

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον  
ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

---



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό  
Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην  
Ήπειρο**

**ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ**

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Αντωνία Μοροπούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2019

**Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης**

**Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ (επιβλέπουσα)**  
**Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Επικ. Καθ. Μ. Περράκη, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ**  
**Δρ. Αικ. Δελέγκου, ΕΔΙΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Δρ. Μ. Καρόγλου, ΕΔΙΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Υ.Δ. Μ. Αποστολοπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Υ.Δ. Α. Πανουτσοπούλου, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ**

**Τριμελής επιτροπή εξέτασης**

**Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ(επιβλέπουσα)**  
**Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**  
**Επικ. Καθ. Ε. Τόπακας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ**

## Πρόλογος

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του ιστορικού λιθότυπου όψης, καθώς και η αποτίμηση πιθανού λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο. Οι απαραίτητες αναλύσεις φυσικοχημικού χαρακτήρισμού πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Οι μετρήσεις μηχανικών αντοχών πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, ενώ η πετρογραφική ανάλυση των λίθων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας - Πετρογραφίας - Κοιτασματολογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Η εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της διεπιστημονικής συμβολής του ΕΜΠ στο έργο αποκατάστασης του Γεφυριού της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο. Τα δείγματα των ιστορικών λίθων ελήφθησαν κατά τη διάρκεια επί τόπου επίσκεψης στην ιστορική κατασκευή (Ιούνιος-Ιούλιος 2018), ενώ τα δοκίμια του πιθανού λίθου αποκατάστασης (λίθος «Δαφνούλα») προέρχονται από λατομείο πλησίον του ποταμού Άραχθου και παραδόθηκαν στο εργαστήριο της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών ώστε να αποτιμηθεί η καταλληλότητα της χρήσης του σε σχέση με τον ιστορικό λίθο.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου προς την κυρία Α. Μοροπούλου, καθηγήτρια της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την πίστη της στο άτομο μου, καθώς για την υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια τόσο των προπτυχιακών μου σπουδών στο πλαίσιο της σχολής αλλά και κατά την διεξαγωγή αυτής τη εργασίας. Χωρίς την καθοδήγησή της θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω το δύσκολο έργο που απαιτούσε η εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά το εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό του τομέα της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών που με βοήθησε και έκανε εφικτή την διεξαγωγή αυτής εργασίας.

Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Αικ. Δελέγκου, η οποία με τις οδηγίες και υποδείξεις της μου έδινε πάντα την σωστή κατεύθυνση για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Α. Μπακόλα για την βοήθεια του κατά την διεξαγωγή του πειράματος της ποροσιμετρίας, καθώς και την Δρ. Μ. Καρόγλου για την καθοδήγησή της κατά την μελέτη της υδρομετρικής συμπεριφοράς των λίθων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επιπλέον το προσωπικό του εργαστηρίου αντισεισμικής τεχνολογίας Πολιτικών Μηχανικών και συγκεκριμένα τον Επίκουρο Καθηγητή Χ. Μουζάκη και την Υποψήφια Διδάκτορα Λ. Πανουτσοπούλου κατά την διεξαγωγή των δοκιμών θλιπτικής αντοχής.

Είναι επίσης ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου ως προς την Επικ. Καθ. Μ. Περράκη, για την βοήθεια της στην επίτευξη της πετρογραφικής μελέτης.

Αξίζει να τονίσω την ανέλπιστη βοήθεια που έλαβα από τους μεταπτυχιακούς φοιτητές, που παράλληλα με εμένα, εργάζονταν σκληρά για την διεκπεραίωση των δικών τους εργασιών και παρ' όλα αυτά βρήκαν τον χρόνο να με βοηθήσουν και να μου επισημάνουν πιθανά λάθη μου. Ν. Γαλανάκη και Μ. Καλοφώνου σας ευχαριστώ.

Οφείλω ένα τεράστιο «ευχαριστώ» στην οικογένεια μου, στους φίλους μου και στα άτομα που ήταν δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια αυτού του έργου, για την συμπαράσταση και την στήριξη τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την Υποψήφια Διδάκτορα Μ. Αποστολοπούλου για την καθοδήγησή της, την βοήθεια της και την συμπαράσταση της. Η θετική της στάση και η επιθυμία της να μου παρέχει όση υποστήριξη μπορούσε σε κάθε στάδιο της διπλωματικής μου εργασίας είναι ένας από τους κυριότερους λόγους που έφερα εις πέρας το έργο αυτό. Την ευχαριστώ πολύ.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος συμβατότητας και η αποτίμηση της καταλληλότητας του λίθου «Δαφνούλας» για την αποκατάσταση του ιστορικού Γεφυριού της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο, το οποίο κατέρρευσε μετά από έντονη βροχόπτωση τον Φεβρουάριο του 2015. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν δοκίμια ιστορικών λίθων του γεφυριού (όψης και γεμίσματος), καθώς και δοκίμια νέου λίθου από το γειτονικό λατομείο της Δαφνούλας. Η μελέτη των μορφολογικών, ορυκτολογικών, φυσικοχημικών, υγρομετρικών, χρωματικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των παραπάνω δοκιμίων και η αποτίμηση της συμβατότητας του ιστορικού λίθου με τον εξεταζόμενο λίθο αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις εξής μεθόδους: μικροσκοπία οπτικών ινών, οπτική μικροσκοπία, περίθλαση ακτινών Χ, υπερηχοσκόπηση, μελέτη της υγρομετρικής συμπεριφοράς με τριχοειδή αναρρίχηση και δοκιμές ολικής εμβάπτισης σε νερό, ποροσιμετρία υδραργύρου, θερμοβαρυμετρική και διαφορική θερμική ανάλυση, προσδιορισμός διαλυτών αλάτων και ποιοτική ανίχνευση ανιόντων, χρωματομετρία, καθώς και δοκιμές αντοχής σε θλίψη.

Ο λίθος γεμίσματος του γεφυριού ταυτοποιείται ως ασβεστιτικός πωρόλιθος με κυρία φάση τον ασβεστίτη παρουσία ιχνών χαλαζία. Ο ιστορικός λιθότυπος όψης και ο προς εξέταση λίθος Δαφνούλας ταυτοποιούνται ως ασβεστιτικοί ψαμμίτες. Σύμφωνα με το πείραμα της υπερηχοσκόπησης οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων του προς εξέταση λίθου για την αποκατάσταση του γεφυριού είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές του ιστορικού λιθότυπου κατά περίπου 8%, κάτι που υποδεικνύει μικρότερη συνεκτικότητα. Οι δείκτες ανισοτροπίας που υπολογίστηκαν βάσει των τιμών της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων για τους δύο αυτούς λιθότυπους (ιστορικός-αποκατάστασης), λαμβάνουν παρόμοιες τιμές, με τον λίθο Δαφνούλας όμως να παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη ανισοτροπία. Οι δύο εξεταζόμενοι λιθότυποι (ιστορικός-αποκατάστασης) παρουσιάζουν χαμηλό ολικό ανοιχτό πορώδες, με αυτό του λίθου Δαφνούλας να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του ιστορικού λιθότυπου, βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης της μικροδομής (δοκιμές εμβάπτισης, δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης και ποροσιμετρία υδραργύρου). Επίσης, η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας του εξεταζόμενου λίθου αποκατάστασης ( $\sim 2.55 \text{ g/cm}^3$ ) είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή του ιστορικού λιθότυπου ( $\sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ ). Το συνολικό ποσοστό ροφημένου νερού για τον λίθο αποκατάστασης ( $\sim 1.5\%$ ) είναι ελαφρώς μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του ιστορικού λιθότυπου ( $\sim 1\%$ ), ενώ η τιμή του συντελεστή υδατοαπορρόφησης του βρίσκεται εντός του εύρους τιμών των δύο τύπων ιστορικών δοκιμίων που εξετάστηκαν. Οι χρωματικές παράμετροι των λίθων είναι παρόμοιες, παρουσιάζοντας μια σχετικά χαμηλή συνολική μεταβολή χρώματος ( $\Delta E=5-6\%$ ), γεγονός που υποδεικνύει την αισθητική τους συμβατότητα. Επιπλέον, σύμφωνα με τις δοκιμές των μηχανικών αντοχών (αντοχή σε θλίψη), ο λίθος Δαφνούλας παρουσιάζει μικρότερες αντοχές σε θλίψη από τον ιστορικό κατά 16%.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, ο λίθος «Δαφνούλα» μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλος για χρήση στην επερχόμενη αποκατάσταση, από άποψη φυσικοχημικής, υγρομετρικής, μηχανικής και χρωματικής συμβατότητας με τον ιστορικό λίθο. Ωστόσο, προτείνεται να πραγματοποιηθούν για τον περαιτέρω έλεγχο

του λίθου Δαφνούλας δοκιμές ανθεκτικότητας σε παγετό και σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης, καθώς και επιπρόσθετες δοκιμές ως προς άλλες μηχανικές ιδιότητες (πχ κάμψη, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας).

## Abstract

The main purpose of this thesis is the evaluation of a potential restoration stone in order to be used for the restoration of the historic Plaka Bridge, which collapsed after a heavy rainfall in February 2015. For this purpose, stone samples of the historical building stone, as well as of the stone used as filling material in the interior of the bridge's main body were examined. Furthermore, stone samples of the potential restoration stone from the “Dafnoula” quarry were also examined. The study of the morphological, mineralogical, chemical, physical, hygric, color and mechanical properties, as well as the assessment of the compatibility of the restoration stone with the historical building stone, was achieved using the following methods: Digital and optical microscopy, X-ray diffraction, ultrasound measurements, water capillary rise and total immersion tests, thermal analysis, mercury intrusion porosimetry, total soluble salts and pH measurements, colorimetry measurements, while the stone specimens were also examined as to their compressive strength.

The stone used as filling material is a calcareous marl, which mainly contains calcite and, secondarily, quartz. Both the compact historical and the restoration stone are calcareous sandstones. According to ultrasound measurements, it appears that the restoration stone present lower average ultrasound velocity values compared to the historical stone by 8%. The anisotropy indices, found from the ultrasound velocities measured in the stone specimens are similar, although the restoration stone presents slightly higher values compared to the historical stone, indicating that the restoration stone is more anisotropic. The capillary rise tests, the tests by total water immersion and mercury intrusion porosimetry indicate that the restoration stone presents similar but slightly higher total average porosity. In accordance with previous results, the bulk density value of the restoration stone ( $\sim 2.55 \text{ g/cm}^3$ ) is slightly lower than the value of the historical stone ( $\sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ ). In addition, all stone specimens present similar capillary rise coefficient values, while the restoration stone present slightly higher water absorption capacity ( $\sim 1.5\%$ ) compared to the historical stone ( $\sim 1\%$ ). Both stones appear to present similar color characteristics, with similar hue and saturation values as well as relatively low total color difference, which indicates their aesthetic compatibility. Finally, the restoration stones present lower compressive strength values compared to the historical stone by 16%.

According to the results of the analysis conducted, the “Dafnoula” stone can be assessed as compatible for use in the upcoming restoration project, in terms of physicochemical, mechanical and color characteristics. However, before making a final decision, it is suggested that further measurements take place, in relation to freeze-thaw and hygric cycles behavior and resistance, while further mechanical tests are also suggested (e.g. flexural, tensile, elasticity modulus).

## Βιβλιογραφία

1	Γενικό θεωρητικό.....	1
1.1	Πέτρωμα .....	1
1.1.1	Πυριγενή πετρώματα.....	1
1.1.2	Ιζηματογενή πετρώματα.....	4
1.1.3	Μεταμορφωμένα πετρώματα .....	8
1.2	Ιδιότητες των Λίθων .....	11
1.3	Ταυτοποίηση και διάγνωση φαινόμενων φθοράς των λίθων .....	15
1.3.1	Φαινόμενα φθοράς .....	18
1.3.2	Παράγοντες φθοράς .....	19
1.3.3	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	27
1.3.4	Γενικές κατηγορίες επιφανειακής φθοράς .....	28
1.4	Μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης.....	30
2	Ειδικό Θεωρητικό .....	33
2.1	Διαδικασία κατασκευής πέτρινων τοξοτών γεφυριών .....	33
2.2	Το Γεφύρι της Πλάκας .....	36
2.2.1	Συνθήκες θεμελίωσης.....	36
2.2.2	Ιστορική Αναδρομή της κατασκευής του Γεφυριού της Πλάκας- Επεμβάσεις και επισκευές .....	37
2.2.3	Αρχιτεκτονική Αποτύπωση και κατασκευαστική ανάλυση.....	41
3	Πειραματικό Μέρος.....	53
3.1	Μεθοδολογική προσέγγιση.....	53
3.2	Ψηφιακή Μικροσκοπία.....	54
3.2.1	Αρχή της μεθόδου .....	54
3.2.2	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	55
3.3	Οπτική Μικροσκοπία .....	57
3.3.1	Αρχή της Μεθόδου.....	57
3.3.2	Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	58
3.4	Περίθλαση Ακτινών Χ.....	59
3.4.1	Αρχές μεθόδου .....	59
3.4.2	Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	59
3.5	Θερμοβαρυστρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση.....	61
3.5.1	Αρχή Μεθόδου .....	61



3.5.2	Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	62
3.6	Υπερηχοσκόπηση .....	63
3.6.1	Αρχή Μεθόδου .....	63
3.6.2	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	64
3.7	Δοκιμές Εμβάπτισης-Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και Ολικού Ανοιχτού Πορώδους προσβάσιμο στο νερό .....	65
3.7.1	Πειραματική διαδικασία .....	65
3.8	Δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης-Προσδιορισμός Συντελεστή υδατοαπορρόφησης και ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών .....	67
3.9	Ποροσιμετρία υδραργύρου .....	68
3.9.1	Αρχή της μεθόδου .....	68
3.9.2	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	69
3.10	Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης <sup>70</sup>	
3.10.1	Πειραματική διαδικασία .....	70
3.11	Χρωματομετρία .....	72
3.11.1	Αρχή Μεθόδου .....	72
3.11.2	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	74
3.12	Δοκιμές Αντοχής σε θλίψη .....	76
3.12.1	Αρχή μεθόδου .....	76
3.12.2	Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία .....	78
3.13	Δειγματοληψία .....	79
4	Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων .....	84
4.1	Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων με μικροσκοπία οπτικών ινών .....	84
4.1.1	Ιστορικό λίθος PL_SH_1 .....	84
4.1.2	Ιστορικός λίθος PL_SH_2 .....	89
4.1.3	Λίθοι γεμίσματος PL_PH_1 και PL_PH_2 .....	93
4.1.4	Προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης PL_R_S .....	95
4.2	Οπτική Μικροσκοπία .....	98
4.3	Περίθλαση ακτινών X .....	101
4.4	Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG) .....	104
4.5	Υπερηχοσκόπηση .....	107

4.6	Δοκιμές με Εμβάπτιση-Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό .....	112
4.7	Δοκιμές Τριχοειδούς αναρρίχησης.....	124
4.8	Ποροσιμετρία υδραργύρου.....	135
4.9	Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης.....	137
4.10	Χρωματομετρία.....	139
4.11	Δοκιμές Αντοχής σε Θλίψη .....	141
5	Συμπεράσματα .....	143
6	Προοπτικές.....	151
7	Βιβλιογραφία .....	152



# 1 Γενικό θεωρητικό

## 1.1 Πέτρωμα

Πέτρωμα είναι το υλικό του στερεού φλοιού της γης, προϊόν γεωλογικών διεργασιών. Αποτελείται από ορυκτά, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζουν και τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Πέτρα είναι το κατεργασμένο από τον άνθρωπο πέτρωμα (1).

Τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που είναι καίριας σημασίας για τους μηχανικούς των υλικών και τους αρχιτέκτονες για την βέλτιστη επιλογή τους είναι τα εξής (2):

- Ορυκτολογική σύνθεση: Οι περισσότερες ιδιότητες των πετρωμάτων βασίζονται στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ορυκτών που τα απαρτίζουν
- Ιστός/ Υφή: Αναφέρονται στον τρόπο εμφάνισης των ορυκτών συστατικών μέσα στη μάζα του πετρώματος, στο βαθμό κρυστάλλωσης το μέγεθος και το σχήμα τους.
- Δομή της μάζας του πετρώματος: τα μακροχαρακτηριστικά, η σχιστότητα, οι πτυχές, κ.α.

Τα πετρώματα διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση την γεωλογική διεργασία από την οποία δημιουργούνται (2) (3):

- Πυριγενή
- Ιζηματογενή
- Μεταμορφωμένα

### 1.1.1 Πυριγενή πετρώματα

Πυριγενή πετρώματα είναι τα πετρώματα τα οποία δημιουργούνται μετά από στερεοποίηση του μάγματος (3). Όταν η στερεοποίηση του μάγματος λαμβάνει χώρα αργά μέσα στον φλοιό σε βάθος, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται βαθυγενή ή πλουτωνίτες, και καθώς η κρυστάλλωση είναι βραδεία οδηγεί στην δημιουργία μεσο/χονδρόκοκκων κρυστάλλων συχνά ορατών με γυμνό μάτι. Τέτοια πετρώματα είναι οι γρανίτες, οι διορίτες, οι συηνίτες και οι γάββροι. Αντίθετα όταν η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα από στην επιφάνεια του φλοιού της γης, τα πετρώματα που δημιουργούνται ονομάζονται ηφαιστίτες ή εκρηξιγενή. Λόγω της απότομης ανόδου του μάγματος στην επιφάνεια, η θερμοκρασία του πέφτει απότομα και σχηματίζονται υαλώδεις ή μικροκρυσταλλικές μάζες. Τέτοια πετρώματα είναι ο

βασάλτης, και ο ρυόλιθος. Όταν η στερεοποίηση γίνεται σε μικρά βάθη, τα πετρώματα ονομάζονται υποηφαιστιακά, ενώ όταν το μάγμα εισχωρήσει μέσα σε μεγάλα ρήγματα ή ανοίγματα δημιουργούνται τα φλεβικά πετρώματα (1).

### **Ιστός πυριγενών πετρωμάτων**

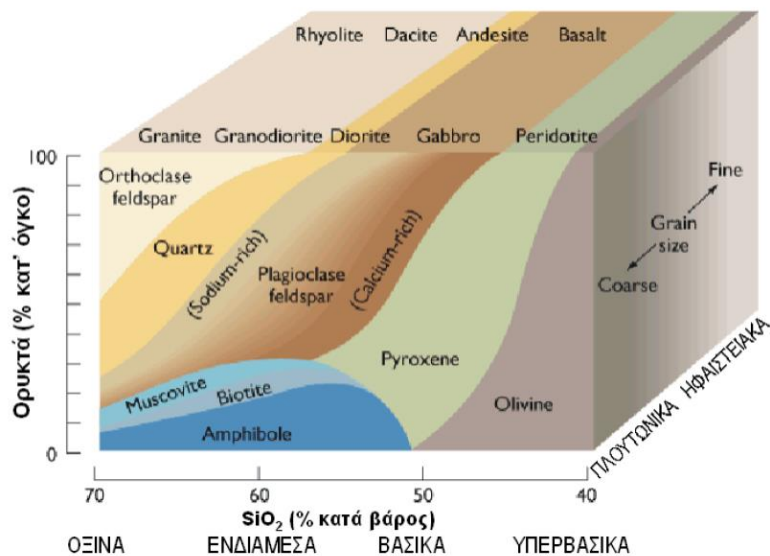
Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τους ακόλουθους τύπους ιστών (2) (4):

- Ολοκρυσταλλικός ή γρανιτικός ιστός: Όταν κατά τον σχηματισμό πλουτωνιτών η στερεοποίηση του μάγματος γίνεται με βραδύ ρυθμό, τα ορυκτά κρυσταλλώνονται πλήρως σχηματίζοντας ευμεγέθεις κρυστάλλους, ορατούς με γυμνό μάτι όπως π.χ. ο γρανίτης.
- Υαλώδης ιστός: Στα ηφαιστειακά πετρώματα, η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης και σχηματίζονται υαλώδεις μάζες. Γνωστό παράδειγμα είναι ο οψιδιανός.
- Αφυρικός ιστός: ίδια περίπτωση με την προηγούμενη, για ηφαιστειακά πετρώματα, αλλά αντί για τον σχηματισμό υαλωδών μαζών έχουμε τον σχηματισμό μικροκρυσταλλικών μαζών.
- Πορφυριτικός ιστός: είναι η περίπτωση που μέσα σε υαλώδη ή μικροκρυσταλλική μάζα βρίσκονται μικροί ή μεγάλοι και καλά μορφοποιημένοι κρύσταλλοι, οι οποίοι σχηματίζονται πριν την έκχυση της λάβας και οι οποίοι ονομάζονται φαινοκρύσταλλοι. Η διαφορά των κρυστάλλων είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συνθηκών κρυστάλλωσης. Τέτοια διαφοροποίηση στην κρυστάλλωση μπορεί να οφείλεται για παράδειγμα σε επανατήξη του γρανίτη και ανάπτυξη μεγάλων κρυστάλλων, ή σε κρυστάλλωση σε δύο στάδια, το πρώτο αργά σε μεγάλα βάθη και το δεύτερο απότομα με μετατόπιση του μάγματος, ή διάβρωση των υπερκείμενων πετρωμάτων.
- Πηγματικός ιστός: Η κρυσταλλική μάζα είναι συνήθως χονδρόκοκκη σε φλέβες και ρηγματώσεις του όγκου του πετρώματος, παρόλο που έχει συμβεί ταχεία κρυστάλλωση. Παρόλο που η ύπαρξη τέτοιων φλεβών θεωρείται διακοσμητική, επιφέρει αρκετά προβλήματα γιατί ευνοεί τον διαχωρισμό των μεγάλων κρυστάλλων αστρία, μαρμαρυγία και αμφιβόλων, ενώ μπορεί να λάβει χώρα και αποκόλληση της φλέβας από τον κύριο όγκο του πετρώματος.
- Απλιτικός ιστός: Εμφανίζεται σε ανοιχτού χρώματος, σακχαροειδούς κοκκοδιαβάθμισης πέτρωμα σε φλέβες, που αποτελείται κυρίως από ανοιχτόχρωμα ορυκτά (αστρίους και χαλαζία) με ταυτόχρονη απουσία σκουρόχρωμων ορυκτών.

## Ταξινόμηση πυριγενών πετρωμάτων

Ένας τρόπος ταξινόμησης των πυριγενών πετρωμάτων (εκτός των ηφαιστειακών) είναι ο χρωματικός δείκτης, Χ.Δ., ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό των έγχρωμων συστατικών του πετρώματος (4):

- 0-5% Ολολευκοκρατικά
- 5-35% Λευκοκρατικά
- 36-65% Μεσοκρατικά
- 69-95% Μελανοκρατικά
- 96-199% Ολομελανοκρατικά



Εικόνα 1. Διάγραμμα ταξινόμησης πυριγενών πετρωμάτων

Τα ορυκτά συστατικά των πετρωμάτων διακρίνονται σε:

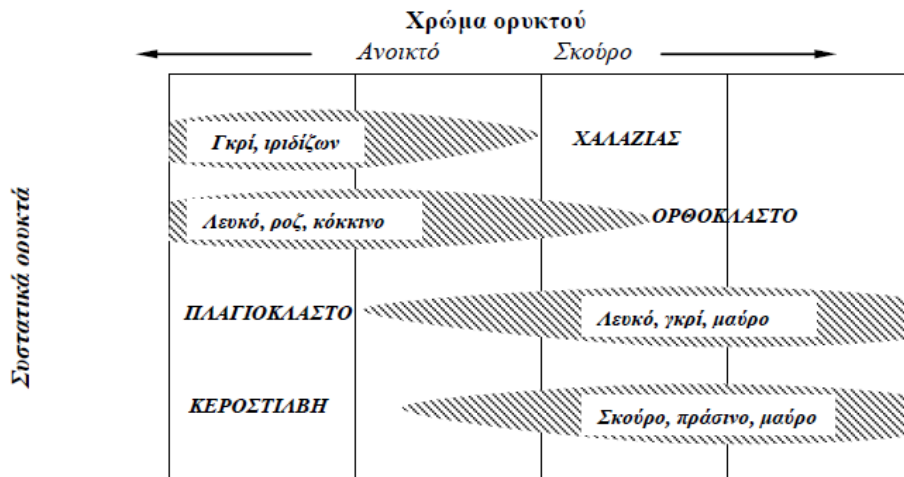
- Έγχρωμα ή φεμικά εξαιτίας του σιδήρου και του μαγνησίου που συνήθως είναι άφθονα σε αυτά τα ορυκτά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι μαρμαρυγίες και οι αμφίβολοι
- Λευκά ή σαλικά λόγω της αφθονίας τους σε πυρίτιο και άργιλο. Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο χαλαζίας και οι άστριοι.

Ο βασικότερος τρόπος ταξινόμησης πυριγενών πετρωμάτων είναι ο καθορισμός της σύστασης τους σε χαλαζία, αστριοειδών και η ποσοτική αναλογία αλκαλιούχων αστρίων προς πλαγιόκλαστα, ενώ μια πολύ γενική χημική ταξινόμηση μπορεί να γίνει με βάση το ποσοστό του SiO<sub>2</sub> (1):

- >63% Όξινα
- 63-52% Ενδιάμεσα

- 52-45% Βασικά
- <45% Υπερβασικά

<i>Χονδρόκοκκα</i>	ΓΡΑΝΙΤΗΣ	ΣΥΗΝΙΤΗΣ ΜΟΝΖΟΝΙΤΗΣ	ΔΙΟΡΙΤΗΣ "ΜΑΥΡΟΣ ΓΡΑΝΙΤΗΣ"	ΓΑΒΒΡΟΣ
<i>Λεπτόκοκκα</i>	ΡΥΟΛΙΘΟΣ, ΤΡΑΧΕΙΤΗΣ		ΑΝΔΕΣΙΤΗΣ	ΒΑΣΑΛΤΗΣ
<i>Μικτά</i>	ΓΡΑΝΙΤΗΣ ΑΣΤΡΙΤΗΣ	ΠΟΡΦΥΡΙΤΗΣ	"ΠΟΡΦΥΡΙΤΗΣ"	



Εικόνα 2. Απλοποιημένη κατάταξη τυπικών πυριγενών πετρωμάτων, η ορυκτολογική τους σύνθεση και το χρώμα των ορυκτών τους

### 1.1.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα δημιουργούνται από απόθεση ή καταβύθιση υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (αέρας ή νερό) και τη μετέπειτα συγκόλληση των υλικών που αποτέθηκαν [3]. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα, η διαστρωμάτωση υλικών και τα απολιθώματα που βρίσκονται μέσα στα ιζήματα.

Οι διαδικασίες σχηματισμού πετρωμάτων είναι οι ακόλουθες (4):

- Διάβρωση και αποσάθρωση: Καταστροφή προϋπαρχόντων πετρωμάτων από φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες
- Μεταφορά: Τα υλικά αποσάθρωσης μεταφέρονται με τον άνεμο και το νερό σε περιοχές απόθεσης οι οποίες μπορεί να είναι είτε κοντά είτε μακριά από την περιοχή παραγωγής των προϊόντων αποσάθρωσης.
- Απόθεση: Τα υλικά που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση εναποτίθενται σε διαδοχικά στρώματα

- Διαγένεση: διαδικασία μετατροπής ενός χαλαρού ιζήματος σε συμπαγές πέτρωμα με την βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης

Ανάλογα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η όλη διαδικασία δημιουργίας των ιζηματογενών πετρωμάτων υπάρχουν τα ακόλουθα (1):

- Οργανικά ή βιογενή ιζήματα: Συσώρευση οργανικής προέλευσης υλικού. Τυπικά πετρώματα αυτού του είδους είναι η τύρφη, ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, ο κοραλλιογενής και ο κελυφογενής.
- Μηχανικά ή κλαστικά ιζήματα: Συγκέντρωση θραυσμάτων ή φερτών υλικών διαφόρων μεγεθών, σχημάτων, και σύνθεσης, τα οποία είναι προϊόντα της αποσάθρωσης άλλων πετρωμάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του είδους είναι ο ψαμμίτης, τα λατυποπαγή και τα κροκαλοπαγή.
- Χημικά ιζήματα: Απόθεση ορυκτών από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διαδικασίες. Τυπικά πετρώματα αυτού του είδους είναι ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο όνυχας, το ορυκτό άλας και ο γύψος.

### **Κλαστικά ιζήματα**

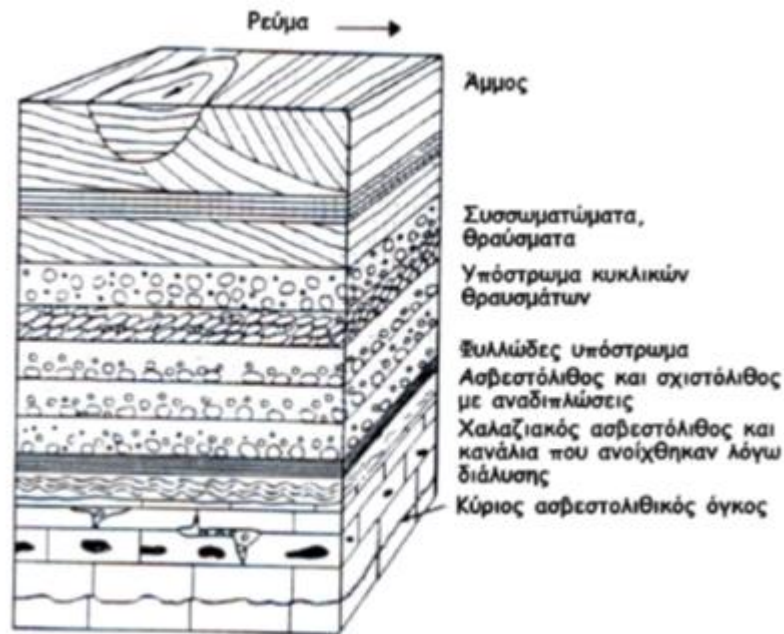
Τα περισσότερα ορυκτά υλικά που περιέχονται στα κλαστικά ιζήματα προέρχονται από πρωτογενή μαγματικά πετρώματα ή την αποσάθρωση με μηχανικές διεργασίες προϋπαρχόντων ιζηματογενών ή μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων (1)

Η υφή των κλαστικών ιζημάτων αποτελείται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (1):

- Ταξινόμηση: βαθμός ομοιότητάς του μεγέθους των κόκκων που επηρεάζεται από τους μηχανισμούς μεταφοράς.
- Στρογγυλότητα: αντιπροσωπεύει τον βαθμό τριβής των κόκκων (μεγάλη στρογγυλότητα υποδεικνύει ότι ο κόκκος έχει υποστεί μεγάλη τριβή)
- Τάξη: αντιπροσωπεύει την διευθέτηση στον χώρο των κόκκων και σχετίζεται με τα διαστήματα ανάμεσα στους κόκκους

Ο ιστός των κλαστικών ιζημάτων αναφέρεται στον προσανατολισμό των κόκκων και είναι ισοτροπικός ή στρωσιγενής ανάλογα με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας των υλικών (1).





Εικόνα 3. Τυπική δομή ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα αποτελούνται από συνδετικό υλικό και κόκκους. Το συνδετικό υλικό προέρχεται από της διάλυση ορυκτών από το νερό. Το διαλυμένο υλικό μεταφέρεται στους πόρους (διάκενα μεταξύ των κόκκων) του κλαστικού ιζήματος και με σταδιακή αφυδάτωση εναποτίθεται άμορφο συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων, το οποίο στη συνέχεια και με τη διαδικασία γήρανσης κρυσταλλώνεται (1).

Η αντοχή και ανθεκτικότητα του λίθου εξαρτάται από την σύνθεση του συνδετικού υλικού και το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει (1):

- Πυριτικό συνδετικό υλικό: Συνήθως περιέχει λεπτοκρυσταλλικό χαλαζία. Τα πετρώματα με πυριτικό συνδετικό υλικό παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές, ιδιαίτερα όταν πληρωθούν όλοι οι πόροι και δεν δημιουργείται στρώμα αργίλου γύρω από τους κόκκους
- Ανθρακικό συνδετικό υλικό: Το πλέον διαδεδομένο στα ιζηματογενή πετρώματα με μορφή κυρίως ασβεσίτη και δολομίτη. Παρουσιάζει ικανοποιητική ανθεκτικότητα
- Σιδηροξείδια και υδροξείδια: Συνδετικό υλικό από λειμωνίτη ή αιματίτη. Παρουσιάζει ελάχιστη ανθεκτικότητα.
- Αργιλικό συνδετικό υλικό: Ιδιαίτερα διαδεδομένο. Ικανοποιητική συμπεριφορά σε ξηρά κλίματα και ελάχιστη αντοχή στα υγρά λόγω εξαλλοίωσης, διόγκωσης, κ.α.

Τα κυριότερα ιζηματογενή πετρώματα είναι τα ακόλουθα (2) (3) (4):

- Κροκαλοπαγή: Συμπαγή πετρώματα που σχηματίζονται από συγκόλληση κροκάλων (αποστρογγυλεμένα θραύσματα πετρωμάτων) διαφόρων μεγεθών και χρωμάτων που συνδέονται (συχνά ισχυρά) μεταξύ τους με συνδετικό υλικό που αποτελείται από μικρούς κόκκους και άμμο.
- Λατυποπαγή: Ιζηματογενή πετρώματα από χονδρόκοκκα ή μεσόκοκκα γωνιώδη θραύσματα.
- Ψαμμίτης: Συμπαγές πέτρωμα που προκύπτει από διαγένεση της άμμου και αποτελείται από κόκκους μεγέθους άμμου, κυρίως χαλαζία, αστρίων, μοσχοβίτη, αλλά συχνά και ασβεστίτη, μαρμαρυγία και κεροσίλβη.
- Πηλόλιθος: Το αφθονότερο κλαστικό ιζηματογενές πέτρωμα στην επιφάνεια της Γης. Αποτελείται από αργιλικά ορυκτά, χαλαζία, αστρίους, ασβεστίτη και οργανική ύλη. Το μέγεθος των συστατικών του κυμαίνεται από 1/250 έως 1/16 mm.
- Αργίλος: Κλαστικό ίζημα που αποτελείται κυρίως από ορυκτά της αργίλου (καολίνης, μοντμοριλλονίτης, ιλλίτης) και χλωρίτη. Το μέγεθος των κόκκων των ορυκτών είναι μικρότερο των 1/500 mm. Συνήθως η άργιλος έχει χαλαρή έως ημισυμπαγή υφή. Η διαγένεση της αργίλου οδηγεί στη σχιστή άργιλο ενώ η μεταμόρφωση σε αργιλικό σχιστόλιθο.
- Μάργα: Ιζηματογενής σχηματισμός που χημικά και ορυκτολογικά κυμαίνεται μεταξύ ασβεστόλιθους και αργίλου.

### Χημικά ιζήματα

Τα χημικά ιζήματα είναι το αποτέλεσμα απόθεσης ορυκτών από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διαδικασίες (π.χ. εξάτμιση νερού). Στη φύση η διαφοροποίηση μεταξύ κλαστικών και χημικών ιζημάτων δεν είναι εύκολη. Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες έχουν συνήθως προσμίξεις ενώ αναμιγνύονται με άργιλο σε διάφορες αναλογίες (1).

Τα κυριότερα χημικά ιζηματογενή πετρώματα είναι τα ακόλουθα (2) (3) (4):

- Ασβεστόλιθος: Ο ασβεστόλιθος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο πέτρωμα στην Ελλάδα και αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ) με λιγότερο από 5% αργιλικές προσμίξεις. Η απόθεση του ασβεστίτη είναι είτε χημική, π.χ. καθίζηση λόγω κορεσμού στο υδατικό διάλυμα, είτε βιογενής από τα σκελετικά στοιχεία ζωικών ή φυτικών οργανισμών. Οι ασβεστόλιθοι έχουν μεγάλο εύρος χρώματα και σύστασης που εξαρτώνται από την διαδικασία σχηματισμού τους.
- Δολομίτης: Πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , και σχηματίζεται όταν ένα μέρος Ca του ασβεστίτη αντικατασταθεί από Mg (δολομιτίωση). Οι δολομίτες σχηματίστηκαν κατά την Παλαιοζωική περίοδο, αντίθετα από τους ασβεστόλιθους που είναι πιο πρόσφατοι. Παρουσιάζουν σακχαροκοκκώδη μορφή και είναι σκληρότεροι, βαρύτεροι

και πιο ψαθυροί από τους κλασσικούς ασβεστόλιθους. Υπάρχουν όλα τα ενδιάμεσα πετρώματα μεταξύ ασβεστόλιθου και δολομίτη.

- Τραβερίτης: Πέτρωμα ανθρακικό, με ανοιχτό, καστανοκίτρινο χρώμα και πορώδη υφή. Είναι προϊόν χημικής ζηματοποίησης κυρίως σε πηγές. Το πορώδες οφείλεται στην απόθεση  $\text{CaCO}_3$  γύρω από φυτικά μέρη (τα οποία απορροφούν  $\text{CaCO}_2$  και μειώνουν την διαλυτότητα του στο νερό), τα οποία μετά την αποσύνθεση τους απομακρύνονται και αφήνουν τους πόρους στο πέτρωμα. Στη Β. Ελλάδα τραβερίνες υπάρχουν στην περιοχή της Έδεσσας-Νάουσας και Σκρα Κιλκίς. Οι ιταλικοί τραβερίνες από το Τινολί ήταν συνηθισμένο δομικό υλικό στην αρχαία Ρώμη (Κολοσσαίο, κ.α.)
- Όνυχας-μάρμαρο (αλάβαστρο): Ανακρυσταλλωμένη ποικιλία τραβερίτη, λεπτόκοκκη και διαφανής με απαλούς τόνους χρώματος (πράσινο, κρεμ, χρυσό-καφέ) που οφείλεται στην ύπαρξη σιδήρου και στους διαφόρους βαθμούς οξείδωσης. Το γεγονός ότι λεπτές τομές του είναι διαφανείς, επέτρεψε την χρήση του όνυχα-μαρμάρου σαν υποκατάστατο υαλοπινάκων, κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου. Για παράδειγμα, τα παράθυρα στον ναό της Αγίας Σοφίας είναι από όνυχα-μάρμαρο.

### Οργανικά ή βιογενή ιζήματα

Τα πιο γνωστά οργανικά ή βιογενή ιζήματα είναι τα εξής (1):

- Οργανογενείς ασβεστόλιθοι: Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί, παραλαμβάνουν από το νερό το  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  και σχηματίζουν προστατευτικά κελύφη και όστρακα. Με τον θάνατο των οργανισμών αυτών τα ασβεστολιθικά τους μέρη συσσωρεύονται στο πυθμένα και σχηματίζουν ασβεστόλιθους ιδιαίτερων τύπων. Τέτοιοι ασβεστόλιθοι είναι ο κογχυλιογενής και ο κοραλλιογενής ασβεστόλιθος.
- Κιμωλία: Η κιμωλία (κρητίς) είναι λευκό, λεπτομερές, στιφρό, ασβεστολιθικό πέτρωμα που σχηματίζεται από λείψανα τρηματοφόρων. Παρουσιάζει μια σειρά ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όπως λευκό χρώμα, υψηλό πορώδες, χαμηλές τιμές αντοχών και εύκολη τριβή.
- Κερατόλιθοι: Οι κερατόλιθοι είναι σκληρά, συμπαγή πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από κρυπτοκρυσταλλικό και άμορφο διοξείδιο του πυριτίου ενώ υπάρχουν και ξένες προσμίξεις αιματίτη, ασβεστίτη, και αργλικών ορυκτών. Οι κερατόλιθοι είναι σχετικά ανθεκτικοί στην φθορά, τουλάχιστον σε σχέση με τον ασβεστόλιθο.

### 1.1.3 Μεταμορφωμένα πετρώματα

Μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τα πετρώματα τα οποία προκύπτουν από άλλα προϋπάρχοντα μετά από ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές χωρίς

όμως να υποστούν τήξη (3) (4). Τα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα υπόκεινται σε αυξημένες πιέσεις και θερμοκρασίες, και στην δράση θερμών διαλυμάτων και αερίων όταν βρεθούν λόγω γεωλογικών διεργασιών σε μεγάλα βάθη (π.χ. λόγω εναπόθεσης πάνω από αυτά νέων ιζηματογενών πετρωμάτων ή λόγω μετακινήσεων των γεωλογικών πλακών) και ανακρυσταλλώνονται σε πιο σταθερές ορυκτές φάσεις. Αναπτύσσονται έτσι νέα ορυκτά που χημικά προσομοιάζουν το μητρικό υλικό αλλά είναι πιο σταθερά στις νέες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διαδικασία είναι αργή και συχνά λαμβάνουν χώρα αναδιπλώσεις (λόγω κίνησης των μαζών). Η θερμότητα που οφείλεται στην γειννίαση με πυριγενείς μάζες, ή στη γεωθερμική δραστηριότητα, επιφέρει πλαστικότητα στα πετρώματα, επιτρέποντας την μοριακή διάχυση από το ένα στρώμα στο άλλο, διαδικασία που διαρκεί εκατομμύρια χρόνια.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν συνήθως σχιστοφυή ιστό ο οποίος είναι αποτέλεσμα της στρωσιφυούς συγκέντρωσης ορυκτών στα πετρώματα (φυλλόμορφα και ινόμορφα). Τα αρχικά πετρώματα από τα οποία προέρχονται τα μεταμορφωμένα ονομάζονται πρωτόλιθοι. Όταν οι πρωτόλιθοι είναι πυριγενή πετρώματα το μεταμορφωμένο πέτρωμα παίρνει το πρόθεμα ορθο-, ενώ αντίστοιχα όταν οι πρωτόλιθοι είναι ιζηματογενείς το μεταμορφωμένο πέτρωμα παίρνει το πρόθεμα παρα-

Σε σχέση με τις αλλαγές στον ιστό, την ορυκτολογική και την χημική σύσταση που υπόκεινται τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζονται οι ακόλουθες μεταμορφώσεις (4):

- **Ισοφασική:** Μεταβολή μόνο του ιστού του προϋπάρχοντος πετρώματος. Για παράδειγμα, ο γρανίτης (ολοκρυσταλλικός) μεταμορφώνεται σε γνεύσιο (σχιστοφυής) περιέχοντας τα ίδια ορυκτά.
- **Αλλοφασική:** αλλαγή της ορυκτολογικής σύστασης. Για παράδειγμα η άργιλος (αργιλικά ορυκτά) μεταμορφώνεται σε γνεύσιο (χαλαζίας, άστριοι, μαρμαρυγίες)
- **Ισοχημική:** η χημικά σύσταση του πετρώματος παραμένει η ίδια. Για παράδειγμα, ο ασβεστόλιθος (περιέχει ασβεστίτη) μεταμορφώνεται μέσω ανακρυστάλλωσης του ασβεστίτη σε μάρμαρο ( ίδια ορυκτολογική και χημική σύνθεση)
- **Αλλοχημική:** Αλλαγή της χημικής σύστασης του πετρώματος. Για παράδειγμα μεταμόρφωση ασβεστόλιθου σε skarn (ασβεστοπυριτικά ορυκτά)

Ανάλογα με την ένταση της δράσης των παραγόντων μεταμόρφωσης (πίεση, θερμοκρασία, θερμά διαλύματα και αέρια ) υπάρχουν οι ακόλουθοι βαθμοί μεταμόρφωσης:

- Χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση
- Μέσου βαθμού μεταμόρφωση
- Υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης

Τα κυριότερα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τα εξής (1):

- **Μάρμαρο:** Πρόκειται για μονόμεικτο πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη, προϊόν ανακρυστάλλωσης ασβεστόλιθων. Έχει σκληρότητα 3

κατά Mohs, και ειδικό βάρος  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . Εκτός από τον ασβεστίτη το μάρμαρο μπορεί να περιέχει δολομίτη, ορυκτό σκληρότερο (3.5-4 κατά Mohs) και βαρύτερο ( $2.9 \text{ g/cm}^3$ ). Η παρουσία στο δολομίτη καθιστά την κατεργασία του μαρμάρου πιο δύσχερη και επιταχύνει την φθορά του. Επίσης, πολύ συχνά περιέχει και άλλες προσμίξεις ( αιματίτης, σιδηροπυρίτης, κ.α.) που διασχίζουν με την μορφή φλεβών την μάζα του μαρμάρου. Τα μάρμαρα διακρίνονται σε λεπτοκοκκώδη (διάμετρος κρυστάλλου ασβεστίτη  $d = 0.01-0.005 \text{ mm}$ ), μεσοκοκκώδη ( $d=0.6-2\text{mm}$ ) και χονδροκοκκώδη ( $d=2-6\text{mm}$ ) ανάλογα με το μέγεθος των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και ανθεκτικότητα στους παράγοντες φθοράς, εξαιτίας της μικροδομής που παρουσιάζει (περίπου 0.3%). Ωστόσο, καταστρέφεται εύκολα από φωτιά όπως και οι κοινοί ασβεστόλιθοι, γιατί περίπου στους  $900^\circ\text{C}$ , αποσυντίθεται το ανθρακικό ασβέστιο σε  $\text{CaO}$  και  $\text{CO}_2$ . Το χρώμα του μπορεί να είναι λευκό, γκρι, ροζ ή πράσινο, με διάφορες μπάντες και φλέβες. Τα πιο γνωστά ελληνικά μάρμαρα είναι το μάρμαρο Πάρου και το Πεντελικό μάρμαρο.

- Γνεύσιος: Πέτρωμα με γρανιτική όψη, μεσόκοκκο αλλά με έντονη παράλληλη διεύθυνση των κόκκων και συγκέντρωση των ορυκτών σε ζώνες. Χαρακτηρίζεται από έντονη σχιστότητα. Τα κυριότερα συστατικά του είναι χαλαζίας, αστρίοι και μαρμαρυγίες, αλλά μπορεί να υπάρχουν και άλλα ορυκτά όπως κεροστίλβη, κ.α.. Παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή σε συμπίεση όταν η φόρτιση γίνει κάθετα στον άξονα των κόκκων αλλά στερεί όταν η φόρτιση γίνει παράλληλα με τους κόκκους. Μπορεί να προέλθει είτε από γρανίτη (όρθο-) είτε από αργιλικά πετρώματα (παρα-).
- Σχιστόλιθος: Παρόμοιος με τον γνεύσιο αλλά είναι μικρότερου βαθμού μεταμόρφωσης. Περιέχει μικρότερα ποσοστά αστρίων και χαλαζία, αλλά μεγαλύτερες ποσότητες μαρμαρυγιών και κεροστίλβης. Υπόκειται σε εύκολη διάτμηση με χρήση σχετικά μικρού φορτίου.
- Σερπεντίτης: Συχνά αποκαλείται και σερπεντίτης-μάρμαρο. Αποτελείται από το ορυκτό σερπεντίτη ( $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ), ενώ περιέχει και τάλκη, αμφίβολο και χλωρίτη. Το πέτρωμα έχει πράσινο χρώμα με λευκές φλέβες ασβεστίτη ή ανθρακικού μαγνησίου.

## 1.2 Ιδιότητες των Λίθων

### Πορώδες

Οι πόροι ενός πορώδους μέσου εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία ως προς το σχήμα το μέγεθος και τον τρόπο της μεταξύ τους σύνδεσης (1).

Πόροι	Μέγεθος πόρων ( $\mu\text{m}$ )
Μικροπόροι	<0.002
Μεσοπόροι	0.002-0.05
Μακροπόροι	>0.05

Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός των πόρων ως προς το μέγεθός τους κατά DIN 66131

Αναλόγως με το σχήμα που παρουσιάζουν οι πόροι γίνεται η παρακάτω διάταξη:

- Κλειστοί χαρακτηρίζονται οι πόροι που δεν έχουν καμιά σύνδεση μεταξύ τους και δεν είναι διαπερατοί από κάποιο ρευστό.
- Ως νεκρού άκρου χαρακτηρίζονται οι ανοιχτοί πόροι, που έχουν μια είσοδο, αλλά δεν είναι διαπερατοί. Έτσι κάποιο ρευστό μπορεί να εισέλθει σε αυτούς, αλλά είναι δύσκολο να εξέλθει.
- Μελανοδοχεία ονομάζονται οι πόροι με περισσότερα του ενός ανοίγματα, που όμως είναι πολύ στενά (λαιμοί), με αποτέλεσμα να είναι δύσκολα διαπερατοί από ρευστά.
- Τέλος μια άλλη κατηγορία πόρων είναι τα κανάλια (πόροι διαπερατοί από ρευστά) και τα τηλεσκόπια, των οποίων η διαπερατότητα είναι μεταξύ αυτής των καναλιών και των μελανοδοχείων.

Η πιο γνωστή μακροσκοπική ιδιότητα ενός πορώδους δομικού λίθου είναι το πορώδες,  $P$ , το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του κενού χώρου  $V_p$  ( του όγκου δηλαδή των πόρων) προς το ολικό όγκος  $V_s$ , ενός δείγματος του λίθου (1) (5):

$$P = \frac{V_p}{V_s}$$

Το  $V_p$  αναφέρεται στο σύνολο των πόρων, δηλαδή και στους ανοιχτούς και στους κλειστούς πόρους, ανεξάρτητα αν αυτοί συνδέονται. Το πορώδες αυτό ονομάζεται απόλυτο ή ολικό. Το πορώδες θα ονομάζεται ανοιχτό όταν, ο όγκος  $V_p$  αντιστοιχεί στον όγκο μόνο των ανοιχτών πόρων και κλειστό, όταν ο όγκος  $V_p$  ισούται με τον όγκο μόνο

των κλειστών πόρων. Είναι φανερό, ότι το άθροισμα του ανοιχτού και κλειστού πορώδους είναι ίσο προς το ολικό πορώδες (6).

Παρά το γεγονός ότι οι πόροι νεκρού άκρου αποτελούν ανοιχτούς πόρους, συνεισφέρουν αμελητέα στη ροή ενός ρευστού μέσα από αυτούς. Έτσι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εκείνοι οι πόροι, που συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ένα ρευστό να μπορεί να κινηθεί μέσα από αυτούς και να διαπεράσει το δείγμα από άκρο σε άκρο, στο σύνολο του όγκου του υλικού. Οι πόροι αυτοί συνιστούν το ενεργό ή συνεκτικό πορώδες, το οποίο αποτελεί ένα μέρος του ανοιχτού πορώδους (1).

Η πλήρης και λεπτομερειακή περιγραφή της πορώδους δομής ανομοιογενών υλικών όπως οι δομικοί λίθοι είναι ουσιαστικά ανέφικτη, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί με τη βελτίωση των χρησιμοποιούμενων τεχνικών. Στην πράξη προκειμένου να αναλυθεί η πορώδης δομή ενός δομικού υλικού, γίνεται η παραδοχή, ότι πρόκειται για ομοιογενές και ισότροπο υλικό (1).

Οι πειραματικές μέθοδοι που επιλέγονται συνήθως για τον προσδιορισμό του πορώδους ενός λίθου, ανάλογα με το εύρος και την κατανομή των πόρων του είναι (6):

- Η ποροσιμετρία υδραργύρου
- Η ρόφηση-εκρόφηση αζώτου (BET)
- Η μικροσκοπική εξέταση τυχαίων (ποσοτική στερεολογία) ή διαδοχικών (σειριακή τομογραφία) επίπεδων τομών ενός πορώδους δείγματος.

## Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι μια ιδιότητα του υλικού η οποία περιγράφεται με διάφορες μορφές (5). Ως πυκνότητα ορίζεται ο λόγος μάζας προς όγκου του υλικού. Ανάλογα με τον ορισμό του όγκου του και τι αυτός περιλαμβάνει, περιγράφονται αντίστοιχα οι διάφοροι τύποι πυκνότητας. Όσον αφορά τους δομικούς λίθους, οι ορισμοί της πυκνότητας που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι οι ακόλουθοι (3) (5) (7) (8):

- Πραγματική πυκνότητα: Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ενός δείγματος προς τον πραγματικό όγκο του δείγματος (χωρίς τα κενά):

$$\rho = W/V_s \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

- Φαινόμενη πυκνότητας: Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ενός δείγματος λίθου προς τον φαινόμενο όγκο του δείγματος (μαζί με τα κενά)

$$\rho = W/V_{app} \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

## Διαπερατότητα

Διαπερατότητα είναι η ιδιότητα των πορωδών υλικών που έχει να κάνει με το κατά πόσο μπορούν να διαπεραστούν από αέρια λόγω διαφοράς πίεσης. Ο βασικός νόμος

που διέπει τον υπολογισμό της διαπερατότητας είναι ο νόμος του Darcy σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής ενός ρευστού είναι απευθείας ανάλογος της διαφοράς πίεσης που προκαλεί.

Αν ρευστό όγκου  $V$  ρέει σε χρόνο  $t$  διαμέσου επιφάνειας με διατομή  $A$ , σε πάχος διαπερνόμενης επιφάνειας  $h$ , και  $\Delta p = p_{\text{εισ}} - p_{\text{εξ}}$  ( $p_{\text{εισ}}$ : πίεσης του αερίου κατά την είσοδο,  $p_{\text{εξ}}$ : πίεση του αερίου κατά την έξοδο) η διαφορά πίεσης του αερίου, η διαπερατότητα  $G_d$  για στρωτή ροή υπολογίζεται (1):

$$G_d = \frac{h}{A\Delta p} * \frac{V}{t}$$

Πρέπει να σημειωθεί βέβαια, ότι η διαπερατότητα αποτελεί μέτρο της υδραυλικής αγωγιμότητας ενός πορώδους μέσου σε μονοφασική ροή ενός νευτώνειου ρευστού και όχι μόνο αερίου. Ωστόσο, για τη μέτρηση της διαπερατότητας προτιμάται η χρήση αερίων, επειδή τα υγρά μερικές φορές μεταβάλλουν την πορώδη δομή και επομένως τη διαπερατότητα, προκαλώντας αναδιάταξη μερικών σωματιδίων, φούσκωμα ορισμένων υλικών όπως τα αργιλικά, χημικές αντιδράσεις κ.λπ. (3).

### **Υδατοαπορροφητικότητα**

Η υδατοαπορροφητικότητα ενός λίθου εξαρτάται από:

- Το πορώδες. Όσο πιο μεγάλου πορώδες έχει ο λίθος τόσο πιο μεγάλη απορροφητικότητα παρουσιάζει
- Την μορφή και το μέγεθος των πόρων που παρουσιάζει ο λίθος. Πόροι μεγάλοι και ευθύγραμμοι επιτρέπουν εύκολα την είσοδο του νερού. Αντίθετα πόροι πολύ μικρής διαμέτρου, με δαιδαλώδη διάταξη και κλειστοί πόροι (που δεν συγκοινωνούν μεταξύ τους) δυσχεραίνουν τον εμποτισμό των λίθων από το νερό.

Λίθοι που παρουσιάζουν μικρή υδατοαπορροφητικότητα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην διαβρωτική δράση του νερού.

### **Σκληρότητα**

Η σκληρότητα ορίζεται ως η αντίσταση του λίθου σε χάραξη ή λείανση. Η σκληρότητα δεν είναι εγγενής ιδιότητας ενός υλικού, καθώς η τιμή της εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Οι δοκιμές σκληρότητας είναι απλά εμπειρικά τεστ που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και χαρακτηρισμό των υλικών (9).



### Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής εκφράζει το πόσο επιρρεπές είναι ένα υλικό στη μεταβολή του μεγέθους του με μεταβολή της θερμοκρασίας. Σε κάθε θερμοκρασία ορίζεται ως συντελεστή γραμμικής διαστολής (1):

$$a_l = \frac{dl}{l\Delta T}$$

Όπου  $l$  είναι το μήκος του δοκιμίου λίθου, και  $T$  η θερμοκρασία. Για περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών είναι δυνατό να οριστεί μια μέση τιμή:

$$\bar{a}_l = \frac{\Delta l}{l\Delta T}$$

### Μηχανικές αντοχές λίθων

Οι μηχανικές δοκιμές χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας των λίθων, και την αντοχή τους σε θλίψη ή εφελκυσμό, και στην δημιουργία καμπύλων τάσης-καταπόνησης, οι οποίες και παρέχουν πλήθος πληροφοριών όσον αφορά την μηχανική τους συμπεριφορά (1).

### 1.3 Ταυτοποίηση και διάγνωση φαινόμενων φθοράς των λίθων

Η φθορά πρόκειται για την απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών κ.α.) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής κ.α.), της συνοχής, των διαστάσεων και της αισθητικής των υλικών.

Τα φαινόμενα φθοράς κατατάσσονται γενικά ως ακολούθως (10):

- Μηχανική ή φυσική φθορά: Αφορά σε μηχανική χαλάρωση των δομών και διαχωρισμό των συστατικών του υλικού λόγω θλιπτικών, εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων, αναπτυσσόμενων δυνάμεων εντός του υλικού λόγω ανισοτροπίας ή διαδικασιών που σχετίζονται με την παρουσία διαλυτών αλάτων και των κύκλων ύγρανσης-ψύξης. Παράδειγμα φυσικής φθοράς είναι η απολέπιση λίθου λόγω δράσης αλάτων.
- Χημική φθορά: Περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο υλικό υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων ή λόγω θερμοδυναμικής αστάθειας ορισμένων συστατικών του υλικού. Παράδειγμα χημικής φθοράς είναι η επίδραση της όξινης βροχής σε δομικά υλικά.
- Βιολογική φθορά: Αφορά στην επίδραση διαφόρων οργανισμών στα υλικά και σχετίζεται με τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες φθοράς.

Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στη διεπιφάνεια μεταξύ του περιβάλλοντος και των υλικών ή και στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών και είναι συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων (10).

#### **Ενδογενής παράγοντες φθοράς**

Οι παράγοντες που αφορούν το υλικό είναι οι ακόλουθοι (10):

- Είδος δομικού υλικού: Τα κύρια δομικά υλικά (μέταλλα, πέτρα, κονιάματα, κεραμικά και σύνθετα υλικά) συμπεριφέρονται διαφορετικά σε ίδιες περιβαλλοντικές φορτίσεις. Γενικά τα μέταλλα είναι πιο επιρρεπή σε συγκεκριμένους τύπους μηχανικής φθοράς όπως η τριβή και η κόπωση, και χημικής φθοράς όπως η ανάπτυξη σκωρίας. Αντίθετα, τα σχετικά ανομοιογενή – στην μακροδομή και μικροδομή τους καθώς και στην κατανομή των ιδιοτήτων ) δομικά υλικά όπως η πέτρα, τα κονιάματα και τα κεραμικά είναι πιο επιρρεπή σε διαφορετικού τύπου φθορές, όπως η δράση των διαλυτών αλάτων και των κύκλων ύγρανσης-ξήρανσης παρά σε φθορές που προαναφέρθηκαν για τα μέταλλα.
- Ιδιότητες υλικού: Οι ιδιότητες του υλικού επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από συγκεκριμένους εξωγενείς παράγοντες. Για παράδειγμα, οι θερμικές ιδιότητες του τσιμέντου είναι δυνατόν να μεταβληθούν μετά από την αύξηση του πορώδους, αποτέλεσμα της δημιουργίας μικρορωγμών και της αποκόλλησης των κόκκων, το οποίο συνοδεύεται με μείωση της

μηχανικής αντοχής. Είναι σημαντικό λοιπόν, να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του εφαρμοζόμενου εξωγενή παράγοντα και της ιδιότητας η οποία δύναται να μεταβληθεί, ώστε η συγκεκριμένη ιδιότητα να καταστεί εν τέλει μέτρο αξιολόγησης της φθοράς του υλικού.

- **Κατανομή στη μάζα:** Η δομή του υλικού σε διάφορες κλίμακες επηρεάζει άμεσα την επιρροή του υλικού σε εξωγενείς παράγοντες. Η μικροδομή, ιδιαίτερα, η οποία φέρει μεγάλη ευθύνη για τις ιδιότητες των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξάπλωση της φθοράς στο υλικό. Τα όρια της κλίμακας για το διαχωρισμό μεταξύ της μακροδομής και της μικροδομής εξαρτώνται από τη μετρούμενη ιδιότητα.
- **Προέλευση του υλικού και απόληψής του:** Αδιαμφισβήτητα, η σύσταση και η μικροδομή του υλικού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από της προέλευσή του. Τα παραδοσιακά δομικά υλικά όπως η πέτρα και το μάρμαρο εξαρτώνται εξίσου από την προέλευση τους. Γενικά, τόσο στη φάση σχεδιασμού, όσο και στις φάσεις της αποτίμησης της φθοράς και αποκατάστασης του υλικού, είναι σημαντική η γνώση της προέλευσης του υλικού και ο τρόπος απόληψής του καθώς και πως οι δύο αυτοί ενδογενείς παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες και τη μακροδομή του υλικού, ενώ η προηγούμενη εμπειρία μπορεί να προσφέρει ειδικευμένες τεχνικές αποκατάστασης των υλικών αυτών.
- **Τεχνολογία παραγωγής:** Η τεχνολογία παραγωγής είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να μεταβάλλει σημαντικά τη μικροδομή όσο και τις δυνατότητες των δομικών υλικών. Η τεχνολογία παραγωγής αποτελεί μέρος της «ιστορίας» του υλικού και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα στάδια της ζωής του
- **Συμβατότητα υλικού:** Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή να είναι συμβατά μεταξύ τους. Η συμβατότητα μπορεί να αφορά διάφορους παράγοντες, όπως η χημική σύσταση, ο συντελεστής θερμικής διαστολής και η πυκνότητα. Η συμβατότητα των υλικών καθορίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή συμπεριφορά των υλικών, ενώ είναι δυνατό να οδηγήσει στην αστοχία τους, στην μείωση της διάρκειας ζωής τους ή στην εκλεκτική ένταση της φθοράς σε ένα από τα υλικά του δομικού συστήματος.

### **Εξωγενής παράγοντες φθοράς**

Πρόκειται για τους παράγοντες που αφορούν στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα έχει να κάνει με το είδος το περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων καθώς και με το γεωτεχνικό πλαίσιο θεμελίωσης. Αναλυτικότερα έχει να κάνει με του εξής παράγοντες (10):

- **Γενικά Χαρακτηριστικά κλίματος:** Η κατανομή, ο προσανατολισμός και η ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων ανάλογα με τη θέση του υλικού στην κατασκευή δρα, συνήθως έμμεσα στην αστοχία και φθορά των υλικών.

Σε γενικές γραμμές, η ένταση της φθοράς των δομικών υλικών αυξάνεται με αύξηση της έντασης, της διάρκειας και της συχνότητας της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων.

- **Μικροκλίμα:** Ο Προσανατολισμός των υλικών στο πλαίσιο του οικοδομήματος καθώς και ο προσανατολισμός και η κλίμακα του ίδιου του οικοδομήματος αποτελούν σημαντικό παράγοντα φθοράς. Παράγοντες η μορφολογία των επιφανειών και ο τρόπος προσβολής τους από τη βροχή παίζουν καίριο ρόλο στην ταχύτητα διάβρωσης των υλικών. Είναι επίσης δυνατό, στο ίδιο υλικό να παρατηρούνται διαφορετικού τύπου φθορές ανάλογα με τη θέση του στην κατασκευή, όπως για παράδειγμα φθορά λόγω υγρασίας στα κατώτερα στρώματα της τοιχοποιίας και φθορά λόγω κρυστάλλωσης των αλάτων στα ανώτερα στρώματα.
- **Είδος περιβαλλοντικών παραγόντων και φορτίσεων:** Το είδος των περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως για παράδειγμα η βιομηχανική, αστική ή θαλασσινή ατμόσφαιρα καθορίζουν αντίστοιχα και τους μηχανισμούς φθοράς στα δομικά υλικά. Την ίδια στιγμή, ο βαθμός και ο τρόπος πρόσβασης του νερού στο οικοδομήμα αποτελεί σημαντικό παράγοντα του βαθμού διάβρωσης. Η έντονη βροχόπτωση, η ύπαρξη αερολυμάτων, υψηλών ποσοστών αλάτων ή ανερχόμενης υγρασίας μπορεί να οδηγήσουν γρήγορα στην αστοχία του.
- **Βιολογικοί παράγοντες:** Η μικροπανίδα και η χλωρίδα της περιοχής μπορεί να επηρεάσουν έντονα την φθορά της κατασκευής
- **Συνθήκες χρήσης δομικού υλικού:** Τα δομικά υλικά έχουν συχνά διαφορετικές χρήσεις, εξωτερικές ή εσωτερικές, και το ίδιο υλικό δέχεται την επίδραση διαφορετικών παραγόντων φθοράς στην ίδια κατασκευή.
- **Είδος μηχανικών φορτίσεων:** Το είδος των μηχανικών φορτίσεων δηλαδή, αν εφαρμόζονται εφελκυστικές, διατμητικές ή θλιπτικές τάσεις μέσω θερμοκρασιακών μεταβολών, διόγκωσης υλικού λόγω χημικής αντίδρασης, κρυστάλλωσης αλάτων και σχηματισμό παγετού, σεισμικών δονήσεων κ.α. καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τους μηχανισμούς φθοράς των δομικών υλικών.

### 1.3.1 Φαινόμενα φθοράς

Ανάλογα με τις τάσεις που ασκούνται, υπάρχουν φυσικά, χημικά ή φυσικοχημικά φαινόμενα. Η ένταση και η ταχύτητα τους εξαρτώνται από το βραδύτερο στάδιο του πολύπλοκου πραγματικού μηχανισμού και τις οριακές συνθήκες εξέλιξης του, όπως διαμορφώνονται στα ανισότροπα πορώδη μέσα που είναι τα δομικά υλικά.

Διεργασία φθοράς	Κύρια φαινόμενα φθοράς	Δράση
Κύκλοι ξήρανσης-ύγρυνσης Παγετός Θερμικά σοκ Κρυστάλλωση αλάτων Επίδραση ανέμου	Φυσικές διεργασίες	Φυσικές δράσεις που προάγουν την αποσάθρωση των υλικών, όπως απόσπαση κόκκων, διάβρωση εκτριβής, ρήξη της συνέχειας, ρηγμάτωση, κ.α.
Υδρόλυση Διάλυση Οξειδωση Χηλική συμπλοκοποίηση Θείωση	Χημικές και βιοχημικές διεργασίες	Κυρίως χημική αποσύνθεση και διάρρηξη των συνθετικών υλικών
Κρυστάλλωση αλάτων Ενυδάτωση Θείωση από ορισμένες συνθήκες	Φυσικοχημικές διεργασίες	Η αποσάθρωση των υλικών προκαλείται από συνδυασμένα φυσικά και χημικά φαινόμενα, όπως π.χ., οσμωτικές πιέσεις, πιέσεις κρυστάλλωσης, πιέσεις ενυδάτωσης και ηλεκτροχημικά δυναμικά

Πίνακας 2. Ταξινόμηση φαινομένων φθοράς στο επίπεδο της μακροκλίμακας

Η φθορά ανισότροπων-πορώδων μέσων, όπως τα δομικά υλικά, είναι μια δυναμική διεργασία, όπου η εντροπία του συστήματος αυξάνει με την αταξία των φάσεων. Όταν πρόκειται για ορυκτά, η διεργασία αυτή προκαλεί ρηγμάτωση του κρυσταλλικού πλέγματος, που, επιτρέποντας την διάχυση των ιόντων προς το περιβάλλον, οδηγεί στη δημιουργία νέων μορφωμάτων στην επιφάνεια. Οι νέες φάσεις βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που τις προκαλούν.

Η μελέτη της φθοράς γίνεται σε επίπεδο:

- Μακροκλίμακας, η οποία αναφέρεται στο είδος και την μορφολογία της διάβρωσης
- Μικροκλίμακας, η οποία αναφέρεται στην κινητική του φαινομένου και στην θερμοδυναμική του φαινομένου φθοράς

### 1.3.2 Παράγοντες φθοράς

#### Ατμόσφαιρα

Όλα τα δομικά υλικά, από τη στιγμή που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα υπόκεινται σε συνεχή φθορά, η οποία είναι αποτέλεσμα φυσικών, χημικών, μηχανικών και βιολογικών παραγόντων (11).

Ρύπανση της ατμόσφαιρας θεωρείται (10) (11):

- Η παρουσία μη φυσιολογικών προσμίξεων, ουσιών δηλαδή που δεν υπήρχαν στη φύση σε καθαρή κατάσταση και προστέθηκαν από ανθρώπινες δραστηριότητες
- Ή η αυξημένη μη φυσιολογική συγκέντρωση φυσιολογικών προσμίξεων, ουσιών δηλαδή που υπήρχαν στη φύση αλλά η συγκέντρωσή τους αυξήθηκε από τις ανθρώπινες δραστηριότητες

Ως ρυπαντές θεωρούνται οι ουσίες που προκαλούν αλλαγή στη σύσταση του φυσικού αέρα. Ωστόσο, όσον αφορά θέματα της διάβρωσης και προστασίας, ως ρυπαντής θεωρείται κάθε συστατικό της ατμόσφαιρας, σε περιεκτικότητα ιχνών, προερχόμενο από ανθρωπογενείς πηγές ή όχι, το οποίο μπορεί να βλάψει τα συνήθη δομικά υλικά (10) (11).

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας αναφέρεται κυρίως στην δράση (10) (11):

- Αέριων ρυπαντών όπως το SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> κ.α.:
- Σωματιδιακών ρυπαντών (αερολύματα)
- Οξινισμένων κατακρημνισμάτων

Η φθορά που οφείλεται στην ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι αποτέλεσμα συνεργατικής δράσης των παραπάνω ρυπαντών και συχνά είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι επιμέρους επιδράσεις, καθώς μεσολαβούν διάφορες φυσικές και χημικές διεργασίες, που οδηγούν στην παραγωγή δευτερογενών ρυπαντών

Οι ρυπαντές μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες (10) (11):

- Πρωτογενείς ρυπαντές, δηλαδή αυτοί που εκπέμπονται απευθείας από φυσικές ή ανθρώπινες πηγές
- Δευτερογενείς ρυπαντές, δηλαδή αυτοί που παράγονται στην ατμόσφαιρα με αντίδραση δύο ή περισσότερων πρωτογενών ρυπαντών ή από τα κανονικά συστατικά της ατμόσφαιρας

Υπάρχουν πολλές χημικές δράσεις διαμέσου των οποίων οι πρωτογενείς ρύποι όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου μπορούν να μετατραπούν σε δευτερογενείς ρυπαντές, όπωςθειικό οξύ,θειικά ιόντα, νιτρικό οξύ και νιτρικά ιόντα (10) (11).

Η χημικά και ηλεκτροχημικά προσβολή της πέτρας εν είναι αρά εναπόθεση των ατμοσφαιρικών ρύπων στην επιφάνειας της και η ενεργοποίηση χημικών και ηλεκτροχημικών διαδικασιών. Η επιφανειακή εναπόθεση ρύπων γενικά αποδίδεται στη χημική εναπόθεση με καταβύθιση (10) (11).

Για την διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης της πέτρας και του σχηματισμού κρούστας, πρέπει να μελετηθεί η διεπιφάνεια πέτρας-ατμόσφαιρας, για να εκτιμηθεί η απόθεση ατμοσφαιρικών ρύπων και σωματιδίων, η συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνεια και στα ήδη εναποτεθέντα σωματίδια και τα χαρακτηριστικά των ρυπαντών που μεταφέρονται με καταβύθιση.

Οι κυριότερες πηγές προέλευσης στερεών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι η μετεωρική σκόνη και τα σωματίδια γήινης προέλευσης, θάλασσα, πυρκαγιές, διάβρωση εδάφους, ηφαιστειακές εκρήξεις, φυτά, ανθρώπινες δραστηριότητες.

Οι αέριοι ρυπαντές και τα αερολύματα, μεταφέρονται στις επιφάνειες των υλικών με τους ακόλουθους μηχανισμούς (10) (11):

- Απόθεση εν ξηρώ:

Ο μηχανισμός αυτός συνιστάται στην συσσώρευση στην επιφάνεια της πέτρας ρυπαντών, αέριας ή σωματιδιακής προέλευσης, που μεταφέρονται με τον αέρα και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των σωματιδίων.

Για ύλη με διαστάσεις μικρότερες από 0.1 μm, κοντά στην επιφάνεια η καθοριστική κίνηση είναι η μοριακή διάχυση ή το φαινόμενο Brown, αν πρόκειται για σωματίδια. Η εναπόθεση γίνεται ανεξάρτητα κλίσης και ατμοσφαιρικών συνθηκών και συγκρατούνται ικανοποιητικά με δυνάμεις Van der Waals.

Στα σωματίδια μεσαίων διαστάσεων 0.5-10 μm, ο ρόλος της τυρβώδους ροής κοντά στην επιφάνεια είναι σημαντικότερος από την κίνηση Brown.

Τα σωματίδια με διαστάσεις μεγαλύτερες των 20 μm αποτίθενται λόγω βαρύτητας, όταν ο αέρας δεν είναι σε κίνηση ή λόγω αδρανών συγκρούσεων. Η ικανότητα συλλογής εξαρτάται από το σχήμα, τη δομή της επιφάνειας και το σημείο συλλογής.

- Υγρή απόθεση:

Στην περίπτωση αυτή, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μεταφέρονται στην πέτρα διαλυμένοι στο νερό, μέσω των μετεωρικών κατακρημνισμάτων και της συμπύκνωσης που συμβαίνει στην επιφάνεια των μνημείων. Το νερό της βροχής διαλύει τα όξινα συστατικά της ατμόσφαιρας. Σε ατμόσφαιρα με ρύπους οι σταγόνες διαλύουν SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, στερεά σωματίδια θεικής σύστασης, NO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub>. Η απομάκρυνση του ρύπου από τη βροχή ελέγχεται από τους εξής παράγοντες:

- Την ένταση της βροχής και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων
- Την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης της ουσίας στην ατμόσφαιρα
- Την ταχύτητα πτώσης των σταγόνων και την απόσταση που διανύουν μέχρι να φθάσουν στην επιφάνεια της γης.

## Νερό

Το νερό αποτελεί πολύ σπουδαίο παράγοντα φθοράς στις κατασκευές, καθώς συμμετέχει με άμεσο ή έμμεσο τρόπο σε χαρακτηριστικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα το νερό κατά την κίνηση του μέσα στα δομικά υλικά και σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα που το περιβάλλει (10) (11):

- Ελέγχει τη μεταφορά, κρυστάλλωση, ανακρυστάλλωση και ενυδάτωση των αλάτων στα δομικά υλικά ενώ παράλληλα ευθύνεται για την ανάπτυξη ισχυρών οσμωτικών πιέσεων όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις
- Οι αέριοι ρύποι μεταφέρονται στο νερό με τη βροχή ή με συμπύκνωση για να σχηματίσουν όξινα διαλύματα ιδιαίτερα επικίνδυνα για τις πέτρες ανθρακικής σύστασης
- Πολλές αντιδράσεις στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της πέτρας μπορούν να λάβουν χώρα μόνο παρουσία νερού (ιονεναλλακτική εξαλλοίωση ορυκτών, υδρόλυση κ.α.). Οι δράσεις αυτές είναι κρίσιμες για τη διάβρωση των αργιλο-πυριτικών πετρωμάτων
- Μια μεγάλη κατηγορία διαβρωτικών φαινομένων ερμηνεύεται μέσω των κυκλικών μεταβολών της ατμοσφαιρικής υγρασίας, ιδιαίτερα παρουσία διαλυτών αλάτων. Επίσης η θιξοτροπία και η διόγκωση του πλέγματος ορισμένων αργίλων είναι φαινόμενα που σχετίζονται με τις αλλαγές της ατμοσφαιρικής υγρασίας
- Το νερό προκαλεί μηχανική φθορά όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 0°C, ένα φαινόμενο αρκετά περίπλοκο και ιδιαίτερα σοβαρό όσο η συχνότητα των κύκλων αυξάνει
- Φθορά μπορεί να προκληθεί επίσης και από ισχυρές καταιγίδες και χαλαζοπτώσεις
- Το σύνολο σχεδόν των βιολογικών δράσεων συμβαίνει μόνο παρουσία υγρασίας

Οι τρόποι μεταφοράς του εκρού στην πέτρα είναι από τις εξής πηγές (10) (11):

- Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- Τη συμπύκνωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας
- Με την τριχοειδή αναρρίχηση του εδαφικού νερού
- Με την απευθείας μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα
- Από τη χρήση νερού κατά τη διαδικασία καθαρισμού
- Από τις διαρροές των δικτύων αποχέτευσης και παροχέτευσης



### **Κρυστάλλωση αλάτων**

Τα διαλυτά άλατα που κυκλοφορούν μέσα στην πέτρα και στην επιφάνειά της είναι κυρίως θειικά, νιτρικά, ανθρακικά και χλωριούχα αλάλια και αλκαλικές γαίες. Η προέλευση του μπορεί να είναι από υπόγεια νερά από όπου ανεβαίνουν με τριχοειδή αναρρίχηση, από όξινους ατμοσφαιρικού ρυπαντές που προσβάλλουν την πέτρα και σχηματίζουν τα αντίστοιχα άλατα το ασβεστίου, από τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου και από επαφή με τσιμέντο που είναι σημαντική πηγή διαλυτών αλάτων (10) (11).

Η κίνησή τους μέσα στην πέτρα γίνεται μέσω των μηχανισμών της ιοντικής διάχυσης, της τριχοειδούς μεταφοράς, ή της ιοντικής όσμωσης διαπίδυσης. Τα υδατικά διαλύματα των αλάτων μετακινούνται με έναν από τους προηγούμενους μηχανισμούς προς την επιφάνεια της πέτρας, όπου γίνεται η εξάτμιση. Αποτέλεσμα της εξάτμισης είναι η κρυστάλλωση των αλάτων στους πόρους του υλικού. Μακροσκοπικά τα φαινόμενα διάβρωσης που έχουν ως αίτιο την κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων είναι εα εξής (10) (11):

- **Εξανθήσεις:** όταν η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από αυτή της εξάτμισης, τα άλατα κρυσταλλώνονται έξω από τους πόρους, σχηματίζοντας αποθέσεις στην εξωτερική επιφάνεια του πορώδους υλικού.
- **Κρυπτοεξανθήσεις:** όταν η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή της εξάτμισης, το υδάτινο μέτωπο υποχωρεί στο εσωτερικό της πέτρας και η κρυστάλλωση των αλάτων γίνεται μέσα στους πόρους.
- **Κυψέλωση:** Είναι μια ιδιαίτερη μορφή κρυπτοεξάνθησης, που εμφανίζεται σε περιοχές που εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους. Η επιφάνεια της πέτρα εκφυλίζεται με τη δημιουργία σπηλαιώσεων

### **Αποσάθρωση κονιαμάτων**

Η αποσάθρωση κονιαμάτων μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της τοιχοποιίας σε συνδυασμό με πλάγιες ωθήσεις. Έμφαση δίνεται στο 1/3 του ύψους της τοιχοποιίας όπου εντοπίζεται το μέγιστο ποσοστό υγρασίας και άρα διαλυτών αλάτων (12).

### **Ασύμβατα υλικά**

#### *Τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης*

Η χρήση τσιμέντου ως συνδετικού υλικού σε τοιχοποιίες, αν και εκτεταμένη στο παρελθόν, σήμερα αναγνωρίζεται ότι προκαλεί έντονα προβλήματα φθοράς, κυρίως λόγω ασυμβατότητας με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Τα κονιάματα τσιμέντου

παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας καθιστώντας τα πολύ δυνατά και άκαμπτα σε σχέση με τα παραδοσιακά κονιάματα στις ιστορικές τοιχοποιίες. Η χρήση του τσιμέντου ως υλικού αποκατάστασης διαταράσσει την μηχανική συμπεριφορά, στατική και δυναμική, της τοιχοποιίας, με κίνδυνο εμφάνισης διαφορικών φορτίσεων σε τμήματα της δομής και επακόλουθη αστοχία τους (10).

Τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν γενικότερα μεγάλο συντελεστή θερμική διαστολής, σχεδόν διπλάσιο της πέτρας, με αποτέλεσμα, σε κύκλους θέρμανσης - ψύξης, να ασκούνται μηχανικές τάσεις στα αυθεντικά υλικά που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία (ρηγμάτωση) (10).

Σε εφαρμογές αποκατάστασης ιστορικών τοιχοποιιών, η μικρή τιμή πορώδους και η σχετικά πυκνή δομή των τσιμεντιτικών κονιαμάτων δυσκολεύει την "αναπνοή" της τοιχοποιίας, δηλαδή την μεταφορά της υγρασίας στους κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης. Τα τσιμεντιτικά κονιάματα είναι φορέας διαλυτών αλάτων. Ο εκλεκτικός προσανατολισμός των διαλυτών αλάτων στα γειτονικά ιστορικά δομικά υλικά και η κρυστάλλωση τους κατά τη φάση της εξάτμισης οδηγούν σε άσκηση πιέσεων κρυστάλλωσης (10).

#### *Χρήση υλικών με ασύμβατη μικροδομή*

Η αντικατάσταση και συμπλήρωση φθαρμένων λιθοσωμάτων από συμπαγέστερους και μικρότερου πορώδους υγιείς λίθους, οδηγεί σε ένταση των φαινομένων φθοράς στη διεπιφάνεια παλαιού – νέου υλικού, λόγω π.χ. διαφορετικής πλέον μετακίνηση υγρασίας και κατ' επέκταση διαλυτών αλάτων (10).

#### **Θερμοκρασιακές μεταβολές**

Οι πέτρες αποτελούνται συνήθως, από περισσότερα του ενός ορυκτά με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, θερμικής αγωγιμότητας και τιμές της ειδικής θερμότητας. Το αποτέλεσμα είναι να διαστέλλονται και να συστέλλονται με διαφορετική ταχύτητα και όχι στον ίδιο βαθμό γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί στην ανάπτυξη μηχανικών τάσεων μέσα στην πέτρα, κατά τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (10).

Ακόμα, αρκετά ορυκτά είναι ανισότροπα με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής κατά τους διάφορους κρυσταλλογραφικούς άξονες (ασβεστίτης, χαλαζίας). Τέλος, το χρώμα των ορυκτών παίζει σοβαρό ρόλο στην ποσότητα της απορροφούμενης ακτινοβολίας και ως εκ τούτου στο εύρος των θερμοκρασιών μεταβολών, που συμβαίνει για κάθε κατηγορία κρυστάλλων, οδηγώντας επίσης σε διαφορετική διαστολή (10).

### **Διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων**

Στα περισσότερα μνημεία, από μάρμαρο, ασβεστόλιθο ή πωρόλιθο σε όλη την Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του χάλυβας, ορείχαλκος και χαλκός, βυθισμένοι σε μόλυβδο ή συχνά και ξύλο σε θειάφι ή πίσσα, για τη σύνδεση των αρχιτεκτονικών στοιχείων μεταξύ τους. Κατά τις αναστηλώσεις που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκαν επίσης, τα ίδια μέταλλα ή κράματα και πρόσφατα πριν 20 χρόνια, ανοξειδωτος χάλυβας βυθισμένα σε σκυρόδεμα ή κονιάματα. Τα ίδια μέταλλα έχουν χρησιμοποιηθεί και για την συντήρηση θραυσμένων γλυπτών βυθισμένα σε κονιάματα ή γύψο (10).

Τα προϊόντα της οξείδωσης που δημιουργούνται στην επιφάνεια του συνδέσμου αυξάνουν σημαντικά τον όγκο του συστήματος μεταλλο-προϊόντος της διάβρωσης. Μάλιστα η διόγκωση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται μέσω, μόνον, της διαφοράς μοριακού όγκου μεταξύ μετάλλου και προϊόντος: ως γνωστόν τα νέα οξειδία σχηματίζονται πάντα στην εξωτερική επιφάνεια με διάχυση των μεταλλοκατιόντων προς το διαβρωτικό περιβάλλον μέσα από το ήδη σχηματισμένο στρώματα των προϊόντων της διάβρωσης. Η διόγκωση αυτή προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων μηχανικών τάσεων, που οδηγούν στην ρήξη του υλικού, όταν υπερβούν την αντοχή του (10).

### **Φθορά λόγω πάγου**

Αναφέρεται στην ανάπτυξη μηχανικών τάσεων από τους κρυστάλλους πάγου στο εσωτερικό των υλικών που όταν υπερβούν την αντοχή του υλικού οδηγούν σε αστοχία του, δηλαδή την ρηγμάτωση και αποσάθρωση. Η ένταση της φθοράς λόγω πάγου εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το υλικό, από την διαπερατότητα του υλικού σε υγρασία και από την μηχανική αντοχή του (10).

### **Σεισμικές δονήσεις**

Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα κτίρια ανάλογα με (10):

- το είδος των δυναμικών καταπονήσεων,
- την διάρκεια τους,
- την μέγιστη εφαρμοζόμενη καταπόνηση,
- τον τρόπο δόνησης (χαρακτηριστικά εδαφικών επιταχύνσεων),
- την πρότερη δομική κατάσταση του κτιρίου
- την απόκριση του κτιρίου σε δυναμικές φορτίσεις.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 - ENV 1998 «Design provisions for earthquake resistance of structures» η δυναμική καταπόνηση των κτιρίων μπορεί να προκαλέσει

βλάβες όταν οι συχνότητες αυτής κυμαίνονται μεταξύ 8-80Hz. Γενικά, βλάβες συνήθως παρουσιάζονται για μέγιστη ταχύτητα καταπόνησης μεγαλύτερη από 10mm/s (10).

Στα ιστορικά κτίρια, σε αντίθεση με τα νεότερα και σχεδιασμένα σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, κυριαρχεί ο παράγοντας των υφιστάμενων βλαβών και της φθοράς των υλικών. Κτίρια που έχουν υποστεί δομικές βλάβες είτε λόγω παρελθόντων σεισμικών δονήσεων είτε λόγω φθοράς των υλικών τους, θα υποστούν περαιτέρω ζημιές και ίσως πλήρη κατάρρευση σε μικρότερες τιμές δυναμικών επιταχύνσεων από αυτές που μπορούν να αντέξουν καινούρια, ισχυρά και κατάλληλα σχεδιασμένα κτίρια (10).

### **Βιολογικοί παράγοντες**

Οι μικροοργανισμοί, τα φυτά και τα ζώα μπορούν να προκαλέσουν στην πέτρα εκτεταμένες φθορές χημικής ή μηχανικής φύσης. Τα φαινόμενα της φθοράς που σχετίζονται με τη δράση των μικροοργανισμών ή με τα προϊόντα οργανικών δράσεων συχνά υποτιμούνται σε σχέση με τα αποτελέσματα άλλων παραγόντων, όπως της άμεσης χημικής διάβρωσης (10).

Ωστόσο τα καταστροφικά αποτελέσματα των χημικών διεργασιών μπορούν να ενταθούν από την παρουσία οργανικά παραγόμενων διαβρωτικών παραγόντων, όπως οξυγόνου, οργανικών οξέων και διοξειδίου του άνθρακα. Εξάλλου, η δράση των βακτηρίων μπορεί να ευνοήσει τη διάβρωση της πέτρας μέσα από την ανάλωση χημικών συστατικών των ορυκτών της πέτρας απαραίτητων για τις οργανικές διεργασίες, όπως ακόμα, μπορεί να παρέχει προϊόντα μεταβολισμού τα οποία να δράσουν σαν καταλύτες στην εξέλιξη της φθοράς (10).

Η βιολογική διάβρωση έχει τις παρακάτω επιπτώσεις (10):

1. Στην αισθητική παρουσία του υλικού, όπως:
  - Αλλαγή χρώματος
  - Επιφανειακές αποθέσεις
  - Βιολογικές κρούστες και βιοφίλμ
  - Ίχνη και λεκέδες από φυτά, πουλιά, κ.α.
2. Στις χημικές διεργασίες στην επιφάνεια των υλικών, όπως με (10) :
  - Βιογενή οργανικά οξέα
  - Βιογενή ανόργανα οξέα
  - Βιογενή επιβραδυντές των κατιόντων και των ανιόντων σε ισορροπία διαλύματος
  - Βιογενή πολυϊόντα και μακρομόρια
  - Βιογενή αέρια και τα αντιδρώντα τους
  - Βιογενή τροποποίηση στο μοντέλο διάχυσης των χημικά ενεργών ουσιών
3. Στις φυσικές διεργασίες στην επιφάνεια των υλικών ,όπως με:

- Βιολογική τροποποίηση της ενεργότητας του νερού
- Μηχανική δράση των μικροοργανισμών
- Τροποποίηση των δυνάμεων Van der Waals από βιογενείς ουσίες
- Αναστολή ή επιτάχυνση της ανταλλαγής ατμών-υγρού από την μικροπανίδα
- Χρωματικές αλλαγές και συναφείς αλλαγές στην θερμική συμπεριφορά

### 1.3.3 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Στη προκειμένη περίπτωση, η μέθοδος της υπερηχοσκόπησης χρησιμοποιήθηκε με άμεσο τρόπο σε κυβικά δοκίμια 5 cm x 5 cm x 5 cm με σκοπό την εξακρίβωση της συμβατότητας των ιστορικών λίθων με τον λίθο «Δαφνούλας». Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε συσκευή Pundit-CNS Electronics. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος των τριών επιπέδων του δείγματος και μετρείται ο χρόνος μετάδοσης παλμού πηγής 54 khz. Λιπαντική ύλη, καλυμμένη με ειδική μεμβράνη χρησιμοποιείται ως συνδετικό μέσο για αύξηση της ηχητικής επαφής μεταξύ του δείγματος και του μετατροπέα. Το όργανο διαβαθμίζεται με πρότυπο αλουμινίου. Διορθώσεις του πάχους και του χρόνου μετάδοσης υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του πραγματικού και των μετρούμενων χρόνων. Η ταχύτητα μετάδοσης των υπερήχων συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας του λίθου, όπως με το λόγο του Poisson και με το μέτρο Young (13).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η ανισοτροπία κι η συνεκτικότητα των δοκιμίων των ιστορικών λίθων και του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ορισμένοι δείκτες οι οποίοι υποδηλώνουν τον βαθμό ανισοτροπίας και συνεκτικότητας του υλικού. Η εύρεση των δεικτών γίνεται μέσω της μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα τρία επίπεδα. Συγκεκριμένα οι δείκτες είναι οι εξής (14):

- $k = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{mean}} * 100$
- $AS = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{min}} * 100$
- $ARS = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{max}} * 100$
- $AD = \frac{v_{min}}{v_{max}}$
- $dM\% = 1 - \frac{2v_{min}}{v_{mean}+v_{max}} * 100$
- $dm\% = \frac{2(v_{max}-v_{mean})}{v_{mean}+v_{max}} * 100$

Όπου  $v_{max}$  η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης σε οποιαδήποτε από τις τρεις κατευθύνσεις,  $v_{min}$  η μικρότερη ταχύτητα διάδοσης και  $v_{mean}$  η μέση ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στα τρία επίπεδα κάθε δοκιμίου (14).

Οι δείκτες k, AS και ARS είναι ευθέως ανάλογη του βαθμού της ανισοτροπίας και δεν έχουν κάποιο όριο στην τιμή που μπορούν να πάρουν. Ο δείκτης AD είναι ευθέως ανάλογος του βαθμού συνεκτικότητας και μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 δηλώνει τον μέγιστο βαθμό ανισοτροπίας (14).

Θεωρείται ότι οι δείκτες dM% και dm% είναι πιο αντιπροσωπευτικοί καθώς λαμβάνουν υπόψη το μέσο όρο της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων. Συγκεκριμένα ο δείκτης dM% ονομάζεται δείκτης ολικής ανισοτροπίας ενώ ο δείκτης dm% ονομάζεται δείκτης σχετικής ανισοτροπίας. Υψηλή τιμή του δείκτη dM% και χαμηλή τιμή του δείκτη dm% δηλώνει πως ο λίθος εμφανίζει υψηλότερη ανισοτροπία σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. (14)

### 1.3.4 Γενικές κατηγορίες επιφανειακής φθοράς

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συχνότερες μορφές επιφανειακής φθοράς (10):

- *Ρωγμές*: Οφείλονται σε αστοχίες υλικού κατά την τοποθέτηση, σε σεισμικές καταπονήσεις, σε θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετό ή εξωτερικά μηχανικά αίτια.
- *Περικρυσταλλικές ρηγματώσεις*: Οφείλονται σε κόπωση του λίθου λόγω συνεχών κύκλων συστολο-διαστολών. Οι ρηγματώσεις επιδεινώνονται από την όξινη προσβολή αέριων ρυπαντών.
- *Ζαχαροειδής φθορά*: Εμφανίζεται κυρίως στα μάρμαρα. Οφείλεται σε διακρυσταλλική αποσάθρωση που οδηγεί στην εκλεκτική αποκόλληση κόκκων μεταβάλλοντας την υφή της επιφάνειας με αποτέλεσμα αυτή να προσομοιάζει κόκκους ζάχαρης.
- *Αποπλυμένες επιφάνειες*: Είναι αποτέλεσμα διαδοχικής έκπλυσης / διάλυσης του ασβεστίτη από την όξινη βροχή γεγονός που συνεπάγεται απώλεια αυθεντικού υλικού. Συνήθως η παρουσία μικρορηγματώσεων και απολέπισης, τραχιάς επιφάνειας σε πλήρως απροστάτευτες επιφάνειες (πιθανή η παρουσία γύψου σε μικρές ή μεγάλες ποσότητες ανάλογα με το βαθμό προστασίας της επιφάνειας) .
- *Ανθρακικές κρούστες (συνήθως λευκές)*: Οφείλονται σε διαδοχική διάλυση του ασβεστίτη από την όξινη βροχή όπου λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.α.) σχηματίζεται ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης.
- *Φαιόμαυρες ή μαύρες κρούστες*: Είναι αποτέλεσμα γυψοποίησης της ασβεστιτικής επιφάνειας και προσρόφησης μαύρων σωματιδίων αιθάλης, H/C κ.ά. σωματιδίων ατμοσφαιρικής προέλευσης που δρουν ως ενεργοί καταλύτες του μετασχηματισμού του ασβεστίτη σε γύψο. Οι επιφάνειες των φαιόμαυρων κρουστών είναι προστατευμένες άμεσης έκπλυσης από το νερό της βροχής .
- *Φαιοκάστανες κρούστες*: Είναι κρούστες με πλούσια περιεκτικότητα σε οξειδία και υδροξειδία του σιδήρου (έντονη γκριζοκάστανη ή/και πορτοκαλοκάστανη χροιά) τα οποία πολλές φορές είναι θωρακισμένα πίσω από ομοιογενές και συμπαγές στρώμα αργιλοπυριτικών διαδοχική διάλυση του ασβεστίτη από την όξινη βροχή όπου λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.α.) σχηματίζεται ανακρυσταλλωμένος ασβεστίτης .
- *Χρυσές πάτινες / πάτινες στο χρώμα της σκουριάς*: Οφείλονται σε διάχυση ιόντων σιδήρου του μαρμάρου από το εσωτερικό προς την εξωτερική επιφάνεια και οξειδωσή τους (προσδίδοντας έντονη πορτοκαλοκάστανη χροιά).
- *Αλκαλοπυριτικές (τσιμεντιτικές) κρούστες*: Πρόκειται για σκληρό στρώμα ένυδρου πυριτικού ασβεστίου το οποίο καλύπτει τη λίθινη επιφάνεια, ενώ παρουσιάζονται συνήθως πολλές κοιλότητες και ρηγματώσεις.

- *Προσανατολισμένα χαράγματα:* Πρόκειται για κατευθυνόμενες και προσανατολισμένες γραμμές από παλαιότερες ασύμβατες επεμβάσεις συντήρησης από μεταλλικές βούρτσες και σβουράκια.
- *Επικαθήσεις σκόνης:* Πρόκειται για αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα αργιλοπυριτικής σύστασης.
- *Μαύρες επικαθήσεις:* Αποθέσεις μη συνεκτικά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα συνήθως αργιλοπυριτικής σύστασης έντονου μαύρου χρώματος λόγω σωματιδίων αιθάλης και H/C (μπορεί να επικαλύπτουν περιοχές κρουστών).
- *Γκρίζα περιοχή – κρούστα:* Σκόνη και ξηρές θωρακισμένες αποθέσεις συσσωρευμένες για πολύ χρόνο. Σχηματισμός συμπαγούς στρώματος που περιέχει και ανακρυσταλλωμένο ασβεστίτη σε περιοχές που δε διαβρέχονται καθόλου από νερό.
- *Ανθρακική κρούστα:* Σχηματίζεται λόγω διάβρωσης ασβεστολιθικών πετρωμάτων σε φυσικό περιβάλλον.
- *Στρώμα γύψου:* Σχηματίζεται σε επιφάνειες ασβεστιτικών λίθων προστατευμένων από το νερό της βροχής.
- *Απομειώσεις επιφανειών:* Εμφανίζονται λόγω χημικής διάλυσης ή αιολικής φθοράς Φθορά με απόσπαση κόκκων ή κρυστάλλων Εμφανίζεται λόγω δράσης αλάτων ή περικρυσταλλικής χημικής προσβολής Απολέπιση Συμβαίνει λόγω δράσης αλάτων, όξινης προσβολής και θερμοκρασιακών μεταβολών.
- *Κυψέλωση:* Συμβαίνει λόγω δράσης διαλυτών αλάτων σε πορώδεις λίθους και λόγω όξινης προσβολής ή βιολογικών δράσεων σε συμπαγείς λίθους.
- *Βιολογική κρούστα:* Ανάπτυξη μικροοργανισμών ανάλογα με τις συνθήκες του μικροκλίματος.
- *Χρωματικές αλλοιώσεις:* Εμφανίζονται από αλλοιώσεις διαφόρων φάσεων του λίθου και από οξείδια μετάλλων.



## 1.4 Μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης

Η πορεία της έρευνας της διαγνωστικής φάσης (δομικά υλικά, αίτιο, μηχανισμός, φαινόμενα/προϊόντα διάβρωσης), περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα (10) (11):

### 1. Ιστορικό-προγενέστερες επεμβάσεις (Ιστορική τεκμηρίωση)

Η μελέτη των ιστορικών αρχείων και η σύγκριση παλαιότερων φωτογραφιών με νεότερες προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες, τόσο για την προέλευση των υλικών όσο και για τυχόν προγενέστερες επεμβάσεις. Η τοπογραφική και αρχιτεκτονική αποτύπωση είναι επίσης πολύ σημαντική. Η γνώση των μνημείων και του είδους των επεμβάσεων που έγιναν παλαιότερα αποτελούν στοιχεία απαραίτητα, που συμπληρώνουν και πολλές φορές, εξηγούν τη σημερινή εικόνα του μνημείου, γι' αυτό και η τήρηση λεπτομερών αρχείων κάθε επέμβασης, μπορεί να βοηθήσει καθοριστικά.

### 2. Επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις για την κατάσταση των υλικών

Κατά το στάδιο αυτό συλλέγονται και ταξινομούνται στοιχεία, κατά το δυνατόν λεπτομερή, σχετικά με τη σοβαρότητα της φθοράς (φωτογραφική, φωτογραμμετρική, σχεδιαστική αποτύπωση).

Μακροσκοπικές παρατηρήσεις σχετικά με την κατάσταση των υλικών και την τυπολογία των φαινομένων διάβρωσης οδηγούν στον σχηματισμό μιας πρώτης εικόνας για τις διάφορες μορφές φθοράς. Πολύ σημαντικό είναι η καταγραφή τυχόν επεμβάσεων που μέχρι τώρα ήταν άγνωστες.

### 3. Τεκμηρίωση, παρακολούθηση και μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων

Επί τόπου μετρήσεις στο άμεσο περιβάλλον της κατασκευής. Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνονται έλεγχοι για το μικροκλίμα (υγρασία, θερμοκρασία, βροχοπτώσεις, ταχύτητα ανέμων κ.α.) και τη παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα γίνεται χημική ανάλυση του εδάφους και παρακολούθηση της ανερχόμενης υγρασίας. Αν κριθεί απαραίτητο, ορισμένοι από του προηγούμενους παράγοντες παρακολουθούνται μόνιμα.

### 4. Επί τόπου μη καταστρεπτικές μετρήσεις-χαρτογράφηση φθοράς

Στο στάδιο αυτό γίνεται η χαρτογράφηση των υλικών και της φθοράς που έχουν υποστεί. Επίσης γίνεται προσπάθεια για αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Γίνεται προσπάθεια να συσχετισθούν τα αποτελέσματα αυτά, με τους παράγοντες όπως το μικροκλίμα, τη θέση και το είδος του υλικού.

5. Ταυτοποίηση των δομικών υλικών και έρευνα προέλευσης τους

Προϋποθέτει δειγματοληψία από υγιή πέτρα στο μνημείο. Η δειγματοληψία αυτή, πρέπει να καλύπτει όλα τα είδη πέτρας που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αρχική κατασκευή όσο και στις μεταγενέστερες επεμβάσεις. Η εξέταση των δειγμάτων με τις μεθόδους που αναφέρονται στη συνέχεια οδηγεί στη γνώση των χαρακτηριστικών των υλικών δομής και μέσω αυτών στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την προέλευσή του (περιοχή, λατομείο):

- Πετρογραφική μελέτη με εξέταση λεπτών τομών στο πολωτικό μικροσκόπιο
- Ορυκτολογική μελέτη με τη μέθοδο της περίθλασης ακτινών Χ. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εντοπισμό ορυκτών ευαίσθητων στους παράγοντες διάβρωσης.
- Μελέτη της χημικής σύστασης, η οποία συμπληρώνει την εικόνα του δομικού υλικού. Ανάλογα και με το σημείο που διερευνάται, χρησιμοποιείται η κατάλληλη μέθοδο ή συνδυασμός μεθόδων (μικροανάλυση, ατομική απορρόφηση, διαφορική θερμική ανάλυση).
- Μελέτη φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, όπως είναι το πορώδες, το μέσο μέγεθος πόρων, η κατανομή πορώδους, η διαπερατότητα σε νερό και ατμούς, ο συντελεστής κορεσμού, και η υδατοαπορροφητικότητα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά κ.α.

Οι μετρήσεις γίνονται και σε δοκίμια που προέρχονται από το λατομείο, αφού συμπληρωθεί η αναγνώριση της προέλευσης του δομικού υλικού.

6. Μελέτη φθοράς στο εργαστήριο

Προϋποθέτει συστηματική δειγματοληψία από τα διαβρωμένα εξωτερικά τμήματα της πέτρας, και με τρόπο ώστε, να καλύπτει όλες τις μορφές διάβρωσης που καταγράφηκαν στα προηγούμενα στάδια. Η μελέτη δειγμάτων γίνεται με τις ίδιες μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τα αποτελέσματα αυτής της εξέτασης συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα από τη μελέτη φυσικών δειγμάτων πέτρας οδηγούν σε συμπεράσματα σχετικά με:

- Το είδος και το βαθμός διάβρωσης
- Την κατάσταση των προϊόντων διάβρωσης
- Τη φυσική κατάσταση της διαβρωμένης πέτρας
- Τα αίτια

7. Συσχέτιση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων της φθοράς στο επίπεδο του μνημείου

Περιλαμβάνει την στοχαστική συσχέτιση περιβαλλοντικών παραγόντων και των δεδομένων της φθοράς των υλικών με πολυκριτηριακή ανάλυση. Η ανάλυση γίνεται με γραφική παράσταση του συνόλου των δεδομένων σε δυσδιάστατο διάγραμμα με ομάδες μεταβλητών, τους ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. Ακολουθεί η εκτίμηση του ρόλου και ειδικού βάρους κάθε μεταβλητής στις διαφορετικές ομάδες.

8. Εκτίμηση αιτίων και μηχανισμών των φαινομένων της φθοράς

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η αξιολόγηση των εργαστηριακών δεδομένων καθώς και των δεδομένων από τα αποτελέσματα των επί τόπου μη καταστρεπτικών μετρήσεων.

9. Παραμετρική ανάλυση - προσομοίωση των φαινομένων στο εργαστήριο σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης

Προσδιορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τα φαινόμενα φθοράς και γίνεται η προσομοίωση συνθηκών στο εργαστήριο. Στο στάδιο αυτό διεξάγονται δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν τις εξής δοκιμές:

- Θάλαμος αλατονέφωσης
- Θάλαμος προσομοίωσης περιβαλλοντικών συνθηκών
- Κύκλοι εμβάπτισης-ξήρανσης κ.α.

## 2 Ειδικό Θεωρητικό

### 2.1 Διαδικασία κατασκευής πέτρινων τοξοτών γεφυριών

Η ανάγκη ανέγερσης πέτρινων γεφυριών σε σημεία όπου κάποιο ορμητικό ποτάμι διέκοπτε την δίοδο για αρκετά χιλιόμετρα ήταν ένα πρόβλημα που μπορεί να απασχολούσε περισσότερα από ένα χωριά. Η απόφαση για ένα τέτοιο έργο και η απόκτηση των οικονομικών πόρων γι' αυτό άνηκε στους κατοίκους των χωριών, τους Τούρκους αξιωματικούς (κατά την Τουρκοκρατία) ή σε ηγούμενους κοντινών μοναστηριών. Πολλές φορές το μεγαλύτερο ποσοστό των χρημάτων παρέχονταν από κάποιον χορηγό, συνήθως ευκατάστατο κάτοικο του χωριού, και γι' αυτό, κατά το πέρας της ανέγερσης, το γεφύρι έπαιρνε και το όνομα του.

Με την συγκέντρωση των οικονομικών πόρων, το χωριό μίσθωνε ειδικευμένα μπουλούκια μαστόρων, τα οποία ονομαζόταν κιοπρούληδες (από την τουρκική λέξη *corpu*= γέφυρα). Η διαδικασία ξεκινούσε με την άφιξη του καλοκαιριού όπου τα νερά των ποταμών λιγόστευαν ή στέρευαν στην περίπτωση ρεματιών. Αρχικά επιλέγονταν η θέση που θα χτιζόταν το γεφύρι βρίσκοντας κάποιον συμπαγή βράχο, προτιμότερα στο στένεμα του ποταμιού, ο οποίος θα λαξεύονταν για να τοποθετηθούν τα ακρόβαθρα.

Σε περίπτωση που το ποτάμι ήταν αρκετά ορμητικό ακόμα και τους καλοκαιρινούς μήνες, τότε το γεφύρι θεμελιωνόταν στην κοίτη. Αυτό επιτυγχανόταν σκάβοντας αρκετά βαθιά μέσα στην κοίτη και κατασκευάζοντας τα θεμέλια σε όρθιους ξύλινους πασσάλους, τοποθετημένους πολύ πυκνά, που θα έμενα για πάντα μέσα στο νερό, ανεπηρέαστοι από την φθορά που επιφέρει το οξυγόνο. Τα υπόλοιπα βάρη κατασκευάζονταν με έκτροπή του ποταμού από την μία πλευρά και μετά από την άλλη.

Έπειτα αποφασίζονταν η τελική μορφή το γεφυριού. Το κυκλικό σχήμα του γεφυριού καθιερώθηκε εμπειρικά, γεγονός που εξηγείται σήμερα από το γεγονός ότι στον κύκλο τα φορτία μεταφέρονται σε όλη την έκταση Του. Τα γεφύρια μπορεί να ήταν μονότοξα ή πολύτοξα αναλόγως με το πλάτος τους ποταμού. Το σχήμα των τόξων ήταν ημικυκλικό, αναβιβασμένο, καταβιβασμένο ή ακόμα και οξυκόρυφο.

Όπως έχει αναφερθεί το μπουλούκι φρόντιζε για το πελέκημα και την μεταφορά της πέτρας στην τοποθεσία του γεφυριού. Κατά βάση χρησιμοποιούνταν ασβεστόλιθος και σχιστόλιθος και φρόντιζαν το πελέκημα των καίριων λίθων, όπως του κλειδιού και των ουρανών να είναι άριστο. Παράλληλα, έστηναν το καλούπι, το οποίο ήταν από επεξεργασμένα ξύλα της περιοχής, στις βάσεις του τόξου που είχαν τοποθετηθεί. Όταν γινόταν οι τοποθέτηση του καλουπιού, τοποθετούσαν και τα αγκωνάρια τα καμαρολίθια και τους ουραμούς για την καμάρα.

Το χτίσιμο των θολίτων του κεντρικού τόξου ξεκινούσε ταυτόχρονα και από τις δυο πλευρές του ποταμού και προχωρούσε προς την κορυφή του. Το τόξο ολοκληρώνονταν με την τοποθέτηση του κλειδιού, το οποίο εθιμοτυπικά γινόταν από τον αρχιμάστορα. Μετά, αφού γινόταν και η ολοκλήρωση των ανακουφιστικών τόξων, ξεκινούσε στο

χτίσιμο της υπόλοιπης γέφυρα και του γεμίματος συνήθως με πέτρες ακανόνιστου σχήματος και μεγέθους, οι οποίες ήταν πελεκημένες μόνο από την πρόσοψη.

Το συνδετικό υλικό αποτελούταν από άσβεστο, χώμα, νερό, ανακατεμένο με θηραϊκή γη, κεραμάλευρο ακόμα και μαλλί ζώων ή άχυρο. Ακόμα και σήμερα φημολογείται η προσθήκη ποσότητας από ασπράδι αυγού κυρίως στο κονίαμα στα θεμέλια και στα βάρθα. Όλα αυτά τα πρόσθετα, όσο και αν ακούγονται περίεργα, είχαν πάντα στόχο να αυξήσουν την στατικότητα και την συγκολλητική ικανότητα του και κατ' επέκταση να αποτρέψουν την φθορά του λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Το οδόστρωμα του γεφυριού ήταν πάντα φτιαγμένο με καλντερίμι, κατασκευασμένο με σκαλοπάτια που ευνοούσαν την μεταφορά ζώων ενώ κατά μήκος του γεφυριού αναγείρονταν αρκάδες, συνήθως όρθιες στενόμακρες πέτρες.

Υπήρχαν πολλές λεπτομέρειες και προσθήκες στην τελικά μορφή του γεφυριού. Τα τζινέτια(ελκυστήρες) συγκρατούσαν το γεφύρι και κυρίως τον λεπτό κορμό του. Οι διάφορες προεξοχές στα μεσόβαθρα, όπως ονομάζονταν πρόβολοι(κόφτρες), προστάτευαν το γεφύρι από τις πλευρικές πιέσεις του νερού όταν έβρεχε και το ποτάμι γινόταν ορμητικότερο, με το μπροστινό να αναχαιτίζει τη δύναμη του νερού και τον πίσω να στηρίζει και να μειώνει τον στροβιλισμό του νερού. Τα διάφορα παράθυρα, τα οποία καλούσαν ψευτοκαμάρες, λειτουργούσαν σαν ανακουφιστικά τόξα, ελαφρύνοντας τον όγκο της κατασκευής και δίνοντας την δυνατότητα της γρήγορης διέλευσης του νερού σε περίπτωση πλημμυράς. Συνήθως ήταν ημικυκλικά ή ακόμα και τεταρτοκυκλικά.

Το ξεκαλούπωμα γινόταν πολύ προσεκτικά και ήρεμα με σκεπάρνια και ειδικούς λοστούς. Η διαδικασία εμπείριχε αρκετό κίνδυνο, ιδίως για τους μάστορες, καθώς πολλά γεφύρια ήταν πιθανό να καταρρεύσουν την στιγμή της αφαίρεσης των καλουπιών.

## Η Πρώτη ύλη

Ορισμένα πετρώματα έχουν προτιμηθεί ιδιαίτερα στην ανοικοδόμηση. Μερικά από αυτά είναι ο αργιλικός σχιστόλιθος, ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο, ο πωρόλιθος, ο γρανίτης, ο περλίτης κ.λπ.

Η έντονη ποικιλία και διαφορετικότητα των πετρωμάτων από περιοχή σε περιοχή οδήγησε στην χρήση ενός ιδιαίτερα εντυπωσιακού αριθμού πετρωμάτων ανά γεωγραφικό διαμέρισμα και τόπο. Μόνο και μόνο αυτή οι διαφορετικές πρώτες ύλες, που καλούνταν να αξιοποιήσουν οι μάστορες, αποτέλεσε συνθήκη για την ανάπτυξη διαφορετικών τρόπων χτισίματος και ιδιαίτερων τοπογραφικών στοιχείων της Αρχιτεκτονικής των Ελληνικών περιοχών.

Η πλούσια ύπαρξη σχιστόλιθων, για παράδειγμα στην Ήπειρο και την Ορεινή βόρεια Ελλάδα οδήγησε σε έναν τύπο χτισίματος που διακρίθηκε για την ισόρροπη δόμηση με τον ίδιο επιμελημένο τρόπο σε όλο το μήκος του κτιρίου. Ιδιαιτερότητες στην αρχιτεκτονική τους παρουσιάζουν και άλλες Ελληνικές τοποθεσίες όπως οι

Κυκλάδες ή τα Λαγκάδια της Πελοποννήσου, όπου τα χαρακτηριστικά των λίθων της περιοχής ανάγκασαν τους μάστορες να προσαρμόσουν την τεχνική τους στους περιορισμούς που επέβαλε η θέση τους

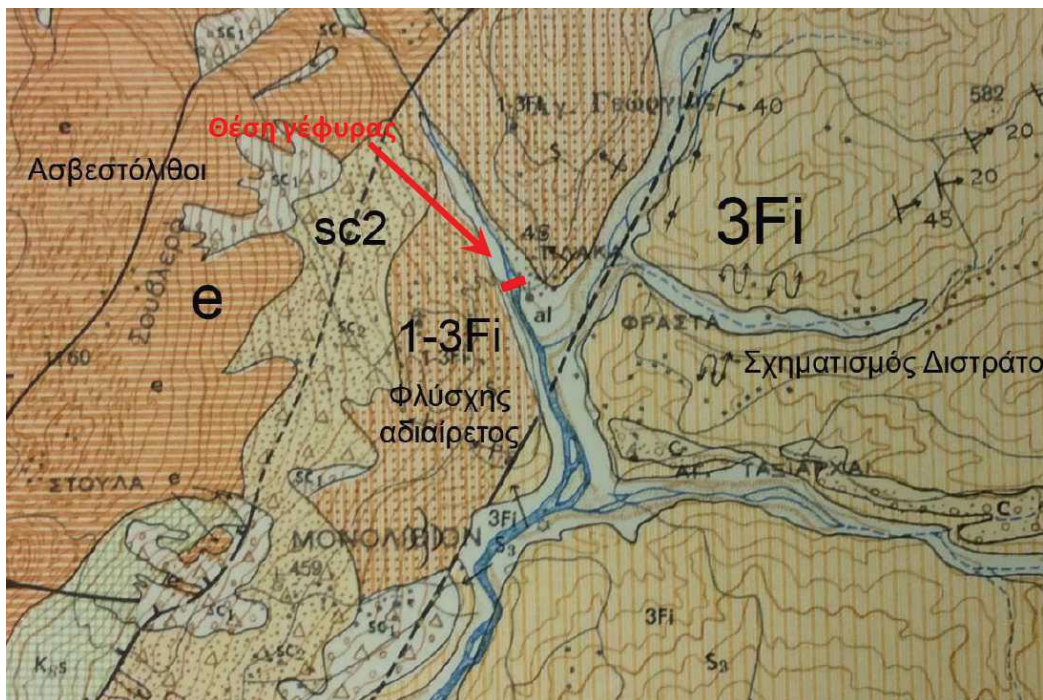
Συνήθως οι μάστορες επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν τα πετρώματα της περιοχής γύρω από την τοποθεσία του έργου. Καθώς η μεταφορά από μακρινές περιοχές ήταν βραδύς και ακριβή διαδικασία, παρελάμβαναν την πετρά από τα γύρω βουνά ή ποτάμια. Συνήθως, η επεξεργασία και το πελέκημα του λίθου γινόταν επί τόπου κατά την εξόρυξη ενώ έπειτα μεταφέρονταν από τα τσιράκια με την βοήθεια κάποιων ζώων.

## 2.2 Το Γεφύρι της Πλάκας

### 2.2.1 Συνθήκες θεμελίωσης

Γεωλογικώς, η περιοχή της γέφυρας ανήκει στην κατώτερη σειρά του φλύσχη της Ιονίου Ζώνης (αδιαίρετος φλύσχη 1-3Fi), ηλικίας Ανώτερου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου, που περιλαμβάνει εναλλαγές ψαμμιτικών πάγκων ποικίλου πάχους με τις συνεκτικές μάργες του Αράχθου.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ σε κλίμακα 1:50000 (Φύλλο Άγναντα) με σημειωμένη τη θέση της γέφυρας στο ανώτερο τμήμα της κοίτης του Αράχθου. Εκατέρωθεν των αλλουβιακών αποθέσεων της κοίτης του ποταμού, επικρατούν τα υλικά του φλύσχη της Ιονίου ζώνης (1-3Fi).



Εικόνα 4. Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ (Φύλλο Αγνάντα) με σημειωμένη την θέση της γέφυρας στο ανώτερο τμήμα της κοίτης του Αράχθου

Στην δεξιά πλευρά της κοίτης του ποταμού, στην θέση έδρασης της γέφυρας, το βάθος του νερού είναι περίπου 4 μέτρα (με συνήθη ροή του ποταμού), καθώς σ' αυτήν την πλευρά της κοίτης η ροή του ποταμού έχει μεγαλύτερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα την εντονότερη τάση διάβρωσης και υποσκαφής του θεμελίου της γέφυρας. Λόγω του ανωτέρω κινδύνου διάβρωσης της θεμελίωσης, η δεξιά βάση του τόξου έχει προστατευθεί με λοξό θωράκιο στην ανάντη πλευρά του βάθρου, και το ανακουφιστικό άνοιγμα δεν φθάνει μέχρι την κοίτη, ώστε το θεμέλιο να είναι ενιαίο και ευρύ.

Το βάθος έδρασης του θεμελίου του δεξιού βάθρου δεν είναι γνωστό, ούτε και οι συνθήκες του εδάφους στην θεμελίωση. Πάντως, δεδομένου ότι η θεμελίωση της γέφυρας στον φλύσχη δεν είναι η πλέον κατάλληλη, οι τεχνίτες της εποχής ορθώς

δημιούργησαν ένα αρκετά πλατύ ενιαίο θεμέλιο σε όλο το μήκος της βάσης του τόξου περιορίζοντας το ύψος του ανακουφιστικού παραθύρου .

Στην θέση έδρασης του αριστερού άκρου του τόξου της γέφυρας, υπάρχει ένας ασβεστολιθικός ογκόλιθος (υπολειμματικό ράκος από τους υπερκείμενους ασβεστόλιθους των Τζουμέρκων) άγνωστων διαστάσεων, επί του οποίου έχει θεμελιωθεί το αριστερό βάθρο της γέφυρας. Δεδομένου ότι οι συνθήκες θεμελίωσης κατά μήκος της αριστερής όχθης του ποταμού είναι δυσμενείς (λόγω του αποσαθρωμένου φλύσχη της αριστερής όχθης), είναι πρακτικώς βέβαιο ότι η επιλογή της συγκεκριμένης θέσης της γέφυρας έγινε λόγω της παρουσίας του συγκεκριμένου ασβεστολιθικού τεμαχίου σ' αυτή τη θέση. Εκτιμάται, όμως, ότι οι τεχνίτες της εποχής υπερεκτίμησαν το μέγεθος του ασβεστολιθικού τεμαχίου, θεωρώντας ότι αποτελεί τμήμα ενός σταθερού υποβάθρου και όχι μεμονωμένο βράχο (όπως πράγματι είναι), και μάλιστα χωρίς σημαντική ανάπτυξη στο ανάντη τμήμα του βάρου της γέφυρας (22).

### 2.2.2 Ιστορική Αναδρομή της κατασκευής του Γεφυριού της Πλάκας- Επεμβάσεις και επισκευές

Οι κύριοι εμπορικοί δρόμοι της εποχής φαίνεται πως δεν διέσχιζαν την ανατολική όχθη του Αράχθου στην περιοχή γύρω από την Πλάκα αλλά κυρίως την Δυτική. Η ανάγκη των κατοίκων των χωριών της περιοχής αυτής, για την διευκόλυνση της επικοινωνίας με το μεγαλύτερο αστικό κέντρο της Άρτας, την διευθέτηση των εμπορικών συναλλαγών μαζί της καθώς και την μετακίνηση των βοσκών με τα κοπάδια τους φαίνεται πως οδήγησε στην απόφαση του για την ανέγερση του Γεφυριού.

Επισκέψεις στην περιοχή καθώς και διάφορες πηγές οδηγούν στο συμπέρασμα πως στην περιοχή της Πλάκας υπήρχε ήδη ένα πέτρινο γεφύρι, πιθανότατα πριν τον 18<sup>ο</sup> αιώνα και πρώτου ανεγερθεί το Γεφύρι της Πλάκας. Η λίθινη αυτή γέφυρα φαίνεται να κατέρρευσε το 1860 σύμφωνα με τις πηγές του Ν. Παπακώστα (15).

Η νέα απόπειρα για ανέγερση λίθινης γέφυρας έγινε με κύρια χρηματοδότη αυτή του Ιωάννη Ζ. Λούλη (16). Για τον σκοπό αυτό, το έργο ανατέθηκε σε δύο πρωτομάστορες, τον Κονιτσιώτη Μαστρο-Γιώργο και τον Κώστα Μπέκα. Υπάρχουν πολλά θολά σημεία γύρω από την ταυτότητα και την δράση τους. Σημαντικό σημείο που μένει αναπάντητο, είναι εάν με το όνομα Μαστρο-Γιώργος ταυτίζεται ο πρωτομάστορας Ζιώγας Φρόντζος, κάτι το οποίο υποστηρίζεται από κάποιες πηγές (17) (18).

Ο Φρόντζος γεννήθηκε πιθανότατα το 1814 και απεβίωσε το 1893 (17). Η καταγωγή του είναι από την Πυρσόγιαννη. Αναφέρεται πως καταγόταν από οικογένεια με έντονη πνευματική παράδοση, με αρκετούς ιερείς να ανήκουν σε αυτή, και κάποια οικονομική ευχέρεια. Ο Ζιώγας Φρόντζος άφησε πίσω του αρκετά ανοικοδομήματα . Ξεκίνησε την δράση του στο Αργυρόκαστρο και συνέχισε να δρα στον ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στην Κόνιτσα, στα Ζαγόρια, στη Πωγώνια και στην Αιτωλοακαρνανία (17). Γνωστό έργο του είναι το γεφύρι στη θέση «Ντέρτι», στενό του ποταμού



Σαρανταπόρου, στα όρια των χωριών Καστάνιανης και Στράτσιανης. Δυστυχώς το γεφύρι αυτό δεν διασώζεται. Άλλα γνωστά του έργα είναι το γεφύρι της Ζέρμας, το μόνο σωζόμενο πέτρινο γεφύρι στον πάνω Σαραντάπορο ποταμό, καθώς και το γεφύρι της Μπαλτουμάς, ανάμεσα στα Γιάννενα και το Μέτσοβο, που επίσης δεν σώζεται.

Όσον αφορά την συνεργασία τους για την ανέγερση του Γεφυριού της Πλάκας, το πιο βασίμο σενάριο είναι πώς και οι δυο μαζί ανέλαβαν το σχέδιο για το γεφύρι που εν τέλει χτίστηκε το 1863 (18). Όπως αναφέρει στα απομνημονεύματα του ο Νίκος Μπέκας (1857-1962), γιος το πρωτομάστορα Κώστα Μπέκα (19), κύριο σημείο διαφωνίας ανάμεσα στους δύο πρωτομάστορες ήταν το ύψος που έπρεπε να έχει η γέφυρα. Έπειτα από συνέλευση με τον Χρηματοδότη Λούλη, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί το σχέδιο του Μαστρο-Γιώργη, κατά το οποίο το ύψος θα ήταν μικρότερο από εκείνο που υποστήριζε ο Μπέκας. Παρ' όλα αυτά, οι δύο μάστορες συνέχισαν την συνεργασία τους κατά το χτίσιμο.

Το καλούπι για το γεφύρι καθώς και τα ικριώματα κατασκευάστηκαν από τον ξυλουργό Ι. Σκέντο, από το χωριό των Μελισσουργών (15). Δυστυχώς όμως, ενώ η ανέγερση της γέφυρας ολοκληρώθηκε το 1863, πιθανότητα μόλις αφαιρέθηκε το ξύλινο καλούπι ή λίγο αργότερα στα εγκαίνια, η ίδια κατέρρευσε. Πιθανότατα, τα βάρη επιβίωσαν της κατάρρευσης.

Η επιτακτικότητα της ανέγερσης της γέφυρας οδήγησε σε μια δεύτερη απόπειρα και από τους πρωτομάστορες, αυτή τη φορά ακολουθώντας το σχέδιο του Μπέκα με Τζουμερκιώτες μαστόρους (20). Το έργο ξεκίνησε τον Ιούλιο του 1866 και ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους. Παρ' όλα αυτά οι πηγές οδηγούν στο συμπέρασμα πως δεν επιτεύχθηκε ολοκληρωτικά το αρχικό σχέδιο. Αυτό συνέβη διότι το ξεκαλούπωμα έγινε νωρίτερα από την επιθυμητή στιγμή, λόγω των βροχοπτώσεων, κάτι που οδήγησε ελαφρά απόκλιση του γεφυριού. Ο δεύτερος λόγος είναι πώς οι περιορισμένοι οικονομικοί πόροι δεν αρκούσαν, με αποτέλεσμα το πλάτος της γέφυρας να μην είναι το προσχεδιασμένο ενώ δεν κατασκευάστηκαν ποτέ στηθαία [11].



Εικόνα 5. Το γεφύρι της Πλάκας

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν σωθεί πολλά στοιχεία για την χρηματοδότηση του γεφυριού του 1866. Συγκεκριμένα αυτή την φορά ο Ιωάννης Ζ. Λούλης προσέφερε 38.000 γρόσια (21) ενώ φαίνεται πως χρηματοδότες για το γεφύρι ήταν και οι Αναγνώστης Λύτρας και Ιωάννης Ρίγγας από τα Πράμαντα καθώς και Αναγνώστης Μάρου από τους Μελισσουργούς, χωρίς όμως να είναι γνωστά ποσά που προσφέρθηκαν. Τέλος, χρηματικά ποσά προσέφεραν και οι κοινότητες των Μελισσουργών, των Πραμάντων και των Αγνάντων. Συγκεκριμένα:

- Κοινότητα Μελισσουργών: 96.000 γρόσια
- Κοινότητα Πραμάντων: 32.000 γρόσια
- Κοινότητα Αγνάντων και γειτονικά χωριά: την ξυλεία που απαιτούνταν και 48.900 γρόσια καθώς και προσωπική εργασία
- Ι. Λούλης: 2.000 γρόσια επί του αρχικού χρηματικού ποσού
- Χρίστος Μάρος: Τήρηση λογαριασμών Εξόδων

Στη διάρκεια των 150 περίπου χρόνων ζωής της γέφυρας, συνέβησαν διάφορα γεγονότα και μικροεπισκευές για τα οποία δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία τεκμηρίωσης. Η ιστορική πορεία του γεφυριού της Πλάκας διαιρείται σε έξι φάσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτές οι φάσεις, μαζί με τα πιο σημαντικά γεγονότα, οι επισκευές και οι επεμβάσεις που έγιναν:

- **Φάση 1 (1866-1927)**

Πραγματοποιείται η κατασκευή της μονότοξης γέφυρας που χαρακτηρίστηκε με μεγάλη καμπυλότητα από τον Τζουμερκιώτη αρχιμάστορα Κώστα Μπέκα, με την συνεργασία του Ζιώγα Φρόντζο. Το γεφύρι παραδόθηκε με ατέλειες διότι τα χρήματα δεν έφτασαν. Κατά τον Ν. Παπακώστα το πλάτος της γέφυρας δεν ήταν επιθυμητό, η τοιχοποιία πάνω από τα βάθρα ήταν ατελής και τα στηθαία δεν κατασκευάστηκαν καθιστώντας την γέφυρα δύσβατη.

Η απελευθέρωση της Άρτας από την τουρκοκρατία το 1881 και η αναγωγή του ποταμού Αράχθου σε σύνορο Ελλάδας-Τουρκίας οδήγησε σε αχρήστευση της γέφυρας μόλις 15 χρόνια μετά την δημιουργία της και μέχρι το 1913, που και απελευθερώνεται η υπόλοιπη Ήπειρος.

- **Φάση 2 (1928-1945)**

Το 1928 το Ελληνικό Κράτος διέθεσε κονδύλι από τον προϋπολογισμό για την συμπλήρωση των ατελειών, με τις οποίες παραδόθηκε το 1866 και να είναι η γέφυρα λιγότερο δύσβατη. Τότε κατασκευάστηκαν πρόσθετα στηθαία(παραπέτα).Η στρατηγική σημασία της γέφυρας, κυρίως κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο οδήγησε στην δημιουργία βλαβών κατά τις συγκρούσεις που συνέβησαν στην περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμα και σήμερα δεν είναι γνωστό αν σε αυτό το χρονικό διάστημα προστέθηκε ο αναλημματικός τοίχος στο ανατολικό βάθρο για την ενίσχυση της θεμελίωσης του καθώς και τμήμα της βάσης του ανακουφιστικού τόξου του δυτικού βάθρου

- **Φάση 3 (1946)**

Το 1946 διανοίχτηκε μεγάλη οπή στο τόξο προς το ανατολικό βάθρο είτε από οβίδα είτε από εκρηκτικά.

- **Φάση 4 (1947-2008)**

Τα επόμενα χρόνια επιχειρήθηκε τοπική επισκευή της ζημιάς ώστε η γέφυρα να συνεχίσει να είναι προσβάσιμη από τους κατοίκους. Μια πιο προσεχτική και επιμελημένη επισκευή έγινε μετά την λήξη του εμφυλίου με κρατικά κονδύλια.

Το 1972 το γεφύρι της Πλάκας κηρύχθηκε ιστορικό διατηρητέο μνημείο ΦΕΚ\_621/22-08-1972. Κατά την φάση αυτή έγιναν πολλές μικροεπισκευές κυρίως στην περιοχή του στηθαίου καθώς αντιμετώπιζε προβλήματα υγρασίας και τοπικές καταρρεύσεις.

Τις επόμενες δεκαετίες υπάρχουν συζητήσεις για την ανοικοδόμηση φράγματος της ΔΕΗ και «μεταφορά» του γεφυριού σε παρακείμενο παραπόταμο που τελικά δεν συνέβησαν ποτέ. Παράλληλα, οι οποιοσδήποτε φθορές κάνουν την εμφάνιση τους επισκευάζονται πρόχειρα και τοπικά χωρίς κάποια δράση για την συντήρηση του γεφυριού.

Το 2005 υπογράφεται η σύμβαση ανάθεσης μελέτης «Γέφυρα Πλάκας: μελέτη αποκατάστασης μνημείου, περιβάλλοντος χώρου και προσβάσεων» από το Γραφείο Μελετών Α. και Γ. Παπαγεωργίου.

- **Φάση 5 (2008-2014)**

Με βάση την μελέτη αυτή έγιναν εργασίες συντήρησης και επισκευής που ανατέθηκαν για την Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Ιωαννίνων, με βάση την μελέτη Α. και Γ. Παπαγεωργίου, αλλά ποτέ δεν ολοκληρώθηκαν. Το 2013 ακολούθησαν συζητήσεις για συνέχιση των εργασιών σύμφωνα με την μελέτη οι οποίες όμως δεν έγιναν ποτέ. Παράλληλα, μαρτυρίες κατοίκων ισχυρίζονται πως νέες ρηγματώσεις διανοίγονταν στην Γέφυρα.

- **Φάση 6 (2015-2019)**

Η Γέφυρα κατέρρευσε την Κυριακή 01-02-2015 μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Κατά την κατάρρευση 4 θραύσματα από το ανατολικό βάθρο κατέληξαν στην κοίτη του ποταμού ενώ τα τμήματα του κεντρικού τόξο διαλύθηκαν και παρασύρθηκαν από το ποτάμι. Μερικές μέρες αργότερα, συγκροτείται διεπιστημονική ομάδα ηγούμενη από τον Πρύτανη ΕΜΠ, Ι. Γκόλια, στην οποία συμμετέχουν καθηγητές και ερευνητικό προσωπικό από 7 σχολές του ΕΜΠ, με στόχο την διεπιστημονική αυτοψία του Γεφυριού της Πλάκας, καθώς και η σύνταξη προτάσεων για την αποκατάστασή του. Συντονιστής ορίζεται ο Καθηγητής Δ. Καλιαμπάκος, Καθηγητής της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργιών ΕΜΠ.

Η συμβολή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είχε σκοπό να τιμήσει την Ήπειρο, τη γενέτειρα των ιδρυτών του και ως εκ τούτου αποφασίστηκε οι μελέτες να προσφερθούν στους αρμόδιους φορείς.

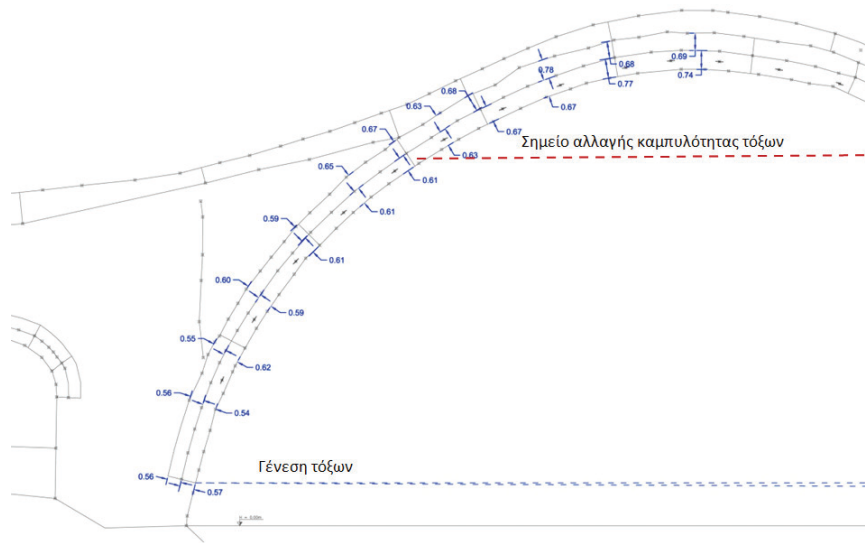
Με Πρυτανική Πράξη συμμετέχει το ΕΜΠ σε Προγραμματική Σύμβαση για την αναστήλωση του Γεφυριού της Πλάκας σε συνεργασία με το Υπουργείο Πολιτισμού, την Περιφέρεια Ηπείρου, τον Δήμο Βορείων Τζουμέρκων και το Τ.Ε.Ε-Τμήμα Ηπείρου. Φορέας υλοποίησης του έργου ορίζεται η Περιφέρεια Ηπείρου.

Τον Αύγουστο 2015 ξεκινούν προπαρασκευαστικές εργασίες στο Γεφύρι της Πλάκας (διάνοιξη προσπελαστικής οδού, ανάσυρση τμημάτων, γεωτεχνική έρευνα). Από πλευράς ΕΜΠ, ο καθηγητής Μ. Καββαδάς συμμετέχει ενεργά στην καθοδήγηση της γεωτεχνικής έρευνας και την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της.

Στις 30 Ιουνίου 2018, το Πολυτεχνείο, πραγματοποιεί επί τόπου επίσκεψη στο γεφύρι της Πλάκας, με σκοπό επιπρόσθετες μετρήσεις σε σχέση με την αποτίμηση των εναπομεινάντων τμημάτων του Γεφυριού, καθώς και τη λήψη επιπλέον δειγμάτων ιστορικών κονιαμάτων και λίθων. Τους επόμενους μήνες εκτελείται συστηματική μελέτη τόσο των ιστορικών δειγμάτων όσο και τον υλικών αποκατάστασης, καθώς και της συμβατότητας τους. Στο πλαίσιο της συμβολής του ΕΜΠ στο έργο αποκατάστασης, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, γνωστοποιήθηκαν στην Επιστημονική Επιτροπή και στους αρμόδιους φορείς.

### 2.2.3 Αρχιτεκτονική Αποτύπωση και κατασκευαστική ανάλυση

Το Γεφύρι αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα μονότοξα γεφύρια στα Βαλκάνια και έχει άνοιγμα 40 μέτρα και ύψος 21 μέτρα. Το πλάτος του στα άκρα είναι περίπου 4.5 μέτρα και 5 μέτρα, στα ανατολικά και δυτικά αντίστοιχα, ενώ μειώνεται προοδευτικά προς τα μεσόβαθρα και παραμένει σταθερό μόνο κατά μήκος του μεσαίου τόξου, το οποίο στο κάτω μέρος του έχει διατομή πλάτους 3.7 μέτρα. Το πλάτος της διατομής του τόξου, περίπου 7 μέτρα από την επιφάνεια έδρασης και σταθερό έως αυτό το ύψος, μειώνεται σε 3.3 μέτρα και με αυτή την τιμή παραμένει σταθερό έως το άνω μέρος της κατασκευής. Αυτή η ιδιαιτερότητα στη κατασκευή πιθανότατα στοχεύει στην ενίσχυση της ευστάθειας της έναντι δυνάμεων που ασκούν τάσεις κάθετα σε όλο το μήκος της.



Εικόνα 6. Κατάντη όψη. Μεταβολή διαστάσεων ύψους τόξων

Η χάραξη του μεσαίου τόξου, εξαιρουμένου του ανωτέρου μέρους, παρουσιάζει μορφή κυκλικού τόξου μικρότερου ενός ημικυκλίου με το κέντρο του να βρίσκεται σχεδόν 1.5 μέτρα χαμηλότερα της χορδής και ακτίνα που υπέρβαινε τα 20 μέτρα. Περίπου 16.5 μέτρα πάνω από το κέντρο, το υπόλοιπο μέρος του τόξου παρουσίαζε μεγαλύτερη καμπυλότητα και ανύψωση. Το κέντρο της νέας χάραξης υπολογίζεται περίπου 2 μέτρα ψηλότερα του αρχικού και η ακτίνα της, 1.5 μέτρα βραχύτερη της αρχικής. Σύμφωνα με τον Μ. Κορρέ, αυτή η ιδιορρυθμία στην κατασκευή δεν αποτελεί τυχαία παραμόρφωση αλλά «ηθελημένη τροποποίηση διαρκούσης της κατασκευής» (22).

Το κεντρικό τοξωτό τμήμα της γέφυρας αποτελείται από δύο επάλληλα τόξα, το τόξο εσωραχίου και το υπερκείμενο τόξο εξωραχίου. Τα δύο τόξα δομούνται από πλακοειδείς λίθους, αδρά λαξευμένους, πλάτους 9-12 εκ. Το ύψος του τόξου εσωραχίου είναι 57 έως 63 εκατοστά και του υπερκείμενου 56 έως 63 εκατοστά.

Οι θολίτες παρουσίαζαν πολύ καλή επαφή με πάχος αρμών μόλις 3-7 χιλιοστά, κάτι που είναι εμφανές τόσο από το εξωτερικό μέρος των τόξων όσο και από τις εσωτερικές περιοχές τους που αποκαλύφθηκαν κατά την κατάρρευση. Η κατάντη και ανάντη όψεις των τόξων έγιναν είτε με έναν είτε με δύο λίθους. Παράλληλα φαίνεται πώς το τόξο εσωραχίου ήταν βυθισμένο κατά 6.5-7.5 εκατοστά κατά του υπερκείμενου τόξου ενώ η δόμηση των τυμπάνων των βάθρων συνεχίζει στο ίδιο επίπεδο με το τόξο εξωραχίου (22).

Στα βάθρα υπήρχαν δύο ανακουφιστικά τοξωτά ανοίγματα, με το ένα στα ανατολικά να έχει πλάτος περίπου 6.5 μέτρα και το δεύτερο, στα δυτικά περίπου 4.80 μέτρα. Οι εξωτερικές παρειές των βάθρων είναι άριστα δομημένες (22). Κάθε παρειά των βάθρων έχει κατασκευαστεί από μία στρώση λίθων πλακοειδούς μορφής, ύψους 9-11 εκατοστά και μήκους 20-35 εκατοστά. Συνήθως, η μεγαλύτερη διάσταση τοποθετείται προς το εσωτερικό γέμισμα της γέφυρας.

Στις κύριες όψεις της γέφυρας, περίπου στην ίδια ευθεία με την εσωτερική παρειά της θεμελίωσης των βάθρων, έχει κατασκευαστεί κατακόρυφη εξοχή 18-25 εκατοστών

η οποία αντιστοιχεί στην διαπλάτυνση της γέφυρας προς τα βάθρα. Η κατακόρυφη αυτή εξοχή λίγο πριν συναντήσει το κεντρικό τόξο γίνεται οριζόντια, ενώ όταν το συναντά γίνεται παράλληλη με την κλίση των θολιτών. Η κατακόρυφη αυτή εξοχή στο Δυτικό βάθρο δεν συνεχίζει έως το στηθαίο αλλά διακόπτεται χαμηλότερα. Στο ανατολικό βάθρο συνεχίζεται έως το άνω τμήμα του στηθαίου (22).



Εικόνα 7. Το λίθινο οδόστρωμα του γεφυριού

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως αρχικά το γεφύρι δεν περιελάμβανε προστατευτικά στηθαία αλλά αυτά κατασκευάστηκαν μεταγενέστερα, το 1928. Το Γεφύρι όπως παραδόθηκε από τους μάστορες του, είχε αρχικά αρκάδες ενσωματωμένους σε λίθινο χαμηλό στηθαίο το οποίο εξείχε από το οδόστρωμα της γέφυρας μόλις μερικά εκατοστά. Οι αρκάδες αυτοί, το 1928, αντικαταστάθηκαν από κατακόρυφους λίθους, μικρότερης διατομής κατά την κατασκευή του στηθαίου. Από καταγραφές, φαίνεται πως η κατασκευή του στηθαίου είχε γίνει με μονή τοιχοποιία μικρότερου πάχους περίπου 30 εκατοστών. Το στηθαίο δεν παρουσίασε ποτέ την κατάλληλη συνοχή με το κυρίως τόξο και την ανωδομή των τυμπάνων καθώς συνεχώς εμφανίζονταν ρηγματώσεις πάρα τις όποιες επεμβάσεις (22).

Το οδόστρωμα διαμορφώθηκε με στόχο την σταθερότητα και ασφάλεια κατά την διέλευση του ανθρώπου και την μεταφορά ζώων. Έτσι είχαν τοποθετηθεί εγκάρσια στον διάδρομο προεξέχουσες σειρές από επιμήκεις λίθους που διαιρούν το καλντερίμι σε τμήματα, τις ούγιες, οι οποίες στο κεντρικό τμήμα οδοστρώματος πυκνώνουν και στα άκρα αραιώνουν. Οι διάφορες βλάβες και ρηγματώσεις, πολλές από τις οποίες οφείλονται στις πολεμικές συγκρούσεις στη περιοχή κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οδήγησαν σε πολλαπλές επιδιορθώσεις του οδοστρώματος. Το 2008 φαίνεται πως προστέθηκε λεπτή πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα στην ευρύτερη περιοχή του ανατολικού και δυτικού βάθρου της γέφυρας (22).

Εντοπίστηκαν επίσης δύο συστήματα μεταλλικών ενισχύσεων. Το βασικό σύστημα μεταλλικών ενισχύσεων είναι ορατό και γνωστό, αφού χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα γεφύρια και αποτελείται από εγκάρσιους διαμπερείς συνδέσμους που τοποθετούνται μόνο στο κύριο τόξο, και αγκυρώνονται με κλειδιά στις όψεις του, «δένοντας» το κατά την εγκάρσια έννοια.

Τον Αύγουστο του 2016 κατά τις εργασίες διευθέτησης της κοίτης εντοπίστηκε το δεύτερο σύστημα στο κατώτερο τμήμα του Δυτικού βάθρου τοποθετημένοι παράλληλα

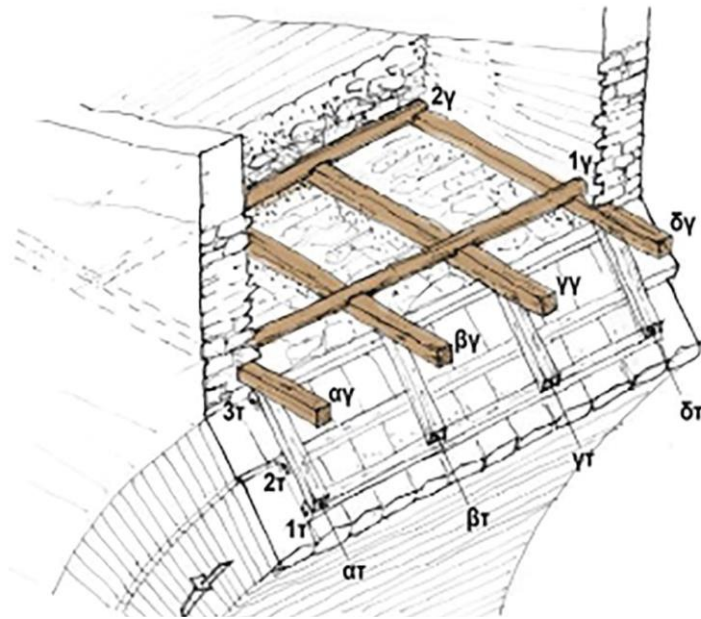
με τις στρώσεις των λίθων εγκάρσια ως προς τον άξονα τη γέφυρας, Πιθανότατα αποτελούν στοιχεία ενίσχυσης της σύνδεσης των λίθων μεταξύ τους.



Εικόνα 8. Διακρίνονται στο λευκό πλαίσιο διαμήκεις μεταλλικοί σύνδεσμοι στο δυτικό βάθρο.

Ιδιαίτερο σημείο το οποίο και πρέπει να αναφερθεί είναι πως μετά την κατάρρευση του ανακαλύφθηκε πως για την ανοικοδόμηση του χρησιμοποιήθηκαν ξύλινες εσχάρες σε καίρια σημεία της κατασκευής, στο κεντρικός τόξο και στα βάθρα.

Η πρώτη ξύλινη εσχάρα είναι τοποθετημένη ανά αποστάσεις κατά μήκος του διπλού τόξου της γέφυρας, ανάμεσα στους θολίτες και παράλληλα στην κλίση τους. Πριν την κατάρρευση του γεφυριού η εσχάρα ήταν μη ορατή τοποθετημένη μερικά εκατοστά εσωτερικά των εξωτερικών επιφανειών των τόξων. Σύμφωνα με την μελέτη του ΕΜΠ το 2016, αποτελούταν από τρία ξύλα, 5-6 εκατοστά ύψος και πλάτος περίπου 12 εκατοστά, τοποθετημένα κατά την εγκάρσια έννοια παράλληλα με το πλάτους της γέφυρας, σε απόσταση μεταξύ το περίπου 50 εκατοστά και τέσσερα ξύλα μικρότερου μήκους τοποθετημένα πάνω από τα εγκάρσια, παράλληλα με την κλίση των θολιτών σε απόσταση περίπου 1 μέτρου (22).



Εικόνα 9. Αναπαράσταση διάταξης ξύλων εσχάρας στην περιοχή του γεμίματος

Το δεύτερο σύστημα ξυλίων εσχάρων βρισκόταν εγκιβωτισμένο στο γέμισμα της γέφυρας στις ίδιες θέσεις που υπήρχε και η ξύλινη εσχάρα των τόξων. Τα ξύλα είχαν διατομή είτε ορθογωνισμένη είτε κυκλική και ήταν τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο με μικρή εγκοπή για την καλύτερη επαφή των κυκλικών διατομών. Ούτε αυτή η εσχάρα ήταν ορατή και αποτελείται από τέσσερα διαμήκη ξύλα σε απόσταση μεταξύ τους περίπου 1 μέτρου και άγνωστου αριθμού εγκάρσια ξύλα τοποθετημένα πάνω από τα διαμήκη σε αρκετά μεγαλύτερη απόσταση περίπου 3 μέτρων.

Σύμφωνα με την αναπληρώτρια καθηγήτρια του Τ.Ε.Ι. Συντήρησης της Αθήνα κ. Α. Πούρνου πιστοποίησε πως τα ξύλα της εσχάρα των τόξων είναι δρύινα ενώ του γεμίματος ελάτη (22).

Οι εσχάρες πιθανώς χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εξασφάλιση της συνοχής της κατασκευής κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης του ασβεστοκονιάματος δομής και την ενίσχυση της συνεργασίας των δύο τόξων. Επίσης, η στρώση των διαμήκη ξύλων στο τόξο, όπως και τα εγκάρσια ξύλα στα βάθρα, αναλαμβάνουν τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εγκάρσια κατεύθυνση λόγω των μεγάλων θλιπτικών τάσεων εντός του επιπέδου του γεφυριού. Όσον αφορά, την εσχάρα του γεμίματος πιθανώς χρησιμοποιήθηκε για την προσπάθεια αγκύρωσης της περιοχής των τόξων στη συμπαγή μάζα της λιθοδομής που αποτελούσε το γέμισμα των βάθρων, τουλάχιστον μέχρι την πήξη και σκλήρυνση των ασβεστοκονιαμάτων (22).

Είναι εμφανές πως όπως και πολλά γεφύρια στην Ήπειρο, έτσι και εδώ, χρησιμοποιήθηκαν πλακοειδή τεμάχια ασβεστόλιθου. Εκ των οποίων πελεκητά είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις άντυγες. Το μέσος πάχος τους είναι 12 εκατοστά, το κατά την ακτίνα μήκος τους έφθανε τα 65 εκατοστά και το βάρος τους τα 80 χιλογραμμάρια. Έντονη εντύπωση αφήνει το μικρό πάχος του κονιάματος στους αρμούς των τόξων, το οποίο πιθανότατα οδήγησε στην ελαχιστοποίηση της συμπίεσης και παραμόρφωσης της λιθοδομής.



Για το γέμισμα μεταξύ των παρειών κητών τόξων χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη λίθου με υψηλό πορώδες διότι μείωναν σημαντικά το βάρος στο κεντρικό ελεύθερο τμήμα της γέφυρας, βελτιώνοντας την καταπόνηση του κεντρικού τόξου από νεκρά φορτία.



Εικόνα 10. Το γέμισμα στο βάθρο του γεφυριού

Σύμφωνα με την μελέτη του Μ. Κορρέ (22) στο κύριο τόξο εμφανίζονται σε κάθε πλευρά του κύριου τόξου περίπου 450 λίθοι καθώς και στο επιβοηθητικό. Οκτώ φορές περισσότεροι λίθοι μεταξύ των δύο όψεων του τόξου. Πιθανολογείται πώς για το γέμισμα χρησιμοποιήθηκαν πάνω από 10.000 λίθους.

Ήδη από τις πρώτες έρευνες τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται πως είναι κονιάματα επί τόπου έσβεσης της ασβεστού και επί τόπου ανάμιξης με υλικά, τα οποία δρουν ως ενεργά αδρανή ή πρόσθετα. Το αυθεντικό κονίαμα παρουσιάζει έντονα υδραυλικό χαρακτήρα

### **Παθολογία γεφυριού**

#### *Ρηγματώσεις και αστοχία λιθοδομής*

Ρηγματώσεις έχουν εμφανιστεί σε αρκετά και διαφορετικά σημεία του γεφυριού. Τα αίτια της εμφάνισης του είναι πολυσύνθετα και σχετίζονται τόσο με τις τάσεις που εμφανίζονται στην γέφυρα, την αρχική ανοικοδόμηση του γεφυριού, τις ζημιές που

συνέβησαν από εξωτερικές παρεμβάσεις αλλά και από τις ατελείς επεμβάσεις και επιδιορθώσεις. Οι σημαντικότερες ρωγμές εμφανίζονταν στα εξής σημεία (22):

- Στο ένα τρίτο του ανοίγματος, περίπου, προς τα ανατολικά είχε εντοπιστεί ακτινωτό σύστημα ρωγμών εύρους 0.5cm-8.0cm γύρω από οπή διαστάσεων 0.90m\*160m με σύγχρονη μετατόπιση μεγάλου τμήματος του τόξου εσωραχίου με έντονα αποσαθρωμένη λιθοδομή. Παράλληλα, τμήμα του τόξου εξωραχίου, σε όλο το πλάτος της γέφυρας και σε μήκος περίπου 4.5 μέτρα είχε καταστραφεί. Η Δημιουργία της βλάβης τοποθετείται στην διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου λόγω είτε εκρηκτικών ή οβίδας είτε προσπάθειας κατεδάφισης της γέφυρας.
- Σε συμμετρική θέση ως προς την παραπάνω βλάβη, υπάρχει ευθύγραμμη ρωγμή στο εσωράχιο του κύριου τόξου, σε όλο το πλάτος του και σε ένα εύρος των μερικών εκατοστών. Πιθανότατα αυτή η βλάβη οφείλεται σε εξάρσεις στην μεταβολή έντασης οι οποίες παρουσιάζονται πάνω στην αλλαγή της καμπυλότητας του κεντρικού τόξου. Παράλληλα αυτή η βλάβη είναι πιθανό να οφείλεται και στο γεγονός ότι στο σημείο αυτό το κεντρικό τόξο πλέον αναπτύσσεται μόνο του χωρίς την μάζα των μεσόβραθρων αριστερά ή δεξιά.
- Στις κλείδες των ανακουφιστικών τόξων, οι οποίες εκτείνονταν σε όλο το πλάτος του εσωραχίου και συνεχίζονταν και στα τύμπανα άνωθεν του των τόξων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ρωγμές σε αυτά τα σημεία, τουλάχιστον στο δυτικό ανακουφιστικό τόξο, είχαν αποκατασταθεί με αρμολόγημα αλλά είχαν επανεμφανιστεί. Η έξαρση και επανεμφάνιση ρηγματώσεων στο σημείο πιθανότατα έχουν να κάνουν με το γεγονός πως οι περιοχές στη κλείδα των ανακουφιστικών τόξων παρουσιάζουν ευαισθησία καθώς αποτελούν σημεία συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων από κάθε δράση στο γεφύρι.

#### *Υποσκαφή θεμελίων*

Το 1995 καταγράφηκε έντονο φαινόμενο υποσκαφής στο θεμέλιο του ανατολικού μεσοβάθρου και στο θεμέλιο του τοιχίου αντιστήριξης κάτωθεν του ανατολικού ακροβάθρου και στο πέριξ αυτού πρανές. Το φαινόμενο αυτό θεωρείται και ένα από τα σημαντικότερα αίτια κατάρρευσης του γεφυριού καθώς δεν είχε γίνει καμιά προσπάθεια για την αντιμετώπιση του, από την ανακάλυψη του και μετά (22).

#### *Παραμορφώσεις*

Χάρης την ερευνητική ομάδα της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ με συντονίστρια την Ελένη Μαϊστρου διεξάχθηκε προσπάθεια για την ψηφιακή χάραξη του κεντρικού τόξου. Το έργο αυτό, σε συνδυασμό με την σύγκριση με τις τοπογραφικές μετρήσεις του ΕΜΠ το 2015 και 2016 καθώς και τα σχέδια αποτύπωσης του 1984 από τον Μ. Κορρέ και του 2005 της μελέτης Παπαγεωργίου, έδωσαν και πολλά στοιχεία ως προς την παθολογία του μνημείου και την παραμόρφωση της μορφής και δομής του. Συγκεκριμένα (22):

- Φαίνεται πως ήδη από το 1984 υπάρχει μετατόπιση του άξονα συμμετρίας του κεντρικού τόξου προς τα ανατολικά. Η καμπύλη του εσωραχίου πριν την κατάρρευση παρουσιάζει μετατόπιση προς τα ανατολικά κατά 20 εκατοστά, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την μετατόπιση του άξονα συμμετρίας στο άνω μέρος του τόξου στα 60 εκατοστά προς τα ανατολικά
- Η ανάντη ακμή του εσωραχίου που αντιστοιχεί στο άνω τμήμα του κεντρικού τόξου με τη διαφοροποιημένη καμπυλότητα βρίσκεται κατά 20 περίπου εκατοστά ψηλότερα από την αντίστοιχη ακμή της κατάντη πλευράς. Επίσης παρατηρείται μια ελαφριά κλίση στις ούγιες από 2 έως 7 εκατοστά προς την κατάντη πλευρά ενώ ελαφριά κλίση του καταστρώματος υπάρχει και στις περιοχές πάνω από τα βάθρα. Φαίνεται πως υπάρχει σημαντική στροφή του άνω μέρους του τόξου και του καταστρώματος προς τα κατάντη περί τον οριζόντιο άξονα. Την ίδια στιγμή, κάτω από την περιοχή αλλαγής της καμπυλότητας, στο τμήμα του τοξωτού φορέα είχε παρατηρηθεί η αντίστροφη μετακίνηση, με μέγιστη διαφορά μεταξύ των ακμών του εσωραχίου περίπου 15 εκατοστά.

#### *Άλλες φθορές*

Εμφανίζεται μετατόπιση και οριζόντια στροφή του δυτικού μεσοβάθρου οι οποίες είναι συμβατές με την κύρτωση του κεντρικού τόξου προς κατάντη. Αυτή η παραμόρφωση σχετίζεται άμεσα με τις ρηγματώσεις που κάνουν την εμφάνισή τους στην κλείδα του δυτικού ανακουφιστικού τόξου, όπως και αναφέρθηκε.

Στη νότια όψη και μεταξύ δυτικής ανακουφιστικής καμάρας και πρανούς είχε καταγραφεί αποδιοργάνωση όλου του κατώτατου τμήματος της τοιχοποιίας του τυμπάνου. Πριν την κατάρρευση του γεφυριού, η ζημιά αυτή είχε επιδιορθωθεί. Στο δυτικό πρανές υπάρχει μετακίνηση επιφανειακής στρώσης εδαφικού υλικού επί υποκείμενων αναστροφών σχιστολιθικών στρώσεων.

Παρατηρείται, τέλος, στη κατάντη όψη του Δυτικού βάθρου, σημαντική μείωση της εξοχής στον άξονα του ύψους, γεγονός που πιθανότατα οφειλόταν στις επανειλημμένες πρόχειρές επεμβάσεις στερέωσης και επισκευής των παρειών των τυμπάνων και του στηθαίου (22).

#### *Υγρασία*

Η ροή όμβριων υδάτων κατά την επιφάνεια ή δια την μάζα, προκαλούσε τη συνεχή διάλυση των κονιαμάτων και αποκόμιση του διαλύματος, του οποίου μέρος, ανακρυσταλλωμένο σχημάτισε κρούστες και σταλακτίτες αλάτων ασβεστίου σε όλη την έκταση των εσωραχίων.

Η διείδυση των υδάτων πιθανότατα συνέβη από το καλντερίμι, το οποίο συγκρατεί μεγάλο μέρος του νετού λόγω του τρόπου διάταξης των λίθων. Το στηθαίο ήταν ατελώς συνδεδεμένο με το κυρίως τόξο και την ανωδομή των τυμπάνων, με αποτέλεσμα να απορροφά υγρασία στην βάση του, εγκλωβίζοντας το νερό της βροχής.

Πάνω από τα βάθρα η τοιχοποιία των τυμπάνων εξέχει δημιουργώντας βάση έδρασης για το στηθαίο. Φαίνεται ότι επανειλημμένα είχε επιχειρηθεί η σφράγιση των αρμών, ώστε να μην εισέρχονται τα όμβρια αποσαθρώνοντας το εσωτερικό των βάθρων, χωρίς όμως επιτυχία, όπως φαίνεται από την βλάστηση που αναπτυσσόταν διαχρονικά



Εικόνα 11. Άποψη του του δυτικού βάθρου από τα βόριο-ανατολικά με εμφανή σημάδια φθοράς

### **Επεμβάσεις και Επισκευές**

Υπάρχουν ακόμα μερικές επεμβάσεις πάνω στην δομή του γεφυριού των οποίων η χρονολογία κατασκευής τους είναι άγνωστη. Συγκεκριμένα η πρώτη είναι η κατασκευή λίθινου τοίχου αντιστήριξης στην περιοχή έδρασης του θεμελίου του ανατολικού ακροβάθρου. Η δεύτερη είναι η κατασκευή λίθινου πτερυγότοιχου ανάντη του μεσοβάθρου και η πλήρωση με τοιχοποιία του ανακουφιστικού ανοίγματος κάτω από την γένεση του ανακουφιστικού τόξου.

Παράλληλα ανά τα χρόνια γίναν αναρίθμητες επισκευές σε όλο το εύρος της γέφυρας. Μία από τις πιο σημαντικές όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η πλήρωση της περιοχής που καταστράφηκε λόγω έκρηξης Κατά τον ΔΠΠ με σκυρόδεμα αφότου τέλειωσε ο πόλεμος από το Ελληνικό Κράτος.

Πολλές επισκευές έγιναν και το 2007-2008 μετά από την μελέτη που εκπονήθηκε για την Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Ιωαννίνων το 2005 (22). Συγκεκριμένες επισκευές είναι:

- Η αντικατάσταση εμφανών επιφανειών σκυροδέματος την περιοχή της έκρηξης με λιθοδομή και η επισκευή της με αρμολόγημα.

- Η τοποθέτηση Αρμολογήματος για να καλυφθεί η ρωγμή στο δυτικό τμήμα του κυρίως τόξου.
- Η επισκευή με αρμολόγημα των ρωγμών στις περιοχές των δύο ανακουφιστικών τόξων στο δυτικό και ανατολικό βάθρο
- Προσθήκη νέας λιθοδομής ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα υποσκαφής στην έδραση του θεμελίου του τοίχου αντιστήριξης
- Ανακατασκευή της λιθοδομής της τοιχοποιίας της νότιας όψης στο δυτικό ακρόβαθρο
- Τοποθέτηση μεταλλικών ανοξειδωτων ελκυστήρων στα δύο ανακουφιστικά τόξα του δυτικού και ανατολικού ακρόβαθρου με στόχο την σύνδεση του σώματος του μεσοβάθρου με αυτό του ακροβάθρου στη στάθμη γένεσης των τόξων.

### Κατάρρευση

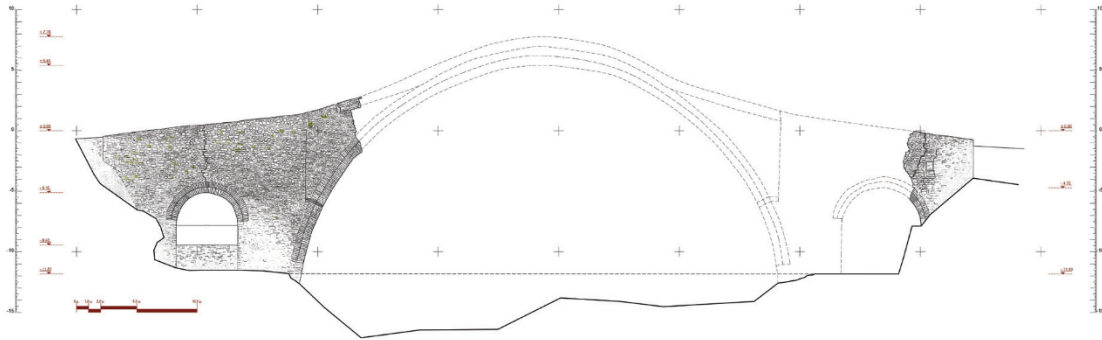
Το γεφύρι κατέρρευσε, έπειτα από έντονη βροχόπτωση 1 Φεβρουαρίου του 2015. Σε αυτή την φάση κατέρρευσε περίπου το 50% της γέφυρας, το οποίο και κατέληξε στο ποτάμι. Το 80% αυτού του συνόλου έχει παρασυρθεί και χαθεί ενώ 4 θραύσματα βυθίστηκαν και κατέληξαν στην κοίτη του ποταμού (22). Τα θραύσματα αυτά έχουν πλέον συλλεχθεί. Είναι πολύ δύσκολο να οριστικοποιηθούν ποια ακριβώς ήταν τα αίτια που λειτούργησαν ώστε να καταρρεύσει το γεφύρι.



Εικόνα 12. Τα τμήματα του γεφυριού που παρέμειναν στην θέση τους και τα απομεινάρια που κατέληξαν στην κοίτη του ποταμού

Σε κάθε όχθη φαίνεται πως παρόλη την κατάρρευση έχει διασωθεί ένα σημαντικό κομμάτι του γεφυριού. Συγκεκριμένα έχει παραμείνει ένα μέρος του ανατολικού βάθρου έως το σημείο όπου το ανακουφιστικό τόξο σχηματίζει γωνία περίπου 45

μοιρών από την ανατολή γένεσή του. Από την άλλη όχθη, έχει διασωθεί το δυτικό βάθρο έως περίπου 41 μοίρες από τη θεωρητική γένεση του τόξου. Φαίνεται πως και στα δύο βάθρα η αστοχία έχει πραγματοποιηθεί σε θέση όπου υπήρχαν ξύλινα στοιχεία.



Εικόνα 13. Τα τμήματα που έχουν διασωθεί. Στο σχέδιο φαίνεται η αποτύπωση του γεφυριού από μελέτη του εργαστηρίου Γεωδαισίας Αγρονόμων και Τοπογράφων ΕΜΠ

Ειδικά στο δυτικό βάθρο ήταν πλέον εμφανής αρκετές ρηγματώσεις η οποίες είτε προκλήθηκαν από την κατάρρευση είτε αποτελούν επανεμφάνιση παλαιότερων επισκευασμένων ρωγμών. Συγκεκριμένα παρατηρούνται ρωγμές στο κατάντη τύμπανο καθώς και ρηγμάτωση υπό γωνία των κυρίως τόξων στην όψη από ανάντη, ακριβώς στη θέση διαπλάτυνσης του βάθρου. Η ρωγή αυτή φαίνεται να είχε συγκρατηθεί από σωστή λειτουργία της μεταλλικής άρπιζας στη θέση αυτή (22).

Αξίζει να σημειωθεί πως παρατηρείται επανεμφάνιση ρωγμής στο κλειδί του ανακουφιστικού τόξου του δυτικού βάθρου, η οποία καταλαμβάνει όλο το πλάτος της γέφυρας κατακόρυφα στα τύμπανα μέχρι τα στηθαία και το κατάστρωμα. Τέλος, σε αντίθεση με την βάση του δυτικού βάθρου, η οποία δεν παρουσιάζει μεταβολή της θέσης της, η ανωδομή του φαίνεται να έχει μετατοπιστεί και πιθανότατα οφείλεται στην αλλοίωση της στατικής λειτουργίας λόγω απώλειας του κεντρικού τόξου (22).

Είναι πολύ δύσκολο να οριστικοποιηθούν ποια ακριβώς ήταν τα αίτια που λειτούργησαν ώστε να οδηγηθούμε στην κατάρρευση. Παρ' αυτά, όλες οι μελέτες μέχρι τώρα οδηγούν στο συμπέρασμα πως το βασικότερο αίτιο της κατάρρευσης είναι η υποσκαφή. Παράγοντες όπως το ίδιο βάρος, κάτι που σε τέτοιου είδους γέφυρες είναι το σημαντικότερο αίτιο για τις τάσεις που αναπτύσσονται, τα ιδιαίτερα μορφολογικά της χαρακτηριστικά (αλλαγή καμπυλότητας, αλλαγή πάχος του τόξου κλπ.), η υδραυλική φόρτιση και η σεισμική δραστηριότητα, σίγουρα παίζανε έναν ρόλο στην κατάρρευση της γέφυρας, Παρόλα αυτά, η γέφυρα παρουσίαζε ικανοποιητική αντοχή απέναντι σε αυτούς τους παράγοντες φθοράς, οι οποίοι θα μπορούσαν να είχαν αντιμετωπιστεί με την σωστή συντήρηση του μνημείου (22).

Η Διερεύνηση Στατικής Λειτουργίας της Ιστορικής Γέφυρας Πλάκας, που εκπονήθηκε από το γραφείο Καλλιεργίος ΟΤΜ Α.Ε καταλήγει στο συμπέρασμα ότι πράγματι, σημαντικότερο αίτιο για την κατάρρευση της γέφυρας είναι η ύπαρξη

υποσκαφής. Τα στοιχεία που δείχνουν προς αυτή την κατεύθυνση είναι η φύση των επιφανειών αστοχίας, η θέση των θραυσμάτων, οι ρηγματώσεις των εναπομεινάντων τμημάτων καθώς και οι παραμορφώσεις που έχουν εκδηλωθεί (22).

## 3 Πειραματικό Μέρος

### 3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, η πορεία που ακολουθήθηκε υπάγεται στα παρακάτω τρία βήματα:

- Χαρακτηρισμός των ιστορικών λίθων και του λίθου αποκατάστασης
- Αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Αποτίμηση συμβατότητας των ιστορικών λίθων σε σχέση με τον λίθο αποκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά φορτία

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω βήματα έγινε κατάλληλη δειγματοληψία με αντιπροσωπευτικά υλικά του γεφυριού. Έπειτα εργαστηριακά ακολουθήθηκαν διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες με σκοπό την ταυτοποίηση των ιστορικών λίθων και την κατανόηση της ανθεκτικότητάς τους στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η συμβατότητα των υλικών ελέγχθηκε στο πλαίσιο της φυσικοχημικής και μηχανικής συμβατότητας, αλλά και με βάση την αισθητική συμβατότητα (23) (24).

Οι παράμετροι που έπρεπε να ελεγχθούν καθώς και η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την κάθε μια εμφανίζεται παρακάτω:

- Μορφολογική μελέτη: Ψηφιακή μικροσκοπία
- Ορυκτολογική μελέτη: Οπτική μικροσκοπία και ανάλυση με περίθλαση ακτινών X
- Χημική σύσταση: Θερμική ανάλυση (TG-DTA)
- Χαρακτηριστικά μικροδομής: Ποροσιμετρία υδραργύρου
- Υγρομετρικά χαρακτηριστικά: Δοκιμές ολικής εμβάπτισης σε νερό και δοκιμές υδατοαπορρόφησης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης
- Έλεγχος συνεκτικότητας: Υπερηχοσκόπηση
- Μελέτη Μηχανικών αντοχών: Δοκιμή σε θλίψη
- Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμές ποιοτική χημικής ανίχνευσης χλωριόντων και θειϊκών
- Έλεγχος χρωματικών παραμέτρων: Χρωματομετρία



## 3.2 Ψηφιακή Μικροσκοπία

Η μικροσκοπία οπτικών ινών αποτελεί μια μη καταστρεπτική μέθοδο που επιτρέπει την εξέταση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των υλικών. Η διάταξη της μεθόδου είναι φορητή και κατ' επέκταση επιτρέπει την επιτόπου εξέταση της επιφάνειας του υλικού που ενδιαφέρει στο πλαίσιο που αυτό συνιστά. Χωρίς να χρειάζεται προ-κατεργασία. Για το λόγο αυτό, Η μέθοδος αυτή είναι ικανή, σε συνεργασία με άλλες μη καταστρεπτικές μεθόδους εξέτασης των υλικών, να δώσει στοιχεία όχι μόνο για την μικροδομή του υλικού, αλλά και για τον βαθμό φθοράς που έχει υποστεί (π.χ. ανάπτυξη κρυστάλλων ή εξανθήσεις) (13).

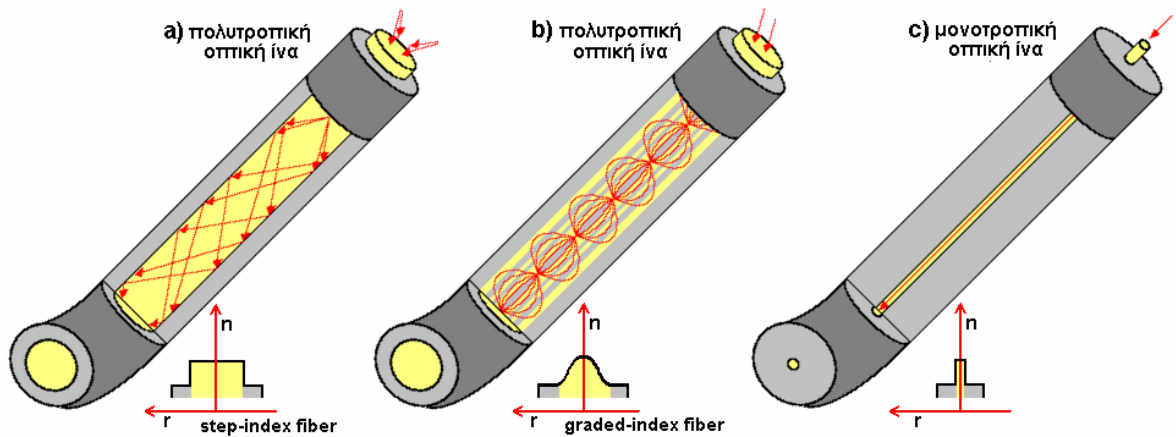
### 3.2.1 Αρχή της μεθόδου

Η οπτική μετάδοση εκμεταλλεύεται ως φορέα σημάτων το φως αντί του ηλεκτρικού ρεύματος ενώ η οπτική ίνα αποτελεί τον αγωγό της μετάδοσης αυτής. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα που πρέπει να μεταδοθεί μετατρέπεται στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης κατά κανόνα σε ακολουθία ψηφιακών παλμών που διοχετεύονται στην οπτική ίνα. Στο άλλο άκρο της ζεύξης ανιχνεύονται οι παλμοί και μετατρέπονται σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα (13).

Η οπτική ίνα αποτελείται από υαλώδη κυλινδρικό πυρήνα και περίβλημα από το ίδιο υλικό, με ελαφρά μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Αυτό έχει σαν συνέπεια, όταν η ακτίνα φωτός εισέρχεται στην ίνα υπό κατάλληλη γωνία, να ανακλάται διαδοχικά στο περίβλημα και να μεταδίδεται παγιδευμένη στην ίνα (25) (13).

Οι οπτικές ίνες ανάλογα με την κατασκευή τους και τον τρόπο διάδοσης του φωτός, διακρίνονται τρεις τύπο:

- Πολυτροπική ίνα με βηματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης (multimode step-index fiber), δηλαδή απότομη μεταβολή από την ίνα στο περίβλημα και πολλαπλά κύματα μετάδοσης. Εδώ το φως διαδίδεται με ολικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος. Ο πυρήνας στον τύπο αυτό έχει διάμετρο 100 ως 200  $\mu\text{m}$  και το περίβλημα από 140 ως 280  $\mu\text{m}$ . Τα πολλαπλά κύματα διανύουν διαφορετικές διαδρομές με την ίδια ταχύτητα και φθάνουν σε διαφορετικούς χρόνους στο τέρμα του αγωγού.
- Πολυτροπική ίνα με βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης (multimode graded-index fiber) και πολλαπλά κύματα. Ο δείκτης διάθλασης μειώνεται εκθετικά από το κέντρο προς την περιφέρεια. Έτσι παρόλο που διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις φθάνουν περίπου στον ίδιο χρόνο στο τέρμα με τα κύματα που κινούνται παράλληλα στον άξονα.
- Μονοτροπική ίνα με βηματική μεταβολή του δείκτης διάθλασης (monomode ή single mode-index fiber) και ένα μόνο κύμα. Αυτό επιτυγχάνεται με πολύ μικρό πυρήνα (περίπου 10  $\mu\text{m}$ )



Εικόνα 14.Είδη οπτικών ινών

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή λευκό φως, συγκεκριμένα λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος από 400 nm έως 760 nm περίπου. Καθώς τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων κυμαίνονται από 0.15 μέχρι 2nm, είναι δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι φαίνονται σαν συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδραση τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται στην οπτική μικροσκοπία με βάση τις εξισώσεις του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (25).

Η φωτεινή πηγή περιγράφεται σαν ένας αρμονικός ταλαντωτής που χαρακτηρίζεται από τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Όλες οι σχέσεις που διέπουν την οπτική μικροσκοπία βασίζονται στην πόλωση του φωτός που επιτυγχάνεται με τα πρίσματα Nicols. Στη μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται όμως λευκό φως που δεν είναι ούτε πολωμένο, ούτε μονοχρωματικό. Το γεγονός αυτό κάνει αδύνατη την ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξάγονται με τη μικροσκοπία οπτικών ινών. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί τη σημασία των ποιοτικών παρατηρήσεων (25) (13).

### 3.2.2 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη είναι ένα φορητό μικροσκόπιο με τα εξής κυριότερα τμήματα (13):

- Οπτικό μικροσκόπιο i-scope Moritex
- Έλεγχος έντασης φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.

- Σύστημα εστίασης αντικειμενικού φακού. Κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν φακοί μεγέθυνσης x25, x50 και x100. Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών.

Κατά την μικροσκοπική εξέταση του δείγματος, το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και να ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Σε θέσεις πλάγιες σχετικά με τη δέσμη φωτός, χαρακτηριστικά της επιφάνειας εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίθεση από την υπόλοιπη εικόνα, διότι ανακλάσεις με γωνίες μεγαλύτερες του μέτρου ικανότητας συλλογής φωτός συνεπάγονται απώλειες φωτός. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό η επιφάνεια του δείγματος να είναι όσο πιο επίπεδη και λιγότερο τραχύς γίνεται ώστε οι εικόνες να είναι καλύτερης ποιότητας (13).

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή λευκό φως, συγκεκριμένα λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος από 400 nm έως 760 nm περίπου. Καθώς τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων κυμαίνονται από 0.15 μέχρι 2nm, είναι δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι φαίνονται σαν συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδραση τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται στην οπτική μικροσκοπία με βάση τις εξισώσεις του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (25).

Η φωτεινή πηγή περιγράφεται σαν ένας αρμονικός ταλαντωτής που χαρακτηρίζεται από τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Όλες οι σχέσεις που διέπουν την οπτική μικροσκοπία βασίζονται στην πόλωση του φωτός που επιτυγχάνεται με τα πρίσματα Nicols. Στη μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται όμως λευκό φως που δεν είναι ούτε πολωμένο, ούτε μονοχρωματικό. Το γεγονός αυτό κάνει αδύνατη την ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξάγονται με τη μικροσκοπία οπτικών ινών. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί τη σημασία των ποιοτικών παρατηρήσεων (25) (13).

### 3.3 Οπτική Μικροσκοπία

Η πετρογραφική μελέτη χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της γεωγραφικής προέλευσης ενός δομικού υλικού και για την αναγνώριση των δομικών ορυκτών του. Η αναγνώριση επιτυγχάνεται με την εξέταση μιας λεπτής τομής από τον προς εξέταση λίθο και λεπτών τομών δειγμάτων από πυκνές πηγές προέλευσης του υλικού σε πετρογραφικό/πολωτικό μικροσκόπιο (11).

#### 3.3.1 Αρχή της Μεθόδου

Στην αναγνώριση ενός ορυκτού σε λεπτή τομή με τη χρήση πετρογραφικού μικροσκόπιο, τα αρχικά διαγνωστικά στοιχεία είναι το σχήμα του κρυστάλλου, τα επίπεδα σχισμών και οι οπτικές ιδιότητες σε επίπεδο πολωμένο φως. Η αναγνώριση μέσω του σχήματος είναι περιορισμένης χρήσης, γιατί στις πέτρες τα ορυκτά σπάνια μπορούν να αναπτυχθούν σε καλοσχηματισμένους κρυστάλλους (11).

Ακόμα, το σχήμα που παρατηρείται εξαρτάται από το σχήμα του κρυστάλλου που έχει κοπεί από τη λεπτή τομή και έτσι είναι τυχαίο. Παρ' όλα αυτά, επειδή υπάρχει σχέση ανάμεσα στον τύπο του κρυστάλλου και των διαρρήξεων, οι γραμμές διάρρηξης οι οποίες παρουσιάζονται στις λεπτές τομές σαν ραβδώσεις που διατρέχουν τον κρύσταλλο, αποτελούν ένα αξιόπιστο διαγνωστικό στοιχείο (11).

Το φυσικό φως που παράγεται από συνήθεις πηγές όπως ο ήλιος ή οι λάμπες πυράκτωσης αποτελείται από στοιχειώδη κύματα, κάθε ένα από τα οποία έχει άλλο επίπεδο ταλάντωσης, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται γωνίες οποιασδήποτε τιμής ως προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και το φυσικό φως να μην εμφανίζεται πολωμένο. Όταν όμως διέρχεται μέσα από ένα πρίσμα Nicol που δρα ως πολωτής, αναλύεται λόγω διπλοδιαθλαστικότητας σε δύο πολωμένες γραμμικές ακτίνες από τις οποίες η μία μόνο εξέρχεται από το πρίσμα παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο του πολωτή, με μειωμένη την έντασή της στο μισό (11).

Το πρίσμα Nicol μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αναλυτής. Αν πάνω στο πρίσμα πέσει δέσμη γραμμική πολωμένου φωτός και περιστραφεί το πρίσμα γύρω από άξονα που συμπίπτει προς τη διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης, κάθε φορά που το χαρακτηριστικό επίπεδο του Nicol συμπίπτει με επίπεδο ταλάντωσης του φωτός, η δέσμη που εξέρχεται έχει την πλήρη έντασή της, ενώ σε άλλες θέσεις η ένταση είναι ελαττωμένη, για να γίνει ίση προς μηδέν, όταν τα δύο επίπεδα γίνουν κάθετα (11).

### 3.3.2 Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Για την παρασκευή λεπτών τομών κόβεται από το λίθο κομμάτι πάχους 1 mm και επιφάνειας 2 cm<sup>2</sup>. Η μία πλευρά λειαινεται με γυαλόχαρτο και επικολλάται πάνω σε αντικειμενοφόρο πλάκα, ενώ στην άλλη πλευρά μειώνεται το πάχος έως 30 μm (11).

Η πλειοψηφία των ορυκτών που υπάρχουν είναι διαφανή σε αυτό το πάχος και το δείγμα εξετάζεται στο πετρογραφικό μικροσκόπιο. Η διαφορά αυτού του μικροσκοπίου από το σύνηθες οπτικό μικροσκόπιο έγκειται στην προσθήκη πολωτή και αναλυτή οι οποί είναι δύο πρίσματα Nicol (11).

Το φως από κατάλληλη πηγή αντανακλάται με καθρέφτη μέσα στον πολωτή, όπου εστιάζεται πάνω στη λεπτή τομή με συγκεντρωτικούς φακούς. Μεγέθυνση από 20 έως 200 φορές επιτυγχάνεται από τους αντικειμενικούς φακούς και το σύστημα της διόπτρας ανάμεσα στα οποία βρίσκεται ο αναλυτής. Το επίπεδο όπου βρίσκονται η λεπτή τομή και ο πολωτής μπορεί να περιστραφεί σε βαθμονομημένη κλίμακα (11).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε Οπτικό Πολωτικό Μικροσκόπιο (τύπου Zeiss Axioskop 40). Η μικροφωτογράφιση των δειγμάτων έγινε με έγχρωμη video-camera (τύπου Progress Gryphax της εταιρίας Jenoptic), προσαρτημένη στο παραπάνω μικροσκόπιο και η επεξεργασία των φωτογραφιών με το ειδικό λογισμικό Progress Gryphax.

### 3.4 Περίθλαση Ακτινών Χ

#### 3.4.1 Αρχές μεθόδου

Η ανάλυση με περίθλαση ακτινών Χ βασίζεται την περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτινών Χ, γνωστού μήκους κύματος  $\lambda$ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων δειγμάτων και στη συνέχεια στον προσδιορισμό μέσω της αντίστοιχης γωνίας  $\theta$ , των εσωτερικών διαστημάτων  $d$  των επιπέδων με εφαρμογή του τύπου του Bragg:

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

Τα προσδιορισθέντα  $d$  είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση και με τον προσδιορισμό του γίνεται ταυτοποίηση της ένωσης ή των ενώσεων που συνιστούν την εξεταζόμενη ουσία. Το γεγονός αυτό καθιστά την ανάλυση ποιοτική.

Είναι δυνατό να γίνει ποσοτική ανάλυση μιας ένωσης με κατάλληλη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας σε επιλεγμένη γωνία, μέγεθος το οποίο είναι ανάλογο της ποσότητας της κρυσταλλικής ένωσης (26) (27).

#### 3.4.2 Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι το D8 Advance της εταιρίας Bruker και η παραγωγή των ακτινοδιαγραμμάτων γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η αξιολόγηση τους γίνεται μέσω του λογισμικού DIFFRAC. A.T. search program (26) (27).

Η τεχνική ανάλυσης που ακολουθήθηκε είναι η τεχνική της περίθλασης σε σκόνη δείγματος. Η πηγή της ακτινοβολίας είναι ένας σωλήνας ακτινών Χ και με τη βοήθεια του μονοχρωμάτορα προκύπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, η οποία διέρχεται από διάφορες διατάξεις εστιασμού και ευθυγράμμισης της δέσμης πριν πέσει στο δείγμα. Το δείγμα είναι κονιοποιημένο σε λεπτή και ομοιογενή σκόνη (κοκκομετρία κάτω από 25  $\mu\text{m}$ ) και ο υποδοχέας του δείγματος μπορεί να περιστρέφεται με σκοπό τη δημιουργία των τυχαίων προσανατολισμών των κρυστάλλων. Έτσι, όταν η δέσμη ακτινών Χ διέλθει μέσω του δείγματος, αναμένεται ότι ένας σημαντικός αριθμός των κρυσταλλιτών θα είναι προσανατολισμένος, έτσι ώστε να ικανοποιούν τη συνθήκη Bragg, για ανάκλαση από κάθε δυνατή απόσταση μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων (26) (27).

Η περιθλώμενη ακτινοβολία μετά την ευθυγράμμισή της πέφτει πάνω στον ανιχνευτή, ο οποίος περιστρέφεται σε σχέση με το δείγμα με τη διπλή γωνιακή ταχύτητα  $2\theta$  (26) (27).

Η ποιοτική ανάλυση του δείγματος γίνεται με τη βοήθεια ειδικών λογισμικών του οργάνου, όπου συγκρίνονται οι πειραματικές κορυφές με αποθηκευμένα φάσματα

κονιών PDF(Powder Diffraction Files) της Επιτροπής για Πρότυπα Περίθλασης  
Ακτινών X, JCPDS (Joint committee on Power Diffraction Standards) (26) (27).

## 3.5 Θερμοβαρυμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση

### 3.5.1 Αρχή Μεθόδου

Η θερμική ανάλυση αποτελεί ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες επιτρέπουν την μέτρηση φυσικών ή χημικών ιδιοτήτων ενός δείγματος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ενώ το δείγμα υποβάλλεται σε θερμοκρασιακό πρόγραμμα υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Το δείγμα μπορεί να θερμαίνεται, και να ψύχεται με καθορισμένο ρυθμό ή και να βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία ή να εναλλάσσεται μεταξύ αυτών των τριών καταστάσεων (13) (27).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται ως μια συνεχή καταγραφή κάποιου μεγέθους με τη μορφή θερμικών φασμάτων. Τα διαγράμματα αυτά χαρακτηρίζουν ένα απλό ή σύνθετο σύστημα υλικών βάσει των μεταβολών των θερμοδυναμικών, φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων τους καθώς και των μεταβολών της δομής τους, αλλά και της κινητικής των χημικών αντιδράσεων και φυσικοχημικών δράσεων που λαμβάνουν χώρα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (13) (27).

#### **Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG Thermogravimetry)**

Στη θερμοβαρυμετρική ανάλυση μετράται η μεταβολή της μάζας δείγματος κατά την εξέλιξη ενός προκαθορισμένου προγράμματος θερμοκρασίας. Μεταβολή μάζας επέρχεται, όταν παράγονται πτητικά αέρια κατά τη θερμική αντίδραση του δείγματος. Ανάλογα με το είδος της ατμόσφαιρας μπορούν να επέλθουν οξειδώσεις παράλληλα προς τις διασπάσεις. Οι μετρήσεις διεξάγονται με τη βοήθεια θερμοζυγού. Κάθε βαθμίδα του διαγράμματος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη αντίδραση και μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένη ουσία. Το γράφημα παρουσιάζει στον άξονα των τεταγμένων το βάρος που έχει απομείνει στο χωνευτήρι και ο άξονας των τεταγμένων την θερμοκρασία του δείγματος (13).

#### **Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA Differential Thermal Analysis)**

Κατά την θέρμανση των υλικών μπορούν να συμβούν χημικές ή φυσικές μεταβολές που αφορούν μεταφορά θερμότητας. Τα θερμικά αποτελέσματα μπορούν να ανιχνευθούν με τη διαφορική θερμική ανάλυση. Η τεχνική συνίσταται στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του προς μέτρηση δείγματος και του δείγματος αναφοράς. Και τα δύο δείγματα υπόκεινται σε ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Όταν λαμβάνει χώρα μια αντίδραση, που περιλαμβάνει φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, τότε αρχίζει να παρουσιάζεται διαφορά ανάμεσα στο προς μέτρηση δείγμα και το δείγμα αναφοράς. Αυτή η διαφορά παρουσιάζεται σαν διαφορά τάσης ανάμεσα στα θερμοστοιχεία και ενισχύεται ηλεκτρονικά (13).



Με βάση τα προαναφερθέντα παραλαμβάνεται ένα γράφημα με τεταγμένη τη διαφορά θερμοκρασίας του δείγματος και του υλικού αναφοράς και τετμημένη την θερμοκρασία του δείγματος. Οι κορυφές στο γράφημα αυτό σχετίζονται με φυσικοχημικές αντιδράσεις. Οι εξώθερμες αντιδράσεις παρουσιάζονται ως κορυφές και οι ενδόθερμες ως κοιλάδες (27).

### 3.5.2 Πειραματική Διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Στη προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η θερμοβαρυμετρική ανάλυση και η διαφορική θερμική ανάλυση. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων μπορεί να οδηγήσει στον προσδιορισμό των συστατικών του δείγματος συγκρίνοντας τις μεταβολές στη καμπύλη DTA με τις μεταβολές του βάρους του γραφήματος TG. Αυτό έγινε με την συσκευή Regulus 2500 (13).

Η συσκευή αποτελείται από ένα κάθετο φούρνο και από ένα ζευγάρι θερμοστοιχείων. Το ένα θερμοστοιχείο υπάρχει για τοποθέτηση του δείγματος προς μέτρηση και το άλλο για το δείγμα αναφοράς. Τα δείγματα τοποθετούνται μέσα σε χωνευτήρια πορσελάνης και το δείγμα αναφοράς είναι  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Τα δύο θερμοστοιχεία είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να γίνεται καλή αγωγή της θερμότητας που δίνεται από το φούρνο. Τα δύο χωνευτήρια ακουμπούν σε ένα ζευγάρι ευαίσθητων θερμομέτρων, τα οποία μετρούν τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο δείγματα. Το σήμα της διαφοράς θερμοκρασίας μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και τελικά καταγράφεται στη μνήμη του H/Y σαν διαφορά τάσης. Στο τέλος της μέτρησης με το κατάλληλο λογισμικό γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, αφού έχουν ληφθεί υπόψιν οι παράγοντες διόρθωσης για αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για τη μέτρηση θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης TG υπάρχουν συνδεδεμένοι με τα χωνευτήρια και δύο ευαίσθητοι θερμοζυγοί, οι οποίοι καταγράφουν τη διαφορά βάρους των δύο δειγμάτων και την αποθηκεύουν στη μνήμη του H/Y προς σχηματισμό της καμπύλης TG. Η ευαισθησία στη μέτρηση τάσης είναι 0.01 mV ενώ για τη μέτρηση βάρους 0.01 mg. Αυτό απαιτεί ακριβείς μετρήσεις για το βάρος τόσο των δειγμάτων όσο και του βάρους των χωνευτηρίων.

Για την επιτυχή διεξαγωγή της μέτρησης μεγάλη σημασία παίζει η προετοιμασία του δείγματος. Έτσι το δείγμα πρέπει καταρχήν να γίνει σκόνη με κόκκους όσο το δυνατόν μικρότερης διατομής. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει θέρμανση στους 100 °C για μία περίπου ημέρα και φύλαξη του δείγματος μετά την θέρμανση σε ξηραντήρα για αποφυγή υγρασίας. Ακολουθεί ζύγιση του δείγματος με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού σημείου. Το βάρος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 100mg. Ακολουθεί η εισαγωγή του δείγματος στο χωνευτήριο το οποίο βρίσκεται πάνω στο θερμοζυγό. Η συσκευή διεξαγωγής της μέτρησης θα πρέπει να έχει τεθεί σε λειτουργία τουλάχιστον δύο ώρες πριν τη διεξαγωγή της μέτρησης, ώστε να εξασφαλίζονται σταθερές αρχικές συνθήκες. Η έναρξη της μέτρησης, καθώς και η παρακολούθηση της γίνεται με τη βοήθεια H/Y, στον οποίο γίνεται αμέσως και η καταγραφή των αποτελεσμάτων. Το θερμοκρασιακό εύρος που έγινε η μελέτη είναι οι 30-1000°C με αύξηση της θερμοκρασίας με ρυθμό 10 °C/min. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η μαθηματική τους επεξεργασία γίνεται επίσης από τον H/Y.

## 3.6 Υπερηχοσκόπηση

### 3.6.1 Αρχή Μεθόδου

Κάθε μηχανικό κύμα συντίθεται από μια ταλάντωση διακριτών σωματιδίων του υλικού. Υπάρχουν δυο τύποι κυμάτων, το διάμηκες και το εγκάρσιο, τα οποία διαφοροποιούνται στον τρόπο ταλάντωσης των σωματιδίων σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στο εγκάρσιο κύμα, η διεύθυνση κίνησης των σωματιδίων είναι κάθετη με την διάδοση του κύματος ενώ στο διάμηκες παράλληλη (13).

Η παραγωγή υπερήχων πραγματοποιείται από διατάξεις που ονομάζονται μορφοτροπείς. Το κύριο στοιχείο των περισσότερων ακουστικών μορφοτροπέων είναι το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την ιδιότητα όταν παραμορφώνονται από εξωτερική μηχανική πίεση να δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τους Curie το 1880. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο ένα υλικό, αν τοποθετηθεί ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, αλλάζει το σχήμα του κάτω από εφαρμογή δυναμικού, ανακαλύφθηκε αργότερα. Το απευθείας πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται για μετρήσεις ενώ το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για παραγωγή μηχανικών πιέσεων, παραμορφώσεων και ταλαντώσεων (13).

Οι μέθοδοι δοκιμής των υλικών με υπερήχους ταξινομούνται με βάση τρία κύρια κριτήρια:

- Τον τύπο της κύριας μετρούμενης ποσότητας,
- την μορφή του υπερήχου(συνεχές κύμα ή παλμοί)
- Την επίδραση μιας ανωμαλίας μέσα στο υλικό ή στην επιφάνεια του.

Στην πράξη οι τεχνικές υπερηχοσκόπησης διακρίνονται συχνά σε έμμεσες, άμεσες ή ημι-άμεσες ανάλογα με την επιφάνεια που μελετάμε και την προσβασιμότητα σε αυτή. Η άμεση διάταξη γίνεται με την τοποθέτηση των ακροδεκτών αντικριστά.

Η μέθοδος της παλμοηχούς είναι η πιο διαδεδομένη. Μια ανομοιογένεια ενός υλικού, όταν φωτίζεται από παλμική δέσμη υπερήχων, ανακλά μια ηχώ που λαμβάνεται από τον δέκτη. Επομένως η κύρια μετρούμενη ποσότητα είναι το εύρος της ηχούς και ο χρόνος μετακίνησης του παλμού από τον πομπό στον ανακλαστήρα και πίσω στον δέκτη.

Αν χρησιμοποιείται μόνο ο χρόνος μετακίνησης ή η αντίστοιχη συχνότητα, ώστε το εύρος του παλμού να λάβει μια ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή, τότε αναφερόμαστε στην μέθοδο χρόνου μετακίνησης.

Η μέθοδος της διέλευσης επιτρέπει τον προσδιορισμό εσωτερικών κενών ανεξάρτητα από το βάθος στο οποίο βρίσκονται αυτά. (13)

### 3.6.2 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Στη προκειμένη περίπτωση, η μέθοδος της υπερηχοσκόπησης χρησιμοποιήθηκε με άμεσο τρόπο σε κυβικά δοκίμια 5 cm x 5 cm x 5 cm με σκοπό την εξακρίβωση της συμβατότητας των ιστορικών λίθων με τον λίθο «Δαφνούλας». Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε συσκευή Pundit-CNS Electronics. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος των τριών επιπέδων του δείγματος και μετρείται ο χρόνος μετάδοσης παλμού πηγής 54 khz. Λιπαντική ύλη, καλυμμένη με ειδική μεμβράνη χρησιμοποιείται ως συνδετικό μέσο για αύξηση της ηχητικής επαφής μεταξύ του δείγματος και του μετατροπέα. Το όργανο διαβαθμίζεται με πρότυπο αλουμινίου. Διορθώσεις του πάχους και του χρόνου μετάδοσης υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του πραγματικού και των μετρούμενων χρόνων. Η ταχύτητα μετάδοσης των υπερήχων συσχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας του λίθου, όπως με το λόγο του Poisson και με το μέτρο Young (13).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η ανισοτροπία κι η συνεκτικότητα των δοκιμίων των ιστορικών λίθων και του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ορισμένοι δείκτες οι οποίοι υποδηλώνουν τον βαθμό ανισοτροπίας και συνεκτικότητας του υλικού. Η εύρεση των δεικτών γίνεται μέσω της μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα τρία επίπεδα. Συγκεκριμένα οι δείκτες είναι οι εξής (14):

- $k = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{mean}} * 100$
- $AS = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{min}} * 100$
- $ARS = \frac{v_{max}-v_{min}}{v_{max}} * 100$
- $AD = \frac{v_{min}}{v_{max}}$
- $dM\% = 1 - \frac{2v_{min}}{v_{mean}+v_{max}} * 100$
- $dm\% = \frac{2(v_{max}-v_{mean})}{v_{mean}+v_{max}} * 100$

Όπου  $v_{max}$  η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης σε οποιαδήποτε από τις τρεις κατευθύνσεις,  $v_{min}$  η μικρότερη ταχύτητα διάδοσης και  $v_{mean}$  η μέση ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στα τρία επίπεδα κάθε δοκιμίου (14).

Οι δείκτες k, AS και ARS είναι ευθέως ανάλογη του βαθμού της ανισοτροπίας και δεν έχουν κάποιο όριο στην τιμή που μπορούν να πάρουν. Ο δείκτης AD είναι ευθέως ανάλογος του βαθμού συνεκτικότητας και μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 δηλώνει τον μέγιστο βαθμό ανισοτροπίας (14).

Θεωρείται ότι οι δείκτες dM% και dm% είναι πιο αντιπροσωπευτικοί καθώς λαμβάνουν υπόψη το μέσο όρο της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων. Συγκεκριμένα ο δείκτης dM% ονομάζεται δείκτης ολικής ανισοτροπίας ενώ ο δείκτης dm% ονομάζεται δείκτης σχετικής ανισοτροπίας. Υψηλή τιμή του δείκτη dM% και χαμηλή τιμή του δείκτη dm% δηλώνει πως ο λίθος εμφανίζει υψηλότερη ανισοτροπία σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. (14)

### 3.7 Δοκιμές Εμβάπτισης-Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και Ολικού Ανοιχτού Πορώδους προσβάσιμο στο νερό

Η υγρασία αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των κτιρίων και για αυτό η υγρομετρική προστασία των κατασκευών για την ελαχιστοποίηση της διαβρωτικής δράσης είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα κατά την κατασκευή, συντήρηση αλλά και προστασία ενός κτιρίου. Το νερό στην αέρια ή υγρή φάση συμμετέχει σε όλα σχεδόν τα φαινόμενα φθοράς των υλικών. Η επίδραση της υγρασίας στα δομικά υλικά μπορεί να είναι φυσικής, χημικής ή βιολογικής φύσεως. Φυσική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς στη κατηγορία αυτή, είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο. Ένα υλικό είναι λιγότερο ή περισσότερο ανθεκτικό στη δράση του παγετού ανάλογα με το συνολικό ποσό της υγρασίας που περιέχει και την πορώδη δομή του.

- Χημική επίδραση: Κύριος μηχανισμός φθοράς στην κατηγορία αυτή είναι η μεταφορά και κρυστάλλωση των αλάτων. Μερικά από τα άλατα είναι υγροσκοπικά και έχουν την τάση να ροφούν υγρασία, αυξάνοντας την περιεχόμενη υγρασία των υλικών.
- Βιολογική επίδραση: Η ανάπτυξη προϊόντων βιοδιάβρωσης στο εξωτερικό των δομικών υλικών είναι δείκτες της ύπαρξης πλεονάζουσας υγρασίας.

Η περιεχόμενη υγρασία των δομικών υλικών καθορίζεται από τη δυναμική ισορροπία που αποκαθίσταται ανάμεσα σε αυτά και το περιβάλλον. Τα περισσότερα δομικά υλικά περιέχουν μια ποσότητα νερού ως φυσικό συστατικό (13).

#### 3.7.1 Πειραματική διαδικασία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ολικής εμβάπτισης σε νερό με σκοπό την εξακρίβωση των χαρακτηριστικών της μικροδομής των ιστορικών λίθων και του λίθου «Δαφνούλας» (ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο σε νερό και φαινόμενη πυκνότητα), και κατ' επέκταση την εξακρίβωση της συμβατότητάς τους.

Η διαδικασία ξεκινάει με την ξήρανση των δοκιμίων 5x5x5 cm σε φούρνο θερμοκρασίας 60°C μέχρι σταθερού βάρους. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel για την μείωση της θερμοκρασίας τους. Στη συνέχεια, καταγράφεται το ξηρό βάρος των δοκιμίων ( $m_i$ ) και τοποθετούνται σε γυάλινους ογκομετρικούς κυλίνδρους και καλύπτονται με απιονισμένο νερό έως ότου η στάθμη του νερού να βρίσκεται 2cm υψηλότερα από την επιφάνεια του δείγματος. Τα δείγματα εξάγονται ανά καθορισμένα χρονικά διαστήματα και απομακρύνονται οι σταγόνες νερού που βρίσκονται στην επιφάνεια τους. Έπειτα καταγράφεται ο χρόνος εξαγωγής και η μάζα των δοκιμίων ( $m_{\gamma\gamma\rho}$ ). Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η διαφοροποίησης δύο διαδοχικών ζυγίσεων της μάζας είναι μικρότερη του 1% της συνολικής μάζας.

Τέλος τα δοκίμια εξάγονται από τα δοχεία και τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας 60°C μέχρι σταθερού βάρους. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel για την μείωση της θερμοκρασίας τους. Τότε τα δοκίμια ζυγίζονται και καταγράφεται η τελική μάζα των δειγμάτων ( $m_d$ ).

Από τα αποτελέσματα κατασκευάζεται διάγραμμα με άξονα x το χρόνο παραμονής των δειγμάτων στο λουτρό και άξονα y το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$M(\%) = \frac{m_{υγρ} - m_i}{m_i} \times 100$$

Η υδατική χωρητικότητα μέσω απορρόφησης (WAC) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$WAC(\%) = \frac{m_{max} - m_d}{m_d} \times 100$$

Όπου  $m_{max}$  η μέγιστη μάζα του απορροφημένου νερού. (28) (13)

Το ανοιχτό πορώδες υπολογίζεται από τον τύπο

$$\text{ανοιχτό πορώδες} = \frac{m_{max} - m_i}{V_{ολ}}$$

Όπου  $V_{ολ}$  ο όγκος το δοκιμίου (13) (28).

### 3.8 Δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης-Προσδιορισμός Συντελεστή υδατοαπορρόφησης και ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδών

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης με βάση το πρότυπο EN15801 (29) για την μελέτη της επίδρασης του φαινομένου αυτού στους εξεταζόμενους λίθους, καθώς και για την μελέτη της μικροδομής των δειγμάτων. Παράλληλα, μελετήθηκε η επίδραση προστατευτικής επίστρωσης από μικρομοριακό αστάρι στην επιφάνεια ορισμένων δοκιμίων του λίθου «Δαφνούλας».

Οι μετρήσεις του συντελεστή υδατοαπορρόφησης πραγματοποιούνται με βάση το πρότυπο EN15801 (29). Κυβικά δοκίμια 5x5x5 cm αρχικά ξηραίνονται σε φούρνο 60°C μέχρι σταθεροποίηση του βάρους τους. Αφού τοποθετηθούν σε ξηραντήρα, τα δοκίμια τοποθετούνται σε κλίση με διηθητικό χαρτί, εμποτισμένο με απιονισμένο νερό. Σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα γίνεται ζύγιση του δοκιμίου. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν υπάρχει διαφορά μικρότερη του 1% μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων. Στην συνέχεια, τα δοκίμια εξάγονται από την κλίση και τοποθετούνται ξανά σε φούρνο, θερμοκρασία 60°C έως σταθεροποίησης του βάρους τους.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται με άξονα  $x$  το  $t^{1/2}$ , δηλαδή η ρίζα του χρόνου παραμονής των δοκιμίων στο νερό, και  $y$  τη μεταβολή  $\Delta W$ , δηλαδή τη διαφορά του ξηρού βάρους του δείγματος μείον το βάρος του υγρού δείγματος, διαιρεμένο με την επιφάνεια επαφής  $S$ . Η κλίση του ευθύγραμμου κομματιού της καμπύλης που προκύπτει αποτελεί τον συντελεστή υδατοαπορρόφησης καθώς ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$C = \frac{\Delta W}{S\sqrt{t}}$$

Στη συνέχεια, και με βάση του παραπάνω τύπου υπολογίζεται το ολικό ποσοστό ροφημένου νερού καθώς και το ανοιχτό πορώδες του κάθε δοκιμίου όπως και για την εμβάπτιση.

## 3.9 Ποροσιμετρία υδραργύρου

### 3.9.1 Αρχή της μεθόδου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εκτίμησης και ανάλυσης της μικροδομής των πορώδων υλικών και προσδιορισμού του πορώδους τους. Συνιστάται στην εφαρμογή μιας πειραματικής τεχνικής και σε μια μέθοδο ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων (30).

Η πειραματική τεχνική βασίζεται στη βαθμιαία εισόδου υδραργύρου (μη διαβρέχον υγρό) σε ένα πορώδες υλικό εκκενωμένο από αέρα με αύξηση της εξωτερικής πίεσης και στην απομάκρυνση του υδραργύρου, καθώς η πίεση ελαττώνεται. Συγκεκριμένα, επειδή ο υδράργυρος αποτελεί μη διαβρέχον υγρό για το σύνολο σχεδόν των υλικών, απαιτεί την επιβολή πίεσης για να εισδύσει στους πόρους ενός εκκενωμένου από αέρα πορώδους υλικού. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται ο υδράργυρος προοδευτικά εισβάλλει και στους μικρότερους πόρους, με την προϋπόθεση, ότι όταν επιβληθεί μια αρκετά μεγάλη πίεση, το πορώδες δείγμα θα κορεστεί με υδράργυρο. Καθώς η διαβρέχουσα φάση είναι αέρας πολύ χαμηλής πίεσης (κενό) με ατμούς υδραργύρου, δεν παρουσιάζει καμιά αντίσταση στην εισόδου υδραργύρου. Στη συνέχεια καθώς η εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση ελαττώνεται ο υδράργυρος απομακρύνεται προοδευτικά, μέχρις ότου σε μια χαμηλή πίεση διακοπεί η συνέχεια του υδραργύρου και ένα ποσοστό του μείνει παγιδευμένο μέσα στην πορώδη δομή. Στη συνέχεια μπορεί να ακολουθήσει ξανά αύξηση της πίεσης και επανείσδυση του υδραργύρου στους πόρους που είχαν αδειάσει πριν (ενεργό πορώδες) (30).

Η πειραματική τεχνική απαιτεί ένα μέσο για την επιβολή τη πίεσης, ένα μέσο για την μεταβολή της πίεσης και ένα μέσο για τον προσδιορισμό του όγκου του υδραργύρου, που έχει εισδύσει στους πόρους του δείγματος σε δεδομένη πίεση. Το μέσο μεταβίβασης της πίεσης, συνήθως είναι υγρό για λόγους ασφαλείας, ενώ όλα τα αέρια αφαιρούνται από το σύστημα πριν το πείραμα μέσω μια αντλίας κενού, που συνδέεται με μετρητή πίεσης για τον έλεγχο του επιπέδου του κενού. Ένας υποδοχέας δείγματος, δεξαμενή για την αποθήκευση του υδραργύρου και του ρευστού μεταβίβασης της πίεσης, μετρητές πίεσης, βαλβίδες και σωληνώσεις σύνδεσης, αποτελούν τα βασικά τμήματα ενός ποροσιμέτρου υδραργύρου. Ο υποδοχέας του δείγματος ενσωματώνει και ένα σύστημα για τη μέτρηση του όγκου του υδραργύρου, που εισδύει στο δείγμα, όπου μεταβολές χωρητικότητας πυκνωτή μετατρέπονται σε μεταβολές όγκου (30).

Αναφορικά με την μέθοδο ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων, από τις καμπύλες εισόδου – απομάκρυνσης υδραργύρου παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την πορώδη δομή του υλικού. Αναπόφευκτα, κάθε θεωρητική μέθοδος, που σαν στόχο έχει την απόκτηση της κατανομής των πόρων ως προς το μέγεθος τους, με βάση τις καμπύλες αυτές, στηρίζεται σε υποθέσεις που αφορούν τα σχήματα των πόρων και τον τρόπο αλληλοσύνδεσης τους (30).

Η συμβατική μέθοδος ανάλυσης βασίζεται στο κυλινδρικό μοντέλο. Με βάση αυτό γίνεται η θεώρηση, ότι οι πόροι αποτελούν μια δέσμη κυλινδρικών τριχοειδών σωλήνων διαφορετικής διαμέτρου και ίσου μήκους που δεν τέμνονται μεταξύ τους.

### 3.9.2 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Για την ποροσιμετρία υδραργύρου χρησιμοποιείται το ποροσίμετρο Pascal 440 από εταιρία Thermo Electron Corporation.

Η πειραματική διαδικασία ξεκινάει με την επιλογή δείγματος, το οποίο κόβεται κατάλληλα για να χωράει στην κυψελίδα του ποροσιμέτρο και τοποθετείται σε φούρνο στους 100 °C. Έπειτα, το δείγμα ζυγίζεται μέχρι το τέταρτο δεκαδικό ψηφίο του γραμμαρίου και το βάρος του εισάγεται στον υπολογιστή. Το δείγμα εισάγεται σε κατάλληλο υποδοχέα του οργάνου. Μέσω αντλίας κενού, αφαιρείται ο αέρας από το δείγμα και υπό κενό, ο υποδοχέας πληρώνεται με υδράργυρο μέχρι τη χαραγή, που υπάρχει για το σκοπό αυτό. Ακολουθεί σταδιακή αύξηση της πίεσης, οπότε ο υδράργυρος εισδύει στους πόρους του δείγματος και μετράται ο όγκος του. Έπειτα, απομακρύνεται ο υδράργυρος από τους πόρους του δείγματος με μείωση της πίεσης. Μετά το πέρας της διαδικασίας ο υποδοχέας μαζί με το δείγμα και τον υδράργυρο ζυγίζονται. Η διαδικασία γίνεται δύο φορές. Την πρώτη σε ένα εύρος σχετικά χαμηλής πίεσης για την εισδυσση στους μακροπόρους, και έπειτα σε ένα εύρος μεγαλύτερης πίεσης για την εισδυσση στους μικροπόρους.

Η συσκευή μετράει τον όγκο του εισερχομένου υδραργύρου σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση και το ενσωματωμένο λογισμικό πρόγραμμα υπολογίζει:

- τον ολικό ειδικό όγκο εισερχομένου υδραργύρου, την ειδική επιφάνεια πόρων, την μέση ακτίνα πόρων, την φαινόμενη και πραγματική πυκνότητα δείγματος και το ολικό ανοιχτό πορώδες.
- Κατασκευάζει διάγραμμα ειδικού όγκου εισερχόμενου υδραργύρου-πίεσης και το ιστόγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή του όγκου των όρων (ανοιχτών) με τις ακτίνες του υλικού.

Το ολικό ανοιχτό πορώδες ( $P_t$ ) προκύπτει σαν γινόμενο του ολικού ειδικού όγκου του υδραργύρου του εισχώρησε (με πίεση) στους πόρους ( $V_k$ ) με την φαινόμενη πυκνότητα ( $d_B$ ), δηλαδή:

$$P_t = (V_k * d_B) * 100$$



### 3.10 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών είναι τα διαλυτά άλατα που μαζί με το νερό. Τα άλατα προέρχονται από τους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, το νερό μέσω της τριχοειδής αναρρίχησης ή ακόμα και τη βροχή. Τα άλατα που θα μας απασχολήσουν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας είναι τα θειικά, τα χλωριούχα και τα νιτρικά. Συγκεκριμένα, αυτά παγιδεύονται στο εσωτερικό των δομικών υλικών και μέσω της κρυστάλλωσης και ανακρυστάλλωσης τους μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη φθορά.

Ο εντοπισμός των ολικών διαλυτών αλάτων ενός διαλύματος γίνεται μελετώντας την αγωγιμότητα του διαλύματος, καθώς η ύπαρξη διαλυτών αλάτων επιφέρει αύξηση της. Την αγωγιμότητα την μετράμε με αγωγιμόμετρα. Η λειτουργία τους βασίζεται σε μία κυψελίδα με δύο ηλεκτρόδια συνήθως από λευκόχρυσο με επιφάνεια κατά προσέγγιση  $1\text{cm}^2$ . Η κυψελίδα βυθίζεται στο διάλυμα του οποίου η αγωγιμότητα πρόκειται να προσδιοριστεί και το σύστημα αυτό συγκροτεί το ένας σκέλος της γέφυρας Wheatstone, με την βοήθεια του οποίου υπολογίζεται η αντίσταση του διαλύματος και από κει υπολογίζεται η ειδική αγωγιμότητα του (31).

#### 3.10.1 Πειραματική διαδικασία

Για τον προσδιορισμό των ολικών διαλυτών αλάτων εφαρμόστηκε το ιταλικό πρότυπο “Dossagio dei sall solubele, Normal 13/83” (32), κατά το οποίο λαμβάνει χώρα ζύγιση  $100 \pm 5$  mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο διαλύεται σε 100 ml απιονισμένου νερού. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετρείται η αγωγιμότητά τους, η οποία εκφράζεται σε  $\mu\text{Siemens}$ . Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$SST\% = \frac{C \times 6.88}{m}$$

Όπου:

C: η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε  $\mu\text{S}$

m: το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg

Πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις, γίνεται βαθμονόμηση του οργάνου στον αέρα, όπου και παίρνει τιμή 0. Μετρώ αρχικά, την αγωγιμότητα του απιονισμένου νερού και την αφαιρώ από αυτή του διαλύματος, ενώ παράλληλα καταγράφω την θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής κάθε μέτρησης.

Συμπληρωματικά του προσδιορισμού των ολικών διαλυτών αλάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων ( $\text{Cl}^-$ ) και θειικών αλάτων ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα υδατικά διαλύματα, βάσει των

οποίων έγινε ο προσδιορισμός της αγωγιμότητας. Γενικά, για την παρασκευή των διαλυμάτων απαιτείται η χρήση απιονισμένου νερού υψηλής καθαρότητας.

Για τον προσδιορισμό των χλωριούχων αλάτων κάθε δείγματος τοποθετήθηκε μέρος του υδατικού διαλύματος σε δοκιμαστικό σωλήνα και προστέθηκε μικρή ποσότητα (λίγες σταγόνες) νιτρικού αργύρου ( $\text{AgNO}_3$ ) 0,1 N. Παρουσία χλωριόντων σχηματίζεται χλωριούχος άργυρος ( $\text{AgCl}$ ) που δημιουργεί χαρακτηριστικό λευκό θόλωμα. Η ποσότητα των περιεχομένων χλωριόντων καθορίζει την ένταση του παρατηρούμενου θολώματος.

Για τον προσδιορισμό των θεικών ιόντων προστέθηκε, βάσει της ίδιας διαδικασίας, μικρή ποσότητα χλωριούχο βαρίου ( $\text{BaCl}_2$ ) 0,1 M. Παρουσία θεικών ιόντων παράγεται θεικό βάριο ( $\text{BaSO}_4$ ), που και αυτό προκαλεί λευκό θόλωμα. Η ποσοτική παρουσία των θεικών ιόντων καθορίζει την ένταση του θολώματος.

Ποιοτικά, η παρουσία των χλωριόντων και των θεικών ιόντων μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, μικρή, πολύ μικρή ή ίχνη. Επισημαίνεται ότι μέτρο σύγκρισης για την πολύ μεγάλη παρουσία χλωριόντων είναι το πόσιμο νερό

## 3.11 Χρωματομετρία

### 3.11.1 Αρχή Μεθόδου

Το χρώμα είναι μια ιδιότητα των σωμάτων, η αντίληψη της οποίας, δημιουργείται όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ορατό φάσμα φτάνει από το σώμα στο μάτι, στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και αισθητήρια νεύρα μετατρέπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα και επιτρέπουν στον εγκέφαλο να αντιληφθεί το χρώμα (33).

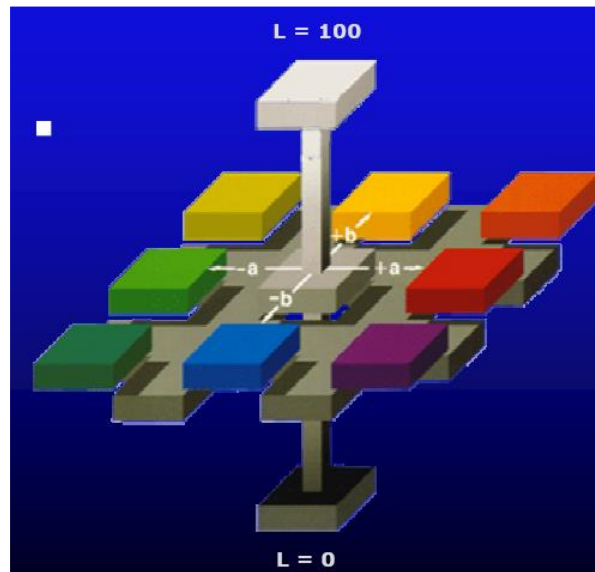
Η ικανότητα ακριβούς αντίληψης της ιδιότητας αυτής εξαρτάται όχι μόνο από την ακρίβεια διέγερσης των φωτοευαίσθητων κυττάρων του παρατηρητή, αλλά και από τις συνθήκες παρατήρησης, για παράδειγμα τον φωτισμό (33).

Η χρωματομετρία ως επιστήμη έκανε την εμφάνισή της το 1930 από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού CIE( Commission Internationale de l'Éclairage) με την διεξαγωγή πειραμάτων οπτικής. Τα χρωματομετρικά συστήματα της CIE είναι τα μόνα παγκοσμίως αποδεκτά για την μέτρηση του χρώματος με συνέπεια όλα τα διεθνή πρότυπα να είναι βασισμένα σε αυτά που ορίζονται από αυτή (34).

Τα συστήματα της CIE βασίζονται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την έκφραση του χρώματος ενός σώματος, δηλαδή χώρων που σε κάθε χρώμα αντιστοιχούν αριθμητικές συντεταγμένες. Ένα από τα σημαντικότερα μοντέλα που εισήγαγε η CIE είναι το μοντέλο RGB με βάση την αρχή των τριών διεγέρσεων του ανθρώπινου οφθαλμού στο κόκκινο (RED) στο πράσινο (GREEN) και στο μπλε (BLUE). Στην προκειμένη διπλωματική εργασία τα πειράματα διεξήχθησαν με το μοντέλο CIELab, το οποίο παρουσίασε η CIELab το 1976 (34).

Το μοντέλο CIELab πρόκειται για ένα ομοιόμορφο οπτικά χρωματικό χώρο ο οποίος προσομοιάζει καλύτερα από όλα τα χρωματικά συστήματα ή μοντέλα την ανθρώπινη αντίληψη των χρωματικών διαφορών. Αποτελεί ένα υπερσύνολο όλων των άλλων χρωματικών μοντέλων. Το κάθε χρώμα περιγράφει από 3 κανάλια ή συντεταγμένες ή παράγοντες όπως και στον χρωματικό χώρο RGB, οι οποίες είναι οι εξής:

- $L^*$  (Lightness) που αποθηκεύει όλη την πληροφορία φωτεινότητας της εικόνας παίρνοντας τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό)
- $a^*$ , θετικές τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κόκκινου και αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του πράσινου χωρίς όριο στις αριθμητικές τους τιμές.
- $b^*$ , θετικές τιμές του οποίου αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κίτρινου και αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του μπλε. Και σε αυτόν τον παράγοντα δεν υπάρχει όριο στις αριθμητικές τιμές που μπορεί να πάρει.



Εικόνα 15. Χρωματικό μοντέλο CIELab

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτού του μοντέλου είναι η ανεξαρτησία των πληροφοριών φωτεινότητας και χρώματος που δίνει πάρα πολλές δυνατότητες. Ο παράγοντας  $L^*$  δηλαδή περιγράφει την άσπρη-μαύρη εκδοχή του προς εξέταση αντικειμένου με διευρυμένο συνήθως φάσμα. Τέλος πολύ σημαντικό είναι ότι το μοντέλο CIELab είναι «device independent», δηλαδή ανεξάρτητο από ιδιότητες συσκευών καταγραφής ή απεικόνισης κάτι που δεν συμβαίνει με τα υπόλοιπα χρωματικά μοντέλα (33) (34).

Το χρωματικό μοντέλο CIELab μπορεί να αναπαρασταθεί και σε κυλινδρικό σύστημα πολικών συντεταγμένων με το μοντέλο CIE  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h$  όπου εμφανίζονται οι εξής παράγοντες (35) (36):

- $L^*$ , όπου όπως και πριν πρόκειται για την φωτεινότητα.
- $C^*$ , που προκύπτει για την χρωματική πυκνότητα. Προσδιορίζει τη συγκέντρωση δηλαδή την ένταση ή την καθαρότητα του χρώματος ή διαφορετικά τη σχέση μεταξύ της έντασης και της φωτεινότητας της μελετώμενης απόχρωσης.
- $h$ , δηλαδή η χροιά. Μετράτε σε μοίρες και προσδιορίζει την απόχρωση παίρνοντας τιμές  $0^\circ$  για το κόκκινο-πορφυρό,  $90^\circ$  για το κίτρινο,  $180^\circ$  για το γαλαζοπράσινο και  $270^\circ$  για το μπλε.

Ο παράγοντας  $C^*$  υπολογίζεται ως εξής υπολογίζονται ως εξής:

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

Για τον υπολογισμό του παράγοντα  $h$  διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

$$h = \tan^{-1} \left( \frac{a^*}{b^*} \right) \text{ όταν } a^* > 0 \text{ και } b^* \geq 0$$

$$h = 0^\circ \text{ όταν } a^* = 0 \text{ και } b^* = 0$$

$$h = 90^\circ \text{ όταν } a^* = 0 \text{ και } b^* > 0$$

$$h = 180^\circ + \tan^{-1} \left( \frac{a^*}{b^*} \right) \text{ όταν } a^* < 0$$

$$h = 270^\circ \text{ όταν } a^* = 0 \text{ και } b^* < 0$$

$$h = 360^\circ \tan^{-1} \left( \frac{a^*}{b^*} \right) \text{ όταν } a^* > 0 \text{ και } b^* < 0$$

Η διαφορά του χρώματος μεταξύ δύο δειγμάτων υπολογίζεται με την εξής εξίσωση:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Όπου

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^*$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$$

Επίσης υπολογίζεται η διαφορά στον κορεσμό των χρωμάτων σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta C^* = C_1^* - C_2^*$$

όπου

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

Η διαφορά στη χροιά των χρωμάτων υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2}$$

Επειδή ο χώρος  $L^*a^*b^*$  δεν έχει ακριβής και απόλυτες αποστάσεις μεταξύ χρωμάτων είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η χρωματική διαφορά για να εξαχθούν συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η διορθωμένη χρωματική διαφορά  $\Delta E_{94}^*$ , στην οποία προστίθενται διορθωτικοί συντελεστές:

$$\Delta E_{94}^* = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Όπου

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0.045 C^*$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^*$$

$$C^* = (C_1^* + C_2^*)^{1/2}$$

Οι μεταβλητές  $k_L$ ,  $k_C$  και  $k_H$  είναι παραμετρικοί συντελεστές. Συμπεριλαμβάνονται ώστε να μπορούν να γίνουν διορθώσεις αναλόγως με το πεδίο στο οποίο χρησιμοποιούνται οι παραπάνω εξισώσεις.

### 3.11.2 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε το Dr Lange colorimeter (LMG268). Πρόκειται για ένα χρωματομέτρο τριπλής διέγερσης. Φωτεινή πηγή στέλνει φως προς το δείγμα. Το φως που αντανακλάται από το δείγμα περνάει μέσα από φίλτρα χρώματος και διαχωρίζεται στο κόκκινο, πράσινο και μπλε ποσοστό του και μετρούνται ξεχωριστά

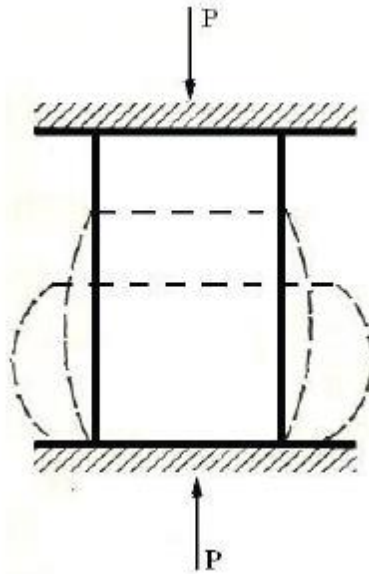
με φωτοκύτταρα. Έπειτα υπολογίζονται οι παράγοντες  $x$ ,  $y$  και  $z$  οι οποίοι και θα οδηγήσουν στην εύρεση των παραγόντων  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$ .

Σε κάθε δείγμα λήφθηκε μέτρηση με το χρωματόμετρο σε 5 αντιπροσωπευτικά σημεία του δείγματος. Στη συνέχεια λήφθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών με βάση τα τελικά αποτελέσματα έγινε ο προσδιορισμός των υπόλοιπων παραμέτρων σύμφωνα με τις παραπάνω μαθηματικές εξισώσεις.

## 3.12 Δοκιμές Αντοχής σε θλίψη

### 3.12.1 Αρχή μεθόδου

Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως (compression test) αποτελεί μια δοκιμή κατά την οποία το δοκίμιο φορτίζεται υπό την επίδραση δυο δυνάμεων, ίσου μέτρου, ίδιας διεύθυνσεως, αντίθετης όμως φοράς, τέτοιας ώστε να προκαλείται συμπίεση του υλικού.



Όπως και σε κάθε περίπτωση αξονικής καταπόνησης ενός υλικού, όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι μικρότερη από την τάση ελαστικότητας (young stress) που αντιστοιχεί στο όριο ελαστικότητας του υλικού, το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά, υπό θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

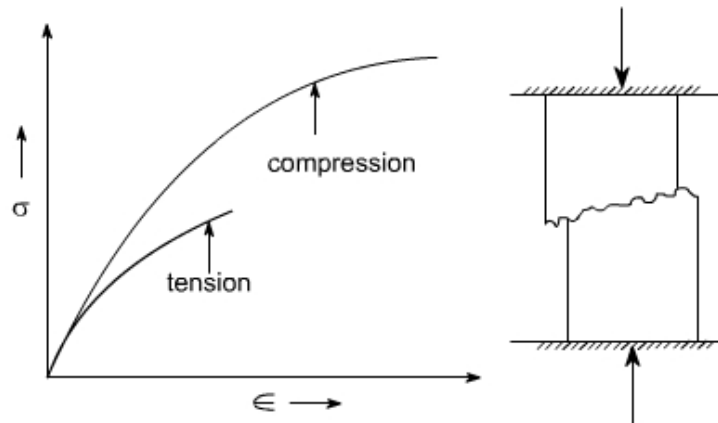
Στην περίπτωση της ελαστικής παραμόρφωσης (βράχυνσης) και μέχρι το όριο αναλογίας του διαγράμματος  $\sigma$ - $\epsilon$ , ισχύει ο νόμος του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Οι παραδοχές ισχύος του Νόμου του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις μπορούν να συμπυκνωθούν στις ακόλουθες:

- Η επιβαλλόμενη δύναμη δρα στη διεύθυνση του ύψους του δοκιμίου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- Ο κύριος άξονας, ο οποίο ταυτίζεται με το ύψος του δοκιμίου είναι απολύτως ευθύγραμμος.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.

- Οι διατομές που αρχικά είναι επίπεδες και κάθετες στο ύψος το δοκιμίου, παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις είναι πάντα μικρότερες από την τάση αναλογίας του υλικού.

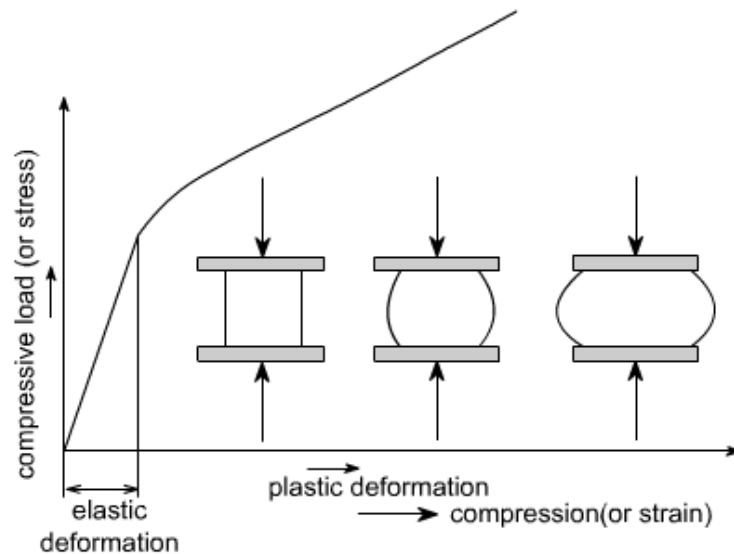


Εικόνα 16. Διάγραμμα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης για ψαθυρό υλικό, (υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος), υποβαλλόμενο σε δοκιμή εφελκυσμού (tension) και θλίψεως (compression)

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η μηχανική συμπεριφορά ενός ψαθυρού υλικού (σε κανονική θερμοκρασία) κατά την δοκιμή του μονοαξονικού εφελκυσμού και της μονοαξονικής θλίψεως. Όπως παρατηρείται, το μέτρο του Young παραμένει σταθερό (ως φυσική ιδιότητα) ενώ το αξιοσημείωτο είναι ότι στην περίπτωση της θλιπτικής καταπόνησης το ψαθυρό υλικό εμφανίζει μία "παραμόρφωση", η οποία και προηγείται της θραύσεως του, πράγμα που σε καμία περίπτωση δεν εμφανίζεται στην περίπτωση της εφελκυστικής δοκιμής.

Μια επίσης πολύ σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από το ανωτέρω διάγραμμα είναι το γεγονός ότι το ψαθυρό υλικό εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή σε θλίψη από την αντίστοιχη σε εφελκυσμό.





Εικόνα 17. Διάγραμμα τάσης- ανηγμένης παραμόρφωσης για όλκιμο, (υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος), υποβαλλόμενο σε δοκιμή θλίψεως (compression)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων όλκιμου δοκιμίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το οποίο υποβάλλεται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψεως. Είναι πολύ σημαντικό να τονισθεί ότι κατά την εν λόγω πειραματική διαδικασία το όλκιμο δοκίμιο εμφανίζει μια βράχυνση με παράλληλη πλευρική διόγκωση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται βαρελοποίηση (barreling) και ουσιαστικά αποτελεί το τελικό σημείο του πειράματος. Δηλαδή, το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως όλκιμου υλικού δεν θεωρείται περατωθέν με την θραύση του δοκιμίου (όπως στον εφελκυσμό), αλλά με την εμφάνιση της πλευρικής διόγκωσης του δοκιμίου σε ποσοστό υποβιβασμού του αρχικού του μήκους, περίπου 30%.

### 3.12.2 Πειραματική διάταξη και Πειραματική διαδικασία

Για την διεξαγωγή του πειράματος δοκιμάστηκε η αντοχή θλίψης 3 δοκιμίων από κάθε λιθότυπο με την χρήση του οργάνου Quasar 600 της εταιρίας Galdabani, το οποίο και ασκεί θλιπτικό φορτίο σε αυτά. Το πείραμα σταματά όταν το δοκίμιο «αστοχήσει» και καταγράφεται το φορτίο αστοχίας. Έπειτα, γνωρίζοντας το φορτίο αυτό και τη διατομή στην οποία ασκήθηκε, είναι δυνατό να ταυτοποιηθεί η θλιπτική αντοχή του δοκιμίου με τον τύπο:

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

### 3.13 Δειγματοληψία

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής μελετήθηκαν δείγματα, τόσο ιστορικά που ληφθήκαν από σημεία πάνω στο γεφύρι, όσο και ένας προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης με στόχο την αναστήλωση του γεφυριού.

Κατά την επίσκεψη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στις 30 Ιουλίου 2018 έγινε αποτίμηση της κατάστασης και συλλογή λίθων και κονιαμάτων. Ως έχει η κατάσταση, υπάρχει ένας χώρος απόθεσης όλων των στοιχείων που μπόρεσαν να διασωθούν από την κοίτη του ποταμού. Συγκεκριμένα, έχει διασωθεί ένας ικανοποιητικός όγκος λίθων αλλά, πιο σημαντικά, κάποια εναπομείναντα τμήματα του γεφυριού.

Στης γέφυρα της Πλάκας για την ανέγερση των θολιτών είχε χρησιμοποιηθεί ένας αρκετά συμπαγής γκρίζος λίθος. Η στρογγυλεμένες γωνίες που φαίνεται να διέθεταν αυτοί οι λίθοι ενδυναμώνουν την αρχική θεώρηση πως κατά την ανοικοδόμηση του χρησιμοποιήθηκαν λίθοι συλλεγμένοι από το ποτάμι του Αράχθου. Στη πλειοψηφία τους αυτές οι πέτρες είχαν διαστάσεις από 55 μέχρι 60 εκατοστά σε μήκος και 6 με 12 εκατοστά πάχος.

Παράλληλα για το γέμισμα του τόξου όσο και των τυμπάνων, χρησιμοποιήθηκαν μεταξύ αρμών και χώματος, λίθοι ακανόνιστου σχήματος, και πιθανότατα δύο ειδών. Είναι εμφανές πως πρόκειται για λίθους με αρκετά υψηλό πορώδες και αρκετά ελαφριούς.



Εικόνα 18. Θέση από εναπομείναντα τμήματα (αριστερά) και θέση απόθεσης λίθων του γεφυριού συλλεχθέντων από το ποτάμι (δεξιά)

Συλλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικοί λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των θολιτών του τυμπάνου και του τόξου. Παράλληλα, συλλέχθηκαν ένας αντιπροσωπευτικός λίθος από το γέμισμα του τυμπάνου και ένας από το γέμισμα του εναπομείναντος τμήματος της γέφυρας, οι οποίοι φαίνεται να ανήκουν και στο κυρίαρχο είδος λίθου που απαντάται στο γέμισμα. Τέλος, παραλήφθηκε ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης από το λατομείο της Δαφνούλας Ιωαννίνων.



Εικόνα 19. Θέση δειγματοληψίας PL\_SH\_1

Όλοι οι λίθοι που συλλέχθηκαν, κόπηκαν σε δοκίμια 5x5x5 εκατοστά. Για κάθε λίθο παραλάβαμε από 6 έως 9 κυβικά δοκίμια. Συγκεκριμένα τα στοιχεία για την κωδικοποίηση των δοκιμίων καθώς και για τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη φαίνονται στους πίνακες στις επόμενες σελίδες.



Εικόνα 20. Προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης

Κωδικός Δοκιμίου	Περιγραφή λίθου
<b>PL_PH_1</b>	Πωρόλιθος από το γέμισμα στο τύμπανο
PL_PH_1.1	
PL_PH_1.2	
<b>PL_PH_2</b>	Πωρόλιθος από το γέμισμα στο τύμπανο
PL_PH_2.1	
PL_PH_2.2	
<b>PL_HS_1</b>	συμπαγής γκρίζος λίθος, προερχόμενος από εναπομένων τμήμα, θολίτη κεντρικού τόξου
PL_HS_1.1	
PL_HS_1.2	
PL_HS_1.3	
PL_HS_1.4	
PL_HS_1.5	
PL_HS_1.6	
PL_HS_1.7	
PL_HS_1.8	
PL_HS_1.9	
<b>PL_HS_2</b>	Συμπαγής γκρίζος λίθος από τον χώρο απόθεσης λίθων
PL_HS_2.1	
PL_HS_2.2	
PL_HS_2.3	
PL_HS_2.4	
PL_HS_2.5	
PL_HS_2.6	
PL_HS_2.7	
<b>PL_R_S</b>	Συμπαγής γκρίζος λίθος από το λατομείο της Δαφνούλας Ιωαννίνων
PL_R_S_1	
PL_R_S_2	
PL_R_S_3	
PL_R_S_4	
PL_R_S_5	
PL_R_S_6	

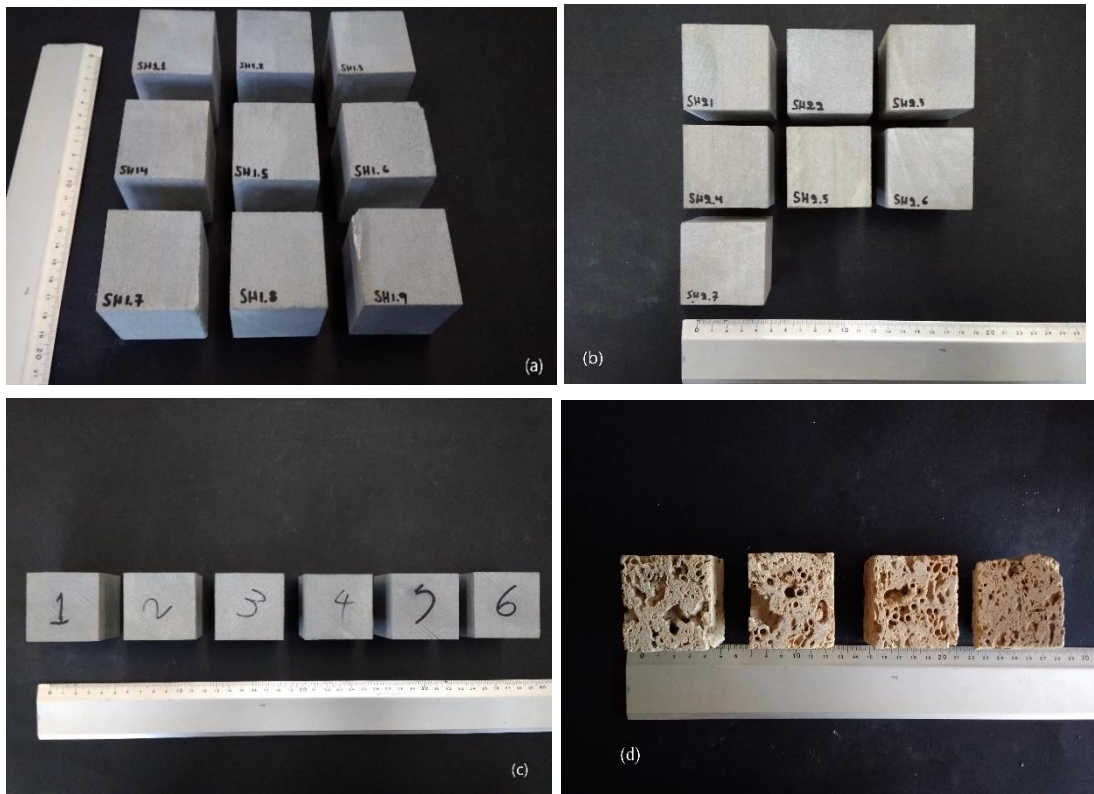
Πίνακας 3. Κωδικοποίηση και Περιγραφή

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

Κωδικός δείγματος	Διαστάσεις Μ(cm)xΠ(cm)xΥ(cm)	Βάρος (g)	Ποκνότητα(g/cm <sup>3</sup> )
PL_PH_1.1	49.09x48.95x48.93	144.26	1.23
PL_PH_1.2	49.30x49.23x50.17	163.96	1.35
PL_PH_2.1	48.81x49.55x49.15	160.84	1.35
PL_PH_2.2	49.43x48.77x49.27	139.22	1.17
PL_SH_1.1	50.08x49.37x49.43	317.54	2.60
PL_SH_1.2	48.84x49.37x50.30	315.54	2.59
PL_SH_1.3	49.29x49.83x49.54	319.29	2.62
PL_SH_1.4	49.84x49.27x49.68	314.92	2.58
PL_SH_1.5	49.47x49.37x50.14	319.42	2.61
PL_SH_1.6	49.23x49.83x49.30	316.12	2.61
PL_SH_1.7	49.59x48.86x49.50	311.37	2.60
PL_SH_1.8	48.85x48.66x49.52	312.11	2.65
PL_SH_1.9	49.25x49.21x49.80	314.21	2.60
PL_SH_2.1	49.56x48.54x49.71	311.04	2.60
PL_SH_2.2	49.37x49.60x48.41	310.04	2.62
PL_SH_2.3	39.63x49.33x49.60	316.40	2.61
PL_SH_2.4	49.20x49.19x49.70	311.46	2.59
PL_SH_2.5	49.49x48.64x49.46	310.87	2.61
PL_SH_2.6	49.55x39.77x49.43	314.82	2.58
PL_SH_2.7	49.84x48.41x49.04	310.51	2.62
PL_S_R_1	49.94x48.98x49.91	305.14	2.50
PL_S_R_2	49.55x49.27x49.08	303.90	2.54
PL_S_R_3	49.04x48.89x49.22	304.55	2.58
PL_S_R_4	48.89x48.98x49.63	304.04	2.56
PL_S_R_5	49.25x48.95x48.90	301.56	2.56
PL_S_R_6	49.15x48.96x49.04	303.94	2.58

Πίνακας 4. Εμβαδόν και βάρος δοκιμίων

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



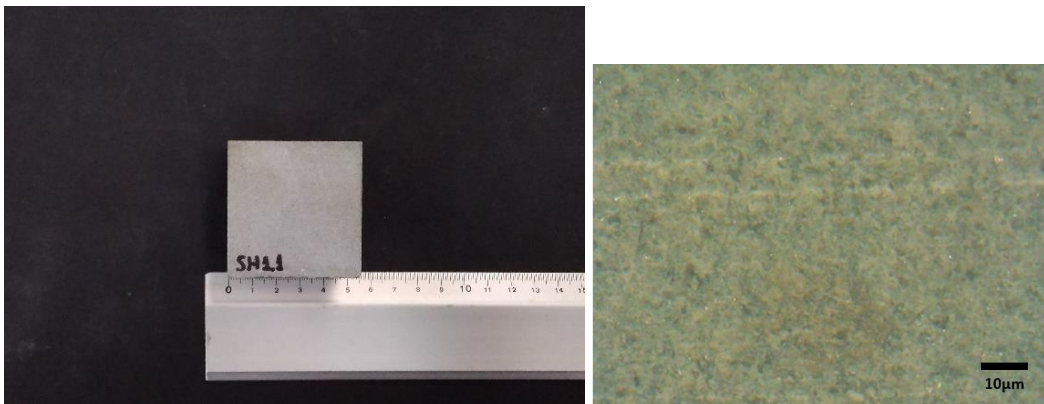
Εικόνα 21. Δοκίμια λίθων από: ιστορικό λίθο PL\_SH1(a), ιστορικό λίθο PL\_SH2(b), λίθο αποκατάστασης PL\_R\_S(c), πωρόλιθους PL\_PH\_1 και PL\_PH\_2(d)

## 4 Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων

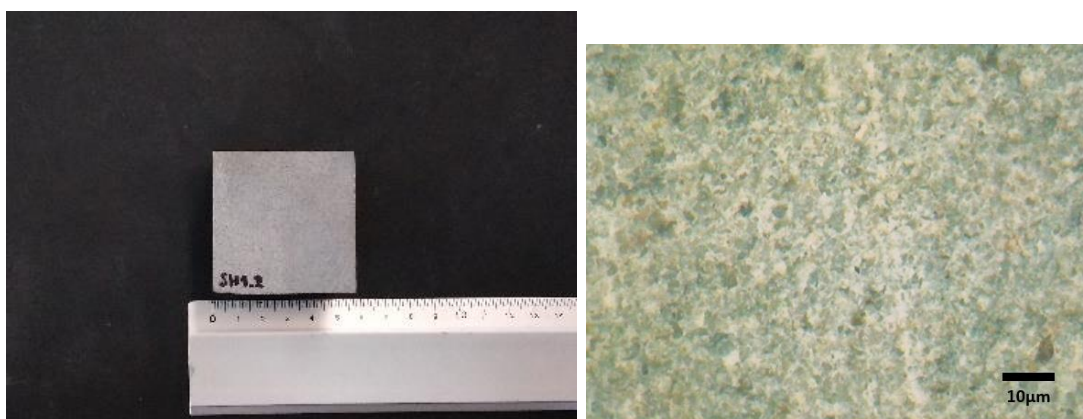
### 4.1 Φωτογραφική και μικροσκοπική τεκμηρίωση των δειγμάτων με μικροσκοπία οπτικών ινών

#### 4.1.1 Ιστορικό λίθος PL\_SH\_1

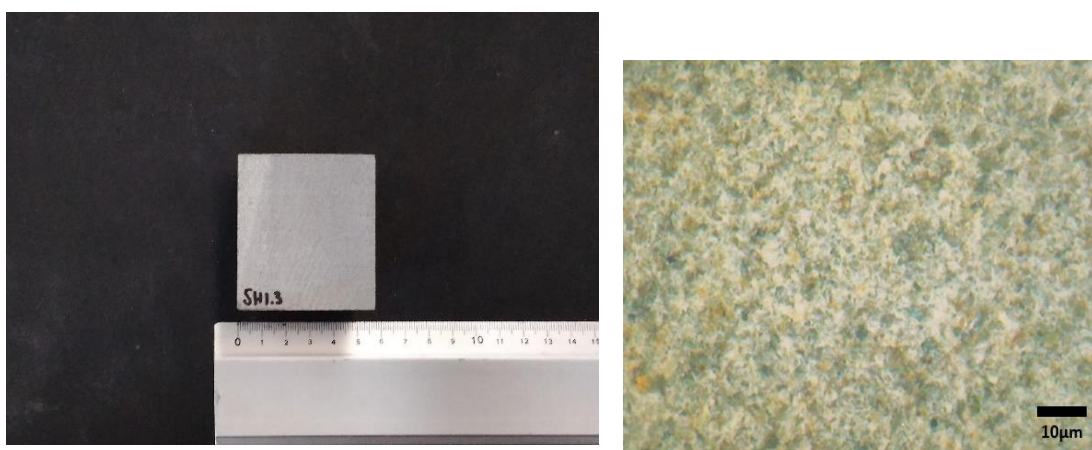
Τα δοκίμια του ιστορικού λίθου PL\_SH\_1 φαίνεται πως έχουν αρκετά συμπαγής επιφάνεια. Υπάρχει ανομοιογένεια ως προς το χρωματισμό τους, με περιοχές διαφόρων αποχρώσεων του γκριζου και λευκές κηλίδες. Η κόκκοι το λίθου είναι ορατοί. Τέλος εμφανείς είναι λευκές φλεβώσεις που διασχίζουν την επιφάνεια του λίθου. Τα δοκίμια PL\_SH\_1.2, PL\_SH\_1.3, PL\_SH\_1.4, PL\_SH\_1.6 και PL\_SH\_1.7 παρουσιάζουν ερυθρές περιοχές ενώ κάποιες πλευρές τους έχουν αποχρωματιστεί τελείως και παρουσιάζουν ερυθρό χρωματισμό που είναι ορατός με γυμνό μάτι. Στο μικροσκόπιο με την βοήθεια μη-πολωμένου φωτός φαίνονται ασημίζουσες κυλίδες, στα δοκίμια PL\_SH\_1.6, PL\_SH\_1.7 και PL\_SH\_1.8, οι οποίες είναι επίσης ορατές με γυμνό μάτι.



Εικόνα 22. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.1 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.1 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



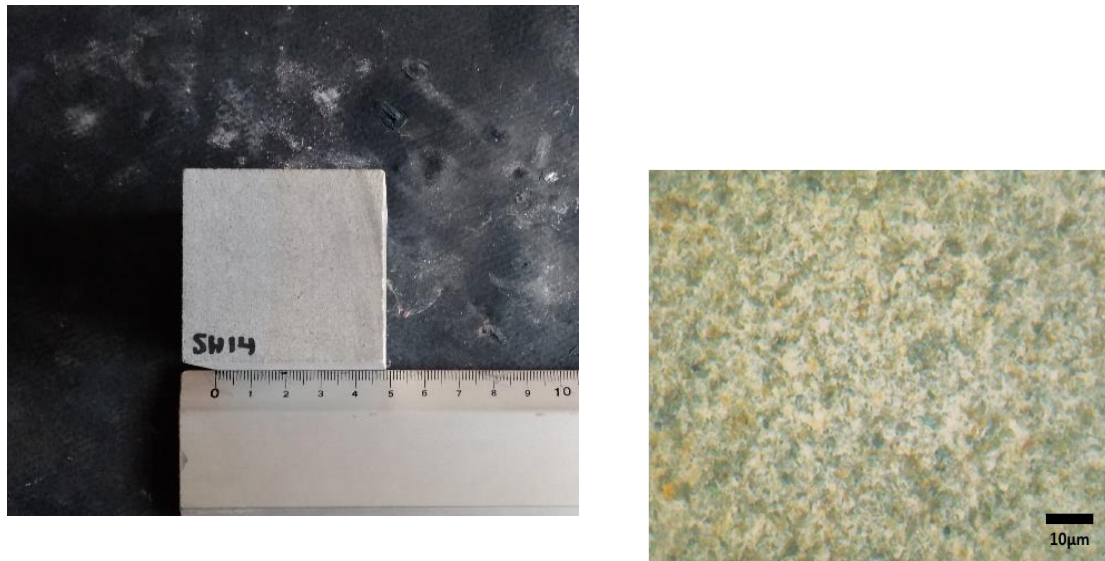
Εικόνα 23. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.2 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.2 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



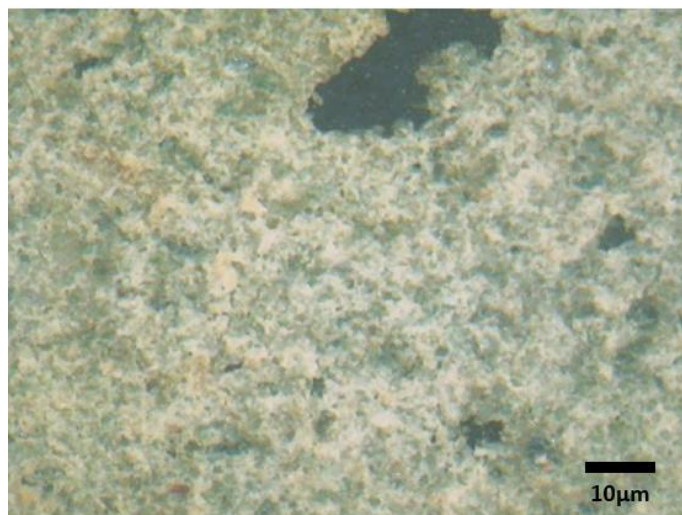
Εικόνα 24. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.3 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.3 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)

Το δοκίμιο PL\_SH\_1.4 παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τα προηγούμενα δοκίμια. Αξίζει να σημειωθεί πως αρκετές από τις πλευρές τού έχουν αποκτήσει μία πλήρως ερυθρή χροιά που είναι εμφανής με γυμνό μάτι. Στο μικροσκόπιο φαίνεται πως σε αυτές τις επιφάνειες, υπάρχουν πάρα πολλές κηλίδες αυτού του χρώματος. Αξίζει να σημειωθεί πως μια πλευρά του δοκιμίου παρουσιάζει καστανέρυθρη περιοχή, η οποία επίσης οδηγεί στο συμπέρασμα της παρουσίας οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου.

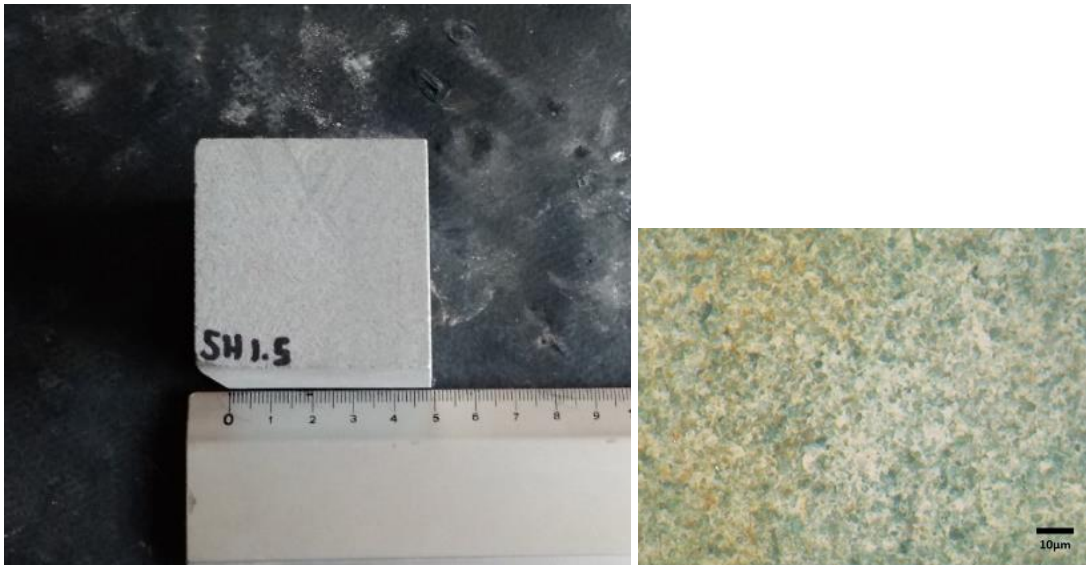




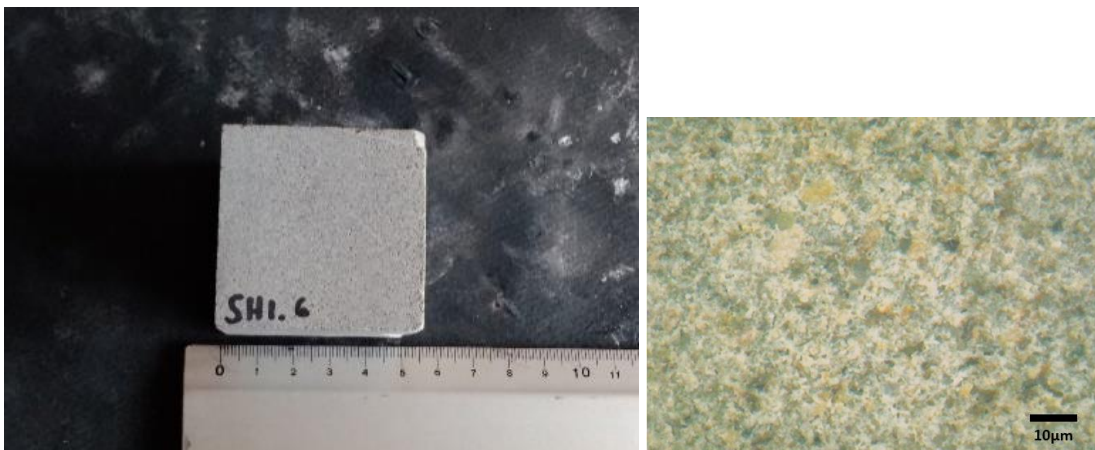
Εικόνα 25. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.4 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.4 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



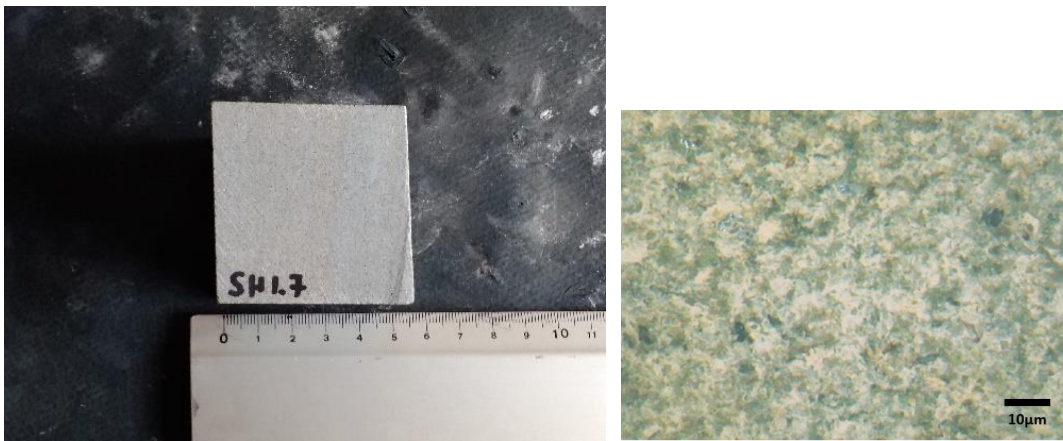
Εικόνα 26. μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.4 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά) στην οποία φαίνεται η μαύρη κρούστα.



Εικόνα 27. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.5 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.5 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



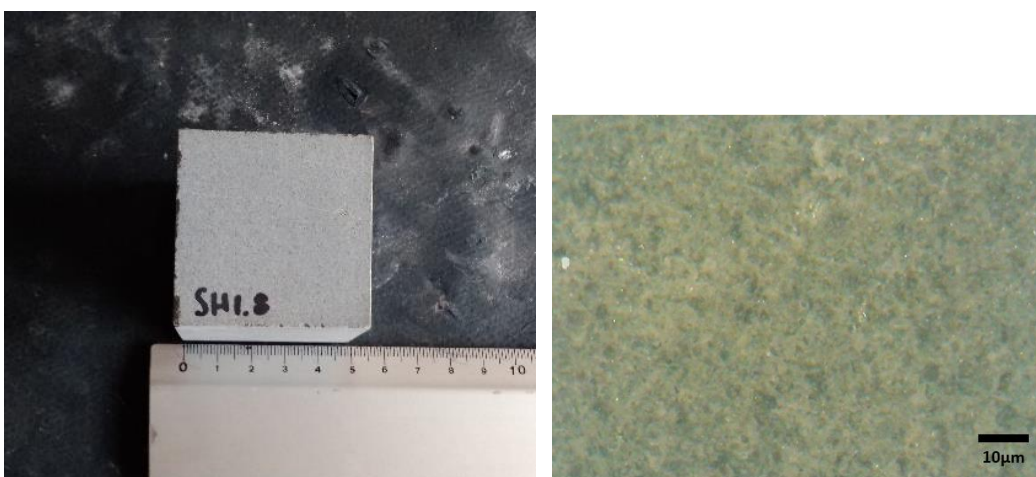
Εικόνα 28. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.6 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.6 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



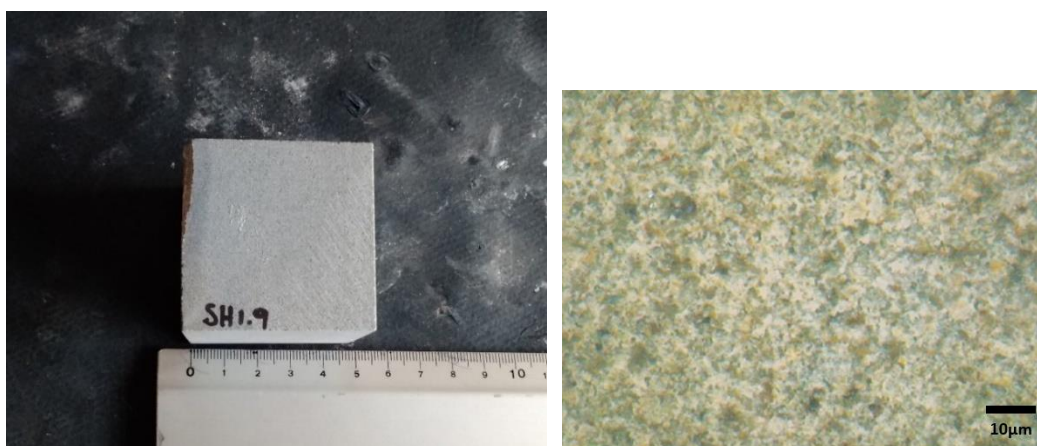
Εικόνα 29. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.7 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.7 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 30. Μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.7 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά), στην οποία διαφαίνεται η ασημένια γυαλάδα



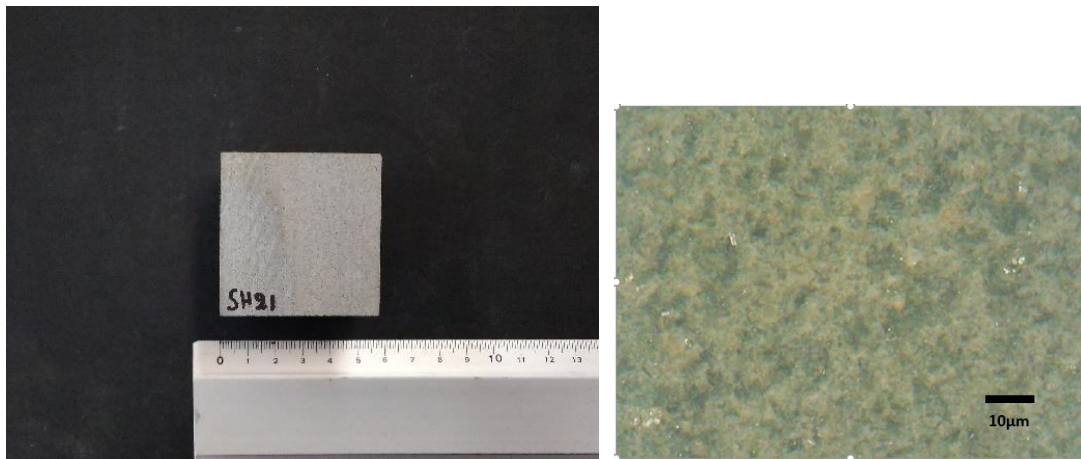
Εικόνα 31. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.8 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.8 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



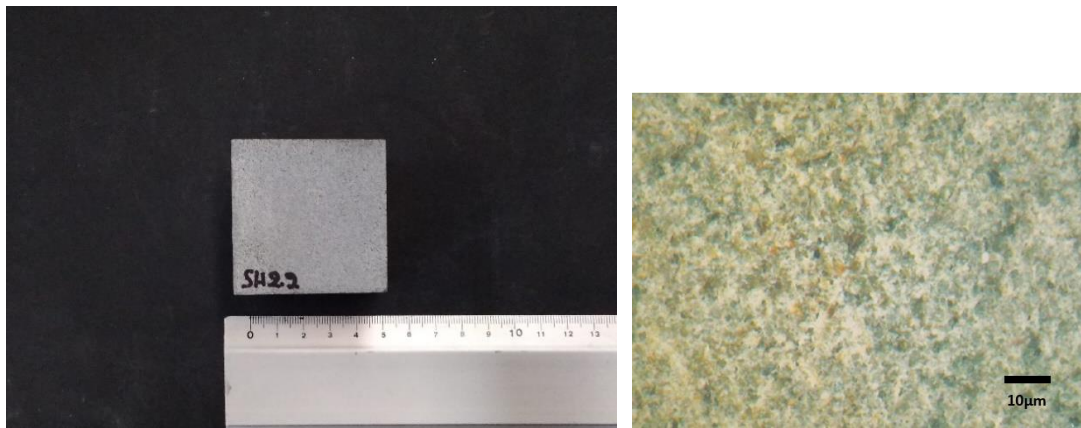
Εικόνα 32. . Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.9 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_1.9 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)

#### 4.1.2 Ιστορικός λίθος PL\_SH\_2

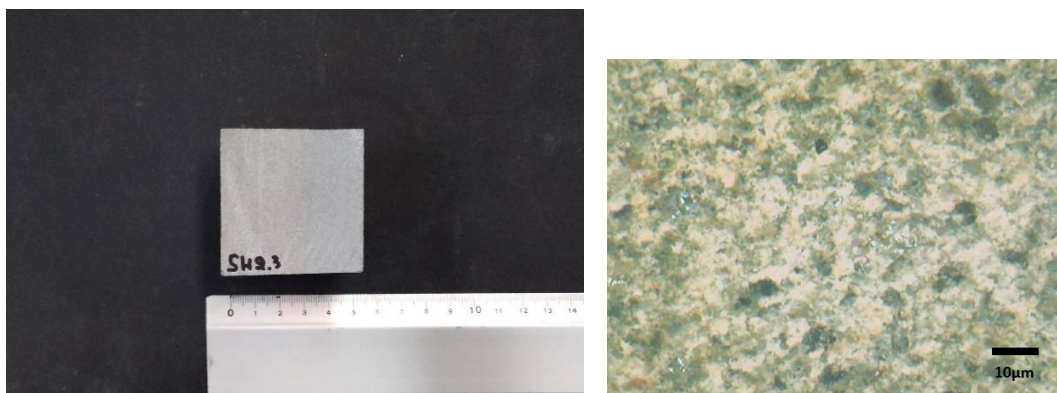
Τα δοκίμια του ιστορικού λίθου PL\_SH\_2 διαθέτουν επίσης συμπαγή επιφάνεια. Οι κόκκοι του λίθου είναι ορατοί με το μικροσκόπιο ενώ και εδώ είναι έντονη η ανομοιογένεια του χρώματος του λίθου. Υπάρχουν πολλές εναλλαγές ανάμεσα σε λευκές, μαύρες και γκριζες περιοχές ενώ λευκές φλεβώσεις διασχίζουν την επιφάνεια των περισσότερων δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια, παρουσιάζουν έντονα αποχρωματισμένες περιοχές ερυθρού χρώματος, οι οποίες πολλές φορές είναι ορατές με γυμνό μάτι. Με την βοήθεια του μη-πολωμένου φωτός παρατηρούνται ασημένιες κηλίδες στα δοκίμια PL\_SH\_2.1, PL\_SH\_2.2, PL\_SH\_2.3, PL\_SH\_2.4, PL\_SH\_2.6 και PL\_SH\_2.7. Αξίζει να σημειωθεί πως ορισμένες πλευρές του δοκιμίου PL\_SH\_2.5 παρουσιάζουν περικρυσταλλικές ρηγματώσεις ενώ το δοκίμιο PL\_SH\_2.6 εμφανίζει περιοχή με έντονο καστανέρυθρο χρωματισμό που επίσης οδηγεί στην κατεύθυνση της ύπαρξης οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου.



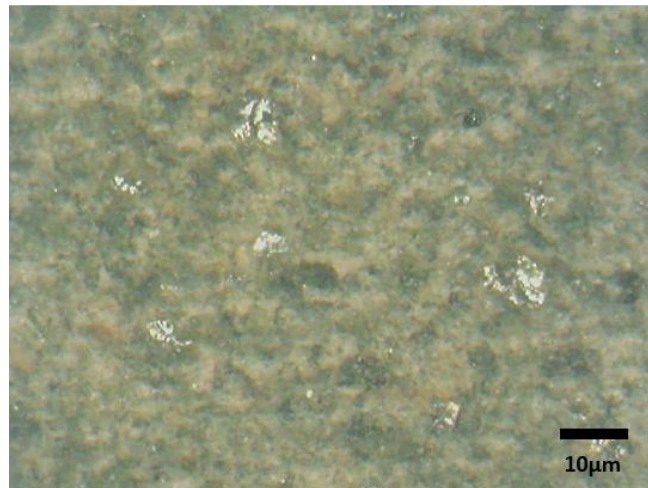
Εικόνα 33. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.1 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.1 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



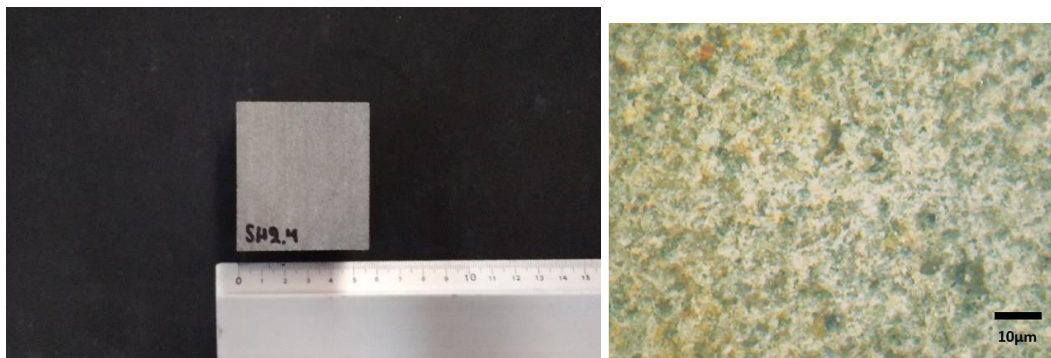
Εικόνα 34. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.2 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.2 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 35. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.3 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.3 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



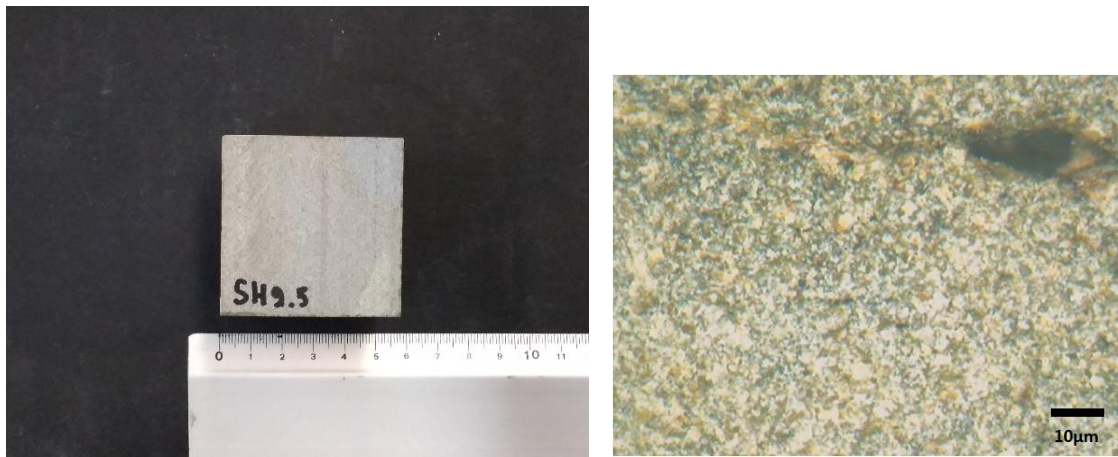
Εικόνα 36. Μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.3 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά), στην οποία διαφαίνεται η ασημένια γυαλάδα



Εικόνα 37. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.4 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.4 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



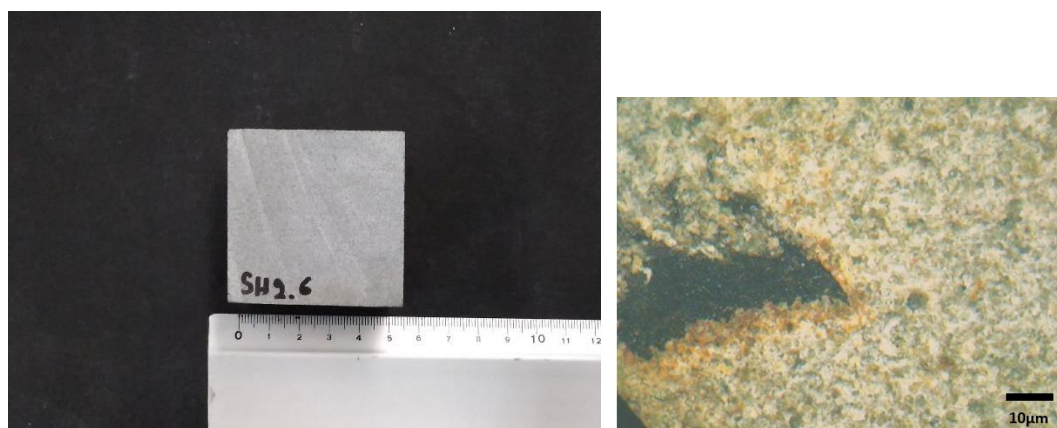
Εικόνα 38. Μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.4 με FOM, μεγέθυνσης x50 με πολωμένο φως



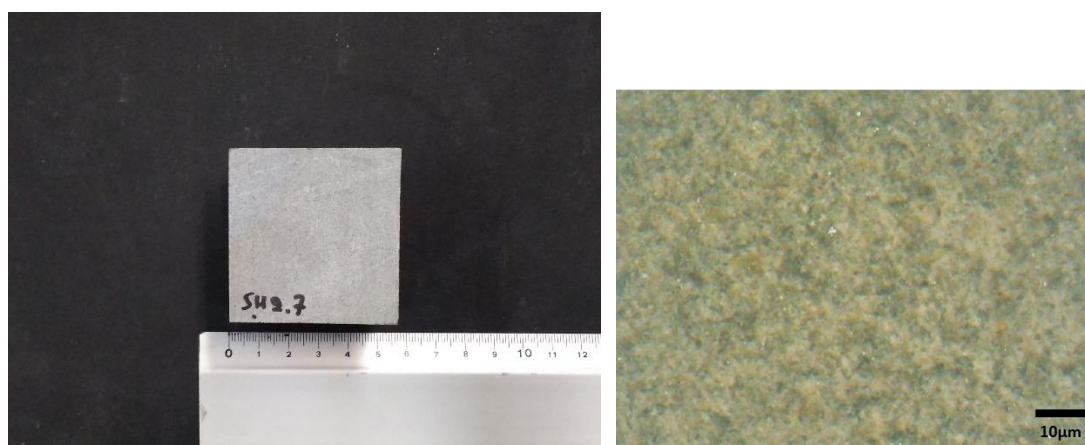
Εικόνα 39. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.5 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.5 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 40. Μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.5 με FOM, μεγέθυνσης όπου φαίνεται ο ερυθρός χρωματισμός καθώς και ρωγμή του δοκιμίου



Εικόνα 41. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.6 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.6 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 42. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.7 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_SH\_2.7 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)

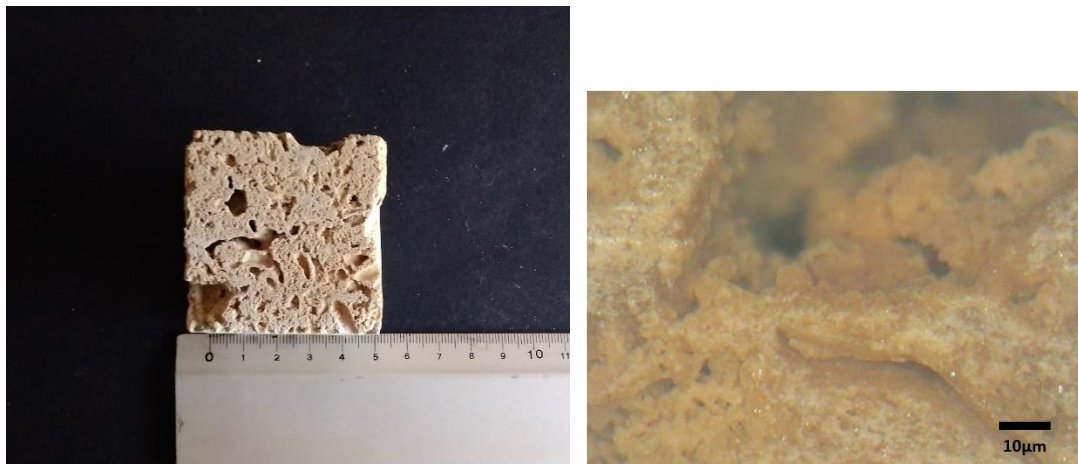
#### 4.1.3 Λίθοι γεμίματος PL\_PH\_1 και PL\_PH\_2

Για τα δοκίμια του λίθου γεμίματος, φαίνεται πως πρόκειται για έναν λίθο, λευκού και μπεζ χρώματος, με αρκετά ανομοιόμορφη επιφάνεια. Είναι εμφανές πως έχει επέλθει τεράστια απώλεια συνδετικού υλικού, ενώ είναι εύκολα αντιληπτό το μέγεθος του πορώδους. Σημείο ενδιαφέροντος είναι οι μικρές περιοχές ασημένιας γυαλάδας.

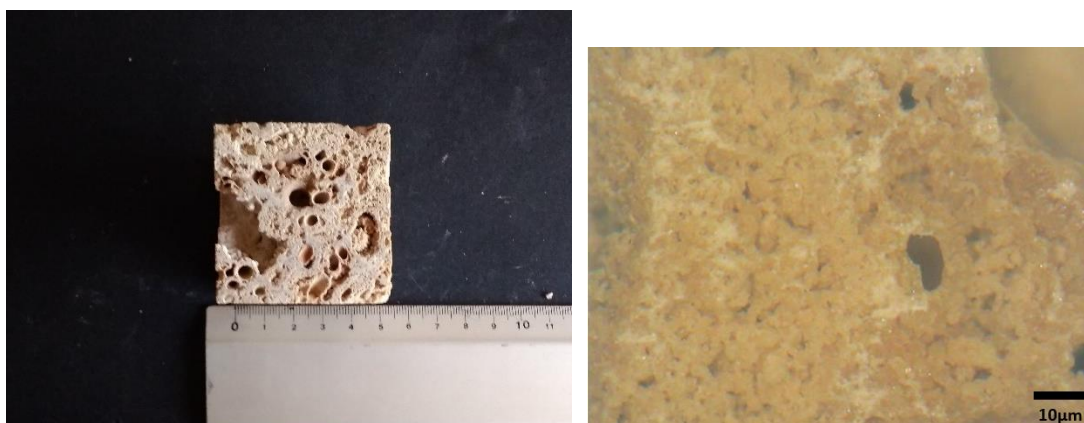




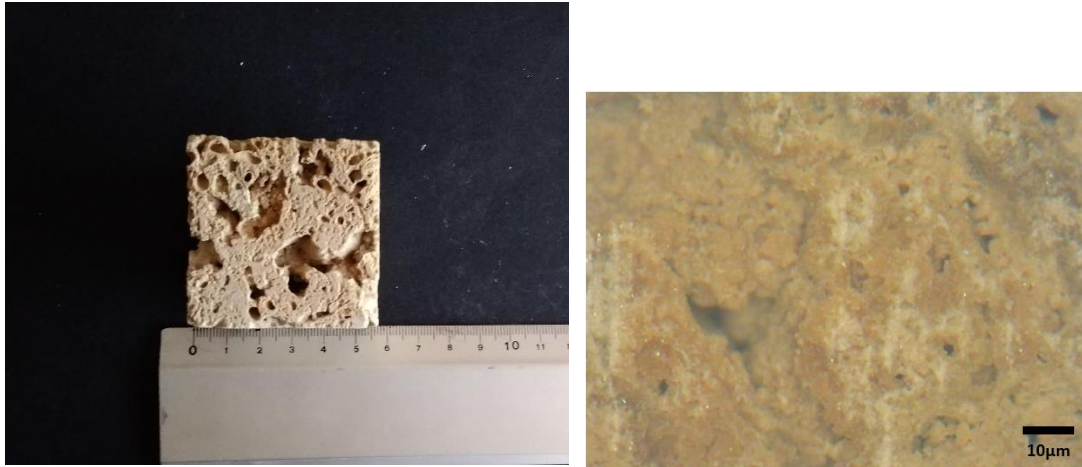
Εικόνα 43. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_1.1 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_1.1 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 44. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_1.2 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_1.2 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



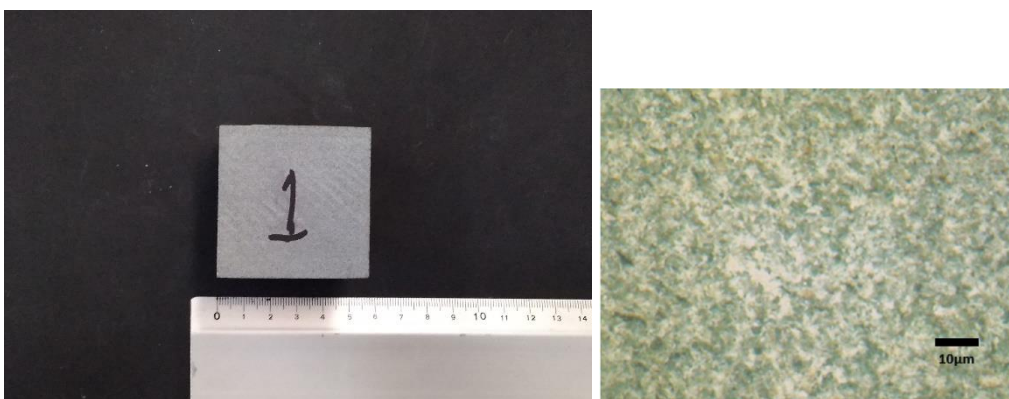
Εικόνα 45. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_2.1 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_2.1 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



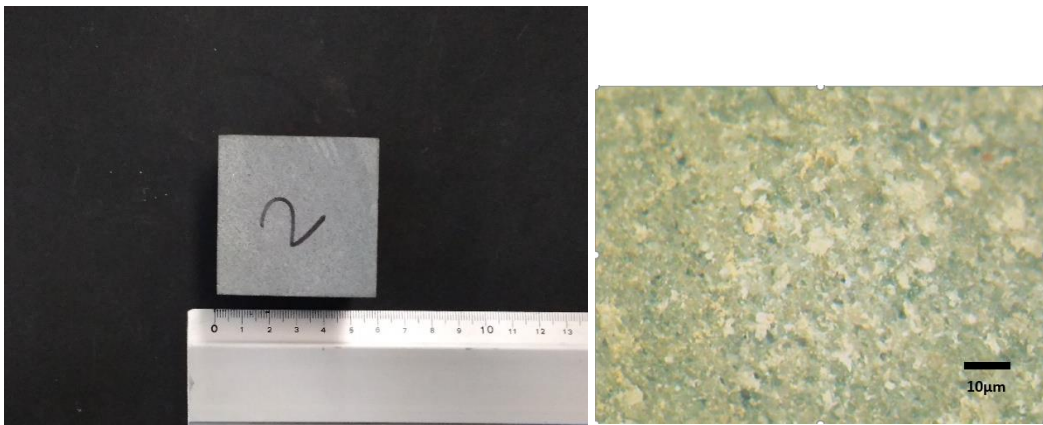
Εικόνα 46. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_2.2 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_PH\_2.2 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)

#### 4.1.4 Προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης PL\_R\_S

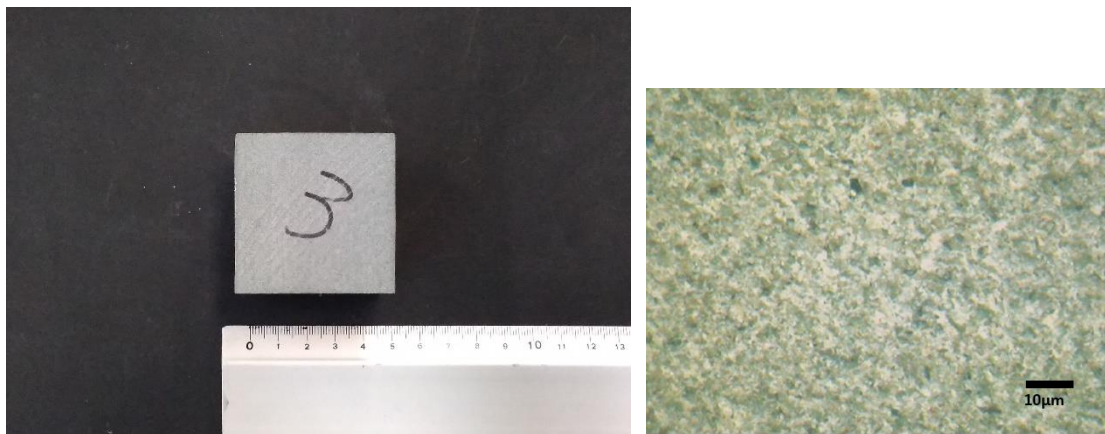
Φαίνεται πως η επιφάνεια των δοκιμίων του λίθου «Δαφνούλας» είναι αρκετά συμπαγής. Οι κόκκοι του λίθου είναι διακριτοί από το μικροσκόπιο ενώ υπάρχει κάποια ανομοιογένεια της επιφάνειας ως προς το χρώμα. Εμφανείς είναι περιοχές έντονα γκρίζου και λευκού χρώματος ενώ φαίνονται και περιοχές μαύρου χρώματος. Αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια PL\_R\_S\_2 και PL\_R\_S\_4 εμφανίζουν ελάχιστες περιοχές με ερυθρό χρωματισμό, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου.



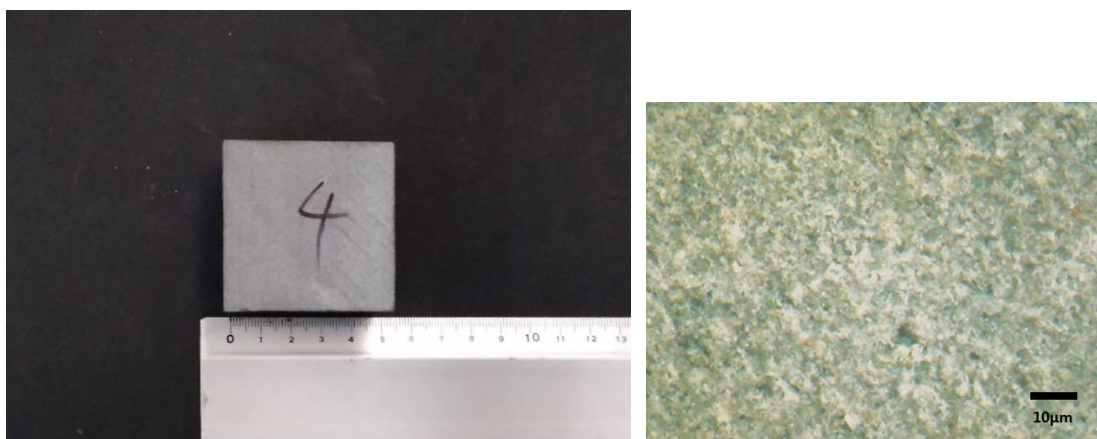
Εικόνα 47. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_1 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_1 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



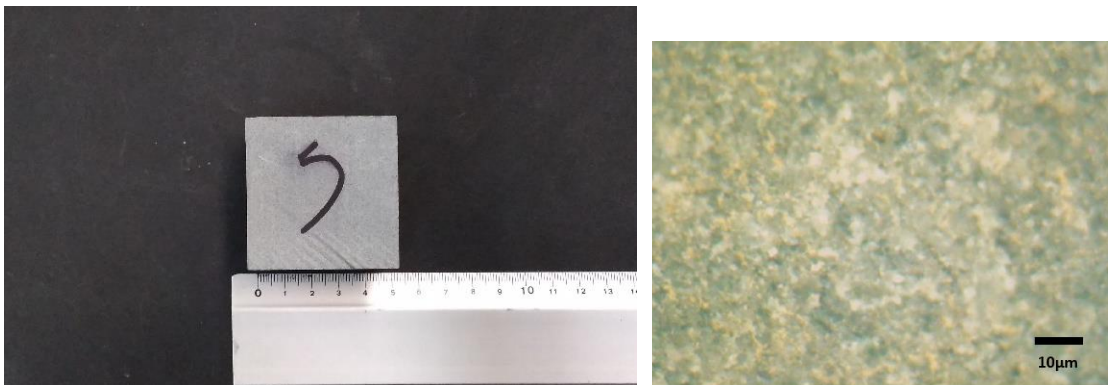
Εικόνα 48. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_2 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_2 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



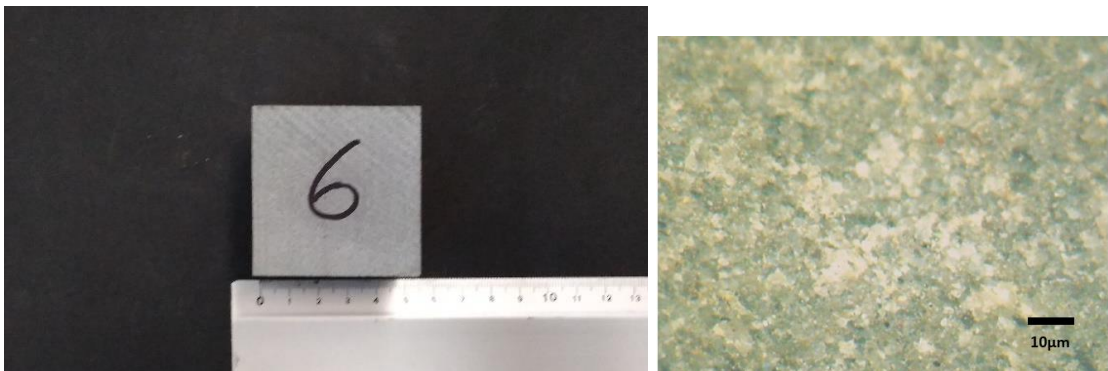
Εικόνα 49. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_3 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_3 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



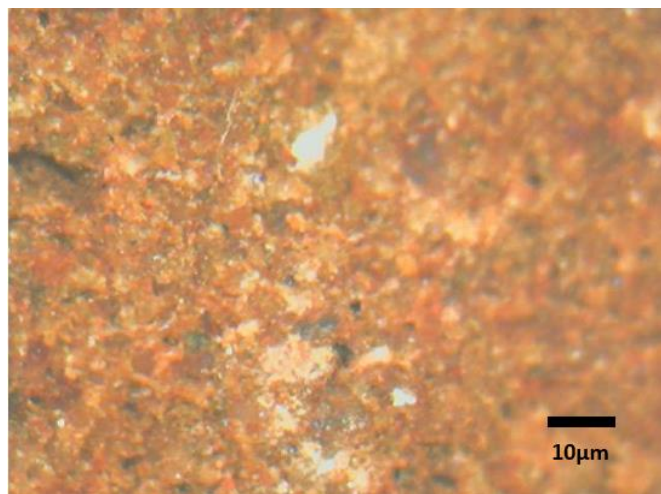
Εικόνα 50. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_4 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_4 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 51. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_5 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_5 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)



Εικόνα 52. Μακροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_5 (αριστερά), μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου PL\_R\_S\_5 με FOM, μεγέθυνσης x50 (δεξιά)

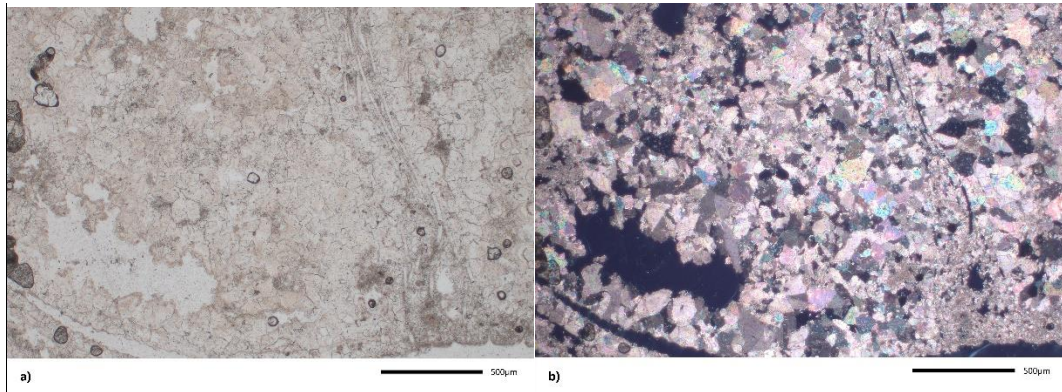


Εικόνα 53. Μικροσκοπική απεικόνιση ερυθρής περιοχής στην επιφάνεια του PL\_R\_S\_6 με FOM, μεγέθυνση x120

## 4.2 Οπτική Μικροσκοπία

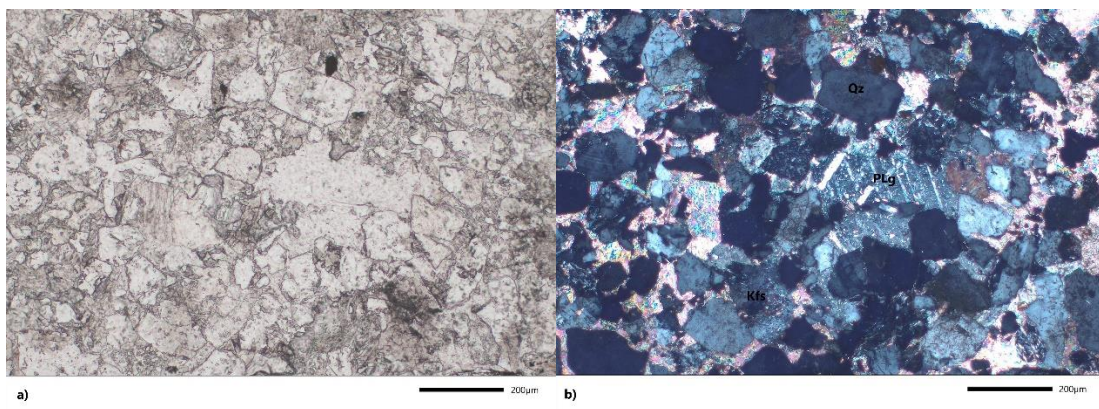
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε πετρογραφική μελέτη με σκοπό την αναγνώριση των ορυκτών που δομούν τους λιθότυπους προς μελέτη.

Όσον αφορά τον λίθο γεμίματος πρόκειται για πορώδη ασβεστόλιθο υπόλευκου χρώματος. Στο μικροσκόπιο διακρίνονται μεγάλοι κι ακανόνιστοι πόροι καθώς και κρύσταλλοι ασβεστίτη. Το μέγεθος των πόρων φαίνεται να φτάνει έως το 1 cm.

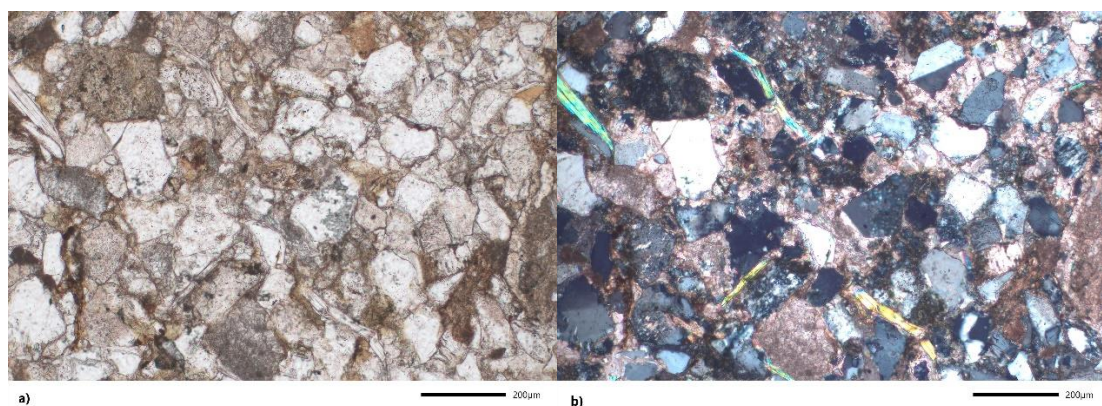


Εικόνα 54. Φωτομικρογραφίες ιστορικού παρόλιθου σε παράλληλα(a) και κάθετα(b) πολαιοιδή σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός

Όσον αφορά τους ιστορικούς λίθους όψης πρόκειται για γκρίζους συμπαγής πετρώματα, αρκετά ομοιογενή και συνεκτικά. Το πορώδες τους είναι αρκετά μικρό. Η ορυκτολογική τους σύσταση όπως προκύπτει από την μελέτη λεπτών τομών των πετρωμάτων σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, είναι κυρίως χαλαζίας και άστριοι (καλιούχοι άστριοι, πλαγιόκλαστα) με συνδετικό υλικό ασβεστίτη. Το μέσο μέγεθος των κλαστικών κόκκων είναι 150 µm. Αξίζει να σημειωθεί πως ο ιστορικός λίθος PL\_SH\_2 παρουσιάζει φυλλάκια μοσχοβίτη.

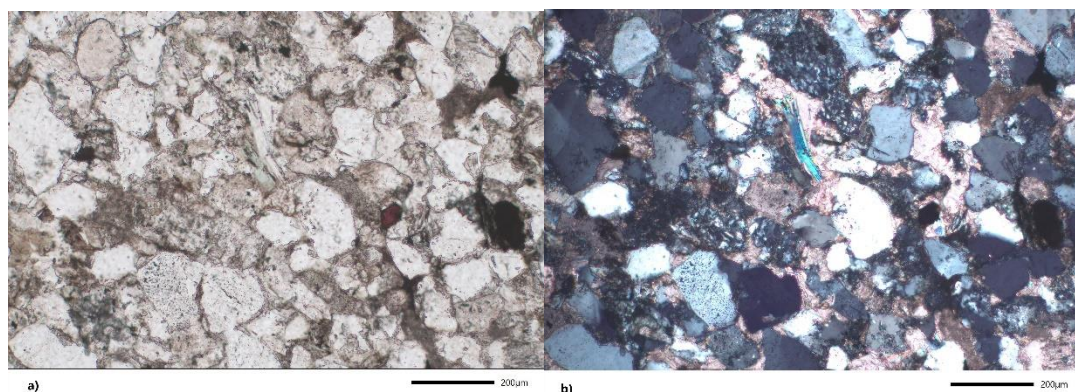


Εικόνα 55. Φωτομικρογραφίες ιστορικού λίθου PL\_SH\_1 σε παράλληλα(a) και κάθετα(b) πολαιοιδή σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός



Εικόνα 56. Φωτομικρογραφίες του ιστορικού λίθου όψης PL\_SH\_2 σε παράλληλα(a) και κάθετα(b) πολαροϊδή σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός

Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης πρόκειται επίσης για ένα συμπαγές γκρίζο και συνεκτικό πέτρωμα, με πολύ μικρό πορώδες. Η ορυκτολογική του σύσταση όπως προκύπτει από την μελέτη λεπτής τομής του πετρώματος σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, είναι κυρίως χαλαζίας και άστριοι (καλιούχοι άστριοι, πλαγιόκλαστα) με συνδετικό υλικό ασβεστίτη, ενώ υπάρχουν φυλλάρια μοσχοβίτη. Το μέσο μέγεθος των κόκκων είναι ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό του ιστορικού λιθότυπου και περίπου 150 μm.



Εικόνα 57. Φωτομικρογραφίες του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης PL\_R\_S σε παράλληλα(a) και κάθετα(b) πολαροϊδή σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός

Συμπερασματικά, ο λίθος «Δαφνούλας» παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τις λεπτές τομές των ιστορικών λίθων όψης, ιδιαίτερα με αυτή του λίθου PL\_SH\_2. Τόσο ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης όσο και ο ιστορικός λιθότυπος ταυτοποιούνται ως ασβεστιτικού ψαμμίτες.

Οι παραπάνω τύποι πετρωμάτων (ψαμμίτης, μάργα) αποτελούν χαρακτηριστικά μέλη ενός φλυσχικού σχηματισμού. Βάσει του γεωλογικού χάρτη κλίμακας 1:50.000 (IGME, φύλλο Άγναντα), η περιοχή της γέφυρας δομείται από την κατώτερη σειρά του φλύσχη της Ιονίου Ζώνης (αδιαίρετος φλύσχη 1-3Fi), ηλικίας

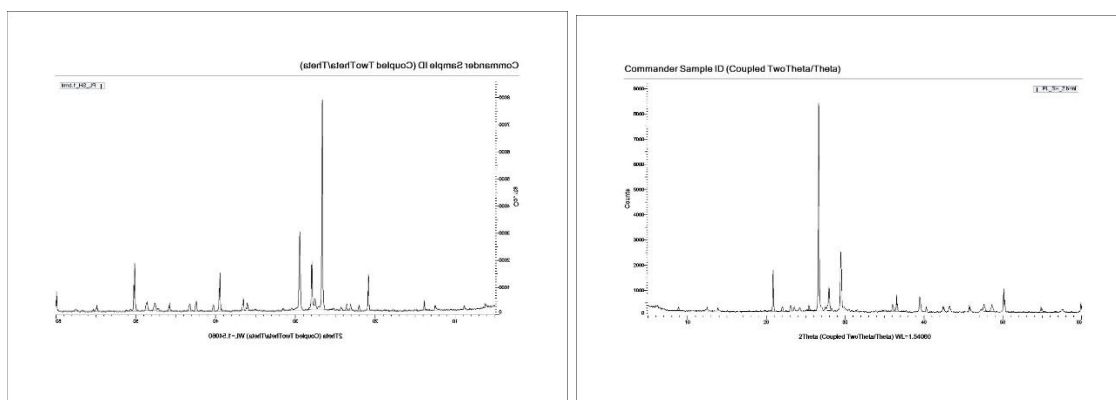
Ανώτερου Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου, που περιλαμβάνει εναλλαγές ψαμμιτικών πάγκων ποικίλου πάχους με τις συνεκτικές μάργες του Αράχθου. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι (προσκομισθέντες) λίθοι από το γεφύρι της Πλάκας προέρχονται από τους ψαμμιτομαργαϊκούς πάγκους του φλύσχη της Ιονίου Ζώνης, οι οποίοι βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση. Μεγάλοι όγκοι πετρωμάτων του φλυσχικού αυτού σχηματισμού βρίσκονται και στην κοίτη του ποταμού, λόγω μηχανικής διάβρωσης.

### 4.3 Περίθλαση ακτινών X

Για την ταυτοποίηση των ενώσεων που παρουσιάζονται στους ιστορικούς λίθους και λίθους αποκατάστασης, πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με περίθλαση ακτινών X. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Κωδικός δείγματος	Ορυκτολογική Σύσταση
PL_SH_1	Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Αλβίτης, Ανορθίτης, Λιζαρδίτης, Μοσχοβίτης, Βιοτίτης, Χλωρίτης-Σερπεντίνης
PL_SH_2	Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Αλβίτης, Ανορθίτης, Λιζαρδίτης, Μοσχοβίτης, Βιοτίτης, Χλωρίτης-Σερπεντίνης
PL_PH_1	Ασβεστίτης, Χαλαζίας
PL_R_S	Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Αλβίτης, Ανορθίτης, Λιζαρδίτης, Βιοτίτης, Μοσχοβίτης, Χλωρίτης-Μοντομυρίτης

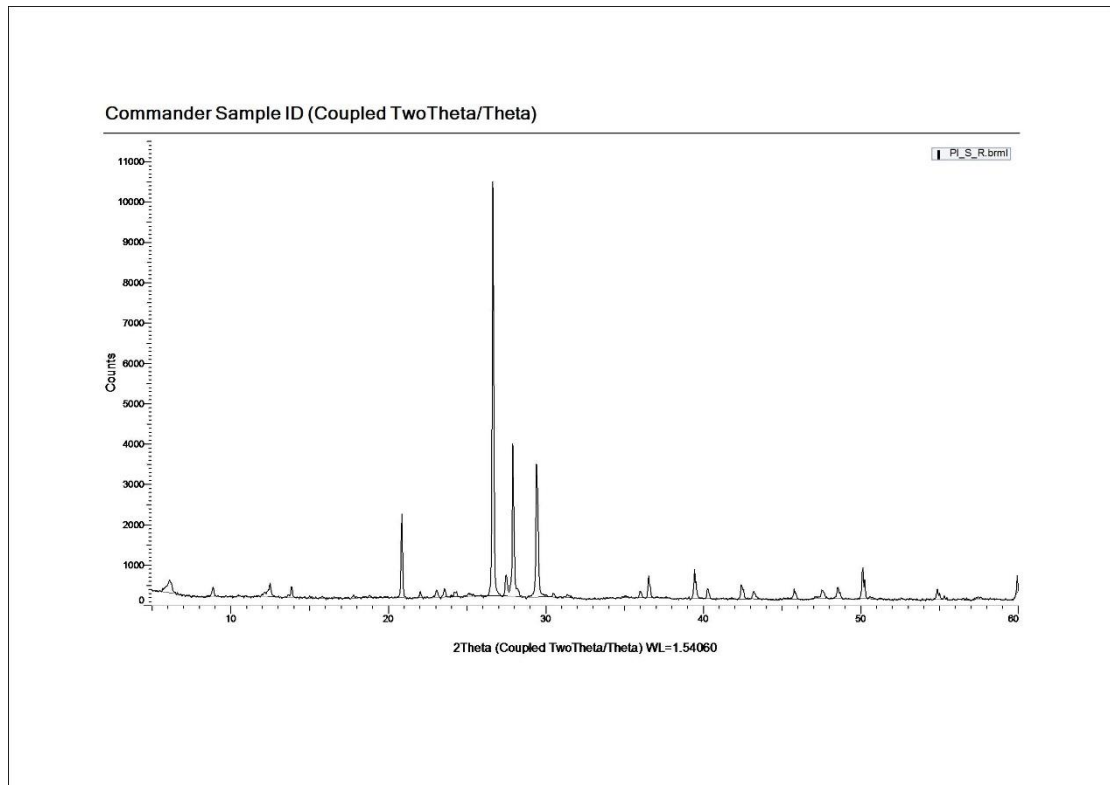
Πίνακας 5. Ορυκτολογική σύσταση λιθότυπων



Γράφημα 1. Ακτινογράφημα ιστορικού λιθότυπου όψης PL\_SH\_1 (αριστερά) και PL\_SH\_2 (δεξιά)

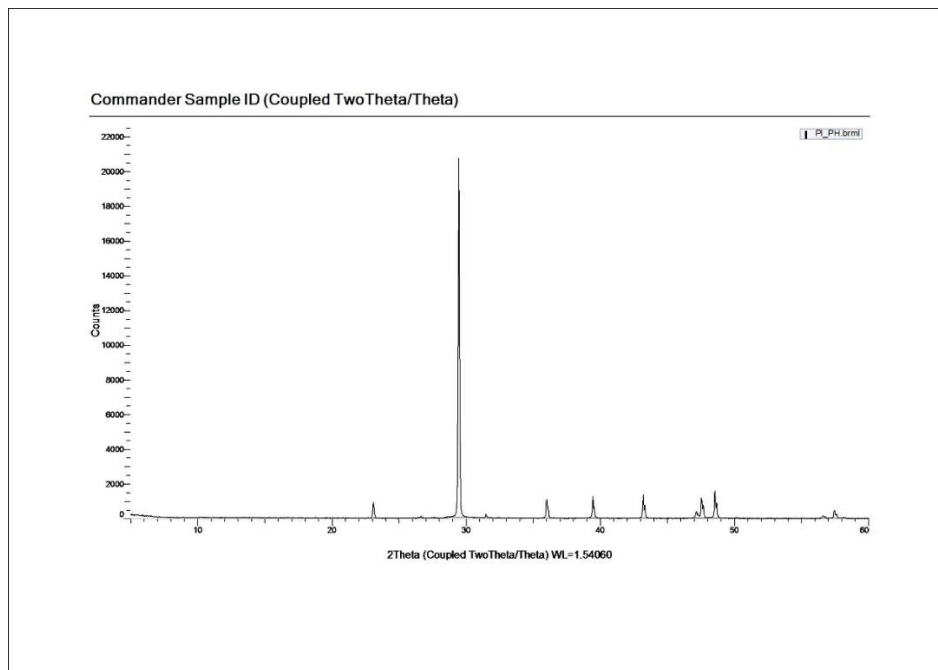
Η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων ιστορικού λιθότυπου όψης είναι πανομοιότυπα με κύριες ορυκτολογικές φάσεις τον χαλαζίας και τον ασβεστίτη. Δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις που εμφανίζονται είναι ο αλβίτης, ο ανορθίτης, ο λιζαρδίτης, ο μοσχοβίτης, ο βιοτίτης και ο χλωρίτης-σερπεντίνης.





Γράφημα 2. Ακτινογράφημα λίθου αποκατάστασης PL\_R\_S

Η κύρια ορυκτολογική φάση του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης φαίνεται πως είναι ο χαλαζίας κι ο ασβεστίτης. Δευτερεύοντες φάσεις του λίθου φαίνεται πως ο αλβίτης, ανορθίτης, λιζαρδίτης, ο βιοτίτης, ο μοσχοβίτης και ο χλωρίτης-μοντμοριλλονίτης. Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία ως την ορυκτολογική του σύσταση με τον ιστορικό.



Γράφημα 3. Ακτινογράφημα ιστορικού παρόλιθου PL\_PH\_1

Από τα αποτελέσματα, φαίνεται πως πρόκειται για ασβεστολιθικό παρόλιθο με κυρία ορυκτολογική φάση τον ασβεστίτη και δευτερεύουσα τον χαλαζία.

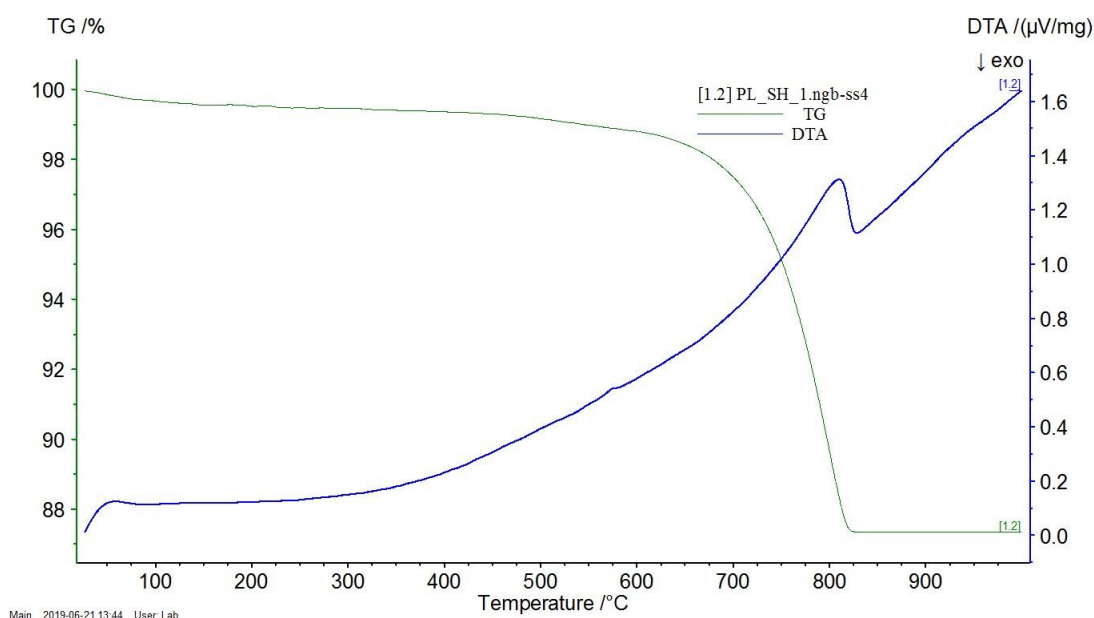
#### 4.4 Θερμοβαρμετρική και Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA-TG)

Η μέθοδος DTA-TG εφαρμόστηκε σε δείγμα από τον λίθο PL\_R\_S και PL\_HS\_1. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συνοπτικά τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων σε σχέση με της επί της εκατό απώλεια μάζας ανά θερμοκρασιακό διάστημα για κάθε δείγμα που εξετάστηκε:

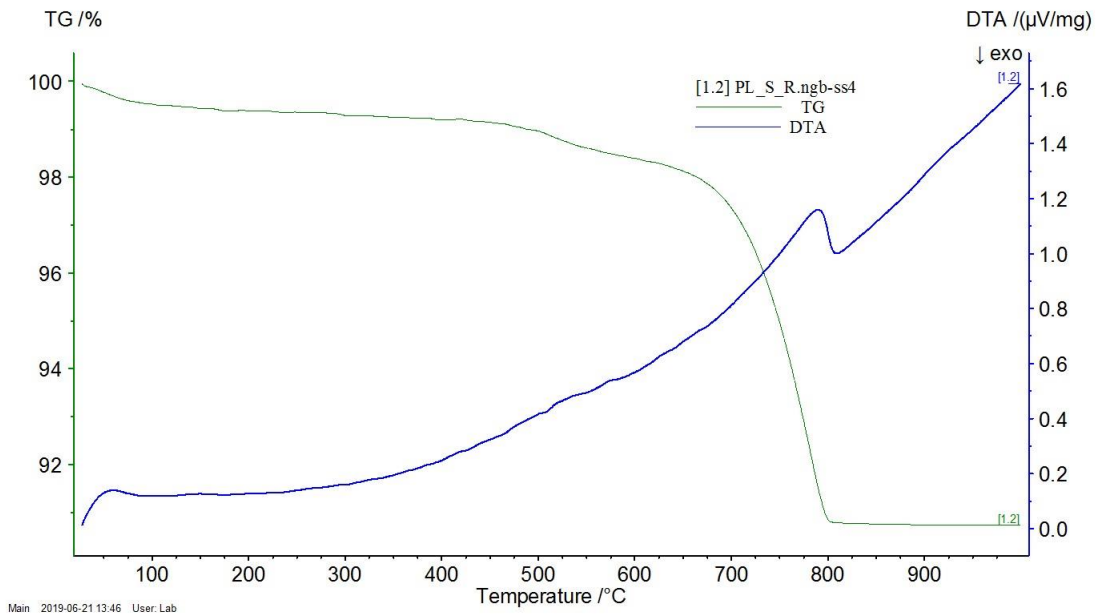
Κωδικός δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό εύρος			
	<120(°C)	120-200 (°C)	200-600 (°C)	>600 (°C)
PL_R_S	0.35	0.10	0.72	11.46
PL_SH_1	0.45	0.11	1.01	7.67

Πίνακας 6. Αποτελέσματα Θερμικής βαρομετρικής Ανάλυσης

Το θερμοκρασιακό εύρος που αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των 120 °C αντιστοιχεί στην εξάτμιση του φυσικά προσροφημένου νερού των συστατικών του δείγματος. Το εύρος των 120-200 °C σχετίζεται με την απομάκρυνση των κρυσταλλικών και διαμοριακών νερών. Στο εύρος 200-600 °C απομακρύνεται το χημικά δεσμευμένο νερό που προέρχεται από τις ένυδρες αργιλοπυριτικές ενώσεις. Τέλος σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 °C αντιστοιχεί η διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων και συγκεκριμένα του ανθρακικού ασβέστη.

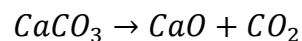


Γράφημα 4. Διάγραμμα θερμοβαρμετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος ιστορικού λιθότυπου



Γράφημα 5. Διάγραμμα θερμοβαρυμετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος λιθότυπου PL\_R\_S

Συνολικά, οι απώλειες μάζας των δειγμάτων των λιθότυπων σε κάθε θερμοκρασιακό εύρος είναι ίδιας τάξης μεγέθους. Είναι εμφανές πως και οι δυο λιθότυποι εμπεριέχουν ελάχιστο ποσοστό δεσμευμένου νερού. Το χημικά δεσμευμένο νερό που απομακρύνεται στις θερμοκρασίες 200-600 °C είναι ελάχιστο και στους δύο λιθότυπους. Στα παραπάνω διαγράμματα η ενδόθερμη κορυφή που εμφανίζεται περίπου στους 575 °C οφείλεται στον μετασχηματισμό του χαλαζία από α φάση σε β φάση η οποία δεν συνεπάγεται σε απώλεια μάζας. Όπως αναφέρθηκε σε θερμοκρασίες >600 °C εμφανίζεται και στα δύο διαγράμματα μια ενδόθερμη κορυφή που αντιστοιχεί στην εξής αντίδραση:



$$m_{CaCO_3} \% = 10044 * m_{CO_2} \%$$

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

Θεωρώντας πως το ποσοστό που φαίνεται να απομακρύνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 °C οφείλεται εξ ολοκλήρου στην ύπαρξη ανθρακικού ασβεστίου, τότε με βάση τη στοιχειομετρία της αντίδρασης και τα μοριακά βάρη των ενώσεων είναι δυνατό να υπολογιστεί το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου μέσω του ποσοστού του απομακρυνόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, εφόσον δεν εμφανίζονται στους λιθότυπους άλλες ορυκτολογικές φάσεις που εμπεριέχουν ανθρακικό ασβέστιο πέρα από τον ασβεστίτη, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το

ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου αντιστοιχεί στο ποσοστό του συνολικού ασβεστίτη. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα:

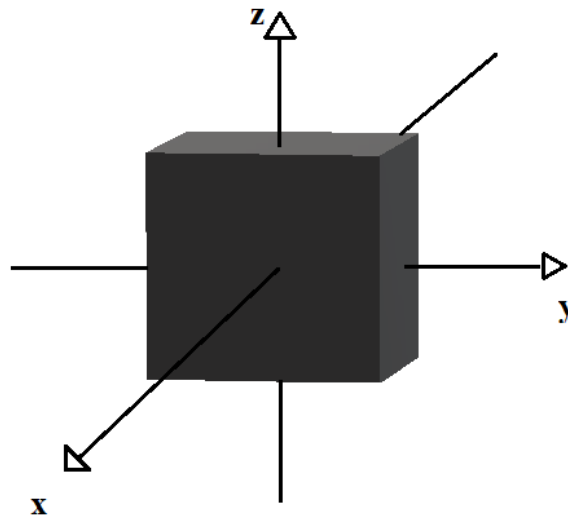
Κωδικός Δείγματος	Ποσοστό CaCO <sub>3</sub> (%)
PL_R_S	26
PL_SH_1	17.5

Πίνακας 7. Ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου σε κάθε λιθότυπο

Φαίνεται πως και τα δύο δείγματα λιθότυπων παρουσιάζουν απώλειες μάζας ίδιας τάξης μεγέθους ακόμα και πάνω από τους 600 °C καθώς και παρόμοιες τιμές απώλειας μάζας μεταξύ τους. Παράλληλα το ποσοστό ασβεστίτη φαίνεται να είναι μεγαλύτερο στον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης.

## 4.5 Υπερηχοσκόπηση

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων κατά μήκος των κυβικών δοκιμίων, εφαρμόστηκε η μέθοδος της άμεσης υπερηχοσκόπησης στα τρία επίπεδα. Κατά την διεξαγωγή του πειράματος μετρήθηκε η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στην διεύθυνση των αξόνων συντεταγμένων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Να σημειωθεί πως ο άξονας  $z$  αποτελεί την διεύθυνση καταπόνησης του λίθου στο πλαίσιο του μνημείου. Για την μέτρηση της ταχύτητας σε κάθε διεύθυνση καταγράφηκε η μέγιστη τιμή τριών διαδοχικών μετρήσεων.



Εικόνα 58. Διευθύνσεις μέτρησης ταχύτητας διάδοσης δοκιμίων

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στον λίθο εξαρτάται από την συνεκτικότητα και το ποσοστό κενού χώρου στο λίθο (πορώδες, ρωγμές). Είναι αναλόγως αντίστροφη το μέγεθος της διάβρωσης και γενικότερα αποτελεί ένα δείκτη για την ποιότητα των μηχανικών αντοχών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν. Να σημειωθεί πως στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων στην διεύθυνση των αξόνων  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα, καθώς κι η μέση τιμή της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων του δοκιμίου.

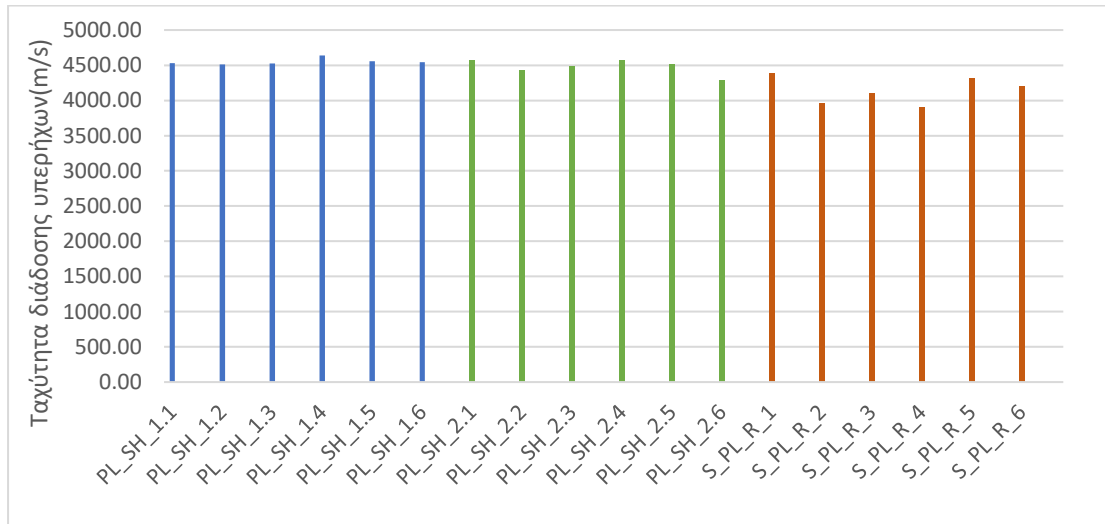
Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

Κωδικός δείγματος	Ταχύτητα υπερήχων ανά άξονα x,y,z (m/s)	Μέση τιμή ταχύτητας υπερήχων δοκιμίου (m/s)
PL_SH_1.1	4680.37	4530.88 ±204.18
	4614.02	
	4298.26	
PL_SH_1.2	4651.43	4513.49 ±244.12
	4231.62	
	4657.41	
PL_SH_1.3	4286.09	4524.69 ±214.34
	4700.94	
	4587.04	
PL_SH_1.4	4657.94	4640.78 ±207.29
	4425.45	
	4838.96	
PL_SH_1.5	4726.43	4558.81 ±232.77
	4293.04	
	4656.97	
PL_SH_1.6	4688.57	4542.90 ±202.27
	4628.17	
	4311.95	
PL_SH_2.1	4720.00	4564.43 ±153.67
	4412.73	
	4560.55	
PL_SH_2.2	4614.02	4432.13 ±230.23
	4509.09	
	4173.28	
PL_SH_2.3	4353.51	4480.94 ±210.42
	4365.49	
	4723.81	
PL_SH_2.4	4761.29	4575.62 ±184.67
	4391.96	
	4573.62	
PL_SH_2.5	4713.33	4512.81 ±182.69
	4355.82	
	4469.28	
PL_SH_2.6	3992.25	4290.38 ±266.27
	4504.55	
	4374.34	

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

S_PL_R_1	4127.27	4390.80 ±228.57
	4535.19	
	4509.94	
<b>Κωδικός δείγματος</b>	<b>Ταχύτητα υπερήχων ανά άξονα x,y,z (m/s)</b>	<b>Μέση τιμή ταχύτητας υπερήχων δοκιμίου (m/s)</b>
S_PL_R_2	3996.00	3959.07 ±168.29
	4105.83	
	3775.38	
S_PL_R_3	4191.45	4100.17 ±92.05
	4007.38	
	4101.67	
S_PL_R_4	4007.38	3906.80 ±169.93
	3710.61	
	4002.42	
S_PL_R_5	4409.55	4319.77 ±305.28
	3979.67	
	4570.09	
S_PL_R_6	4427.03	4197.28 ±325.34
	3825.00	
	4339.82	

Πίνακας 8. Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων στα τρία επίπεδα κάθε δοκιμίου



Γράφημα 6. Μέση ταχύτητα διάδοσης υπερήχων κάθε δοκιμίου

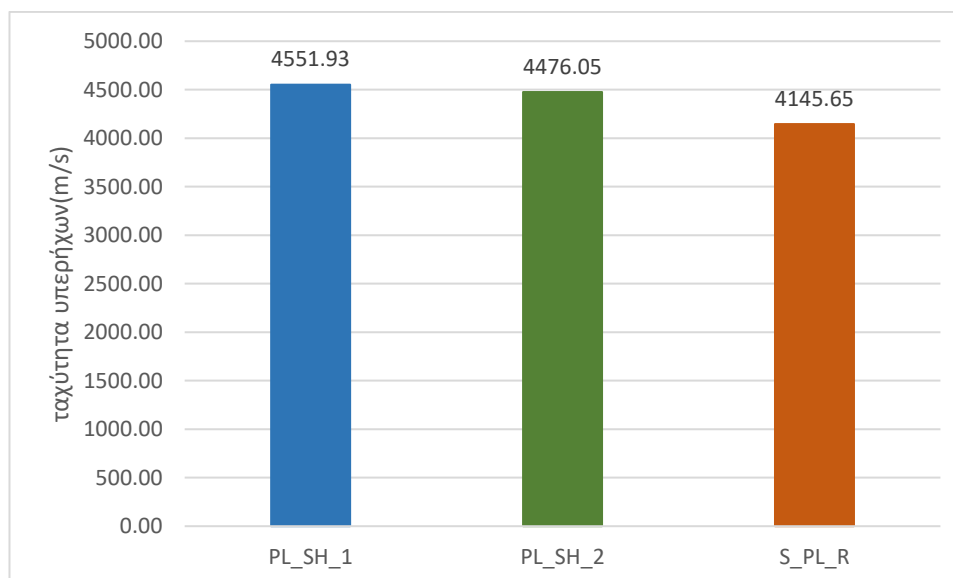
Αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια PL\_SH\_2.5 και PL\_SH\_2.6 παρουσίαζαν ρηγματώσεις, γεγονός που πιθανότατα επηρέασε την τιμή της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση του δοκιμίου PL\_SH\_2.6, όπου η ταχύτητα διάδοσης σε ένα επίπεδο είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις. Από τις τιμές των δοκιμίων φαίνεται πως τις χαμηλότερες τιμές ταχύτητας των υπερήχων παρουσιάζουν τα δοκίμια του λίθου αποκατάστασης.



Η μέση ταχύτητα υπερήχων για κάθε λίθο παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα καθώς και στο αντίστοιχο διάγραμμα μαζί με την τυπική της απόκλιση. Φαίνεται πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει μικρότερη αλλά ίδιας τάξης μεγέθους ταχύτητα διάδοσης υπερήχων με τους ιστορικούς. Συγκεκριμένα παρουσιάζει περίπου 9% μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από τον λίθο PL\_SH\_1 και περίπου 7.5% μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από τον λίθο PL\_SH\_2. Η υψηλότερη ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων στον ιστορικό λιθότυπο υποδηλώνει πως παρουσιάζει υψηλότερη συνεκτικότητα από τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης, ακόμα και μετά από οποιαδήποτε φθορά μπορεί να έχει υποστεί. Παρόλα αυτά, ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης συνάδει με την σημερινή κατάσταση διατήρησης των ιστορικών λίθων.

Κωδικός λίθου	Μέση τιμή ταχύτητας διάδοσης υπερήχων(m/s)
PL_SH_1	4551.93±182.97
PL_SH_2	4476.05±195.09
PL_R_S	4145.65±257.65

Πίνακας 9. Μέση ταχύτητα διάδοσης υπερήχων κάθε λιθότυπου



Γράφημα 7. Μέση ταχύτητα διάδοσης υπερήχων για κάθε λίθο

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δείκτες ανισοτροπίας για κάθε λίθο. Από τα δεδομένα είναι εμφανές πως οι δείκτες ανισοτροπίας των δοκιμών του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης είναι αντίστοιχοι με τους δείκτες ανισοτροπίας των ιστορικών λίθων, αν και ελαφρώς υψηλότεροι από αυτούς. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, πως ο λίθος «Δαφνούλας» παρουσιάζει παρόμοιο βαθμό ανισοτροπίας με τους ιστορικούς λίθους. Από τα αποτελέσματα, φαίνεται πως η μικρή διαφορά μεταξύ των δεικτών dM(%) και

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

dm(%) υποδηλώνει πως και στους τρεις λίθους ένα από τα τρία επίπεδα διάδοσης υπερήχων παρουσιάζει εντονότερη ανισοτροπία.

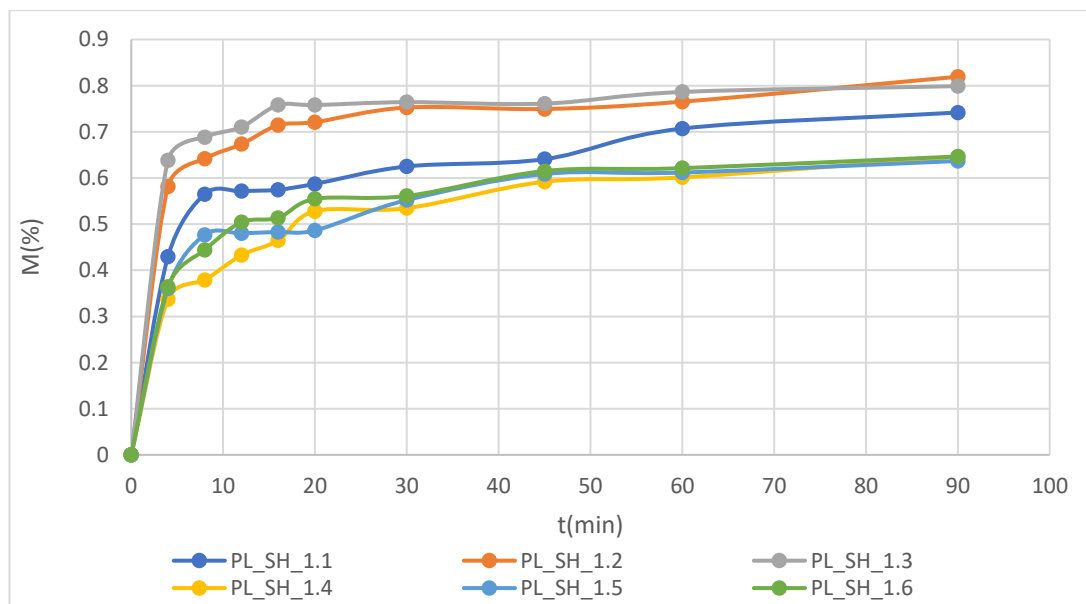
Κωδικός δείγματος	k	AS	ARS	AD	dM(%)	dm(%)
PL_SH_1.1	8.43	8.12	7.51	0.92	6.67	3.25
PL_SH_1.2	9.43	9.36	8.56	0.91	7.72	3.14
PL_SH_1.3	9.17	8.63	7.94	0.92	7.08	3.82
PL_SH_1.4	8.91	9.34	8.55	0.91	6.63	4.18
PL_SH_1.5	9.51	10.10	9.17	0.91	7.53	3.61
PL_SH_1.6	8.29	8.73	8.03	0.92	6.58	3.16
<b>M.O λίθου</b>	<b>8.96</b>	<b>9.05</b>	<b>8.29</b>	<b>0.92</b>	<b>7.04</b>	<b>3.53</b>
PL_SH_2.1	6.73	9.23	8.45	0.92	4.94	3.35
PL_SH_2.2	9.94	8.04	7.44	0.93	7.73	4.02
PL_SH_2.3	8.26	7.93	7.35	0.93	5.41	5.28
PL_SH_2.4	8.07	8.41	7.76	0.92	5.92	3.98
PL_SH_2.5	7.92	8.21	7.59	0.92	5.58	4.35
PL_SH_2.6	11.94	12.83	11.37	0.89	9.21	4.87
<b>M.O λίθου</b>	<b>8.81</b>	<b>9.11</b>	<b>8.33</b>	<b>0.92</b>	<b>6.47</b>	<b>4.31</b>
S_PL_R_1	9.29	9.88	8.99	0.91	7.52	3.24
S_PL_R_2	8.35	8.75	8.05	0.92	6.37	3.64
S_PL_R_3	4.49	4.59	4.39	0.96	3.34	2.20
S_PL_R_4	7.60	8.00	7.41	0.93	6.23	2.54
S_PL_R_5	13.67	14.84	12.92	0.87	10.47	5.63
S_PL_R_6	14.34	15.74	13.60	0.86	11.30	5.33
<b>M.O λίθου</b>	<b>9.62</b>	<b>10.30</b>	<b>9.23</b>	<b>0.91</b>	<b>7.54</b>	<b>3.76</b>

Πίνακας 10. Δείκτες ανισοτροπίας κάθε δοκιμίου

#### 4.6 Δοκιμές με Εμβάπτιση-Προσδιορισμός ποσοστού ροφημένου νερού και ολικού ανοιχτού πορώδους προσβάσιμου στο νερό

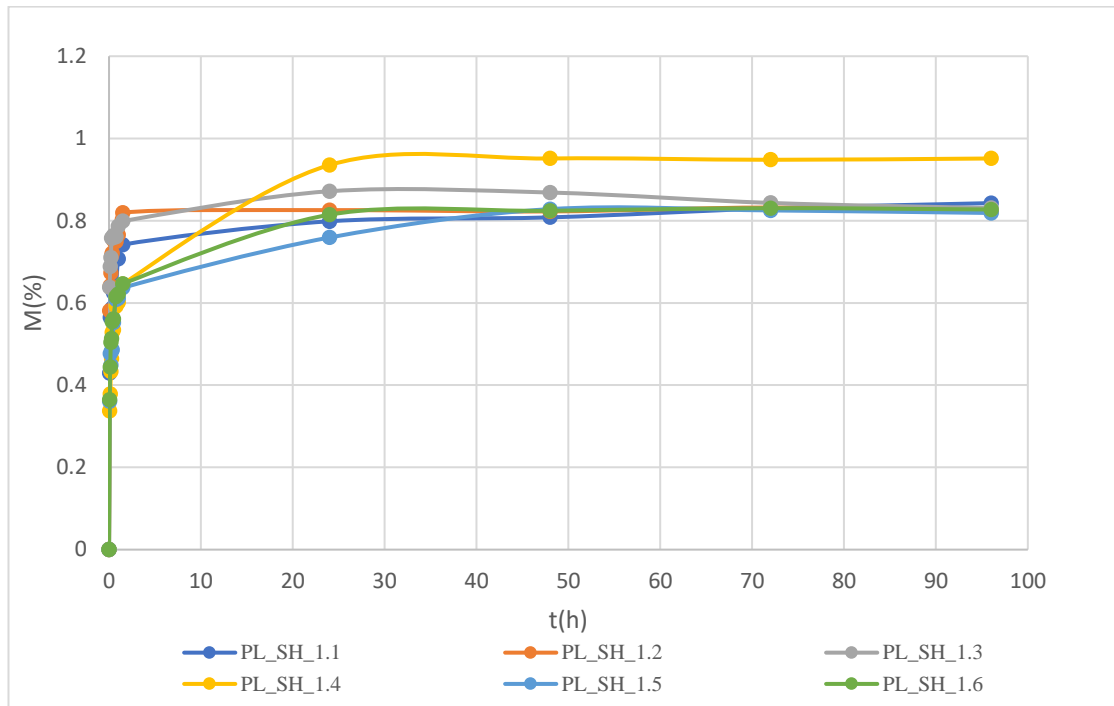
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα από την δοκιμή των λίθων με ολική εμβάπτιση. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν το ποσοστό του ροφημένου νερού σε ένα διάστημα 96 ωρών. Παράλληλα παρουσιάζεται και το ποσοστό ροφημένου νερού τα πρώτα 90 λεπτά διεξαγωγής του πειράματος, που εμφανίζεται και ο μέγιστος ρυθμός απορρόφησης νερού.

Όπως φαίνεται για τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_1 τα δοκίμια έχουν μια ικανοποιητική ομοιογένεια μεταξύ τους. Τα πρώτα 90 λεπτά του πειράματος παρουσιάζεται η ταχύτερη αύξηση του ποσοστού του ροφημένου νερού και η οποία δείχνει μικρές διακυμάνσεις μεταξύ των λίθων. Το δοκίμιο PL\_SH\_1.4, PL\_SH\_1.5 και PL\_SH\_1.6 παρουσιάζουν τους μικρότερους ρυθμούς εκρόφησης νερού και τα δοκίμια PL\_SH\_1.2 και PL\_SH\_1.3 τους μεγαλύτερους.



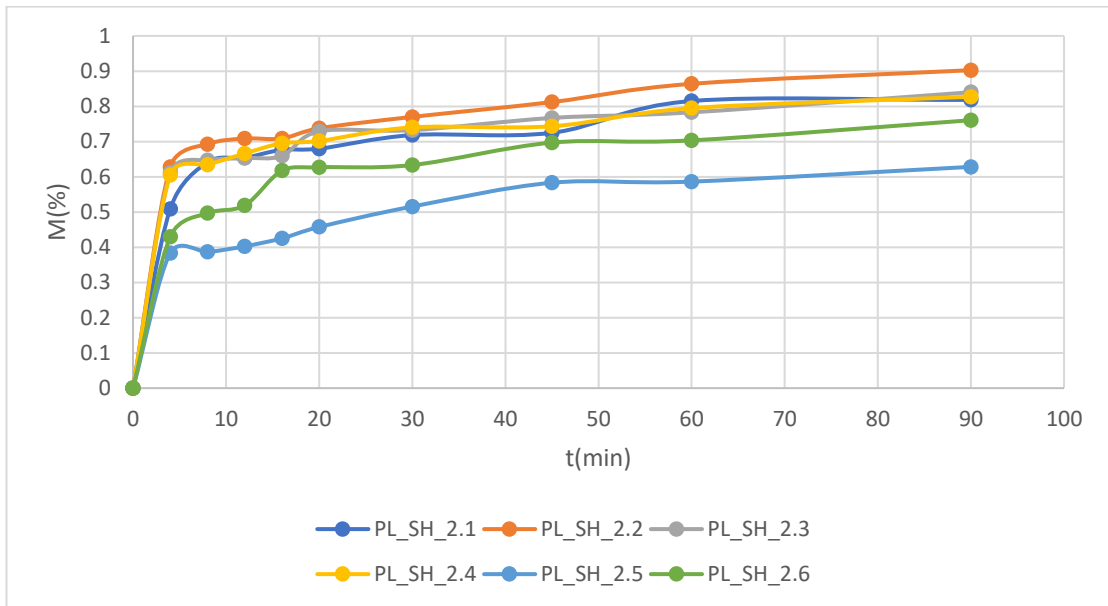
Γράφημα 8. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_SH\_1 τα πρώτα 90 λεπτά

Στην διάρκεια του πειράματος φαίνεται πως το ποσοστό του ροφημένου νερού αυξάνεται ελάχιστα και αξίζει να σημειωθεί πως το ποσοστό αυτό για όλα τα δοκίμια συγκλίνει περίπου στην τιμή 0.83%. Εξαιρεση αποτελεί το δοκίμιο PL\_SH\_1.4 το οποίο ενώ παρουσίαζε τον μικρότερο ρυθμό ρόφησης φαίνεται να έχει το μεγαλύτερο τελικό ποσοστό ροφημένου νερού με τιμή περίπου 0.95%, κάτι που παραπέμπει και σε μεγαλύτερο πορώδες. Παρ' όλα αυτά, όλα τα δοκίμια επιδεικνύουν πολύ χαμηλή προσβασιμότητα στο νερό, γεγονός που επιδεικνύει την ποιότητα τους.



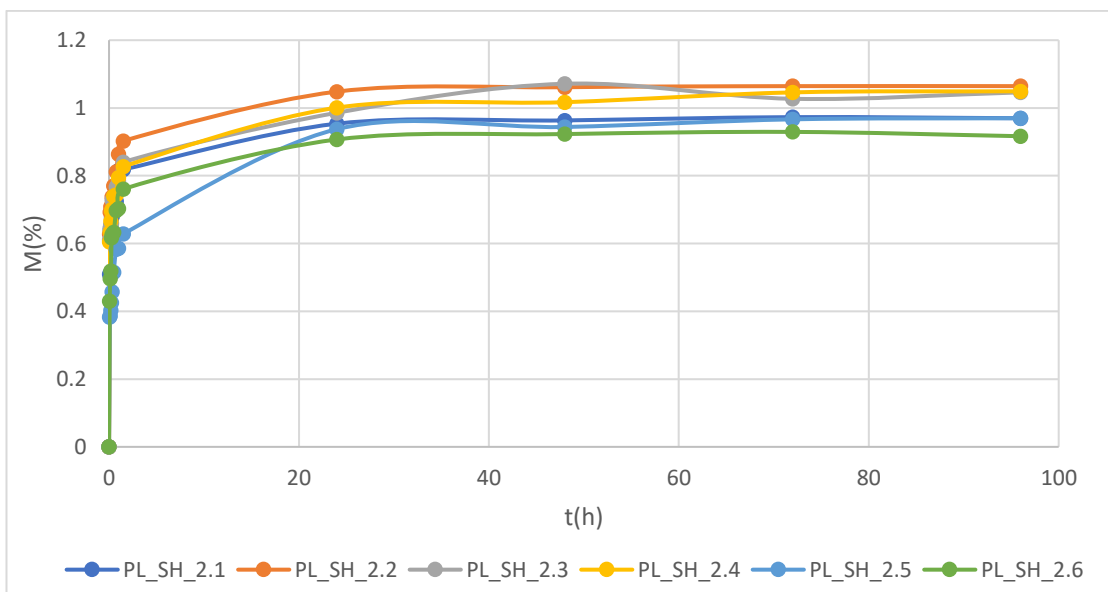
Γράφημα 9. Ποσοστό ροφημένου νερού ( $M_i\%$ ) συναρτήσει του χρόνου  $t$  δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_SH\_1 μετά από 96 ώρες

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και ο ιστορικός λίθος PL\_SH\_2. Μέσα στα πρώτα 90 λεπτά διεξαγωγής του πειράματος τα δοκίμια παρουσιάζουν τον μέγιστο ρυθμό ροφημένου νερού. Συγκεκριμένα το PL\_SH\_2.2 φτάνει περίπου το 0.90% ροφημένου νερού ενώ το δοκίμιο PL\_SH\_2.5 παρουσιάζει τον ελάχιστο ρυθμό και φτάνει το 0.63% ροφημένου νερού.



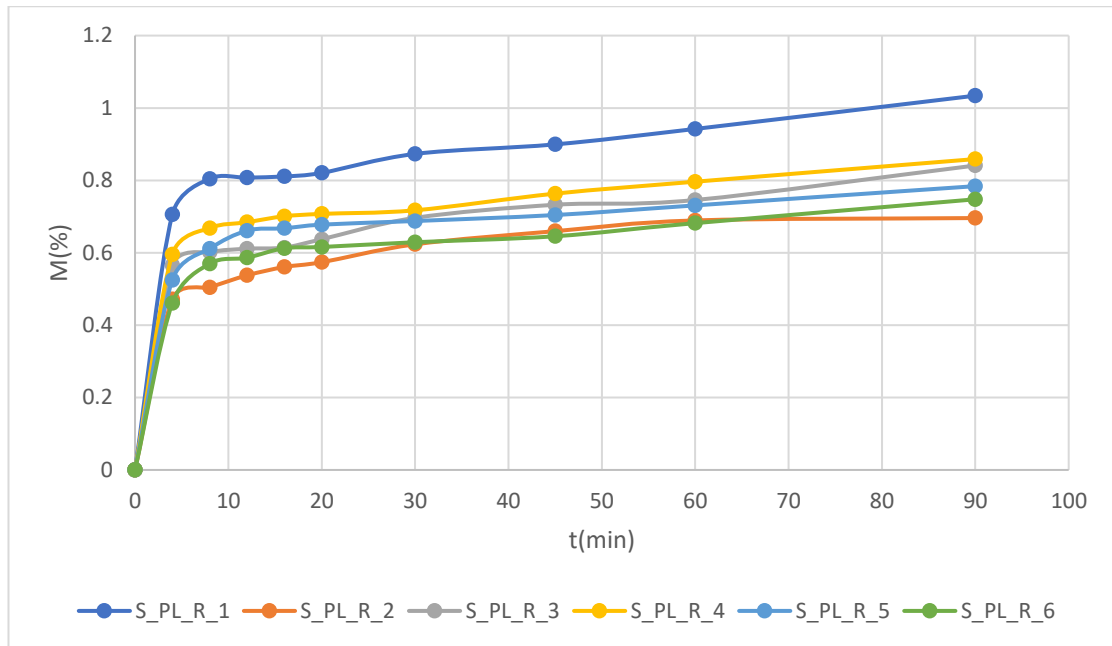
Γράφημα 10. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_SH\_2 τα πρώτα 90 λεπτά

Στη συνέχεια κατά την διεξαγωγή και την μέτρηση του ροφημένου νερού, το ποσοστό αυξήθηκε ελάχιστα. Τα δοκίμια PL\_SH\_2.2, PL\_SH\_2.3 και PL\_SH\_2.4 συγκλίνουν στην τιμή περίπου του 1.05% ενώ μικρότερο ποσοστό ροφημένου νερού παρουσιάζει το δοκίμιο PL\_SH\_2.6. Γενικώς, τα δοκίμια του λίθου PL\_SH\_2 παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά ροφημένου νερού από τον λίθο PL\_SH\_1. Παρ'όλα αυτά η διαφορά είναι ελάχιστη και εντός των αναμενόμενων ορίων διακυμάνσεις.



Γράφημα 11. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_SH\_2 μετά από 96 ώρες

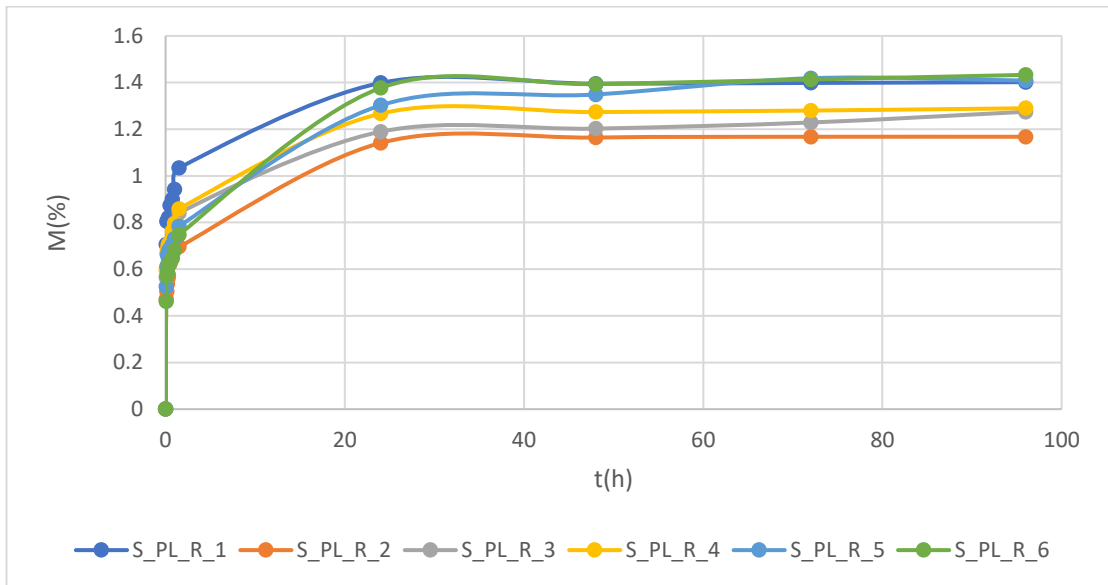
Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης φαίνεται πως επίσης έχει πολλά κοινά σημεία με τους ιστορικούς. Τα δοκίμια παρουσιάζουν τον μέγιστο ρυθμό ρόφησης νερού στα πρώτα 90 λεπτά της εμφάνισης. Μέγιστο ρυθμό παρουσιάζει το δοκίμιο S\_PL\_R\_5 το οποίο φαίνεται πως φτάνει σε ποσοστό περίπου 1.00% ροφημένου νερού έπειτα από 90 λεπτά ενώ ελάχιστο ρυθμό παρουσιάζει το S\_PL\_R\_2 με ποσοστό ροφημένου νερού περίπου 0.70%.



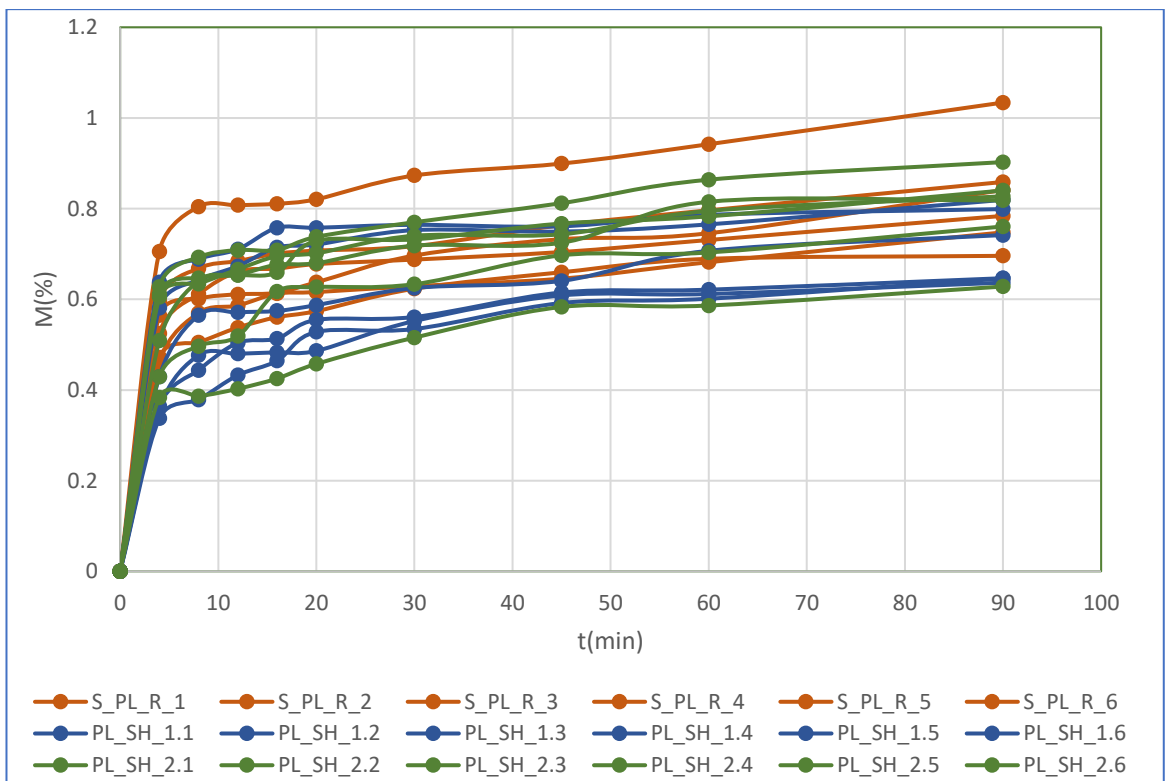
Γράφημα 12. Ποσοστό ροφημένου νερού ( $M_i$ %) συναρτήσει του χρόνου  $t$  δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_S\_R τα πρώτα 90 λεπτά

Σε σύγκριση με τους ιστορικούς λίθους, εδώ εμφανίζεται η μεγαλύτερη μεταβολή του ποσοστού ροφημένου νερού στη διάρκεια των 96 ωρών του πειράματος καθώς το ποσοστό ροφημένου νερού για κάθε δοκίμιο αυξάνεται περίπου κατά 0.4%. Μέγιστη τιμή φαίνεται να έχουν τα δοκίμια S\_PL\_R\_1, S\_PL\_R\_5 και S\_PL\_R\_6 που συγκλίνουν στην τιμή 1.4%. Φαίνεται πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει την μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στη ρόφηση νερού. Παρ' όλα αυτά, η διαφορά σε σχέση με τους ιστορικούς λίθους είναι ελάχιστη και αποδεκτή.

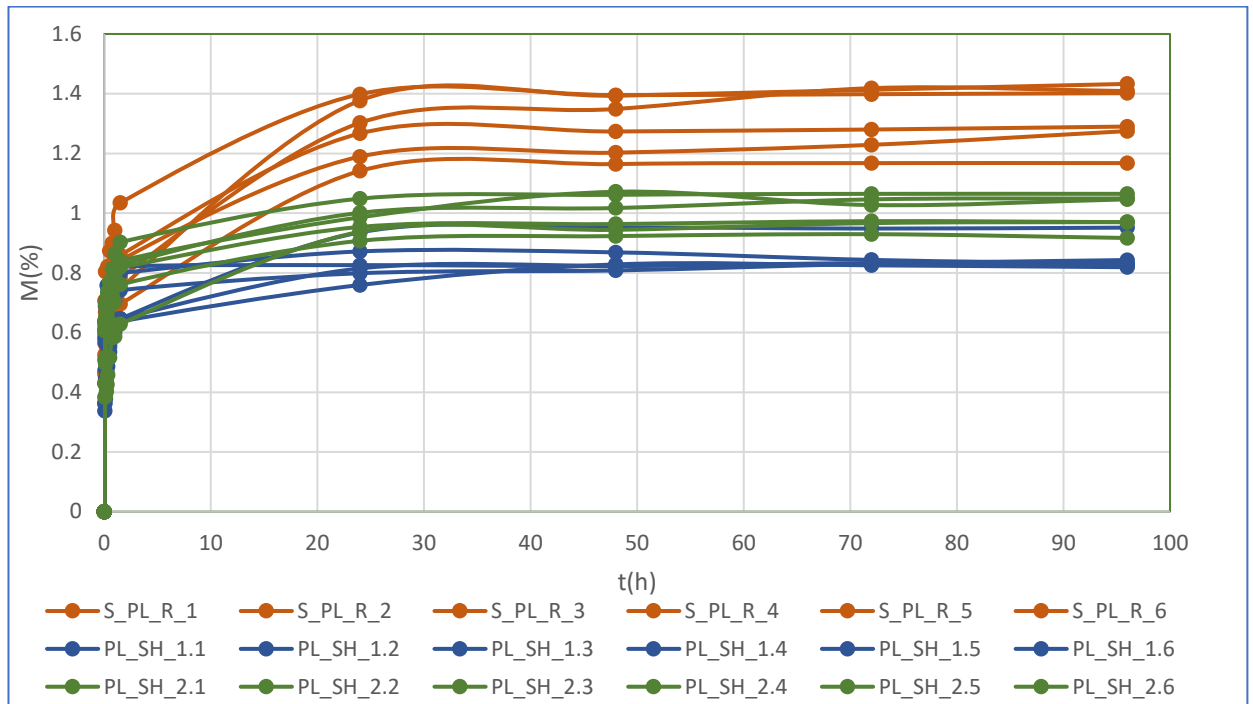
Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



Γράφημα 13. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων ιστορικού λίθου PL\_S\_R μετά από 96 ώρες



Γράφημα 14. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων όλων των λίθων τα πρώτα 90 λεπτά



Γράφημα 15. Ποσοστό ροφημένου νερού ( $M_i$ %) συναρτήσει του χρόνου  $t$  δοκιμίων όλων των λίθων PL\_S\_R μετά από 96 ώρες

Από το πείραμα της εμφάνισης φαίνεται πως όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν αρκετά όμοια χαρακτηριστικά και ικανοποιητική αντίσταση στη διάβρωση κατά την εμφάνιση τους για ένα διάστημα περίπου 5 ημερών. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια μετά το τέλος της διαδικασίας φαίνεται πως είχαν όλα απώλεια μάζας μικρότερη από 0.15%. Υψηλότερη απώλεια μάζας παρουσιάζουν τα δοκίμια του λίθου PL\_SH\_2 και μικρότερη εκείνα του λίθου PL\_SH\_1.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές εμφάνισης ως προς το ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, το ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο από το νερό και την φαινόμενη πυκνότητα:

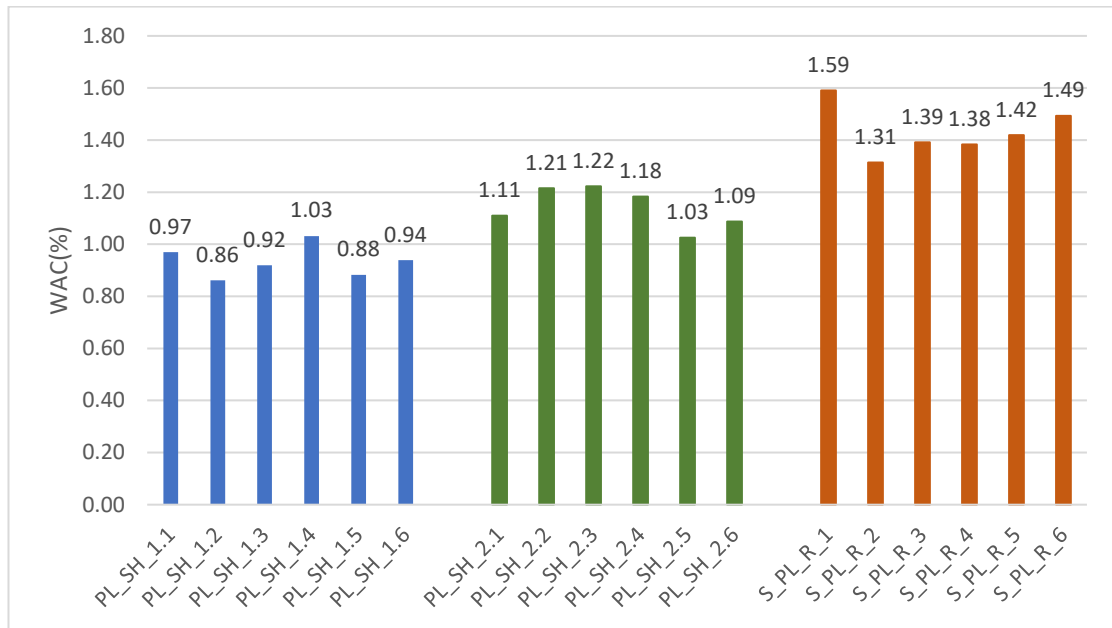


Κωδικός Δείγματος	WAC(%)	Ολικό Ανοιχτό πορώδες (%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
PL_SH_1.1	0.97	2.27	2.59
PL_SH_1.2	0.86	2.14	2.59
PL_SH_1.3	0.92	2.20	2.60
PL_SH_1.4	1.03	2.44	2.57
PL_SH_1.5	0.88	2.14	2.60
PL_SH_1.6	0.94	2.22	2.61
PL_SH_2.1	1.11	2.57	2.59
PL_SH_2.2	1.21	2.80	2.60
PL_SH_2.3	1.22	2.75	2.59
PL_SH_2.4	1.18	2.66	2.58
PL_SH_2.5	1.03	2.51	2.61
PL_SH_2.6	1.09	2.37	2.57
S_PL_R_1	1.59	3.69	2.49
S_PL_R_2	1.31	3.11	2.53
S_PL_R_3	1.39	3.31	2.58
S_PL_R_4	1.38	3.32	2.55
S_PL_R_5	1.42	3.57	2.55
S_PL_R_6	1.49	3.70	2.57

Πίνακας 11. Ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό και φαινόμενη πυκνότητα κάθε δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε από την δοκιμή εμβάπτισης

Όσον αφορά, το συνολικό ποσοστό ροφημένου νερού φαίνεται πως μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζουν τα δοκίμια του λίθου αποκατάστασης S\_PL\_R. Συγκεκριμένα μεγαλύτερο ποσοστού ροφημένου νερού έχει το δοκίμιο S\_PL\_R\_1 που φτάνει το 1.59%. Γενικώς, τα δοκίμια των ιστορικών λίθων παρουσιάζουν ποσοστά με εύρος από 0.80% έως 1.20% ενώ τα δοκίμια του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης παρουσιάζουν τιμές από 1.30% έως 1.60%.

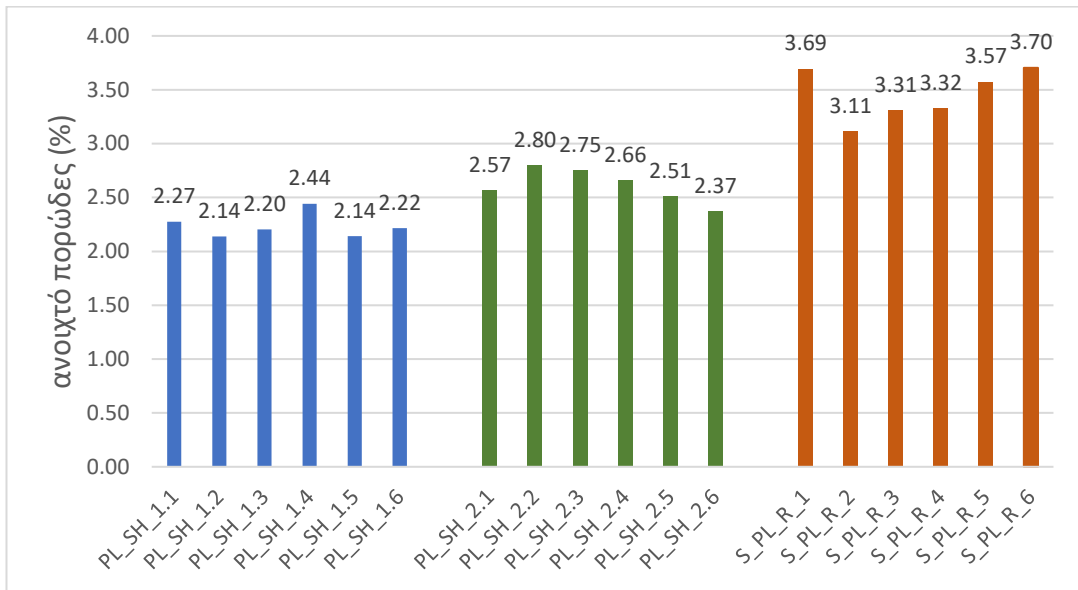
Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



Γράφημα 16. Γράφημα στήλης με το συνολικό ποσοστό ροφημένου νερού κάθε δοκιμίου

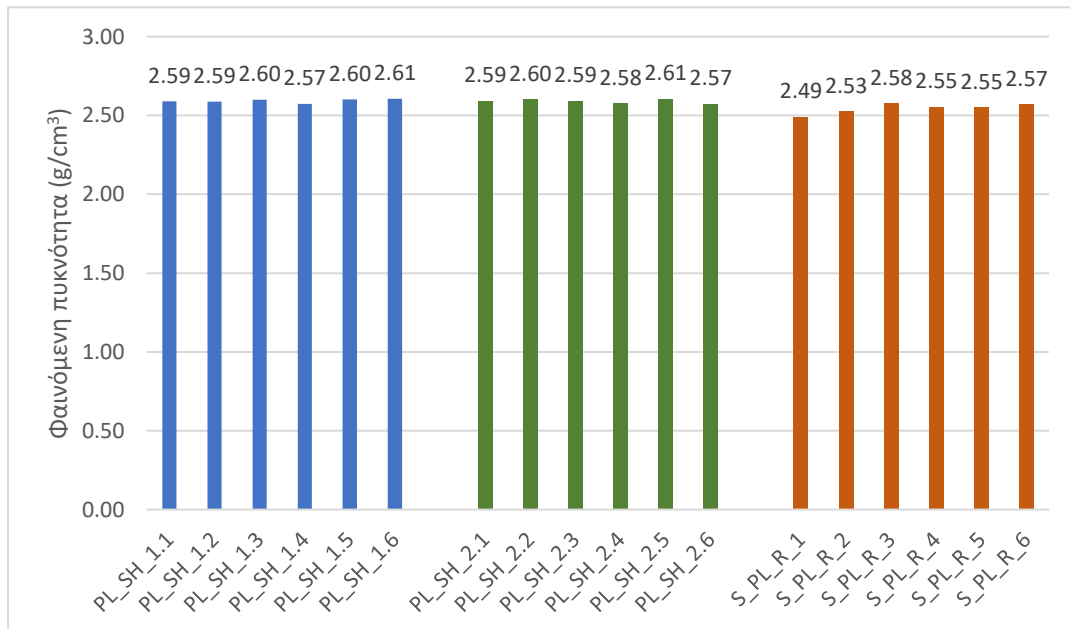
Όσον αφορά το ανοιχτό πορώδες των δοκιμίων φαίνεται πως τα αποτελέσματα είναι συμβατά με τα παραπάνω. Μεγαλύτερο πορώδες φαίνεται να παρουσιάζει ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης, γεγονός που εξηγεί και το ότι παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά ροφημένου νερού. Το ανοιχτό πορώδες των δοκιμίων του λίθου «Δαφνούλας» να κυμαίνεται σε τιμές από 3.10% έως 3.70% και αυτό των δοκιμίων των ιστορικών λίθων να κυμαίνεται από 2.10% έως 2.80%. Οι τιμές αυτές είναι εντός των αποδεκτών ορίων απόκλισης και γενικότερα δείχνουν πως οι λίθοι αυτή έχουν ικανοποιητική υγρομετρική συμπεριφορά και καλή αντίσταση στην διάβρωση λόγω ρόφησης νερού.

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



Γράφημα 17. Γράφημα στήλης για το ανοιχτό πορώδες κάθε δοκιμίου

Γνωρίζοντας το ανοιχτό πορώδες είναι δυνατό να βρεθεί η φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων. Τα δοκίμια, και κατ' επέκταση οι λίθοι, παρουσιάζουν ικανοποιητική ομοιότητα ως προς την πυκνότητα τους και ελάχιστη διακύμανση. Η φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων των ιστορικών λίθων κυμαίνεται από 2.57 g/cm<sup>3</sup> έως 2.61 g/cm<sup>3</sup>, ενώ αυτή των δοκιμίων του λίθου «Δαφνούλας» από 2.49 g/cm<sup>3</sup> έως 2.57 g/cm<sup>3</sup>.



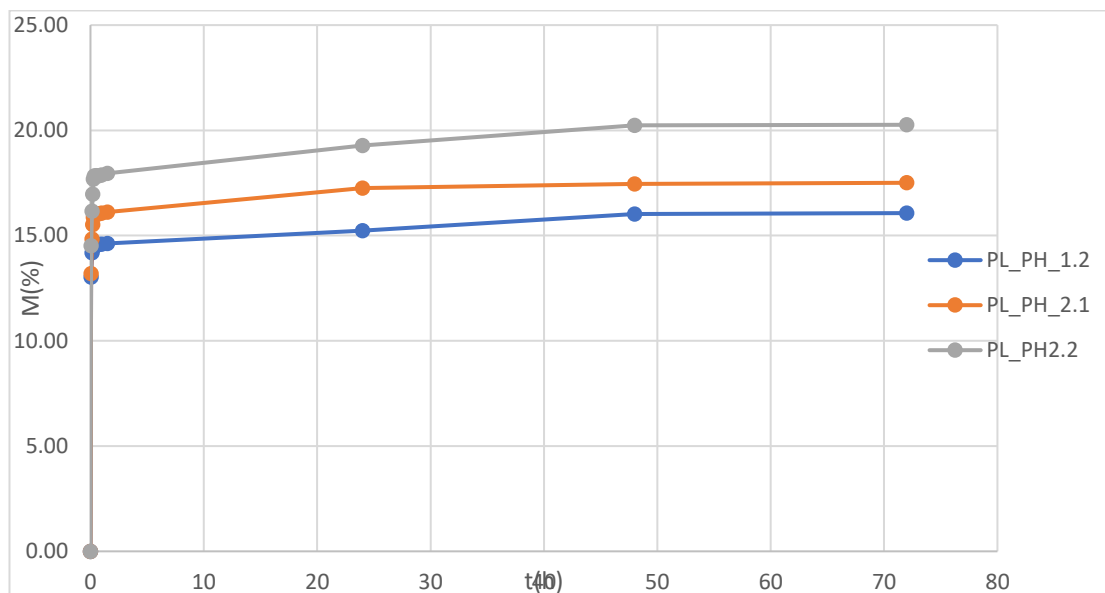
Γράφημα 18. Γράφημα στήλης για την φαινόμενη πυκνότητα κάθε δοκιμίου

Συνολικά, τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης συνάδει με την σημερινή κατάσταση διατήρησης του ιστορικού λίθου. Και οι τρεις λίθοι παρουσιάζουν παραπλήσια τάση ρόφησης νερού και ίδιας τάξης μεγέθους ολικό ανοιχτό πορώδες, προσβάσιμο στο νερό. Παράλληλα, η φαινόμενη πυκνότητα όλων των λίθων είναι πολύ κοντά.

<b>Κωδικός Δείγματος</b>	<b>Μέση τιμή WAC λιθότυπου(%)</b>	<b>Μέση τιμή ανοιχτού πορώδες λιθότυπου (%)</b>	<b>Μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητας λιθότυπου(g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>PL_SH_1</b>	0.93±0.06	2.24±0.10	2.59±0.01
<b>PL_SH_2</b>	1.13±0.09	2.61±0.15	2.59±0.03
<b>PL_R_S</b>	1.43±0.09	3.45±0.22	2.55±0.03

Πίνακας 12. Μέσο ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, μέσο ολικό ανοιχτό πορώδες, προσβάσιμο στο νερό και μέση φαινόμενη πυκνότητα των τριών λίθων σύμφωνα με δοκιμές ολικής εμβάπτισης

Δοκιμές με ολική εμβάπτιση πραγματοποιήθηκαν και στα δοκίμια του πωρόλιθου. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει το ρυθμό και το ποσοστό ρόφησης νερού στη διάρκεια των 72 ωρών.



Γράφημα 19. Ποσοστό ροφημένου νερού (Mi%) συναρτήσει του χρόνου t δοκιμίων όλων των λίθων PL\_S\_R μετά από 96 ώρες

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές πως ο πωρόλιθος έχει την τάση να προσροφήσει μεγαλύτερα ποσοστά νερού, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου πορώδους τους. Και τα τρία δοκίμια παρουσιάζουν τον μέγιστο ρυθμό ρόφησης τα πρώτα 90 λεπτά διεξαγωγής του πειράματος ενώ μετά το ποσοστό ροφημένου νερού μένει σχετικά σταθερό. Αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια είχαν ελάχιστη απώλεια μάζας, εφόσον ζυγίστηκε μετά τη λήξη της πειραματικής διεργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται, όπως υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα, το ποσοστό ροφημένου νερού, το ολικό ανοιχτό πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων πωρόλιθου.

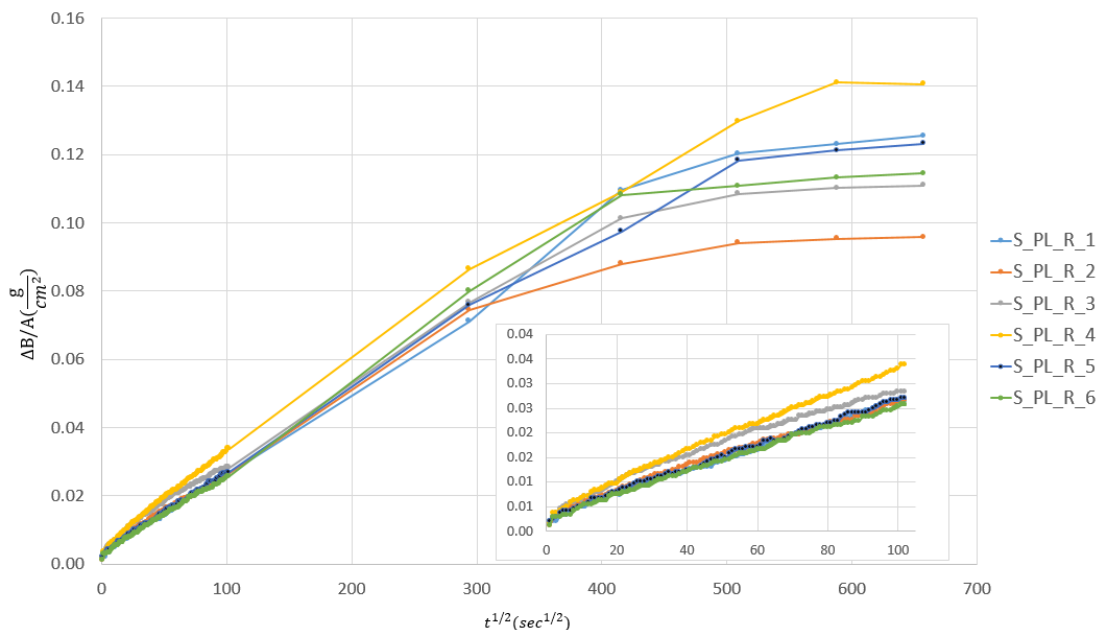
Κωδικός Δείγματος	WAC(%)	Ολικό Ανοιχτό πορώδες (%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
PL_PH_1.2	16.51	21.50	1.78
PL_PH_2.1	17.79	23.30	1.75
PL_PH_2.2	20.63	24.59	1.65

Πίνακας 13. Ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, ολικό ανοιχτό πορώδες προσβάσιμο στο νερό και φαινόμενη πυκνότητα κάθε δοκιμίου πωρόλιθου, όπως υπολογίστηκε από την δοκιμή εμβάπτισης

Φαίνεται πως τα δοκίμια έχουν σχετικά μεγάλο πορώδες ενώ φαίνεται να υπάρχει κάποια διακύμανση μεταξύ των δοκιμίων ακόμα και του ίδιου πωρόλιθου. Αυτό οφείλεται στην ακανόνιστη μικροδομή του καθώς και στους μεγάλους πόρους που παρουσιάζει

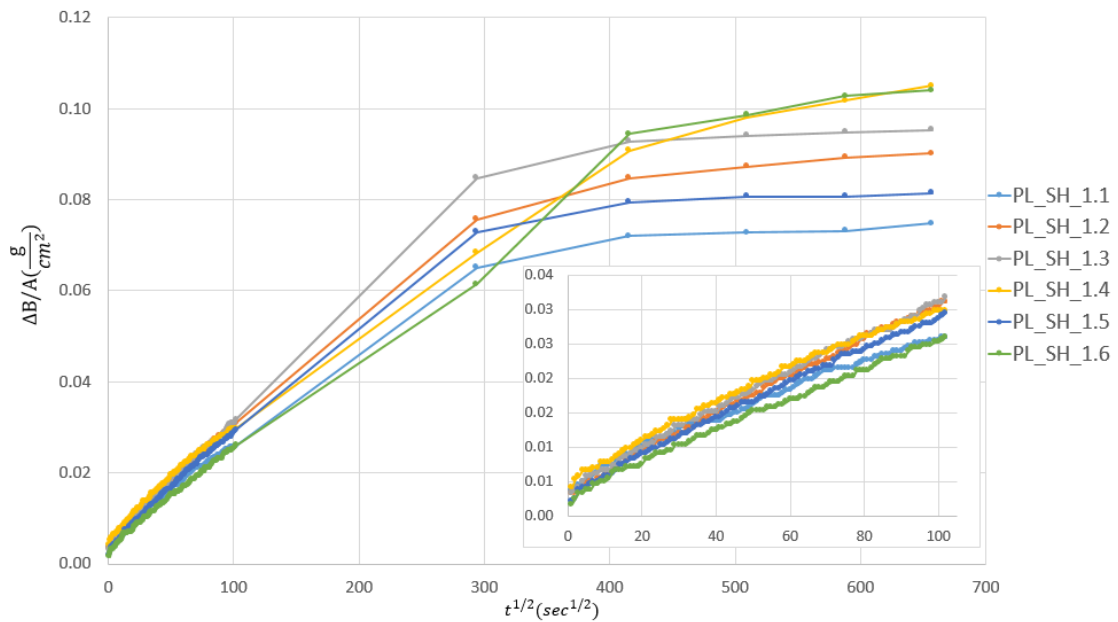
## 4.7 Δοκιμές Τριχοειδούς αναρρίχησης

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η τριχοειδής αναρρίχηση του νερού στα δοκίμια κάθε λίθου. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν 6 δοκίμια από κάθε λίθο και παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των δύο ιστορικών λίθων και του λίθου αποκατάστασης με τετημημένη τη ρίζα του χρόνου παραμονής των δοκιμίων σε επαφή με το νερό και τεταγμένη το κλάσμα της διαφορά του βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων ως προς το εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου. Τα δοκίμια έμειναν στο νερό για περίπου 5 ημέρες ενώ φαίνεται πως σε κάθε διάγραμμα υπάρχει η μεγέθυνση της περιοχής του διαγράμματος όπου η αύξηση του απορροφούμενου νερού είναι ευθύγραμμη και αντιστοιχεί στις πρώτες ώρες παραμονής των δοκιμίων.



Γράφημα 20. Ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης για τον ιστορικό λίθο PL\_S\_R. Κάτω δεξιά φαίνεται εστιασμένα η περιοχή όπου παρουσιάζεται ο μέγιστος ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης.

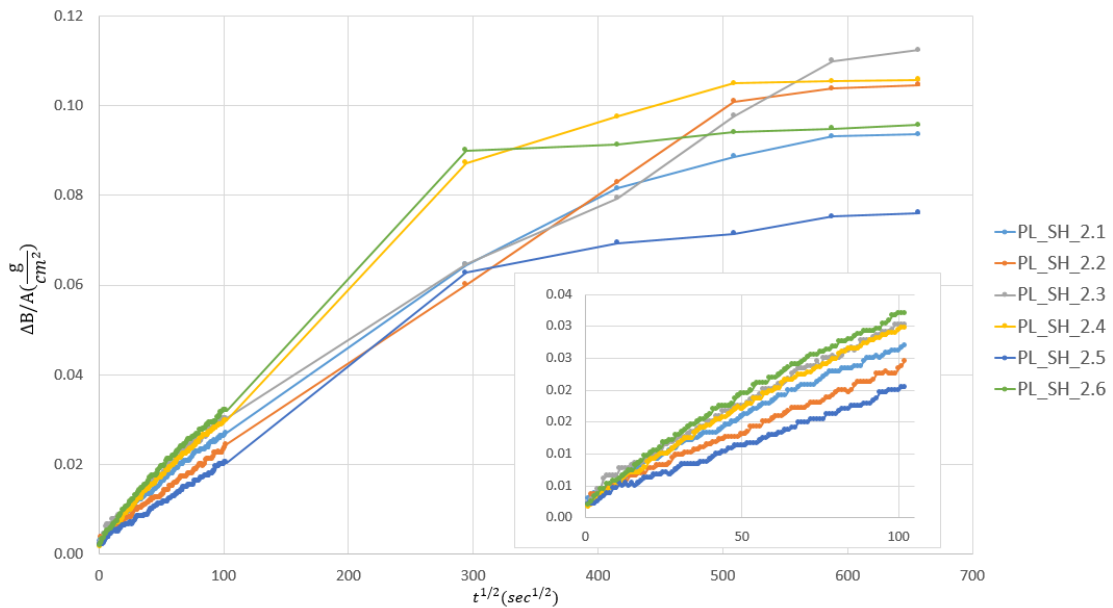
Μόνο και από τα διαγράμματα είναι εμφανές πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης απορρόφησε ελάχιστη ποσότητα νερού στο βάθος 5 ημερών. Συγκεκριμένα, το κλάσμα  $\Delta B/A$  έφτασε στο 0.14 για το δοκίμιο S\_PL\_R\_4 ενώ το δοκίμιο S\_PL\_R\_2 δεν έφτασε ούτε το 0.10. Είναι φανερό πως οι διαφοροποιήσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο είναι ελάχιστες και έχουν να κάνουν κυρίως με το τελικό ποσοστό απορρόφησης νερού ενώ, από το διάγραμμα φαίνεται πως όλα τα δείγματα έχουν ιδιαίτερα κοινό ρυθμό απορρόφησης νερού.



Γράφημα 21. Ρυθμός τριχλωιδούς αναρρίχησης για τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_1. Κάτω δεξιά φαίνεται εστιασμένα η περιοχή όπου παρουσιάζεται ο μέγιστος ρυθμός τριχλωιδούς αναρρίχησης.

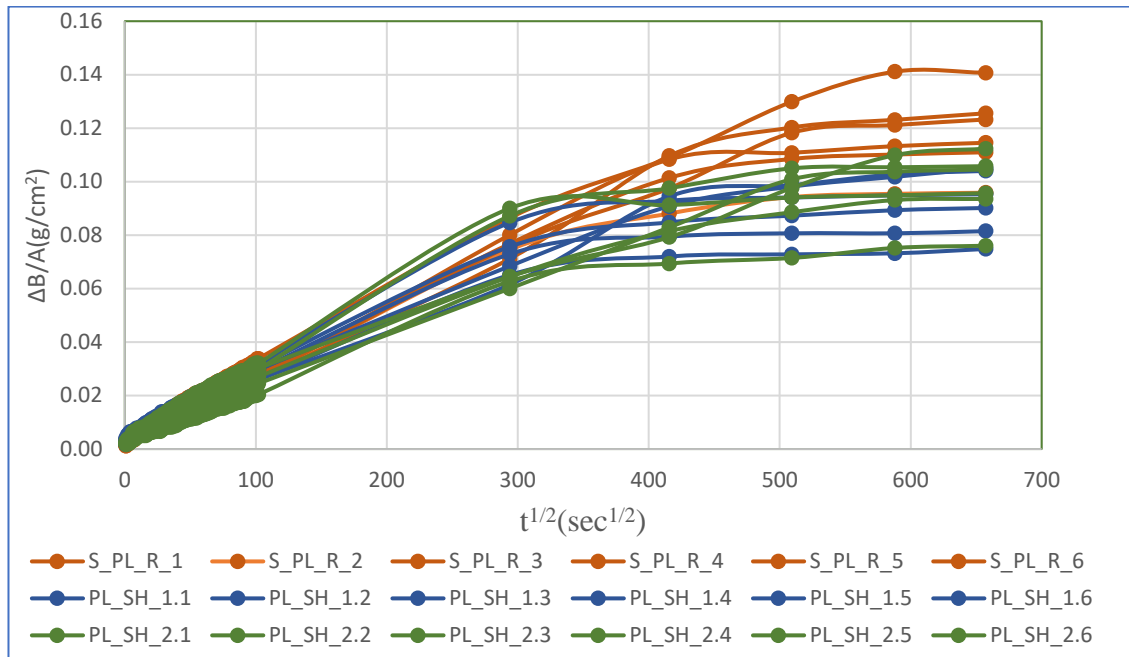
Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασε και ο λίθος PL\_SH\_1 καθώς τα περισσότερα από τα δείγματα παρουσίασαν πανομοιότυπους ρυθμούς απορρόφησης νερού τις πρώτες ώρες και ελάχιστες διαφοροποιήσεις στο τελικό ποσοστό ροφημένου νερού. Συγκεκριμένα έπειτα από 5 ημέρες παραμονής των δοκιμίων μέγιστη μεταβολή του κλάσματος  $\Delta B/A$  παρουσίασαν τα δοκίμια PL\_SH\_1.6 και PL\_SH\_1.4 τα οποία έφτασαν και τα δύο στην τιμή 0.10 ενώ ελάχιστη μεταβολή παρουσίασε το δοκίμιο PL\_SH\_1.1 το οποίο φαίνεται πως έφτασε την τιμή 0.07.





Γράφημα 22. Ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης για τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_2. Κάτω δεξιά φαίνεται εστιασμένα η περιοχή όπου παρουσιάζεται ο μέγιστος ρυθμός τριχοειδούς αναρρίχησης.

Τέλος, ο δεύτερος ιστορικός λίθος φαίνεται πως επαληθεύει τις ενδείξεις του προηγούμενου λίθου και φαίνεται πως παρουσιάζει και αυτός κοινή συμπεριφορά. Τα δοκίμια παρουσίασαν μια εντονότερη διαφοροποίηση στην απορρόφηση νερού τις πρώτες ώρες, αν και πάλι οι διαφορές είναι μέσα στο εύρος της αναμενόμενης διακύμανσης. Παράλληλά, μεγαλύτερη απορρόφησης παρουσιάζει το δοκίμιο PL\_SH\_2.3 που φτάνει την τιμή του 0.11 ενώ το δοκίμιο PL\_SH\_2.5 έχει την ελάχιστη μεταβολή και φτάνει την τιμή του 0.07 περίπου. Αξίζει να σημειωθεί πώς αρκετά από τα δοκίμια του λίθου PL\_SH\_2 χρωμάτισαν το νερό της κλίνης κίτρινο ή ερυθρό, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στην παρουσία οξειδίων του σιδήρου και άλλων μετάλλων.



Γράφημα 23. Ρυθμός τριχουειδούς αναρρίχησης όλων των δοκιμίων κάθε λίθου

Φαίνεται πως όλα τα δείγματα παρουσίασαν ικανοποιητική συμπεριφορά μετά από την παραμονή τους στο υγρό περιβάλλον του πειράματος για 5 ημέρες. Συγκεκριμένα η απώλεια μάζα κυμαίνεται από 0.18 % μέχρι 0.22%. Και οι ιστορικοί λίθοι και ο λίθος «Δαφνούλας» παρουσιάζουν την ίδια ανθεκτική συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση από υγρασία.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές τριχουειδούς αναρρίχησης για όλα τα δοκίμια κάθε λίθου, ως προς το ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, το ολικό ανοιχτό πορώδες και την φαινόμενη πυκνότητα:

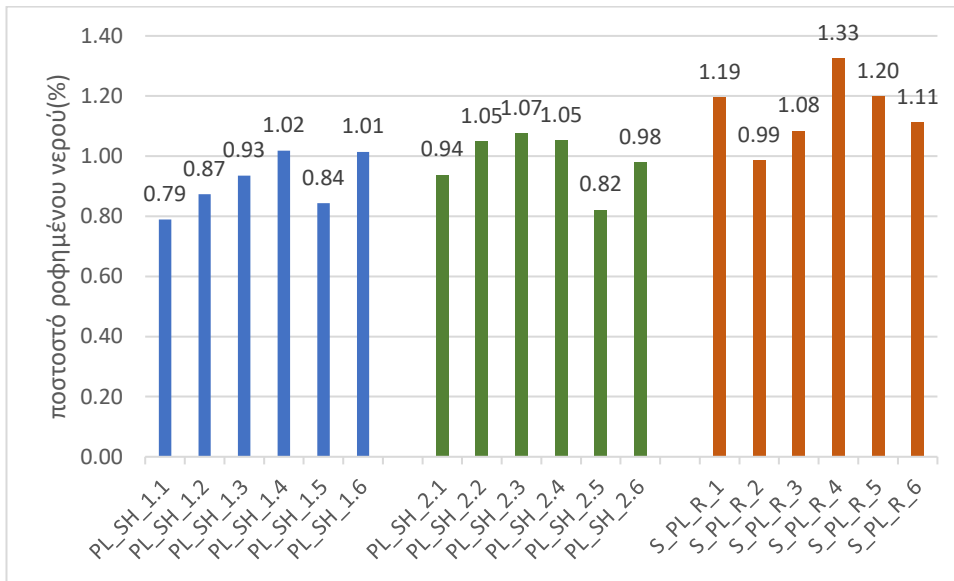
Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

Κωδικός Δείγματος	Ποσοστό ροφημένου νερού(%)	Ολικό ανοιχτό πορώδες(%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης (g/cm <sup>2</sup> *sec <sup>1/2</sup> )
PL_SH_1.1	0.79	1.51	2.59	2.12×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_1.2	0.87	1.79	2.59	2.74×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_1.3	0.93	1.92	2.60	2.70×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_1.4	1.02	2.11	2.58	2.49×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_1.5	0.84	1.63	2.60	2.59×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_1.6	1.01	2.08	2.61	2.26×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.1	0.94	1.88	2.60	2.35×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.2	1.05	+	2.61	2.02×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.3	1.07	2.26	2.60	2.65×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.4	1.05	2.13	2.58	2.75×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.5	0.82	1.54	2.61	1.76×10 <sup>-4</sup>
PL_SH_2.6	0.98	1.94	2.58	2.89×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_1	1.19	2.51	2.58	2.38×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_2	0.99	1.95	2.50	2.27×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_3	1.08	2.25	2.53	2.40×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_4	1.33	2.84	2.58	2.93×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_5	1.20	2.52	2.56	2.38×10 <sup>-4</sup>
S_PL_R_6	1.11	2.34	2.55	2.29×10 <sup>-4</sup>

Πίνακας 14. Υπολογισμοί για το ολικό ποσοστό ροφημένου νερού, το ολικό ανοιχτό πορώδες, προσβάσιμο στο νερό, την φαινόμενη πυκνότητα κάθε δοκιμίου και τον συντελεστή υδατοαπορρόφησης των τριών λίθων με δοκιμές τριχοειδούς αναρρίχησης

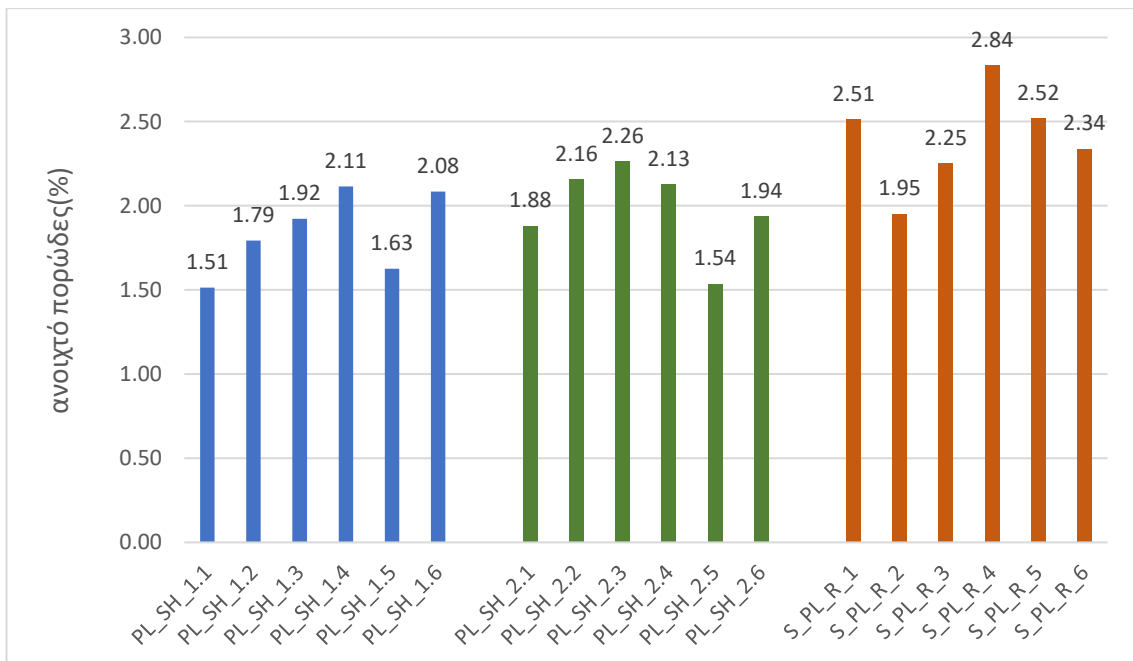
Όσον αφορά το ποσοστό του ροφημένου νερού φαίνεται το υψηλότερο ποσοστό ροφημένου νερού παρουσιάζουν τα δοκίμια του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, η διακύμανση αυτή είναι μέσα σε ένα αναμενόμενο εύρος (<1%) από τα δοκίμια των ιστορικών λίθων. Φαίνεται πως και οι τρεις λίθοι παρουσιάζουν ελάχιστη ικανότητα στην προσρόφηση νερού, κάτι που επιβεβαιώνει την καλή ποιότητα του ιστορικού λίθου και την καταλληλότητα του λίθου αποκατάστασης.

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



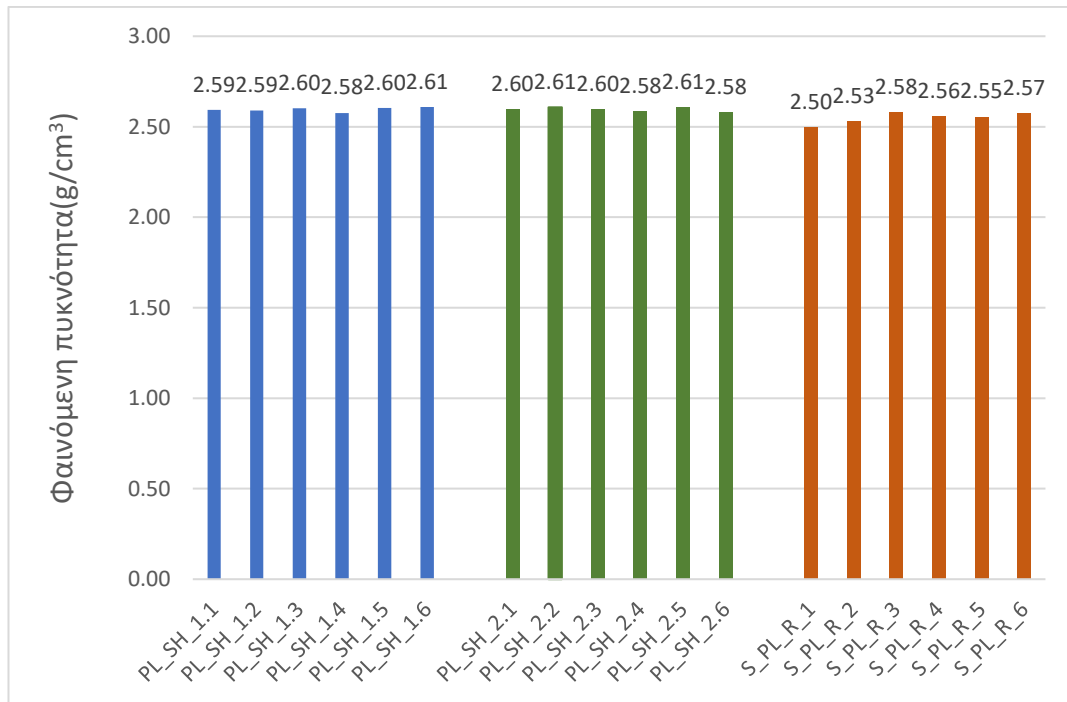
Γράφημα 24. Γράφημα στήλης για το ολικό ποσοστό ροφημένου νερού κάθε δοκιμίου

Τα αποτελέσματα ως προς το πορώδες που είναι προσβάσιμο για το νερό με τριχοειδή αναρρίχηση οδηγούν στο συμπέρασμα τα δοκίμια των τριών λίθων παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά στην μικροδομή τους. Το ανοιχτό πορώδες και των τριών λίθων κυμαίνεται μεταξύ του 1.50% έως το 2.80%.



Γράφημα 25. Γράφημα στήλης για το ανοιχτό ολικό πορώδες κάθε δοκιμίου

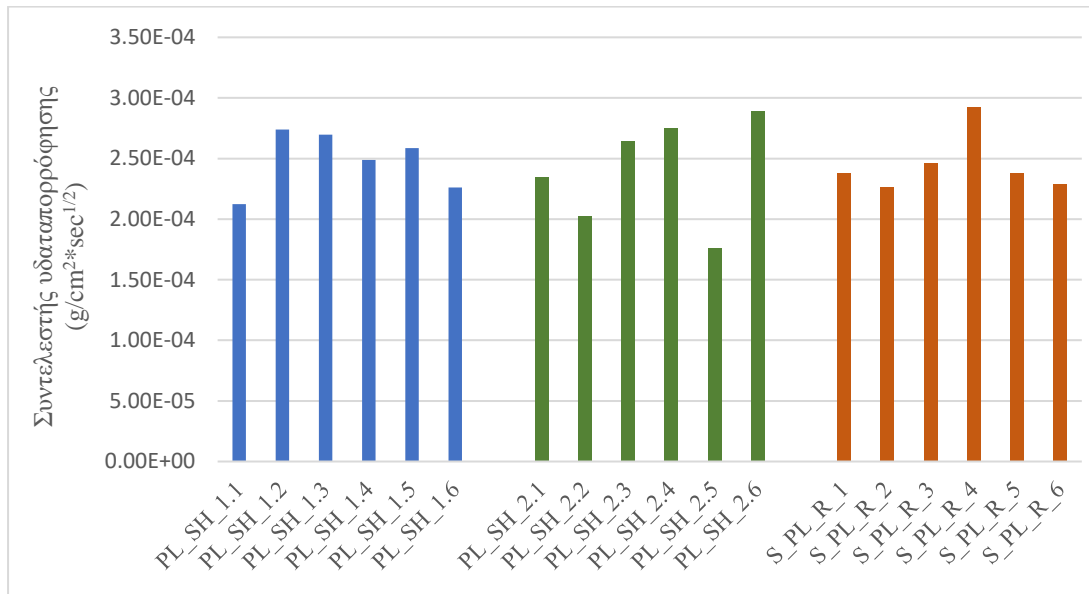
Τα αποτελέσματα για την φαινόμενη πυκνότητα φαίνεται να είναι πολύ θετικά καθώς όλα τα δοκίμια και των τριών λίθων παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια των ιστορικών λίθων παρουσιάζουν φαινόμενη πυκνότητα από 2.58 g/cm<sup>3</sup> έως 2.61 g/cm<sup>3</sup> ενώ τα δοκίμια του λίθου «Δαφνούλας» παρουσιάζουν τιμές από 2.50 g/cm<sup>3</sup> έως 2.57 g/cm<sup>3</sup>.



Γράφημα 26. Γράφημα στήλης φαινόμενης πυκνότητας κάθε δοκιμίου

Σε θετικά συμπεράσματα οδηγεί και η μελέτη του συντελεστή υδατοαπορρόφησης και των τριών λίθων ο οποίος όχι μόνο είναι χαμηλός και σε όλους τους λιθότυπους αλλά φαίνεται πως η διαφορά στην τιμές των δοκιμίων και κατ' επέκταση, των λίθων είναι της τάξεως των 10<sup>-5</sup>. Συμπερασματικά, φαίνεται πως ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης όλων των δοκιμίων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και παραπλήσιων τιμών. Εξάιρεση αποτελεί ο συντελεστής του δοκιμίου PL\_SH\_1.5 ο οποίος εμφανίζει ρηγμάτωση κοντά στην βάση του παράλληλα με το επίπεδο της επιφάνειας που εκτίθεται στο νερό.

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο



Γράφημα 27. Γράφημα στήλης συντελεστή υδατοαπορρόφησης κάθε δοκιμίου

Συνολικά, ο λίθος «Δαφνούλας» παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με τους ιστορικούς λίθους και ικανοποιητική συμπεριφορά. Όλοι οι λίθοι επιδεικνύουν ιδιαίτερη αντίσταση στα φαινόμενα τριχοειδούς αναρρίχησης και όμοια υγρομετρική συμπεριφορά με αυτά. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των λιθότυπων είναι ίδιας τάξης μεγέθους ενώ ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης είναι ανάμεσα στους συντελεστές υδατοαπορρόφησης των δύο ιστορικών λίθων. Συνεπώς, ο προτεινόμενος λίθος φαίνεται να είναι συμβατός με τον ιστορικό λίθο.

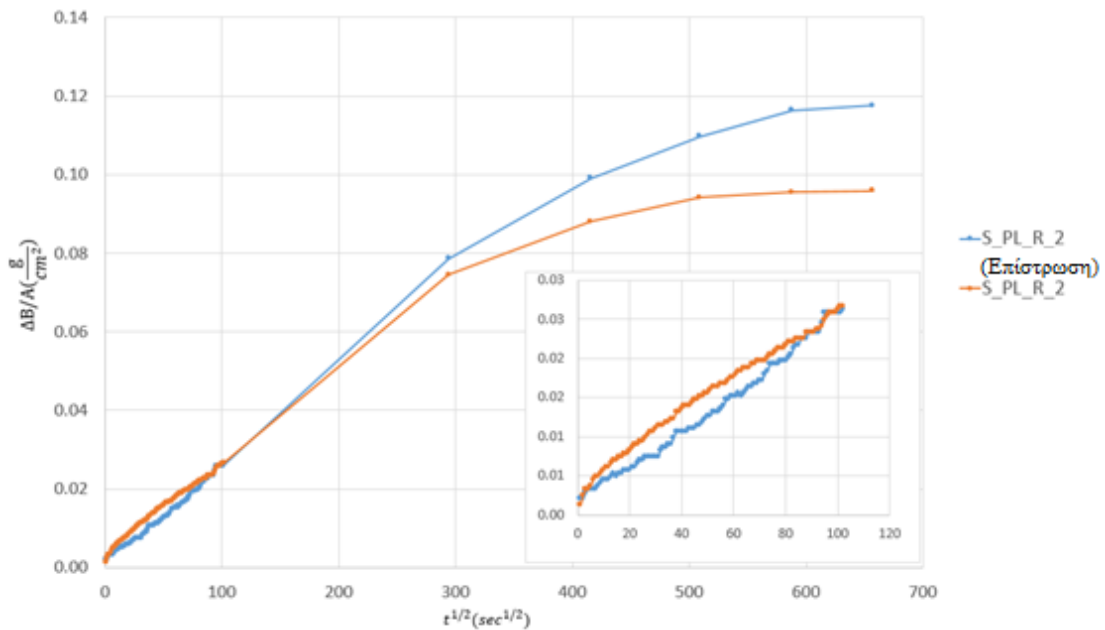
Κωδικός Δείγματος	Μέση τιμή Ποσοστού ροφημένου νερού(%)	Μέση τιμή ολικού ανοιχτού πορώδους(%)	Μέση τιμή φαινόμενης πυκνότητας(g/cm³)	Μέση τιμή συντελεστή υδατοαπορρόφησης (g/cm²sec¹/²)
PL_SH_1	0.91±0.09	1.84±0.22	2.60±0.01	2.48×10 <sup>-4</sup> ±2.24×10 <sup>-5</sup>
PL_SH_2	0.99±0.09	1.98±0.24	2.59±0.01	2.40×10 <sup>-4</sup> ±4.05×10 <sup>-5</sup>
S_PL_R	1.15±0.11	2.40±0.27	2.55±0.03	2.45×10 <sup>-4</sup> ±2.23×10 <sup>-5</sup>

Πίνακας 15. Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης για το ποσοστό ροφημένου νερού, το ολικό ανοιχτό πορώδες, προσβάσιμο στο νερό, την φαινόμενη πυκνότητα και τον συντελεστή υδατοαπορρόφησης των λιθότυπων

Παράλληλά, μελετήθηκε η επίδραση που είχε στα δοκίμια επίστρωση από μικρομοριακό αστάρι, η οποία είχε ως σκοπό την αύξηση της συνάφειας μεταξύ λίθου και κονιάματος. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε η τριχοειδής αναρρίχηση στα δοκίμια PL\_R\_2, PL\_R\_3 και PL\_R\_4, με και χωρίς το επίστρωμα αυτό.

Πράγματι, φαίνεται πως η κάλυψη της επιφάνειας των δοκιμίων επηρέασε την αρχική ταχύτητα απορρόφησης νερού. Παρ' όλα αυτά, οι συντελεστές κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα άρα θεωρούμε ότι δεν μεταβάλλουν την υδρομετρική συμπεριφορά των δοκιμίων.

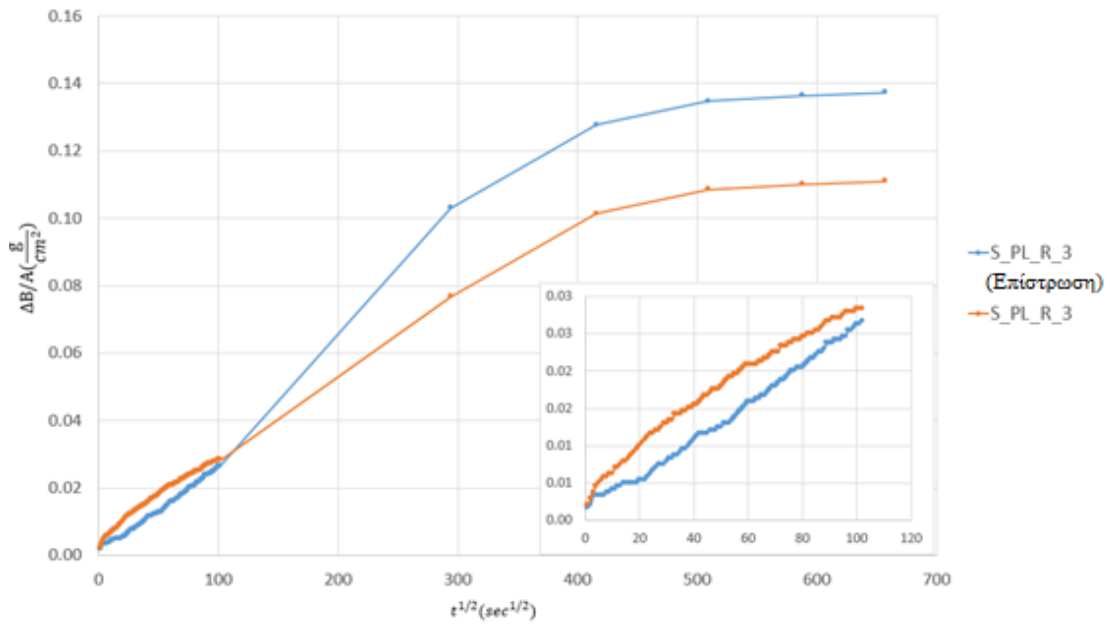
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως και της τρεις περιπτώσεις τα δοκίμια με την επικάλυψη φαίνεται πως απορρόφησαν εν τέλει μεγαλύτερα ποσοστά νερού απ' ότι χωρίς την επικάλυψη. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην αλληλεπίδραση του νερού με την προστατευτική επίστρωση του οργανικού υλικού μετά από ορισμένη ώρα επαφής του με αυτό.



Γράφημα 28. Σύγκριση τριχοειδούς αναρρίχησης σε δοκίμιο αποκατάστασης PL\_R\_2 με και χωρίς προστατευτικό επίστρωμα

Κωδικός δείγματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης(g/cm <sup>2</sup> sec <sup>1/2</sup> )
PL_R_2(Με επίστρωση)	2.41x10 <sup>-4</sup>
PL_R_2	2.2710 <sup>-4</sup>

Πίνακας 16. Επίδραση του συντελεστή υδατοαπορρόφησης του δοκιμίου PL\_R\_2 από την επίστρωση

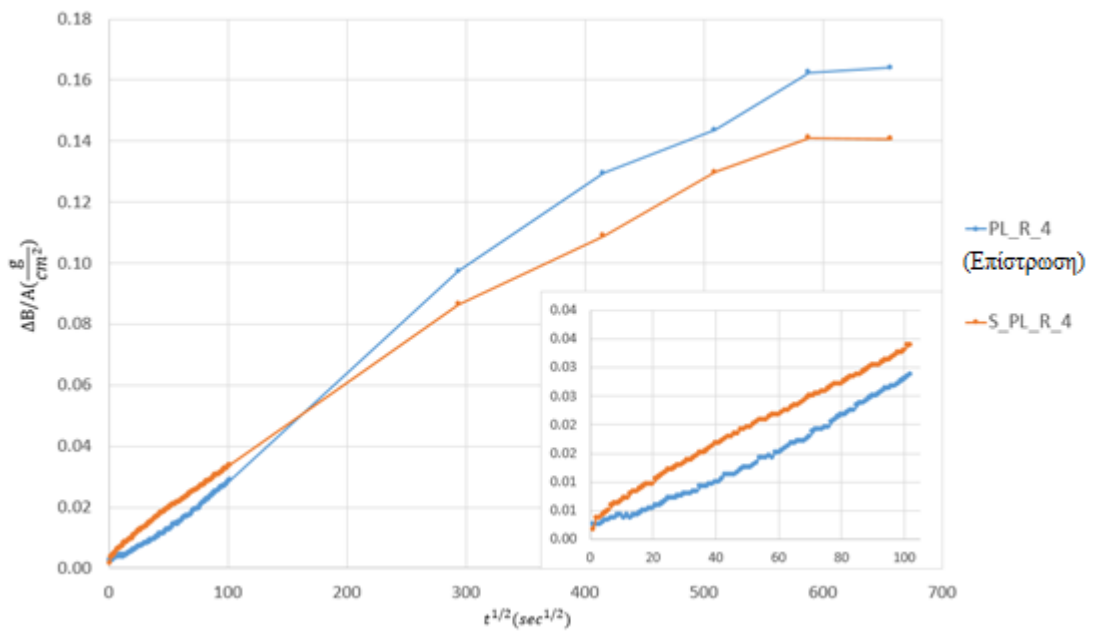


Γράφημα 29. Σύγκριση τριχοειδούς αναρρίχησης σε δοκίμιο αποκατάστασης PL\_R\_3 με και χωρίς προστατευτικό επίστρωμα

Κωδικός δείγματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης( $g/cm^2sec^{1/2}$ )
PL_R_3(Με επίστρωση)	$2.47 \times 10^{-4}$
PL_R_3	$2.4710^{-4}$

Πίνακας 17. Επίδραση του συντελεστή υδατοαπορρόφησης του δοκιμίου PL\_R\_3 από την επίστρωση





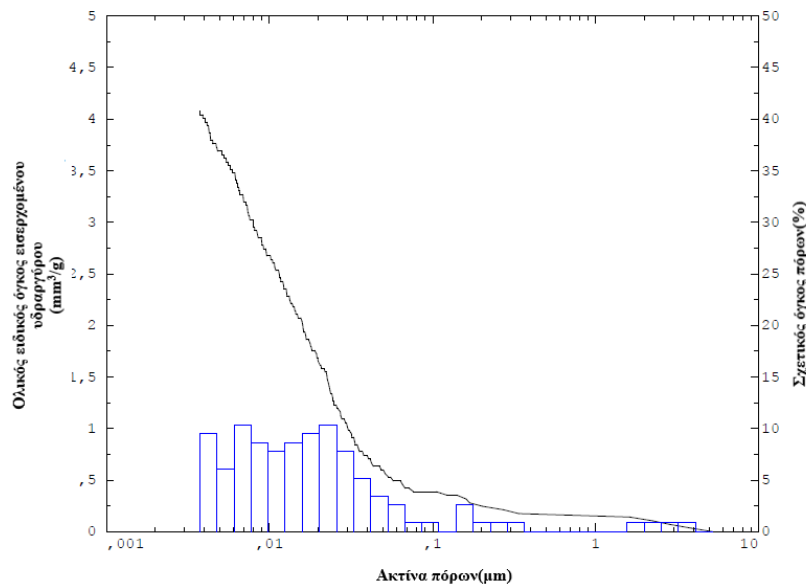
Γράφημα 30. Σύγκριση τριχοειδούς αναρρίχησης σε δοκίμιο αποκατάστασης PL\_R\_4 με και χωρίς προστατευτική επίστρωση

Κωδικός δείγματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης(g/cm <sup>2</sup> sec <sup>1/2</sup> )
PL_R_4(Με επίστρωση)	2.64x10 <sup>-4</sup>
PL_R_4	2.9310 <sup>-4</sup>

Πίνακας 18. Επίδραση του συντελεστή υδατοαπορρόφησης του δοκιμίου PL\_R\_3 από την επίστρωση

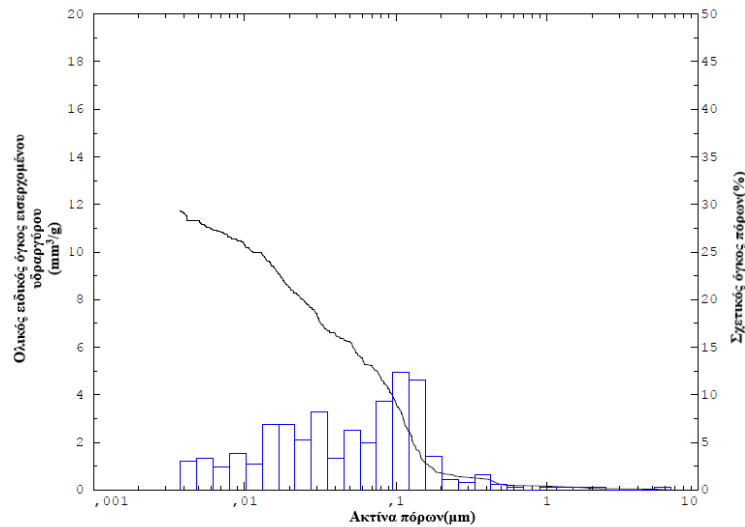
## 4.8 Ποροσιμετρία υδραργύρου

Ποροσιμετρία υδραργύρου πραγματοποιήθηκε σε ένα δείγμα κατάλληλου μεγέθους του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης και σε ένα δείγμα του ιστορικού λιθότυπου όψης. Η ίδια διαδικασία ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί για τον παρόλιθο λόγω του μεγάλου μέγεθος των πόρων του. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τα τον αποτελεσμάτων:



Γράφημα 31. Καμπύλη είσδυσης ποροσιμετρίας υδραργύρου για τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_1

Κι οι δύο λίθοι παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό πορώδες. Η πλειοψηφία των πόρων του δείγματος από τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_1 κυμαίνονται σε τιμές ακτίνας μικρότερες από 0,1 μm. Παράλληλα, η πλειοψηφία των πόρων του δείγματος από τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης κυμαίνονται γύρω από την περιοχής τιμών ακτίνας 1 μm, αν και φαίνεται να υπάρχει ένας ποσοστό πόρων που φθάνει σε τιμές ακτίνας έως περίπου 0,005 μm.



Γράφημα 32. Καμπύλη εισόδου ποροσιμετρίας υδραργύρου για τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης PL\_S\_R

Παρακάτω, παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε λίθου, όπως υπολογίστηκαν με βάση την μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου:

Κωδικός δείγματος	Ολικός ειδικός όγκος εισερχομένου υδραργύρου(mm <sup>3</sup> /g)	Ειδική επιφάνεια πόρων(m <sup>2</sup> /g)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ολικό ανοιχτό πορώδες(%)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>2</sup> sec <sup>1/2</sup> )
PL_SH_1	4.08	0.71	0.02	1.07	2.61
PL_R_S	11.74	1.04	0.11	3.03	2.58

Πίνακας 19. Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών δειγμάτων ποροσιμετρίας υδραργύρου

Φαίνεται πως οι δύο λίθοι έχουν παρόμοιες τιμές όσον αφορά την φαινόμενη πυκνότητα τους. Παράλληλα, ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει μεγαλύτερο ολικό ανοιχτό πορώδες σε σύγκριση με τον ιστορικό αλλά η διαφορά είναι μικρή και αποδεκτή. και οι δύο λίθοι παρουσιάζουν μικρή μέση ακτίνα πόρων. Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης φαίνεται να έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια πόρων και μεγαλύτερο ολικό ειδικό όγκο εισερχόμενου υδραργύρου, κάτι που φαίνεται να είναι σε συμφωνία με το γεγονός πως ο λίθος αυτός έχει μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων και ανοιχτό πορώδες σε σύγκριση με τον ιστορικό λίθο.

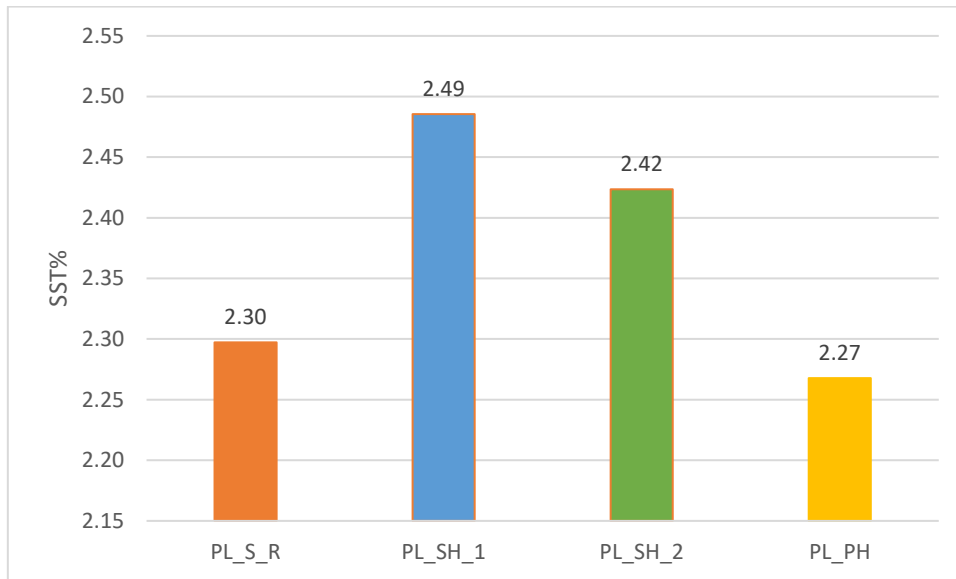
#### 4.9 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης

Από κάθε λίθο προς μελέτη λήφθηκε ένα δείγμα. Από τον παρόλιθο πάρθηκαν δύο δείγματα, ένα σε ένα σημείο που φαίνεται να είναι υγιές, και ένα σημείο όπου φαίνεται να παρουσιάζει υψηλότερη φαινόμενη πυκνότητα και γι' αυτό υπάρχει η πιθανότητα να έχει εισχωρήσει ένεμα. Οι μάζες των δειγμάτων, οι μετρήσεις της αγωγιμότητας καθώς και το ποσοστό διαλυτών αλάτων σε καθένα από αυτά, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Κωδικός δείγματος	Μάζα (mg)	T(°C)	Blank C(μS)	Αγωγιμότητα C(μS)	SST%
PL_S_R	100	29.3	3.81	37.2	2.30
PL_SH_1	99.9	30.1	3.81	39.9	2.49
PL_SH_2	99.9	30.3	3.81	39	2.42
PL_PH	101.3	29.7	3.81	37.2	2.27

Πίνακας 20. Αποτελέσματα προσδιορισμού διαλυτών αλάτων

Φαίνεται πως η παρουσία διαλυτών αλάτων στους τρεις λίθους είναι παρόμοια. Το γεγονός πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης έχει παρόμοιο ποσοστό διαλυτών αλάτων πιθανότητα δηλώνει πως η ύπαρξη αυτών των αλάτων έχει να κάνει με τους ίδιους τους λίθους και την θέση από την οποία λήφθηκαν. Παράλληλα, τα αποτελέσματα της ποιοτικής ανάλυσης υποδεικνύουν πως πρόκειται για ελάχιστη παρουσία χλωριόντων σε όλα τα δείγματα. Επίσης, τα χαμηλά ποσοστά διαλυτών αλάτων (<3%) στους ιστορικούς λίθους υποδηλώνουν πως οι ιστορικού λιθότυποι δεν διέτρεχαν κίνδυνο από την διάβρωση λόγω εισχώρησης διαλυτών αλάτων.



Γράφημα 33. Γράφημα στήλης ολικών διαλυτών αλάτων κάθε δείγματος

Κωδικός δείγματος	Παρουσία $\text{SO}_4^{2-}$	Παρουσία $\text{Cl}^-$	Παρουσία $\text{NO}_3^-$
PL_S_R	-	+	-
PL_SH_1	-	++	-
PL_SH_2	-	++	-
PL_PH	-	+	-

Πίνακας 21. Ποιοτικός προσδιορισμός θεικών, χλωριόντων και νιτρικών

Η κλίμακα για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

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

Πίνακας 22. Κλίμακα περιεκτικότητας ιόντων

## 4.10 Χρωματομετρία

Για την αισθητική σύγκριση του χρώματος των λίθων διεξήχθη χρωματομετρία σε όλα τα δοκίμια. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσες τιμές κάθε παραμέτρου του χρωματικού μοντέλου CIElab για κάθε λιθότυπο:

Κωδικός Δείγματος	L	a	b
PL_SH_1	62.68±1.05	-0.98±0.47	2.44±1.58
PL_SH_2	62.93±0.85	-0.77±0.62	3.42±1.92
PL_R_S	57.46±0.37	-1.77±0.05	0.98±0.20

Πίνακας 23. Τιμές L, a, b των δομικών λίθων.

Κωδικός Δείγματος	L	a	b
PL_PH_1	66.64±0.12	5.11±0.06	17.36±0.13
PL_PH_2	66.67±0.4	4.90±0.07	17.01±0.51

Πίνακας 24. Τιμές L, a, b των λίθων του γεμίσματος

Φαίνεται πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη φωτεινότητας από τους δύο ιστορικούς λίθους. Παράλληλα, οι ιστορικοί λίθοι επιδεικνύουν υψηλότερες τιμές a και b σε σχέση με τον λίθο «Δαφνούλας». Να σημειωθεί πως η μεγάλη απόκλιση των χρωματικών παραμέτρων a και b στους ιστορικούς λίθους οφείλεται στην ύπαρξη καστανέρυθρων περιοχών στην επιφάνεια τους.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης κάθε ιστορικού λίθου με τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης όσον αφορά την διαφορά του χρώματος τους. Φαίνεται πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει μεταβολή χρωματισμού σε σύγκριση με τους ιστορικούς λίθους από περίπου 5.50 έως 6. Σύμφωνα με το πρότυπο (37) οποιαδήποτε μεταβολή του χρωματισμού πάνω από 5 είναι αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Παρ' όλα μεταβολή αυτή είναι κοντά στην οριακή τιμή και γι' αυτό αποδεκτή.

Αποτίμηση λίθου αποκατάστασης για το ιστορικό Γεφύρι της Πλάκας στον ποταμό Άραχθο στην Ήπειρο

	$\Delta E^{*2,1}$	$\Delta C^{*2,1}$	$\Delta H^{*2,1}$	$\Delta E^{*94}$
Σύγκριση PL_R_S με PL_SH_1	5.47	-0.60	1.54	5.45
Σύγκριση PL_R_S με PL_SH_2	6.07	-1.49	2.18	6.00

Πίνακας 25. Μεταβολή χρωματισμού μεταξύ λίθου «Δαφνούλας» και των ιστορικών λίθων, λαμβάνοντας υπόψη τις αποχρωματισμένες περιοχές

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσθήκης της προστατευτικής επιστρώσης στα δοκίμια του λίθου αποκατάστασης. Φαίνεται πως τα δείγματα χωρίς το επίστρωμα παρουσιάζουν μεγαλύτερη φωτεινότητα και παρόμοια ένταση και χρωματισμό. Από αισθητικής άποψης, φαίνεται ότι το επίστρωμα δεν αλλάζει σημαντικά τον χρωματισμό του λίθου.

	$\Delta E^{*2,1}$	$\Delta C^{*2,1}$	$\Delta H^{*2,1}$	$\Delta E^{*94}$
Σύγκριση χρώματος πριν και μετά την προσθήκη επιστρώματος σε δοκίμιο PL_R_2	3.09	-0.45	0.6	3.08
Σύγκριση χρώματος πριν και μετά την προσθήκη επιστρώματος σε δοκίμιο PL_R_3	2.81	-0.35	0.48	2.8
Σύγκριση χρώματος πριν και μετά την προσθήκη επιστρώματος σε δοκίμιο PL_R_4	3.34	-0.16	0.3	3.34

Πίνακας 26. Αποχρωματισμός δοκίμων λίθου αποκατάστασης

#### 4.11 Δοκιμές Αντοχής σε Θλίψη

Πραγματοποιήθηκε η δοκιμή σε θλίψη δοκιμίων κάθε λιθότυπου με σκοπό την μελέτη των μηχανικών αντοχών τους. Αξίζει να τονιστεί, πως κατά το πέρας του πειράματος στα δοκίμια πωρόλιθου δεν είχε επέλθει θραύση, αλλά λόγω του μεγάλου πορώδους τους υπήρξε πλαστική παραμόρφωση καθώς συμπυκνώθηκαν οι πόροι του. Όπως αναμενόταν, οι πωρόλιθοι το γεμίσματος εμφάνισαν πολύ μικρές θλιπτικές αντοχές.

Κωδικός δείγματος	Εμβαδόν διατομής(cm <sup>2</sup> )	Θλιπτική Αντοχή(Mpa)
PL_PH_1.2	24.27	1.94
PL_PH_2.1	24.19	2.75
PL_PH_2.2	24.11	2.82
		<b>2.78±0.03</b>

Πίνακας 27. Θλιπτική αντοχή λιθότυπων γεμίσματος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα ιστορικά δοκίμια των λιθότυπων PL\_SH\_1 και PL\_SH\_2 επέδειξαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τα δοκίμια του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης. Συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει 12.36% μικρότερη αντοχή σε θλίψη από τον λίθο PL\_SH\_1 και 20.02% μικρότερη αντοχή από τον λίθο PL\_SH\_2.





Εικόνα 59. Αστοχία δοκιμίου ιστορικού λιθότυπου

Κωδικός δείγματος	Εμβαδόν διατομής(cm <sup>2</sup> )	Θλιπτική Αντοχή(Mpa)
PL_SH_1.1	24.72	165.45
PL_SH_1.2	24.18	143.94
PL_SH_1.3	24.56	201.83
		<b>170.41±23.89</b>
PL_SH_2.1	24.06	204.07
PL_SH_2.2	24.49	186.14
PL_SH_2.3	24.48	169.95
		<b>186.72±13.93</b>
PL_S_R_1	24.46	163.11
PL_S_R_5	24.10	145.24
PL_S_R_6	24.06	139.69
		<b>149.35±9.99</b>

Πίνακας 28. Θλιπτική αντοχή ιστορικών λίθων και προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης

## 5 Συμπεράσματα

Το Γεφύρι της Πλάκας αποτέλεσε ένα επίτευγμα της τεχνογνωσίας και της εφευρετικότητας της περιοχής και τότε εποχής. Υπήρξε το μεγαλύτερο μονότοξο γεφύρι των Βαλκανίων και ένα σημαντικό κομμάτι της πολιτιστικής ιστορίας των Τζουμέρκων. Οι μελέτες μέχρι τώρα δείχνουν ότι τα αίτια της κατάρρευσης του ήταν πολυσύνθετα. Η παθολογία της γέφυρας, και συνεχόμενη εξέλιξη της φθοράς της, η ελλιπής και αναποτελεσματικές απόπειρες συντήρησής της, καθώς και τα έντονα καιρικά φαινόμενα οδήγησαν στην κατάρρευση της.

Στο πλαίσιο της αναστήλωσης της γέφυρας έγιναν πολλές συζητήσεις σχετικά με το αν θα πρέπει το γεφύρι να χτιστεί στην ίδια τοποθεσία αξιοποιώντας τα τμήματα του που έχουν επιβιώσει καθώς και τους δομικούς λίθους που έχουν διασωθεί μετά την κατάρρευση, ή αν θα πρέπει τα τμήματα που επιβιώνουν να διατηρηθούν και η νέα γέφυρα να χτιστεί πλησίον της παλιάς. Σημαντικό ερώτημα αποτέλεσε και το κατά πόσο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν παραδοσιακά υλικά και τεχνικές δόμησης, ή νέα υλικά και τεχνικές που θα εξωτερικά θα προσομοιάζουν την ιστορική γέφυρα της Πλάκας.

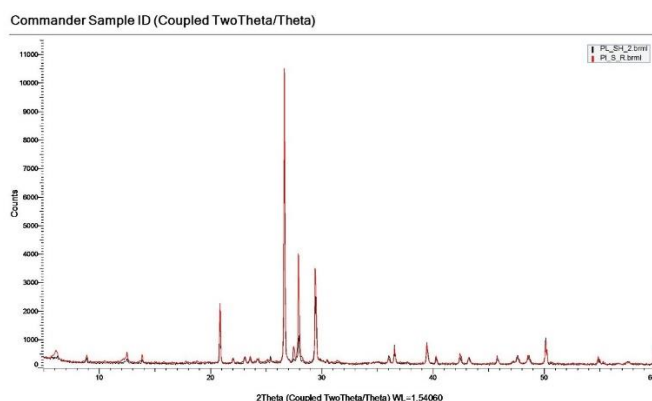
Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου έργου, έχει αποφασιστεί η γέφυρα να ανοικοδομηθεί στο ίδιο σημείο, αξιοποιώντας τα σωζόμενα τμήματα και τους λίθους που έχουν διασωθεί. Παράλληλα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέοι λίθοι, προερχόμενοι από την περιοχή, που προσομοιάζουν τις ιδιότητες των ιστορικών λίθων (φυσικοχημικές, χημικές κλπ.). Η απόφαση αυτή έλαβε υπόψη όχι μόνο την πολιτιστική και η ιστορική αξία του μνημείου και τις επιθυμίες των κατοίκων, αλλά και την αξιοθαύμαστη ποιότητα της κατασκευής.

Ο ιστορικός λίθος που δομούσε εξωτερικά το γεφύρι, καθώς και ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης από το λατομείο της Δαφνούλας, είναι κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα, και συγκεκριμένα είναι ασβεστιτικοί ψαμμίτες. Πρόκειται για συμπαγείς λίθους γκριζου χρώματος, με μεγάλη ομοιογένεια και συνεκτικότητα. Ο λίθος που έχει χρησιμοποιηθεί για το γέμισμα είναι ασβεστιτική μάργα, μπεζ χρώματος με αρκετά μεγάλο πορώδες και έντονα ανομοιογενή επιφάνεια. Η μορφή των λίθων, καθώς και η θέση της κατασκευής φαίνεται να επιβεβαιώνει την υπόθεση πως οι ιστορικοί λίθοι συλλέχθηκαν από τον Άραχθο.

Με το μικροσκόπιο παρατηρείται πως οι ιστορικοί λίθοι παρουσιάζουν κάποιες ρηγματώσεις στην επιφάνεια τους καθώς και κάποιες περιοχές που το χρώμα τους φαίνεται να έχει αλλοιωθεί και να έχουν αποκτήσει καστανέρυθρο χρωματισμό. Η Χρωματική αυτή αλλοίωση πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της περίθλασης ακτινών X και την οπτική μικροσκοπία, οι ασβεστολιθικοί ψαμμίτες, είτε οι ιστορικοί είτε ο προτεινόμενος αποκατάστασης, φαίνεται πως παρουσιάζουν ως κύρια ορυκτολογική φάση αυτή του χαλαζία, ακολουθούμενη από αυτήν του ασβεστίτη, ο οποίος αποτελεί και το συνδετικό υλικό. Ο ιστορικός λιθότυπος που δομούσε εξωτερικά το γεφύρι παρουσιάζει ως

δευτερεύουσες φάσεις τον αλβίτη, τον ανορθίτη, τον λιζαρδίτη, τον μοσχοβίτη, τον βιοτίτη και τον χλωρίτη-σερπεντίνη. Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει τον αλβίτη, τον ανορθίτη, τον λιζαρδίτη, τον βιοτίτη, τον μοσχοβίτη και τον χλωρίτη-μοντμοριλλονίτη ως δευτερεύουσες φάσεις. Ο λίθος του γεμίσματος παρουσιάζει κυρίως ασβεστιτική σύσταση και ίχνη χαλαζία. Όσον αφορά την συμβατότητα του ιστορικού λίθου όψης με τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης, φαίνεται πως παρουσιάζουν ικανοποιητικά παρόμοια σύσταση.



Πίνακας 29. Σύγκριση ακτινογραφήματος ιστορικού λίθου PL\_SH\_1 με ακτινογράφημα λίθου αποκατάσταση PL\_S\_R

Τα συμπεράσματα από την περίθλαση ακτίνων Χ, φαίνεται πως συμφωνούν με αυτά της θερμικής ανάλυσης καθώς παρουσιάζουν ορισμένη απώλεια μάζα πάνω από του 600°C, γεγονός που οφείλεται εξολοκλήρου στην απομάκρυνση του ασβεστίτη. Επίσης φαίνεται στα δείγματα ψαμμίτη φαίνεται στους περίπου 570 °C η μετάπτωση του χαλαζία από την φάση α' στην φάση β', ενώ κάθε θερμοκρασιακό εύρος η απώλειες μάζας των ιστορικών δομικών λίθων και του λίθου αποκατάστασης είναι παρόμοιες.

Σύμφωνα με το πείραμα της υπερηχοσκόπησης έγιναν δοκιμές στους γκρίζους δομικούς λίθους, ιστορικούς και αποκατάστασης. Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν ταχύτητες διάδοσης περίπου από 4100 m/s έως 4600 m/s. Παράλληλα, αν και η μέση ταχύτητα διάδοσης του λίθου αποκατάστασης είναι παρόμοια με την μέση ταχύτητα διάδοσης κάθε ιστορικού λίθου, είναι χαμηλότερη. Αυτό δείχνει πως οι ιστορικοί λίθοι παρά την οποιαδήποτε φθορά έχουν υποστεί κατά την διάρκεια ζωής τους, φαίνεται να έχουν υψηλότερη συνεκτικότητα από τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης.

Η μετρήσεις επίσης δείχνουν πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης, αν και εντός αποδεκτού εύρους, παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό ανισοτροπίας σε σύγκριση με τους ιστορικούς λίθους. Παρ' όλα αυτά, ως σύνολο, όλοι οι λιθότυποι παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό ανισοτροπίας, κάτι που τονίζει την ποιότητα τους.

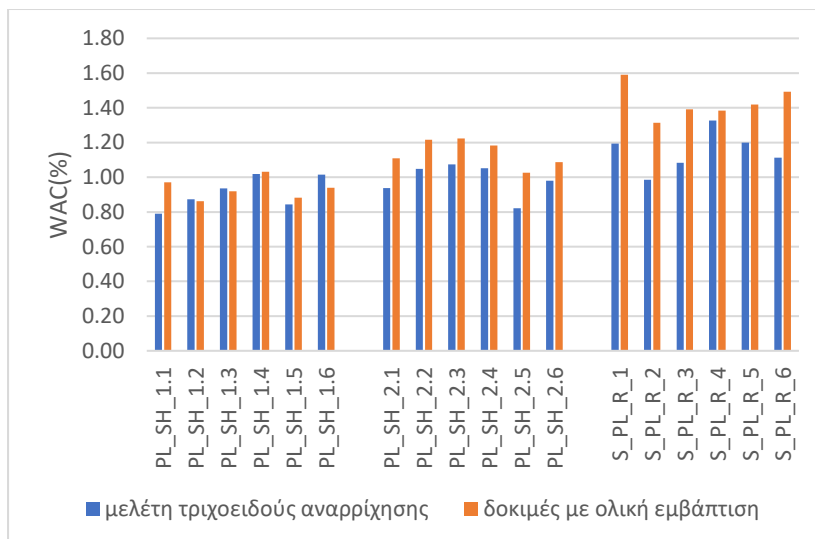
Παράλληλα, τα αποτελέσματα από τις δοκιμές αντοχής σε θλίψη συμπληρώνουν σε μεγάλο βαθμό τα παραπάνω αποτελέσματα. Είναι εμφανές πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης, οποίος παρουσιάζει μικρότερη συνεκτικότητα και μεγαλύτερη

ανισοτροπία, φαίνεται ότι παρουσιάζει και μικρότερη θλιπτική αντοχή. Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζει περίπου 8% χαμηλότερη ταχύτητα διάδοσης υπερήχων και 16% μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τον λιθότυπο. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο ο πωρόλιθος του γεμίματος εμφανίζει πολύ μικρές θλιπτικές αντοχές που κυμαίνονται περίπου στα 2 MPa.

Το πείραμα της τριχοειδούς αναρρίχησης και των δοκιμών με ολική εμβάπτιση των δοκιμών προσφέρει πολλά συμπεράσματα για την υδρομετρική συμπεριφορά. Να σημειωθεί πως τα ίδια πειράματα δεν έγιναν για τους λίθους γεμίματος, καθώς το μεγάλο πορώδες του εμπόδιζε την σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ποσοστό ολικού ροφημένου νερού(%)			
Κωδικός δείγματος	PL_SH_1	PL_SH_2	PL_R_S
Αποτελέσματα δοκιμών ολικής εμβάπτισης	0.93±0.06	1.13±0.09	1.43±0.09
Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης	0.91±0.09	0.99±0.09	1.15±0.11

Πίνακας 30. Σύγκριση ποσοστού ροφημένου νερού μεταξύ δοκιμών ολικής εμβάπτισης και τριχοειδούς αναρρίχησης

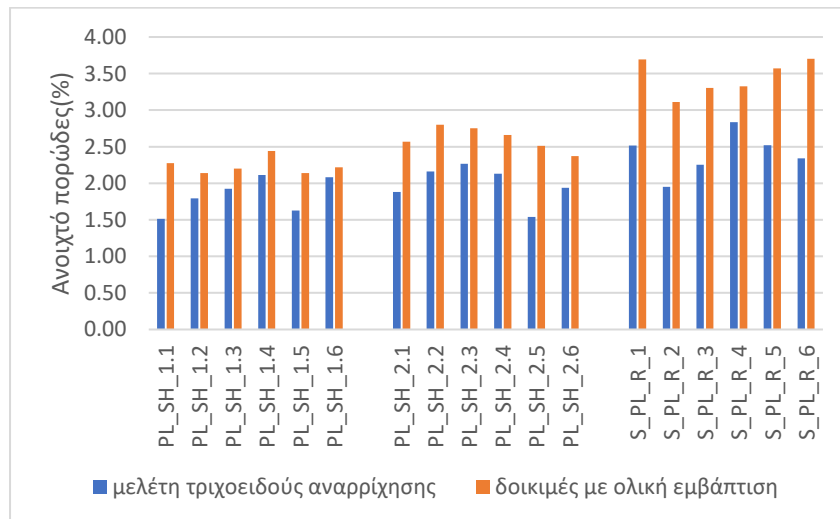


Γράφημα 34. Σύγκριση αποτελεσμάτων ποσοστού ολικού ροφημένου νερού με την μέθοδο της τριχοειδούς αναρρίχησης και την δοκιμή με ολική εμβάπτιση δοκιμών

Κατά την διεξαγωγή και των δύο πειραμάτων, τόσο τα δοκίμια του ιστορικού λιθότυπου όψης όσο και αυτά του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης εμφάνισαν τον μέγιστο ρυθμό ρόφησης νερού τις πρώτες ώρες διεξαγωγής του πειράματος. Τα δοκίμια απορρόφησαν πολύ λίγο νερό, είτε κατά την τριχοειδή αναρρίχηση, είτε κατά την ολική τους εμφύσηση, στο εύρος των 96 ωρών που διήρκησε το πείραμα.

Ολικό ανοιχτό πορώδες(%)			
Κωδικός δείγματος	PL_SH_1	PL_SH_2	PL_R_S
Αποτελέσματα δοκιμών ολικής εμφύσησης	2.24±0.10	2.61±0.15	3.45±0.22
Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης	1.84±0.22	1.98±0.24	2.40±0.27
Αποτελέσματα ποροσιμετρίας υδραργύρου	1.065	-	3.03

Πίνακας 31. Σύγκριση ολικού ανοιχτού πορώδους, προσβάσιμο στο νερού σύμφωνα με δοκιμές ολικής εμφύσησης και τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και ποροσιμετρίας υδραργύρου



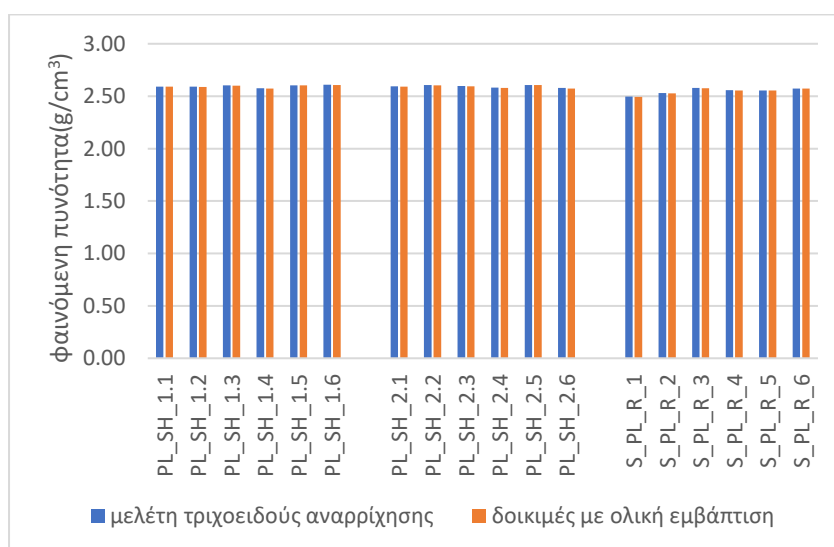
Γράφημα 35. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανοιχτού πορώδους με την μέθοδο της τριχοειδούς αναρρίχησης και την δοκιμή με ολική εμφύσηση δοκιμίων

Τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων φαίνεται να συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, με της δοκιμές ολικής εμφύσησης, φαίνεται πως το μετρούμενο ποσοστό ολικού ροφημένου νερού είναι μεγαλύτερο για τις δοκιμές με

ολική εμβάπτιση, κάτι που είναι αναμενόμενο, λόγω του ότι υπάρχει ρόφηση νερού από όλες τις πλευρές του δοκιμίου. Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και για το μετρούμενο ανοιχτό πορώδες, όπως υπολογίζεται και από τις δύο μεθόδους. Την ίδια στιγμή, τα αποτελέσματα για την φαινόμενη πυκνότητα φαίνεται να συμφωνούν εξαιρετικά μεταξύ των δύο μεθόδων, ενώ συμφωνούν και με την πραγματική πυκνότητα όπως έχει μετρηθεί μέσω του όγκου και της μετρούμενης μάζας.

φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )			
Κωδικός δείγματος	PL_SH_1	PL_SH_2	PL_R_S
Αποτελέσματα δοκιμών ολικής εμβάπτισης	2.59±0.01	2.59±0.03	2.55±0.03
Αποτελέσματα δοκιμών τριχοειδούς αναρρίχησης	2.60±0.01	2.59±0.01	2.55±0.03
Αποτελέσματα ποροσιμετρίας υδραργύρου	2.61	-	2.58
Αποτελέσματα με βάση διαστάσεις δειγμάτων	2.61±0.19	2.60±0.13	2.57±0.27

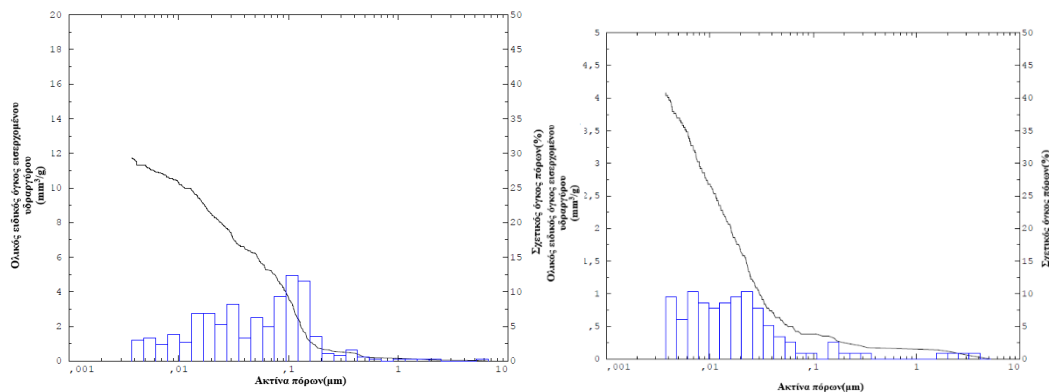
Πίνακας 32. Σύγκριση φαινόμενης πυκνότητας στο νερού σύμφωνα με δοκιμές ολικής εμβάπτισης και τριχοειδούς αναρρίχησης καθώς και ποροσιμετρίας υδραργύρου



Γράφημα 36. Σύγκριση αποτελεσμάτων φαινόμενης πυκνότητας με την μέθοδο της τριχοειδούς αναρρίχησης και την δοκιμή με ολική εμβάπτιση δοκιμίων

Αξίζει να σημειωθεί πως κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, το νερό που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα σε κάποια δοκίμια, απέκτησε μετά από κάποιες μέρες έναν ερυθρό χρωματισμό, που πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου. Παράλληλα τα δοκίμια που είχαν εμφανείς ρηγματώσεις, εμφάνισαν χαμηλότερο ρυθμό υδατοαπορρόφησης, ειδικά κατά τις πρώτες ώρες διεξαγωγής του πειράματος. Επίσης, η επίστρωση από μικρομοριακό αστάρι, ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζει τον συντελεστή υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων, οδηγεί στην αύξηση του ποσοστού ροφημένου νερού μετά από ορισμένη ώρα διεξαγωγής του πειράματος. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αλληλεπίδραση του νερού με το οργανικό υλικό της επίστρωσης.

Όλοι οι λιθότυποι δείχνουν πολύ καλή υγρομετρική συμπεριφορά με ελάχιστη ρόφηση νερού, ακόμα και κατά μετά από την ολική εμβάπτιση για αρκετές μέρες, ενώ το υπολογισμένο ανοιχτό πορώδες είναι αρκετά μικρό. Όλα αυτά υποδεικνύουν έντονη ανθεκτικότητα στην εισχώρηση υγρασίας και επιβεβαιώνουν την υψηλή συνεκτικότητα των λίθων. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό ροφημένου νερού αλλά και μεγαλύτερο ανοιχτό πορώδες σε σχέση με τους ιστορικούς λίθους, αν και αυτό είναι εντός αποδεκτών ορίων (<1%).



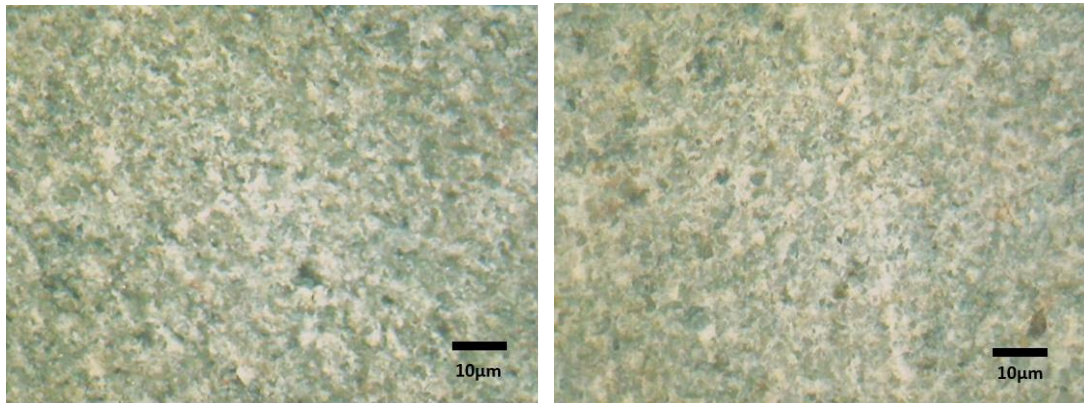
Εικόνα 60. Καμπύλες εισόδου ποροσιμετρίας υδραργύρου για τον προτεινόμενο λίθο αποκατάστασης PL\_R\_S και τον ιστορικό λίθο PL\_SH\_1(δεξιά)

Η ποροσιμετρία υδραργύρου φαίνεται να είναι σε συμφωνία με τα παραπάνω αποτελέσματα. Ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση ακτίνα πόρων και μεγαλύτερο ολικό ανοιχτό πορώδες από τον ιστορικό λιθότυπο αλλά παρόμοια τιμή φαινόμενης πυκνότητας. Αν και ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης φαίνεται πιο επιδεκτικός στην υγρασία λόγω του μεγαλύτερου πορώδες τους η διαφορά αυτή είναι εντός αποδεκτών ορίων.

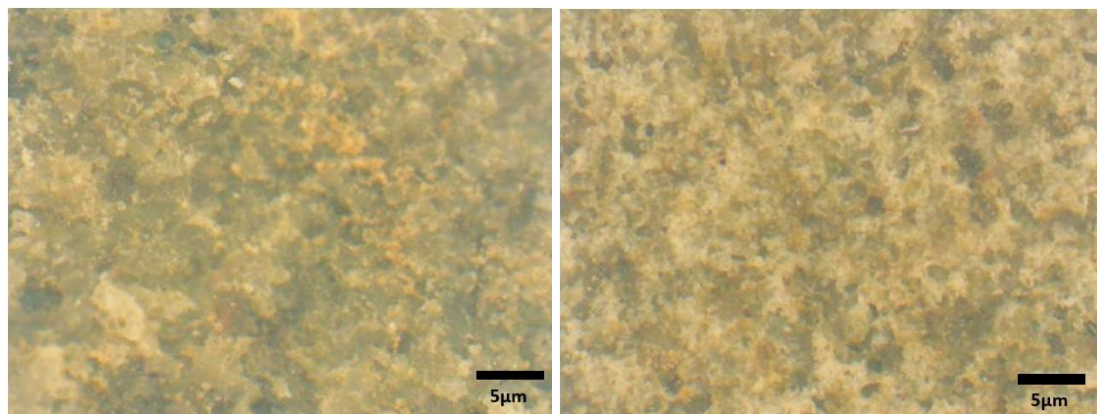
Οι ιστορικοί λίθοι δεν φαίνεται να έχουν υποστεί διάβρωση λόγω της παρουσίας διαλυτών αλάτων. Συγκεκριμένα, όλοι οι λίθοι παρουσιάζουν μικρότερο από 3% ποσοστό διαλυτών αλάτων, το οποία και ταυτοποιούνται ως χλωρίοντα. Αυτό παραπέμπει, σύμφωνα με παλαιότερη έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

(38), πως δεν υπάρχει ένδειξη κινδύνου λόγω της παρουσίας διαλυτών αλάτων. Το γεγονός ότι παρόμοιο ποσοστό διαλυτών αλάτων παρουσιάζει και ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης, οδηγεί στο συμπέρασμα πως το ποσοστό αυτό των διαλυτών αλάτων έχει σχέση με το είδος του λιθότυπου και την τοποθεσία εξόρυξής του.

Τέλος, Θα πρέπει να κριθεί η αισθητική συμβατότητα των λίθων. Ακόμα και με το μικροσκόπιο, οι ιστορικοί λίθοι και ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογία και χρωματισμό. Αξίζει να σημειωθεί, πως ακόμα και οι διαβρωμένες περιοχές που εμφανίζουν αλλοίωση του χρωματισμού τους έχουν παρόμοιο χρώμα.



Εικόνα 61. Σύγκριση μορφολογίας προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης (αριστερά) και ιστορικού λιθότυπου (δεξιά) με FOM, μεγέθυνσης x50



Εικόνα 62. . Σύγκριση μορφολογίας σε καστανέρυθρες περιοχές προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης (αριστερά) και ιστορικού λιθότυπου(δεξιά) με FOM, μεγέθυνσης x120

Παρ' όλα αυτά, η χρωματομετρία φαίνεται να οδηγεί στο συμπέρασμα πως υπάρχει διαφορά στο χρώμα μεταξύ του λίθου αποκατάστασης και των ιστορικών λίθων. Συγκεκριμένα, φαίνεται πως οι λίθοι εμφανίζουν παρόμοια χροιά και ένταση χρώματος αλλά τα αποτελέσματα δείχνουν πως η διαφορά του χρώματος κυμαίνεται σε τιμές περίπου 5.50 έως 6.00. Σύμφωνα με το πρότυπο (37), οποιαδήποτε διαφορά πάνω 5 είναι ορατή με το μάτι. Αυτό παραπέμπει στο ότι στο σύνολο του μνημείου η διαφορά



στο χρώμα μεταξύ το σωζόμενων περιοχών και τον αποκαταστημένων τμημάτων του γεφυριού θα είναι αισθητή αλλά ελάχιστη, καθώς το χρώμα του λίθου αποκατάστασης και του ιστορικού είναι αρκετά συμβατά. Αυτό ίσως είναι και κάτι επιθυμητό, εφόσον δίνεται η δυνατότητα να τονιστούν τα νέα τμήματα της γέφυρας χωρίς να αλλοιωθεί η αισθητική αξία του μνημείου.

Συμπερασματικά, φαίνεται πως ο προτεινόμενος λίθος αποκατάστασης από το λατομείο της Δαφνούλας είναι ικανοποιητικά συμβατός με τον ιστορικό λίθο. Επίσης η μελέτη των ιστορικών λίθων υποδεικνύει και τονίζει την ποιότητα του έργου των κατασκευαστών του γεφυριού. Οι ιστορικοί λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται να είναι αξιοθαύμαστης ποιότητας και ικανής ανθεκτικότητας, ιδιαίτερα αν κάποιος λάβει υπόψη του τις έντονες περιβαλλοντικές συνθήκες τις οποίες αντιμετώπιζαν (έντονη βροχόπτωση, σεισμικές δονήσεις κλπ.).

## 6 Προοπτικές

Από την επεξεργασία των δειγμάτων και τα συμπεράσματα που ελήφθησαν από τα αποτελέσματα των μεθόδων είναι δυνατό να γίνουν ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω αποτίμηση της καταλληλότητας των υλικών αποκατάστασης:

- Θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν επιπλέον λίθινα δείγματα του μνημείο, τόσο από την εξωτερική όψη του γεφυριού όσο κι από το γέμισμα. Για παράδειγμα, θα ήταν χρήσιμη η μελέτη λίθων αγκύρωσης μεταλλικών εσχάρων και καταστρώματος, καθώς και λίθοι γεμίματος από ασβεστόλιθο.
- Να μελετηθεί ο λίθος «Δαφνούλας» ως προς άλλες κρίσιμες μηχανικές ιδιότητες (π.χ. αντοχή σε κάμψη, αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας)
- Να μελετηθεί περαιτέρω η ανθεκτικότητα κι η αντίσταση των ιστορικών λιθότυπων, αλλά και του προτεινόμενου λίθου αποκατάστασης στη διάβρωση από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, προτείνεται να πραγματοποιηθούν δοκιμές ανθεκτικότητας σε παγετό και σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης καθώς και επιπλέον δοκιμές των μηχανικών αντοχών τους (π.χ. κάμψη, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας).
- Μπορεί επίσης να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω πειραματικές διαδικασίες σε συστήματα λίθων-προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης με σκοπό να μελετηθεί και να αποτιμηθεί η αλληλεπίδρασή τους.
- Να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά άλλων λιθότυπων από κοντινά λατομεία και να ελεγχθεί η συμβατότητά τους με τους ιστορικού λιθότυπος

## 7 Βιβλιογραφία

1. **Μοροπούλου, Α. και Μπατής, Γ.** *Δομικά υλικά*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2016.
2. **Winkler, E. M.** *Stone in Architecture. Properties, durability* . [επιμ.] Springer-Verlag. 3rd. Berlin : Springer-Verlag, 1997.
3. **Λεγάκης, Α.** *Δομικά Υλικά*. s.I : Εκδ. Ευγενίδιο Ίδρυμα, 1997.
4. **Σολδάτος, Τ. και Χριστοφίδης, Γ.** *Ορυκτολογία: Διδακτικές σημειώσεις*. s.I : Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 2004.
5. **Μοροπούλου, Α.** *Μη Καταστρεπτικές και ενόργανες μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς και ελέγχου υλικών και επεμβάσεων συντήρησης*. Αθήνα : s.n.
6. **Μοροπούλου, Α. και συν.** *Εργαστηριακός οδηγός του μαθήματος Επιστήμη και Τεχνική των Υλικών*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2016.
7. **Reed, J.S.** *Principles of Ceramics Processing* . 2nd. New york : John Wiley and Son, 1995.
8. **Webb, P.A.** *Volume and density determinations for particle technologists*. USA : Micromeritics Instrument Corp., 2001.
9. **Μοροπούλου, Α.** *Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης: Κριτήρια, μεθοδολογία και τεχνικές αποτίμησης και σχεδιασμού*.
10. —. *Φαινόμενα και μηχανισμοί φθοράς*.
11. **Μοροπούλου, Α.** *Φθορά και προστασία υλικών*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2016.
12. **Μοροπούλου, Α., και συν.** Digital Processing for the Environmental Impact Assessment on Architectural Surfaces. *Journal of Environmental Chemistry and technology*. 1995.
13. **Μοροπούλου, Α.** *Σημειώσεις ασκήσεων του μαθήματος Δομικά Υλικά του 9ου εξαμήνου*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
14. **Fort, R., και συν.** Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2011.
15. **Παπακώστα, Νικ.** *Ηπειρωτικά*. Αθήνα : s.n., 1967.
16. **Μαντάς, Σ.** *Το γεφύρι και ο Ηπειρώτης*. Αθήνα : Λαϊκό Πολύπτυχο, 1987.
17. **Παπαγεωργίου, Β. και Πετρονάκης, Α.** *Ο Πυρσογιαννίτης μάστορας Ζιώγας Φρόντζος και τα έργα του*. Κόνιτσα : s.n., 1996.
18. **Μαντάς, Σ.** Ο Μαστρο-Γιώργης και ο Μαστρο-Κώστας. *Κόνιτσα*. Μάρτης-Απρίλης, 2015, 181.
19. —. *Αρχείο Γεφυριών Ηπειρωτικών*. [Ηλεκτρονικό] <http://arhiogefirionipirotikon.blogspot.com/>.

20. **Μαμμόπουλος, Α.** *Λαϊκή Αρχιτεκτονική-Ηπειρώτες Μαστοροι και Γεφύρια*. Αθήνα : s.n., 1973.
21. **Λαμπρίδης, Ι.** *Περί των εν Ηπείρω Αγαθοεργημάτων*. Αθήνα : s.n., 1880. Τόμ. Π.
22. **Διεπιστημονική ομάδα ΕΜΠ.** *Γεφύρι της Πλάκας, το έργο για την αποκατάστασή του*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
23. **Μοροπούλου, Α.** *Ολοκληρωμένη μεθοδολογία διάγνωσης, ανάλυσης και χαρτογράφησης των δομικών υλικών και της φθοράς στα κτίρια*. Αθήνα : s.n., 2018.
24. —. *Τυποποίηση και πρότυπα για έλεγχο ποιότητας στις κατασκευές*. Αθήνα : s.n., 2017.
25. **Hentschel, Christian.** *Fiber Optics Handbook*. s.l. : Hewlett-Packard GmbH, 1983.
26. **Όξενκιουν-Πετροπούλου, Μ.** *Φασματομετρικές Μεθόδους*. Γ' Έκδοση. Αθήνα : Συμμετρία, 2012.
27. **Όξενκιουν-Πετροπούλου, Μ.** *Φυσικές Μεθόδους Ανάλυσης: χρωματογραφικές θερμικές, ηλεκτρομετρικές, φασματομετρίας μάζας*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.
28. **Borrelli, Ernesto.** *ICCROM ARC laboratory handbook vol. 1-2*. Rome : ICCROM, 1999.
29. **British Standards Institution.** *EN15801: 2010: Conservation of Cultural Property- Test Methods- Determination of Water Absorption by Capillarity*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardisation, 2010.
30. **Μοροπούλου, Α.** *Εργαστηριακός Οδηγός για την Φθορά και προστασία υλικών 9ου εξαμήνου*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
31. **Καραντώνης, Α.** *Φυσικοχημεία ΙΙΙ: Χημική κινητική και ηλεκτροχημεία*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
32. **Normal 13/83, Dosaggio dei sali solubili**, CNR - ICR.
33. **X-Rite Inc.** *A guide to understanding color communication*.
34. **Ορφανάκος, Β.** *Χρωματομετρία-Βασικές Αρχές*. Αθήνα : s.n., 2004.
35. **Whetzel, N.** *CIE L\*a\*b\* Color Scale - an07\_96a*. [Ηλεκτρονικό] 16 January 2015. [Παραπομπή: 11 4 2019.] <https://support.hunterlab.com/hc/en-us/articles/203996325-CIE-L-a-b-Color-Scale-an07-96a>.
36. **Whetzel, Norman.** *CIE L\*C\*h Color Scale - an09\_96a*. [Ηλεκτρονικό] 16 January 2015. [Παραπομπή: 11 4 2019.] <https://support.hunterlab.com/hc/en-us/articles/203285709-CIE-L-C-h-Color-Scale-an09-96a>.
37. **British Standards Institution.** *EN15886:2010: Conservation of Cultural Property-Test Methods-colour Measurement of surfaces*. Brussels : European Committee for Standardisation, 2010.

38. **Μοροπούλου, Α., και συν.** Documentation protocols to generate risk indicator regarding degradation processes for cultural heritage risk evaluation. *International Archives of the Photogrammetry*. 2013.

39. **Guinier, A.** *X-Ray Diffraction in Crystals, Imperfect Crystals, and amorphous Bodies*. San Fransisco and London : W. H. Freeman and Co., 1963.

40. **Συλλογική έκδοση εργαστηρίου ανόργανης και αναλυτικής χημείας.** *Φυσικές μέθοδοι Ανάλυσης, Εργαστηριακές Ασκήσεις*. [επιμ.] Μ. Όξενκιουν-Πετροπούλου. 3η έκδοση. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.

41. **Μοροπούλου, Α., και συν.** *Origin and growth of deteriorating crusts on ancient marbles in industrial atmosphere*. s.l. : 1995.

42. **Μοροπούλου, Α.** *Υψηλή Μετρητική Τεχνολογία*. Αθήνα : s.n.