



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ
ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΦΥΡΙΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ
ΣΤΟΝ ΑΡΑΧΘΟ ΠΟΤΑΜΟ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Ε. ΚΩΣΤΟΥΛΑ

Διπλωματούχου Αρχιτέκτονος Μηχανικού Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ
ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΓΕΦΥΡΙΟΥ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ
ΣΤΟΝ ΑΡΑΧΘΟ ΠΟΤΑΜΟ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Ε. ΚΩΣΤΟΥΛΑ

Διπλωματούχου Αρχιτέκτονος Μηχανικού Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του διατμηματικού προγράμματος σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» που συντονίζεται από τη σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του Ε. Μπαδογιάννη, Επίκουρου Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και της Α. Μοροπούλου, Καθηγήτριας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π., στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Τομέα Ι, καθώς και στο Εργαστήριο Πετρογραφίας του Εργαστηρίου ΛΙΘΟΣ του Ε.Α.Γ.Μ.Ε.

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα της εργασίας μου Καθηγήτρια Α. Μοροπούλου, που στο πλαίσιο της συνέργειας του ΕΜΠ για τη μελέτη και το έργο αποκατάστασης του Γεφυριού της Πλάκας, μου έδωσε την ευκαιρία να ερευνήσω ένα θέμα που με ενδιέφερε ιδιαίτερα, λόγω της επαγγελματικής μου ενασχόλησης με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, αλλά και της καταγωγής μου από το συγκεκριμένο τόπο. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα Επ. Καθηγητή Ε. Μπαδογιάννη, για τη στήριξή του και τη συμβολή του στην πραγματοποίηση της εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή Α. Μπακόλα για τη στήριξη και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών αναλύσεων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω Δρ. Χ. Παπατρέχα, Πετρολόγο του Εργαστηρίου ΛΙΘΟΣ του Ε.Α.Γ.Μ.Ε., που με βοήθησε σημαντικά στην ολοκλήρωση της μελέτης μου. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Π. Κορνέζο για τη συμβολή του στις πειραματικές μετρήσεις εκτίμησης της μηχανικής αντοχής των δειγμάτων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στην ΕΔΙΠ Δρ. Α. Δελέγκου, τη Δρ. Μ. Αποστολοπούλου, και την Υπ. Δρ. Ι. Ντούτση, χωρίς την καθοδήγηση και τη βοήθεια των οποίων, η εργασία δε θα ήταν εφικτή.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να αναφερθώ στην ευκαιρία που μου δόθηκε να εργαστώ για επτά μήνες ως επί τόπου μηχανικός στο εργοτάξιο της αναστήλωσης του Γεφυριού της Πλάκας, αφότου είχα ήδη ξεκινήσει και ολοκληρώσει ένα μεγάλο κομμάτι της εργασίας. Η εμπειρία αυτή, αν και καθυστέρησε την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού, αποτέλεσε μια εμπειρία που εκτός της ευρύτερης σπουδαιάς γνώσης που μου δίδαξε, μου έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρώ σε καθημερινή βάση τις κατασκευαστικές προκλήσεις του γεφυριού και να αντιληφθώ μια σειρά από θέματα που σχετίζονται με τα κονιάματά του. Αν και το μεγαλύτερο μέρος της δειγματοληψίας και των πειραματικών αναλύσεων που παρουσιάζεται στην εργασία πραγματοποιήθηκε σε στάδιο πριν από αυτή την ευκαιρία, κάποια επιπλέον δείγματα λήφθηκαν και αργότερα, συμπληρώνοντας σε έναν ικανοποιητικό βαθμό τη γενική εικόνα των κονιαμάτων.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της τεχνολογίας των ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο, ένα μνημείο στου 19^{ου} αιώνα, σημαντικό για την αρχιτεκτονική και την οικοδομική τεχνολογία, αποτελώντας για πολλά χρόνια το μεγαλύτερο μονότοξο γεφύρι των Βαλκανίων και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης.

Συνολικά, εξετάστηκαν 26 δείγματα κονιαμάτων, που καλύπτουν ένα σημαντικό εύρος της συνολικής δομής του γεφυριού. Οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Η ψηφιακή μικροσκοπία (DM), για τη μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων.
- Η κοκκομετρική ανάλυση, για τη διαπίστωση της κοκκοδιαβάθμισης των αδρανών και της αναλογίας μεταξύ αυτών και της κονιάς.
- Η Πετρογραφική Ανάλυση, για τον εντοπισμό των ορυκτών φάσεων του κονιάματος και τη μικροσκοπική παρατήρηση της κονιάς.
- Η μέθοδος της Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD) για τον προσδιορισμό των κρυσταλλικών φάσεων των κονιαμάτων.
- Η Θερμική Ανάλυση (DTA, TG) για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της χημικής σύστασης των κονιαμάτων.
- Η Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier, για την ποιοτική ανίχνευση οργανικών ουσιών.
- Η δοκιμή της Ολικής Εμβάπτισης, για τον προσδιορισμό του ποσοστού ροφημένου νερού και του ολικού ανοικτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό.
- Ο προσδιορισμός Διαλυτών Αλάτων και PH, για τη διερεύνηση της φθοράς.
- Η Μέθοδος των Θραυσμάτων, για τη μετρηση της εφελκυστικής αντοχής.

Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά: Πρόκειται για ασβεστιτικά κονιάματα με υδραυλικό χαρακτήρα, μικρή φαινόμενη πυκνότητα και υψηλό πορώδες. Τα αδρανή φαίνεται να έχουν συλλεχθεί από το ποτάμι και να έχουν κυρίως αργιλοπυριτική σύσταση. Ο υδραυλικός χαρακτήρας τους μπορεί να εξηγηθεί με κάποιο ποζολανικό πρόσθετο, κάτι που θα μπορούσε να εξηγήσει και τη μικρή φαινόμενη πυκνότητα, αλλά και την έντονη παρουσία χαλαζία, ακόμα και στην κονία. Σε σχέση με πιθανά οργανικά πρόσθετα η ένδειξη οξειδωμένων μορίων χοληστερόλης, αλλά και των αμιδίων I και III σε κάποια δείγματα, μπορεί να συνδεθεί με την πιθανή χρήση ασπραδιού στο κονίαμα. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία δεν επαρκούν για την επιβεβαίωση της χρήσης οργανικού υλικού.

Σε γενικές γραμμές, όλα τα δείγματα δείχνουν πως παρόλο που βρίσκονταν σε ένα περιβάλλον με έντονη υγρασία, εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες και με συνεχή μηχανική καταπόνηση, η κατάστασή τους είναι αρκετά υγιής και ειδικά εκείνων που βρίσκονταν στο εσωτερικό των λιθοδομών. Το βασικό πρόβλημα της σταδιακής απομάκρυνσης και δευτερογενούς ανακρυστάλλωσης του ανθρακικού ασβεστίου, με τη συμβολή του νερού, δε φαίνεται να έχει επηρεάσει σημαντικά την πλεινότητα των δειγμάτων. Σε αυτό έχει παίξει καθοριστικό ρόλο η υδραυλικότητα των κονιαμάτων, καθιστώντας τα σε σημαντικό ποσοστό ανθεκτικά στο νερό.

Abstract

The main purpose of this work, was the study and investigation of the historic Plaka Bridge's mortars technology. Plaka Bridge has been a 19th century monument, especially important for its architecture and construction technology, being the largest single-arch stone bridge in the Balkan region and one of the largest in Europe.

Twenty-six specimens were totally examined, covering a variety of different construction areas in the body of the bridge. The following methods were used for the analysis and characterization of the mortars, as part of the reverse engineering process:

- Digital Microscopy (DM), for the small-scale optical observation of the mortars.
- Granulometric analysis, for understanding the granulation of the aggregates and the ratio between binder and aggregates.
- Petrographic Analysis for the identification of the rock minerals included in the mortar, as well as the microscopic observation of the binder.
- X-ray diffraction method was used to determine the crystalline phases of the mortars.
- Thermal Analysis (DTA, TG) for the qualitative and quantitative determination of the constituents of the mortars.
- Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), for the qualitative detection of organic matter.
- Total Immersion test to determine the percentage of the absorbed water and the total open porosity accessible to it.
- Total Soluble Salts (TSS) and PH test to investigate the degree of decay.
- Fragment test to obtain the tensile strength.

The majority of the specimens have similar characteristics: They are lime-based hydraulic mortars, with low apparent density and high porosity. The river sand has served as the main aggregate, mainly of aluminosilicate nature. The hydraulic nature of the mortars, as well as the low apparent density and the acute presence of quartz in the binder, can all be explained mainly through pozzolanic additives. Also, the indication of oxidised particles of cholesterol and amide I and III in some specimens, can possibly be related to organic additives, such as egg-white.

Totally, most of the mortars seem to have low levels of decay and present an overall healthy state, taking in account the weathering and the mechanical stress of more than 150 years. The main issue of gradual elimination and secondary recrystallisation of calcium carbonate through water absorption, doesn't seem to have affected the mortars significantly, due to the determinant role of their hydraulic nature.

Περιεχόμενα

1. Γενικό Θεωρητικό Μέρος.....	1
1.1 Κονιάματα.....	1
1.2 Κονίες.....	2
1.3 Αδρανή.....	8
1.4 Πρόσθετα.....	10
2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος.....	14
2.1 Σύντομα ιστορικά στοιχεία.....	14
2.2 Κατασκευαστικές Φάσεις.....	15
2.3 Κατασκευαστική Ανάλυση.....	18
3. Πειραματικό Μέρος.....	29
3.1 Βασικές αρχές μεθόδων Χαρακτηρισμού και διάγωσης Φθοράς.....	29
3.2 Παρουσίαση Δειγματοληψίας.....	35
4. Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	49
4.1 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων μέσω Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM).....	49
4.2 Φυσικός διαχωρισμός κονίας αδρανών – Κοκκομετρική Ανάλυση.....	74
4.3 Πετρογραφική Ανάλυση.....	77
4.4 Αποτελέσματα Περίθλασης Ακτίνων X (XRD).....	81

4.5 Αποτελέσματα Θερμοβαρυμετρικής και Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA-TG).....	89
4.6 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (FT-IR).....	98
4.7 Δοκιμή Εμβάπτισης- Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και ολικού Ανοιχτού Πορώδους προσβάσιμου στο νερό.....	103
4.8 Προσδιορισμός Διαλυτών Αλάτων και PH – Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων.....	105
4.9 Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής με τη Μέθοδο των Θραυσμάτων.....	106
4.10 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	107
5. Συμπεράσματα-Προοπτικές.....	107
5.1 Συμπεράσματα.....	111
5.2 Προοπτικές.....	112
6. Βιβλιογραφία.....	113
7. Βιογραφικό Σημείωμα.....	117

1.ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γενικά στοιχεία-Ορισμοί

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται κάποια γενικά στοιχεία σχετικά με βασικές πρώτες ύλες που έχουν χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία κονιαμάτων στις αρχιτεκτονικές κατασκευές, σε διάφορες ιστορικές περιόδους από την Αρχαιότητα έως σήμερα. Ανάλογα με την ιστορική περίοδο που χρησιμοποιήθηκαν, τον λειτουργικό σκοπό που εξυπηρετούν και το περιβάλλον εφαρμογής, τα ιστορικά κονιάματα διαφοροποιούνται ως προς την χημική και ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών, την κοκκομετρία των αδρανών και της κονιάς, τη μικροδομή και τις μηχανικές αντοχές.

Η εξέλιξη των ιστορικών κονιαμάτων από τόπο σε τόπο συμβαδίζει με την εξέλιξη της κονιάς και των λοιπών διαθέσιμων πρώτων υλών της περιοχής, τις οικονομο-κοινωνικές συνθήκες κάθε εποχής, την τεχνολογία παρασκευής και τον τελικό προορισμό χρήσης. Η μελέτη τους φωτίζει πτυχές μαστορικών και οικοδομικών γνώσεων άλλων εποχών, εν πολλοίς ξεχασμένες, ωστόσο πολύτιμες για την κατανόηση της εξέλιξης και διαφοροποίησης ιστορικών τεχνολογιών, ενώ συμβάλλει στον τομέα της συντήρησης μνημείων και εν γένει στην προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς.

1.1 Κονιάματα

Μελετητές από την αρχαιότητα ως και την σύγχρονη εποχή αποτυπώνουν στα γραπτά τους αυτήν την εξέλιξη στη χρήση διαφόρων υλικών στην αρχιτεκτονική και στις τεχνικές εφαρμογές¹. Τα πηλοκονιάματα ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο στις κατασκευές, λόγω της αφθονίας της συγκεκριμένης κονιάς στη φύση και της εύκολα αντιληπτής χρήσης του. Σταδιακά, μέσω πειραματισμού και εμπειρικής γνώσης, προέκυψαν νέες κονίες που οδήγησαν σε ανθεκτικότερες κατασκευές, όπως η γύψος και η άσβεστος, καθώς και χρήση νέων υλικών ανόργανων ή οργανικών που βελτίωναν χαρακτηριστικά των κονιαμάτων.

Τα κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσότερων συνδετικών υλών κονιών, νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4mm) και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, αποκτούν δε μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης, μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης². Τα κονιάματα μπορούν να διαιρεθούν κατά διάφορους τρόπους όπως :

- Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης που εξαρτάται από το είδος της κονιάς, σε **υδραυλικά** και **αερικά**.
- Ανάλογα με το φαινόμενο βάρος τους σε ελαφριά (<1500Kg/m³) και βαριά (>1500Kg/m³).
- Ανάλογα με το είδος της κονιάς ή των αδρανών σε ασβεστοκονιάματα, πηλοκονιάματα, τσιμεντοκονιάματα, κονιάματα τσιμέντου-ασβέστου, μαρμαροκονιάματα κ.α.
- Ανάλογα με την χρήση τους σε κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας, κονιάματα επιχρισμάτων, ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων, επισκευαστικά κονιάματα και συγκολλητικά όπου υπάγονται οι διάφορες κόλλες. Διάφορες επιμέρους κατηγορίες όπως θερμομονωτικά, ηχομονωτικά, πυράντοχα κλπ, είναι υποπεριπτώσεις των παραπάνω γενικών διαιρέσεων.

¹ Βιτρούβιος Π. Μ. Μτφ Λέφας, Π. (2000) Περί Αρχιτεκτονικής. Εκδόσεις Πλέθρον.

² Τσίμας, Σ. (2001). Δομικά Υλικά (Τσιμέντο-Ασβέστης-Σκυρόδεμα-Κονιάματα). Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

1.2 Κονίες

Κονίες ονομάζονται τα υλικά που βρίσκονται σε μορφή σκόνης και κατά την ανάμιξη τους με το νερό, σχηματίζουν μια πολτώδη ουσία, η οποία βαθμιαία πήζει και σκληραίνει. Οι κονίες μπορεί να είναι φυσικές όπως ο πηλός ή τεχνητές όταν υφίστανται ανθρωπογενή επεξεργασία. Οι τεχνητές κονίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τις συνθήκες που επηρεάζουν την πήξη και σκλήρυνση τους, τις αερικές και τις υδραυλικές:

- Αερικές, ονομάζονται οι κονίες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν με μόνη την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα, και γι' αυτό το λόγο τα κονιάματα που έχουν παρασκευαστεί με αερικές κονίες δεν παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε υγρά περιβάλλοντα. Αερικές κονίες είναι ο γύψος και η αερική άσβεστος.
- Υδραυλικές, ονομάζονται οι κονίες που πήζουν και σκληρύνονται και κάτω από την επίδραση του νερού, με ή χωρίς την παρουσία αέρα και παραμένουν σκληρές ακόμα και κάτω από το νερό. Στις υδραυλικές κονίες ανήκουν η υδραυλική άσβεστος και το τσιμέντο.

Η φύση του συνδετικού υλικού παίζει κριτικό ρόλο στην ικανοποίηση της επιτελεστικότητας του κονιάματος και συνδέεται άμεσα τόσο με τις φυσικοχημικές ιδιότητες όσο και με τον χρόνο πήξης και σκλήρυνσης αυτού. Έτσι, ένα αερικό κονίαμα με αερικό συνδετικό υλικό (π.χ. υδράσβεστο) σκληραίνει σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και αποκτά τελικά χαμηλότερες μηχανικές αντοχές από ένα υδραυλικό κονίαμα με υδραυλικό συνδετικό υλικό (π.χ. υδραυλικό ασβέστη)^{3 4}.

1.2.1 Η δομική υδράσβεστος

Η πιο διαδεδομένη κονία που έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο όπως πιστοποιεί η αρχαιολογική έρευνα και η ανάλυση ιστορικών κονιαμάτων είναι αυτή της αερικής ασβέστου ή υδρασβέστου^{5 6}. Η όπτηση ασβεστόλιθων για την παρασκευή της κονιάς αποτέλεσε πρακτική που εφαρμόστηκε από την προϊστορική εποχή και παρά τις τεχνολογικές διαφοροποιήσεις η ίδια τεχνολογία εφαρμόζεται και σήμερα.

Η υδράσβεστος παράγεται από την όπτηση ασβεστόλιθου σε θερμοκρασίες περίπου 900-950 °C, όπου παράγεται οξείδιο του ασβεστίου (άσβεστος, CaO, quicklime), και της επακόλουθης σβέσης του προϊόντος όπτησης με νερό, όπου παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου ή πορτλαντίτης [hydrated/slaked lime, Ca(OH)₂]. Παρατίθεται σχηματικά η διαδικασία έψησης, σβέσης και σκλήρυνσης, από το πέτρωμα μέχρι το τελικό κονίαμα, ο κύκλος δηλ. της ασβέστου (lime cycle) στην

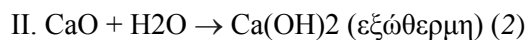
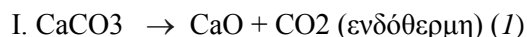
³ Αγγελακοπούλου, Ε. (2006). Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Φυσικοχημικών και Μηχανικών Χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση Αριστοποίησης Συμβατών Κονιαμάτων και Σκυροδεμάτων Αποκατάστασης Ιστορικών Τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).

⁴ Αποστολοπούλου (2020). «Μεθοδολογία Σχεδιασμού Συμβατών και Επιτελεστικών Κονιαμάτων Αποκατάστασης για την Αντισεισμική Προστασία Μνημείων και Ιστορικών Κατασκευών». Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).

⁵ Karkanias, P. (2007). Identification of lime plaster in prehistory using petrographic methods: a review and reconsideration of the data on the basis of experimental and case studies. *Geoarchaeology: An international journal*, 22(7), 775-796.

⁶ Kopelson, E. (1996). Analysis and consolidation of architectural plasters from Çatalhöyük, Turkey. Diploma Thesis. University of Pennsylvania, Historic Preservation Dpt.

Εικόνα 1⁷ και στις αντιδράσεις (1) όπτηση ασβεστολίθου, (2) ενυδάτωση/σβήσιμο ασβέστη και (3) ενανθράκωση μέσω της αντίδρασης με το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα.



Εικόνα 1. Ο κύκλος όπτησης, ενυδάτωσης και ενανθράκωσης για την παρασκευή αερικής υδρασβέστου..

Σε όλα τα παραπάνω στάδια υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες που θα καθορίσουν την τελική ποιότητα της υδρασβέστου και την καταλληλότητα της σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές, κάποιο εκ των οποίων αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Τύπος πετρώματος και συνθήκες έψησης

Η χημική σύσταση και ποικιλία των διαφόρων τύπων υδρασβέστου εξαρτάται άμεσα από τον τύπο ασβεστολίθου που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους⁸. Κατά συνέπεια, η αναγνώριση των χαρακτηριστικών των ασβεστολιθικών πετρωμάτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους προς όπτηση. Στην Εικόνα 2 αποτυπώνονται τα διάφορα είδη δομικής άσβεστου που μπορεί να προκύψουν ανάλογα με τον αρχικό τύπο πετρώματος⁹.

Ανάλογα με τη χημική σύσταση του αρχικού πετρώματος, μπορεί να παραχθεί υδροξείδιο του ασβεστίου, δηλαδή υδράσβεστος, όταν το αρχικό πέτρωμα είναι καθαρός ασβεστόλιθος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ή μια μίξη υδροξείδιου του ασβεστίου και του μαγνησίου, όταν το αρχικό πέτρωμα είναι δολομιτικός ή μαγνησιακός ασβεστόλιθος. Ενώ, όπως προαναφέρθηκε, το υδροξείδιο

⁷ Rodríguez-Navarro, C. (2012). Binders in historical buildings: traditional lime in conservation. Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM), 9, 91-112.

⁸ Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E., "The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime", Cement and Concrete Research 31 (2001) 633-639.

⁹ Ζαχαροπούλου Γ. (2004). Παραγωγή ασβέστου υψηλής δραστηκότητας κατάλληλης για αποκαταστάσεις μνημείων και ιστορικών κτιρίων. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών. (επιβλέπουσα: Καθ. Ι. Παπαγιάννη).

του ασβεστίου αντιδράει με το CO₂ της ατμόσφαιρας προς τη δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου, στην περίπτωση όπτησης δολομιτικού ή μαγνησιακού πετρώματος, το μεν υδροξείδιο του ασβεστίου ενανθρακώνεται προς ανθρακικό ασβέστιο, το δε υδροξείδιο του μαγνησίου προς υδρομαγνησίτη ή μαγνησίτη ή συνδυασμό των δυο. Παρόλο που έχουν βρεθεί αρκετά ιστορικά κονιάματα όπου τεκμαίρεται η χρήση μαγνησιακής ασβέστου, η χρήση τους σήμερα, ως υλικό αποκατάστασης δεν είναι διαδεδομένη, λόγω της ευαισθησίας του συγκεκριμένου ασβεστόλιθου στις συνθήκες όπτησης, του χαμηλού ρυθμού ενυδάτωσης του οξειδίου του μαγνησίου και λόγω του χαμηλού ρυθμού ενανθράκωσης του υδροξειδίου του μαγνησίου¹⁰.

Οργανικές προσμείξεις συχνά υπάρχουν σε ποσοστό περίπου 1%. Αν και η παρουσία τους θεωρείται χωρίς σημασία γιατί εξαφανίζονται κατά την έψηση, μπορεί να χρωματίζουν το προϊόν από ελαφρό γκρι ως και πιο σκουρόχρωμο.

Ως κύριες προσμείξεις του ασβεστόλιθου θεωρούνται τα οξείδια του πυριτίου, του αλουμινίου και του σιδήρου και δευτερεύουσες του φωσφόρου και του θείου. Για την άσβεστο που προορίζεται για δομικές χρήσεις θα πρέπει να λεχθεί ότι μας ενδιαφέρει περισσότερο η ποσότητα αυτών παρά η ποιότητα γιατί κατά την έψηση η περιεκτικότητά τους διπλασιάζεται και αφετέρου κατά την πήξη δεσμεύουν ίση σχεδόν ποσότητα CaO¹¹.

Η διαδικασία και οι συνθήκες της έψησης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που θα καθορίσουν τις τελικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων δομικής ασβέστου. Η θερμοκρασία έψησης, ο ρυθμός και συνολικός χρόνος έψησης, ο τύπος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κλιβάνου είναι κάποιες βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη.^{12 13}

¹⁰ Chever, L., Pavía, S., Howard, R. (2010). Physical properties of magnesian lime mortars. *Materials and structures*, 43(1-2), 283-296.

¹¹ Τσίμας Σταμ., Αποστολίδου Αικ., «Μελέτη της ασβέστου που προορίζεται για δομικές χρήσεις», ΤΕΕ Επιστημονική Επιτροπή Δομικών Υλικών και στοιχείων, Αθήνα 1984.

¹² Zacharopoulou, G. (2013). Impact of calcination temperature on reactivity, maturation capacity and mechanical properties of a high calcium building lime (CL). In 3rd Historic Mortars Conference HMC (pp. 11-14).

¹³ Hughes, J. J., Swift, D. S., Bartos, P. M., & Banfill, P. F. (2002). A traditional vertical batch lime kiln: thermal profile and quicklime characteristics. In *Masonry: Opportunities for the 21st Century*. ASTM International.

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΚΑΙ ΤΥΠΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ				
ΑΡΓΟ ΥΛΙΚΟ ¹⁵		ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΚΑΜΕΝΗ ΑΣΒΕΣΤΟΣ	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΚΑΘΑΡΟΙ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ (η ταξινόμηση της δομικής ασβέστου γίνεται με βάση το ποσοστό σε CaO+MgO)	εξαιρετικά καθαροί ασβεστίτικοι ¹⁶ ασβεστόλιθοι	περιεκτικότητας 98-99% CaCO ₃	ασβεστίτικη καμένη άσβεστος (υπό συνθήκες κανονικής όπτησης)	παρέχει παχιά υδράσβεστο (ποσοστό MgO< 5%) $f_c=0.3\pm 0.5 \text{ N/mm}^2$ (1:3/L:S, 28ημ.)
	ασβεστίτικοι ασβεστόλιθοι υψηλής καθαρότητας	περιεκτικότητας >94% CaCO ₃ και 2-5% MgCO ₃		
	μαγνησιακοί (δολομιτικοί) ασβεστόλιθοι	περιεκτικότητας >60% CaCO ₃ και 5-40 %MgCO ₃ ¹⁷	μαγνησιακή (δολομιτική) καμένη άσβεστος	παρέχει ισχνή υδράσβεστο (ποσοστό MgO>5%) $f_c=0.3\pm 1.3 \text{ N/mm}^2$ (1:3/L:S, 28ημ.)
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΜΕ ΠΡΟΣΜΙΞΕΙΣ ¹⁸ (η ταξινόμηση της δομικής ασβέστου γίνεται με βάση τις ελάχιστες θλιπτικές αντοχές των 28 ημ.)	ασβεστίτικοι ασβεστόλιθοι υψηλής καθαρότητας	περιεκτικότητας 5-12% ενεργών αργιλοπυριτικών προσμίξεων	ελαφρώς/ασθενώς υδραυλική 0.1<I<0.16 0.3<C.I<0.5	πήξη σε 15-20 μέρες $f_c=1.3\pm 2.0 \text{ N/mm}^2$ (1:3/L:S, 28ημ.)
	& μαγνησιακοί (δολομιτικοί) ασβεστόλιθοι <u>με</u>	περιεκτικότητας 12-18% ενεργών αργιλοπυριτικών προσμίξεων	μετρίως υδραυλική 0.16<I<0.31 0.5<C.I<0.7	πήξη σε 5-15 μέρες $f_c=2.0\pm 5.0 \text{ N/mm}^2$ (1:3/L:S, 28ημ.)
	αργιλικές ή/και πυριτικές προσμίξεις	περιεκτικότητας 18-25% ενεργών αργιλοπυριτικών προσμίξεων	ισχυρώς υδραυλική 0.42<I<0.50 0.7<C.I<1.1	πήξη σε 1-4 μέρες $f_c=5\pm 10 \text{ N/mm}^2$ (1:3/L:S, 28ημ.)

Εικόνα 2. Ταξινόμηση ασβεστολίθων και είδη δομικής ασβέστου που παράγονται.

Προϊόντα ενυδάτωσης ασβέστου

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι σβέσης, η υγρή (wet slaking) και η ξηρή (dry slaking), που παράγουν υδράσβεστο, αντίστοιχα, σε μορφή πολτού και σκόνης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου σβέσης επηρεάζεται από δύο παραμέτρους: α) τον τύπο της καμένης ασβέστου (αερική ή υδραυλική) και β) την προβλεπόμενη χρήση της.

Όταν χρησιμοποιείται η στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα νερού για την σβέση της ασβέστου (32% κ.β.), τότε η υδράσβεστος καταπίπτει με τη μορφή σκόνης, ενώ όταν χρησιμοποιηθεί περίσσεια νερού, λαμβάνεται πολτός υδρασβέστου. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι η αντίδραση ενυδάτωσης είναι εξώθερμη και μέρος του νερού εξατμίζεται για να ληφθεί σκόνη υδρασβέστου απαιτείται γύρω στο 60-65% επί του βάρους της ασβέστου.

Ο πολτός που παράγεται με περίσσεια νερού είναι μίγμα κολλοειδούς και κρυσταλλικής μορφής¹⁴. Επειδή πλαστικές ιδιότητες έχει μόνο η κολλοειδής μορφή, επιβάλλεται το σβήσιμο του οξειδίου του ασβέστη να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα μετά την έψηση ώστε να ληφθεί προϊόν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αναλογία κολλοειδούς μορφής.

Βασικός παράγοντας για την παρασκευή πολτού υδρασβέστου υψηλής ποιότητας αποτελεί και η ωρίμανσή του για μεγάλο χρονικό διάστημα με την αποθήκευση του σε ειδικά διαμορφωμένους λάκκους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σκοπός της ωρίμανσης ή *φύρασης* (που σημαίνει μείωση όγκου ή και βάρους) είναι: α) η ολοκλήρωση της σβέσης, ώστε να αποτραπεί η πρόκληση διογκώσεων,

¹⁴ Hansen, E. F., Tagle, A., Erder, E., Baron, S., Connell, S., Rodriguez-Navarro, C., & Van Balen, K. (2000). Effects of ageing on lime putty. In International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests, Cachan, France: RILEM Publications sarl (pp. 197-206).

αποκολλήσεων ή εξανθημάτων (“πεταλίδες” ή “pitting and popping”) στα επικαλυπτικά κονιάματα και η μείωση της αντοχής της τοιχοποιίας στα συνδετικά κονιάματα, β) η αύξηση της πλαστικότητας του πολτού, καθώς εμπλουτίζεται ο κολλοειδής χαρακτήρας του (η διαδικασία επιταχύνεται με την αποβολή νερού και αλάτων) και γ) η βελτίωση της ποιότητας της υδρασβέστου, καθώς η παρατεταμένη ωρίμανση επιδρά ευεργετικά στην μορφολογία και υφή των κρυστάλλων πορτλαντίτη που αναπτύσσονται¹⁵.

Η κατάταξη της ασβέστου και της υδρασβέστου, γίνεται με γνώμονα αυτά που ορίζονται στα πρότυπα EN 459-1 και EN 459-2^{16 17}, σε τρεις τύπους: CL90, CL80, CL70, ανάλογα με τ Παράλληλα, το αγγλικό γράμμα που ακολουθεί τον αριθμό είναι ένδειξη για το εάν πρόκειται για οξειδίο του ασβεστίου (Q: quicklime), υδράσβεστος σε σκόνη (S: slaked lime), υδράσβεστο σε πολτό (S PL: putty lime). Για την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης, προτιμάται ο τύπος CL90, ενώ για λόγους αναπαραγωγισιμότητας και σταθερότητας του προϊόντος προτιμάται συνήθως η χρήση υδρασβέστου σε σκόνη¹⁸.

Η σύγκριση χρήσης σκόνης υδρασβέστου ή πολτού στην μικροδομή και τις τελικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες των ασβεστοκονιαμάτων αποτελεί εκτενές πεδίο μελέτης σύγχρονων ερευνητικών ομάδων^{19 20}

Πήξη κονιάματος αερικής υδρασβέστου

Η κύρια ιδιότητα που αφορά στην χρήση της υδρασβέστου στην κατασκευή είναι η πήξη· η υδράσβεστος έχει την ικανότητα να απορροφά εύκολα το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και να μετατρέπεται στο αρχικό πέτρωμα από το οποίο προέκυψε. Κατά το τελευταίο, αυτό, στάδιο αφού εφαρμοστεί το κονίαμα στο οικοδόμημα, είναι σημαντική η παρουσία ικανής υγρασίας ώστε να καθίσταται δυνατή η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα στους πόρους του κονιάματος: η παρουσία υγρασίας επιτρέπει στο CO₂ της ατμόσφαιρας να μετατραπεί σε ανθρακικό οξύ, το οποίο εν συνεχεία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου προς τη δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου πιο γρήγορα. Ωστόσο, η υγρασία δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποια επίπεδα, καθώς όταν το δοκίμιο είναι κορεσμένο σε νερό, λόγω της χαμηλότερης διάχυσης CO₂ στο νερό σε σχέση με τον αέρα, δεν μπορεί να επιτευχθεί η ενανθράκωση. Συνεπώς η βέλτιστη σχετική υγρασία για την επίτευξη της ενανθράκωσης είναι περίπου στο 75%.²¹

¹⁵ Margalha, M. G., Silva, A. S., do Rosário Veiga, M., De Brito, J., Ball, R. J., & Allen, G. C. (2013). Microstructural changes of lime putty during aging. *Journal of materials in civil engineering*, 25(10), 1524-1532.

¹⁶ EN 459-1:2015—Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. European Committee for Standardisation (CEN): Brussels, Belgium.

¹⁷ EN 459-2: 2010, Building lime. Part 2: Test methods. European Committee for Standardisation (CEN): Brussels, Belgium

¹⁸ Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. (2009). Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars. *International RILEM Workshop on Repairs Mortars for Historic Masonry*, RILEM Publications SARL, pp. 278-291.

¹⁹ Ontiveros-Ortega, E., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A., & Molina, L. (2018). Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime. *Construction and Building Materials*, 191, 575-589.

²⁰ Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2019). Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Construction and Building Materials*, 225, 633-641.

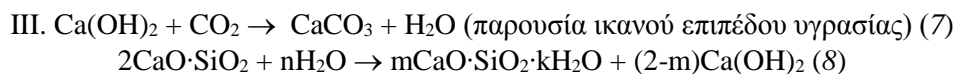
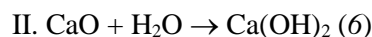
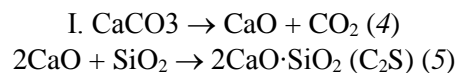
²¹ Van Balen, K., & Van Gemert, D. (1994). Modelling lime mortar carbonation. *Materials and structures*, 27(7), 393-398.

1.2.2 Η υδραυλική άσβεστος

Η φυσική υδραυλική άσβεστος (NHL, natural hydraulic lime) προέρχεται από την έψηση μαργαϊκών ασβεστόλιθων, δηλαδή ασβεστόλιθους που περιέχουν αργιλοπυριτικές προσμίξεις.

Η θερμοκρασία έψησης ιδανικά πρέπει να διατηρείται μεταξύ 900-950°C [13] και τα προϊόντα της καύσης είναι το οξειδίο του ασβεστίου και αργιλοπυριτικές ενώσεις του ασβεστίου, με κύρια φάση τον μπελίτη (C₂S). Τα C₂S και CaO είναι οι πιο δραστικές ουσίες που περιέχονται στην υδραυλική άσβεστο. Το ποσοστό του παραγόμενου C₂S και CA εξαρτάται από τις αρχικές ποσότητες των οξειδίων στο πέτρωμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, πράγμα που αποτελεί με τη σειρά του ένδειξη της υδραυλικότητας της άσβεστου.

Σε περίπτωση που η θερμοκρασία ξεπεράσει τοπικά τους 1200°C παράγονται και άλλες υδραυλικές φάσεις, όπως του αλίτη (C₃S), που είναι ωστόσο ανεπιθύμητες σε τέτοιου είδους κονίες, ιδιαίτερα εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε έργα αποκατάστασης μνημείων και ιστορικών κατασκευών. Η σβέση των προϊόντων της έψησης για την παραγωγή της υδραυλικής ασβέστου πρέπει να γίνεται με προσοχή, ώστε να μην ενυδατωθούν οι αργιλοπυριτικές ενώσεις πριν από την ανάμιξη της κονίας για την παρασκευή του κονιάματος, και πρέπει να ακολουθεί στοιχειομετρικές αναλογίες για τη σβέση μόνο του οξειδίου του ασβεστίου (ξηρή μέθοδος). Συνεπώς η σβέση έχει σαν προϊόν το υδροξείδιο του ασβεστίου, ενώ οι αργιλοπυριτικές ενώσεις διατηρούνται ως έχουν. Οι βασικές αντιδράσεις (i) της έψησης του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, (ii) της σβέσης των προϊόντων της έψησης για την παραγωγή της υδραυλικής ασβέστου ως πρώτη ύλη και (iii) της πήξης και της σκλήρυνσης, παρατίθενται παρακάτω:



Τα κονιάματα υδραυλικής ασβέστου, λόγω των υδραυλικών ενώσεων που περιέχουν και που σκληραίνουν διαμέσου αντίδρασης με το νερό, δίνουν τη δυνατότητα σε αυτά τα κονιάματα να σκληρύνουν σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας, ακόμα και στο νερό^{22 23}.

Οι καλύτερες φυσικές υδραυλικές άσβεστοι είναι αυτές που η όπτηση πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες, διότι απαιτούν λιγότερο νερό κατά τη διάρκεια της “σβέσης”, διατηρώντας αναλλοίωτες τις υδραυλικές ιδιότητες των δραστικών ενώσεων. Μετά από την όπτηση ακολουθεί μία μακρά περίοδος “σβέσης” και “ωρίμανσης” χρήσιμη για τη σταθεροποίηση της ένωσης πριν από τη φάση της λειοτρίβησης. Μόνο με την καθαρότητα της πρώτης ύλης και την απουσία δευτερογενών οξειδίων που προκύπτουν από την ανάμιξη της ασβέστου με παράγωγα από τη λειοτρίβηση του κλίνκερ είναι δυνατόν να ληφθεί η καθαρή φυσική υδραυλική άσβεστος ανώτερης ποιότητας η οποία συμβολίζεται με τα αρχικά NHL (Natural Hydraulic Limes) σύμφωνα με το πρότυπο EN 459 -1.

Μπορούμε να κατατάξουμε τις άσβεστους με βάση τον δείκτη υδραυλικότητας του Vicat:

$$\text{Δείκτης υδραυλικότητας (i)} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{MgO})$$

²² Gulotta, D., Goidanich, S., Tedeschi, C., Nijland, T. G., & Toniolo, L. (2013). Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterisation. *Construction and Building materials*, 38, 31-42.

²³ Apostolopoulou, M., Asteris, P. G., Armaghani, D. J., Douvika, M. G., Lourenço, P. B., Cavaleri, L., & Moropoulou, A. (2020). Mapping and holistic design of natural hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 136, 106167.

Όσο πιο μεγάλη τιμή έχει ο δείκτης υδραυλικότητας, τόσο πιο υδραυλικό χαρακτήρα έχει η άσβεστος. Οι άσβεστοι κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με την τιμή του δείκτη υδραυλικότητας:

- 0.00-0.01, αερική άσβεστος
- 0.10-0.16, άσβεστος χαμηλής υδραυλικότητας
- 0.16-0.32, άσβεστος μεσαίας υδραυλικότητας
- 0.32-0.42, υδραυλική άσβεστος
- 0.42-0.50, άσβεστος υψηλής υδραυλικότητας

Εκτός από τη φυσική υδραυλική άσβεστο, υπάρχουν και άλλες δυο κατηγορίες υδραυλικής ασβέστου, FL (formulated lime), όπου η υδραυλική άσβεστος είναι μίξη αερικής ασβέστου ή/και φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη υδραυλικών ή/και ποζολανικών υλικών, και HL (hydraulic lime) όπου η κονία είναι μίξη υδρασβέστου και άλλων υλικών, όπως τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, κ.α. [EN-459-1].

Η χρήση της υδραυλικής ασβέστου σε κατασκευές ξεκινά μετά τον 19^ο αιώνα, αν και όπτηση ασβεστολίθων με αργλικό περιεχόμενο που ενδεχομένως οδηγούσε σε δομικές ασβέστου με κάποιο υδραυλικό χαρακτήρα θα γινόταν από την αρχαιότητα. Η λογική της ανάπτυξης υδραυλικότητας στα ιστορικά κονιάματα βασίζεται στην χρήση αερικού ασβέστη με ποζζολανικό πρόσθετο είτε φυσικής προέλευσης όπως η θηραϊκή γη ή τεχνητής όπως το κεραμάλευρο.

Η χρήση της φυσικής υδραυλικής ασβέστου σε έργα αποκατάστασης είναι αρκετά συνήθης, καθώς τα κονιάματα φυσικής υδραυλικής ασβέστου παρουσιάζουν συμβατότητα με τα ιστορικά υλικά, χαμηλότερη συρρίκνωση και υψηλότερες αντοχές σε σχέση με τα αερικά κονιάματα, ενώ πηζουν σκληραίνουν και λειτουργούν σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας, στα οποία τα κονιάματα αερικής ασβέστου είναι ευπαθή^{24 25}. Ωστόσο, στην Ελλάδα δεν παράγονται βιομηχανικά, ούτε παράγονταν ποτέ.

1.3 Αδρανή

Ως αδρανή υλικά χαρακτηρίζονται όλα τα κοκκώδη υλικά που προέρχονται από φυσική κατάτμηση ή τεχνητή θραύση των φυσικών πετρωμάτων ή ακόμα και βιομηχανικών υπολειμμάτων. Τα υλικά αυτά είναι κατά κανόνα ανόργανα και ονομάζονται αδρανή γιατί δεν αντιδρούν με τις κονίες, αλλά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους συμβάλλοντας μηχανικά στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

Τα αδρανή αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των κονιαμάτων, καθώς η παρουσία τους μειώνει την συρρίκνωση και αυξάνει την ανθεκτικότητα του κονιάματος. Παράλληλα, συμβάλλουν στην μείωση του κόστους, λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη συμμετοχή τους στο κονίαμα (60-75% περίπου του όγκου του) και την χαμηλότερη τιμή τους σε σχέση με τις κονίες και τα πρόσθετα. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών υλικών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό αρκετά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, από την απαίτηση του κονιάματος σε νερό, την εργασιμότητα του νωπού κονιάματος, μέχρι τις μηχανικές ιδιότητες, τη μικροδομή και την πυκνότητα που θα αναπτύξει το κονίαμα μετά την ολοκλήρωση της πήξης και της σκλήρυνσης.²⁶

²⁴ Apostolopoulou, M., Armaghani, D. J., Bakolas, A., Douvika, M. G., Moropoulou, A., & Asteris, P. G. (2019). Compressive strength of natural hydraulic lime mortars using soft computing techniques. *Procedia Structural Integrity*, 17, 914-923.

²⁵ Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586.

²⁶ Αναγνωστοπούλου, Σ. (2012). Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα (ανεξάρτητα αν είναι φυσικής ή τεχνητής προέλευσης). Ο διαχωρισμός γίνεται με όριο το κόσκινο τετραγωνικής οπής Νο 4 (πλευράς 4,75 mm) κατά το αμερικάνικο πρότυπο ASTM E11 ή το κόσκινο 4 (πλευράς 4 mm) κατά τα γερμανικά πρότυπα DIN 4187 και DIN4188. Τα διερχόμενα χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκα ή άμμος και τα παραμένοντα ως χονδρόκοκκα (χάλικες ή σκύρα). Αν η άμμος διέρχεται από την οπή του 1 mm διακρίνεται ως λεπτόκοκκη, ενώ αν παραμένει στο κόσκινο του 1 mm και διέρχεται από την οπή των 4 mm ως χονδρόκοκκη. Οι χάλικες είναι τα συλλεκτά αδρανή ενώ τα σκύρα τα θραυστά. Αν οι χάλικες ή τα σκύρα συγκρατούνται στο κόσκινο των 4 mm και διέρχονται από το κόσκινο των 32 mm χαρακτηρίζονται ως λεπτοί, ενώ αν παραμένουν στο κόσκινο των 32 mm ως χονδροί. Στα κονιάματα το μέγεθος των αδρανών δεν ξεπερνά τα 5 mm. Πέραν των 5 mm μιλάμε για σκυροδέματα²⁷.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών αποτελεί βασική παράμετρο στον σχεδιασμό συνθέσεων κονιάματος, καθώς επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού μίγματος, ενώ σχετίζεται άμεσα με την συνολική επιφάνεια των κόκκων αλλά και με το ποσοστό των κενών που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών, ενώ έχει συσχετιστεί με διάφορα θεωρητικά μοντέλα σχετικά με επίτευξη μέγιστης πυκνότητας στοιβαξης, άρα την επίτευξη συνεκτικού κονιάματος.

Η καθαρότητα των αδρανών αναφέρεται στο ότι δεν πρέπει να περιέχουν προσμίξεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν φθορά υπό συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, να έχουν χημική επίδραση στην κονία ή να μειώσουν την πρόσφυση και τις αντοχές των κονιαμάτων αποκατάστασης. Τέτοιες μπορεί να είναι ²⁸:

- Ενώσεις του Θείου. Το θειικό ασβέστιο υπό τη μορφή της γύψου ή του ανυδρίτη γύψου αυξάνει τον κίνδυνο διόγκωσης (τοπικής αν είναι συγκεντρωμένες σε ορισμένα σημεία) και ρηγμάτωσης του κονιάματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια και η διαλυτότητα των ενώσεων αυτών τόσο καθίστανται πιο επιβλαβή. Σημασία έχει επίσης και η δυνατότητα ή όχι να εισχωρήσει έπειτα στη μάζα του κονιάματος αέρας ή υγρασία. Ο έλεγχος της περιεκτικότητας του θείου γίνεται με τη δοκιμή κατά DIN 4226. Το μεγαλύτερο ποσοστό θείου στα αδρανή με τη μορφή του SO₃ δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του βάρους των αδρανών που ξηράθηκαν στους 105°C.
- Ενώσεις του σιδήρου. Αυξάνουν, επίσης, τον κίνδυνο διόγκωσης των κονιαμάτων και εμφάνισης επιφανειακών κηλίδων.
- Νιτρικά άλατα και αλογόνα. Σε ποσοστό μεγαλύτερο του 0,2% (εκφρασμένο σε χλωριούχα κατά βάρος των αδρανών).
- Ενώσεις του μολύβδου και του ψευδαργύρου. Οι ενώσεις του μολύβδου επιταχύνουν την πήξη και μειώνουν τις αντοχές, ενώ οι ενώσεις του ψευδαργύρου επιβραδύνουν την πήξη και μειώνουν τις αντοχές.
- Χλωριούχες ή φωσφορικές ενώσεις.
- Άμορφο SiO₂. Αδρανή που προέρχονται από πετρώματα που περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου (οπάλιος, ψαμμίτης κ.α) αντιδρούν με τα υδατοδιαλυτά αλκάλια της υδραυλικής κονίας κι επιφέρουν διόγκωση στο κονίαμα/ σκυρόδεμα. Η αλκαλοπυριτική αντίδραση οδηγεί σε ραγίσματα και καταστροφή του ιστού του κονιάματος και έτσι σε μείωση της αντοχής. Ο έλεγχος για περιεκτικότητα σε άμορφο διοξείδιο του πυριτίου γίνεται με τον κανονισμό ASTM-C295, ASTM-C289.
- Λεπτόκοκκα υλικά. Αυτά μπορεί να είναι άργιλοι ή παιπάλη (διέρχονται από το κόσκινο των 75 μm κατά BS 812). Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση αυτά μπορεί να έχουν θετική ή αρνητική επίπτωση. Σε μεγάλες ποσότητες αυξάνουν την απαιτούμενη ποσότητα κονιάς και νερού. Ιδιαίτερη σημασία έχει η κατανομή τους μέσα στα αδρανή. Αν

²⁷ Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΥΑ Δ14/19164 (ΦΕΚ 315/Β/1997).

²⁸Καραγιάννης-Μπακόλας Αστέριος, «Κριτήρια και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ιστορικών Κονιαμάτων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.

βρίσκονται προσκολλημένα στην επιφάνεια χονδρότερων κόκκων μπορεί να εμποδίζουν την πρόσφυση κόκκου και συνδετικής κονιάς. Επίσης, μπορεί κατά την ανάμιξη να μην διαλύονται και να σχηματίζουν μικρούς σβώλους δημιουργώντας εστίες μειωμένης αντοχής και μειώνοντας συνολικά την αντοχή του κονιάματος. Το αργιλικό περιεχόμενο του λεπτόκοκκου υλικού μπορεί να αποτελείται από υλικό «αργιλικού μεγέθους», κι όχι απαραίτητα από αργιλικά ορυκτά. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς τα αργιλικά ορυκτά (ειδικά οι προσροφητικοί άργιλοι) είναι πολύ ευαίσθητα στην υγρασία και θα επηρεάσουν περισσότερο το κονίαμα από τα λεπτόκοκκα υλικά «αργιλικού μεγέθους». Ο έλεγχος γίνεται με τη δοκιμή «απόπλυσης» ή ελέγχου ιζήματος.

- Οργανικές προσμίξεις. Αυτές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στην άμμο και όχι σε χονδρόκοκκα αδρανή. Η παρουσία τέτοιων υλικών (φυτικής ή ζωικής προέλευσης) επιβραδύνει την πήξη της κονιάς και οδηγεί σε μειωμένη αντοχή. Επίσης, υπό μορφή κόκκου, όπως ξύλο ή λιγνίτης δημιουργούν τοπικές διογκώσεις και οδηγούν στην εμφάνιση αποφλοιώσεων (σκασιμάτων). Ο προσδιορισμός των προσμίξεων σε μορφή κόκκου γίνεται με «επιλογή», ενώ για λεπτές οργανικές προσμίξεις με τη δοκιμή του διαλύματος NaOH (χρωματομετρική μέθοδος).
- Ανεπιθύμητη είναι και η ύπαρξη χωματοειδών υλικών και υγρασίας που δυσχεραίνουν την πρόσφυση κονιάς αδρανών.

Συνηθισμένα αδρανή που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ιστορικά κονιάματα και σε κονιάματα αποκατάστασης είναι άμμος (θαλασσινή-ανθρακικής σύστασης, ποταμίσια-χαλαζιακής σύστασης, λατομείου), θραύσματα από ασβεστολιθικά πετρώματα, γρανίτες, χαλαζίες, δολομίτες κα., θραύσματα κεραμεικού, κίσηρη και άλλα ηφαιστειακά πετρώματα.

1.4 Πρόσθετα

1.4.1 Ποζολάνες

Ο όρος ποζολάνες αναφέρεται σε μια ομάδα αργιλοπυριτικών υλικών, φυσικών ή τεχνητών, τα οποία ενώ στη συνήθη τους κατάσταση δεν διαθέτουν ιδιότητες κονιάς, όταν βρεθούν σε λεπτότατο καταμερισμό και παρουσία υγρασίας, αντιδρούν με την υδράσβεστο και δίνουν υδραυλικές ενώσεις. αποκτούν δηλαδή την ιδιότητα να σκληραίνουν στον αέρα και στο νερό.

Τα ανόργανα αυτά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί από την αρχαιότητα για την τροποποίηση κονιαμάτων ασβέστη, ειδικότερα σε κατασκευές που έρχονταν σε επαφή με το νερό: δεξαμενές, λουτρά, κρήνες, λιμενικά έργα. Η βιβλιογραφία είναι πλούσια σχετικά με την χρήση τους στην αρχιτεκτονική^{29 30}.

Οι ποζολάνες διακρίνονται σε φυσικές και τεχνητές:

Οι *φυσικές ποζολάνες* είναι υλικά πλούσια σε άμορφες αργιλοπυριτικές ενώσεις, που έχουν προκύψει μετά από φυσικές ηφαιστειακές κατεργασίες ως αποτέλεσμα φυσικών γεωλογικών διεργασιών. Στις φυσικές ποζολάνες συγκαταλέγονται οι ηφαιστειακοί τόφοι, όπως η θηραϊκή και μηλαϊκή γή, η ιταλική pozzolana, η γερμανική trass, κ.ά. Η χρήση των ιταλικών ποζζολανών, κυρίως της περιοχής Campi Flegrei στον Κόλπο της Νάπολης σε συνδυασμό με τα λοιπά πυροκλαστικά πετρώματα της περιοχής

²⁹ Hobbs, L. W., & Siddall, R. (2011). Cementitious materials of the ancient world. In *Building Roma aeterna: current research on Roman mortar and concrete* (Vol. 128, pp. 35-60). The Finnish Society of Sciences and Letters.

³⁰ Papastefanaki, L. (2018). From Santorini to Trieste and Suez: scientific knowledge, discovery and use of Theran earth in the Mediterranean (from the end of the eighteenth century to the beginning of the twentieth century). *Mediterranean Historical Review*, 33(1), 67-88.

συνέβαλλε στην ανάπτυξη της ρωμαϊκής μνημειώδους αρχιτεκτονικής και τεχνολογίας υδραυλικών κατασκευών^{31,32}.

Στον Αιγαιακό χώρο εντυπωσιακές γεωλογικές διαδικασίες³³ οδήγησαν στον σχηματισμό της περίφημης θηραϊκής γης που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς σε μια σειρά από μεγάλα υδραυλικά έργα της Μεσογείου και της Ευρώπης κατά τη διάρκεια του 19ου και αρχές 20^{ου} αιώνα, ενώ καθόρισε την φυσιογνωμία ενός σπουδαίου αρχιτεκτονικού παραδείγματος, αυτό των υπόσκαφων κατασκευών στην Θήρα και την Θηρασία³⁴.

Οι *σύγχρονες τεχνητές ποζολάνες* προκύπτουν μετά από τεχνητές θερμικές κατεργασίες υλικών, με σκοπό την ανάπτυξη ποζολανικότητας στα υλικά αυτά. Έτσι, όπτηση αργίλων και σχιστόλιθων σε θερμοκρασία > 700 °C και στην συνέχεια άλεση, οδηγεί σε τεχνητό ποζολανικό προϊόν, λόγω της αμορφοποίησης των αργιλικών ορυκτών³⁵. Τεχνητές ποζολάνες προκύπτουν επίσης σαν παραπροϊόντα της βιομηχανίας, η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων, η πυριτική παιπάλη.

Στις *παραδοσιακές τεχνητές ποζολάνες* περιλαμβάνονται υλικά όπως κονιοποιημένο κεραμικό³⁶, γνωστό ως κεραμάλευρο στην βυζαντινή εποχή ή κουρασάνι στην οθωμανική αρχιτεκτονική. Η χρήση κεραμάλευρου και θραυστού κεραμικού ξεκινάει επί ρωμαϊκής εποχής, ενώ επεκτείνεται και συστηματοποιείται στη Βυζαντινή περίοδο. Τα κονιάματα παρουσίαζαν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην υγρασία και εμφάνιζαν τη χαρακτηριστική ρόδινη χροιά των βυζαντινών κονιαμάτων.

Το κοινό χαρακτηριστικό των φυσικών και τεχνητών ποζολανών είναι ότι το οξείδιο του πυριτίου αποτελεί το βασικό συστατικό τους. Το υαλώδες SiO₂ στις φυσικές ποζολάνες σχηματίζεται από τη γρήγορη στερεοποίηση της λιωμένης λάβας, η οποία αποτελείται κυρίως από πορώδη σφαιρικά σωματίδια. Η υαλώδης άμορφη δομή των τεχνητών ποζολανών - προϊόντων αποβλήτων, όπως π.χ. η ιπτάμενη τέφρα (ΙΤ) και η πυριτική παιπάλη (ΠΠ) σχηματίζεται λόγω γρήγορης στερεοποίησης.

Κατά κανόνα, οι ποζολάνες περιέχουν ενεργές και αδρανείς φάσεις, οι οποίες, ορυκτολογικά, αντιστοιχούν σε άμορφες και κρυσταλλικές φάσεις αντίστοιχα. Η ικανότητα των ποζολανών να αντιδρούν με τον ασβέστη οφείλεται στην παρουσία των ενεργών φάσεων, που είναι θερμοδυναμικά ασταθείς και περιέχουν υαλώδη και άμορφα συστατικά. Οι ενεργές φάσεις των ποζολανών είναι πλούσιες σε πυριτία, απαραίτητο χαρακτηριστικό για την εμφάνιση ποζολανικού χαρακτήρα. Ο όρος «ποζολανικότητα» χαρακτηρίζει το πόσο ενεργή είναι μια ποζολάνη, βάσει δύο παραμέτρων: α) του μέγιστου ποσού ασβέστη που μπορεί να δεσμευτεί από την ποζολάνη, και β) του ρυθμού με τον οποίο αυτή η αντίδραση λαμβάνει χώρα. Είναι προφανές ότι η ποζολανικότητα ποικίλλει και εξαρτάται από

³¹ Artioli, G., Secco, M., & Addis, A. (2019). The Vitruvian legacy: mortars and binders before and after the Roman world. *The Contribution of Mineralogy to Cultural Heritage*; Artioli, G., Oberti, R., Eds, 151-202.

³² Brandon, C. J., Hohlfelder, R. L., Jackson, M. D., & Oleson, J. P. (2014). *Building for eternity: the history and technology of Roman concrete engineering in the sea*. Oxbow books.

³³ Heiken, G., & McCoy Jr, F. (1984). Caldera development during the Minoan eruption, Thira, Cyclades, Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8441-8462.

³⁴ Ριτζούλη, Α. (2016). Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής και της οικοδομικής τέχνης στη Σαντορίνη από τη Βενετοκρατία (1204) μέχρι το σεισμό του 1956 (Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Τομέας Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής, Ιστορίας της Τέχνης, Αρχιτεκτονικής Μορφολογίας και Αναστήλωσης).

³⁵ Mohammed, S. (2017). Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. *Construction and building materials*, 140, 10-19.

³⁶ Rogers, S. B. (2011). Evaluation and testing of brick dust as a pozzolanic additive to lime mortars for architectural conservation.

την φύση της ποζολάνης και πιο συγκεκριμένα, από την ποιότητα και την ποσότητα των ενεργών φάσεων της³⁷.

1.4.2 Οργανικά υλικά

Οργανικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από την προϊστορική εποχή στους τομείς της αρχιτεκτονικής και της τέχνης για την βελτίωση διαφόρων ιδιοτήτων των οικοδομικών ή διακοσμητικών κονιαμάτων, ως φορείς σε χρωματικά στρώματα ή σε βερνίκια κ.α.^{38 39 40}. Καθώς μερικά πρώιμα ασβεστιτικά κονιάματα παρουσίαζαν χαμηλές μηχανικές αντοχές δεν είναι ασυνήθιστο να βρούμε ινώδη φυτικά υλικά ή ακατέργαστες ζωικές τρίχες που προστίθενται για την βελτίωση των μηχανικών αντοχών. Η σύγχρονη έρευνα και η εφαρμογή ποικίλων αναλυτικών και μη καταστρεπτικών τεχνικών έχουν επιτρέψει την ταυτοποίηση και διάκριση ποικίλων οργανικών ουσιών και μείξης αυτών σε δείγματα από ιστορικά κονιάματα και άλλα υλικά, γεγονός που υποδεικνύει μια περίτεχνη γνώση γύρω από το ζήτημα. Στην Εικόνα 3 αποτυπώνεται μια σειρά από διαφορετικά οργανικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί, καθώς και ο ρόλος τους στην βελτίωση των οικοδομικών μειγμάτων.

Μια γρήγορη ταξινόμηση βάσει χημική σύστασης οργανικών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε δομικά υλικά σαν πρόσθετα και σε διάκοσμους σαν συνδετικά μέσα και βερνίκια είναι: α) πρωτεϊνικά υλικά, όπως η αλμπουμίνη από το ασπράδι αυγού, η καζεΐνη γάλακτος και διάφορες ζωικές κόλλες, β) πολυσακχαρίτες φυτικής προέλευσης όπως διάφορα κόμμεα (gums) ή αμυλούχα συστατικά και γ) ουσίες με βάση λιπαρά οξέα (fatty acid) όπως το μελισσοκέρι, φυτικά έλαια και ρητινικά προϊόντα⁴¹.

³⁷ Moropoulou, A., Bakolas, A., & Aggelakopoulou, E. (2004). Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 420(1-2), 135-140.

³⁸ Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., & Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3313-3318.

³⁹ Fang, S. Q., Zhang, H., Zhang, B. J., & Zheng, Y. (2014). The identification of organic additives in traditional lime mortar. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2), 144-150.

⁴⁰ Brecolaki, H., Andreotti, A., Bonaduce, I., Colombini, M. P., & Lluveras, A. (2012). Characterization of organic media in the wall-paintings of the "Palace of Nestor" at Pylos, Greece: evidence for a secco painting techniques in the Bronze Age. *Journal of Archaeological Science*, 39(9), 2866-2876.

⁴¹ Vandenabeele, P., Wehling, B., Moens, L., Edwards, H., De Reu, M., & Van Hooydonk, G. (2000). Analysis with micro-Raman spectroscopy of natural organic binding media and varnishes used in art. *Analytica Chimica Acta*, 407(1-2), 261-274.

<i>Είδος Πρόσμικτου</i>	<i>Επίδραση στο κονίαμα</i>	<i>Οργανικό Ιστορικό υλικό</i>	<i>Συνθετικό Σύγχρονο υλικό</i>
Αερακτικό	Βελτίωση ανθεκτικότητας	Βύνη, μύρα, δέρμα ζώων	Συνθετικά απορρυπαντικά, κλάσματα πετρελαίου, υδροξείδια του βαρίου
Σταθεροποιητής	Σε μικρές ποσότητες για σταθεροποίηση γαλακτωμάτων	Κρόκος αυγού, λίπη, κερί	Ακρυλονιτρίλια, βενζοτριάζολες
Filler	Βελτίωση σκληρότητας	Κόλλα, αραβική μαστίχα, ζάχαρη, χυμοί φρούτων, γλουτένη, ρύζι	Ακρυλικά πολυμερή, ακρυλικό γαλάκτωμα
Ανθεκτικό στην πήξη του νερού	Αντίσταση στη φθορά από πάγο, κύκλους τήξης-πήξης	Ζάχαρη	Ακρυλικά, προπανόλη
Πρόσθετο διαστολής	Διαστολή κατά την πήξη	Ζωικές και φυτικές κόλλες	Υδρολυμένες πρωτεΐνες
Μετατροπέας	Μεταβολή υπαρχόντων διαλυμάτων	Ασπράδι αυγού, αίμα, αλευρόκολλα, κερατίνη, κολλαγόνο, καζεΐνη, βόρακας, φυτικές ρητίνες	Φορμαλδεΐδη, ακρυλικά πολυμερή και Γαλακτώματα, συμπολυμερή του βουτεδιένιου
Αναστολέας μεταβολής όγκου	Ανασταλτική δράση στη συστολή	Κερί μέλισσας	Πυριτική γέλη, ακρυλικά γαλακτώματα
Πλαστικοποιητής	Μείωση εύθρυπτου, αύξηση εργασιμότητας	Ζάχαρη, γάλα, ασπράδι αυγών, λάδι λιναρόσπορου, λίπος χοίρου, γάλα σύκου, ζωική κόλλα	Σιλικόνες
Επιβραδυντής	Επιβράδυνση ταχύτητας πήξης	Ζάχαρη, γάλα, σακχαρίνη, αλευρόκολλα, ασπράδι αυγών, βόρακας	Σιλικόνες

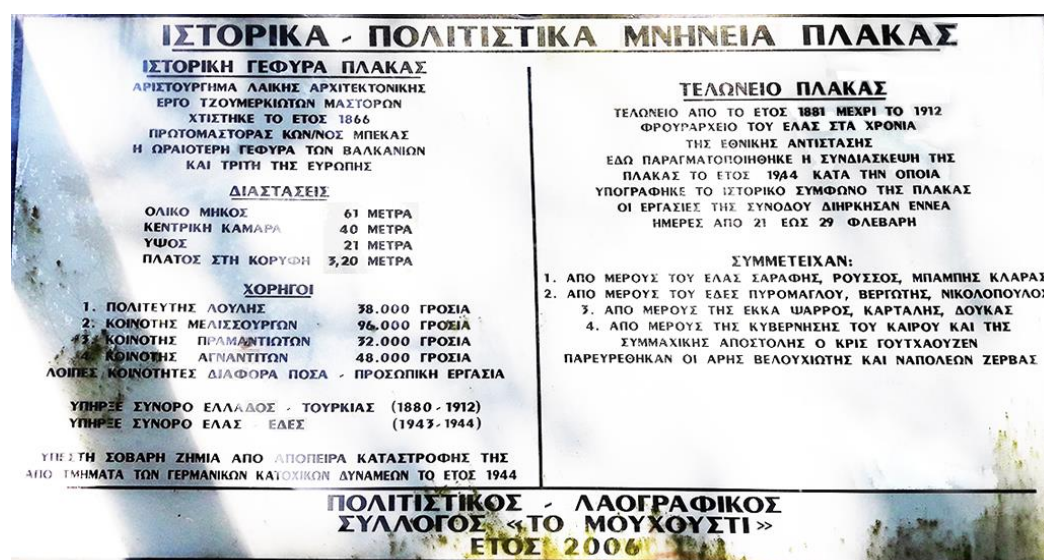
Εικόνα 3. Παραδείγματα παραδοσιακών οργανικών υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στα κονιάματα και αντίστοιχα σύγχρονα υλικά.

2. Ειδικό Θεωρητικό Μέρος. Γέφυρα Πλάκας.

2.1 Σύντομα ιστορικά στοιχεία

Το Γεφύρι της Πλάκας φαίνεται να αποτελούσε σημαντικό πέρασμα κυρίως για τους κατοίκους των Τζουμέρκων στην πορεία τους προς την Άρτα και τα Ιωάννινα. Το 1860 κατέρρευσε η γέφυρα που προϋπήρχε σε γειτονικό σημείο¹ και αμέσως κρίθηκε απαραίτητη η οικοδόμηση νέας. Το 1863 πραγματοποιήθηκε η πρώτη απόπειρα για νέα γέφυρα στην Πλάκα, στο σημείο που αργότερα χτίστηκε το ομώνυμο γεφύρι. Η προσπάθεια αυτή δεν ευόδωσε, καθώς σύμφωνα με τις πηγές, κατέρρευσε κατά την αφαίρεση του καλουπιού. Παρόλα αυτά, η ανάγκη για το πέρασμα ήταν τόσο επιτακτική, που συγκεντρώθηκαν και πάλι οι πόροι για μια δεύτερη προσπάθεια με λίγο διαφορετική γεωμετρία, αλλά τους ίδιους πρωτομάστορες, τον Πραμαντιώτη Κώστα Μπέκα και τον Κονιτσιώτη Ζιώγα Φρόντζο².

Απόδειξη της αναγκαιότητας του συγκεκριμένου γεφυριού για τους κατοίκους των Τζουμέρκων αποτελεί η προσφορά πολλών χωριών, αλλά και αυτόνομων κατοίκων για την κατασκευή. Χαρακτηριστικό είναι για παράδειγμα ότι εκτός από την οικονομική ενίσχυση, αρκετές τοπικές κοινότητες προσέφεραν εθελοντική εργασία ή υλικά, όπως την ξυλεία για το καλούπι που προσέφεραν τα Άγναντα.



Εικόνα 1. Πινακίδα μπροστά από το Γεφύρι της Πλάκας με ιστορικά στοιχεία.

Όπως κάθε σημαντικό πέρασμα, έτσι και το Γεφύρι της Πλάκας αποτέλεσε κατά καιρούς σημείο διενέξεων και τελικά σύνορο σε διάφορες ιστορικές περιόδους. Μεταξύ 1881 και 1913 αποτέλεσε το σύνορο μεταξύ του Βασιλείου της Ελλάδος και Οθωμανικής Αυτοκρατορίας, που συνοδεύτηκε με τη δημιουργία του τελωνειακού σταθμού. Το 1943 η γέφυρα αποτέλεσε στόχο κατά τη διάρκεια του 'Β παγκοσμίου πολέμου, δεχόμενη οβίδα ή εκρηκτικά στο κεντρικό τόξο, χωρίς ωστόσο να καταρρεύσει. Το Φεβρουάριο του 1944 υπογράφηκε η συνθήκη ανακωχής Πλάκας - Μυρόφυλλου ανάμεσα στις αντιπροσωπείες του ΕΑΜ, ΕΔΕΣ και του ΕΚΚΑ, στο κτίριο του τελωνείου.

¹ Παπακώστας. Ν. Χ. (1967) Ηπειρωτικά, σελ. 429.

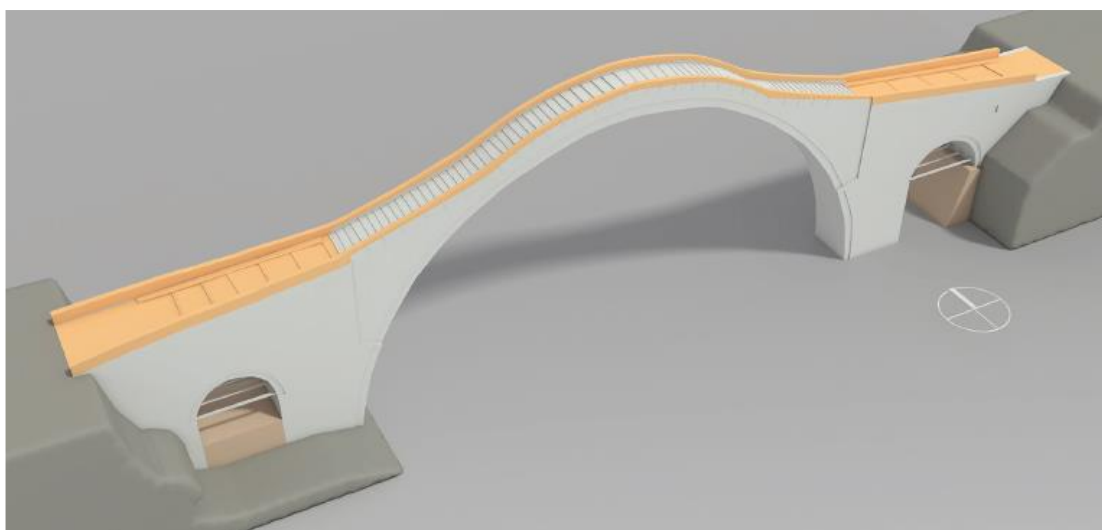
² ΕΜΠ. (2016). «Γεφύρι της Πλάκας. Το Έργο του Ε.Μ.Π. για την Αποκατάστασή του», σελ. 67

2.2 Κατασκευαστικές Φάσεις



Εικόνα 2. Το γεφύρι (1901). (φωτ. συλλογής σουλτάνου Αμπντούλ Χαμίτ ΙΙ), Άρθρο Σ. Μαντά http://arhiogefirionipirotikon.blogspot.gr/2012/03/blog-post_28.html.

Η γέφυρα αυτή, τελικά κατασκευάστηκε επιτυχώς το 1866, αφήνοντας ωστόσο ελλείψεις που πιθανά σχετίζονται με οικονομικούς παράγοντες και οι οποίες δυσκόλεψαν την προσβασιμότητά της. Το γεφύρι χρησιμοποιήθηκε αρχικά έως το 1881, οπότε και ο Άραχθος αποτέλεσε το σύνορο μεταξύ Ελληνικού κράτους και Οθωμανικής αυτοκρατορίας. Το 1913 που προσαρτήθηκε η υπόλοιπη Ήπειρος στο Ελληνικό κράτος, η γέφυρα άρχισε να χρησιμοποιείται και πάλι τακτικά.



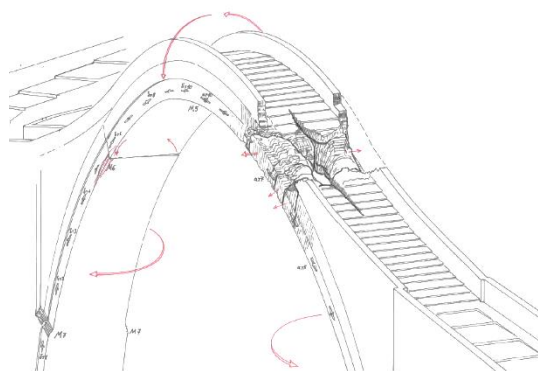
Εικόνα 3. Φάση 2 (1928). Με πορτοκαλί χρώμα φαίνονται οι επιβεβαιωμένες προσθήκες. ΕΜΠ (2016)

Το 1928 το κράτος διέθεσε κονδύλι για τη βελτίωση του έργου. Σε αυτή τη φάση, φαίνεται να ανυψώθηκαν τα βάθρα εκατέρωθεν και να οικοδομήθηκαν τα στηθαία, βελτιώνοντας την προσβασιμότητα συνολικά. Δεν είναι γνωστό εάν σε αυτή ή σε επόμενη φάση οικοδομήθηκε ο περυγώτοιχος του δυτικού βάθρου και η συμπλήρωση του τμήματος κάτω από το δυτικό ανακουφιστικό τόξο, καθώς και ο τοίχος αντιστήριξης κάτω από το ανατολικό ακρόβαθρο.



Εικόνα 4. Το Γεφύρι της Πλάκας, στη μορφή που είχε από το 1928 έως το 2015.

Το 1943, προκλήθηκε σημαντική ζημιά στην ανατολική πλευρά του κεντρικού τόξου από οβίδα ή εκρηκτικά, η οποία επισκευάστηκε αρχικά πρόχειρα και αργότερα με κρατική ενίσχυση, σκυροδετώντας τη διαμπερή τρύπα. Το 1972 το γεφύρι της Πλάκας κηρύχθηκε ιστορικό διατηρητέο μνημείο³ και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τοπικές συντηρήσεις, κυρίως στη βάση των στηθαίων που αντιμετώπιζαν προβλήματα υγρασίας.



Εικόνα 5. Η τρύπα που προλήθηκε από οβίδα ή εκρηκτικά στο κεντρικό τόξο το 1943. Σχέδιο του Μ. Κορρέ. ΕΜΠ (2016)

Το 2008 πραγματοποιήθηκαν εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης, οι οποίες αν και βασίστηκαν στη μελέτη των Α. και Γ. Παπαγεωργίου, περιορίστηκαν σε κυρίως επιφανειακές συντηρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, αρμολογήθηκαν επιφάνειες με ρωγμές σε ανατολικό και δυτικό βάθρο και στα αντίστοιχα ανακουφιστικά τόξα, επισκευάστηκε ξανά η περιοχή βλάβης του 1943 με αρμολόγημα των ρωγμών και αντικατάστηκαν εμφανείς επιφάνειες σκυροδέματος με λιθοδομή. Επίσης, τοποθετήθηκαν μεταλικοί ανοξείδωτοι ελκυστήρες στα δύο ανακουφιστικά τόξα του

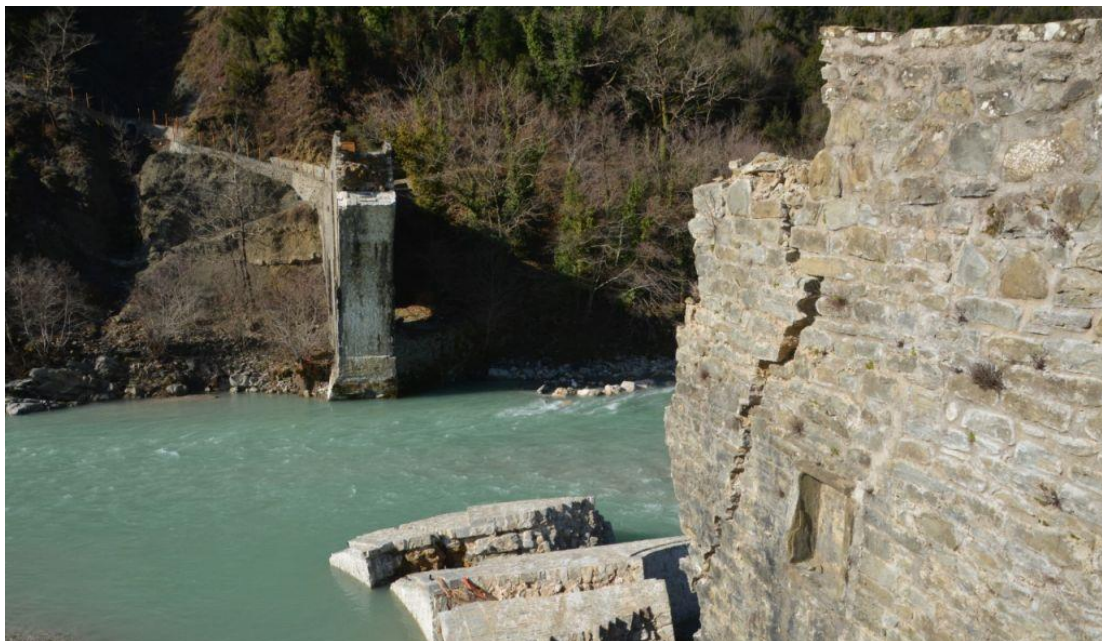
δυτικού και ανατολικού ακρόβαθρου. Τέλος, διενεργήθηκαν περιορισμένης έκτασης τοπικές ενεματώσεις στα δύο βάθρα, οι οποίες καταδεικνύουν την προχειρότητα της εκτέλεσης του έργου και την ελλιπή εφαρμογή της μελέτης⁴. Ερώτημα παραμένει, επίσης, η αιτία της μη υλοποίησης της κατασκευής μικροπασσάλων για την προστασία από υποσκαφή και των δύο βάθρων, ένα πρόβλημα στο οποίο οφείλεται η κατάρρευση του γεφυριού το Φεβρουάριο του 2015, σύμφωνα με τη διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ⁵. Κατά τη διάρκεια της πρόσφατης

³ ΦΕΚ-621/22-08-1972

⁴ ΕΜΠ. (2016). «Γεφύρι της Πλάκας. Το Έργο του Ε.Μ.Π. για την Αποκατάστασή του», σελ. 134

⁵ Ό.π. ΕΜΠ. σελ. 101

αποκατάστασης και αναστήλωσης του γεφυριού, βρέθηκε στρώμα σκυροδέτησης με πλέγμα και επικάλυψη από ασφαλτόπανο κάτω από το νεότερο κατάστρωμα του δυτικού βάθρου, μία επέμβαση που αποδίδεται πιθανά στην ίδια φάση του 2008.



Εικόνα 6. Η γέφυρα και τα θραύσματά της στον Άραχθο, αμέσως μετά την κατάρρευση.

Το Φεβρουάριο του 2015, το μεγαλύτερο μέρος της γέφυρας κατέρρευσε ύστερα από μεγάλη πλημμύρα που είχε προκληθεί από συνεχείς βροχοπτώσεις στην περιοχή. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ που ταξίδεψε αμέσως μετά την καταστροφή στο σημείο και και μελέτησε το ζήτημα, κατέληξε πως το βασικό αίτιο κατάρρευσης ήταν η υποσκαφή της θεμελίωσης του ανατολικού βάθρου. Η άμεση κινητοποίηση του ΕΜΠ και φορέων της κεντρική διοίκησης είχε ως αποτέλεσμα τελικά την αναστήλωση και αποκατάσταση του γεφυριού που ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2020.



Εικόνα 7. Οι εργασίες αναστήλωσης το 2019.

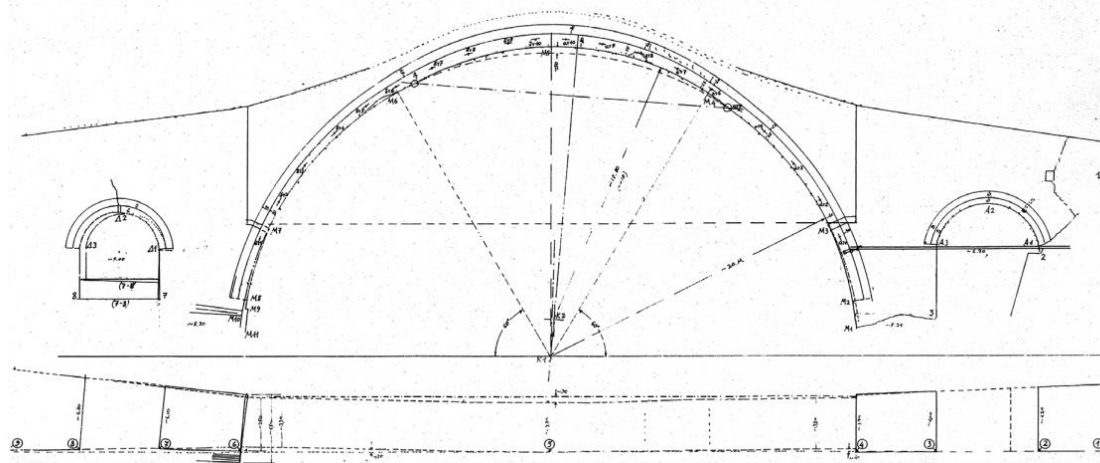
2.3 Κατασκευαστική Ανάλυση

2.3.1 Αναλογίες-Διαστάσεις

Πρόκειται για μονότοξο γεφύρι, με άνοιγμα 40 μ και δύο ανακουφιστικά τόξα εκατέρωθεν του κεντρικού: το ανατολικό διαμέτρου περίπου 6,70 μ και το δυτικό περίπου 5 μ. Το πλάτος της γέφυρας φτάνει τα 4,50 μ και 5 μ στο ανατολικό και δυτικό ακρόβαθρο αντίστοιχα, ενώ μειώνεται σταδιακά προς τα μεσόβαθρα, έως το κεντρικό τόξο που έχει περίπου σταθερό πλάτος 3,30 μ. Η μικρή αυτή διάσταση φαίνεται σχετικά οριακή, παρουσιάζοντας αναλογία πλάτους προς άνοιγμα 1:12. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι ρωμαϊκές γέφυρες σπάνια είχαν πλάτος κάτω των 5 μ.⁶

2.3.2 Γεωμετρικά Στοιχεία

Η γέφυρα παρουσιάζει μια ποικιλία γεωμετρικών χαράξεων που αντανακλούν τον προσεκτικό σχεδιασμό της και την απαίτηση για ελάχιστη ενέργεια οικοδόμησης, δεδομένου ότι έπρεπε να κτιστεί σε δύσκολες συνθήκες και όσο το ποταμί είχε μικρή ροή. Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ένα στένεμα των διαστάσεων από κάτω προς τα πάνω και από τα άκρα προς το μέσον. Εκτός των ομαλών συγκιλόμενων ευθειών, υπάρχουν και κάποιες πιο απότομες μειώσεις, οι οποίες γίνονται βαθμιδωτά. Τέτοιες υπάρχουν στα δύο βάθρα, στα νότια για το δυτικό και στα βόρεια για το ανατολικό, ενώ περίπου 7 μ από τη βάση, το πλάτος του κεντρικού τόξου και μέρους του μεσοβάθρου μειώνεται κατά 0,45 μ. Αντίθετα, το ύψος του κεντρικού τόξου σταδιακά αυξάνεται προς το μέσο κατά περίπου 0,30 μ., με τους δύο επάλληλους θολίτες να φτάνουν κατά περιπτώσεις ακόμα και τα 1,56 μ.



Εικόνα 8. Σχέδιο νότιας όψης του Γεφυριού από το Μ. Κορρέ. ΕΜΠ (2016).

Επιπρόσθετα, ένα από τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του γεφυριού αποτελεί η διπλή καμπυλότητα του κεντρικού τόξου. Από τις αποτυπώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς, έχει γίνει εμφανές ότι ενώ το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης εφάπτεται σε κύκλο (μικρότερο ενός ημικυκλίου), με ακτίνα περίπου 20 μ, το ανώτερο τμήμα του εμφανίζει ανύψωση. Η ιδιαιτερότητα αυτή, που έχει ερμηνευτεί ως πιθανή παραμόρφωση, λόγω πίεσης από τα εκατέρωθεν βάθρα, φαίνεται τελικά να αποτελεί συνειδητή επιλογή, η οποία αποτυπώνεται με μία δεύτερη χάραξη τομέα κύκλου με κέντρο περίπου 3 μέτρα ψηλότερα του άλλου και 2,5 μ μικρότερης ακτίνας. Η ιδιομορφία αυτή παρατηρείται και στο μεταγενέστερο γεφύρι της Κόνιτσας, το οποίο είχαν αναλάβει οι ίδιοι πρωτομάστορες⁷.

⁶ Ό.π. ΕΜΠ. σελ. 24

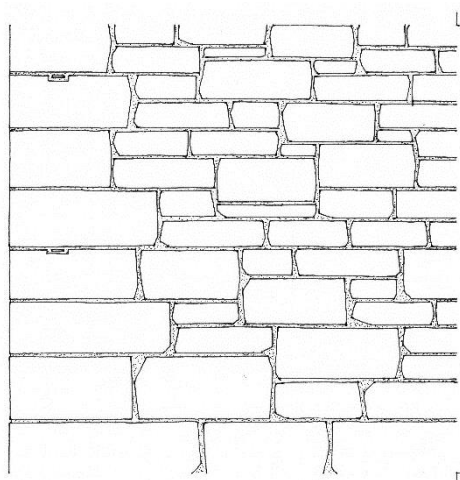
⁷ Ό.π. ΕΜΠ. σελ. 66-67

2.3.3 Λιθοδομή

Όσον αφορά τη λιθοδομή, στην αρχιτεκτονική μελέτη τεκμηρίωσης για την αναστήλωση της γέφυρας παρουσιάζονται 15 διαφορετικοί τύποι λιθοπλοκής, οι οποίοι διαφοροποιούνται τόσο ως προς τη μεταξύ τους οικοδόμηση όσο και ως προς τις διαστάσεις και το είδος των λίθων, ανάλογα με τις ανάγκες της δομής του κάθε μέρους της κατασκευής.

Δόμηση στα κατώτερα τμήματα των βάθρων και του τόξου

Οι βάσεις των δύο βάθρων είναι δομημένες με μεγαλύτερου μεγέθους λίθους πάχους από 0,12 μ. έως 0,27 μ. μήκους από 0,65 μ. έως 1,00 μ. και πλάτους 0,30 μ. έως 0,70 μ. με αναλογία μήκους προς πάχος όχι μεγαλύτερη από 5,5:1 (Λιθοδομή Λ1). Επίσης, σε απόσταση περίπου 1,00μ.-1,50 μ. από το εσωράχιο του κεντρικού τόξου, οι αρμοί των λίθων ακολουθούν την διεύθυνση της ακτίνας του κεντρικού τόξου, παρουσιάζοντας μια καταφέρεια. Εκτός των μεγάλου μεγέθους λίθων που χρησιμοποιήθηκαν στη βάση με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης σταθερότητας στην κατασκευή, εσωτερικά υπήρχαν μεταλλικές ενισχύσεις, οι οποίες αποκαλύφθηκαν κατά την πτώση της γέφυρας. Πιο συγκεκριμένα, στο ανατολικό μεσόβαθρο βρέθηκαν 3 σειρές χαλύβδινων συνδέσμων που απείχαν μεταξύ τους 0,70 μ καθ' ύψος. Οι σύνδεσμοι αυτοί είχαν μήκος από 1.20 έως 2 μ και εγκιβωτίζονταν στη λιθοδομή μέσα σε εντορμίες γεμισμένες με μόλυβο αντί κονιάματος, σχηματίζοντας σε κάθε επίπεδο δύο πλαίσια δυνατά να παραλάβουν εφελκυστικές και καμπτικές δυνάμεις. Ένδειξη μεταλλικών συνδέσμων εντοπίστηκε επίσης στο δυτικό μεσόβαθρο⁸. Σύμφωνα με τη στατική μελέτη για την αναστήλωση της γέφυρας, οι σύνδεσμοι αυτοί πράγματι βελτιώνουν τη στατική λειτουργία της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, επαναλήφθηκε η χρήση του συστήματος αυτού κατά την ανακατασκευή του ανατολικού βάθρου το 2019, αλλά αυτή τη φορά με ανοξειδωτο χάλυβα.



Εικόνα 9. Λιθοδομή Λ1 στη βάση του μεσοβάθρου. Σχέδιο Χ. Τάκου και Κ. Βάβουλα από την αρχιτεκτονική μελέτη τεκμηρίωσης της αναστήλωσης.

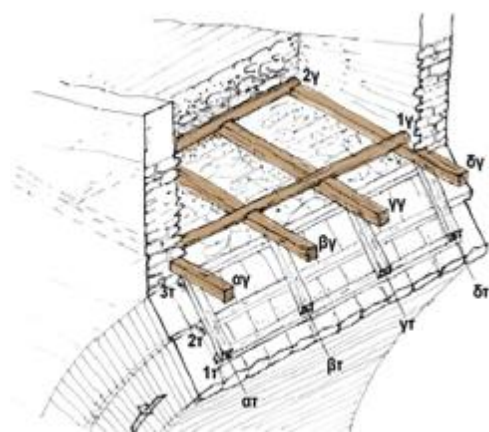
Δόμηση στον κορμό των μεσοβάθρων

Περίπου 4 μ πιο ψηλά, δομείται ο κορμός του μεσοβάθρου με πάχος λίθων που κυμαίνεται από 0,07 μ. έως 0,16μ., μήκος από 0,35 μ. έως 0,50 μ. και πλάτος 0,30μ. έως 0,45 μ. (Λιθοδομή Λ2). Λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων ανάληψης φορτίων, η δόμηση είναι ομοιογενής σε όλη την έκταση της μάζας του κορμού του βάθρου, χωρίς να ξεχωρίζουν οι εξωτερικές παρειές από το γέμισμα. Από αυτό το ύψος και πάνω, αξίζει να παρατηρήσουμε την ύπαρξη αρκετών ξυλότρυπων, σημάδια από τα σημεία στα οποία είχαν στηθεί σκαλωσιές κατά τη διάρκεια του έργου. Πολλές από αυτές λειτούργησαν εκ των υστέρων ως σημεία απορροής του νερού που διαπερνούσε τη γέφυρα από τις βροχοπτώσεις μέσω του καταστρώματος.

Δόμηση στα τύμπανα ανατολικού και δυτικού βάθρου

⁸ Ό.π. ΕΜΠ. σελ. 120

Σε αυτή την περιοχή, αν και η λιθοδομή είναι σε μεγάλο βαθμό ίδια με εκείνη του κορμού των μεσοβάθρων (Λιθοδομή Λ4), αποκαλύφθηκε εντός της άλλη μία κρυφή δομή, κατά την πτώση της γέφυρας: εκείνη των ξύλινων εσχάρων. Πιο συγκεκριμένα, από το ύψος της γένεσης του ανατολικού τόξου και πάνω βρέθηκαν ξύλινες διατομές οι οποίες διασταυρώνονται σχηματίζοντας μικρότερα πλαίσια. Συνολικά 4 επίπεδα ξύλινων εσχάρων βρέθηκαν στο ανατολικό βάθρο και άλλες τόσες πιθανολογούνται στο δυτικό. Το κάθε επίπεδο αποτελούνταν από μία οριζόντια εσχάρα που κάλυπτε σχεδόν το σύνολο της δομής του τυμπάνου και μία άλλη μία επικλινή στο συναφές επίπεδο του τόξου. Οι οριζόντιες αποτελούνταν από ξυλεία ελάτης, ενώ οι επικλινείς από δρυ⁹. Τα ξύλα μεταξύ τους συνδέονταν με ευμεγέθη γυφτόκαρφα. Αντίθετα με την περίπτωση των μεταλλικών συνδέσμων, η στατική μελέτη της αναστήλωσης δείχνει ότι οι εσχάρες δε φαίνεται να συνεισφέρουν στη βελτίωση της στατικής λειτουργίας του γεφυριού. Το γεγονός αυτό προσανατολίζει τα συμπεράσματα για τη χρήση των στοιχείων αυτών ως βοηθητικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Εξάλλου, τα περισσότερα ξύλα που εξετάστηκαν είχαν φθαρεί σε τέτοιο βαθμό που δε θα μπορούσαν να συνεισφέρουν δομικά, ενώ άλλα είχαν ουσιαστικά διαβρωθεί πλήρως. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής αυτών των στοιχείων δε θα μπορούσε να λειτουργήσει συμπληρωματικά με την υπόλοιπη τεχνολογία του γεφυριού που φαίνεται να σχεδιάστηκε για πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Παρόλα αυτά, εγκρίθηκε η τοποθέτηση νέων ξύλινων εσχάρων για την αναστήλωση της γέφυρας, για ιστορικούς κυρίως λόγους. Η ξυλεία που χρησιμοποιήθηκε στην ανακατασκευή των μεγάλων εσχάρων ήταν καστανιά έναντι της ελάτης για, λόγω έλλειψης μεγάλων διατομών στην εγχώρια αγορά, αλλά



Εικόνα 10. Σχέδιο της ανώτερης ξύλινης εσχάρας στο ανατολικό βάθρο. ΕΜΠ (2016).

και για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Στις μικρότερες εσχάρες χρησιμοποιήθηκε και πάλι ξυλεία δρυός.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο της δομής των τυμπάνων αποτελεί η χρήση πωρόλιθου ως εσωτερικό γέμισμα της λιθοδομής στο κομμάτι που παρατηρείται η μείωση του πλάτους και έως το κεντρικό τόξο. Φαίνεται δηλαδή, ότι ενώ ακόμα και τα ανώτερα τμήματα της λιθοδομής οικοδομούνται εξολοκλήρου συμπαγώς, κυρίως με πλακοειδείς λίθους, στην περιοχή που το κεντρικό τόξο αρχίζει να παραλαμβάνει περισσότερα φορτία, επιλέγεται -εσωτερικά και μόνο- η δόμηση με πωρόλιθο, με προφανή στόχο τη μείωση του βάρους που έφερε το καλούπι, αλλά και το τόξο στη συνέχεια.

Δόμηση στο κεντρικό τόξο

Με το κέντρο του κύκλου στον οποίο εγγράφεται το κεντρικό τόξο να βρίσκεται χαμηλότερα από τη στάθμη έδρασης των δύο βάθρων, το κεντρικό τόξο ξεκινάει ήδη με μια αρχική κλίση. Για τα πρώτα 3,5 μ περίπου, οι θολίτες δεν ξεχωρίζουν στις όψεις από το υπόλοιπο σώμα του βάθρου, ενώ στη συνέχεια σχηματίζουν δύο επάλληλες σειρές λιθοδομής, η πρώτη εκ των οποίων εισέχει εκατέρωθεν περίπου 6 εκ. Η δεύτερη σειρά (άνω θολίτες) δημιουργεί ένα σχετικά σαφές όριο με τη λιθοδομή του τυμπάνου, αν και εσωτερικά εμπλέκεται τακτικά με εκείνη, ώστε να δημιουργεί συνάφεια με το υπόλοιπο σώμα της γέφυρας. Το ίδιο συμβαίνει και με τις δύο σειρές των θολιτών, όπου ενώ εξωτερικά εμφανίζονται ξεχωριστές με συγκεκριμένου μεγέθους λίθους (53 έως 80 εκ για τους έξω και 61 έως 76 για τους έσω), εσωτερικά χρησιμοποιούνται διαφορετικού μεγέθους θολίτες ή ακόμα και ενδιάμεσοι λίθοι με

⁹ Ο.π. ΕΜΠ. σελ. 231

σκοπό την πλοκή των αρμών (Λιθοδομή T1). Αυτό αποδεικνύει ότι η κατασκευή των δύο σειρών έγινε ταυτόχρονα και άρα το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε θα έπρεπε να φέρει το βάρος όλου το τόξου¹⁰. Οι πέτρες του κεντρικού τόξου έχουν παράλληλες πλευρές έδρασης και όχι σφηνοειδείς, όπως συνήθιζεται σε αρκετά τόξα, εφόσον το μέγεθος της ακτίνας το επιτρέπει χωρίς να σχηματίζεται μεγάλος στο εξωράχιο. Ένα άλλο σημαντικό δομικό στοιχείο του κεντρικού τόξου αποτελούν οι άρπιζες· μεταλλικοί εκλυστήρες που συγκρατούν τις πλαϊνές πλευρές του τόξου. Αποτελούνται από ορθογωνικής διατομής μακρόστενα κομμάτια χάλυβα που εγκιβωτίζονται με εντορμιά ανάμεσα στους θολίτες του έσω τόξου και στα άκρα τους συνδέονται με εγκάρσια κομμάτια που εφάπτονται εκατέρωθεν σε πέντε ή έξι εξωτερικούς θολίτες, συγκρατώντας τους και εξασφαλίζοντας τη συνοχή του τόξου στον εγκάρσιο άξονα. Στο ανώτερο τμήμα του κεντρικού τόξου, δηλαδή κοντά στο σημείο αλλαγής καμπυλότητας και ύστερα, και φαίνεται να εντείνεται η προσπάθεια δομικής σταθερότητας, αυξάνοντας των αριθμό των αρπιζών και το μέγεθος των θολιτών σταδιακά.



Εικόνα 12. Άρπιζα στην έσω σειρά θολιτών του κεντρικού τόξου. ΕΜΠ (2016).



Εικόνα 11. Σφραγίδα που βρέθηκε πάνω σε άρπιζα, με το όνομα της αγγλικής εταιρείας που προμήθευσε τον ιστορικό χάλυβα. ΕΜΠ (2016).

Δόμηση στα ανακουφιστικά τόξα

Τα δύο ανακουφιστικά τόξα έχουν δομηθεί με σχετικά παρόμοια κατασκευαστική λογική με εκείνη του κεντρικού τόξου, χωρίς ωστόσο τον ίδιο βαθμό επιμέλειας. Έχουμε και πάλι δύο επάλληλες σειρές λίθων μικρότερου μεγέθους (43 έως 51 εκ) οι οποίες αν και έχουν σαφή εξωτερικά όρια, με το έσω τόξο να σχηματίζει και πάλι εσοχή, στο εσωτερικό τους εμπλέκονται (Λιθοδομή T2). Επίσης, αντί των χαλύβδινων αρπιζών, εδώ χρησιμοποιήθηκαν ξύλινοι σύνδεσμοι από δρυ. Οι ενισχύσεις αυτές έχουν ορθογωνική διατομή (5x10 εκ) και εγκιβωτίζονται στη λιθοδομή των έσω θολιτών, διατρέχοντας ένα ολόκληρο επίπεδο σε παράλληλη επαφή με αυτούς, όπως και οι άρπιζες. Για να μπορέσουν αντίστοιχα να συγκρατήσουν το τόξο σε εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις, οι ξύλινοι σύνδεσμοι πακτώνονται με γυροτόκαρφα στους αρμούς του τόξου. Τα περισσότερα από τα σόκορα των ξύλων αυτών είναι ορατά στις όψεις της γέφυρας, ενώ κάποια άλλα έχουν επιμελώς κοπεί στις άκρες και καλυφθεί με ένα μικρότερο εξωτερικό θολίτη. Βασική διαφορά των ανακουφιστικών τόξων από το κεντρικό είναι η χρήση σφηνοειδών λίθων, κάτι που επιβάλλουν οι διαστάσεις των κύκλων στους οποίους εγγράφονται, ώστε να εξασφαλιστεί η μείωση των αρμών και άρα καλύτερη επαφή των εδραζόμενων λίθων.

¹⁰ Ο.π. ΕΜΠ. σελ. 30



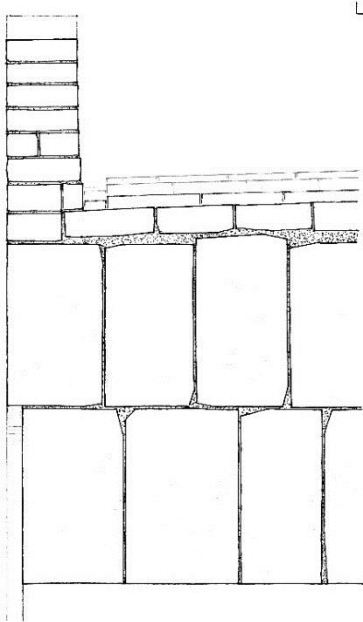
Εικόνα 14. Ξύλινη δοκός ενίσχυσης που παρέμεινε στο ακρόβαθρο μετά την κατάρρευση. ΕΜΠ (2016).



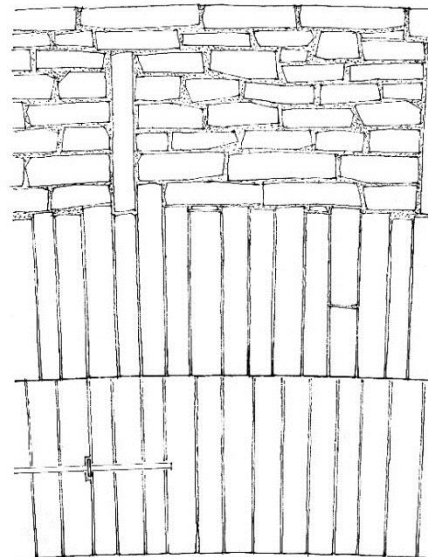
Εικόνα 13. Τα εμφανή σόκορα των τριών από τις τέσσερις ξύλινες ενισχύσεις του ανατλικού τόξου. ΕΜΠ (2016).

Δόμηση στο κατάστρωμα και τους αρκάδες

Η λιθοδομή του καταστρώματος της γέφυρας ακολουθεί τη λογική των τοπικών καλντεριμιών, με πέτρες μικρότερου πάχους τοποθετημένες «όρθιες», δηλαδή με τη μικρή πλευρά τους προς τα πάνω, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη σταθερότητα και συνοχή. Σε τακτά διαστήματα είναι τοποθετημένες οι ούγιες· όρθιες πέτρες που εξέχουν των υπολοίπων και βοηθούν το βήμα των ανθρώπων και των ζώων κατά τη διάβαση στα πιο απότομα τμήματα. Όπως είναι λογικό, οι ούγιες πληθαίνουν στο ανώτερο τμήμα του κεντρικού τόξου που η έντονη κλίση το καθιστούν δυσδιάβατο. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται και κονίαμα για ακόμα μεγαλύτερη σταθερότητα, αλλά και για τη σφράγιση των αρμών, προστατεύοντας το γεφύρι από τα όμβρια. Μια ελαφρά καμπούρα στο κέντρο εξασφαλίζει τη ροή των ομβρίων στα πλαϊνά της γέφυρας και από εκεί η καμπυλότητα του τόξου τα διοχετεύει έξω από τα ακρόβαθρα. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η αρχική κατασκευή δεν περιελάμβανε στηθαία, παρά μόνον αρκάδες, μεγάλες όρθιες πέτρες, που δημιουργούν ένα ασαφές προστατευτικό όριο. Οι αρκάδες σφηνώνονταν με κονίαμα ανάμεσα στο κατάστρωμα και ανά περιπτώσεις ανάμεσα στις άκρες των έξω θολιτών, για μεγαλύτερη σταθερότητα.



Εικόνα 15. Λεπτομέρεια εγκάρσιας τομής στο κεντρικό τόξο, όπου γίνεται εμφανής η δομή των θολιτών, του καταστρώματος και του στηθαίου. Σχέδιο Χ. Τάκου και Κ. Βάβουλα από την αρχιτεκτονική μελέτη τεκμηρίωσης της αναστήλωσης.



Εικόνα 16. Λεπτομέρεια όψης στο κεντρικό τόξο, όπου γίνεται εμφανής η δομή των θολιτών, του στηθαίου και των εγκιβωτισμένων αρκάδων. Σχέδιο Χ. Τάκου και Κ. Βάβουλα από την αρχιτεκτονική μελέτη τεκμηρίωσης της αναστήλωσης.

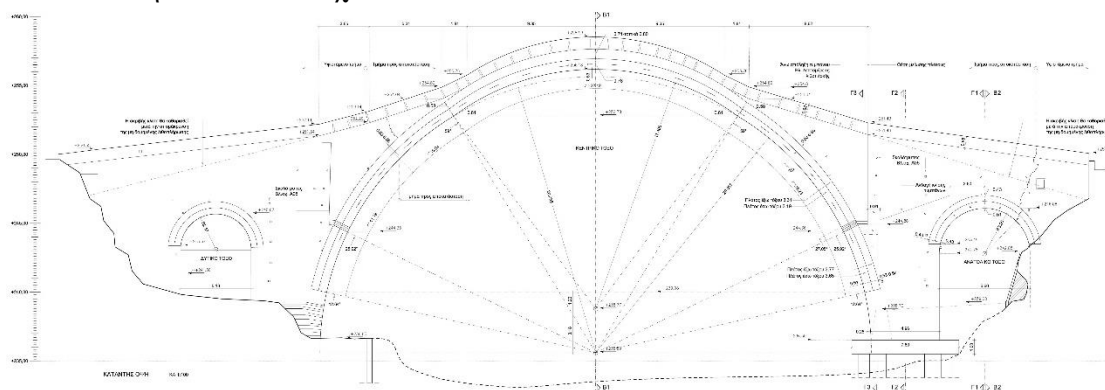
Δόμηση στις επεμβάσεις του 1928

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το 1928 διατέθηκαν κρατικά χρήματα για τη βελτίωση του γεφυριού που αφορούσαν ελλείψεις της αρχικής κατασκευής και έδωσαν στο γεφύρι τη μορφή με την οποία αποτυπώθηκε στη συλλογική μνήμη των τελευταίων γενεών. Η μεγαλύτερη επέμβαση αφορά την ανυψωση των βάθρων με τρόπο που να εξομαλύνει την κλίση της γέφυρας στα αρχικά τμήματα. Η δόμηση αυτής της επέμβασης δεν ακολούθησε την κατασκευαστική λογική των τυμπάνων ως συνέχειά τους, αντιμετωπίζοντας το σύνολο του βάθρου ως μία ενιαία δομή. Αντίθετα, οικοδομήθηκαν σε κάθε βάθρο δύο ανεξάρτητες τοιχοποιίες, μία σε κάθε όψη, ενώ το μέσον τους γεμίστηκε άτακτα με πέτρες και χώμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις εργασίες αποκατάστασης του 2019, φάνηκε ότι τοιχοποιίες αυτές ήταν δομημένες με προχειρότητα και απουσία κονιάματος. Επιπλέον, πιθανά την ίδια περίοδο κατασκευάστηκαν τα στηθαία, τα οποία οικοδομήθηκαν πατώντας στα νέα διαμορφωμένα επιπεδα των δύο βάθρων και κλείνουν από τις δύο πλευρές το γεφύρι, δημιουργώντας δύο τοίχους ασφαλείας. Στο μεγαλύτερο μήκος τους είναι δύο λθοδομές πάχους περίπου 30 εκ που κλείνουν στο πάνω μέρος με τα καπάκια, μεγαλύτερες πέτρες που ενοποιούν τον τοίχο και εμποδίζουν τη βροχή να εισέλθει εσωτερικά. Το ύψος τους είναι 60-70 εκ, λίγο ψηλότερο από τους αρκάδες, τους οποίους εγκιβωτίζουν στη δομή τους, αφήνοντας τους ορατούς πλέον μόνο στην όψη της γέφυρας. Το γεγονός ότι η δομή τους πατάει πάνω στην υπάρχουσα γέφυρα, χωρίς να εμπλέκονται, καθώς και το γεγονός ότι λειτουργούν σαν εξωτερικό όριο για τα όμβρια, έχει δημιουργήσει πολλές αστοχίες και βλάβες κατά καιρούς, που επισκευάζονταν συνήθως τοπικά, με τη χρήση τσιμέντου. Επίσης, την ίδια περίοδο πιθανολογείται ότι οικοδομήθηκε ο πτερυγότοιχος του δυτικού βάθρου, ο μοναδικός όλης της γέφυρας. Οι πτερυγότοιχοι αποτελούν κατασκευές που σχεδόν πάντα συνόδευαν τις βάσεις των βάθρων για την ενίσχυσή τους απέναντι στη ροή των ορμητικών ποταμών. Είναι πιθανό ότι και αυτή η κατασκευή είχε αρχικά σχεδιαστεί, αλλά δεν πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της μη ολοκλήρωσης το 1866 που περιγράψαμε νωρίτερα. Ο πτερυγότοιχος αυτός βρίσκεται στη βόρεια πλευρά, δηλαδή ανάντη του δυτικού βάθρου, προστατεύοντάς το από την υποσκαφή, αλλά και τις πιέσεις του ποταμιού κατά τη διάρκεια πλημμύρας. Το ύψος του φτάνει τα 4,5 μ, έχει κλίση προς τα μέσα και λειτουργεί ως τοίχος αντιστήριξης για το πρανές που βρίσκεται από πίσω του. Η κατασκευή του πτερυγότοιχου επέφερε αναγκαστικά τη συμπλήρωση του βάθρου κάτω από το δυτικό ανακουφιστικό τόξο σε ύψος λίγο ψηλότερα από τον τοίχο, ώστε να επιχωματωθεί το ενδιάμεσο διάστημα και να δημιουργηθεί το πρανές. Δεν υπάρχουν στοιχεία για τη δόμηση στο εσωτερικό αυτού του συμπληρωματικού τμήματος, αν και μοιάζει συμπαγής. Ωστόσο, το γεγονός ότι καταναλώθηκε μεγάλη ποσότητα ενέματος κατά τις εργασίες αναστήλωσης και αποκατάστασης του 2019, υποδηλώνει την πιθανή προβληματική δομή του. Τέλος, μία άκομα επέμβαση που πιθανολογείται ότι συνέβη την ίδια περίοδο είναι ο αναλημματικός τοίχος στο ανατολικό ακρόβαθρο. Ο τοίχος αυτός, είναι δομημένος κάτω από την ανατολική έδραση του ανατολικού τόξου, συγκρατώντας το θεμέλιο του ανατολικού ακροβάθρου. Είναι και αυτός επικλινής και δομημένος με κονίαμα, όπως και ο πτερυγότοιχος, αφήνοντας κάποιες οπές για την απορροή του νερού.

Δόμηση στις επεμβάσεις του 2019-2020

Κατά τη διάρκεια του έργου «Στερέωση, Αποκατάσταση, Αναστήλωση, Ανάδειξη Γέφυρας Αράχθου στην Πλάκα», το γεφύρι της Πλάκας αποκαταστάθηκε στην αρχική του μορφή και ενισχύθηκε απέναντι στη ροή του ποταμού. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αρχιτεκτονική της γέφυρας επαναλήφθηκε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πιστότητα, τηρουμένων των αναλογιών στις σύγχρονες συνθήκες, με αποτέλεσμα μία κατασκευή που δεν ομοιάζει μόνο οπτικά τη γεωμετρία και τη σύνθεσή της, αλλά και στη δομική της τεχνολογία. Με αυτό το στόχο, η κατασκευή αυτή έθεσε προκλήσεις σχεδόν άγνωστες για τους σύγχρονους μηχανικούς, αφού όλα τα υλικά και οι τεχνικές έπρεπε να μιμούνται -ή να είναι συμβατές με- εκείνες του 1866. Βέβαια, η χρήση σύγχρονων μέσων μεταφοράς υλικών και υποστήριξης της

κατασκευαστικής διαδικασίας συνολικά διευκόλυνε σημαντικά το έργο και μείωσε την επικινδυνότητά του στο ελάχιστο.



Εικόνα 17. Κατάντης όψη. Κατασκευαστικό σχέδιο του Χ. Τάκου από την αρχιτεκτονική μελέτη τεκμηρίωσης της αναστήλωσης.

2.3.4 Υλικά

Λίθοι

Όπως κάθε μνημείο που έχει δεχτεί διάφορες επεμβάσεις στο πέρασμα του χρόνου, οι οποίες εμφανίζονται και στα διαφορετικά υλικά κατασκευής του, έτσι και οι λίθοι του Γεφυριού της Πλάκας διαφοροποιούνται, έστω και ελαφρώς, στις διαφορετικές κατασκευαστικές του φάσεις.

Λίθοι του 1866

Οι πέτρες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του γεφυριού προέρχονται από αρκετά κοντινή περιοχή, με πιο πιθανό σημείο εξόρυξης στο Ραφτανίτικο παραπόταμο του Αράχθου. Δεδομένου ότι η πέτρα της περιοχής είχε δοκιμαστεί επανηλειμμένα στην ανθεκτικότητά της, δεν αποτελούσε ερώτημα η χρήση της, αλλά το πλησιέστερο και ευνοϊκότερο σημείο προμήθειάς της, ώστε να μειωθούν τα δρομολόγια μεταφοράς της, που γίνονταν κυρίως με μουλάρια. Ο καθηγητής Μ. Κορρές υπολόγισε περίπου 20.000 φορτία ημίονου¹¹ για τους δομικούς λίθους που απαιτήθηκαν.

Ο βασικός δομικός λίθος ορυκτολογικά είναι ασβεστιτικός ψαμμίτης, γκρι χρώματος, προερχόμενος από φλύσχη της Ιονίας ζώνης. Αποτελεί ένα ιζηματογενές πέτρωμα κλαστικής προέλευσης (προέρχεται από διαγένεση άμμου). Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που διακρίνονται είναι: χαλαζίας, άστριοι (κυρίως πλαγιόκλαστα) και ασβεστίτης.¹²

Επίσης, η σχιστότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των λίθων αυτών, κάτι που προφανώς επηρέασε τη μορφολογία του γεφυριού, η οποία είναι δομημένη με ένα σύστημα που προσομοιάζει το ψευδοϊσόδομο. Επιπλέον, το πάχος των λίθων από το συγκεκριμένο σημείο εξόρυξης φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ 5 έως 30 εκ, με πιο συνήθη μεγέθη εκείνα μεταξύ



Εικόνα 18. Δείγμα του ιστορικού λίθου δόμησης του γεφυριού. ΕΜΠ (2016).

¹¹ Ο.π. ΕΜΠ. σελ. 29

¹² Ο.π. ΕΜΠ. σελ. 257

8-12 εκ, όπως γίνεται εμφανές από το κεντρικό τόξο. Οι πιο μεγάλοι λίθοι, λιγότεροι σε ποσότητα, αλλά και δυσκολότεροι κατά τη μεταφορά, επιλέχθηκαν για την κατασκευή της βάσης του τόξου και των βάθρων.

Ένα ακόμα είδος λίθου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του γεφυριού είναι ο πορόλιθος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Η χρήση του έγινε εσωτερικά των τυμπάνων στις περιοχές που το τόξο παραλαμβάνει φορτία από την υπόλοιπη λιθοδομή. Η πορώδης σύσταση των λίθων αυτών συνέβαλε καθοριστικά στην ελάφρυνση αυτού του φορτίου, γεγονός που εξηγεί την επιλογή τους.



Εικόνα 19. Δείγμα από τον πορόλιθο που βρέθηκε στο εσωτερικό του γεφυριού. ΕΜΠ (2016).

Ορυκτολογικά, πρόκειται για ασβεστιτική μάργα, υπόλευκου χρώματος, ομοιογενή και εύθρυπτη, με χαρακτηριστικό πορώδες. Το μέγεθος των πόρων φτάνει έως και το 1 cm. Πρωτεύουσες ορυκτολογικές φάσεις αποτελούν ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας, ενώ δευτερεύουσες οι εξής: Ιλλίτης/ Μοσχοβίτης, Χλωρίτης, Μοντμοριλλονίτης, Άστριοι¹³.

Λίθοι του 1928

Κατά τη διάρκεια της αναστήλωσης του γεφυριού το 2019 αφαιρέθηκαν σύμφωνα με τη μελέτη οι εσωτερικές επιχωματώσεις ανάμεσα στους ανυψωμένους τοίχους των δύο βαθρών, εκατέρωθεν του κεντρικού τόξου, που είχαν πραγματοποιηθεί στην επέμβαση του 1928. Αφαιρώντας το υλικό αυτό, εμφανίστηκε η εσωτερική δομή των τοίχων και στάθηκε δυνατή η μακροσκοπική παρατήρησή τους, αφού εξωτερικά δεν το επέτρεπαν εύκολα οι αλληπάλληλες αρμολογήσεις και η φθορά των περιβαλλοντικών συνθηκών περίπου ενός αιώνα. Έγινε, λοιπόν, αντιληπτό ότι οι λίθοι της ανωδομής του 1929 της δυτικής πλευράς ήταν διαφορετικοί από εκείνους της ανατολικής, αλλά επίσης διαφορετικοί με τους λίθους του 1866. Πιο συγκεκριμένα, στην ανατολική πλευρά, οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρίως ποταμίσιοι αποστρογγυλεμένοι, ενώ της δυτικής πλευράς έμοιαζαν αρκετά με τους λίθους που υπάρχουν στη δυτική πλαγιά του γεφυριού, στη πλευρά του μονολιθίου· σκουρόχρωμοι ογκώδεις και γωνιώδεις, τραπεζοειδούς σχήματος, χωρίς την παραλληλία που παρουσίαζαν οι λίθοι του 1866. Μάλιστα, οι λίθοι της δυτικής πλευράς φάνηκαν ιδιαίτερα διαβρωμένοι και εύθρυπτοι. Φαίνεται ότι η επέμβαση αυτή έγινε πρόχειρα, χρησιμοποιώντας τις κοντινότερες πηγές δομικού υλικού, δηλαδή το ποτάμι από τη μία και τη διπλανή πλαγιά από την άλλη, χωρίς να ενδιαφέρει ούτε η συνεκτική δόμηση ούτε η ποιότητα του υλικού. Αυτό, φυσικά, γίνεται σαφές και από την έλλειψη κονιάματος στην εσωτερική όψη των λιθοδομών και φυσικά τις εσωτερικές επιχώσεις με χώμα και πέτρες.

Λίθοι του 2019

Κατά τη διάρκεια της αναστήλωσης του 2019, ο δομικός λίθος που χρησιμοποιήθηκε σε αντικατάσταση του ιστορικού, προμηθεύτηκε από ενεργό λατομείο στην περιοχή της Δαφνούλας του νομού Ιωαννίνων, 50 χλμ μακριά από το Γεφύρι της Πλάκας. Ο λίθος αυτός ομοιάζει σημαντικά με τον αυθεντικό, τόσο στα εξωτερικά χαρακτηριστικά όσο και στην ορυκτολογική σύσταση, τη μικροδομή και τις αντοχές. Παρόλα αυτά, παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις, οι οποίες κατά κύριο λόγο αφορούν σε μειονεκτήματα του νέου λίθου. Πιο συγκεκριμένα, ο λίθος της Δαφνούλας παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό ανισοτροπίας, 8% μεγαλύτερη διάδοση υπερήχων, 16% μικρότερη θλιπτική αντοχή, μεγαλύτερο πορώδες και

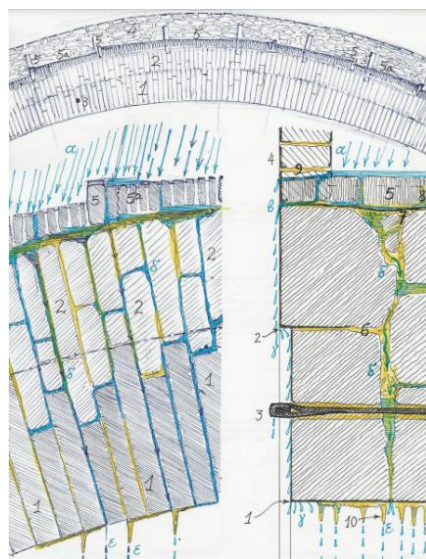
¹³ Ο.π. ΕΜΠ. σελ. 242

μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων, συγκριτικά με τον αυθεντικό λίθο. Επίσης, υπάρχει μια χρωματική διαφοροποίηση της τάξης του 5.50-6.00 του χρωματικού μοντέλου CIElab. Παρόλα αυτά, οι παραπάνω διαφορές θεωρήθηκαν εντός του πλαισίου συμβατότητας με την ιστορική κατασκευή¹⁴ και έγιναν αποδεκτές τόσο από την επιτροπή του ΕΜΠ, όσο και από τον κύριο του έργου.

Τέλος, ο πωρόλιθος που χρησιμοποιήθηκε συλλέχτηκε από σχετικές αποθέσεις του πετρώματος σε δύο περιοχές των κεντρικών Τζουμέρκων, κοντά στα χωριά Μηλιά και Άνω Γραικικό.

Κονιάματα

Το κονίαμα της αρχικής κατασκευής του ιστορικού γεφυριού μοιάζει να ήταν ένα, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στα διάφορα σημεία της κατασκευής, σύμφωνα με τις έως τώρα μελέτες. Σε γενικές γραμμές, πρόκειται για ένα κονίαμα δόμησης με βάση τον ασβέστη, η περίσσεια του οποίου απλωνόταν στην εξωτερική επιφάνεια των αρμών, καλύπτοντας επαρκώς τα κενά μεταξύ των λίθων. Στην πορεία, η γέφυρα δέχτηκε ποικίλες επεμβάσεις, με πιο συχνή εκείνη της αρμολόγησης σε τυχόν αστοχίες και βλάβες που προέκυπταν κατά καιρούς, χρησιμοποιώντας κάθε φορά συνήθως την πιο κοινή τεχνολογία της εποχής. Μία σημαντική μακροσκοπική παρατήρηση αφορά στη φθορά του ασβεστικτικού κονιάματος που είχε επέλθει λόγω της υγρασίας, διαπερνώντας τη λιθοδομή μέσα από τους πόρους του κονιάματος και παρασύροντας τα συστατικά της κονιάς στις κάτω και στις παλιές εξωτερικές επιφάνειες, ανάλογα με το που έβρισκε δίοδο το νερό. Η διαρκής αυτή φθορά αποδεικνύεται και από τους σταλακτίτες ανθρακικού ασβεστίου που είχαν σχηματιστεί στο εσωράχιο του κεντρικού και των ανακουφιστικών τόξων, αποτελέσα των ανακρυστάλλωσεων των ασβεστιτικών ενώσεων. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την κατάρρευση της γέφυρας, παρέμειναν συγκολλημένα αρκετά μεγάλα λιθωσώματα, επιβιώνοντας της σημαντικής αυτής πτώσης, ενώ το δυτικό βάθρο και το ανατολικό ακρόβαθρο παρέμειναν ακέραια για μεγάλο διάστημα χωρίς στηρίξεις, παρόλο που μεγάλο μέρος της λιθοδομής τους βρισκόταν εν προβόλω. Αυτό αποδεικνύει ότι, παρόλες τις φθορές, το μεγαλύτερο ποσοστό του κονιάματος διατηρούσε η δομή και τη συνοχή του, λειτουργώντας ιδιαίτερα βοηθητικά στη στατικότητα του γεφυριού. Εξάλλου, το ίδιο διαπιστώθηκε και κατά τη διάσπαση των κομματιών ώστε να μεταφερθούν πιο εύκολα από το ποτάμι στην όχθη, αλλά και τις επιτόπιες παρατηρήσεις των θραυσμάτων από τη διεπιστημονική ομάδα του ΕΜΠ.



Εικόνα 20. Η διαρκής διάβρωση του κονιάματος από τις βροχοπτώσεις. Σχέδιο του Μ. Κορρέ. ΕΜΠ (2016).

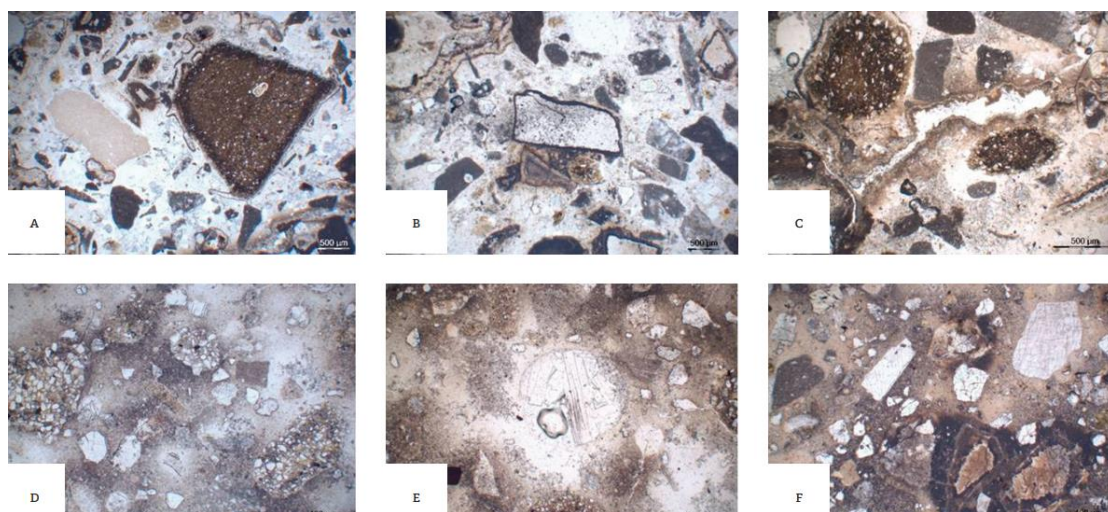
¹⁴ Νικολαΐδης, Ι. (2019). Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο, σελ. 152

Κονίαμα του 1866

Η μελέτη των κονιαμάτων που πραγματοποιήθηκε το 2015, αμέσως μετά την κατάρρευση του γεφυριού με επιστημονική υπεύθυνο την κα Μοροπούλου, συμπεραίνει πως το ιστορικό κονίαμα παρουσιάζει έντονο υδραυλικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα συμπεράσματα, το κονίαμα έχει παρασκευαστεί από υδράσβεστο και ποζολάνη, με μέση τιμή αναλογίας συνδετικής ύλης/αδρανών 1:2 ή και χαμηλότερα. Λόγω της ύπαρξης συσσωματωμάτων ασβέστη, αλλά και του υψηλού ποσοστού χημικά δεσμευμένου νερού, θεωρήθηκε ότι η τεχνολογία παρασκευής ήταν η επί τόπου σβέση και ανάμιξη της ασβέστου με τα αδρανή, τα οποία είναι κυρίως πυριτικής φύσης, προερχόμενα από το ποτάμι. Τέλος, τόσο η συνεχής έκθεση των κονιαμάτων στα καιρικά φαινόμενα όσο και η έντονη παρουσία φυσικής υγρασίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα κονιάματα αυτά ως επιδεκτικά στη φθορά έχουν υποστεί απομείωση των μηχανικών τους αντοχών με την πάροδο του χρόνου¹⁵. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν και εμπλουτίστηκαν με τη μεταπτυχιακή εργασία του Ι. Γρυλλάκη¹⁶ και τη διδακτορική διατριβή της Μ. Αποστολοπούλου¹⁷.



Εικόνα 21. Συμπαγής στρώση κονιαματος ανάμεσα στους θολίτες ενός θραύσματος του κεντρικού τόξου.



Εικόνα 22. Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου σε λεπτές τομές των κονιαμάτων. ΕΜΠ (2016).

Πέραν της επιστημονικής μελέτης, αξίζει να αναφερθεί η έντονη λαϊκή φημολογία περί χρήσης 10.000 αυγών στο αυθεντικό κονίαμα, η οποία δε στάθηκε δυνατό να εξεταστεί έως τώρα. Η χρήση οργανικών υλικών είναι γνωστή στην ιστορία των κονιαμάτων ως πρόσθετα της κονίας και των αδρανών και μάλιστα η ποικιλία τους ανάλογα με την περιοχή και τον τοπικό πολιτισμό είναι εντυπωσιακή. Η χρήση του αυγού σε κονιάματα, και ειδικότερα του ασπραδιού, τεκμηριώνεται ιστορικά σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως, χωρίς ωστόσο να έχουν γίνει

¹⁵ Ο.π. ΕΜΠ, σελ. 248

¹⁶ Γρυλλάκης Ι. (2019). «Γεφύρι της Πλάκας: Χαρακτηρισμός και Διάγνωση Φθοράς Ιστορικών Κονιαμάτων – Σχεδιασμός και Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης»

¹⁷ Αποστολοπούλου Μ. (2020). «Μεθοδολογία Σχεδιασμού Συμβατών και Επιτελεστικών Κονιαμάτων Αποκατάστασης για την Αντισεισμική Προστασία Μνημείων και Ιστορικών Κατασκευών».

σαφείς οι λόγοι και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει. Στην περίπτωση του Γεφυριού της Πλάκας, το κονιάμα που απαιτήθηκε για την κατασκευή του γεφυριού εικάζεται πως ήταν 300-400 τόνοι, ενώ τα 10.000 αυγά ισοδυναμούν περίπου με 300-350 κιλά ασπράδιου¹⁸. Στην περίπτωση που τα αυγά χρησιμοποιούνταν για το σύνολο του κονιάματος, τότε θα καταλάμβαναν περίπου το 0,1% του αρχικού κονιάματος, ένα ποσοστό στο οποίο δε θα μπορούσαν λογικά να ασκήσουν κάποια βελτιωτική επίδραση. Εάν ωστόσο, η πιθανή χρήση τους περιορίστηκε στο πιο νευραλγικό κομμάτι της κατασκευής, δηλαδή το κεντρικό τόξο, τότε το ασπράδι θα καταλάμβανε το 0,8-1,3% του κονιάματος, εφόσον το κονιάμα που απαιτήθηκε για την κατασκευή του υπολογίζεται σε 26-35 τόνους¹⁹. Η ποσότητα αυτή είναι στο πλαίσιο των συνηθισμένων τιμών για οργανικά πρόσθετα και άρα θα μπορούσε να είναι βάσιμη η αναφορά. Παρόλα αυτά, η τιμή του ασπράδιου σε ποσοστό λιγότερο από 2% στο κονιάμα καθιστά σχεδόν αδύνατη την ανίχνευσή του από τις συνήθεις μεθόδους²⁰.

Κονιάματα και ενέματα 1928-2008

Τα κονιάματα των μεταγενέστερων επεμβάσεων αν και δεν έχουν μελετηθεί συνολικά από τις έως τώρα εργασίες, κάποια εξ' αυτών έχουν εξεταστεί μεμονωμένα και μπορούν να προκύψουν κάποια συμπεράσματα, σε συνδυασμό τη μακροσκοπική παρατήρηση. Για το κονιάμα που είχε χρησιμοποιηθεί το 1929 δεν μπορεί να ειπωθεί κάτι με βεβαιότητα, αφού οι μετέπειτα αρμολογήσεις έχουν πιθανώς αλλοιώσει το χαρακτήρα τους, ενώ δεν έχει γίνει προσπάθεια δειγματοληψίας από εσωτερικό αρμό εκείνης της κατασκευαστικής φάσης. Η σκυροδέτηση του τμήματος του τόξου που είχε υποστεί βλάβη το 1943, υποδεικνύει ότι από πολύ νωρίς ξεκίνησε στην περιοχή και η χρήση του τσιμέντου, συμπεριλαμβάνοντάς το πιθανότατα στα κονιάματα επεμβάσεων που ακολούθησαν, με κυριότερες φάσεις του 1972 και 2008. Η εμφανής χρήση του τσιμέντου έχει γίνει σε κονιάματα των στηθαίων, σε γεμίσματα κενών, όπως στις σκαλότρυπες, στη σκυροδέτηση του υποβάθρου του δυτικού καταστρώματος²¹, ενώ το περιεχόμενο του ενέματος του 2008 έχει τεκμηριωθεί ήδη ως τσιμεντιτικό²². Στη συνέχεια της εργασίας, επίσης, θα παρουσιαστούν επιπλέον δείγματα από μεταγενέστερες του 1866 επεμβάσεις, τα οποία συμπληρώνουν την παραπάνω τεκμηρίωση.

Κονιάμα και ένεμα του 2019

Για την αναστήλωση του γεφυριού το 2019, το εγκεκριμένο κονιάμα δόμησης είχε την παρακάτω σύνθεση: Αναλογία κονιάς προς αδρανή 30:70 κατά βάρος, με χρήση των παρακάτω υλικών (κατά βάρος στο σύνολο των ξηρών υλικών): 27% υδραυλική άσβεστο NHL 5, 3% φυσική ποζολάνη και 70% χαλαζιακή άμμο. Το νερό αποτελεί το 18% της συνολικής σύνθεσης, με λόγο νερού/κονιάς 0,6.

Επίσης, η εγκεκριμένη σύνθεση για τα ενέματα που πραγματοποιήθηκαν είναι η εξής: 90% υδραυλική άσβεστος NHL 5, 10% φυσική ποζολάνη, 80% νερό επί του ξηρού μίγματος και 1% ρευστοποιητής.

¹⁸ Ένα μέσο ασπράδι ζυγίζει 30-35 γραμμάρια.

¹⁹ Υπολογίστηκαν 237 κ.μ. λιθοδομής τόξου. Το κονιάμα υπολογίστηκε ως ένα ποσοστό 7-10% αυτής της λιθοδομής. Τιμή φαινόμενης πυκνότητα κονιάματος θεωρήθηκε το 1,3 (μέσος όρος από τις υπάρχουσες μετρήσεις του ΕΜΠ). Τέλος, στους υπολογισμούς συμπεριλήφθηκε ένα ποσοστό 20-25% ως συρρίνωση του αρχικού κονιάματος.

²⁰ Shi Qiang Fanga, Hui Zhang, Bing Jian Zhanga, Ye Zhenga. (2013) «The identification of organic additives in traditional lime mortar». Στο παραπάνω άρθρο φαίνεται πως η ανίχνευση της αλμπουμίνης με το αντιδραστήριο του Bradford δεν είναι δυνατή για ποσοστό ασπράδιου κάτω από 1,6% στο κονιάμα.

²¹ Κατά τις αναστηλωτικές εργασίες του 2019 το σκυρόδεμα αυτό αφαιρέθηκε.

²² Ο.π. Γρυλλάκης, σελ.117

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Βασικές αρχές μεθόδων Χαρακτηρισμού και διάγνωσης Φθοράς

3.1.1 Ψηφιακή Μικροσκοπία (DM)

Η μέθοδος της ψηφιακής μικροσκοπίας (DM) αποτελεί μη καταστρεπτική, φορητή τεχνική, μικροσκοπικού ελέγχου των υλικών χωρίς να απαιτείται προηγουμένως επεξεργασία των υπό εξέταση επιφανειών. Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στη μετάδοση σημάτων φωτός, αντί ηλεκτρικού ρεύματος, μέσω οπτικών ινών, αντί για μεταλλικούς αγωγούς, οι οποίες βρίσκονται συζευγμένες σε κατάλληλη διάταξη. Στο ένα άκρο της ζεύξης ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικούς παλμούς οι οποίοι μεταδίδονται μέσω διαδοχικών ανακλάσεων παγιδευμένοι εντός οπτικών ινών. Στο άλλο άκρο της ζεύξης οι οπτικοί παλμοί μετατρέπονται εκ νέου σε ηλεκτρικό σήμα ¹.

Είναι κατάλληλη για την εξέταση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των επιφανειών, όπως υφή και μορφές φθοράς (εξανθήσεις, κρούστες κλπ). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ταξινόμηση των διαφόρων λιθότυπων, κονιαμάτων και άλλων υλικών που απαντώνται σε ένα μνημείο, την κατάσταση διατήρησης, την αναγνώριση διαφόρων μορφών βιοδιάβρωσης κ.α. Η τεχνική βοηθά και στην επιλογή των κατάλληλων σημείων δειγματοληψίας και στην εκτίμηση της συμβατότητας μιας επέμβασης.

Οι εικόνες της μικροσκοπίας οπτικών ινών έχουν υψηλή ανάλυση και μεγέθυνση έως και X600, ενώ αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή για περαιτέρω επεξεργασία. Η λήψη εικόνων κατά τη διάρκεια του εργαστηριακού ελέγχου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μικροσκοπίου i_scope moritex και των φακών μεγεθύνσεων X30, X50, X120.

3.1.2 Φυσικός διαχωρισμός κονία-αδρανών/Κοκκομετρική Ανάλυση

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

Η κοκκομετρική ανάλυση έγινε σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο Determination of Particle size distribution (by sieve analysis): EN 1015-1:1999. Με τη συγκεκριμένη δοκιμή γίνεται η κατανομή ενός υλικού σε κλάσματα μεγέθους μέσω της διέλευσης του από κόσκινα με μειούμενη διάμετρο, στη συνέχεια ζυγίζεται η ποσότητα του υλικού σε κάθε κόσκινο και με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή μεγέθους σωματιδίων (ταξινόμηση) στο κάθε δείγμα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής απεικονίζονται σε λογαριθμική κλίμακα για την παραγωγή ενός διαγράμματος κατανομής. Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο κόσκινο με μεγαλύτερη οπή το οποίο ανάλογα με το είδος του δείγματος, διέρχεται όλη η ποσότητα. Στη συνέχεια, με οριζόντιες και κάθετες κινήσεις με σκληρό πινέλο, που περιοδικά συνοδεύονται με προσεκτικές ανακινήσεις του δείγματος, γίνεται το κοσκίνισμα του υλικού.

¹ Μοροπούλου Α. (2012). Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών, ΕΜΠ, Αθήνα.

Το υλικό που διέρχεται από κάθε κόσκινο συλλέγεται σε κατάλληλους πλατύστομους συλλέκτες. Το κοσκίνισμα θεωρείται ότι έληξε όταν τοποθετώντας ένα άσπρο χαρτί κάτω από το κόσκινο διαπιστώνεται ότι δεν διέρχεται άλλο υλικό. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν (ISO 565) είχαν άνοιγμα οπών 8mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0.5mm, 0.25mm, 0.125mm και 0.063mm.

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

*Διερχόμενο % στο κόσκινο i = διερχόμενο στο κόσκινο i / αρχικό βάρος δείγματος * 100*

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

Η κοκκομετρική ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων αποτελεί εν γένει βασική μέθοδο για τον προσδιορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών όπως ο υπολογισμός της αναλογίας κονιάς/αδρανών, το εύρος των μεγεθών των αδρανών, την κατανομή του μεγέθους των αδρανών για το εύρος αυτό. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού μίγματος καθώς σχετίζεται άμεσα με την συνολική επιφάνεια των κόκκων αλλά και με το ποσοστό των κενών που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών, ενώ έχει συσχετιστεί με διάφορα θεωρητικά μοντέλα σχετικά με επίτευξη μέγιστης πυκνότητας στοιβαξης, άρα την επίτευξη συνεκτικού κονιάματος.

Οποιαδήποτε κι αν είναι η αναλογία των αδρανών σε ένα μίγμα, σε μια ιδανική κοκκομετρική καμπύλη θα είχαμε συνεχή κοκκοδιαβάθμιση, η οποία οδηγεί σε σχετικά ομαλή, σιγμοειδή κοκκομετρική καμπύλη. Δεν θα είχαμε, δηλαδή, σημαντική απώλεια κάποιων κλασμάτων συγκεκριμένου μεγέθους, ώστε το κονίαμα να χαρακτηρίζεται από την λεγόμενη ασυνεχή κοκκομετρική καμπύλη. Πρακτικά, όμως, είναι γεγονός ότι δεν υπάρχει ιδανική κοκκομετρία, δεδομένου ότι τα αδρανή προέρχονται από φυσικές πηγές και αποθέσεις, όπου δεν ισχύουν οι ιδανικές συνθήκες. Επιπλέον, τελείως ομαλές κοκκομετρικές καμπύλες σπάνια επιτυγχάνονται.

3.1.3 Πετρογραφική Ανάλυση

Για την πετρογραφική ανάλυση ενός πετρώματος ή ενός κονιάματος, αρχικά πραγματοποιείται μία λεπτή τομή του δείγματος. Συνήθως, ακολουθεί εμποτισμός με εποξική ρητίνη σε κενό αέρος ώστε να αφαιρεθεί ο αέρας από τους πόρους του δείγματος και να εισχωρήσει καλύτερα η ρητίνη. Η λεπτή τομή επικολλάται με ρητίνη σε αντικειμενοφόρο πλάκα και λειαίνεται ώστε το πάχος της λεπτής τομής να μην ξεπερνά τα 30μm. Στη συνέχεια, το δείγμα εξετάζεται με τη βοήθεια πολωτικού μικροσκοπίου. Το πολωτικό μικροσκόπιο διαφέρει από τα οπτικά, γιατί διαθέτει δύο επιπλέον φίλτρα πόλωσης. Το δείγμα τοποθετείται πάνω στην τράπεζα του μικροσκοπίου, ανάμεσα στα δύο φίλτρα. Το κατώτερο φίλτρο είναι σταθερό και ονομάζεται πολωτής, το ανώτερο είναι μετακινούμενο και ονομάζεται αναλυτής. Το φως είναι φυσικό όταν περνά από τον πολωτή αλλά όχι από τον αναλυτή (παράλληλα Nicols) και γίνεται πολωμένο όταν περνά και από τα δύο φίλτρα (κάθετα Nicols). Τα ορυκτά και τα πετρώματα παρουσιάζουν

διαφορετικές οπτικές ιδιότητες στα δύο είδη φωτός, γεγονός που επιτρέπει την ταυτοποίησή τους. Οι μεγεθύνσεις που χρησιμοποιούνται στην πετρογραφική ανάλυση κυμαίνονται από x50 έως x500 φορές.

3.1.4 Ορυκτολογική Ανάλυση με Περίθλαση Ακτίνων X (XRD)

Με τη συγκεκριμένη τεχνική διεξήχθη η ποιοτική ορυκτολογική ανάλυση των κονιαμάτων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των κρυσταλλικών ενώσεων του δείγματος και την ταυτοποίηση των διαφόρων κρυσταλλικών δομών ουσιών ίδιας χημικής σύστασης, και συμπληρώνει την στοιχειακή ανάλυση.

Με τη μέθοδο του περιθλασιμέτρου ακτίνων X είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν πάνω στα πλεγματικά επίπεδα των κρυστάλλων των διαφόρων ορυκτών. Το περιθλασίμετρο δηλαδή, καταγράφει υπό μορφή ακτινογραφήματος την ένταση των ανακλώμενων ακτίνων για κάθε συγκεκριμένη γωνία και για ορισμένο φάσμα γωνιών. Η μέθοδος επιτρέπει την ταυτοποίηση κρυστα

Βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων X, γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων και στον προσδιορισμό των διαστημάτων d των κρυσταλλικών επιπέδων, μέσω του προσδιορισμού της περιθλώμενης γωνίας θ της ακτινοβολίας X, σύμφωνα με το νόμο του Bragg: $n\lambda = 2d\eta\mu\theta$, όπου: $n=1,2,3\dots$, λ : μήκος κύματος, θ : γωνία ανάκλασης, d : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου.

Μέσω του προσδιορισμού των κρυσταλλικών επιπέδων d που είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση γίνεται η ποιοτική ανάλυση της εξεταζόμενης ουσίας, ενώ από τη μέτρηση της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε μία επιλεγμένη γωνία θ γίνεται η ποσοτική ανάλυση μίας κρυσταλλικής ένωσης σε ένα δείγμα, όταν η συγκέντρωση δεν είναι πολύ χαμηλή².

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη περίθλασης Diffraktometer D-5000 της Siemens το οποίο συνδέεται με μονάδα ηλεκτρονικού υπολογιστή, με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η όλη διαδικασία καταγραφής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων

3.1.5 Διαφορική Θερμική και Θερμοβαρμετρική Ανάλυση (DTA/TG)

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών του δείγματος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αναγνώριση διαφόρων συστατικών των κονιαμάτων και των πιθανών υδραυλικών ιδιοτήτων τους καθώς και για την αποτίμηση των θερμικών μετασχηματισμών που συσχετίζονται με την ελεγχόμενη θέρμανσή τους. Η μέθοδος αποκαλύπτει θερμικούς μετασχηματισμούς όπως αφυδάτωση, αφυδροξυλίωση, οξειδωση και αποσύνθεση. Επιπλέον μπορούν να παρατηρηθούν κρυσταλλικές μεταπτώσεις, οι οποίες είναι είτε εξώθερμες είτε ενδόθερμες³.

² Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (1995). Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *thermochimica acta*, 269, 779-795.

³ Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (2000), Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*,1(1), 45-58.

Σε συνδυασμό με τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG) παρακολουθείται η απώλεια βάρους στο δείγμα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Ο προσδιορισμός γίνεται μέσω της καταγραφής της απώλειας μάζας (TG) και των ενδόθερμων και εξώθερμων φαινομένων (DTA) που λαμβάνουν χώρα στο δείγμα, όταν υπόκειται σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν πρόκειται για κονίαμα, αφού μέσω αυτών μπορούμε να διαπιστώσουμε τα επίπεδα υδραυλικότητας και τη χημική σύσταση αυτών. Η βασική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν ένας θερμοζυγός ακριβείας, τύπου TGA 6.

3.1.6 Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

Τα φασματοφωτόμετρα υπερύθρου χρησιμοποιούν, συνήθως, την περιοχή του φάσματος με μήκος κύματος από 2 μέχρι 50 μm , που αντιστοιχεί στους κυματάριθμους 4000-200 cm^{-1} . Μαζί με τη φασματοσκοπία RAMAN συνιστούν την δονητική φασματοσκοπία και οι δύο μέθοδοι αλληλοσυμπληρώνονται ⁴.

Η υπέρυθη φασματοσκοπία βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια μίας ένωσης, τα οποία διεγείρονται σε υψηλότερες στάθμες δόνησης ή περιστροφής. Ενεργά υπέρυθρες ενώσεις είναι μόνον αυτές στις οποίες οι δονήσεις και οι περιστροφές των ατόμων τους έχουν μία διαρκή διπολική ροπή. Η περιοδική αλλαγή της διπολικής ροπής λόγω περιστροφής ή δόνησης επιτυγχάνεται μόνο με ορισμένες συχνότητες. Απορρόφηση συμβαίνει όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα του διπόλου.

Γενικά το φάσμα απορρόφησης υπερύθρου αποτελεί μία θεμελιώδη ιδιότητα κάθε μορίου και χρησιμεύει κυρίως στην ποιοτική ανάλυση, για τη διαλεύκανση της δομής μίας ένωσης, δηλαδή για τη φύση των ατόμων που βρίσκονται στο μόριο και τη διάταξή τους στο χώρο, δίνοντας το δακτυλικό αποτύπωμα μίας ουσίας. Από την άλλη πλευρά επειδή το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας είναι συνάρτηση του αριθμού των υπαρχόντων μορίων, προκύπτουν από το IR φάσμα και πληροφορίες και ως προς τη συγκέντρωση ενός συστατικού σε ένα δείγμα

Στον τομέα εξέτασης υλικών αρχαιολογικής και αισθητικής αξίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού μπορεί να εντοπίσει, ακόμα και σε μικρές ποσότητες, ανόργανες κι οργανικές ενώσεις που μπορεί να προέρχονται από το αυθεντικό υλικό, τα προϊόντα φθοράς και τυχόν προηγούμενες επεμβάσεις. Ακόμη, μπορεί να γίνει ημι-ποσοτικός προσδιορισμός των ενώσεων. Στο πλαίσιο της εργασίας, γινόταν ομογενοποίηση των δειγμάτων με KBr, ώστε να σχηματισθούν δισκία, μετά από ζύγιση, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των εντάσεων των κορυφών. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο Excalibur series Bio_Rad.

3.1.7 Δοκιμές εμβάπτισης – Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό

Η δοκιμή αυτή μετρά το ρυθμό και τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης του νερού. Η συνολική ποσότητα απορροφούμενου νερού σχετίζεται με το συνολικό ανοικτό πορώδες, ενώ η κινητική της διαδικασίας εξαρτάται κυρίως από την κατανομή των μεγεθών των πόρων⁵. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται από ένα υλικό βυθισμένο σε απιονισμένο νερό σε πίεση και θερμοκρασία δωματίου, σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα (δηλ. ρυθμό απορρόφησης ύδατος), εκφράζεται ως ποσοστό της ξηράς μάζας του δείγματος. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

⁴ Derrick, M. R., Stulik, D., & Landry, J. M. (2000). Infrared spectroscopy in conservation science. Getty Publications.

⁵ Borrelli, E., & Urland, A. (1999). ARC Laboratory Handbook. ICCROM, Rome.

- Πλένουμε τα δείγματα με απιονισμένο νερό, πριν ξεκινήσει αυτή η δοκιμή, προκειμένου να απομακρυνθεί το κονιοποιημένο υλικό από την επιφάνεια.
- Στεγνώνουμε τα δείγματα στον φούρνο για 24 ώρες στους 60 ° C (αυτή η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ξήρανσης θα αποτρέψει την υποβάθμιση των οργανικών ουσιών στην περίπτωση των επεξεργασμένων δειγμάτων).
- Στη συνέχεια τοποθετούμε τα δείγματα σε ξηραντήρα με ξηρό πήγμα πυριτίας για να κρυσώσουν.
- Ζυγίζουμε τα δείγματα.
- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία ξήρανσης έως ότου η μάζα του κάθε δείγματος να είναι σταθερή, δηλαδή μέχρις ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, σε διάστημα 24 ωρών, να μην υπερβαίνει το 0,1% της μάζας του δείγματος.
- Αφού τα δείγματα στεγνώσουν τελείως και καταγραφεί η σταθερή μάζα τους (m₀), τα τοποθετούμε σε δοχείο ή ποτήρι ζέσεως και καλύπτουμε αργά με απιονισμένο νερό, μέχρι να βυθιστούν τελείως με περίπου 2 cm νερού πάνω από αυτά.
- Σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα, αφαιρούμε κάθε δείγμα από το δοχείο, σκουπίζουμε γρήγορα με ένα υγρό πανί για να αφαιρέσουμε το επιφανειακό νερό και στη συνέχεια καταγράφουμε τη μάζα των υγρών δειγμάτων (m₁) και το χρόνο μέτρησης στο δελτίο δεδομένων.
- Βυθίζουμε ξανά τα δείγματα σε νερό και συνεχίζουμε τη μέτρηση έως ότου η διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε διαστήματα 24 ωρών, να είναι μικρότερη από 1% της ποσότητας του απορροφημένου νερού.
- Σε αυτό το σημείο, αφαιρούμε τα δείγματα από το νερό και τα στεγνώνουμε ξανά σε φούρνο στους 60 ° C, μέχρι να φθάσουν σε σταθερή μάζα (όπως παραπάνω).
- Καταγράφουμε αυτήν την τιμή στο φύλλο δεδομένων.
- Συνεχίζουμε με τους υπολογισμούς

3.1.8 Προσδιορισμός Ολικών Διαλυτών Αλάτων (TSS%) και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (Spot tests)

Για τον προσδιορισμό των ολικών διαλυτών αλάτων εφαρμόστηκε το ιταλικό πρότυπο ‘‘Dosaggio dei sali solubili, Normal 13/83’’, κατά το οποίο λαμβάνει χώρα ζύγιση 100 ± 5 mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο διαλύεται σε 100 ml απιονισμένου νερού. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετρείται η αγωγιμότητά τους, η οποία εκφράζεται σε μSiemens. Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

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

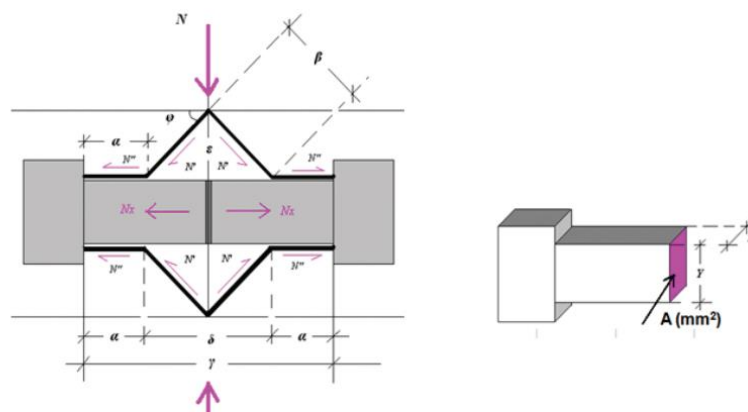
όπου: C: η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε μS, m: το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg. Η θερμοκρασία όλων των διαλυμάτων και του τυφλού ήταν 20 – 21 οC κατά τη μέτρηση της αγωγιμότητάς τους.

Συμπληρωματικά του προσδιορισμού των ολικών διαλυτών αλάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων (Cl⁻) και θεικών αλάτων (SO₄²⁻), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Ποιοτικά, σημειώνονταν τα εξής αποτελέσματα ως προς την ανίχνευση των αλάτων.

<i>tr</i>	<i>Τχνη</i>
+	Πολύ μικρή
++	Μικρή
+++	Μέτρια
++++	Υψηλή
+++++	Πολύ υψηλή

3.1.9 Προσδιορισμός εφελκυστική αντοχής με τη Μέθοδο των Θραυσμάτων

Η μέθοδος των θραυσμάτων εφαρμόζεται για την επιβολή άμεσου εφελκυσμού, σύμφωνα με τη διάταξη Κατσαραγάκη-Τάσσιου⁶ και πραγματοποιήθηκε στο «Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος» του ΕΜΠ. Τα δοκίμια φορτίζονται μέσω υδραυλικής πρέσσας (μεγίστου φορτίου 300KN). Μια δυναμοκυψέλη DBBSE (μεγίστου φορτίου 10 KN) είναι στερεωμένη στην πρέσσα και συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο μεταφέρονται οι μετρήσεις του επιβαλλόμενου φορτίου. Αν και η μέθοδος είχε δημιουργηθεί αρχικά για τη μέτρηση εφελκυστικών αντοχών σε σκυροδέματα, δίνεται η δυνατότητα να μετρηθούν και κονιάματα, τα οποία συγκολλούνται στο μέσον της διάταξης με ισχυρή συγκολλητική ύλη (σιδηρόστοκο) εκατέρωθεν, προκειμένου η θραύση να επιτευχθεί στο –ασθενέστερο- κονίαμα. Στη συνέχεια, καταγράφεται η μεγαλύτερη δύναμη που άντεξε το δοκίμιο σε N και μετράται η επιφάνεια θραύσης γραφικά, με αποτέλεσμα ο λόγος τους να δίνει την εφελκυστική τάση.

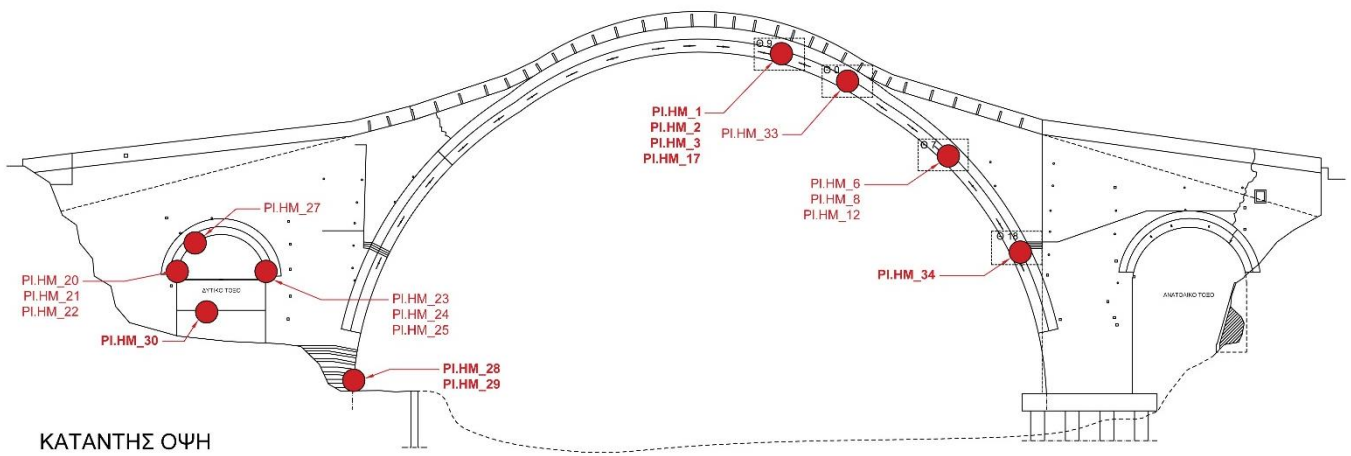


Εικόνα 1 Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο εφελκυστικής αντοχής.

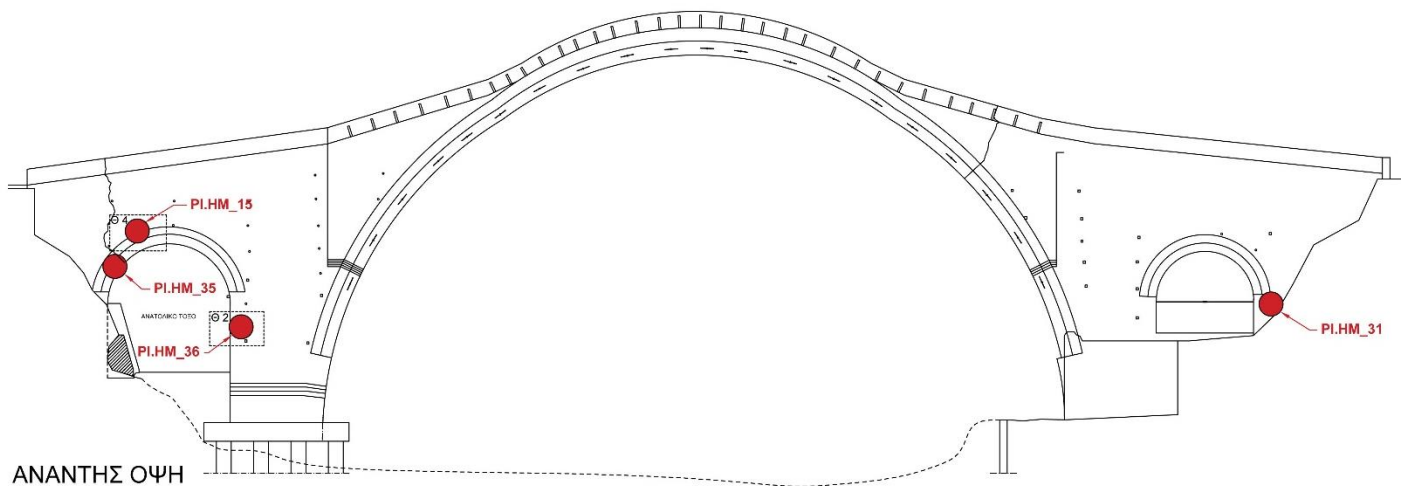
⁶ Katsaragakis, E. S. 1989. A new tensile test for concrete. Materials and Structures 20(6):463–466

3.2 Παρουσίαση Δειγματοληψίας

Λίστα φωτογραφιών και Δειγμάτων για Τεκμηρίωση		
Δείγμα	Σημείο Δειγματοληψίας	Περιγραφή
Pl.HM_1	Θραύσμα Θ9, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης θολιτών (εξωτερικός αρμός)
Pl.HM_2	Θραύσμα Θ9, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης θολιτών (εξωτερικός αρμός)
Pl.HM_3	Θραύσμα Θ9, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης θολιτών
Pl.HM_6	Θραύσμα Θ7, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης κάτω θολιτών
Pl.HM_8	Θραύσμα Θ7, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης άνω θολιτών
Pl.HM_12	Θραύσμα Θ7, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης κάτω θολιτών
Pl.HM_15	Θραύσμα Θ4, Ανατολικό Τόξο	Πέτρα και κονίαμα από λιθοδομή τυμπάνου πάνω από το ανατολικό τόξο
Pl.HM_17	Θραύσμα Θ9, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης λίθων πάνω από τους άνω θολίτες
Pl.HM_19	Παλιό Γεφύρι περ. 600 μ. Βόρεια του Γεφυριού της Πλάκας	Κονίαμα δόμησης λίθων
Pl.HM_20	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_21	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_22	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_23	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_24	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_25	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_26	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Θρυμματισμένος σταλακτίτης
Pl.HM_27	Εσωράχιο Δυτικού Τόξου	Σταλακτίτης
Pl.HM_28	Βάση Δυτικού Βάθρου	Κονίαμα δόμησης λίθων (εξωτερικός αρμός)
Pl.HM_29	Βάση Δυτικού Βάθρου	Κονίαμα δόμησης λίθων (εξωτερικός αρμός)
Pl.HM_30	Τοιχοποιία συμπλήρωσης δυτικού βάθρου	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_31	Δυτικό ακρόβαθρο	Κονίαμα αρμού
Pl.HM_32	Θραύσμα Θ7, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης θολιτών
Pl.HM_33	Θραύσμα Θ0, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα θολιτών
Pl.HM_34	Θραύσμα Θ18, Κεντρικό Τόξο	Κονίαμα θολιτών
Pl.HM_35	Ανατολικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης θολιτών
Pl.HM_36	Θραύσμα Θ2, Ανατολικό Τόξο	Κονίαμα δόμησης λίθων τυμπάνου



ΚΑΤΑΝΤΗΣ ΟΨΗ



ΑΝΑΝΤΗΣ ΟΨΗ

Δείγματα Κεντρικού Τόξου

PI.HM_1

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου (εξωτερικός αρμός).



PI.HM_2

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου (εξωτερικός αρμός).



PI.HM_3

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου.



Pl.HM_6

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου (κάτω θολιτών).



Pl.HM_8

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου (άνω θολιτών)



PI.HM_12

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου (κάτω θολιτών)



PI.HM_17

Κονίαμα δόμησης λίθων στο εξωράχιο του κεντρικού τόξου.



PI.HM_32

Κονίαμα δόμησης θολιτών κεντρικού τόξου.



Pl.HM_33

Κονίαμα σύνδεσης θολιτών κεντρικού τόξου



Pl.HM_34

Κονίαμα σύνδεσης θολιτών κεντρικού τόξου



Δείγματα Δυτικού Βάθρου

PI.HM_20

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου.



PI.HM_21

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου



PI.HM_22

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου



Pl.HM_23

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου



Pl.HM_24

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου



Pl.HM_25

Κονίαμα αρμού από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάθρου



PI.HM_26

Πεσμένος, θρυμματισμένος σταλακτίτης από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάρου.



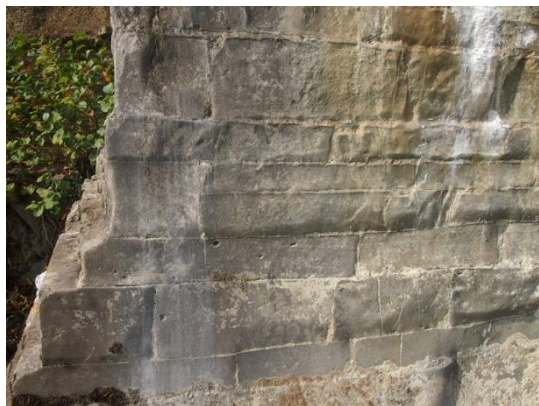
PI.HM_27

Σταλακτίτης από ανακουφιστικό τόξο δυτικού βάρου.



PI.HM_28

Κονίαμα αρμού από βάση δυτικού βάρου



PI.HM_29

Κονίαμα αρμού από βάση δυτικού βάρου

Pl.HM_30

Κονίαμα αρμού από τη βάση του δυτικού βάθρου, κάτω από το ανακουφιστικό τόξο.



Pl.HM_31

Κονίαμα αρμού από το δυτικό βάθρο στη βορειοανατολική πλευρά του τυμπάνου.



Δείγματα Ανατολικού Βάθρου

PI.HM_15

Πέτρα και κονίαμα από λιθοδομή τυμπάνου πάνω από το ανατολικό ανακουφιστικό τόξο.



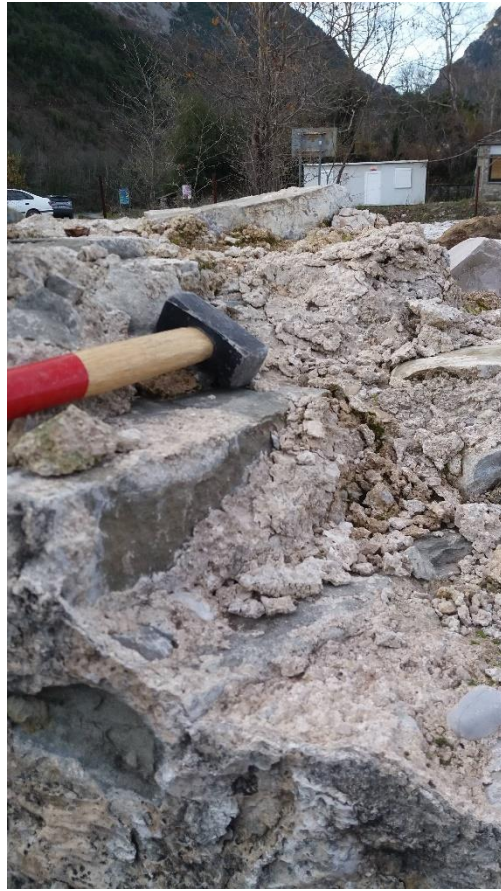
PI.HM_35

Κονίαμα δόμησης θολιτών ανατολικού τόξου



PI.HM_36

Κονίαμα δόμησης λίθων ανατολικού τυμπάνου.



Δείγμα από παλαιότερο γεφύρι στον Άραχθο

PI.HM_19

Κονίαμα δόμησης λίθων από κοντινό πεσμένο παλαιότερο γεφύρι του Αράχθου.



4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα δείγματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, ανά τεχνική που εφαρμόστηκε.

4.1 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων των ιστορικών κονιαμάτων μέσω Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM)

Παρακάτω παρουσιάζονται ανά περιοχή δειγματοληψίας μία αντιπροσωπευτική φωτογραφία του κάθε δείγματος και εικόνες που λήφθηκαν από ψηφιακή μικροσκοπία οπτικών ινών.



Εικόνα 1. Γραφική κλίμακα φωτογραφιών

4.1.1 Δείγματα κεντρικού τόξου

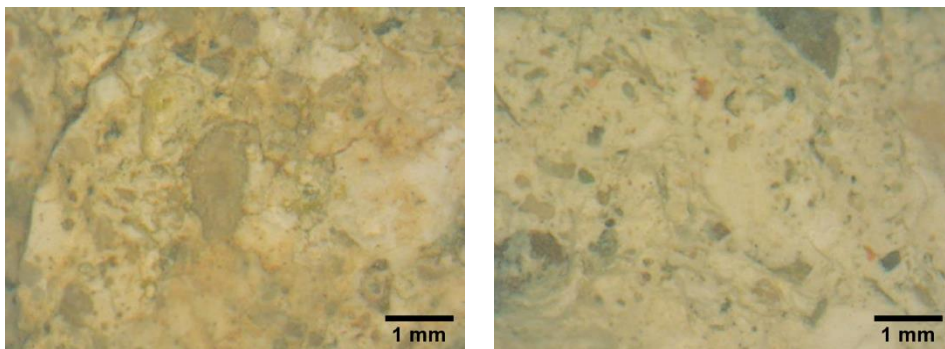
Δείγμα PL.HM_1



Εικόνα 2. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_1.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος από την εξωτερική πλευρά του αρμού σύνδεσης θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μακροσκοπική παρατήρηση, διακρίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα. Μικροσκοπικά παρατηρούνται λεπτόκοκκα αδρανή σε διάφορους χρωματισμούς. Είναι χαρακτηριστική η παρουσία συσσωματωμάτων ασβέστη στη μάζα του κονιάματος, σε ποικίλα μεγέθη, γεγονός που συνδέεται με τις συνθήκες και τον τρόπο ανάμειξης. Δεν παρατηρούνται ίχνη βιοδιάβρωσης, ενώ το δείγμα φαίνεται αρκετά συμπαγές.

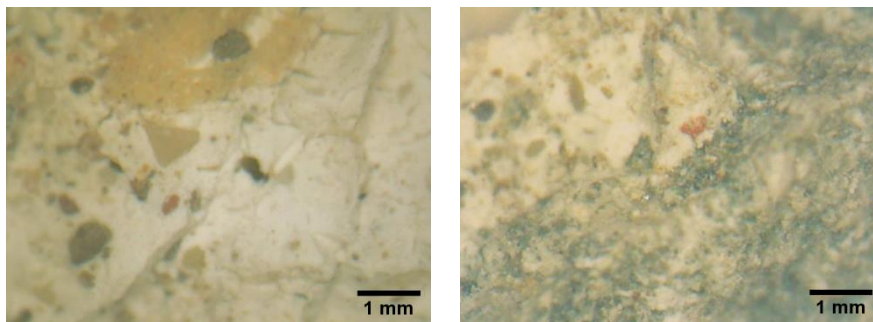
Δείγμα PL.HM.2



Εικόνα 3. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_2.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος από την εξωτερική πλευρά του αρμού σύνδεσης θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μακροσκοπική παρατήρηση, διακρίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα. Μικροσκοπικά παρατηρούνται λεπτόκοκκα αδρανή σε διάφορους χρωματισμούς. Είναι χαρακτηριστική η παρουσία συσσωματωμάτων ασβέστη στη μάζα του κονιάματος, σε ποικίλα μεγέθη, γεγονός που συνδέεται με τις συνθήκες και τον τρόπο ανάμειξης. Διακρίνεται, επίσης, ο σχηματισμός κιτρινωπών περιοχών, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε βιογενούς προέλευσης επικαθίσεις, λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον. Το δείγμα φαίνεται να βρίσκεται σε καλή κατάσταση διατήρησης.

Δείγμα PL.HM_3



Εικόνα 4. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_3.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα με λεπτόκοκκα αδρανή σε διάφορους χρωματισμούς. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονίας. Δεδομένου ότι έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, το ωχρό και το σκούρο χρώμα που επίσης παρατηρείται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον.

Δείγμα PL.HM_6



Εικόνα 5. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_6.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης των κάτω θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα με λεπτόκοκκα αδρανή σε διάφορους χρωματισμούς. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς. Το δείγμα παρουσιάζει έντονη βιοδιάβρωση με την εμφάνιση πορτοκαλί επικαθίσεων, ενώ διακρίνονται ινώδη ριζίδια φυτών να έχουν διεισδύσει στη μάζα του.

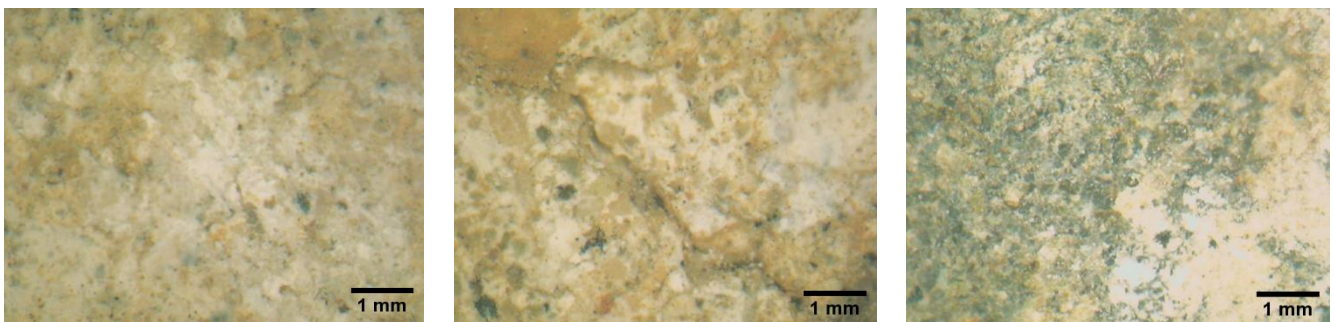
Δείγμα PL.HM_8



Εικόνα 6. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_8.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης των άνω θολιτών του κεντρικού τόξου. Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης των κάτω θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα με λεπτόκοκκα αδρανή σε διάφορους χρωματισμούς. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, η πορτοκαλοκάστανη κρούστα που παρατηρείται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον.

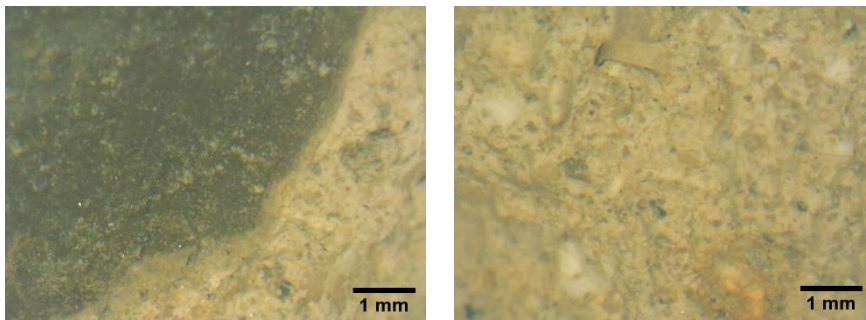
Δείγμα PL.HM_12



Εικόνα 7. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_12.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης των κάτω θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο κονίαμα με λεπτόκοκκα αδρανή. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, το δείγμα παρουσιάζει έντονη βιοδιάβρωση· πορτοκαλί και φαιόμαυρες επικαθίσεις παρατηρούνται σε αρκετά σημεία.

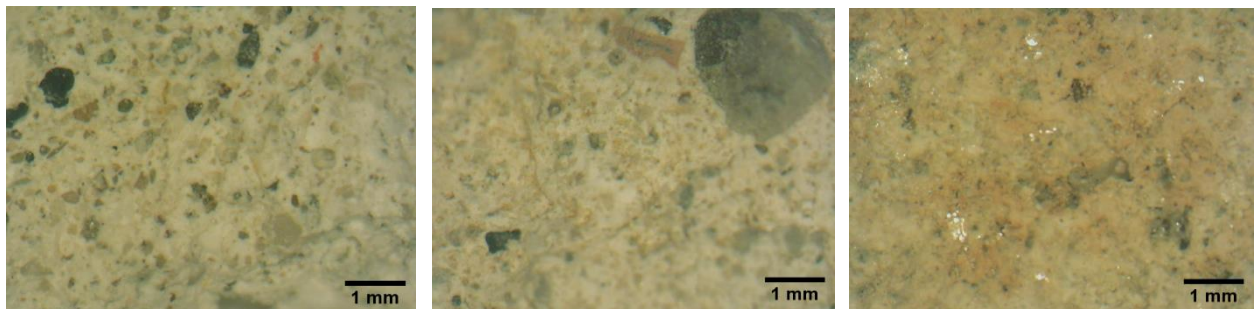
Δείγμα PL.HM_17



Εικόνα 8. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_17.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης λίθων του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο κονίαμα με λεπτόκοκκα αδρανή. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς. Σε τμήμα δείγματος παρατηρείται ο σχηματισμός μαύρης κρούστας λόγω ατμοσφαιρικών επικαθίσεων και βιογενών παραγόντων.

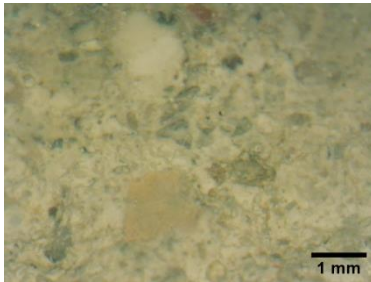
Δείγμα PL.HM_32



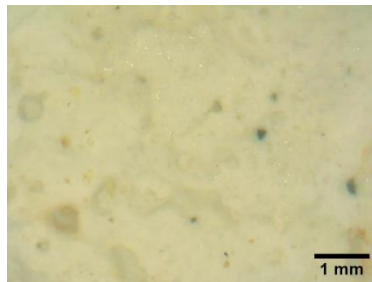
Εικόνα 9. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_32.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος σύνδεσης θολιτών του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο κονίαμα με λεπτόκοκκα και κατά τόπους χονδρόκοκκα αδρανή. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονίας. Σε τμήμα δείγματος που ήταν εκτεθειμένο, παρατηρούνται πορτοκαλί επικαθίσεις βιογενούς διάβρωσης και σχηματισμό αλάτων.

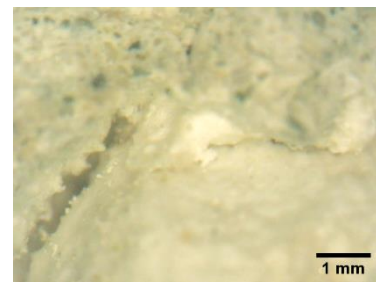
Δείγμα PL.HM_33



PL.HM_33_grey



PL.HM_33_white

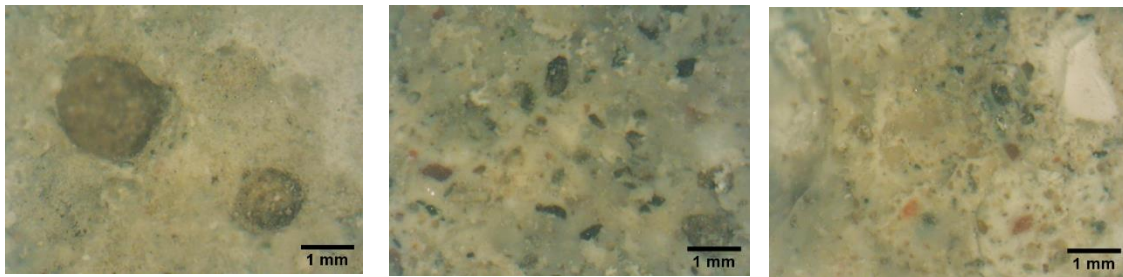


Διεπιφάνεια

Εικόνα 10. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_33.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος ανάμεσα στους θολίτες του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα λευκό κονίαμα με κατά τόπους ελάχιστα λεπτόκοκκα αδρανή (PL.HM_33_white). Στην άκρη του συνδέεται με ένα πιο σκουρόχρωμο κονίαμα (PL.HM_33_grey), το οποίο ομοιάζει με τα υπόλοιπα κονιάματα δόμησης του κεντρικού τόξου. Φαίνεται πως πρόκειται για κονίαμα με αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς. Η έντονη διαφοροποίηση του λευκού κονιάματος, καθώς και η διεπιφάνεια που σχηματίζει με το κοινό κονίαμα δόμησης, συνηγορούν ότι πρόκειται για μεταγενέστερο επισκευαστικό κονίαμα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το δείγμα αυτό βρίσκεται πολύ κοντά στην περιοχή ρίψης οβίδας ή εκρηκτικών του 1945, που μετέπειτα σκυροδετήθηκε.

Δείγμα PL.HM_34

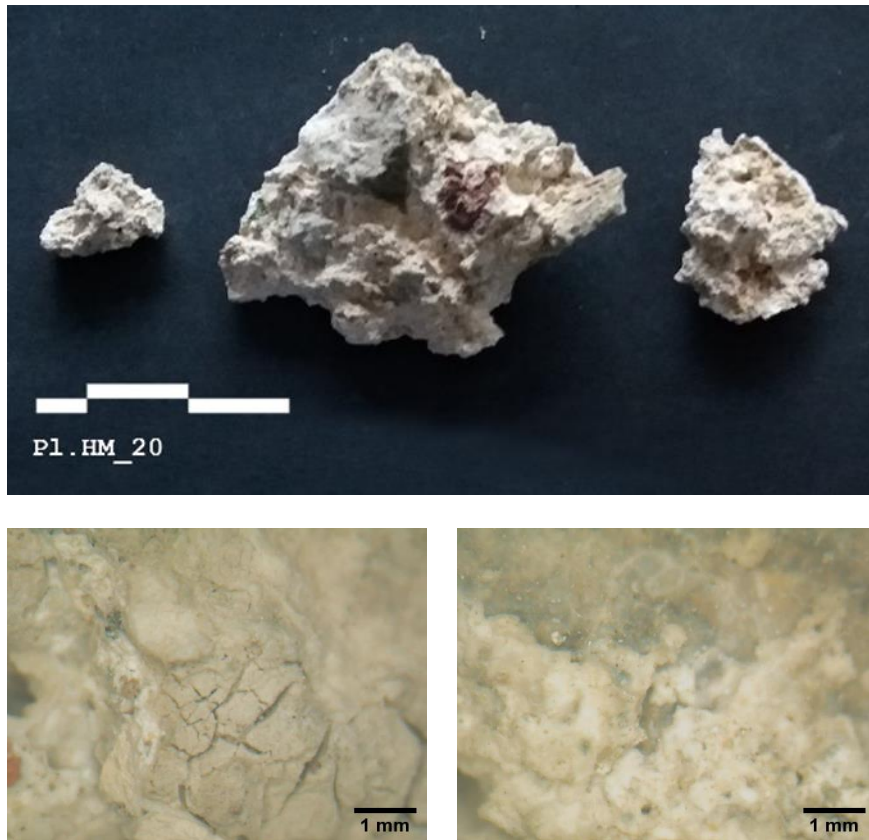


Εικόνα 11. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_34.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος ανάμεσα στους θολίτες του κεντρικού τόξου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα φαιόχρωμο κονίαμα με μικρή ποσότητα λεπτόκοκκων αδρανών, διαφορετικό από τα περισσότερα κονιάματα που έχουν μελετηθεί παραπάνω. Επίσης, υπάρχουν αρκετοί κρατήρες ποικίλων μεγεθών που έχουν σχηματιστεί είτε από την αφαίρεση αδρανών είτε από εγκλωβισμένο αέρα που προέκυψε πιθανά από ενεμάτωση.

4.1.2 Δείγματα δυτικού βάρου

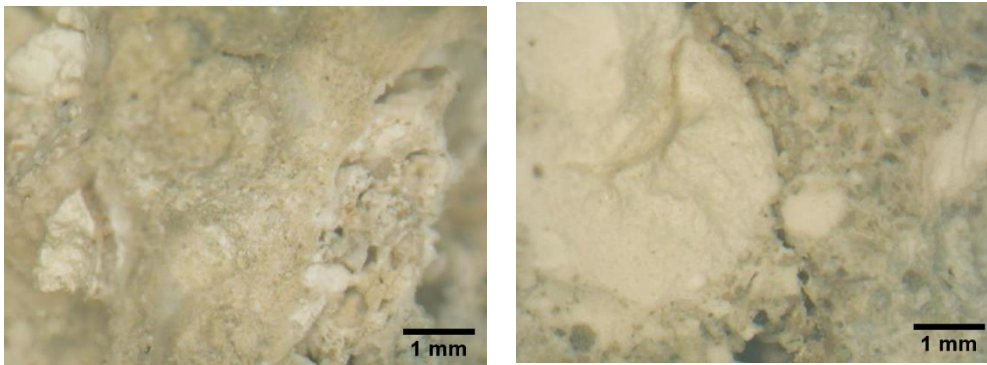
Δείγμα PL.HM_20



Εικόνα 12. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_20.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλληπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου. Οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ λευκού και γκρι που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία πιθανώς οφείλονται τόσο στη βιογενή διάβρωση, όσο και στην πιθανή χρήση τσιμέντου από μεταγενέστερες αρμολογήσεις.

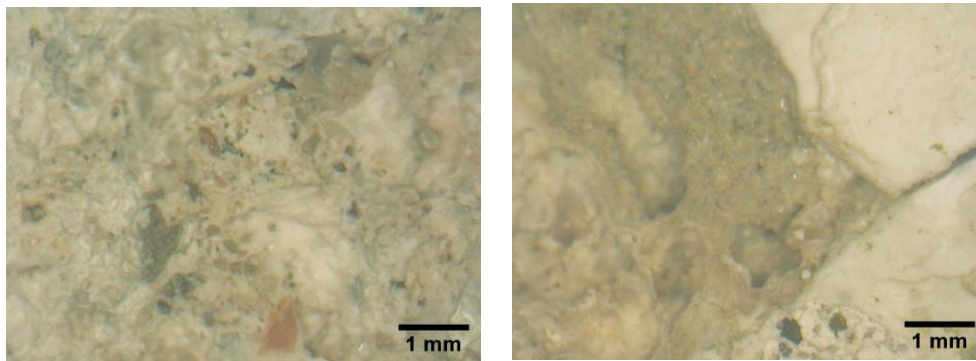
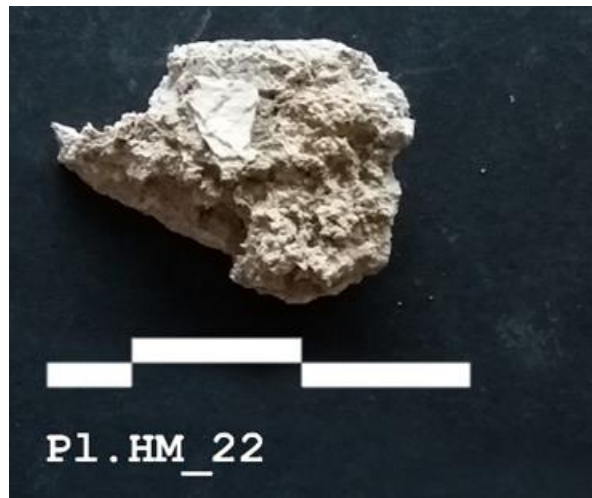
Δείγμα PL.HM_21



Εικόνα 13. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_21.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάθρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλλεπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου.

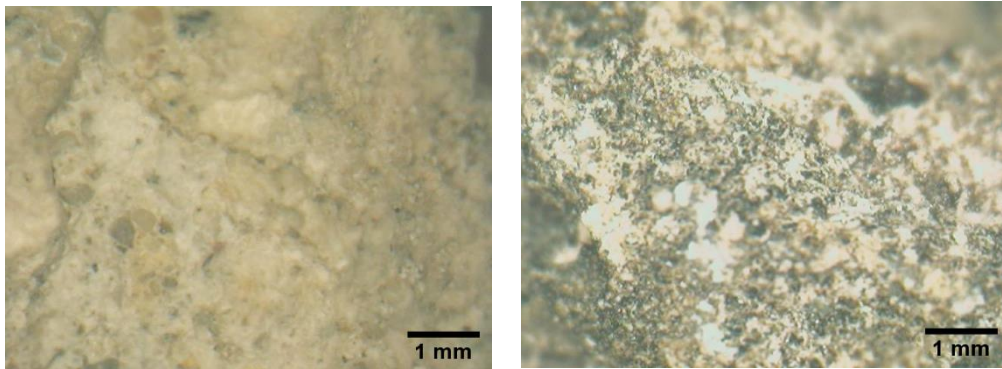
Δείγμα PL.HM_22



Εικόνα 14. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_22.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλληπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου. Οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ λευκού και γκρι που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία πιθανώς οφείλονται τόσο στη βιογενή διάβρωση, όσο και στην πιθανή χρήση τσιμέντου από μεταγενέστερες αρμολογήσεις.

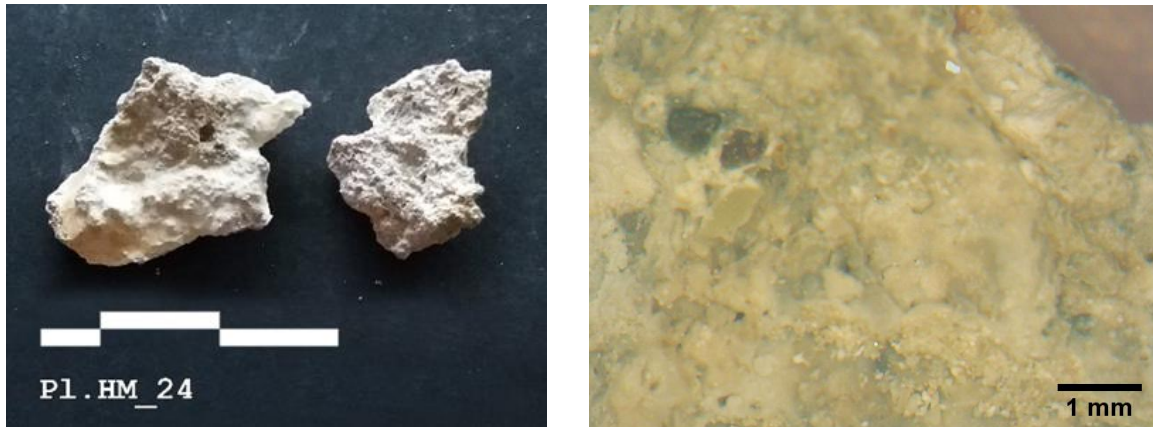
Δείγμα PL.HM_23



Εικόνα 15. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_23.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάθρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλληπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου. Οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ λευκού και γκρι που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία πιθανώς οφείλονται τόσο στη βιογενή διάβρωση, όσο και στην πιθανή χρήση τσιμέντου από μεταγενέστερες αρμολογήσεις. Βιογενής διάβρωση παρατηρείται και με την μορφή μαύρων επικαθίσεων,

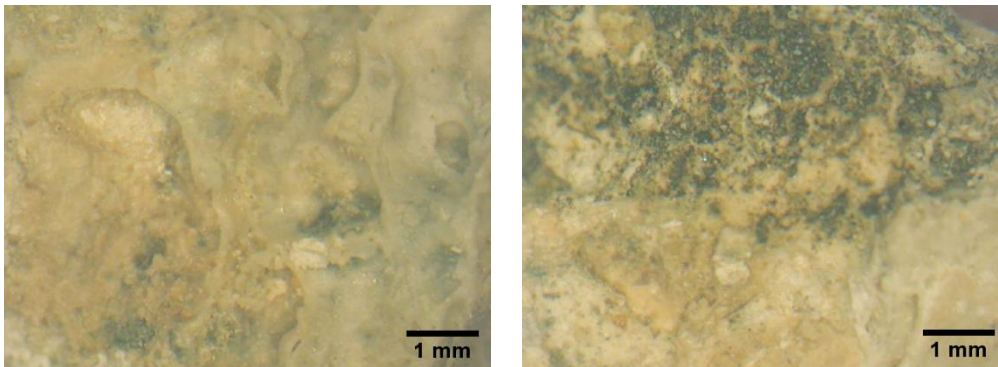
Δείγμα PL.HM_24



Εικόνα 16. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_24.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλλεπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου. Οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ λευκού και γκρι που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία πιθανώς οφείλονται τόσο στη βιογενή διάβρωση, όσο και στην πιθανή χρήση τσιμέντου από μεταγενέστερες αρμολογήσεις.

Δείγμα PL.HM_25



Εικόνα 17. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_25.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Από τη μικροσκοπική τεκμηρίωση, παρατηρείται η απουσία αδρανών, τα οποία πιθανώς έχουν καλυφθεί από τις αλληπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του τόξου. Οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ λευκού και γκρι που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία πιθανώς οφείλονται τόσο στη βιογενή διάβρωση, όσο και στην πιθανή χρήση τσιμέντου από μεταγενέστερες αρμολογήσεις. Βιογενής διάβρωση παρατηρείται και με την μορφή μαύρων επικαθίσεων,

Δείγμα PL.HM_26



Εικόνα 18. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_26..

Πρόκειται για δείγμα πεσμένου θρυμματισμένου σταλακτίτη από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Μέσω της μικροσκοπικής παρατήρησης, διαφαίνονται οι αλλεπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες σχηματίζουν τη φυλλόμορφη δομή του.

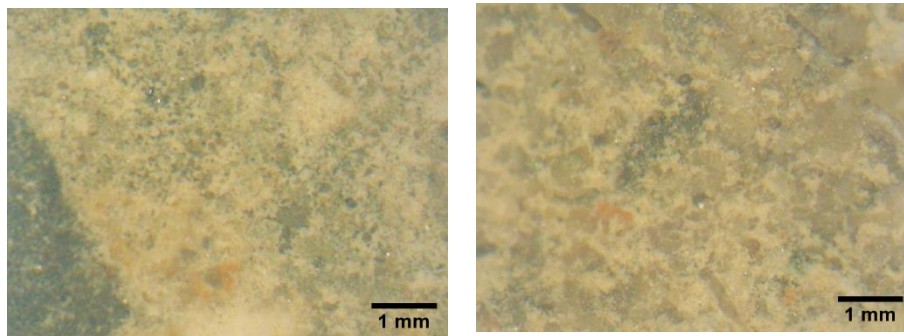
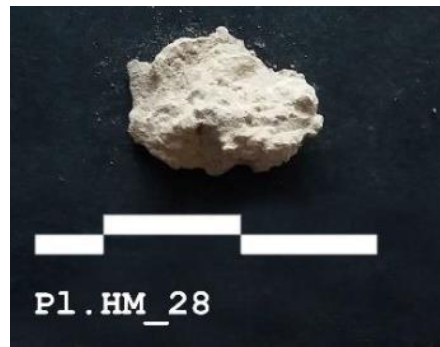
Δείγμα PL.HM_27



Εικόνα 19. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_27.

Πρόκειται για δείγμα σταλακτίτη από το ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου. Μέσω της μικροσκοπικής παρατήρησης, διαφαίνονται οι αλλεπάλληλες στρώσεις ανακρυστάλλωσης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οι οποίες σχηματίζουν τη φυλλόμορφη δομή του.

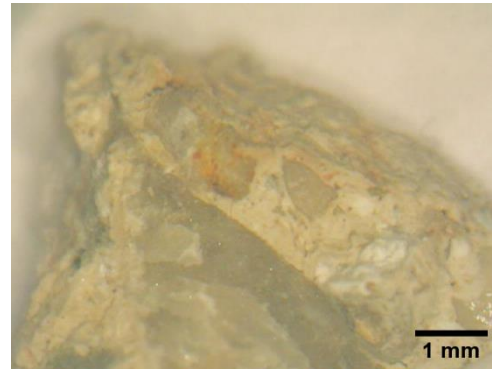
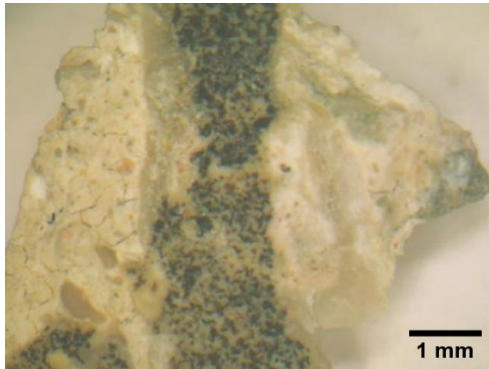
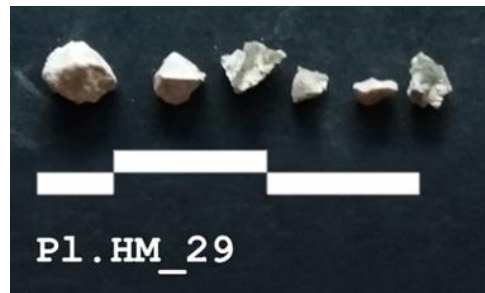
Δείγμα PL.HM_28



Εικόνα 20. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_28.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από την βάση του δυτικού βάθρου. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, το ωχρό χρώμα που επίσης παρατηρείται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον. Βιογενής διάβρωση παρατηρείται και με την μορφή μαύρων επικαθίσεων.

Δείγμα PL.HM_29



Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από την βάση του δυτικού βάρους. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, το ωχρό και σκούρο χρώμα που επίσης παρατηρούνται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον. Επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερου μεγέθους ανοιχτόχρωμα γωνιώδη αδρανή, που διαφοροποιούνται από τα αποστρογγυλεμένα των περισσότερων δειγμάτων του κεντρικού τόξου.

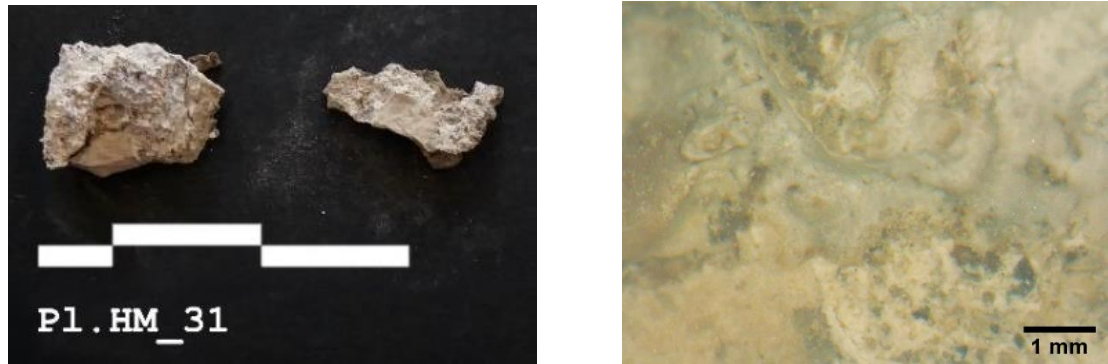
Δείγμα PL.HM_30



Εικόνα 21. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_30.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από τη βάση του δυτικού βάρου, κάτω από το ανακουφιστικό τόξο. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, οι ωχρές επικαθίσεις που παρατηρούνται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον.

Δείγμα PL.HM_31

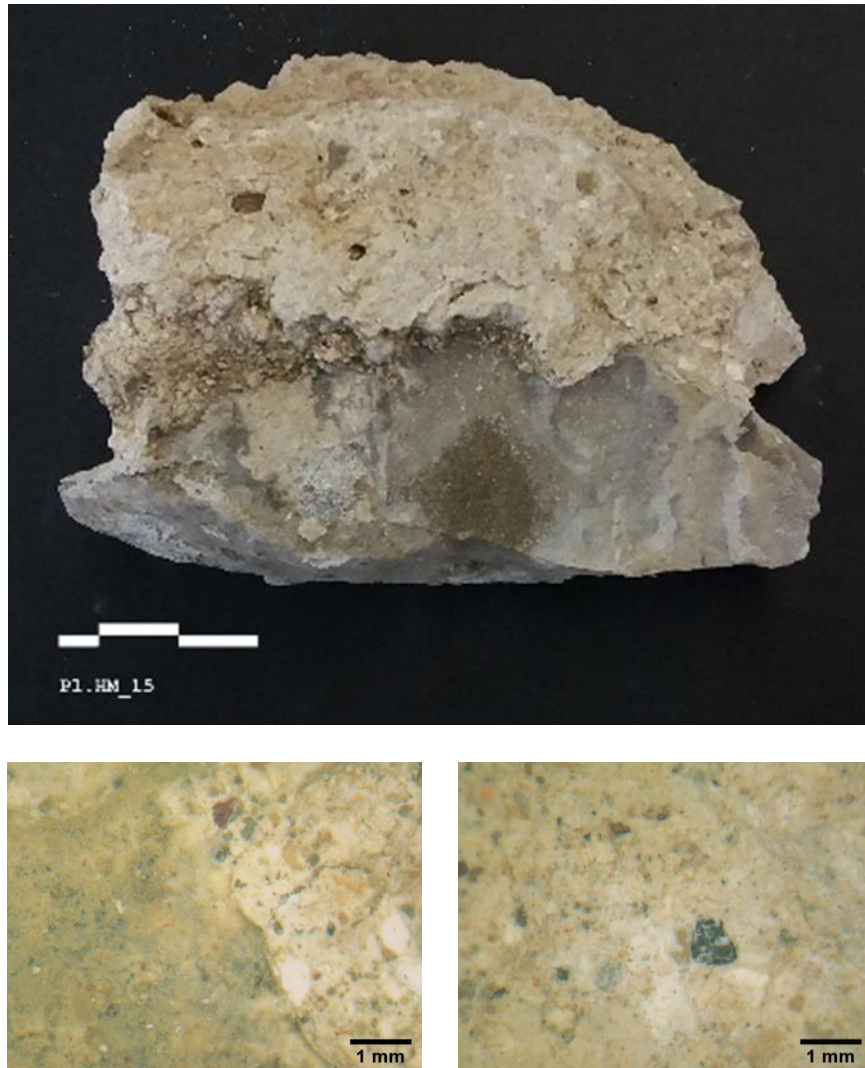


Εικόνα 22. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_31.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος αρμού από το δυτικό βάθρο στην βορειοανατολική πλευρά του τυμπάνου. Δεδομένου ότι μέρος του δείγματος έχει αφαιρεθεί από εξωτερικό αρμό, το ωχρό χρώμα που επίσης παρατηρείται σε αρκετά σημεία, οφείλεται σε βιογενή διάβρωση λόγω άμεσης επαφής του με το περιβάλλον.

4.1.3 Δείγματα ανατολικού βάρου

Δείγμα PL.HM_15



Εικόνα 23. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_15.

Πρόκειται για δείγμα πέτρας και κονιάματος από την λιθοδομή του τυμπάνου πάνω από το ανατολικό ανακουφιστικό τόξο. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα., το οποίο παρουσιάζει έντονες ομοιότητες με τα δείγματα του κεντρικού τόξου, τόσο στο χρώμα της κονίας και των αδρανών, όσο και της μεταξύ τους αναλογίας και της εμφάνισης συσσωματωμάτων Ca(OH)_2 .

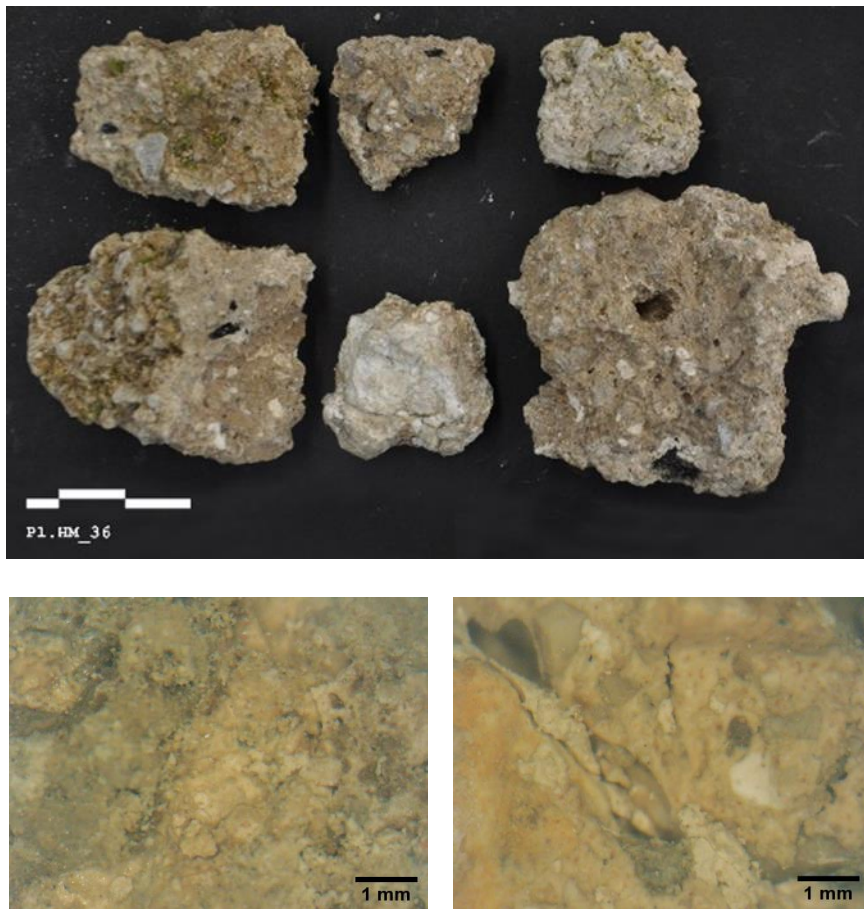
Δείγμα PL.HM_35



Εικόνα 24. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_35.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης θολιτών από το ανατολικό ανακουφιστικό τόξο. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα ανοιχτόχρωμο φαιό κονίαμα, το οποίο παρουσιάζει έντονες ομοιότητες με τα δείγματα του κεντρικού τόξου, τόσο στο χρώμα της κονίας και των αδρανών, όσο και της μεταξύ τους αναλογίας. Επίσης, παρουσιάζει σημάδια βιοδιάβρωσης με την εμφάνιση πορτοκαλί επικαθίσεων.

Δείγμα PL.HM_36

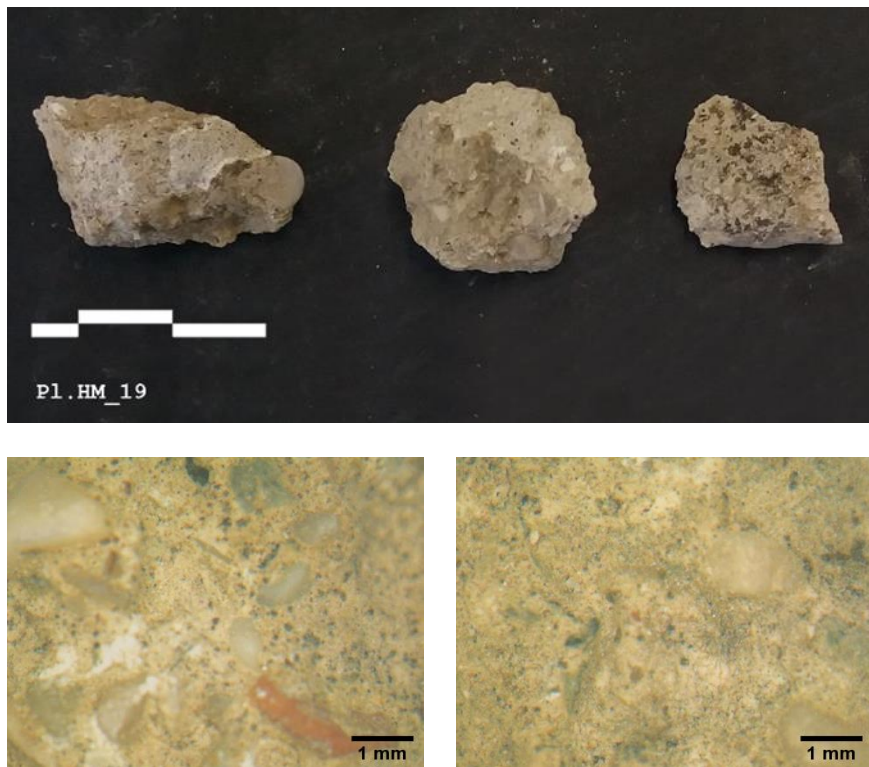


Εικόνα 25. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_36.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης λίθων τυμπάνου του ανατολικού βάρου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, φαίνεται ένα φαιό κονίαμα, με αρκετά συσσωματώματα ασβέστη. Είναι επίσης ευδιάκριτα σε όλο το δείγμα τα έντονα σημάδια βιοδιάβρωσης, καθώς και μικρορηγματώσεις.

4.1.4 Δείγμα από παλαιότερο γεφύρι στον Άραχθο

Δείγμα PL.HM_19



Εικόνα 26. Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση του δείγματος PL.HM_19.

Πρόκειται για δείγμα κονιάματος δόμησης λίθων από γειτονικό παλαιότερο γεφύρι στον Άραχθο. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση, προκύπτουν ομοιότητες με τα περισσότερα κονιάματα του Γεφυριού της Πλάκας: ανοιχτόχρωμο κονίαμα, λεπτόκοκκα, αλλά και πιο χονδρόκοκκα ποταμίδια αποστρογγυλεμένα αδρανή και σημάδια βιογενούς διάβρωσης.

4.2 Φυσικός διαχωρισμός κονιάς αδρανών – Κοκκομετρική Ανάλυση

4.2.1. Αποτελέσματα Κοκκομετρικής Ανάλυσης

Η κοκκομετρική ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων αποτελεί εν γένει βασική μέθοδο για τον προσδιορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών όπως ο υπολογισμός της αναλογίας κονιάς/αδρανών, το εύρος των μεγεθών των αδρανών, την κατανομή του μεγέθους των αδρανών για το εύρος αυτό. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού μίγματος καθώς σχετίζεται άμεσα με την συνολική επιφάνεια των κόκκων αλλά και με το ποσοστό των κενών που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών, ενώ έχει συσχετιστεί με διάφορα θεωρητικά μοντέλα σχετικά με επίτευξη μέγιστης πυκνότητας στοίβαξης, άρα την επίτευξη συνεκτικού κονιάματος.

Οποιαδήποτε κι αν είναι η αναλογία των αδρανών σε ένα μίγμα, σε μια ιδανική κοκκομετρική καμπύλη θα είχαμε συνεχή κοκκοδιαβάθμιση, η οποία οδηγεί σε σχετικά ομαλή, σιγμοειδή κοκκομετρική καμπύλη. Δεν θα είχαμε, δηλαδή, σημαντική απώλεια κάποιων κλασμάτων συγκεκριμένου μεγέθους, ώστε το κονίαμα να χαρακτηρίζεται από την λεγόμενη ασυνεχή κοκκομετρική καμπύλη. Πρακτικά, όμως, είναι γεγονός ότι δεν υπάρχει ιδανική κοκκομετρία, δεδομένου ότι τα αδρανή προέρχονται από φυσικές πηγές και αποθέσεις, όπου δεν ισχύουν οι ιδανικές συνθήκες. Επιπλέον, τελείως ομαλές κοκκομετρικές καμπύλες σπάνια επιτυγχάνονται.

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε ένα από τα δείγματα, το PL.HM_8, δείγμα κονιάματος σύνδεσης των θολιτών του κεντρικού τόξου. Τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται παρακάτω, στον Πίνακα. Στα Διαγράμματα παρουσιάζονται η καμπύλη του αθροιστικά διερχόμενου ποσοστού κόκκων ανά μέγεθος οπής κοσκίνου σε ημιλογαριθμική κλίμακα και τα ποσοστά συγκρατούμενης άμμου στα διάφορα κόσκινα, αντίστοιχα.

Η μονοκόρυφη κοκκομετρική καμπύλη χαρακτηρίζεται ως ομαλή, ενώ παρατηρείται ότι το μέγιστο ποσοστό άμμου παρουσιάζει διάμετρο μεταξύ 0,25 mm και 0,5mm (συνεπώς συγκρατείται στο κόσκινο των 250μm). Είναι σαφές ότι υπερισχύουν τα λεπτόκοκκα κλάσματα έναντι των πιο χονδρόκοκκων, καθώς το 84,64% της άμμου παρουσιάζει διάμετρο κόκκων κάτω των 0,5mm.

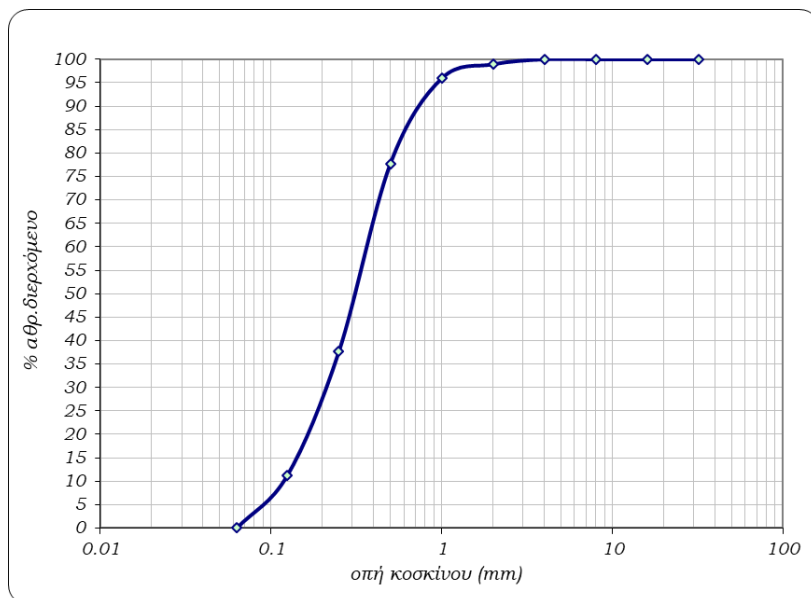
Στον Πίνακα παρουσιάζονται οι κύριες ποσοτικές παράμετροι της κοκκομετρικής ανάλυσης. Παρατηρείται πολύ μεγάλη αναλογία κονιάς/αδρανών σε σχέση με τις τιμές που συναντάμε στη διεθνή βιβλιογραφία για ιστορικά κονιάματα. Η αυξημένη ποσότητα κονιάς οδηγεί σε αύξηση της συνάφειας, γεγονός που συνάδει με τον ρόλο του κονιάματος στην εν λόγω κατασκευή. Ειδικότερα στην σύνδεση των θολιτών, το κονίαμα χρησιμοποιείται σε πολύ μικρή ποσότητα αφού η αντοχή της κατασκευής βασίζεται κυρίως στην σύνδεση των λίθων μεταξύ τους και η αυξημένη συνάφεια είναι βασικό χαρακτηριστικό. Η θέση του εν λόγω κονιάματος στην κατασκευή, επίσης, εξηγεί και την χρήση λεπτόκοκκου υλικού, ώστε οι αρμοί των θολιτών να είναι αρκετά λεπτοί.

Πίνακας 1

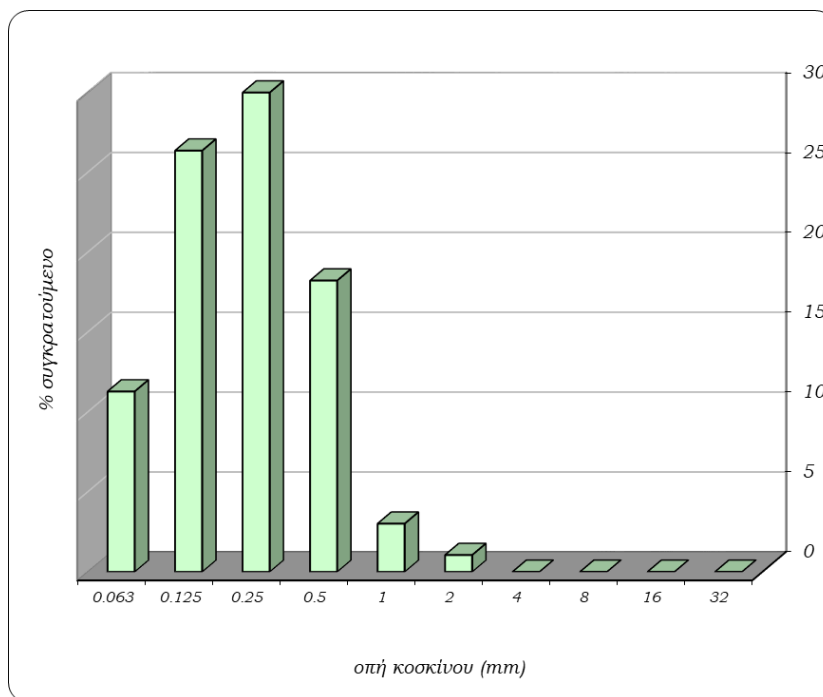
Κωδικός δείγματος	Κονία%	Αδρανή%	Αναλογία κονιάς/αδρανών	Μέση τιμή κατανομής- D50
PL.HM_8	68.31	32.89%	2/1	0.3

Πίνακας 2. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_8.

Gradation Curve (ASTM)				
Μάζα αραγκή (g)	45.00			
οπή κοσκίνου (mm)	συγκρατούμενη ποσότητα	% συγκρατούμενο	% αθροιστικά συγκρατούμενο	% αθροιστικά διερχόμενο
32	0	0.00	0.00	100.00
16	0	0.00	0.00	100.00
8	0	0.00	0.00	100.00
4	0	0.00	0.00	100.00
2	0.15	1.05	1.05	98.95
1	0.43	3.02	4.07	95.93
0.5	2.6	18.23	22.30	77.70
0.25	5.71	40.04	62.34	37.66
0.125	3.76	26.37	88.71	11.29
0.063	1.61	11.29	100.00	0.00
<0,063	29.1	67.11		
Σύνολο	43.36			
Συνολικά αδρανή	14.26	κονία (g)	30.74	
απώλειες (g)	1.64	κονία (%)	68.31	
απώλειες (%)	3.64	<5%		



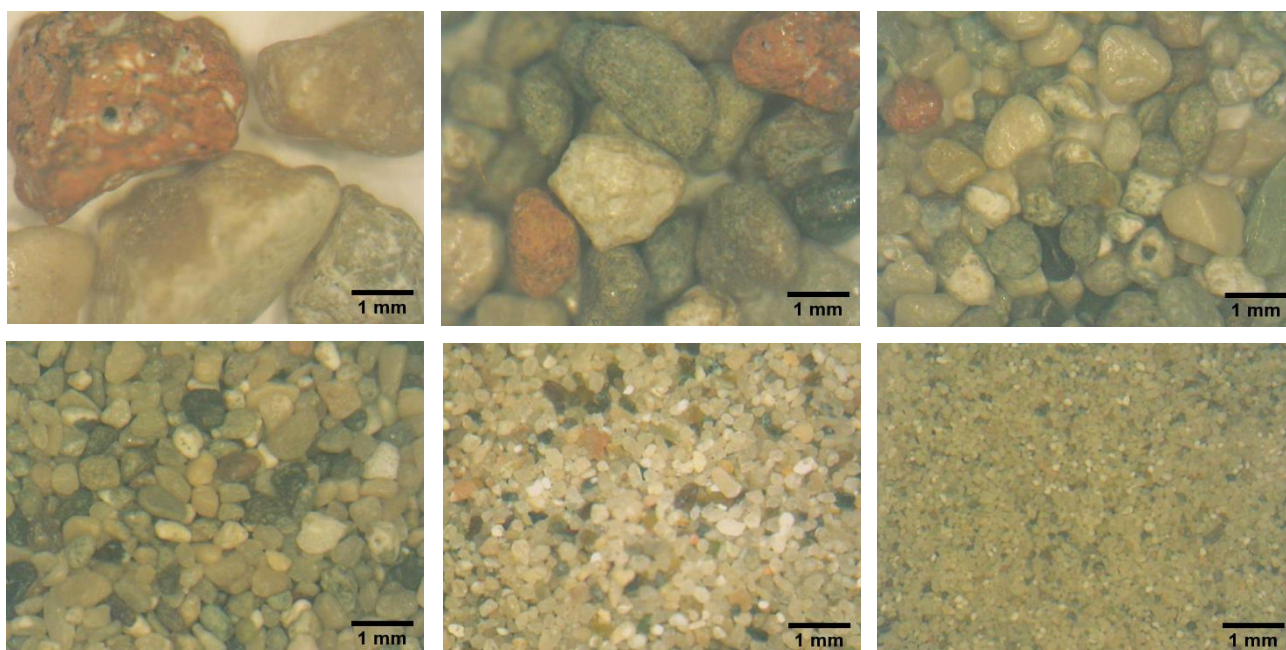
Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος PL.HM_8.



Διάγραμμα 2. Ιστόγραμμα κατανομής κόκκων δείγματος PL.HM_8

4.2.2 Μικροσκοπική τεκμηρίωση της κοκκοδιαβάθμισης μέσω Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM)

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες των αδρανών του δείγματος PL.HM_8, που λήφθηκαν από ψηφιακή μικροσκοπία οπτικών ινών σε κάθε κλάσμα κοσκίνου του δείγματος.



Εικόνα 27. Φωτογραφίες των αδρανών που προέκυψαν από την κοσκίνηση του PL.HM_8. Από πάνω αριστερά απεικονίζονται τα κλάσματα με τη σειρά: 2 mm, 1mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm και 62 μm, αντίστοιχα.

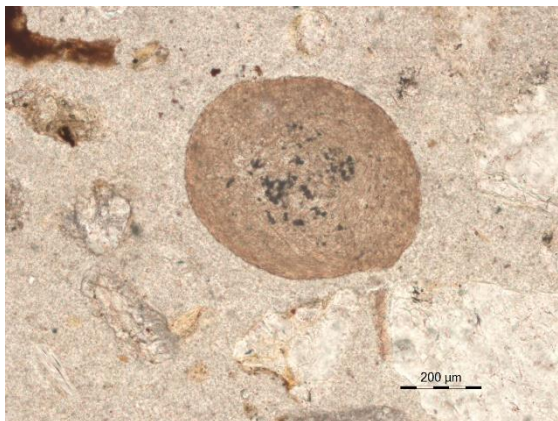
4.3 Πετρογραφική Ανάλυση

Παρακάτω, ακολουθούν οι εικόνες και ο σχολιασμός της πετρογραφικής ανάλυσης που διενεργήθηκε σε συνεργασία με το Δρ. Χ. Παπατρέχα, πετρολόγο του εργαστηρίου ΛΙΘΟΣ του Ε.Α.Γ.Μ.Ε. για τα δείγματα ΠΙ.ΗΜ_3, 8 και 19.

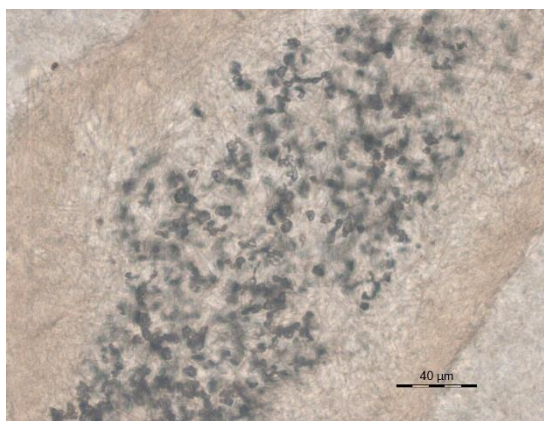
ΠΙ.ΗΜ_3

Από τη μικροσκοπική παρατήρηση της λεπτής τομής του ΠΙ.ΗΜ_3 προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα:

- Πρόκειται για ένα δείγμα πλούσιο σε κονία και λίγα αδρανή.
- Τα αδρανή παρουσιάζουν μία ποικιλία πετρωμάτων και ορυκτών που περιλαμβάνει κυρίως: Ψαμμίτη, ασβεστίτη, χαλαζία, χαλαζίτη, σερπεντινίτη, βιοτίτη, χλωρίτη, ολιβίνη, μοσχβίτη και πυρόξενο.
- Η κονία είναι ασβεστιτικής φύσης, ιδιαίτερα λεπτόκοκκη (2-3 μm) και παρουσιάζει συνοχή.
- Σε αρκετά σημεία συναντώνται ωοειδείς σχηματισμοί (εικ. 28, 29), με ινώδη εσωτερική σύσταση, που αποδίδονται σε περιοχές αντίδρασης της ασβεστιτικής κονίας με αργιλοπυριτικά πρόσθετα.



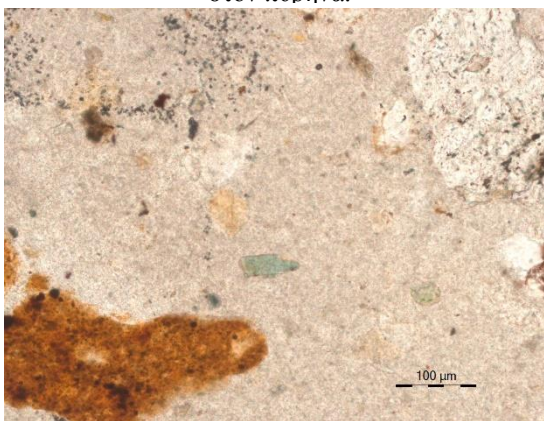
Εικόνα 28. Παράλληλα Nicols x100. Ωοειδής σχηματισμός που αποδίδεται στην αντίδραση της ασβεστιτικής κονίας με αργιλοπυριτικά πρόσθετα.



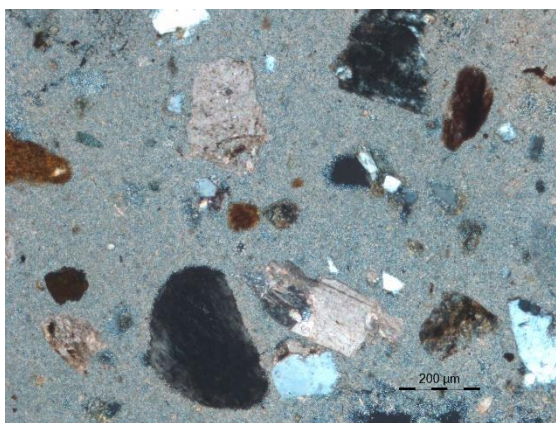
Εικόνα 29. Παράλληλα Nicols x500. Στο εσωτερικό των ωοειδών περιοχών διακρίνονται ινώδεις σχηματισμοί και σκουρόχρωμα στίγματα στον πυρήνα.



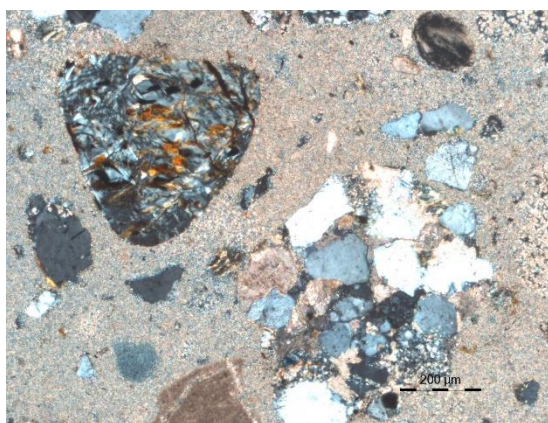
Εικόνα 30. Παράλληλα Nicols x100. Ένα φυλλάριο βιοτίτη δίπλα σε έναν ψαμμίτη, χαλαζίες και ασβεστιτικά αδρανή.



Εικόνα 31. Παράλληλα Nicols x200. Ένα φυλλάριο χλωρίτη στο κέντρο. Πάνω δεξιά, ένα ασβεστιτικό αδρανές.



Εικόνα 32. Διασταυρωμένα Nicols x100. Μία τυπική εικόνα του κονιάματος. Χαλαζίες, ασβεστίτες και σερπεντινίτες ως αδρανή στη μάζα μιας υπερλεπτόκοκκης κονιάς. Η σκούρα μάζα χαμηλά είναι ένας ακόμα ωσειδής ινώδης σχηματισμός, που στα διασταυρωμέα nicols εμφανίζεται σκούρος, καταδεικνύοντας την άμορφη σύστασή του.



Εικόνα 33. Διασταυρωμένα Nicols x100. Ένας σερπεντινίτης (πάνω αριστερά) και ένας ψαμμίτης (κάτω δεξιά). Πάνω δεξιά διακρίνεται άλλος ένα ωσειδής άμορφος σχηματισμός.

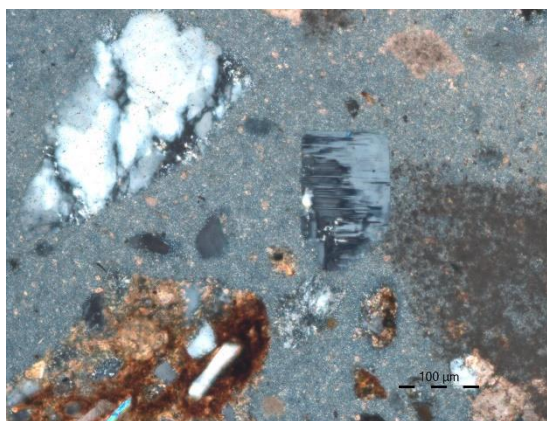
PI.HM_8

Από τη μικροσκοπική παρατήρηση της λεπτής τομής του PI.HM_8 προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα:

- Πρόκειται για ένα δείγμα σχεδόν πανομοιότυπο με το PI.HM_3. Οι μόνες διαφορές που εντοπίζονται αφορούν στην παρουσία περισσότερων αδρανών και στην παρουσία οργανικών (κάρβουνου).
- Τα επιπλέον αδρανή που εμφανίζονται στο δείγμα αυτό είναι ο μικροκλινής και ο μικρογάββρος, ενώ σε μεγαλύτερη αναλογία εμφανίζονται οι σερπεντινίτες και οι βιοτίτες.
- Οι ωσειδείς ινώδεις περιοχές αντίδρασης εμφανίζονται και πάλι σε αντίστοιχη κλίμακα και συγκέντρωση.



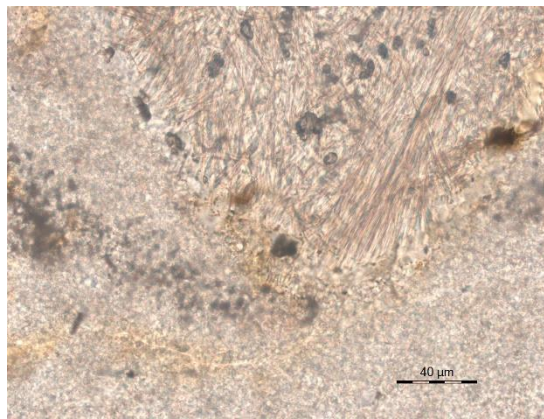
Εικόνα 34. Παράλληλα Nicols x200. Οργανικό υλικό (κάρβουνο) μέσα στη μάζα της κονιάς.



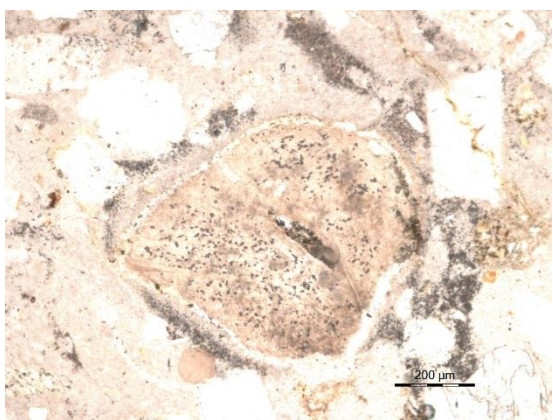
Εικόνα 35. Διασταυρωμένα Nicols x200. Στο κέντρο διακρίνεται ένας μικροκλινής.



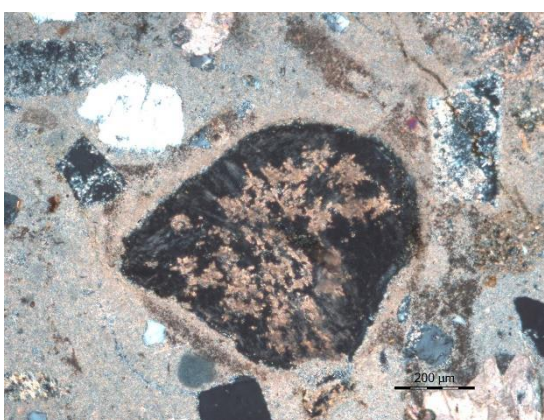
Εικόνα 36. Διασταυρωμένα Nicols x100. Ένας μικρογάββρος, στο εσωτερικό του οποίου διακρίνονται πλαγιόκλαστα και ένας ολιβίνης.



Εικόνα 37. Παράλληλα Nicols x500. Λεπτομέρεια διεπιφάνειας μεταξύ ινώδους περιοχής αντίδρασης και τυπικής μάζας της κονιάς.



Εικόνα 38. Παράλληλα Nicols x100. Ωσειδής περιοχή αντίδρασης. Στο εσωτερικό διακρίνονται και πάλι σκουρόχρωμα στίγματα διάσπαρτα στο ινώδες εσωτερικό.

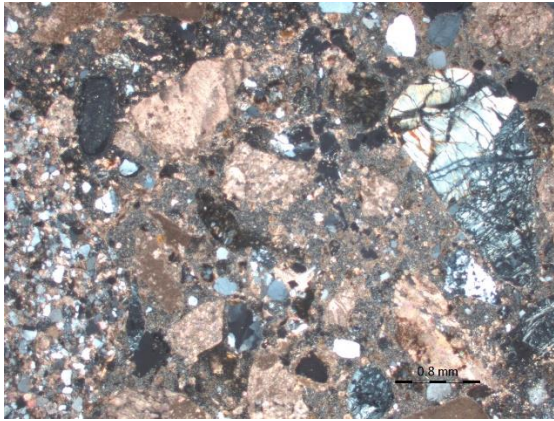


Εικόνα 39. Διασταυρωμένα Nicols x100. Ξανά η ίδια εικόνα, όπου οι σκουρόχρωμες περιοχές φανερώνουν την άμορφη σύστασή τους.

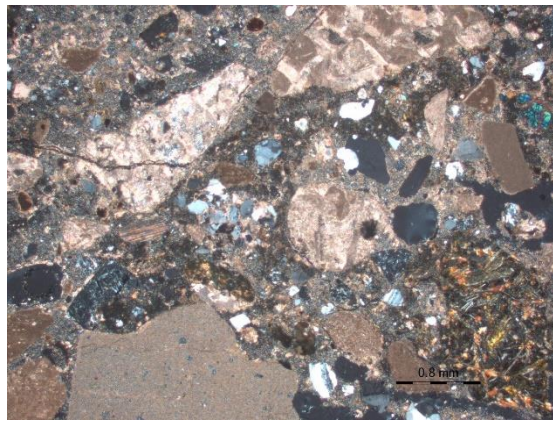
PI.HM_19

Από τη μικροσκοπική παρατήρηση της λεπτής τομής του PI.HM_19 προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα:

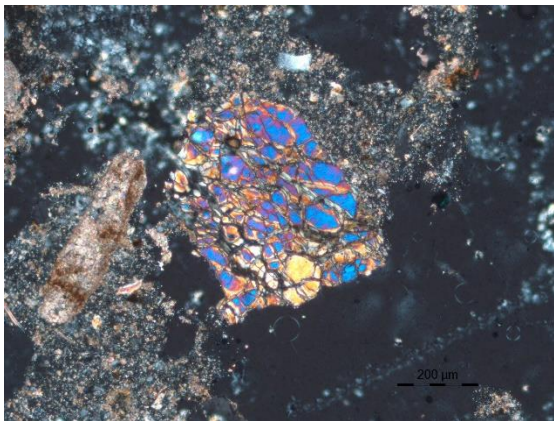
- Πρόκειται για ένα δείγμα με πολύ περισσότερα αδρανή από τα άλλα δύο δείγματα.
- Τα αδρανή εμπεριέχουν σχεδόν όλα τα ορυκτά που προαναφέρθηκαν. Επιπρόσθετα, σε αυτό το δείγμα εμφανίζεται χρωμίτης και πυριτόλιθος, ενώ υπάρχουν πολύ περισσότερα ασβεστιτικά αδρανή.
- Η κονία είναι και πάλι ασβεστιτικής φύσης, ιδιαίτερα λεπτόκοκκη (2-3 μm), ωστόσο παρουσιάζει μικρότερη συνοχή. Επίσης, εμφανίζονται περισσότερα μαύρα στίγματα στη μάζα της κονιάς.



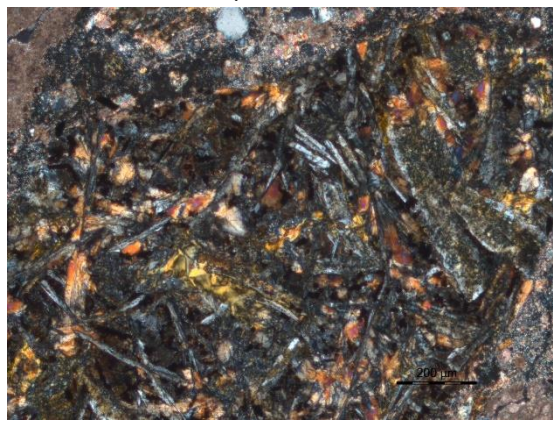
Εικόνα 40. Διασταυρωμένα Nicols x50. Μια τυπική εικόνα του κονιάματος, με πολλά αδρανή (κυρίως ψαμμίτες, ασβεστόλιθους και χαλαζίες).



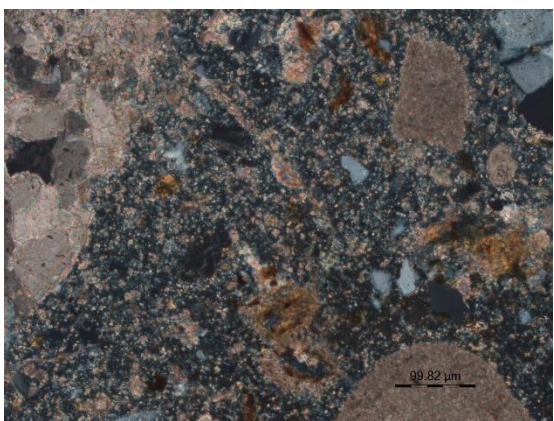
Εικόνα 41. Διασταυρωμένα Nicols x50. Άλλη μια τυπική εικόνα του δείγματος. Κάτω αριστερά διακρίνεται ένας μικριτικός ασβεστόλιθος, ενώ πάνω διακρίνονται απολιθωματοφόροι ασβεστόλιθοι.



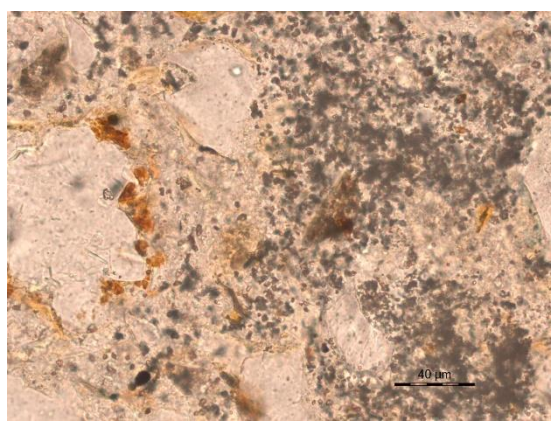
Εικόνα 33. Διασταυρωμένα Nicols x100. Στο κέντρο της εικόνας διακρίνεται ένας ολιβίνης.



Εικόνα 32. Διασταυρωμένα Nicols x100. Υποφαιστειακό πέτρωμα με δοκίδες βασικής σύστασης.



Εικόνα 44. Διασταυρωμένα Nicols x200. Η λεπτόκκοκη ασβεστιτική κονία ως πιο σκούρα μάζα, στο εσωτερικό και περιφερειακά της οποίας ξεχωρίζουν τα πιο ανοιχτόχρωμα ασβεστιτικά αδρανή.



Εικόνα 45. Παράλληλα Nicols x500. Μαύρα στίγματα στο εσωτερικό της κονιάς.

4.4 Αποτελέσματα Περίθλασης Ακτίνων X (XRD)

Στον παρακάτω Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της περίθλασης ακτίνων X για κάθε δείγμα με τις κύριες και δευτερεύουσες ορυκτολογικές ενώσεις που παρατηρήθηκαν. Βάσει αυτών παρατίθεται μια σειρά από σχόλια, ανά γεωγραφική ομάδα δειγμάτων.

Γεωγραφική Θέση	Κωδικός δείγματος	Ορυκτολογική Ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X	
		Κύρια ορυκτολογική φάση	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
Δείγματα κεντρικού βάρους	PL.HM_1	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Μοσχοβίτης, αλβίτης, γύψος, εντριγκίτης, θωμασίτης, βιοτίτης, ιλλίτης, χλωρίτης, μοντμοριλονίτης, βερμικουλίτης, κλινόχλωρο, τάλκης, χρυσοτίλης, λευκίτης
	PL.HM_2	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, χρυσοτίλης, κλινόχλωρο.
	PL.HM_3	Ασβεστίτης, Χαλαζίας και Γύψος	Πορτλαντίτης, αλβίτης, βιοτίτης, χλωρίτης, κλινόχλωρο, χρυσοτίλης, λευκίτης, ορθόκλαστο
	PL.HM_6	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης, λευκίτης, μικροκλινής
	PL.HM_8_total	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Μοσχοβίτης, ιλλίτης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης, μίκα, αλβίτης, αιματίτης, βιοτίτης, διοψίτης, λευκίτης, κλινόχλωρο, φλογοπίτης
	PL.HM_8_binder	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Λευκίτης, αλβίτης, κλινόχλωρο, βιοτίτης, ιλλίτης, ορθόκλαστο, αιματίτης, μοντμοριλονίτης
	PL.HM_8_binder_HCL	Χαλαζίας	Αλβίτης, κλινόχλωρο, βιοτίτης, ιλλίτης, χρυσοτίλης
	PL.HM_12	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Βιοτίτης, αλβίτης, λευκίτης, μικροκλινής, λιζαρδίτης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης, κλινόχλωρο, γύψος
	PL.HM_17	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, χρυσοτίλης, βιοτίτης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
	PL.HM_32	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Μοσχοβίτης, αλβίτης, χλωρίτης, μοντμοριλονίτης, βιοτίτης, λιζαρδίτης, χρυσοτίλης
	PL.HM_33_grey	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, μικροκλινής, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης, ιλλίτης, βιοτίτης, χρυσοτίλης, κλινόχλωρο
	PL.HM_33_white	Ασβεστίτης, Πορτλαντίτης	Θωμασίτης, γύψος
	PL.HM_34	Χαλαζίας, ασβεστίτης	Αλβίτης, χλωρίτης, χρυσοτίλης
	Δείγματα δυτικού βάρους	PL.HM_20	Ασβεστίτης, Χαλαζίας
PL.HM_21		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, λιζαρδίτης, λευκίτης, κλινόχλωρο, βιοτίτης, χλωρίτης
PL.HM_22		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, λιζαρδίτης, λευκίτης, κλινόχλωρο, βιοτίτης, χλωρίτης, γύψος
PL.HM_23		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, ορθόκλαστο, κλινόχλωρο, χρυσοτίλης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
PL.HM_24		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, ορθόκλαστο, κλινόχλωρο
PL.HM_25		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, ορθόκλαστο, κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης, δολομίτης
PL.HM_26		Ασβεστίτης	-
PL.HM_28		Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, βιοτίτης, κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
PL.HM_29		Ασβεστίτης	Χαλαζίας, αλβίτης, βιοτίτης, κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
PL.HM_30		Ασβεστίτης	Χαλαζίας

	PL.HM_31	Ασβεστίτης, χαλαζίας	Αλβίτης, γύψος, αλβίτης, βιοτίτης, κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
Δείγματα ανατολικού βάθρου	PL.HM_15	Γύψος, Ασβεστίτης	Χαλαζίας, εντριγκίτης, θωμασίτης, μοσχοβίτης, αλβίτης, βιοτίτης, ιλλίτης, χλωρίτης-σερπεντίνης, μοντμοριλονίτης, κλινόχλωρο, χρυσοσίλης
	PL.HM_35	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Κλινόχλωρο, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης, χρυσοσίλης, βιοτίτης, κυανίτης, αλβίτης, λευκίτης, άστριοι
	PL.HM_36	Ασβεστίτης	Πορτλαντίτης, χαλαζίας, γύψος, βιοτίτης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	PL.HM_19	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Αλβίτης, μικροκλινής, χρυσοσίλης, κλινόχλωρο, βιοτίτης, μοντμοριλονίτης-χλωρίτης

Πίνακας 3. Αποτελέσματα Ορυκτολογικής Ανάλυσης XRD.

Δείγματα κεντρικού τόξου

- Σε όλα τα δείγματα του κεντρικού τόξου εντοπίζονται ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας και ως δευτερεύουσες ορυκτά των ομάδων των μαρμαρυγιών, των άστριων καθώς και φυλλοπυριτικά ορυκτά όπως χλωρίτης και σερπεντίνης. Δεν παρατηρείται ορυκτολογική διαφοροποίηση μεταξύ των δειγμάτων που ελήφθησαν από τον εξωτερικό αρμό (PL.HM_1, PL.HM_2) και αυτών που ελήφθησαν από θέσεις σύνδεσης των θολιτών (PL.HM 6, 8, 12) και από την θέση πάνω από το κεντρικό τόξο (PL.HM.17).
- Το δείγμα PL.HM_3 διαφοροποιείται αφού ως κύρια ορυκτολογική φάση εκτός από τον ασβεστίτη και τον χαλαζία περιλαμβάνει και τον γύψο. Ακόμη, μόνο σε αυτό το δείγμα και στο PL.HM_33_white ανιχνεύεται και πορτλαντίτης.
- Δεν παρατηρείται σημαντική ορυκτολογική διαφοροποίηση μεταξύ του συνολικού δείγματος και του κλάσματος της κονιάς για το PL.HM_8. Αυτό εν μέρει δικαιολογείται από το υψηλό ποσοστό κονιάς στο ολικό δείγμα. Επιπρόσθετα, πιθανολογείται ότι στο PL.HM_8_binder εμπεριέχονται λεπτόκοκκα αργιλοπυριτικά, τα οποία δικαιολογούν το ύψος της κορυφής του χαλαζία. Πιο συγκεκριμένα, ο λευκίτης συνδέεται με ποζολονικά ορυκτά της Ιταλίας, στοιχείο που ενισχύει την υπόθεση της χρήσης ποζολανικών πρόσθετων. Επιπλέον, μετά από προσβολή με HCl στο κλάσμα της κονιάς, στο διάγραμμα πέρα από την αύξηση της έντασης των κορυφών που αντιστοιχούν στον χαλαζία και η μείωση των αντίστοιχων του ασβεστίτη, λόγω αντίδρασης με το HCl, παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται πλέον και ο λευκίτης, κάτι που αναμένεται να γίνει εάν αποτελούσε μέρος των αργιλοπυριτικών υδραυλικών ενώσεων που διαλυτοποιούνται επίσης με το HCL¹.
- Για το δείγμα PL.HM_33 πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση σε δύο σημεία, ένα πιο γκριζό και ένα λευκό. Παρατηρείται πλήρης διαφοροποίηση στην ορυκτολογική τους σύσταση, γεγονός που υποδεικνύει ότι το λευκό πιθανώς αποτελεί υπόλειμμα υλικού μεταγενέστερης παρέμβασης. Πιο συγκεκριμένα, το γκριζό τμήμα παρουσιάζει την τυπική ορυκτολογική σύσταση που εντοπίζεται και στα υπόλοιπα δείγματα του κεντρικού τόξου, ενώ το λευκό διακρίνεται από έντονη παρουσία πορτλαντίτη και ίχνη γύψου και θωμασίτη.

¹ Alvarez, J.I., Martín, A., Casado, P.G., Navarro, I. and Zornoza, A., 1999. "Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars". Cement and Concrete Research, 29(7), pp.1061-1065.

Δείγματα δυτικού βάρου

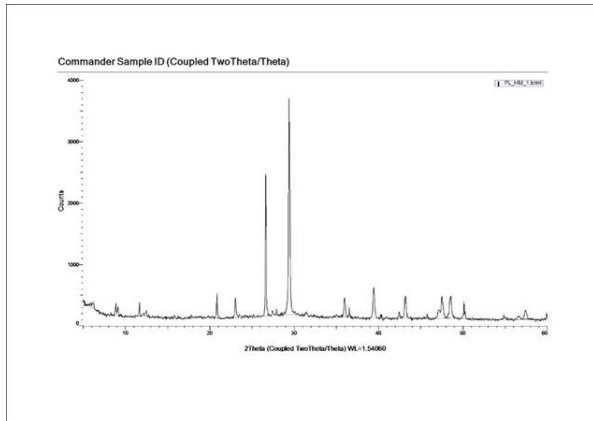
- Κύριες ορυκτολογικές φάσεις όλων των δειγμάτων από το τόξο του δυτικού βάρου (PL.HM 20-25) είναι ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας, ενώ είναι πολύ ασθενής η ανίχνευση των συνήθων ορυκτολογικών φάσεων που ανιχνεύονται στα δείγματα του κεντρικού τόξου (κυρίως φυλλοπυριτικά ορυκτά μαρμαρυγιών και άστριων). Ωστόσο το δείγμα PL.HM_25 εμφανίζει και δολομίτη, ως δευτερεύουσα κορυφή, κάτι που πιθανά σχετίζεται με τη χρήση άλλης κόνιας σε μεταγενέστερο αρμολόγημα.
- Στο δείγμα σταλακτίτη PL.HM 26 ανιχνεύεται μόνο ασβεστίτης. Στα δείγματα PL.HM_28, PL.HM_29, PL.HM_30, τα οποία είναι κονιάματα αρμού από την βάση του δυτικού βάρου, εντοπίζεται ο χαλαζίας σε μικρή ένταση, συγκριτικά με το σύνολο σχεδόν των υπόλοιπων δειγμάτων. Πιθανόν, αυτό να σχετίζεται και με την ύπαρξη λιγότερων αδρανών στα συγκεκριμένα δείγματα.

Δείγματα ανατολικού βάρου

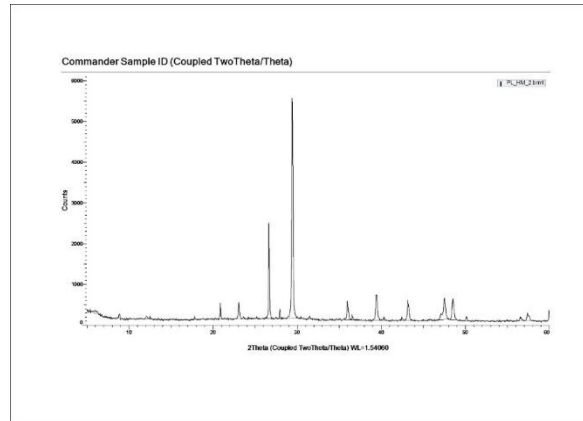
- Το δείγμα PL.HM_15 παρουσιάζει ως κύρια ορυκτολογική φάση τον γύψο και τον ασβεστίτη, ενώ στις δευτερεύουσες εντοπίζεται και πορτλαντίτης.
- Πορτλαντίτης και γύψος εντοπίζεται και στο δείγμα PL.HM_36 πέραν του ασβεστίτη.

Δείγμα από παλαιότερο γεφύρι στον Άραχθο

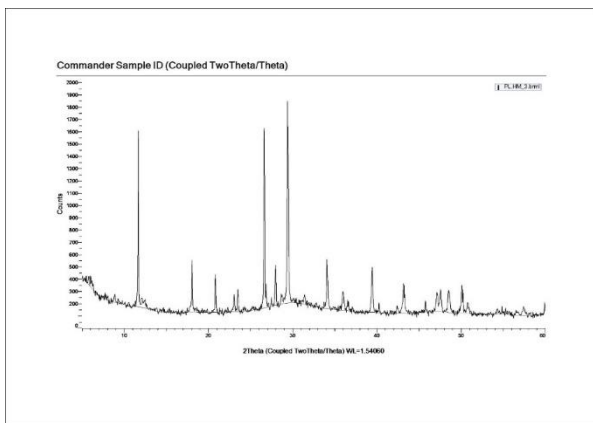
Τέλος, το δείγμα προγενέστερου γεφυριού στον Άραχθο παρουσιάζει ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις τον χαλαζία και τον ασβεστίτη, ενώ ανιχνεύονται και αρκετές από τις συνήθεις δευτερεύουσες κορυφές των δειγμάτων του γεφυριού της Πλάκας.



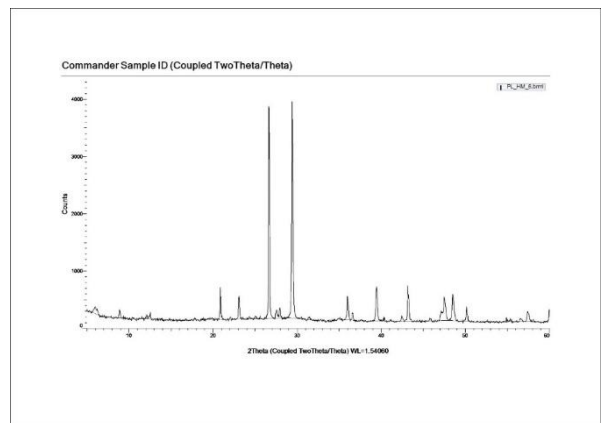
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_1



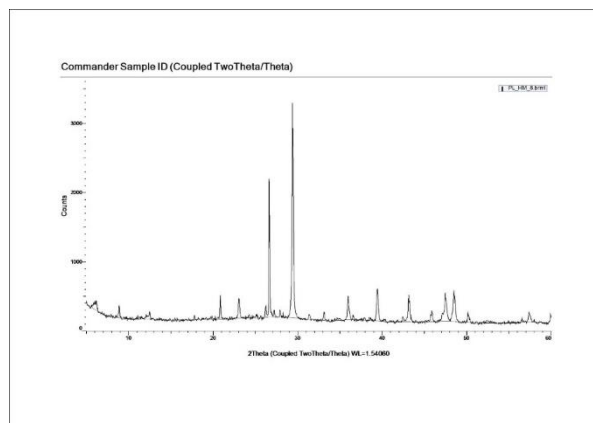
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_2



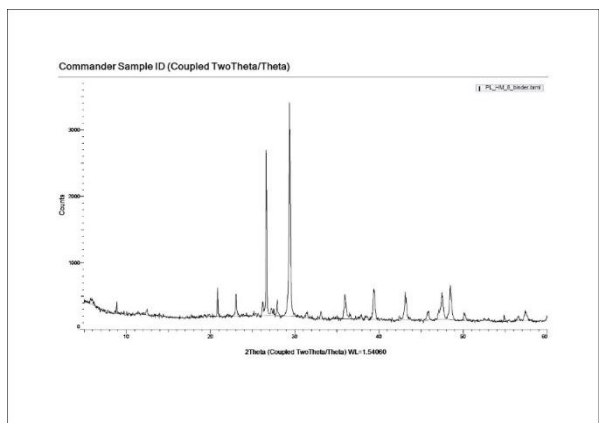
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_3



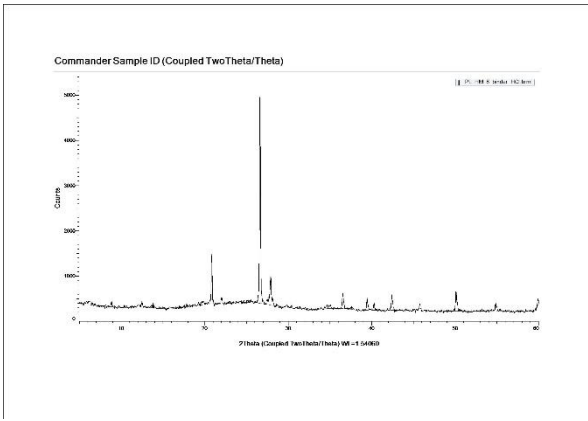
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_6



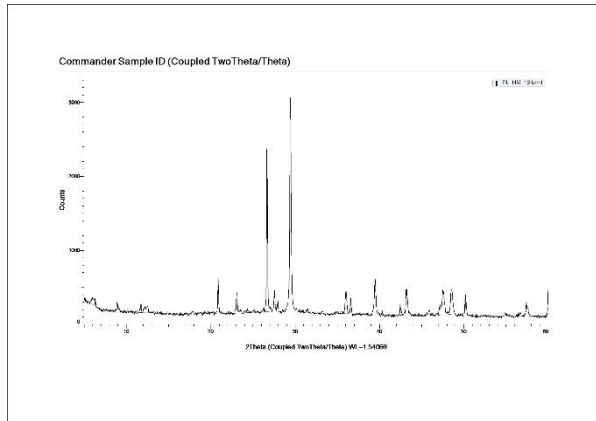
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_8



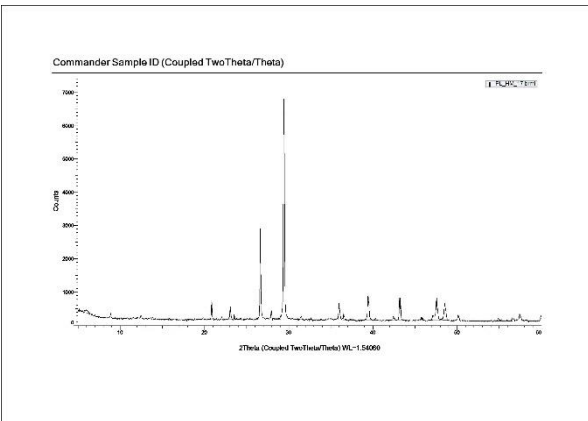
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_8_binder



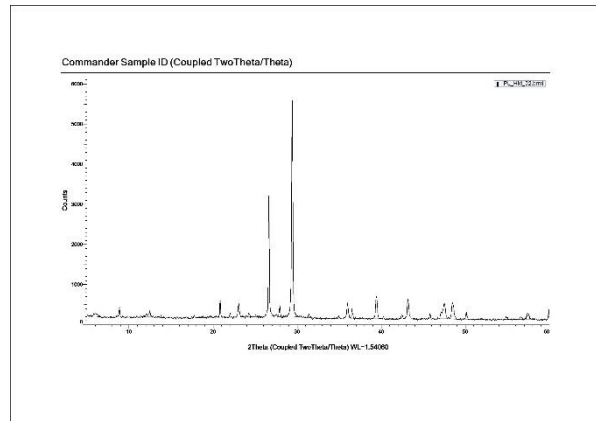
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_8_binder_HCL



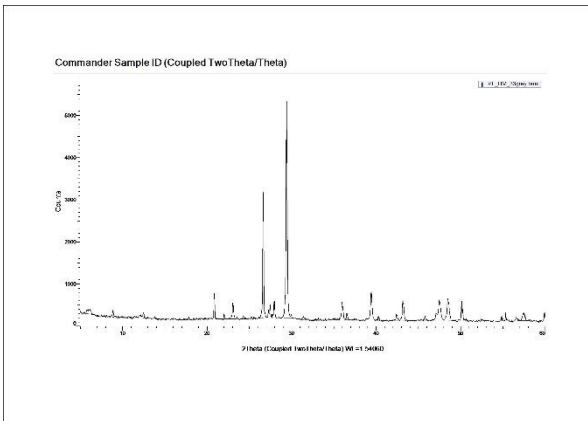
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_14



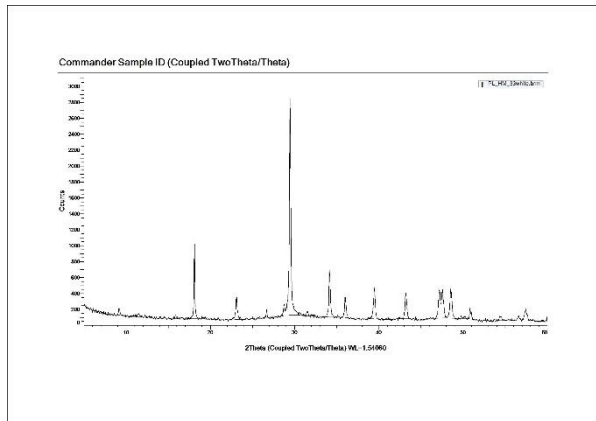
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_17



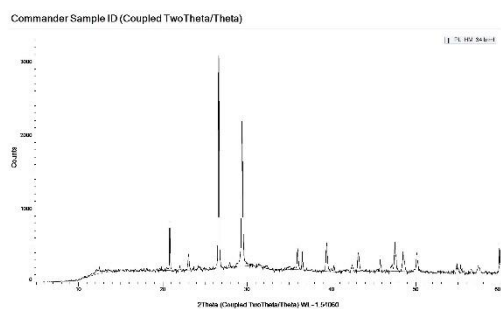
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_32



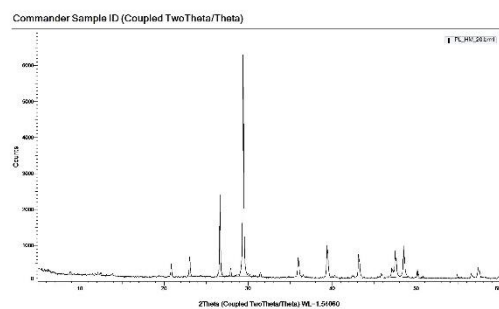
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_33_grey



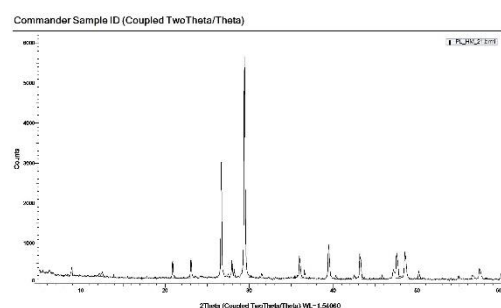
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_33_white



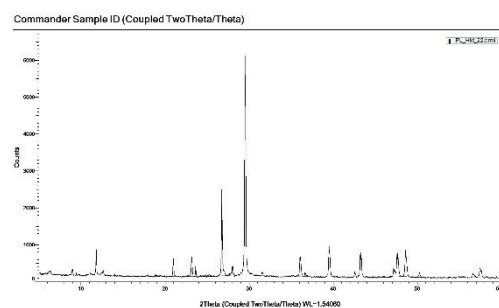
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_34



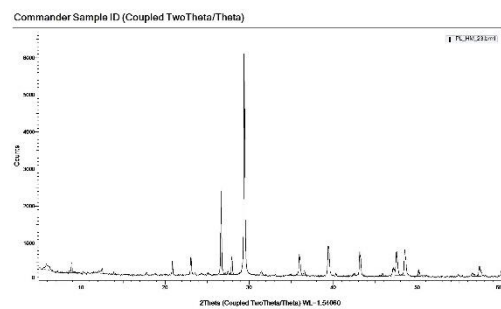
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_20



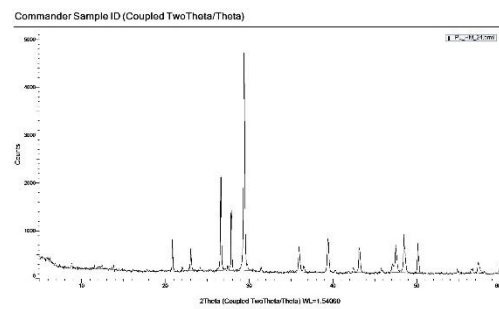
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_21



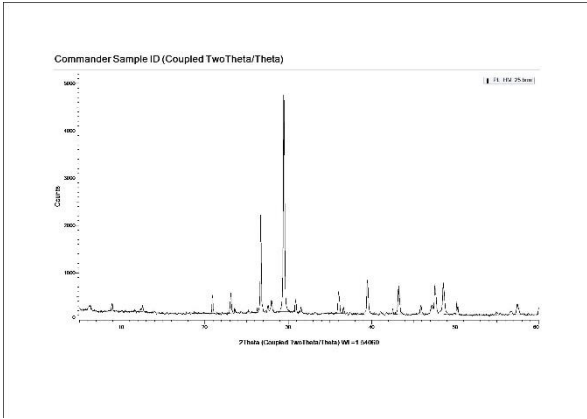
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_22



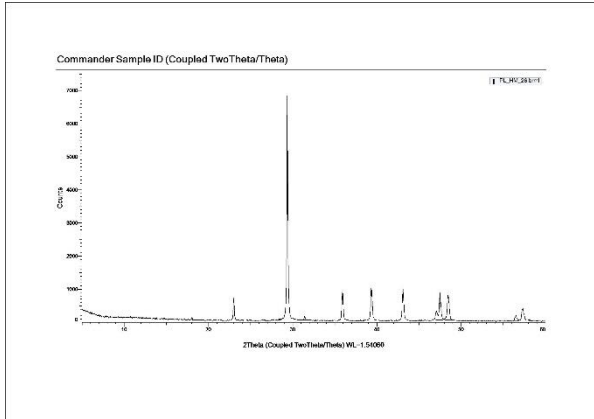
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_23



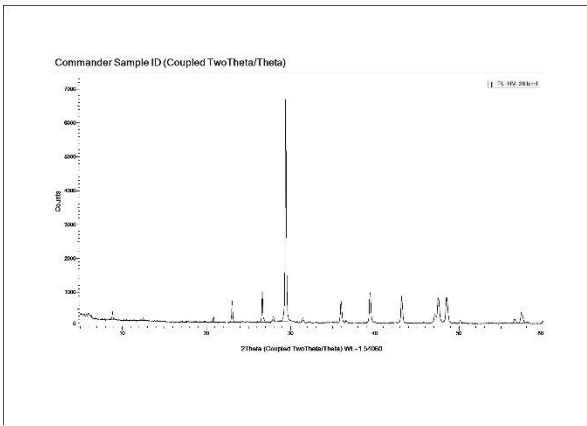
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_24



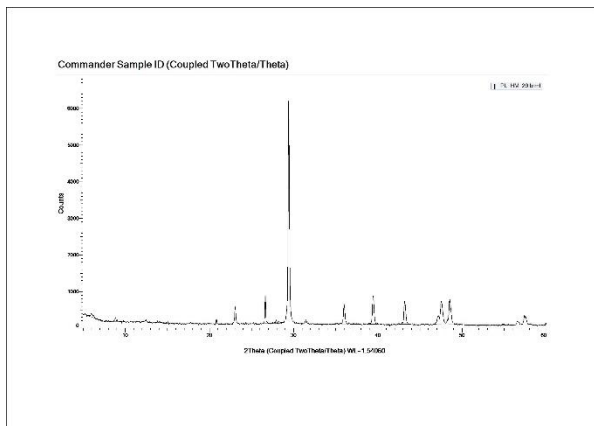
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_25



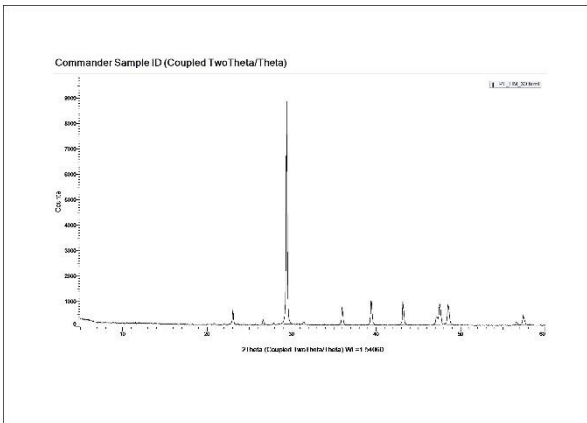
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_26



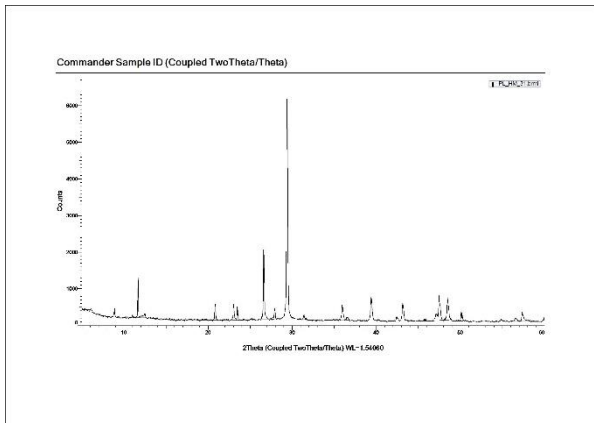
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_28



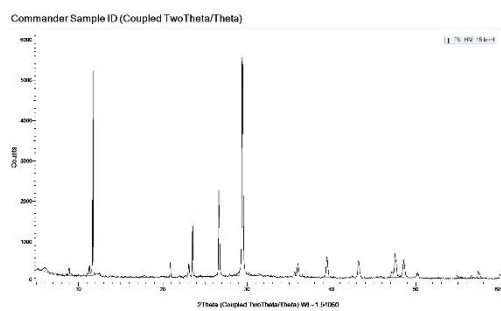
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_29



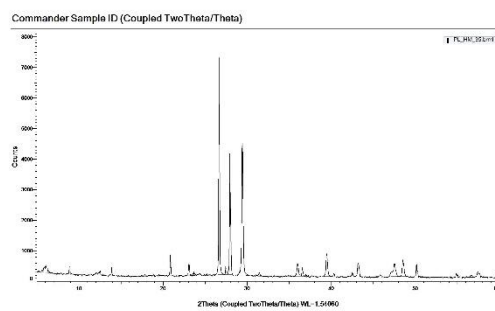
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_30



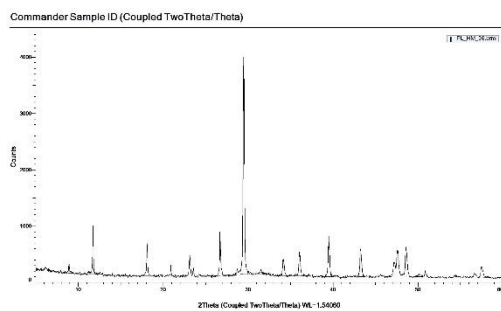
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_31



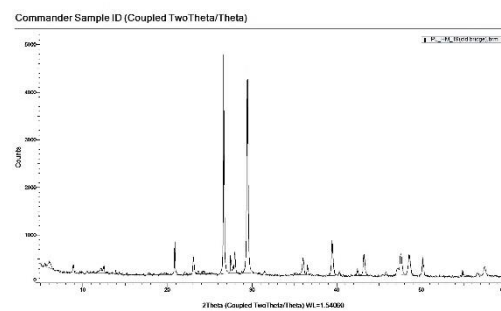
Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_15



Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_35



Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_56



Διάγραμμα XRD Δείγματος PI.HM_19

4.5 Αποτελέσματα Θερμοβαρουμετρικής και Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA-TG)

Η μέθοδος DTA-TG εφαρμόστηκε σε επιλεγμένα αντιπροσωπευτικά δείγματα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων σε σχέση με την επί της εκατό απώλεια μάζας ανά θερμοκρασιακό διάστημα για κάθε δείγμα που εξετάστηκε. Βάσει αυτών παρατίθεται μια σειρά από σχόλια, ανά γεωγραφική ομάδα δειγμάτων. Για την ερμηνεία των αναλύσεων λαμβάνουμε υπόψη μας τα παρακάτω.

- Το θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ 25 - 120 ° C αντιστοιχεί στο φυσικά προσροφημένο νερό των συστατικών του δείγματος, ενώ αυτό των 120 - 200 ° C αντιστοιχεί στα κρυσταλλικά νερά ενυδατωμένων αλάτων που περιέχονται στο μίγμα.
- Οι απώλειες βάρους στο διάστημα των 200 – 600 ° C που συνοδεύονται με ενδόθερμες κορυφές αποδίδονται στο χημικά δεσμευμένο νερό που μπορεί να προέρχεται από τις υδραυλικές αργιλοπυριτικές ενώσεις της συνδετικής μήτρας των κονιαμάτων. Στο ίδιο θερμοκρασιακό διάστημα απώλειες βάρους που προέρχονται από εξώθερμες κορυφές αντιστοιχούν σε οργανικά συστατικά του δείγματος. Στους 580 ° C εντοπίζεται η μετάπτωση α σε β του χαλαζία, η οποία δε συνοδεύεται από μεταβολή βάρους και άρα δεν παρατηρείται το φαινόμενο στην καμπύλη TG. Στους 400-520 ° C εντοπίζεται ενδόθερμη κορυφή, λόγω της αφυδάτωσης του πορτλαντίτη.
- Τέλος, οι απώλειες βάρους στο θερμοκρασιακό διάστημα 600 – 1000 ° C, αντιστοιχούν στη διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων του μίγματος, όπως ο ασβεστίτης (CaCO_3),. Βάσει στοιχειομετρίας και από την απώλεια βάρους σε αυτήν την περιοχή μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου που περιέχεται στο δείγμα, με εξαίρεση όταν παρατηρείται έντονη παρουσία πορτλαντίτη.

Γεωγραφική Θέση	Κωδικός δείγματος	Απώλεια μάζας ανά Θερμοκρασιακό Διάστημα				CO ₂ /H ₂ O	Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (%)
		<120	120-200	200-600	>600		
Δείγματα κεντρικού τόξου	PL.HM_1	3.16	1.6	5.24	18.83	3.59	42,80
	PL.HM_2	2.13	0.86	4.94	21.76	4.40	49,45
	PL.HM_3	2.83	2	5.29	15.15	2.86	34,43
	PL.HM_6	2.03	0.9	3.82	18.46	4.83	41,95
	PL.HM_8	3.21	1.44	7.53	18.32	2.43	41,64
	PL.HM_8_binder	3.06	1.42	7.59	16.91	2.23	38,43
	PL.HM_12	2.74	1.48	5.47	16.68	3.05	37,91
	PL.HM_17	1.7	0.64	2.81	20.75	7.38	47,16
	PL.HM_32	4,27	0,98	4,27	15,93	3,73	36,20
	PL.HM33_grey	1,75	0,8	3,8	18,8	4,95	42,73
	PL.HM33_white	16,98	2,86	7,05 (4,29 χωρίς πορτλαντίτη)	16,02	3,73	36,41
Δείγματα δυτικού βάθρου	PL.HM_34	12,36	2,66	3,96	10,82	2,73	24,59
	PL.HM_20	0.96	0.5	4.23	26.32	6.22	59,82
	PL.HM_21	1.13	0.4	3.68	23.13	6.29	52,57
	PL.HM_24	1.68	0.56	4.62	21.33	4.62	48,48
	PL.HM_26	0,19	0,27	4,08	40,13	9,84	91,20
	PL.HM_28	0,7	0,26	2,2	33,96	15,44	77,18
	PL.HM_29	1,02	0,58	2,61	32,44	12,43	73,73
Δείγματα ανατολικού βάθρου	PL.HM_15	2.63	1.64	5.98	19.65	3.29	44,66
	PL.HM_35	2,52	0,82	4,14	16,74	4,04	38,05
	PL.HM_36	2,27	1,79	4,33	24,14	5,58	54,86
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	PL.HM_19	1.12	0.46	2.48	19.44	7.84	44,18

Πίνακας 4. Αποτελέσματα θερμοβαρυντρικής ανάλυσης δειγμάτων.

Δείγματα κεντρικού τόξου

- Όλα, σχεδόν, τα δείγματα κονιαμάτων από το κεντρικό τόξο παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά φυσικά προσροφημένου νερού της τάξης του 1.70-4.27% (>1%) και τιμές χημικά δεσμευμένου νερού μεταξύ 3.80-7.59 %. Εξαιρέση παρουσιάζουν τα PL.HM_33_white και PL.HM_34, τα οποία παρουσιάζουν πού υψηλές τιμές φυσικά προσροφημένου νερού.
- Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, δηλαδή παρουσιάζουν υδραυλικό χαρακτήρα.
- Τα δείγματα PL.HM_8 και PL.HM_8_binder παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα. Αυτό εν μέρει δικαιολογείται από το υψηλό ποσοστό κονιάς στο ολικό δείγμα. Επιπρόσθετα, πιθανολογείται ότι

- Αυτά που διαφοροποιούνται αρκετά είναι τα δείγματα PL.HM_33_white και το PL.HM.34, τα οποία έχουν πολύ υψηλές τιμές φυσικά προσροφημένου νερού και υψηλή τιμή χημικά δεσμευμένου νερού.
- Το PL.HM_33_white παρουσιάζει έντονη κορυφή στα 460°, που δικαιολογείται από την ύπαρξη πορτλαντίτη, και αυξάνει το ποσοστό απώλειας βάρους στους 200 – 600 ° C στο 7,05.

Δείγματα δυτικού βάρους

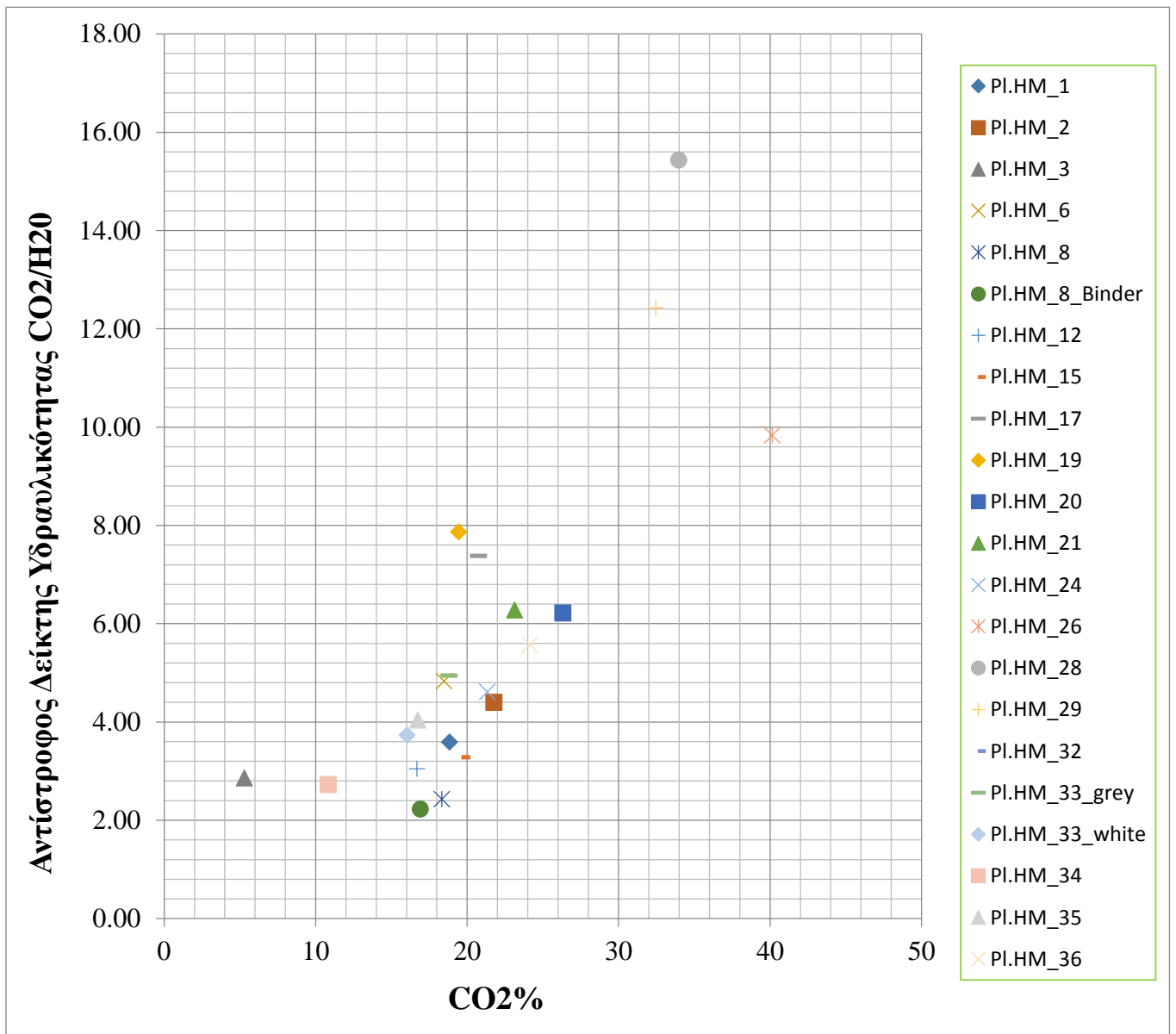
- Όλα τα δείγματα κονιαμάτων, εκτός του PL.HM_24, παρουσιάζουν χαμηλά ποσοστά φυσικά προσροφημένου νερού της τάξης του 0.68-1.68 και τιμές χημικά δεσμευμένου νερού μεταξύ 2.20-4.62 %.
- Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν σχετικά υψηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, δηλαδή δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα υδραυλικό χαρακτήρα.
- Το PL.HM_24 παρουσιάζει ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα δείγματα με τις υψηλότερες τιμές προσροφημένου και χημικά δεσμευμένου νερού, καθώς και το χαμηλότερο αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας.
- Το δείγμα σταλακτίτη PL.HM_26 που είναι καθαρός ασβεστίτης παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου.
- Από τα υπόλοιπα δείγματα, ξεχωρίζουν τα PL.HM_28 και PL.HM_29, με μεγαλύτερο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου και αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας. Η περιορισμένη ποσότητα δείγματος που ελήφθη επιφανειακά, σε συνδυασμό με την ύπαρξη μεγάλων ασβεστολιθικών αφρανών σε αυτό, πιθανά εξηγούν την ασβεστιτική τους φύση. Από την άλλη, στη συγκεκριμένη περιοχή της δειγματοληψίας, υπάρχει μια γεωμετρική διαφοροποίηση που εγείρει ερωτήματα για πιθανή πρότερη φάση της κατασκευής, οπότε για πιθανή διαφορετική σύνθεση του κονιάματος.

Δείγματα ανατολικού βάρους

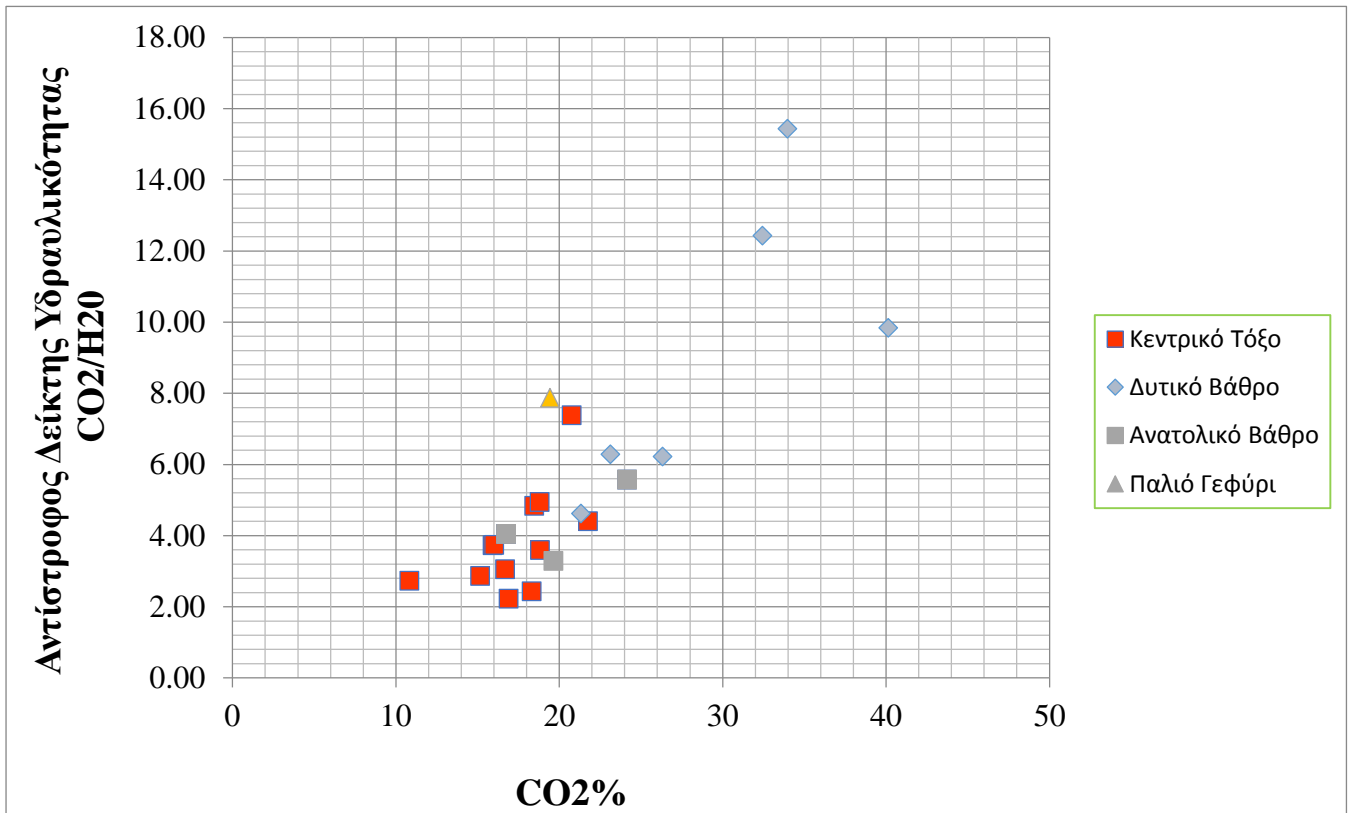
- Όλα τα δείγματα κονιαμάτων από το ανατολικό βάθρο παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά φυσικά προσροφημένου νερού της τάξης του 2.27- 2.63% (>1%) και τιμές χημικά δεσμευμένου νερού μεταξύ 4.14-5.98%.
- Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, δηλαδή παρουσιάζουν υδραυλικό χαρακτήρα, ομοιάζοντας με τα περισσότερα δείγματα του κεντρικού τόξου.

Δείγμα από παλαιότερο γεφύρι στον Άραχθο

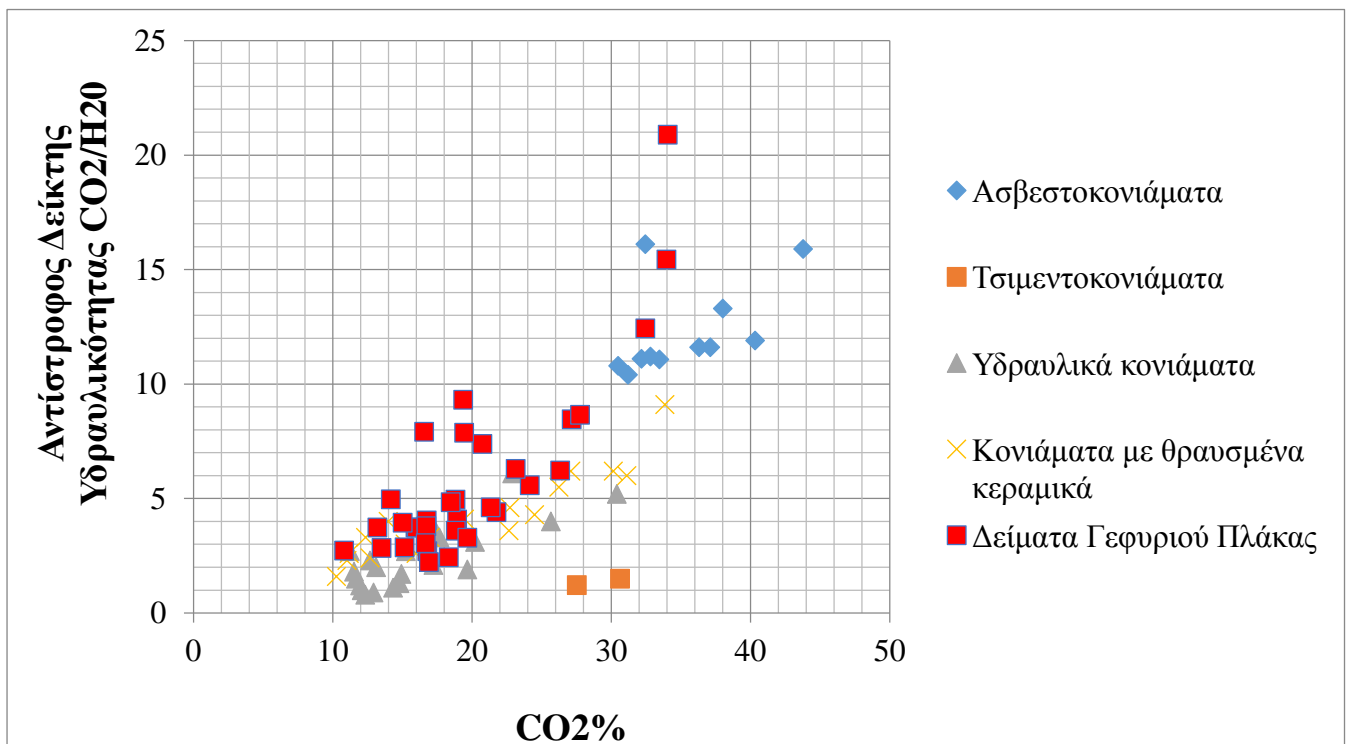
- Το δείγμα PL.HM_19, συγκρινόμενο με τα δείγματα του κεντρικού τόξου και του ανατολικού βάρους, έχει χαμηλότερα φυσικά προσροφημένο και χημικά δεσμευμένο νερό, ενώ παρουσιάζει, επίσης, μικρότερη υδραυλικότητα.



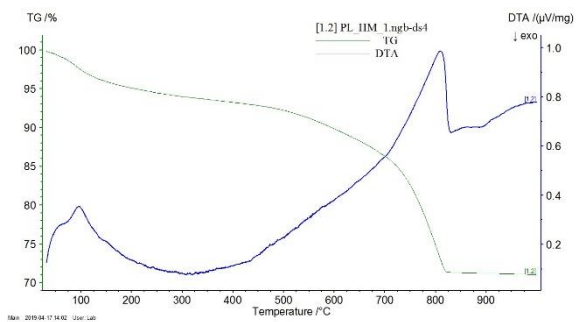
Διάγραμμα 3. Συσχέτιση αντίστροφου δείκτης υδραυλικότητας με την απώλεια CO₂.



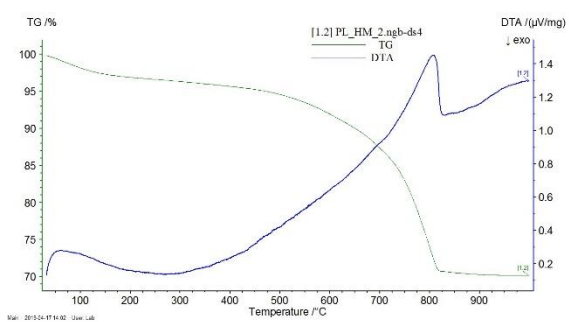
Διάγραμμα 4. Ομαδοποίηση των δειγμάτων ανά περιοχή για καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων στο διάγραμμα θερμικής ανάλυσης.



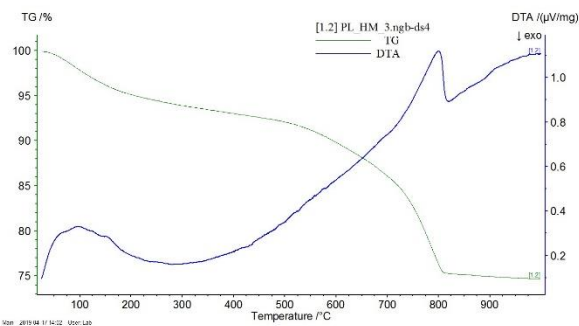
Διάγραμμα 5. Συσχέτιση όλων των δειγμάτων του γεφυριού, συμπεριλαμβανομένων των παλαιότερων μελετών, με διάφορες κατηγορίες κονιαμάτων στα αποτελέσματα του TG.



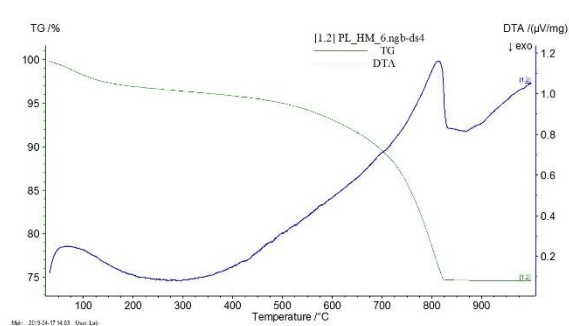
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_1



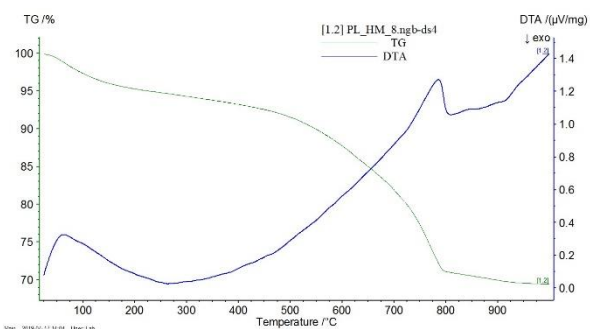
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_2



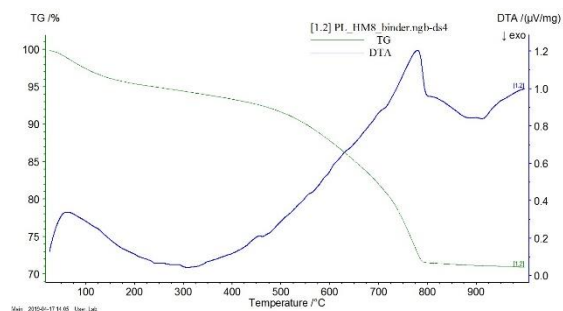
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_3



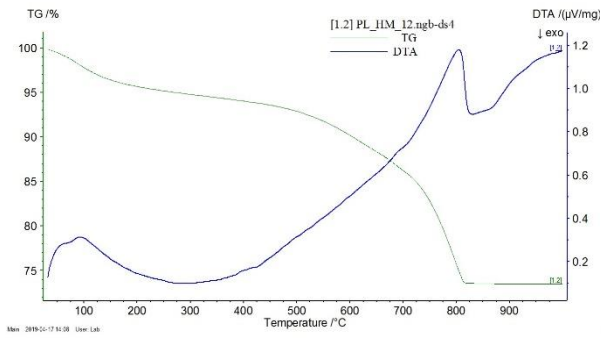
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_6



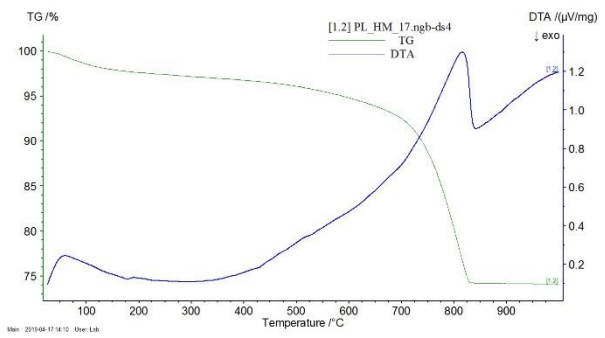
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_8



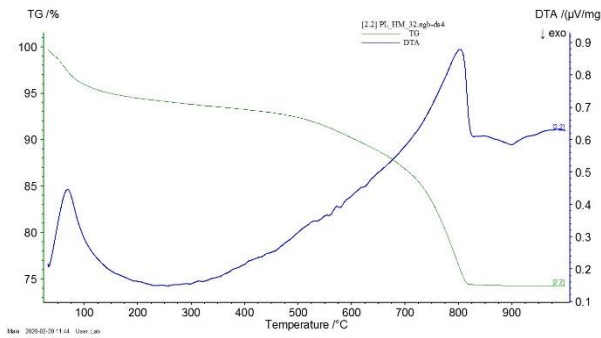
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PI.HM_8_binder



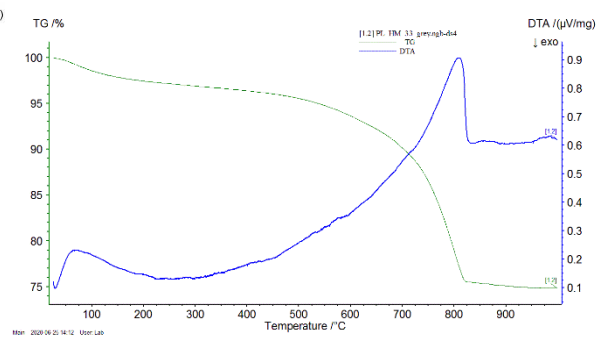
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_12



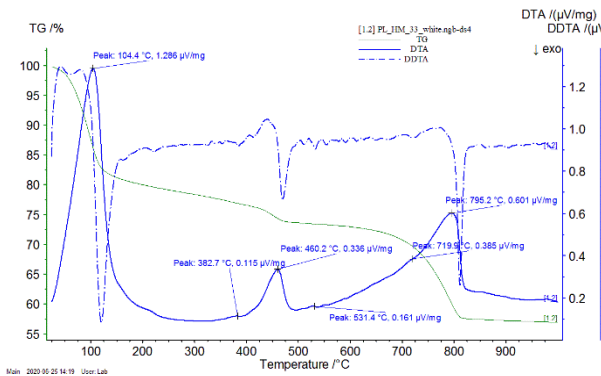
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_17



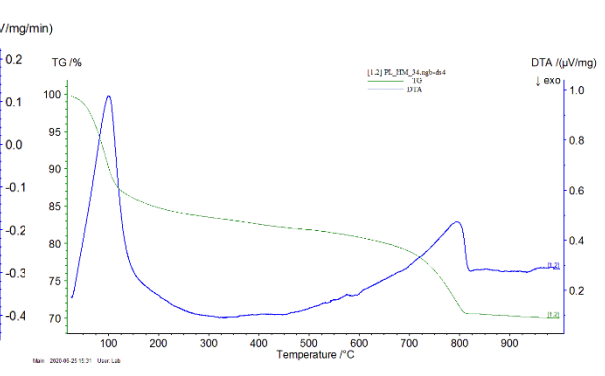
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_32



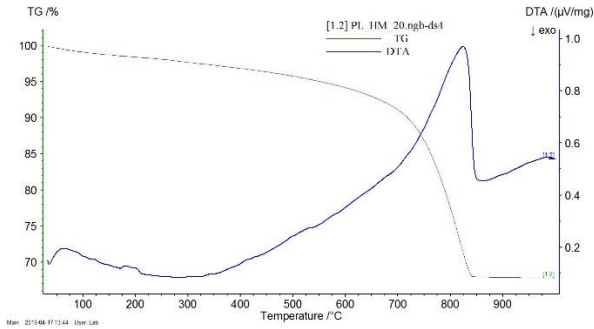
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_33_grey



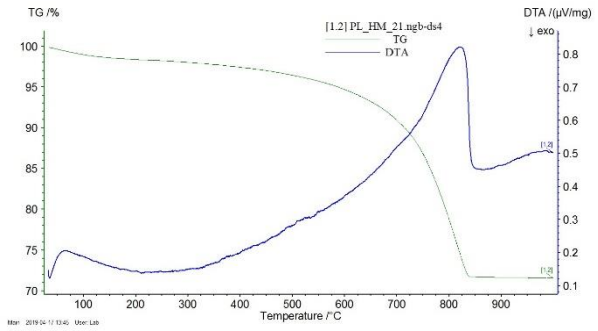
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_33_white



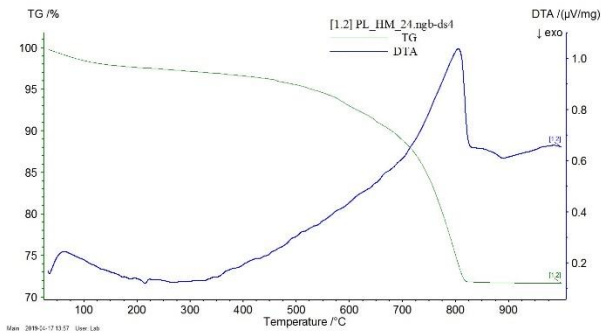
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_34



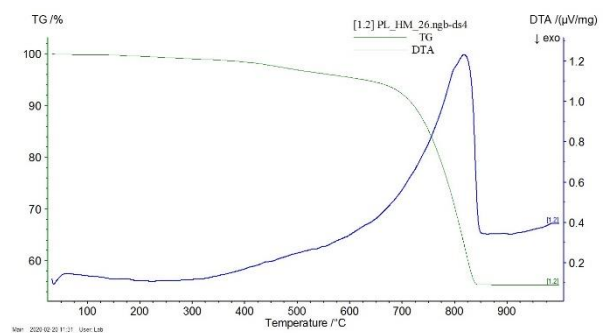
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_20



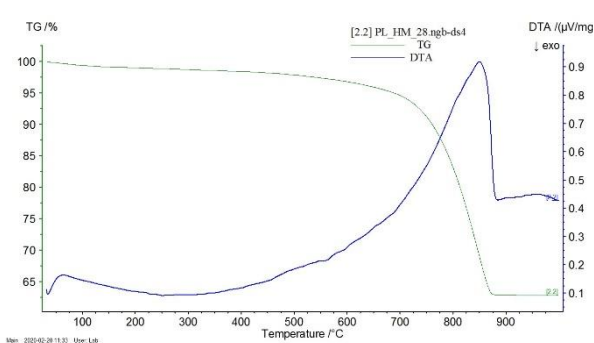
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_21



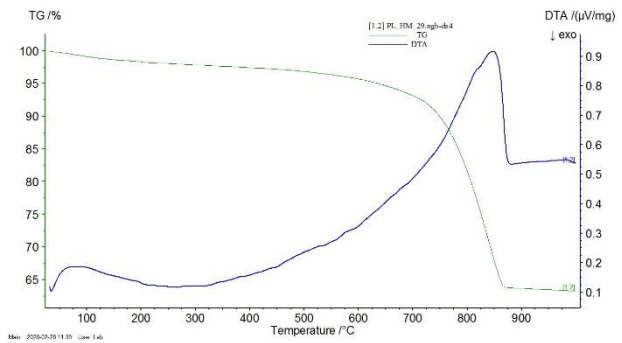
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_24



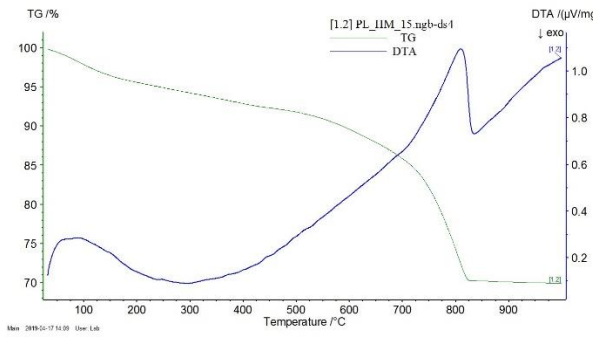
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_26



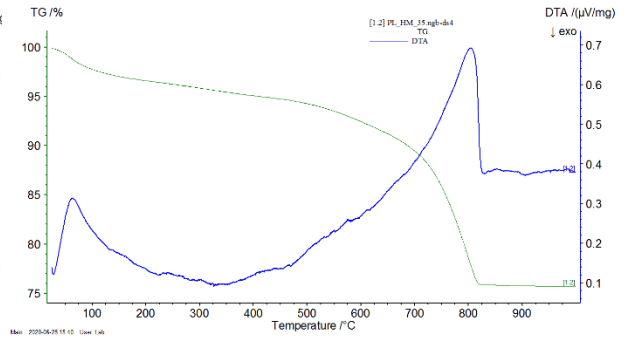
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_28



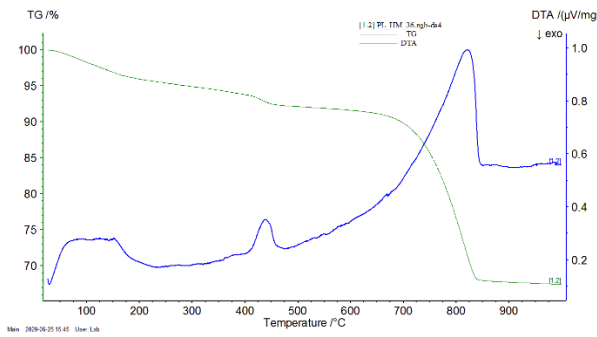
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PL.HM_29



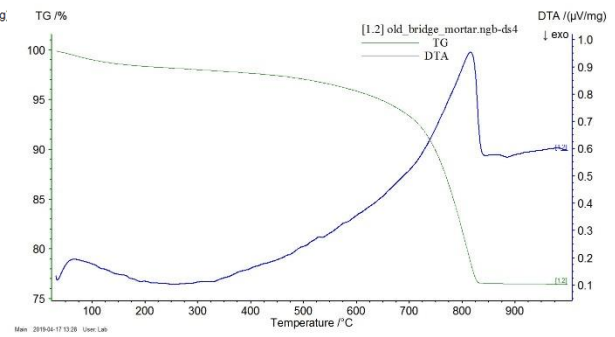
Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PLHM_15



Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PLHM_35



Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PLHM_36



Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης δείγματος PLHM_19

4.6 Αποτελέσματα Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (FT-IR)

Σε επιλεγμένα δείγματα πραγματοποιήθηκε φασματοσκοπική ανάλυση FT-IR με σκοπό την ανίχνευση ανόργανων και οργανικών ενώσεων. Στον Πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κορυφές που εντοπίστηκαν ανά δείγμα.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα FT-IR ανάλυσης των δειγμάτων.

ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ	ΔΕΙΓΜΑ	ΑΣΒΕΣΤΙΤ ΗΣ CaCO ₃ (Ce)	ΟΡΓΑΝΙΚΟ Ο ΥΛΙΚΟ (O)	ΑΡΓΙΛΟΠΥΡΙΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ	ΥΔΡΟΞΥΛΙΑ -OH	ΆΛΛΕΣ ΚΟΡΥΦΕΣ ΠΙΘΑΝΟΝ ΟΞΕΙΔΙΑ
Δείγματα κεντρικού τόξου	PL.HM_1	1430, 712, 870 1798, 2515	2947, 2921, 2853, 1733	1160, 1080, 1010, 513, 788	3438, 1630	451, 653
	PL.HM_6	1430, 712, 870 1798, 2515	2967, 2920, 2843	1160, 1080, 1010, 513, 797-777	3457, 1639	473, 451, 420
	PL.HM_8 TOT	1430, 712 875, 848 1799, 2515	2947, 2921, 2853	781, 1081, 1161	3438, 1630	461
	PL.HM_8 BINDER	1430, 712 875 1798, 2515	2947, 2921, 2853	1185, 1080, 787	1654, 1624, 3433	457
	PL.HM_8 BINDER AFTER HCl	1460	2947, 2921, 2853	1185, 1087, 797, 778	3622, 3438, 1640	576, 472, 420
Δείγματα δυτικού βάρθρου	PL.HM_12	1430, 712, 870 1798, 2515	2967, 2920, 1726	1180, 1080, 790-770	3571, 3438, 1623	457
	PL.HM_26	1430, 712, 870 1798, 2515	2955, 2920, 2854	1164, 1080, 787	3442	457
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	PL.HM_29	1430, 712, 870 1798, 2515	2955, 2920, 2854	1160, 1087, 1015	3438, 1629	450
	PL.HM_19	1430, 712, 870 1798, 2515	2931, 2859, 1737	1160, 1087, 1035, 792	3427, 1610-1630	647, 513, 461, 420

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Παρουσία ασβεστίτη

Η υπέρυθη φασματοσκοπία είναι τεχνική ευαίσθητη στην ανίχνευση της παρουσίας ανθρακικών αλάτων. Οι εμφανιζόμενες κορυφές οφείλονται στις δονήσεις του ανθρακικού ιόντος CO_3^{2-} . Υπάρχουν 4 τύποι δόνησης του ελεύθερου ανθρακικού ιόντος: i) η συμμετρική δόνηση τάσης $\nu_1[\text{CO}_3^{2-}]$, είναι ενεργή στο Raman και μη ενεργή στο IR στα 1080 cm^{-1} , ii) η ασύμμετρη εκτός επιπέδου (*out-of-plane*) κάμψη $\nu_2[\text{CO}_3^{2-}]$ στα 870 cm^{-1} , iii) η μη συμμετρική δόνηση τάσης $\nu_3[\text{CO}_3^{2-}]$ στα $1430\text{-}1440 \text{ cm}^{-1}$ και iv) η $\nu_4[\text{CO}_3^{2-}]$ που διακρίνεται στη συμμετρική εντός επιπέδου (*in plane*) δόνηση κάμψης του δεσμού C-O στο ανθρακικό ιόν και στη δόνηση του δεσμού Ca-O στα 712 cm^{-1} ^{2 3}.

Οι εμφανιζόμενες κορυφές σε όλα τα δείγματα από το Γεφύρι της Πλάκας επιβεβαιώνουν την παρουσία ανθρακικού ασβεστίου με την κρυσταλλική δομή ασβεστίτη. Υπάρχει, ακόμη, σε κάποια δείγματα και μια κορυφή που εμφανίζεται περί τα 1799 cm^{-1} , η οποία αποδίδεται στην $\nu_1+\nu_4$ ταινία απορρόφησης και προέρχεται από τον συνδυασμό του ασβεστίτη (*combination band*). Μία ακόμη ταινία συνδυασμού, η $2\nu_2 + \nu_4$ εντοπίζεται στα 2515 cm^{-1} . Οι σχετικές θέσεις των εμφανιζόμενων κορυφών για κάθε δείγμα απεικονίζονται στον Πίνακα 5.

Παρουσία αργιλοπυριτικών ενώσεων

Όσον αφορά στη φασματική περιοχή $1000\text{-}1100 \text{ cm}^{-1}$ των ληφθέντων φασμάτων, παρουσιάζονται χαμηλής έως μεσαίας έντασης κορυφές που υποδεικνύουν την παρουσία αργιλοπυριτικού περιεχομένου (*clay minerals*)⁴. Αυτή είναι η περιοχή εμφάνισης των δονήσεων τάσης των Si-O και Al-O δεσμών, ενώ η περιοχή εμφάνισης των αντίστοιχων δονήσεων κάμψης είναι στα $150\text{-}600 \text{ cm}^{-1}$. Ειδικότερα, οι ταινίες απορρόφησης που παρατηρούνται περίπου στα 1085 cm^{-1} θα μπορούσαν να αποδοθούν στις μη συμμετρικές δονήσεις τάσης $\nu\text{Si-O}$ του χαλαζία. Η διπλή ταινία που παρατηρείται στα 796 και 778 cm^{-1} είναι χαρακτηριστική του χαλαζία και αντιστοιχεί στις δονήσεις τάσης $\nu\text{Si-O}$. Αυτή εμφανίζεται είτε ως διπλή είτε ως ευρεία κορυφή περί τα $780\text{-}790 \text{ cm}^{-1}$ στα φάσματα όλων των δειγμάτων. Η ξεκάθαρα διπλή κορυφή του χαλαζία εμφανίζεται στα δείγματα PL.HM_6, PL.HM_8_binder μετά την επίδραση του HCl και στο PL.HM_12. Άλλες ζώνες απορρόφησης που σχετίζονται με την παρουσία αργιλοπυριτικών ενώσεων εντοπίζονται στα 1160 και 1010 cm^{-1} ⁵. Ασθενείς κορυφές κάτω από τα 600 σχετίζονται με τις δονήσεις κάμψης $\delta\text{Si-O}$, αλλά και με την παρουσία οξειδίων του σιδήρου⁶. Η σαφής διάκριση δεν είναι εύκολη, λόγω παρουσίας θορύβου σε αυτήν την περιοχή των φασμάτων. Στα δείγματα PL.HM 26 και 29 φασματοσκοπικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ύπαρξη αργιλοπυριτικών εμφανίζονται πολύ ασθενή, σε σύμπνοια με τις XRD αναλύσεις.

Παρουσία οργανικού υλικού και υδροξυλίων

Οι ταινίες απορρόφησης που εμφανίζονται στις περιοχές των 2920 cm^{-1} και 2850 cm^{-1} στα φάσματα των δειγμάτων αποδίδονται στις μη συμμετρικές και συμμετρικές δονήσεις τάσης των αλειφατικών μεθυλενομάδων νCH_2 . Οι αντίστοιχες απορροφήσεις των μεθυλομάδων αναμένονται περίπου στα $\nu_{as}\text{CH}_3$ 2960 cm^{-1} και $\nu_s \text{CH}_3$ 2870 cm^{-1} . Η ασθενής παρουσία αυτών σε όλα τα δείγματα σχετίζεται με

² Lucia Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L.M. Morales and Sagrario Martínez-Ramírez (2012). Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials, Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.), ISBN: 978-953-51-0537-4, InTech.

³ Gunasekaran, S.& Anbalagan, G. (2007), Spectroscopic characterization of natural calcite minerals, Spectrochimica Acta Part A 68, pp 656–664.

⁴ Lenka Vaculikova&Eva Plevova (2005), Identification of clay minerals and micas in sedimentary rocks, Acta Geodyn. Geomater., Vol.2, No.2 (138), 167-175.

⁵ Χειλάκου Διδακτορική διατριβή, Η εφαρμογή των Φασματοσκοπικών και μη καταστρεπτικών μεθόδων στον χαρακτηρισμό, τον έλεγχο της φθοράς και τη συντήρηση-αποκατάσταση ιστορικών έργων, ΕΜΠ, 2012.

⁶ Cenestar, C. & Pons, C. (2005), Earth pigments in painting: characterization and differentiation by means of FTIR spectroscopy and SEM-EDS microanalysis, Anal Bioanal. Chem. 382 pp 269-274.

την παρουσία οργανικού υλικού (κοινές απορροφήσεις για πολλά οργανικά συνδετικά και πρόσθετα στην αρχιτεκτονική αλλά και εν γένει σε ατμοσφαιρικής προέλευσης ή λόγω μικροοργανισμών) και συνήθως η παρουσία τους στα μνημεία αστικού περιβάλλοντος αποδίδεται βιβλιογραφικά στην ατμοσφαιρική επίδραση⁷. Εδώ τόσο εξωγενείς παράγοντες όσο και ενδογενείς είναι πιθανοί. Στην φασματική περιοχή μεταξύ 3400-700 cm^{-1} , οι ταινίες απορρόφησης που παρατηρούνται σε όλα τα φάσματα αποδίδονται στις δονήσεις τάσης των ομάδων νOH. Οι αντίστοιχες δονήσεις κάμψης εντοπίζονται περί τα 1630-1650 cm^{-1} .

Η περιοχή αυτή αποτέλεσε αντικείμενο διερεύνησης καθώς σκοπός της FTIR ανάλυσης ήταν η ανίχνευση οργανικών ουσιών που θα επιβεβαίωναν τη χρήση αυγού στα κονιάματα του γεφυριού, πρωτίστως πρωτεϊνικών συστατικών. Σε αυτή την περιοχή περιμένουμε την ευρεία ταινία στα 1645 cm^{-1} γνωστή και ως Amide I που αποτελεί την εντονότερη ταινία απορρόφησης που δίνουν οι πρωτεΐνες στα φάσματά τους και αντιστοιχεί κύρια στις δονήσεις τάσης νC=O του καρβονυλίου των ομάδων αμιδίου -CONH-. Άλλες χαρακτηριστικές κορυφές εμφανίζονται περίπου στα 1550 cm^{-1} (Amide II) και στα 1230 cm^{-1} (Amide III), ενώ συνήθως υπάρχει και απορρόφηση λόγω δόνησης τάσης του N-H δεσμού στα 3350 cm^{-1} (Derrick, 1999).

Σε τρία δείγματα εμφανίζεται και ασθενής κορυφή κοντά στα 1730 cm^{-1} (PL.HM_1, 12, 19) που επίσης μπορεί να σχετίζεται με την παρουσία οργανικού υλικού, αφού εκεί εντοπίζεται η δόνηση τάσης του καρβονυλικού δεσμού των εστέρων (νC=O). Η τελευταία συνδέεται με την παρουσία εστερικών χοληστερικών ομάδων οξειδωμένων μορίων χοληστερόλης⁸.

Βάσει των παραπάνω, η σαφής απόδοση απορροφήσεων σε οργανικό υλικό που να χρησιμοποιήθηκε εγγενώς στην σύνθεση του κονιάματος δεν είναι εφικτή.

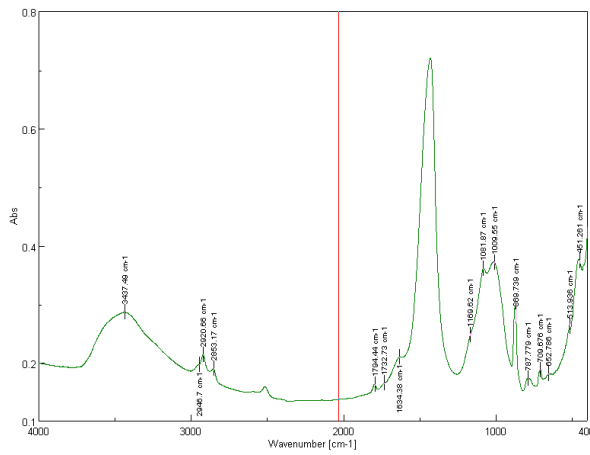
Δείγμα PL.HM. 8

- Στο δείγμα PL.HM.8 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις FTIR τόσο για το σύνολο του κονιάματος, όσο και για το κλάσμα κονιάς· στο τελευταίο πραγματοποιήθηκε και προσβολή με διάλυμα HCl, προκειμένου να μειωθεί η ένταση της κύριας ταινίας απορρόφησης του ασβεστίτη στα 1400-1600 cm^{-1} και να διερευνηθεί η ύπαρξη άλλων κορυφών που μπορεί να σχετίζονται με την παρουσία αυγού, δηλ. πρωτίστως πρωτεϊνικού υλικού, σε μια προσπάθεια επαλήθευσης του σχετικού μύθου. Με την χρήση υδροχλωρικού η ένταση της ταινίας του ασβεστίτη στα 1440 cm^{-1} περίπου μειώνεται αλλά, πιθανόν απαιτούνταν περαιτέρω προσβολή για την πλήρη εξάλειψη του Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν αύξηση της έντασης στα 1640 cm^{-1} και εμφάνιση μιας μικρότερης κορυφής στα 1680 cm^{-1} περίπου. Αυτά τα φασματοσκοπικά δεδομένα δεν επαρκούν για ταυτοποίηση οργανικού υλικού.
- Είναι ενδιαφέρον το ότι και στο κλάσμα της κονιάς είναι έντονη η παρουσία αργιλοπυριτικών συστατικών τόσο πριν όσο και μετά την προσβολή με οξύ, με ξεκάθαρη την παρουσία χαλαζία. Δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των φασμάτων συνόλου και κονιάς δείγματος, όπως αντίστοιχα και στο XRD ήταν έντονη η παρουσία χαλαζία και παρόμοια τα ακτινοδιαγράμματα και των δύο. Θεωρητικά το κλάσμα της κονιάς θα πρέπει να περιέχει μόνο ασβεστίτη σε ένα καθαρά ασβεστιτικό κονίαμα. Είναι πιθανό κατά την κοκκομετρική ανάλυση και διαχωρισμό των κλασμάτων, ένα ποσοστό από αργιλοπυριτικά αδρανή να πέρασε στο κλάσμα των κάτω από 63 μm . Είναι, όμως βάσιμο εφόσον το δείγμα παρουσιάζει και την υψηλότερη υδραυλικότητα βάσει των DTA-TG αποτελεσμάτων η παρουσία των αργιλοπυριτικών να σχετίζεται με την εγγενή ύπαρξη του στο υλικό. Η ανίχνευση μπορεί να

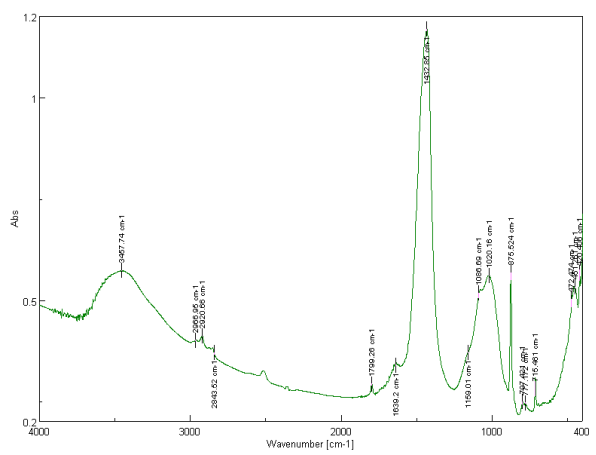
⁷ Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2005). Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin. *Analytica chimica acta*, 532(2), 187-198.

⁸ Sotiropoulou, S., Papliaka, Z. E., & Vaccari, L. (2016). Micro FTIR imaging for the investigation of deteriorated organic binders in wall painting stratigraphies of different techniques and periods. *Microchemical Journal*, 124, 559-567.

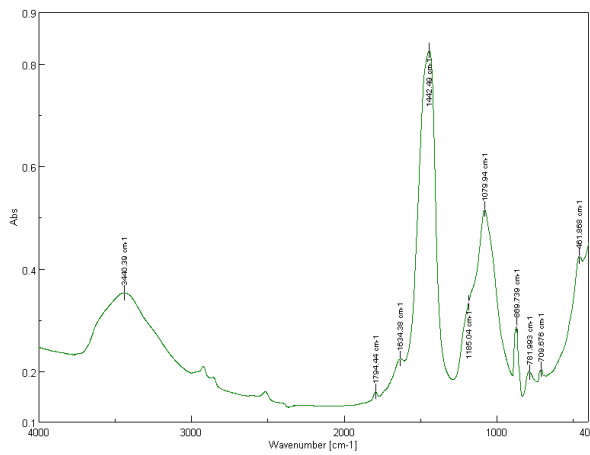
προέρχεται είτε από την παρουσία τους στον ασβεστόλιθο που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του ασβέστη, είτε στη χρήση ειδικού ποζολανικού πρόσθετου.



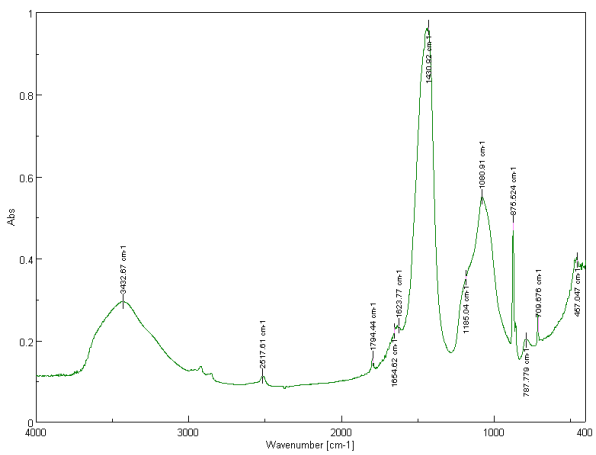
Διάγραμμα FTIR PLHM_1



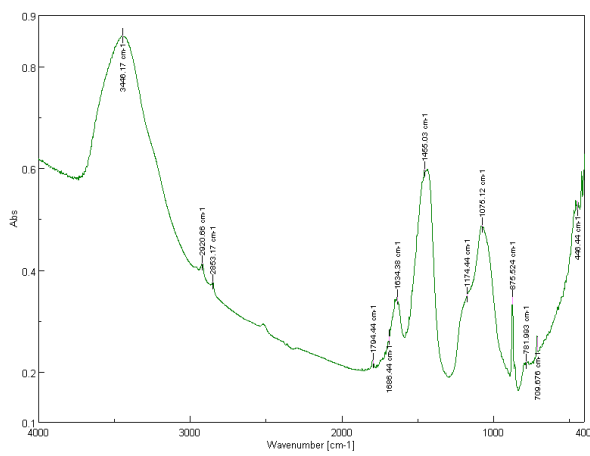
Διάγραμμα FTIR PLHM_6



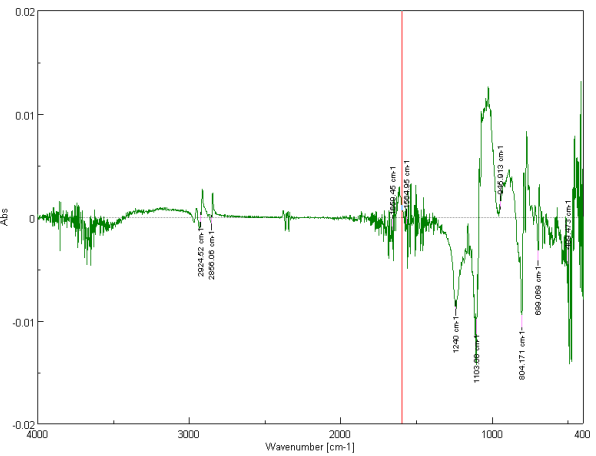
Διάγραμμα FTIR PLHM_8_total



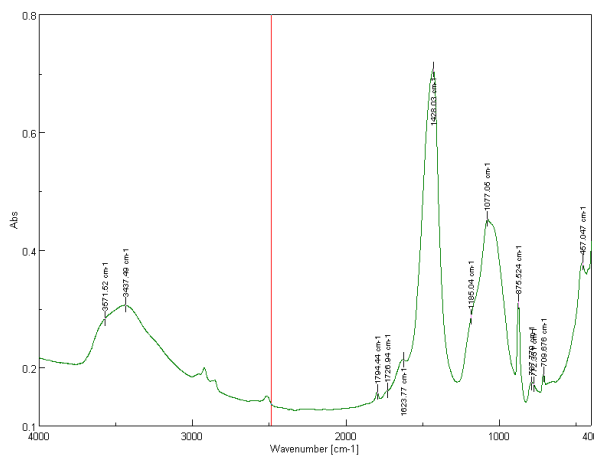
Διάγραμμα FTIR PLHM_8_binder



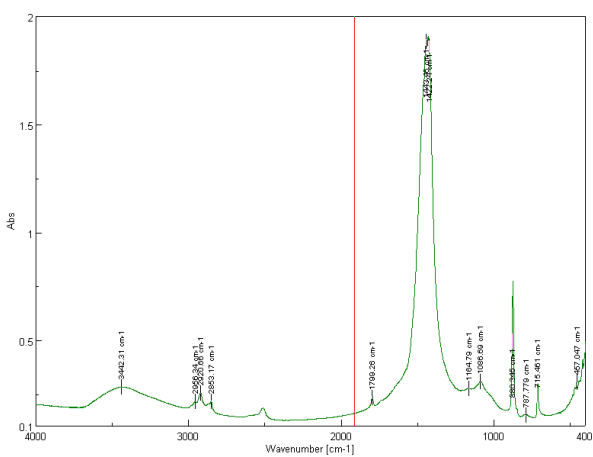
Διάγραμμα FTIR PLHM_8_binder_HCL



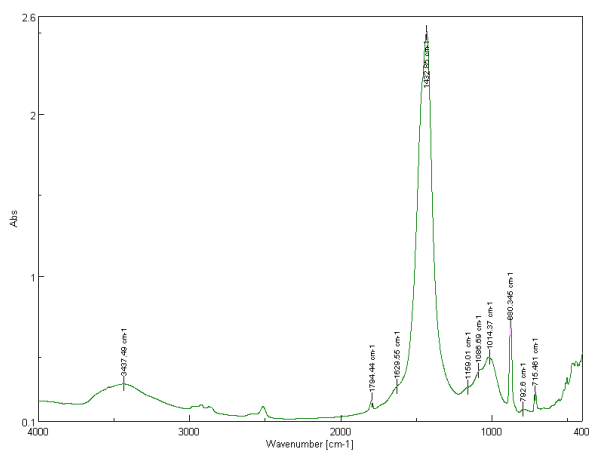
Διάγραμμα 1ης παραγώγου FTIR PLHM_8_binder_HCL



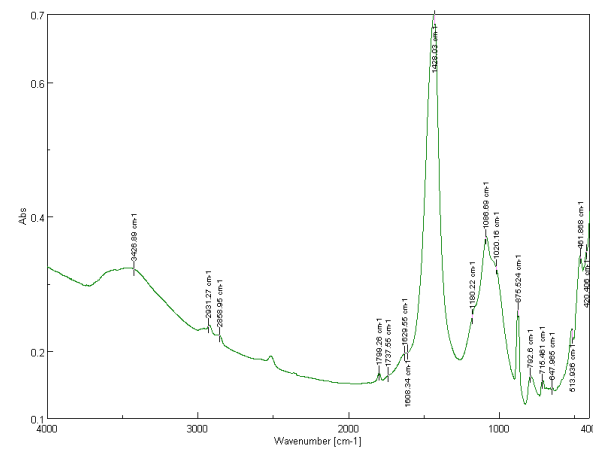
Διάγραμμα FTIR PI.HM_12



Διάγραμμα FTIR PI.HM_26



Διάγραμμα FTIR PI.HM_29



Διάγραμμα FTIR PI.HM_19

4.7 Δοκιμή Εμβάπτισης- Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και ολικού Ανοιχτού Πορώδους προσβάσιμου στο νερό

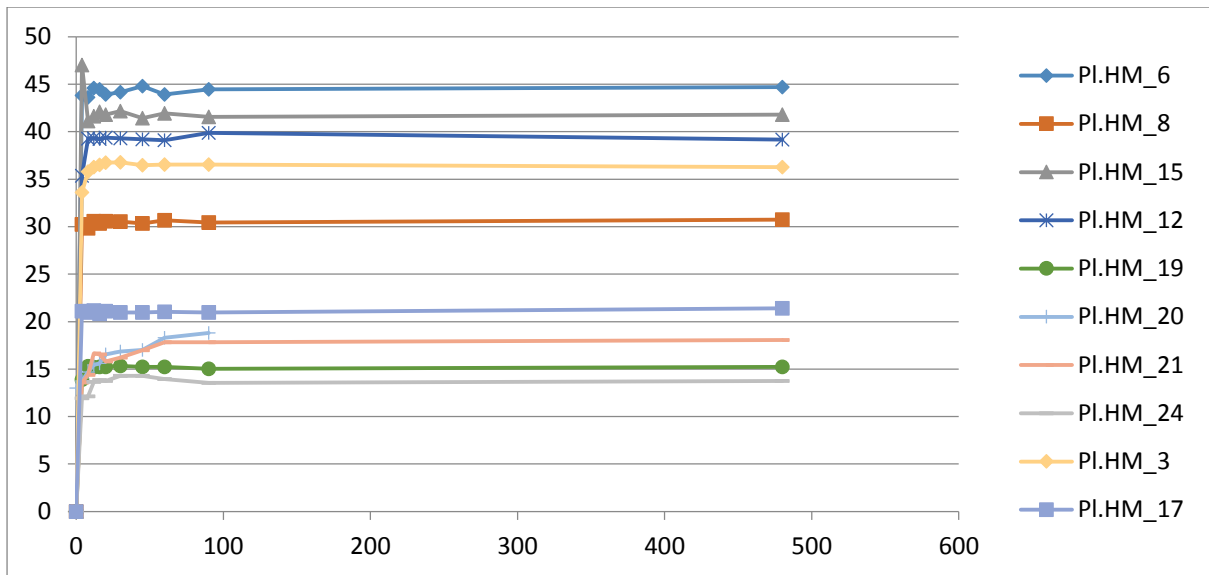
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα τις πειραματικής διαδικασίας και το διάγραμμα ποσοστού απορρόφησης νερού για κάθε δείγμα. Τα δείγματα που δοκιμάστηκαν είναι μόνο εκείνα που είχαν το απαιτούμενο μέγεθος για την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας.

Γεωγραφική θέση δείγματος	Κωδικός Δείγματος	WAC	Ανοιχτό Πορώδες (%)	Πυκνότητα
Δείγματα κεντρικού τόξου	PL.HM_3	36.86	35.03	0.96
	PL.HM_6	48.69	53.88	1.15
	PL.HM_8	32.04	39.06	1.24
	PL.HM_12	41.2	47.29	1.17
	PL.HM_17	24.24	36.89	1.58
Δείγματα δυτικού βόθρου	PL.HM_20	19.01	31.05	1.65
	PL.HM_21	23.68	26.77	1.16
	PL.HM_24	21.34	27.56	1.4
	PL.HM_15	50.36	42.85	0.96
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	PL.HM_19	16.51	24.67	1.61

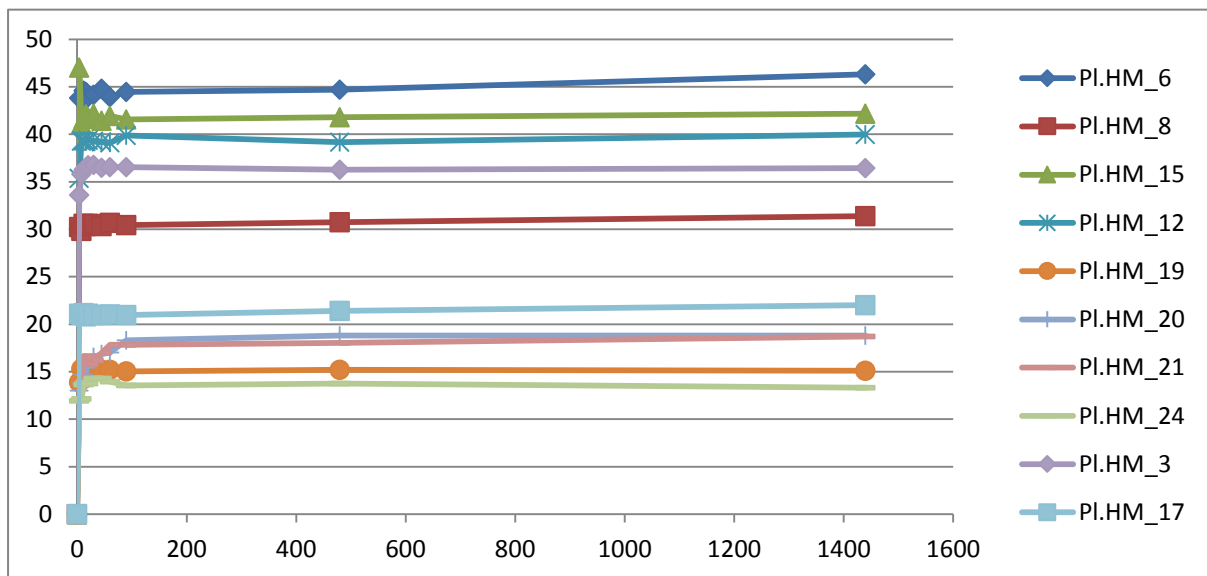
Πίνακας 6. Αποτελέσματα δοκιμών ολικής εμβάπτισης των κονιαμάτων σε νερό.

- Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνουμε ότι τα ποσοστά ροφημένου νερού των κονιαμάτων κυμαίνονται στο 25-55%, ενώ τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης σε νερό την επιδεικνύει το κονίαμα PL.HM_6, με τη μεγαλύτερη τιμή ανοικτού πορώδους.
- Σε γενικές γραμμές, οι σχετικά χαμηλές τιμές της φαινόμενης πυκνότητας δείχνουν ότι πρόκειται για ελαφροβαρή κονιάματα, γεγονός που σχετίζεται και με το υψηλό πορώδες, όπως επίσης και με την πιθανή ύπαρξη ελαφροβαρών αδρανών.
- Τα δείγματα PL.HM_19,20,21 και 24 παρουσιάζουν το πιο χαμηλό πορώδες με τιμές 24.67-31.05 % και συντελεστή απορρόφησης 16.51-23.68 %.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος, το PL.HM_15 είχε σημαντική απώλεια μάζας.



Διάγραμμα 6. Καμπύλες απορρόφησης νερού, μέσω ολικής εμβάπτισης, για τις 8 πρώτες ώρες.



Διάγραμμα 7. Καμπύλες απορρόφησης νερού, μέσω ολικής εμβάπτισης, για τις 24 ώρες.

4.8 Προσδιορισμός Διαλυτών Αλάτων και ΡΗ – Ποιοτική Ανίχνευση Ανιόντων

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα του πειραματικού προσδιορισμού των διαλυτών αλάτων σε επιλεγμένα δείγματα, καθώς και ποιοτική ανίχνευση των ανιόντων.

Τα περισσότερα δείγματα παρουσιάζουν σημάδια φθοράς, δεδομένου ότι βρίσκονται πολύ κοντά ή υπερβαίνουν το 3% των διαλυτών αλάτων, με πιο υψηλά ποσοστά στα Pl.HM_3, Pl.HM_15, Pl.HM_1, Pl.HM_31, ακολούθως. Τα υψηλά ποσοστά των Pl.HM_3 και Pl.HM_15 πιθανότατα σχετίζονται και με τις υψηλές κορυφές γύψου που βέθηκαν στα ίδια δείγματα στο XRD και τις καμπύλες TG-DTA.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα ποσοτικού και ποιοτικού προσδιορισμού αλάτων και μετρήσεις ΡΗ.

Γεωγραφική θέση	Κωδικός Δείγματος	TSS(%)	pH	Cl-
Δείγματα κεντρικού τόξου	Pl.HM_1	4,23	9,39	+++
	Pl.HM_2	2,63	8,62	++
	Pl.HM_3	5,74	9,77	+++
	Pl.HM_6	2,72	8,98	++
	Pl.HM_8	3,24	8,75	++
	Pl.HM_12	3,76	9,47	++
	Pl.HM_17	2,82	8,86	++
	Pl.HM_18	2,62	9,06	++
Δείγματα δυτικού βάθρου	Pl.HM_20	2,79	8,67	++
	Pl.HM_21	2,79	9,16	+++
	Pl.HM_22	3,16	9,45	+++
	Pl.HM_23	2,72	9,19	++
	Pl.HM_24	2,77	9,07	+++
	Pl.HM_25	2,73	9,15	+++
	Pl.HM_26	2,57	9,53	++
	Pl.HM_28	2,63	9,08	+
	Pl.HM_29	2,99	9,15	++
	Pl.HM_30	2,55	9,23	++
	Pl.HM_31	4,11	9,75	++++
Δείγμα ανατολικού βάθρου	Pl.HM_15	4,60	9,69	++++
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	Pl.HM_19	2,70	9,11	++

4.9 Προσδιορισμός εφελκυστική αντοχής με τη Μέθοδο των Θραυσμάτων

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα της εφελκυστικής αντοχής που πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με τη διάταξη Κατσαραγάκη-Τάσσιου στο «Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος». Τα δείγματα που δοκιμάστηκαν είναι μόνο εκείνα που είχαν το απαιτούμενο μέγεθος για την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα περισσότερα δείγματα έχουν αρκετά κοντινές τιμές, με το μέσο όρο περίπου 0,34 MPa. Μικρή διαφορά παρουσιάζει το Pl.HM_24, το οποίο έχει τη μεγαλύτερη τιμή (0,52 MPa), που πιθανά να σχετίζεται με χρήση τσιμέντου ή άλλης κονίας, καθώς πιθανότατα αποτελεί μεταγενέστερο κονίαμα αρμολογήματος. Τέλος, δεν παρατηρείται συσχέτιση των αντοχών με το δείκτη αντίστροφης υδραυλικότητας.

Πίνακας 8.

Fragment Test				
Γεωγραφική θέση	Κωδικός Δείγματος	F (N)	A (m ²)	S(MPa)
Δείγματα κεντρικού τόξου	Pl.HM_8	150,58	0,000460	0,33
	Pl.HM_12	157,2	0,000890	0,18
	Pl.HM_18	141,34	0,000394	0,36
Δείγματα δυτικού βάθρου	Pl.HM_20	63,21	0,000221	0,29
	Pl.HM_21	72,06	0,000200	0,36
	Pl.HM_24	85,73	0,000164	0,52
Δείγματα ανατολικού βάθρου	Pl.HM_15	588,83	0,001480	0,40
Δείγμα προγενέστερου γεφυριού	Pl.HM_19	161,75	0,000556	0,29

4.10 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Από τις παραπάνω αναλύσεις, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά: Πρόκειται για ασβεστίτικα κονιάματα με υδραυλικό χαρακτήρα, μικρή φαινόμενη πυκνότητα και υψηλό πορώδες. Τα αδρανή φαίνεται να έχουν συλλεχθεί από το ποτάμι και να έχουν κυρίως αργιλοπυριτική σύσταση. Τα δείγματα που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα: PI.HM_1, 2, 3, 6, 8, 12, 15, 17, 31, 32, 33_grey, 34, 35 και 36 και για λόγους ευκολίας, κατηγοριοποιούνται με τον τίτλο: «Κοινό ιστορικό κονίαμα». Δεδομένου ότι όλα τα παραπάνω δείγματα ανήκουν σε διαφορετικά σημεία του γεφυριού, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφοροποιήσεις του κονιάματος στο σύνολο της αρχικής κατασκευής.

Ο υδραυλικός χαρακτήρας μπορεί να εξηγηθεί με κάποιο ποζολανικό πρόσθετο, κάτι που θα μπορούσε να εξηγήσει και τη μικρή φαινόμενη πυκνότητα, αλλά και την έντονη παρουσία χαλαζία, ακόμα και στην κονία (κάτω των 62 μm) του δείγματος PI.HM_8. Η υπόθεση αυτή μπορεί να τεκμηριωθεί και από τον πετρογραφικό χαρακτηρισμό που έγινε σε δείγματα του γεφυριού το 2015 και ανιχνεύει φυσική ποζολάνη σε σειρά δειγμάτων, αλλά και ελαφροβαρή αδρανή (κίσηση)⁹. Εξάλλου, η ποζολάνη δεν είναι άγνωστη σε μελετητές της παραδοσιακής γεφυροποιίας, όπως το Σ. Μαντά, καθώς στη χρήση της είχαν αναφερθεί κατά καιρούς γηραιοί τεχνίτες της Ηπείρου¹⁰. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι την περίοδο που χτιζόταν το γεφύρι οι φυσικές ποζολάνες σε Ελλάδα και Ιταλία είχαν αρχίσει να αναγνωρίζονται και βιομηχανικά ως σημαντικός εξορυξίμος ορυκτός πλούτος για την κατασκευή υδραυλικών έργων αρχικά και για την παρασκευή τσιμέντου στη συνέχεια. Ο παράγοντας της μεταφοράς και του κόστους αποτελούν τα βασικά αντεπιχειρήματα, καθώς αν και άλλα υλικά, όπως ο χάλυβας είχαν έρθει από πολύ μακρινές περιοχές, στην περίπτωση της ποζολάνης, θα πρέπει να υπολογίζουμε πως το φορτίο που θα απαιτούνταν για τη συνολική κατασκευή μπορεί να έφτανε και τους 100 τόνους¹¹. Ωστόσο, αν η αναλογία ποζολάνης:ασβέστη ήταν μικρότερη από 1:1 και αν δε χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα τμήματα της κατασκευής, το φορτίο μπορεί να ήταν πολύ μικρότερο, της τάξης των 20 τόνων. Δεν παύει, παρόλα αυτά, να αποτελεί μια μεγάλη ποσότητα που θα έπρεπε να μεταφερθεί από ένα μακρινό σημείο (Κυκλάδες ή Ιταλία), καθώς δεν υπάρχουν αναφορές για φυσική ποζολάνη σε κοντινότερες περιοχές. Στην υπόθεση αυτή, θα πρέπει να προστεθεί η ένδειξη παρουσίας λευκίτη, ως δευτερεύουσας κορυφής στο διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X στην κονία του PI.HM_8, ένα ορυκτό το συνδέεται με φυσικές ποζολάνες της Ιταλίας. Επιπρόσθετα, η παρουσία περιοχών αντίδρασης στην κονία, καθώς και άμορφων σχηματισμών που εντοπίστηκαν κατά την πετρογραφική ανάλυση, συνηγορούν στο σενάριο αυτό.

Οι χαμηλές τιμές φαινόμενης πυκνότητας, όπως αναφέραμε, μπορούν να εξηγηθούν από την παρουσία φυσικών ελαφροβαρών πρόσθετων. Σε διαφορετική περίπτωση, ή συνδυαστικά, μπορεί επίσης να εξηγηθεί από την ίδια τη φύση των πιο λεπτόκοκκων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν ή ακόμα και τη διαδικασία παρασκευής του κονιάματος. Αντίστοιχα, η έντονη παρουσία του χαλαζία ακόμα στην κονία, αν δεν οφείλεται στην προσθήκη ποζολάνης, ίσως σχετίζεται με λεπτόκοκκα τοπικά αδρανή ή την ίδια την κονία, σε περίπτωση που λιθος, από τον οποίο προέκυψε η κονία, περιείχε αργιλοπυριτικές ενώσεις.

⁹ ΕΜΠ. (2016). «Γεφύρι της Πλάκας. Το Έργο του Ε.Μ.Π. για την Αποκατάστασή του», σελ. 239-241.

¹⁰ Προφορική μαρτυρία.

¹¹ Εάν, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, το συνολικό κονίαμα ήταν 300-400 τόνους, και η αναλογία κονίας:αδρανών θεωρηθεί 1:1 κατά βάρος, τότε προκύπτουν 150-200 τόνοι κονίας. Σε μια αναλογία ασβέστη:ποζολάνης 1:1, θα απαιτούνταν 75-100 τόνοι από το κάθε υλικό.

Η αναλογία κονιάς:αδρανών 2:1 κατά βάρος του PI.HM_8, όπως και εκείνη που αναφέρεται στην εργασία του Ι. Γρυλλάκη για 1:1 κατά βάρος¹² πάλι σε δείγμα κονιάματος του κεντρικού τόξου, δείχνει πως τουλάχιστον για το κεντρικό τόξο, το κονίαμα ήταν πλούσιο σε κονία, σε αντίθεση με τις συνήθεις αναφορές για αναλογίες κοντά στο 1:3. Το γεγονός αυτό εξηγείται τόσο από την ανάγκη λειτουργίας του κονιάματος στο τόξο περισσότερο σε κάμψη και εφελκυσμό, παρά σε θλίψη, όσο επίσης και από τους πολύ μικρούς αρμούς που έπρεπε να γεμίσουν με πολύ λεπτόκοκκο υλικό.

Σε σχέση με πιθανά οργανικά πρόσθετα η ένδειξη οξειδωμένων μορίων χοληστερόλης στα δείγματα PI.HM_1, 12 και 19 μπορεί να συνδεθεί με την πιθανή χρήση ασπραδιού στο κονίαμα. Το ίδιο ισχύει και για το δείγμα PI.HM_8, όπου υπάρχουν ενδείξεις των αμιδίων I και III. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία δεν επαρκούν για την επιβεβαίωση της χρήσης οργανικού υλικού.

Σε γενικές γραμμές, όλα τα δείγματα δείχνουν πως παρόλο που βρίσκονταν σε ένα περιβάλλον με έντονη υγρασία, εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες και με συνεχή μηχανική καταπόνηση, η κατάστασή τους είναι αρκετά υγιής και ειδικά εκείνων που βρίσκονταν στο εσωτερικό των λιθοδομών. Το βασικό πρόβλημα της σταδιακής απομάκρυνσης και δευτερογενούς ανακρυστάλλωσης του ανθρακικού ασβεστίου, με τη συμβολή του νερού, δε φαίνεται να έχει επηρεάσει σημαντικά την πλεινότητα των δειγμάτων. Σε αυτό έχει παίξει καθοριστικό ρόλο η υδραυλικότητα των κονιαμάτων, καθιστώντας τα σε σημαντικό ποσοστό ανθεκτικά στο νερό.

Τα δείγματα PI.HM_1, 3, 12, 15 και 36 που ανήκουν στο «κοινό ιστορικό κονίαμα», εμφανίζουν γύψο στα διαγράμματα XRD και TG-DTA, με τα PI.HM_3 και 15, ειδικά, να εμφανίζουν πολύ έντονες κορυφές στο διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X. Το γεγονός ότι τα δείγματα αυτά ανήκουν σε διαφορετικά σημεία του γεφυριού, αλλά τα υπόλοιπα δείγματα του «κοινού ιστορικού κονιάματος» δεν εμφανίζουν τέτοια κορυφή, ίσως δείχνει ότι η πιθανή προσθήκη γύψου ενδεχομένως αποτελούσε μία πρακτική για την επιτάχυνση της σκλήρυνσης, όποτε και όπου χρειαζόταν. Η εμφάνιση εντριγκίτη και θωμασίτη στο δείγμα PI.HM_15 επίσης σχετίζεται με την έντονη παρουσία του γύψου στο υδραυλικό κονίαμα.

Από την παραπάνω κατηγοριοποίηση του «κοινού ιστορικού κονιάματος», θα πρέπει να σημειωθεί ότι το PI.HM_17 χαρακτηρίζεται οριακά ως υδραυλικό, με τιμή αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας 7,38. Επίσης στη δοκιμή εμβάπτισης, παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη υδαταπορρόφησης και πορώδους, καθώς και μεγαλύτερη πυκνότητα από τα υπόλοιπα δείγματα. Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν ίσως να εξηγηθούν από τη χρήση λιγότερης ποζολάνης ή άλλων ελαφροβαρών αδρανών στο συγκεκριμένο σημείο ή ακόμα και την ύπαρξη περισσότερων ασβεστιτικών αδρανών στο δείγμα, κάτι που θα μπορούσε να τεκμηριωθεί και από τη μικρότερη κορυφή του χαλαζία στο XRD. Ωστόσο, τόσο η θέση του την κατασκευή, όσο και οι υπόλοιπες πειραματικές ενδείξεις δεν το κατατάσσουν ως ξεχωριστή περίπτωση.

Τα PI.HM_28 και PI.HM_29, αντίθετα, δεν παρουσιάζουν υδραυλικότητα και διαφέρουν από τα δείγματα του «κοινού ιστορικού κονιάματος» σε μια σειρά από πειραματικές ενδείξεις. Τα κονιάματα αυτά είναι ασβεστιτικά, με χρήση ασβεστιτικών και χαλαζιακών αδρανών. Τα χονδρόκοκκα ασβεστιτικά αδρανή ίσως είναι εκείνα που έχουν επηρεάσει αρκετά τις καμπύλες XRD, TG-DTA και FTIR. Ωστόσο, ακόμα και η εικόνα τους μέσω της ψηφιακής μικροσκοπίας (DM) μοιάζει διαφορετική από εκείνη των δειγμάτων του κοινού ιστορικού κονιάματος. Η πιθανά διαφορετική σύνθεση των δειγμάτων αυτών μπορεί να σχετίζεται με τη θέση τους στο χαμηλότερο τμήμα του τόξου. Το σημείο αυτό, αφενός παρουσιάζει μια γεωμετρική διαφοροποίηση από το υπόλοιπο τόξο, που έως τώρα έχει

¹² Γρυλλάκης Ι. (2019). «Γεφύρι της Πλάκας: Χαρακτηρισμός και Διάγνωση Φθοράς Ιστορικών Κονιαμάτων – Σχεδιασμός και Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης», ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», υπ. τ. Καθ. Α. Μοροπούλου, σελ. 68.

αποδοθεί σε λανθασμένη αρχική χάραξη του τόξου¹³. Εάν υποθεθεί ότι η γεωμετρική αυτή διαφοροποίηση σχετίζεται με προγενέστερη φάση του τμήματος αυτού, τότε ίσως θα μπορούσε να εξηγηθεί και η διαφορετική σύνθεση του κονιάματος. Από την άλλη, το τμήμα αυτό του τόξου, όντας χαμηλότερο, υπόκειται συχνά σε διάβρωση και φθορά από τα νερά του Αράχθου. Θα μπορούσε, λοιπόν, να υποθεθεί ότι οι εξωτερικοί αρμοί αυτού του τμήματος έχουν αρμολογηθεί σε κάποια μεταγενέστερη χρονική φάση. Μάλιστα, οι καμπύλες XRD των δειγμάτων αυτών είναι σχεδόν ίδιες με εκείνη του PI.HM_30, το οποίο λόγω θέσης γνωρίζουμε ότι είναι του 1928 ή μεταγενέστερο. Παρόλα αυτά, για το τελευταίο δεν έχουμε επαρκείς πειραματικές ενδείξεις, ώστε να μπορέσουμε να το κατατάξουμε μαζί τα δείγματα 28 και 29 και να πούμε ότι ανήκουν στην ίδια κατασκευαστική φάση. Χάριν ευκολίας, τα δείγματα PI.HM_28 και 29 κατηγοριοποιούνται με το όνομα: «Δυτική βάση κεντρικού τόξου».

Τα δείγματα PI.HM_20, 21 και 24 επίσης παρουσιάζουν παρόμοια στοιχεία. Παρόλο που στο διάγραμμα των θερμικών αναλύσεων εμφανίζονται στην ίδια περιοχή με τα δείγματα του «κοινού ιστορικού κονιάματος» και μοιράζονται αρκετές κοινές κορυφές στα διαγράμματα περίθλασης ακτίνων X, οι εμφανώς μικρότερες τιμές υδαταπορρόφησης και πορώδους, ενδεχομένως και η παρουσία μικρότερης κορυφής χαλαζία στο XRD, τα κατατάσσουν σε ξεχωριστή ομάδα. Εξάλλου, η θέση δειγματοληψίας τους από το δυτικό ανακουφιστικό τόξο, έχει γίνει σε σημεία που είναι γνωστό ότι έχουν αρμολογηθεί επανηλειμμένα. Αντίστοιχα, η παρουσία δολομίτη στο δείγμα PI.HM_25 που ανήκει στην ίδια περιοχή δειγματοληψίας πιθανώς συνδέεται με χρήση διαφορετικής κόνιας από φάση επισκευής. Τα PI.HM_22 & 23 εντάσσονται και αυτά στην ίδια ομάδα, λόγω θέσης, καθώς τα στοιχεία δεν επαρκούν για να τα εντάξουν σε άλλη κατηγορία. Τέλος, λόγω των συνεχών ανακρυσταλλώσεων ανθρακικού ασβεστίου στο εσωράχιο του τόξου, οι οποίες φαίνονται και σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο¹⁴, η αρχική σύνθεση όλων των παραπάνω κονιαμάτων έχει διαπιστευμένα μεταβληθεί. Τα δείγματα αυτά κατηγοριοποιούνται στο εξής με την ονομασία «Αρμολογήματα δυτικού τόξου».

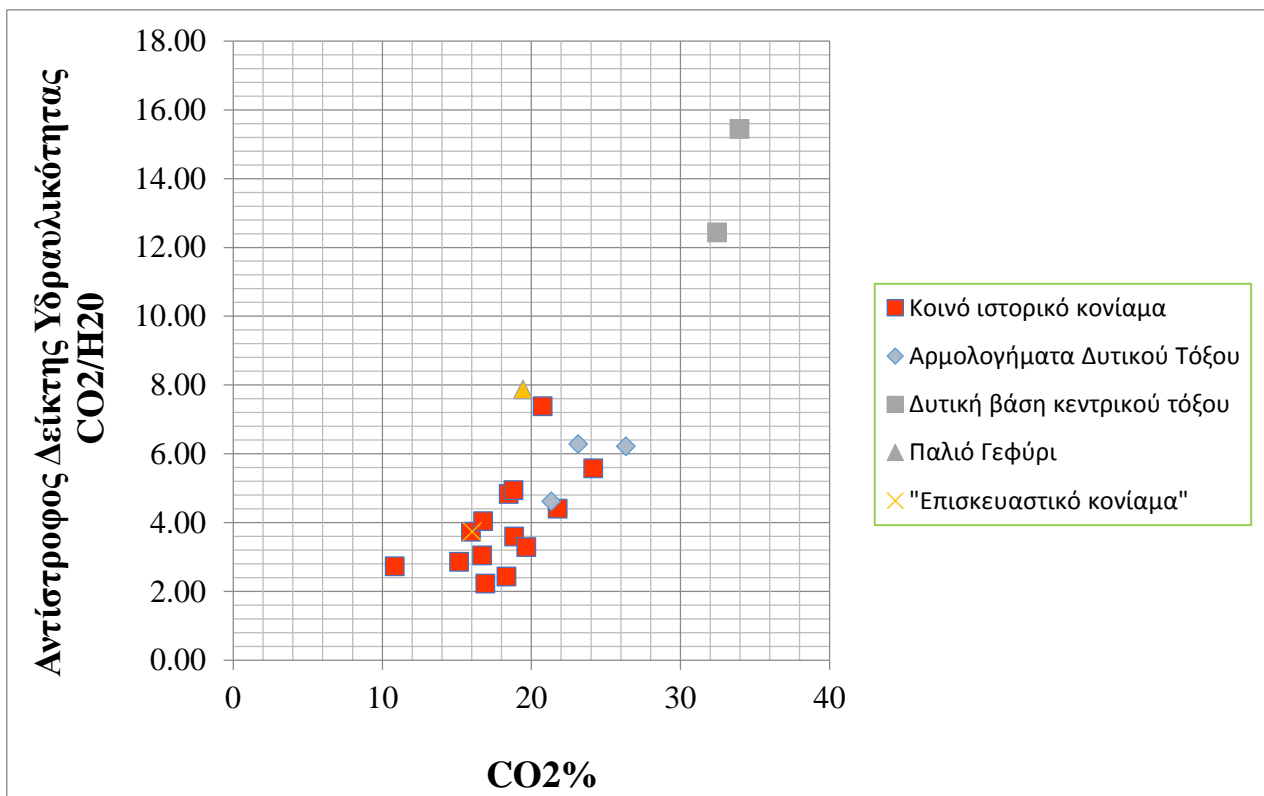
Τα PI.HM_26 και 27 που δεν αποτελούν κονιάματα, αλλά ανακρυσταλλώσεις ανθρακικού ασβεστίου, δεν εμπίπτουν σε σύγκριση με καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Το PI.HM_33_white, όπως φαινόταν και μακροσκοπικά, κατατάσσεται ως «επισκευαστικό κονίαμα» μεταγενέστερης επέμβασης, χωρίς ωστόσο να μπορεί να εξηγηθεί με βεβαιότητα η σύνθεσή του. Πρόκειται για υδραυλικής φύσης κονίαμα, χωρίς σχεδόν καθόλου παρουσία αδρανών. Εκτός από τον ασβεστίτη, η έντονη παρουσία πορτλαντίτη μαρτυρά την ασβεστιτική φύση του κονιάματος. Επίσης, η εμφάνιση γύψου στα διαγράμματα XRD και TG-DTA, δείχνουν ότι πιθανώς έχει χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση της πήξης του κονιάματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δείγμα αυτό βρίσκεται πολύ κοντά στην περιοχή της βλάβης του 1943 και ίσως μπορεί να συσχετιστεί με κάποια επισκευή εκείνης της περιόδου. Η εμφάνιση του θωμασίτη στο XRD, εξηγείται ως προϊόν φθοράς και επιβεβαιώνει την παρουσία του γύψου και τον υδραυλικό χαρακτήρα του κονιάματος. Αντίθετα, το PI.HM_34, αν και μακροσκοπικά δεν παρουσιάζει ομοιότητες με τα υπόλοιπα δείγματα του «κοινού ιστορικού κονιάματος», οι υπάρχουσες πειραματικές ενδείξεις το κατατάσσουν στην ίδια κατηγορία.

Τέλος, το PI.HM_19, που αποτελεί το μοναδικό δείγμα μελέτης από το προγενέστερο γεφύρι της περιοχής, ομοιάζει σημαντικά με το «κοινό ιστορικό κονίαμα» του γεφυριού της Πλάκας σε όλες σχεδόν τις πειραματικές ενδείξεις. Τα μοναδικά σημεία διαφοροποίησης είναι ο λίγο χαμηλότερος δείκτης υδραυλικότητας και το μικρότερο ανοιχτό πορώδες του, όπως ακριβώς και στο δείγμα PI.HM_17. Συνέπως, και για αυτό θα μπορούσαμε να εξάγουμε παρόμοια συμπεράσματα. Η παρόμοια τεχνολογία του προγενέστερου αυτού κονιάματος συναινεί σε μια ιστορική συνέχεια τεχνολογίας για τη γεφυροποιία, αλλά και για τη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

¹³ Ο.π. ΕΜΠ (2016), σελ. 32.

¹⁴ Βλ. ψηφιακή μικροσκοπία στο κεφάλαιο 4 της παρούσης.



Διάγραμμα θερμικών αναλύσεων των δειγμάτων που μελετήθηκαν, ομαδοποιημένα με βάση την κατηγοριοποίηση που δόθηκε στα συμπεράσματα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1 Συμπεράσματα

Από τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, προκύπτουν τα εξής συνοπτικά συμπεράσματα:

- Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά: Πρόκειται για ασβεστιτικά κονιάματα με υδραυλικό χαρακτήρα, μικρή φαινόμενη πυκνότητα και υψηλό πορώδες.
- Τα αδρανή φαίνεται να έχουν συλλεχθεί από το ποτάμι και να έχουν κυρίως αργιλοπυριτική σύσταση.
- Πρόκειται για κονιάματα πλούσια σε κονία, κυρίως όσον αφορά εκείνα του κεντρικού τόξου.
- Ο υδραυλικός χαρακτήρας πιθανότατα οφείλεται σε ποζολανικό πρόσθετο, κάτι που εξηγεί και τη μικρή φαινόμενη πυκνότητα, αλλά και την έντονη παρουσία χαλαζία στο κλάσμα της κονιάς.
- Είναι πιθανή η προσθήκη γύψου, όπως αυτή ανιχνεύεται σε κάποια από τα δείγματα, ως πρακτική για την επιτάχυνση της σκλήρυνσης, όποτε και όπου χρειαζόταν.
- Υπάρχουν ενδείξεις οργανικών προσθέτων που αφορούν την πιθανή χρήση ασπραδιού στο κονίαμα, ωστόσο τα στοιχεία δεν επαρκούν για την τεκμηρίωση της χρήσης του.
- Η κατάστασή της πλειοψηφίας των κονιαμάτων είναι αρκετά υγιής και ειδικά εκείνων που βρίσκονταν στο εσωτερικό των λιθοδομών, παρόλες τις συνεχείς καταπονήσεις και την έντονη υγρασία του περιβάλλοντος.
- Το μοναδικό δείγμα μελέτης από το προγενέστερο γεφύρι της περιοχής, ομοιάζει σημαντικά με την πλειοψηφία των δειγμάτων του γεφυριού της Πλάκας, με βάση τις περισσότερες πειραματικές ενδείξεις.

5.2 Προοπτικές

Σε μία προσπάθεια περαιτέρω διερεύνησης της σύνθεσης των ιστορικών κονιαμάτων των διαφορετικών κατασκευαστικών φάσεων, αλλά και της συμπεριφοράς τους στο χρόνο, κρίνεται σκόπιμο να γίνουν τα παρακάτω:

- Δειγματοληψία κονιαμάτων από περισσότερα σημεία του ανατολικού και του δυτικού τυμπάνου, καθώς τα λίγα δείγματα που έχουν ήδη μελετηθεί δεν μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικά για τον όγκο και τις κατασκευαστικές τους ιδιαιτερότητες.
- Δειγματοληψία κονιαμάτων από περιοχές μεταγενέστερων επεμβάσεων, όπως των τοίχων στα άνω άκρα των βάθρων, των στηθαίων και του περυγότοιχου, ώστε να υπάρχει γνώση και σύγκριση των διαφορετικών συνθέσεων και της συμπεριφοράς τους στο χρόνο.
- Περαιτέρω δειγματοληψία από το κονίαμα του τόξου στη βάση του δυτικού βάθρου, κοντά στα δείγματα PI.HM_28-29, ώστε να εξακριβωθεί εάν πράγματι πρόκειται για διαφορετικής σύνθεσης κονίαμα και να διαπιστωθούν τα όρια των διαφορετικών επεμβάσεων.
- Περισσότερες κοκκομετρίες από δείγματα του τόξου και του τυμπάνου, με στόχο να αποκρυσταλλωθεί ένας μέσος όρος για τις αναλογίες του πρώτου και να διαπιστωθεί πόσο και αν άλλαζαν αυτές ανάλογα με τη θέση του κονιάματος στην κατασκευή.
- Έλεγχος περίθλασης ακτίνων X σε κλάσματα του κοσκίνου, ώστε να διαπιστωθεί ορυκτολογικά η φύση των αδρανών.
- Έλεγχος περίθλασης ακτίνων X σε συσσωματώματα ασβέστη του «κοινού ιστορικού κονιάματος», ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν αργιλοπυριτικές προσμίξεις.
- Πετρογραφικός χαρακτηρισμός σε περισσότερα δείγματα του «κοινού ιστορικού κονιάματος» και χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), με σκοπό να τεκμηριωθεί η χρήση ποζολανικών πρόσθετων, αλλά και η χρήση γύψου σε κάποια από αυτά.
- Προσπάθεια διερεύνησης της αλμπουμίνης με την πρωτεϊνική δοκιμή του Bradford¹. Τα δείγματα που αξίζει να μελετηθούν είναι τα PI.HM_1, 8, 12 και 19 που ήδη έχουν δώσει ενδείξεις οργανικού υλικού στο FTIR. Σε περίπτωση θετικών αποτελεσμάτων, θα μπορούσαν να μελετηθούν και τα PI.HM_15, 35 και 36, για να διαπιστωθεί εάν η χρήση ασπραδιού γινόταν και σε άλλα μέρη πλην του κεντρικού τόξου.

¹ Bradford M. (1976). "A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding". *Analytical Biochemistry* 72, 248-254.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βιτρούβιος Π. Μ. Μτφ Λέφας, Π. (2000) Περί Αρχιτεκτονικής. Εκδόσεις Πλέθρον.
2. Τσίμας, Σ. (2001). Δομικά Υλικά (Τσιμέντο–Ασβέστης–Σκυρόδεμα–Κονιάματα). Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
3. Αγγελakoπουλου, Ε. (2006). Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Φυσικοχημικών και Μηχανικών Χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση Αριστοποίησης Συμβατών Κονιαμάτων και Σκυροδεμάτων Αποκατάστασης Ιστορικών Τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).
4. Αποστολοπούλου (2020). «Μεθοδολογία Σχεδιασμού Συμβατών και Επιτελεστικών Κονιαμάτων Αποκατάστασης για την Αντισεισμική Προστασία Μνημείων και Ιστορικών Κατασκευών». Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).
5. Karkanias, P. (2007). Identification of lime plaster in prehistory using petrographic methods: a review and reconsideration of the data on the basis of experimental and case studies. *Geoarchaeology: An international journal*, 22(7), 775-796.
6. Kopelson, E. (1996). Analysis and consolidation of architectural plasters from Çatalhöyük, Turkey. Diploma Thesis. University of Pennsylvania, Historic Preservation Dpt.
7. Rodríguez-Navarro, C. (2012). Binders in historical buildings: traditional lime in conservation. *Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM)*, 9, 91-112.
8. Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E., "The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime", *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 633-639.
9. Ζαχαροπούλου Γ. (2004). Παραγωγή ασβέστου υψηλής δραστηριότητας κατάλληλης για αποκαταστάσεις μνημείων και ιστορικών κτιρίων. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών. (επιβλέπουσα: Καθ. Ι. Παπαγιάννη).
10. Chever, L., Pavia, S., Howard, R. (2010). Physical properties of magnesian lime mortars. *Materials and structures*, 43(1-2), 283-296.
11. Τσίμας Σταμ., Αποστολίδου Αικ., «Μελέτη της ασβέστου που προορίζεται για δομικές χρήσεις», ΤΕΕ Επιστημονική Επιτροπή Δομικών Υλικών και στοιχείων, Αθήνα 1984.
12. Zacharopoulou, G. (2013). Impact of calcination temperature on reactivity, maturation capacity and mechanical properties of a high calcium building lime (CL). In 3rd Historic Mortars Conference HMC (pp. 11-14).
13. Hughes, J. J., Swift, D. S., Bartos, P. M., & Banfill, P. F. (2002). A traditional vertical batch lime kiln: thermal profile and quicklime characteristics. In *Masonry: Opportunities for the 21st Century*. ASTM International.
14. Hansen, E. F., Tagle, A., Erder, E., Baron, S., Connell, S., Rodriguez-Navarro, C., & Van Balen, K. (2000). Effects of ageing on lime putty. In *International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, Cachan, France: RILEM Publications sarl (pp. 197-206).
15. Margalha, M. G., Silva, A. S., do Rosário Veiga, M., De Brito, J., Ball, R. J., & Allen, G. C. (2013). Microstructural changes of lime putty during aging. *Journal of materials in civil engineering*, 25(10), 1524-1532.
16. EN 459-1:2015—Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. European Committee for Standardisation (CEN): Brussels, Belgium.
17. EN 459-2: 2010, Building lime. Part 2: Test methods. European Committee for Standardisation (CEN): Brussels, Belgium
18. Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. (2009). Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars. *International RILEM Workshop on Repairs Mortars for Historic Masonry*, RILEM Publications SARL, pp. 278-291.

19. Ontiveros-Ortega, E., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A., & Molina, L. (2018). Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime. *Construction and Building Materials*, 191, 575-589.
20. Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2019). Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Construction and Building Materials*, 225, 633-641.
21. Van Balen, K., & Van Gemert, D. (1994). Modelling lime mortar carbonation. *Materials and structures*, 27(7), 393-398.
22. Gulotta, D., Goidanich, S., Tedeschi, C., Nijland, T. G., & Toniolo, L. (2013). Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterisation. *Construction and Building materials*, 38, 31-42
23. Apostolopoulou, M., Asteris, P. G., Armaghani, D. J., Douvika, M. G., Lourenço, P. B., Cavaleri, L., & Moropoulou, A. (2020). Mapping and holistic design of natural hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 136, 106167.
24. Apostolopoulou, M., Armaghani, D. J., Bakolas, A., Douvika, M. G., Moropoulou, A., & Asteris, P. G. (2019). Compressive strength of natural hydraulic lime mortars using soft computing techniques. *Procedia Structural Integrity*, 17, 914-923.
25. Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586.
26. Αναγνωστοπούλου, Σ. (2012). Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας III: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).
27. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΥΑ Δ14/19164 (ΦΕΚ 315/Β/1997).
28. Καραγιάννης-Μπακόλας Αστέριος, «Κριτήρια και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ιστορικών Κονιαμάτων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
29. Hobbs, L. W., & Siddall, R. (2011). Cementitious materials of the ancient world. In *Building Roma aeterna: current research on Roman mortar and concrete* (Vol. 128, pp. 35-60). The Finnish Society of Sciences and Letters.
30. Papastefanaki, L. (2018). From Santorini to Trieste and Suez: scientific knowledge, discovery and use of Theran earth in the Mediterranean (from the end of the eighteenth century to the beginning of the twentieth century). *Mediterranean Historical Review*, 33(1), 67-88.
31. Artioli, G., Secco, M., & Addis, A. (2019). The Vitruvian legacy: mortars and binders before and after the Roman world. *The Contribution of Mineralogy to Cultural Heritage*; Artioli, G., Oberti, R., Eds, 151-202.
32. Brandon, C. J., Hohlfelder, R. L., Jackson, M. D., & Oleson, J. P. (2014). *Building for eternity: the history and technology of Roman concrete engineering in the sea*. Oxbow books.
33. Heiken, G., & McCoy Jr, F. (1984). Caldera development during the Minoan eruption, Thira, Cyclades, Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8441-8462.
34. Ριτζούλη, Α. (2016). Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής και της οικοδομικής τέχνης στη Σαντορίνη από τη Βενετοκρατία (1204) μέχρι το σεισμό του 1956 (Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Τομέας Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής, Ιστορίας της Τέχνης, Αρχιτεκτονικής Μορφολογίας και Αναστήλωσης).
35. Mohammed, S. (2017). Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. *Construction and building materials*, 140, 10-19.
36. Rogers, S. B. (2011). Evaluation and testing of brick dust as a pozzolanic additive to lime mortars for architectural conservation.
37. Moropoulou, A., Bakolas, A., & Aggelakopoulou, E. (2004). Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, 420(1-2), 135-140.

38. Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., & Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3313-3318.
39. Fang, S. Q., Zhang, H., Zhang, B. J., & Zheng, Y. (2014). The identification of organic additives in traditional lime mortar. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2), 144-150.
40. Brecolouki, H., Andreotti, A., Bonaduce, I., Colombini, M. P., & Lluveras, A. (2012). Characterization of organic media in the wall-paintings of the “Palace of Nestor” at Pylos, Greece: evidence for a secco painting techniques in the Bronze Age. *Journal of Archaeological Science*, 39(9), 2866-2876.
41. Vandenabeele, P., Wehling, B., Moens, L., Edwards, H., De Reu, M., & Van Hooydonk, G. (2000). Analysis with micro-Raman spectroscopy of natural organic binding media and varnishes used in art. *Analytica Chimica Acta*, 407(1-2), 261-274.
42. Παπακώστας Ν. Χ. (1967) Ηπειρωτικά.
43. ΕΜΠ. (2016). «Γεφύρι της Πλάκας. Το Έργο του Ε.Μ.Π. για την Αποκατάστασή του»,
44. ΦΕΚ-621/22-08-1972
45. Νικολαΐδης, Ι. (2019). Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο, Διπλωματική εργασία. Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).
46. Γρυλλάκης Ι. (2019). «Γεφύρι της Πλάκας: Χαρακτηρισμός και Διάγνωση Φθοράς Ιστορικών Κονιαμάτων – Σχεδιασμός και Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης». Μεταπτυχιακή εργασία. Εθνικό ετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Χημικών Μηχανικών. Τομέας ΙΙΙ: Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. (Επιβλέπουσα: Καθ. Α. Μοροπούλου).
47. Fang, S. Q., Zhang, H., Zhang, B. J., & Zheng, Y. (2014). The identification of organic additives in traditional lime mortar. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2), 144-150.
48. Μοροπούλου Α. (2012). Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
49. Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (1995). Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *thermochimica acta*, 269, 779-795.
50. Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (2000), Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1), 45-58.
51. Derrick, M. R., Stulik, D., & Landry, J. M. (2000). *Infrared spectroscopy in conservation science*. Getty Publications.
52. Borrelli, E., & Urland, A. (1999). *ARC Laboratory Handbook*. ICCROM, Rome.
53. Katsaragakis, E. S. 1989. A new tensile test for concrete. *Materials and Structures* 20(6):463–466
54. Lucia Fernández-Carrasco, D. Torrens-Martín, L.M. Morales and Sagrario Martínez-Ramírez (2012). *Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials*, *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology*, Prof. Theophanides Theophile (Ed.), ISBN: 978-953-51-0537-4, InTech.
55. Gunasekaran, S.& Anbalagan, G. (2007), Spectroscopic characterization of natural calcite minerals, *Spectrochimica Acta Part A* 68,pp 656–664.
56. Lenka Vaculikova&Eva Plevova (2005), Identification of clay minerals and micas in sedimentary rocks, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol.2, No.2 (138), 167-175.
57. Χειλάκου Διδακτορική διατριβή, Η εφαρμογή των Φασματοσκοπικών και μη καταστρεπτικών μεθόδων στον χαρακτηρισμό, τον έλεγχο της φθοράς και τη συντήρηση-αποκατάσταση ιστορικών έργων, ΕΜΠ, 2012.
58. Cenestar, C. & Pons, C. (2005), Earth pigments in painting: characterization and differentiation by means of FTIR spectroscopy and SEM-EDS microanalysis, *Anal Bioanal. Chem.* 382 pp 269-274.
59. Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2005). Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): characterization and origin. *Analytica chimica acta*, 532(2), 187-198.

60. Sotiropoulou, S., Papiaka, Z. E., & Vaccari, L. (2016). Micro FTIR imaging for the investigation of deteriorated organic binders in wall painting stratigraphies of different techniques and periods. *Microchemical Journal*, 124, 559-567.
61. Bradford M. (1976). "A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding"

Βιογραφικό Σημείωμα

Επώνυμο: Κωστούλας
Όνομα: Παναγιώτης
Εθνικότητα: Ελληνική
Τόπος Γέννησης: Αθήνα, Ελλάδα
Ημερομηνία Γέννησης: 26 Νοεμβρίου 1988
Στοιχεία επικοινωνίας: Τηλ: +30 6942037553, e-mail: kostoulasarch@gmail.com



Εκπαίδευση

- (2017-σήμερα): Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης στην Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
- (2013): Δίπλωμα Αρχιτέκτονα Μηχανικού, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ερευνητικό πεδίο

- Ιστορία και εξέλιξη των ασβεστιτικών κονιαμάτων.
- Τεχνολογία χωμάτινων κατασκευών.
- Τοξωτές και θολωτές κατασκευές.

Επαγγελματική εμπειρία

- Διαχειριστής και συνιδρυτής της ομάδας «Μπουλούκι – Περιοδεύον Εργαστήριο για τις Παραδοσιακές Τεχνικές Δόμησης», Αθήνα, Ελλάδα (2018-σήμερα)
- Αρχιτέκτονας, ελεύθερος επαγγελματίας, Αθήνα, Ελλάδα (Οκτ 2017-σήμερα)
- Επί τόπου μηχανικός στο έργο της αναστήλωσης του Γεφυριού της Πλάκας, Ήπειρος, Ελλάδα (Μάιος 2019-Δεκ 2019)
- Επισκέπτης Καθηγητής, McGan's Ooty School of Architecture, Ινδία (Φεβ 2015-Ιαν 2016)
- Αρχιτέκτονας, Akara Consultancy, Ooty, Ινδία (Ιούν 2014-Ιαν 2016)
- Αρχιτέκτονας, Andagere Architects, Bangalore, Ινδία (Δεκ 2012-Αύγ 2013)
- Πρακτική, OnOffice Architects, Αθήνα, Ελλάδα (Μάιος 2012-Σεπ 2012)

Ξένες Γλώσσες

- Αγγλικά – Επίπεδο Γ1
- Ιταλικά – Επίπεδο Β2