



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: "ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ"
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: "ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ"



ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

Μετρήσεις χαρακτηρισμού δειγμάτων κονιαμάτων από το
Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα



Μεταπτυχιακή φοιτήτρια: Λαμπρινή Σιούλα,
Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Επιβλέπουσα: Καθ. Αντωνία Μοροπούλου, Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016



ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

Μετρήσεις χαρακτηρισμού δειγμάτων κονιαμάτων από το
Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα

Μεταπτυχιακή φοιτήτρια: Λαμπρινή Σιούλα,
Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

Επιβλέπουσα: Καθ. Αντωνία Μοροπούλου, Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.
τ.Καθ. Εμμανουήλ Κορρές, Σχ. Α.Μ. Ε.Μ.Π.
Επικ. Καθ. Αστέριος Μπακόλας, Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.
Αικατερίνη Δελέγκου, Ε.Δ.Ι.Π. Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.
† Πέτρος Μούνδουλας, Ε.Δ.Ι.Π. Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.

Επιτροπή Εξέτασης

τ.Καθ. Εμμανουήλ Κορρές, Σχ. Α.Μ. Ε.Μ.Π.
Καθ. Ανδρέας Γεωργόπουλος, Σχ. Α.Τ.Μ. Ε.Μ.Π.
Καθ. Αντωνία Μοροπούλου, Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.
Καθ. Κωνσταντίνος Σπυράκος, Σχ. Π.Μ. Ε.Μ.Π.
Επικ. Καθ. Αστέριος Μπακόλας, Σχ. Χ.Μ. Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, με τίτλο "Μετρήσεις χαρακτηρισμού δειγμάτων κονιαμάτων από το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα", πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών μου, στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Προστασία Μνημείων". Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας μου, ήταν ο χαρακτηρισμός δειγμάτων κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, μέσω ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης ορυκτολογικών, πετρογραφικών, χημικών, φυσικών, μηχανικών ιδιοτήτων και μικροδομής.

Η ευκαιρία για την εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, μου δόθηκε μέσω της καινοτόμου έρευνας με τίτλο "Ολοκληρωμένο Πρόγραμμα Διαγνωστικής Έρευνας και Στρατηγικός Σχεδιασμός Υλικών και Επεμβάσεων Συντήρησης και Αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανιέρο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα", που ανέλαβε να διεξάγει το Ε.Μ.Π., μετά από προγραμματική συμφωνία με το Πατριαρχείο Ιεροσολύμων και σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση Φ1/232/Β1/404/25.08.2000.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου, στην Καθηγήτρια και επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής μου εργασίας κυρία Αντωνία Μοροπούλου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω τη συγκεκριμένη εργασία, για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της έρευνας, καθώς και για τη γνώση που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ επίσης, τον καθηγητή κύριο Εμμανουήλ Κορρέ που συμμετείχε στην επιτροπή υποστήριξης της εργασίας μου, όπως και τον Επίκ. Καθηγητή Αστέριο Μπακόλα, την Δρ. Αικατερίνη Δελέγκου για το χρόνο που μου διέθεσε και τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης και ολοκλήρωσης της εργασίας, και τέλος τον Δρ. Πέτρο Μούνδουλα, που μπορεί να έφυγε πολύ νωρίς από κοντά μας, αλλά ήταν μέχρι την τελευταία στιγμή αρωγός στην προσπάθειά μου, πολύτιμος συνεργάτης, αξιόλογος μηχανικός και κυρίως, αληθινός φίλος.





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: "ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ"
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: "ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ"

Λαμπρινή ΣΙΟΥΛΑ, Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Παπαρηγοπούλου 7, Αγία Παρασκευή Αττικής, 153 43, Ελλάδα

e-mail: lamprinisioula@gmail.com

Μεταπτυχιακή Εργασία:

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

ΑΠΟ ΤΟ ΙΕΡΟ ΚΟΥΒΟΥΚΛΙΟ ΤΟΥ ΠΑΝΑΓΙΟΥ ΤΑΦΟΥ ΣΤΑ ΙΕΡΟΣΟΛΥΜΑ

Επιβλέπουσα: Καθ. Αντωνία Μοροπούλου

Ημερομηνία παρουσίασης: 16/03/2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, με τίτλο "Μετρήσεις χαρακτηρισμού δειγμάτων κονιαμάτων από το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα", πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών μου, στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Προστασία Μνημείων". Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας μου, ήταν ο χαρακτηρισμός δειγμάτων κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στα Ιεροσόλυμα, μέσω ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης ορυκτολογικών, πετρογραφικών, χημικών, φυσικών, μηχανικών ιδιοτήτων και μικροδομής.

Συνολικά, εξετάστηκαν 6 δείγματα, εκ των οποίων τα 5 είναι κονιάματα πλήρωσης ή συνδετικά κονιάματα και το 1 επίχρισμα.

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Γενικό Θεωρητικό, στο οποίο γίνεται η προσέγγιση της μεθόδου χαρακτηρισμού που εφαρμόζεται (Μεθοδολογία της Αντίστροφης Μηχανικής Προσέγγισης), Ειδικό Θεωρητικό, στο οποίο παρουσιάζεται το Μνημείο του Παναγίου Τάφου, Πειραματικό, όπου παρατίθενται οι μέθοδοι μετρήσεων και παρατήρησης, τα μέσα μέτρησης, τα αποτελέσματα αυτών και τέλος, το κεφάλαιο Συμπερασμάτων και Προτάσεων.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2015-2016.





**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
INTERDISCIPLINARY POSTGRADUATE PROGRAMME: "PROTECTION OF MONUMENTS"
DIRECTION: "CONSERVATION OF BUILDING MATERIALS"**

Lamprini SIOULA, *Civil Engineer A.U.TH.*

7 Paparrigopoulou St., Agia Paraskevi - Athens, 153 43, Greece

e-mail: lamprinisioula@gmail.com

Postgraduate Thesis:

CHARACTERIZATION MEASUREMENTS OF MORTARS SAMPLES OF THE AEDICULE OF THE HOLY SEPULCHRE IN JERUSALEM

Supervisor: Professor Antonia Moropoulou

Thesis presented on: 16/03/2016

ABSTRACT

This postgraduate thesis, entitled "*Characterization measurements of mortars samples of the Aedicule of the Holy Sepulchre in Jerusalem*", held at the Laboratory of Materials Science and Engineering of the Chemical Engineering Department at the National Technical University of Athens, in the context of completion of my studies at the Interdisciplinary Postgraduate Programme "Protection of Monuments". The aim of my thesis was the characterization of mortars samples of the Aedicule of the Holy Sepulchre in Jerusalem, through qualitative and quantitative analysis of mineralogical, petrographical, chemical, physical, mechanical properties and microstructure.

In total, six samples, of which 5 are filling mortars or binders and 1 coating, got tested.

The study consists of four chapters. General Theoretical, which classifies the method applied (Methodology of Reverse Engineering), Special Theoretical which shows the Monument of the Holy Sepulchre, Experimental, listing the methods of measurement and observation, measurement instruments, their results and finally, the Conclusions and Recommendations section.

This postgraduate thesis was carried out during the 2015-2016 Academic Period.



Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Πρόλογος..... | 5 |
| Περίληψη..... | 7 |
| Abstract..... | 9 |
| A. Γενικό Θεωρητικό Μέρος | 15 |
| A1: Η Μεθοδολογία της Αντίστροφης Μηχανικής Προσέγγισης (Reverse Engineering)..... | 15 |
| A2: Ιστορικά Κονιάματα..... | 15 |
| B. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος | 29 |
| B1: Ναός της Αναστάσεως: Ιστορικά Στοιχεία – Επεμβάσεις Συντήρησης..... | 31 |
| Γ. Πειραματικό Μέρος | 35 |
| Γ1: Αρχές Μεθόδων | 37 |
| Μικροσκόπια Οπτικών Ινών..... | 37 |
| Πολωτικό Μικροσκόπιο | 38 |
| Περιθλασιμετρία Ακτινών Χ | 38 |
| Φασματοσκοπία Υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier | 39 |
| Μέθοδοι Θερμικής Ανάλυσης | 39 |
| Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA) | 39 |
| Ποροσιμετρία Υδραργύρου..... | 40 |
| Διαλυτά άλατα..... | 41 |
| Κοκκοδιαβάθμιση | 42 |
| Δοκιμές Μηχανικών Αντοχών | 43 |
| Γ2: Μακροσκοπική Παρατήρηση - Δειγματοληψία | 45 |
| Γ3: Αναλυτική Περιγραφή - Τεκμηρίωση | 50 |
| Γ4: Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων | 53 |
| Δ. Συμπεράσματα – Προτάσεις | 81 |
| Βιβλιογραφία | 85 |



Τη διπλωματική εργασία που εκπόνησα για τη λήψη του Διπλώματος του Πολιτικού Μηχανικού, την αφιέρωσα στους γονείς μου, Φανή και Ηλία, που πάντα με στήριζαν και με στηρίζουν.

Την παρούσα, οφείλω να την αφιερώσω στον Πέτρο.



A. Γενικό Θεωρητικό Μέρος

A1: Η Μεθοδολογία της Αντίστροφης Μηχανικής Προσέγγισης
(Reverse Engineering)

A2: Ιστορικά Κονιάματα



A1: Η Μεθοδολογία της Αντίστροφης Μηχανικής Προσέγγισης (ReverseEngineering)

Η ανάγκη της αναγνώρισης των παραδοσιακών δομικών υλικών προέκυψε πρόσφατα από το αυξημένο ενδιαφέρον για τις τεχνικές και τα χρησιμοποιούμενα στο παρελθόν υλικά. Αρνητικά αποτελέσματα σε πρόσφατα αποκατεστημένα κτίρια, λόγω της χρήσης ακατάλληλων υλικών, οδήγησαν στην επιτακτική ανάγκη έρευνας των ιστορικών υλικών.

Ωστόσο, η τεχνολογία παραγωγής των παραδοσιακών δομικών υλικών, όπως κονίες αρμών, επιχρίσματα, στεγανωτικά κονιάματα κ.λ.π., ενώ έχει αποδείξει αξιοσημείωτη μακροβιότητα, έχει απολεσθεί, δεδομένου ότι τα παραδοσιακά υλικά έχουν εκτοπισθεί από σύγχρονα υλικά, ευρείας εφαρμογής, όπως τσιμέντο και τεχνητά πολυμερή, μη συμβατά με τα αυθεντικά υλικά, με αποτέλεσμα να έχουν προκληθεί ανεπανόρθωτες ζημιές σε πολλά μνημεία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς. Πρόσφατες επεμβάσεις σε ιστορικές τοιχοποιίες, χρησιμοποιώντας μοντέρνα υλικά, απέδειξαν ότι τα υλικά αυτά είναι ασύμβατα με τα αυθεντικά, προκαλώντας συχνά σοβαρές καταστροφές φυσικοχημικής και μηχανικής φύσεως.

Η έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα στα παραδοσιακά δομικά υλικά, για την αποκάλυψη της τεχνολογίας τους, είναι περιορισμένη. Ωστόσο, μια συστηματική έρευνα, που έγινε τα τελευταία χρόνια σε αρχιτεκτονικά μνημεία στην περιοχή της Μεσογείου, αποκάλυψε την ακολουθούμενη τεχνολογία και προχώρησε στην ταξινόμηση των υλικών αυτών σε κατηγορίες ανά ιστορικές περιόδους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε πάνω σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων κονιαμάτων, προερχόμενα από μνημεία της αρχαίας Ελληνικής και Ελληνιστικής περιόδου, Ρωμαϊκά, Βυζαντινά, Μεταβυζαντινά και Ενετικά μνημεία, καθώς και σε δείγματα κονιαμάτων μεταγενέστερων αποκαταστάσεων, από οχυρωματικά έργα, μοναστήρια κι εκκλησίες και ιστορικά κτίρια της Μεγάλης Ελλάδας, της Ρόδου, της Κρήτης, της Κέρκυρας, του Αγίου Όρους, της Βενετίας και της Κωνσταντινούπολης.

Η μεθοδολογία, που αποδείχθηκε αξιόπιστη για την αξιολόγηση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των παραδοσιακών υλικών, είναι η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης (ReverseEngineering), η οποία ακολουθείται στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πρόκειται για τεχνολογία η οποία αφορά στην ολοκληρωμένη προσέγγιση των αυθεντικών υλικών. Με χρήση νέων τεχνικών είναι δυνατή η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και την τεχνολογία παραγωγής τους. Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής ξεκινά από την αναγνώριση των ιστορικών κονιαμάτων μέχρι και τη φάση της εφαρμογής των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων σε πιλοτική κλίμακα.

Τα σημαντικότερα σημεία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης και οι ακολουθούμενες φάσεις-από τη φάση της εξέτασης των ιστορικών υλικών μέχρι και την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης- συνοψίζονται παρακάτω:

1. Δειγματοληψία αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κονιαμάτων, που έχουν υποστεί φθορά (περιβαλλοντική, φυσική, μηχανική) στο μικρότερο δυνατό βαθμό.
2. Φυσικοχημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις, στα συνολικά δείγματα και σε επιμέρους κλάσματα των δειγμάτων, μετά από φυσικό διαχωρισμό.

-
3. Δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Αποτίμηση των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων, καθώς και κονιαμάτων/δομικών υλικών, με ενόργανες και μη καταστρεπτικές μεθόδους (στατικές και δυναμικές).

Βήματα μεθοδολογίας

Συνοπτικά, τα βήματα της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης παρατίθενται στη συνέχεια.

1η Φάση: Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων.

Προσδιορισμός και αποτίμηση των ορυκτολογικών, χημικών, φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των παραδοσιακών κονιαμάτων και της συμπεριφοράς τους σχετικά με την περιβαλλοντική δράση και τις μηχανικές καταπονήσεις. Επιλογή των πρώτων υλών παραγωγής για τη σύνθεση των νέων υλικών.

2η Φάση: Παρασκευή Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Σύνθεση κονιαμάτων αποκατάστασης, αποτελούμενων από μίγματα διαφόρων αναλογιών, ποσοστών και κλασμάτων κοκκοδιαβάθμισης συνδετικής ύλης, αδρανών, πρόσθετων, υπό διάφορες συνθήκες και με ποικίλους τρόπους.

3η Φάση: Αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Αξιολόγηση των νέων υλικών αποκατάστασης και των τεχνικών θεμελιωδών χαρακτηριστικών τους, σε σχέση με τα παραδοσιακά σε εργαστηριακή κλίμακα. Εργαστηριακή προσομοίωση για τη μελέτη της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής αντίστασης των κονιαμάτων στη φθορά, σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης. Δοκιμαστική εφαρμογή σε εργαστηριακή κλίμακα και σε πιλοτική τοιχοποιία, και αξιολόγηση της συμπεριφοράς με επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές.

4η Φάση: Αριστοποίηση Παρασκευής Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Επιλογή, σχεδιασμός και αριστοποίηση της τεχνολογίας παραγωγής -προτυποποίηση προϊόντος, με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από την προηγούμενη φάση.

5η Φάση: Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Παραγωγή του προτυποποιημένου προϊόντος, σε ευρεία κλίμακα και εφαρμογή του σε πιλοτική κλίμακα, σε αντιπροσωπευτικά ιστορικά μνημεία.

A2: Ιστορικά κονιάματα**Εργαστηριακοί έλεγχοι για την αναγνώριση της τεχνολογίας των ιστορικών κονιαμάτων – Μέθοδοι αναγνώρισης**

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων, όσον αφορά τις χαρακτηριστικές παραμέτρους μικροδομής τους, την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών, το είδος της συνδετικής ύλης, αλλά και των χρησιμοποιούμενων αδρανών, καθώς και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, βάσει αναλυτικών μεθόδων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το κονίαμα είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από πρόσθετα και αδρανή, τα οποία υπό συνθήκες μπορούν να αντιδράσουν με τη συνδετική ύλη, και από πρόσμικτα που εξυπηρετούν άλλους σκοπούς. Ταυτόχρονα η διαδικασία παραγωγής των ιστορικών κονιαμάτων, καθώς και οι χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή και ανάλογα με την ιστορική περίοδο και την εφαρμογή-χρήση του κονιάματος. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τα κονιάματα σύνθετα συστήματα. Επομένως, απαιτείται η χρησιμοποίηση περισσότερων από μιας μεθόδου για τον ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό των αυθεντικών κονιαμάτων. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό ενός κονιάματος, καθώς και οι συλλεγόμενες πληροφορίες, παρατίθενται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

| Μέθοδος/Όργανα Ανάλυσης | Πληροφορίες |
|---|--|
| Οπτική μικροσκοπία Ηλεκτρονική μικροσκοπία Μικροσκοπία οπτικών ινών | Ορυκτολογικός και πετρογραφικός χαρακτηρισμός. Φυσικοχημική ανάλυση. |
| Θερμικές αναλύσεις (DTA, TG/DTG, DSC, TMA) | Ποιοτικός, ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων. Μέτρηση συντελεστή θερμικής διαστολής. |
| Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD) ΠοροσιμετρίαHg | Προσδιορισμός κρυσταλλικών φάσεων. Μελέτη μικροδομής. |
| Καλιμετρία | Περιεκτικότητα σε ανθρακικά μέσω μέτρησης του εκλυόμενου CO ₂ . |
| Φασματοφωτομετρία IR | Ποιοτική εκτίμηση ανόργανων, οργανικών φάσεων. |
| Φωτοηλεκτρονική ακτίνων Χ | Μελέτη διεπιφάνειας κονίας/αδρανών και κονιαμάτων/δομικού υλικού |
| Κοκκοδιαβάθμιση | Αναλογία αδρανών/συνδετικής κονίας (κ.β.). Διαστάσεις των κλασμάτων των αδρανών. |
| Test μηχανικών αντοχών | Αποτίμηση μηχανικών αντοχών κονιαμάτων και κονιαμάτων/δομικών υλικών |

Πίνακας 1.1 Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό κονιαμάτων

Παρακάτω, παρατίθενται αναλυτικότερα οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό ενός κονιάματος.

1. Οπτικό μικροσκόπιο (ΟΜ): Οι μέθοδοι για την πετρογραφική μελέτη των ορυκτών είναι πολύ χρήσιμες και για τα κονιάματα. Η παρατήρηση λεπτών τομών στο οπτικό μικροσκόπιο δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την ορυκτολογική σύνθεση των αδρανών, τις διαστάσεις των κόκκων, την παρουσία πόρων και μικρορωγμών και την αναλογία αδρανών/κονίας. Πρέπει, ωστόσο, να λαμβάνεται υπόψιν ότι η μορφολογία των συνδετικών υλικών σε ένα κονίαμα μεταβάλλεται από τα επαναλαμβανόμενα φαινόμενα διάλυσης-ανακρυστάλλωσης που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του χρόνου, λόγω των ατμοσφαιρικών δράσεων. Η εκάστοτε κατάσταση του ιστορικού κονιάματος είναι πολύ διαφορετική από αυτή που είχε αμέσως μετά τη σκλήρυνση. Αυτό περιπλέκει αρκετά την μελέτη, ταυτόχρονα όμως επιτρέπει τη διερεύνηση της εξέλιξης του υλικού στο χρόνο. Η τεχνική είναι πολύ χρήσιμη για το χαρακτηρισμό των αδρανών που περιέχονται στα υδραυλικά και αερικά κονιάματα.

2. Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD): Η περίθλαση ακτίνων Χ επιτρέπει την ανίχνευση κρυσταλλικών ενώσεων σε δείγμα κονιοποιημένου κονιάματος σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 5%, μολονότι αυτό το όριο εξαρτάται από τον τύπο της ένωσης και την παρουσία ατελειών στους κρυστάλλους της. Οι μη κρυσταλλικές φάσεις που απαντώνται σε διάφορες κατηγορίες κονιαμάτων δεν παρουσιάζουν καθαρές κορυφές, αλλά προκαλούν την αύξηση του θορύβου σε διάφορες ζώνες του διαγράμματος περίθλασης. Τα άμορφα συστατικά, όπως οι ηφαιστειογενείς υαλώδεις φάσεις των ποζολανών, το διαλυτό πυρίτιο ή τα άμορφα αργιλοπυριτικά που σχηματίζονται κατά τη σκλήρυνση των υδραυλικών κονιών, δεν είναι ανιχνεύσιμα και μπορούν αντίθετα να δημιουργήσουν προβλήματα στην αναγνώριση των κρυσταλλικών φάσεων σε μικρά ποσοστά. Στα κονιάματα συναντάται συνήθως ένας μεγάλος αριθμός ενώσεων, που έχει σαν αποτέλεσμα την αλληλοεπικάλυψη κορυφών, γεγονός που αυξάνει τη δυσκολία στην ταυτοποίηση των φάσεων ειδικότερα για τις φάσεις που βρίσκονται σε μικρότερα ποσοστά. Μεγάλο πρόβλημα, στην αναγνώριση φάσεων, δημιουργεί η παρουσία του ασβεστίτη σε μεγάλα ποσοστά, είτε στα αδρανή είτε στη συνδετική ύλη, γεγονός που μπορεί να ξεπεραστεί εμπλουτίζοντας το δείγμα σε ενώσεις με τα μικρότερα ποσοστά, με χρήση αραιού οξέος. Με την περίθλαση ακτίνων Χ επιτυγχάνεται ποιοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων. Στην πραγματικότητα ο ποσοτικός προσδιορισμός τόσο σύνθετων μιγμάτων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολος. Ωστόσο, είναι δυνατό να εξαχθούν πληροφορίες όσον αφορά τη σχετική ποσότητα των ενώσεων, συγκρίνοντας την ένταση των κορυφών που παρατηρούνται στα διαγράμματα περίθλασης.

3. Φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR): Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη και πολύ αποτελεσματική για την ανίχνευση χαρακτηριστικών ενώσεων των κονιαμάτων, όπως ανθρακικό ασβέστιο, δολομίτης, αργιλοπυριτικά, υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου, υδρομαγνησίτης, γύψος κ.λ.π. ή προϊόντα φθοράς όπως νιτρικά, οξαλικά, θειικά κ.λ.π. και ενδεχόμενες οργανικές ενώσεις. Είναι ποιοτική και ημι-ποσοτική μέθοδος, απαιτείται πολύ μικρή ποσότητα δείγματος και μπορεί να βοηθήσει στην ταυτοποίηση ενώσεων σε μικρά ποσοστά, που παρουσιάζουν προβλήματα ανίχνευσης με τις θερμικές μεθόδους.

4. Θερμικές Μέθοδοι: Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των θερμικών μεταβολών που υφίστανται τα κονιάματα θερμαινόμενα σε μια θερμοκρασιακή κλίμακα 25-1000°C και με ρυθμό 10°C/min. Επιτυγχάνεται ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Με χρήση της Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA) καταγράφονται οι ενεργειακές μεταβολές που υφίσταται το υλικό σε αυτή τη θερμοκρασιακή περιοχή και εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα σχετικά με τα περιεχόμενα στο κονίαμα υλικά. Ταυτόχρονα με τη Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (TG) καταγράφονται οι αντίστοιχες μεταβολές βάρους, βάσει των οποίων καθορίζονται

ποσοτικά τα διάφορα συστατικά. Κατ' αυτόν το συνδυαστικό τρόπο επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της φύσης του συνδετικού υλικού και των αδρανών με παράλληλες αναλυτικές μετρήσεις στα επιμέρους κλάσματα. Ειδικότερα, για θερμοκρασίες μικρότερες των 120°C η μεταβολή οφείλεται στην εξάτμιση της υγρασίας, στο θερμοκρασιακό διάστημα 120-200°C αποβάλλεται το νερό των ένυδρων αλάτων (π.χ. γύψος), στο διάστημα μέχρι τους 600°C αποβάλλεται το χημικά δεσμευμένο νερό των ένυδρων αργιλοπυριπικών φάσεων, εφόσον απουσιάζουν οργανικές προσμίξεις, ενώ πάνω από 600°C αποσυντίθενται οι ανθρακικές ενώσεις απελευθερώνοντας CO₂.

5. ΠοροσιμετρίαHg: Με την ποροσιμετρία υδραργύρου εξετάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι μικροδομής των κονιαμάτων. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι ο ολικός ειδικός όγκος, η φαινόμενη πυκνότητα, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα των πόρων και το ολικό πορώδες. Από την κατανομή μεγέθους πόρων ως προς τον ολικό προσροφούμενο όγκο εξάγονται συμπεράσματα για την πορώδη δομή των κονιαμάτων. Για παράδειγμα, τα κονιάματα με τσιμέντο παρουσιάζουν μια τάση ανάπτυξης μικροπορώδους δομής, ενώ εκείνα με ασβέστη-άμμο παρουσιάζουν, συνήθως σε σημαντικό ποσοστό, μεγάλους πόρους. Το πορώδες επηρεάζεται από τον τρόπο εφαρμογής του κονιάματος και ειδικότερα από την ποσότητα του νερού, κατά την ανάμιξη και από τη συμπίεση που υφίσταται κατά την εφαρμογή του. Αυξάνοντας την ποσότητα του νερού, αυξάνει το πορώδες του σκληρυνόμενου κονιάματος, ενώ αν το νωπό ακόμη κονίαμα συμπιεστεί, το πορώδες μειώνεται. Σημειώνεται δε, ότι το πορώδες των αδρανών προσθέτων στο μίγμα του κονιάματος επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της μέτρησης.

6. Περιεκτικότητα σε ανθρακικά με ογκομετρικό προσδιορισμό (Calcimetry): Με αυτή τη μέθοδο προσδιορίζεται το περιεχόμενο ανθρακικών ενώσεων (ασβεστίτης, δολομίτης) στα κονιάματα, επιδρώντας στο κονιορτοποιημένο δείγμα με υδροχλωρικό οξύ 10% και μετρώντας τον όγκο του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Με τη μέθοδο αυτή, προσδιορίζεται ο περιεχόμενος ασβεστίτης και δολομίτης, αφού η διάσπασή τους ακολουθεί διαφορετική κινητική (με πιο γρήγορη αυτή του ασβεστίτη). Η μέθοδος είναι αρκετά γρήγορη και πιο αντιπροσωπευτική σε σύγκριση με τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης.

7. Κοκκοδιαβάθμιση: Η κοκκοδιαβάθμιση είναι ο φυσικός διαχωρισμός του δείγματος, χρησιμοποιώντας κόσκινα με διάμετρο οπών 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000μm. Το τελευταίο κλάσμα που διαπερνά το κόσκινο των 63μm λαμβάνεται ως συνδετική ύλη, παρόλο που λεπτόκοκκα αδρανή είναι δυνατό να βρίσκονται σε αυτό το κλάσμα, ενώ τα υπόλοιπα κλάσματα αντιστοιχούν στα αδρανή υλικά. Έτσι, εξάγονται συμπεράσματα για την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή, καθώς και για την κοκκοδιαβάθμιση των αδρανών.

8. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM): Η τεχνική αυτή επιτρέπει την παρατήρηση των κονιαμάτων σε μεγάλες μεγεθύνσεις. Για την καλύτερη παρατήρηση, τα δείγματα πρέπει να είναι εγκιβωτισμένα σε ρητίνη (στιλπνές τομές). Λαμβάνονται πληροφορίες για την μικροδομή, τη φύση των αδρανών και της μήτρας, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνεια αδρανών-μήτρας και κονιάματος-δομικού λίθου. Με τη βοήθεια της μικροανάλυσης (EDX) είναι δυνατό να ταυτοποιηθούν πολλές από τις ενώσεις που συναντώνται στα κονιάματα, μέσω στοιχειακής ημι-ποσοτικής ανάλυσης.

9. Μηχανικές αντοχές: Εκτιμάται η εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων σε μικρά δείγματα βάσει της δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού επί θραυσμάτων κονιαμάτων (fragmenttestmethod). Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται λόγω της αδυναμίας αφαίρεσης δειγμάτων κονιαμάτων μεγάλων διαστάσεων από ιστορικές τοιχοποιίες, προκειμένου να εκτιμηθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη). Έτσι, βάσει της προαναφερθείσας μεθόδου χρησιμοποιούνται θραύσματα από τα ιστορικά κονιάματα, τα οποία εγκιβωτίζονται

μέσα σε σκληρή μήτρα από εποξειδική ρητίνη και υποβάλλονται σε μηχανικές καταπονήσεις προς εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής.

Κατάταξη ιστορικών κονιαμάτων

Βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας και με επεξεργασία και συσχέτιση των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων, επιτρέπεται η ταξινόμηση των κονιαμάτων σε κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση της συνδετικής ύλης και των αδρανών υλικών.

Αναλυτικότερα, η κατάταξη πραγματοποιείται στις εξής κατηγορίες:

1. Συμβατικά ασβεσπιτικά κονιάματα: παρασκευάζονται με υδράσβεστο και αδρανή ασβεσπιτικής ή αργιλλοπυριτικής φύσης, ή μίγμα και των δύο σε διάφορες αναλογίες, με συνήθη αναλογία υδρασβέστου/αδρανών 1:3 κατά βάρος.
2. Κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό: παρασκευάζονται με υδράσβεστο ως συνδετική ύλη και με θραυσμένο κεραμικό ως αδρανές σε διάφορες κοκκοδιαβαθμίσεις, ανάλογα με την εφαρμογή τους. Τα κονιάματα αυτά, παρουσιάζουν υδραυλικά χαρακτηριστικά από τις αντιδράσεις ποζολανικής φύσης, που πραγματοποιούνται στη διεπιφάνεια συνδετικής ύλης/κεραμικού. Η αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών κατ' όγκο κυμαίνεται από 1:2 - 1:4, ανάλογα με την ειδική εφαρμογή τους. Χαρακτηριστική ιδιότητα των κονιαμάτων αυτών, είναι η αυξημένη ελαστικότητά τους και η ικανότητα αντοχής τους σε τάσεις.
3. Κονιάματα υψηλής επί τόπου σβέσης της ασβέστου: παρασκευάζονται με ανάμιξη επί τόπου του CaO με τα αδρανή και τα ενεργά αδρανή και προσθήκη νερού. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, κατά την επί τόπου σβέσης της ασβέστου βοηθούν στην αντίδραση των ποζολανικών προσθέτων με την παραγόμενη υδράσβεστο. Τα κονιάματα αυτά, παρουσιάζουν σημαντικές υδραυλικές ιδιότητες και μηχανικές αντοχές μεγαλύτερες από τα κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό. Από τις μεθόδους ανάλυσης έχει εκτιμηθεί για τα κονιάματα αυτά μια μέση αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών 1:3.
4. Υδραυλικά κονιάματα: παρασκευάζονται από υδραυλική άσβεστο και ενεργά αδρανή (ποζολάνη), με μέση τιμή αναλογίας συνδετικής ύλης/αδρανών 1:3. Τα κονιάματα αυτά, παρουσιάζουν αξιόλογες μηχανικές αντοχές, λόγω της ανάπτυξης ενώσεων με υδραυλικό χαρακτήρα, αναπτύσσοντας ταυτόχρονα συμβατές μικροδομές με τα ιστορικά δομικά στοιχεία των τοιχοποιιών, καθώς επίσης, και αξιόλογη μακροβιότητα.
5. Κονιάματα με γύψο: Τα κονιάματα αυτά είναι παρασκευασμένα από γύψο, ως συνδετική ύλη, αναμειγμένη με διάφορα αδρανή, και σε αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών 1:2 - 1:3. Τα κονιάματα αυτά, παρουσιάζουν συνήθως χαμηλές μηχανικές αντοχές, που βελτιώνονται με πρόσθετα οργανικής και ανόργανης φύσης, ανάλογα με την εφαρμογή τους.
6. Κονιάματα διπλής εσωτερικής τοιχοποιίας: παρασκευάζονται από υδράσβεστο, αδρανή και ενεργά αδρανή σε διάφορες αναλογίες, ή από υδράσβεστο και ενεργά αδρανή με παράλληλη προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της εφαρμογής τους. Η υψηλή θερμοκρασία, που αναπτύσσεται ευνοεί την αλληλεπίδραση συνδετικού υλικού ενεργών αδρανών, με συνέπεια το σχηματισμό αργιλοπυριτικών υδραυλικών φάσεων. Παρουσιάζουν σημαντικές μηχανικές αντοχές.

Η κατηγοριοποίηση των ιστορικών κονιαμάτων μπορεί επίσης να γίνει βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης. Ο χαρακτηρισμός των κονιαμάτων με θερμικές μεθόδους αποκαλύπτει την ταυτότητα πολλών συστατικών, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης αντιδράσεων, που σχετίζονται με την ελεγχόμενη θέρμανση του κονιάματος. Έτσι, βάσει των θερμικών μεθόδων ανάλυσης, η κατηγοριοποίηση των ιστορικών κονιαμάτων έχει ως εξής:

1. **Τυπικά ασβεστιτικά κονιάματα:** Οι μετρήσεις TG δείχνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική απώλεια βάρους μέχρι τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του ασβεστίτη, δηλαδή μεταξύ 820-840°C, όπου παρατηρείται απώλεια βάρους 30% σε CO₂ (ισοδύναμο με πάνω από 68% CaCO₃). Τα κονιάματα αυτά, δεν παρουσιάζουν υγροσκοπική συμπεριφορά δεδομένου ότι μέχρι τους 120°C η απώλεια βάρους είναι μικρότερη του 1%. Το συνδεδειγμένο υλικό είναι καλώς κρυσταλλωμένος ασβεστίτης.
2. **Κονιάματα θραυσμένου κεραμικού:** Οι καμπύλες DTG δείχνουν μία σειρά κορυφών: υγροσκοπικό νερό σε ποσοστό 1-2% σε θερμοκρασία περίπου 80°C και παράλληλα δεσμευμένο νερό σε ποσοστό πάνω από 3,5%. Το νερό αυτό είναι δεσμευμένο στα διάφορα αργιλοπυριτικά ένυδρα σε θερμοκρασίες 200-260°C, 480-520-580°C εντοπίζεται δε, όταν ανιχνεύονται ένυδρες ορυκτές φάσεις όπως μοντμοριλονίτης ή ιλλίτης. Η απώλεια βάρους λόγω του CO₂ ποικίλει από 6-33% και παρατηρείται κατά τη διάρκεια αποσύνθεσης του ασβεστίτη σε θερμοκρασίες 760-820°C. Κονιάματα αυτής της κατηγορίας βρέθηκαν σε βυζαντινά, ενετικά και οθωμανικά μνημεία στη Ρόδο στην Κρήτη και στην Αγία Σοφιά. Χαρακτηρίζονται από αντιδράσεις φυσικοχημικού χαρακτήρα ανάμεσα στο κεραμικό και το Ca(OH)₂.
3. **Υψηλής θερμοκρασίας έψησης κονιάματα (Hotlimetechnologymortars):** Κονιάματα της τεχνολογίας αυτής, έχουν βρεθεί σε μνημεία του Αγίου Όρους. Το χαρακτηριστικό τους είναι οι μεγάλες τιμές σε δοκιμές εφελκυσμού, ακόμα μεγαλύτερες από αυτές που λαμβάνονται στα κονιάματα θραυσμένου κεραμικού. Οι μετρήσεις DTA-TG δείχνουν 1% φυσικά ροφημένο νερό στις θερμοκρασίες 50 και 120°C και 3-6% απώλεια βάρους σε θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 200-600°C, η οποία οφείλεται στο δεσμευμένο νερό στα αργιλοπυριτικά ένυδρα. Χαρακτηριστικές είναι οι κορυφές στους 785-815°C. Οι κορυφές αυτές, αποδίδονται στην αποσύνθεση της υδραυλικής μήτρας ποζολανικού χαρακτήρα πλούσιας σε μαγνήσιο.
4. **Κονιάματα Opuscementicium:** Τα κονιάματα αυτά αποτελούν μίγματα από χαλίκια, άμμο, και υδραυλικές ενώσεις. Οι καμπύλες TG δείχνουν απώλεια βάρους 1-4% από φυσικά ροφημένο νερό στους 80°C. Δεσμευμένο νερό 3-16% σε αργιλοπυριτικά ένυδρα δείχνουν κορυφές στους 280, 450 και 480°C. Αυτά είναι χαρακτηριστικά σημεία κορυφών τα οποία χαρακτηρίζουν τις ποζολανικές αντιδράσεις. Κορυφή για τη διάσπαση του CaCO₃ λαμβάνεται στη θερμοκρασιακή περιοχή 740-820°C. Η απώλεια σε CO₂ υπολογίζεται μεταξύ 10-20%.
5. **Κονιάματα με γύψο:** Σ' αυτήν την κατηγορία κονιαμάτων, οι μόνες κορυφές που παρατηρούνται αφορούν στην αποσύνθεση του γύψου στις θερμοκρασίες που έχουν προαναφερθεί και ακολούθως στην αποσύνθεση του CaCO₃ τους 760°C.

Εύρος των ορίων αποδοχής των φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που προκύπτουν από την εξέταση των ιστορικών κονιαμάτων

Στη βάση των μετρούμενων φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των ιστορικών κονιαμάτων της κάθε κατηγορίας είναι δυνατός ο κατά προσέγγιση καθορισμός του εύρους των ορίων αποδοχής των νέων κονιαμάτων αποκατάστασης, για την κάθε κατηγορία ξεχωριστά.

Οι τεχνικές και φυσικο-μηχανικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν για τον καθορισμό των αποδεκτών ορίων είναι:

- Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών.
- Τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικής ύλης/αδρανών.
- Οι παράμετροι μικροδομής που προέρχονται από τις μετρήσεις ποροσιμετρίας και αντοχής σε εφελκυσμό, βάσει της δοκιμής θραυσμάτων.

Οι χημικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν είναι:

- Ποσοστό υγροσκοπικού νερού.
- Περιεχόμενο CO₂ (%).
- Περιεχόμενο υδραυλικού νερού (%).
- Λόγος CO₂/H₂O, ο οποίος εκφράζει τον υδραυλικό χαρακτήρα του μίγματος. Τα όρια αποδοχής, χαρακτηριστικά, των ιστορικών κονιαμάτων για κάθε κατηγορία, αναφέρονται παρακάτω.

Κονιάματα θραυσμένου κεραμικού – ασβέστου

Τα ασβεσπιτικά κονιάματα θραυσμένου κεραμικού παρασκευάζονται με άσβεστο ως συνδετικό υλικό και κεραμάλευρο, το οποίο δρα ως ποζολανικό πρόσθετο, και θραυσμένο κεραμικό ως ενεργό αδρανές ή καθαρό αδρανές σε ποικίλες κοκκοδιαβαθμίσεις. Αυτά τα κονιάματα παρουσιάζουν υδραυλικά χαρακτηριστικά προερχόμενα από τις ποζολανικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνεια συνδετικού/κεραμικού. Οι λόγοι ανάμιξης συνδετικού/αδρανών ποικίλουν από 1/2 ως 1/4 κατά βάρος, με μέση τιμή το 1/3.

Τα δεδομένα μικροδομής παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 170-290mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,5-1,9g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,1-0,8μm
- Ειδική επιφάνεια: 3,5-15m²/g
- Συνολικό πορώδες: 32-43%
- Η μετρούμενη αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 0,5-1,2MPa

Τυπικά ασβεσπιτικά κονιάματα

Τα ασβεσπιτικά κονιάματα παρασκευάζονται με άσβεστο ως συνδετικό υλικό και αδρανή ανθρακικής ή αργιλλοπυριπικής σύστασης ή μίγματος αυτών, σε διάφορα ποσοστά. Τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικού/αδρανών ποικίλουν από 1/1 μέχρι 1/4

κατά βάρος, με μέση τιμή το 1/3. Τα δεδομένα μικροδομής παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 170-320mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,5-1,8g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,8-3,3μm
- Ειδική επιφάνεια: 1,3-3,3m²/g
- Συνολικό πορώδες: 30-45%
- Η μετρούμενη αντοχή σε εφελκυσμό είναι γενικά χαμηλότερη <0,35MPa

Κονιάματα υδραυλικής ασβέστου

Τα υδραυλικά κονιάματα παρασκευάζονται με υδραυλική άσβεστο ως συνδετικό υλικό και αδρανή ανθρακικής ή αργιλλοπυριτικής σύστασης ή μίγματος αυτών σε διάφορα ποσοστά. Το ποσοστό ανάμιξης συνδετικού/αδρανών κυμαίνεται από 1/1,5 ως 1/4 κατά βάρος, με μέση τιμή 1/2.

Τα δεδομένα μικροδομής παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 90-230mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,7-2,1g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,1-3,5μm
- Ειδική επιφάνεια: 2,5-13,5m²/g
- Συνολικό πορώδες: 18-40%

Κονιάματα υψηλής θερμοκρασίας έψησης

Τα κονιάματα υψηλής θερμοκρασίας έψησης παρασκευάζονται με ανάμιξη της ασβέστου με τα αδρανή ανθρακικής ή αργιλλοπυριτικής σύστασης. Τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικού/αδρανών ποικίλουν από 1/2-1/4 με μέση τιμή 1/3.

Τα δεδομένα μικροδομής παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 110-180mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,7-1,9g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,3-0,8μm
- Ειδική επιφάνεια: 2,5-4,7m²/g
- Συνολικό πορώδες: 20-30%
- Η μετρούμενη αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 0,85-1,5MPa

Κονιάματα ασβέστου – ποζολανικών προσθέτων

Τα κονιάματα αυτά, παρασκευάζονται με άσβεστο ως συνδετικό υλικό και φυσική ποζολάνη και με αδρανή ανθρακικής ή αργιλλοπυριτικής σύστασης. Αυτά τα κονιάματα παρουσιάζουν υδραυλικά χαρακτηριστικά, οφειλόμενα στις ποζολανικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ασβέστου και φυσικής ποζολάνης. Τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικού/αδρανών κυμαίνονται από 1/2 ως 1/4 κατά βάρος, με μέση τιμή 1/3.

Τα δεδομένα ποροσιμετρίας παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 160-265mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,6-1,9g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,1-1,5μm
- Ειδική επιφάνεια: 3-14m²/g
- Συνολικό πορώδες: 30-42%

Εσωτερικά κονιάματα διπλής τοιχοποιίας

Αποτελούν ειδική κατηγορία κονιαμάτων, παρασκευασμένα για συγκεκριμένη τεχνική κατασκευής. Το συνδετικό υλικό είναι συνήθως μια υδραυλική άσβεστος ή συνδετικά υλικά, που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία υψηλής θερμοκρασίας έψησης με αδρανή ποικίλων κοκκοδιαβαθμίσεων και συστατικά άμμου, θραυσμένης πέτρας κ.ά. Τα αδρανή είναι ανθρακικής ή αργιλλοπυριτικής σύστασης και σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατό να εκτιμηθούν τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικού/αδρανών, καθώς και η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών. Τα ακόλουθα αποτελέσματα αναφέρονται μόνο στο πλέγμα των κονιαμάτων, για τους προαναφερόμενους λόγους.

Τα δεδομένα ποροσιμετρίας παρουσιάζουν τα εξής όρια αποδεκτών τιμών:

- Ολικός ειδικός όγκος: 117-220mm³/g
- Φαινόμενη πυκνότητα: 1,79-2,12g/cm³
- Μέση ακτίνα των πόρων: 0,2-20,6μm
- Ειδική επιφάνεια: 1,2-4,7m²/g
- Συνολικό πορώδες: 25-39%

Συνοπτικά, τα εύρη των ορίων αποδοχής παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

| Είδος κονιαμάτων | Ολικός ειδικός όγκος (mm ³ /g) | Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³) | Μέση ακτίνα πόρων (μm) | Ειδική επιφάνεια (m ² /g) | Ολικό πορώδες (%) |
|--------------------|---|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Ασβεστικά | 170-320 | 1,5-1,8 | 0,8-3,3 | 1,3-3,3 | 30-45 |
| Θρ. Κεραμικό | 170-290 | 1,5-1,9 | 0,1-0,8 | 3,5-15 | 32-43 |
| Υψηλής σβέσης | 110-180 | 1,7-1,9 | 0,3-0,8 | 2,5-4,7 | 20-30 |
| Υδραυλικά | 90-230 | 1,7-2,1 | 0,1-3,5 | 2,5-13,5 | 18-40 |
| Ασβέστη-Ποζολάνη | 160-265 | 1,6-1,9 | 0,1-1,5 | 3-14 | 30-42 |
| Διπλής τοιχοποιίας | 117-220 | 1,8-2,1 | 0,2-20,6 | 1,2-4,7 | 25-39 |

Πίνακας 1.2 Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά της μικροδομής

| Είδος κονιαμάτων | Υγροσκοπικό Νερό (%) | Υδραυλικό Νερό (%) | Περιεχόμενο CO ₂ (%) | Λόγος CO ₂ /H ₂ O | Εφελκυστική Αντοχή (MPa) |
|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|---|--------------------------|
| Ασβεστικά | <1 | 2-4 | >30 | >8,5 | <0,35 |
| Θραυσμένο Κεραμικό | 1,5-4,5 | 2,3-5,3 | <20 | 3,2-6,5 | 0,5-1,2 |
| Υψηλής έσβεσης | 0,7-1,5 | 2-4,6 | >25 | 6-15 | 0,85-1,5 |
| Υδραυλικά | 1-2,5 | 4-7,2 | <25 | 1,8-6,1 | - |
| Ασβέστη-Ποζολάνα | 2-4 | 3,3-5,4 | <22 | 1,3-5,1 | - |
| Διπλής τοιχοποιίας | - | 5,6-5,9 | <30 | 3,36-5,13 | - |

Πίνακας 1.3 Όρια αποδοχής με βάση τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης



Β. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος

**Β1: Ναός της Αναστάσεως
Ιστορικά στοιχεία και Επεμβάσεις Συντήρησης**



B1: Ναός της Αναστάσεως: Ιστορικά Στοιχεία – Επεμβάσεις Συντήρησης

Ο Ναός της Αναστάσεως^[1], που ονομάζεται επίσης και Εκκλησία της Αναστάσεως, από τους Ορθόδοξους Χριστιανούς, είναι μια εκκλησία μέσα στη χριστιανική συνοικία της Παλαιάς Πόλης της Ιερουσαλήμ.

Η εκκλησία αποτελείται, σύμφωνα με τις παραδόσεις που χρονολογούνται τουλάχιστον από τον τέταρτο αιώνα, από τις δύο πιο ιερές τοποθεσίες της Χριστιανοσύνης: τον τόπο όπου ο Ιησούς από τη Ναζαρέτ σταυρώθηκε^[2], γνωστό ως «Calvary» στα λατινικά και «Γολγοθά» στα ελληνικά,^[3] και το κενοτάφιο του Ιησού (ο χώρος όπου είχε ταφεί και αναστήθηκε). Μέσα στον Πρόναο συναντά κανείς τους τελευταίους τέσσερις (ή, από κάποιους ορισμούς, πέντε) σταθμούς της Vía Dolorosa, που εκπροσωπούν τα τελευταία επεισόδια των Παθών του Ιησού. Η εκκλησία υπήρξε σημαντικός προσορισμός για τους χριστιανούς προσκυνητές από τη δημιουργία της τον 4ο αιώνα, ως παραδοσιακός τόπος της Αναστάσεως του Χριστού, ή Εκκλησία της Αναστάσεως (αρχική ελληνική ονομασία του).

Σήμερα, το ευρύτερο συγκρότημα που έχει συσσωρευτεί κατά τη διάρκεια των αιώνων γύρω από την Εκκλησία του Παναγίου Τάφου, χρησιμεύει ως έδρα του Ελληνικού Πατριαρχείου Ιεροσολύμων, ενώ ο έλεγχος του ίδιου του ναού πραγματοποιείται από κοινού, από πολλά χριστιανικά δογμάτα, που παραμένουν αμετάβλητα για πάνω από 160 χρόνια. Τα κύρια δόγματα είναι η Ελληνική Ορθόδοξη Εκκλησία, η Αρμενική Ορθόδοξη Εκκλησία και η Ρωμαιοκαθολική. Σε μικρότερο βαθμό συμμετέχουν οι Αιγύπτιοι Κόπτες, Σύροι και Αιθίοπες. Οι Προτεστάντες, συμπεριλαμβανομένων των Αγγλικανών δεν έχουν μόνιμη παρουσία στην Εκκλησία και θεωρούν τον Γολγοθά στην Ιερουσαλήμ, ως πραγματικό τόπο της Σταύρωσης και της Ανάστασης του Ιησού, ή τουλάχιστον ως καταλληλότερο χώρο για να τιμήσουν αυτά τα γεγονότα.

Ιστορία

Κατασκευή

Σύμφωνα με τον Ευσέβιο Καισαρείας, ο Ρωμαίος αυτοκράτορας Αδριανός, τον 2ο αιώνα μ.Χ. έχτισε ένα ναό αφιερωμένο στη θεά Αφροδίτη, προκειμένου να θάψει τη σπηλιά στην οποία ο Ιησούς είχε θαφτεί.^{[4][5]} Ο πρώτος χριστιανός αυτοκράτορας, Κωνσταντίνος ο Μέγας, διέταξε περίπου το 325/326 την αντικατάσταση του ναού από μια εκκλησία.^[6] Κατά τη διάρκεια της ανοικοδόμησης της Εκκλησίας, η μητέρα του Κωνσταντίνου, Ελένη, πιστεύεται ότι ξαναβρήκε τον «Τίμιο Σταυρό».

Η Εκκλησία του Κωνσταντίνου αποτελείται από δύο εκκλησίες που συνδέουν τους δύο διαφορετικούς ιερούς τόπους, και συμπεριλαμβάνουν μια μεγάλη βασιλική, ένα κλειστό αίθριο με κιονοστοιχία με τον παραδοσιακό τόπο του Γολγοθά σε μια γωνιά, και μια ροτόντα, που ονομάζεται Ανάσταση κι εντοπίζεται ως τοποθεσία ταφής του Ιησού.

Σύμφωνα με την παράδοση, ο Κωνσταντίνος μερίμνησε για την αφαίρεση του βράχου γύρω από τον τάφο για να τον απομονώσουν στο κέντρο της ροτόντας σε ένα μικρό κτίριο που ονομάζεται στα ελληνικά Κουβούκλιο ^[7] και στα λατινικά Aedicule^[8].

Η ανοικοδόμηση της εκκλησίας ξεκίνησε το 325/326, ενώ εγκαινιάστηκε στις 13 Σεπτεμβρίου 335. Από τις εκθέσεις των προσκυνητών φαίνεται ότι το παρεκκλήσιο και ο τάφος του Ιησού ήταν ανεξάρτητα αρχικά, και ότι η Ροτόντα στήθηκε γύρω του περίπου το 380.

Κάθε χρόνο, η Ανατολική Ορθόδοξη Εκκλησία γιορτάζει την επέτειο της καθαίωσης του Ναού της Αναστάσεως (Παναγιο Τάφο) στις 13 Σεπτεμβρίου.^[9]

Ζημιές και καταστροφή

Αυτό το κτίριο καταστράφηκε από πυρκαγιά το Μάιο του 614, όταν η αυτοκρατορία των Σασσανιδών, υπό τον Χοσρόη Β' της Περσίας, εισέβαλε και κατέλαβε την Ιερουσαλήμ και τον Τιμιο Σταυρό. Αποκαταστάθηκε το 630 από τον αυτοκράτορα Ηράκλειο, όταν κατέλαβε εκ νέου την Ιερουσαλήμ και έχτισε και πάλι την εκκλησία. Μετά η Ιερουσαλήμ κατακτήθηκε από τους Άραβες, παρέμεινε όμως η χριστιανική εκκλησία, με τους πρώτους μουσουλμάνους ηγέτες να προστατεύουν τους χριστιανικούς χώρους της πόλης. Το κτίριο υπέστη σοβαρές ζημιές από σεισμό στο 746.

Στις αρχές του ενάτου αιώνα, ένας άλλος σεισμός καταστρέφει το Θόλο του Ναού της Αναστάσεως. Οι ζημιές αποκαθίστανται το 810 από τον Πατριάρχη Θωμά. Κατά το έτος 841, νέα πυρκαγιά καταστρέφει το Ναό. Στο 935, οι Ορθόδοξοι Χριστιανοί αποτρέπουν την κατασκευή ενός μουσουλμανικού τζαμιού δίπλα στην Εκκλησία. Το 938, μία νέα πυρκαγιά καταστρέφει το εσωτερικό της βασιλικής και φτάνει κοντά στον κυκλικό κόμβο. Το 966, λόγω της ήττας από μουσουλμανικές στρατιές στην περιοχή της Συρίας, μια εξέγερση ξέσπασε και ακολουθήθηκε από αντίποινα. Η βασιλική κήκη και πάλι, πόρτες και οροφή καταστράφηκαν.

Στις 18 Οκτωβρίου 1009, ο χαλίφης των Φατιμίδων Αλ-Χακίμ Μπι-Αμρ Αλλάχ διέταξε την ολοκληρωτική καταστροφή της εκκλησίας, ως μέρος μιας γενικότερης εκστρατείας εναντίον χριστιανικών χώρων λατρείας στην Παλαιστίνη και την Αίγυπτο.^[10] Η καταστροφή ήταν σχεδόν ολοκληρωτική, με λίγα μέρη της πρώτης εκκλησίας να σώζονται. Η Χριστιανική Ευρώπη αντέδρασε με σοκ και απελάσεις των Εβραίων και αργότερα προχώρησε στις Σταυροφορίες.^[11]

Ανακατασκευή

Σε ευρείας κλίμακας διαπραγματεύσεις μεταξύ των Φατιμίδων και της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας το 1027-8 επιτεύχθηκε συμφωνία, βάσει της οποίας ο νέος χαλίφης Αλή Αζ-Ζαχίρ (γιος του Αλ-Χακίμ) συμφώνησε να επιτρέψει την ανακατασκευή της Εκκλησίας.^[12] Η ανακατασκευή ολοκληρώθηκε με χρηματοδότηση της τεράστιας δαπάνης από τον αυτοκράτορα Κωνσταντίνο Θ' το Μονομάχο και τον Πατριάρχη Νικηφόρο της Κωνσταντινούπολης, το 1048.^[13] Ως παραχώρηση, το τζαμί στην Κωνσταντινούπολη άνοιξε ξανά, και στα κηρύγματα έπρεπε να αναφέρεται το όνομα του Αζ-Ζαχίρ. Η νέα κατασκευή αφορά τη ροτόντα και τα γύρω κτίρια, ενώ η μεγάλη βασιλική παρέμεινε ερειπωμένη. Η ανακατασκευασμένη εκκλησία αποτελούνταν από «προαύλιο ανοιχτό προς τον ουρανό, με πέντε μικρά παρεκκλήσια που συνδέονται με αυτό»^[14].

Ο έλεγχος της Ιερουσαλήμ, και ως εκ τούτου η Εκκλησία του Παναγίου Τάφου, συνέχισε να αλλάξει χέρια μεταξύ των Φατιμίδων και των Σελτζούκων Τούρκων, μέχρι την άφιξη των Σταυροφόρων το 1099.^[15]

Περίοδος των σταυροφόρων

Πολλοί ιστορικοί υποστηρίζουν ότι το κύριο μέλημα του Πάπα Ουρβανού Β', κατά την κλήση της Πρώτης Σταυροφορίας, μετά την έκκληση για βοήθεια από το βυζαντινό αυτοκράτορα Αλέξιο Α' Κομνηνό, ήταν η απειλή της Κωνσταντινούπολης από την τουρκική εισβολή της Μικράς Ασίας.^[16] Οι ιστορικοί συμφωνούν ότι η τύχη της Ιερουσαλήμ και της Εκκλησίας του Παναγίου Τάφου ήταν ανησυχητική, αν και δεν αποτελούσε άμεσο στόχο της παπικής πολιτικής το 1095. Η ιδέα της κατάληψης Ιερουσαλήμ απέκτησε μεγαλύτερη βαρύτητα, καθώς η Σταυροφορία ήταν σε εξέλιξη. Η

ανακατασκευασμένη εκκλησία πέρασε από την κατοχή των Φατιμιδών στους ιππότες της Πρώτης Σταυροφορίας στις 15 Ιουλίου 1099.^[12]

Ο Γουλιέλμος της Τύρου, χρονογράφος του Βασιλείου των Σταυροφόρων της Ιερουσαλήμ, γράφει σχετικά με την ανακαίνιση του ναού στα μέσα του 12ου αιώνα. Οι σταυροφόροι ερεύνησαν τα ανατολικά ερείπια της περιοχής, με περιστασιακές εκσκαφές, και ενώ προσπαθούσαν να φτάσουν στην δεξαμενή, ανακάλυψαν μέρος του ισογείου του ναού του Αδριανού και αποφάσισαν να μετατρέψουν αυτό το χώρο, σε ένα παρεκκλήσι αφιερωμένο στην Ελένη (το εκκλησάκι της Αγίας Ελένης), διευρύνοντας την αρχική σήραγγα, σε σκάλα. Οι σταυροφόροι προσέδωσαν στην εκκλησία διάκοσμο ρωμανικού στυλ και πρόσθεσαν ένα καμπαναριό.^[17] Οι ανακαινίσεις ενοποίησαν τα μικρά παρεκκλήσια και ολοκληρώθηκαν κατά τη διάρκεια της βασιλείας της Βασίλισσας της Μελισσάνθης στο 1149, με την τοποθέτηση του συνόλου των Αγίων Τόπων κάτω από μία στέγη για πρώτη φορά. Η κυριαρχία επί της πόλης και της εκκλησίας χάθηκε και πέρασε στον Σαλαντίν,^[17] το 1187, παρόλ' αυτά υπογράφηκε συνθήκη μετά την Τρίτη σταυροφορία που επέτρεπε στους χριστιανούς προσκυνητές να επισκεφθούν την περιοχή. Ο Αυτοκράτορας Φρειδερίκος Β' ανέκτησε την πόλη και την εκκλησία με συνθήκη τον 13ο αιώνα. Τόσο η πόλη όσο και η εκκλησία καταλαμβάνονται από τη Δυναστεία των Χωρεσμιών το 1244.^[17]

Νεότερα χρόνια

Οι Φραγκισκανοί μοναχοί ανακαίνισαν περαιτέρω την εκκλησία το 1555, η οποία ήταν παραμελημένη παρά τον αυξημένο αριθμό προσκυνητών. Οι Φραγκισκανοί ξαναέχτισαν το Κουβούκλιο, επεκτείνοντας τη δομή του και δημιουργώντας έναν προθάλαμο.^[18] Μετά την ανακαίνιση του 1555, τον έλεγχο της εκκλησίας κινείται μεταξύ των Φραγκισκανών και των Ορθοδόξων, αναλόγως με το ποια κοινότητα θα μπορούσε να τύχει ευνοϊκής μεταχείρισης από την "Υψηλή Πύλη" σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, συχνά μέσω δωροδοκιών, ενώ ακόμη και βίαιες συγκρούσεις δεν ήταν ασυνήθιστες.

Μια πυρκαγιά προξενεί και πάλι σοβαρή βλάβη της εκκλησίας το 1808, προκαλώντας κατάρρευση του τρούλου της Ροτόντας και καταστροφή της εξωτερικής διακόσμησης του Κουβουκλίου. Η Ροτόντα και το εξωτερικό του Κουβουκλίου αποκαταστάθηκαν το 1809-1810 από τον αρχιτέκτονα Νικόλαο Χρ. Κομνηνό από τη Μυτιλήνη με εφαρμογή του τότε σύγχρονου οθωμανικού μπαρόκ. Η φωτιά δεν είχε φτάσει στο εσωτερικό του Κουβουκλίου, έτσι ο μαρμάρινος διάκοσμος του τάφου χρονολογείται κυρίως στην αποκατάσταση του 1555, αν και το εσωτερικό του προθάλαμου, σήμερα γνωστό ως «Παρεκκλήσι του Αγγέλου», εν μέρει ξαναχτίστηκε σε τετραγωνική κάτοψη, στη θέση του προηγουμένως ημικυκλικού δυτικού άκρου. Ένα άλλο διάταγμα του 1853, από τον σουλτάνο σταθεροποίησε την υφιστάμενη εδαφική διαίρεση μεταξύ των κοινοτήτων και έθεσε ένα «status quo», προκειμένου η υφιστάμενη κατάσταση του ναού να "παραμείνει για πάντα", προκαλώντας διαφωνίες σχετικά με τη συντήρηση και πιθανές μικρές αλλαγές,^[19] συμπεριλαμβανομένης μιας διαφωνίας σχετικά με την απομάκρυνση της "Ακίνητης Κλίμακος," μια εξωτερικής σκάλας κάτω από ένα από τα παράθυρα, η οποία παραμένει στην ίδια θέση από τότε.

Η επένδυση του κόκκινου μαρμάρου που εφαρμόστηκε στο Κουβούκλιο από τον Κομνηνό, επιδεινώθηκε άσχημα και αποκολλήθηκε από την υποκείμενη δομή. Από το 1947 συγκρατείται στη θέση της με εξωτερικές σκαλωσιές σιδήρου οι οποίες τοποθετήθηκαν από τη Βρετανική Εντολή. Από τότε δεν έχει συμφωνηθεί τρόπος αποκατάστασής του.

Ο θόλος χρονολογείται στο 1870, παρόλο που αναστηλώθηκε κατά την περίοδο 1994-1997, ως μέρος των σύγχρονων εκτεταμένων ανακαινίσεων του ναού, που έχουν

ξεκινήσει από το 1959. Κατά τη διάρκεια εργασιών αποκατάστασης και ανασκαφών στο εσωτερικό του ναού, μεταξύ του 1970 με του 1978, και κάτω από το κοντινό Μουριστάν, διαπιστώθηκε ότι η περιοχή ήταν αρχικά ένα λατομείο, από την οποίο είχε ληφθεί λευκός ασβεστόλιθος (Μέλεκης ή μαλαχίτης λίθος, Melekeh ή malaki) (meleke).^[20] Στα ανατολικά του παρεκκλησίου της Αγίας Ελένης, οι ανασκαφείς ανακάλυψαν ένα κενό το οποίο περιείχε ένα σχέδιο ρωμαϊκού πλοίου του 2ου αιώνα, δύο χαμηλούς τοίχους που στήριζαν το ναό του Αδριανού του 2ου αιώνα, και ένα υψηλότερο τοίχο του 4ου αιώνα, που χτίστηκε για να υποστηρίξει βασιλική του Κωνσταντίνου.^[21] Μετά από τις ανασκαφές της δεκαετίας του 1970, η Αρμενική Αρχή μετέτρεψε αυτό τον αρχαιολογικό χώρο στο παρεκκλήσι του Αγίου Βαρτάν, και δημιούργησε έναν τεχνητό διάδρομο πάνω από το λατομείο στο βόρειο παρεκκλήσι, έτσι ώστε το νέο παρεκκλήσι θα μπορούσε να προσεγγιστεί (με άδεια) από το παρεκκλήσι της Αγίας Ελένης.^[21]

Ροτόντα και Κουβούκλιο

Η Ροτόντα βρίσκεται στο κέντρο του Ναού της Αναστάσεως, κάτω από το μεγαλύτερο από τους δύο τρούλους της εκκλησίας. Στο κέντρο της Ροτόντας βρίσκεται το εκκλησάκι που ονομάζεται Κουβούκλιο, το οποίο περιέχει τον Πανάγιο Τάφο. Το Κουβούκλιο έχει δύο δωμάτια, το πρώτο με την Πέτρα του Αγγέλου, η οποία πιστεύεται ότι είναι ένα κομμάτι της μεγάλης πέτρας που σφράγισε τον τάφο, ενώ το δεύτερο είναι ο τάφος. Σύμφωνα με το ισχύον καθεστώς, η Ανατολική Ορθόδοξη, η Ρωμαιοκαθολική, και η Αρμενική Αποστολική Εκκλησία, έχουν δικαιώματα στο εσωτερικό του τάφου, και οι τρεις κοινότητες γιορτάζουν την Θεία Λειτουργία εκεί καθημερινά. Επίσης, χρησιμοποιείται για άλλες τελετές και για ειδικές περιπτώσεις, όπως η τελετή του Μεγάλου Σαββάτου, της Αφής Αγίου Φωτός με επικεφαλής τον Έλληνα Ορθόδοξο Πατριάρχη (με τη συμμετοχή της Κοπτών και Αρμενίων πατριαρχών).^[22]

Τοποθεσία

Η Αγία Γραφή περιγράφει την τοποθεσία του τάφου του Ιησού, εξωτερικά του τείχους της πόλης^[23], όπως ήταν φυσιολογικό για ταφές σε όλο τον αρχαίο κόσμο, οι οποίες θεωρούνταν «ακάθαρτες».^[24] Πλέον, ο χώρος της Εκκλησίας είναι εντός των σημερινών τειχών της παλιάς πόλης της Ιερουσαλήμ. Η εκκλησία είναι ένα μέρος της παγκόσμιας κληρονομιάς της UNESCO Παλιά Πόλη της Ιερουσαλήμ.

Επιρροή

Από τον 9ο αιώνα, η κατασκευή των ναών εμπνεύστηκε από το Ναό της Αναστάσεως κι επεκτάθηκε σε ολόκληρη την Ευρώπη^[25]. Πολλές εκκλησίες και μοναστήρια στην Ευρώπη, για παράδειγμα, στη Γερμανία και τη Ρωσία, και τουλάχιστον μία εκκλησία στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι εμπνευσμένες από το Ναό της Αναστάσεως, προς όφελος των προσκυνητών οι οποίοι δεν μπορούσαν να ταξιδέψουν σε τους Αγίους Τόπους.

Γ. Πειραματικό Μέρος

Γ1: Αρχές Μεθόδων

Γ2: Μακροσκοπική Παρατήρηση - Δειγματοληψία

Γ3: Αναλυτική Περιγραφή - Τεκμηρίωση

Γ4: Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων



Γ1: Αρχές Μεθόδων

Διάκριση και Παρουσίαση Πειραματικών Τεχνικών για το Χαρακτηρισμό των Υλικών και τη διάγνωση της Φθοράς

➤ Μη καταστρεπτικές Τεχνικές

Κατά την επί τόπου επίσκεψη, που πραγματοποιήθηκε μεταξύ 17ης και 21ης Μαΐου 2015, πραγματοποιήθηκε ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των εξεταζόμενων περιοχών προκειμένου να χαρτογραφηθούν τα υλικά και οι βασικοί τύποι φθοράς τους, αλλά και να ληφθούν χρήσιμα στοιχεία αναφορικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος έχει χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών από την ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ, της Σχολής Χημικών Μηχανικών, Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών με επιστημονικά υπεύθυνη την καθ. Α. Μοροπούλου. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος περιλάμβανε την εφαρμογή των ακόλουθων τεχνικών:

- Θερμογραφία Υπερύθρου (Infra-Red Thermography), η οποία δεν παρουσιάζεται στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας,
- Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optic Microscopy).

Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

Η μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμεύει για την επί τόπου χαρτογράφηση και εκτίμηση της φθοράς και παρέχει πληροφορίες για την υφή της επιφάνειας ενός υλικού (μορφολογία επιφάνειας, πιθανές αστοχίες, διεπιφανειακές δράσεις). Δίνει επιπλέον, πληροφορίες για τη μικροδομή του υλικού. Συμπληρώνει τη χαρτογράφηση της φθοράς και της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, καθώς επίσης και των επεμβάσεων συντήρησης, καθαρισμού και προστασίας.

Για τη λήψη ευδιάκριτων εικόνων σημαντικό ρόλο παίζει η μορφή της εξεταζόμενης επιφάνειας. Όσο πιο επίπεδη και λεία είναι, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται ο φακός σε αυτήν. Τέλος, το μικροσκόπιο συνδέεται με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή για την άμεση μεταφορά, προβολή, επεξεργασία και αποθήκευση των εικόνων οι οποίες λαμβάνονται με το μικροσκόπιο.

Το μικροσκόπιο αποτελείται από αντικειμενικούς φακούς, διαφόρων μεγεθύνσεων, οι οποίοι μπορούν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της εφαρμογής. Οι δυνατές μεγεθύνσεις είναι x25, x50, x120, x200 και x600. Η επιλογή κάποιου φακού σχετίζεται με τον τύπο, το μέγεθος και τη μορφολογία του εξεταζόμενου υλικού. Στο εργαστήριο οι παρατηρήσεις έγιναν με μικροσκόπιο i_scopemoritex και χρησιμοποιήθηκαν οι φακοί μεγεθύνσεως x25, x50 και x120.

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το i_scopemoritex (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών i_scopemoritex

Πολωτικό Μικροσκόπιο

Σκοπός της μεθόδου αυτής, είναι η εξακρίβωση της γεωγραφικής προέλευσης των ορυκτών και η αναγνώριση των δομικών ορυκτών των πετρωμάτων. Επιτυγχάνεται με την εξέταση λεπτών τομών των υλικών σε πολωτικό μικροσκόπιο. Βασίζεται στα βασικά χαρακτηριστικά των ορυκτών, δηλαδή το σχήμα του κρυστάλλου, τα επίπεδα σχισμών και τις οπτικές ιδιότητες σε επίπεδο πολωμένο φως.

Η προετοιμασία των δειγμάτων σε λεπτές τομές, καθώς και η παρατήρηση και η λήψη φωτογραφιών αυτών με Πολωτικό Μικροσκόπιο (ανακλώμενου και διερχομένου φωτισμού) τύπου LEICA DM-LP, πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε).

➤ **Αναλυτικές Τεχνικές**

Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ

Η περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ, χρησιμεύει στην ταυτοποίηση των ενώσεων που υπάρχουν στα εξεταζόμενα κονιορτοποιημένα δείγματα. Χρησιμοποιείται ακτινοβολία ακτίνων-Χ, διότι το μήκος κύματός της είναι της τάξης των διαστάσεων του κρυσταλλικού πλέγματος των ορυκτών. Έτσι, μπορεί να διεισδύσει εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και ανάμεσα στα διαστήματα των επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος. Ο τρόπος περίθλασης εξαρτάται από την τρισδιάστατη γεωμετρία του κρυσταλλικού πλέγματος, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για κάθε ορυκτό. Επομένως, μπορούμε να ταυτοποιήσουμε τα ορυκτά με βάση τα αντίστοιχα διαγράμματα που παράγονται από το όργανο.

Για να λάβει χώρα η περίθλαση των ακτίνων-Χ πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg:

$$\lambda = 2d \eta \mu \theta$$

Όπου, $\eta = 1, 2, 3, \dots$

λ = μήκος κύματος ακτίνων-Χ,

d = απόσταση δύο δικτυωτών επιπέδων,

θ = γωνία προσπίπτουσας ή περιθλώμενης δέσμης ακτίνων-Χ και δικτυωτού επιπέδου.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με όργανο Siemens D5000 XRD (Εικόνα 3.2).

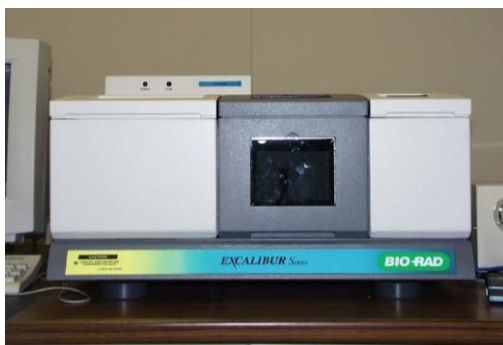


Εικόνα 3.2 Εξοπλισμός της περιθλασιμετρίας ακτινών-Χ

Φασματοσκοπία Υπέρουθρου με μετασχηματισμό Fourier

Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη και πολύ αποτελεσματική για την ανίχνευση διαφόρων ενώσεων, που συναντάμε σε λίθους και σε ποικίλες κατηγορίες κονιαμάτων. Ανιχνεύονται χαρακτηριστικές ενώσεις των υλικών, όπως ανθρακικό ασβέστιο, δολομίτης, αργιλοπυριτικά υλικά, υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου, γύψος κ.ά. ή προϊόντα φθοράς, όπως νιτρικά, οξαλικά, θειικά κ.ά., καθώς και οργανικές ενώσεις. Είναι ποιοτική και ημι-ποσοτική μέθοδος, απαιτείται πολύ μικρή ποσότητα δείγματος και μπορεί να βοηθήσει στην ταυτοποίηση ενώσεων σε μικρά ποσοστά, που παρουσιάζουν προβλήματα ανίχνευσης με τις θερμικές μεθόδους.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ExcaliburseriesBio-Rad (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός FT-IR

Μέθοδοι Θερμικής Ανάλυσης

Οι θερμικές αναλύσεις χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μεταβολών του υλικού που εμφανίζονται όταν θερμαίνονται τα υλικά σε μια θερμική κλίμακα 25-1000°C, με ρυθμό 10°C/min. Επιτυγχάνεται ποσοτική και ποιοτική ανάλυση.

Διαφορική Θερμική Ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)

Πρόκειται για συνεχή καταγραφή δεδομένων με τη μορφή θερμικών φασμάτων, τα οποία χαρακτηρίζουν ένα απλό ή σύνθετο σύστημα υλικών, βάσει των θερμοδυναμικών, φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων τους, των μεταβολών της δομής τους, καθώς και της κινητικής των χημικών αντιδράσεων και φυσικοχημικών δράσεων

που διενεργούνται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Χαρακτηρίζουν ποιοτικά και ποσοτικά τα υλικά, συντελούν στην αποτίμηση της συμβατότητας διαφόρων υλικών.



Εικόνα 3.4 Εξοπλισμός θερμικών μεθόδων ανάλυσης

Η διαφορική θερμική ανάλυση βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εξεταζόμενου δείγματος και του δείγματος αναφοράς. Για την εξέταση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το όργανο 409 EP, του Οίκου Netzsch (Εικόνα 3.4).

Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Με την ποροσιμετρία υδραργύρου εξετάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι μικροδομής των υλικών. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι ο ολικός ειδικός όγκος, η φαινόμενη πυκνότητα, η ειδική επιφάνεια, η μέση ακτίνα των πόρων και το ολικό πορώδες. Από την κατανομή μεγέθους πόρων ως προς τον ολικό προσροφούμενο όγκο εξάγονται συμπεράσματα για την πορώδη δομή των υλικών (δομικών λίθων και κονιαμάτων).

Η τεχνική αυτή επιτυγχάνεται με τη βαθμιαία διείσδυση υδραργύρου στους ανοικτούς πόρους ενός υλικού, με αύξηση της εξωτερικής πίεσης και την απομάκρυνση του υδραργύρου με ελάττωση της πίεσης. Η επιβολή της εξωτερικής πίεσης είναι απαραίτητη για τη διείσδυση του υδραργύρου, καθώς δεν αποτελεί διαβρέχον υγρό για τα περισσότερα υλικά.

Το ποροσίμετρο του εργαστηρίου αποτελείται από δύο όργανα: της CarboErbalInstruments- MacroporesUnit 120 και ThermoElectronCorporation, PorosimeterPascal 440. Το πρώτο όργανο (Εικόνα 3.5) χρησιμεύει στη μέτρηση των μεγάλων πόρων με ακτίνα 7,5-100 μm και το δεύτερο (Εικόνα 3.6) στη μέτρηση μικρότερων πόρων με ακτίνα 37,5 \AA -7.5 μm . Τα δύο όργανα συνδέονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα και παρουσιάζει τα αποτελέσματα, δηλαδή τις καμπύλες διείσδυσης και απομάκρυνσης του υδραργύρου, τον ολικό ειδικό όγκο, τη φαινόμενη πυκνότητα, το ολικό πορώδες, τη μέση ακτίνα πόρων και την ειδική επιφάνεια.



Εικόνα 3.5 Μονάδα μέτρησης Carbo Erba Instruments Macropores Unit 120



Εικόνα 3.6 Μονάδα μέτρησης –Thermo Electron corporation Pascal 440

Διαλυτά άλατα

Για τον προσδιορισμό των ολικών διαλυτών αλάτων εφαρμόστηκε το ιταλικό πρότυπο "Dosaggio Dei Sali Solubile, Normal 13/83", βάσει του οποίου πραγματοποιείται ζύγιση 100 ± 5 mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, που διαλύεται σε 100 ml απιονισμένου νερού. Εικοσιπένσες ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετριέται η αγωγιμότητά 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:

$$\text{SST}\% = (\text{Cx } 6,88) / \text{m}$$

όπου:

C: η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε μS ,

m: το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg.

Η θερμοκρασία όλων των διαλυμάτων και του «τυφλού» ήταν $15-19^\circ\text{C}$ κατά τη μέτρηση της αγωγιμότητάς τους.

Συμπληρωματικά του προσδιορισμού των ολικών διαλυτών αλάτων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων (Cl^-) και θειικών αλάτων (SO_4^{2-}), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 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) 0,1N. 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 θειικών ιόντων προστέθηκε, βάσει της ίδιας

διαδικασίας, μικρή ποσότητα χλωριούχου βαρίου (BaCl_2) 0,1M. Παρουσία θεικών ιόντων παράγεται θεικό βάριο (BaSO_4), που κι αυτό προκαλεί λευκό θόλωμα. Η ποσοτική παρουσία των θεικών ιόντων καθορίζει την ένταση του θολώματος. Ποιοτικά, η παρουσία των χλωριόντων και των θεικών ιόντων μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ υψηλή (+++++), υψηλή (++++), μέτρια (++++), μικρή (+++), πολύ μικρή (++) ή ίχνη (+). Επισημαίνεται ότι μέτρο σύγκρισης για την πολύ μεγάλη παρουσία χλωριόντων είναι το πόσιμο νερό.

Κοκκοδιαβάθμιση

Βάσει της δοκιμής κοκκοδιαβάθμισης, πραγματοποιείται ο φυσικός διαχωρισμός του δείγματος χρησιμοποιώντας σειρά κόσκινων με συγκεκριμένη διάμετρο σπής το καθένα, ανάλογα με το πρότυπο βάσει του οποίου πραγματοποιείται η δοκιμή. Εν προκειμένω, η κοκκοδιαβάθμιση πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο DIN 18555 βάσει του οποίου τα κόσκινα έχουν διαμέτρους σπής 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 μm . Όσον αφορά τα αδρανή υλικά (άμμοι, κεραμικά κ.λ.π.) το κλάσμα του υλικού το οποίο διέρχεται από το τελευταίο κόσκινο (63 μm) λαμβάνεται ως παιπάλη. Όσον αφορά τα κονιάματα το κλάσμα του υλικού, που διέρχεται από το τελευταίο κόσκινο (63 μm) αποτελεί την κονία ή συνδετική ύλη του υλικού. Ωστόσο, ένα ποσοστό πολύ λεπτόκοκκου αδρανούς είναι δυνατό να διέρχεται από αυτό το κόσκινο. Τα υπόλοιπα κλάσματα του υλικού που συγκρατούνται στα μεγαλύτερης διαμέτρου κόσκινα αποτελούν τα αδρανή του κονιάματος. Βάσει της δοκιμής της κοκκοδιαβάθμισης, εξάγονται συμπεράσματα για την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών, ενώ παράλληλα προσδιορίζονται ποσοστιαία, τα διάφορα μεγέθη κόκκων που χαρακτηρίζουν τα αδρανή υλικά. Το αποτέλεσμα της δοκιμής δίνει μια εικόνα της κοκκομετρικής σύνθεσης του υλικού, παριστάνεται δε με την αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα αδρανούς υλικού. Τα χρησιμοποιούμενα κόσκινα τοποθετούνται κατ' αύξουσα σειρά μεγέθους σπών, επάνω σε έναν υποδοχέα, ολόκληρη δε η σειρά τοποθετείται στο μηχανικό κόσκινο, εφ' όσον το κοσκίνισμα δεν γίνεται χειρονακτικά. Το δείγμα γνωστού βάρους εισάγεται στα κόσκινα και ξεκινά το κοσκίνισμα. Ακολούθως, ζυγίζεται το συγκρατούμενο σε κάθε κόσκινο υλικό και εν συνεχεία υπολογίζεται το %κ.β. ποσοστό του συνολικά διερχόμενου από κάθε κόσκινο υλικού. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων λαμβάνεται η αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη.



Εικόνα 3.7 Κόσκινα

Η κοκκομετρική ανάλυση εν προκειμένω γίνεται εργαστηριακά με τη χρήση του μηχανικού κόσκινου EFL2000, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δόνηση της πρότυπης κατά DIN 18555 σειράς κόσκινων.

Δοκιμές Μηχανικών Αντοχών

Τα υλικά ανάλογα με την κατεργασία που έχουν υποστεί και τη σύστασή τους έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η γνώση των ιδιοτήτων αυτών είναι σημαντική, όχι μόνο στο μηχανολογικό σχεδιασμό, αλλά και στον έλεγχο καταπόνησης φορτίων διαφόρων κατασκευών. Έτσι τα υλικά, υφίστανται ποικίλες δοκιμασίες και μετρούνται οι διάφορες παράμετροι της μηχανικής τους συμπεριφοράς με τα αποτελέσματα να χρησιμοποιούνται: 1) Για ποιοτικό έλεγχο 2) Για την επιλογή υλικού για κάποια εφαρμογή και 3) Για την καταγραφή της συμπεριφοράς του υλικού κάτω από διάφορες καταπονήσεις.

Όταν ασκούνται δυνάμεις σε ένα σώμα, τότε αυτό παραμορφώνεται (μεταβολή των διαστάσεων και του όγκου του σώματος, που μπορεί να συνοδεύεται με αλλαγή του σχήματος του). Το σώμα μπορεί να επιμηκυνθεί, να συμπιεστεί, να υποστεί στρέψη ή να αλλάξει το σχήμα του (διάτμηση). Η ιδιότητα ενός σώματος να επιστρέφει στο αρχικό του μέγεθος και σχήμα όταν οι δυνάμεις που το παραμορφώνουν σταματούν να ασκούνται πάνω του, ονομάζεται **Ελαστικότητα**. Για να περιγράψουμε τις ελαστικές ιδιότητες γραμμικών αντικειμένων (π.χ. στήλες ή/και δοκοί) όταν τεντώνονται (εφελκυσμός) ή συμπιέζονται (συμπίεση ή θλίψη), χρησιμοποιούμε το μέτρο Young.

Η τάση P (stress)

Ορίζουμε ως τάση σ (stress) σε διατομή S το λόγο της δύναμης (F) που δρα πάνω σε ένα σώμα, προς το εμβαδόν (S) της εγκάρσιας επιφάνειας του σώματος πάνω στο οποίο δρα η δύναμη:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Η μονάδα για την τάση στο σύστημα SI είναι το Newton ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m^2), και έχει ειδικό όνομα Pascal (για συντομία Pa).

Η σχετική παραμόρφωση (strain)

Ειδική επιμήκυνση (strain) είναι η σχετική επιμήκυνση που προκαλεί μια τάση σε ένα σώμα. Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής κάποιας διάστασης του σώματος (Δl) προς την αρχική διάσταση (l) στην οποία προκλήθηκε η μεταβολή.

$$\epsilon_{lon} = \frac{\Delta l}{l}$$

Όταν σε ένα σώμα ασκείται μια τάση, το σώμα παραμορφώνεται. Για μικρές τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης, συνήθως το ένα μέγεθος είναι ευθέως ανάλογο του άλλου, ο δε συντελεστής αναλογίας ορίζεται ως **Μέτρο Ελαστικότητας ή Μέτρο του Young (Y)**:

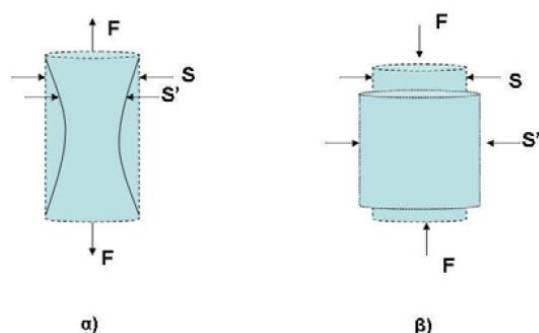
$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon_{lon}}$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως **νόμος του Hooke** και ο συντελεστής αναλογίας Y έχει μονάδες τάσης (N/m^2). Το μέτρο Young (Y) αποτελεί ένα βασικό μέγεθος της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών και εξαρτάται από τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των ατόμων του υλικού, ώστε να «κρατάνε» τα άτομα στις θέσεις ισορροπίας τους. Όταν σε ένα σώμα ασκηθούν εξωτερικές δυνάμεις, τα άτομα μετατοπίζονται από τις αρχικές τους θέσεις σε νέες και οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων, αυξάνονται (εφελκυσμός). Αυτό προκαλεί την ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων που αντιπύθενται

στις εξωτερικές και τείνουν να επαναφέρουν τα άτομα στις αρχικές θέσεις ισορροπίας. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μια ράβδος αποτελείται από παράλληλες σειρές ατόμων συνδεδεμένες με ελατήρια τα οποία παριστάνουν τις ενδο-ατομικές δυνάμεις. Το πόσο θα επιμηκυνθεί η ράβδος όταν δεχθεί μια τάση εξαρτάται από το πόσο «σκληρά» είναι τα ελατήρια που αντιστοιχούν στις ενδο-ατομικές δυνάμεις. Ένα υλικό με μεγάλο μέτρο Young είναι δύσκαμπτο, διότι απαιτείται μεγάλη τάση για να επιτευχθεί δεδομένη ειδική επιμήκυνση.

Λόγος Poisson

Η αξονική παραμόρφωση μιας ράβδου συνοδεύεται από μια μικρή εγκάρσια (πλευρική) παραμόρφωση. Στην περίπτωση του εφελκυσμού είναι συστολή ($S' < S$) (Εικόνα 3α), ενώ στην περίπτωση της θλίψης είναι διαστολή ($S' > S$) (Εικόνα 3β).



Εικόνα 3α) Ελάττωση της διατομής μιας ράβδου κατά το μέσον της (εφελκυσμός)

3β) Αύξηση της διατομής μιας ράβδου (θλίψη)

Ανεξαρτήτως του σχήματος της διατομής, αν b είναι μια οποιαδήποτε αρχική εγκάρσια διάσταση (π.χ διάμετρος του κύκλου, πλευρά τετραγώνου κ.λ.π.) και b' η διάσταση μετά την παραμόρφωση, ονομάζουμε ειδική εγκάρσια διατομή το λόγο:

$$\varepsilon_{trans} = \frac{b' - b}{b}$$

Ειδικότερα, στον εφελκυσμό η παραπάνω ποσότητα ονομάζεται εγκάρσια συστολή και είναι αρνητική ποσότητα ($\varepsilon_{trans} < 0$), ενώ στη σύνθλιψη λέγεται εγκάρσια διαστολή και είναι θετική ποσότητα ($\varepsilon_{trans} > 0$).

Λόγος Poisson ορίζεται ο λόγος:

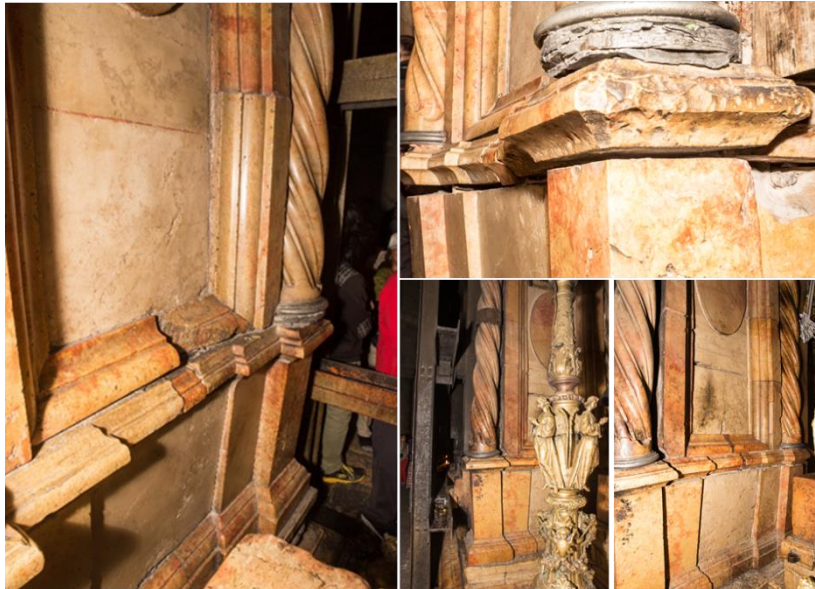
$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{lon}}$$

Το αρνητικό πρόσημο δικαιολογείται από το ότι τα μεγέθη ε_{trans} και ε είναι πάντα ετερόσημα, διότι όταν αυξάνεται η μία διάσταση, συγχρόνως, ελαττώνεται η άλλη. Ο συντελεστής ν είναι χαρακτηριστική σταθερά για κάθε υλικό, εφόσον αυτό καταπονείται μέσα στα όρια της ελαστικής του συμπεριφοράς και προφανώς είναι αδιάστατο μέγεθος.

Γ2: Μακροσκοπική Παρατήρηση - Δειγματοληψία

Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις

Στο πλαίσιο της επίσκεψης στο Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου (Ιεροσόλυμα, Ισραήλ) της επιστημονικής ομάδας του εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την διεξαγωγή επιτόπιας διαγνωστικής μελέτης για την αποτίμηση των φθορών και την εκτίμηση της κατάστασης συντήρησης του Μνημείου, αρχικά έγινε μια μακροσκοπική επισκόπηση της κατάστασης συντήρησης του Ιερού Μνημείου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.8, οι εξωτερικές επιφάνειες του μνημείου (ορθομαρμαρώσεις), παρουσιάζουν σημαντικές παραμορφώσεις. Αυτές, μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη στατικότητα του Ιερού Μνημείου, δημιουργώντας επιπλέον φορτίσεις στα δομικά υλικά, συμβάλλοντας αρνητικά στη μακροζωία του μνημείου, γι' αυτό και το αίτιο που τις προκαλεί πρέπει να εντοπιστεί και να αναιρεθεί.



Εικόνα 3.8 Παραμορφώσεις στην εξωτερική τοιχοποιία (ορθομαρμαρώση)

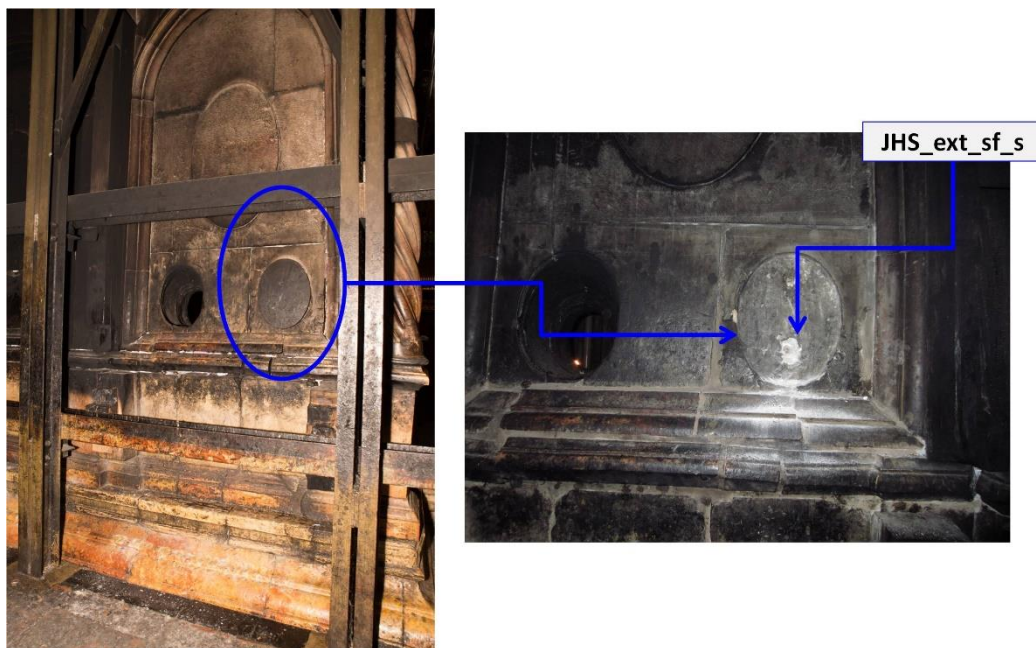
Δειγματοληψία

Για να εξακριβωθούν τα αίτια που προκαλούν τις παραμορφώσεις που παρουσιάστηκαν στη προηγούμενη παράγραφο, χρειάζεται να εξεταστούν στο εργαστήριο τα δομικά υλικά, που αποτελούν το κτίσμα και να γίνει μια αποτίμηση της φθοράς, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η δειγματοληψία των δομικών υλικών από το Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου έγινε σε τρεις φάσεις:

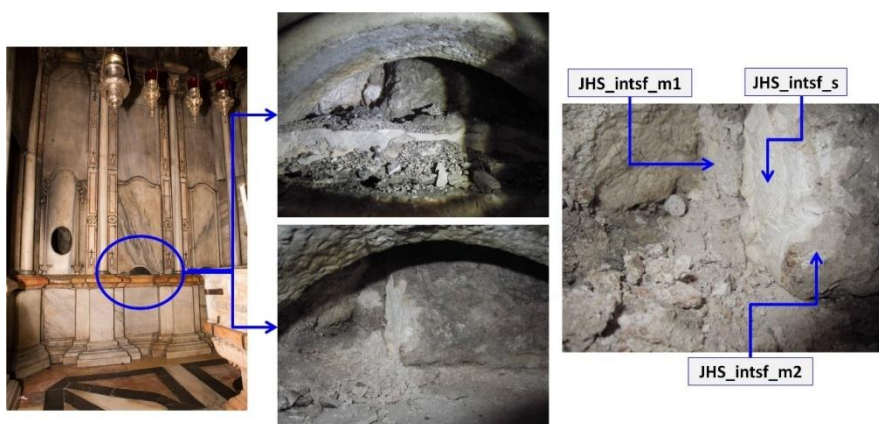
- Δείγματα κονιαμάτων, επιχρισμάτων και λίθων πλήρωσης συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της επίσκεψης της διεπιστημονικής ομάδας του Ε.Μ.Π. στα μέσα Μαΐου 2015, οπότε και υποδείχθηκαν οι θέσεις δειγματοληψίας των καρότων.
- Δείγματα Καρότων: δείγματα δομικών λίθων και κονιαμάτων (συλλέχθηκαν μερικές εβδομάδες μετά την επίσκεψη της διεπιστημονικής ομάδας του Ε.Μ.Π.).
- Δείγμα κονιάματος πλήρωσης από το εμπρόσθιο τμήμα του Ναού το οποίο λήφθηκε κατά την διάρκεια της επισκέψης της καθηγήτριας Ε.Μ.Π. κυρίας Αντωνίας Μοροπούλου και του καθηγητή Ε.Μ.Π. κύριου Μανόλη Κορρέ, μερικούς μήνες μετά τη συλλογή των καρότων.

➤ **Δείγματα πρώτης επίσκεψης**

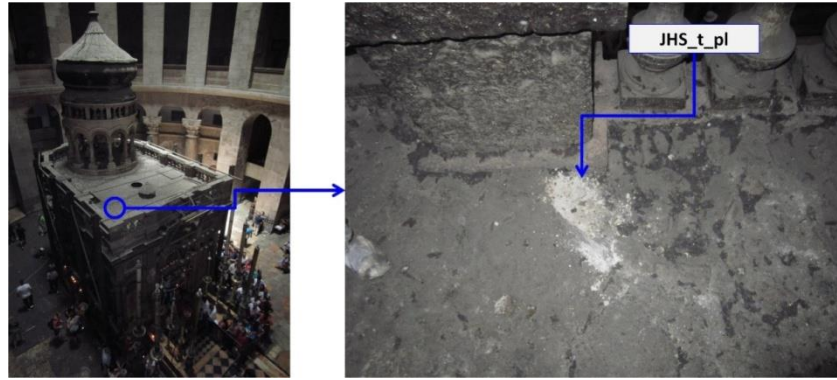
Κατά την επιτόπια επισκόπηση στο χώρο, επιλέχθηκαν, χαρακτηριστικές των αρχιτεκτονικών φάσεων και επεμβάσεων αποκατάστασης και συντήρησης του Ιερού Μνημείου, θέσεις για την εξαγωγή δειγμάτων. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν προέρχονται από: **α)** την νότια εξωτερική όψη του Ναού (Εικόνα 3.9), **β)** το εσωτερικό του Πρόναου (Εικόνα 3.10) **γ)** το δώμα του Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου (Εικόνα 3.11) και **δ)** την εσωτερική σκάλα (εσώκλειστη της τοιχοποιίας) της νότιας όψης (Εικόνα 3.12). Το είδος του δείγματος, η κωδική του ονομασία και ο ακριβής τόπος εξαγωγής του παρουσιάζονται στις προαναφερθείσες εικόνες.



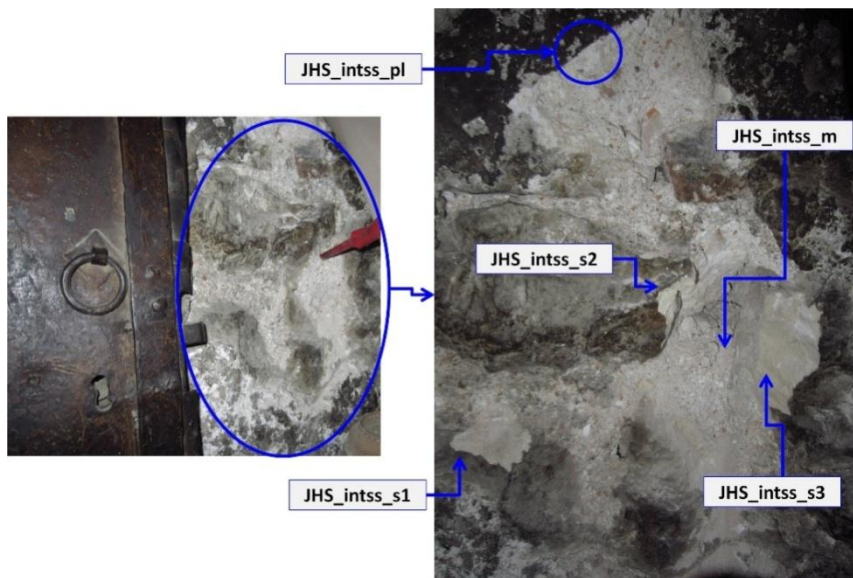
Εικόνα 3.9 Εξωτερική νότια όψη Πρόναου από όπου συλλέχθηκε το δείγμα του δομικού λίθου JHS_ext_sf_s



Εικόνα 3.10 Εσωτερικό Πρόναου από όπου συλλέχθηκαν τα δείγματα του δομικού λίθου JHS_intsf_s και των κονιαμάτων JHS_intsf_m1 και JHS_intsf_m2



Εικόνα 3.11 Δώμα Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου από όπου συλλέχθηκε το δείγμα του κονιάματος JHS_t_pl



Εικόνα 3.12 Εσωτερική σκάλα νότιας όψης (Φάση Κομνηνού) από όπου συλλέχθηκαν τα δείγματα των δομικών λίθων JHS_intss_s1, JHS_intss_s2 και JHS_intss_s3, του κονιάματος JHS_intss_m και του επιχρίσματος JHS_intss_pl

➤ Δείγματα Καρότων: α) Τοιχοποιίας β) Δαπέδου

Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, ζητήθηκε η άδεια από τις τρεις εκκλησιαστικές κοινότητες, η οποία και δόθηκε, για την εξαγωγή καρότων (CoreTest) από 2 (δύο) επιλεγμένα σημεία στη νότια όψη του Μνημείου (Εικόνα 3.13). Τα Coretesting εκτελέστηκαν στις καθορισμένες θέσεις #1 (Drillingdepth 75 cm , πάχος τοίχου 80 εκ.) και #2 (Drillingdepth 85 cm) που είχαν προσημειωθεί κατά την επίσκεψη της διεπιστημονικής ομάδας του Ε.Μ.Π. τον Μάιο. Ο φυσικός βράχος εντοπίζεται σε βάθος 45cm από την επιφάνεια δαπέδου. Η ορθομαρμάρωση του Κουβουκλίου έχει πάχος 15cm και σύμφωνα με τον Δρ. Θ.Μητρόπουλο, ο οποίος ήταν παρών κατά τη διάρκεια εξαγωγής των καρότων είναι σκληρός ασβεστόλιθος: Mizzi-Yehudi (γκριζωπός κρυσταλλικός δολομίτης). Το πρώτο σημείο (drilling #1) εδράζεται στη νότια τοιχοποιία, ενώ το δεύτερο σημείο (drilling #2) βρίσκεται στην ίδια όψη, στο δάπεδο της βάσης του μνημείου. Τα καρότα, όπως αυτά εξήχθησαν, παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.14 μαζί με την κωδική ονομασία των επιμέρους δειγμάτων που προέρχονται από κάθε καρότο.



Εικόνα 3.13 Σημεία εξαγωγής των καρότων



Εικόνα 3.14 Πάνω: Καρότο Τοιχοποιίας (drilling #1): Τρία δείγματα δομικών λίθων (JHS_1fa_ys, JHS_1fa_ws, JHS_1fa_ws2), Τρία δείγματα κονιαμάτων (JHS_1fa_m1, JHS_1fa_m2, JHS_1fa_m3) Κάτω: Καρότο Δαπέδου (drilling #2): Τρία δείγματα δομικών λίθων (JHS_2fl_bs, JHS_2fl_ps, JHS_2fl_ws)

➤ Δείγμα Κονιάματος Πλήρωσης

Από την πρόσθια όψη του ναού, λόγω της παραμόρφωσης που έχουν επιφέρει εσωτερικά φορτία επιβαλλόμενα στην εσωτερική όψη της ορθομαρμάρωσης προς τα έξωθεν, κατέστη δυνατόν να ληφθεί δείγμα (Εικόνα 3.15: δεξιά πάνω και κάτω) από τη διαρρηγμένη επιφάνεια (Εικόνα 3.15: αριστερά). Η όψη και η υφή του δείγματος υποδηλώνει ότι είναι κονίαμα και στο εξής θα αναφέρεται ως κονίαμα πλήρωσης.



Εικόνα 3.15 Αριστερά: σημείο εξαγωγής δείγματος κονιάματος πλήρωσης
Δεξιά: Κονίαμα πλήρωσης σε ανεπεξέργαστη μορφή (κωδικός δείγματος JHS_fe_m)

Γ3: Αναλυτική Περιγραφή - Τεκμηρίωση

Από την Εικόνα 3.16 έως την 3.21 παρουσιάζονται τα δείγματα που εξετάστηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά η κωδική ονομασία και η περιγραφή (τύπος δομικού υλικού, προέλευση) του κάθε δείγματος.



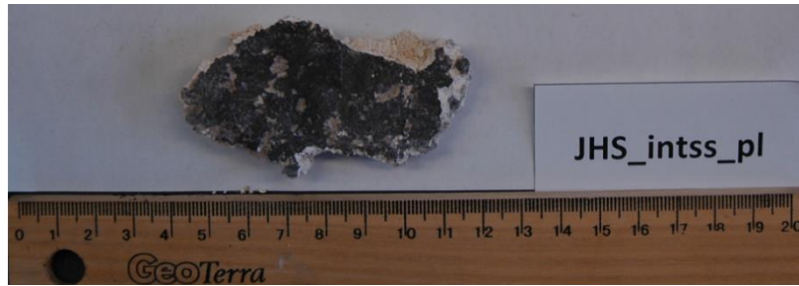
Εικόνα 3.16 Κονίαμα Πλήρωσης Ορθομαρμάρωσης (JHS_fe_m)



Εικόνα 3.17 Συνδετικό κονίαμα της εσωτερικής παρειάς της σκάλας (JHS_intss_m)



Εικόνα 3.18 Κονίαμα επί εσωτερικής τοιχοποιίας παρειάς Πρόναου (JHS_intsf_m2)



Εικόνα 3.19 Επίχρισμα σκάλας (JHS_intss_pl)



Εικόνα 3.20 Συνδετικό κονίαμα τοιχοποιίας εσωτερικής παρειάς Πρόναου (JHS_intsf_m1)



Εικόνα 3.21 Κονίαμα δώματος Παναγίου Τάφου (JHS_t_pl)

| α/α | Τόπος συλλογής δείγματος | Μακροσκοπική περιγραφή δείγματος | Χαρακτηρισμός δείγματος ως προς την οικοδομική φάση | Κωδική ονομασία δείγματος |
|------------|---|---|--|----------------------------------|
| 1 | Πρόσθια όψη Ναού | Κονίαμα Πλήρωσης Ορθομαρμάρωσης | Φάση Κομνηνού | JHS_fe_m |
| 2 | Εσωτερική Σκάλα | Επίχρισμα | Φάση Κομνηνού | JHS_intss_pl |
| 3 | Δώμα πάνω από τον Πρόναο | Κονίαμα | Φάση Κομνηνού | JHS_t_pl |
| 4 | Σταυροφοριακή τοιχοποιία εσωτερικής παρειάς Πρόναου (Νότια όψη) | Συνδεδειγμένο κονίαμα Σταυροφοριακής τοιχοποιίας με ορθομαρμάρωση Πρόναου | Φάση Κομνηνού | JHS_intsf_m1 |
| 5 | Σταυροφοριακή τοιχοποιία εσωτερικής παρειάς Πρόναου (Νότια όψη) | Κονίαμα ορθομαρμάρωσης | Φάση Κομνηνού | JHS_intsf_m2 |
| 6 | Κάτω από επίχρισμα εσωτερικής παρειάς της σκάλας | Συνδεδειγμένο κονίαμα | Φάση Κομνηνού | JHS_intss_m |

Πίνακας 3.1 Συνοπτική παρουσίαση δειγμάτων

Γ4: Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Αποτελέσματα Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου Δομικών Υλικών και Αρχιτεκτονικών Επιφανειών

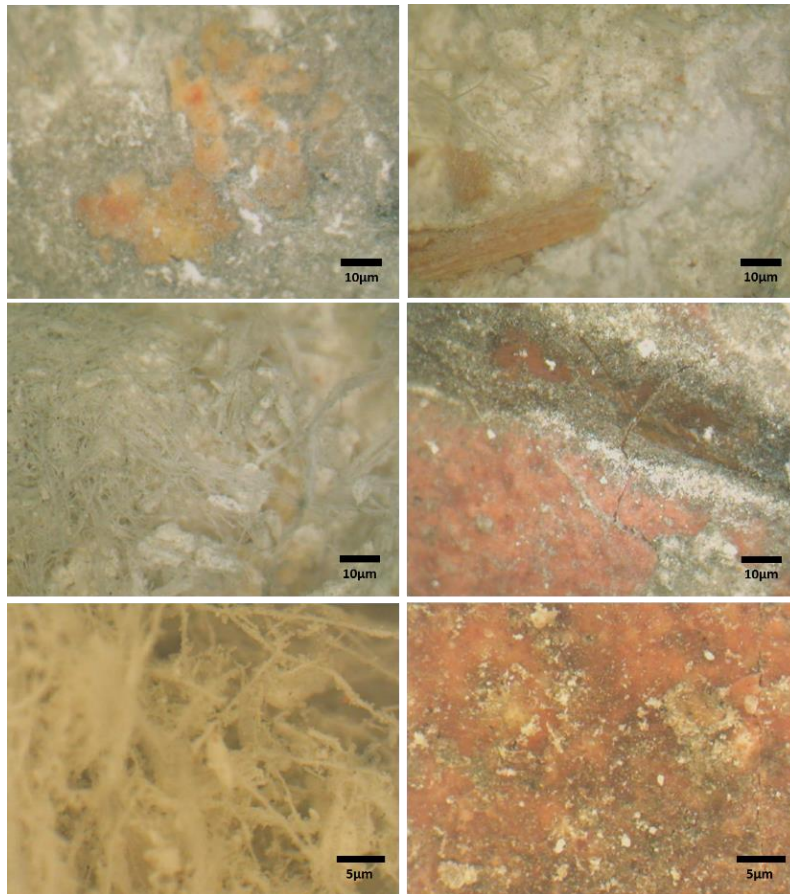
Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_fe_m - Φάση Κομνηνού**

Το υποφαινόμενο δείγμα (Εικόνα 3.22) είναι λευκού χρώματος (λευκή κονία), όπου στη μία όψη της επιφάνειας του, υπάρχει υπόλοιπο χρωματικής επίστρωσης. Επίσης, μακροσκοπικά είναι εμφανείς λευκές ίνες. Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται ευκρινώς πολλές ίνες, όπως και λίγα άχυρα που εμφανίζονται αραιά, καθώς και διάσπαρτα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου στη μάζα του. Το υπόλοιπο της χρωματικής επίστρωσης κόκκινο-καφέ απόχρωσης, μαρτυρά την ύπαρξη χρωστικής στο εσωτερικό της τοιχοποιίας (μέρος που δεν είναι εμφανές) και πιθανόν να σημαίνει ότι σε κάποια ιστορική περίοδο η επίστρωση αυτή αποτελούσε την εξωτερική φάση της πρόσθιας τοιχοποιίας του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου.



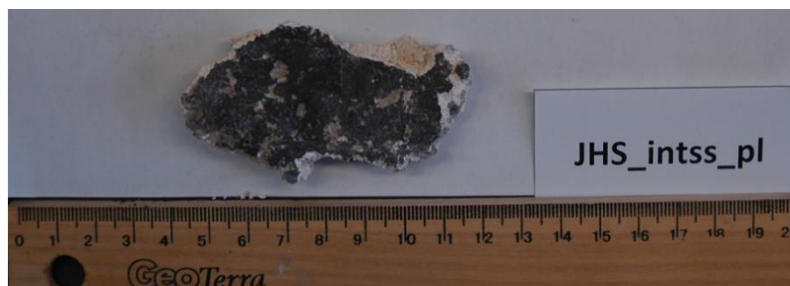
Εικόνα 3.22 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_fe_m



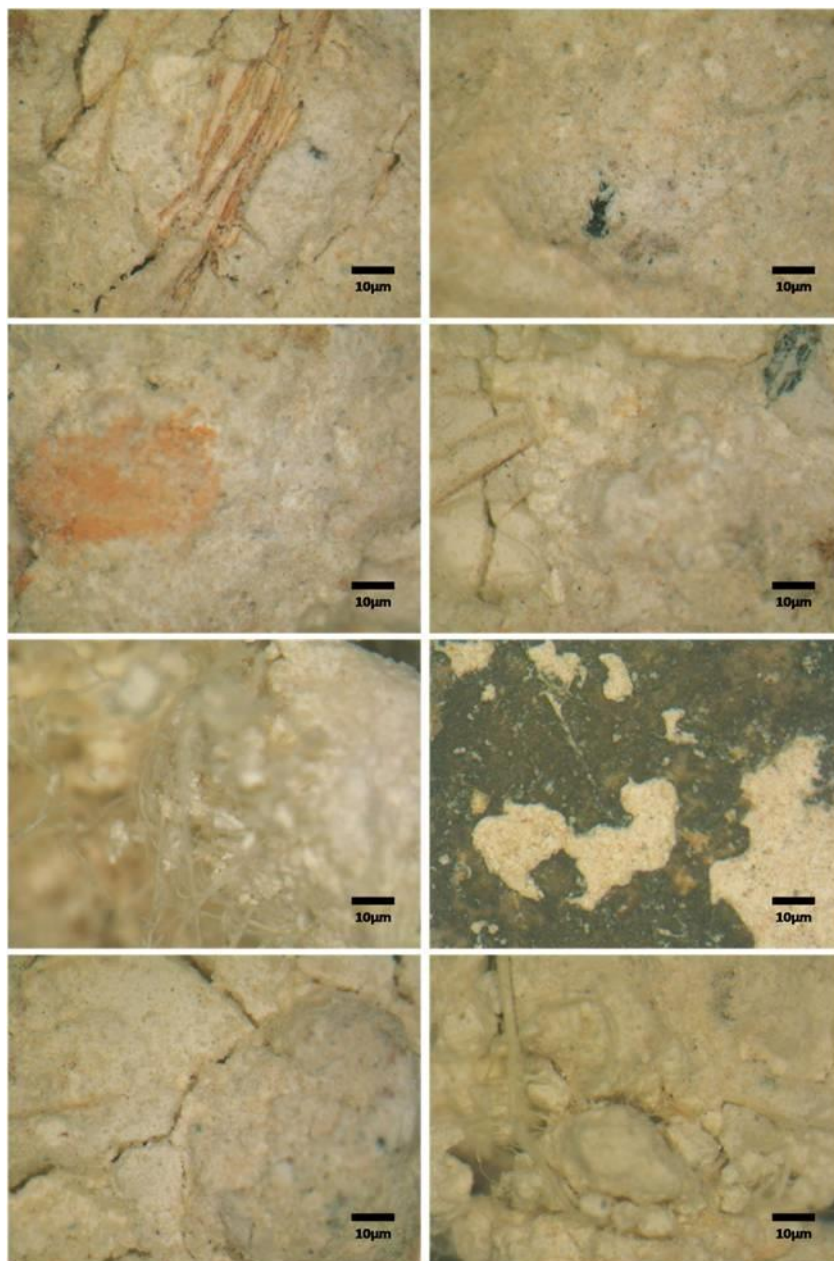
Εικόνα 3.23 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10µm) και φακό 120X (κλίμακα 5µm) του δείγματος JHS_fe_m

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_intss_pl - Φάση Κομνηνού**

Το επόμενο δείγμα (Εικόνα 3.24) είναι λευκού χρώματος (λευκή κονία) και φέρει μαύρες επικαθίσεις στη μία του όψη. Επίσης, μακροσκοπικά είναι εμφανείς λευκές ίνες. Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται ευκρινώς πολλές ίνες, όπως και λίγα άχυρα, καθώς και διάσπαρτα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου στη μάζα του.



Εικόνα 3.24 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_intss_pl



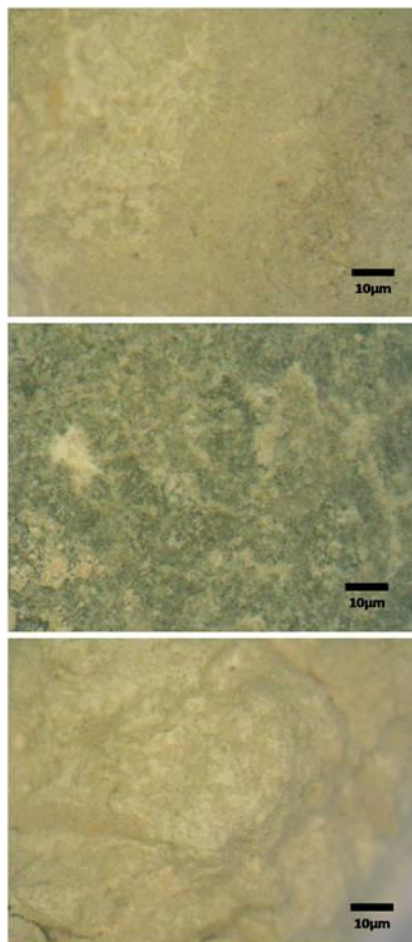
Εικόνα 3.25 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10μm) του δείγματος JHS_intss_pl

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_t_pl - Φάση Κομνηνού**

Το υποφαινόμενο δείγμα (Εικόνα 3.26) είναι μπεζ χρώματος. Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται μαύρα αδρανή μεγαλύτερου μεγέθους και λευκά συσσωματώματα ασβέστη.



Εικόνα 3.26 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_t_pl



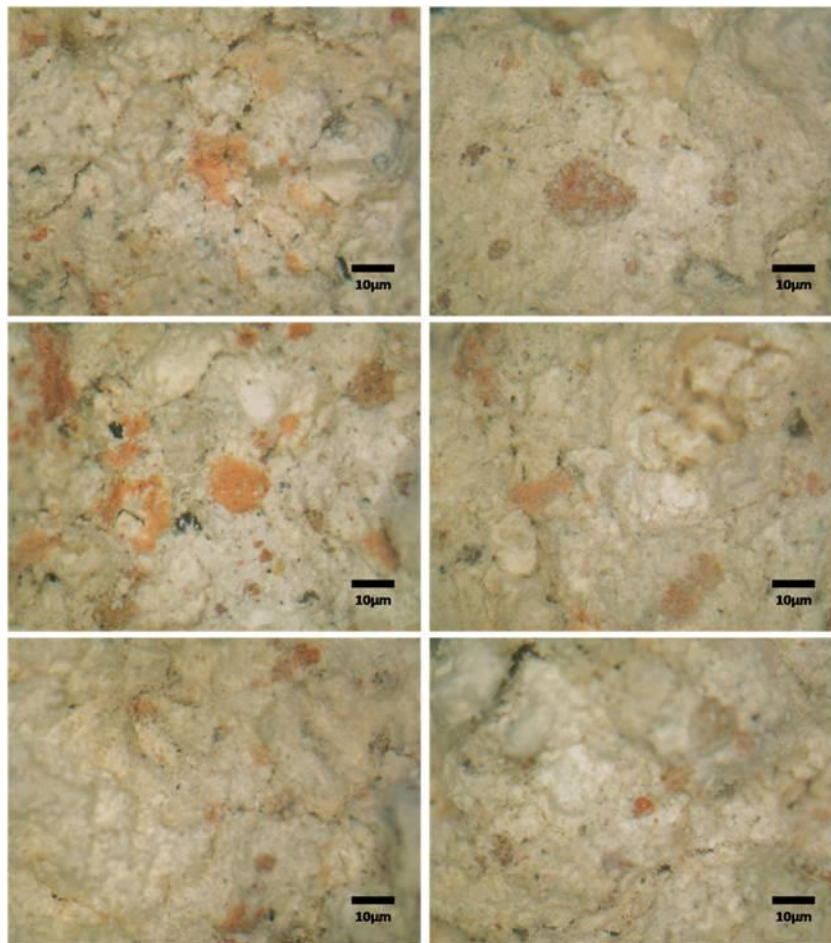
Εικόνα 3.27 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10µm) του δείγματος JHS_t_pl

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_intsf_m1- Φάση Κομνηνού**

Το υποφαινόμενο δείγμα (Εικόνα 3.28) είναι γκρι χρώματος. Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται διάσπαρτα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου στη μάζα του και μαύρα αδρανή.



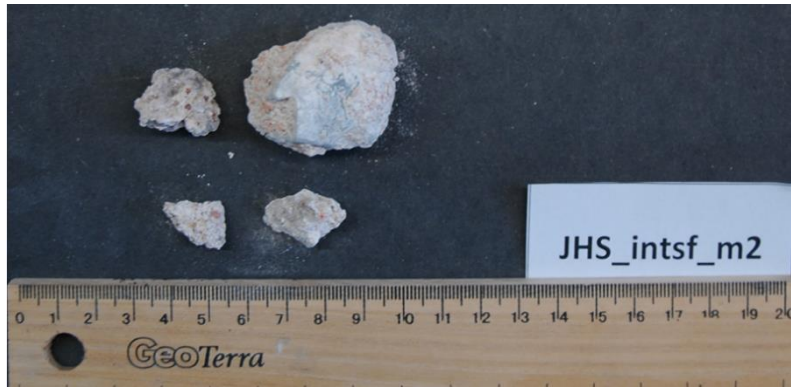
Εικόνα 3.28 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_intsf_m1



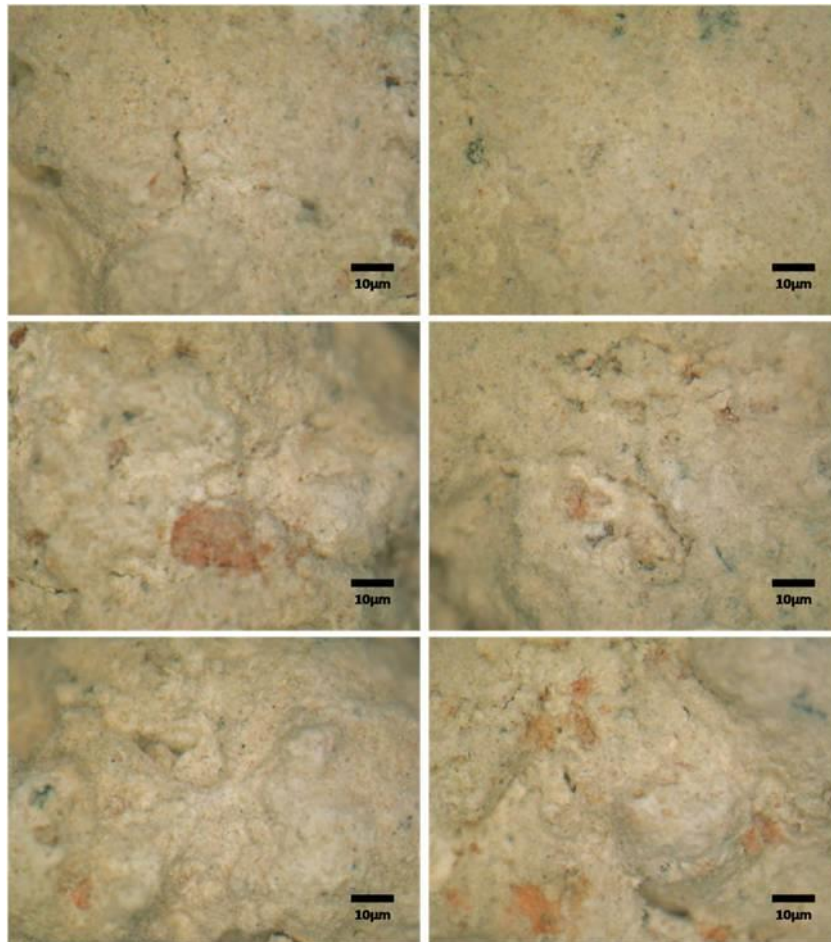
Εικόνα 3.29 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10µm) του δείγματος JHS_intsf_m1

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_intsf_m2- Φάση Κομνηνού**

Το υποφαινόμενο δείγμα (Εικόνα 3.30) είναι λευκού χρώματος (λευκή κονία). Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται διάσπαρτα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου στη μάζα του και μαύρα αδρανή.



Εικόνα 3.30 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_intsf_m2



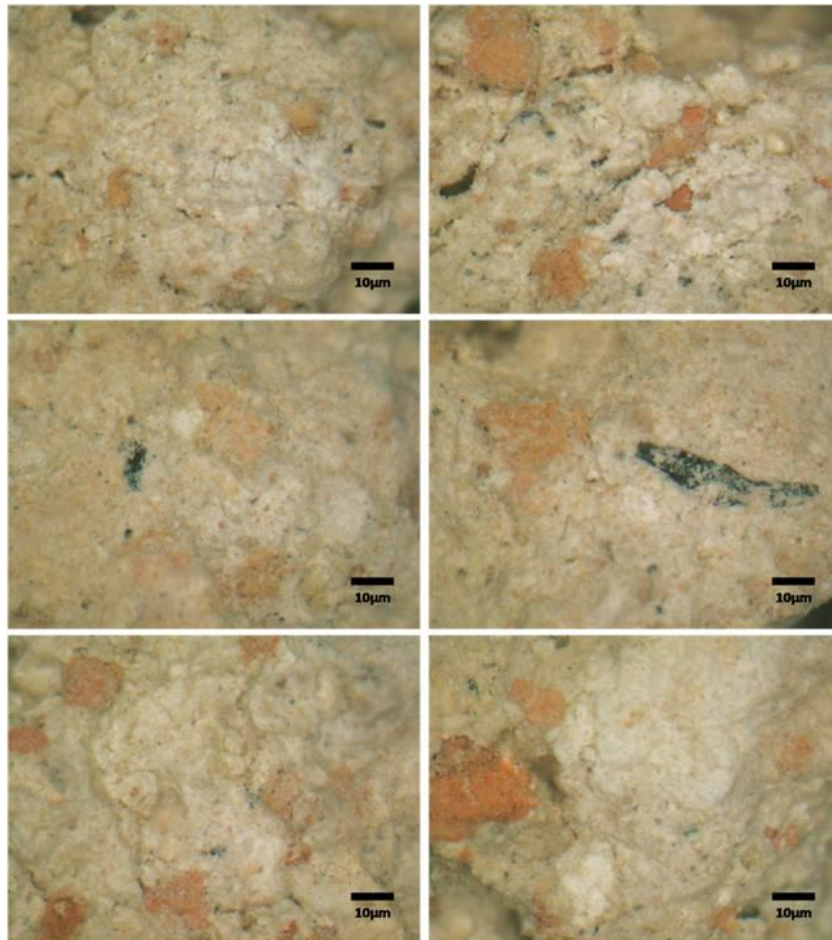
Εικόνα 3.31 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10μm) του δείγματος JHS_intsf_m2

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_intss_m - Φάση Κομνηνού**

Το υποφαινόμενο δείγμα (Εικόνα 3.32) είναι γκρι χρώματος. Από την εξέταση με το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών, παρατηρούνται διάσπαρτα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου στη μάζα του και μαύρα αδρανή ποικίλων μεγεθών.



Εικόνα 3.32 Μακροσκοπική όψη δείγματος JHS_intss_m



Εικόνα 3.33 Μετρήσεις Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών με φακό 50X (κλίμακα 10µm) του δείγματος JHS_intss_m

Πετρογραφικός Χαρακτηρισμός Δειγμάτων

Για τις ανάγκες του Πετρογραφικού χαρακτηρισμού των Δομικών Υλικών (Δομικοί Λίθοι, Κονιάματα και Επιχρίσματα) που προέρχονται από τις δειγματοληψίες που έλαβαν χώρα στο Ιερό Κουβούκλιο του Παναγίου Τάφου, τα δείγματα εξετάστηκαν εργαστηριακά στις εγκαταστάσεις της Δ/νσης Ορυκτολογίας - Πετρογραφίας του Ι.Γ.Μ.Ε. από τον Δρ. Γεωλόγο - Πετρολόγο Γεώργιο Οικονόμου και χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Πολωτικό Μικροσκόπιο (ανακλώμενου και διερχομένου φωτισμού) τύπου LEICA DMLP.
- Περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ, (XRD, τύπου PANALYTICAL, X' Pert PRO).
- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM), τύπου JEOL-JSM 5600.

Πολωτικό Μικροσκόπιο

- **Ασβεστοκονίαμα JHS_fe_m - Φάση Κομνηνού**

Το κονίαμα είναι κυρίως ασβεστιτικής σύστασης (ασβεστοκονίαμα), στο οποίο παρατηρούνται : μικροκρυσταλλικός ασβεσίτης σε ποσοστό περίπου 80%, καθώς και ορυκτά του, όπως λαρνίτης σε ποσοστό < 6%, γύψος σε ποσοστό περίπου 5% και χαλαζίας σε ποσοστό < 7%. Στο προκείμενο δείγμα δεν ήταν δυνατή η δημιουργία λεπτής τομής, γι' αυτό και δεν υπάρχει διαθέσιμη εικόνα από το Πολωτικό Μικροσκόπιο.

Ακολουθεί η γνωμάτευση για το ένα από τα δείγματα που εξετάστηκαν και αφορά την παρούσα μεταπτυχιακή.

| Κωδικός δείγματος | Μακροσκοπική περιγραφή δείγματος | Χαρακτηρισμός δείγματος ως προς την οικοδομική φάση | Πετρογραφικός Χαρακτηρισμός Δείγματος |
|--------------------------|---|--|--|
| JHS_fe_m | Κονίαμα Πλήρωσης Ορθομαρμάρωσης | Φάση Κομνηνού | Ασβεστοκονίαμα |

Πίνακας 3.2 Πετρογραφικός χαρακτηρισμός δείγματος

Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ

Για την ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις περιθλάσης ακτίνων-Χ, αφού τα δείγματα είχαν προηγουμένως λειοτριβηθεί στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα της περιθλάσης ακτίνων-Χ παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα.

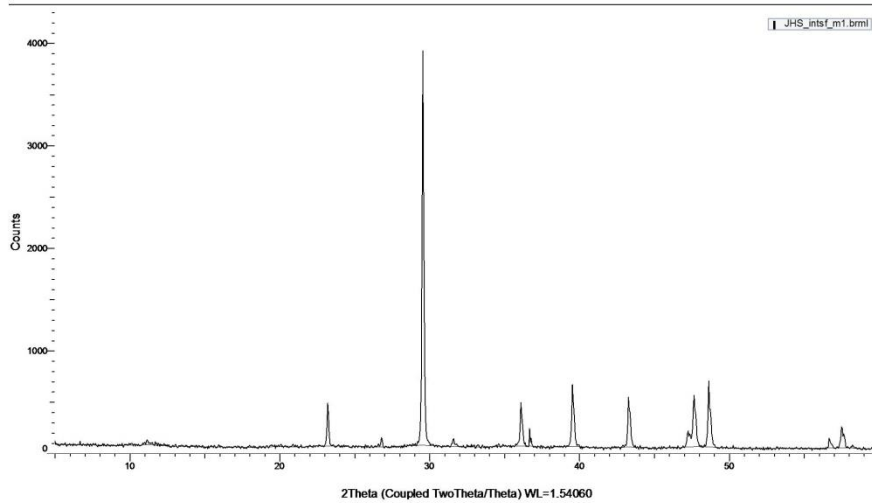
| Κωδικός Δείγματος | Ορυκτολογική Σύσταση |
|--------------------|--|
| Κονιάματα | |
| JHS_intsf_m1 | Μαγνησιακός ασβεστίτης, χαλαζίας |
| JHS_intsf_m2 | Μαγνησιακός ασβεστίτης, χαλαζίας, μοντμοριλονίτης, αλίτης |
| JHS_intss_m | Ασβεστίτης, χαλαζίας, ενστατίτης, αλίτης |
| JHS_t_pl | Μαγνησιακός ασβεστίτης, χαντίτης, αλίτης |
| JHS_fe_m | Ασβεστίτης, γύψος, ενστατίτης, χαλαζίας, μοντμοριλονίτης, γκελενίτης, αλίτης |
| Επιχρίσματα | |
| JHS_intss_pl | Μαγνησιακός ασβεστίτης, χαλαζίας, αλίτης |

Πίνακας 3.3 Συνοπτικά αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ

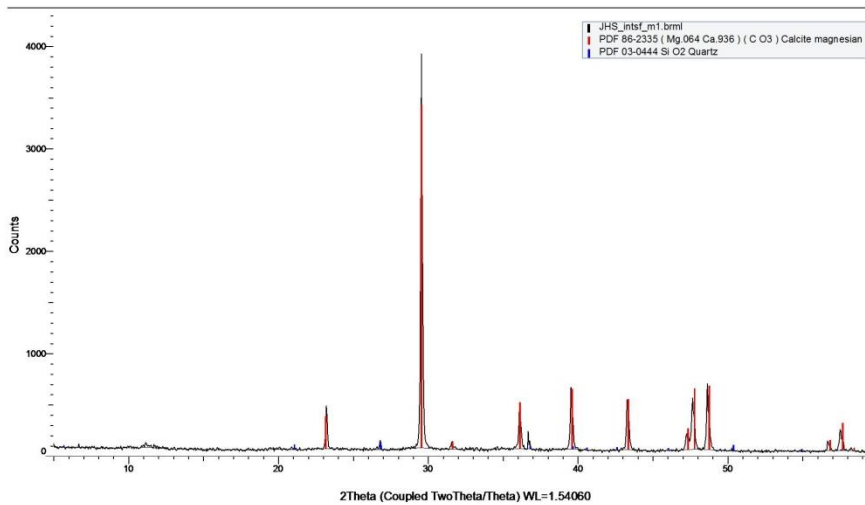
Αποτελέσματα Περιθλασιμετρίας Ακτίνων-Χ

Η κύρια ορυκτολογική φάση όλων των δειγμάτων των κονιαμάτων που εξετάστηκαν είναι και πάλι ο ασβεστίτης. Όμως, στα δείγματα JHS_intsf_m1, JHS_intsf_m2, JHS_t_pl, και JHS_intss_pl προσδιορίστηκε μαγνησιακός ασβεστίτης ($Mg_{0.64}Ca_{0.936}(CO_3)$). Χαλαζίας παρουσιάζεται ως δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση, σε μικρές όμως ποσότητες, σε όλα τα δείγματα, εκτός από το δείγμα του κονιάματος πλήρωσης του δώματος JHS_t_pl. Επιπλέον, αλίτης (κρυσταλλικό χλωριούχο νάτριο – προϊόν διάβρωσης) ανιχνεύεται σε όλα τα δείγματα εκτός από το JHS_intsf_m1. Ανιχνεύονται επίσης: ενστατίτης ($MgSiO_3$) στο δείγμα JHS_intss_m, και χαντίτης ($Mg_3Ca(CO_3)_4$) στο δείγμα JHS_t_pl. Γύψος, ενστατίτης, μοντμοριλονίτης ($KAl_4(Si, Al)_8O_{10}(OH)_4 \cdot 4H_2O$), και γκελενίτης προσδιορίζονται ως δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις στο δείγμα JHS_fe_m. Τέλος, ανιχνεύεται μοντμοριλονίτης ($KAl_4(Si, Al)_8O_{10}(OH)_4 \cdot 4H_2O$) στο δείγμα JHS_intsf_m2.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

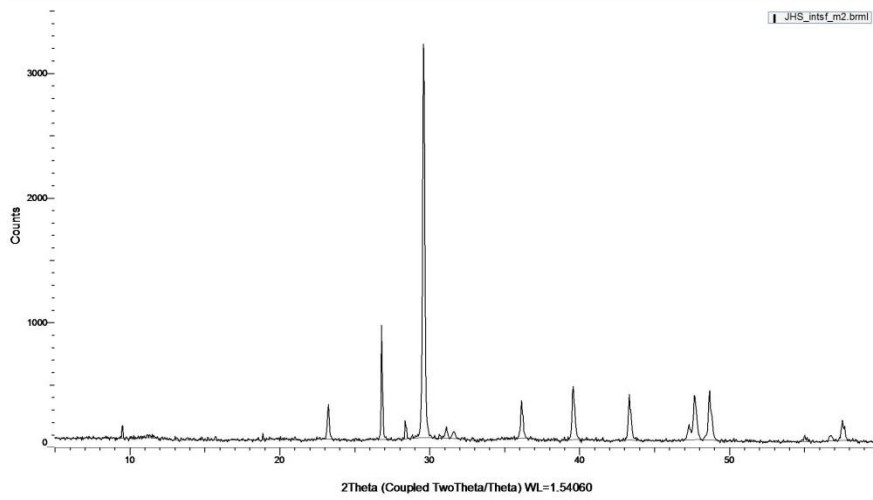


Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

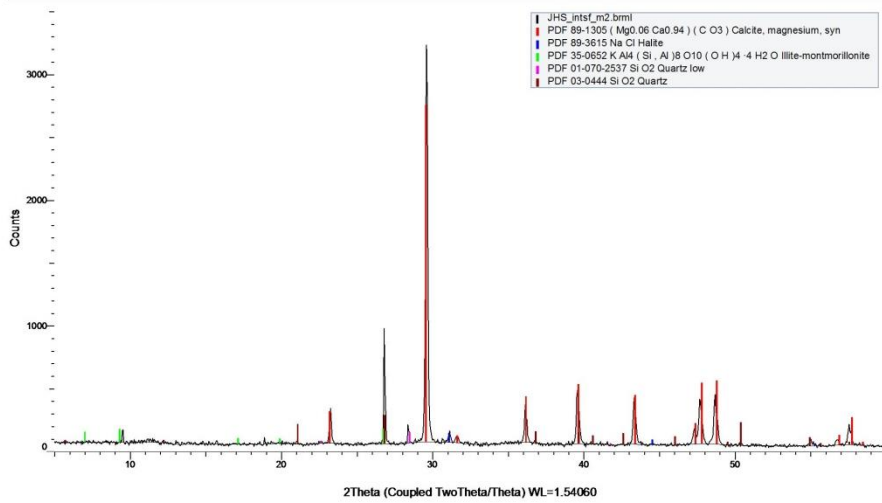


Εικόνα 3.34 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_intsf_m1

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

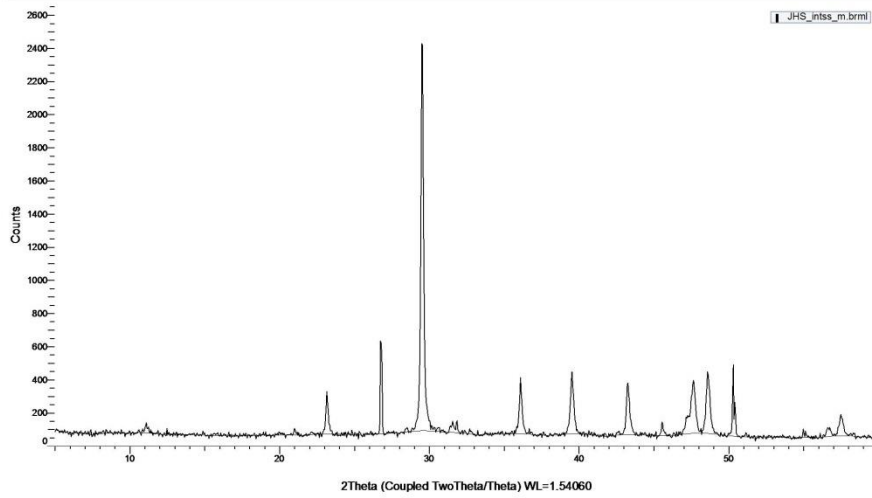


Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

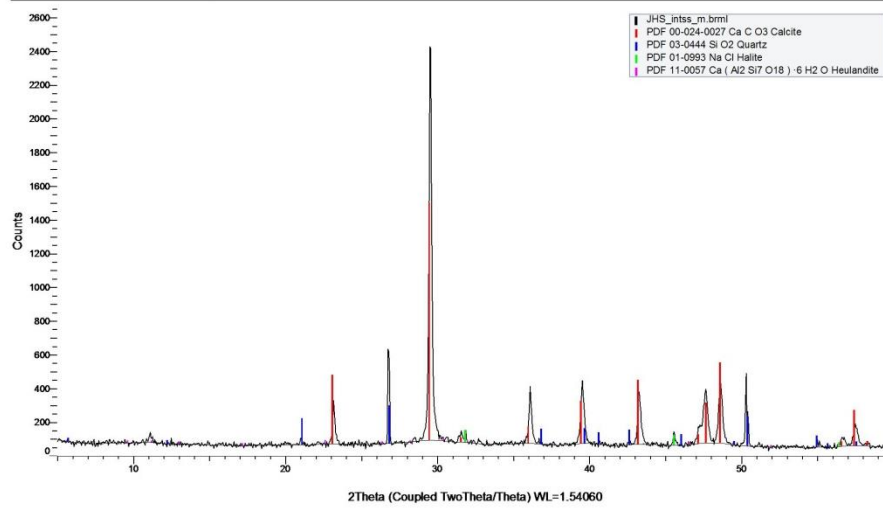


Εικόνα 3.35 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_intsf_m2

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

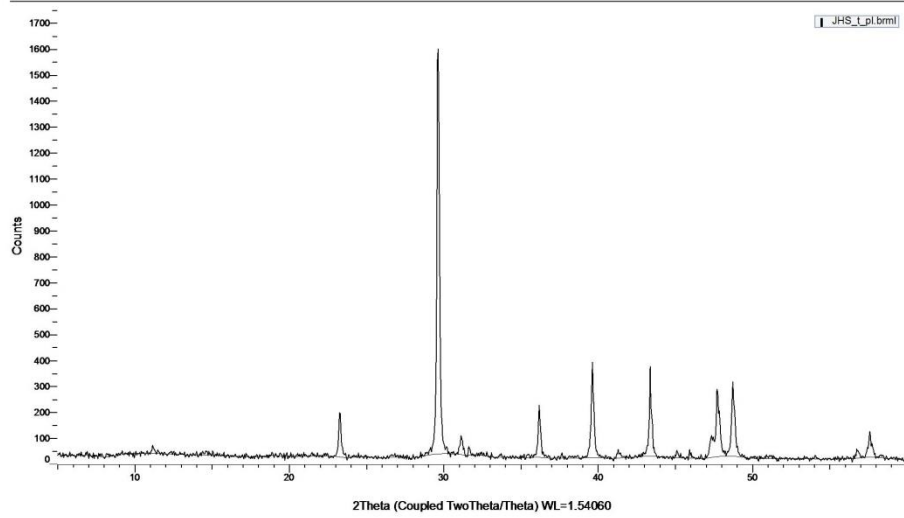


Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

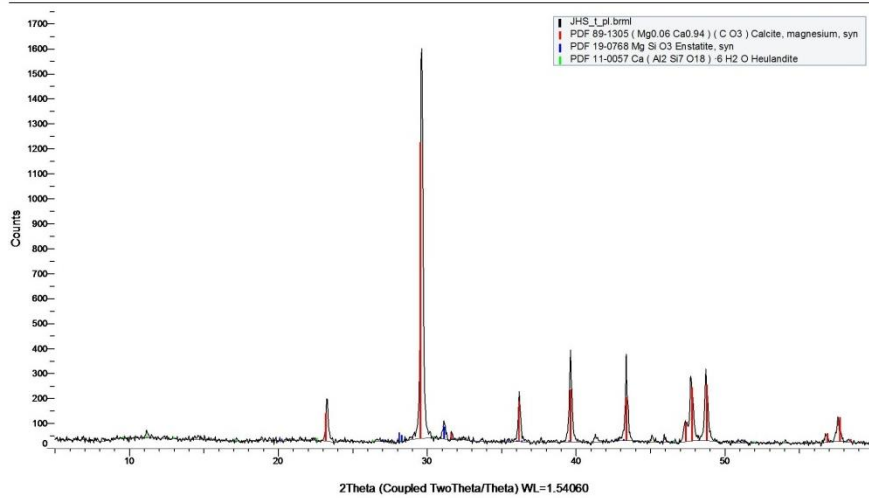


Εικόνα 3.36 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_intss_m

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

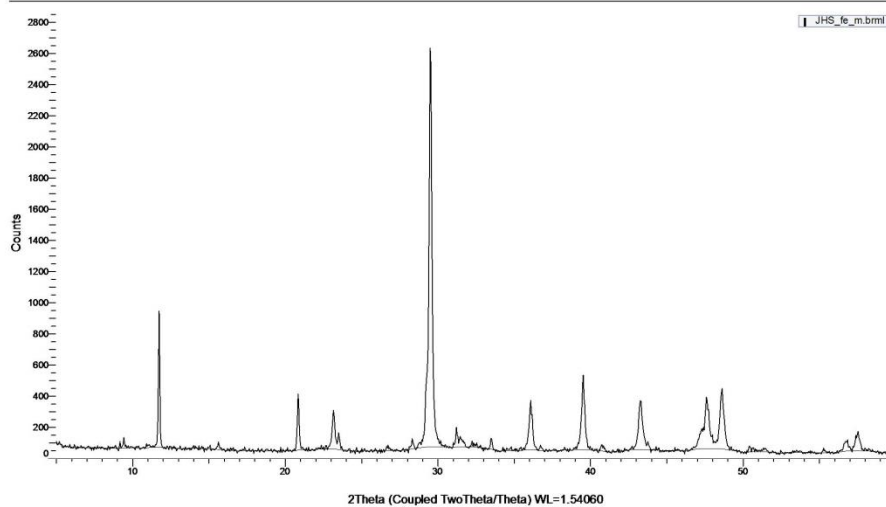


Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

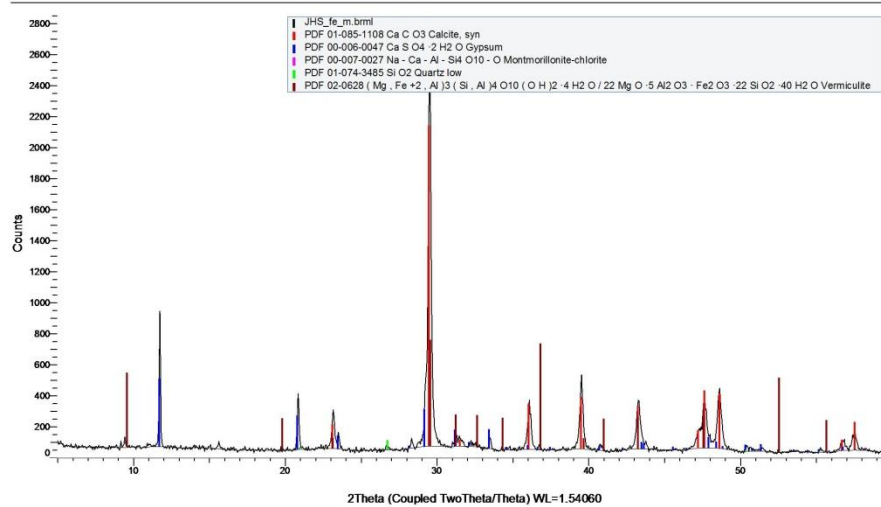


Εικόνα 3.37 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_t_pl

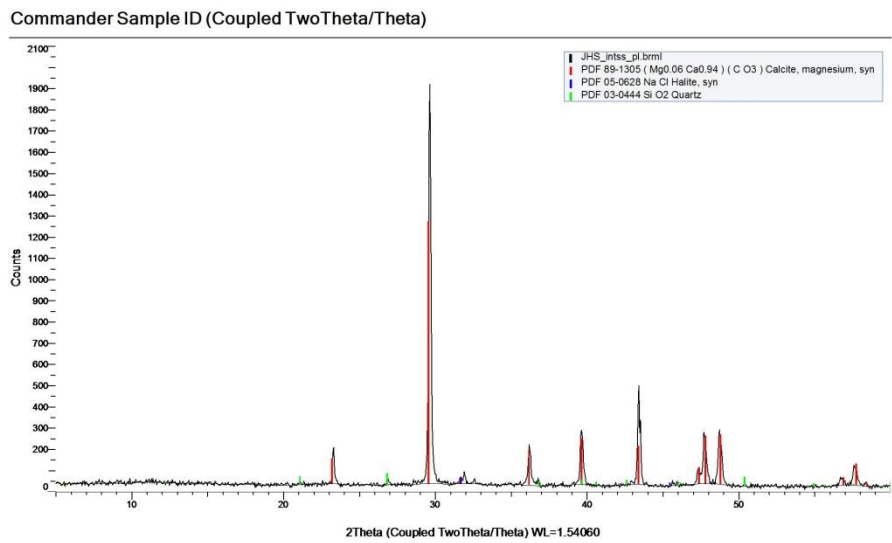
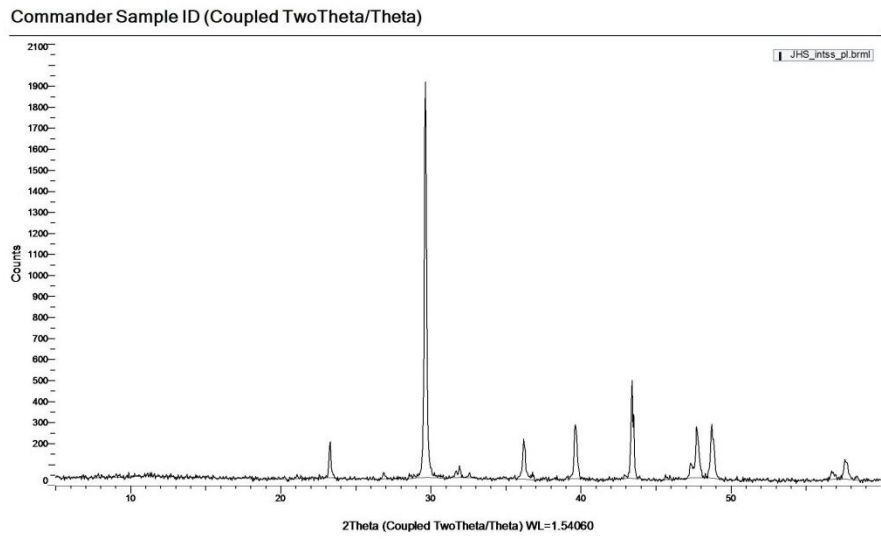
Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)



Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)



Εικόνα 3.38 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_fe_m



Εικόνα 3.39 Γωνιογράμματα δειγμάτων JHS_intss_pl

Μέθοδοι Θερμικής Ανάλυσης

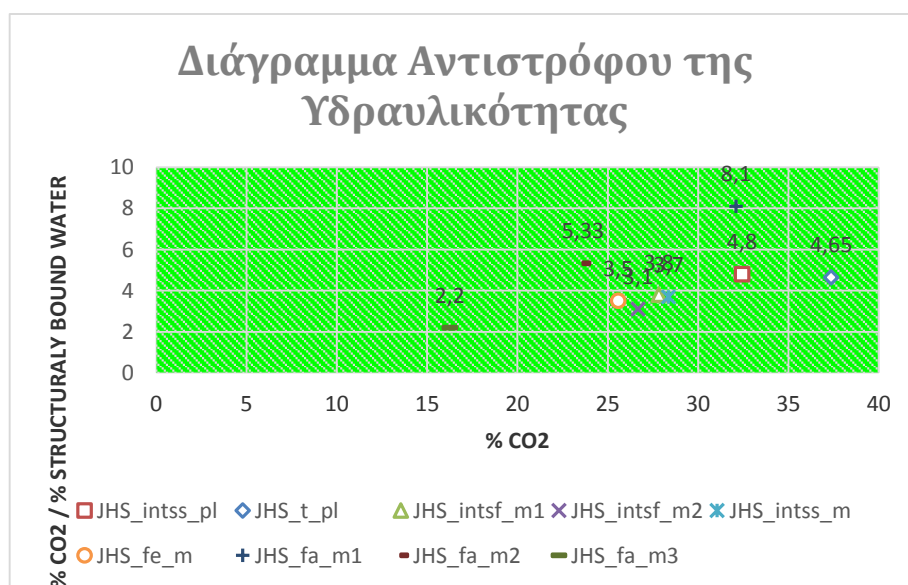
Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των θερμικών μεθόδων ανάλυσης (Πίνακας 3.4), το σύνολο των δειγμάτων των κονιαμάτων που εξετάστηκαν, χαρακτηρίζονται ως ασβεστίπικα με ελαφρώς υδραυλικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί μαγνησιακός ασβεστόλιθος, έως και μαργαϊκός ασβεστόλιθος, από τον οποίο έχει προέλθει η κονία, όπως συμπεραίνεται από την ανάλυση των περισσότερων δειγμάτων που ελήφθησαν από το εσωτερικό της σκάλας, είτε πρόκειται για κονίαμα, είτε πρόκειται για επίχρισμα. Στις περιπτώσεις που δεν έχει χρησιμοποιηθεί μαργαϊκός ασβεστόλιθος, παρατηρείται η ύπαρξη μεγάλης καθαρότητας, τυπικού ασβεστόλιθου. Σε όλα τα δείγματα εκτός από αυτό που έχει ληφθεί από το δώμα (JHS_t_pl) παρατηρούνται σχετικά υψηλά ή πολύ υψηλά ποσοστά παραμένουσας υγρασίας. Η σημαντική απώλεια μάζας, η οποία εντοπίζεται στο διάστημα 200-600°C, αποδίδεται σε τέσσερις παράγοντες. Ο πρώτος έχει να κάνει με τον κορεσμό των αργιλικών ενώσεων του μαργαϊκού ασβεστόλιθου σε νερό, γεγονός το οποίο έχει οδηγήσει και στην έντονη αποσάθρωση των κονιαμάτων με ταυτόχρονη απομείωση των μηχανικών τους αντοχών. Ο δεύτερος παράγοντας της απώλειας μάζας είναι η ύπαρξη οργανικής ύλης σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό από δείγμα σε δείγμα. Η ύπαρξη οργανικών παραγόντων επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR). Ο τρίτος παράγοντας ο οποίος σχετίζεται με την απώλεια μάζας και στο διάστημα από τους 200 έως και τους 600°C, αλλά και η ύπαρξη χαρακτηριστικών κορυφών σε άλλα θερμοκρασιακά διαστήματα είναι η ύπαρξη του εντριγκίτη, ο οποίος κρυσταλλώνεται με 16 κρυσταλλικά νερά. Η απουσία τσιμέντου από όλα τα δείγματα των ιστορικών κονιαμάτων και επίχρισμάτων (ο εντριγκίτης αποτελεί προϊόν διάβρωσης του τσιμέντου), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για το ορυκτό εντριγκίτη, ο οποίος απαντάται σε φλέβες και κοιλότητες του σχηματισμού *Hatrumit*, και προκύπτει από την διάβρωση κρουστών και λαρνιτικών πετρωμάτων. Οι χαρακτηριστικές κορυφές που υποδεικνύουν εντριγκίτη βρίσκονται στα δείγματα 2 και 3 των κονιαμάτων του καρότου της τοιχοποιίας.* Ίχνη εμφανίζονται και σε άλλα δείγματα, αλλά εκεί απαντάται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις μετρήσεις περίθλασης ακτίνων-X (XRD). Ο τέταρτος παράγοντας της απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα από 200 έως και 600°C είναι ο ελαφρά υδραυλικός χαρακτήρας που παρουσιάζουν τα κονιάματα. Ο παράγοντας αυτός στη φάση εφαρμογής των κονιαμάτων αυτών, τους είχε προσδώσει τις μηχανικές αντοχές οι οποίες και κράτησαν για πάρα πολλά χρόνια τη στατική επάρκεια της κατασκευής. Οι χαμηλές όμως μηχανικές αντοχές, που βρίσκουμε σήμερα σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μικροδομής που δείχνουν έντονα φθαρμένα υλικά, επιβεβαιώνουν ότι η διαβρωτική συμπεριφορά του νερού με την πάροδο του χρόνου (έντονη διάβρωση των αργιλικών προσμίξεων του μαργαϊκού ασβεστόλιθου με την παρουσία πλέον του τριανθρακικού αργιλικού ασβεστίου) απομείωσαν τις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων δίνοντας το σημερινό αποτέλεσμα, πίεση των ορθομαρμαρώσεων λόγω της απώλειας της αντοχής, αλλά και του μεγαλύτερου μοριακού όγκου που έχει οδηγήσει στην γλοιώδη εξαλλοιωμένη σημερινή κατάσταση. Τα αποτελέσματα ωστόσο της θερμικής ανάλυσης είναι ο οδηγός, όπως περιγράφεται και στη μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης για την παρασκευή και πρόταση συμβατών και επιτελεστικών κονιαμάτων αποκατάστασης. Ο ελαφρώς υδραυλικός χαρακτήρας των κονιαμάτων χρήζει ενίσχυσης, και είναι επιτακτική η ανάγκη χρήσης υλικών, τα οποία είναι ανθεκτικά στους διαβρωτικούς παράγοντες που υφίσταται η κατασκευή, διατηρώντας από την άλλη πλευρά και ικανές μηχανικές αντοχές, οι οποίες συνάδουν και με τις αντοχές των υπολοίπων δομικών στοιχείων της κατασκευής.

*δεν αφορά τα δείγματα που παρουσιάζονται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία – αναφέρεται επειδή αποτελεί συμπέρασμα της συνολικής μελέτης αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκε

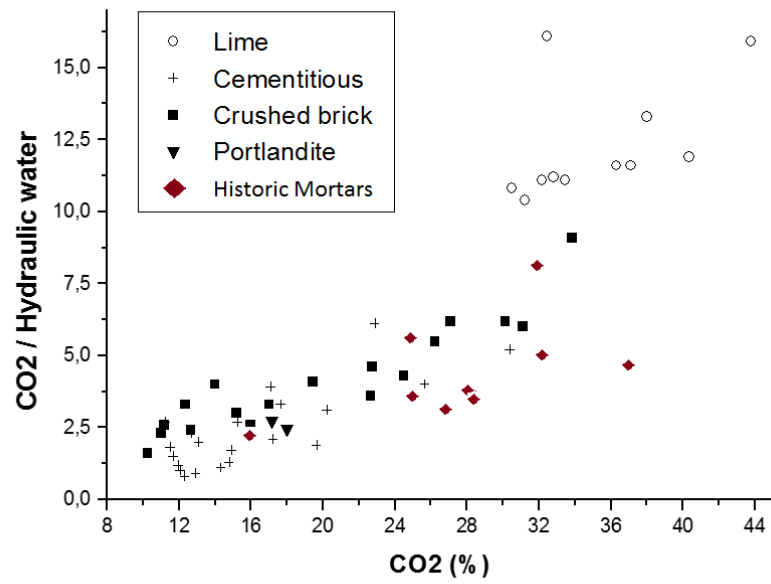
| Κωδικός Δείγματος | Διαστήματα Θερμοκρασίας | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | 25-120 (°C) | 120-200 (°C) | 200-600 (°C) | >600 (°C) |
| | %Απώλεια Μαζας | %Απώλεια Μαζας | %Απώλεια Μαζας | %Απώλεια Μαζας |
| Κονιάματα | | | | |
| JHS_t_pl | 0.96 | 0.64 | 8.03 | 37.36 |
| JHS_intsf_m1 | 2.52 | 0.85 | 7.28 | 27.82 |
| JHS_intsf_m2 | 2.71 | 1.08 | 8.66 | 26.67 |
| JHS_intss_m | 1.93 | 1.08 | 8.17 | 28.12 |
| | 2.09 | 1.06 | 7.59 | 28.36 |
| JHS_fe_m | 0.97 | 2.06 | 8.78(6.3) | 31.19 |
| Επιχρίσματα | | | | |
| JHS_intss_pl | 1.46 | 0.60 | 6.74 | 32.43 |

Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 3.1) απεικονίζεται το αντίστροφο της υδραυλικότητας, δηλαδή το αντίστροφο του υδραυλικού χαρακτήρα παρουσιάζει ένα κονίαμα για τα αυθεντικά κονιάματα του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου. Φαίνεται αφενός ο ασβεσπιτικός τους χαρακτήρας (υψηλά ποσοστά απώλειας διοξειδίου του άνθρακα), αφετέρου ο ελαφρά υδραυλικός τους χαρακτήρας, αφού η απώλεια που οφείλεται σε χημικά δεσμευμένο νερό είναι σημαντική. Για λόγους σύγκρισης και ομαδοποίησης, στο αντίστοιχο Διάγραμμα 3.2 υπερτίθενται τα ιστορικά κονιάματα του Ιερού Κουβουκλίου με πλήθος κονιαμάτων που έχουν εξεταστεί από το εργαστήριο επιστήμης και τεχνικής των υλικών του Ε.Μ.Π.



Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα αντιστρόφου της υδραυλικότητας για τα ιστορικά κονιάματα



Διάγραμμα 3.2 Διάγραμμα υπέρθεσης αντιστρόφου της υδραυλικότητας ιστορικών κονιαμάτων Ιερού Κουβουκλίου Παναγίου Τάφου με πλήθος ιστορικών κονιαμάτων που έχουν εξεταστεί από το εργαστήριο επιστήμης και τεχνικής των υλικών του Ε.Μ.Π.

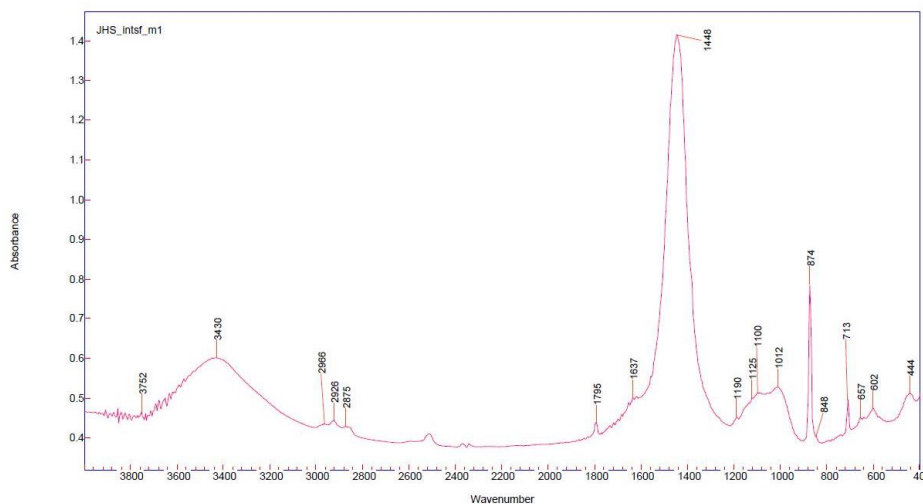
Φασματοσκοπία Υπερύθρου Μετασχηματισμών Fourier (FTIR)

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier πραγματοποιήθηκαν για τον ποιοτικό προσδιορισμό της χημικής σύστασης των δειγμάτων που εξετάστηκαν. Με την τεχνική εξετάστηκαν πέντε κονιάματα που αφορούν αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία. Η κύρια σύσταση των κονιαμάτων που εξετάστηκαν είναι ασβεσπική. Παρουσιάζονται δε, οργανικές και αργιλοπυριτικές ενώσεις, καθώς και μικρές ποσότητες θειικού ασβεστίου.

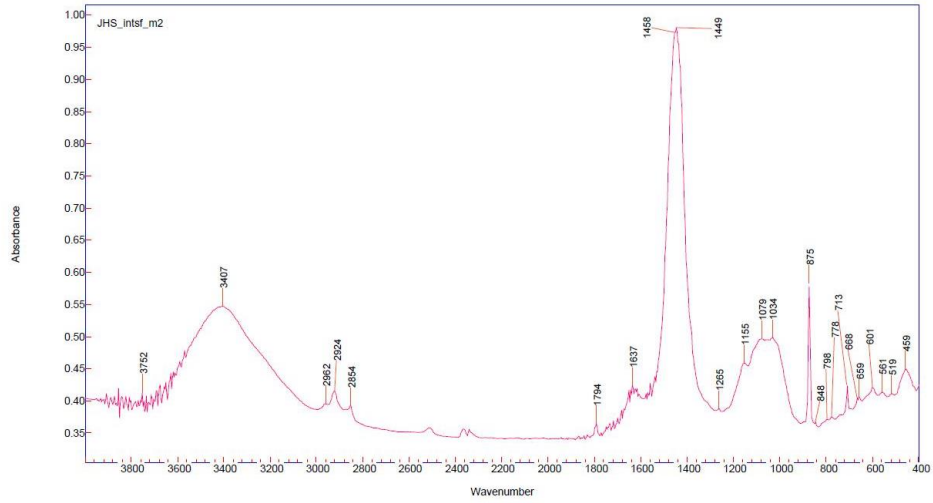
Ειδικά, για το JHS_fe_m, το φάσμα του, παρουσιάζει μια ευρεία κορυφή απορρόφησης στους 3456 κυματάρια περίπου, η οποία αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του δεσμού οξυγόνου-υδρογόνου (O-H) που συμμετέχει σε δεσμούς υδρογόνου ή/και ανήκει σε ελεύθερο νερό, ενώ στους 1650 κυματάρια περίπου, αντιστοιχεί η δόνηση κάμψης του δεσμού οξυγόνου-υδρογόνου (O-H). Η οξεία κορυφή ανάμεσα στους 3698 και 3750 κυματάρια, που παρουσιάζεται σε όλα τα δείγματα, αποδίδεται στη δόνηση τάσης οξυγόνου-υδρογόνου (O-H) που δε συμμετέχει σε δεσμούς υδρογόνου. Επιπλέον, στους 1430 κυματάρια αντιστοιχεί η δόνηση τάσης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη (ανθρακικό ασβέστιο-CaCO₃), ενώ στους 875 και 713 κυματάρια αντιστοιχεί η δόνηση κάμψης του ανθρακικού ανιόντος του ασβεστίτη.

Η παρουσία οργανικών ενώσεων πιστοποιείται από την παρουσία τριών κορυφών χαμηλής έντασης, περίπου στους 2970, 2930 και 2860 κυματάρια, που αντιστοιχούν στις δονήσεις τάσεων των δεσμών άνθρακα-υδρογόνου (C-H) κορεσμένων υδρογονανθράκων. Η σχετικά ευρεία ταινία ανάμεσα στους 1150 και τους 950, παρουσιάζει κορυφές στους 1090 και 1021 κυματάρια περίπου, που αντιστοιχούν στις δονήσεις τάσεων των δεσμών πυριτίου-οξυγόνου (Si-O) και υποδεικνύουν την παρουσία πυριτικών ενώσεων. Η ασθενής κορυφή στους 850 κυματάρια αποδίδεται στη δόνηση κάμψης του δεσμού Al-O-H αργιλικών ενώσεων.

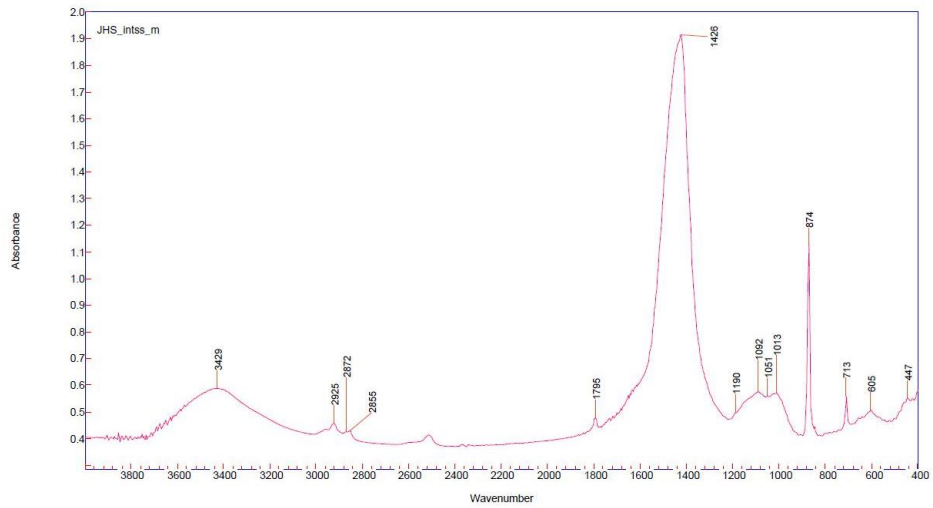
Τέλος, οι κορυφές στους 670 και 605 κυματάρια αντιστοιχούν στις δονήσεις κάμψης του δεσμού S-O του θειικού ανιόντος της ένωσης του θειικού ασβεστίου.



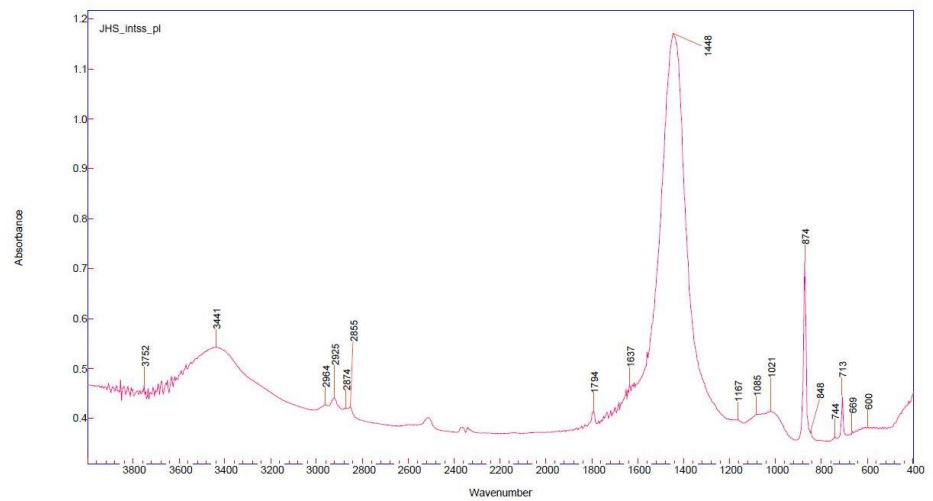
Εικόνα 3.40 Φάσμα του δείγματος JHS_intsf_m1



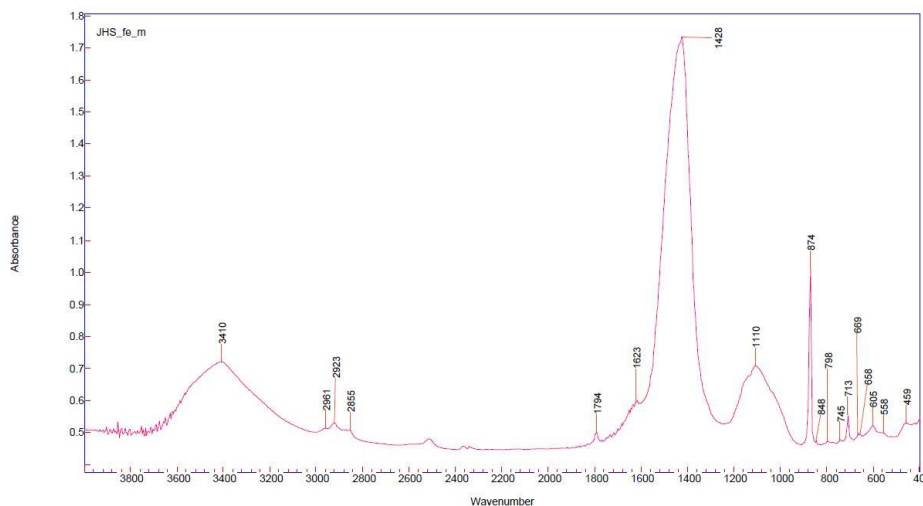
Εικόνα 3.41 Φάσμα του δείγματος JHS_intsf_m2



Εικόνα 3.42 Φάσμα του δείγματος JHS_intss_m



Εικόνα 3.43 Φάσμα του δείγματος JHS_intss_pl



Εικόνα 3.44 Φάσμα του δείγματος JHS_fe_m

Ποροσιμετρία Υδραργύρου

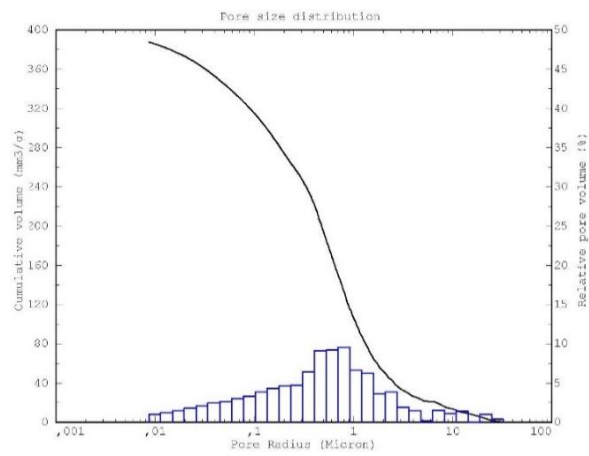
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ποροσιμετρίας για όλα τα δείγματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Δείγμα | Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g) | Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³) | Ολικό Ανοιχτό Πορώδες (%) | Μέση Ακτίνα Πόρων (μm) | Ειδική Επιφάνεια (m ² /g) |
|------------------|---|--|---------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Κονιάματα | | | | | |
| JHS_fe_m | 450.6557 | 1.14336 | 51.5262 | 0.567782 | 2.452 |
| JHS_intsf_m1 | 387.4482 | 1.24328 | 48.1708 | 0.496312 | 6.235 |
| JHS_intss_m | 432.4344 | 1.17697 | 50.8962 | 0.780076 | 6.239 |
| JHS_t_pl | 215.8231 | 1.55002 | 33.4529 | 0.467869 | 1.948 |
| Επίχρισμα | | | | | |
| JHS_intss_pl | 295.1378 | 1.4603 | 43.099 | 0.489399 | 2.61 |

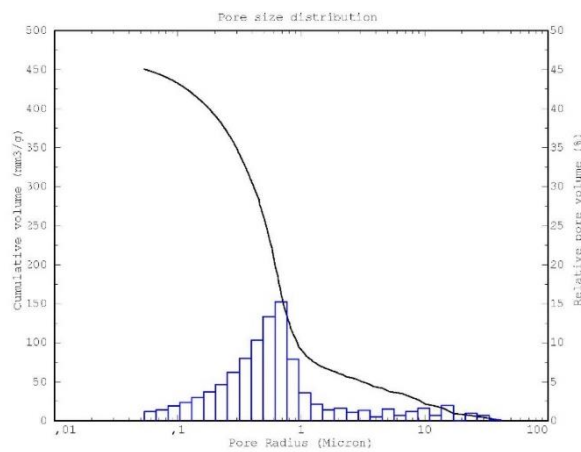
Πίνακας 3.5 Μετρήσεις Χαρακτηριστικών Μικροδομής

Οι μετρήσεις ποροσιμετρίας για τα κονιάματα δείχνουν γενικά υψηλές τιμές ειδικής επιφάνειας, ενισχύοντας την υπόθεση ότι τα μικρά ανοιχτού-πορτοκαλί αδρανή που βρίσκονται σε αυτά είναι κεραμικά. Οι τιμές του ανοιχτού πορώδους χαρακτηρίζονται

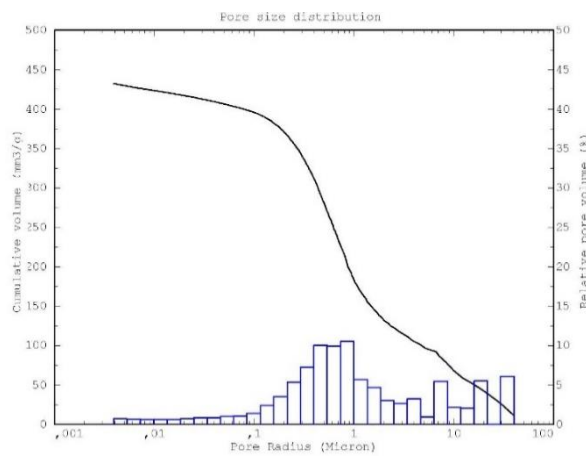
ως αρκετά υψηλές (28-56%) ενώ αναλυτικότερα η κατανομή των διαμέτρων των πόρων για τα κονιάματα παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 3.45 - Εικόνα 3.48).



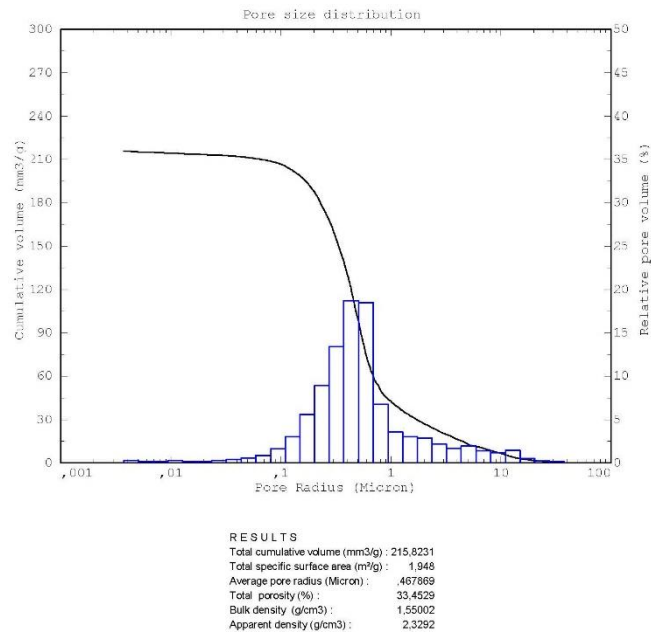
Εικόνα 3.45 Κατανομή μεγέθους πόρων δείγματος JHS_intsf_m1



Εικόνα 3.46 Κατανομή μεγέθους πόρων δείγματος JHS_fe_m

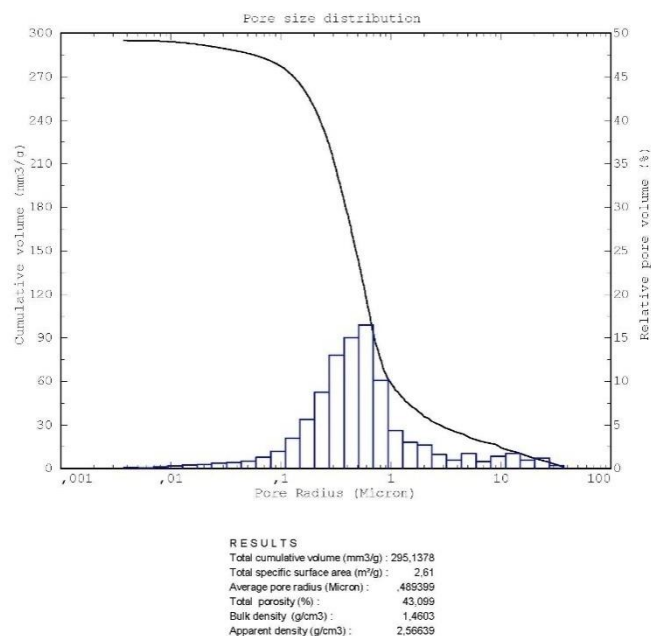


Εικόνα 3.47 Κατανομή μεγέθους πόρων δείγματος JHS_intss_m



Εικόνα 3.48 Κατανομή μεγέθους πόρων δείγματος JHS_t_pl

Για το επίχρισμα το ολικό ανοικτό πορώδες χαρακτηρίζεται ως υψηλό (43%), όπως και η ειδική επιφάνεια, που έχει την τιμή 2.61 m²/gr. Η κατανομή των διαμέτρων των πόρων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.49.



Εικόνα 3.49 Κατανομή μεγέθους πόρων δείγματος JHS_intss_pl

Προσδιορισμός Ολικών Διαλυτών Αλάτων

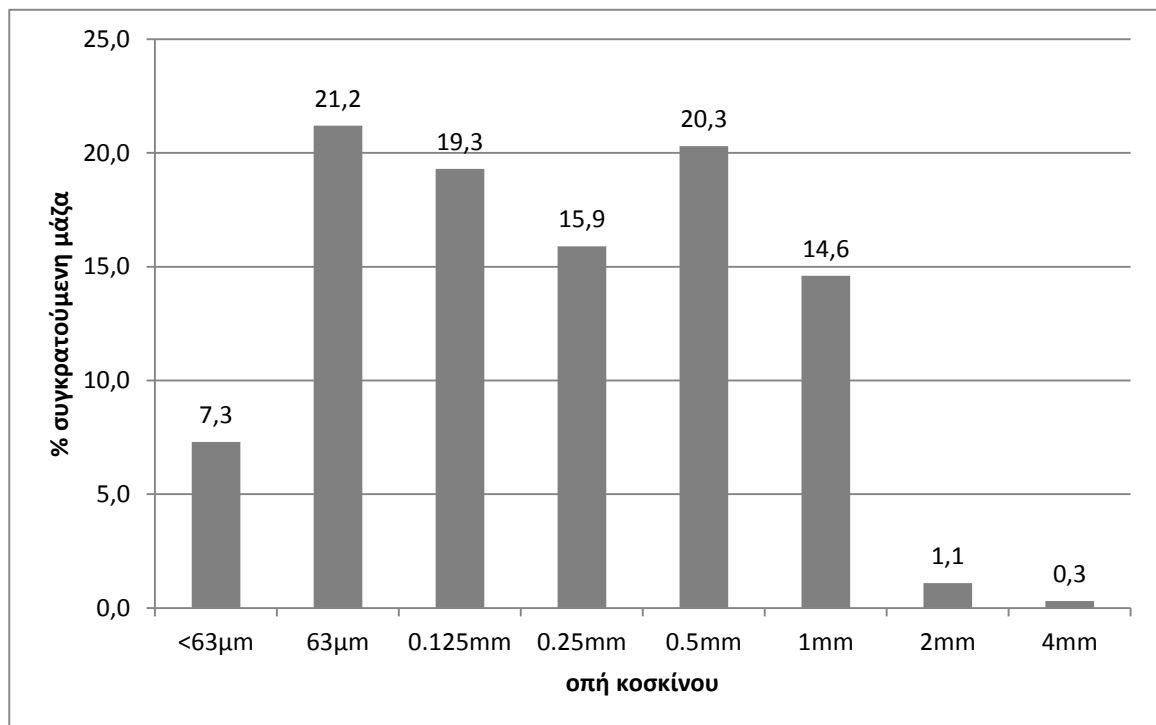
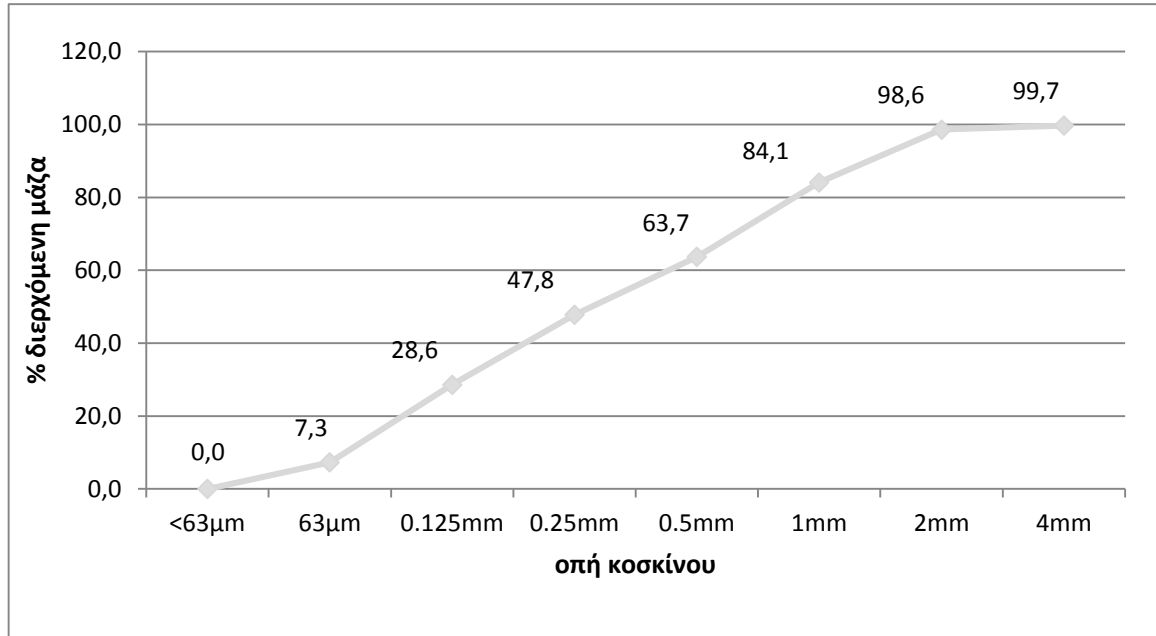
Αν και οι μετρήσεις ολικών διαλυτών αλάτων πραγματοποιήθηκαν σε δύο ημέρες διαφορετικής θερμοκρασίας, εντούτοις προκύπτει στην πολύ μεγάλη πλειοψηφία των δειγμάτων υψηλή ή πολύ υψηλή παρουσία διαλυτών αλάτων (Πίνακας 3.6). Ειδικότερα για τα κονιάματα, από όπου κι αν προέρχονται η παρουσία διαλυτών αλάτων είναι ιδιαίτερα υψηλή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών της ποιοτικής χημικής ανίχνευσης διαπιστώθηκε μικρή παρουσία χλωριόντων (Cl⁻) στο συνδετικό κονίαμα της εσωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας του Πρόναου (JHS_intsf_m1), στο κονίαμα για τις ορθομαρμαρώσεις (JHS_intsf_m2), στο κονίαμα πλήρωσης της πρόσοψης (JHS_fe_m) και στο κονίαμα (JHS_intss_m) της εσωτερικής παρειάς της σκάλας. Ίχνη θεικών (SO₄⁻²) ανιχνεύονται στα κονιάματα του δώματος (JHS_t_pl) και το κονίαμα της εσωτερικής παρειάς της σκάλας (JHS_intss_m), όσο και στο επίχρισμα της εσωτερικής παρειάς της σκάλας (JHS_intss_pl).

| Δείγμα | Μάζα (mgr) | Θερμοκρασία Μέτρησης (°C) | Αγωγιμότητα διαλύματος (μS) | SST (%) | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² |
|--------------------|------------|---------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|
| Κονιάματα | | | | | | |
| JHS_intsf_m1 | 100 | 18.8 | 182.2 | 12.54 | + | - |
| JHS_intsf_m2 | 110 | 18.9 | 153.6 | 9.61 | + | - |
| JHS_intss_m | 120 | 18.9 | 177.9 | 10.20 | + | + |
| JHS_t_pl | 100 | 18.4 | 64.8 | 4.46 | - | + |
| JHS_fe_m | 110 | 18.8 | 180.4 | 11.28 | + | - |
| Επίχρισματα | | | | | | |
| JHS_intss_pl | 110 | 18.9 | 130.3 | 8.15 | - | + |

Πίνακας 3.6 Μετρήσεις δειγμάτων για τον προσδιορισμό των Ολικών Διαλυτών Αλάτων

Κοκκοδιαβάθμιση

Στην παρούσα εργασία, κοκκοδιαβάθμιση πραγματοποιήθηκε μόνο για το δείγμα JHS_fe_m.

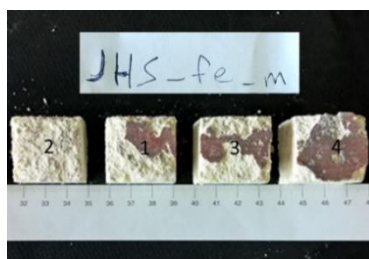


Δοκιμές Μηχανικών Αντοχών

Για να γίνει η μέτρηση των δειγμάτων, αυτά έπρεπε να έχουν κυλινδρική ή κυβική μορφή. Έτσι τα αρχικά δείγματα επεξεργάστηκαν και προσαρμόστηκαν καταλλήλως, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.50-3.51. Το δείγμα του οποίου οι μηχανικές αντοχές μετρήθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι το κονίαμα πλήρωσης (δείγμα JHS_fe_m). Αφού πρώτα μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δειγμάτων για τη δημιουργία των ανηγμένων διαγραμμάτων (τάσης-παραμόρφωσης) και για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης θραύσεως, στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης (4 δοκίμια).



Εικόνα 3.50 Κοπή και προετοιμασία δοκιμών για μέτρηση των Μηχανικών τους Ιδιοτήτων



Εικόνα 3.51 Τα τέσσερα δοκίμια που προέρχονται από το δείγμα του κονιάματος πλήρωσης μετά την επεξεργασία τους για να εκπληρωθούν οι μετρήσεις θλίψεως

Πειραματική διαδικασία

Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο Αντοχής των Υλικών, του Τομέα Μηχανικής των Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με επιβλέπων καθηγητή Ε.Μ.Π. τον κύριο Σταύρο Κουρκουλή, με τη βοήθεια των Δρ.Ερμιόνης Πάσιου και υποψήφιου διδάκτορα Εμμανουήλ Αλεξάκη.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των δοκιμών του κονιάματος πλήρωσης (JHS_fe_m) είναι της εταιρίας Material Testing System (Modellnsight) με μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο τους 10 τόνους. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με

σταθερό ρυθμό επιβολής της μετατόπισης της τραβέρσας της μηχανής, έτσι ώστε να προσομοιώνονται «οιονεί» στατικές συνθήκες. Η πειραματική διάταξη, κατά τη διάρκεια της μέτρησης ενός δοκιμίου και ο συνολικός αριθμός των δοκιμών του δείγματος JHS_fe_m μετά το πέρας των μετρήσεων φαίνονται στην Εικόνα 3.52.



Εικόνα 3.52 Αριστερά: Πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια της μέτρησης ενός δοκιμίου του δείγματος κονιάματος πλήρωσης Δεξιά: Τα δοκίμια μετά από τις μετρήσεις

Αποτελέσματα – Μετρήσεις

Οι μηχανικές αντοχές του κονιάματος πλήρωσης μετρήθηκε με δοκιμές θλίψης με επιβολή φορτίου σε δύο κατευθύνσεις για τα τέσσερα δοκίμια ως: 1) κόκκινη επίστρωση είναι κατακόρυφη στη διεύθυνση φόρτισης (JHS_fe_m_1-2) και 2) κόκκινη επίστρωση είναι οριζόντια στη διεύθυνση φόρτισης (JHS_fe_m_3-4). Οι μηχανικές αντοχές που μετρήθηκαν για τα δοκίμια που προέρχονται από το κονίαμα πλήρωσης (η τάση θραύσεως και το μέτρο ελαστικότητας) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

| Κωδικός Δείγματος | Τάση θραύσεως σε θλίψη [MPa] | Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη [MPa] |
|----------------------|---------------------------------------|---|
| JHS_fe_m_1 | 1.7 | 54.6 |
| JHS_fe_m_2 | 2.0 | 110.3 |
| JHS_fe_m_3 | 1.0 | 24.5 |
| JHS_fe_m_4 | 1.0 | 21.1 |

Πίνακας 3.7 Μετρήσεις Μηχανικών Αντοχών Δείγματος Κονιάματος Πλήρωσης από την πρόσθια όψη του Ναού

Οι μηχανικές αντοχές του κονιάματος πλήρωσης επιβεβαιώνουν την αρχική υπόθεση ότι το υλικό αυτό είναι κονίαμα και επιπλέον, οι μεγάλες διαφορές που παρουσιάζονται για τις μετρήσεις στις δύο κατευθύνσεις δηλώνουν ότι το υλικό αυτό εμφανίζει μεγάλη ανισοτροπία. Η μεγάλη τιμή (μεγάλη διαφορά) για το μέτρο ελαστικότητας του δείγματος JHS_fe_m_2 πιθανόν να οφείλεται στην ανομοιομορφία κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου λόγω της κόκκινης επίστρωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Άξιο παρατήρησης είναι το γεγονός ότι στα δείγματα στα οποία η διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου είναι κάθετη στην επιφάνεια με την κόκκινη επίστρωση (JHS_fe_m_3-4) παρατηρείται ρηγμάτωση και διάρρηξη του δείγματος, ενώ στη περίπτωση που η επιφάνεια με την κόκκινη επίστρωση είναι παράλληλη στη διεύθυνση φόρτισης (δείγματα JHS_fe_m_1-2) δεν υπάρχει αυτή η διάρρηξη. Τέλος, ο αριθμός των πειραμάτων που έγιναν για το συγκεκριμένο δείγμα δεν επιτρέπει τη στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Δ. Συμπεράσματα – Προτάσεις



Χαρακτηρισμός των δομικών υλικών και διάγνωση της φθοράς τους

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί για την εξέταση των κονιαμάτων του Ιερού Κουβουκλίου του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως, συμπεραίνονται τα εξής:

Το κονίαμα πλήρωσης που λήφθηκε από την πρόσοψη του Ιερού Κουβουκλίου (δείγμα **JHS fe m** - Φάση Κομνηνού), είναι ασβεστικό, ενισχυμένο με πολλές ίνες και λίγα άχυρα που εμφανίζονται κατά τόπους, ενώ λίγα κεραμικά, σχετικά μεγάλης διαμέτρου, είναι διάσπαρτα στη μάζα του. Παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή πορώδους (51.5%), υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά άλατα και χαμηλές μηχανικές αντοχές, δεδομένα που υποδηλώνουν την κακή κατάσταση διατήρησής του. Τέλος, το συγκεκριμένο δείγμα σε όψη του φέρει υπόλοιπο χρωματικής επίστρωσης κόκκινο-καφέ απόχρωσης. Το γεγονός αυτό (δηλ. η ύπαρξη χρωστικής σε μη εμφανές στοιχείο της τοιχοποιίας) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για κάποια χρονική περίοδο η επίστρωση αυτή ήταν εμφανής και μάλλον αποτελούσε το εξωτερικό στρώμα της πρόσοψης του Ιερού Κουβουκλίου. Πιθανολογείται δε, ότι κατά την περίοδο αποκατάστασης του Ιερού Κουβουκλίου από τον Κομνηνό και έως ότου οι όψεις επενδυθούν με τις σημερινές ορθομαρμαρώσεις, το χρωματικά επιστρωμένο αυτό κονίαμα πρέπει να αποτελούσε την πρόσοψη του Ιερού Ναού.

Την παραπάνω υπόθεση ενισχύει το γεγονός του ότι **το επίχρισμα της εσωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας της σκάλας** που οδηγεί στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου (δείγμα **JHS intss pl** - Φάση Κομνηνού), είναι και αυτό ενισχυμένο με ίνες και λίγα άχυρα κατ' αντιστοιχία με το κονίαμα πλήρωσης JHS_fe_m (οι ίνες όμως παρουσιάζονται σε μικρότερη αναλογία από ότι στο το JHS_fe_m). Το επίχρισμα JHS_intss_pl είναι ασβεστικό με υψηλό πορώδες (43.1%), καθώς και υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά άλατα.

Επιπλέον, βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών, το **κονίαμα από την εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας της σκάλας** που οδηγεί στο δώμα του Ιερού Κουβουκλίου (δείγμα **JHS intss m** - Φάση Κομνηνού), καθώς και **το κονίαμα από την εσωτερική παρειά της τοιχοποιίας του Πρόναου στη νότια όψη** (δείγμα **JHS intsf m1**- Φάση Κομνηνού) είναι ασβεστοκονιάματα, παρουσία λίγων κεραμικών αδρανών. Τα δύο αυτά δείγματα παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές πορώδους (50.9% & 48.2% αντιστοίχως) και ειδικής επιφάνειας, ενώ η περιεκτικότητά τους σε ολικά διαλυτά άλατα είναι πολύ ψηλή, γεγονός που επιβεβαιώνει την κακή κατάσταση διατήρησής τους.

Τέλος, το **κονίαμα δώματος** (δείγμα **JHS t pl** - Φάση Κομνηνού), είναι κονίαμα μαγνησιακού ασβεστίτη με σχετικά υψηλό πορώδες (33.5%) και σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά άλατα.

Εν κατακλείδι και βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί, καθίσταται σαφές ότι τα κονιάματα παρουσιάζουν έντονη φθορά, έχουν χάσει την ανθεκτικότητα και την επιτελεστικότητά τους και βρίσκονται σε πολύ κακή κατάσταση διατήρησης.

Κριτήρια επιλογής κονιαμάτων αποκατάστασης:

- να έχουν υδραυλικό χαρακτήρα, ο οποίος θα τους εξασφαλίζει ικανές μηχανικές αντοχές,
- να έχουν συμβατές μικροδομές με τα ποζολανικά κονιάματα όπως προκύπτει από τα όρια αποδοχής που τίθενται από τη μελέτη των ιστορικών υλικών,
- χρήση τόσο κονιάς όσο και ποζολανικού πρόσθετου, ώστε να διασφαλίζεται η ανθεκτικότητά τους στους διαβρωτικούς παράγοντες,
- να είναι υλικά τα οποία έχουν φυσική, χημική και φυσικοχημική συμβατότητα με τα βασικά δομικά στοιχεία της κατασκευής.

Τα παραπάνω κριτήρια οδηγούν στη διερεύνηση συνθέσεων με πρώτες ύλες υδράσβεστο από υψηλής καθαρότητας ασβεστόλιθο ή φυσική υδραυλική άσβεστο σαν βασική κονία, μετακαολίνη σαν ποζολανικό πρόσθετο και αδρανή πυριτικής φύσης με χρήση κατά περίπτωση και θραυσμένου κεραμικού όππου κρίνεται απαραίτητο. Η χρήση ως ποζολανικού πρόσθετου του μετακαολίνη οδηγεί σε υδραυλικές ενώσεις οι οποίες είναι ανθεκτικές στους έντονα διαβρωτικούς παράγοντες διαλυμάτων αλάτων από τα οποία υποφέρει η κατασκευή, διασφαλίζοντας επίσης γρήγορη και ικανή πρόσληψη μηχανικών αντοχών που αποτελεί ζητούμενο, αφού η εφαρμογή θα λάβει χώρα σε υφιστάμενη κατασκευή η οποία είναι και σε χρήση. Από την άλλη μεριά η καθαρότητα του ασβεστόλιθου από τον οποίο θα προέλθει η υδράσβεστος είναι σημαντική, καθώς τα ευρήματα από τα αυθεντικά κονιάματα υποδεικνύουν ότι η χρήση μαργαϊκού ασβεστόλιθου σε τέτοιο περιβάλλον είχε καταστροφικά αποτελέσματα.

Γενική Βιβλιογραφία

1. Polikreti, K., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E., "Classification of restoration mortars by principle component analysis and correlation between their properties and synthesis", 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turkey (2008)
2. Ε. Αγγελακοπούλου, επιβλέπουσα: Μοροπούλου Αντωνία, Διδακτορική διατριβή: «Κριτήρια και Μέθοδοι αποτίμησης φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες», Τομέας (III) Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
3. Π. Μούνδουλας, επιβλέπουσα: Μοροπούλου Αντωνία, Διδακτορική διατριβή: «Μεθοδολογία σχεδιασμού και αποτίμησης συμβατών και επιτελεστικών κονιαμάτων αποκατάστασης ιστορικών μνημείων με κριτήρια τις ορυκτολογικές - φυσικοχημικές και φυσικομηχανικές τους ιδιότητες», Τομέας (III) Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004
4. Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A., *Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries*, Applied Clay Science, 53 (2011) 15-19
5. Moropoulou, A., Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., "Earthquakes and monuments – The role of materials in the earthquake protection of monuments", V Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions,
6. Gunneson C., Wilard B., "Acid Rain", Boston, 1979
7. Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S., "Composite materials in ancient structures", Cement and Concrete Composites, 27 (2005) 295-300
8. Μοροπούλου Α., Μπατής Γ., "Δομικά Υλικά-9ο εξάμηνο Χημικών μηχανικών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012
9. Μοροπούλου Α., "FOM-Μικροσκοπία οπτικών Ινών", Διδακτικές σημειώσεις για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2009-2010
10. Μοροπούλου Α., "IRT-Θερμογραφία υπερύθρου", Διδακτικές σημειώσεις για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2009-2010
11. Μοροπούλου Α., "Δομικά υλικά ιστορικών μνημείων (κονίες, ιστορικά κονιάματα)", Διδακτικές Σημειώσεις του Δ.Μ.Π.Σ. «Προστασία Μνημείων», 2010
12. Μοροπούλου Α., "Εισαγωγή στην Παθολογία και Αποκατάσταση Μνημείων και Συνόλων", σημειώσεις του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων»
13. Μοροπούλου Α., "Εξέταση πορώδους μικροδομής των υλικών", Διδακτικές σημειώσεις για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2009-2010
14. Μοροπούλου Α., "Θερμική ανάλυση", Διδακτικές σημειώσεις για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2009-2010
15. Μοροπούλου Α., "Ποροσιμετρία Υδραργύρου", Διδακτικές σημειώσεις για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2009-2010
16. Μοροπούλου Α., "Υψηλή μετρητική τεχνολογία. Μη καταστρεπτικές & ενόργανες μέθοδοι διάγνωσης της φθοράς και ελέγχου υλικών και επεμβάσεων συντήρησης", Διδακτικές Σημειώσεις του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων», 2008
17. Μοροπούλου Α., Μούνδουλας Π., "Συμβατά και επιτελεστικά κονιάματα αποκατάστασης", παρουσίαση pdf για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2014
18. Μοροπούλου Αντωνία, «Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών», παρουσίαση pdf για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2014
19. Μοροπούλου Αντωνία, Μούνδουλας Πέτρος, «Ιστορικά κονιάματα. Παραδείγματα εφαρμογών. Κονίες και κονιάματα. Συντήρηση, αποκατάσταση, αντικατάσταση κονιαμάτων και επιχρισμάτων», παρουσίαση pdf για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2014

20. Μούνδουλας Πέτρος, Μπακόλας Αστέριος, Αγγελακοπούλου Ελένη, Μοροπούλου Αντωνία, Çakmak Ahmet, «Αντίστροφη μηχανική προσέγγιση- reverse engineering για το σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης- η περίπτωση της Αγίας Σοφιάς», Το πανελλήνιο συνέδριο δομικών υλικών και στοιχείων, ΤΕΕ, 2008
21. Μπακόλας Αστέριος, «Επιστήμη και τεχνική των επεμβάσεων συντήρησης- αποκατάστασης», παρουσίαση για το Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων, Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης, Ε.Μ.Π.», 2014
22. Μπακόλας-Καραγιάννης Α., επιβλέπουσα: Μοροπούλου Αντωνία, Διδακτορική διατριβή: «Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων», Αθήνα 2002.

Ειδική Βιβλιογραφία

23. In American English also spelled Sepulcher. Also called the Basilica of the Holy Sepulchre.
24. McMahon, Arthur L. (1913). "Holy Sepulchre". Catholic Encyclopedia. New York: Robert Appleton Company.
25. "Church of the Holy Sepulchre, Jerusalem". Jerusalem: Sacred-destinations.com. 21 February 2010. Retrieved 7 July 2012.
26. NPNF2-01. Eusebius Pamphilius: Church History, Life of Constantine, Oration in Praise of Constantine. Christian Classics Ethereal Library. 13 July 2005. Retrieved 2014-09-19. Though Eusebius's account makes no mention of Helena's presence at the excavation, nor of the finding of the cross but only the tomb. According to Eusebius, the tomb exhibited "a clear and visible proof" that it was the tomb of Jesus.
27. Pringle, Denys (2007). *The Churches of the Crusader Kingdom of Jerusalem* 3. Cambridge University Press. p. 6. ISBN 978-0521390361. Retrieved 2014-09-19.
28. The Pilgrim of Bordeaux reports in 333: "There, at present, by the command of the Emperor Constantine, has been built a basilica, that is to say, a church of wondrous beauty". *Itinerarium Burdigalense*, page 594
29. Κουβούκλιον; Modern Greek for small compartment
30. Americans spell this as Edicule from Latin: aediculum, small building
31. "Commemoration of the Founding of the Church of the Resurrection (Holy Sepulchre) at Jerusalem". Orthodox Church in America. Retrieved 2 March 2012.
32. Adémar de Chabannes recorded that the church of Saint George at Lydda 'with many other churches of the saints' had been attacked, and the 'basilica of the Lord's Sepulchre destroyed down to the ground'. ...The Christian writer Yahya ibn Sa'id reported that everything was razed 'except those parts which were impossible to destroy or would have been too difficult to carry away.'" Morris 2005
33. Bokenkotter, Thomas (2004). *A Concise History of the Catholic Church*. Doubleday. p. 155. ISBN 0-385-50584-1.
34. Lev, Yaacov (July 1991). *State and Society in Fatimid Egypt*. Leiden; New York: E.J. Brill. ISBN 978-90-04-09344-7.
35. Foakes-Jackson, Frederick John (1921). *An Introduction to the History of Christianity, A. D. 590–1314*. London: Macmillan.
36. Fergusson, James (1865). *A History of Architecture in All Countries*. London: J. Murray.
37. Gold, Dore (29 January 2007). *The Fight for Jerusalem: Radical Islam, the West, and the Future of the Holy City*. Washington, D.C.: Regnery Publishing. ISBN 1-59698-029-X.
38. "Council of Claremont". Famous historical events.net. Retrieved 7 July 2012.
39. Pilgrimages and Pilgrim shrines in Palestine and Syria after 1095, Henry L. Savage, "A History of the Crusades: The Art and Architecture of the Crusader States",

- Volume IV, ed. Kenneth M. Setton and Harry W. Hazard, (University of Wisconsin Press, 1977), 37.
40. Murphy-O'Connor, Jerome (February 1998). *The Holy Land*. Oxford University Press. pp. 56, 59. ISBN 978-0191528675.
41. Cohen, Raymond (May 2009). "The Church of the Holy Sepulchre: A Work in Progress". *The Bible and Interpretation*. Retrieved 2014-09-19.
42. Hesemann, Michael (1999). *Die Jesus-Tafel* (in German). Freiburg. p. 170. ISBN 3-451-27092-7.
43. Lancaster, James E. (1998). "Finding the Keys to the Chapel of St. Vartan". Jim Lancaster's Web Space. Retrieved 2 March 2012. The height difference can be easily seen; the yellowish wall on the left is the 4th century wall, the pinkish wall on the right is the 2nd century wall.
44. "Miracle of Holy Fire which happens every year". *Holyfire.org*. Retrieved 2 March 2012.
45. for example, Hebrews 13:12
46. Toynbee, Jocelyn M. C. *Death and Burial in the Roman World*, pp. 48–49, JHU Press. 1996. ISBN 0-8018-5507-1. An exception in the Classical World were the Lycians of Anatolia. There are also the Egyptian mortuary-temples, where the object of worship was the deified royal person entombed, but Egyptian temples to the major gods contained no burials.
47. *Monastero di Santo Stefano: Basilica Santuario Santo Stefano: Storia*, Bologna.
48. Μητρόπουλος, Θ. (2012). *Ιστορικά στοιχεία σχετικά με την σεισμικότητα της περιοχής των Ιεροσολύμων και η καταγραφή των σημαντικότερων σεισμών μέχρι τον 20ο αι.* (<http://www.jp-newsgate.net/gr/2012/01/21/5192>)
49. Μητρόπουλος, Θ., (2015). *Ο Πανάγιος Τάφος του Πανίερου Ναού της Αναστάσεως - Σύντομη ιστορική και κτηριακή ανάδρομη από τους αρχαιότερους χρόνους μέχρι την πυρκαϊά του Ναού της Αναστάσεως το 1808.*
50. Μοροπούλου, Α., Μπακόλας Α., Δελέγκου Α., Μούνδουλας, Π., Αλεξάκης Ε., Σιούλα, Λ. (2016). *Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών και Διάγνωση της Φθοράς και της Παθολογίας. Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών – Διάγνωση Φθοράς - Ενδιάμεση Έκθεση.*
51. Μοροπούλου, Α., Λαμπρόπουλος, Κ. (2016). *Τεκμηρίωση και Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών και Διάγνωση της Φθοράς και της Παθολογίας. Μη καταστροφικός έλεγχος Διερεύνησης/ Απεικόνισης Εσωτερικής Δομής του Ιερού Κουβουκλίου του Παναγίου Τάφου στον Πανίερο Ναό της Αναστάσεως στα Ιεροσόλυμα με χρήση Γεωραντάρ - Ενδιάμεση Έκθεση.*



