυβικών δοκιμίων	Ολική εμφύπτιση
L_M8,5	1,65	1,54	1,56
L_M10,5	1,65	1,60	1,67
L_M12,5	1,62	1,63	1,43
L_NP12,5	1,71	1,71	1,65
L_M8,5_s	1,62	1,66	1,45
ME_19	1,86	1,78	1,88
*ME_15	1,96	1,88	-

*Η τελευταία σύνθεση πρόκειται για τη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος που προστέθηκε χαμηλότερη ποσότητα νερού.

Από το παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι οι μέθοδοι δεν εμφανίζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Τα μεγέθη ανά μέθοδο, και ανά σύνθεση, βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι η ποροσιμετρία, μετά ακολουθεί ο υπολογισμός της πυκνότητας μέσω μέτρησης των διαστάσεων και τέλος μέσω της ολικής εμφάπτισης. Αυτό συμβαίνει διότι ο ογκομετρικός κύλινδρος έχει το μεγαλύτερο σφάλμα και τη μικρότερη ακρίβεια συγκριτικά με το παχύμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το προσδιορισμό του όγκου των δοκιμίων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μέγεθος του πορώδους. Στη περίπτωση της ποροσιμετρίας μετρείται το ολικό ανοιχτό πορώδες, στη τριχοειδή αναρρίχηση μετρείται το πορώδες των τριχοειδών πόρων και μέσω της ολικής εμφάπτισης μετρείται το ολικό ανοιχτό πορώδες που είναι προσβάσιμο στο νερό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 65 Αποτελέσματα πορώδους με διάφορες πειραματικές μεθόδους

Κωδικός Δείγματος	Πορώδες (%)		
	Ποροσιμετρία	Τριχοειδής Αναρρ.	Ολική εμφάπτιση
L_M8,5	35,44	38,00	32,88
L_M10,5	35,19	34,45	35,46
L_M12,5	35,34	35,12	29,60
L_NP12,5	33,15	30,77	28,76
L_M8,5_s	34,87	33,54	29,25
ME_19	27,18	26,48	27,88
*ME_15	23,38	22,81	-

*Η τελευταία σύνθεση πρόκειται για τη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος που προστέθηκε χαμηλότερη ποσότητα νερού.

Στα παραπάνω δείγματα δεν εμφανίζονται μεγάλες διαφορές μεταξύ των μεθόδων. Θεωρητικά αναμένεται το μέγιστο πορώδες να το εμφανίζει η ποροσιμετρία, μετά η ολική εμφάπτιση και τέλος η τριχοειδής αναρρίχηση, καθώς κάποιοι από τους ολικούς πόρους είναι προσβάσιμοι στο νερό, και κατά την εμφάπτιση πρέπει παράλληλα να δρουν και τα φαινόμενα της τριχοειδούς αναρρίχησης και της ρόφησης του νερού από όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό παρατηρείται μόνο στη σύνθεση L_M12,5, αλλά οι διαφορές σε όλα τα δείγματα είναι κάτω του 3% συνεπώς μπορεί να οφείλονται και στα σφάλματα των μεθόδων. Άρα ως συμπέρασμα, μπορεί να αναφερθεί ότι σχεδόν όλο το πορώδες των δειγμάτων φαίνεται να συμβάλει στην απορρόφηση νερού μέσω τριχοειδής αναρρίχησης ή απλής απορρόφησης από όλες τις κατευθύνσεις.

Έπειτα, παρουσιάζεται η ολική ικανότητα ρόφησης νερού. Αυτή υπολογίστηκε με της μεθόδους της τριχοειδούς αναρρίχησης και της ολικής εμφάπτισης. Προφανώς μέσω της τριχοειδής αναρρίχησης προσδιορίζεται το ποσοστό του νερού που μπορεί να ροφηθεί με τους τριχοειδείς πόρους ενώ στην εμφάπτιση με όλους τους πόρους που είναι προσβάσιμοι στο νερό. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 66 Αποτελέσματα WAC% με διάφορες πειραματικές μεθόδους

Κωδικός Δείγματος	WAC%	
	Τριχοειδής Αναρρ.	Ολική εμφάνιση
L_M8,5	24,64	22,14
L_M10,5	21,47	22,62
L_M12,5	21,48	23,08
L_NP12,5	17,97	19,69
L_M8,5_s	20,20	21,24
ME_19	14,85	15,48
*ME_15	12,12	-

**Η τελευταία σύνθεση πρόκειται για τη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος που προστέθηκε χαμηλότερη ποσότητα νερού.*

Και πάλι, αναμένεται τα ποσοστά μέσω της ολικής εμφάνισης να είναι υψηλότερα των ποσοστών μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης. Αυτό παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός αυτής του L_M8,5, η οποία μπορεί να δικαιολογηθεί και λόγω σφάλματος της μεθόδου. Τα υπόλοιπα δείγματα, παρόλο που το ποσοστό απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων είναι μικρότερο οι διαφορές δεν ξεπερνούν το 3%. Συνεπώς, συνάγεται και πάλι το συμπέρασμα ότι σχεδόν όλοι οι πόροι που είναι προσβάσιμοι στο νερό συμβάλουν και στα φαινόμενα της τριχοειδούς αναρρίχησης.

4.2.6 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων

4.2.6.1 Μετρήσεις Υπερηχοσκόπησης

Τα κυβικά δείγματα των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν μελετήθηκαν και όσον αφορά τη ταχύτητα των υπερήχων. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μετά από 3 μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων. Οι μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο λήφθηκαν ως εξής. Πρώτα προσδιορίστηκε η ταχύτητα υπερήχων στο επίπεδο συμπίκνωσης του κονιαματος και μετά των άλλων δύο επιπέδων με την άμεση μέθοδο, δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης των υπερήχων βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση. Από τα δύο άλλα επίπεδα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα. Μέσω της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων υπολογίστηκε και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 67 Ταχύτητα Υπερήχων κονιαμάτων αποκατάστασης στις 90 ημέρες

Κωδικός Δείγματος	υ (m/s)		Ed (GPa)
	Επίπεδο Συμπύκνωσης	Άλλες Διευθύνσεις	
L_M8,5	1691,17±25,50	1835,49±188,48	4,32
L_M10,5	1897,20±224,59	2016,77±128,97	5,42
L_M12,5	1668,77±1,40	1759,13±41,52	4,40
L_NP12,5	1667,94±4,97	1759,99±39,23	4,41
L_M8,5_s	2073,91±9,85	2246,25±67,76	6,98
ME_19	1978,56±117,98	2417,12±72,60	8,67
ME_15	-	-	-

Για όλα τα δείγματα ισχύει ότι η ταχύτητα υπερήχων στο επίπεδο συμπίκνωσης είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή στα υπόλοιπα επίπεδα με τη μεγαλύτερη διαφορά να την εμφανίζει η σύνθεση του έτοιμου κονιαματος.

Γενικά παρατηρείται ότι την υψηλότερη ταχύτητα τη παρουσιάζει η έτοιμη σύνθεση κονιαματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η σύνθεση με τον υπερρευστοποιητή, η οποία εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με το αντίστοιχο δείγμα χωρίς υπερρευστοποιητή. Έπειτα ακολουθεί η σύνθεση με την ενδιάμεση περιεκτικότητα σε μετακαολίνη. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποιο μοτίβο της ταχύτητας σε σχέση με τη περιεκτικότητα των κονιαμάτων σε μετακαολίνη. Ακολουθεί μετά η σύνθεση με το μέγιστο ποσοστό σε μετακαολίνη και η αντίστοιχη σύνθεση με φυσική ποζολάνη. Η αντικατάσταση του μετακαολίνη με τη φυσική ποζολάνη δε φαίνεται να προκαλέσει κάποια αλλαγή όσον αφορά τη ταχύτητα των υπερήχων. Τέλος, τη χαμηλότερη τιμή της ταχύτητας υπερήχων τη παρουσιάζει το κονίαμα με τη μικρότερη περιεκτικότητα σε μετακαολίνη.

Από τα αποτελέσματα του υπολογισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ των τιμών του μέτρου ελαστικότητας και της περιεκτικότητας του μετακαολίνη, καθώς η σύνθεση με τη μεσαία περιεκτικότητα σε μετακαολίνη εμφανίζει και την υψηλότερη τιμή του Ed. Με την αντικατάσταση του μετακαολίνη με φυσική ποζολάνη, παρατηρείται μικρή πτώση του Ed, ενώ η προσθήκη υπερρευστοποιητή οδηγεί σε αύξησή του. Τέλος, το κονίαμα έτοιμο κονίαμα αποκατάστασης εμφανίζει το μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

4.2.6.2 Μετρήσεις μηχανικών αντοχών

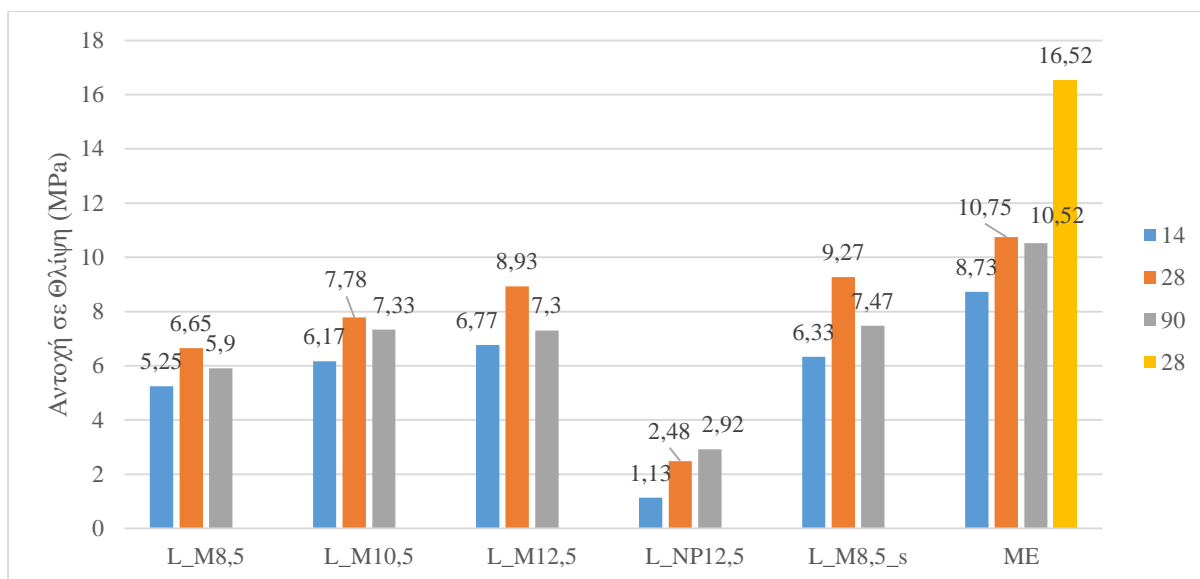
Τα κονιαματα που παρασκευάστηκαν μελετήθηκαν σε κάμψη και σε θλίψη στο εργαστήριο κονιαμάτων του TITAN στο Καμάρι, όπου και παρασκευάστηκαν το δοκίμια. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015. Οι μετρήσεις έγιναν σε διάφορους χρόνους ωρίμανσης, ώστε να μελετηθεί η εξέλιξη των μηχανικών αντοχών στον χρόνο, όπως εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 68 Εξέλιξη μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων αποκατάστασης

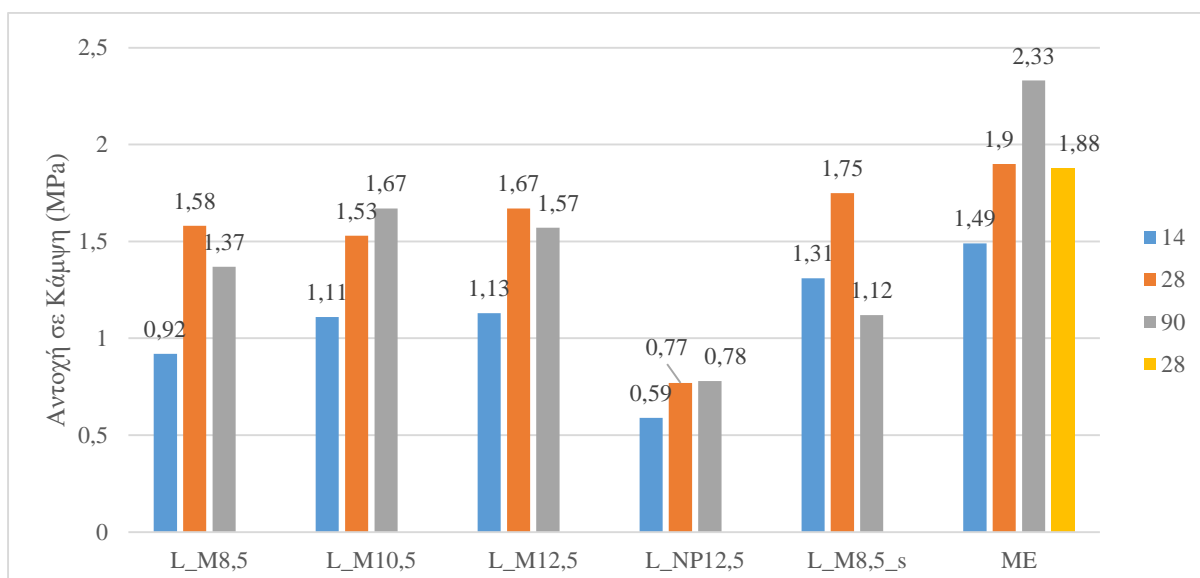
Σύνθεση Κονιάματος	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
L_M8,5	14	0,92 ±0,08	5,25 ±0,47
	28	1,58 ±0,07	6,65 ±0,45
	90	1,37 ±0,21	5,9 ±0,14
L_M10.5	14	1,11 ±0,07	6,17 ±0,46
	28	1,53 ±0,11	7,78 ±0,31
	90	1,67 ±0,28	7,33 ±0,39
L_M12.5	14	1,13 ±0,05	6,77 ±0,12
	28	1,67 ±0,07	8,93 ±0,16
	90	1,57 ±0,29	7,3 ±0,28
L_NP_12.5	14	0,59 ±0,03	1,13 ±0,05
	28	0,77 ±0,12	2,48 ±0,23
	90	0,78 ±0,06	2,92 ±0,26
L_M8,5_s	14	1,31 ±0,48	6,33 ±0,73
	28	1,75 ±0,16	9,27 ±0,53
	90	1,12 ±0,66	7,47 ±0,39
ME_20	14	1,49 ±0,08	8,73 ±0,33
	28	1,9 ±0,16	10,75 ±0,14
	90	2,33 ±0,31	10,52 ±0,45
ME_15*	28	1,88 ±0,14	16,52 ±0,58

*Η τελευταία σύνθεση πρόκειται για τη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος που προστέθηκε χαμηλότερη ποσότητα νερού.

Σχεδόν όλα τα κονιάματα αποκατάστασης εμφανίζουν αντοχή σε κάμψη άνω του 1 MPa ήδη από τις πρώτες 14 ημέρες, με εξαίρεση το κονίαμα, όπου ο μετακαολίνης έχει αντικατασταθεί με φυσική ποζολάνη, όπου η τιμή αυτή δεν έχει επιτευχθεί ούτε στους τρεις μήνες ωρίμανσης και τη σύνθεση με τη μικρότερη περιεκτικότητα σε μετακαολίνη, υποδεικνύοντας πρώιμη ανάπτυξη αντοχών στην περίπτωση των κονιαμάτων ασβέστη-μετακαολίνη και την υπεροχή τους από αυτήν την άποψη έναντι των κονιαμάτων με φυσική ποζολάνη ως ποζολανικό πρόσθετο. Συγκεκριμένα, το κονίαμα με φυσική ποζολάνη L_NP12.5 παρουσιάζει περίπου τη μισή τιμή αντοχής σε κάμψη σε σχέση με τα κονιάματα ασβέστη-μετακαολίνη. Το έτοιμο κονίαμα ME_20 παρουσιάζει στις 14 ημέρες την υψηλότερη αντοχή σε κάμψη ανάμεσα στα εξεταζόμενα κονιάματα (1,49MPa). Η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται από τις 14 στις 28 ημέρες σε όλα τις εξεταζόμενες συνθέσεις κονιαμάτων. Από τις 28 στις 90 ημέρες παρατηρείται μικρή μείωση στην αντοχή σε κάμψη στα κονιάματα με 8.5% μετακαολίνη και στο κονίαμα με 12.5% μετακαολίνη, ενώ στην σύνθεση με 10.5% μετακαολίνη παρατηρείται μια μικρή αύξηση. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί, ότι το κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη με προσθήκη υπερρυστοποιητή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση στο διάστημα 28 με 90 ημέρες. Η αντοχή σε κάμψη του κονιάματος με τη φυσική ποζολάνη, L_NP12.5, καθώς και του κονιάματος ME_20 παρουσιάζουν ανοδική τάση σε όλους τους χρόνους. Στις 90 ημέρες τη μεγαλύτερη τιμή αντοχής σε κάμψη παρουσιάζει με σημαντική διαφορά το έτοιμο κονίαμα ME_20. Στα παρακάτω ιστογράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών αντοχών, όπου είναι εμφανής όλες οι αυξήσεις και οι μειώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

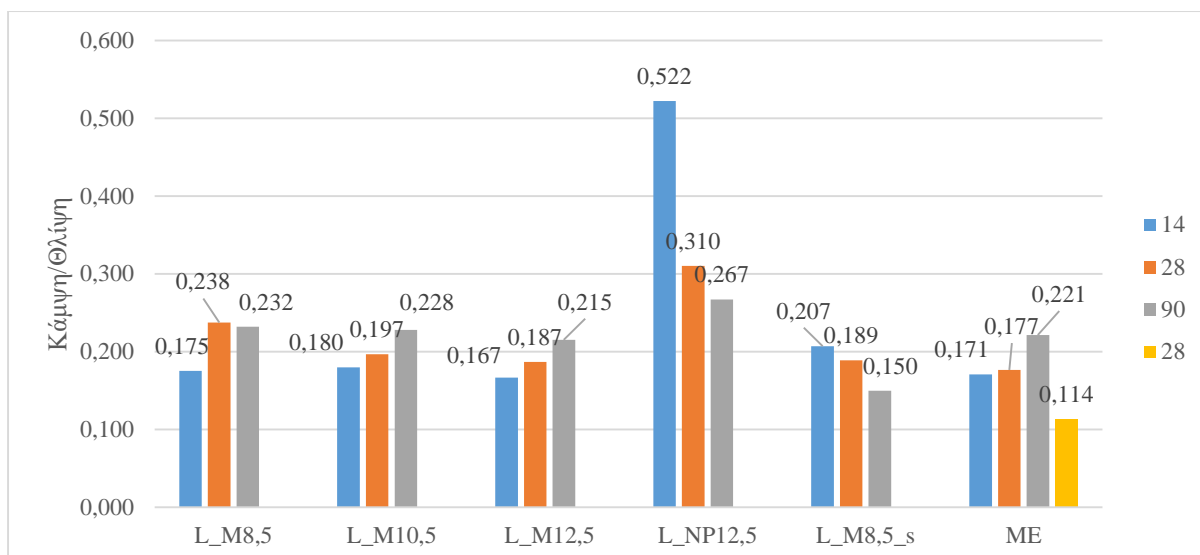


Διάγραμμα 99 Εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη στον χρόνο για τις διάφορες συνθέσεις κονιαμάτων



Διάγραμμα 100 Εξέλιξη της αντοχής σε κάμψη στον χρόνο για τις διάφορες συνθέσεις κονιαμάτων

Εκτός από τα παραπάνω υπολογίστηκε και ο λόγος της αντοχής κάμψης προς την αντοχή σε θλίψη. Ο λόγος αυτός είναι ενδεικτικός της ελαστικής συμπεριφοράς των κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο λόγος αυτός αυξάνεται το κονίαμα θεωρείται πιο ελαστικό. Στο παρακάτω ιστόγραμμα, λοιπόν, παρουσιάζεται ο λόγος αυτός στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις των κονιαμάτων αποκατάστασης.



Διάγραμμα 101 Εξέλιξη του λόγου Αντοχή Κάμψης/Αντοχή θλίψης στους διάφορους χρόνους ωρίμανσης

Στο παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι οι μισές συνθέσεις εμφανίζουν μία μικρή αύξηση του λόγου αυτού. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση L_M8,5 παρουσιάζει αρχικά αύξηση του λόγου αλλά στους 3 μήνες εμφανίζει μία πολύ μικρή μείωση. Το κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη παρουσιάζει μία μεγάλη πτώση ανάμεσα στις 14 και 28 ημέρες και μία μικρότερη στους 3 μήνες. Παρόλο που υπάρχει αυτή η συνεχής πτώση στο λόγο το κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή του λόγου αυτού στους 3 μήνες, συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις. Ακόμη, το κονίαμα με τον υπερρυστοποιητή εμφανίζει μία μικρή σταδιακή μείωση σε όλους τους χρόνους ωρίμανσης. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες συνθέσεις εμφανίζουν σταδιακή μικρή αύξηση του λόγου με τη μεγαλύτερη αύξηση να την εμφανίζει το έτοιμο κονίαμα.

4.2.7. Συρρίκνωση Δοκιμίων

Μετρήθηκαν οι διαστάσεις των κυβικών δοκιμίων των κονιαμάτων αποκατάστασης μετά από 3 μήνες της πήξης τους. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συρρίκνωσή τους σύμφωνα με τον αρχικό τους όγκο (δοκίμια 5cmX5cmX5cm) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 69 Συρρίκνωση επί τις εκατό (%) των εξεταζόμενων συνθέσεων

Κωδικός Δείγματος	Συρρίκνωση (%)
L_M8,5	3,13 ±0,81
L_M10,5	3,12 ±1,11
L_M12,5	2,20 ±0,91
L_NP12,5	2,35 ±0,19
L_M8,5_s	2,40 ±0,03
ME_19	0,02 ±0,63

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι τη μικρότερη συρρίκνωση την έχει το έτοιμο κονίαμα ME_19 και ακολουθεί το κονίαμα L_M12,5, L_NP12,5, L_M8,5_s, L_M10,5 και την μεγαλύτερη συρρίκνωση την εμφανίζει το L_M8,5. Από τα σχεδιαζόμενα κονιάματα ασβέστη-μετακαολίνη, είναι εμφανές ότι η αύξηση του ποσοστού μετακαολίνη, προκαλεί μείωση της συρρίκνωσης, τουλάχιστον στον χρόνο των 90 ημερών. Το κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη παρουσιάζει συρρίκνωση παρόμοια με αυτήν του κονιάματος ασβέστη-μετακαολίνη με το μεγαλύτερο ποσοστό μετακαολίνη, και χαμηλότερη από τα άλλα δυο κονιάματα ασβέστη μετακαολίνη. Παράλληλα, είναι εμφανές ότι η προσθήκη υπερρρευστοποιητή προκαλεί μείωση της συρρίκνωσης, προφανώς λόγω και της μικρότερης απαίτησης του κονιάματος σε νερό ανάμιξης.

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι τη μικρότερη συρρίκνωση την έχει το έτοιμο κονίαμα. Αυτό εν μέρη συμβαίνει λόγω των ινών που περιέχονται στη σύνθεση του έτοιμου κονιάματος. Από τα σχεδιαζόμενα κονιάματα ασβέστη-μετακαολίνη, είναι εμφανές ότι η αύξηση του ποσοστού μετακαολίνη, προκαλεί μείωση της συρρίκνωσης, τουλάχιστον στον χρόνο των 90 ημερών. Το κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη παρουσιάζει συρρίκνωση παρόμοια με αυτήν του κονιάματος ασβέστη-μετακαολίνη με το μεγαλύτερο ποσοστό μετακαολίνη, και χαμηλότερη από τα άλλα δυο κονιάματα ασβέστη μετακαολίνη. Παράλληλα, είναι εμφανές ότι η προσθήκη υπερρρευστοποιητή προκαλεί μείωση της συρρίκνωσης, προφανώς λόγω και της μικρότερης απαίτησης του κονιάματος σε νερό ανάμιξης.

4.2.8. Χρωματομετρία

Μετά τους 3 μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων έγινε και ο προσδιορισμός του χρώματος στα κονιάματα αποκατάστασης μέσω τις χρωματομετρίας. Σε κάθε δοκίμιο έγιναν 5 μετρήσεις των μεγεθών L*, a* και b* σε κάθε πλευρά. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του κάθε μεγέθους ανά σύνθεση και μετά έγινε ο υπολογισμός των μεγεθών C* και h*. Στα αποτελέσματα, που εμφανίζονται και στο παρακάτω πίνακα, έχουν διαχωριστεί τα αποτελέσματα της πλευράς συμπίκνωσης των κονιαμάτων και στις υπόλοιπες πλευρές.

Πίνακας 70 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας Κονιαμάτων Αποκατάστασης

Κωδικός	Επιφάνεια Συμπύκνωσης					Άλλες διευθύνσεις				
	L*	a*	b*	C*	h*	L*	a*	b*	C*	h*
L_M8,5	84,40 ±0,68	1,15 ±0,02	6,05 ±0,28	6,16 ±0,28	1,38 ±1,38	84,78 ±0,25	1,47 ±0,05	8,78 ±0,09	8,90 ±0,10	1,40 ±0,00
L_M10,5	86,31 ±0,46	1,31 ±0,02	6,87 ±0,00	7,00 ±0,00	1,38 ±0,00	84,87 ±0,57	6,50 ±4,73	9,90 ±0,26	14,57 ±4,77	1,36 ±0,03
L_M12,5	86,09 ±0,47	1,24 ±0,02	6,64 ±0,01	6,75 ±0,02	1,39 ±0,00	84,83 ±0,45	1,83 ±0,17	10,06 ±0,42	10,23 ±0,46	1,39 ±0,01
L_NP12,5	84,20 ±0,73	2,05 ±0,04	7,96 ±0,16	8,22 ±0,15	1,32 ±0,01	82,49 ±0,20	2,38 ±0,04	10,42 ±0,02	10,68 ±0,03	1,35 ±0,00
L_M8,5_s	84,64 ±0,03	1,87 ±0,05	8,62 ±0,33	8,82 ±0,34	1,36 ±0,00	85,76 ±0,29	2,06 ±0,02	10,46 ±0,01	10,66 ±0,01	1,38 ±0,00
ME	86,29 ±0,29	0,44 ±0,05	4,72 ±0,22	4,74 ±0,22	1,48 ±0,01	85,58 ±0,24	0,55 ±0,01	6,51 ±0,02	6,53 ±0,02	1,49 ±0,00

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές όσων αφορά το χρώμα των κονιαμάτων. Η λαμπρότητα των κονιαμάτων κυμαίνεται στις τιμές [82,49-86,31], το μέγεθος a* κυμαίνεται στις τιμές [0,44-6,50], το μέγεθος b* κυμαίνεται στις τιμές [4,72-10,46]. Ακόμη τα μεγέθη που υπολογίστηκαν από τα a* και b* κυμαίνονται: το C* στις τιμές [4,74-14,57] και το h* στις τιμές [1,32-1,49]. Ακόμη παρατηρείται ότι στην επιφάνεια συμπίκνωσης εμφανίζονται ελαφρώς μικρότερες τιμές σε όλα τα μεγέθη, εκτός τις λαμπρότητας που σε τρεις συνθέσεις εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές.

4.2.9 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα και Μερικά Συμπεράσματα των Κονιαμάτων Αποκατάστασης

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία σχεδιάστηκαν και εξετάστηκαν 5 συνθέσεις κονιαμάτων με ποζολανικό πρόσθετο. Τρεις από αυτές περιείχαν διαφορετικά ποσοστά μετακαολίνη. Σε μία εξετάστηκε η προσθήκη φυσικής ποζολάνης και σε άλλη μία εξετάστηκε πέρα της προσθήκης μετακαολίνη και η προσθήκη υπερρευστοποιητή. Τέλος, μελετήθηκε και μία σύνθεση εμπορικού κονιάματος με ποζολανικό πρόσθετο τον μετακαολίνη. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά την εξέταση των κονιαμάτων με διάφορες μεθόδους μετά τους 3 μήνες ωρίμανσης τους.

Πίνακας 71 Αποτελέσματα DTA-TG και αγωγιμομετρίας-pH στις 90 ημέρες

Κωδικός Δείγματος	120-200°C	200-600°C	600-1000°C	CaCO ₃ %	Αντ. Δεικ. Υδρ.	Αγωγ. (μS)	pH
L_M8,5	0,99%	2,31%	8,06%	18,32%	2,66	59,8	9,75
L_M10,5	0,88%	2,36%	8,14%	18,50%	2,51	49,3	9,16
L_M12,5	0,82%	2,50%	6,39%	14,52%	1,92	52,3	8,7
L_NP12,5	0,44%	2,16%	7,39%	16,80%	2,98	39,8	8,17
L_M8,5_s	0,81%	2,21%	9,29%	21,11%	3,08	46	8,57
ME_19	0,67%	2,44%	6,02%	13,68%	1,94	48,51	8,7

Πίνακας 72 Αποτελέσματα MIP στις 90 ημέρες

Κωδικός Δείγματος	Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Πορώδες (%)	ρ_φ (g/cm ³)
L_M8,5	215,11	6,32	0,29	35,44	1,65
L_M10,5	213,24	7,69	0,29	35,19	1,65
L_M12,5	218,01	9,83	0,26	35,34	1,62
L_NP12,5	193,97	3,36	0,62	33,15	1,71
L_M8,5_s	214,58	9,06	0,48	34,87	1,62
ME_19	146,45	9,73	0,04	27,18	1,86
ME_15	119,11	8,43	0,04	23,38	1,96

Πίνακας 73 Αποτελέσματα τριχοειδούς αναρρίχησης και ολικής εμβάπτισης στις 90 ημέρες

Κωδικός Δείγματος	Τριχοειδής Αναρρίχηση			Ολική εμβάπτιση		
	Συντ. Τριχ. Αναρ. (g/cm ² /s ^{1/2})	WAC%	Πορώδες %	WAC%	Πορώδες %	ρ _φ (g/cm ³)
L_M8,5	0,0251	24,64%	38,00%	22,14	32,88	1,55
L_M10,5	0,0203	21,47%	34,45%	22,62	35,46	1,65
L_M12,5	0,0206	21,48%	35,12%	23,08	29,60	1,40
L_NP12,5	0,0358	17,97%	30,77%	19,69	28,76	1,62
L_M8,5_s	0,0133	20,20%	33,54%	21,24	29,25	1,44
ME_19	0,0065	14,85%	26,48%	15,48	27,88	1,87
ME_15	0,0047	12,12	22,81	-	-	-

Πίνακας 74 Αποτελέσματα υπερηχοσκόπησης και δοκιμές αντοχών στις 90 ημέρες

Κωδικός Δείγματος	Ταχύτητα υπερήχων (m/sec)	Ed (GPa)	Αντοχή σε θλίψη (Mpa)	Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)	Κάμψη /Θλίψη
L_M8,5	1835,49	4,32	5,90	1,37	0,23
L_M10,5	2016,77	5,42	7,33	1,67	0,23
L_M12,5	1759,13	4,20	7,30	1,57	0,22
L_NP12,5	1759,99	4,41	2,92	0,78	0,27
L_M8,5_s	2246,25	6,98	7,47	1,12	0,15
ME_19	2417,12	8,67	10,52	2,33	0,22
ME_15	-	-	1,88	16,52	0,11

4.2.10 Μερικά Συμπεράσματα της Αποτίμησης των Κονιαμάτων Αποκατάστασης

Όλα τα κονιάματα που εξετάστηκαν παρουσιάζουν έντονα υδραυλικό χαρακτήρα και ικανοποιητικές τιμές φυσικοχημικών χαρακτηριστικών για υδραυλικά κονιάματα με βάση την άσβεστο.

Η αντικατάσταση του μετακαολίνης με τη φυσική ποζολάνη έχει ως αποτέλεσμα την βραδύτερη κατανάλωση πορτλαντίτη. Παρατηρήθηκε ότι στους 3 μήνες σκλήρυνσης είχε καταναλωθεί όλη η ποσότητα του πορτλαντίτη στο αντίστοιχο κονίαμα με τον μετακαολίνη, ενώ στο κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη έχει καταναλωθεί το 95% του περιεχόμενου πορτλαντίτη. Στον αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας παρατηρείται μία μικρή αύξηση στο κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη σε σύγκριση με το αντίστοιχο κονίαμα με μετακαολίνη. Αντιθέτως, παρατηρείται πτώση του πορώδους και αύξηση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, όταν προστίθεται η φυσική ποζολάνη έναντι του μετακαολίνης ως ποζολανικό πρόσθετο.

Η περιεκτικότητα η οποία εμφανίζει την πιο ταχεία κατανάλωση του πορτλαντίτη εμφανίζεται να είναι αυτή με το 10,5% μετακαολίνη με τη περιεκτικότητα των 12,5% μετακαολίνης να εμφανίζει επίσης ταχεία κατανάλωση πορτλαντίτη. Και οι δύο συνθέσεις έχουν καταναλώσει όλη την ποσότητα του περιεχόμενου πορτλαντίτη στους 3 μήνες σκλήρυνσης. Σε αντίθεση, η σύνθεση με το μικρότερο ποσοστό μετακαολίνης στους 3 μήνες έχει καταναλώσει το 90% μόνο του πορτλαντίτη. Όσον αφορά στον αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, το κονίαμα με την υψηλότερη περιεκτικότητα μετακαολίνης παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή, η οποία αυξάνεται με τη μείωση της ποσότητας του μετακαολίνης στο κονίαμα. Όμοια παρατήρηση μπορεί να γίνει και για το πορώδες, όπου η σύνθεση με τη μεγαλύτερη ποσότητα μετακαολίνης εμφανίζει χαμηλότερο πορώδες σε σχέση με τις δύο άλλες συνθέσεις. Όσον αφορά στον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης οι συνθέσεις με τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες μετακαολίνης παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης.

Η προσθήκη υπερρευστοποιητή στο κονίαμα αποκατάστασης παρατηρείται ότι αυξάνει κατά πολύ τη ταχύτητα κατανάλωσης του πορτλαντίτη, καθώς από τις 28 μόλις ημέρες πήξης έχει καταναλωθεί σχεδόν όλη η ποσότητα του πορτλαντίτη (93%). Παράλληλα, ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας παρατηρείται ότι αυξάνεται με τη προσθήκη υπερρευστοποιητή. Ο υπερρευστοποιητής φαίνεται να μειώνει το πορώδες και τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης του κονιάματος σε σχέση με το αντίστοιχο κονίαμα δίχως υπερρευστοποιητή.

Το έτοιμο κονίαμα παρατηρείται ότι έχει την πιο ταχεία κατανάλωση του πορτλαντίτη σε σχέση με τα υπόλοιπα κονιάματα αποκατάστασης, καθώς στους 3 μήνες έχει ήδη καταναλωθεί όλη η ποσότητα του πορτλαντίτη. Συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις η εμπορική σύνθεση κονιάματος με ασβέστη-μετακαολίνη εμφανίζει έναν από τους χαμηλότερους αντίστροφους δείκτες υδραυλικότητας, υποδεικνύοντας τη μεγάλη υδραυλικότητα του κονιάματος αυτού. Το πορώδες που έχει η έτοιμη αυτή σύνθεση εμφανίζεται να είναι χαμηλότερο των υπόλοιπων συνθέσεων, χωρίς ωστόσο να ξεπερνά τα όρια συμβατότητας για υδραυλικά κονιάματα αποκατάστασης. Ομοίως, παρουσιάζει και τον χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, χωρίς ωστόσο να βρίσκεται σε μη επιτρεπτά επίπεδα, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία της τοιχοποιίας από την ανερχόμενη υγρασία, που όπως προαναφέρθηκε είναι και ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών του Ιερού Κουβουκλίου.

Όσον αφορά στις μηχανικές αντοχές παρατηρείται ότι η προσθήκη ποζολάνης μειώνει κατά πολύ την ανάπτυξη μηχανικών αντοχών σε σχέση με την προσθήκη μετακαολίνης. Το κονίαμα με φυσική ποζολάνη εμφανίζει τις χαμηλότερες αντοχές θλίψης και κάμψης σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Όσον αφορά στα κονιάματα με τις διαφορετικές περιεκτικότητες μετακαολίνης, παρατηρείται ότι αυτά με τις υψηλότερες περιεκτικότητες σε μετακαολίνη εμφανίζουν καλύτερη μηχανική συμπεριφορά στους 3 μήνες, συγκριτικά με το κονίαμα που περιέχει τη μικρότερη περιεκτικότητα μετακαολίνης. Παράλληλα, τα κονιάματα ασβέστη μετακαολίνης αναπτύσσουν γρηγορότερα μηχανικές αντοχές (σε μικρότερους χρόνους ωρίμανσης). Η προσθήκη του υπερρευστοποιητή φαίνεται να αυξάνει τις μηχανικές αντοχές του κονιάματος, όπως είναι αναμενόμενο, λόγω της μείωσης του νερού που προστέθηκε κατά την παρασκευή του κονιάματος.

Η εμπορική σύνθεση ασβέστη-μετακαολίνη παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά ανάμεσα σε όλα τα κονιάματα αποκατάστασης που εξετάστηκαν. Αναλυτικότερα, το εμπορικό κονίαμα εμφανίζει ταχύτατη ανάπτυξη αντοχών από τις 14 μέρες σκλήρυνσής του, ενώ παρουσιάζει και τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε όλους τους χρόνους, με το κονίαμα της χαμηλότερης προσθήκης νερού να υπερισχύει.

4.3. Αποτίμηση συμβατότητας και επιτελεστικότητας των κονιαμάτων αποκατάστασης

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, μελετήθηκαν τα ιστορικά κονιάματα του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα και σχεδιάστηκαν, παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πιθανές συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης. Τα κονιάματα αυτά σχεδιάστηκαν σύμφωνα με την αντίστροφη μηχανική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μνημείου (περιβάλλον, επιταγές έργου αποκατάστασης, δυναμική και στατική απόκριση). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ποικιλομορφία των ιστορικών κονιαμάτων δεν επέτρεψε τον κλασσικό σχεδιασμό μέσω αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης, ωστόσο η υδραυλική φύση της πλειονότητας των ασβεστιτικών ιστορικών κονιαμάτων αποτέλεσε βάση για τον σχεδιασμό. Φυσικά, καθίσταται σαφές ότι η επίτευξη της συμβατότητας ενός κονιάματος αποκατάστασης με τα ιστορικά υλικά ενός τόσο περίπλοκου δομήματος είναι πρόκληση, ιδιαίτερος λαμβάνοντας υπόψη και τις επιταγές για επιτελεστικότητα.

Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής τουλάχιστον 15 MPa

Το έργο αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου κρίθηκε ως κατεπείγον λόγω των έντονων παραμορφώσεων και αποκλίσεων από την κατακόρυφο που εμφάνιζε το μνημείο το 2015. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατέδειξε την ανάγκη για χρήση κονιάματος αποκατάστασης, το οποίο να αναπτύσσει αντοχή σε θλίψη, τουλάχιστον 15 MPa. Καθώς η Ιερουσαλήμ, όπως προαναφέρθηκε, είναι περιοχή σεισμικής επικινδυνότητας, και λαμβάνοντας υπόψη τις εμφανιζόμενες παραμορφώσεις και αποκλίσεις, η επιταγή για επιτελεστικότητα του κονιάματος αποκατάστασης σε σεισμική δράση είναι πρωτεύουσας σημασίας, χωρίς ωστόσο να θυσιάζονται οι επιταγές για συμβατότητα του κονιάματος αποκατάστασης με τα ιστορικά δομικά υλικά.

Το μοναδικό κονίαμα εκ των εξετασθέντων που πληροί την επιταγή για ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής τουλάχιστον 15 MPa, είναι το **έτοιμο κονίαμα με αναλογία νερού κονιάς 0,15**.

Πρώιμη ανάπτυξη επαρκών μηχανικών αντοχών

Καθώς το Ιερό Κουβούκλιο αποφασίστηκε να παραμείνει ανοιχτό στους προσκυνητές και στις λατρευτικές λειτουργίες καθ' όλη τη διάρκεια του έργου αποκατάστασης, είναι κρίσιμη και η ανάπτυξη αντοχών σε μικρό χρόνο.

Το κονίαμα φυσικής ποζολάνης εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε πρώιμους χρόνους, ενώ είναι εμφανές ότι τα κονιάματα με μετακαολίνη αναπτύσσουν αντοχές ταχύτερα. Το **έτοιμο κονίαμα παρουσιάζει υψηλές αντοχές σε σύντομο χρόνο** (ήδη στις 28 ημέρες) και μάλιστα επαρκείς για την στατική και δυναμική απόκριση του μνημείου, όπως προαναφέρθηκε.

Γρήγορη κατανάλωση πορτλαντίτη

Λόγω της έντονης παρουσίας διαλυτών αλάτων, αλλά και λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών του έργου (στενό χρονικό πλαίσιο και ύπαρξη ορθομαρμαρώσεων που περιβάλλουν τις τοιχοποιίες, όπως προαναφέρθηκε), είναι επιταγή η γρήγορη κατανάλωση του πορτλαντίτη που περιέχεται στο κονίαμα αποκατάστασης.

Στις 90 ημέρες ωρίμανσης το κονίαμα με τη φυσική ποζολάνη, καθώς και το κονίαμα με το χαμηλό ποσοστό μετακαολίνη, παρουσιάζουν ακόμα ποσότητα ελεύθερου υδροξειδίου του ασβεστίου, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις δεν ανιχνεύεται καμία ποσότητα σε αυτόν τον χρόνο. **Στις 28 ημέρες μόνο το έτοιμο κονίαμα έχει καταναλώσει όλο το ελεύθερο υδροξείδιο του ασβεστίου.**

Χαμηλός αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας

Όπως προαναφέρθηκε, το κονίαμα αποκατάστασης θα πρέπει να λειτουργήσει σε ένα περιβάλλον έντονης διάβρωσης, λόγω των διαφορετικών ιστορικών υλικών και των δυναμικών που αναπτύσσονται. Τα ασβεστιτικά κονιάματα υδραυλικού χαρακτήρα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε περιβάλλοντα προσβολής από άλατα. Συνεπώς είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί κονίαμα υδραυλικής φύσεως, το οποίο εξάλλου είναι και σε συμφωνία με πληθώρα ασβεστιτικών ιστορικών κονιαμάτων του μνημείου.

Όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας.

Χαμηλός συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης και χαμηλό ποσοστό ροφημένου νερού μέσω ολικής εμβάπτωσης

Λόγω της τριχοειδούς αναρρίχησης που επιδρά στο μνημείο από το υπέδαφος, είναι σημαντική η εξέταση και αποτίμηση των υδρομετρικών χαρακτηριστικών των κονιαμάτων αποκατάστασης. Είναι επιταγή τα κονιάματα αποκατάστασης να μην εντείνουν την πρόσληψη υγρασίας από το υπέδαφος στο δόμημα, συνεπώς είναι σημαντικό να εμφανίζουν σχετικά χαμηλό συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης (ωστόσο όχι σε βαθμό που να καθίστανται ασύμβατα με τα ιστορικά δομικά υλικά).

Το έτοιμο κονίαμα παρουσιάζει τον χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, συνεπώς θα άγει μικρότερες ποσότητες νερού από το υπέδαφος, ενώ η μικρότερη χωρητικότητά του σε νερό μέσω ολικής εμβάπτωσης (ωστόσο σε συμβατά εύρη) θα μειώσει το φορτίο υγρασίας του δομήματος.

Τιμές πορώδους χαρακτηριστικές υδραυλικών κονιαμάτων

Σε σχέση με τη μικροδομή, είναι προφανές ότι οποιοδήποτε κονίαμα αποκατάστασης θα παρουσιάζει χαμηλότερο πορώδες σε σχέση με τα ιστορικά κονιάματα, τα οποία βρίσκονται, λόγω του έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος, σε εξαιρετικά κακή κατάσταση διατήρησης. Το πορώδες είναι επιθυμητό να είναι χαμηλότερο από τα ιστορικά κονιάματα, ωστόσο σε επιτρεπτά όρια για υδραυλικά κονιάματα.

Από την άποψη αυτή, όλα τα εξεταζόμενα κονιάματα πληρούν αυτήν την προδιαγραφή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αισθητική συμβατότητα σε σχέση με τις χρωματικές παραμέτρους, παρόλο που είναι εξέχουσας σημασίας σε έργα συντήρησης και αποκατάστασης μνημείων και ιστορικών συνόλων, στην παρούσα έρευνα δεν ελήφθη υπόψη ως κρίσιμος παράγοντας αποτίμησης, αφενός λόγω της διασποράς που παρουσίασαν τα ιστορικά κονιάματα σε σχέση με αυτήν την παράμετρο και αφετέρου καθώς τα κονιάματα αρμολόγησης της τοιχοποιίας βρίσκονται σε μη εμφανείς περιοχές του μνημείου, αφού καλύπτονται με ορθομαμαρώσεις.

Από τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι το έτοιμο κονίαμα με αναλογία νερού προς ξηρό κονίαμα ίση με 0,15, πληροί όλες τις επιταγές επιτελεστικότητας, ενώ η σύσταση του και η μικροδομή που αναπτύσσει, το καθιστά συμβατό με τα ιστορικά δομικά υλικά. Παράλληλα, το εν λόγω κονίαμα παρουσιάζει και την μικρότερη συρρίκνωση, σημαντική παράμετρος για τα κονιάματα αποκατάστασης.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκαν τα ιστορικά κονιάματα όλων των όψεων του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα. Εξετάστηκαν δύο είδη κονιαμάτων, κονιάματα συμπλήρωσης και κονιάματα αρμού. Τα κονιάματα λήφθηκαν από διαφορετικά ύψη της κατασκευής που κυμαίνονταν από τα 50cm έως τα 280cm. Η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου (τοιχοποιίας και γεμίματος) αναδεικνύει την περιπλοκότητα του μνημείου.

Τα ιστορικά κονιάματα διαχωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες: 1) κονιάματα Ασβέστη, 2) Γυψοκονιάματα, 3) μικτά κονιάματα Ασβέστη - Γύψου και 4) κονιάματα Ασβέστη παρουσία Πορτλαντίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο 33% των κονιαμάτων εντοπίστηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης, σε διάφορα ποσοστά, ανεξαρτήτως κατηγορίας κονιαμάτων. Μετά από την εξέταση επιλεγμένων κονιαμάτων με θερμοβαρυμετρική και θερμική ανάλυση, προκύπτει ότι τα κονιάματα ασβέστη ταξινομούνται περαιτέρω σε τυπικά κονιάματα αερικής ασβέστου, υδραυλικής ασβέστου και ασβέστη-τεχνητής ποζολάνης. Επιπλέον, σε περιοχές του μνημείου που το μικροκλίμα δεν ευνόησε την ενανθράκωση, παρατηρούνται κονιάματα ασβέστη με σημαντική περιεκτικότητα σε πορτλαντίτη.

Τα κονιάματα που εξετάστηκαν παρουσίασαν υψηλό λόγο κονιάς/αδρανών, με τιμές αναλογίας που κυμαίνονται σε ευρύ διάστημα [1,25-3,6]. Διαπιστώθηκε ότι η κονία, ανά περίπτωση, μπορεί να είναι μίξης γύψου και ασβέστη (σε ποικίλες αναλογίες), ασβεστιτικής σύστασης (σε κάποια ασβεστιτικά κονιάματα η κονία είναι μίξη πορτλαντίτη και ανθρακικού ασβεστίου σε ποικίλες αναλογίες), ενώ στις περιπτώσεις που βρέθηκε εντριγκίτης ή/και θωμασίτης στην κονία, αυτά αποτελούν προϊόντα διάβρωσης. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι τα αδρανή ποικίλουν ανά περίπτωση και μπορεί να είναι ασβεστιτικά, χαλαζιακά, εντριγκίτη, ή/και γύψου.

Σε λατρευτικά κτήρια, όπως το Ιερό Κουβούκλιο, ήταν συνήθης η επανάχρηση δομικών υλικών από παλαιότερες φάσεις του μνημείου με σκοπό την αποφυγή απόρριψής τους, αλλά και της διάσωσή τους από χέρια απίστων. Συνεπώς, είναι πιθανό κατά τη τελευταία ανακατασκευή και αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου το 1810 από τον Κάλφα Κομνηνό, να έγινε επανάχρηση των παλαιότερων κονιαμάτων μέσω ενσωμάτωσής τους στην τοιχοποιία. Με αυτό τον τρόπο δικαιολογείται η έντονη διαφοροποίηση στη σύσταση των κονιαμάτων, όπως επίσης και τα υψηλά ποσοστά κονιάς στα ιστορικά κονιάματα, χωρίς όμως να μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο ότι οι διαφορές στην σύσταση υποδηλώνουν διαφορετική περίοδο χρήσης τους στην κατασκευή κατά τις πολλαπλές ανακατασκευές και αποκαταστάσεις που έλαβαν χώρα στο μνημείο στη διάρκεια των δύο χιλιάδων χρόνων ζωής του.

Κατά την εξέταση της μικροδομής των κονιαμάτων παρατηρήθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά, με το ολικό πορώδες προσβάσιμο στο νερό και το ποσοστό του ολικά ροφημένου νερού να κυμαίνονται ανάμεσα σε τιμές μεγάλου εύρους, ωστόσο πάντα σε σχετικά υψηλά ποσοστά. Σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές του ποσοστού ολικών διαλυτών αλάτων και τις διαφορετικές τιμές του pH ανάμεσα στα ιστορικά κονιάματα, δικαιολογεί την κακή κατάσταση διατήρησής τους. Το παραπάνω γεγονός σε συνέργεια με ένα έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, υψηλής υγρασίας, όπως αυτό του Ιερού Κουβουκλίου, καθιστά το ιστορικό κονίαμα ως έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος άγει, αλλά και δέχεται τη φθορά που προκύπτει εξαιτίας της ανάπτυξης διαφορετικού δυναμικού στην τοιχοποιία.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία σχεδιάστηκαν, παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πιθανές συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης για την αποκατάσταση του Ιερού Κουβουκλίου. Τα κονιάματα αυτά σχεδιάστηκαν σύμφωνα με την αντίστροφη μηχανική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μνημείου (ιστορικά υλικά, περιβάλλον, επιταγές έργου αποκατάστασης, δυναμική και στατική απόκριση). Έτσι, μελετήθηκαν πέντε (5) συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης, τέσσερα κονιάματα ασβέστη με προσθήκη μετακαολίνη, σε διαφορετική ποσοστιαία αναλογία, και ένα κονίαμα ασβέστη με προσθήκη φυσικής ποζολάνης, ενώ εξετάστηκε και ένα εμπορικό κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη χωρίς παρουσία τσιμέντου. Η εμπορική σύνθεση εξετάστηκε με την προσθήκη δύο διαφορετικών ποσοτήτων νερού. Βάσει της αποτίμησης των κονιαμάτων αποκατάστασης προκύπτει ότι η προσθήκη μετακαολίνη σε σχέση με την προσθήκη φυσικής ποζολάνης, προσδίδει υψηλότερες μηχανικές αντοχές, αλλά και βελτιωμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά. Μετά την αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης διερευνήθηκε η συμβατότητα και η επιτελεστικότητά τους

σε σχέση με τα ιστορικά κονιάματα, όπως επίσης και με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του μνημείου και του έργου, σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής τουλάχιστον 15 MPa
- Πρώιμη ανάπτυξη επαρκών μηχανικών αντοχών
- Γρήγορη κατανάλωση πορτλαντίτη
- Χαμηλός αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας
- Χαμηλός συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης και χαμηλό ποσοστό ροφημένου νερού μέσω ολικής εμβάπτυσης
- Τιμές πορώδους χαρακτηριστικές υδραυλικών κονιαμάτων

Βάσει των ανωτέρων κριτηρίων το εμπορικό κονίαμα ασβέστη-μετακαολίνη προκρίνεται ως το πλέον συμβατό και επιτελεστικό και πιο συγκεκριμένα προτιμάται η σύνθεση με την προσθήκη της χαμηλότερης ποσότητας νερού κατά την παρασκευή. Τέλος, η χρήση ενός εμπορικού κονιάματος εγγυάται την αναπαραγωγισιμότητα του κονιάματος αποκατάστασης σε συνθήκες εργοταξίου, μειώνοντας την περιπλοκότητα και τον χρόνο των εργασιών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Τεχνικά δελτία Α' υλών για τη παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης.

1. Τεχνικό Δελτίο Πυρτικής Άμμου

**ΕΚΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ
TEST REPORT**Δοκιμές
Αρ. Πιστοπ. 663**ΤΡΥΨΙΑΝΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ**

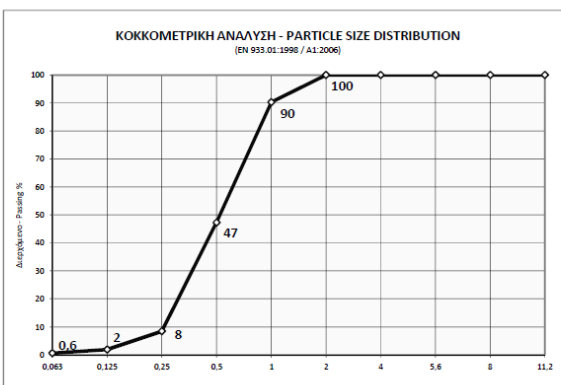
ΒΙ.ΠΕ. Σίνδου Θεσσαλονίκης / *Industrial Area of Thessaloniki*
 Τ.Κ. 570 22 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ / *GR 570 THESSALONIKI*
 Τηλ. / Tel. 0030 2310 465975, Fax 0030 2310 570635
 e-mail: skvrolab@otenet.gr

Αιτηθείσα δοκιμή / *Request test* :
Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης
Determination of particle size distribution
 ΕΛΟΤ EN 933.01:1998 / A1:2006

Εντολέας / *Customer* : ΔΑΛΚΑΦΟΥΚΗ ΟΙΚΟΣ Ε.Π.Ε.
 Έργο / *Project* : ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στοιχεία - Προέλευση δείγματος / *Sample's description* : ΑΜΜΟΣ ΠΟΤΑΜΟΥ 0-2
 Ημερομηνία δειγματοληψίας / *Date of sampling* : 16/03/2011
 Υπεύθυνος δειγματοληψίας / *Sampling made by* : ΜΙΚΡΟΥ ΑΡΗΣ
 Ημερομηνία Εισαγωγής / *Date of Receive* : 16/03/2011
 Αριθμός Πρωτοκόλλου / *Register Number* : 6885
 Κωδικός Δείγματος / *Code of Sample* : 198
 Ημερομηνία Εκτέλεσης Δοκιμής / *Date of Test* : 17/03/2011

Διερχόμενα ποσοστά μάζας	
<i>Percentage of the passing mass</i>	
Κόσκινα Sieves (mm)	Διερχόμενο Passing (%)
11,2	100
8	100
5,6	100
4	100
2	100
1	90
0,5	47
0,25	8
0,125	2
0,063	0,6



Μάζα δείγματος δοκιμής / *Mass of test portion* : 0,4 Kg

Μέθοδος ανάλυσης / *Method of analysis* : Πλύσιμο και κοσκίνισμα / *Washing and sieving*
 Ξερό κοσκίνισμα / *Dry sieving*

Παρατηρήσεις / Remarks :

1. Η έκθεση αυτή δεν μπορεί να αναπαραχθεί παρά μόνον σε πλήρη μορφή, εκτός αν υπάρχει η άδεια του εργαστηρίου που την εκδίδει / *This test report may not be reproduced other than in full, except with the permission of the issuing laboratory.*
2. Εκθέσεις δοκιμών χωρίς υπογραφή και σφραγίδα δεν είναι έγκυρες / *Test reports without signature and seal are not valid.*
3. Οι αναγραφόμενες τιμές αποτελεσμάτων αφορούν μόνο το δείγμα που προσκομίστηκε στο εργαστήριο / *Reported results pertain exclusively to the sample provided by the customer.*
4. Τα αναγραφόμενα στοιχεία προέλευσης του δείγματος είναι κατά δήλωση του πελάτη / *Reported information regarding the description of the sample as declared by the customer*

Τέλος Έκθεσης Δοκιμής / End of Test Report

Σφραγίδα / <i>Seal</i> :	Ημερομηνία έκδοσης / <i>Date of issue:</i>	Τεχνικός Προϊστάμενος / <i>Technical Director:</i>	Τεχνικός Δοκιμής / <i>Testing Technician :</i>
	18/03/2011	Γρ. Τρυψιάνης	Ολ. Καραλέξη

2.Τεχνικό Δελτίου Υδρασβέστου



ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ

Αερική ανόργανη κονία σε σκόνη για την παρασκευή κονιαμάτων, σοβάδων, ενεμάτων και υδροχρωμάτων**Περιγραφή**

Η υδράσβεστος είναι μια αερική ανόργανη κονία σε σκόνη που παρασκευάζεται από τη σβέση του ασβέστη και αποτελείται από υδροξείδιο του ασβεστίου. Η υδράσβεστος σήμερα μπορεί να θεωρηθεί από τα πιο αντιπροσωπευτικά υλικά της οικολογικής οικοδομικής και είναι κατάλληλη για την παρασκευή κονιαμάτων αρμολόγησης-επιχρισμάτων υψηλής διαπνοής, ενεμάτων και υδροχρωμάτων. Το προϊόν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του EN 459-1 (CL 90).

Πεδία εφαρμογής

Το υλικό είναι κατάλληλο για:

- αερικά κονιάματα αρμολόγησης, δόμησης μαζί με άμμο
- υδραυλικά κονιάματα αρμολόγησης, δόμησης μαζί με ποζολάνη ή ποζολάνη και άμμο
- την κατασκευή, ανακατασκευή, συμπλήρωση επιχρισμάτων
- την παρασκευή ενεμάτων για τη στερέωση τοιχοποιιών, ψηφιδωτών, τοιχογραφιών
- την παρασκευή υδροχρωμάτων
- την παρασκευή κονιαμάτων, σοβάδων μαζί με τσιμέντο για τη δόμηση νέων κατασκευών

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

- Χημική Ανάλυση

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₄
(%)	0.1-0,2	0.05-0.9	ίχνη	0.5-0.8	1,5-2,3	0.1-0,25

Ca(OH)₂ 92 - 94%

CaCO₃ : Ελάχιστο 2,5% - Μέγιστο 3,4%

ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Φυσική υγρασία: 0,0 - 0,2 %
- Φαινόμενο ειδικό βάρος: 450 - 480 Kg/m³
- Διόγκωση (Le Chatellieur) 3,3-6,5 mm
- Απώλεια Πύρωσης 1,1-1,5 % κ.β
- Λευκότητα: 98 %
- Κοκκομετρία: 98 % <90 μm, 93% <45 μm

Αποθήκευση

Το προϊόν πρέπει να αποθηκεύεται σε καλυμμένο και στεγνό χώρο.

Συσκευασία

Το προϊόν συσκευάζεται σε σάκους των 25 Kg.

3.Τεχνικό Δελτίο Μετακαολίνη

ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ**ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ****Χημική ανάλυση :**SiO₂ : 55% Fe₂O₃ : 1,4% Al₂O₃ : 40% TiO₂ : 1,5%K₂O+Na₂O : 0,8% CaO+MgO : 0,3%**Απώλεια κατά την καύση :**

(1 050 °C) 1%

Τυπικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά :

pH 6

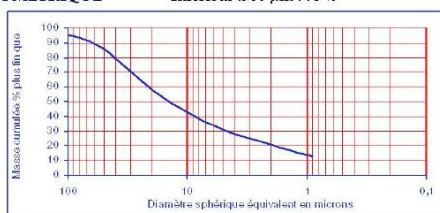
Δείκτης ποζολανικότητας : 1100 mg Ca(OH)₂ / g

Φωτεινότητα με μπλε φίλτρο Photovolt : 73 %

Απαιτήσεις σε νερό : 900 g/kg

Ειδικό βάρος : 2,4 g/cm³

Πυκνότητα :

Χαλαρή -> 400 kg/m³Συμπιεσμένη -> 800 kg/m³**DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE****Inférieur à 80 µm : 95 %***Particle size distribution*

4.Τεχνικό Δελτίο Φυσικής Ποζολάνης



ΘΗΡΑΪΚΗ ΓΗ

Φυσική ηφαιστειογενής ποζολάνη για την αποκατάσταση μνημείων και παραδοσιακών κτιρίων και τη δόμηση νέων κατασκευών

Περιγραφή

Η θηραϊκή γη είναι μια φυσική ποζολάνη ηφαιστειογενούς προέλευσης και είναι κατάλληλη μετά από ανάμειξη με υδράσβεστο αδρανή και νερό, για την παρασκευή συμβατών κονιαμάτων αρμολόγησης, επιχρισμάτων και ενεμάτων.

Πεδία εφαρμογής

Το υλικό είναι κατάλληλο για:

- κονιάματα αρμολόγησης, δόμησης
- συμπλήρωση, ανακατασκευή-κατασκευή επιχρισμάτων
- υποστρώματα ψηφιδωτών, τοιχογραφιών
- ενέματα για τη στερέωση τοιχοποιιών, ψηφιδωτών, τοιχογραφιών

Τρόπος χρήσης

Το υλικό πρέπει να αναμειγνύεται με υδράσβεστο (πολτό ή σκόνη), υδραυλική άσβεστο με καθαρό νερό με την προσθήκη άμμου ή άλλων αδρανών χωρίς επιβλαβείς προσμίξεις.

Η δΟΣΟΛΟΓΙΑ του προσδιορίζεται ανάλογα με την εφαρμογή όπως επίσης από τη φύση και την κοκκομετρία των αδρανών.

Συνίσταται να μην χρησιμοποιείτε το υλικό για τις διάφορες εφαρμογές σε θερμοκρασίες κάτω των 5 °C και άνω των 35 °C.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

• Χημική Ανάλυση

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
(%)	76.78	12.78	1.38	0.56	1.53	3.41	3.25	0.21

Υδατοδιαλυτά αλκάλια: 0.66 %

ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Χρώμα: τεφρόλευκο
- Φαινόμενο ειδικό βάρος: 750 Kg/m³
- Πραγματικό ειδικό βάρος: 2360 Kg/m³
- Ειδική επιφάνεια: 4650 cm²/g
- Κοκκομετρία: 97 % <250 μm, 91% < 125μm
- Ποζολανικότητα : > 5 N/mm²

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Το υλικό είναι σε άμορφη κρυσταλλική δομή. Οι κρυσταλλικές φάσεις που ανιχνεύονται είναι χαλαζίας, αλβίτης και ασβεσίτης.

Αποθήκευση

Το προϊόν πρέπει να αποθηκεύεται σε καλυμμένο και στεγνό χώρο.

Συσκευασία

Το προϊόν συσκευάζεται σε σάκους των 20 Kg.

Βιβλιογραφία

1. Α. Μοροπούλου, Γ. Μπατής. 'Δομικά Υλικά. Αθήνα' : Σημειώσεις Μαθήματος, Ε.Μ.Π., 2012.
2. Α. Μπακόλας, 'Κριτήρια και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ιστορικών Κονιαμάτων'. Αθήνα : Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2002.
3. Α. Μοροπούλου, Α. Μπακόλας, Μ. Αποστολοπούλου. 'Ενότητα 1.2, Δομικά Υλικά (Κονίες, Ιστορικά Κονιάματα)'. Διδακτικές Σημειώσεις : ΕΜΠ, Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.
4. I. Parayianni, V. Pachta, M. Stefanidou. 'Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars: The case study of Odeion of the archaeological site of Dion' Construction and Building Materials, 2013
5. Ε. Αγγελakoπουλου, 'Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Φυσικοχημικών και Μηχανικών Χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση Αριστοποίησης Συμβατών Κονιαμάτων και Σκυροδεμάτων Αποκατάστασης Ιστορικών Τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες'. Αθήνα : Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2006.
6. Α. Moropoulou, Α. Bakolas, S. Anagnostopoulou. 'Composite Materials in Ancient Structures'. Cement and Concrete Composites, 2005
7. Α. Moropoulou, Α. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou. Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars. International RILEM Workshop on Repairs Mortars for Historic Masonry, 2009.
8. Α. Moropoulou, Α. Bakolas, P. Moundoulas, Α. S. Cakmak. 'Compatible restoration mortars for Hagia Sophia earthquake protection. Transactions on the Built Environment', 1999.
9. Α. Χ. Τριανταφύλλου, 'Δομικά υλικά', Πάτρα, 2013.
10. Μ. Τζιότζιου, 'Μελέτη του Μηχανισμού Πήξης Κονιαμάτων Τύπου Ασβέστη- Φυσικής Ποζολάνης', Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.
11. Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής. 'Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου'. Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2010.
12. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA/ko1.htm. [Ηλεκτρονικό]
13. Σ. Αναγνωστοπούλου, 'Μεθοδολογία Αποτίμησης του Ρόλου των Αδρανών για τον Επιτελεστικό Σχεδιασμό Κονιαμάτων Αποκατάστασης' Αθήνα : Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2012.
14. Ε. Αγγελakoπουλου, Α. Μοροπούλου. Ενότητα 3.2, 'Εισαγωγή στα κονιάματα-Κονίες, Αδρανή, Πρόσθετα'. Διδακτικές Σημειώσεις, Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης
15. S. Q. Fanga, H. Zhang, B. J. Zhanga, Y. Zhenga. 'The identification of organic additives in traditional lime mortar', Journal of Cultural Heritage, 2014.
16. Α. Μοροπούλου, Π. Μούνδουλας, Μ. Αποστολοπούλου. Ενότητα 1.2, 'Συμβατά και επιτελεστικά κονιάματα αποκατάστασης'. Διδακτικές Σημειώσεις, Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.
17. Α. Μοροπούλου, 'Ενότητα 2.1, Κριτήρια Αξιολόγησης της επιδεκτικότητας των δομικών υλικών στη φθορά βάσει των ιδιοτήτων τους', Διδακτικές Σημειώσεις, Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση-Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.

18. A. M. K. Ngoma, 'Characterisation and Consolidation of Historical Lime Mortars in Cultural Heritage Buildings and Associated Structures in East Africa' Stockholm : Doctoral Thesis, 2009.
19. Α. Μοροπούλου, 'Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών-Μεθοδολογία Ενόργανων και μη Καταστρεπτικών Τεχνικών'. Αθήνα : Σημειώσεις Μαθήματος, Ε.Μ.Π., 2012.
20. P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, I. Karatasios, V. Kilikoglou. 'Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete', Cement and Concrete Research. 2005.
21. A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas, K. Bisbikou. 'Technology and behavior of rubble masonry mortars', Construction and Building Materials. 1996.
22. ARC, ICCROM. 'Concervation of architectural heritage, Historic structures and materials', Laboratory Handbook. 1999.
23. M. Apostolopoulou, E. T. Delegou, E. Alexakis, M. Kalofonou, K.C. Lampropoulos, E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou:. 'Study of the historical mortars of the Holy Aedicule as a basis for the design, application and assessment of repair mortars: A multispectral approach applied on the Holy Aedicule', Construction and Building Materials. 2018.
24. A. Kioussia, M. Karogloua, A. Bakolasa, K. Labropoulos, A. Moropoulou. Documentation Protocols To Generate Risk Indicators Regarding Degradation Processes For Cultural Heritage Risk Evaluation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2013.
25. Α. Μοροπούλου, Ενότητα 3.2, 'Αντίστροφη Μηχανική Προσεγγιση –Reverse Engineering" Για τον σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης' Διδακτικές Σημειώσεις, Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.
26. Ε. Αγγελακοπούλου, Α. Μοροπούλου. Ενότητα 3.2, 'Σχεδιασμός Κονιαμάτων Αποκατάστασης'. Διδακτικές Σημειώσεις. σ.1. : Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης.
27. M. Apostolopoulou, E. Aggelakopoulou, L. Siouta, A. Bakolas, M. Douvika, P. G. Asteris, A. Moropoulou. 'A methodological approach for the selection of compatible and performable restoration mortars in seismic hazard areas'. Construction and Building Materials. 2017.
28. M. Biddle, 'The Tomb of Christ.', SUTTON PUBLISHING, 1999.
29. Θ. Γ. Μητρόπουλος, 'Ο Πανίερος Ναός της Αναστάσεως Ιεροσολύμων Το έργο του Κάλφα Κομνηνού 1808-1810', Θεσσαλονίκη : Ευρωπαϊκό Κέντρο Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Μνημείων, 2009.
30. K. C. Lampropoulos, A. Moropoulou, M. Korres. 'Ground penetrating radar prospection of the construction phases of the Holy Aedicula of the Holy Sepulchre in correlation with architectural analysis', Construction and Building Materials. 2017.
31. C.C. Spyrakos, C.A. Maniatakis, & A. Moropoulou, 'Preliminary Assessment of the Structural Response of the Holy Tomb of Christ Under Static and Seismic Loading', In International Conference on Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for Preservation of Cultural Heritagage, Springer, Cham. 2018.
32. A. Moropoulou, E. Korres, A. Georgopoulos, C. Spyrakos, Ch. Mouzakis, E. Lambrou, G. Pantazis, M. Kavvadas, P. Marinou, N. Moropoulos, V. Zafeiris, K. Lampropoulos, M. Apostolopoulou, Ch. Maniatakis, M. Agapakis, J. Agapakis, A. Fragkiadoulakis. Faithful

Rehabilitation. History, culture, religion, and engineering all intertwined in a recent project in Jerusalem to rehabilitate and strengthen the site believed to be the tomb of Jesus of Nazareth. Modern methods, including 3-D laser scanning, Non-Destructive Techniques and ground-penetrating radar, combined with careful documentation and design, revealed the secrets of how to help preserve and sustain the ancient site for future generations. s.l. : Journal of the American Society of Civil Engineers, 2017.

33. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou. Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*. 2011.
34. A. Santos Silva, A. Gameiro, J. Grilo, R. Veiga, A. Velosa. Long-term behavior of lime–metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition. *Applied Clay Science*. 2014.
35. 1015-1:1999, EN. Determination of Particle size distribution (by sieve analysis).
36. Μ. Οξένκιουν-Πετροπούλου, 'Φασματομετρικές μέθοδοι', Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 2008.
37. Murphy, D. B. *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. Canada : John Wiley & Sons, Inc., 2001.
38. M. M. Raith, P. Raase, J. Reinhardt. *Guide to thin section microscopy*. s.l. : Open Access Publication e-book, 2012. ISBN 978-3-00-037671-9.
39. 2010, EN15801:. *Conservation of Cultural Property-Test Methods-Determination of Water Absorption by Capillarity*. : Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation, 2010.
40. 13/83:, Normal. *Dosage of Soluble Salts Rome; Consiglio Nazionale delle Ricerche and Istituto Centrale del Restauro (CNR-ICR)*. Rome, Italy : s.n., 1983.
41. 4/80:, Normal. *Distribution of Pore Volume as a Function of Pore Diameter C.N.R.-I.C.R; Consiglio Nazionale delle Ricerche and Istituto Centrale del Restauro (CNR-ICR):* . Rome, Italy : s.n., 1980.
42. EN1015-11:2007:, *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 11. Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortars*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation: , 2007.
43. Anonymous. 'CIE L* a * b* Color Scale. s.l. : HunterLab, Applications Note, 1996.
44. Anonymous, 'What is color and How is Measured?' HunterLab The Color Management Company, Applications Note. 2000.
45. EN1015-3:2007:. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 3. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation: , 2007.
46. EN1015-6:2007:. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation: , 2007.
47. EN1015-8:2007:. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 8. Determination of Retained Water of Fresh Mortar*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation, 2007.
48. Α. Ζαργκλή, 'Αρχιτεκτονική Τεκμηρίωση Της Εσωτερικής Λιθοδομής Σε Διαδραστική Σχέση Με Την Ολοκληρωμένη Μελέτη Προστασίας Του Ιερού Κουβουκλίου Του Πανάγιου Τάφου Στα Ιεροσόλυμα'. Μεταπτυχιακή Εργασία, Επιβλέπουσα: Α. Μοροπούλου. Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση – Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, 2017.

49. A. Moropoulou, N. Zacharias, E.T. Delegou, M. Apostolopoulou, E. Palamara, A. Kolaiti. 'OSL mortar dating to elucidate the construction history of the Tomb Chamber of the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre in Jerusalem', *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2018.
50. Μ. Καλοφώνου, 'Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων Της Τοιχοποιίας Της Ανατολικής Και Δυτικής Όψης Του Ιερού Κουβουκίου Του Παναγίου Τάφου Στα Ιεροσόλυμα', Αθήνα : Διπλωματική Εργασία, Επιβλέπουσα: Α. Μοροπούλου, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2017.
51. J. P. Broomfield, 'Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair', CRC Press, 2006.
52. S. Gross, 'The Minerology of the Hatrurim Formation'. *GSI Bull.* 1977, 70.
53. Μ. Αποστολοπούλου, 'Μεθοδολογία Σχεδιασμού Συμβατών Και Επιτελεστικών Κονιαμάτων Αποκατάστασης Για την Αντισεισμική Προστασία Μνημείων Και Ιστορικών Κατασκευών', Υπό εκπόνηση Διδακτορική Διατριβή, Επιβλέπουσα: Καθ. Αντωνία Μοροπούλου, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
54. N. Bianco, A. Calia, G. Denotarpietro, P. Negro. 'Laboratory assessment of the performance of new hydraulic mortars for restoration', *Procedia Chemistry*. 2013