

Γεφύρι της Πλάκας: Χαρακτηρισμός και Διάγνωση Φθοράς Ιστορικών Κονιαμάτων –
Σχεδιασμός και Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης



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

Συντάκτης: Γρυλλάκης Ιάκωβος
Α.Μ.: 41001906
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ιούνιος 2019

Γεφύρι της Πλάκας: Χαρακτηρισμός και Διάγνωση Φθοράς Ιστορικών Κονιαμάτων –
Σχεδιασμός και Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ – ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης:

- Ομοτ. Καθ. Μ. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ
- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ
- Αναπλ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Δρ. Α. Δελέγκου, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Επιτροπή Εξέτασης:

- Ομοτ. Καθ. Μ. Κορρές, Σχ. ΑΜ ΕΜΠ
- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Ομ. Καθ. Γ. Μπατής Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Αναπλ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

Ιούνιος 2019

Πρόλογος

Σκοπό της παρούσης εργασίας αποτελεί ο χαρακτηρισμός και η διάγνωση της φθοράς ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού της Πλάκας, καθώς και ο σχεδιασμός συμβατών και επιτελεστικών κονιαμάτων αποκατάστασης και πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ «Προστασία Μνημείων», β' κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης». Το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε στο «Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών» της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η σύνθεση των κονιαμάτων αποκατάστασης διεξήχθη στο εργοστάσιο «TITAN» Καμαρίου με τη συνεργασία του έμπειρου προσωπικού του εργαστηρίου κονιαμάτων.

Η διπλωματική εργασία επιτεύχθηκε στο πλαίσιο της διεπιστημονικής συμβολής του Ε.Μ.Π. για την αναστήλωση του ιστορικού Γεφυριού της Πλάκας, τόσο για να διασωθεί ένα μεγάλο και σημαντικό μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς της Ηπείρου και της Ελλάδας, όσο και για να τιμήσει τους ιδρυτές του Ε.Μ.Π., η καταγωγή των οποίων ήταν από την Ήπειρο.

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα Αντωνία Μοροπούλου, τόσο για τη γνώση και τη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλο τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών, όσο και για την καθοριστική της συμβολή στην εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Την ευχαριστώ επίσης για την πρωτοβουλία της να διεξαχθεί επίσκεψη στην περιοχή της Πλάκας ώστε να γίνει η δειγματοληψία και οι απαραίτητες παρατηρήσεις, προκειμένου να διεκπεραιωθεί η διπλωματική μου εργασία.

Θέλω επίσης να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στη ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου Μαίρη και Δρ. Α. Δελέγκου για την εξαιρετική τους καθοδήγηση, το χρόνο που αφιέρωσαν για τη διεκπεραίωση και ανάλυση των εργαστηριακών δοκιμών και αποτελεσμάτων, καθώς και για τις εξαιρετικές τους διαλέξεις στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων».

Ευχαριστώ επίσης τον Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκη για τη συμβολή του στη διαδικασία δειγματοληψίας που διεξήχθη στο Γεφύρι της Πλάκας καθώς και για τη συμβολή του στις μετέπειτα εργαστηριακές δοκιμές.

Ευχαριστώ τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Α. Μπακόλα, χωρίς τον οποίο δε θα ήταν εφικτή η διεξαγωγή της δοκιμής «Ποροσιμετρίας Υδραργύρου» για τη μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων. Η γνώση του περί χαρακτηρισμού των κονιαμάτων συντέλεσε καθοριστικά στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ ακόμα το προσωπικό του εργαστηρίου κονιαμάτων στον «TITAN» για την καθοριστική συμβολή τους και την τεχνογνωσία που μοιράστηκαν μαζί μου όσον αφορά στη σύνθεση κονιαμάτων αποκατάστασης.

Τέλος να ευχαριστήσω θερμά όλους τους συναδέλφους-συμφοιτητές μου για μία άκρως εποικοδομητική συναναστροφή μαζί τους στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων».

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι αφενός ο χαρακτηρισμός και η διάγνωση της φθοράς επιλεγμένων ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού της Πλάκας, αφετέρου ο σχεδιασμός κονιαμάτων αποκατάστασης με βάση την υδραυλική άσβεστο και η αποτίμησή της συμβατότητάς και της επιτελεστικότητάς τους για πιθανή χρήση στο έργο αποκατάστασης. Στο πλαίσιο αυτό, για τη μελέτη των προς εξέταση κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της «Περίθλασης Ακτίνων Χ» για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής τους σύστασης, η «Θερμική Ανάλυση (DTA, TG/DTG)» για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της χημικής τους σύστασης, η «Ποροσιμετρία Υδραργύρου» για τη μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων αποκατάστασης, η δοκιμή «Ολικής Εμβάπτισης» για τον προσδιορισμό του ποσοστού ροφημένου νερού και του ολικού ανοικτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό, ενώ πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης για τον προσδιορισμό του συντελεστή υδαταπορρόφησης και του ολικού ανοικτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό μέσω τριχοειδών στα κονιαμάτων αποκατάστασης. Παράλληλα, στα κονιάματα αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε και μελέτη των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τον χρόνο ωρίμανσης (αντοχή σε θλίψη και αντοχή σε κάμψη), ενώ χρωματομετρία εφαρμόστηκε και στα ιστορικά και στα κονιάματα αποκατάστασης, με σκοπό την αποτίμηση της συμβατότητάς τους ως προς τις χρωματικές τους παραμέτρους.

Όλα τα ιστορικά κονιάματα που μελετήθηκαν παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά σε σχέση με την σύστασή τους, οι τιμές των οποίων συνάδουν με χαρακτηριστικές τιμές ιστορικών κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου και κονιαμάτων ασβέστη-φυσικής ποζολάνης, μην επιτρέποντας την κατάταξή τους σε καθαρά μία εκ των δυο κατηγοριών. Σε κάθε περίπτωση, εμφανίζουν υδραυλικό χαρακτήρα, δηλαδή χαμηλές τιμές αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας, ενώ είναι εμφανές ότι για την παρασκευή τους φαίνεται να έχει χρησιμοποιηθεί άμμος αργιλοπυριτικής σύστασης ή μίξη άμμων ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής σύστασης. Η κοκκομετρική ανάλυση των κονιαμάτων έδειξε ότι υπάρχει μεγάλη συμμετοχή κονιάς (κονία/αδρανή=1/1), εξηγώντας εν μέρη και τη χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα που παρουσιάζουν.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των ιστορικών κονιαμάτων, αλλά και το περιβάλλον και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του μνημείου, σχεδιάστηκαν κονιάματα αποκατάστασης με βάση την φυσική υδραυλική άσβεστο (NHL3.5) και αποτιμήθηκαν με βασικό γνώμονα τη διερεύνηση του πιο συμβατού και επιτελεστικού από αυτά. Στην πορεία της εργασίας αυτής διαπιστώθηκε ότι η επιλογή των πρώτων υλών για τα κονιάματα αποκατάστασης έπαιξε καθοριστικό ρόλο στα τελικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων συνθέσεων, ενώ αναδείχθηκε η έντονη επίδραση των οργανικών προσθέτων στα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων. Παράλληλα, η χρήση των οργανικών προσθέτων δεν επέτρεψε την πήξη του κονιάματος σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Το κονίαμα που ξεχώρισε λόγω των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του, είναι η σύνθεση φυσικής υδραυλικής ασβέστου με μικρή προσθήκη μετακαολίνη και με την παρουσία άμμου πυριτικής φύσεως PL.BR.NHL.M1_D, χωρίς την προσθήκη άλλων

προσθέτων. Οι μηχανικές αντοχές που παρουσίασε ήταν ικανοποιητικές με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές, παρουσίασε το χαμηλότερο ποσοστό διαλυτών αλάτων, ενώ και η χρωματική του απόχρωση προσομοιάζει πολύ τα ιστορικά κονιάματα. Ωστόσο, δεν επετεύχθη ικανοποιητική ανάπτυξη μηχανικών αντοχών σε μικρούς χρόνους ωρίμανσης.

Abstract

The purpose of this Master Thesis is to characterize and diagnose the decay of historic mortars selected from the Plaka Bridge, as well as to design restoration mortar based on hydraulic lime and assess them in terms of compatibility and performance. To achieve this objective, the “X-ray diffraction” method was used to determine the crystalline phases of mortars, “Thermal Analysis (DTA, TG / DTG)” for the qualitative and quantitative determination of the constituents of mortars, “Mercury Porosimetry” for the study of mortar microstructure, the “Total Immersion” test to determine the percentage of the absorbed water through total immersion and the total open porosity accessible to it, and finally the “Capillary Rise Test” was conducted, only on the restoration mortars, in order to determine the capillary rise coefficient and total open porosity accessible to water by capillaries. Furthermore, the mechanical properties of the restoration mortars were studied (compressive and flexural strength) in relation to curing time, while colorimetry measurements were also applied to both historic and restoration mortars, aiming to assess their aesthetic compatibility.

Based on the analytical techniques applied in the laboratory, it was found that in relation to their chemical composition, all mortars exhibit similar values, which are consistent with the characteristic values of historical hydraulic lime mortars and lime-natural pozzolan mortars, without allowing them to be clearly classified in only one out of these two categories. In any case, they present a hydraulic character, meaning, low values of reverse hydraulic index. The sand used in the historic mortars was of aluminosilicate nature, probably taken from the river or a mixture of calcitic and aluminosilicate nature. Sieve analysis of the mortars revealed a high binder to aggregate ratio of 1/1, partly explaining their low bulk density.

Based on the characteristics of the historic mortars, at the same time taking into account the surrounding environment and the particular requirements of the monument, natural hydraulic lime (NHL3.5) restoration mortars, with a variety of additives, were designed with the main focus being to investigate which is the most compatible and performing. In the course of this work it was found that the choice of raw materials for restoration mortars played a decisive role in the final characteristics of the compositions produced, while the addition of organic additives highly affects the physicochemical characteristics of the produced restoration mortar. Additionally, the addition of organic additives, played a negative role and did not allow the mortar to set and harden in high humidity conditions.

The mortar that stands out on account of its physico-chemical characteristics is the synthesis of natural hydraulic lime with a small addition of metakaolin and the use of siliceous sand as aggregate, coded PL.BR.NHL.M1_D. The values of its mechanical strength was satisfactory according to the required specifications, although towards the lower limit; it presents the smallest percentage of total soluble salts, and in addition, its coloration closely resembles that of the historic mortars.

However, although the optimum amongst the mortars examined, it did not achieve adequate mechanical strength values at early ages, which is a prerequisite for the specific project.

Εισαγωγή

Η Ήπειρος είναι τόπος ορεινός, με ογκώδεις και ψηλές οροσειρές, τις οποίες διασχίζουν μεγάλα ποτάμια και διακλαδώσεις τους, γεγονός το οποίο έκανε επιτακτική την επίλυση του προβλήματος της γεφύρωσης των ποταμών και των ορμητικών ρεμάτων για την μετακίνηση του πληθυσμού και την διακίνηση του εμπορίου. Η Γέφυρα της Πλάκας αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της ανάγκης αυτής, όντας ταυτόχρονα ορόσημο παραδοσιακής ηπειρώτικης αρχιτεκτονικής γεφυρών. Με την κατάρρευσή της το 2015, ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις, κρίθηκε αναγκαία η σύρραξη και η κινητοποίηση διεπιστημονικών ομάδων, για την ταχύτερη και επιτελεστικότερη αποκατάσταση του γεφυριού. Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται τα ιστορικά κονιάματα της γέφυρας καθώς και πιθανά κονιάματα αποκατάστασης, με κυρίαρχους πάντα γνώμονες τη συμβατότητα, την επιτελεστικότητα και την αειφορία της κατασκευής. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται ενδελεχής χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων και καθορίζονται κριτήρια για την κατασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης, συγκρίνοντάς τα σε κάθε βήμα με τα ιστορικά υλικά.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract	3
Εισαγωγή	7
ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	11
1. ΚΟΝΙΕΣ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ.....	11
1.1.1. Κονίες.....	11
1.1.2. Κονιάματα	11
1.1.3. Ιδιότητες Κονιαμάτων	12
1.1.4. Κατηγορίες και Είδη Κονιαμάτων.....	12
1.1.5. Επίδραση του νερού ανάμιξης στις ιδιότητες των κονιαμάτων	13
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ.....	14
1.3. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	17
ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ.....	20
2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ – ΓΕΦΥΡΙ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΑΡΑΧΘΟ	20
2.1.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Γέφυρας	23
2.1.2. Σύντομη Αρχιτεκτονική Περιγραφή.....	23
2.1.3. Ιστορικοί Λίθοι.....	25
2.2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	26
2.2.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	27
2.3. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ – ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΒΛΑΒΩΝ	27
2.3.1. Βλάβες και παραμορφώσεις του κεντρικού τόξου	27
2.3.2. Βλάβες στα ανακουφιστικά τόξα των βάθρων.....	30
2.3.3. Υποσκαφή Θεμελίων.....	32
2.3.4. Προβλήματα Υγρασίας.....	32
2.3.5. Προηγούμενες Επεμβάσεις Συντήρησης.....	33
2.4. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ.....	34
2.4.1. Ανατολικό Βάθρο	35
2.4.2. Δυτικό Βάθρο	36
3. ΓΕΝΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ.....	38
3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	38
3.1.1. ΦΑΣΗ 1, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	38
3.1.2. ΦΑΣΗ 2, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ.....	39

3.1.3. ΦΑΣΗ 3, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	39
3.1.4. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	40
3.1.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	42
3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	42
3.2.1. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ	44
3.2.2. ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	45
3.2.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	45
3.2.4. ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (Hg)	46
3.2.4.1. Πορώδες	46
3.2.4.2. Τύποι Πόρων	47
3.2.4.3. Η κίνηση του νερού σε πορώδη δομικά υλικά	48
3.2.5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΡΟΦΗΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟ ΣΤΟ ΝΕΡΟ	49
3.2.5.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	49
3.2.6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕΣΩ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ	50
ΕΙΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	51
3.3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	51
3.3.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΛΗΦΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΓΕΦΥΡΙ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ	52
4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	57
4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	57
4.1.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ	57
4.1.5. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ	68
4.1.2. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X.R.D.)	70
4.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	74
4.1.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΕ ΝΕΡΟ	78
4.1.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ pH	80
4.1.7. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	81
4.1.8. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ	83
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	84
4.2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	84
4.2.2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	86

4.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΗΞΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ.....	89
4.2.3.1. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X.R.D.).....	89
4.2.3.2. ΔΟΚΙΜΗ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΝΣΗΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ..	93
4.2.3.3. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	94
4.2.3.4. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	103
4.2.3.5. ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (Hg)	106
4.2.3.5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ποροσιμετρίας υδραργύρου	107
4.2.3.5.2 Σύγκριση τιμών πορώδους από τις διάφορες τεχνικές που εφαρμόστηκαν	109
4.3.6. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	111
4.3.7. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	114
4.3.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ Ph.....	116
4.3.9. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	117
4.3.9.1. Αποτίμηση συμβατότητας και επιτελεστικότητας εξεταζόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης και ιστορικών υλικών του Γεφυριού της Πλάκας.....	Error! Bookmark not defined.
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119

ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

1. ΚΟΝΙΕΣ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

1.1.1. Κονίες

Συνδετική ύλη ή κονία καλείται κάθε κονιοποιημένο υλικό που με κατάλληλη προεργασία μπορεί να γίνει πλαστικό, να παρουσιάσει δηλαδή συγκολλητικές ιδιότητες και να στερεοποιηθεί βαθμιαία, ώσπου να σχηματιστεί μια σκληρή και συμπαγής μάζα. Οι περισσότερες κονίες εμφανίζουν συγκολλητικές ιδιότητες και γίνονται πλαστικές όταν αναμιχτούν με νερό. Στερεοποιούνται είτε επειδή εξατμίζεται το νερό (π.χ. πηλοκονία) είτε επειδή προκαλούνται χημικές αντιδράσεις (π.χ. τσιμέντο, ασβεστίτης) [9].

Οι κονίες υποδιαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις αερικές και τις υδραυλικές. Αερικές ονομάζονται οι κονίες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν με την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα. Και δεν αντέχουν μέσα σε υγρό περιβάλλον ακόμα και αν έχουν σκληρυνθεί (π.χ. αερική άσβεστος, γύψος). Υδραυλικές ονομάζονται οι κονίες εκείνες που πήζουν και σκληραίνουν και υπό την επίδραση του νερού (π.χ. τσιμέντο, υδραυλικός ασβέστης). Οι κονίες σπάνια εφαρμόζονται αμιγείς για οικονομικούς και τεχνολογικούς λόγους. Εκτός από το απαιτούμενο νερό, χρειάζεται να αναμιχθούν και με συγκεκριμένη ποσότητα άμμου (<5mm) ή γενικότερα άλλου αδρανούς. Με τον τρόπο αυτό παρασκευάζονται τα κονιάματα, τα οποία αποτελούν μίγματα συνδετικής ύλης (κονίας), αδρανών και νερού. Το τελευταίο είναι απαραίτητο για να αποκτήσει ο πολτός την κατάλληλη πλαστικότητα και εργασιμότητα για την εφαρμογή του, και ακολούθως για την πήξη και σκλήρυνσή του [9].

1.1.2. Κονιάματα

Το κονίαμα είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από πρόσθετα και αδρανή, τα οποία υπό συνθήκες μπορούν να αντιδράσουν με τη συνδετική ύλη, και από πρόσμικτα που εξυπηρετούν άλλους σκοπούς.

Τα κονιάματα αποτελούν ένα από τα βασικότερα υλικά των περισσότερων κατασκευών και χρησιμοποιούνται για δύο κυρίως σκοπούς:

- για να δημιουργήσουν τα στοιχεία εκείνα των τοιχοδομών που συμπληρώνουν τα δημιουργούμενα κενά (κονιάματα δομήσεως)
- για να επενδύσουν τα στοιχεία των κατασκευών για λόγους μόνωσης, προστασίας και αισθητικής.

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται ως επενδύσεις ονομάζονται επιχρίσματα (κονιάματα επενδύσεων). Επίσης, κονιάματα είναι δυνατόν να θεωρηθούν και οι πολτοί από νερό και συνδετική ύλη χωρίς πρόσμιξη αδρανών. Οι πολτοί αυτοί χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις και συγκεκριμένα για στόμωση μικροδιαρροών, για έμφραξη μικρορωγμών ή πόρων, για τσιμεντοενέσεις, για συμπληρώσεις λιθοσφμάτων και αυθεντικών λίθων. Κατά γενικό όμως κανόνα τα κονιάματα είναι μίγματα λεπτόκοκκων αδρανών, συνδετικής ύλης και νερού [9].

Πήξη είναι το φαινόμενο, το οποίο λαμβάνει χώρα από τη στιγμή που ο πολτός, που προκύπτει από την ανάμιξη της κονιάς με το νερό, χάνει την πλαστικότητά του μέχρι τη στιγμή που αποκτά κάποια συνεκτικότητα και στερεότητα. Σκλήρυνση είναι το φαινόμενο, το οποίο έπεται της πήξης, οπότε ο πολτός μεταβάλλεται σε λίθωμα και αποκτά την τελική αντοχή του [6].

Η πήξη είναι η φάση της στερεοποίησης, δηλαδή η περίοδος κατά την οποία το κονίαμα από εύπλαστη μάζα μετατρέπεται σε στερεό. Έναρξη της πήξης είναι η στιγμή κατά την οποία η εύπλαστη μάζα αρχίζει να στερεοποιείται και να χάνει την πλαστικότητά της. Ο χρόνος έναρξης της πήξης, δηλαδή ο χρόνος που περνάει από τη στιγμή που στο κονίαμα προστίθεται το νερό, μέχρι την έναρξη της πήξης, είναι καίριος, γιατί μέσα σ' αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει να γίνει η παρασκευή, μεταφορά και εφαρμογή του κονιάματος στο έργο. Αν το κονίαμα εφαρμοστεί μετά από την έναρξη της πήξης, καταστρέφεται το πλέγμα που έχει αρχίσει να δημιουργείται και τελικά οι αντοχές που αναπτύσσονται είναι μικρότερες. Η λήξη της πήξης είναι η στιγμή που ο πολτός έχει στερεοποιηθεί. Μετά τη λήξη της πήξης αρχίζει η περίοδος της σκλήρυνσης που διαρκεί επί μήνες ή και επί χρόνια ανάλογα με το είδος του κονιάματος και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκεται [9].

Κατά την περίοδο της σκλήρυνσης, το κονίαμα παρουσιάζει μεταβολές στον όγκο του (συστολή) και αύξηση της αντοχής του. Το τέλος της σκλήρυνσης είναι ακαθόριστο και δεν έχει πρακτική σημασία. Σημασία έχει ο ρυθμός αύξησης των αντοχών, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της αύξησης της αντοχής σε θλίψη προς το χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για να πραγματοποιηθεί η αύξηση αυτή. Ο ρυθμός μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου και συγκεκριμένα είναι μεγαλύτερος στην αρχή και ελαττώνεται βαθμιαία μέχρι μηδενισμού [9].

1.1.3. Ιδιότητες Κονιαμάτων

Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες των κονιαμάτων είναι οι παρακάτω:

- Στεγανότητα (αυξάνει όταν αυξάνει η συμπίκνωση αυτού, δηλαδή όταν ελαττωθεί το πορώδες του)
- Πρόσφυση με τα στοιχεία τα οποία συνδέει ή επί των οποίων εδράζεται
- Αντίσταση στις χημικές επιδράσεις του περιβάλλοντος και στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Ογκοσταθερότητα (η ικανότητα του κονιάματος να μη μεταβάλλει αισθητά τον όγκο του, ιδίως κατά την αρχική περίοδο της σκλήρυνσής του)
- Εργασιμότητα (το σύνολο των ρεολογικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν ένα κονίαμα)
- Μηχανικές αντοχές

1.1.4. Κατηγορίες και Είδη Κονιαμάτων

Τα κονιάματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Αερικά κονιάματα: είναι εκείνα που πήζουν, σκληρύνονται και διατηρούνται μόνο στον αέρα

- Υδραυλικά κονιάματα: πήζουν, σκληρύνονται και διατηρούνται, όχι μόνο στον αέρα, αλλά και μέσα στο νερό.

Ανάλογα με το είδος της κονιάς και του αδρανούς που θα χρησιμοποιηθεί, παρασκευάζονται διάφορα είδη κονιαμάτων, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα εξής:

- Τσιμεντοκονιάματα: έχουν ως συνδετική ύλη το τσιμέντο.
- Ασβεστοκονιάματα: έχουν ως συνδετική ύλη τον πολύ της ασβέστου ή την κονιοποιημένη υδράσβεστο (σκόνη υδρασβέστου)
- Ποζολανικά κονιάματα: έχουν ως συνδετική ύλη την άσβεστο και ως πρόσμικτο υλικό κάποια ποζολάνη (θηραϊκή γη, μηλαϊκή γη, ιπτάμενη τέφρα κ.α.).
- Γυψοκονιάματα: χρησιμοποιούν ως κύριο συνδετικό υλικό το γύψο
- Μαρμαροκονιάματα: έχουν ως κύριο αδρανές τη μαρμαρόσκονη και ως συνδετική ύλη την άσβεστο ή το τσιμέντο

1.1.5. Επίδραση του νερού ανάμιξης στις ιδιότητες των κονιαμάτων

Το νερό με την κονία αποτελούν τα δύο ενεργά συστατικά του κονιάματος και μαζί με τα αδρανή συνθέτουν το τελικό κονίαμα. Το νερό παίρνει μέρος σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων, που οδηγούν (με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων) στην πήξη και σκλήρυνση του μείγματος. Για τον λόγο αυτό το νερό πρέπει να είναι τόσο καθαρό, ώστε να περιέχει όσο το δυνατόν λιγότερα συστατικά που μπορεί να επηρεάσουν τις χημικές αντιδράσεις [28].

Ο ρόλος του νερού στα κονιάματα είναι διπλός. Ένα μέρος του χρησιμοποιείται για την παρασκευή του κονιάματος και καταναλώνεται στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την πήξη της κονιάς (άσβεστος, τσιμέντο κλπ.). Το υπόλοιπο μέρος χρησιμεύει στη διαβροχή των κόκκων των αδρανών και στην αύξηση της πλαστικότητας και εργασιμότητας του κονιάματος και είναι αυτό που επηρεάζει τις ιδιότητές του. Μικρή ποσότητα νερού δημιουργεί κονίαμα στεγανό και δυσκολοκατέργαστο, αλλά αυξημένης μηχανικής αντοχής και στεγανότητας. Αντίθετα, μεγάλη ποσότητα νερού δημιουργεί κονίαμα που είναι πλαστικό ως υδαρές και ευκολοκατέργαστο, αλλά συγχρόνως ελαττώνει την αντοχή του και τη στεγανότητά του. Επομένως, το νερό σε κατάλληλη ποσότητα είναι απαραίτητο για να δώσει στο κονίαμα την απαιτούμενη πλαστικότητα και εργασιμότητα [28].

Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως η συνολική ποσότητα νερού παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στη μηχανική αντοχή, όσο και στις υπόλοιπες ιδιότητες του κονιάματος. Όταν γενικά δεν είναι επαρκής, παραμένει μια ποσότητα κονιάς ανενεργή, με αποτέλεσμα να έχουμε μερική μόνο σύνδεση των αδρανών. Αντίθετα, όταν η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από τη συνολικά απαιτούμενη, δεν απορροφάται από την κονία και τα αδρανή, αλλά μένει ελεύθερη μέσα στη μάζα του υλικού, με αποτέλεσμα μετά την εξάτμιση του νερού να δημιουργούνται πόροι και κοιλότητες, μειώνοντας έτσι τη συνοχή και τις αντοχές του κονιάματος.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Το αρχαιότερο κονίαμα που εφαρμόστηκε σε κατασκευή είναι το πηλοκονίαμα που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε διάφορα μέρη του κόσμου. Στην αρχαία Αίγυπτο χρησιμοποιούσαν τα πηλοκονιάματα μαζί με πλίνθους που ξηραίνονταν στον ήλιο, ενώ για τους μεγάλους όγκους πέτρας των μνημειακών κτιρίων προτιμούσαν τον γύψο.



Εικόνα 1: Δείγμα πηλοκονιάματος από τη Μεγάλη Πυραμίδα, 2551-2528 π.Χ

Τα κονιάματα και σκυροδέματα που χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερες κατασκευές αφορούν σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ένα συνδετικό υλικό (ή μείγμα συνδετικών υλικών), φυσικό ή τεχνητό, συσσωματώματα ή μίγμα αυτών και προσθήκες ποζολάνης (φυσικής ή τεχνητής), προκειμένου να βελτιωθούν τα ασβεστιτικά κονιάματα και να παραταθεί η διάρκεια ζωής τους.

Μερικές φορές, προκειμένου να βελτιωθούν τα ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνταν ορισμένα οργανικά (φυτικά ή ζωικά) υλικά ως ενισχυτικά [6].

Οι τεχνίτες έπρεπε να βασίζονται σε πειραματισμούς ή πληροφορίες του παρελθόντος για να κατανοήσουν και να μάθουν τις ιδιότητες των υλικών, καθώς και τις επιδράσεις τους, όταν τα χρησιμοποιούσαν για την παραγωγή κονιαμάτων.

Η βιβλιογραφία αναφέρεται στη χρήση κονιαμάτων ως μονωτικά υλικά επένδυσης σε δεξαμενές, πηγάδια, υδραγωγεία, φρεάτια και αγωγούς αποχέτευσης, υποστηρικτικά υλικά για πεζοδρόμια και ψηφιδωτά, επιχρίσματα σε εξωτερικούς και

εσωτερικούς τοίχους, υποστηρίγματα για τοιχογραφίες, καθώς και ως συνδετικά υλικά σε δομές τοιχοποιίας. Οι παλαιότεροι τεχνίτες και οικοδόμοι δεν είχαν στη διάθεσή τους προηγμένα υλικά για την κατασκευή κονιαμάτων και σκυροδεμάτων και καθώς δεν ήταν σε θέση να επενδύσουν στην αντοχή των υλικών, επένδυναν στην αρτιότητα της τεχνικής [6]. Εφάρμοζαν ενστικτωδώς τρόπους οικολογίας και οικονομίας και δεν χρησιμοποιούσαν πολύτιμα και δυσεύρετα υλικά, όταν υλικά χαμηλής αξίας ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις της κατασκευής. Έβρισκαν τρόπους να αξιοποιήσουν στο μέγιστο τις δυνατότητες των διαθέσιμων υλικών.

Για την παρασκευή κονιαμάτων και σκυροδεμάτων χρησιμοποιούνταν διάφορα υλικά. Τα ασβεστοκονιάματα, γνωστά για τις αντοχές και τις αποδόσεις τους από τους αρχαίους χρόνους, κυριαρχούσαν στις δομικές κατασκευές, πιθανώς λόγω προβλημάτων που δημιουργούνταν από τη γύψο. Οι πρώτες ύλες καίγονταν περίπου στους 900 °C και μετατρέπονταν σε ασβέστο που σβενόταν επί τόπου με νερό. Φαίνεται ότι οι συνθήκες καύσης και μακρόχρονης ενδυνάμωσης σε λάκκους, διαδραμάτιζαν σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες της ασβέστου [6].

Μια άλλη παραδοσιακή μέθοδος ήταν η ανάμιξη ασβέστη με άμμο (hot lime method). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ασβέστος προστίθονταν στην άμμο με μια προκαθορισμένη αναλογία όγκου και το κονίαμα διατηρούταν υγρό όσο το δυνατόν περισσότερο. Στη διάρκεια του εκάστοτε έργου προστίθονταν νερό, ώστε να αποκτήσει το κονίαμα την επιθυμητή εργασιμότητα. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιούνταν σε κονιάματα τοιχοποιίας, όπου η ύπαρξη του ασβέστη μεταξύ των λίθων ή των πλίνθων βελτιώνει τον δεσμό μεταξύ τους και κατά συνέπεια παραγόταν τοιχοποιία υψηλής αντοχής [24].

Η ανάμιξη ασβέστη με υγρή άμμο χρησιμοποιήθηκε επίσης στην παρασκευή επιχρισμάτων. Στην περίπτωση αυτή, το κονίαμα εφαρμοζόταν μετά από 3-30 ημέρες ωρίμανσης, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης ενυδάτωση του θερμού ασβέστη. Οι μαστόροι που χρησιμοποιούσαν αυτή τη μέθοδο είναι τώρα λίγοι, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η επίδραση αυτής της τεχνικής στα επιχρίσματα, ήταν η αύξηση της αντοχής λόγω της καλύτερης σύνδεσης της ασβέστου και των κόκκων άμμου, καθώς ο ασβέστης διαστέλλεται και η θερμότητα απελευθερώνεται από την αντίδραση ενυδάτωσης [24].



Εικόνα 2: Παλιό ασβεστοκάμινο

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την σβέση είναι:

- Η θερμοκρασία του νερού και της ασβέστου. Όπως είναι λογικό, η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και της ασβέστου επηρεάζει θετικά την ταχύτητα ενυδάτωσης.
- Ο βαθμός έψησης της ασβέστου. Όταν η άσβεστος είναι ψημένη σε χαμηλές θερμοκρασίες, έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, γεγονός που αυξάνει την ταχύτητα σβέσης.
- Προσμίξεις της ασβέστου και του νερού. Οι προσμίξεις έχουν αρνητική επίδραση στην ταχύτητα σβέσης, με ισχυρότερη επίδραση αυτή που οφείλεται στην παρουσία του Fe_2O_3 [20].

Τα πλεονεκτήματα της προσθήκης φυσικών ή τεχνητών ποζολανών σε μείγματα ασβέστη, προκειμένου να δημιουργηθούν υδραυλικά κονιάματα, ήταν γνωστά. Φυσικές ποζολάνες, κυρίως ηφαιστειακής προέλευσης, είτε ως χονδροειδές συσσωμάτωμα, είτε ως λεπτόκοκκη σκόνη στη μήτρα, χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα για προστασία από το νερό. Τεχνητές ποζολάνες, όπως τετράγωνα τούβλα και πλακίδια ή θραυσμένα κεραμικά, χρησιμοποιούνταν όποτε χρειαζόταν η παρασκευή ενός κονιάματος αδιάλυτου στο νερό και δεν υπήρχαν διαθέσιμα φυσικά ποζολανικά υλικά.

1.3. ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Η υποβάθμιση των ιστορικών κονιαμάτων αποδίδεται κυρίως στη χημική διάλυση της μήτρας του κονιάματος, δηλαδή του ασβεστολιθικού συνήθως συνδετικού υλικού και είναι γνωστή ως έκπλυση των αρμών του κονιάματος, ιδιαίτερα όσον αφορά τα ασβεστοκονιάματα. Η ευπάθεια των ιστορικών σύνθετων υλικών σε παράγοντες φθοράς, όπως για παράδειγμα η κρυστάλλωση των αλάτων, καθορίζεται από τα φυσικοχημικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, τη μικροδομή τους και την προσκόλληση του συνδετικού υλικού στα αδρανή. Σε μια αντίστροφη προσέγγιση, θα πρέπει να απαιτηθεί η παραγωγή κονιαμάτων αποκατάστασης, σχεδιασμένων με κατάλληλη μικροδομή για τη μείωση της ευπάθειας έναντι της κρυστάλλωσης των αλάτων, καθώς αυτά τα συστήματα θεωρούνται περισσότερο συμβατά με τις πορώδεις οικοδομικές πέτρες από το σύγχρονο τσιμέντο. Ως εκ τούτου, η μελέτη της συμπεριφοράς του κονιάματος αποκατάστασης σε θαλάσσια, βιομηχανικά και αστικά κέντρα είναι κυρίαρχης σημασίας [12].

Τα δομικά υλικά, όταν έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον έχουν την τάση να φθείρονται, ωστόσο παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση στη φθορά, η οποία εξαρτάται από δύο παράγοντες :

- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Τη φύση του υλικού

Προκειμένου να εξετασθεί η φθορά των κονιαμάτων, είναι αναγκαίο, το κάθε υλικό να αντιμετωπίζεται και σαν αυτόνομη μονάδα, αλλά και σαν αναπόσπαστο τμήμα του συνόλου της κατασκευής, που επηρεάζει και επηρεάζεται από τα γειτονικά του δομικά υλικά [9].

Οι παράγοντες που συντελούν στη φθορά των κονιαμάτων ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Μηχανικές Δράσεις
- Χημικές Δράσεις
- Βιολογικές Δράσεις

Μηχανικές Δράσεις: Οι δράσεις αυτές μπορεί να είναι είτε εξωτερικής είτε εσωτερικής προέλευσης

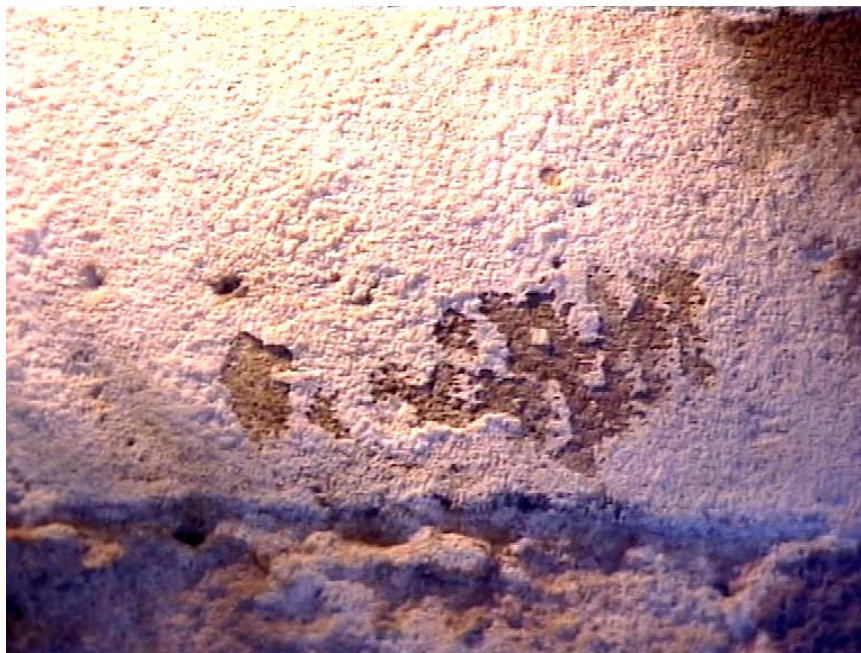
Εξωτερικής Προέλευσης:

- 1) Σεισμικές καταπονήσεις της κατασκευής
- 2) Μεταβολές στη θερμοκρασία, οι οποίες προκαλούν συστολές και διαστολές των υλικών
- 3) Φορτία που καταπονούν τα υλικά ως μέρος του δομικού συνόλου
Κκαταπονήσεις που οφείλονται στον κακό σχεδιασμό του οικοδομήματος

Εσωτερικής Προέλευσης:

- 1) Ο σχηματισμός πάγου, λόγω συγκρατούμενης υγρασίας, όταν η θερμοκρασία κατέβει κάτω του μηδενός (η διαδικασία αυτή ευνοείται, όταν τα υλικά διαθέτουν μεγάλο ποσοστό μικρών πόρων)
- 2) Η κρυστάλλωση των αλάτων: Τα άλατα μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές (τριχοειδής αναρρίχηση από το έδαφος, γειτονικά υλικά όπως το τσιμέντο, ακόμα και το ίδιο το κονίαμα). Η πιο επικίνδυνη μορφή είναι τα ευδιάλυτα άλατα που με τη βοήθεια του νερού μετακινούνται και όταν βρεθούν στις ιδανικές συνθήκες κρυσταλλώνονται σε διάφορες μορφές, συγκροτώντας τα μόρια του νερού, με αποτέλεσμα να υφίστανται διαστολές και να δημιουργούν τάσεις στο εσωτερικό του υλικού. Εάν η εξάτμιση του διαλύματος γίνει στην επιφάνεια των κονιαμάτων, τα άλατα δημιουργούν χαρακτηριστικές εξανθίσεις [9].

Χημικές Δράσεις: Για να λάβουν χώρα οι δράσεις αυτές, είναι απαραίτητη η παρουσία του νερού, είτε με τη μορφή νερού της βροχής, είτε ως συμπύκνωση της υγρασίας. Οι δράσεις αυτές εμφανίζονται φυσικά με διαφορετικές μορφές αντιδράσεων από κονίαμα σε κονίαμα.



Εικόνα 3: Εξανθίσεις αλάτων σε τοιχοποιία

Βιολογικές Δράσεις: Στις βιολογικές δράσεις κατατάσσεται η δράση των βακτηρίων, μυκήτων, φυκιών, βρύων, λειχήνων, καθώς και ανωτέρων φυτικών οργανισμών. Το προϊόν μεταβολισμού των μικροοργανισμών είναι όξινης φύσης και δρα διαλυτικά για τα κονιάματα. Σε ορισμένες συνθήκες η δράση των μικροοργανισμών μπορεί να είναι καταστροφική, καθώς η παρουσία τους μπορεί να επιδεινώσει ορισμένες χημικές δράσεις. Επιπλέον, η ύπαρξη ανωτέρων φυτικών οργανισμών εξασκεί μηχανικές τάσεις στα δομικά υλικά, όταν βρίσκεται σε άμεση επαφή με αυτά [9].



Εικόνα 4: Μικροσκοπική άποψη αποικιών λειχήνων

Παρατηρείται λοιπόν, ότι στη διαδικασία της φθοράς το σημαντικότερο ρόλο παίζει το νερό, γιατί:

- είναι ο κύριος φορέας έκφρασης των φυσικομηχανικών δράσεων φθοράς
- οι χημικές δράσεις εκφράζονται μόνο με την παρουσία νερού-υγρασίας, έστω και αν είναι παροδική.

Θα πρέπει να τέλος να τονιστεί, ότι το φαινόμενο της φθοράς είναι συνήθως πολύ πιο πολύπλοκο, αφού οι δράσεις που αναφέρθηκαν τις περισσότερες φορές δεν συναντώνται από μόνες τους αλλά δρουν συνδυαστικά, επιλεκτικά και με ανομοιογένεια, επιδεινώνοντας έτσι την όλη κατάσταση.

ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ – ΓΕΦΥΡΙ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΑΡΑΧΘΟ

Η εξέλιξη της γεφυροποιίας ακολούθησε την εξέλιξη της οδοποιίας και κατ' επέκταση των συγκοινωνιών. Παρά το γεγονός ότι η εξέλιξη αυτή ήταν συνεχής, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις ξεχωριστές φάσεις, θέτοντας ως διαχωριστικά σημεία την εισαγωγή της επεξεργασμένης πέτρας από τους Ρωμαίους γύρω στο 200 π.Χ. και την εισαγωγή του χυτοσιδήρου στα τέλη του 18ου αι. μ.Χ..

- Φάση 1η: 4000 π.Χ. - 200 π.Χ.: Χρήση ακατέργαστων ή ελαφρώς κατεργασμένων υλικών, όπως μεγάλες πλάκες, ογκόλιθοι, κορμοί, μεγάλα κλαδιά δέντρων κ.ά.
- Φάση 2η: 200 π.Χ. - 1780 μ.Χ.: Χρήση μερικών κατεργασμένων υλικών, όπως λαξευμένες πέτρες και ξύλινα δοκάρια διαφόρων σχημάτων και μεγεθών.
- Φάση 3η: 1780 μ.Χ. - σήμερα. Χρήση πλήρως κατεργασμένων υλικών, όπως σίδηρο, ατσάλι και οπλισμένο σκυρόδεμα [16].

Η μορφολογία και η ποιότητα κατασκευής των γεφυριών εξαρτιόταν από την γεωμορφολογία του σημείου ανέγερσης και κατόπιν από την εκάστοτε οικονομική κατάσταση του τόπου που βασιζόταν σε χρηματοδοτήσεις και δωρεές. Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας κατασκευάστηκε και συντηρήθηκε μεγάλος αριθμός γεφυριών, διότι η συνεχής καλυτέρευση του οδικού δικτύου ήταν πρωταρχικής σημασίας για την επίβλεψη και την άνθιση του οθωμανικού κράτους. Τα περισσότερα από τα γεφύρια που υπάρχουν σήμερα κατασκευάστηκαν από τα μέσα περίπου του 18ου αι. έως τις αρχές του 20ου αι.. Λειτουργούσαν ως διάλυοι επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων οικισμών της Ηπείρου και πολλές φορές ως εμπορικά μονοπάτια για τη διέλευση караβανιών και αμαξών [1].

Οι όμορφες πέτρινες τοξωτές γέφυρες της χώρας μας ήταν και είναι εξαιρετικές κατασκευές πλήρως εναρμονισμένες στο φυσικό περιβάλλον, προσθέτοντας ένα γοητευτικό άγγιγμα. Για το λόγο αυτό, οι πέτρινες γέφυρες της χώρας μας, εκτός από το ότι αποτελούσαν τους βασικούς κόμβους και τα κανάλια του εμπορίου, των μεταφορών και της επικοινωνίας των λαών και των πολιτισμών, ήταν ένα εξαιρετικό στοιχείο της πολιτιστικής μας κληρονομιάς [3].

Η Γέφυρα της Πλάκας χτίστηκε το 1866, στον ποταμό Άραχθο, στον οικισμό της Πλάκας της Κοινότητας των Ραφτανέων (Δυτικά Τζουμέρκα) στην Ήπειρο. Η Γέφυρα βρίσκεται σε απόσταση 86,5χλμ από τις εκροές του ποταμού Αράχθου και σε υψόμετρο 250μ. Η Γέφυρα σχημάτισε τη σύνδεση μεταξύ των χωριών της περιοχής Τζουμέρκα και των πόλεων Άρτας και Ιωαννίνων [4].

Τα πέτρινα γεφύρια της Ηπείρου ανάγονται σχεδόν όλα στα χρόνια της οθωμανικής κυριαρχίας και ιδιαίτερα στην περίοδο του 18ου και 19ου αιώνα. Αυτά αποτελούσαν τμήματα του οδικού δικτύου για τη διακίνηση και ανάπτυξη του εμπορίου. Είναι δημιουργήματα της λαϊκής αρχιτεκτονικής και αποτελούν με την αισθητική τους αξία ένα κόσμημα για την περιοχή της Ηπείρου.



Εικόνα 5: Γεφύρια της Ηπείρου

Μεταξύ 1881 και 1913, ο ποταμός Άραχθος σχημάτιζε το όριο μεταξύ της Ελλάδας και της Τουρκίας. Έτσι, στη μια όχθη του ποταμού υπήρχε ένα τελωνείο και μια φυλακή του ελληνικού στρατού. Μετά την απελευθέρωση της Ηπείρου (1912-1913), η Γέφυρα δόθηκε στους κατοίκους της περιοχής. Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, οι κάτοικοι από τα ορεινά χωριά των Τζουμέρκων χρησιμοποιούσαν τη Γέφυρα για να φτάσουν στις επίπεδες περιοχές και τα πλουσιότερα χωριά που βρίσκονταν στην κοιλάδα, όπου αναζητούσαν εργασία και φαγητό για να επιβιώσουν. Ο γερμανικός στρατός προσπάθησε να ανατινάξει τη γέφυρα, αλλά δεν τα κατάφερε. Η ρωγμή που προκλήθηκε επισκευάστηκε μερικά χρόνια αργότερα. Η περιοχή γύρω από τη Γέφυρα ήταν πολύ συχνά το επίκεντρο του πολέμου. Σε ένα κτίριο κοντά στη Γέφυρα υπογράφηκε το 1944 η ‘Συνθήκη της Πλάκας’. Το κτίριο αυτό υπάρχει μέχρι σήμερα και προστατεύεται από το νόμο ως μνημείο ορόσημο [4].

Στη διάρκεια των 150 χρόνων ζωής της γέφυρας, συνέβησαν διάφορα γεγονότα και μικροεπισκευές για τα οποία δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία τεκμηρίωσης.

Η πρώτη προσπάθεια κατασκευής γέφυρας στο σημείο όπου αργότερα ανεγέρθηκε το Γεφύρι της Πλάκας, ήταν ανεπιτυχής, με την κατάρρευσή του να συμβαίνει το 1860 λόγω μετατόπισης του βράχου στον οποίο στηριζόταν το δεξιό της σκέλος. Η γέφυρα ξαναχτίστηκε το 1863 με την οικονομική υποστήριξη των Ιωάννη Ζ. Λούλη και Δημ. Αρβανιτογιάννη, αλλά κατέρρευσε την ημέρα των εγκαινίων της. Στην σημερινή του θέση και μορφή κτίστηκε το 1866, υπό την επίβλεψη του διάσημου τοπικού οικοδόμου Κωνσταντίνου Μπέκα. Η γέφυρα όμως παραδόθηκε με ατέλειες, διότι η χρηματοδότηση του έργου δεν ήταν επαρκής. Το πλάτος της γέφυρας δεν ήταν το

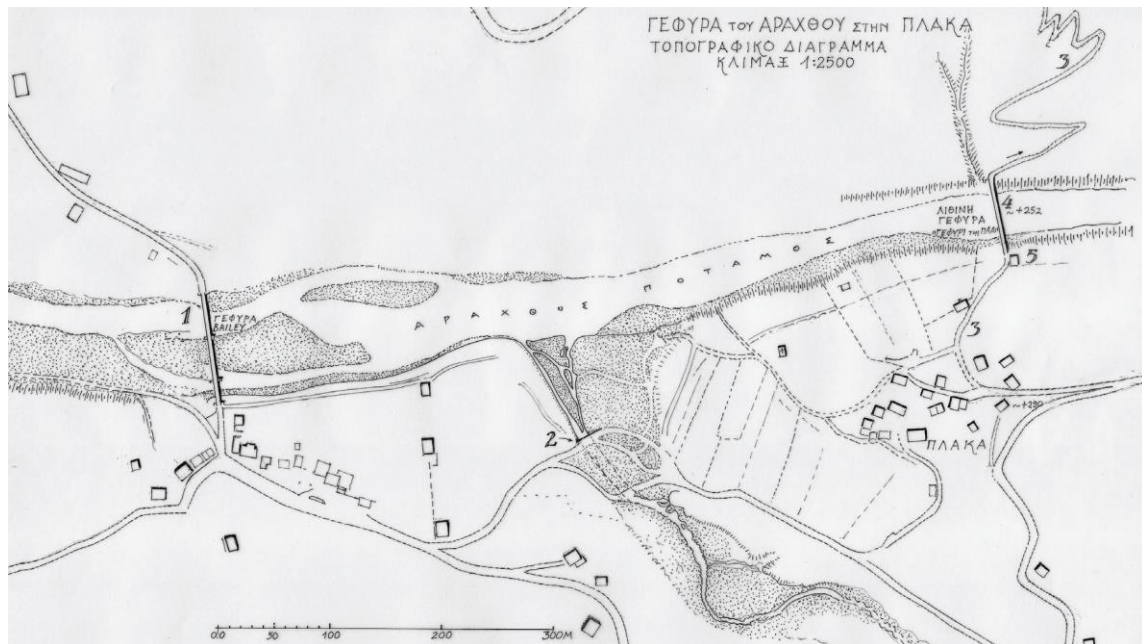
επιθυμητό, η τοιχοποιία πάνω από τα βάθρα ήταν ατελής και τα στηθαία δεν κατασκευάστηκαν, καθιστώντας δύσκολη και επικίνδυνη τη διάβαση της γέφυρας.

Μελέτη που διεξήχθη από το Πολυτεχνείο έδειξε ότι οι αιτίες της κατάρρευσης του γεφυριού το 2015 ήταν λόγω προβλημάτων στην γεωμετρία της, λόγω των ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών, προβλημάτων στα θεμέλια, υποβάθμισης των συνδετικών κονιαμάτων, χρήσης ασύμβατων υλικών στις πρόσφατες αποκαταστάσεις, καθώς και λόγω παλαιότερων ζημιών, λόγω μιας έκρηξης κατά τη διάρκεια του ΄Β Παγκοσμίου Πολέμου [5].



Εικόνα 6: Άποψη Γέφυρας πριν και μετά την κατάρρευση

Τον Αύγουστο του 1972 το γεφύρι της Πλάκας κηρύχθηκε ιστορικό διατηρητέο μνημείο στο ΦΕΚ-621/22-08-1972.



Εικόνα 7: Η περιοχή του έργου: 1. Γέφυρα Bailey, 2. Οδός προς Πλάκα, διάβαση του παραπόταμου Ραφτανίτη, 3. Παλαιά ιστορική οδός, κατά θέσεις λιθόστρωτη, 4. Η ιστορική Γέφυρα της Πλάκας, 5. Παλαιό Τελωνείο

2.1.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Γέφυρας

Η γέφυρα στέκει σε σημείο 86,5 χλμ από την εκβολή του ποταμού (μέτρηση μήκους ιστορικής κοίτης, μη λαμβανομένης υπ' όψιν της τεχνητής λίμνης), με υψόμετρο ~ +250. Στην θέση αυτή, η κλίση του ποταμού είναι ιδιαίτερος ισχυρή (~7:1000), ενώ έως την τεχνητή λίμνη, 25 χλμ κατάντη, είναι ~5:1000. Στην θέση της γέφυρας, η κοίτη φαίνεται σχεδόν ευθεία, στην πραγματικότητα όμως παρουσιάζει ελαφρά αριστερή στροφή, με ακτίνα καμπυλότητας περίπου 1,5 χλμ, εξ αιτίας της οποίας, συντελούντος και του εδάφους, η κοίτη βαθύνεται δεξιά του μέσου και καλύπτεται από φερτές ύλες αριστερά αυτού. Βάσει πληροφοριών των εντοπίων, ιχνών επί των οχθών, αλλά και της υψηλής θέσεως του δυτικού ανακουφιστικού τόξου, χρησιμοποιούμενης ως ένδειξης, η μεταξύ ελαχίστου και μεγίστου διαφορά στάθμης, είναι περίπου της τάξεως των 6 μέτρων. Ωστόσο, τα δύο υδρόμετρα στάθμης του ανατολικού μεσοβάθρου, επέτρεπαν μέτρηση έως +2 μ.. Δεδομένης της ισχυρής κλίσης ροής (~0,7%) και της μεγάλης ανύψωσης της στάθμης, η ταχύτητα του ποταμού μπορεί εύκολα να υπερβαίνει τα 20 χλμ/ώρα [1].

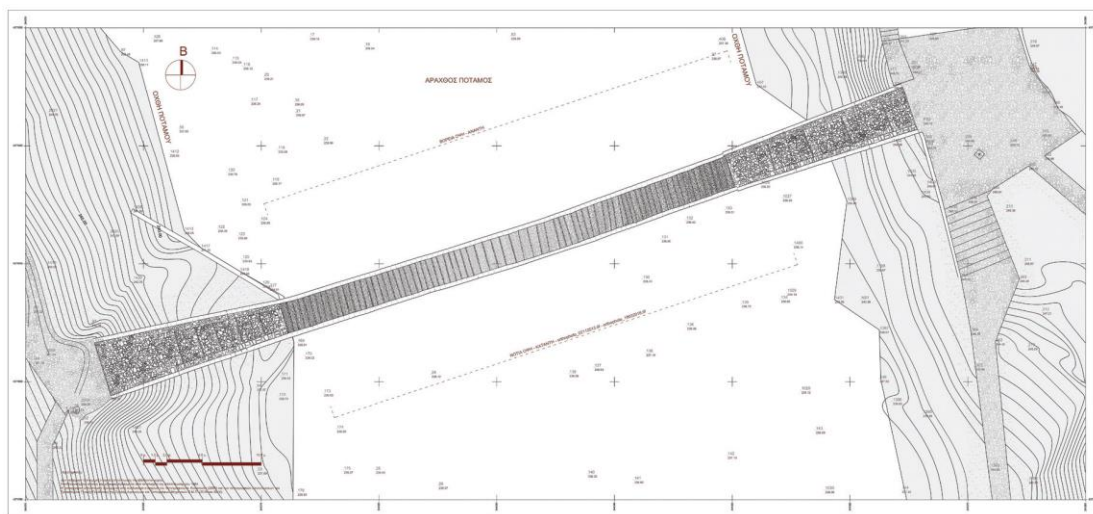
2.1.2. Σύντομη Αρχιτεκτονική Περιγραφή

Μετά την ανατίναξη της ιστορικής μονότοξης γέφυρας Κοράκου (1949) που είχε άνοιγμα τόξου μεγαλύτερο των 45,0μ., το Γεφύρι της Πλάκας ήταν το μεγαλύτερο σωζόμενο μονότοξο γεφύρι της Ηπείρου, ανοίγματος ~40μ και ύψους ~21 μ. [1].

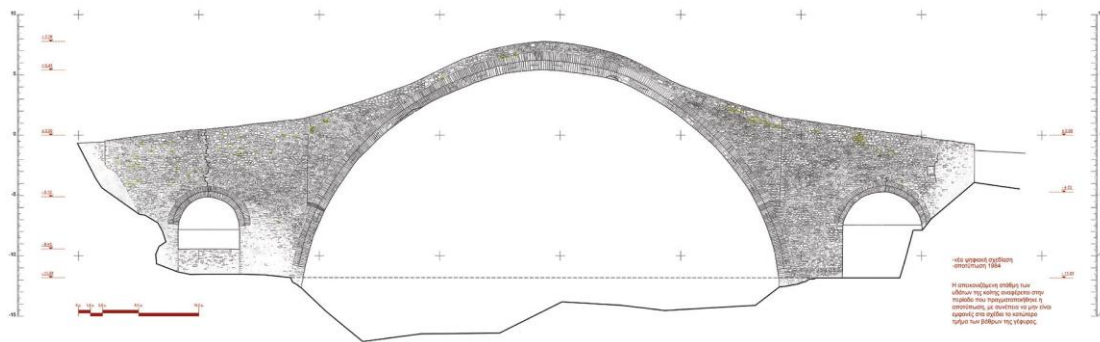
Το πλάτος της γέφυρας ήταν ~3,20μ στο κεντρικό τόξο (οδόστρωμα~2,50μ και στηθαία~0,30-0,35μ Χ2), ενώ στα βάθρα υπήρχε βαθμιαία διαπλάτυνση που έφτανε τα 4.00μ και 4,50 μ.. Εκατέρωθεν του κεντρικού τόξου, υπήρχαν δύο ανακουφιστικά τοξωτά ανοίγματα. Το ανακουφιστικό τοξωτό άνοιγμα στο ανατολικό βάθρο είχε πλάτος περίπου 6,5μ και το δυτικό περίπου 5,00μ. [1].

Το κεντρικό τόξο της γέφυρας αποτελείτο από δύο επάλληλα τόξα. Το τόξο εσωραχίου (αναφέρεται και ως κύριο τόξο) που είχε πάχος 60-65εκ, κατασκευάστηκε σε ελαφρά εσοχή από το τόξο εξωραχίου (αναφέρεται και ως επιβοηθητικό ή δευτερεύον) το οποίο είχε πάχος 50εκ περίπου. Σε κάθε μία από τις δύο όψεις του τόξου εσωραχίου είχαν τοποθετηθεί 20 εγκάρσιοι διαμπερείς σύνδεσμοι "άρπιζες" για την ενίσχυση της δομής [1].

Το στηθαίο, που όπως προκύπτει από την ιστορική τεκμηρίωση κατασκευάστηκε σε μεταγενέστερη φάση από την υπόλοιπη γέφυρα, έχει υποστεί πολλές τροποποιήσεις και επισκευές. Στο στηθαίο διακρίνεται η απόπειρα ατελούς στήριξης «αρκάδων», κατακόρυφων λίθων πακτωμένων στο εξωράχιο και στον τοίχο μετώπου.



Εικόνα 8: Κάτοψη Γέφυρας



Εικόνα 9: Όψη Γέφυρας Κάτάντη

Στην περίπτωση των γεφυριών με διαδοχικά τόξα, οι ενδιάμεσες καμάρες, βασίζονταν σε πέτρινους στύλους που έφεραν ανοίγματα σε ύψος εκτιμώμενο από τον κατασκευαστή, για την επέκταση της υδροστατικής και υδροδυναμικής ενέργειας του νερού κατά τις πλημμύρες. Τα θεμέλια όμως των γεφυριών αυτού του τύπου και δεδομένου του εδάφους γύρω από ποταμούς (χαλίκια και άμμος) δεν θα μπορούσαν να αντέχουν ταυτόχρονα το βάρος της ίδιας της γέφυρας και το βάρος της διέλευσης των ανθρώπων, των ζώων και διάφορων μεταφορικών μέσων. Στην περίπτωση αυτή, η τεχνική κατασκευή αποσκοπούσε στη μείωση του βάρους της ίδιας της δομής και στη μείωση της εφαρμοζόμενης πίεσης του ποταμού στον πυθμένα των ρευμάτων. Η μείωση του βάρους της κατασκευής επιτεύχθηκε μέσω κενών στο σώμα της δομής για τη μείωση του ειδικού βάρους τουλάχιστον κατά 20-25%. Επίσης, δράσεις όπως η διεύρυνση της βάσης των κατασκευών ή η κατασκευή πέτρινων στύλων στο κάτω μέρος των ρευμάτων, είχαν ως αποτέλεσμα την ανακούφιση της δομής από τις δυνάμεις του ποταμού [3].

2.1.3. Ιστορικοί Λίθοι

Η χρήση της πέτρας ως δομικό υλικό κάλυπτε πάντα πολλές σημαντικές ανθρώπινες ανάγκες, όπως την κατασκευή φραγμάτων και οδοστρωμάτων, μονοπατιών ή οδών και στη συγκεκριμένη περίπτωση την οικοδόμηση γεφυρών. Πριν από την ανακάλυψη του σκυροδέματος και την τάση που προέκυψε για κατασκευές εξολοκλήρου με αυτό, οι περισσότερες γέφυρες ήταν κατασκευασμένες από φυσική πέτρα, με ή χωρίς συνδετικό υλικό [3].

Στην περιοχή της Ηπείρου, λόγω των γεωλογικών συνθηκών (άφθονοι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί), στις περισσότερες πέτρινες κατασκευές χρησιμοποιούνταν ως δομικό υλικό ο φυσικός ή σκαλιστός ασβεστόλιθος. Οι διαστάσεις των λίθων διέφεραν σε κάθε κατασκευή ανάλογα με το είδος της και τη στατική λειτουργία των δομών [3].

Τα λιθοσώματα από τα οποία είναι κτισμένη η γέφυρα, είναι τεμάχια τοπικού πετρώματος ασβεστολιθικού φλύσχη (μαρμαρυγιάκος ασβεστιτικός ψαμμίτης) τα οποία σε ειδικές περιπτώσεις (όπως στις άντυγες των τόξων) είναι πελεκητά με ελάχιστο πάχος αρμών. Στα βάθρα, τα εσωτερικά γεμίσματα είναι κυρίως από το ίδιο

πέτρωμα, ενώ το γέμισμα του κεντρικού τόξου γίνεται από πιθανότατα τοπικό, πωρόλιθο (ασβεστιτική μάργα) [1].

Ως συνήθως, στην Ήπειρο, έτσι και στην περίπτωση της Πλάκας, η γέφυρα είναι κτισμένη με πλακοειδή τεμάχια λίθου και συγκεκριμένα ασβεστιτικού ψαμμίτη. Εξ αυτών τα χρησιμοποιηθέντα στις άντυγες των τόξων είναι πελεκητά. Το μέσο πάχος τους είναι ~ 12 εκ, το κατά την ακτίνα μήκος τους φθάνει τα 65 εκ (ή σχεδόν 80εκ πλησίον της κορυφής) και το βάρος τους τα 80 kg [1].

Η συμπαγής ιστορική πέτρα της Γέφυρας της Πλάκας είναι ένα κλασικό ιζηματογενές πέτρωμα και συγκεκριμένα ένας ασβεστολιθικός ψαμμίτης με γκρι χρωματισμό. Η πορώδης ιστορική πέτρα είναι ένα ασβεστόχο μάρμαρο με σημαντικό πορώδες, μεγέθους έως και 1cm. Οι συμπαγείς ιστορικές πέτρες παρουσίαζαν στρογγυλεμένες άκρες, μια ένδειξη ότι συλλέχθηκαν από τον ποταμό Άραχθο, ακολουθώντας αυστηρή διαδικασία συλλογής όσον αφορά τις διαστάσεις τους. Ως επί το πλείστον επιλέχθηκαν πέτρες διαστάσεων 55-60cm και 6-12cm (αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις πέτρες που χρησιμοποιήθηκαν για τα ορατά τμήματα της κύριας καμάρας) [5].

2.2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ο κύκλος ζωής υλικών και κατασκευών εξαρτάται από ανθρώπινους, οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

- Ανθρώπινοι παράγοντες: λειτουργικότητα, υγεία, ασφάλεια, ευχρηστικότητα
- Οικονομικοί παράγοντες: κόστος απόκτησης, σύνθεσης, συντήρησης, ανακύκλωσης, διαθεσιμότητα, κόστος/ιδιότητες
- Κοινωνικοί παράγοντες: παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, αισθητική, αρχιτεκτονικά στυλ και τάσεις, τρόπος ζωής
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: περιβαλλοντικό κόστος πρώτων υλών, ενεργειακό κόστος, κόστος επιβάρυνσης περιβάλλοντος, κόστος αποβλήτων

Λειτουργική διάρκεια ζωής ενός υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή ορίζεται ως το χρονικό διάστημα (ή αριθμός κύκλων λειτουργίας) που παρέρχεται μέχρι την απώλεια μάζας, ή μείωση κάποιας ιδιότητας (μηχανική, φυσική, χημική κλπ.) του υλικού, σε τέτοιο βαθμό που καθιστά την χρήση του μη ικανοποιητική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή [17].

Οικονομική διάρκεια ζωής ενός υλικού ορίζεται ως το χρονικό διάστημα (ή αριθμός κύκλων λειτουργίας) πέραν του οποίου είναι οικονομικά ασύμφορη η διατήρηση του υπάρχοντος υλικού. Αυτό συμβαίνει, όταν το συνολικό κόστος συντήρησης, αποκατάστασης, αποτίμησης και αντικατάστασης του υπάρχοντος υλικού είναι μεγαλύτερο από το ολικό κόστος ζωής ενός νέου υλικού ίδιας ή διαφορετικής σύστασης [17].

Η παρακολούθηση του κύκλου ζωής των υλικών (ιδιοτήτων, χαρακτηριστικών και κόστους) πρέπει να είναι συνεχής και ολοκληρωμένη και η διάγνωση της φθοράς (απομείωση των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών) πρέπει να ακολουθεί ολοκληρωμένη μεθοδολογία [17].

Η μεθοδολογία της Διαγνωστικής Μελέτης είναι το κατάλληλο εργαλείο για την επιτελεστικότερη διάγνωση της φθοράς των υλικών [17].

2.2.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ



2.3. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ – ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΒΛΑΒΩΝ

Τα αίτια κατάρρευσης της Γέφυρας είναι πολλά και έχουν διερευνηθεί κυρίως βάσει υπάρχουσας βιβλιογραφίας (ειδικότερα μέσω της διπλωματικής εργασίας του πολιτικού μηχανικού Δημήτρη Μπακάλη), φωτογραφικής τεκμηρίωσης και in situ μελέτης. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αίτια και τα αποτελέσματα των φθορών που παρουσιάστηκαν ανά τα χρόνια στο Γεφύρι.

2.3.1. Βλάβες και παραμορφώσεις του κεντρικού τόξου

- 1) Η έκρηξη οβίδας στο Γεφύρι κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα ακτινωτό σύστημα ρωγμών (0,5-8,0 εκ) γύρω από την οπή που προκλήθηκε από την έκρηξη, η οποία είχε διαστάσεις 0,90 x 1.60 μ.. Η λιθοδομή αποσαθρώθηκε και μεγάλο τμήμα του

τόξου εσωραχίου μετατοπίστηκε. Επίσης, ένα τμήμα του εξωράχιου τόξου καταστράφηκε και αυτό.



Εικόνα 10: Βλάβη της Γέφυρας από την έκρηξη

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων-διερευνήσεων που διεξάχθηκαν από την ομάδα του Ε.Μ.Π., παρατηρούνται εξάρσεις στην μεταβολή της έντασης. Οι εξάρσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην αλλαγή της καμπυλότητας του κεντρικού τόξου, η οποία συμπίπτει ακριβώς με την περιοχή εμφάνισης της ρωγμής, αλλά και στην αλλαγή δόμησης που λαμβάνει χώρα επίσης στα σημεία αυτά, όπου πλέον το κεντρικό τόξο αναπτύσσεται μόνο του χωρίς τη συμπαγή μάζα των μεσοβάθρων, αριστερά η δεξιά, παρουσιάζοντας έντονη λυγηρότητα εντός και εκτός επιπέδου.

Σε συμμετρική θέση ως προς την προηγούμενη βλάβη, είχε εντοπιστεί το 1995 ευθύγραμμη ρωγμή - αποκόλληση στο εσωράχιο του κύριου τόξου, σε όλο το πλάτος του, κυμαινόμενου εύρους από 5,0 εκ έως 11,5 εκ. Παρατηρήθηκε ότι στο κατάντη τμήμα είχαν αποκολληθεί μια ή δύο σειρές θολιτών.



Εικόνα 11: Βλάβη στο εσωράχιο του κυρίως τόξου

- 2) Λόγω σεισμικής δράσης με κύρια διεύθυνση κάθετη στον άξονα της γέφυρας, είτε λόγω στροφής του βάθρου (περί κατακόρυφο άξονα), είτε σε συνδυασμό των αιτίων αυτών, ο διαμήκης άξονας του κυρίως τόξου παρουσίαζε απόκλιση από την ευθεία σε κάτοψη (κύρτωση του κεντρικού τόξου προς τα κατόντη). Η απόκλιση αυτή είναι επίσης πολύ πιθανό να προκλήθηκε και από το πρόωρο ξεκαλούπωμα της γέφυρας, όταν κατασκευάστηκε.

2.3.2. Βλάβες στα ανακουφιστικά τόξα των βάρων

- 1) Στην κλείδα του δυτικού ανακουφιστικού τόξου υπήρχε ρωγμή εκτεινόμενη σε όλο το πλάτος του εσωραχίου. Αυτή η ρωγμή συνέχιζε και στα δύο τύμπανα άνωθεν του τόξου. Η μορφή της ρωγμής (μεταβλητό άνοιγμα 0,5 εκ στη νότια όψη – 1,5 εκ στη βόρεια όψη) είναι συμβατή με μετατόπιση και οριζόντια στροφή του δυτικού μεσοβάθρου, οι οποίες με τη σειρά τους είναι συμβατές με την κύρτωση του κεντρικού τόξου προς κατάντη.



Εικόνα 12: Βλάβη στο ανακουφιστικό τόξο του δυτικού βάρου

Σημειώνεται ότι οι τότε παρατηρηθείσες ρηγματώσεις αποκαταστάθηκαν με αρμολόγημα την περίοδο 2007 – 2008. Επανεμφανίζονται σήμερα είτε στην ίδια είτε σε γειτονικές θέσεις.

- 2) Στη νότια όψη και μεταξύ δυτικής ανακουφιστικής καμάρας και πρανούς είχε καταγραφεί αποδιοργάνωση όλου του κατώτατου τμήματος της τοιχοποιίας του τυμπάνου, η οποία αργότερα επισκευάστηκε.



Εικόνα 13: Αποδιοργάνωση του κάτω τμήματος του τυμπάνου

- 3) Στη βόρεια όψη του τόξου ήταν εμφανής η θλιπτική δράση στο κάτω μισό της διατομής (θραύση κονιάματος γύρω από την κορωνίδα) και η εφελκυστική δράση στο άνω μισό (μικρού εύρους ρωγμή στην ίδια θέση).



Εικόνα 14: Ρηγμάτωση ανατολικού ανακουφιστικού τόξου

2.3.3. Υποσκαφή Θεμελίων

Έντονο φαινόμενο υποσκαφής παρατηρήθηκε τόσο στο θεμέλιο του ανατολικού μεσοβάθρου όσο και στο θεμέλιο του τοιχείου αντιστήριξης κάτωθεν του ανατολικού ακροβάθρου και στο πέριξ αυτού πρανές. Το φαινόμενο καταγράφηκε το 1995, αλλά θεωρείται πιθανή η έκτοτε επιδείνωσή του. Αποτέλεσε το σημαντικότερο αίτιο κατάρρευσης της γέφυρας, δεδομένου ότι κατά το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε, δεν πραγματοποιήθηκαν έργα προστασίας των θεμελίων.



Εικόνα 15: Υποσκαφή θεμελίων

2.3.4. Προβλήματα Υγρασίας

Το Γεφύρι βρίσκεται μέσα σε ένα πλούσιο από πανίδα περιβάλλον, πράγμα που συντελεί στη συνολική αισθητική ομορφιά του μνημείου, αλλά παράλληλα δημιουργεί και μεγάλα προβλήματα σε αυτό. Η επιβαρυντική δράση της υγρασίας πολλαπλασιαζόταν ανά τους χρόνους από την δράση των φυτών, μέσω του ριζικού τους συστήματος. Λόγω έλλειψης συντήρησης, φύτεωναν διάφορα φυτά πάνω στο κατάστρωμα και στην ανωδομή των τοίχων των τυμπάνων, κυρίως στην περιοχή έδρασης των στηθαίων, με αποτέλεσμα την επιδείνωση της επισφαλούς στήριξης των παραπέτων και την επιβάρυνση της κατάστασης του μνημείου.



Εικόνα 16: Δράση υγρασίας λόγω του περιβάλλοντος

2.3.5. Προηγούμενες Επεμβάσεις Συντήρησης

Σε περίοδο που δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς, κατασκευάστηκε ένας λίθινος τοίχος αντιστήριξης στην περιοχή έδρασης του θεμελίου του ανατολικού βάθρου, πιθανώς για την αντιμετώπιση προβλημάτων υποσκαφής [1].



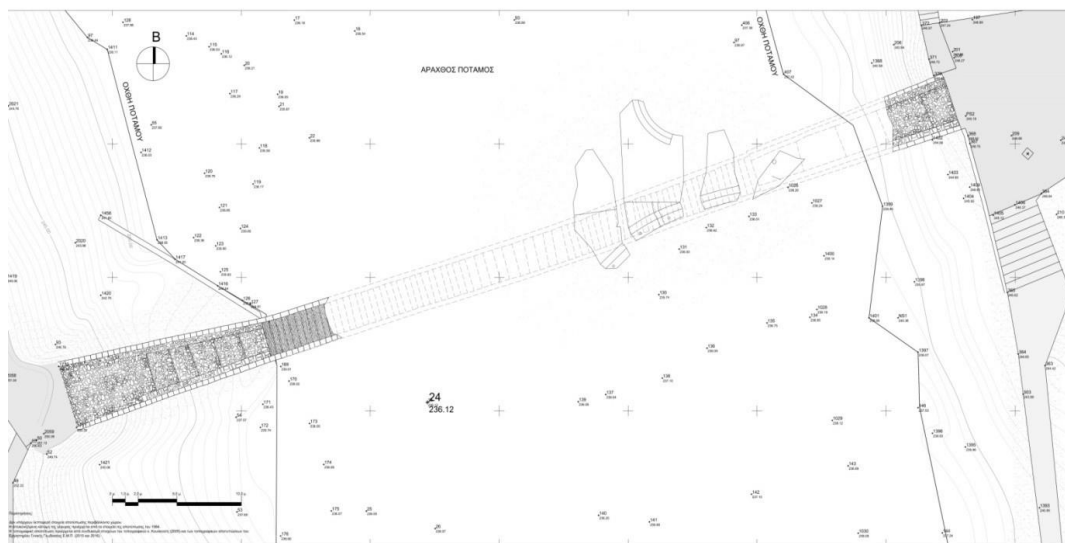
Εικόνα 17: Λίθινος τοίχος αντιστήριξης στη θέση του θεμελίου του ανατολικού βάθρου

Αργότερα, πάλι σε απροσδιόριστη χρονική περίοδο, άλλος ένας πέτρινος τοίχος κατασκευάστηκε ανάντη του μεσοβάθρου, πιθανώς για την προστασία του δυτικού βάρου έναντι υποσκαφής [1].



Εικόνα 18: Λίθινος τοίχος ανάντη του δυτικού μεσοβάθρου

2.4. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ



Εικόνα 19: Κάτοψη γέφυρας μετά την κατάρρευση



Εικόνα20: Όψη κατάντη γέφυρας μετά την κατάρρευση

2.4.1. Ανατολικό Βάθρο

Μετά την κατάρρευση του μεγαλύτερου τμήματος της Γέφυρας το 2015 (κεντρικό τόξο και ανατολικό βάθρο) έγινε προσπάθεια αποτίμησης της παθολογίας του υφιστάμενου μνημείου από την εξειδικευμένη διεπιστημονική ομάδα του Ε.Μ.Π.. Η σημαντικότερη αστοχία σημειώθηκε στο ανατολικό βάθρο, του οποίου το μεγαλύτερο μέρος κατάρρευσε μαζί με το κεντρικό τόξο. Πιο συγκεκριμένα, η αστοχία έχει φτάσει στο σημείο όπου το ανακουφιστικό τόξο σχηματίζει γωνία περίπου 45°. Στην επιφάνεια αστοχίας, παρατηρείται η ύπαρξη ξύλινου στοιχείου παράλληλα με τους οριζόντιους αρμούς και κατά την εγκάρσια διεύθυνση της γέφυρας.



Εικόνα 21: Επιφάνεια αστοχίας ανατολικού βάθρου και ύπαρξη ξύλινου στοιχείου

2.4.2. Δυτικό Βάθρο

Το δυτικό βάθρο έχει διατηρηθεί έως περίπου 41° από τη θεωρητική γένεση του τόξου, γωνία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των 30° στην οποία λαμβάνει χώρα συνήθως η αστοχία στα τόξα. Η επιφάνεια αστοχίας του τόξου έχει εμφανισθεί και πάλι σε θέση όπου υπήρχαν ξύλινα στοιχεία. Η μορφή της αστοχίας φαίνεται να είναι κυρίως καμπτική (εκτός επιπέδου), ενώ επί πλέον η εικόνα παραμόρφωσης των στηθαίων δείχνει ότι η κίνηση κατά την κατάρρευση είχε συνισταμένη και προς ανάντη. Τα στηθαία στις θέσεις αυτές είναι σε ετοιμόρροπη κατάσταση και επιβάλλεται να στερεωθούν. Στο συγκεκριμένο βάθρο είχαν εντοπιστεί και στο παρελθόν ρηγματώσεις (κυρίως κατακόρυφες στα τύμπανα και στη θέση του κλειδιού του ανακουφιστικού τόξου σε όλο το πλάτος του). Είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι στην περιοχή αυτού του βάθρου είχαν εμφανισθεί βλάβες, δεδομένου ότι το ανακουφιστικό άνοιγμα έχει εν μέρει πληρωθεί με τοιχοποιία μεταγενέστερης κατασκευαστικής φάσης, μέχρι την στάθμη του 1,5m περίπου πριν από την στάθμη της γένεσης του τόξου.



Εικόνα 22: Επιφάνεια αστοχίας δυτικού βάρου

3. ΓΕΝΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

3.1.1. ΦΑΣΗ 1, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Η τεχνολογία παραγωγής των παραδοσιακών δομικών υλικών, όπως κονιάματα αρμών, επιχρίσματα, στεγανωτικά κονιάματα κλπ., ενώ έχει επιδείξει αξιοσημείωτη μακροβιότητα, έχει απολεσθεί, δεδομένου ότι τα παραδοσιακά υλικά έχουν εκτοπισθεί από σύγχρονα υλικά ευρείας εφαρμογής, όπως τσιμέντο και τεχνητά πολυμερή, μη συμβατά όμως με τα αυθεντικά υλικά, με αποτέλεσμα να έχουν προκληθεί ανεπανόρθωτες ζημιές σε πολλά μνημεία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς. Πρόσφατες επεμβάσεις σε ιστορικές τοιχοποιίες χρησιμοποιώντας μοντέρνα υλικά απέδειξαν ότι τα υλικά αυτά είναι ασύμβατα με τα αυθεντικά, προκαλώντας συχνά σοβαρές καταστροφές φυσικοχημικής και μηχανικής φύσεως [1].

Η συμβατότητα, που αποτελεί το επίκεντρο κάθε νέας αξιολόγησης κονιάματος αποκατάστασης, είναι ένας πολύπλοκος όρος. Οι παράμετροι που καθορίζουν τη συμβατότητα μπορούν να διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ των ερευνητών, ωστόσο οι κύριες κατηγορίες αναφέρονται στην αισθητική, χημική, φυσική και μηχανική συμβατότητα και καθορίζονται συνήθως σε σχέση με την ομοιότητα του κονιάματος αποκατάστασης και του ιστορικού κονιάματος της τοιχοποιίας [8].

Το ζητούμενο αποτέλεσμα είναι η επίτευξη μίας ομοιογενούς μηχανικής και φυσικής συμπεριφοράς μεταξύ των διαφόρων δομικών υλικών της τοιχοποιίας και η εξασφάλιση ότι δεν θα προκληθούν μηχανισμοί αποικοδόμησης με την εφαρμογή του κονιάματος αποκατάστασης.

Κατά την επιλογή του βέλτιστου κονιάματος αποκατάστασης που θα εφαρμοστεί για την αποκατάσταση ενός ιστορικού κτιρίου ή μνημείου, πρέπει να εξασφαλιστεί η συμβατότητά του, τόσο με το ιστορικό κονίαμα όσο και με δομικά στοιχεία της τοιχοποιίας. Το ιστορικό κονίαμα συνήθως αντικαθίσταται μόνο σε κάποιο βαθμό και συνεπώς θα παραμείνει εντός της τοιχοποιίας και τα δομικά στοιχεία δεν θα πρέπει να αλλοιώνονται με τη χρήση του νέου κονιάματος αποκατάστασης [8].

Μία μεθοδολογία που αποδείχθηκε χρήσιμη για την εις βάθος κατανόηση των παραδοσιακών τεχνολογιών παραγωγής κονιαμάτων και για το σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης είναι η αντίστροφη μηχανική. Ανακαλύπτοντας λοιπόν, τα «μυστικά» της αρχαίας τεχνολογίας για την παραγωγή των αρχικών κονιαμάτων, νέα, συμβατά κονιάματα αποκατάστασης μπορούν να σχεδιαστούν [8].

Πρόκειται για τεχνολογία η οποία αφορά στην ολοκληρωμένη προσέγγιση των αυθεντικών υλικών. Με χρήση νέων τεχνικών είναι δυνατή η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και την τεχνολογία παραγωγής τους. Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής ξεκινά από την αναγνώριση των ιστορικών κονιαμάτων και ολοκληρώνεται στην φάση εφαρμογής και αποτίμησης των λαμβανόμενων

αποτελεσμάτων σε πιλοτική κλίμακα. Τα σημαντικότερα σημεία της αντίστροφης μηχανικής και οι ακολουθούμενες φάσεις (από τη φάση της εξέτασης των ιστορικών υλικών μέχρι και την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης) συνοψίζονται παρακάτω:

- 1) Δειγματοληψία αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κονιαμάτων, που έχουν υποστεί φθορά (περιβαλλοντική, φυσική, μηχανική) στο μικρότερο δυνατό βαθμό
- 2) Φυσικοχημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις στα συνολικά δείγματα και σε επιμέρους κλάσματα των δειγμάτων, μετά από φυσικό διαχωρισμό
- 3) Δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Αποτίμηση των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων, καθώς και κονιαμάτων/δομικών υλικών, με ενόργανες και μη καταστρεπτικές μεθόδους (στατικές και δυναμικές)

Τα βήματα της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης, είναι τα εξής:

3.1.2. ΦΑΣΗ 2, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Με τη χρήση κυρίως μη καταστρεπτικών (ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, χρωματομετρία, θερμογραφία υπερύθρου, υπέρηχοι) αλλά και καταστρεπτικών τεχνικών (ποροσιμετρία υδραργύρου, υδαταπορρόφηση, μηχανικά tests, θερμική ανάλυση, περίθλαση ακτίνων X), γίνεται ο προσδιορισμός και η αποτίμηση των ορυκτολογικών, χημικών και φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των παραδοσιακών κονιαμάτων και της συμπεριφοράς τους, σχετικά με την περιβαλλοντική δράση και τις μηχανικές καταπονήσεις. Η επιλογή των κατάλληλων αναλυτικών τεχνικών εξαρτάται κυρίως από τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν και το διαθέσιμο προς έρευνα υλικό. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την πληθώρα μεθόδων, γίνεται και η επιλογή των πρώτων υλών παραγωγής για τη σύνθεση των νέων υλικών για τα κονιάματα αποκατάστασης.

3.1.3. ΦΑΣΗ 3, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στο στάδιο αυτό πρέπει να λαμβάνουμε υπ' όψιν μας το σύνολο της κατασκευής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις υπάρχουσες φθορές, καθώς και να εξασφαλίζεται η φυσικοχημική και μηχανική συμβατότητα με τα ιστορικά υλικά, για να συνθέσουμε στη συνέχεια κονιάματα αποκατάστασης αποτελούμενα από μίγματα διαφόρων αναλογιών, ποσοστών και κλασμάτων κοκκοδιαβάθμισης συνδετικής ύλης, αδρανών και πρόσθετων, υπό διάφορες συνθήκες και με ποικίλους τρόπους.

Στο σημείο αυτό, απαραίτητο βήμα, είναι η αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης ως προς τη μηχανική και φυσικοχημική συμβατότητά τους με το αυθεντικό υλικό. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται αξιολόγηση των νέων υλικών αποκατάστασης και των τεχνικών θεμελιωδών χαρακτηριστικών τους, σε σχέση με τα παραδοσιακά, σε εργαστηριακή κλίμακα. Οι απαιτήσεις που πρέπει να τηρούνται είναι οι εξής:

- 1) Σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας (E)
- 2) Χημική συγγένεια
- 3) Συμβατή μικροδομή
- 4) Συρρίκνωση <3% κατ' όγκο
- 5) Ομοιογένεια
- 6) Απουσία παραγωγής παραπροϊόντων

Στη φάση αυτή, γίνεται επίσης η επιλογή, ο σχεδιασμός και η αριστοποίηση της τεχνολογίας παραγωγής – προτυποποίησης προϊόντος, με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από την αξιολόγηση των υλικών. Τελευταίο βήμα της φάσης αυτής, αποτελεί η πιλοτική εφαρμογή των παραγόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης, στην κλίμακα του μνημείου.

3.1.4. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης θα πρέπει, σε κάθε περίπτωση, να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια βάσει των οποίων κρίνονται ως κατάλληλα. Η θέσπιση των κριτηρίων έχει προκύψει τόσο από έρευνες στα ιστορικά κονιάματα, όσο και από βιβλιογραφική αναζήτηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση τσιμέντου, οποιασδήποτε μορφής, δεν συνίσταται, καθώς εκτός της ασυμβατότητας μικροδομής και φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών, θα οδηγούσε σε τέτοια ανισοτροπία, που θα αποσάρθρωνε με επιταχυνόμενο ρυθμό το αυθεντικό κονίαμα, αλλά και τα παραδοσιακά δομικά υλικά με τα οποία θα γειτνιάζε [1].

Η επιλογή των πρώτων υλών αποτελεί αποφασιστικό βήμα για την ανάπτυξη κονιαμάτων αποκατάστασης με στόχο την ικανοποίηση των κριτηρίων που προκύπτουν από τη γνώση των ιστορικών υλικών. Μερικές από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται περισσότερο για τη διαδικασία παραγωγής αναφέρονται παρακάτω:

- Υλικά σύνδεσης: πολτός ασβέστου, υδραυλική άσβεστος και τσιμέντο.
- Αδρανή υλικά: άμμος πυριτικής σύνθεσης και θραυσμένο κεραμικό.
- Πρόσθετα υλικά: φυσικά και τεχνητά ποζολανικά υλικά.

Οι τεχνικές και οι δοκιμές έρευνας που χρησιμοποιούνται για τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό των πρώτων υλών είναι οι ακόλουθες:

- Θερμική ανάλυση (Διαφορική Θερμική και Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση)
- Περίθλαση ακτίνων X (XRD)
- Φθορισμός ακτίνων X (XRF)
- Ποροσιμετρία
- Δοκιμή ποζολανικότητας
- Προσδιορισμός διαλυτού διοξειδίου του πυριτίου
- Μέτρηση ειδικού βάρους

[12]

Ο πολτός ασβέστου πρέπει να πληροί τις ακόλουθες τεχνικές προδιαγραφές:

- Η πρώτη ύλη για την παραγωγή ασβέστου πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 98-99% CaCO_3 .
- Η θερμοκρασία έψησης της πρώτης ύλης για την παραγωγή ασβέστου πρέπει να είναι περίπου 900 °C προκειμένου να ληφθούν μικροκρυστάλλοι CaO και υψηλή ειδική επιφάνεια.
- Κατάλληλη διαδικασία σβέσης της άσβεστου για την παραγωγή του ασβεστοκονιάματος.
- το ασβεστοκονίαμα δεν πρέπει να περιέχει λιγότερο από 94% ($\text{CaO} + \text{MgO}$) και όχι περισσότερο από 60% ελεύθερο νερό στον πολτό.

Η υδραυλική άσβεστος πρέπει να πληροί τις ακόλουθες τεχνικές προδιαγραφές:

- Η θερμοκρασία ψησίματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 900 °C
- Ο δείκτης υδραυλικότητας πρέπει να είναι από 0.31-0.42

Πυριτική άμμος: Η άμμος πρέπει να είναι καθαρή, δηλαδή χωρίς εξωγενείς ενώσεις, μεταλλικά άλατα, αργίλους, λάσπη κ.λπ. Επιπλέον, πρέπει να είναι πυριτικής φύσης, διότι αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή στα μηχανικά φορτία και τα φαινόμενα φθοράς. Θα πρέπει επίσης, να παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα κατανομής μεγέθους κόκκων, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι τεχνικές απαιτήσεις που υποδεικνύονται από την αντίστροφη μηχανική προσέγγιση [12].

Θραυσμένο κεραμικό: Το θραυσμένο κεραμικό όσον αφορά τα φυσικά του χαρακτηριστικά, πρέπει να έχει μικρό ειδικό βάρος, προκειμένου το παραγόμενο κονίαμα να είναι ελαφρύτερο από το κονίαμα που περιέχει μόνο άμμο. Χάρη στα ειδικά χαρακτηριστικά του κεραμικού, το κονίαμα αποκτά ελαστικότητα και δείχνει καλύτερη συμπεριφορά στα μηχανικά φορτία και τις καταπονήσεις από σεισμό [12].

Φυσικά και τεχνητά ποζολανικά υλικά ως πρόσθετα: Ένα ποζολανικό πρόσθετο, από μόνο του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνδετικό υλικό, αλλά αντιδρώντας με $\text{Ca}(\text{OH})_2$, σχηματίζει αργιλοπυριτικές ενώσεις. Το ποζολανικό πρόσθετο πρέπει να πληροί τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη δοκιμή ποζολανικότητας πρέπει να παρέχουν αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη από 5 N/mm^2 .
- Πρέπει να παρουσιάζει ένα καλό ποσοστό δραστικού πυριτίου (μεγαλύτερο από 20%).
- Να έχει μεγάλη καθαρότητα από ανεπιθύμητες προσμίξεις.
- Η θερμοκρασία έψησης του κεραμικού θα πρέπει να γίνεται περίπου στους 850°C (στην περίπτωση χρήσης μετακαολίνη ή κεραμάλευρου)
- Θα πρέπει να έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια και υψηλή λεπτότητα (περίπου <63 μm) [1].

3.1.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΝΩΠΙΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Κριτήρια Βελτιστοποίησης :

1. Ελάχιστη ποσότητα νερού
2. Καλή εργασιμότητα
3. Εύκολη εφαρμογή σε πιλοτική τοιχοποιία [27]

Δοκιμές αποτίμησης τεχνικών χαρακτηριστικών :

1. Μέτρηση εξάπλωσης: Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, καθορίζεται αν η προτεινόμενη ποσότητα νερού για το κονίαμα προσφέρει την ανεπιθύμητη εργασιμότητα. Αποτελεί επίσης μέτρο παραμόρφωσης του κονιάματος, όταν αυτό υπόκειται σε τάσεις
2. Συγκρατούμενο νερό: Με τη μέθοδο αυτή, μετράμε την ποσότητα του νερού που συγκρατείται στο κονίαμα.
3. Μέτρηση ειδικού βάρους: Κατά τη μέθοδο αυτή, γίνεται ζύγιση της μάζας του κονιάματος που απαιτείται για την πλήρωση μεταλλικού δοχείου όγκου 2 lt. Ο λόγος της μάζας του κονιάματος που απαιτείται προς τον όγκο, αποτελεί το ειδικό βάρος του κονιάματος [27].

3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Δεδομένης της διαφοροποίησης των χημικών, ορυκτολογικών και φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών των κονιαμάτων, επιτρέπεται η αναγνώριση διαφορετικών οικοδομικών φάσεων. Ο προσδιορισμός της φύσης της κονιάς, ο έλεγχος της ποιότητας εφαρμογής και η αποτίμηση της κατάστασης διατήρησης του κονιάματος είναι σημαντικά στοιχεία για την αποτίμηση της φυσικοχημικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας [20].

Σήμερα, με τη συνεχή και ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, είναι διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία ενόργανων τεχνικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι δυσκολίες όμως που συνδέονται με τη μη αναστρέψιμη και καταστροφική φύση της δειγματοληψίας στα μνημεία δεν επιτρέπει, την εκτεταμένη χρήση των διαθέσιμων αυτών τεχνικών. Συνεπώς, προτιμάται η χρήση των Μη Καταστροφικών Τεχνικών (NDT) που μπορούν να εφαρμοστούν επί τόπου και δεν απαιτούν καταστροφική δειγματοληψία [10].

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των αισθητήρων και των σχετικών λογισμικών ανάλυσης δεδομένων έχουν ενισχύσει τη χρησιμότητα και την αξιοπιστία των μη καταστρεπτικών μεθόδων και είναι σήμερα ένα απαραίτητο και αναπόσπαστο εργαλείο στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, όσον αφορά τον χαρακτηρισμό των υλικών, την ανίχνευση της φθοράς και υποβάθμισης των υλικών, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων και την αξιολόγηση συμβατών υλικών και εφαρμογών [10].

Η αποσάθρωση των δομικών υλικών μπορεί να οριστεί ως η αποικοδόμηση των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών κ.λπ.) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογική σύσταση, υφή, κ.λπ.) των υλικών με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας έτσι στην αστοχία τους ως κατασκευαστικά και δομικά στοιχεία. Τα φαινόμενα αποσύνθεσης αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια των υλικών με το περιβάλλον ή στη διεπιφάνεια των υλικών με άλλα υλικά και είναι συνάρτηση εγγενών και εξωγενών παραγόντων.

Στη συνέχεια, παρατίθεται πίνακας (πίνακας 1) με τη σύντομη περιγραφή μερικών καταστρεπτικών (απαιτείται δειγματοληψία) μεθόδων ανάλυσης για το χαρακτηρισμό ιστορικών κονιαμάτων και πίνακας (πίνακας 2) με τη σύντομη περιγραφή μη καταστρεπτικών μεθόδων ανάλυσης.

Πίνακας 1: Καταστρεπτικές μέθοδοι ανάλυσης για το χαρακτηρισμό ιστορικών κονιαμάτων

Μέθοδος / Όργανο Ανάλυσης	Σύντομη Περιγραφή
Ηλεκτρονική Μικροσκοπία	<i>Ορυκτολογικός-Πετρογραφικός Χαρακτηρισμός / Φυσικοχημική Ανάλυση</i>
Θερμικές Αναλύσεις (DTA, TG/DTG, DSC, TMA)	<i>Ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων Μέτρηση συντελεστή θερμικής διαστολής.</i>
Περίθλαση Ακτίνων X	<i>Προσδιορισμός Κρυσταλλικών Φάσεων</i>
Ποροσιμετρία Υδραργύρου (Hg)	<i>Μελέτη Μικροδομής</i>
Κοκκοδιαβάθμιση	<i>Αναλογία αδρανών/συνδετικής κονίας Διαστάσεις των κλασμάτων των αδρανών.</i>
Τεστ Μηχανικών Αντοχών	<i>Αποτίμηση Μηχανικών Αντοχών Κονιαμάτων και Δομικών Υλικών</i>
Φασματοφωτομετρία IR	<i>Ποιοτική εκτίμηση ανόργανων / οργανικών φάσεων</i>

Πίνακας 2: Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ανάλυσης για τον χαρακτηρισμό ιστορικών κονιαμάτων

Μέθοδος / Όργανο Ανάλυσης	Σύντομη Περιγραφή
Μικροσκοπία Οπτικών Ινών	Μελέτη μορφολογίας επιφανειών και εκτίμηση φθοράς
Υπερηχοσκόπηση	Πληροφορίες για το βάθος και τον τύπο της φθοράς
Γεωραντάρ	Αντληση πληροφοριών για το υπέδαφος
Υπέρυθρη Θερμογραφία	Ανίχνευση στρωμάτων υλικών και ανίχνευση υγρασίας
Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας	Εξαγωγή χαρακτηριστικών και για την αναγνώριση σχεδίων στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες των μνημείων

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν εκτενέστερα οι μέθοδοι ανάλυσης (καταστρεπτικές και μη) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για το χαρακτηρισμό κονιαμάτων.

3.2.1. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Το μικροσκόπιο οπτικής ίνας (FOM) είναι ένα μη καταστρεπτικό μικροσκόπιο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί επί τόπου, προκειμένου να αποκτηθούν μεγεθυμένες εικόνες ορατού φάσματος. Το FOM είναι ένα σύστημα μικροσκοπίου με ενσωματωμένο προηγμένο σύστημα οπτικών ινών και ψηφιακών εξαρτημάτων. Ενώ στην παραδοσιακή οπτική μικροσκοπία απαιτείται να τοποθετηθεί δείγμα στο μικροσκόπιο, με το FOM δεν απαιτείται δειγματοληψία και η εικόνα μπορεί να ληφθεί επί τόπου. Με αυτή την τεχνολογία μπορεί να ληφθεί υψηλή ανάλυση και υψηλή μεγέθυνση (έως 600 φορές) εικόνας της επιφάνειας, επιλέγοντας και συνδέοντας τους κατάλληλους οπτικούς φακούς μεγέθυνσης (π.χ., 25, 50, 100, 200). και στη συνέχεια να αποθηκευτούν ψηφιακά για περαιτέρω επεξεργασία [10].

Στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, το FOM χρησιμοποιείται για διάφορες εργασίες και παρατηρήσεις, μερικές από τις οποίες αναγράφονται παρακάτω:

- 1) εντοπισμός διαφορών στην υφή και τη σύνθεση των επιφανειών

- 2) ταξινόμηση υλικών (π.χ. ταξινόμηση κονιαμάτων)
- 3) μελέτη των φαινομένων αποσύνθεσης (κυψέλωση, σκληρές όξινες ανθρακικές κρούστες, κ.λπ.)
- 4) διερεύνηση της μορφολογίας των επιφανειών των υλικών
- 5) εντοπισμός ελαττωμάτων σε ιστορικά οικοδομικά υλικά
- 6) αξιολόγηση επεμβάσεων καθαρισμού και προηγούμενων επεμβάσεων συντήρησης

«Αρχή» Λειτουργίας FOM: Οι οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν φως, αντί για ηλεκτρικό ρεύμα, ως φορέα σημάτων και οπτικές ίνες, αντί για μεταλλικούς αγωγούς για τη μετάδοσή τους. Το προς μετάδοση σήμα, (π.χ. εικόνα, φωνή, δεδομένα) μετατρέπεται στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης σε ακολουθία ψηφιακών παλμών που διοχετεύονται στην οπτική ίνα. Στο άλλο άκρο της ζεύξης ανιχνεύονται οι παλμοί και μετατρέπονται στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα.

3.2.2. ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ X

Η μέθοδος περίθλασης ακτίνων-X χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό κρυσταλλικών υλικών, πετρωμάτων, ορυκτών, ιζημάτων, διάφορων γεωλογικών υλικών και γενικά στερεών οποιασδήποτε χημικής φύσης. Η μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό της δομής και της σύστασης του δείγματος, το οποίο μπορεί να περιέχει περισσότερες από μία κρυσταλλικές ενώσεις [11].

Η περίθλαση ακτίνων X επιτρέπει την ανίχνευση κρυσταλλικών ενώσεων σε δείγμα κονιοποιημένου κονιάματος σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 5%, μολονότι αυτό το όριο εξαρτάται από τον τύπο της ένωσης και την παρουσία ατελειών στους κρυστάλλους της. Οι μη κρυσταλλικές φάσεις που απαντώνται σε διάφορες κατηγορίες κονιαμάτων δεν παρουσιάζουν καθαρές κορυφές, αλλά προκαλούν την αύξηση του θορύβου σε διάφορες ζώνες του διαγράμματος περίθλασης [1]. Τα άμορφα συστατικά, όπως οι ηφαιστειογενείς υαλώδεις φάσεις των ποζολανών, το διαλυτό πυρίτιο ή τα άμορφα αργιλοπυριτικά που σχηματίζονται κατά την σκλήρυνση των υδραυλικών κονιών δεν είναι ανιχνεύσιμα και μπορούν αντίθετα να δημιουργήσουν προβλήματα στην αναγνώριση των κρυσταλλικών φάσεων σε μικρά ποσοστά [1].

Στα κονιάματα συναντάται συνήθως ένας μεγάλος αριθμός ενώσεων που έχει σαν αποτέλεσμα την αλληλοεπικάλυψη κορυφών, γεγονός που αυξάνει τη δυσκολία στην ταυτοποίηση των φάσεων ειδικότερα για τις φάσεις που βρίσκονται σε μικρότερα ποσοστά. Το προς ανάλυση δείγμα βρίσκεται υπό μορφή κονιάς (πούδρας συγκεκριμένα) μέσα στην κοιλότητα ενός πλαστικού ή μεταλλικού πλακιδίου [11]. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X, που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κονιάς.

3.2.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των θερμικών μεταβολών που υφίστανται τα κονιάματα, όταν θερμαίνονται σε μία θερμοκρασιακή κλίμακα

εύρους 25-1000^oC και με ρυθμό 10^oC/min. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Με τη χρήση της Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA) καταγράφονται οι ενεργειακές μεταβολές που υφίσταται το υλικό σε αυτή την θερμοκρασιακή περιοχή και εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα σχετικά με τα περιεχόμενα στο κονίαμα υλικά. Ταυτόχρονα με την θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG) καταγράφονται οι αντίστοιχες μεταβολές βάρους, βάσει των οποίων καθορίζονται ποσοτικά τα διάφορα συστατικά [1].

Με αυτόν τον συνδυαστικό τρόπο, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της φύσης του συνδετικού υλικού και των αδρανών, με παράλληλες αναλυτικές μετρήσεις στα επιμέρους κλάσματα. Ειδικότερα, για θερμοκρασίες μικρότερες των 120^oC η μεταβολή οφείλεται στην εξάτμιση της υγρασίας, στο θερμοκρασιακό διάστημα 120-200^oC αποβάλλεται το νερό των ένυδρων αλάτων (π.χ. γύψος), στο διάστημα μέχρι τους 600^oC αποβάλλεται το χημικά δεσμευμένο νερό των ένυδρων αργιλοπυριτικών φάσεων, εφόσον απουσιάζουν οργανικές προσμίξεις, ενώ πάνω από τους 600^oC αποσυντίθενται οι ανθρακικές ενώσεις, απελευθερώνοντας CO₂ [1].

Το πορώδες μπορεί να μετρηθεί, χρησιμοποιώντας και άλλες έμμεσες μεθόδους, με βάση τις ιδιότητες του υλικού, μετρώντας, για παράδειγμα, την απορρόφηση νερού με ολική εμβάπτιση ή την απορρόφηση του νερού μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δομικών υλικών σε επαφή με το νερό. Παρόλη την απλότητά τους, οι μέθοδοι αυτοί περιορίζονται από την ανάγκη να δουλεύουμε σε δείγματα ακριβούς γεωμετρικού σχήματος και μεγέθους (π.χ. κύβιοι, κύλινδροι κλπ.). Η λήψη δειγμάτων αυτού του είδους από ιστορικές δομές είναι πολύ σπάνια και συγχρόνως απαιτούνται περισσότερα δείγματα προς ανάλυση, για να ληφθεί ένα στατιστικά βιώσιμο αποτέλεσμα [13].

3.2.4. ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (Hg)

3.2.4.1. Πορώδες

Πολλά οικοδομικά υλικά τόσο φυσικά (πέτρες) όσο και τεχνητά (τούβλα, άσβεστος, τσιμεντοκονιάματα) περιέχουν έναν ορισμένο όγκο κενών χώρων. Αυτό κατανέμεται μέσα στην στερεά μάζα με τη μορφή πόρων, κοιλοτήτων και ρωγμών διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Το συνολικό άθροισμα αυτών των κενών χώρων ονομάζεται πορώδες, ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του οικοδομικού υλικού, που επηρεάζει τις φυσικές του ιδιότητες (αντοχή, μηχανική αντοχή, κ.λ.π.) [13].

Τα χαρακτηριστικά των πόρων στους βράχους εξαρτώνται κυρίως από το "γένος" τους (δηλ. πυρογενές, ιζηματογενές, μεταμορφωμένο κ.λπ.), ενώ το πορώδες στα δομικά υλικά που εφηύρε ο άνθρωπος εξαρτάται από την κατασκευή τους [13].

Η γνώση της δομής των πόρων είναι μια σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό των υλικών, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους υπό διάφορες καιρικές συνθήκες, την αξιολόγηση του βαθμού αποσάθρωσής τους και την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των εργασιών συντήρησης [13].

3.2.4.2. Τύποι Πόρων

Οι πόροι μπορούν ουσιαστικά να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη τυπολογία, τη γεωμετρία και το μέγεθός τους.

1) Τυπολογία Πόρων

Κλειστοί Πόροι: Πόροι απομονωμένοι από την εξωτερική επιφάνεια, χωρίς να επιτρέπουν την πρόσβαση του νερού είτε σε υγρή είτε σε αέρια φάση. Δεν επηρεάζουν ούτε τη διαπερατότητα ούτε τη μεταφορά υγρών στα υλικά, αλλά επηρεάζουν την πυκνότητά τους και τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητές τους.

Ανοιχτοί Πόροι: Είναι οι πόροι που συνδέονται με την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και επομένως είναι προσιτοί από το νερό και έχουν άμεση σχέση με τα φαινόμενα φθοράς. Οι ανοιχτοί πόροι επιτρέπουν τη διέλευση υγρών και συγκρατούν την υγρασία μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης. Μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε αδιέξοδους ή διασυνδεδεμένους πόρους [13].

2) Γεωμετρία

- Σφαιρικοί και κυλινδρικοί πόροι
- Βασικοί πόροι: Είναι αυτοί που υπάρχουν από τη "γένεση" του υλικού
- Πόροι διάλυσης: Είναι πόροι που προέρχονται από τη χημική διάλυση ανθρακικών αλάτων, θεικών και οργανικών υλικών
- Πόροι διάσπασης: Είναι πόροι που προέρχονται από την ένδο και διακρυσταλλική μηχανική θραύση και συνδέονται με την τεκτονική παραμόρφωση των πετρωμάτων, την καταπόνηση που προκαλείται από τα εφαρμοζόμενα φορτία [13]

3) Μέγεθος

Υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα στα μεγέθη των πόρων. Μπορεί να διαφέρουν από λίγα angstrom έως και κάποια χιλιοστά. Οι πόροι μεγαλύτερων διαστάσεων ορίζονται ως κοιλότητες και όχι ως πόροι και δεν συμβάλλουν στην τριχοειδή δράση. Οι πόροι με ακτίνες μικρότερες από 10 angstrom δεν θεωρούνται διαπερατές. Υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με την ταξινόμηση του μεγέθους των πόρων. Στην πράξη, όταν οι συντηρητές μιλάνε για πορώδες, δεν αναφέρονται γενικά στις τιμές που ορίζονται παρακάτω, αλλά σε ένα διάστημα <2,5 μm και> 2,5 μm, μεταξύ του μικροπορώδους και του μακροπορώδους, το οποίο είναι ρεαλιστικότερο, όταν αναφερόμαστε σε δομικά υλικά [13].

Κατά τις διεθνείς προδιαγραφές, οι πόροι περιγράφονται με βάση την ακτίνα τους ως εξής:

MICROPORES:	radius	< 0.001 μm	(< 10 Å)
MESOPORES:	radius between	0.001 μm and 0.025 μm	(10 Å and 250 Å)
MACROPORES:	radius	> 0.025 μm	(> 250 Å)

Η ποσοστιαία κατανομή των πόρων με διαφορετική ακτίνα εντός του υλικού είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του υλικού σε επαφή με το νερό και συνεπώς για την πρόβλεψη κύκλων ψύξης-απόψυξης, χημικής αντίδρασης κλπ. [13].

3.2.4.3. Η κίνηση του νερού σε πορώδη δομικά υλικά

Η μελέτη του πορώδους είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των φαινομένων μεταφοράς ύδατος μέσα στην δομή των πόρων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ υλικών και νερού. Το νερό μπορεί να διαπεράσει ένα στερεό, επειδή υπάρχουν διασυνδεδεμένα κανάλια (πόροι) μέσα σε αυτό, διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά του. Το πέτρινο υλικό μπορεί να απορροφήσει την υγρασία από το περιβάλλον σε μορφή ατμού ανάλογα με τη σχετική υγρασία και σε υγρή μορφή, όταν εκτίθεται στην άμεση δράση του νερού (βροχοπτώσεις, υγρασία από το έδαφος και συμπύκνωση υδρατμών από τον αέρα) [13].

Νερό σε υγρή μορφή:

- Μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης: Όταν ένα αρχικά ξηρό πορώδες υλικό έρχεται σε επαφή με το νερό, παίρνει σταδιακά υγρασία. Πρώτα γεμίζει τους μικρότερους πόρους και στη συνέχεια δημιουργεί μια υγρή μεμβράνη στην επιφάνεια των μεγαλύτερων πόρων, γεμίζοντάς τες τελικά και αυτές.
- Μέσω διάχυσης, λόγω της διέλευσης του νερού από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό
- Μέσω όσμωσης: Όταν υπάρχουν άλατα στο νερό, διαχωρίζονται σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (ιόντα) που προσελκύουν νερό μέσω ηλεκτρικής δύναμης.

Νερό σε μορφή υδρατμών:

- Με διάχυση ως ατμός, από πόρους με υψηλή περιεκτικότητα σε υδρατμούς, σε πόρους με χαμηλότερη
- Μέσω υγροσκοπικής απορρόφησης, η οποία μπορεί να συμβεί ακόμη και σε θερμοκρασίες άνω του σημείου δρόσεως. Αυτό το φαινόμενο επιδεινώνεται με την παρουσία διαλυτών αλάτων που είναι υγροσκοπικά και μπορούν να απορροφήσουν νερό και κάτω από τις μέσες συνθήκες σχετικής υγρασίας.
- Μέσω συμπύκνωσης: Όταν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από το σημείο δρόσεως, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στους πόρους. Στους μικρούς πόρους, η συμπύκνωση μπορεί να λάβει χώρα πριν η θερμοκρασία φθάσει στο σημείο δρόσεως [13].

Με την ποροσιμετρία υδραργύρου εξετάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι μικροδομής των κονιαμάτων. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι ο ολικός ειδικός όγκος (mm^3/g), η φαινόμενη πυκνότητα (g/cm^3), η ειδική επιφάνεια (m^2/g), η μέση

ακτίνα των πόρων (μm) και το ολικό πορώδες επί τοις εκατό (%). Από την κατανομή μεγέθους πόρων ως προς τον ολικό προσροφούμενο όγκο εξάγονται συμπεράσματα για την πορώδη δομή των κονιαμάτων [1].

Το ποροσίμετρο υδραργύρου επιτρέπει τη χρήση ακανόνιστων τεμαχίων και μικρών διαστάσεων δειγμάτων κονιάματος για την εκτέλεση της μέτρησης, δηλαδή όπως ακριβώς λαμβάνονται αυτά από μια τοιχοποιία [9]. Το πορώδες επηρεάζεται από τον τρόπο εφαρμογής του κονιάματος και ειδικότερα από την ποσότητα του νερού κατά την ανάμιξη και από τη συμπίεση που υφίσταται κατά την εφαρμογή του. Αυξάνοντας την ποσότητα του νερού, αυξάνει το πορώδες του σκληρυνόμενου κονιάματος, ενώ αν το νωπό ακόμη κονίαμα συμπιεστεί, το πορώδες μειώνεται [1].

3.2.5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΡΟΦΗΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

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 πόρων [13]. 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 [13].

Στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά, το πείραμα της ολικής εμβάπτισης των δειγμάτων από τα ιστορικά κονιάματα του Γεφυριού της Πλάκας και παρατίθενται οι πίνακες με τα αποτελέσματα της δοκιμής.

3.2.5.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

- 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 (m_0), 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 (mi) 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 [13].

3.2.6. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΡΟΣΒΑΣΙΜΟ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕΣΩ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ

Η δοκιμή αυτή μετρά την τριχοειδή αναρρίχηση του νερού, την πιο κοινή μορφή μετανάστευσης υγρών υδάτων σε δομικά υλικά. Η έννοια της απορρόφησης νερού με τριχοειδή αναρρίχηση, είναι ουσιαστικά η ικανότητα διείσδυσης ενός υγρού σε ένα πορώδες στερεό, λόγω της επιφανειακής τάσης των τριχοειδών αγγείων. Η δοκιμή τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας συντελεί στη μέτρηση της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά το νερό μέσω των τριχοειδών αγγείων, λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της επιφάνειας του νερού μέσα στα τριχοειδή αγγεία και τον αέρα [14]. Είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη διάμετρο των πόρων. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής απορρόφηση. Ορισμένα δομικά υλικά, λόγω της χαμηλής τους τριχοειδούς απορρόφησης, επιλέγονται για συγκεκριμένες χρήσεις, για παράδειγμα ως φράγμα, όπου η τοιχοποιία έρχεται σε επαφή με το έδαφος ή ως βάση για ξύλινα εξαρτήματα, προκειμένου να προστατεύεται η δομή από την υγρασία [13].



Εικόνα 23 : Παράδειγμα ανερχόμενης υγρασίας μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης

ΕΙΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Στις 30/06/2018, με πρωτοβουλία και προτροπή της καθ. Α. Μοροπούλου, διεπιστημονική ομάδα του Ε.Μ.Π με επικεφαλής τον Πολιτικό Μηχανικό κ. Χαράλαμπο Μουζάκη, πραγματοποίησε επίσκεψη στο Γεφύρι της Πλάκας, προκειμένου να γίνει περαιτέρω αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης του μνημείου, εφαρμόζοντας μη καταστρεπτικές, αλλά και άλλες ενόργανες μεθόδους, για τη μελέτη και το χαρακτηρισμό κυρίως των ιστορικών κονιαμάτων. Διεξήχθη επίσης προσεκτική δειγματοληψία από καίρια σημεία των εναπομεινάντων τμημάτων του Γεφυριού για μελέτη στο εργαστήριο.



Εικόνα 24: Γενική άποψη του εργοταξίου που διαμορφώθηκε γύρω από τα εναπομειναντα τμήματα του Γεφυριού



Εικόνα 25: Εναπομείναντα τμήματα των θολιτών του Γεφυριού

3.3.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΣΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΛΗΦΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΓΕΦΥΡΙ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Ελήφθησαν αρκετά δείγματα κονιαμάτων για μελέτη στο εργαστήριο, τα περισσότερα από τα οποία προέρχονται από τα δύο μεγαλύτερα ακέραια σωζόμενα τμήματα του γεφυριού (εναπομείναν τμήμα 1, εναπομείναν τμήμα 2), που αποτελούν τους θολίτες του γεφυριού.

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό από την επίσκεψη που πραγματοποιήθηκε στο Γεφύρι της Πλάκας.



Εικόνα 26: Εναπομείναν τμήμα 1



Εικόνα 27: Εναπομείναν τμήμα 2








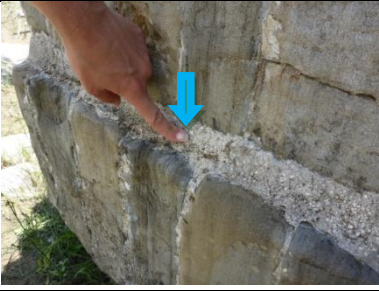




Εικόνα 28: Σωληνάκι ενεμάτωσης στο εναπομείναν τμήμα 1



Εικόνα 29: Εναπομείναν τμήμα τυμπάνου

Πίνακας 3: Πίνακας με κωδικούς των ληφθέντων δειγμάτων

Κωδικός δείγματος	Περιγραφή Δείγματος	Φωτογραφική Τεκμηρίωση δειγματοληψίας
PL.HM_3	<p><i>Εσωτερικό κονίαμα συγκόλλησης λίθων θολιτών στο εναπομείναν τμήμα 1</i></p>	
PL.HM_4	<p><i>Δείγμα κονιάματος σύνδεσης λίθων τόξου από την κάτω πλευρά του κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2 (όψη τόξου προς ποτάμι)</i></p>	
PL.HM_5	<p><i>Τελικός αρμός από τον κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2</i></p>	
PL.HM_7	<p><i>Κονίαμα σύνδεσης λίθων Τυμπάνου</i></p>	
PL.HM_8	<p><i>Κονίαμα σύνδεσης λίθων του πάνω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2</i></p>	

<p>PL.HM_9</p>	<p><i>Εξωτερικό κονίαμα σύνδεσης του άνω και του κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 1</i></p>	
<p>PL.HM_10</p>	<p><i>Κονίαμα στην ένωση του άνω και του κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 1</i> - <i>Στρώση κονιάματος κάτω από PL.HM.9</i></p>	
<p>PL.HM_11</p>	<p><i>Κονίαμα σύνδεσης άνω και κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2- σε επαφή με το PL.HM_9, αλλά διαφορετικής υφής και μορφολογίας</i></p>	
<p>PL.HM_13</p>	<p><i>Κονίαμα σύνδεσης λίθων του κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2</i></p>	
<p>Grout_Tube</p>	<p><i>Υλικό μέσα από σωληνάκι ενεμάτωσης μεταξύ των θολιτών στο εναπομείναν τμήμα 1</i></p>	

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Συνολικά, τα δείγματα PL.HM_3, PL.HM_8 και PL.HM_13 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης λίθων θολιτών, ενώ τα δείγματα PL.HM_9, PL.HM_10, PL.HM_11 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης άνω και κάτω θολίτη.

Το δείγμα PL.HM_4 αποτελεί κονίαμα σύνδεσης λίθων του κεντρικού τόξου του γεφυριού (όψη προς το ποτάμι), ενώ το δείγμα PL.HM_7 αφορά σε κονίαμα σύνδεσης των λίθων του τυμπάνου και συγκεκριμένα πάνω από το ανακουφιστικό τόξο.

Το δείγμα PL.HM_5 αποτελεί κονίαμα τελικού αρμού από τον κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2.

Το δείγμα Grout_tube αφορά υλικό ενεμάτωσης, καθώς ελήφθη από σωληνίσκο ενεμάτωσης που είχε παραμείνει στην ένωση των θολιτών από προηγούμενη επέμβαση, η οποία υλοποιήθηκε προ δεκαετίας.

Μακροσκοπικά, φαίνεται ότι τα διάφορα δείγματα κονιαμάτων που ελήφθησαν, εμπεριέχουν κοινά αδρανή και παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό κονιάς σε σχέση με αυτά. Επίσης, όλα τα δείγματα των κονιαμάτων είναι ελαφροβαρή, ένδειξη της χρήσης ελαφροβαρών αδρανών, πέραν της ποταμίσις πυριτικής άμμου που εμπεριέχουν. Σε κάποιες περιπτώσεις διακρίνονται εμφανή συσσωματώματα ασβέστη, τα οποία πιθανόν να οφείλονται στις συνθήκες ανάμιξης των κονιαμάτων και επιπλέον δεν παρατηρούνται μακροσκοπικά προϊόντα διάβρωσης.

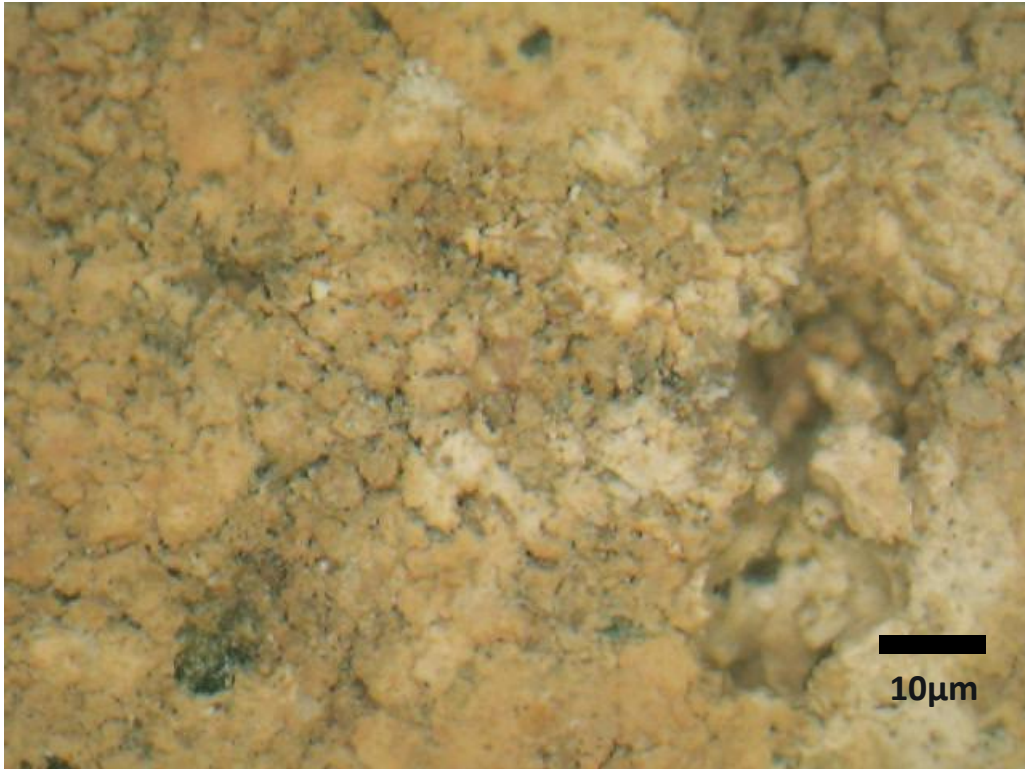
4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

4.1.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ

Οι φωτογραφίες που ακολουθούν απεικονίζουν το σύνολο των δειγμάτων που ελήφθησαν από το Γεφύρι της Πλάκας και στη συνέχεια φωτογραφήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και μελετήθηκαν με τη μέθοδο της οπτικής μικροσκοπίας.



Εικόνα 30: PL.HM_3 : Εσωτερικό κονίαμα σύνδεσης λίθων από εναπομείναν τμήμα 1

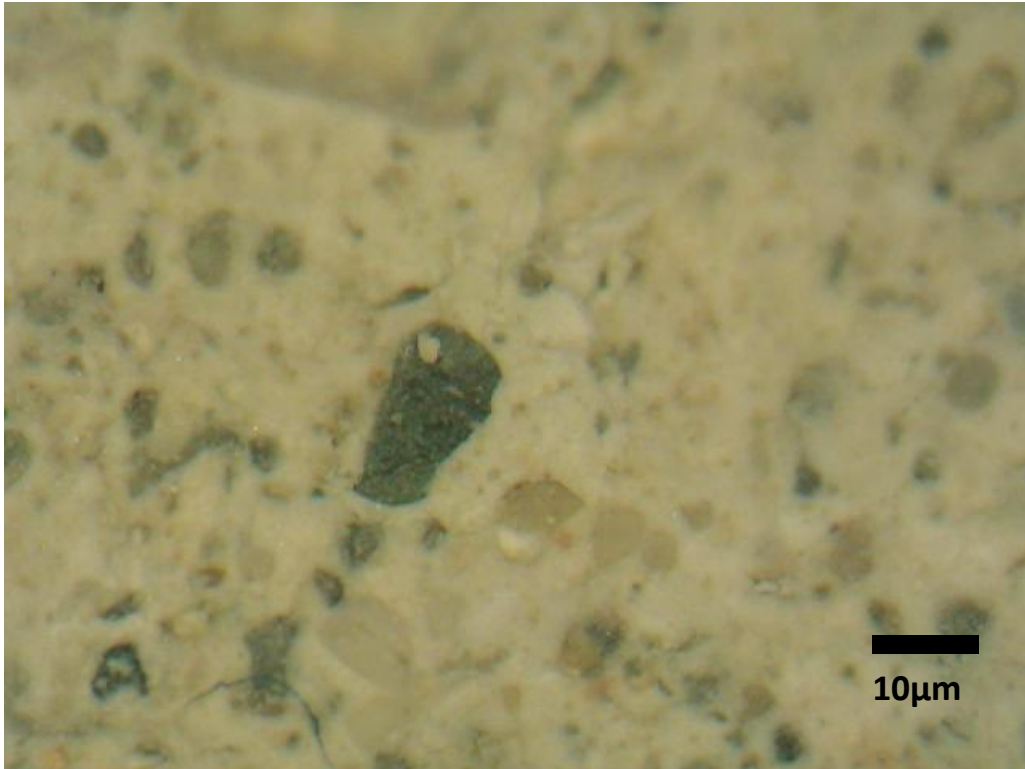


Εικόνα 31: PL.HM_3 x50

Το δείγμα PL.HM_3 παρουσιάζει εύθραπτη επιφάνεια, ανά περιοχές κίτρινου χρωματισμού, με μικρή παρουσία αδρανών, σχηματισμό ρηγματώσεων και μικρή συνάφεια αδρανών – κονιάς.



Εικόνα 32: PL.HM_4 : Κονιάμα σύνδεσης λίθων τόξου από την κάτω πλευρά του κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2

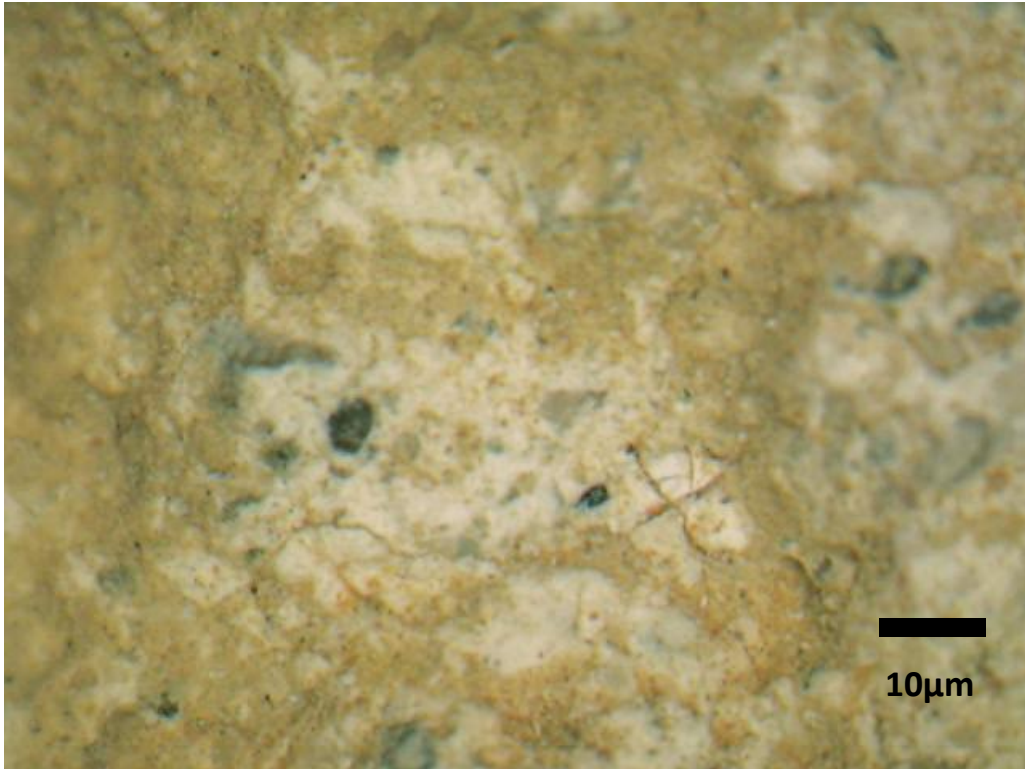


Εικόνα 33: PL.HM_4 x50

Το κονίαμα PL.HM_4, γκρίζου χρωματισμού, παρουσιάζει πολύ συνεκτική επιφάνεια και πλήθος αδρανών διαφόρων μεγεθών, με τα οποία υπάρχει πολύ καλή συνάφεια μεταξύ αυτών και της κονιάς.



Εικόνα 34: PL.HM_5 : Τελικός αρμός από τον κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2

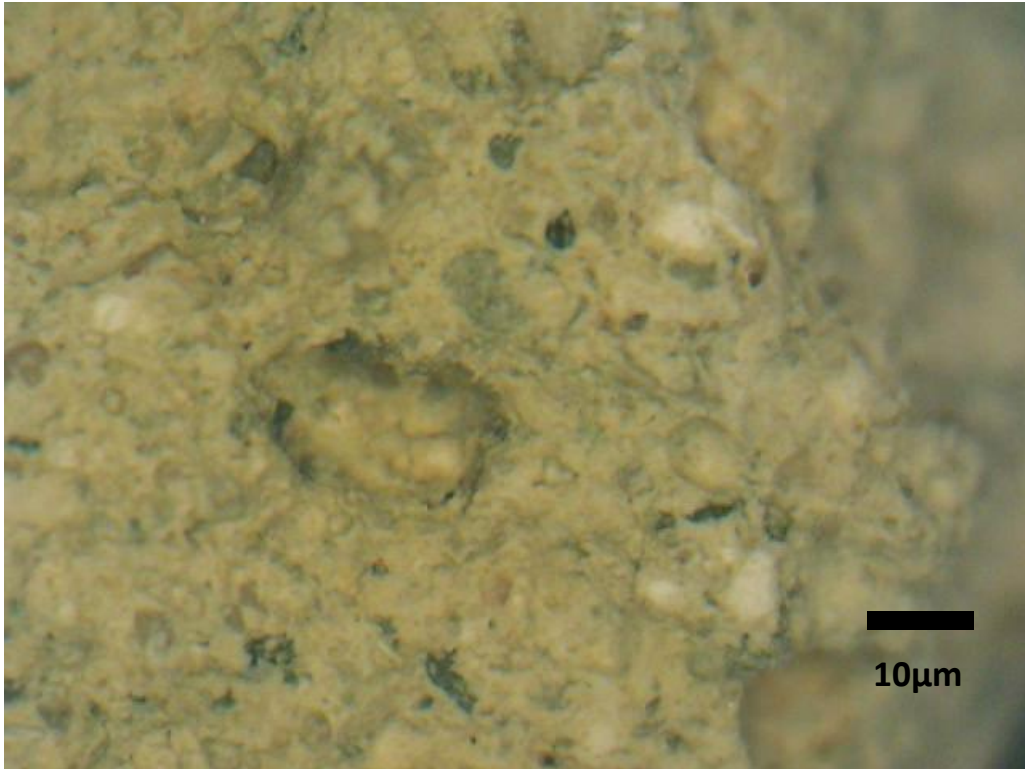


Εικόνα 35: PL.HM_5 x 50

Το δείγμα PL.HM_5, γκρίζου χρωματισμού, παρουσιάζει συνεκτική επιφάνεια με ίχνη βιοδιάβρωσης, παρουσία λίγων αδρανών μικρού μεγέθους και σχετικά καλή συνάφεια κονίας αδρανών.



Εικόνα 36: PL.HM_7 : Κονίαμα τυμπάνου, ανάμεσα σε λίθους τυμπάνου

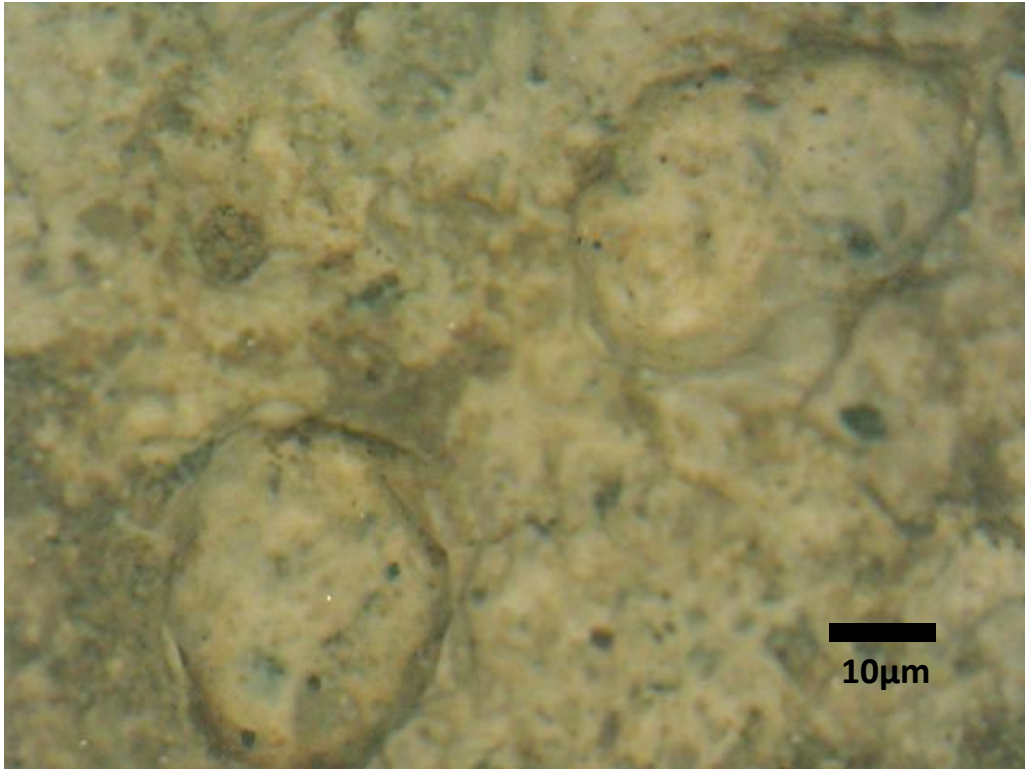


Εικόνα 37: PL.HM_7 x50

Το κονίαμα PL.HM_7 είναι σχετικά εύθρυπτο και μαλακό κονίαμα, με πλήθος αδρανών και θραυστών κεραμικών



Εικόνα 38: PL.HM_8 : Κονίαμα σύνδεσης λίθων πάνω θολίτη από απομεινάρι 2

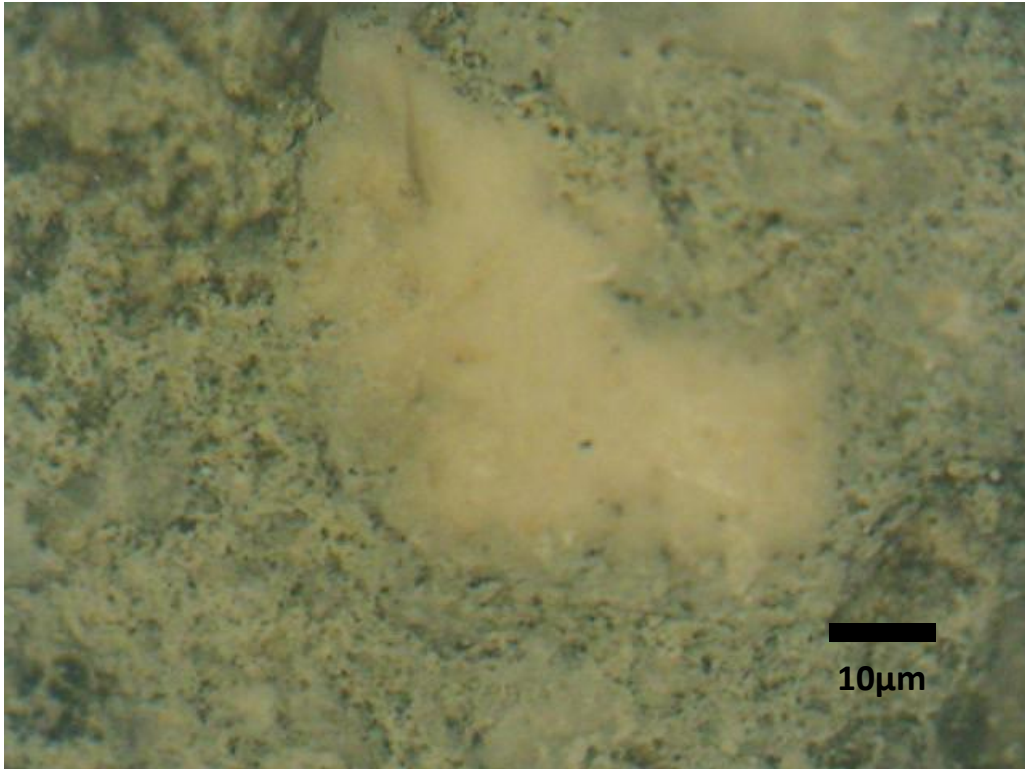


Εικόνα 39: PL.HM_8 x50

Το κονίαμα PL.HM_8, έχει αρκετά συνεκτική φύση και καλή συνάφεια κονιάς – αδρανών (σχετικά μεγάλου μεγέθους)



Εικόνα 40: PL.HM_9 : Εξωτερικό κονίαμα σύνδεσης του άνω και του κάτω θολίτη

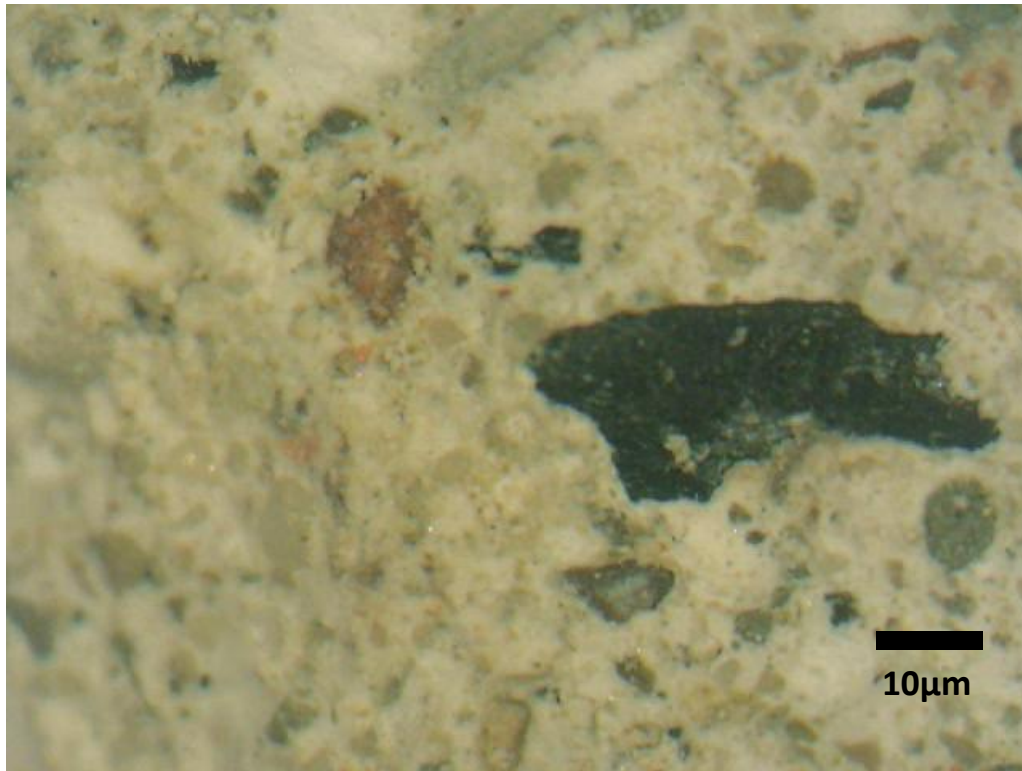


Εικόνα 41: PL.HM_9 x50

Το PL.HM_9, κονίαμα γκρίζου χρωματισμού, παρουσιάζει χαρακτηριστικά τσιμεντιτικού υλικού.



Εικόνα 42: PL.HM_10 : Κονίαμα στην ένωση των θολιτών

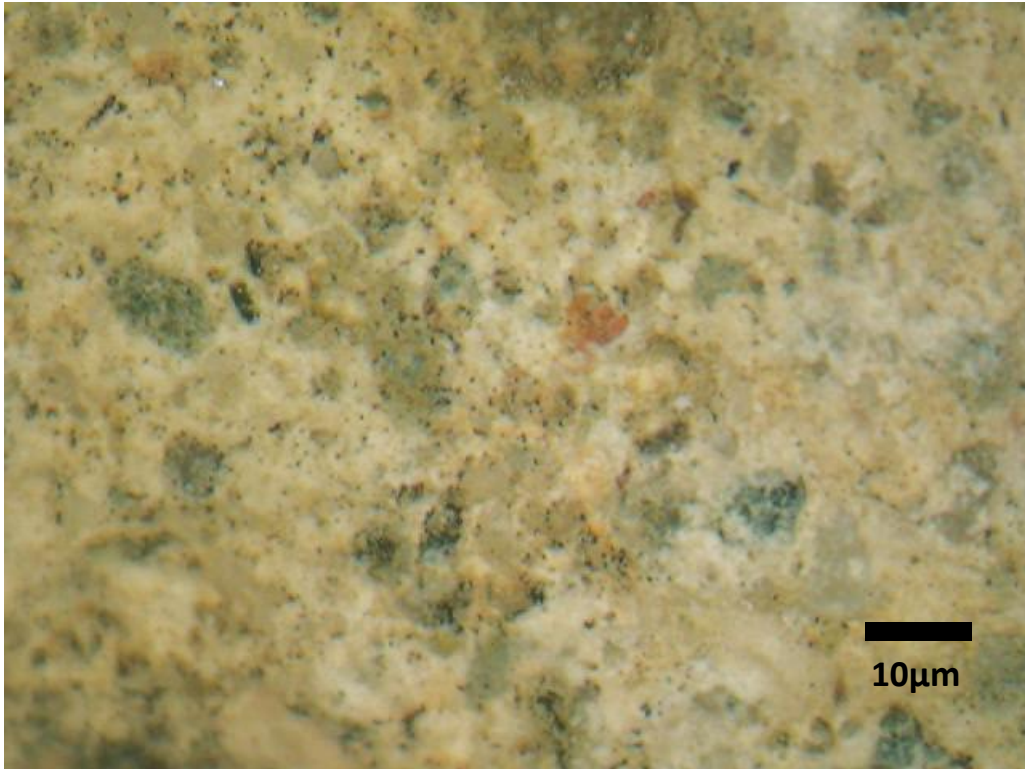


Εικόνα 43: PL.HM_10 x50

Η επιφάνεια του κονιάματος PL.HM_10 είναι συνεκτικής φύσεως, με πλήθος αδρανών ποικίλων μεγεθών, τα οποία έχουν αρκετά καλή συνάφεια με την κονία.



Εικόνα 44: PL.HM_11: Λευκό κονίαμα σύνδεσης 2 θολιτών στο εναπομείναν τμήμα 2, σε επαφή με το τσιμέντο

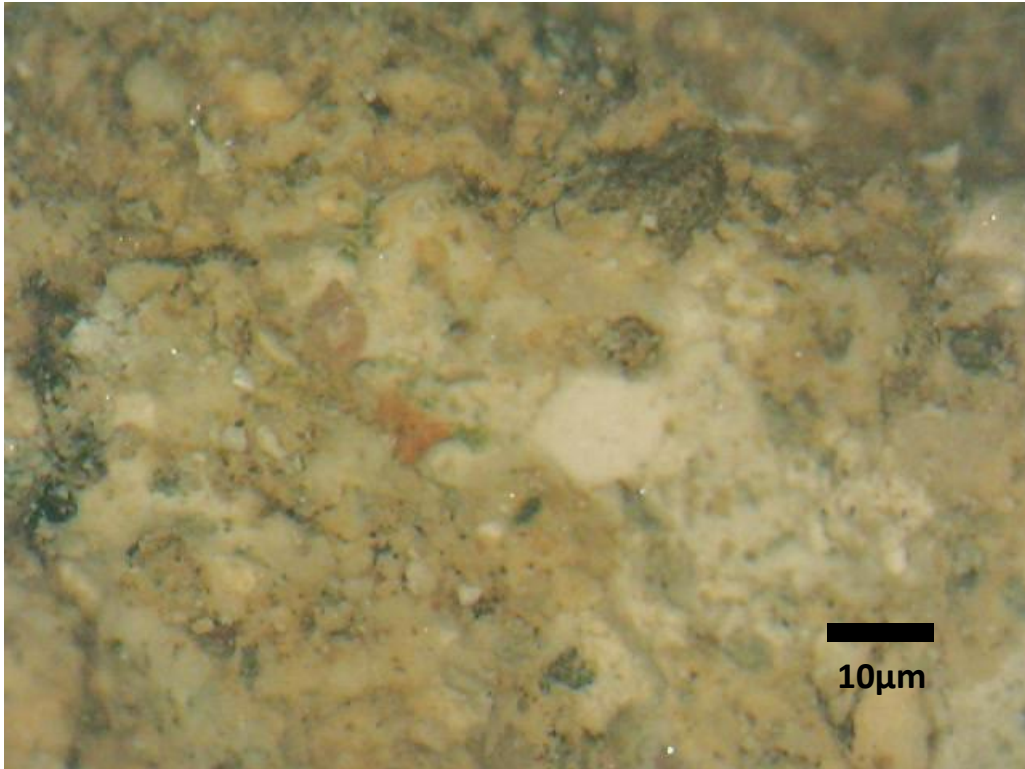


Εικόνα 45: PL.HM_11 x50

Το PL.HM_11 είναι κονίαμα γκρίζου χρωματισμού, με συνεκτική επιφάνεια και πλήθος αδρανών και θραυστού κεραμικού, που παρουσιάζουν εξαιρετική συνάφεια με την κονία. Παρουσιάζει επίσης ίχνη βιοδιάβρωσης (τριχίδια μπορντώ χρωματισμού).



Εικόνα 46: PL.HM_13 : Κονίαμα σύνδεσης λίθων του κάτω θολίτη στο απομεινάρι 2

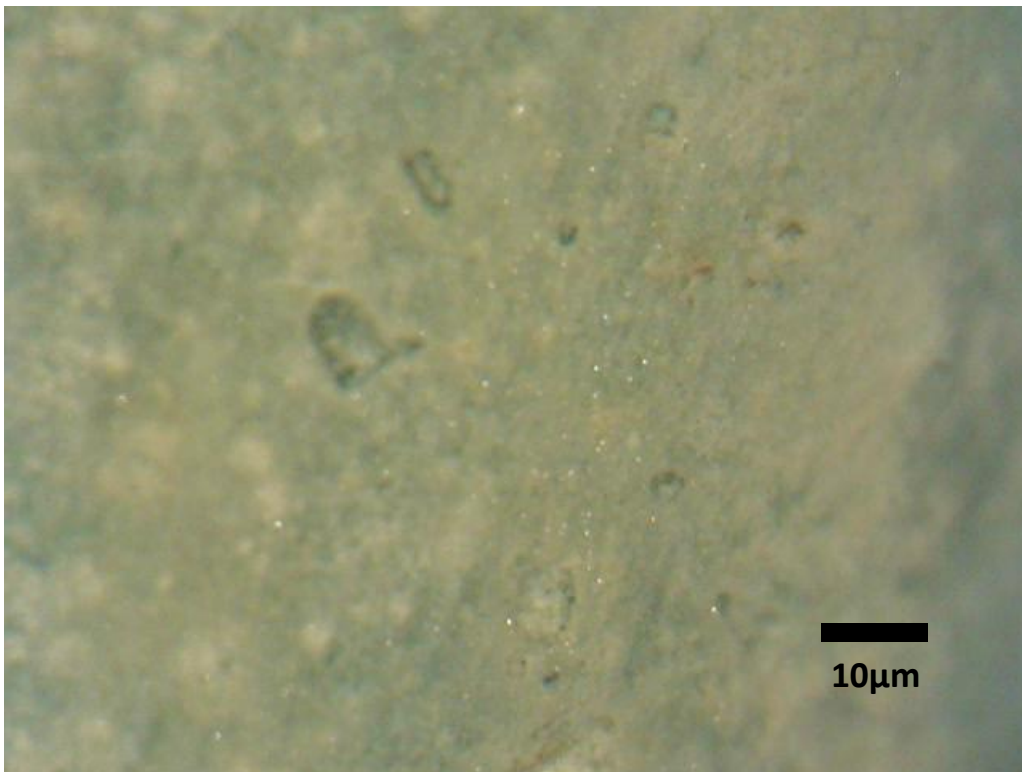


Εικόνα 47: PL.HM_13 x50

Το PL.HM_13 παρουσιάζει σχετικά συνεκτική επιφάνεια με ίχνη φθοράς και βιοδιάβρωσης, καθώς και αρκετά αδρανή και μικρού μεγέθους συσσωματώματα ασβέστη.



Εικόνα 48: Grout_Tube : Υλικό μέσα από σωληνάκι ενεμάτωσης μεταξύ των θολιτών στο απομεινάρι 1

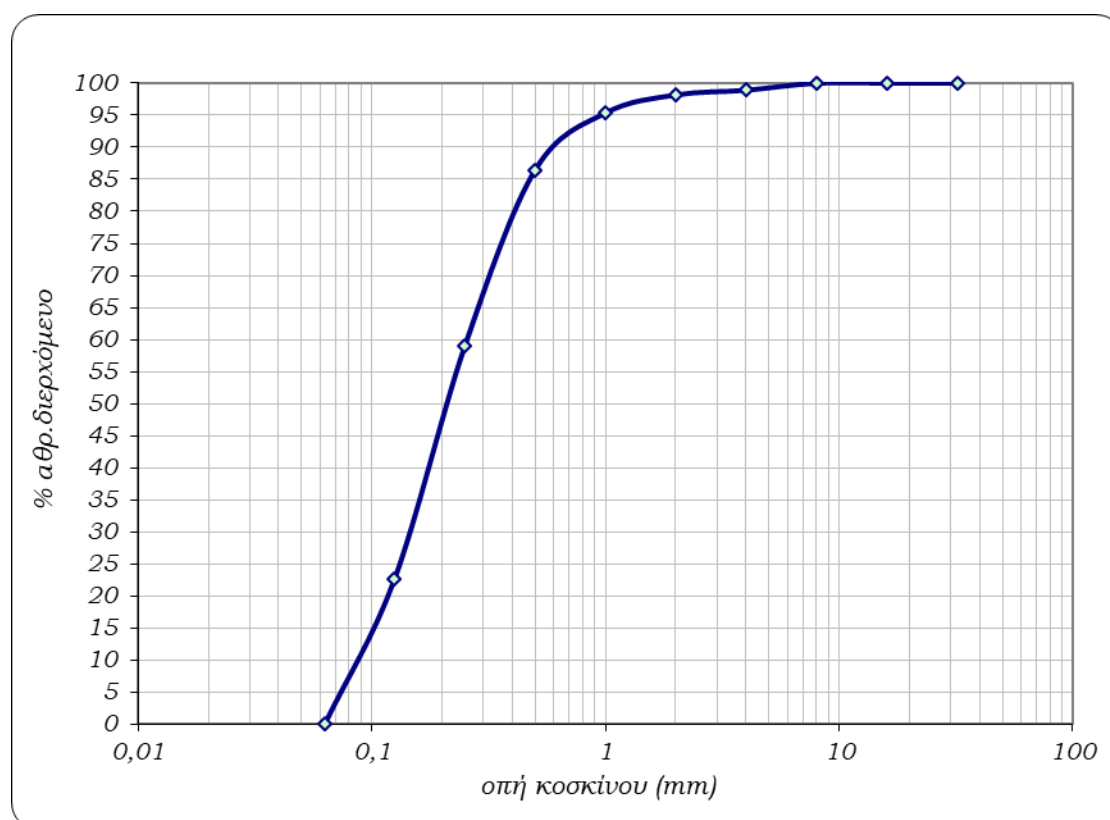


Εικόνα 49: Grout_Tube x50

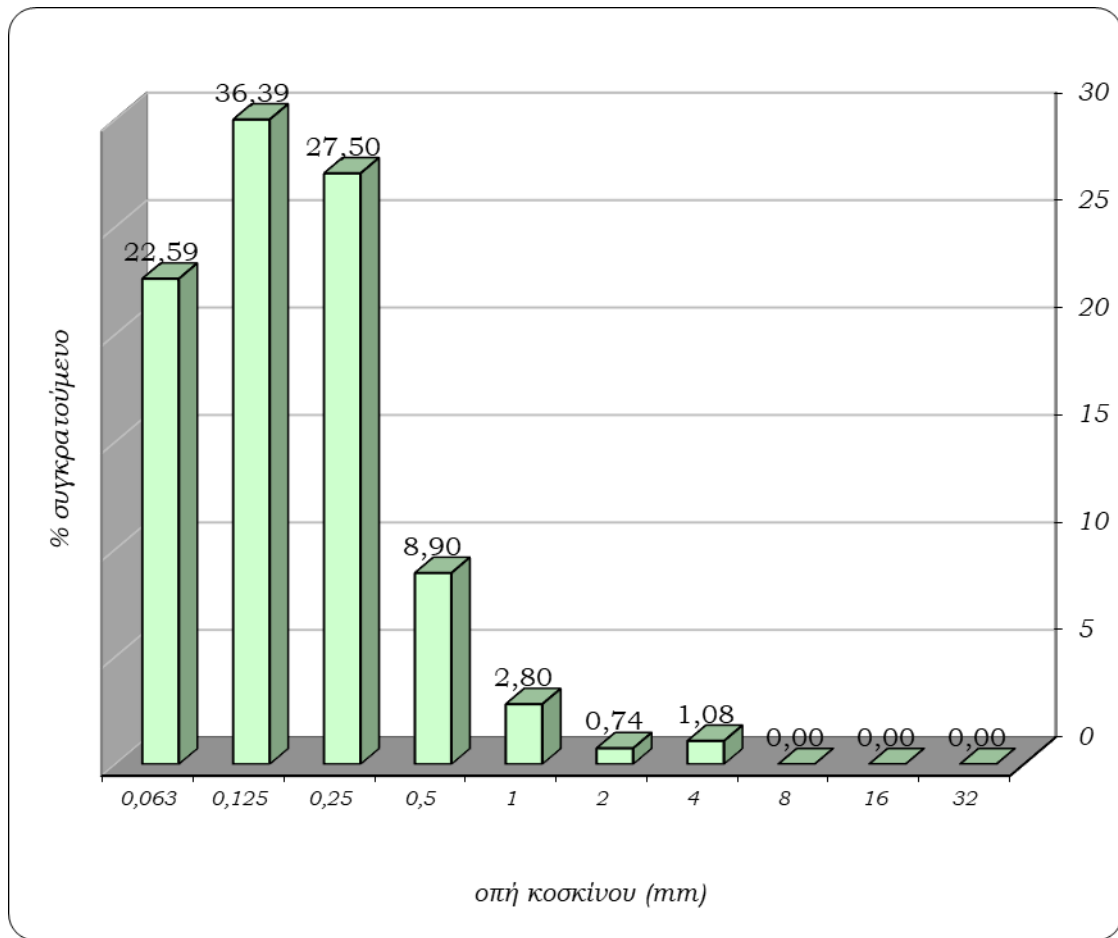
Το PL.HM.GROUT_1 πρόκειται για ένεμα τσιμεντιτικής φύσεως και επομένως παρουσιάζει πολύ σκληρή και συνεκτική επιφάνεια γκριζου σκούρου χρωματισμού.

4.1.5. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ

Η μέθοδος της κοκκοδιαβάθμισης είναι ίσως ο πιο διαδεδομένος τρόπος για τον προσδιορισμό των συνολικών αδρανών και της συνολικής κονιάς που περιέχει ένα κονίαμα. Προσδιορίζει επίσης την αναλογία κονιάς / αδρανών. Το δείγμα που επιλέξαμε να κοκκομετρήσουμε, είναι το PL.HM_13, το οποίο αποτελεί κονίαμα σύνδεσης λίθων του κάτω θολίτη, στο εναπομείναν τμήμα 2, καθώς θεωρείται αντιπροσωπευτικό του συνόλου των κονιαμάτων δόμησης. Στα παρακάτω 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.



Εικόνα 50: Κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος PL.HM_13



Εικόνα 51: Κοκκομετρία του δείγματος PL.HM_13

Είναι εμφανές ότι δεν παρατηρείται η ύπαρξη ασυνεχειών στην μονοκόρυφη κοκκομετρική καμπύλη, ενώ παρατηρείται ότι το μέγιστο ποσοστό άμμου παρουσιάζει διάμετρο μεταξύ 0,125mm και 0,25mm (συνεπώς συγκρατείται στο κόσκινο των 125μm). Είναι σαφές ότι υπερисχύουν τα λεπτόκοκκα κλάσματα έναντι των πιο χονδρόκοκκων, καθώς το 86,48% της άμμου παρουσιάζει διάμετρο κόκκων κάτω των 0,5mm.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα μέτρησης κοκκοδιαβάθμισης του PL.HM_13

Κωδικός δείγματος	Κονία %	Αδρανή %	Απώλειες %	Μέγιστος κόκκος (mm)	Κονία:Αδρανή (κ.β.)
PL.HM_13	49,00	51,00	2,62	6	0,96 ή ~1:1

Από τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι το ποσοστό της κονίας που περιέχεται στο δείγμα είναι περίπου το 50% του συνολικού δείγματος, γεγονός από το οποίο

συμπεραίνουμε ότι το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό και περιέχει σημαντική ποσότητα αδρανών.

4.1.2. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X.R.D.)

Πίνακας 5: Πίνακας Ανάλυσης Δειγμάτων με X.R.D.

Κωδικός δείγματος	Κύρια ορυκτολογική φάση	Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις
PL.HM_3	Ασβεστίτης, Χαλαζίας, Γύψος	Αλβίτης, Πορτλαντίτης, ορθόκλαστα, μοσχοβίτης, τάλκης, θωμασίτης, λιζαρδίτης
PL.HM_4	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, αλβίτης, ιλλίτης ορθόκλαστα
PL.HM_5	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Αλβίτης, ιλλίτης, μικροκλίνης, αστριοι, λιζαρδίτης, μοντμοριλονίτης, χλωρίτης
PL.HM_7	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Αλβίτης, μικροκλίνης, λιζαρδίτης, ιλλίτης, μοντμοριλονίτης, χλωρίτης
PL.HM_8	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Αλβίτης, ορθόκλαστα, μαρμαρυγίες
PL.HM_9	Ασβεστίτης	-
PL.HM_10	Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Αλβίτης, μικροκλίνης, ιλλίτης, λιζαρδίτης,
PL.HM_11	Χαλαζίας, Ασβεστίτης	Αλβίτης, μικροκλίνης, ιλλίτης, λιζαρδίτης,
PL.HM_13	Ασβεστίτης	Αλβίτης, μικροκλίνης, λιζαρδίτης, μαρμαρυγίες, ιλλίτης, ενσταντίτης μοντμοριλονίτης- χλωρίτης
PL.HM_13_binder	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, μοντμοριλονίτης, μαρμαρυγίες
Grout_tube	Πορτλαντίτης, Ασβεστίτης, Χαλαζίας	Εντριγκίτης, μικροκλίνης, Αλβίτης, άστριοι, ανορθόκλαστα, γύψος

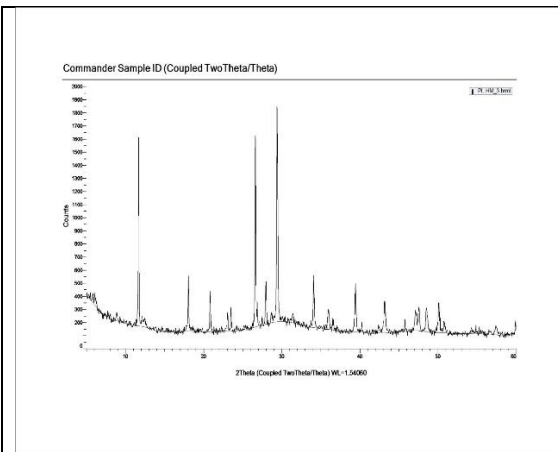
Τα κονιάματα PL.HM_5, PL.HM_7 και PL.HM_8 παρουσιάζουν ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις χαλαζία και ασβεστίτη. Ως κοινή δευτερεύουσα φάση παρουσιάζουν τον αλβίτη.

Τα κονιάματα PL.HM_4, PL.HM_9, PL.HM_13 και PL.HM_13_binder παρουσιάζουν ως κύρια ορυκτολογική φάση τον ασβεστίτη.

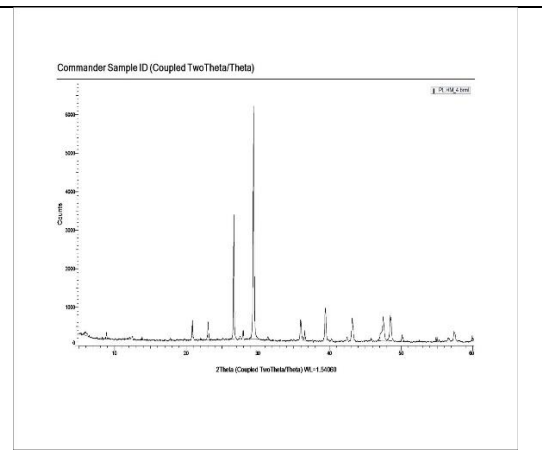
Το κονίαμα PL.HM_3, που αφορά σε κονίαμα σύνδεσης λίθων θολιτών, εκτός από τον ασβεστίτη και τον χαλαζία, είναι το μόνο που παρουσιάζει και γύψο ως κύρια

ορυκτολογική φάση, με κορυφή σχεδόν ίση αυτής του ασβεστίτη και του χαλαζία. Παρατηρείται επίσης ότι στις δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις που παρουσιάζει, εμπεριέχεται και πορτλαντίτης.

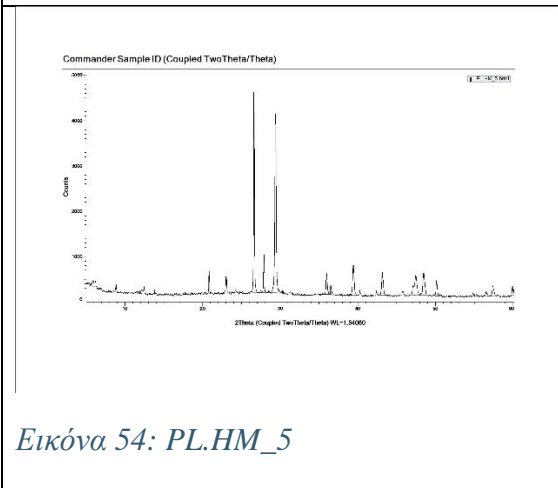
Το δείγμα Grout_Tube επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για ένεμα, παρουσιάζοντας πορτλαντίτη, ασβεστίτη και χαλαζία ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις και εντριγκίτη, αλβίτη και γύψο ως δευτερεύουσες.



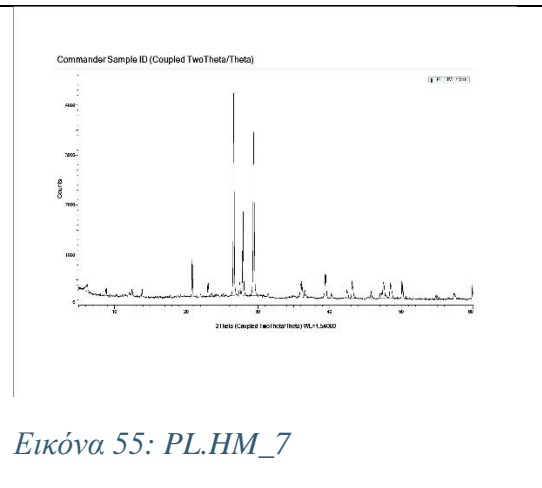
Εικόνα 52: PL.HM_3



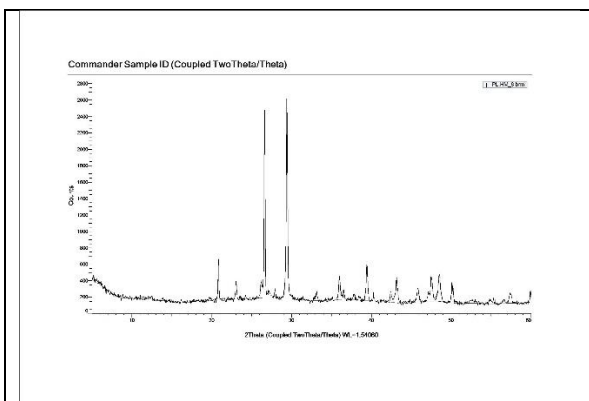
Εικόνα 53: PL.HM_4



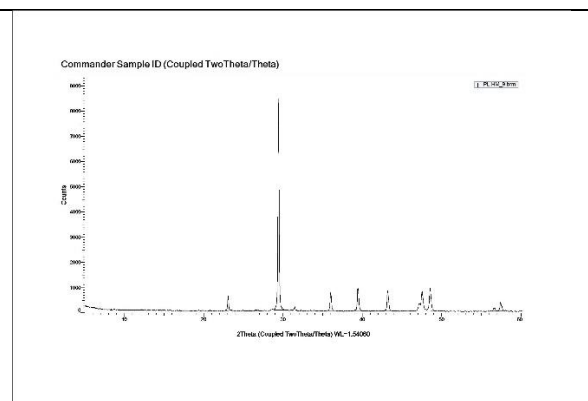
Εικόνα 54: PL.HM_5



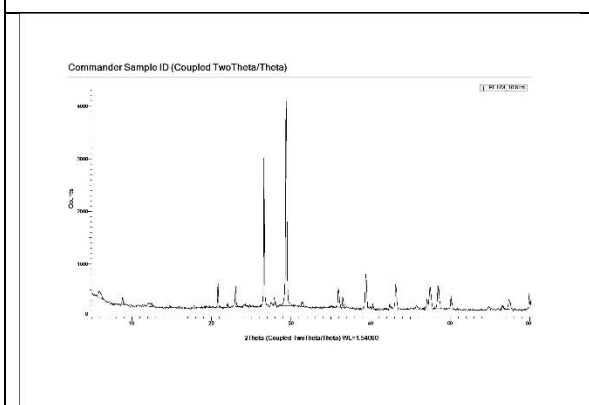
Εικόνα 55: PL.HM_7



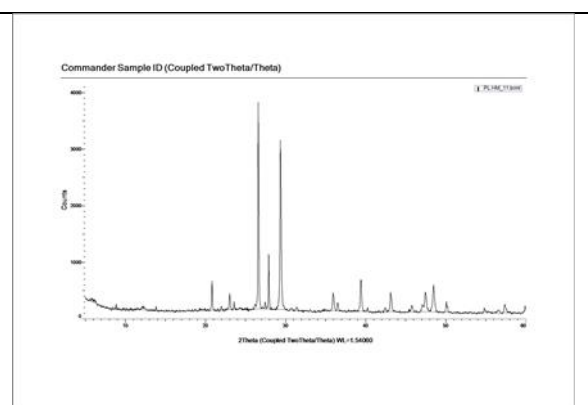
Εικόνα 56: PL.HM_8



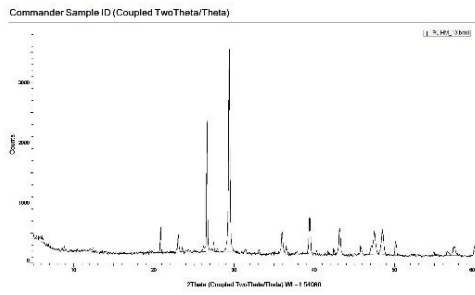
Εικόνα 57: PL.HM_9



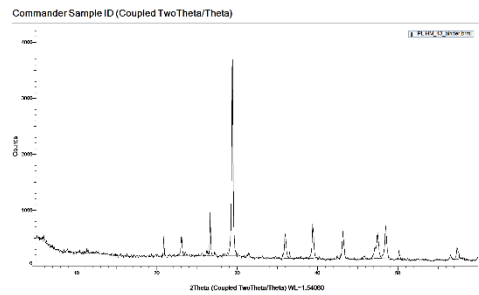
Εικόνα 58: PL.HM_10



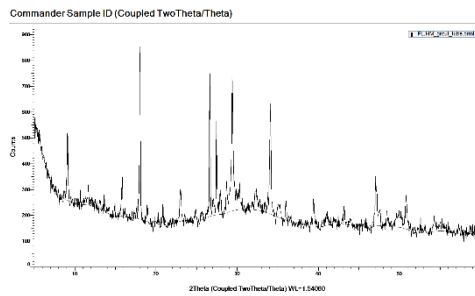
Εικόνα 59: PL.HM_11



Εικόνα 60: PL.HM_13



Εικόνα 61: PL.HM_13_Binder



Εικόνα 62: Grout_Tube

4.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δειγμάτων που ελήφθησαν από το Γεφύρι της Πλάκας και που εξετάστηκαν με Θερμικές Μεθόδους Ανάλυσης (Διαφορική Θερμική Ανάλυση–Θερμοβαρυμετρία).

Πίνακας 6: Απόλεια μάζας% και αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας ιστορικών κονιαμάτων

Κωδικός δείγματος	Απόλεια μάζας (%)				Αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας
	<120°C	120-200°C	200-600°C	>600°C	
PL.HM_3	2,83	2,00	5,29	15,15	2,86
PL.HM_4	1,46	0,73	3,58	22,71	6,34
PL.HM_5	2,28	1,00	4,64	18,92	4,08
PL.HM_7	1,50	0,64	2,85	14,16	4,97
PL.HM_8	3,21	1,44	7,53	18,32	2,43
PL.HM_9_EXT	1,73	0,56	1,63	34,05	20,89
PL.HM_10	2,63	1,44	4,41	16,72	3,79
PL.HM_11	2,03	0,90	5,03	18,22	3,62
PL.HM_13	2,86	1,47	6,23	16,79	2,70
Grout_tube	8,43	5,69	7,40*	6,27	1,23

*Παρατηρείται απόλεια μάζας στο διάστημα 421-514°C ίση με 2,29%

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ροφημένου νερού (>1%). Το υλικό από το σωληνίσκο ενεμάτωσης παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό ροφημένου νερού με τιμή 8,43%.

Θερμοκρασίες μικρότερες των 120°C: Η μεταβολή οφείλεται στην εξάτμιση της υγρασίας. Στο διάστημα αυτό την υψηλότερη τιμή παρουσιάζει το υλικό ενεμάτωσης, ενώ ακολουθεί το PL.HM_8 με τιμές 8,43 και 3,21% αντίστοιχα.

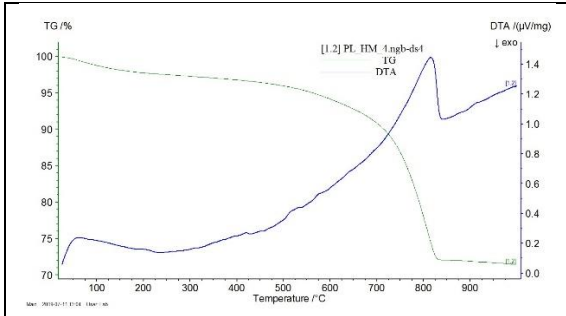
Θερμοκρασίες μεταξύ 120 και 200°C: Στο διάστημα αυτό αποβάλλεται το νερό των ένυδρων αλάτων. Τη μικρότερη τιμή απόλεια μάζας την παρουσιάζει το τσιμεντιτικής φύσεως κονίαμα PL.HM_9 (0,56%), ενώ την υψηλότερη τιμή την παρουσιάζει και πάλι το ένεμα Grout_Tube(5,69%), με το κονίαμα PL.HM_3 να ακολουθεί (2.00%).

Διάστημα 200-600°C: Αποβάλλεται το χημικά δεσμευμένο νερό των ένυδρων αργιλοπυριτικών φάσεων, εφόσον απουσιάζουν οργανικές προσμίξεις. Την υψηλότερη τιμή (7,53%) παρουσιάζει το κονίαμα PL.HM_8, ενώ την χαμηλότερη (1,63%) το PL.HM_9.

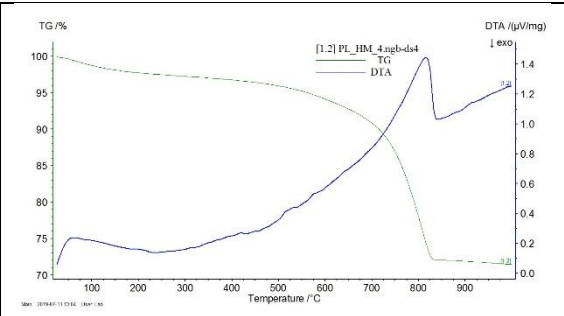
Πάνω από τους 600°C αποσυντίθενται οι ανθρακικές ενώσεις, απελευθερώνοντας CO₂. Στο διάστημα αυτό όλα τα δείγματα κυμαίνονται κάτω από το 20% με εξαίρεση τα PL.HM_4 και PL.HM_9 που παρουσιάζουν τιμές 22,71 και 20,89% αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα του Grout_Tube παρατηρείται έντονη ενδόθερμη κορυφή στους 122,7°C και 460°C, πράγμα που οφείλεται στην παρουσία πορτλαντίτη και στην απώλεια των κρυσταλλικών νερών του εντριγκίτη και του γύψου καθώς και κάποιων υδραυλικών ενώσεων που αποδίδονται στο τσιμέντο.

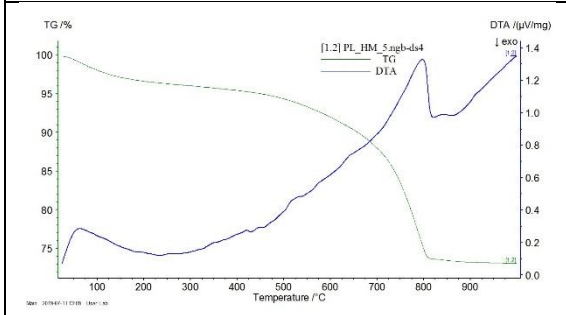
Σε όλα τα υπόλοιπα κονιάματα παρατηρείται ενδόθερμη κορυφή χαλαζία περίπου στους 580°C, λόγω μετάπτωσης του χαλαζία από Α σε Β.



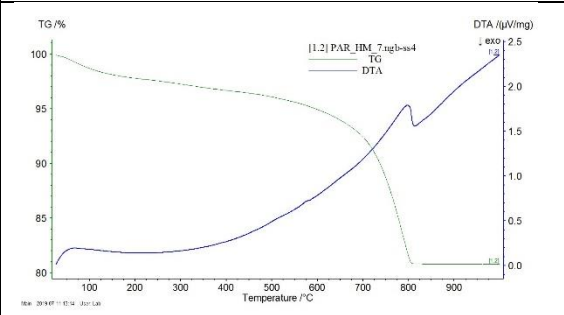
Εικόνα 63: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_3



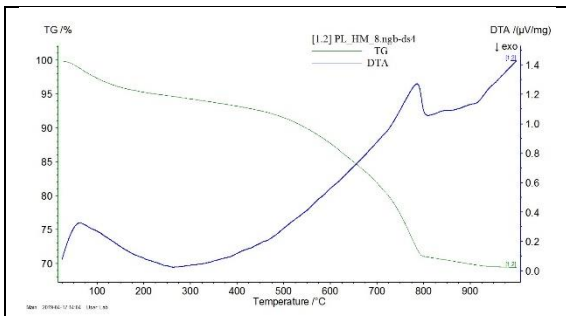
Εικόνα 1: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_4



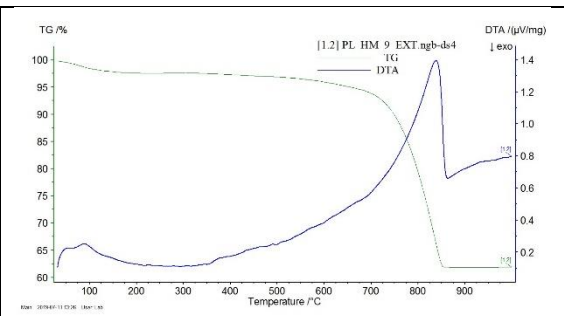
Εικόνα 65: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_5



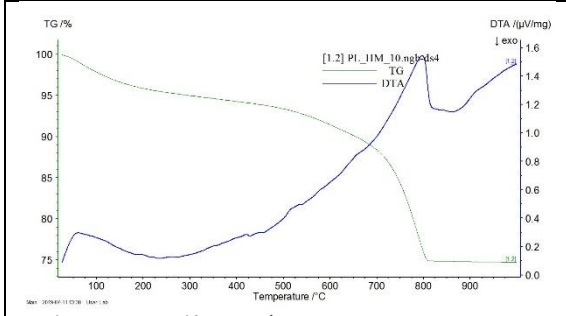
Εικόνα 2: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_7



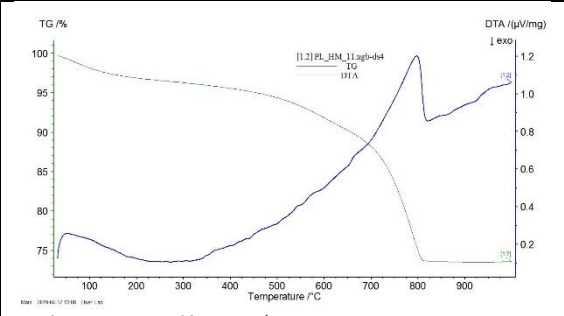
Εικόνα 67: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_8



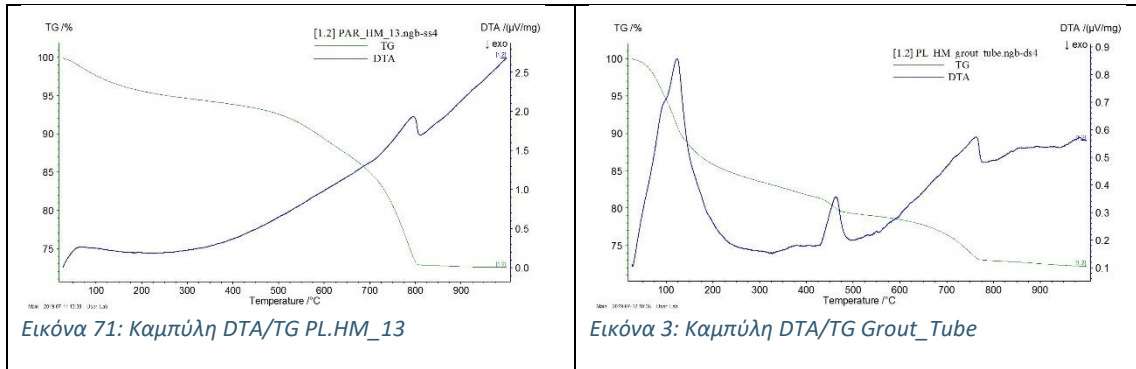
Εικόνα 68: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_9



Εικόνα 69: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_10

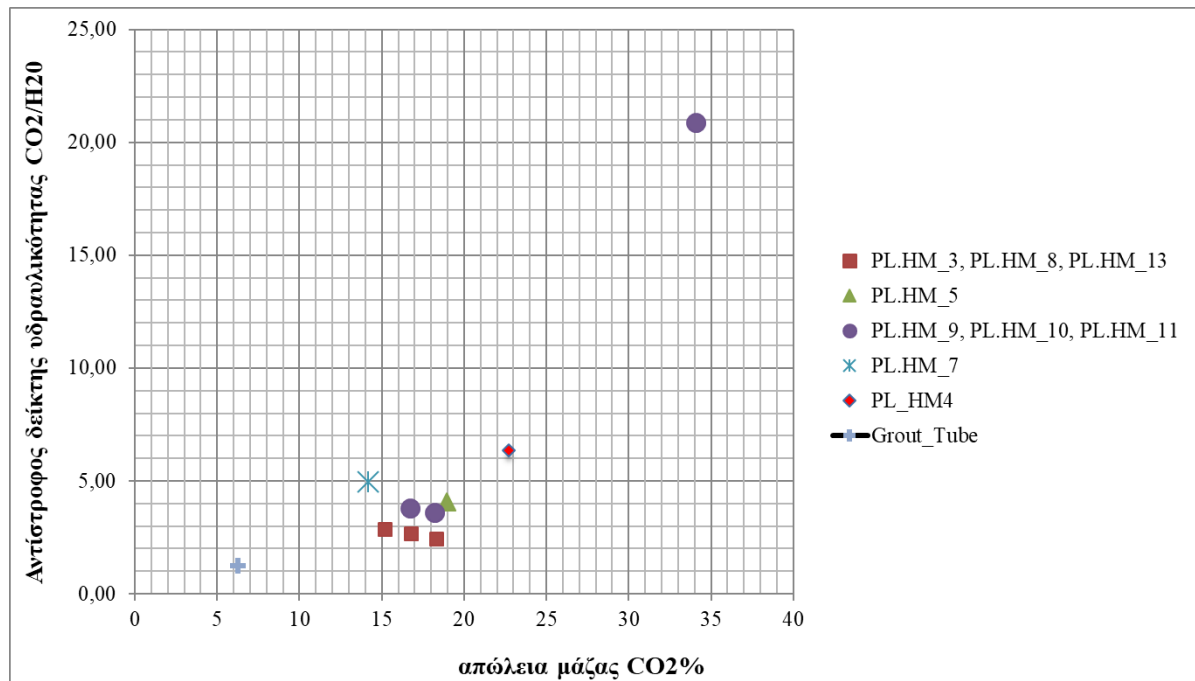


Εικόνα 70: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_11



Εικόνα 71: Καμπύλη DTA/TG PL.HM_13

Εικόνα 3: Καμπύλη DTA/TG Grout_Tube



Εικόνα 4: Αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας και απώλεια μάζας ιστορικών κονιαμάτων

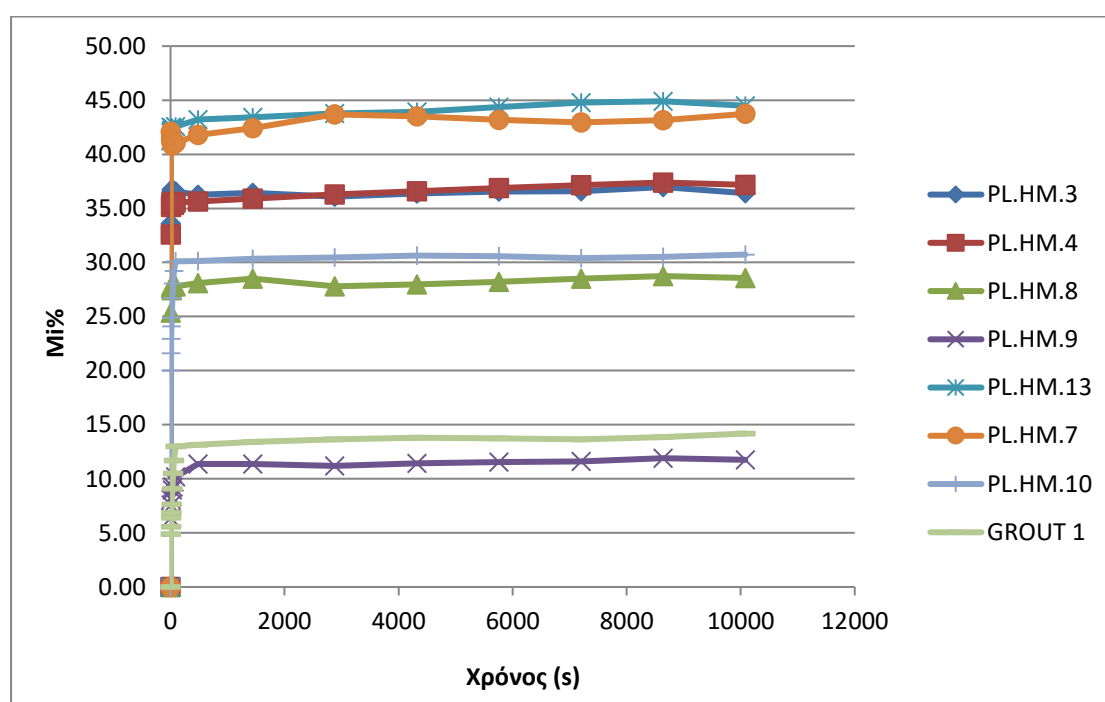
Όπως συμπεραίνουμε από το παραπάνω διάγραμμα τα κονιάματα που διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα και βρίσκονται στα περατοτικά όρια του διαγράμματος, είναι ένα από τα κονιάματα σύνδεσης άνω και κάτω σειράς θολιτών, το PL.HM_9, το PL.HM_4, κονίαμα σύνδεσης λίθων τόξου και το PL.HM_7, κονίαμα σύνδεσης λίθων τυμπάνου. Τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων κονιαμάτων, με εξαίρεση πάντα το ένεμα Grout_Tube, είναι αρκετά παρόμοια και σύμφωνα και με το διάγραμμα αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας / απώλεια μάζας CO₂%, που προκύπτει από τη μέθοδο της Θερμικής Ανάλυσης, φαίνεται να κατηγοριοποιούνται περίπου στην ίδια περιοχή.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική αναφορά [6] η πλειονότητα των κονιαμάτων που εξετάστηκαν εμφανίζουν τιμές ανάμεσα των χαρακτηριστικών τιμών των ιστορικών κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου και κονιαμάτων φυσικής ποζολάνης.

Όσον αφορά τον αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας την μακράν υψηλότερη τιμή την παρουσιάζει το PL.HM_9 (20,89), ενώ την χαμηλότερη το Grout_Tube. Στην ομάδα των υπολοίπων δειγμάτων υψηλότερη τιμή παρουσιάζει το PL.HM_4.

4.1.4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΝΣΗΣ ΣΕ ΝΕΡΟ

.Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ολικής εμβάπτισης σε νερό στα εξεταζόμενα δείγμα, με εξαίρεση αυτά που δεν είχαν επαρκή ποσότητα ή γεωμετρία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται γραφικά στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 74: Καμπύλες απορρόφησης νερού μέσω ολικής εμβάπτισης

Στους παρακάτω πίνακες αναγράφονται οι τιμές των βαρών των εξεταζόμενων δειγμάτων, καθώς και τα ποσοστά αύξησης του βάρους τους, προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές του ανοιχτού πορώδους, της φαινόμενης πυκνότητας, το ποσοστό του ροφημένου νερού, και το ποσοστό της απώλειας μάζας.

Όπως φαίνεται η μικροδομή του PL.HM_9 παρουσιάζει παρόμοιες τιμές με αυτές του ενέματος Grout_Tube και παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά από τα υπόλοιπα δείγματα.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα ολικής εμφάπτισης ιστορικών κονιαμάτων σε νερό

Κωδικός δείγματος	WAC (%)*	Ολικό πορώδες (%) (μέσω ολικής εμφάπτισης)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Απώλεια μάζας (%)
PL.HM_3	37,07	35,14	0,96	0,07
PL.HM_4	37,91	44,48	1,18	0,07
PL.HM_7	45,15	42,56	0,94	0,97
PL.HM_8	29,05	37,31	1,29	0,24
PL.HM_9	12,36	23,36	1,91	0,41
PL.HM_10	30,95	42,74	1,38	0,17
PL.HM_13	45,57	41,19	0,91	0,46
Grout_tube	14,18	21,70	1,53	0,00

*Ποσοστό απορρόφησης νερού μέσω ολικής εμφάπτισης

Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνουμε ότι τα ποσοστά ροφημένου νερού των κονιαμάτων κυμαίνονται στο 30-40%, ενώ τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης σε νερό (λόγω του ότι έχει και τη μεγαλύτερη τιμή ανοικτού πορώδους) την επιδεικνύει το κονίαμα PL.HM_13 (Κονίαμα σύνδεσης λίθων του κάτω θολίτη στο απομεινάρι 2). Εμφανίζει επίσης τη μικρότερη τιμή φαινόμενης πυκνότητας από όλα τα ιστορικά κονιάματα που εξετάστηκαν με τη μέθοδο ολικής εμφάπτισης σε νερό.

Οι τιμές του ολικού πορώδους σε όλα τα δείγματα εκτός των PL.HM_9 και Grout_Tube, κυμαίνονται άνω του 35%. Τα δείγματα PL.HM_5 και PL.HM_11 δεν ήταν εφικτό να μετρηθούν με τη μέθοδο της ολικής εμφάπτισης, λόγω ανεπαρκούς ποσότητας.

Η απώλεια μάζας μετά το πέρας ενός κύκλου ολικής εμφάπτισης παρουσιάστηκε πολύ χαμηλή, <1% σε όλες τις περιπτώσεις.

4.1.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ pH

Πίνακας 8: Προσδιορισμός διαλυτών αλάτων ιστορικών κονιαμάτων

Κωδικός δείγματος	TSS %	Ph	Ποιοτική ανίχνευση ιόντων		
			Χλωριόντα (CL ⁻)	Θειικά (SO ₄ ⁻)	Νιτρικά (NO ₃ ⁻)
Blank 1		6,4			
PL.HM_3	5,74	9,77	+++ (υποκίτρινο)	+	-
PL.HM_4	2,96	8,48	+	-	-
PL.HM_5	3,49	8,67	+	-	-
PL.HM_7	3,33	8,72	+	-	-
PL.HM_8	3,18	8,80	++	-	-
PL.HM_9_ext	4,96	9,28	+	-	-
PL.HM_10	3,86	8,94	++	-	-
PL.HM_11	3,33	8,83	++	+	-
PL.HM_13	3,36	8,85	+	+	-
Grout_Tube	11,1 6	9,9	+++++ (πολύ κίτρινο)	+	-

+++++πολύ υψηλή, ++++υψηλή, +++μέτρια, ++χαμηλή, +πολύ χαμηλή, tr ίχνη

Σε όλα τα δείγματα των ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού της Πλάκας ανιχνεύτηκε μικρή παρουσία χλωριόντων. Αυτό οφείλεται τόσο στο περιβάλλον που περικλείει το Γεφύρι, όσο και στη φύση των υλικών που είχαν χρησιμοποιηθεί καθώς και στη γήρανση της στο χρόνο. Το δείγμα Grout_1, το οποίο στην ουσία είναι ένεμα τσιμεντιτικής φύσεως, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε χλωριόντα (πράγμα το οποίο φαίνεται από την έντονη χρωματική αλλαγή), κυρίως λόγω ύπαρξης πορτλαντίτη, ενώ τη δεύτερη υψηλότερη παρουσία χλωριόντων εμφανίζει το δείγμα από την ένωση των θολιτών, το οποίο μακροσκοπικά φαίνεται να είναι τσιμεντιτικής φύσεως νεότερη επέμβαση, το οποίο παρουσίασε σχεδόν 5%.

Η ύπαρξη θεικών αλάτων οφείλεται κυρίως στην διέλευση υπόγειων υδάτων, στην αλατονέφωση και στην ατμοσφαιρική ρύπανση, ενώ μπορούν να προέρχονται και από την γεινίαση με τσιμεντιτικά υλικά, καθώς χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα γύψου στα τσιμεντοκονιάματα για την επιβράδυνση της πήξης. Τα μόνα δείγματα που παρουσιάζουν θειικά άλατα, και μάλιστα με πολύ χαμηλή παρουσία, είναι το PL.HM_11 (κονίαμα σύνδεσης άνω και κάτω θολίτη), το PL.HM_13 (κονίαμα σύνδεσης λίθων θολιτών) και το Grout_1 (τσιμεντιτικό ένεμα).

Κανένα από τα εξεταζόμενα δείγματα δεν παρουσίασε νιτρικά άλατα, των οποίων η ύπαρξη οφείλεται κυρίως στην αποικοδόμηση οργανικών υλών και βακτηριδίων. Εδώ αξίζει να τονιστεί ότι το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη μέτρηση ήταν από

το εσωτερικό του κάθε δείγματος (υγής τμήματα), αποκλείοντας τις διαβρωμένες επιφάνειες.

4.1.7. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Οι μετρήσεις χρωματομετρίας που έγιναν στα δείγματα των ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού της Πλάκας είχαν ως σκοπό τον προσδιορισμό της χρωματικής απόχρωσης των κονιαμάτων και την της, σύγκρισή της με της συνθέσεις των κονιαμάτων αποκατάστασης που παρουσιάζονται στην πορεία της εργασίας.

Λόγω πολύ περιορισμένων και συγκεκριμένων διαστάσεων των δοκιμίων, έγιναν δύο σετ μετρήσεων σε κάθε δείγμα, τρεις μετρήσεις σε κάθε πλευρά, προκειμένου να εξαχθεί της μέσος όρος τιμών.

Προκειμένου να γίνει καλύτερη κατηγοριοποίηση των εξαγόμενων τιμών, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των μετρήσεων της χρωματομετρίας, οι οποίοι παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 9: Μέσοι όροι τιμών χρωματομετρίας

Κωδικός	L	a	b
PL.HM_3	69,43	2,99	13,03
PL.HM_4	72,02	0,40	5,76
PL.HM_5	71,32	1,67	10,45
PL.HM_7	65,05	1,25	11,07
PL.HM_8	71,64	0,71	7,75
PL.HM_9	64,94	0,48	7,52
PL.HM_10	68,82	0,70	7,48
PL.HM_11	59,72	3,19	12,99
PL.HM_13	71,26	1,43	9,53
Grout_tube	67,15	-0,73	2,63

Όλες οι τιμές του χρωματόμετρου ήταν θετικές εκτός μόνο από το ένεμα (Grout_1).

Αναλυτικότερα οι τιμές του L κυμαίνονται από 59,72-69,43 και από 71,26-72,02. Οι ακραίες τιμές που παρουσιάζονται (71,64 και 72,02), ανήκουν στα PL.HM_8 και PL.HM_4 αντίστοιχα.

Οι τιμές του a κυμαίνονται από 0,40-1,67 και από 2,2-3,19. Το δείγμα Grout_1 είναι το μόνο που παρουσιάζει αρνητική τιμή και διαφοροποιείται εντελώς από τα υπόλοιπα δείγματα.

Οι τιμές του b κυμαίνονται από 5,76-7,75 και από 9.53-13,03, με τις ακραίες τιμές (12,99 και 13,03) να παρουσιάζονται στα PL.HM_11 και PL.HM_3 αντίστοιχα.

4.1.8. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκαν ιστορικά κονιάματα από διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις του Γεφυριού της Πλάκας. Τα δείγματα PL.HM_3, PL.HM_8 και PL.HM_13 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης λίθων θολιτών, ενώ τα δείγματα PL.HM_9, PL.HM_10, PL.HM_11 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης άνω και κάτω θολίτη. Το δείγμα PL.HM_4 αποτελεί κονίαμα σύνδεσης λίθων του κεντρικού τόξου του γεφυριού (όψη προς το ποτάμι), ενώ το δείγμα PL.HM_7 αφορά σε κονίαμα σύνδεσης των λίθων του τυμπάνου και συγκεκριμένα πάνω από το ανακουφιστικό τόξο. Το δείγμα PL.HM_5 αποτελεί κονίαμα τελικού αρμού από τον κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2. Το δείγμα Grout_tube αφορά υλικό ενεμάτωσης, καθώς ελήφθη από σωληνίσκο ενεμάτωσης που είχε παραμείνει στην ένωση των θολιτών από προηγούμενη επέμβαση, η οποία υλοποιήθηκε προ δεκαετίας.

Η κοκκοδιαβάθμιση που έγινε στο κονίαμα PL.HM_13, έφερε ως αποτέλεσμα υψηλή αναλογία κονιάς προς αδρανή της τάξης του 1/1, αναλογία πολύ υψηλότερη από τη συνήθη πρακτική για κονιάματα δόμησης. Σε σχέση με τη χημική τους σύσταση, όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές, οι οποίες συνάδουν με χαρακτηριστικές τιμές ιστορικών κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου και κονιαμάτων ασβέστη-φυσικής ποζολάνης, μην επιτρέποντας την κατάταξή τους σε καθαρά μια εκ των δυο κατηγοριών. Σε κάθε περίπτωση, εμφανίζουν υδραυλικό χαρακτήρα, δηλαδή χαμηλές τιμές αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας, ενώ είναι εμφανές ότι για την παρασκευή τους φαίνεται να έχει χρησιμοποιηθεί άμμος αργιλοπυριτικής σύστασης ή μίξη άμμων ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής σύστασης. Εξαιρέση αποτελεί το δείγμα PL_HM_9, το οποίο παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή τιμή αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας και υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο. Παράλληλα, το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, παρουσιάζει τυπικά χαρακτηριστικά τσιμεντιτικού υλικού, με εξαιρετικά χαμηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, αισθητά χαμηλότερο των ιστορικών κονιαμάτων. Τα ιστορικά κονιάματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές ροφημένου νερού (29-46%) και πορώδους (35-45%) προσβάσιμου στο νερό μέσω ολικής εμβάπτισης, με εξαίρεση το δείγμα PL_HM_9 και το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, τα οποία παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές (WAC:12,36%, 14,18% και Πορώδες: 23,36%, 21,70%, αντίστοιχα) ενδεικτικές τσιμεντιτικών υλικών. Παράλληλα, τα ιστορικά κονιάματα, παρουσιάζουν και χαμηλές τιμές φαινόμενης πυκνότητας (0,9-1,4g/cm³), με εξαίρεση και πάλι το δείγμα PL_HM_9 και το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, τα οποία παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερες τιμές, 1,9 και 1,5g/cm³ αντίστοιχως. Τέλος όσον αφορά τα διαλυτά άλατα όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν μικρή ποσότητα χλωριόντων

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

4.2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η πρόταση για την παρασκευή ενός κονιάματος αποκατάστασης, το οποίο να είναι συμβατό με την παραδοσιακή κατασκευή και τα υλικά της από τη μία, αλλά και να είναι ανθεκτικό και να βελτιώνει τις ιδιότητες του δομήματος, χωρίς να προκαλεί ανισοτροπία με τα αυθεντικά υλικά της κατασκευής, αποτελεί πρόκληση. Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι και η διερεύνηση κονιαμάτων αποκατάστασης με βάση την υδραυλική άσβεστο (NHL3.5) ως πιθανά υλικά αποκατάστασης στο επερχόμενο έργο αναστήλωσης του Γεφυριού.

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα συμβατό και επιτελεστικό κονίαμα αποκατάστασης, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τα ιστορικά κονιάματα της εκάστοτε ιστορικής δομής. Αυτό σχετίζεται με πολλές πτυχές της αποκατάστασης. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί παρόμοια τεχνολογία κατασκευής και υλικά, αν φυσικά, το ιστορικό κονίαμα εξυπηρετούσε επαρκώς τη δομή, σε συνδυασμό πάντα με το περιβάλλον που την περικλείει, στην οποία ήταν ενταγμένο. Το κονίαμα αποκατάστασης πρέπει να είναι συμβατό με τα ιστορικά υλικά, όσον αφορά τη φυσικοχημική του σύσταση και τη μηχανική του συμπεριφορά. Πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικό στο περιβάλλον του μνημείου, πάντα "χωρίς να επιβιώνει εις βάρος των ιστορικών υλικών".

Στην περίπτωση της Γέφυρας της Πλάκας, είναι προφανές ότι προκειμένου ένα κονίαμα αποκατάστασης να είναι συμβατό και επιτελεστικό σε σχέση με τα ιστορικά κονιάματα, θα ήταν προτιμότερο να εφαρμοστεί ένα κονίαμα αποκατάστασης ασβέστη-ποζολάνης ή ένα κονίαμα υδραυλικής ασβέστου. Η υδραυλικότητα που παρουσιάζουν αυτά τα κονιάματα έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της εξαιρετικής απόδοσης σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας, όπως η Γέφυρα της Πλάκας. Για τη σύνθεση των κονιαμάτων αποκατάστασης αποφασίστηκε η χρήση άμμου πυριτικής σύστασης, αλλά και μίξη άμμου πυριτικής και ασβεστιτικής φύσεως, ώστε να υπάρξει συνάφεια με τα ιστορικά κονιάματα που περιείχαν κυρίως πυριτικά αδρανή και παρουσίαζαν χαμηλή διαβάθμιση της τάξης των 0-2 mm, ώστε να είναι εφαρμόσιμο το κονίαμα και σε λεπτούς αρμούς, όπως είναι αυτά του Γεφυριού.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής παρασκευάστηκαν συνολικά τέσσερα κονιάματα. Όλες οι συνθέσεις είχαν ως βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστο NHL3.5. Δύο εκ των κονιαμάτων περιείχαν επίσης μικρή ποσότητα μετακαολίνη, ενώ η μόνη τους διαφορά ήταν ότι το ένα (PL.BR.NHL.M1_K) περιείχε μίξη πυριτικής άμμου και μαρμαρόσκονης, ενώ το άλλο (PL.BR.NHL.M1_D) περιείχε μόνο άμμο πυριτικής σύστασης. Τα άλλα δύο κονιάματα (PL.BR_1 και PL.BR_2) που παρασκευάστηκαν αποτελούνται από ένα συνδυασμό φυσικής υδραυλικής ασβέστου NHL3.5, φυσικής ποζολάνης, μετακαολίνη, ενός μείγματος άμμου πυριτικής και ασβεστολιθικής σύστασης (0-2,5 mm) και υπερρευστοποιητή. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών κονιαμάτων είναι ότι το PL.BR_1 περιέχει επιπλέον μια μίξη οργανικών προσθέτων.

Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι συνθέσεις που εξετάστηκαν (σύσταση κ.β.%).

Πίνακας 10: Αναλυτική σύσταση συνθέσεων

Σύνθεση	Σκόνη Ασβέστου	Φυσική ή Υδραυλική Ασβεστος	Μετακασλίτης	Φυσική Ποζολάνη	Πυριτική Άμμος	Μικτή Άμμος	Υπερυστοιχητής	Επιπλέον Πρόσθετα
PL.BR_1	-	18,75	4,17	12,5	-	64,58	0,05	ΝΑΙ
PL.BR_2	-	18,75	4,17	12,5	-	64,58	0,05	ΌΧΙ
PL.BR.NHL.M1_K	-	24,00	1,00	-	-	75	-	ΌΧΙ
PL.BR.NHL.M1_D	-	24,00	1,00	-	75	-	-	ΌΧΙ

4.2.2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Αρχικά υπολογίζεται το νερό που θα χρειαστεί η κάθε σύνθεση ώστε να προκύψει εργάσιμο κονίαμα. Το νερό αυτό προστίθεται στον κάδο ανάμιξης, και προστίθενται τα λευτόκοκκα υλικά (κονίες). Στη συνέχεια, αφού έχουν αναμιχθεί τα λεπτόκοκκα υλικά, προστίθενται σιγά-σιγά τα αδρανή και συνεχίζεται η ανάμιξη. Ο συνολικός χρόνος ανάμιξης ήταν 3 λεπτά. Στη συνέχεια ακολουθεί φωτογραφική απεικόνιση της διαδικασίας παρασκευής κονιαμάτων στο Εργοστάσιο "TITAN" Καμαρίου.



Όργανο ανάμιξης κονιαμάτων



Κονίαμα κατά την ανάμιξή του



Μέτρηση συγκρατούμενου νερού κονιάματος



Κονίαμα αμέσως μετά την ανάμιξή του



Κονίαμα στην τράπεζα εξάπλωσης



Κονίαμα μέσα σε μήτρα



Μήτρες κονιάματων σε θάλαμο σταθερών συνθηκών

Προκειμένου να παρασκευαστούν τα επιθυμητά κονιάματα αποκατάστασης για το Γεφύρι της Πλάκας, προηγήθηκαν μελέτες των νωπών χαρακτηριστικών τους, οι οποίες έλαβαν μέρος στο εργοστάσιο του «ΤΙΤΑΝ».

Ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό W / B (όπου το συνδετικό υλικό υπολογίζεται ως το άθροισμα της ασβέστου και της πρόσθετης ποζολανικής ουσίας) για κάθε μείγμα κονιάματος, προσδιορίστηκε αφού μετρήθηκε η συνεκτικότητα του νέου κονιάματος σύμφωνα με την τράπεζα εξάπλωσης και επιδιώχθηκε μια τιμή 15-15,5 cm. Στην περίπτωση των δύο κονιαμάτων Pl.Br.1 και Pl.Br.2, η συνοχή ήταν

σημαντικά υψηλότερη όταν επιτεύχθηκε αυτή η εργασιμότητα, πιθανώς λόγω της προσθήκης των οργανικών προσθέτων και ίσως λόγω του συνδυασμού των δύο τύπων ποζολάνης.

Πίνακας 11: Νωπά χαρακτηριστικά κονιαμάτων αποκατάστασης

Κονίαμα Αποκατάστασης	W/B	Τράπεζα Εξάπλωσης (cm)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm³)	Συγκρατούμενο Νερό %
NHL_M1_K	0.80	15.00	2.02	90.92
NHL_M1_D	0.74	15.00	2.04	92.41
PL.BR_1	0.69	16.50	1.82	99.02
PL.BR_2	0.65	16.80	1.97	89.88

Την χαμηλότερη απαίτηση σε νερό παρουσίασαν τα Pl.Br.1 και Pl.Br.2, με το Pl.Br.1 (με την προσθήκη ενός μείγματος οργανικών προσθέτων), να παρουσιάζει πολύ υψηλότερη τιμή συγκρατούμενου νερού σε σχέση με τα άλλα μίγματα κονιάματος. Η σύνθεση Pl.Br.2, η οποία είναι της ίδιας σύνθεσης με την Pl.Br.1, αλλά με την προσθήκη μόνο υπερρευστοποιητή και κανενός άλλου οργανικού προσθέτου, παρουσίασε μακράν τη χαμηλότερη τιμή συγκρατούμενου νερού. Το υδραυλικό ασβεστοκονίαμα παρουσίασε την υψηλότερη τιμή πυκνότητας, ενώ το κονίαμα Pl.Br.1 παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερη τιμή [5].

Μετά την επιλογή των συνθέσεων η οποία έχει προκύψει από την μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων και την επιλογή των πρώτων υλών, ακολουθεί η παρασκευή και αποτίμηση των νωπών κονιαμάτων. Τα κονιάματα παρασκευάστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που προαναφέρθηκε και πραγματοποιήθηκε έγχυση του υλικού σε μεταλλικά καλούπια, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN1015. Εν συνεχεία, τα κονιάματα διατηρήθηκαν για 7 μέρες σε θάλαμο σταθερών συνθηκών (95% σχετική υγρασία και 20°C, τις δυο πρώτες μέρες σε καλούπι και τις υπόλοιπες 5 ημέρες εκτός μήτρας) και εν συνεχεία διατηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου σε συνθήκες 65% σχετικής υγρασίας και 20°C. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το κονίαμα με τα οργανικά πρόσθετα δεν έπηξε στον θάλαμο υγρασίας, όπου και παρέμεινε μέσα στην μήτρα μέχρι να είναι δυνατή η αφαίρεσή του (10 ημέρες).

4.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΗΞΗ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ

4.2.3.1. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (Χ.Ρ.Δ.)

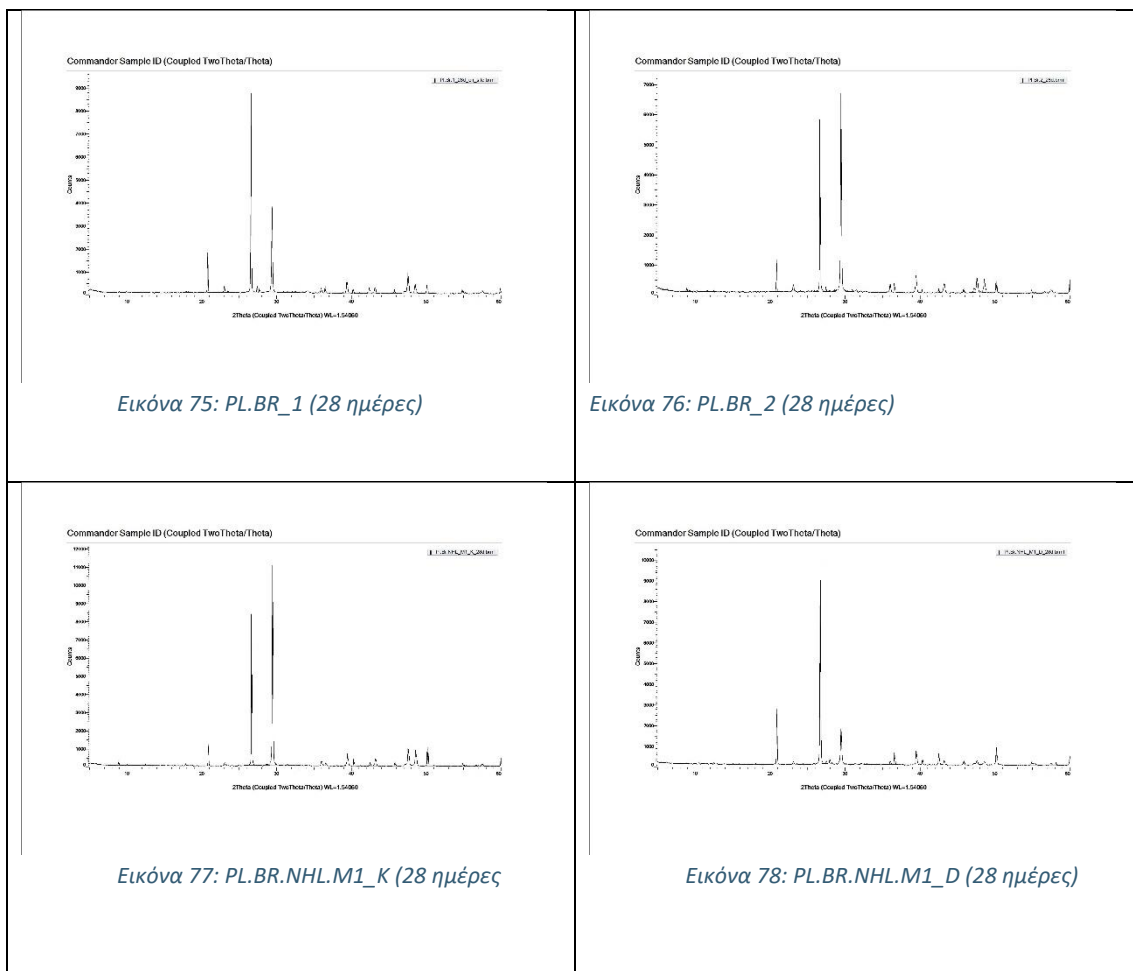
Εδώ παρουσιάζονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα από το Χ.Ρ.Δ., με τη μορφή διαγραμμάτων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 28, 90 και 180 ημερών.

Πίνακας 12: Ορυκτολογικές φάσεις συνθέσεων

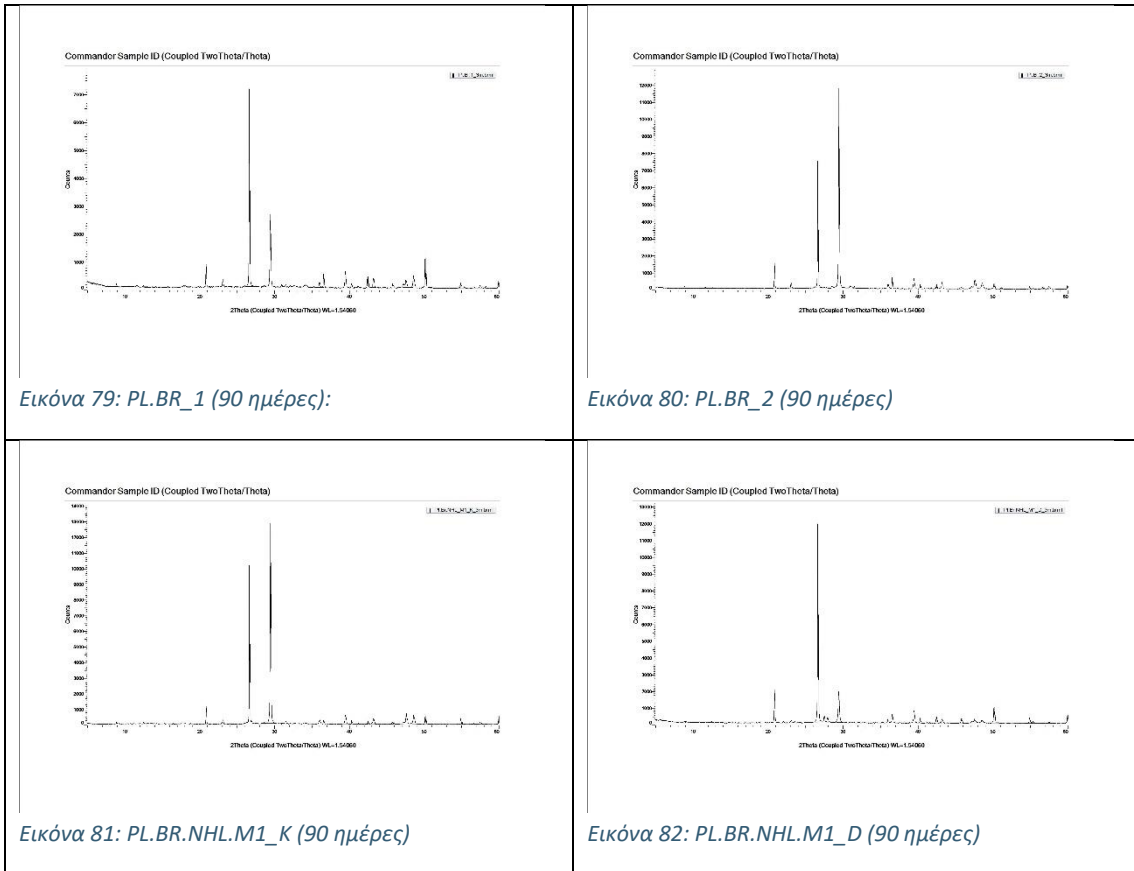
Κωδικός	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Κύρια ορυκτολογική φάση	Δευτερεύουσα Ορυκτολογική φάση
PL.BR_1	14, 28, 90, 180	χαλαζίας	Ασβεστίτης
PL.BR_2	14, 28, 90, 180	ασβεστίτης, χαλαζίας	Αλβίτης
PL.BR.NHL.M1_K	14, 28, 90, 180	ασβεστίτης, χαλαζίας	-
PL.BR.NHL.M1_D	14, 28, 90, 180	χαλαζίας	ασβεστίτης, αλβίτης

Ως κύρια ορυκτολογική φάση στα PL.BR_1 και PL.BR.NHL.M1_D παρουσιάζεται ο χαλαζίας, ενώ τα PL.BR_2 και PL.BR.NHL.M1_K έχουν δύο κύριες ορυκτολογικές φάσεις, τον ασβεστίτη και τον χαλαζία. Ως δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση στη σύνθεση PL.BR_1 παρατηρείται ο ασβεστίτης, στη σύνθεση PL.BR_2 ο αλβίτης και η σύνθεση PL.BR.NHL.M1_D αποτελείται από δύο δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις, τον ασβεστίτη και τον αλβίτη. Το κονίαμα PL.BR.NHL.M1_K δεν παρουσιάζει δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση.

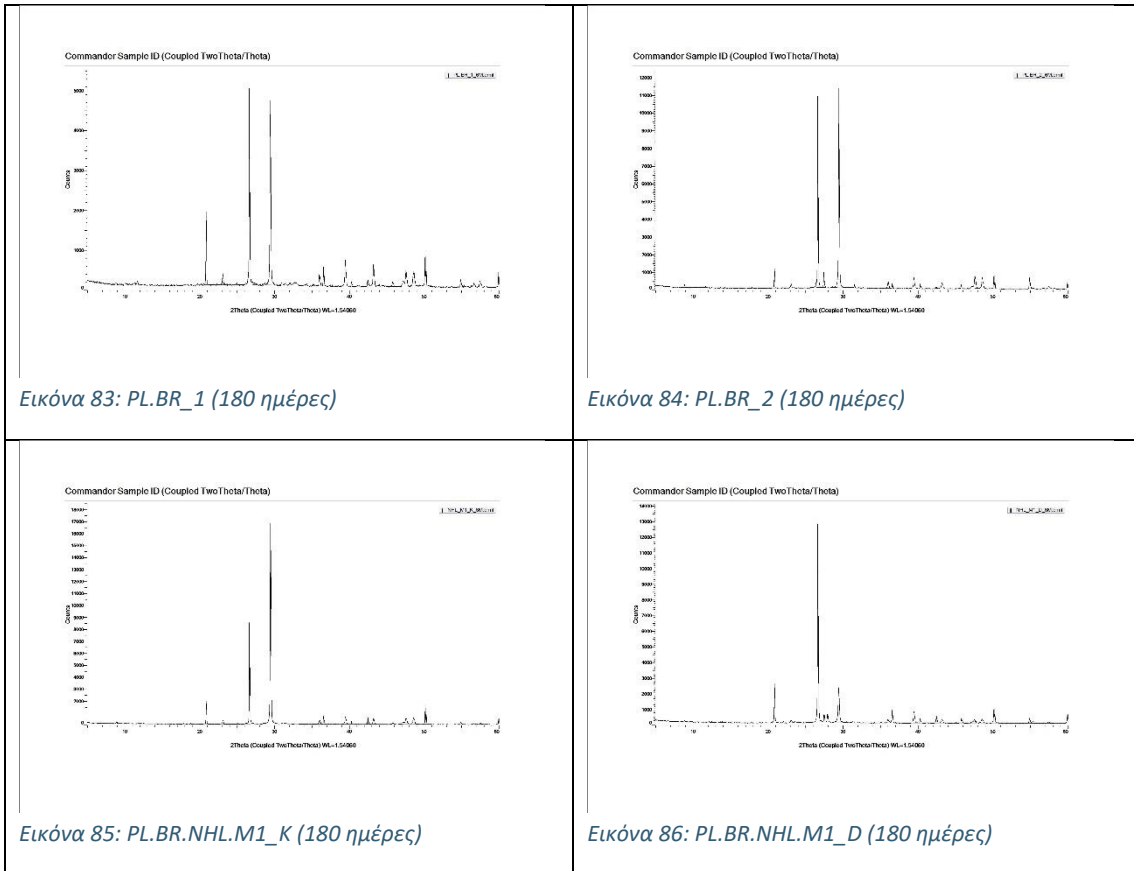
Πίνακας 13: Διαγράμματα X.R.D. κονιομάτων αποκατάστασης στις 28 ημέρες



Πίνακας 14: Διαγράμματα X.R.D. κονιαμάτων αποκατάστασης στις 90 ημέρες



Πίνακας 15: Εικόνα 46: Διαγράμματα Χ.Ρ.Δ. κονιαμάτων αποκατάστασης στις 180 ημέρες



Εικόνα 83: PL.BR_1 (180 ημέρες)

Εικόνα 84: PL.BR_2 (180 ημέρες)

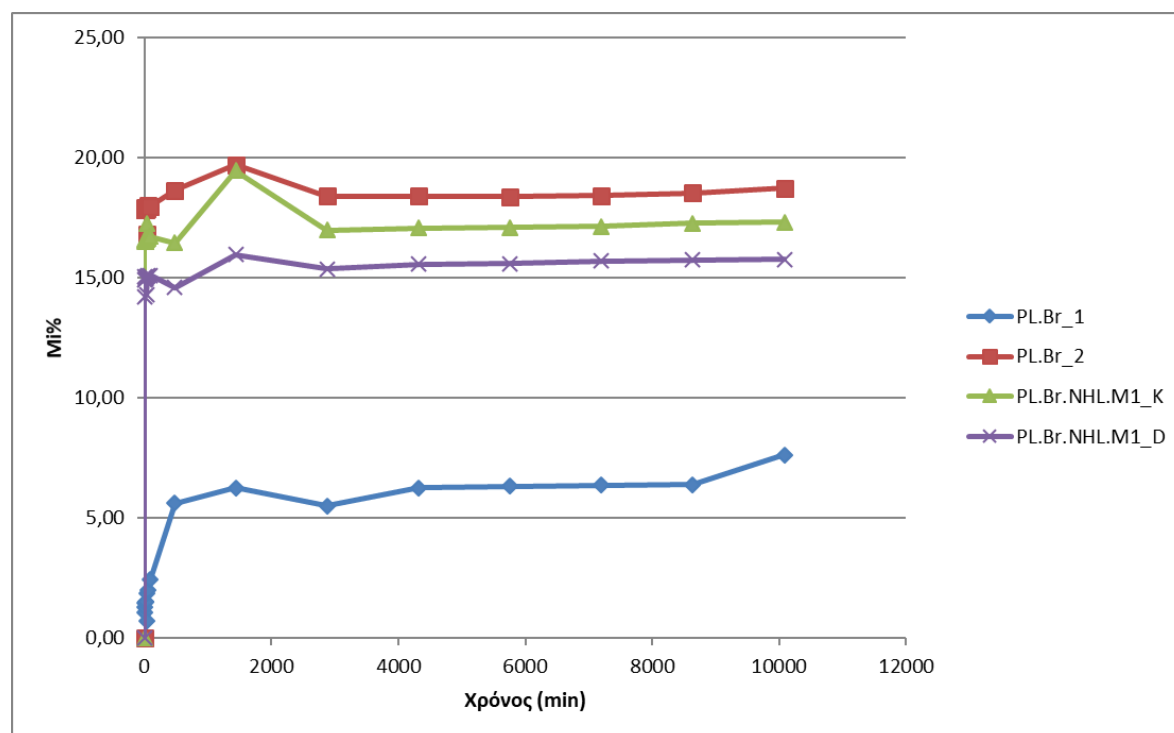
Εικόνα 85: PL.BR.NHL.M1_K (180 ημέρες)

Εικόνα 86: PL.BR.NHL.M1_D (180 ημέρες)

4.2.3.2. ΔΟΚΙΜΗ ΟΛΙΚΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΝΣΗΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας των αποτελεσμάτων και το διάγραμμα που προέκυψε από τις δοκιμές ολικής εμφάπτισης σε νερό, προκειμένου να μελετήσουμε το ρυθμό και να μετρήσουμε τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης νερού των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν.

Εικόνα 87: Αύξηση ποσοστού βάρους σε σχέση με το χρόνο



Πίνακας 16: Αποτελέσματα ολικής εμφάπτισης σε νερό - κονιάματα αποκατάστασης

Κωδικός Δείγματος	Ανοιχτό Πορώδες (%)	Ποσοστό απορροφούμενου νερού (%)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)	Απώλεια Μάζας (%)
PL.BR_1	11,67	8,17	1,52	0,51
PL.BR_2	32,34	19,76	1,72	0,47
PL.BR.NHL.M1_K	29,23	19,76	1,68	0,26
PL.BR.NHL.M1_D	26,88	16,27	1,70	0,26

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, καταλήγουμε στο ότι τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης νερού μέσω ολικής εμφάπτισης, παρουσιάζει το PL.BR_2 (32,34%), ενώ την χαμηλότερη τιμή με διαφορά παρουσιάζει το PL.BR_1 (11,67%). Παράλληλα, το PL.BR_1 παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό ροφημένου νερού (8,17%) σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κονιάματα, ενώ παρουσιάζει και εξαιρετικά

χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα. Είναι λοιπόν εμφανής η επίδραση των προσθέτων στα υδρομετρικά χαρακτηριστικά ενός κονιάματος. Συγκρίνοντας τις τιμές του PL.BR_1 με τις αντίστοιχες τιμές των ιστορικών κονιαμάτων, όπως μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι εμφανές ότι είναι ασύμβατο σε σχέση με τα υδρομετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι ιδιαίτερος σημαντικά σε αυτό το μνημείο, λόγω του περιβάλλοντός του και της χρήσης του.

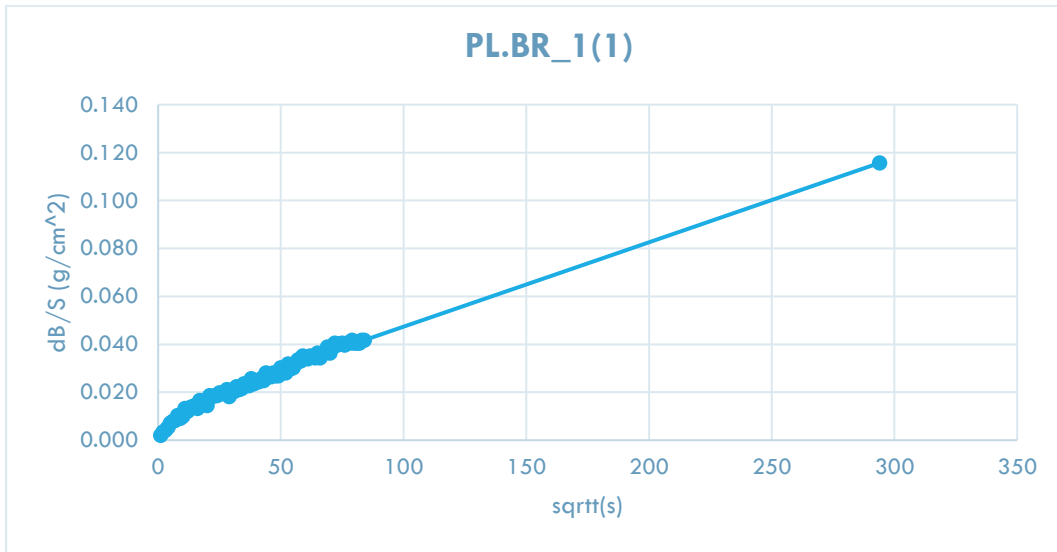
Οι υπόλοιπες συνθέσεις παρουσιάζουν κοντινές μεταξύ τους τιμές στα υδρομετρικά χαρακτηριστικά όπως μετρήθηκαν μέσω ολικής εμβάπτυσης, με ικανοποιητικές τιμές σε σύγκριση με τα ιστορικά κονιάματα (παρόμοιες και ελαφρά χαμηλότερες τιμές).

4.2.3.3. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

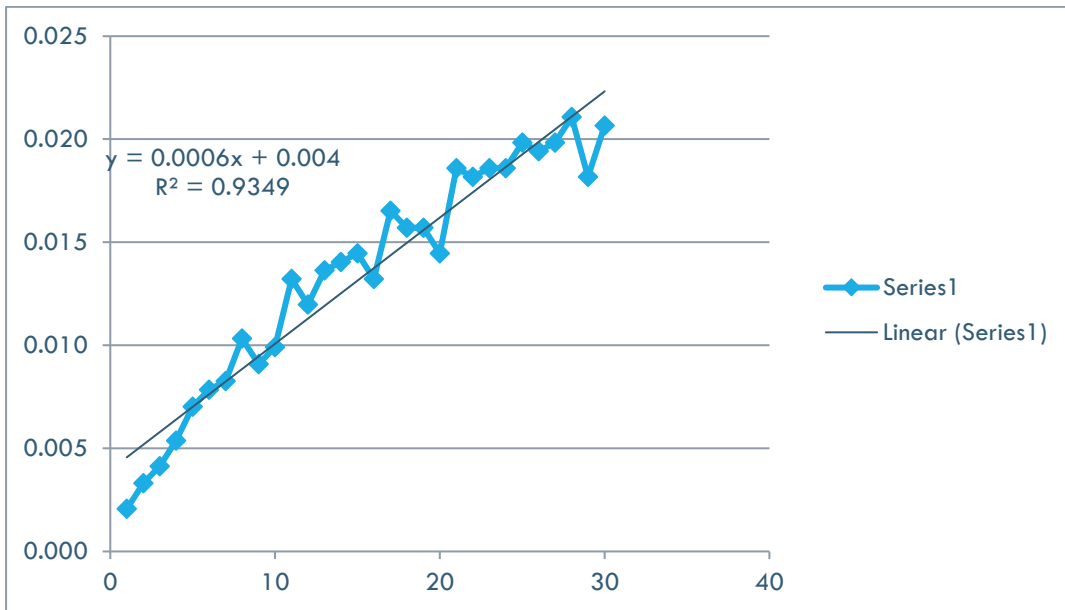
Η διαδικασία της δοκιμής τριχοειδούς αναρρίχησης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

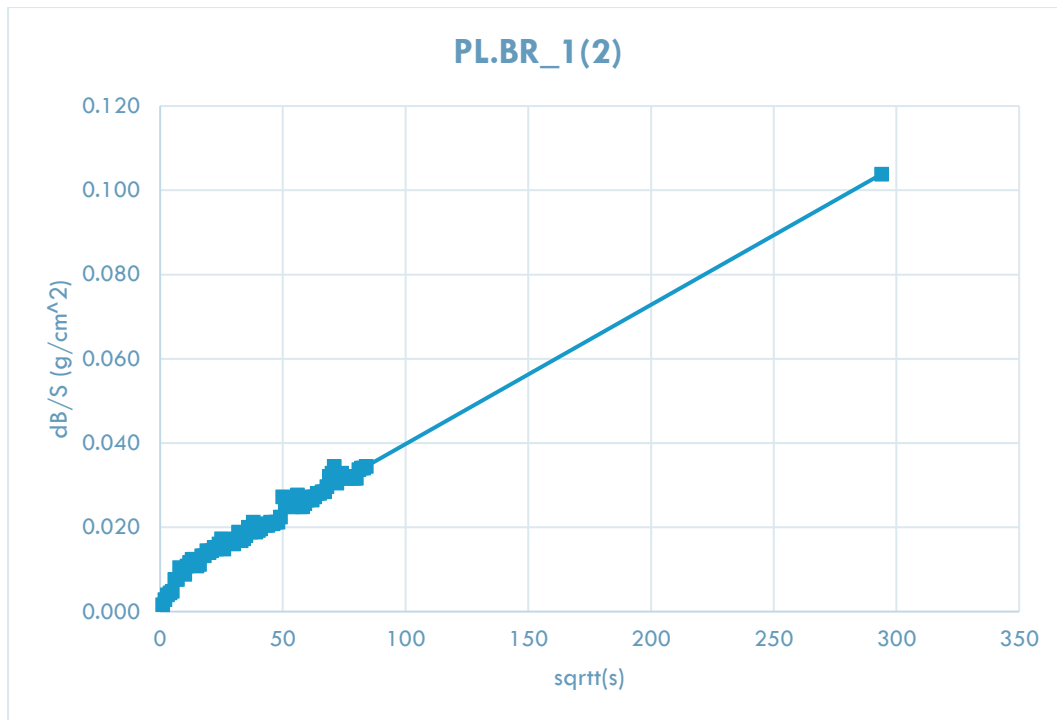
1. Τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας 60 °C για είκοσι τέσσερις ώρες
2. Τα δείγματα μετά από είκοσι τέσσερις ώρες στο φούρνο, τοποθετούνται σε ξηραντήρα για περίπου τρεις ώρες
3. Σε δοχείο τυχαίων διαστάσεων τοποθετείται διειθνικό χαρτί το οποίο διαβρέχεται με απιονισμένο νερό
4. Ζυγίζονται οι ξηρές μάζες των δειγμάτων πριν από τη δοκιμή
5. Μετά από κάθε τοποθέτηση του δείγματος στο δοχείο με το απιονισμένο νερό, το δείγμα απομακρύνεται από το νερό, καθαρίζεται από επιπλέον νερό και ζυγίζεται
6. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι τιμές του βάρους να σταθεροποιηθούν εντελώς
7. Αφού οι τιμές του βάρους κάθε δείγματος σταθεροποιηθούν εντελώς, το δείγμα παραμένει στο δοχείο καλυμμένο με ζελατίνα (για την αποφυγή εξάτμισης του νερού).
8. Μετά από είκοσι τέσσερις ώρες, το δείγμα αφαιρείται από το δοχείο και ζυγίζεται
9. Στη συνέχεια τοποθετείται πάλι στο φούρνο για είκοσι τέσσερις ώρες και μετά στον ξηραντήρα για τρεις
10. Τέλος ζυγίζουμε την τελική μάζα του ξηρού δείγματος

Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τη δοκιμή της τριχοειδούς αναρρίχησης υγρασίας στα κονιάματα αποκατάστασης.

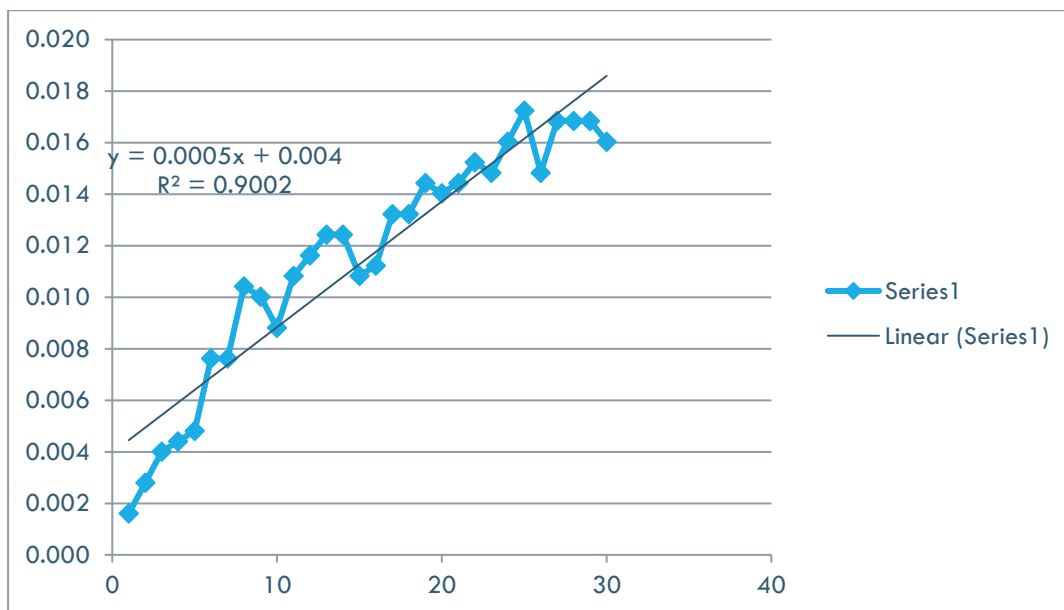


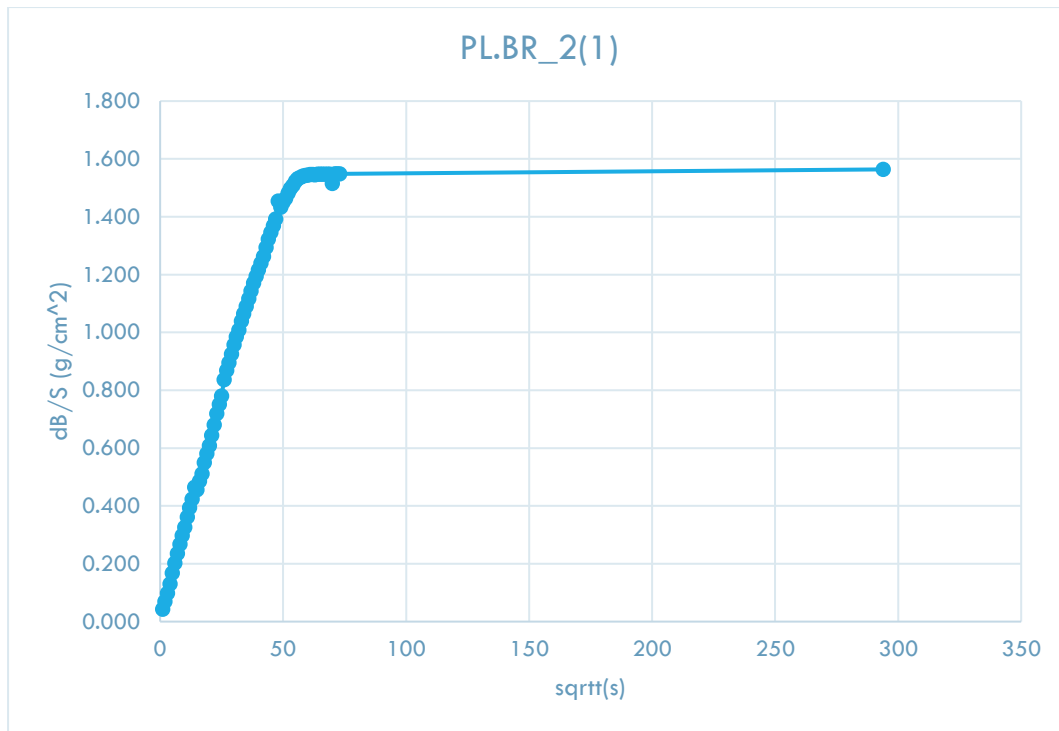
Εικόνα 88: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR_1(1), σε σχέση με το χρόνο



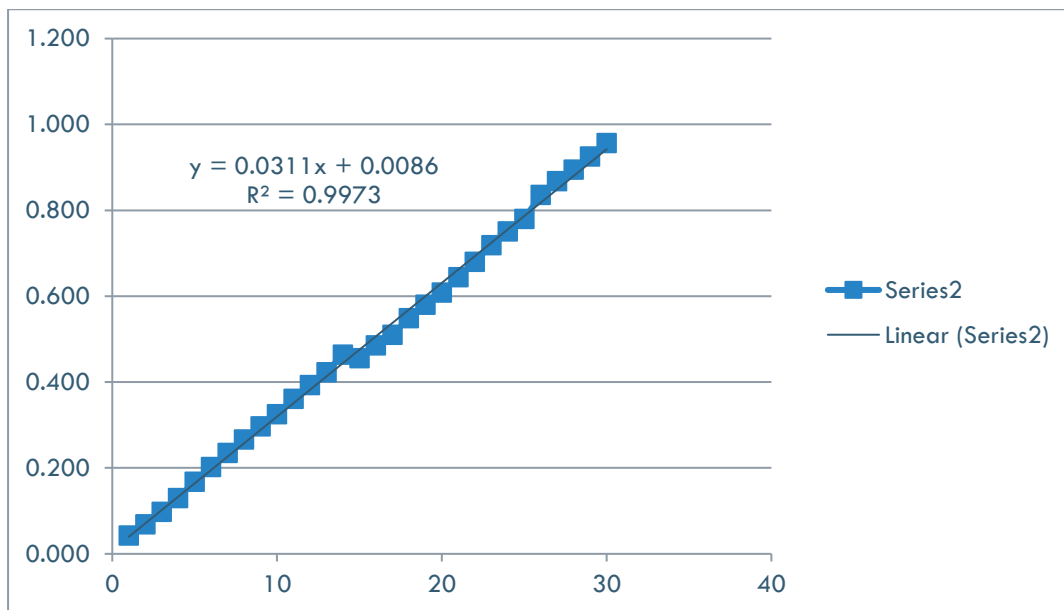


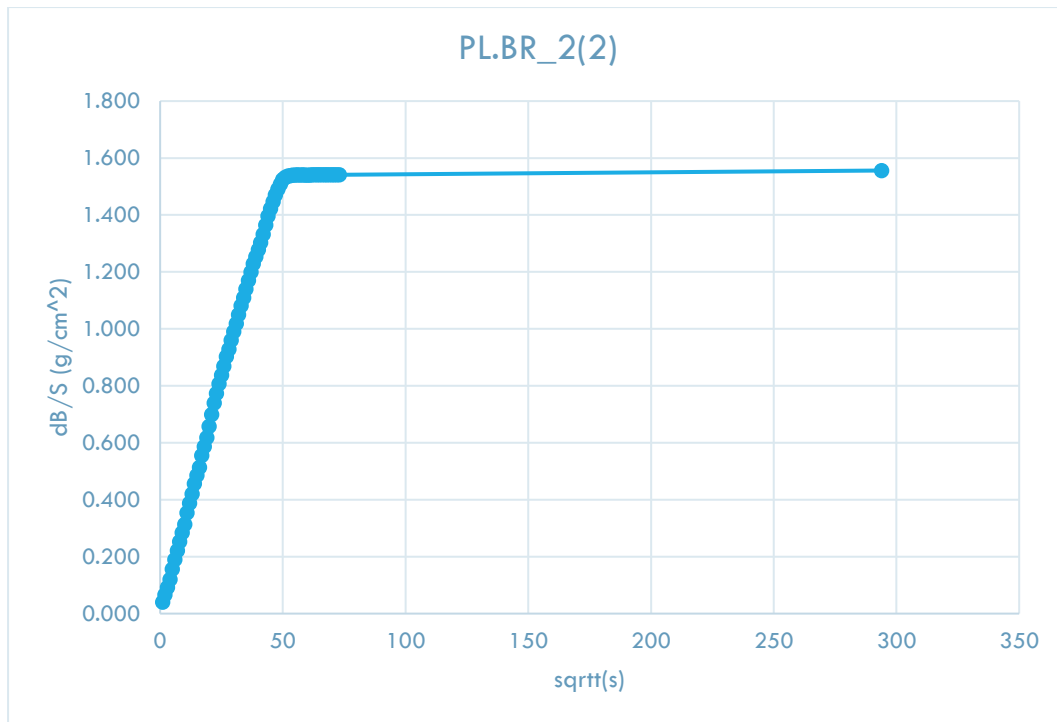
Εικόνα 89: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR_1(2), σε σχέση με το χρόνο



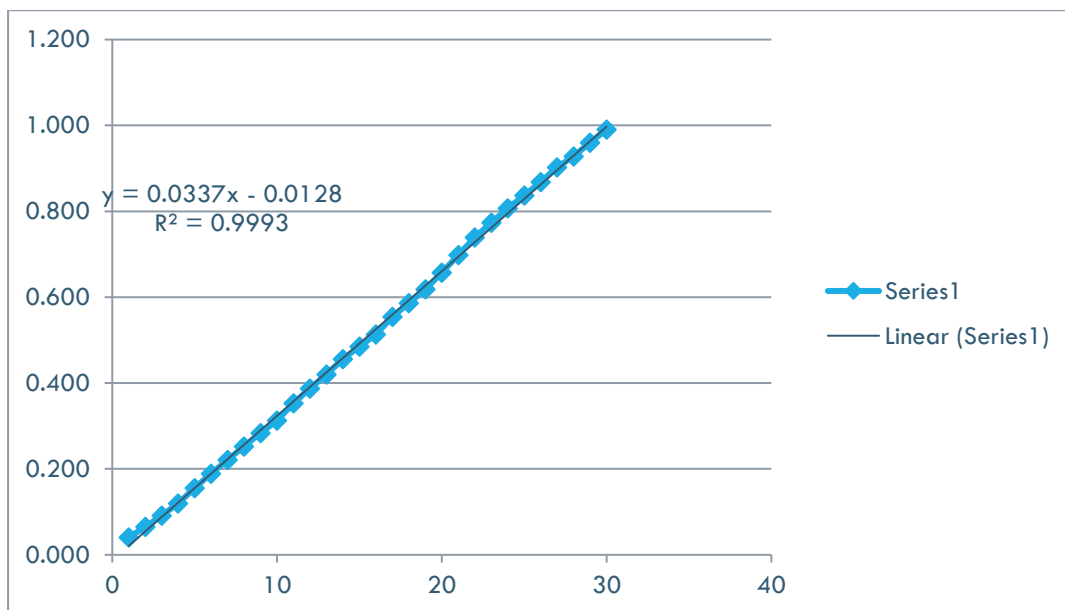


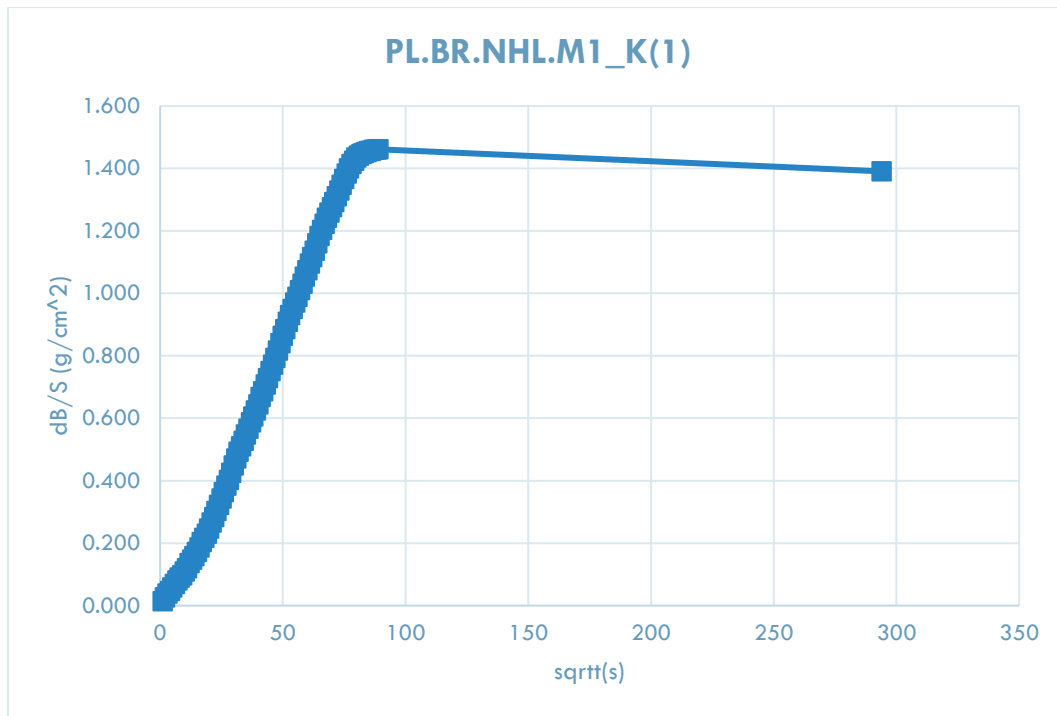
Εικόνα 90: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR_2 (1), σε σχέση με το χρόνο



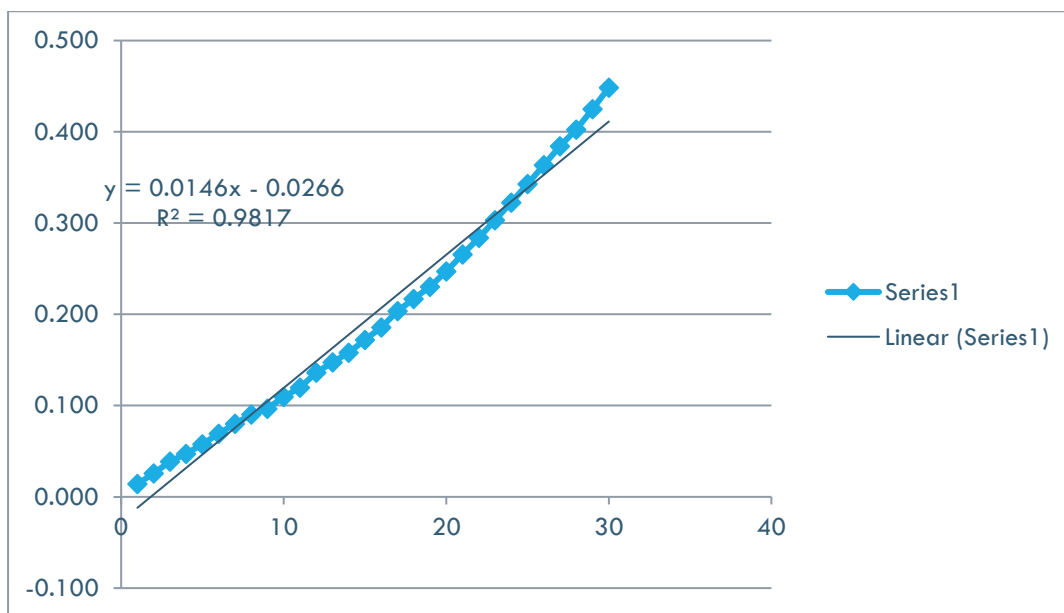


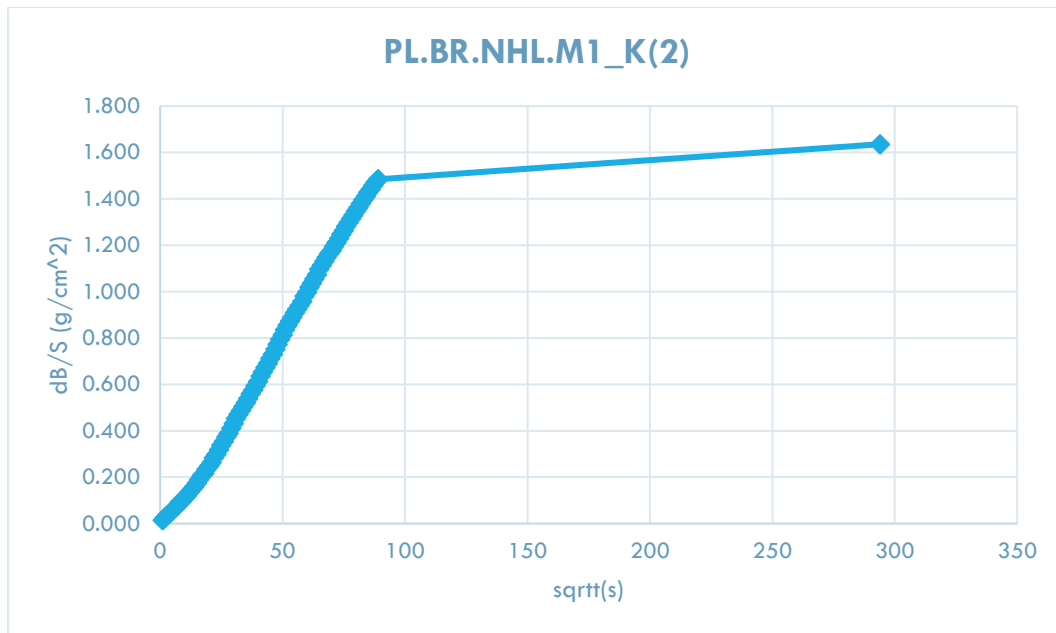
Εικόνα 91: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR_2 (2), σε σχέση με το χρόνο



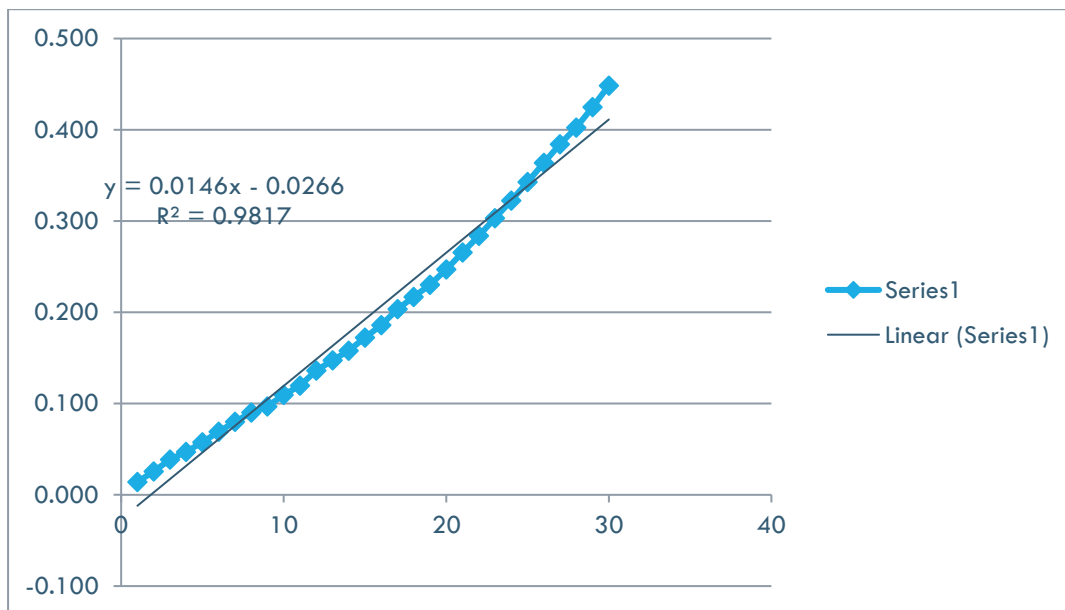


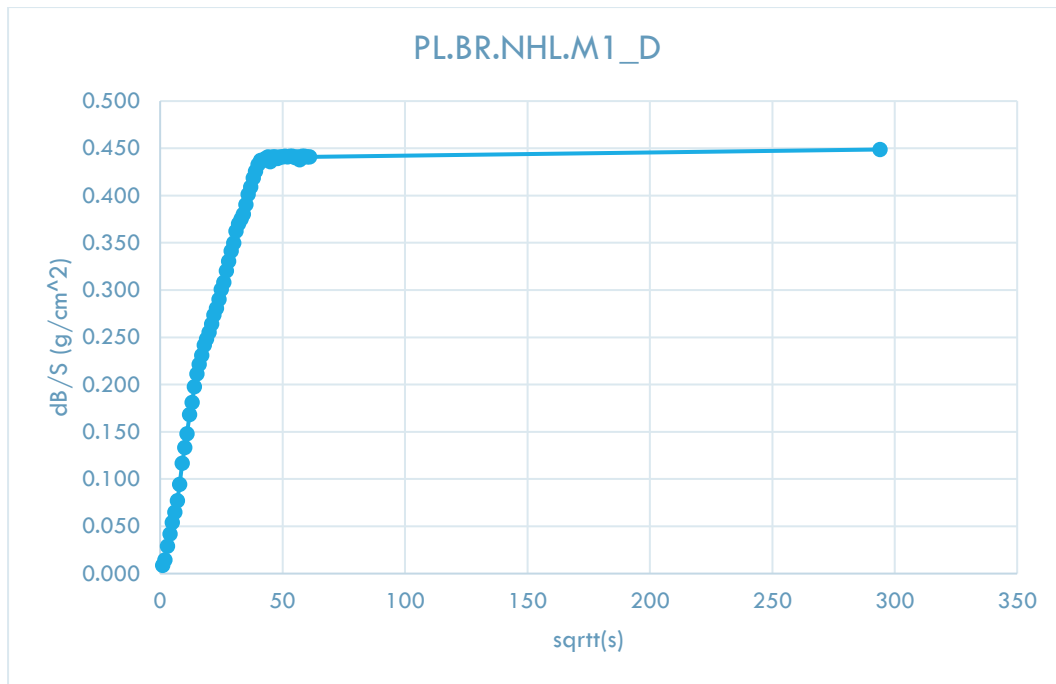
Εικόνα 92: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR.NHL.M1_K(1), σε σχέση με το χρόνο



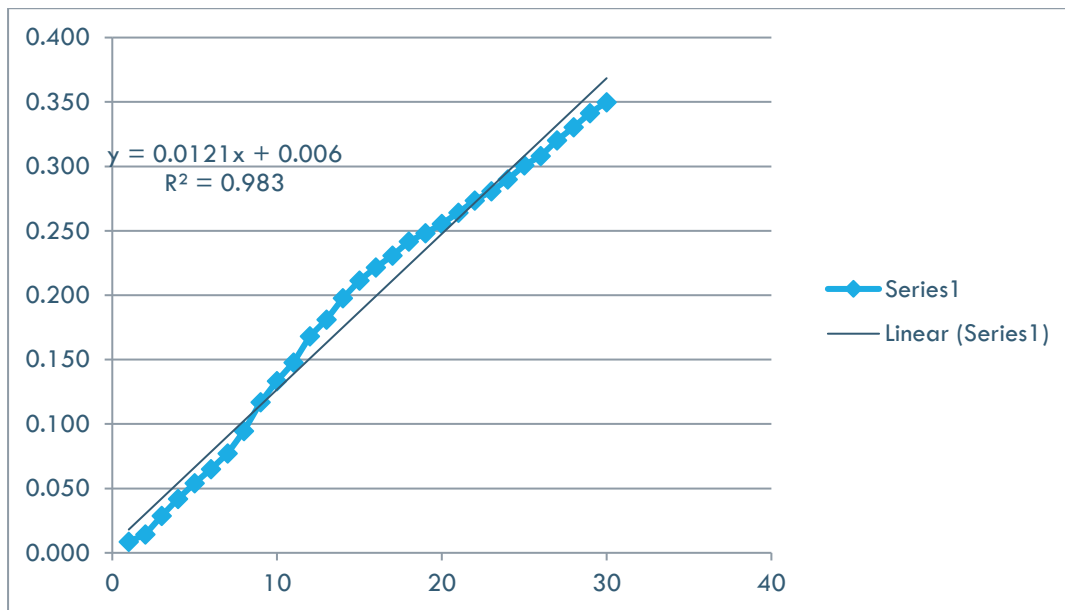


Εικόνα 93: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR.NHL.M1_K(1), σε σχέση με το χρόνο





Εικόνα 94: Ποσοστό αύξησης βάρους του PL.BR.NHL.M1_D, σε σχέση με το χρόνο



Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς αναρρίχησης υγρασίας

Κωδικός δείγματος	Μ.Ο. Συντελεστή υδαταπορρόφησης μέσω τριχοειδών (g/cm ² * t ^{1/2})	Μ.Ο. Πορώδους προσβάσιμο από τριχοειδείς πόρους (%)	Απορρόφηση νερού μέσω τριχοειδών (%)	Μέγιστη τιμή απορρόφησης (g/cm ²)
PL.BR_1 (1)	0.0006	2.3	1.47	0.116
PL.BR_1 (2)	0.0005	2.1	1.36	0.104
PL.BR_2 (1)	0.0311	31.7	18.08	1.564
PL.BR_2 (2)	0.0337	31.5	18.04	1.556
PL.BR.NHL.M1_K (1)	0.0146	28.2	15.78	1.391
PL.BR.NHL.M1_K (2)	0.0146	33.1	17.97	1.635
PL.BR.NHL.M1_D	0.0121	23.6	14.30	0.449

Το κονίαμα PL.BR_2 εμφάνισε τη μεγαλύτερη με διαφορά τιμή συντελεστή υδαταπορρόφησης, καθώς και το μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού μέσω τριχοειδών. Τις αμέσως μεγαλύτερες τιμές συντελεστή υδαταπορρόφησης και ποσοστού ροφημένου νερού παρουσιάζει το PL.BR.NHL.M1_K και στη συνέχεια με πολύ μικρές διαφορές ακολουθεί το άλλο κονίαμα με βάση την υδραυλική άσβεστο, PL.BR.NHL.M1_D. Το PL.BR_1 εμφανίζει εξαιρετικά χαμηλή τιμή συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, καθώς και εξαιρετικά χαμηλότερη απορρόφηση νερού μέσω τριχοειδών (διαφορετική τάξη μεγέθους και στα δυο προαναφερθέντα χαρακτηριστικά).

Το μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους προσβάσιμο από τριχοειδείς πόρους, με μικρή διαφορά από το PL.BR_2, το παρουσίασε το PL.BR.NHL.M1_K. Ελαφρώς χαμηλότερη τιμή πορώδους παρουσίασε το PL.BR.NHL.M1_D. Το PL.BR_1 παρουσία εξαιρετικά χαμηλότερη τιμή πορώδους, και πάλι άλλης τάξης μεγέθους.

4.2.3.4. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πίνακας 18: Απόλεια μάζας κονιαμάτων

Κονίαμα Αποκατάστασης	Ημέρες	Απόλεια Μάζας (%) σε Θερμοκρασιακά Εύρη (°C)				Διάφορα 370- 470°C	Αντίστροφος Δείκτης Υδραυλικότητας
		<120°C	120- 200°C	200- 600°C	600- 1000°C		
PL.BR.NHL _M1_D	14	1,13	0,84	2,04	7,56	0,62	5,32
	28	0,83	0,52	1,86	7,62	0,62	6,15
	90	0,70	0,47	2,03	8,40	0,00	4,14
	180	0,91	0,58	3,04	8,95	0,00	2,94
PL.BR.NHL. M1_K	14	1,22	0,47	2,75	18,84	1,50	15,07
	28	0,48	0,32	2,26	21,26	0,66	13,29
	90	0,47	0,32	1,53	21,91	0,43	19,92
	180	0,73	0,39	2,21	22,66	0,00	10,25
Pl.Br.1	14	0,53	0,59	4,23	16,66	1,33	5,74
	28	0,69	0,67	3,93	17,83	1,11	6,32
Pl.Br.1_ons	28	0,45	0,49	4,07	18,29	1,10	6,16
Pl.Br.1	90	0,79	0,89	4,06	16,40	0,63	4,78
	180	0,89	0,93	5,25	17,25	0,00	3,29
Pl.Br.2	14	0,63	0,58	2,65	17,91	0,71	9,23
	28	0,55	0,50	2,10	18,08	0,42	10,76
	90	0,72	0,73	2,68	17,87	0,00	6,67
	180	1,20	0,76	3,18	17,00	0,00	5,35

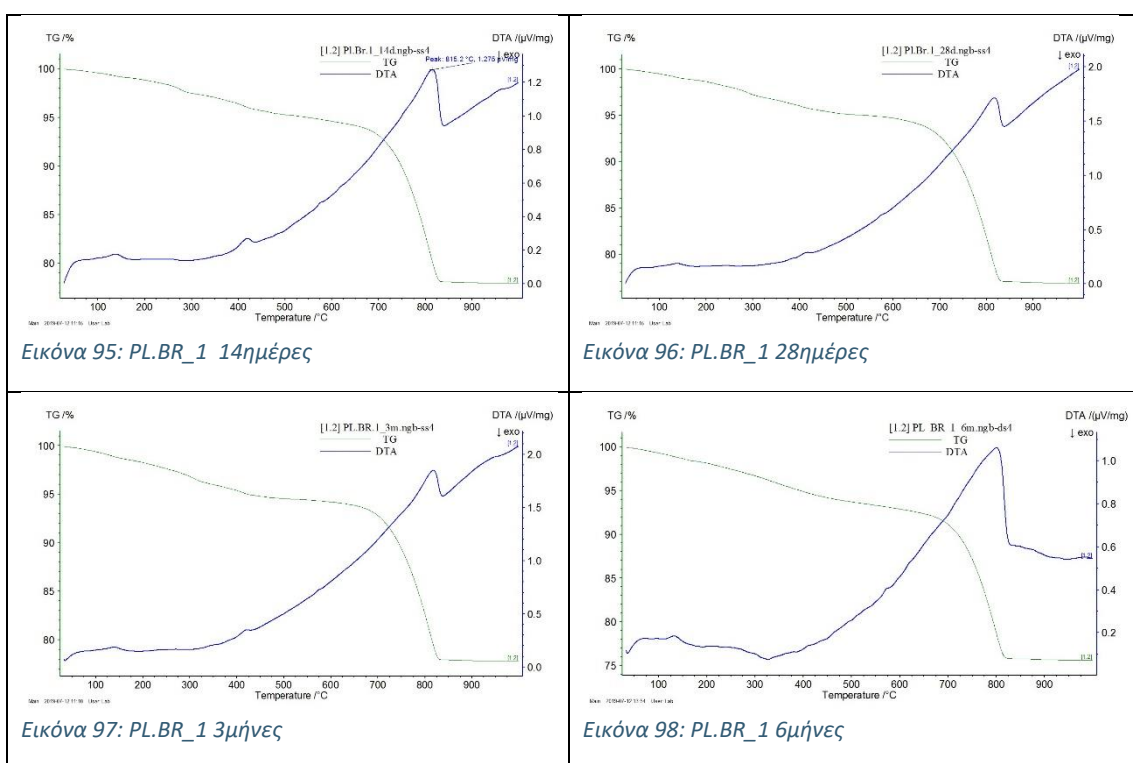
Σε όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις στις 180 ημέρες δεν υπάρχει πλέον παραμένουσα ποσότητα υδροξειδίου του ασβεστίου (απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα 370-470°C). Το κονίαμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με μετακαολίνη (PL.BR.NHL_M1_D) παρουσιάζει μηδενικό ποσοστό Ca(OH)_2 ήδη από τις 90 ημέρες, όπως και το Pl.Br.2. Οι άλλες δύο συνθέσεις έχουν καταναλώσει όλη την ποσότητα του Ca(OH)_2 αργότερα, στις 180 ημέρες.

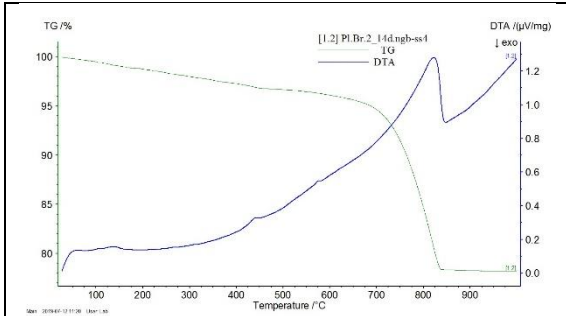
Το ποσοστό απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα άνω των 600°C αντιστοιχεί στο CO_2 που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων. Είναι εμφανές ότι η απώλεια μάζας στο διάστημα αυτό, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ηλικία του δοκιμίου, εκτός από το Pl.Br.2, όπου παραμένει πρακτικά σταθερό το ποσοστό. Η σύνθεση PL.BR.NHL_M1_D, παρουσιάζει τα χαμηλότερα ποσοστά σε όλους τους χρόνους, γεγονός που ανάγεται στην πυριτική φύση της άμμου που έχει

χρησιμοποιηθεί σαν αδρανές, σε αντίθεση με τις άλλες συνθέσεις όπου έχει χρησιμοποιηθεί μίξη ασβεστιτικής και πυριτικής άμμου.

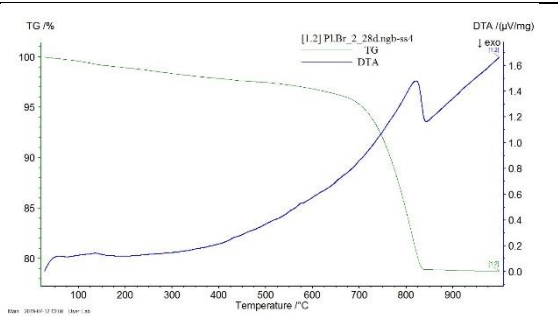
Ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας εμφανίζεται αισθητά μειωμένος στις 180 ημέρες σε σχέση με τις 14 ημέρες. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία υδραυλικών ενώσεων με την ωρίμανση του δοκιμίου, καθώς όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν αύξηση του ποσοστού απώλειας μάζας που οφείλεται στη διάσπαση των υδραυλικών ενώσεων στο θερμοκρασιακό διάστημα 200-600°C (δηλαδή αφαιρώντας την απώλεια μάζας που οφείλεται στην αφυδροξυλίωση του υδροξειδίου του ασβεστίου) με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης.

Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοβαρυσμτρικής και θερμικής ανάλυσης.

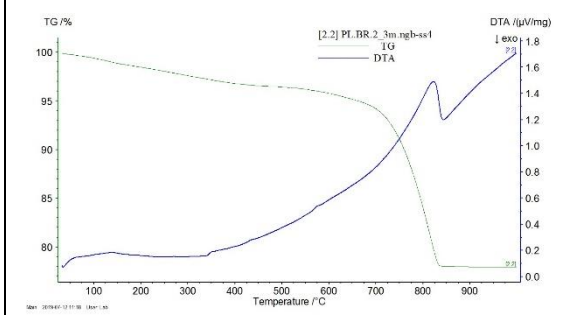




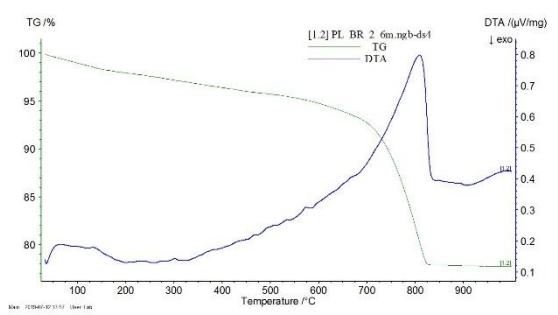
Εικόνα 99: PL.BR_2 14ημέρες



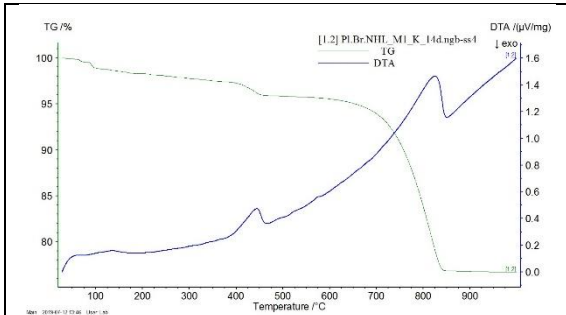
Εικόνα 100: PL.BR_2 28ημέρες



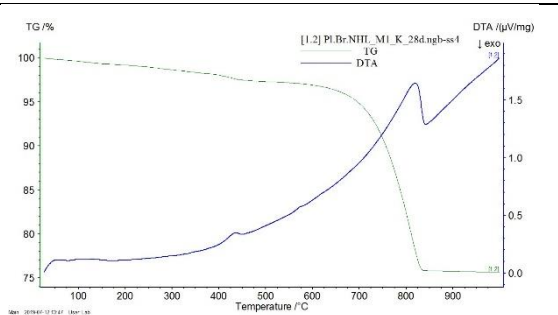
Εικόνα 101: PL.BR_2 3μήνες



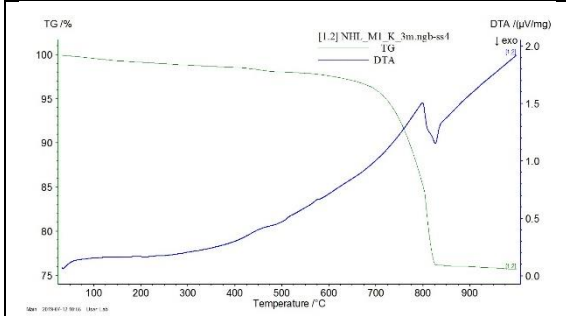
Εικόνα 102: PL.BR_2 6μήνες



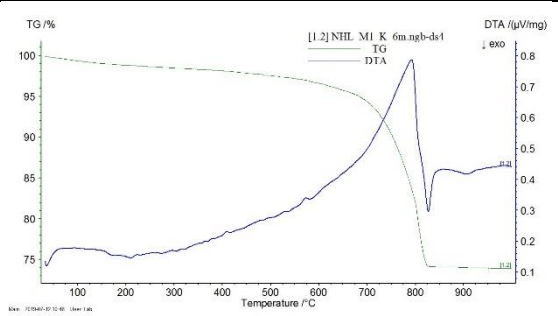
Εικόνα 103: PL.BR.NHL.M1_K 14ημέρες



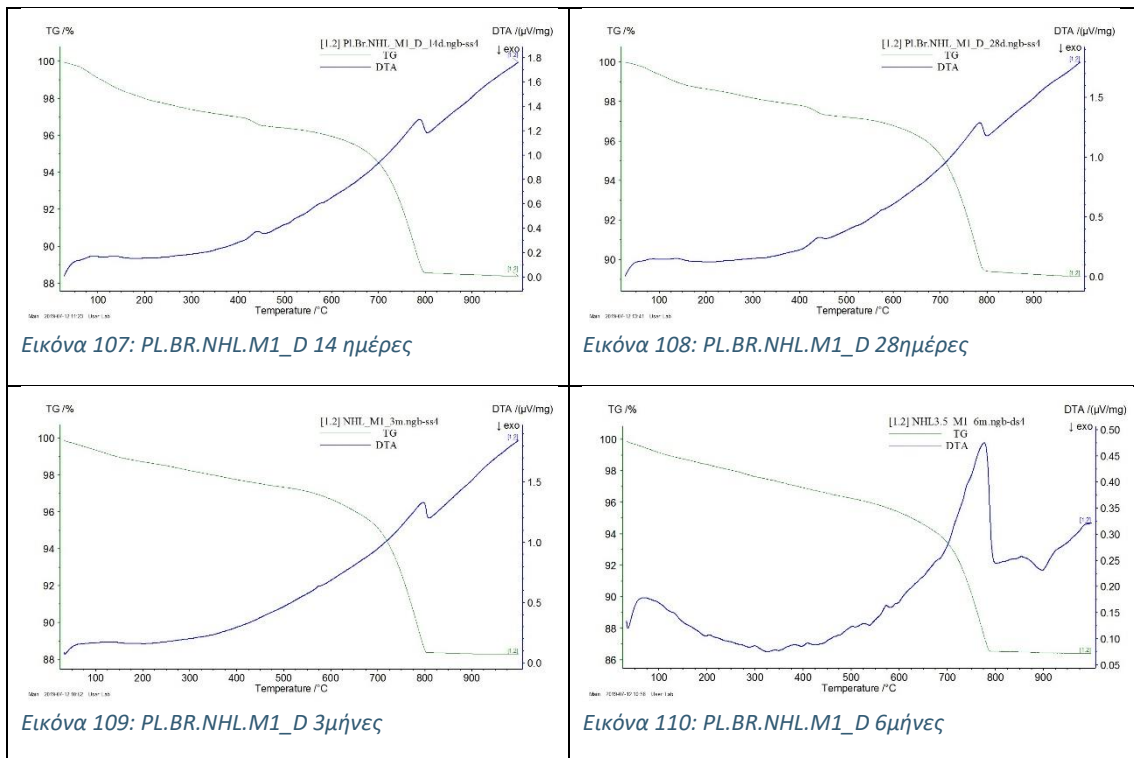
Εικόνα 104: PL.BR.NHL.M1_K 28ημέρες



Εικόνα 105: PL.BR.NHL.M1_K 3μήνες



Εικόνα 106: PL.BR.NHL.M1_K 6μήνες



Ικανοποιητικό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας για κονιάμα υδραυλικής ασβέστου, ικανής υδραυλικότητας, δηλαδή τιμή κάτω του 7,5, παρουσιάζουν όλα τα κονιάματα εκτός του PL.BR.NHL.M1_K (10,25) [5]. Την χαμηλότερη τιμή παρουσιάζει το PL.BR.NHL_M1_D.

4.2.3.5. ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (Hg)

Η μελέτη της μικροδομής των παραγόμενων κονιαμάτων είναι απαραίτητη ώστε να διασφαλιστεί και από αυτήν την άποψη η συμβατότητα με τα ιστορικά κονιάματα και το εναπομείναν αυθεντικό υλικό του Γεφυριού.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μικροδομή ενός κονιάματος μετασχηματίζεται καθώς ο χρόνος εξελίσσεται, μέχρι να ολοκληρωθούν οι χημικές αντιδράσεις. Ωστόσο, η μέτρηση των χαρακτηριστικών της μικροδομής στη διάρκεια των 90 ημερών, μπορεί να παρέχει αρκετά ικανοποιητικές και ενδεικτικές πληροφορίες σχετικά με τα τελικά χαρακτηριστικά της, ενώ σε συνδυασμό με μετρήσεις σε διαφορετικούς χρόνους σκλήρυνσης, μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο και το ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσεται η μικροδομή [5].

Για την αποτίμηση της συμβατότητας της μικροδομής είναι απαραίτητο να εξεταστούν τα κονιάματα αποκατάστασης σε σχέση και με τα δομικά στοιχεία μιας ιστορικής κατασκευής αλλά και ως προς την κατανομή του πορώδους σε διάφορες ακτίνες πόρων και όχι μόνο ως προς τα απόλυτα νούμερα των χαρακτηριστικών της μικροδομής (πορώδες, μέση ακτίνα πόρων) [18].

Παράλληλα, η ταυτόχρονη παρακολούθηση με Θερμογραφία Υπερύθρου κονιαμάτων αποκατάστασης διαφόρων κατηγοριών και δομικών στοιχείων, καθώς και πρότυπων στοιχείων τοιχοποιίας (λίθος – κονίαμα – λίθος) σε συνθήκες υδατοαπορρόφησης και εξάτμισης, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μικροδομής θα επιβεβαιώσουν την συμβατότητα, ή μη των κονιαμάτων αυτών με παραδοσιακά δομικά στοιχεία [18].

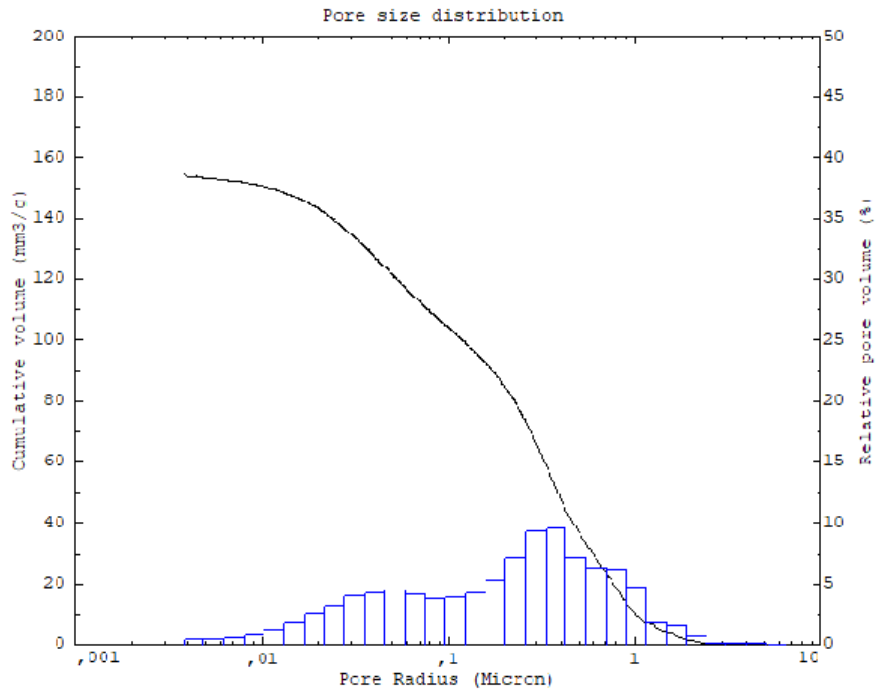
4.2.3.5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ποροσιμετρίας υδραργύρου

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των κονιαμάτων αποκατάστασης, σε ηλικία 90 ημερών.

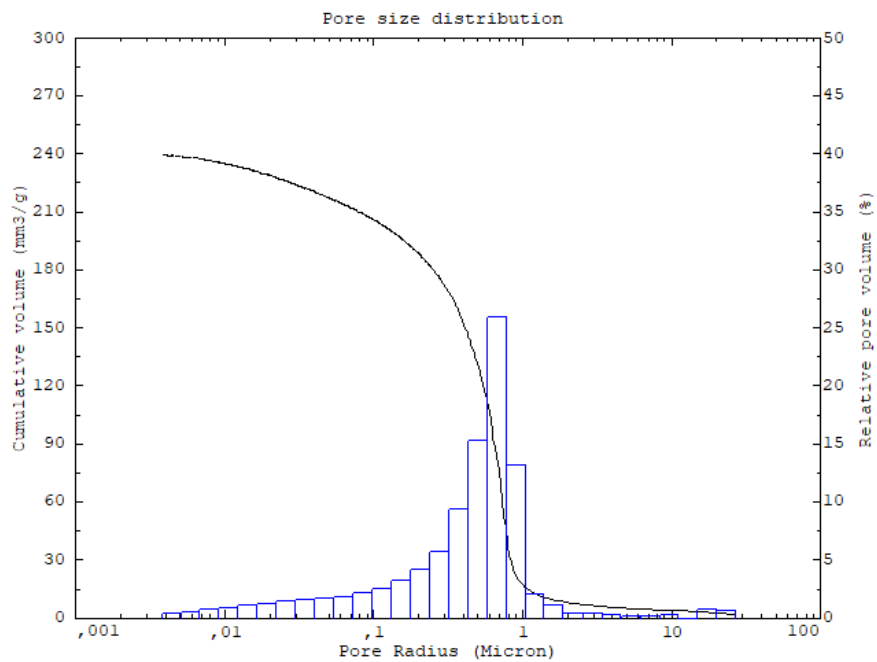
Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά της μικροδομής των κονιαμάτων αποκατάστασης

Δείγμα	Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g)	Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	Μέση Ακτίνα Πόρων (μm)	Συνολικό Πορώδες (%)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)
NHL_M1_D	153.97	4.66	0.37	28.58	1.86
Pl.Br.1	239.44	4.34	0.66	37.16	1.55
Pl.Br.2	192.16	4.85	0.63	32.91	1.71

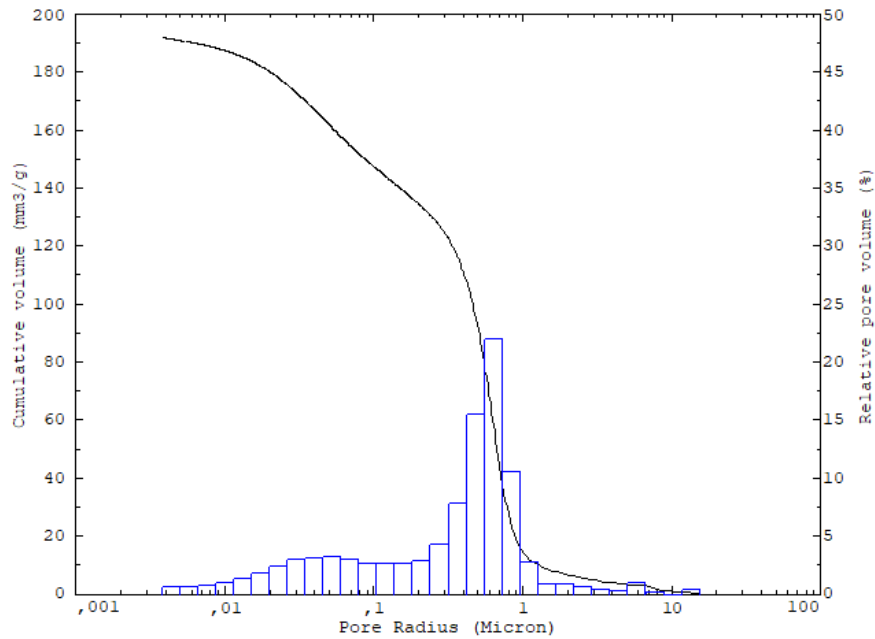
Όπως συμπεραίνουμε από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που προηγήθηκε, το κονίαμα με τη φυσική υδραυλική άσβεστο και την προσθήκη μικρής ποσότητας μετακαολίνη, παρουσίασε τη χαμηλότερη μέση ακτίνα πόρων, αλλά συγχρόνως και χαμηλότερες τιμές συνολικού πορώδους και συνολικού ολικού ειδικού όγκου. Παρουσίασε επίσης τη μεγαλύτερη τιμή φαινόμενης πυκνότητας. Το κονίαμα Pl.Br.1 παρουσίασε υψηλότερο πορώδες, μέση ακτίνα πόρων και αρκετά μεγαλύτερη τιμή ολικού ειδικού όγκου σε σχέση με τα άλλα δύο κονιάματα. Το κονίαμα Pl.Br.2 παρουσιάζει ενδιάμεσα χαρακτηριστικά μεταξύ των άλλων δύο κονιαμάτων [5].



Εικόνα 111: Συνολικός όγκος(mm³/g) κονιάματος NHL.M1, σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων(μm)



Εικόνα 112: Συνολικός όγκος(mm³/g) κονιάματος PL.BR_1, σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων(μm)



Εικόνα 113: Συνολικός όγκος (mm³/g) κονιάματος PL.BR_2, σε σχέση με τη μέση ακτίνα πόρων(μm)

Από τα παραπάνω διαγράμματα, καθίσταται εμφανές ότι το PL.BR.NHL.M1_D παρουσιάζει μια πιο ευρεία κατανομή σε σχέση με τα άλλα δυο κονιάματα και μάλιστα δικόρουφη. Αντιθέτως, το κονίαμα με τα οργανικά πρόσθετα, PL.BR_1 παρουσιάζει στενή και πολύ έντονη μονοκόρουφη κατανομή. Το PL.BR_2 παρουσιάζει μια ενδιάμεση κατανομή των άλλων δυο, ωστόσο περισσότερο όμοια με το PL.BR_1.

4.2.3.5.2 Σύγκριση τιμών πορώδους από τις διάφορες τεχνικές που εφαρμόστηκαν

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές ολικού ανοιχτού πορώδους των κονιαμάτων αποκατάστασης που προέκυψαν από τις δοκιμές της ποροσιμετρίας υδραργύρου, της ολικής εμφύπτισης και της τριχοειδούς αναρρίχησης.

Πίνακας 20: Τιμές πορώδους κονιαμάτων αποκατάστασης από όλες τις μεθόδους

Τιμές Ολικού Πορώδους %			
Κωδικός Δείγματος	Ποροσιμετρία Υδραργύρου	Ολική Εμφύπτιση	Τριχοειδής Αναρρίχηση
PL.BR_1	37,16	11,67	2,2
PL.BR_2	32,91	32,34	31,6
PL.BR.NHL.M1_K	-	29,23	30,65
PL.BR.NHL.M1_D	28,58	26,88	23,6

Παρατηρείται ότι παρόλο που το PL.BR_1 παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή πορώδους, όπως μετρήθηκε από την ποροσιμετρία υδραργύρου, σε σχέση με τα υπόλοιπα κονιάματα αποκατάστασης, εντούτοις το ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω ολικής εμφύπτισης και το πορώδες που είναι προσβάσιμο από τριχοειδείς πόρους στο κονίαμα PL.BR_1, παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές,

υποδεικνύοντας μια εξαιρετικά μη συμβατή συμπεριφορά με τα ιστορικά κονιάματα σε σχέση με την υγρομετρική τους συμπεριφορά. Η χρήση του κονιάματος αυτού, θα είχε σαν αποτέλεσμα η υγρασία να άγεται στα ιστορικά υλικά, αυξάνοντας τα φορτία που καλούνται να αντιμετωπίσουν και επιταχύνοντας τη φθορά τους. Η σύγκριση μεταξύ των τιμών που δίνουν οι διάφορες τεχνικές, αναδεικνύει την σημαντικότητα μέτρησης όλων, ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Το PL.BR_2, παρουσιάζει παραπλήσιες τιμές πορώδους με όλες τις μεθόδους (31,6-32,91%), το οποίο αναδεικνύει τις διαφοροποιήσεις που προκαλούν τα πρόσθετα στην υγρομετρική συμπεριφορά.

Το PL.BR.NHL.M1_D παρουσιάζει μεγαλύτερο πορώδες μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου, ελαφρώς μικρότερο μέσω ολικής εμβάπτυσης και μικρότερο μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης, όπως είναι αναμενόμενο λόγω των πόρων που συμμετέχουν στην κάθε μέτρηση, με τιμές που κυμαίνονται από 23,6-28,58% και οι οποίες είναι επιθυμητές και ταυτοχρόνως συμβατές σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ιστορικών κονιαμάτων στην παρούσα εργασία (ίσες με τις χαμηλότερες τιμές πορώδους, όπως μετρήθηκαν στα ιστορικά κονιάματα μέσω ολικής εμβάπτυσης). Συνεπώς η χρήση του εν λόγω κονιάματος, δεν θα αυξάνει το φορτίο υγρασίας του δομήματος, ταυτοχρόνως επιτρέποντας την ομαλή και ομοιογενή μεταφορά υγρασίας ανάμεσα σε ιστορικά κονιάματα και κονιάματα αποκατάστασης.

Το PL.BR.NHL.M1_K, το οποίο εξετάστηκε μόνο μέσω ολικής εμβάπτυσης και τριχοειδούς αναρρίχησης ως προς τη μικροδομή, παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από το PL.BR.NHL.M1_D, παρόλο που πρόκειται για την ίδια σύνθεση με διαφορετικές πρώτες ύλες.

4.3.6. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι μηχανικές αντοχές στα κονιάματα των ιστορικών κατασκευών είναι δύσκολο να εκτελεσθούν, λόγω της απαίτησης μεγάλης ποσότητας δείγματος συγκεκριμένων διαστάσεων, που σε μια ιστορική κατασκευή δεν είναι δυνατόν να ληφθεί [9]. Στα κονιάματα αποκατάστασης οι μηχανικές τους αντοχές μπορούν να ελεγχθούν με διάφορους τρόπους, λόγω της ευχέρειας παρασκευής διαφόρων γεωμετριών.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, διεξήχθησαν δοκιμές αντοχής σε θλίψη και σε κάμψη, στις συνθέσεις που έχουν προαναφερθεί. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στις 14, 28, 90 και 180 ημέρες, προκειμένου να αποκτήσουμε πλήρη εικόνα των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων σε συνδυασμό με την ωρίμανσή τους στο χρόνο.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των αντοχών σε κάμψη και θλίψη των κονιαμάτων αποκατάστασης ανά ηλικία.

Πίνακας 21: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των αντοχών σε κάμψη και σε θλίψη των κονιαμάτων αποκατάστασης

Κωδικός σύνθεσης	Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	Μ.Ο. Αντοχής σε κάμψη (ΜΡα)	Τυπική απόκλιση	Μ.Ο. Αντοχής σε θλίψη (ΜΡα)	Τυπική απόκλιση
PL.BR.N HL.M1_ K	14	0,76	0,02	0,00	0,0
	28	0,88	0,06	2,50	0,06
	90	0,66	0,04	4,18	0,22
	180	0,65	0,00	4,48	0,33
PL.BR.N HL.M1_ D	14	1,24	0,04	2,87	0,1
	28	1,31	0,06	4,48	0,1
	90	1,62	0,13	5,52	0,17
	180	1,26	0,64	6,80	0,62
Pl.Br.1	14	0,46	0,02	0	0
	28	1,41	0,15	2,83	0,21
	90	2,83	0,12	7,08	0,26
	180	3,39	0,25	9,15	0,26
Pl.Br.2	14	0,84	0,12	2,8	0,06
	28	0,85	0,04	4,83	0,18
	90	0,83	0,14	7,67	0,36
	180	0,18	0,25	6,78	0,13

Το Pl.Br.1 παρουσιάζει τις χαμηλότερες αντοχές και σε κάμψη και σε θλίψη στις 14 ημέρες, ωστόσο, στις 180 ημέρες παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές, με ανοδική τάση (κάμψη: 3,39 MPa, θλίψη: 9,15MPa). Συνεπώς το κονίαμα αυτό, να μεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις του έργου αποκατάστασης του Γεφυριού από άποψη μηχανικών αντοχών στις 180 ημέρες, ωστόσο, δεν καλύπτει την απαίτηση για ικανή ανάπτυξη αντοχών σε μικρό χρόνο.

Το κονίαμα όπου προστέθηκε μόνο ρευστοποιητής και όχι άλλα οργανικά πρόσθετα, το PL.Br.2, παρουσιάζει πολύ διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με το PL.Br.1. Οι μηχανικές του αντοχές στις 14 ημέρες είναι 0,84 MPa και 2,80MPa, σε κάμψη και σε θλίψη αντίστοιχα, ωστόσο μέχρι τις 180 ημέρες, οι τιμές της κάμψης μειώνονται συνεχώς και αισθητά (0,18MPa στις 180 ημέρες), ενώ η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται μέχρι τα 7,67MPa στις 90 ημέρες και μειώνεται στα 6,78MPa στις 180 ημέρες. Η αντοχή σε κάμψη είναι εξαιρετικά χαμηλή για να θεωρηθεί ως αποδεκτή τιμή, καθώς τα κονιάματα θα υπόκεινται και σε καμπτικές τάσεις.

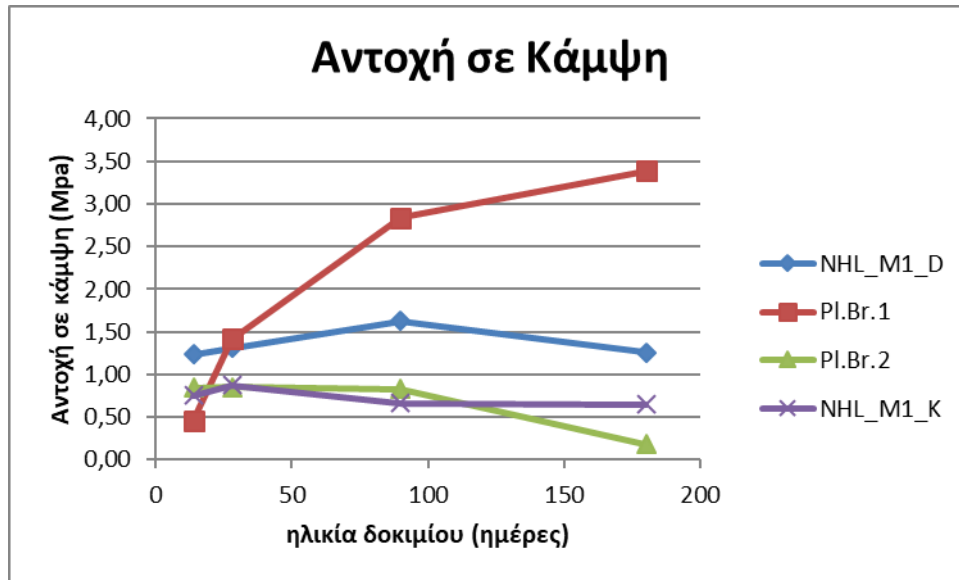
Τα κονιάματα PL.BR.NHL.M1_D και PL.BR.NHL.M1_K, παρόλο που αφορούν στην ίδια σύνθεση με διαφορετικές πρώτες ύλες, παρουσιάζουν διαφορετική μεταξύ τους συμπεριφορά ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η αντοχή σε κάμψη του PL.BR.NHL.M1_K δεν ξεπερνά το 1MPa σε κανέναν χρόνο, ενώ το PL.BR.NHL.M1_D παρουσιάζει τιμές άνω του 1MPa σε όλους τους χρόνους δοκιμής. Και οι δυο συνθέσεις παρουσιάζουν ανοδική τάση στην θλιπτική αντοχή σε σχέση με τον χρόνο ωρίμανσης, ωστόσο, το κονίαμα PL.BR.NHL.M1_D παρουσιάζει αισθητά υψηλότερες τιμές σε όλους τους χρόνους (PL.BR.NHL.M1_D: 6,80MPa στις 180 ημέρες, PL.BR.NHL.M1_K: 4,48MPa στις 180 ημέρες).

Είναι εμφανές ότι επί τω συνόλω, την καλύτερη συμπεριφορά εκ των εξεταζόμενων κονιαμάτων παρουσιάζει το PL.BR.NHL.M1_D, το οποίο συνδυάζει την επίτευξη ικανοποιητικών σχετικά αντοχών σε κάμψη και σε θλίψη στις 180 ημέρες, ενώ και στις 14 ημέρες παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές όλων των εξεταζόμενων κονιαμάτων. Η τιμή αντοχής σε θλίψη που παρουσιάζει στις 180 ημέρες, είναι ικανοποιητική με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές (αντοχή σε θλίψη 5-9 MPa), αν και η ιδανική αντοχή σε θλίψη θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ 7 και 9 MPa.

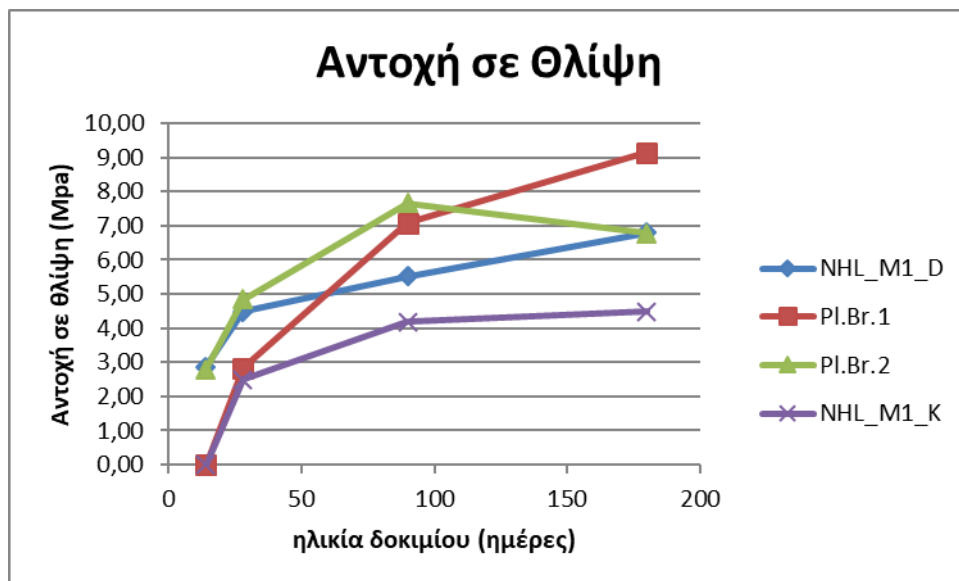
Αξίζει να σημειωθεί ότι στις 14 ημέρες το κονίαμα PL.BR.NHL.M1_K και PL.Br.1 παρουσίασαν μηδενική αντοχή σε θλίψη. Στην περίπτωση του PL.Br.1, η μηδενική αντοχή σε θλίψη σε αυτόν τον χρόνο, πιθανότατα οφείλεται στην καθυστερημένη πήξη του εν λόγω κονιαματος και την μη ικανή σκλήρυνσή του σε αυτόν τον χρόνο, καθώς μέχρι και τις 10 ημέρες, δεν ήταν δυνατόν να ξεκαλουπωθεί, υποδεικνύοντας την αδυναμία πήξης του σε υψηλές συνθήκες υγρασίας, το οποίο είναι μειονέκτημα για την χρήση του σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας, όπως είναι το Γεφύρι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τη συγκεκριμένη σύνθεση χρησιμοποιήθηκαν διάφορα οργανικά πρόσθετα.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται γραφικά, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις μετρήσεις των αντοχών σε κάμψη και θλίψη.

Εικόνα 114: Αντοχή σε κάμψη των κονιαμάτων αποκατάστασης



Εικόνα 114: Αντοχή σε θλίψη των κονιαμάτων αποκατάστασης



4.3.7. ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Διεξήχθησαν μετρήσεις χρωματομετρίας προκειμένου να προσδιοριστεί η χρωματική απόχρωση των κονιαμάτων αποκατάστασης και να ελεγχθεί η ομοιότητα και η συμβατότητα με τα ιστορικά κονιάματα του Γεφυριού.

Πίνακας 22: Μέσοι όροι τιμών χρωματόμετρου

Κωδικός Δείγματος	Μ.Ο Τιμών L ^x	Μ.Ο Τιμών a ^x	Μ.Ο Τιμών b ^x
PL.BR_1	79.62	2.56	12.13
PL.BR_2	81.80	2.21	10.92
PL.BR.NHL.M1_K	81.49	3.46	13.14
PL.BR.NHL.M1_D	68.89	2.64	11.68

Οι τιμές του L κυμαίνονται από 68,89 έως και 81,80 με το κονίαμα PL.BR.NHL.M1_D να παρουσιάζει το μικρότερο μέσο όρο τιμών. Οι τιμές των τριών άλλων συνθέσεων δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, με τη σύνθεση PL.BR_2 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη (81,80).

Οι τιμές των παραμέτρων a και b κυμαίνονται από 2,21-3,46 και από 10,92-13,14 αντίστοιχα, με το κονίαμα PL.BR_2 να παρουσιάζει τις μικρότερες, ενώ τις μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει η σύνθεση PL.BR.NHL.M1_K.

Προκειμένου να επιτύχουμε το επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα των κονιαμάτων αποκατάστασης, όσον αφορά τη χρωματική απόχρωση, συγκρίναμε τις τιμές του χρωματόμετρου των ιστορικών κονιαμάτων, με αυτές των κονιαμάτων αποκατάστασης. Οι τιμές της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 23: Σύγκριση χρωματικής απόχρωσης ιστορικών κονιαμάτων με κονιάματα αποκατάστασης

Κωδικός	Σύγκριση με PL.BR_1	Σύγκριση με PL.BR_2	Σύγκριση με PL.BR.NHL.M1_K	Σύγκριση με PL.BR.NHL.M1_D
PL.HM_3	10.24	12.57	17.76	1.50
PL.HM_4	10.15	11.20	11.50	7.06
PL.HM_5	8.52	10.50	14.69	2.89
PL.HM_7	14.67	16.77	19.94	4.12
PL.HM_8	9.29	10.74	12.83	5.17
PL.HM_9	15.53	17.28	18.42	6.12
PL.HM_10	11.91	13.51	14.97	4.62
PL.HM_11	19.93	22.19	25.35	9.28
PL.HM_13	8.83	10.65	14.12	3.42
PL.HM_14	15.09	17.30	20.86	4.39
GROUT_1	16.02	17.08	15.17	9.81

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, μπορούμε να πούμε ότι η σύνθεση με τα πιο κοντινά χαρακτηριστικά, όσον αφορά τη χρωματική απόχρωση, του συνόλου των ιστορικών κονιαμάτων που μελετήθηκαν (εξαιρουμένου πάντα του GROUT_1), είναι το PL.BR.NHL.M1_D.

4.3.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ pH

Πίνακας 24: Προσδιορισμός διαλυτών αλάτων κονιαμάτων αποκατάστασης

Κωδικός	Ημέρες	TSS%	pH	Χλωριόντα	Θειικά	Νιτρικά
PLBR1	14	19,02	10,30	++++		-
	28	17,56	10,59	+++		-
	180	12,36	10,09	+++		-
PLBR2	14	7,06	9,73	++		-
	28	7,80	10,09	+++		-
	180	5,55	9,6	+		-
PL.BR.NHL.M1_K	14	24,90	10,88	++		-
	28	12,55	10,90	++		-
	180	6,57	9,71	++	+	-
PL.BR.NHL.M1_D	14	14,24	10,21	+		-
	28	13,37	10,54	+		-
	180	0,02	9,34	-	-	-

++++πολύ υψηλή, +++υψηλή, ++μέτρια, +χαμηλή, +πολύ χαμηλή, tr ίχνη

Όλες οι συνθέσεις, παρουσιάζουν pH μεγαλύτερο του 10, ή πολύ κοντά στο 10, και υψηλό ποσοστό διαλυτών αλάτων, στους πρώτους χρόνους. Αυτό δικαιολογείται λόγω της παρουσίας πορτλαντίτη, ο οποίος παρουσιάζει υψηλό pH και υψηλές τιμές αγωγιμότητας. Το pH μειώνεται με τον χρόνο, συγκρίνοντας τις 14 με τις 180 ημέρες, ενώ η ίδια τάση μείωσης παρατηρείται και στο ποσοστό των ολικών διαλυτών αλάτων. Στις 180 ημέρες, η σύνθεση NHL_M1_D παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό διαλυτών αλάτων (0,02%), ενώ το PLBR1 παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές (12,36%). Το κονίαμα PLBR2 στο οποίο προστέθηκε μόνο υπερρευστοποιητής και όχι άλλα οργανικά πρόσθετα, παρουσιάζει εμφανώς χαμηλότερη τιμή διαλυτών αλάτων σε σχέση με το PLBR1 (5,55%). Το κονίαμα NHL_M1_K που παρασκευάστηκε με τις ίδιες αναλογίες πρώτων υλών με το NHL_M1_D, αλλά με άλλες πρώτες ύλες, παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή διαλυτών αλάτων (6,57%).

Συνεπώς, είναι εμφανές ότι όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν pH άνω του 9, συνεπώς, εάν η τιμή αυτή δεν μειωθεί μέχρι τους 24 μήνες, η χρήση τους δεν θα επιφέρει διαβρωτικό περιβάλλον για τα όποια μεταλλικά στοιχεία χρησιμοποιηθούν.

Όσον αφορά την αγωγιμότητα και το ποσοστό διαλυτών αλάτων, μόνο το κονίαμα NHL_M1_D, στο οποίο δεν ανιχνεύθηκαν χλωριόντα, θειικά ή νιτρικά άλατα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια, καθώς τα υψηλά ποσοστά διαλυτών αλάτων των υπόλοιπων συνθέσεων, και ιδιαίτερα του PLBR1, θα έχουν σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή διαλυτών αλάτων στο δόμημα, με συνέπειες στην ανθεκτικότητά του..

4.3.9. ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Μελετήθηκαν τέσσερις συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης με βάση την υδραυλική ασβέστο (NHL3.5).

Το κονίαμα με κωδικό PL.BR.NHL.M1_K, είχε μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό σε σχέση με το αντίστοιχο κονίαμα PL.BR.NHL.M1_D για την επίτευξη της ίδιας εργασιμότητας, ενώ παρουσιάζει και διαφορετικά φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, αναδεικνύοντας τη σημασία που έχουν οι πρώτες ύλες στην παρασκευή ενός κονιαμάτος. Το κονίαμα PL.BR_1 παρουσίασε εξαιρετικά διαφοροποιημένα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το αντίστοιχο PL.BR_2, αναδεικνύοντας την έντονη διαφοροποίηση που επιφέρει η χρήση οργανικών προσθέτων.

Όσον αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων αποκατάστασης που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία και ως προς τη συμβατότητά τους με τα ιστορικά κονιάματα, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. Ικανοποιητικό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας για κονίαμα υδραυλικής ασβέστου, ικανής υδραυλικότητας, δηλαδή τιμή κάτω του 7,5, παρουσιάζουν όλα τα κονιάματα εκτός του PL.BR.NHL.M1_K (10,25) [5]. Την χαμηλότερη τιμή παρουσιάζει το PL.BR.NHL_M1_D, δηλαδή το κονίαμα υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη μικρής ποσότητας μετακαολίνη και χωρίς την προσθήκη άλλων προσθέτων. Μεταξύ των κονιαμάτων αποκατάστασης, την υψηλότερη τιμή ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό μέσω ολικής εμβάπτυσης, παρουσιάζει το PL.BR_2 (32,34%), ενώ την χαμηλότερη τιμή με διαφορά παρουσιάζει το PL.BR_1 (11,67%). Παράλληλα, το PL.BR_1 παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό ροφημένου νερού (8,17%) σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κονιάματα, ενώ παρουσιάζει και εξαιρετικά χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα. Καθώς το PL.BR_1 πρόκειται για την ίδια σύνθεση με το PL.BR_2, αλλά με προθήκη οργανικών προσθέτων, αναδεικνύεται η έντονη επίδραση των προσθέτων στα υδρομετρικά χαρακτηριστικά ενός κονιαμάτος. Λόγω των εξαιρετικά χαμηλών τιμών που παρουσιάζει το PL.BR_1 σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάζουν τα ιστορικά κονιάματα, όπως μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι εμφανές ότι είναι ασύμβατο σε σχέση με τα υδρομετρικά χαρακτηριστικά. Η χρήση του κονιαμάτος PL.BR_1, θα είχε σαν αποτέλεσμα η υγρασία να άγεται στα ιστορικά υλικά, αυξάνοντας τα φορτία που καλούνται να αντιμετωπίσουν και επιταχύνοντας τη φθορά τους. Οι υπόλοιπες συνθέσεις παρουσιάζουν κοντινές μεταξύ τους τιμές στα υδρομετρικά χαρακτηριστικά, όπως μετρήθηκαν μέσω ολικής εμβάπτυσης, με ικανοποιητικές τιμές σε σύγκριση με τα ιστορικά κονιάματα (παρόμοιες και ελαφρά χαμηλότερες τιμές)
2. Η χρήση του κονιαμάτος PL.BR.NHL.M1_D, δεν θα αυξάνει το φορτίο υγρασίας του δομήματος και ταυτοχρόνως θα επιτρέπει την ομαλή και ομοιογενή μεταφορά υγρασίας ανάμεσα σε ιστορικά κονιάματα και κονιάματα αποκατάστασης.

3. Το PL.BR.NHL_M1_D είναι το μόνο κονίαμα που παρουσιάζει ικανοποιητικά χαμηλό ποσοστό ολικών διαλυτών αλάτων στις 180 ημέρες. Παράλληλα, αξίζει να τονιστεί ότι το κονίαμα με την προσθήκη οργανικών πρόσθετων, PL.BR_1, παρουσιάζει σε αυτόν τον χρόνο εξαιρετικά υψηλές τιμές διαλυτών αλάτων, τα οποία θα άγει στα ιστορικά υλικά σε περίπτωση χρήσης του.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων αποκατάστασης είναι τα ακόλουθα:

1. Τις υψηλότερες μηχανικές αντοχές, εντός επιτρεπτών ορίων, παρουσιάζει η σύνθεση PL.BR_1, ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, αποτιμάται ως εξαιρετικά ασύμβατο με τα ιστορικά υλικά από φυσικοχημικής απόψεως. Παράλληλα, δεν έπηξε στις συνθήκες υψηλής υγρασίας και δεν παρουσίασε ικανοποιητικές αντοχές σε μικρούς χρόνους ωρίμανσης, συνεπώς αποκλείεται σαν επιλογή ως κονίαμα αποκατάστασης.
2. Είναι εμφανές ότι επί τω συνόλω, με εξαίρεση το PL.BR_1, την καλύτερη συμπεριφορά εκ των εξεταζόμενων κονιαμάτων παρουσιάζει το PL.BR.NHL.M1_D, το οποίο συνδυάζει την επίτευξη ικανοποιητικών σχετικά αντοχών σε κάμψη και σε θλίψη στις 180 ημέρες, ενώ και στις 14 ημέρες παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές όλων των εξεταζόμενων κονιαμάτων. Η τιμή αντοχής σε θλίψη που παρουσιάζει στις 180 ημέρες, είναι ικανοποιητική με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές (αντοχή σε θλίψη 5-9 MPa), αν και η ιδανική αντοχή σε θλίψη θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ 7 και 9 MPa. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι, ενώ παρουσιάζει τις υψηλότερες αντοχές στις 14 ημέρες, εντούτοις δεν παρουσιάζει ικανοποιητικό επίπεδο θλιπτικών αντοχών σε αυτόν τον χρόνο.

Όσον αφορά στην αισθητική συμβατότητα, σε σχέση με το σύνολο των ιστορικών κονιαμάτων που μελετήθηκαν, αυτή επιτυγχάνεται μόνο με τη χρήση του PL.BR.NHL.M1_D.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκαν ιστορικά κονιάματα από διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις του Γεφυριού της Πλάκας. Τα κονιάματα αυτά κατηγοριοποιήθηκαν σε ομάδες σύμφωνα με τη θέση τους στο αρχικό δόμημα. Τα δείγματα PL.HM_3, PL.HM_8 και PL.HM_13 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης λίθων θολιτών, ενώ τα δείγματα PL.HM_9, PL.HM_10, PL.HM_11 αφορούν σε κονιάματα σύνδεσης άνω και κάτω θολίτη. Το δείγμα PL.HM_4 αποτελεί κονίαμα σύνδεσης λίθων του κεντρικού τόξου του γεφυριού (όψη προς το ποτάμι), ενώ το δείγμα PL.HM_7 αφορά σε κονίαμα σύνδεσης των λίθων του τυμπάνου και συγκεκριμένα πάνω από το ανακουφιστικό τόξο. Το δείγμα PL.HM_5 αποτελεί κονίαμα τελικού αρμού από τον κάτω θολίτη στο εναπομείναν τμήμα 2. Το δείγμα Grout_tube αφορά υλικό ενεμάτωσης, καθώς ελήφθη από σωληνίσκο ενεμάτωσης που είχε παραμείνει στην ένωση των θολιτών από προηγούμενη επέμβαση, η οποία υλοποιήθηκε προ δεκαετίας.

Η κοκκοδιαβάθμιση που έγινε στο κονίαμα PL.HM_13, έφερε ως αποτέλεσμα υψηλή αναλογία κονιάς προς αδρανή της τάξης του ένα προς ένα, γεγονός από το οποίο συμπεραίνουμε ότι το κονίαμα περιέχει σημαντική ποσότητα κονιάς σε σχέση με την συνήθη πρακτική.

Όσον αφορά τη χημική τους σύσταση, όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές, οι οποίες συνάδουν με χαρακτηριστικές τιμές ιστορικών κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου και κονιαμάτων ασβέστη-φυσικής ποζολάνης, μην επιτρέποντας την κατάταξή τους σε καθαρά μία εκ των δυο κατηγοριών. Σε κάθε περίπτωση, εμφανίζουν υδραυλικό χαρακτήρα, δηλαδή χαμηλές τιμές αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας, ενώ είναι εμφανές ότι για την παρασκευή τους φαίνεται να έχει χρησιμοποιηθεί άμμος αργιλοπυριτικής σύστασης ή μίξη άμμων ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής σύστασης. Εξαιρέση αποτελεί το δείγμα PL_HM_9, το οποίο παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή τιμή αντίστροφου δείκτη υδραυλικότητας και υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, υποδεικνύοντας διαφορετική τεχνολογία παρασκευής. Παράλληλα, το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, παρουσιάζει τυπικά χαρακτηριστικά τσιμεντιτικού υλικού, με εξαιρετικά χαμηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, αισθητά χαμηλότερο των ιστορικών κονιαμάτων.

Τα ιστορικά κονιάματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές ροφημένου νερού (29-46%) και πορώδους (35-45%) προσβάσιμου στο νερό μέσω ολικής εμβάπτισης, με εξαίρεση το δείγμα PL_HM_9 και το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, τα οποία παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές (WAC:12,36%, 14,18% και Πορώδες: 23,36%, 21,70%, αντίστοιχα), ενδεικτικές διαβρωμένων τσιμεντιτικών υλικών. Παράλληλα, τα ιστορικά κονιάματα, παρουσιάζουν και χαμηλές τιμές φαινόμενης πυκνότητας ($0,9-1,4\text{g/cm}^3$), με εξαίρεση και πάλι το δείγμα PL_HM_9 και το δείγμα από το σωληνάκι ενεμάτωσης, τα οποία παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερες τιμές, 1,9 και $1,5\text{g/cm}^3$ αντίστοιχως. Η χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα, πέραν των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, μέρος των οποίων ήταν ελαφροβαρή, εξηγείται και από την

μεγάλη συμμετοχή της κονιάς στο κονίαμα. Τέλος, όσον αφορά στα διαλυτά άλατα όλα τα κονιάματα παρουσιάζουν μικρή ποσότητα χλωριόντων.

Με το πέρας του χαρακτηρισμού των ιστορικών κονιαμάτων του Γεφυριού, ακολούθησε η τεκμηριωμένη πρόταση για την παρασκευή ενός κονιάματος αποκατάστασης, το οποίο να είναι συμβατό με την παραδοσιακή κατασκευή και τα υλικά της από τη μία, αλλά παράλληλα να είναι ανθεκτικό και να βελτιώνει τις ιδιότητες του δομήματος, χωρίς να προκαλεί ανισοτροπία με τα αυθεντικά υλικά της κατασκευής, με βάση της υδραυλική άσβεστο NHL3.5.

Το κονίαμα αποκατάστασης πρέπει να είναι συμβατό με τα ιστορικά υλικά, όσον αφορά τη φυσικοχημική του σύσταση και τη μηχανική του συμπεριφορά. Πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικό στο περιβάλλον του μνημείου, πάντα "χωρίς να επιβιώνει εις βάρος των ιστορικών υλικών".

Με βάση τις τιμές του πορώδους που προκύπτουν από τις δοκιμές της ποροσιμετρίας, της ολικής εμβάπτισης και της τριχοειδούς αναρρίχησης, διαπιστώνεται ότι η χρήση του κονιάματος PL.BR_1, θα είχε σαν αποτέλεσμα η υγρασία να άγεται στα ιστορικά υλικά, αυξάνοντας τα φορτία που καλούνται να αντιμετωπίσουν και επιταχύνοντας τη φθορά τους και ως εκ τούτου απορρίπτεται σαν υλικό αποκατάστασης. Παράλληλα, η προσθήκη οργανικών προσθέτων έδρασε αρνητικά στην ικανότητα πήξης του κονιάματος σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Αντιθέτως, η χρήση του κονιάματος PL.BR.NHL.M1_D, δεν θα αυξάνει το φορτίο υγρασίας του δομήματος και ταυτοχρόνως θα επιτρέπει την ομαλή και ομοιογενή μεταφορά υγρασίας ανάμεσα σε ιστορικά κονιάματα και κονιάματα αποκατάστασης. Το κονίαμα το οποίο υπέδειξε τις καλύτερες αντοχές σε κάμψη και σε θλίψη στις 180 ημέρες, ήταν το PL.BR_1, το οποίο ωστόσο θεωρείται ασύμβατο από φυσικοχημικής απόψεως, ενώ στις 14 ημέρες, λόγω και της αδυναμίας πήξης του στον θάλαμο υψηλής υγρασίας, παρουσίασε χαμηλά επίπεδα θλιπτικών αντοχών. Τις αμέσως υψηλότερες μηχανικές αντοχές στις 180 ημέρες παρουσίασε το PL.BR.NHL.M1_D. Επίσης ήταν το μόνο στο οποίο δεν ανιχνεύθηκαν χλωριόντα, θειικά και νιτρικά άλατα, επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια. Τέλος, οι τιμές που παρουσίασε το χρωματόμετρο για το συγκεκριμένο κονίαμα, ήταν οι κοντινότερες σε σχέση με αυτές που εξήχθησαν από τα ιστορικά κονιάματα, δηλώνοντας έτσι παραπλήσια χαρακτηριστικά χρωματικής απόχρωσης, δηλαδή την αισθητική συμβατότητα. Ωστόσο αξίζει να τονιστεί ότι καμία σύνθεση δεν παρουσίασε ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές σε μικρούς χρόνους.

Βιβλιογραφία

- [1]: Γεφύρι της Πλάκας, 2016 ‘‘Το Έργο του Ε.Μ.Π. για την Αποκατάστασή του’’
- [2]: Τεχνική Έκθεση Ε.Μ.Π.(2015), ‘‘Η Γέφυρα του Αράχθου στην Πλάκα’’
- [3]: Myriounis*, Ch., Varras, G., Tsirogiannis, I., Pavlidis, V. : Usage of stone materials in natural and human environment, case study in Epirus, Greece, Agriculture and Agricultural Science Procedia 4 (2015) 431 – 439
- [4]: S. Giannakopoulou, D. Damigos, D. Kaliampakos : The socioeconomic value of the Plaka Bridge in mountainous Epirus, 19th International Conference on Cultural Economics, 21-24 June, Valladolid, Spain
- [5]: Maria Apostolopoulou, Ioannis Nikolaidis, Iakovos Grillakis, Sophia Mermiggi, Vasileios Keramidas, Ekaterini.T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas, Charalampos Mouzakis and Antonia Moropoulou : The Plaka Bridge in Epirus: An evaluation of new building materials for its restoration
- [6] : A.Moropoulou A.Bakolas S.Anagnostopoulou : Composite materials in ancient structures, Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 295-300
- [7] Goreti Margalha, Rosário Veiga, António Santos Silva, Jorge de Brito, : Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method, Cement & Concrete Composites 33 (2011) 796–804
- [8] Maria Apostolopoulou, Eleni Aggelakopoulou, Louiza Siouta, Asterios Bakolas, Maria Douvika, Panagiotis G.Asteris, AntoniaMoropoulou : A methodological approach for the selection of compatible and performable restoration mortars in seismic hazard areas, Construction and Building Materials Volume 155, 30 November 2017, Pages 1-14
- [9] Αστέριος Μπακόλας Καραγιάννης :Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων, Διδακτορική Διατριβή
- [10] Antonia Moropoulou, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas : Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage, Construction and Building Materials 48 (2013) 1222–1239
- [11] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΑ Α. ΛΕΩΝΙΔΑΚΗ : Ανάλυση κονιαμάτων του Ι. Ν. Γενεσίου Θεοτόκου Κορωνησίας Ν. Άρτας με ορυκτολογικές και πετρογραφικές μεθόδους, Διπλωματική Εργασία, Χανιά, Νοέμβριος 2012
- [12] A. Moropoulou, A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou : REVERSE ENGINEERING: A PROPER METHODOLOGY FOR COMPATIBLE

RESTORATION MORTARS, International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, the Netherlands, 26th-28th January 2005

[13] ISBN 92-9077-157-7 © ICCROM 1999 International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property

[14] Rawaz Kurda, Jorge de Brito, José D. Silvestre : Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash, Cement and Concrete Composites Volume 95, January 2019

[15] Antonia Moropoulou, Elisabetta Zendri, Pilar Ortiz, Ekaterini T. Delegou, Ioanna Ntoutsis, Eleonora Balliana, Javier Becerra and Rocío Ortiz : Scanning Microscopy Techniques as an Assessment Tool of Materials and Interventions for the Protection of Built Cultural Heritage, Published 26 February 2019

[16] Γκράσος Γεώργιος: Τα πέτρινα τοξωτά γεφύρια της Ελλάδας

[17] Καθ. ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου: Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης

[18] Καθ. ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου : Κριτήρια Επιλογής Υλικών και Στρατηγικός Σχεδιασμός Επεμβάσεων Συντήρησης

[19] Καθ. ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου : Ιστορικά Κονιάματα και Επιχρίσματα, Προβλήματα Αποτίμησης και Κριτήρια Ανάπτυξης Κονιαμάτων Αποκατάστασης

[20] Α. Μπακόλας : Ιστορικά Κονιάματα και Επιχρίσματα

[21] A. Moropoulou, A.S. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas, E. Zendri : Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia Constr. Build. Mater., 16 (8) (2002), pp. 543-552

[22] Lucía Garijo, XiaoXin Zhang, Gonzalo Ruiz, José Joaquín Ortega, Zhimin Wu : The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars, Construction and Building Materials Volume 169, 30 April 2018, Pages 325-334

[23] J. Lanás, J.I. Alvarez : Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior, Cem. Concr. Res., 33 (11) (2003), pp. 1867-1876

[24] Goreti Margalha, Rosário Veiga, António Santos Silva, Jorge de Brito : Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method, Cement and Concrete Composites Volume 33, Issue 8, September 2011, Pages 796-804

[25] Τριανταφύλλου Γεώργιος : «Αξιολόγηση νεογενών ασβεστολιθικών πετρωμάτων Κρήτης για τη διερεύνηση δυνατότητας παραγωγής φυσικών υδραυλικών κονιών», Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης (2011, Χανιά)

[26] Μαρκόπουλος, Θ., Τριανταφύλλου, Γ. & Μαυριγιαννάκης, Σ., (2006), «Σύνθεση κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου που παρήχθησαν από ασβεστολιθικές ύλες της Κρήτης και έλεγχος της μηχανικής τους συμπεριφοράς» 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος

[27] ΑΓΓΕΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ Χ.Μ, ΜΟΥΝΔΟΥΛΑΣ ΠΕΤΡΟΣ Χ.Μ : ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ, Επιστημονικά Υπεύθυνη: Καθ. ΕΜΠ Αντωνία Μοροπούλου, ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2004

[28] Γερογιάννης Γιώργος : Μελέτη και αξιολόγηση πρώτων υλών και κονιαμάτων ως προς την καταλληλότητά τους για επεμβάσεις συντήρησης και αναστήλωσης , Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (Δεκέμβριος 2003-Χανιά)