

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**Διερεύνηση ποιοτικών χαρακτηριστικών δομικών λίθων μνημείων Ρόδου
και σύγκριση παραμέτρων συνθετικού λίθου που χρησιμοποιείται στη συντήρηση**

Διπλωματική Εργασία

Θεόφιλος Δ. Μαντικός

Εξεταστική Επιτροπή
Καθηγητής Θεόδωρος Μαρκόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Γεώργιος Αλεβίζος
Δρ. Ευτυχία Ρεπούσκου

Χανιά
Νοέμβριος, 2012

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	v
Abstract	vi
Πρόλογος	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς	1
1.2 Η φθορά της πέτρας στο πέρασμα του χρόνου	2
1.3 Οι κατηγορίες των δομικών υλικών των μνημείων	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ	4
2.1 Τα ιζηματογενή πετρώματα	4
2.2 Βιοχημικά ιζήματα	5
2.3 Τα ανθρακικά πετρώματα	6
2.4 Ασβεστόλιθοι	6
2.5 Φυσικοί δομικοί λίθοι	11
2.5.1 Γενικά	11
2.5.2 Κατηγορίες φυσικών δομικών λίθων	12
2.6 Πορώδη υλικά	13
2.7 Φυσικός πωρόλιθος	13
2.7.1 Εισαγωγικά	13
2.7.2 Διαγένεση και χαρακτηριστικά φυσικού πωρόλιθου	14
2.8 Τεχνητοί δομικοί λίθοι	15
2.8.1 Γενικά	15
2.8.2 Παραγωγή τεχνητής πέτρας με αμμοκονιάματα τσιμέντου	16
2.9 Τεχνητός πωρόλιθος	17
2.9.1 Η αναγκαιότητα χρήσης τεχνητού πωρόλιθου	17
2.9.2 Διαδικασία παραγωγής	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	21
3.1 Γεωλογικό υπόβαθρο ευρύτερης περιοχής δειγματοληψίας	21
3.2 Στρωματογραφία ευρύτερης περιοχής	22
3.3 Περιοχή δειγματοληψίας	25
3.3.1 Γεωγραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά	25
3.3.2 Στρωματογραφικά χαρακτηριστικά	26
3.3.3 Γεωμορφολογία χαρακτηριστικά	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	33
4.1 Ορυκτολογικές αναλύσεις	33
4.1.1 Μικροσκοπία διερχομένου φωτός και προετοιμασία λεπτών τομών	33
4.1.2 Ασβεστιμετρία	35
4.1.3 Μέτρηση συντελεστή υδατοαπορρόφησης	38
4.1.4 Δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD)	39
4.1.5 Απώλεια πύρωσης	43
4.1.6 Δοκιμή αδιάλυτου υπολοίπου	44
4.1.7 Φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (XRF)	44
4.2 Αναλύσεις μηχανικών ιδιοτήτων	47
4.2.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης	47
4.2.2 Μέτρηση διαπερατότητας	48
4.2.3 Πορομετρία υδραργύρου	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	51
5.1 Ορυκτολογικές αναλύσεις	51
5.1.1 Ασβεστιμετρία	51
5.1.2 Μικροσκοπία διερχομένου φωτός	52
5.1.3 Μέτρηση συντελεστή υδατοαπορρόφησης	58
5.1.4 Δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD)	59
5.1.5 Απώλεια πύρωσης	62
5.1.6 Δοκιμή αδιάλυτου υπολοίπου	63
5.1.7 Φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (XRF)	64

5.2	Αναλύσεις μηχανικών ιδιοτήτων	65
5.2.1	Δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης	65
5.2.2	Μέτρηση διαπερατότητας	67
5.2.3	Πορομετρία υδραργύρου	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		79
Κατάλογος εικόνων, σχημάτων και πινάκων		82

Περίληψη

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι, αρχικά, η αξιολόγηση τού φυσικού δομικού υλικού των ιστορικών μνημείων Ρόδου μέσω ορυκτολογικών και μηχανικών αναλύσεων, τού πετρώματος γνωστού και ως πωρόλιθος. Εκτός τού φυσικού πετρώματος, γίνεται μελέτη τού αντίστοιχου τεχνητού υλικού, ο οποίος μελετήθηκε διαμέσου των ίδιων εργαστηριακών δοκιμών προκειμένου να επιτευχθεί μία αξιόπιστη σύγκριση μεταξύ των δύο υλικών.

Εν συντομία, αναφέρεται ότι οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και των οποίων τα αποτελέσματα εκτίθενται παρακάτω, είναι οι εξής: μέτρηση τού συντελεστή υδατοαπορρόφησης, δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, δοκιμής απώλειας πύρωσης, αδιάλυτου υπολοίπου και ασβεστιμετρία, όσον αφορά την ορυκτολογική ανάλυση τού φυσικού και τεχνητού δομικού υλικού ενώ για την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων τους πραγματοποιήθηκε δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης, πορομετρία υδραργύρου και τέλος μέτρηση της διαπερατότητας.

Σκοπός της εργασίας πέραν της σύγκρισης αυτής, είναι η κατάθεση πρότασης για την τελειοποίηση των ιδιοτήτων τού τεχνητού πωρόλιθου, γεγονός που θα βοηθήσει, σαφώς, στην αποκατάσταση και συντήρηση των ιστορικών μνημείων. Μέσω των αποτελεσμάτων διεξήχθησαν συμπεράσματα αναφορικά με τα χαρακτηριστικά τού τεχνητού πωρόλιθου που χρήζουν βελτιστοποίηση.

Abstract

The objective of this thesis is, initially, the evaluation of the natural structural material of the historical monuments of Rhodes island, Greece, through mineral and mechanical analysis of the stone known as porous stone. Moreover, we deal with the study of the corresponding artificial material, which was studied through the same experimental processes in order to accomplish a trustworthy comparison between these two materials.

In short, the experimental trials conducted are: measurement of water absorption, x ray diffraction, measurement of loss on ignition, insoluble remainder and calcimetry in terms of the mineral analysis of the natural and artificial structural material, whereas for the analysis of the mechanical properties trial, porometry of mercury and transmission of mercury were carried out.

Beyond this comparison, the purpose of this thesis is the proposal for the improvement of the artificial porous stone properties, which will assist the restoration and maintenance of the historical monuments. The results of this thesis have led us to conclusions about the characteristics of the artificial porous stone that need to be improved.

Πρόλογος

Η ιδέα του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας γεννήθηκε και υλοποιήθηκε σε ένα περιβάλλον με σοβαρή παράδοση στην έρευνα των υλικών και με έκδηλο τον προβληματισμό για την κατάσταση των ιστορικών μνημείων της χώρας μας.

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας εντάσσονται, ασφαλώς, σε μια γενικότερη προσπάθεια να κατακτηθεί η απαραίτητη γνώση και τεχνολογία για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τη διατήρηση της πολιτιστικής μας κληρονομιάς.

Η εκπόνηση και συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτέλεσε για μένα, αρχικά, πεδίο ανεξερεύνητο και εν συνεχεία ευχάριστο και άκρως ενδιαφέρον, πάντα με τη βοήθεια όλων όσων με βοήθησαν.

Στο τέλος ακριβώς αυτής της προσπάθειας θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με κάθε τρόπο συνέβαλλαν στην περάτωση αυτής της εργασίας:

- Τον καθηγητή κ. Θ. Μαρκόπουλο, που εμπνεύσθηκε την ιδέα του θέματος και στη συνέχεια εμπιστεύτηκε την υλοποίηση της σε μένα.
- Τη Δρ. Ε. Ρεπούσκου και τον επίκουρο καθηγητή Γ. Αλεβίζο, για την πολύτιμη τους βοήθεια στην αξιολόγηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων και την υπομονή τους στην καθοδήγηση της συγγραφής.
- Τη Π. Ροτόντο και Γ. Τριανταφύλλου, χωρίς των οποίων τη συνδρομή η διεκπεραίωση της εργασίας θα ήταν ανέφικτη.
- Τον Στ. Μαυριγιαννάκη και Δ. Μαρινάκη για τη διεξαγωγή των απαραίτητων για την εργασία πειραματικών δοκιμών.
- Τον Γ. Αποστολάκη για τη παρασκευή των απαιτούμενων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές.
- Τον αρχαιολόγο Μ. Ζερλέντη, για τα πολύτιμα βιβλία και εργασίες που μου εμπιστεύθηκε.
- Τον πατέρα μου, Δ. Μαντικό, για την προσωπική έρευνα και ενασχόληση.
- Τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους τους φίλους που μου στάθηκαν ηθικά, υλικά και λειτούργησαν εμψυχωτικά σε όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς

Ο πολιτισμός της κάθε κοινωνίας διαμορφώνεται αλλά και μετασχηματίζεται στο πέρασμα του χρόνου. Όσοι ασχολούνται με την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς έρχονται, συνήθως, αντιμέτωποι με προβλήματα που όχι μόνο δεν επιδέχονται μία και μοναδική, καθολικά αποδεκτή, λύση αλλά που οδηγούν σε αδιέξοδα εξαιτίας της ιδιάζουσας σχέσης μεταξύ υλικού πολιτισμού και τεχνολογίας, κομμάτι της οποίας αποτελούν και οι ίδιοι.

Το ζήτημα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς προκαλεί και αναδεικνύει ένα όχι καινούριο θέμα. Εκείνο της συνύπαρξης του υλικού πολιτισμού – και του πολιτισμού γενικότερα – μέσα από τα όσα ανά τους αιώνες έχουν καταχωρηθεί ως πολιτισμικό απόθεμα, και της τεχνολογίας, των τεχνικών, των υλικών, των εξελιγμένων μεθόδων που τον διαμόρφωσαν. Τα διάφορα τεχνήματα έχουν κατασκευαστεί με μέσο την τεχνολογία. Με τη συνδρομή των διαφόρων τεχνολογικών μεθόδων υπάρχει δυνατότητα να παραταθεί ο χρόνος που τα δημιουργήματα αυτά θα συνεχίσουν να υφίστανται.

Η φροντίδα και προστασία για τα έργα του παρελθόντος πήρε τη μορφή αιτήματος όταν ήδη από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα παρουσιάστηκαν οι αρνητικές συνέπειες της βιομηχανικής επανάστασης, για το φυσικό και το δομημένο περιβάλλον.

Σήμερα το ζήτημα αντιμετωπίζεται σε διαφορετική κλίμακα ενώ ταυτόχρονα υπεισέρχονται νέα δεδομένα σε κάθε προσπάθεια προσέγγισης του.

Η σημασία που αποδίδεται και σήμερα στα κληροδοτημένα από το παρελθόν έργα βασίζεται σε κριτήρια μοναδικότητας, αξίας ως ιστορικών συμβόλων, καλλιτεχνικής αξίας και παιδευτικού δυναμικού. Επιπλέον στο αίτημα της προστασίας των μνημείων δίνει κρίσιμο χαρακτήρα η ραγδαία υποβάθμιση τού περιβάλλοντος, φυσικού και ανθρωπογενούς, που σημειώνεται με τη βιομηχανική ανάπτυξη και τη διόγκωση των αστικών κέντρων.

Η διατήρηση και ανάδειξη της πολιτιστικής και αρχιτεκτονικής κληρονομιάς είναι εθνική ανάγκη. Από αυτήν την ανάγκη προέκυψε η αναζήτηση νέων, καινοτόμων υλικών τα οποία πληρούν τους κανόνες δεοντολογίας για τις επεμβάσεις της συντήρησης των μνημείων. Ο τεχνητός πωρόλιθος αποτελεί ένα από αυτά τα υλικά. Η αποτελεσματικότητά του, παρουσιάζεται στην παρούσα τεχνική έκθεση βάσει επιστημονικών δεδομένων και πειραματικών αποτελεσμάτων.

1.2 Η φθορά της πέτρας στο πέρασμα του χρόνου

Το μεγαλύτερο μέρος της πολιτιστικής μας κληρονομιάς βρίσκεται αποτυπωμένο στην πέτρα. Αποτελώντας το πιο διαδεδομένο φυσικό υλικό δόμησης, η πέτρα, όπως και οτιδήποτε άλλο στη φύση, φθείρεται. Η φθορά της πέτρας περιλαμβάνει όλες εκείνες τις διεργασίες που συμβάλλουν στην αλλοίωση του χημικού χαρακτήρα, της αισθητικής, των διαστάσεων και της αντοχής της.

Η διεργασία της διάβρωσης της πέτρας ξεκινά με την ολοκλήρωση ενός κτιρίου και αποτελεί μία απόλυτα φυσική διαδικασία. Η ένταση της καθώς και τα φαινόμενα που την ελέγχουν εξαρτώνται από τον τύπο της πέτρας και από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην αύξηση του ρυθμού φθοράς των μνημείων. Το παλάτι του Μεγάλου Μαγίστρου και τα δημόσια κτίρια του Δήμου Ροδίων, δυστυχώς, δεν αποτελούν εξαίρεση στον κανόνα της φθοράς των ιστορικών μνημείων.

1.3 Οι κατηγορίες των δομικών υλικών των μνημείων

Η γνώση του είδους των δομικών υλικών των διαφόρων κατασκευών καθώς επίσης ο τρόπος με τον οποίο σχηματίστηκαν ή παρασκευάστηκαν και οι ιδιότητες τους, αποτελεί το πρωταρχικό στάδιο για οποιοδήποτε πρόγραμμα προστασία τους. Τα υλικά αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

Φυσικά υλικά: Πρόκειται για δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται χωρίς να αλλοιωθεί η χημική και κρυσταλλική σύσταση ή η δομή των μορίων της αντίστοιχης πρώτης ύλης, απ'όπου προήλθαν. Τέτοια υλικά είναι οι πέτρες που προέρχονται από μηχανική μόνο επεξεργασία της αντίστοιχης πρώτης ύλης (πέτρωμα, ορυκτό υλικό). Ακόμα στην ίδια κατηγορία περιλαμβάνεται το ξύλο, το δέρμα, το ύφασμα στην περίπτωση κατά την οποία διατηρούν σε γενικές γραμμές την αρχική χημική σύσταση και δομή τους ανεξάρτητα από μερικές πρόσθετες – πέρα από τις μηχανικές – επεξεργασίες.

Τεχνητά υλικά: Πρόκειται για δομικά υλικά που παρασκευάζονται από πρώτες ύλες οι οποίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλοιώσεις της χημικής και κρυσταλλικής τους σύστασης και της δομής των μορίων τους. Τέτοια υλικά είναι τα μέταλλα και τα κράματα, τα οποία προέρχονται από τα μεταλλεύματα, ο ασβέστης και ο γύψος. Στην κατηγορία των τεχνητών υλικών ανήκουν και τα τεχνητά υλικά που δεν προέρχονται από ένα συγκεκριμένο πέτρωμα, μετάλλευμα ή ορυκτό. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από πολλές πρώτες ύλες. Στην ομάδα αυτή ανήκουν οι διάφοροι τύποι τσιμέντου, τα κονιάματα, το σκυρόδεμα, το γυαλί, το τούβλο, το κεραμίδι και τα πολυμερή.^[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΙΘΟΣ ΠΩΡΙΝΟΣ

2.1 Τα ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα (sedimentary rocks) σχηματίζονται από την καθίζηση ουσιών που βρίσκονται εν διαλύσει ή εν αιωρήσει σε ρευστό μέσο, κυρίως νερό και άνεμο. Η καθίζηση των συστατικών μπορεί να είναι άμεση είτε έμμεση, οπότε παρεμβάλλονται και άλλοι παράγοντες και μάλιστα ο οργανικός κόσμος.^[2]

Στην περίπτωση αυτή, τα συστατικά που βρίσκονται μέσα στο νερό παραλαμβάνονται από τον οργανικό κόσμο και μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα καθιζάνουν. Συνεπώς για το σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων πρέπει πρώτα να γίνει καταστροφή και αποσάθρωση του πετρώματος και στη συνέχεια μεταφορά και απόθεση του υλικού· αυτά είναι δυνατό να είναι ασύνδετα (άμμος, κροκάλες, ιλύς κλπ.) ή να αποτελούν συμπαγή πετρώματα.^[3]

Το ουσιώδες γνώρισμα των ιζηματογενών πετρωμάτων (sedimentary rocks) είναι η στρώση η οποία επιτυγχάνεται στο στάδιο της απόθεσης λόγω της διαβάθμισης των υλικών της αποσάθρωσης.^[2]

Τα ιζηματογενή πετρώματα διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο γενέσεως σε:

- ❖ Μηχανικά ή κλαστικά ιζήματα
- ❖ Χημικά ιζήματα
- ❖ Βιοχημικά ιζήματα

2.2 Βιοχημικά ιζήματα

Τα βιοχημικά ιζήματα είναι χημικά είτε και εν μέρει κλαστικά ιζήματα, τα οποία σχηματίζονται με την με οποιοδήποτε τρόπο παρέμβαση του οργανικού κόσμου, ζωικού ή φυτικού. Τα προϊόντα που προκύπτουν μπορεί να διατηρούν ίχνη του οργανικού κόσμου ή να υπέστησαν βαθύτερη επεξεργασία, ή να μη φέρουν κανένα ίχνος τους.

Ο οργανικός – ζωικός και φυτικός – κόσμος παραλαμβάνει διάφορες ανόργανες ουσίες από το άμεσο περιβάλλον του για την κατασκευή κελυφών, οστέων, σκελετών κλπ. Μετά το θάνατο του ζώου ή του φυτού τα λείψανα αποτίθενται, συγκεντρώνονται και σχηματίζουν υλικά συστατικά των πετρωμάτων (π.χ. πρωτόζωα, μλάκια, κοράλλια, φύκη κλπ.).

Ορισμένα φύκη παραλαμβάνουν από το περιβάλλον το απαραίτητο για αυτά CO_2 και έτσι συντελούν στην καθίζηση του CaCO_3 με τη μεταβολή του $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ σε ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) μη διαλυτό. ^[4]

Ανάλογα με τη χημική σύσταση διακρίνονται στη συνέχεια τα βιοχημικά ιζήματα σε ασβεστολιθικά έως δολομιτικά, σε πυριτικά, φωσφορούχα, άνθρακες και βιτουμενιούχα ιζήματα.

2.3 Τα ανθρακικά πετρώματα

Τα ανθρακικά ιζήματα (carbonate sediments) έχουν προέλευση χημική αλλά και βιογενή ενώ αποτελούν το 25% των ιζηματογενών πετρωμάτων. Έχουν ποικίλο χρώμα, τεφρό, λευκό, ερυθρό, καστανό, μαύρο, υποκίτρινο.

Τα χαρακτηριστικότερα γνωρίσματα των ανθρακικών πετρωμάτων είναι τα εξής:

- ❖ Οι κόκκοι αποτελούνται από δύο μεγέθη: μέγεθος άμμου έως μεσόκοκκης ιλύος, μέγεθος λεπτόκοκκης ιλύος έως αργίλου
- ❖ Τα σκελετικά συστατικά των οργανισμών στο σχηματισμό τους.
- ❖ Ο σχηματισμός τους σε αβαθή ύδατα (μέχρι βάθους 15 m).
- ❖ Ο ρυθμός ιζηματογένεσης που σχηματίζει λεπτά ή παχιά στρώματα.

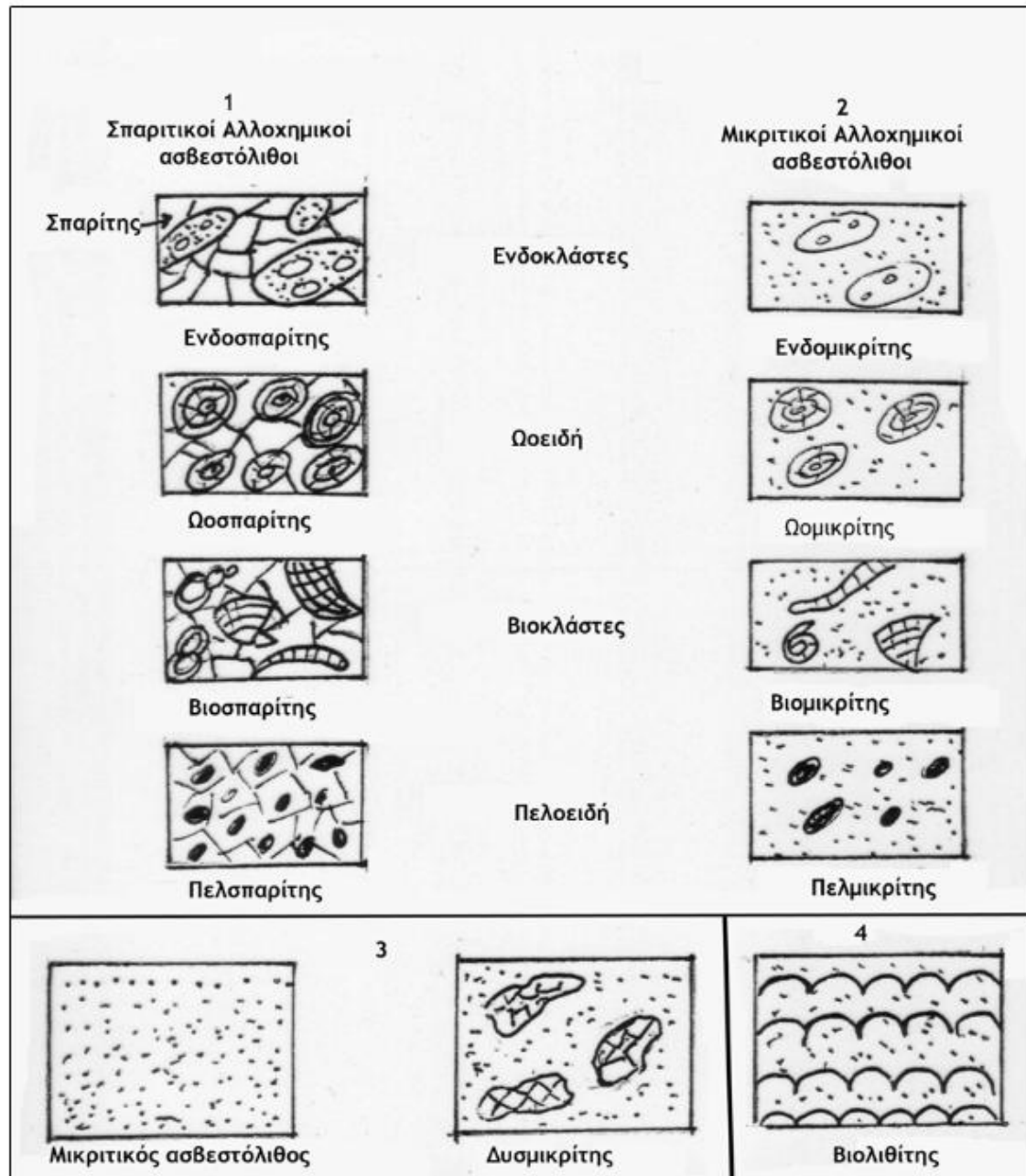
Τα ορυκτά που περιέχουν την ανθρακική ρίζα (CO_3)⁻² είναι εξήντα περίπου στη φύση. Ο ασβεστίτης και ο αραγωνίτης είναι αρκετά διαδεδομένα στα ιζήματα νεώτερης ηλικίας. Στα παλαιότερα απαντούν ο ασβεστίτης, ο δολομίτης ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$), ενώ η απουσία του αραγωνίτη οφείλεται στη διάλυση και ασντικατάσταση του από άλλα ορυκτά. ^[5]

2.4 Ασβεστόλιθοι

Οι ασβεστόλιθοι (limestones) περιέχουν τουλάχιστον 90% ασβεστίτη και μέχρι 10% δολομίτη. Σε μικρές αναλογίες περιέχουν χαλαζία, χαλκηδόνιο, αστρίους, αργιλικά ορυκτά, σιδηρίτη και σιδηροπυρίτη.

Οι ασβεστόλιθοι είναι κλαστικοί, χημικοί ή βιογενείς, κρυσταλλικοί ή ανακρυσταλλωμένοι. Από οικονομική άποψη είναι σημαντικοί. Οι πόροι τους αποτελούν χώρους συγκέντρωσης πετρελαίων και φυσικών αερίων. Πολλές φορές αποτελούν δεξαμενές συγκέντρωσης υπεδάφινων υδάτων. Μεγάλες ποσότητες ασβεστολίθων χρησιμοποιούνται ως δομικοί λίθοι. ^[2]

Ακολουθεί εικόνα με τους βασικούς ασβεστολιθικούς τύπους, την ταξινόμηση των ανθρακικών πετρωμάτων βάσει του ιστού απόθεσής τους και πίνακας με τους μικροφασικούς τύπους ασβεστολίθων.



Εικόνα 2.1: Βασικοί ασβεστολιθικοί τύποι κατά Folk (1959).^[6]

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΤΟ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥΣ (κατά DUNHAM, 1962)					
ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΙΜΟΣ ΙΣΤΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ					ΜΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΙΜΟΣ ΙΣΤΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ <u>Κρυσταλλικά ανθρακικά</u> (υποδιαιρούνται σύμφωνα με ταξινομήσεις αναφερόμενες στον φυσικό ή τη διαγένεση)
Αρχικά συστατικά μη συνδεδεμένα κατά την απόθεση (arenite και silt)				Τα αρχικά συστατικά ήταν συνδεδεμένα κατά την απόθεση.... όπως φαίνεται από την παρουσία περιπλεγμένου σκελετικού υλικού, στρώση αντίθετη προς τη βαρύτητα ή κοιλότητες στρωμένες με ίζημα που καλύπτονται από οργανικό ή αμφισβητούμενο οργανικό υλικό, που είναι πολύ μεγάλες για να αποτελούν ενδιάμεσα διάκενα. <u>Boundstone</u>	
Περιέχει ιλύ (σωμάτια μεγέθους clay και silt)		Κοκκο - στηριζόμενο	Στερείται ιλύος και είναι κοκκο- στηριζόμενο		
Ιλυο-στηριζόμενο					
Ποσοστό κόκκων <10%	Ποσοστό κόκκων >10%				
<u>Mudstone</u>	<u>Wackestone</u>	<u>Packstone</u>	<u>Grainstone</u>		

Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση ανθρακικών πετρωμάτων σύμφωνα με τον ιστο απόθεσης (Dunham, 1962).^[6]

SMF	Λιθολογία	Περιβάλλον/Ζώνη
1	Σκούρος αργιλώδης mudstone ή wackestone πλούσιος σε οργανικό υλικό ή ασβεστόλιθος με βελόνες πυριτικής σύστασης (spiculite). Οι βελόνες συχνά έχουν αντικατασταθεί από ασβεστίτη.	Λεκάνη, βαθύ περιβάλλον με μικρή ταχύτητα ιζηματογένεσης.
2	Πολύ λεπτοκρυσταλλικός grainstone ή packstone με μικρούς βιοκλάστες και πελοειδή και διασταυρωμένες στρώσεις.	Υφαλοκρηπίδα ανοιχτής θάλασσας κοντά στο κατώτερο τμήμα της ηπειρωτικής κατωφέρειας. Βαθύτερο όριο υφαλοκρηπίδας.
3	Πελαγικός mudstone και wackestone. Η μικριτική ιλής περιέχει διάσπαρτα πελαγικά μικροαπολιθώματα (πχ ραδιολάρια ή τρηματοφόρα Globigerinids) ή μακροαπολιθώματα (θραύσματα μαλάκων).	Λεκάνη, βαθύ περιβάλλον με αργή ιζηματογένεση ή βαθύτερο όριο υφαλοκρηπίδας.
4	Μικρολατυποπαγής ή βιοκλαστικός-λιθοκλαστικός packstone. Στρογγυλεμένοι κόκκοι, συνήθως ταξινομημένοι. Πολύμεικτος ή μονόμεικτος. Συμμετέχει κλαστικό υλικό (χαλαζίας, θραύσματα κερατολίθων και ασβεστόλιθων).	Επανιζηματογενείς ασβεστόλιθοι-foreslope.
5	Grainstone-packstone ή floatstone με υφαλογενείς βιοκλάστες και γεωπεταλική δομή.	Παρεία υφάλου.
6	Υφαλογενής rudstone με μεγάλους βιοκλάστες και με υφαλογενή θραύσματα. Δε συμμετέχει ιλύς.	Έμπροσθεν κατωφέρεια υφάλου. Υλικά από τον ύφαλο. Σύνηθες σε ζώνες υψηλής ενέργειας.
7	Bounstone. In situ ανάπτυξη οργανογενών δομών (framestone, bindstone, bafflestone).	Υφαλογενής σχηματισμός στα περιθώρια της πλατφόρμας.
8	Wackestone με ολόκληρους οργανισμούς μέσα σε μικριτική μάζα. Λίγοι βιοκλάστες.	Λιμνοθάλασσα υφαλοκρηπίδας με ανοικτή κυκλοφορία. Χαμηλή ενέργεια υδάτων, κάτω από τη βάση των κυμάτων.
9	Βιοκλαστικός wackestone ή βιοκλαστικός μικρίτης. Θραύσματα διαφόρων οργανισμών που έχουν ομοιογενοποιηθεί με βιοαναμόχλευση. Μικριτίωση των βιοκλαστών.	Ρηχά ύδατα με ανοικτή κυκλοφορία, στο επίπεδο κυμάτων ή κοντά σε αυτά.

10	Packstone-wackestone με επιφλοιωμένους και διαβρωμένους βιοκλάστες.	Οι κόκκοι προέρχονται από περιβάλλον υψηλής ενέργειας και έχουν μετακινηθεί προς τοπικές κατωφέρειες σε χαμηλής ενέργειας περιβάλλοντα.
11	Grainstone με επιφλοιωμένους βιοκλάστες σε σπαριτικό τσιμέντο.	Αποπλυμένες άμμοι στο άκρο της πλατφόρμας. Στις περιοχές αυτές είναι σταθερή η ενέργεια των κυμάτων στο ή πάνω από το επίπεδο της βάσης των κυμάτων.
12	Coquina, βιοκλαστικός packstone, grainstone ή rudstone με συγκεντρώσεις οργανισμών. Επικρατούν μερικοί τύποι οργανισμών (πχ κρινοειδή, ασβεστολιθικά φύκη).	Κατωφέρεια και άκρο της υφαλοκρηπίδας.
13	Grainstone με ογκοειδή (ογκοσπαρίτης).	Περιοχές μέτριας ενέργειας, πολύ ρηχά ύδατα.
14	Lags. Συγκέντρωση επιφλοιωμένων και στρογγυλοποιημένων κόκκων (λιθοκλάστες), κατά θέσεις αναμεμειγμένα με ωοειδή και πελοειδή, έντονα εμποτισμένων με οξείδια Fe κατά μήκος λεπτοστρώσεων.	Αργή απόθεση αδρομερούς υλικού σε ζώνη απόπλυσης.
15	Ωόλιθοι με καλά ταξινομημένα και καλοσχηματισμένα ωοειδή διαμέτρου 0,5-1,5 mm. Πάντα με διασταυρωμένες στρώσεις. Ιστός στοιβαγμένος.	Υψηλής ενέργειας περιβάλλον σε ωολιθικά αναχώματα, ακτές και παλιρροιακά αναχώματα.
16	Grainstone με πελοειδή (πιθανότατα κοπρόλιθοι), κατά θέσεις αναμεμειγμένος με συγκεντρώσεις οστρακωδών ή τρηματοφόρων.	Πολύ ζεστά ρηχά ύδατα με μέτρια κυκλοφορία.
17	Grapestone (βοτρυόλιθος), πελσπαρίτης ή grainstone με συσσωματώματα κόκκων, μεμονωμένα και συγκολλημένα πελοειδή και μερικούς επιφλοιωμένους κόκκους.	Υφαλοκρηπίδα με περιορισμένη κυκλοφορία και περιπαλιρροιακά επίπεδα.
18	Grainstone με τρηματοφόρα ή dasycladaceae.	Παλιρροιακά αναχώματα και κανάλια λιμνοθάλασσας.
19	Λοφερίτης, λεπτοστρωσιγενής mudstone-wackestone που κατά περίπτωση εξελίσσεται σε πελσπαρίτη με παραθυροειδής δομές. Οστρακώδη και πελοειδή, λίγα διάσπαρτα τρηματοφόρα, γαστερόποδα και φύκη.	Περιορισμένοι κόλποι και μικρές λίμνες.

20	Στρωματολιθικός mudstone με φύκη.	Συχνά στη μεσοπαλιρροιακή ζώνη.
21	Δομές φυκών σε λεπτοκρυσταλλικό μικριτικό ίζημα.	Περιπαλιρροιακές μικρές λίμνες.
22	Μικρίτης με μεγάλα ογκοειδή, wackstone ή floatstone.	Χαμηλής ενέργειας περιβάλλοντα, ρηχά ύδατα, όπισθεν τού υφάλου. Συχνά στην άκρη λιμνών ή καναλιών.
23	Μη λεπτοστρωσιγενής, ομογενής, μη απολιθωματοφόρος καθαρός μικρίτης, πιθανή η παρουσία εβαποριτικών ορυκτών.	Λίμνες περιπαλιρροιακού περιβάλλοντος υψηλής αλμυρότητας.
24	Rudstone ή floatstone με αδρομερείς λιθοκλάστες και βιοκλάστες. Οι λιθοκλάστες συνήθως συνίστανται από μη απολιθωματοφόρο μικρίτη ή ασβεστοσιλίτη. Ιλύς απαντά σποραδικά. Ενίοτε διασταυρωμένες στρώσεις.	Ενδολατυποπαγή (intraformational breccia). Συσσώρευση υλικού σε παλιρροιακά κανάλια (lags).

Πίνακας 2.1: Standard μικροφασικοί τύποι κατά Wilson και Flugel. ^[6]

2.5 Φυσικοί δομικοί λίθοι

2.5.1 Γενικά

Οι φυσικοί λίθοι προέρχονται από τα πετρώματα των επιφανειακών στρωμάτων του στερεού φλοιού της γης και λαμβάνονται στα λατομεία με εξόρυξη. Οι φυσικοί λίθοι χρησιμοποιούνται κυρίως στη δόμηση τοιχοποιίας. Η χρήση τους, όμως, είναι περιορισμένη επειδή έχουν μεγάλο ειδικό βάρος και παρουσιάζουν σχετικά υψηλή θερμοαγωγιμότητα. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ανωδομή ως επένδυση διάφορων στοιχείων των κατασκευών, όπως και στην κατασκευή μνημείων, αφού υποστούν κατάλληλη κατεργασία.

2.5.2 Κατηγορίες φυσικών δομικών λίθων

Οι φυσικοί δομικοί λίθοι υποβάλλονται, μετά την εξόρυξή τους, σε ορισμένες ειδικές κατεργασίες με σκοπό να αποκτήσουν το κατάλληλο σχήμα και διαστάσεις , ώστε να παρουσιάζουν την επιθυμητή εμφάνιση στις ορατές επιφάνειες των κατασκευών.

Ανάλογα με το βαθμό κατεργασίας τους κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες.

Αργοί. Είναι ακατέργαστοι λίθοι από τα λατομεία , οι οποίοι επεξεργάζονται πρόχειρα από τον τεχνίτη στο εργοτάξιο για την καλύτερη προσαρμογή τους στις κατασκευές. Οι αργοί είναι κοινοί λίθοι δόμησης.

Τυκτοί. Είναι λίθοι με χονδροειδή επεξεργασία στα λατομεία για την απόκτηση κανονικού σχήματος. Στη συνέχεια, κατεργάζονται από τον τεχνίτη στο εργοτάξιο, ώστε να παρουσιάζουν επίπεδες έδρες στην ορατή επιφάνειά τους στις κατασκευές (γωνιόλιθοι).

Ημιλάξευτοι. Είναι λίθοι οι οποίοι λαξεύονται στο εργοτάξιο, ώστε οι επιφάνειες που θα είναι ορατές στις κατασκευές να είναι επίπεδες.

Λάξευτοί. Είναι λίθοι με πολύ επιμελημένη λάξευση στο εργοτάξιο, ώστε να ομαλοποιηθούν τελείως οι επίπεδες επιφάνειες. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές μνημείων και σε κατασκευές όπου οι επιφάνειες δεν επιχρίονται για αισθητικούς λόγους.

Μηχανικά κατεργασμένοι φυσικοί δομικοί λίθοι. Είναι λίθοι, οι οποίοι κατεργάζονται στο λατομείο σε κανονικές τυποποιημένες διαστάσεις με τη βοήθεια κοπτικών μηχανημάτων και χρησιμοποιούνται για την επένδυση στοιχείων των κατασκευών. Η κατεργασία γίνεται σε μάρμαρα και μαλακούς ασβεστόλιθους ή πωρόλιθους, όπως π.χ. λευκοί λίθοι με φλέβες και χρωματιστοί, ψευδομάρμαρα κ.λ.π.

Πλάκες. Είναι λίθοι από σχιστολιθικά πετρώματα με φυσικές επιφάνειες σχισμού ή σχισμού με μηχανικά μέσα. Οι δύο διαστάσεις των πλακών είναι πολύ μεγαλύτερες από το πάχος τους. Συνήθως, έχουν πάχος 2÷5 cm ή και μικρότερο από 2 cm. Πλάκες

λαμβάνονται και από τα μάρμαρα με πάχος μέχρι και 8 mm. Οι λεπτές αυτές πλάκες χρησιμοποιούνται σε πολυτελείς επενδύσεις. Για την αύξηση των μηχανικών αντοχών τους επικολλώνται σε πλάκες από υλικά ξύλου και φέρονται στο εμπόριο σε τυποποιημένες διαστάσεις. Οι πλάκες ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε πλάκες επένδυσης, πλάκες επίστρωσης, πλάκες στέγασης και πλάκες διακόσμησης.^[7]

2.6 Πορώδη υλικά

Τα κυριότερα δομικά χαρακτηριστικά ενός πορώδους υλικού, όπως το πορώδες, τα σχήματα και τα μεγέθη των πόρων καθώς επίσης και ο τρόπος αλληλοσύνδεσης των πόρων μεταξύ τους, σχετίζονται με τις διαδικασίες που οδήγησαν στη δημιουργία του υλικού. Έτσι επικαθητικές και διαγενετικές διαδικασίες που συνέβαιναν για εκατομμύρια χρόνια ή συνεχίζουν να συμβαίνουν ακόμη, καθορίζουν την πολύπλοκη πορώδη δομή των ιζηματογενών πετρωμάτων.

Οι φυσικές ιδιότητες των πορώδων υλικών όπως π.χ. η διαπερατότητα, επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τα δομικά χαρακτηριστικά των πόρων. Γι' αυτόν το λόγο η μελέτη της δομής των πορώδων υλικών παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον. Αποτελεί ουσιαστικά ένα θεμελιώδες βήμα στον καθορισμό των σχέσεων ανάμεσα στις δομικές παραμέτρους του υλικού και τις ιδιότητες του, ενώ ταυτόχρονα θέτει τις βάσεις σε οποιαδήποτε προσπάθεια βελτίωσης αυτών των ιδιοτήτων.^[8]

2.7 Φυσικός πωρόλιθος

2.7.1 Εισαγωγικά

Ο όρος πωρόλιθος ή πώρος ή λίθος πώρινος, περιλαμβάνει κατά περιοχές πετρώματα διαφορετικής ποιότητας, μαλακά με ερυθροκίτρινο χρώμα που μπορούν να δουλευτούν με το σκαρπέλο, καθώς και τόφφους και απολιθωματοφόρους ασβεστόλιθους κυρίως γκρίζου χρώματος, η σκληρότητα των οποίων αυξάνεται με την παραμονή τους στον αέρα.

Κατά την αρχαϊκή, αλλά και την κλασσική περίοδο, χρησιμοποιούνταν πολλά είδη πωρόλιθου, όπως κογχυλιάτης πωρόλιθος, υποκίτρινος αλλά ελαφρά σκληρός, περιέχοντας πολλά απολιθωμένα κοχύλια. Χαρακτηριστικά κτίσματα από αυτόν τον τύπο πωρόλιθου είναι ο ναός τού Δία στην Ολυμπία και της Αθηνάς στην Αλίφειρα. Άλλο είδος πωρόλιθου που χρησιμοποιούνταν ευρέως είναι ο καστανέρυθρος ωολιθικός πωρόλιθος καθώς και ο υποκίτρινος Αιγινίτης.

Εξωτερικά τα πώρινα μέλη δέχονταν ένα λεπτό στρώμα επιχρίσματος (stucco). Το πάχος τού επιχρίσματος ήταν συνήθως λεπτό, ενώ η χρήση του είχε ως στόχο να εξομαλύνει τις μικρές, φυσικές κοιλότητες, τους αρμούς, καθώς και να προστατεύσει την επιφάνεια από την υγρασία και να διευκολύνει την τοποθέτηση των χρωμάτων. Ο πωρόλιθος, χρησιμοποιούνταν για τα ορατά μέρη των κτιρίων, ενώ αργότερα με τη διάδοση της χρήσης τού μαρμάρου, χρησιμοποιούνταν κυρίως για γεμίσματα ή δομές ή δευτερεύοντα αρχιτεκτονικά μέλη, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι δε χτίζονταν και κτίρια εξ'ολοκλήρου από πωρόλιθο, όπως για παράδειγμα το Αφροδίσιο της Επιδαύρου ή το Γυμνάσιο της Σικυώνος.^[9]

2.7.2 Διαγένεση και χαρακτηριστικά φυσικού πωρόλιθου

Ο φυσικός πωρόλιθος είναι βιοκλαστικός ασβεστόλιθος και αποτελεί κλασσικό ίζημα με συγκολλητικό υλικό ανθρακικής σύστασης.

Τα κλασσικά απολιθωματοφόρα ιζήματα και συγκεκριμένα τα ιζηματογενή είναι πετρώματα που αποτελούνται από κλασσικό υλικό, προερχόμενο είτε από κάποιο προγενέστερο μητρικό πέτρωμα, είτε από κελύφη και σκελετούς διαφόρων οργανισμών. Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό συνέχεται με συγκολλητική ύλη που ποικίλλει σε ένα ευρύ φάσμα.

Το συνδετικό ή συγκολλητικό υλικό των βιοκλαστικών ιζημάτων προέρχεται από τα διαλυμένα στο νερό άλατα που κυκλοφορούν στους πόρους αυτών των σχηματισμών και αποτίθενται μέσα στους κόκκους σαν φυσικό τσιμέντο. Η αντοχή και γενικά η ποιότητα

μιας τέτοιας πέτρας εξαρτάται τόσο από το «βαθμό συγκόλλησης», όσο και το είδος του συγκολλητικού υλικού. Η ποσότητα του συνδετικού υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την τιμή του πορώδους.^[10]

Ο κανονισμένος φυσικός πωρόλιθος λαμβάνεται με κόψιμο ή λάξευση εξορυγμένων ογκολίθων φυσικού πωρόλιθου ενδεδειγμένης μηχανικής αντοχής και χρησιμοποιείται για ειδικές τοιχοποιίες ή επενδύσεις αυτών.

Η μηχανική αντοχή του φυσικού πωρόλιθου όπως τον βρίσκουμε στη φύση προέρχεται κατόπιν πιέσεων από τα υπερκείμενα στρώματα γης και συγκόλλησης της άμμου με διάφορες φυσικές κολλητικές ουσίες μετά παρέλευση αιώνων.

Για την εξόρυξη ογκολίθων φυσικού πωρόλιθου απαιτείται ειδικός λατομικός χώρος όπου είναι δυνατόν να βρεθεί φυσικός πωρόλιθος ενδεδειγμένης μηχανικής αντοχής και όχι σαθρός.

Ο φυσικός πωρόλιθος διαβρώνεται εύκολα στην όξινη βροχή, στον ήλιο, στον αέρα, στην υγρασία, στην αλμύρα της θάλασσας και καταστρέφεται λόγω μειωμένης μηχανικής αντοχής.

2.8 Τεχνητοί λίθοι

2.8.1 Γενικά

Από την Αναγέννηση έως σήμερα οι μηχανικοί και οι αρχιτέκτονες δοκίμασαν τη χρήση τεχνητών υλικών για να προσδώσουν στα έργα τους μεγαλύτερη διάρκεια στο χρόνο. Αρχικιά δοκίμασαν να αντιγράψουν τη φυσική πέτρα με μίγματα ασβέστη. Η χρήση της τεχνητής πέτρας διαδόθηκε συγχρόνως με την εκτεταμένη χρήση του τσιμέντου, με επιτυχία στο πεδίο της συντήρησης και αποκατάστασης ιστορικών μνημείων. Χαρακτηρίστηκε δε ως το «τέλειο αποτέλεσμα της μοντέρνας εφευρετικότητας.

Η επιτυχής παρασκευή της τεχνητής πέτρας είναι δυνατή μόνο με την εισαγωγή του τσιμέντου στην κατασκευαστική διαδικασία. Τα αμμοκονιάματα που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο, μπορούν πράγματι να χρωματισθούν κατά το δοκούν, με κατάλληλη δοσολογία χρωστικών ουσιών σε σκόνη, κωδικοποιημένων βάσει των τόνων των χρωμάτων του φυσικού υλικού που επιθυμείται η αντιγραφή.

Τα αισθητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη χρήση του τσιμέντου στην τεχνητή πέτρα είναι αποτελεσματικά. Επιπρόσθετα, αντίθετα με τον ασβέστη που στερεοποιείται επιφανειακά, το τσιμέντο στερεοποιείται ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του. Γι' αυτόν το λόγο ένα καλό χειροποίητο προϊόν τσιμέντου, κατασκευασμένο στο εργοτάξιο ή επί τόπου, είναι δεκτικό όλων των τυπικών εργασιών σκαλίσματος που κανονικά εφαρμόζονται στο φυσικό λίθο. Μάλιστα δε, για να διευκολυνθεί το σκάλισμα πρέπει αυτό να πραγματοποιηθεί πριν το τσιμέντο να φτάσει στη μέγιστη σκληρότητα του. ^[11]

2.8.2 Παραγωγή τεχνητής πέτρας με αμμοκονιάματα τσιμέντου

Η χρήση φυσικού πετρώματος ως βασικού δομικού και διακοσμητικού υλικού σε καινούριες κατασκευές λιγοστεύει συνεχώς, κυρίως για οικονομικούς λόγους. Αντίθετα ο τεχνητός λίθος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σήμερα στις περιπτώσεις επισκευής και συντήρησης διατηρητέων πετρόκτιστων κατοικιών που αναδεικνύουν την παραδοσιακή αρχιτεκτονική κληρονομιά καθώς και στην υποχρεωτική επισκευή και συντήρηση λίθινων ιστορικών κατασκευών και μνημείων που έχουν ιστορική σημασία.

Μόλις έγιναν αντιληπτές οι κατασκευαστικές δυνατότητες του τσιμέντου, που προέρχονται από την υδραυλική του στερεοποίηση και από τις ικανότητες του σε σκλήρυνση και διάρκεια, δημιουργείται αυθόρμητα η τάση αναπαραγωγής της πέτρας με τη χρήση έγχρωμων αμμοκονιαμάτων.

Μια τεχνολογία ειδικού ενδιαφέροντος και πολυπλοκότητας είναι η απομίμηση κατά τα μέγιστα του τραβερτίνη. Αυτή η απομίμηση επιτυγχάνεται με την προσθήκη κόκκων χονδρού αλατιού στο αμμοκονίαμα. Η πιο έμπειρη τεχνική για να επιτευχθεί ακόμα καλύτερη απομίμηση, είναι το «πασπάλισμα» των κόκκων με οξείδια του σιδήρου, έτσι ώστε με την επαφή με το νερό του μίγματος και το βρέξιμο στη συνέχεια, να δημιουργούνται κοιλότητες χρώματος κόκκινο-κίτρινο, χαρακτηριστικές του τραβερτίνη. Πάντα με τη χρήση των έγχρωμων αμμοκονιαμάτων τσιμέντου είναι δυνατή η πραγματοποίηση της τέλει απομίμησης και του τεχνητού πωρόλιθου. ^[11]

2.9 Τεχνητός πωρόλιθος

2.9.1 Η αναγκαιότητα χρήσης τεχνητού πωρόλιθου

Η ανάγκη εύρεσης ενός τεχνητού υλικού που θα αντικαθιστούσε κατά το δυνατόν το φυσικό πέτρωμα, που καλείται πωρόλιθος, έγινε επιτακτική στις αρχές της δεκαετίας του 90'. Η απαγόρευση λατομείων φυσικού πωρόλιθου για λόγους περιβαλλοντολογικούς, ανεξάρτητα αν εκείνοι ευσταθούν ή όχι, ήταν ένας από τους κύριους λόγους που κίνησαν τη διαδικασία ούτως ώστε να βρεθεί ένα υλικό που θα πληροί μια σειρά προϋποθέσεων προκειμένου να έχει τα ίδια αποτελέσματα και συμπεριφορά με τη φυσική πέτρα.

Το καινούριο, λοιπόν, τεχνητό υλικό θα πρέπει να έχει φυσικομηχανικές ιδιότητες κατά το δυνατόν συμβιβαστές με αυτές του πωρόλιθου, να παρουσιάζει την ίδια αισθητική εμφάνιση. Για τη συντήρηση ιστορικών και αρχαιολογικών μνημείων, ειδικότερα, το υλικό αυτό επιβάλλεται να έχει ένα είδος προστατευτικού επιστρώματος απέναντι στους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, τη σκόνη και τους βιολογικούς παράγοντες και να ικανοποιεί την αρχή της αναστρεψιμότητας, όπως προκύπτει από τις διατάξεις της Βενετίας, να προσφέρει δηλαδή τη δυνατότητα επαναφοράς του μνημείου στην κατάσταση που βρισκόταν πριν από την επέμβαση.

Ο τεχνητός πωρόλιθος που προέκυψε, τελικά, παρουσίασε τις ίδιες φυσικομηχανικές και αισθητικές ιδιότητες με τον φυσικό ενώ επειδή η πρώτη ύλη για την παρασκευή του είναι το λεγόμενο πωρόχωμα, δηλαδή αλεσμένος φυσικός πωρόλιθος, προσέφερε τεράστια εξοικονόμηση κέρδους. Πιο απλά, πλέον δεν ήταν υποχρεωτική η εύρεση τεμαχίων καταλλήλου μεγέθους και αντοχής, αλλά μόνο η πρώτη ύλη ανεξαρτήτως φυσικομηχανικών ιδιοτήτων οι οποίες προσδίδονται αργότερα με την προσθήκη των υπόλοιπων συστατικών του μίγματος του τεχνητού πετρώματος.

2.9.2 Διαδικασία παραγωγής

Η παραγωγή τεχνητού πορόλιθου ξεκινά με την εξόρυξη του φυσικού πετρώματος δηλαδή του φυσικού πορόλιθου. Αρχικά ο περιβάλλον χώρος καθαρίζεται επιφανειακά προκειμένου το υλικό που θα εξορυχθεί να είναι όσο το δυνατόν πιο καθαρό. Η εξόρυξη πραγματοποιείται με τσάπα αφού οι εμφανίσεις είναι συνήθως επιφανειακές ενώ για την περίπτωση όπου απαιτείται θραύση τού πετρώματος προσαρτάται σφύρα. Αξίζει να σημειωθεί ο φυσικός πορόλιθος εξορύσσεται, συνήθως, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών του έτους για να αποφευχθεί η παρουσία υγρασίας στο υλικό.

Πέραν της εξόρυξης, η μέθοδος χρησιμοποιεί όλα τα προϊόντα εκσκαφών για τη θεμελίωση κτιρίων, στις αναρίθμητες περιπτώσεις που συναντάται πωρόλιθος, τα οποία τα εργοτάξια πάντοτε απομακρύνουν και εναποθέτουν σε τυχαίους χώρους καταστρέφοντας το περιβάλλον. Αποφεύγεται η δημιουργία λατομικού χώρου σώζοντας στην κυριολεξία τη φύση.

Ακολουθεί μεταφορά του υλικού με τη χρήση φορτηγών-αυτοκινήτων στους αποθηκευτικούς χώρους της βιοτεχνίας. Η αποθήκευση λαμβάνει χώρα σε ειδικά διαμορφωμένους, στεγασμένους χώρους, ενώ η ποσότητα τού υλικού είναι υπολογισμένη για να καλύψει τις ανάγκες της βιοτεχνίας για τους υπόλοιπους χειμερινούς μήνες. Όλη η ποσότητα του φυσικού πωρόλιθου που προέρχεται από τις εκσκαφές, θρυμματίζεται σε αμμοτριβείο και μετατρέπεται σε άμμο. Το μέγεθος του εξορυγμένου πετρώματος δεν πρέπει να

υπερβαίνει τα 40 cm, το μέγεθος δηλαδή του στομίου του σπαστήρα-αμμοτριβείου όπου και θα οδηγηθεί το πέτρωμα.

Φορτωτές παραλαμβάνουν το υλικό από τους αποθηκευτικούς χώρους και το εισάγουν απευθείας στον τροφοδότη του αμμοτριβείου. Το άνοιγμα της σκάρας ρυθμίζεται στα 3 mm. Για την καλύτερη δυνατή συνοχή του υλικού στη μετέπειτα διαδικασία παραγωγής τεχνητού πωρολίθου, ο φυσικός πορόλιθος που εξέρχεται από το αμμοτριβείο δεν κοσκινίζεται με αποτέλεσμα να υπάρχουν όλες οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις.

Το προϊόν της άλεσης επιβάλλεται να αποθηκευτεί και αυτό με τη σειρά του σε στεγασμένο χώρο. Μόνο εάν το υλικό είναι πλήρως στεγνό μπορεί να ελεγχθεί η αναλογία άμμου-νερού στο μίγμα του τεχνητού πορολίθου. Στην περίπτωση κατά την οποία η άμμος βραχεί, η αναλογία αυτή ρυθμίζεται εμπειρικά με τον έλεγχο της υγρασίας του μίγματος.

Ο φυσικός πορόλιθος προς θραύση για την παρασκευή του δομικού υλικού πρέπει να προέρχεται από υπεδάφη πορόλιθου, μη σαθρά, και να περιέχει σε μικρές ποσότητες χαλαζιακή άμμο, πυρίτιο, ασβεστόλιθο και άλλα πετρώματα ή μέταλλα που συναντώνται σε υπεδάφη πορόλιθου.

Ο τεχνητός πορόλιθος αποτελείται από το θραυσμένο φυσικό πορόλιθο, το λεγόμενο πορόχωμα, νερό, λευκό τσιμέντο, χρωστικές ουσίες καθώς και βιομηχανικές ρητίνες. Η ανάμιξη αυτών των υλικών πραγματοποιείται σε οριζόντιο αναμικτήρα και όχι σε αναμικτήρα σκυροδέματος (μπετονιέρα) στον οποίο, αναπόφευκτα, θα σχηματιζόντουσαν σβώλοι.

Το μείγμα για την παρασκευή του δομικού υλικού, έχει σε αναλογίες προσμίξεως πωρόλιθο 1.00 μ.κ., τσιμέντο 100 έως 350 κιλά, νερό 50 έως 250 λίτρα και χρωστική ουσία 0 έως 20 κιλά.

Το λευκό τσιμέντο εκτός από αισθητικούς λόγους, χρησιμοποιείται επειδή είναι υψηλής αντοχής και ταχείας πήξεως, γεγονός που επιτρέπει την αποκαλούπωση μετά από μόνο 24 ώρες. Η ανάμιξη του με νερό και λευκό τσιμέντο έχει σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του πωρόλιθου σε αντίθεση με εκείνη της γεωλογικής.

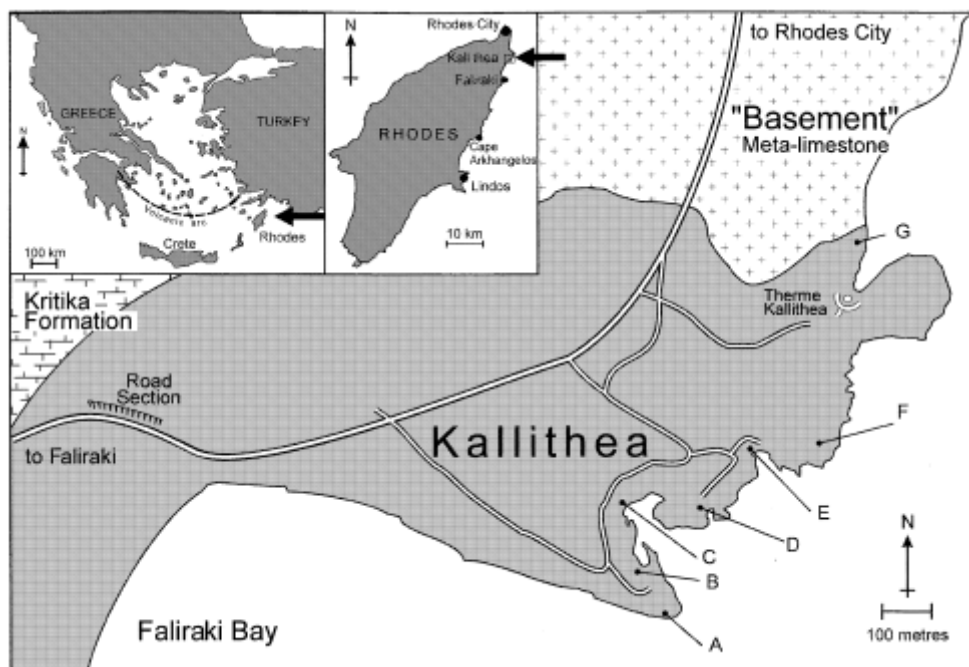
Οι χρωστικές ουσίες χρησιμοποιούνται για λόγους εμφάνισης και διακόσμησης. Οι βιομηχανικές ρητίνες έχουν ως σκοπό τη στεγανοποίηση του υλικού για την προστασία του από την υγρασία του περιβάλλοντος καθώς και τις καρικές συνθήκες.

Η παρασκευή του τελικού προϊόντος, γίνεται σε ειδικά καλούπια προσδίδοντας καθορισμένο σχήμα και μορφή. Το τελικό προϊόν μπορεί να κοπεί με ειδικό δίσκο κοπής πωρόλιθου. Ακόμα, με το μείγμα αυτό τροφοδοτούνται μηχανήματα παραγωγής τσιμεντολίθων για συμπαγή προϊόντα, τσιμεντοπλακών και ειδικών προκατασκευασμένων καλουπιών μέσω των οποίων λαμβάνεται ο κανονισμένος τεχνητός πωρόλιθος σε μεγάλη παραγωγή και χαμηλό κόστος. Παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση από το φυσικό πωρόλιθο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

3.1 Γεωλογικό υπόβαθρο ευρύτερης περιοχής δειγματοληψίας

Η ανατολική ακτή της Ρόδου χωρίζεται σε ένα πλήθος τεκτονικών βυθισμάτων, δημιουργώντας μία σειρά από λεκάνες υποδεικνύοντας διαφορετικές τεκτονικές κινήσεις. Υπάρχουν μικρές διαφορές στην χρονολόγηση και στις συνθήκες ιζηματογένεσης μεταξύ των λεκανών. Οι ζώνες εξελίχθηκαν σε μεσοζωικούς μετα-ασβεστόλιθους (αναφέρονται και ως υπόβαθρο) και καρστικοποιήθηκαν, ενώ συχνά υποβάλλονταν σε θαλάσσια βιοδιάβρωση πριν και κατά τη διάρκεια της απόθεσης των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων. Η καρστική και τεκτονικά ελεγχόμενη παλαιο-παράκτια γεωμορφολογία του υποβάθρου είναι πολύπλοκη και επηρέασε σημαντικά τις νεογενείς ιζηματογενέσεις. Σε γενικές γραμμές οι πλειο-πλειστοκαινικές λεκάνες της Ρόδου έχουν απότομα όρια και μία σύνθετη παράκτια τοπογραφία η οποία καθόρισε τα μωσαϊκά των φάσεων κατά τη διάρκεια της απόθεσης.^[12]



Εικόνα 3.1: Τοποθεσία της ευρύτερης περιοχής μελέτης στην Καλλιθέα. Τα γράμματα αναφέρονται σε τμήματα της παράκτιας περιοχής που περιγράφονται στο κείμενο.^[12]

Κατά την απόθεση των φάσεων ασβεσταρενίτη του Ακρωτηρίου Αρχαγγέλλου, η παράκτια λεκάνη της περιοχής της Καλλιθέας οριοθετήθηκε στα βόρεια και βορειο-ανατολικά από ένα απόκρημνο ακρωτήριο Μεσοζωικού μετα-ασβεστόλιθου (Elaphokampos Cherty limestone), και στα νότια και ανατολικά από τον υποκείμενο διαβρωμένο πυριτιούχο Πλειόκαινο Σχηματισμό Κρητικών. Η λεκάνη παρουσιάζεται να έχει άξονα διεύθυνσης Α-Δ, πλάγια τοποθετημένο ως προς τη σημερινή ακτογραμμή, ακολουθώντας έτσι τη φορά του ακρωτηρίου. Παρόλες τις αποδείξεις για Ολοκαινικές μετακινήσεις στη βάση των ζωνών στις οποίες βρίσκεται η λεκάνη Καλλιθέας, δεν υπάρχουν άμεσες αποδείξεις από τους ασβεσταρενίτες Ακρωτηρίου Αρχαγγέλου για καμία *renecontemporaneous* τεκτονική δραστηριότητα.^[12]

3.2 Στρωματογραφία ευρύτερης περιοχής

Οι Πλειο-Πλειστοκαινικές αποθέσεις της ανατολικής Ρόδου αποτελούνται από τρεις σχηματισμούς. Ο Πλειόκαινος σχηματισμός Κρητικών αποτελείται κυρίως από πυροκλαστικά παράκτια και θαλάσσια περιβάλλοντα. Ο θαλάσσιος σχηματισμός Ρόδου υπόκειται του σχηματισμού Λίνδου από την οποία διαχωρίζεται από μία διαβρωμένη ασυνέχεια. Οι σχηματισμοί υποδιαιρούνται σε φάσεις και όχι τμήματα εξαιτίας των δυσκολιών συσχέτισης των λεκανών μεταξύ τους. Στην Καλλιθέα, ο σχηματισμός Ρόδου αντιπροσωπεύεται από αργιλικές φάσεις της παραλίας Λίνδου και από τις ασβεσταρενιτικές φάσεις του Ακρωτηρίου Αρχαγγέλου οι οποίες αποτελούν και τον κύριο όγκο που εκτίθεται επιφανειακά. Στην κορυφή της ακολουθίας Καλλιθέας βρίσκεται μία ογκώδης στρώση κροκαλοπαγών η οποία μπορεί να είναι αντιπροσωπευτική των φάσεων Παραλίας Μύλου ή τραχειάς ρωγμάτωσης αντιπροσωπευτικής των φάσεων ασβεστορουδίτη (*calcirudite*) Κλεοπούλου του σχηματισμού Ακροπόλεως Λίνδου.

Ο σχηματισμός Ρόδου μπορεί να διακριθεί σε αρκετές τεκτονικές λεκάνες στην ανατολική ακτή του νησιού. Η σύνθεση του ξεκινά με την απόθεση ασβεστόλιθου Κολυμπίων

και αργίλου Λίνδου, και συνεχίζει με την απόθεση ασβεσταρενίτη Ακρωτηρίου Αρχαγγέλου. Ακολουθεί διάβρωση και η μετέπειτα απόθεση του σχηματισμού Ακροπόλεως Λίνδου.

Η ιζηματολογική ακολουθία στην Καλλιθέα έχει υποδιαιρεθεί σε 7 φάσεις. Οι έξι προέρχονται από το σχηματισμό Ρόδου και η έβδομη από το σχηματισμό Ακροπόλεως Λίνδου. Στο σχηματισμό Ρόδου μία φάση ανήκει στην ομάδα φάσεων αργίλου Παραλίας Λίνδου και πέντε φάσεις στην ομάδα φάσεων Ακρωτηρίου Αρχαγγέλου.^[12]

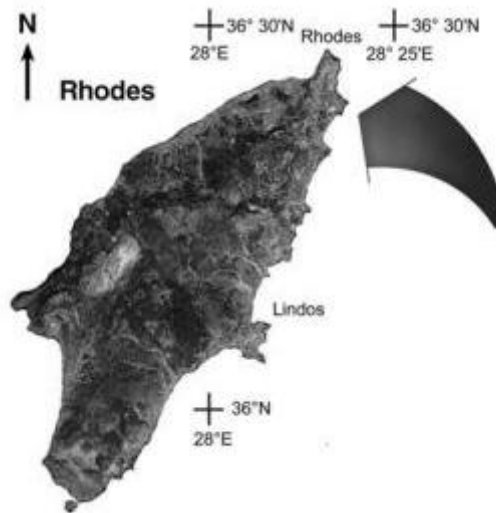
Μία σύνοψη των ιζηματολογικών δεδομένων παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Φάσεις	Λιθολογία, μέγεθος κόκκων, CaCO ₃	Δομή	Στρωμάτωση, εσωτερικές επιφάνειες	Ερμηνεία	Κατεύθυνση
Ομάδα φάσεων Αργίλου Παραλίας Λίνδου	Πηλόλιθοι, βακόλιθοι, κοκκόλιθοι, Μεταασβεστόλιθοι, Χαλαζίας, Βιοκλάστες, 30-70% CaCO ₃	Έλλειψη δομής Ομαλά διαβαθμισμένες στρώσεις	Strongly bioturbated Firmgrounds	Low energy βαθιά λεκά-νη	NA
A	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι βακόλιθος, λεπτοκρυσταλλικοί σωρόλιθοι, κοκκόλιθοι, χαλαζίας, μεταασβεστόλιθοι, βιοκλάστες 40-80% CaCO ₃	Ελασματοποίηση, γράμμωση, undulating ελασματοποίηση, μικρής κλίμακας στρωματοποίηση, χάραξη	Λεπτόκοκκες μονάδες βακόλιθων, σωρόλιθων, bioturbated.	Παράκτιο μέτωπο, storm beds	NA
B	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι βακόλιθος, λεπτοκρυσταλλικοί σωρόλιθοι, κοκκόλιθοι, χαλαζίας, μεταασβεστόλιθοι, βιοκλάστες 70% CaCO ₃	Πλευρική προσαύξηση μάζας, μικρής κλίμακας στρωματοποίηση, χάραξη	Διαβαθμισμένες και διασταυρωμένες στρώσεις	Παράκτιο μέτωπο, migrating bar	NA
C	Κοκκόλιθοι, extraclasts, 70% CaCO ₃	Επίπεδη ελασματοποίηση, μικρής κλίσης Διασταυρωμένες στρώσεις	Channel fill, aggrading	Storm surge στο κατώτερο παράκτιο μέτωπο	A, NA
D	Κοκκόλιθοι, 70-90% CaCO ₃	Διασταυρωμένες στρώσεις, πλευρική προσαύξηση μάζας, κυματοειδής- διασταυρωμένη στρωματοποίηση, κροκαλοπαγή	Aggrading to prograding	Upper shoreface storm beds	N, NΔ, Δ
E	Κοκκόλιθοι, Σωρόλιθοι 70-95% CaCO ₃	Μεγάλης κλίμακας foresets, μέτρια διασταυρωμένη στρωματοποίηση	Giant scours, prograding	Ανθρακική πλατφόρμα progradation	A, NA

3.3 Περιοχή δειγματοληψίας

3.3.1 Γεωγραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δείγματα φυσικού πωρολίθου, που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται από την παράκτια περιοχή Ασγούρου.



Εικόνα 3.2 :Τοποθεσία περιοχής μελέτης στη ΒΔ ακτή Ρόδου.^[12]

Στην ευρύτερη περιοχή Καλλυθιών, το παλαιότερο τμήμα της ακολουθίας αποτελείται από τον ελαφρώς μεταμορφωμένο δολομιτικό «Ελαφόκαμπος Cherty Ασβεστόλιθο» ο οποίος χρονολογείται στην Κάρνια περίοδο.^[14]

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντούν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι, Ολιγοκαινικός φλύσχος, Πλειο-Πλειστοκαινικές μάργες, καλκαρενίτες (ασβεσταρενίτες) και τέλος Ολιγοκαινικές αποθέσεις.^[15]

3.3.2 Στρωματογραφικά χαρακτηριστικά

Στο νησί της Ρόδου διακρίνονται τρεις τεκτονικές μονάδες, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ευδιάκριτη και σαφώς καθορισμένη τεκτονική διαδοχή.

Συγκεκριμένα:

- ❖ Μιας κατώτερης μονάδας που θεωρείται ως αυτόχθονη και παραυτόχθονη
- ❖ μιας ενδιάμεσης ετερόχθονης μονάδας, που αποτελείται τουλάχιστον από τρεις διαχωριζόμενες υπομονάδες και μιας ανώτερης νεοαυτόχθονης μονάδας, που επίκειται σε ασυμφωνία στην προηγούμενη.^[8]

Πάνω από αυτές τις μονάδες επικάθονται σε γωνιώδη ασυμφωνία νεοαυτόχθονα ιζήματα. Μέσα σε αυτά διακρίνονται:

- ❖ η ομάδα Βάτι
- ❖ τα «λεβαντίνια» ιζήματα και
- ❖ η διάπλαση Ασγούρου

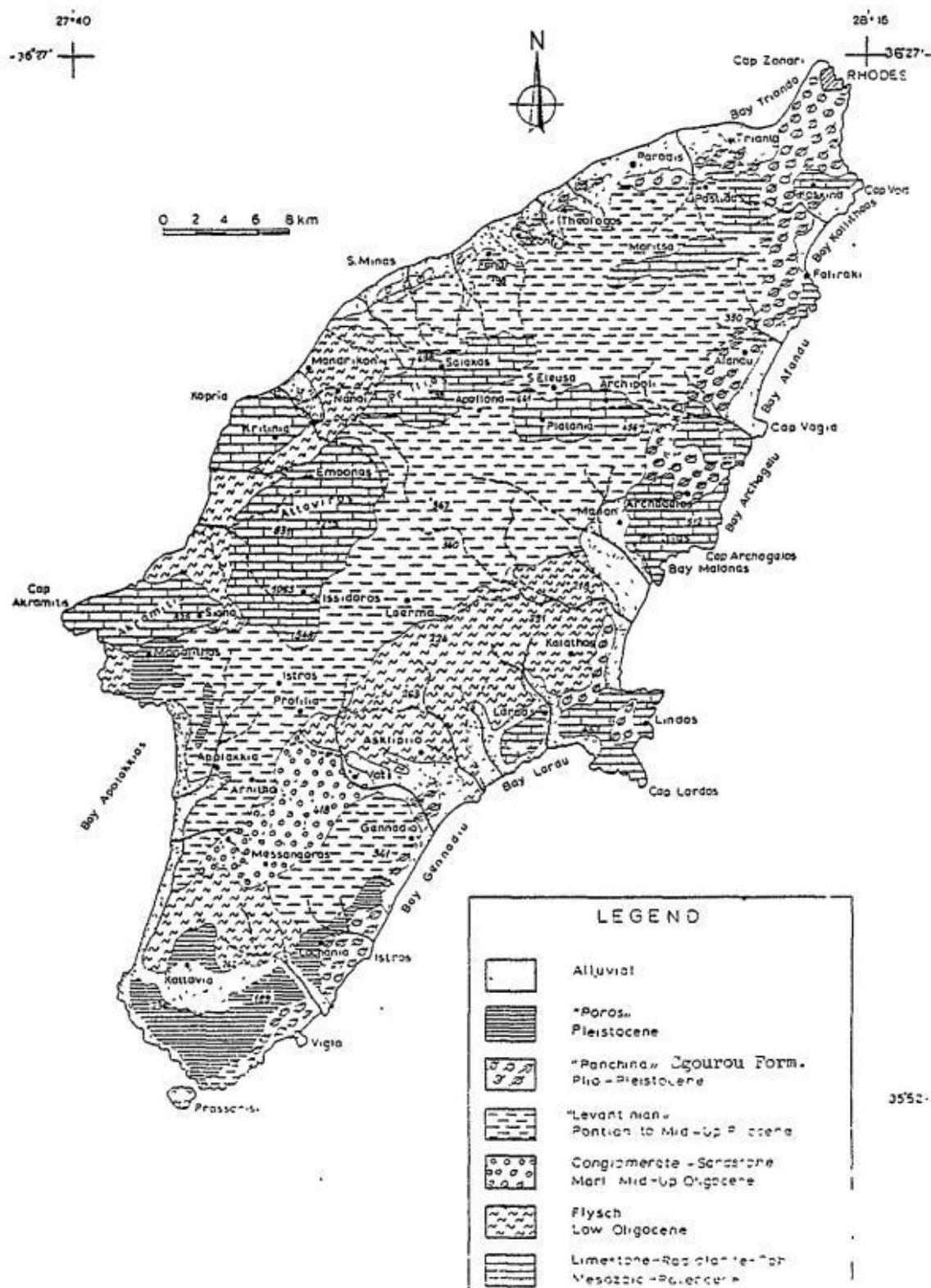
Οι «λεβαντινιανές» αποθέσεις θεωρούνται ότι είναι νεογενείς ηπειρωτικές κλαστικές αποθέσεις. Εναποτίθενται γωνιακά πάνω από το σύμπλεγμα του Βάτι και έχουν πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων. Το περιβάλλον απόθεσης είναι εν μέρει ποτάμιο και εν μέρει λιμναίο. Τα ποτάμια συστατικά χαρακτηρίζονται από χαλικώδεις-αμμώδεις φάσεις ενώ τα λιμναία αποτελούνται από ασβεστώδεις-αμμώδεις φάσεις.^[16]

Στα «λεβαντινιανά» ιζήματα εντάσσονται από κοινού όλες οι νεογενείς ηπειρωτικές κλαστικές αποθέσεις της νήσου Ρόδου, πάχους μερικών εκατοντάδων μέτρων.^[8]

Ο σχηματισμός Ασγούρου, που βρίσκεται σε ασυμφωνία επί των «λεβαντινιανών» ιζημάτων, φτάνει στο μέγιστο του πάχους των 180 m στη βόρεια Ρόδο. Απολιθωματοφόρο στρώμα του γνωστού τύπου Panchina (ασβεσταρενίτης), εμφανίζεται συχνά στην κορυφή

του σχηματισμού. Με βάση την εγκλειόμενη μικρο- και μακρο-πανίδα, ο σχηματισμός αυτός τοποθετείται χρονολογικά στον Άνω Πλειόκαινο μέχρι Κάτω Πλειστόκαινο (Καλάβριο).

Τύπος ασβεστοφλοιώδους παλαιοεδάφους, γνωστός σαν «Πώρος», βρίσκεται σε μεγάλη εξάπλωση στο εσωτερικό της νήσου. Ο «Πώρος» αυτός ανήκει στο Άνω Πλειόκαινο-Κάτω Πλειστόκαινο, με βάση τη στρωματογραφική και μορφολογική τοποθέτηση.^[8]

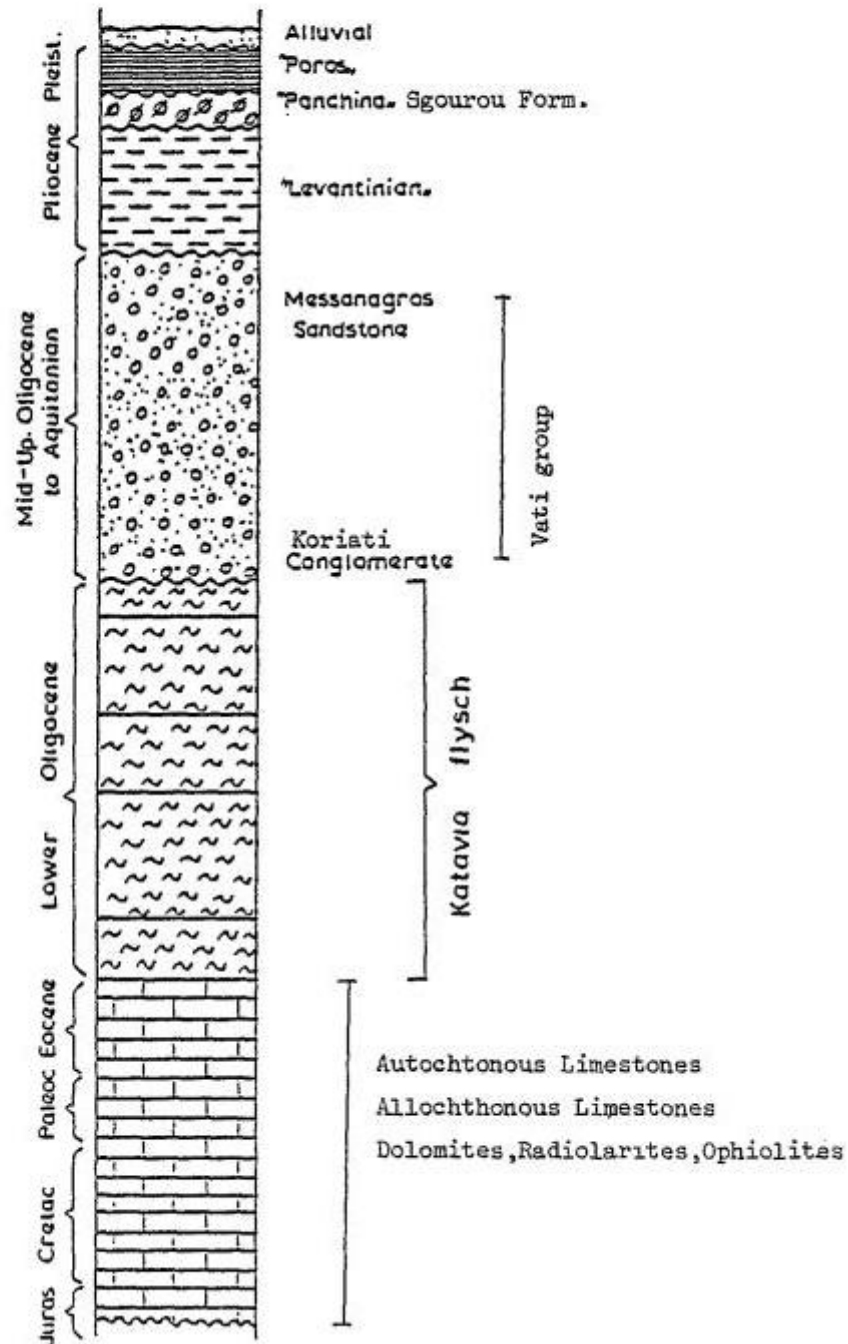


Εικόνα 3.3 :Γεωλογικός χάρτης Ρόδου.^[17]

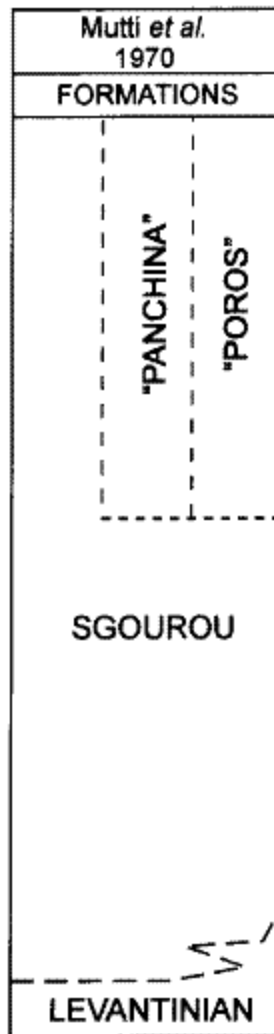
STRATIGRAPHIC RELATIONSHIP

Chronostratigraphy

Lithostratigraphy



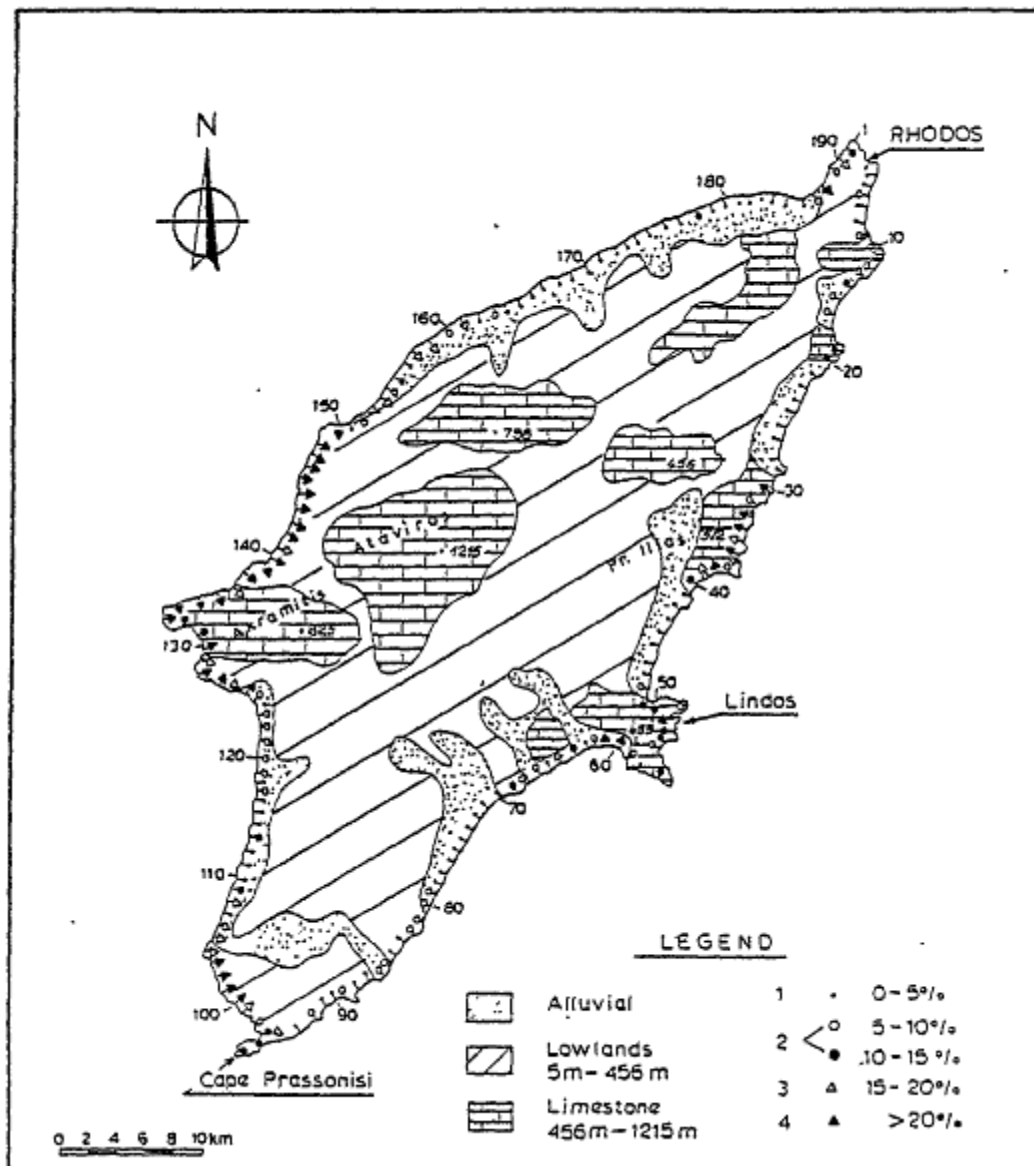
Εικόνα 3.4 :Στρωματογραφική στήλη των πετρωμάτων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3.^[17]



Εικόνα 3.5 : Οι λιθοστρωματογραφικοί σχηματισμοί Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας σύμφωνα με τον Mutti.^[17]

3.3.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Γεωμορφολογικά η περιοχή δειγματοληψίας χαρακτηρίζεται ως παράκτια πεδινή όπως και τα δύο τρίτα των ακτών της Ρόδου. Το πλάτος της ποικίλλει μεταξύ 500 m και 5000 m. Αναπτύχθηκαν από εκτεταμένα συστήματα κοιλάδων τα οποία με τη σειρά τους σχηματίστηκαν από διαβρωμένους βραχώδεις σχηματισμούς και έχουν μέση κλίση 2-5 %.^[15]



Εικόνα 3.6 : Γεωμορφολογικός χάρτης Ρόδου. ^[17]

Οι ακτές αυτές συνδέονται πολλές φορές με ζώνες χαλαρών υλικών στη βάση τους. Επειδή ο σχηματισμός δεν παρουσιάζει την ίδια λιθολογία, η συμπεριφορά του στις διεργασίες διάβρωσης ποικίλλει. Έτσι στις ακτές που επικρατεί ο καλκαρενίτης είναι συνηθισμένη η παρουσία υπολλειματικών διαβρωσιγενών επίπεδων επιφανειών.^[15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Ορυκτολογικές αναλύσεις

4.1.1 Μικροσκοπία διερχομένου φωτός και προετοιμασία λεπτών τομών

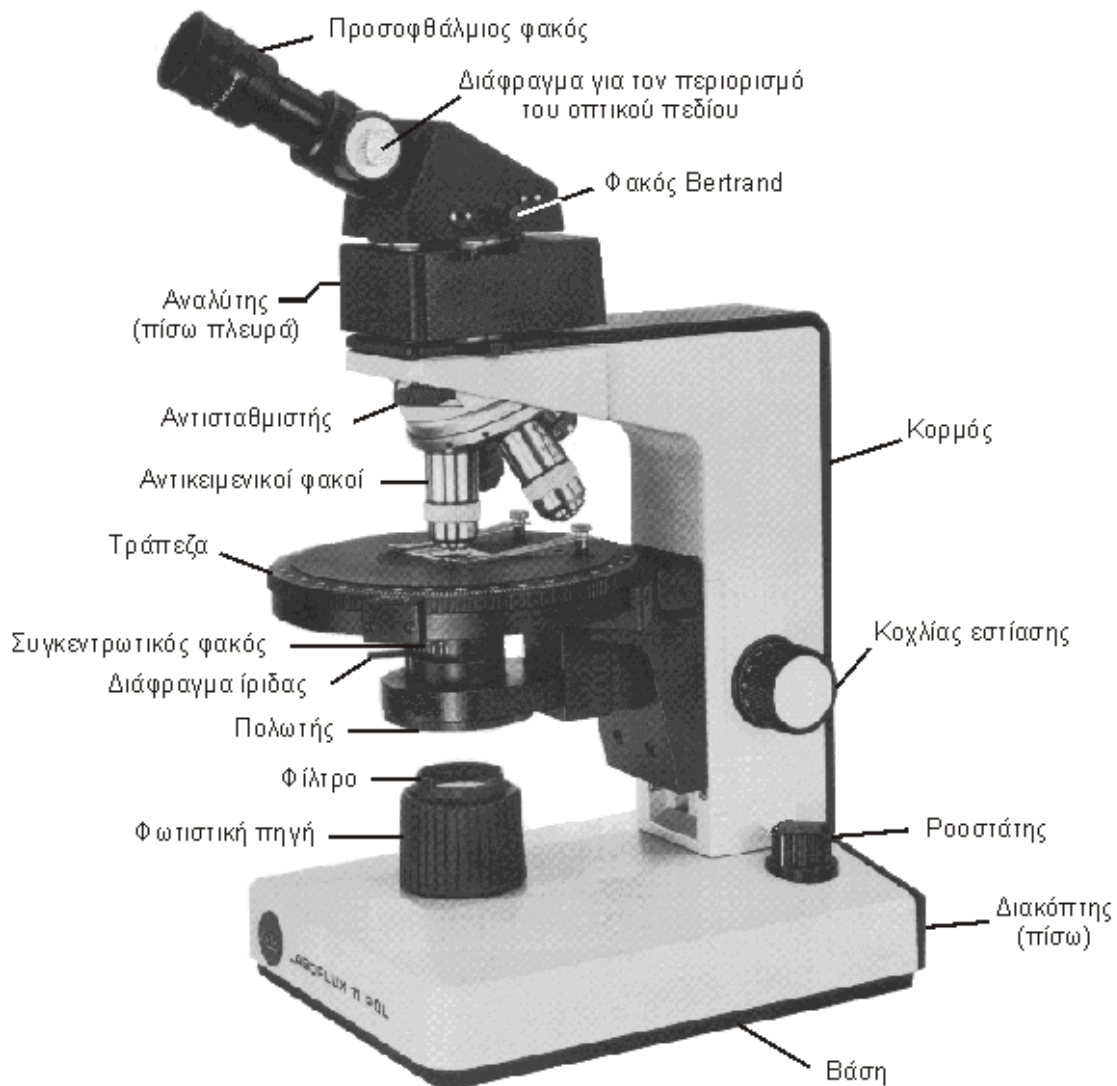
Η μέθοδος της μικροσκοπίας διερχομένου φωτός χρησιμοποιήθηκε τόσο κατά τη φάση της αναγνώρισης του φυσικού και τεχνητού δομικού υλικού, όσο και κατά τα επόμενα στάδια της διπλωματικής μελέτης.

Η λειτουργία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου βασίζεται στις ιδιότητες της ηλεκτρονικής δέσμης αυτής καθαυτής, καθώς και των φαινομένων που προκαλεί η πρόσπτωση των ηλεκτρονίων πάνω στα δείγματα. Βασικό τμήμα της εξέτασης αποτελεί η προετοιμασία των λεπτών τομών η οποία διεκπαιρεύεται από ειδικά εκπαιδευμένο τεχνικό προσωπικό.^[8]

Παίρνοντας το δείγμα στο εργαστήριο, κόπηκε με ειδικό τροχό κοπής ένα κομμάτι από το δείγμα. Η κοπή γίνεται συνήθως παράλληλα με τη γράμμωση έκτασης (και σχετικά κάθετη στη φύλλωση). Η κοπή αφήνει δύο επιφάνειες, κατοπτρικά όμοιες. Η μία βρίσκεται στο κομμάτι που κόπηκε και η άλλη στο υπόλοιπο δείγμα. Στο πάνω μέρος του κομματιού που κόπηκε, χαράχθηκε με τον τροχό μία σχισμή κάθετη στη γράμμωση. Πραγματοποιήθηκε κοπή του δείγματος σε μορφή πλακιδίου ορθογωνίου σχήματος διαστάσεων 2 x 4 cm. Στη συνέχεια κολλήθηκε το γυαλί του παρασκευάσματος (αντικειμενοφόρος πλάκα) με ρητίνη πάνω στην επιφάνεια του κομματιού, με προσοχή ώστε το ίχνος από τη σχισμή να είναι μέσα στο πλαίσιο του γυαλιού. Ακολούθησε λείανση του πλακιδίου μέχρις ότου αποκτήσει το επιθυμητό πάχος των 0.02-0.03 mm και κάλυψη του παρασκευάσματος με λεπτό γυάλινο πλακίδιο (καλυπτρίδα) με τη βοήθεια ρητίνης.

Οι λεπτές τομές αντιπροσωπεύουν τομές σύνθετων δομών που αναπτύσσονται στις τρεις διαστάσεις και ως εκ τούτου δε μπορούν πάντα να τις αναπαραστήσουν σωστά.

Έτσι λοιπόν το μέγεθος και το σχήμα των κρυστάλλων και των ορυκτών, το σχήμα των εγκλεισμάτων, το σχήμα κυλινδρικών αντικειμένων, το πάχος ενός στρωματιδίου, η γωνία των σκελών μη-κυλινδρικών πτυχών, διδυμίες και σχισμοί κρυστάλλων, γραμμώσεις φυλλωδών ορυκτών, η επαφή κρυστάλλων διαφορετικών φάσεων και το σχήμα πολύπλοκων ορίων κρυστάλλων αποτελούν ορισμένα μόνο από τα στοιχεία που εξαρτώνται άμεσα από τον προσανατολισμό της λεπτής τομής.^[18]



Εικόνα 4.1 : Πολωτικό μικροσκόπιο.^[19]

Η εξέταση των λεπτών τομών έγινε με παράλληλη δέσμη φωτός (ορθοσκοπική εξέταση). Η ορθοσκοπική εξέταση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πολωτή και με διασταυρωμένα Nicols (πολωτής και αναλυτής παρεμβάλλονται στην πορεία του φωτός).

Χωρίς την παρεμβολή του αναλυτή στην πορεία των ακτίνων, παρατηρήθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες:

- ❖ Διαφάνεια
- ❖ Σχήμα της τομής
- ❖ Σχισμός
- ❖ Χρώμα
- ❖ Πλεοχρωισμός
- ❖ Εκτίμηση του δείκτη διάθλασης
- ❖ Εξαλλοιώσεις

Στην ορθοσκοπική ανάλυση με τον αναλυτή να παρεμβάλλεται στην πορεία των ακτίνων, παρατηρήθηκαν οι εξής ιδιότητες:

- ❖ Ισοτροπία-ανισοτροπία
- ❖ Ορθή και πλάγια κατάσβεση
- ❖ Χρώμα πόλωσης της τομής
- ❖ Επιμήκυνση
- ❖ Διδυμία-πολυδιδυμία
- ❖ Ζωνώδης δομή^[19]

4.1.2 Ασβεστιμετρία

Ο προσδιορισμός του ασβεστίτη (CaCO_3) με το ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Frunhling είναι ένας σταθμικός προσδιορισμός. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση αυτή στηρίζεται στην επίδραση ενός αντιδραστηρίου σε γνωστή ποσότητα του δείγματος.

Συγκεκριμένα ο προσδιορισμός του ασβεστίτη στηρίζεται στη μέτρηση του όγκου του CO_2 που εκλύεται από την επίδραση διαλύματος υδροχλωρικού οξέος στο δείγμα σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Εικόνα 4.2 :Ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Fruhling.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν :

- ❖ Ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Fruhling
- ❖ HCl οξύ 1:3
- ❖ Πρότυπο δείγμα ασβεστολίθου (ή και πρότυπο δολομίτη στην περίπτωση που τα δείγματα προς ανάλυση περιέχουν και δολομίτη)

Εκτέλεση:

- ❖ Ποσότητα από το δείγμα 0,6-0,7 gr (έως 1 gr σε περιπτώσεις χαμηλών αναμενόμενων περιεκτικοτήτων σε ανθρακικό συστατικό) μεταφέρεται στην κωνική φιά-

- λη του ασβεστίμετρου μαζί με δοκιμαστικό κυλινδρικό σωλήνα που περιέχει διάλυμα HCl 1:3.
- ❖ Η φιάλη κλείνει με το πώμα του οργάνου και προτού ανακινηθεί κλείνει και η στρόφιγγα ώστε να παρεμποδιστεί η διαφυγή του εκλυόμενου αερίου στην ατμόσφαιρα. Η φιάλη ανακινείται μέχρις ότου ολοκληρωθεί η αντίδραση του οξέος με το δείγμα.
 - ❖ Το αέριο που εκλύεται εκτοπίζει τη στήλη του κόκκινου διαλύματος (ελαφρά οξινισμένο διάλυμα νερού με μερικές σταγόνες HCl και την προσθήκη δείκτη ερυθρού του μεθυλίου).
 - ❖ Αφού εξισορροπηθεί η πίεση μέσα στη στήλη με την ατμοσφαιρική, καταγράφεται η ένδειξη από τη βαθμονομημένη κλίμακα του οργάνου, που αντιστοιχεί στον όγκο (σε ml) του αερίου που εκλύθηκε κατά την αντίδραση.
 - ❖ Παράλληλα με τα άγνωστα δείγματα, μετράται πρότυπο δείγμα ασβεστολίθου, στην προκειμένη περίπτωση περιεκτικότητας 99,01% σε $CaCO_3$ ($43,56\% CO_2$) για να υπολογιστεί ένας συντελεστής διόρθωσης (για τη βαθμονόμηση του οργάνου) ενώ επίσης καταγράφονται η πίεση και η θερμοκρασία κατά την διάρκεια του πειράματος για την αναγωγή του εκλυόμενου όγκου CO_2 σε Κ.Σ..
 - ❖ Η τάση ατμών του νερού P_{H_2O} απαιτείται προκειμένου να βρούμε την τάση P_{CO_2} και για δεδομένη θερμοκρασία και δίνεται από πίνακα.
 - ❖ Συνίσταται η μέτρηση παραπάνω του ενός προτύπου όταν πρόκειται να μετρηθούν πάνω από πέντε δείγματα.
 - ❖ Από το ποσοστό επί τοις εκατό σε CO_2 που προσδιορίζεται μετά τις απαραίτητες διορθώσεις ως προς τα πρότυπα και τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος, υπολογίζεται στοιχειομετρικά η περιεκτικότητα του δείγματος σε $CaCO_3$.

Υπολογισμοί:

Αρχικά υπολογίζεται το ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος του CO_2 που εκλύεται από κάθε δείγμα για να αναχθεί στη συνέχεια, σε ποσοστό επί τοις εκατό σε ανθρακικό ασβέστιο στο δείγμα. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- ❖ Μετατροπή του όγκου του CO_2 που μετράται σε όγκο σε κανονικές συνθήκες.

$$V_{K.S.} = [(P - P_{H_2O}) * (\epsilon_{\nu\delta\alpha\zeta\eta}) * 273] / [(273 + \theta) * 760]$$

- ❖ Η περιεκτικότητα Π% του προτύπου σε CO_2 είναι:

$$\Pi\% = [\epsilon_{\nu\delta\epsilon\iota\zeta\eta}] / [\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha] * 0,196$$

$$\acute{o}\pi\upsilon 0,196 = M.B_{CO_2} / 22400 * 100$$

- ❖ Μετατροπή του όγκου του CO_2 σε γραμμάρια CO_2

$$\text{Τα } 22400 \text{ ml } CO_2 \text{ σε K.}\Sigma. \rightarrow 44 \text{ gr } CO_2$$

$$\text{Τα } V_{K.S.} \text{ ml } CO_2 \rightarrow \frac{44 * V_{K.S.}}{22400} \text{ gr } CO_2$$

- ❖ Ο συντελεστής διόρθωσης είναι: $\Sigma\Delta = 43,56 / \Pi\%$
- ❖ Στην περίπτωση που υπεισέρχονται περισσότερα από 1 πρότυπα θα πρέπει να προσδιοριστεί η μέση τιμή των προτύπων και βάσει αυτής να γίνει διόρθωση των αντίστοιχων τιμών για τα άγνωστα δείγματα.
- ❖ Από τις διορθωμένες περιεκτικότητες του δείγματος σε CO_2 και τα αντίστοιχα μοριακά βάρη, υπολογίζεται η περιεκτικότητα σε $CaCO_3$. Δεδομένου ότι 1 gr CO_2 αντιστοιχούν 2,273 gr $CaCO_3$, το ποσοστό του περιεχόμενου ασβεστίτη(%) είναι: **Ασβεστίτης (%) = $V_{CO_2} * 0,196 * \Sigma\Delta / M$** ^[20]

4.1.3 Μέτρηση συντελεστή υδατοαπορρόφησης

Όταν ένα τεμάχιο πετρώματος βυθισθεί μέσα σε νερό δε γίνεται πλήρωση όλων των κενών του με νερό γιατί πολλά από αυτά είναι απομονωμένα, αλλά και κάποια ποσότητα αέρα παραμένει εγκλωβισμένη από το νερό και δε διαφεύγει. Επιπλέον αν υπάρχει άργιλος εμποδίζει την παραπέρα διείσδυση τού νερού. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ακόμα και τα πετρώματα έχουν ίδιο πορώδες δεν παρουσιάζουν την ίδια ικανότητα απορρόφησης νερού. Συνεπώς η ικανότητα που έχει κάθε πέτρωμα να απορροφά νερό ονομάζε-

ται υδατοαπορροφητικότητα και εκφράζεται ως ο λόγος μεταξύ του βάρους του απορροφούμενου νερού προς το βάρος του σώματος σε ξηρή κατάσταση.^[22]

Πιο απλά μπορούμε να πούμε ότι υδατοαπορροφητικότητα καλείται η % ποσοστιαία αύξηση της μάζας ενός τεμαχίου πετρώματος μετά την εμβάπτιση του στο νερό για ορισμένο χρονικό διάστημα. Η δοκιμή γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 99 του ΕΛΟΤ.

Για την εκτέλεση τού πειράματος χρησιμοποιήθηκε φούρνος ξήρανσης ικανός να λειτουργεί στους 110 ± 5 °C, ζυγός με ακρίβεια 0,01% της μάζας των δοκιμίων, ξηραντήρας και απορροφητικό χαρτί.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 5cm x 5cm x 5cm. Πριν από την έναρξη του πειράματος, τα δοκίμια ξηράνθηκαν σε φούρνο σε θερμοκρασία 70°C μέχρις ότου αποκτήσουν σταθερό βάρος. Η προεργασία αυτή είναι απαραίτητη καθώς τα δοκίμια πρέπει να είναι απαλλαγμένα από υγρασία πριν προχωρήσουμε στη μέτρηση της υδατοαπορρόφησης.

Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ποτήρια ζέσεως και αφέθηκαν εκεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να απορροφήσουν ποσότητα νερού μεταβάλλοντας έτσι το βάρος τους. Κατόπιν απομακρύνθηκαν τα δοκίμια και αφού οι επιφάνειες τους σκουπίστηκαν με απορροφητικό χαρτί, και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε άλλες 2 φορές μέχρις ότου το βάρος των δοκιμίων σταθεροποιήθηκε.

4.1.4 Δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των Ι.Τ. πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων-X (XRD) τύπου D8-Advance της BrukerAXS (Εικ. 5.1) του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η μέθοδος της περιθλασιμετρίας ακτίνων -X βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-X πάνω στους κρυστάλλους.

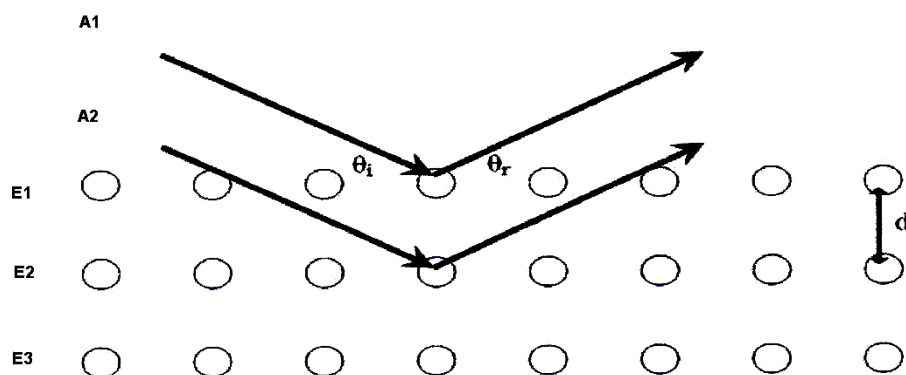
Ο Bragg ερμήνευσε, κατά απλούστερο τρόπο, την περίθλαση των ακτίνων -X στους κρυστάλλους ως ανάκλαση των ακτίνων -X, οι οποίες προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία στα πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου.

Έστω ότι το πλέγμα ενός κρυστάλλου αποτελείται από ομάδες πλεγματικών επιπέδων τα οποία σε κάθε ομάδα είναι παράλληλα και διαδέχεται το ένα το άλλο πάντα στην ίδια απόσταση, d .

Εάν E_1, E_2, E_3 , τα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου, A_1, A_2 , δύο ακτίνες -X μήκους κύματος λ , θ , η γωνία με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες (Εικόνα 5.2), και n , η τάξη της ανάκλασης σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg ισχύει:

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

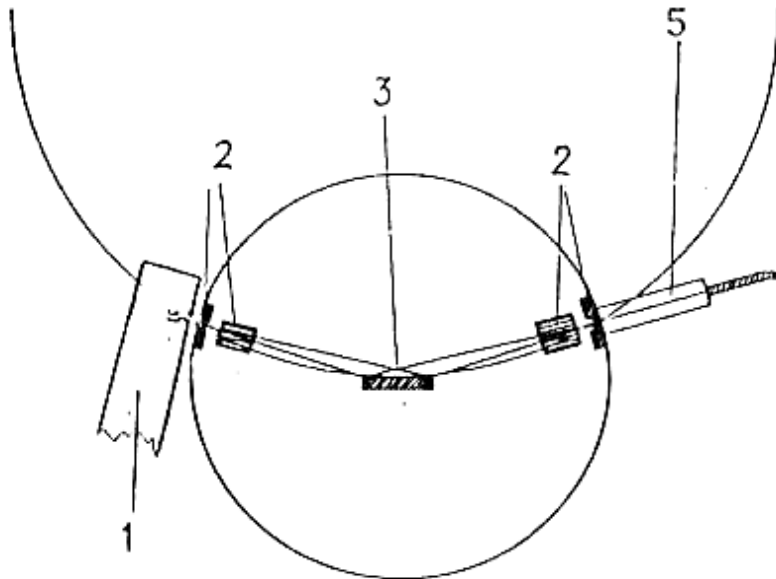
Με τη μέθοδο του περιθλασιμέτρου ακτίνων -X., η οποία τυγχάνει ευρείας εφαρμογής, καθίστανται δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων -X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως.



Εικόνα 4.3 : Ανάκλαση ακτίνων -X στα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου.^[22]

Οι βασικές μονάδες που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων-X είναι (Εικ. 5.3) η μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης, η λυχνία ακτίνων-X, το γωνιομέτρο (σε κατακόρυφη θέση), ο απαριθμητής των ακτίνων-X με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και η μονάδα του μικροϋπολογιστή μέσω του οποίου καθοδηγείται ολόκληρο το σύστημα και αξιολογούνται τα δεδομένα.^[22]

Το παρασκεύασμα τοποθετείται στον δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων -X και μάλιστα έτσι ώστε το επίπεδο του παρασκευάσματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου.



Εικόνα 4.4 : Σχηματική παράσταση της διάταξης εστιασμού των ακτίνων -X. 1) λυχνία ακτίνων-X, 2) διαφράγματα, 3) παρασκεύασμα, 4) βάση απαριθμητή ακτίνων -X και 5) απαριθμητής ακτίνων -X.^[22]

Ταυτόχρονα ως προς τον ίδιο άξονα γύρω από τον οποίο διαγράφει τον κύκλο, περιστρέφεται ο απαριθμητής με κάποια σταθερή γωνιακή ταχύτητα $2\theta/\text{min}$ και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min ίση προς το ήμισυ εκείνης του απαριθμητή έτσι ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση του απαριθμητή και τη περιστροφή του δείγματος ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος όπως και στο σημείο εξόδου των ακτίνων -X της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων $-X$ των προερχόμενων από την λυχνία ώστε να πληρούνται για κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων η εξίσωση του Bragg.

Όπως όλες οι μέθοδοι ανάλυσης, έτσι και η περιθλασιμετρία ακτίνων- X έχει κάποιους περιορισμούς κατά την εφαρμογή της (Whiston C., 1987). Για παράδειγμα, δεν είναι δυνατό να γίνει ταυτοποίηση υλικών στις περιπτώσεις όπου πρόκειται για άμορφα ή κρυσταλλικές φάσεις που βρίσκονται μέσα σε ένα μείγμα σε πολύ μικρή περιεκτικότητα. Επίσης ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται κατά την ταυτοποίηση όταν πρόκειται για: πολυφασικά μείγματα, λόγω της αλληλοεπικάλυψης των ανακλάσεων, φάσεις που παρουσιάζουν εκλεκτικό προσανατολισμό, ατέλειες δομής ή έχουν πολύ μικρές γωνίες ανάκλασης.

Η διείδυση των ακτίνων X είναι της τάξης των 20 μm , έτσι το μέγεθος των κόκκων του κονιοποιημένου δείγματος πρέπει να είναι μεταξύ 5 και 10 μm , προκειμένου να είμαστε σίγουροι ότι ικανοποιητικός αριθμός κόκκων συμμετέχει στην περίθλαση της δέσμης των ακτίνων X .

Γενικά, το δείγμα, για ανάλυση με τη μέθοδο αυτή, πρέπει να είναι ομοιογενής σκόνη, με μέγεθος κόκκων μεταξύ 1 και 25 μm , χωρίς κάποιο προεξάρχοντα προσανατολισμό ή μικρο/μακρο κρυσταλλικές τάσεις.

Κατά την παρασκευή του δείγματος, επομένως, ιδιαίτερα όταν γίνεται με ηλεκτρικό μύλο, χρειάζεται προσοχή, αφού παρατεταμένη λειοτρίβηση μπορεί να προκαλέσει υπερβολική θέρμανση με δυσάρεστες συνέπειες.

Η παρασκευή των δειγμάτων εκτελέστηκε σε έναν ηλεκτρικό μύλο για την επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρίας. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε γουδί από αχάτη. Τέλος τοποθετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο και σε περίπου ίδιες ποσότητες σε δειγματοφορείς.

Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση λυχνίας Cu, μονοχρωματιστή γραφίτη, τάση λυχνίας U=35KV και ένταση ρεύματος I=35mA. Η ακτινοσκόπηση των δειγμάτων I.T. έγινε σε γωνίες μεταξύ 7-70° 2θ.^[22]

4.1.5 Απώλεια πυρώσεως

Ο προσδιορισμός του ποσοστού του βάρους του οργανικού υλικού και του ανθρακικού περιεχομένου στα ιζήματα βασίζεται στη διαδοχική θέρμανση σε ηλεκτρικό κλίβανο. Μετά τη ξήρανση των δειγμάτων στους 60°C, για χρονικό διάστημα περίπου 24 ωρών, ακολούθησε η καύση τους στη θερμοκρασία των 550 °C. Έπειτα η απώλεια πυρώσεως (Loss On Ignition, LOI) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$LOI_{550} = ((DW_{60} - DW_{550}) / DW_{60}) * 100$$

όπου το LOI₅₅₀ εκφράζει την απώλεια πυρώσεως με τη μορφή ποσοστού, το DW₆₀ εκφράζει το ξηρό βάρος του εκάστοτε δείγματος στη θερμοκρασία των 60°C, και το DW₅₅₀ το ξηρό βάρος στη θερμοκρασία των 550°C. Η απώλεια βάρους, που προκύπτει από την καύση των δειγμάτων, πρέπει να είναι ανάλογη της ποσότητας του οργανικού άνθρακα που περιέχεται σ' αυτά.

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε στους 1050 °C οπότε ομοίως η απώλεια πυρώσεως (LOI) εκτιμάται από τη σχέση:

$$LOI_{1050} = ((DW_{550} - DW_{1050}) / DW_{60}) * 100$$

όπου το LOI₁₀₅₀ εκφράζει την απώλεια πυρώσεως με τη μορφή ποσοστού, το DW₆₀ εκφράζει το ξηρό βάρος του εκάστοτε δείγματος στη θερμοκρασία των 60°C, το DW₅₅₀ το ξηρό βάρος στη θερμοκρασία των 550°C και το DW₁₀₅₀ το ξηρό βάρος στη θερμοκρασία των 1050°C.^[23]

Οι δοκιμές απώλειας πυρώσεως πραγματοποιήθηκαν σε ηλεκτρικό κλίβανο με ψηφιακή απεικόνιση της θερμοκρασίας και θερμοστατικό έλεγχο θερμοκρασίας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε έτσι ώστε να αποφευχθεί η παρουσία υγρασίας στα δείγματα πριν αυτά ζυγιστούν. Για το λόγο αυτό, τα δείγματα ξηράνθηκαν αρχικά σε θερμοκρασία 60 °C και στη συνέχεια αφέθηκαν να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος προτού γίνουν οι μετρήσεις.

4.1.6 Δοκιμή αδιάλυτου υπολοίπου

Η δοκιμή απαιτεί τα δείγματα να είναι κονιοποιημένα για τη βέλτιστη αντίδραση με το διάλυμα υδροχλωρικού οξέος. Το διάλυμα αυτό πρέπει να είναι αραιωμένο με νερό με αναλογία 1:3 (HCl:H₂O) και συνήθως παρασκευάζεται επί τόπου λίγο πριν πραγματοποιηθεί η πειραματική διαδικασία.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα, ένα φυσικού και ένα τεχνητού πωρόλιθου βάρους 5 gr το καθένα. Αφού προστέθηκε η απαιτούμενη ποσότητα του διαλύματος υδροχλωρικού οξέος και τα δείγματα αφέθηκαν να αντιδράσουν πλήρως, στη συνέχεια εκπλύθηκαν με απιονισμένο νερό. Ακολούθησε διήθηση και στη συνέχεια ξήρανση των δειγμάτων σε 60°C. Η διαφορά βάρους του υλικού πριν την αντίδραση με το υλικό μετά την αντίδραση διαιρεμένη με το αρχικό βάρος δίνει το ποσοστό CaCO₃ που υπήρχε στο κάθε δείγμα.^[4]

4.1.7 Φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (XRF)

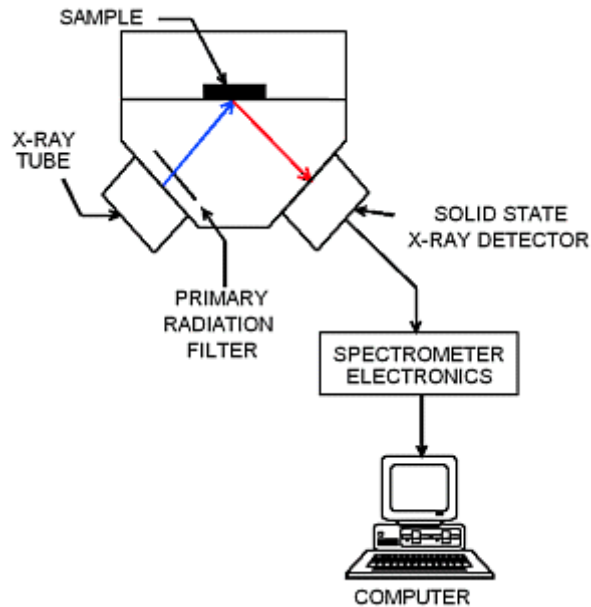
Η φασματοσκοπία XRF χρησιμοποιείται ευρέως για την ποιοτική και ποσοτική στοιχειακή ανάλυση ποικιλίας στερεών και υγρών δειγμάτων. Η μέθοδος XRF βρίσκει εφαρμογή σε πολλά πεδία, όπως στη γεωλογία, την ορυκτολογία, τη μεταλλουργία, την επιστήμη υλικών κ.α. Με τη μέθοδο XRF μπορεί να προσδιοριστεί η συγκέντρωση όλων των στοιχείων με ατομικό βάρος μεγαλύτερο του αργιλίου. Η ανάλυση είναι πολύ γρήγορη και εξαιρετικά αξιόπιστη, προσφερόμενη για μεγάλο αριθμό μετρήσεων δειγμάτων γνωστής

σύνθεσης. Η απαιτούμενη ελάχιστη ποσότητα δείγματος είναι 5-10 gr. Το χαμηλότερο όριο ανίχνευσης της συσκευής εξαρτάται από την ανάλυση των στοιχείων και μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1-100 ppm, σύμφωνα με τα στοιχεία που μετρήθηκαν και τη συνολική χημική σύσταση του δείγματος. Η τυπική διάταξη φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων-X αποτελείται από μια πηγή πρωτογενούς ακτινοβολίας (ραδιοϊσότοπο ή λυχνία ακτίνων-X) και ένα σύστημα ανίχνευσης της δευτερεύουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το δείγμα. Οι ακτίνες-X αποτελούν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το μήκος κύματος τους αλληλοκαλύπτεται με την ακτινοβολία-γ και τις μικρού μήκους κύματος υπεριώδεις ακτίνες. Το φάσμα τους αποτελείται από το συνεχές και το χαρακτηριστικό, με σχετικά λίγες συγκεκριμένες τιμές.

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός ότι ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής ατομικής στιβάδας διεγείρεται από προσπίπτουσα ακτινοβολία κατάλληλης ενέργειας και κατά τη μετάπτωση του ατόμου στη θεμελιώδη του κατάσταση, ηλεκτρόνιο ανώτερης ενεργειακής στάθμης καταλαμβάνει την κενή θέση της εσωτερικής στιβάδας. Ταυτόχρονα έχουμε εκπομπή φωτονίου ενέργειας στην περιοχής των ακτίνων-X. Με την παραπάνω διαδικασία στο φάσμα των ακτίνων-X έχουμε την εμφάνιση χαρακτηριστικών μηκών κύματος. Το μήκος κύματος οδηγεί στην ταυτοποίηση των στοιχείων που περιέχονται στο δείγμα (ποιοτική ανάλυση), ενώ από την έντασή της προκύπτουν οι σχετικές ή απόλυτες συγκεντρώσεις των στοιχείων του δείγματος. Η διέγερση του δείγματος για εκπομπή ακτίνων-X, γίνεται με ειδικές λυχνίες ακτίνων-X, ενέργειας πολλαπλάσιας αυτής που θέλουμε να διεγείρουμε.

Οι βασικές μονάδες ενός συστήματος φασματομετρίας ακτίνων-X φθορισμού είναι μια λυχνία παραγωγής της πρωτογενούς ακτινοβολίας ή ραδιενεργός πηγή, ένα φίλτρο πρωτογενούς ακτινοβολίας, ένας ευθυγραμμιστής, ο αναλυτής κρύσταλλος και ο ανιχνευτής.^[26]

Οι μέθοδοι προετοιμασίας των δειγμάτων ποικίλουν ανάλογα με το είδος της ανάλυσης. Η ομοιογένεια του δείγματος είναι σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα της ανάλυσης. Η περιεκτικότητα του αντίστοιχου στοιχείου στο δείγμα είναι συνδεδεμένη με την ένταση των ακτίνων-X για κάθε ανάκλαση.



Εικόνα 4.5: Σχηματική διάταξη φασματομέτρου ακτίνων-X

Για την χημική ανάλυση των δειγμάτων με τη μέθοδο φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF), χρησιμοποιήθηκε το φασματόμετρο S2 Ranger της Bruker (Εικόνα 4.6) του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Εικόνα 4. 6: Φασματοσκόπιο ακτίνων-X φθορισμού του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

4.2 Αναλύσεις μηχανικών ιδιοτήτων

4.2.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης

Για τη μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS, uniaxial compressive strength) τού «ακέραιου» πετρώματος στο εργαστήριο, κατασκευάζονται δοκίμια σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές. Τα εργαστηριακά δοκίμια είναι συνήθως κυλινδρικά με μήκος διπλάσιο έως τριπλάσιο της διαμέτρου τους και τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες σε κατάλληλη μηχανή φόρτισης. Στη συνέχεια φορτίζονται είτε με έλεγχο του φορτίου (load control) είτε με έλεγχο της μετατόπισης (displacement control) κατά τον διαμήκη άξονα τους και συγχρόνως καταγράφεται η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση που υφίστανται. Οι παραμορφώσεις αυτές προκύπτουν μετά από μετρήσεις διαστολής ή/και συστολής των υλικών, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με μηχανικά (strain gages) είτε με ηλεκτρικά μηχανοσκόπια (electrical strain gages) κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση τού δοκιμίου, είτε μετρώντας τη σύγκλιση των πλακών, από τις οποίες εφαρμόζεται η θλιπτική τάση στο δοκίμιο.^[24]

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε με σκοπό να ταξινομηθούν τα δοκίμια από πλευράς αντοχής.

Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διάμετρο περίπου 54 mm και ύψος 2.5 – 3 φορές τη διάμετρο τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμών. Για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης απαιτούνται η παραλληλία και η λειότητα των βάσεων των κυλινδρικών δοκιμών με ανοχή 0.02 mm και 0.3 mm αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν το εργαστηριακό δισκοπρίονο δοκιμών και ο εργαστηριακός λειαντής.

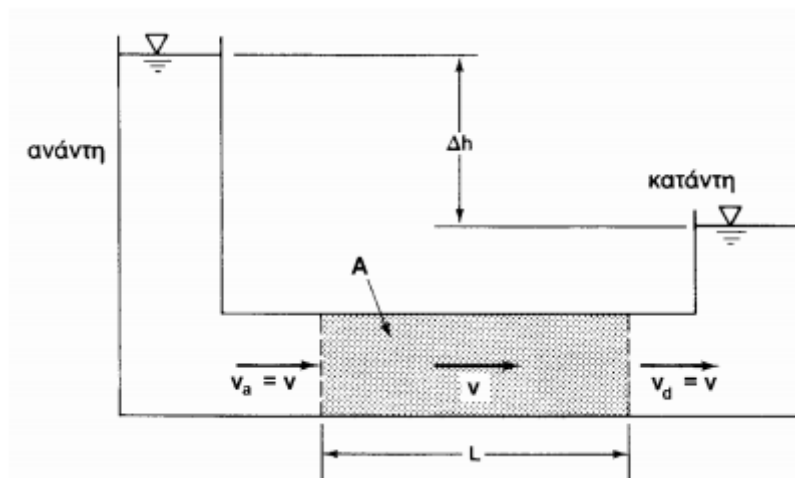
Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για συνολικά 8 κυλινδρικά δοκίμια, τα 4 εκ των οποίων ήταν φυσικού πορολίθου και τα υπόλοιπα τεχνητού.

Μετά το πέρας της προετοιμασίας των κυλινδρικών δοκιμίων μετρήθηκε η διάμετρος τού κάθε δοκιμίου 6 φορές με ακρίβεια 0.1 mm και υπολογίστηκε ο μέσος όρος. Η μέση διάμετρος που προέκυψε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επιφάνειας φόρτισης. Το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκε με ακρίβεια της τάξης του 1.0 mm.

Στη συνέχεια αφού οι σφαιρικές κεφαλές έδρασης της συσκευής δοκιμής λειάνθηκαν με ελαφρό ορυκτέλαιο ακολούθησε η φόρτιση των δοκιμίων με σταθερό ρυθμό φόρτισης μεταξύ 0.5 – 1.0 MPa / sec.

4.2.2 Μέτρηση διαπερατότητας

Ως διαπερατότητα ορίζεται η ικανότητα του πορώδους μέσου να επιτρέπει σε ένα ρευστό με το οποίο είναι κορεσμένο να ρέει μέσω των πόρων του. Στο σχήμα παρουσιάζεται η μονοδιάστατη υδατική ροή διαμέσου εδαφικού στρώματος μήκους L .



Σχήμα 4.5 : Μονοδιάστατη ροή διαμέσου εδαφικού υλικού.^[24]

Εφόσον η στάθμη στις ανάντη και κατάντη δεξαμενές παραμείνει σταθερή, σε μικρό σχετικά χρόνο θα αποκατασταθούν συνθήκες μόνιμης ροής στο εσωτερικό τού εδαφικού στρώματος. Η διηθούμενη παρόχή Q (η ποσότητα του νερού που διηθείται στη μονάδα τού χρόνου, μετρούμενη σε m^3/sec) εξαρτάται από τη διαφορά της στάθμης Δh των δύο

δεξαμενών, το μήκος L και το εμβαδόν A της διατομής του εδαφικού στρώματος. Η παροχή αυτή υπολογίζεται μαθηματικά μέσω του νόμου του Darcy:

$$Q = kA \frac{\Delta h}{L}$$

Η ποσότητα $i = \Delta h / L$ ονομάζεται υδραυλική κλίση ή κλίση της πιεζομετρικής συνάρτησης. Ο συντελεστής k (που έχει μονάδες ταχύτητας) ονομάζεται συντελεστής διαπερατότητας και χαρακτηρίζει το εδαφικό υλικό. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διαπερατότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχαρακτηριστική του εδαφικού υλικού, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη παροχή θα διέλθει διαμέσου του εδαφικού υλικού αν τα υπόλοιπα μεγέθη διατηρηθούν σταθερά. Προφανώς ο συντελεστής διαπερατότητας εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων του εδαφικού υλικού και συνεπώς δεν αποτελεί ιδιότητα του υλικού αλλά μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται ο βαθμός συμπίκνωσης του.^[25]

Η πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό της διαπερατότητας, πραγματοποιήθηκε για έναν πυρήνα τεχνητού πωρόλιθου και έναν φυσικού με αναλογία ύψους-διαμέτρου περίπου 2:1. Στο εργαστήριο τα μεγέθη που μετρήθηκαν ήταν η παροχή, μετρούμενη σε ml/min και η πίεση, μετρούμενη σε bar.

4.2.3 Πορομετρία υδραργύρου

Ο υδράργυρος αποτελεί ένα μη διαβρέχον υγρό για το σύνολο σχεδόν των υλικών και συνεπώς απαιτεί την εφαρμογή πίεσης για να εισδύσει στους πόρους ενός εκκενωμένου πορώδους υλικού. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται ο υδράργυρος προοδευτικά εισβάλλει και στους μικρότερους πόρους και με την προϋπόθεση ότι μια αρκετά μεγάλη πίεση επιβάλλεται, όλο το πορώδες δείγμα θα κορεστεί με υδράργυρο. Καθώς η διαβρέχουσα φάση είναι αέρας πολύ χαμηλής πίεσης (κενό) με ατμούς υδραργύρου, δεν παρουσιάζει καμμία αντίσταση στην είσδυση υδραργύρου και κατά συνέπεια δε μπορεί να οριστεί μη αναγώγιμος κορεσμός διαβρέχουσας φάσης σε μια τέτοια διαδικασία. Ακολούθως, καθώς η εξωτερικά εφαρμοζόμενη πίεση ελαττώνεται, απομάκρυνση του υδραργύρου από προοδευτικά μεγαλύτερους πόρους λαμβάνει χώρα 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 εκ νέου αύξηση της πίεσης και επανείσδυση του υδραργύρου στους πόρους του δείγματος που άδειασαν στο προηγούμενο στάδιο.

Η πειραματική τεχνική απαιτεί ένα μέσο για την επιβολή της πίεσης και ένα μέσο για τον προσδιορισμό του όγκου του υδραργύρου που έχει εισδύσει μέσα στους πόρους του δείγματος σε δεδομένη πίεση. Το μέσο μεταβίβασης πίεσης συνήθως είναι υγρό για λόγους ασφαλείας ενώ όλα τα αέρια αφαιρούνται από το σύστημα πριν το πείραμα μέσω μιας αντλίας κενού που συνδέεται με μετρητή πίεσης για τον έλεγχο του επιπέδου του κενού. Ένας υποδοχέας δείγματος, δεξαμενές για την αποθήκευση υδραργύρου και ρευστού μεταβίβασης πίεσης, μετρητές πίεσης, βαλβίδες και σωληνώσεις σύνδεσης συμπληρώνουν τα βασικά τμήμα ενός ποροσίμετρου υδραργύρου. Ο υποδοχέας ενσωματώνει και ένα σύστημα για τη μέτρηση του όγκου υδραργύρου που εισδύει στο πορώδες δείγμα όπου μεταβολές χωρητικότητας πυκνωτή μετρημένες με κατάλληλο όργανο μετατρέπονται σε μεταβολές όγκου είσδυσης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη πορομετρία υδραργύρου ήταν κυλινδρικού σχήματος, ένα φυσικού και ένα τεχνητού πορόλιθου. Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις πίεσης και μετατόπισης (που αργότερα στην επεξεργασία μετατράπηκαν σε όγκο), χωρίς τα δοκίμια, για τη βαθμονόμηση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις με το δοκίμιο. Η διαφορά των όγκων που προέκυψε από την αρχική τιμή με και χωρίς τα δοκίμια ισούται με το BV. Έπειτα, αφαιρώντας από τον κάθε όγκο που μετρήθηκε για την κάθε πίεση με δοκίμιο, τον όγκο που αντιστοιχεί στην ίδια πίεση χωρίς δοκίμιο, προκύπτει το PV. Καθώς κάθε φορά ο υδράργυρος εισρέει βαθύτερα στους πόρους του δοκιμίου, το PV που προκύπτει είναι αθροιστική ιδιότητα. Συνεπώς διαιρώντας το εκάστοτε PV με το τελευταίο (και μέγιστο), προκύπτει ο κορεσμός σε υδράγγυρο.

Τέλος, διαρώντας το τελευταίο από τα PV που προκύπτουν με το BV προκύπτει το πορώδες φ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.1 Ορυκτολογικές αναλύσεις

5.1.1 Ασβεστιμετρία

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα για τη δοκιμή ασβεστιμετρίας για δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου (Δείγμα 1) και δοκίμιο τεχνητού (Δείγμα 2).

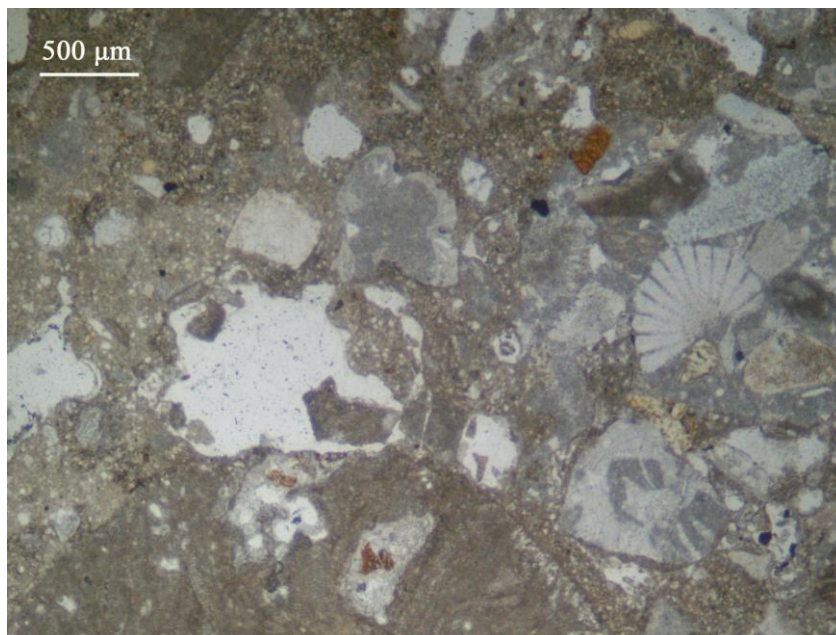
Δείγμα	Βάρος (gr)	P (mmHg)	T (°C)	PH ₂ O	VCO ₂ total(ml)	VCO ₂ ασβεστ.Κ.Σ.μ I	% CO ₂ std ασβεστ.	% CO ₂ ασβεστ.	Ασβεστίτης %
Πρότυπο 99% Cc	0,6538	751	23	21,068	154	136,41	40,90	43,56	99,01
Δείγμα 1	0,7	751	23	21,068	168	148,82	43,84	41,40229217	94,11
Δείγμα 2	0,6791	751	23	21,068	127,5	112,94	43,84	32,38840777	73,62

Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα δοκιμής ασβεστιμετρίας για δείγμα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.

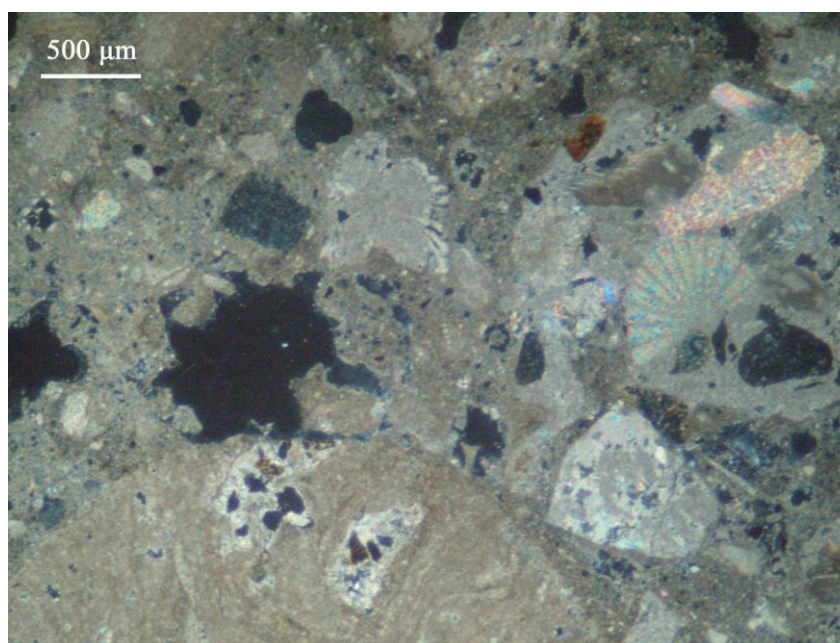
Από τη δοκιμή ασβεστιμετρίας προκύπτει ότι το δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου περιέχει ασβεστίτη σε ποσοστό 94,11% και το δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου σε ποσοστό 73,62%.

5.1.2 Μικροσκοπία διερχομένου φωτός

Οι φωτογραφίες από το ηλεκτρονικού μικροσκοπίου των λεπτών τομών φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου με διασταυρωμένα και παράλληλα Nicols που λήφθηκαν είναι οι ακόλουθες:



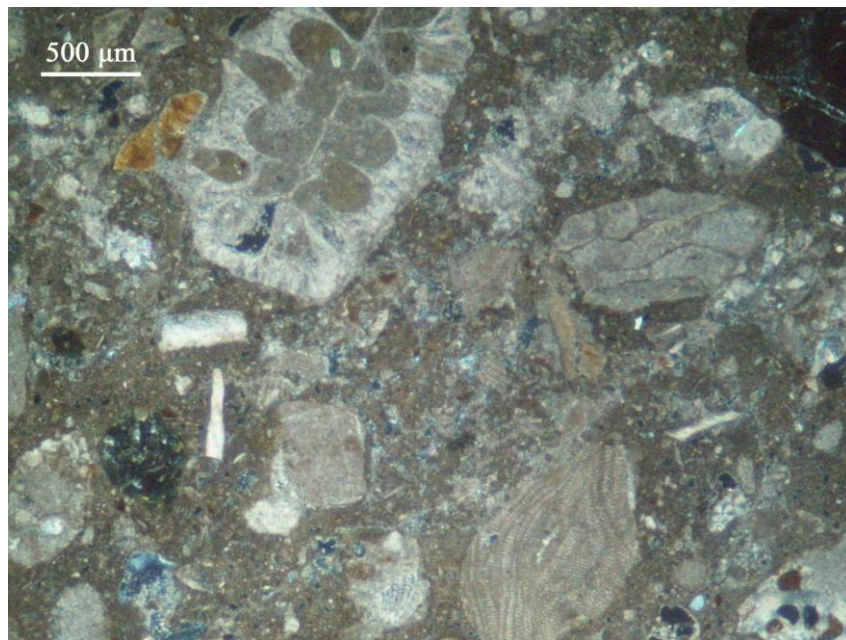
Εικόνα 5.1 : φυσικός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).



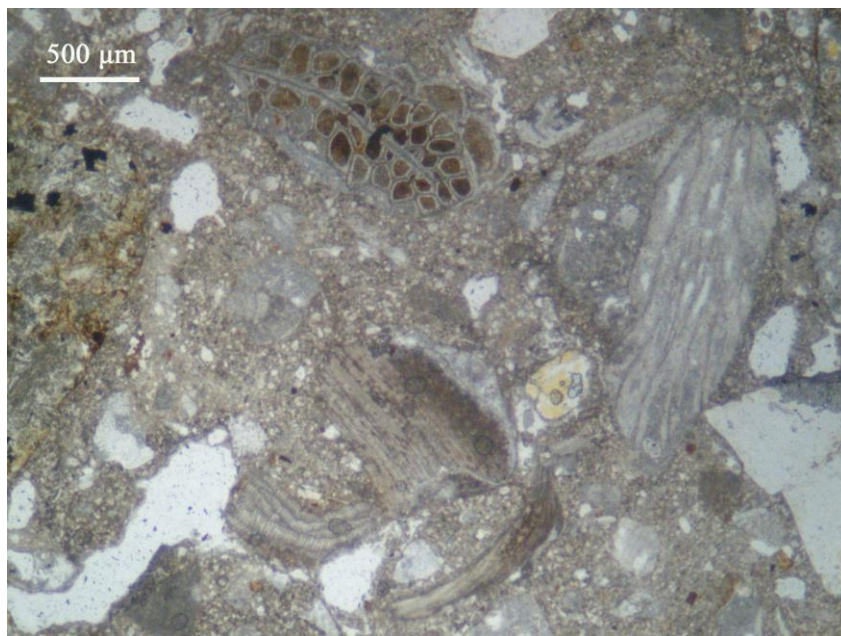
Εικόνα 5.2: φυσικός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols)



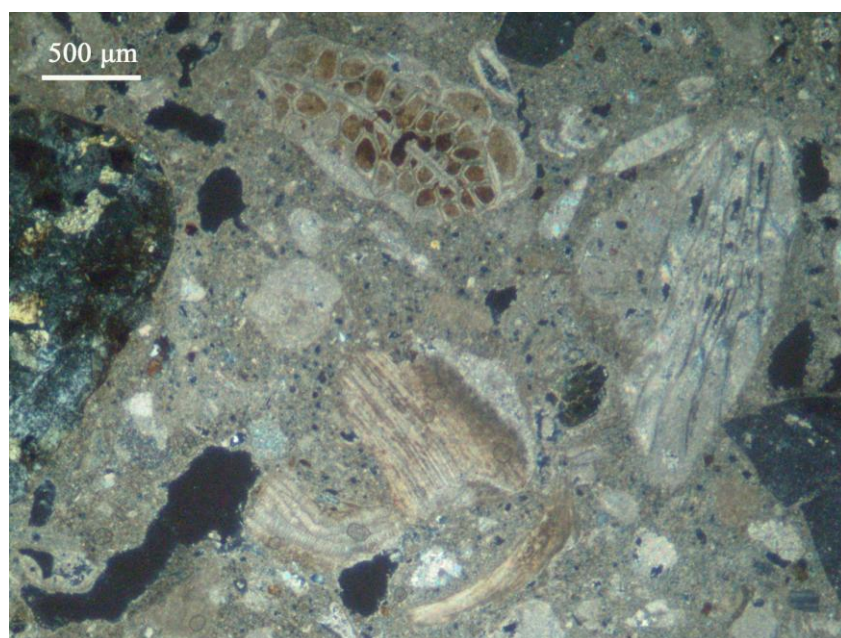
Εικόνα 5.3: φυσικός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).



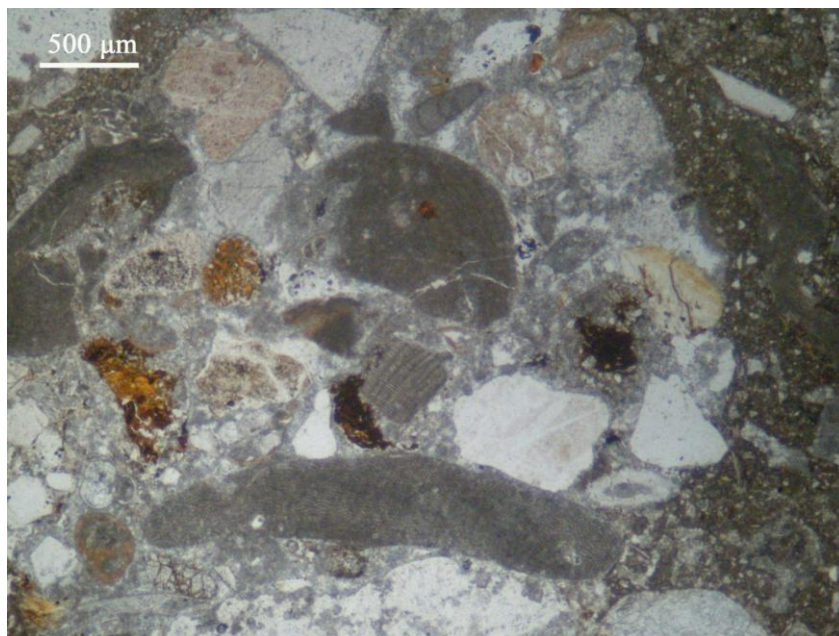
Εικόνα 5.4: φυσικός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).



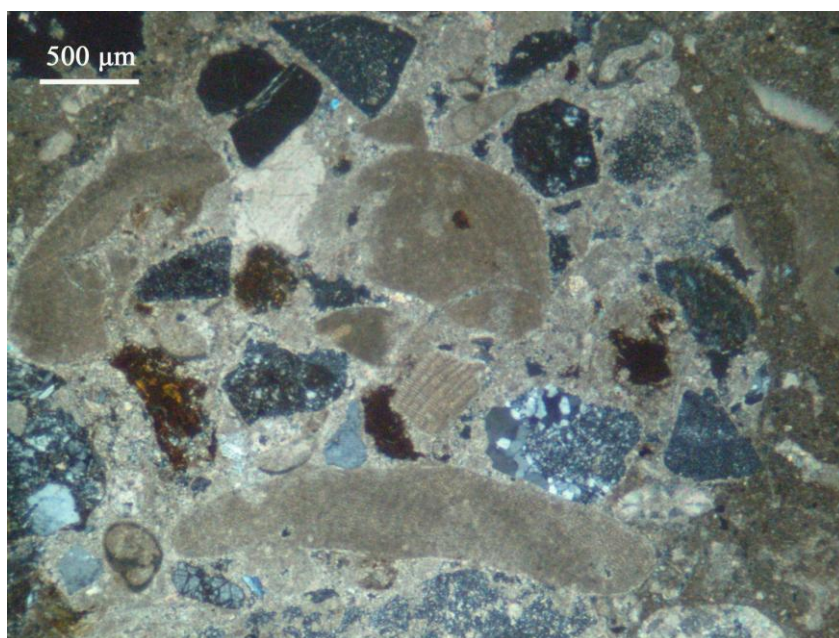
Εικόνα 5.5: φυσικός παρόλιθος (παράλληλα Nicols).



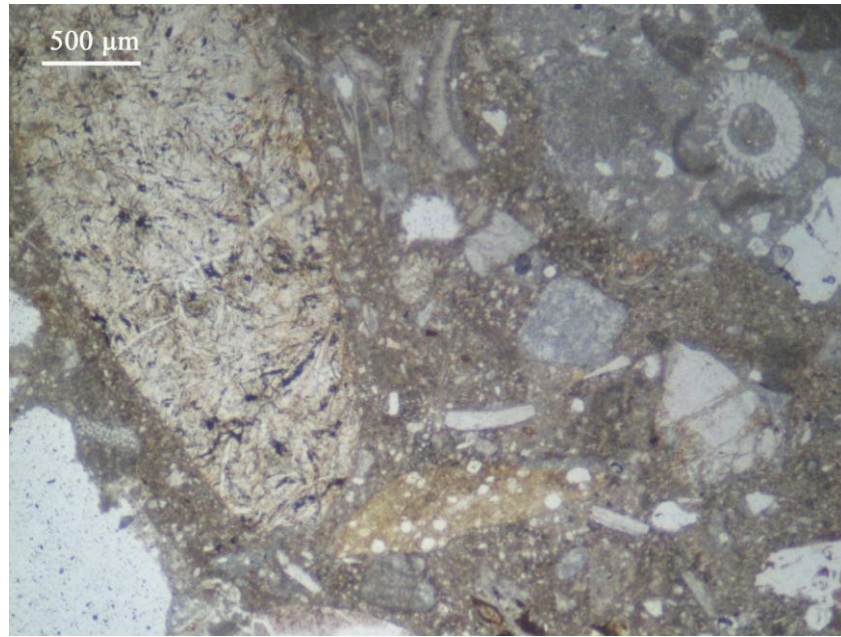
Εικόνα 5.6 : φυσικός παρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).



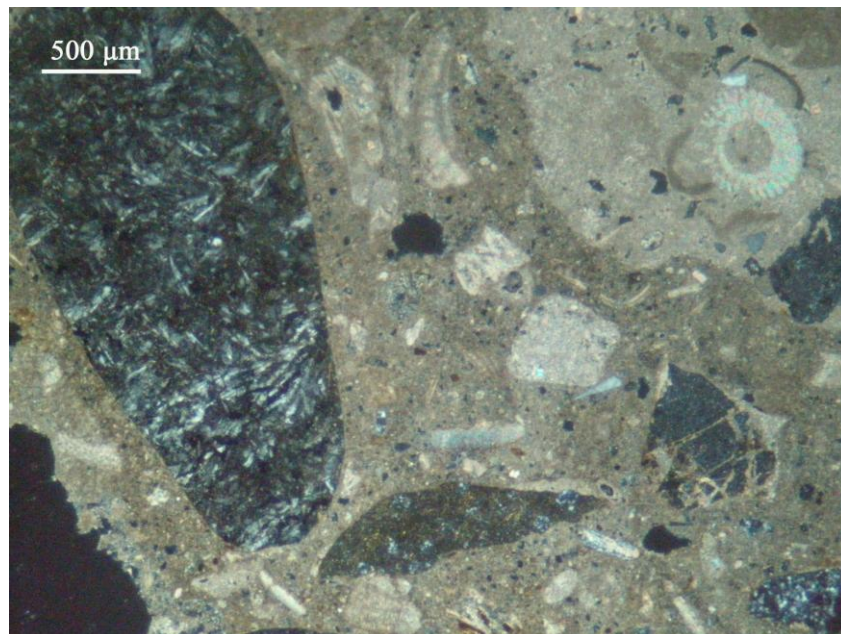
Εικόνα 5.7 : τεχνητός πορώλιθος (παράλληλα Nicols).



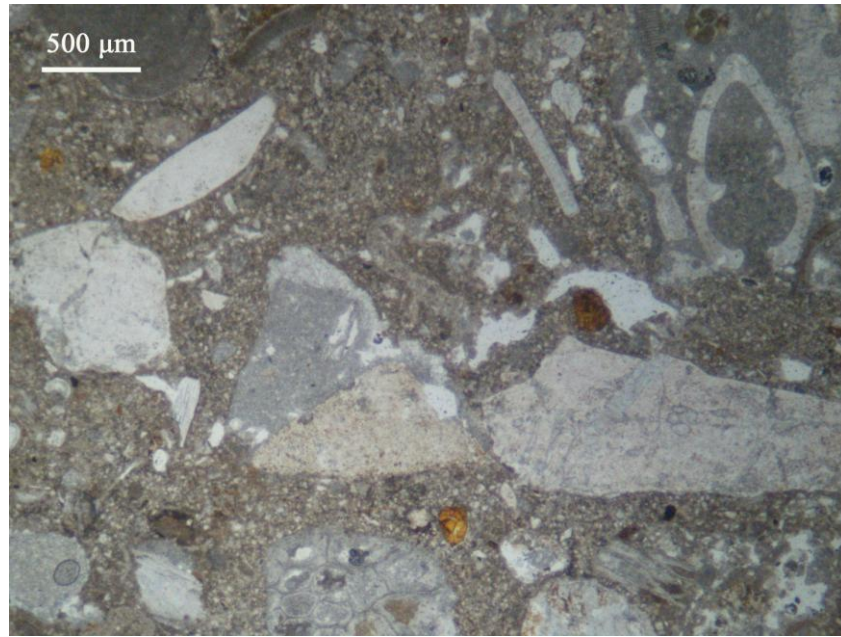
Εικόνα 5.8 : τεχνητός πορώλιθος (διασταυρωμένα Nicols).



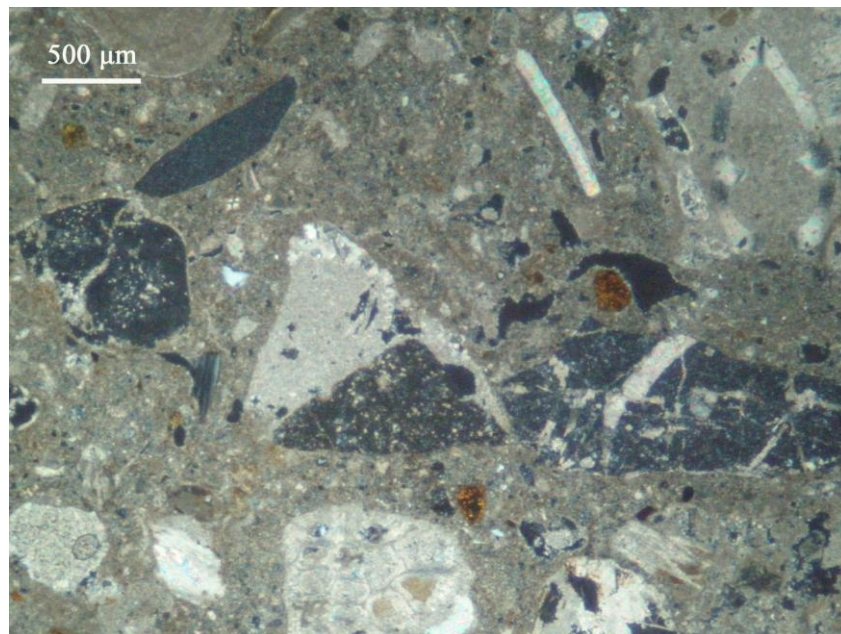
Εικόνα:5.9 τεχνητός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).



Εικόνα 5.10 : τεχνητός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).



Εικόνα 5.11 : τεχνητός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).



Εικόνα 5.12 : τεχνητός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).

5.1.3 Μέτρηση συντελεστή υδατοαπορρόφησης

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις για τη δοκιμή μέτρησης του συντελεστή υδατοαπορρόφησης, με Θ1 το δείγμα φυσικού και Θ2 το δείγμα τεχνητού πωρόλιθου.

Δείγμα	Βάρος επί ξηρώ (gr)	1 ^η ενβάπτιση (gr)	2 ^η ενβάπτιση (gr)	3 ^η ενβάπτιση (gr)
Θ1	248,543	281,743	283,354	283,543
Θ2	248,456	273,412	276,423	276,454

Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα της μέτρησης του συντελεστή υδατοαπορρόφησης για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.

Ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = \Delta M / S \sqrt{t}$$

Όπου: ΔM : η μεταβολή βάρους εξαιτίας του νερού που απορροφήθηκε

t : ο χρόνος απορρόφησης νερού

S : η επιφάνεια επαφής δοκιμίου νερού

Λαμβάνουμε μέσο όρο για τα δύο δείγματα από τις τρεις ενβαπτίσεις και έχουμε:

για Θ1: 275,429 gr = 0,28288 kg

για Θ2: 282,880 gr = 0,275429 kg

οπότε με δεδομένο ότι και τα δύο δοκίμια είχαν επιφάνεια S ίση με $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}^2 = 0,0025 \text{ m}^2$ και ο μέσος χρόνος κάθε ενβάπτισης ήταν 24 ώρες δηλαδή 86.400 sec, οι συντελεστές υδατοαπορρόφησης C είναι:

για Θ1: $C = (0,28288 - 0,248543) \text{ kg} / 0,0025 \text{ m}^2 \sqrt{86.400} = 0,0467 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ sec}^{0,5}$

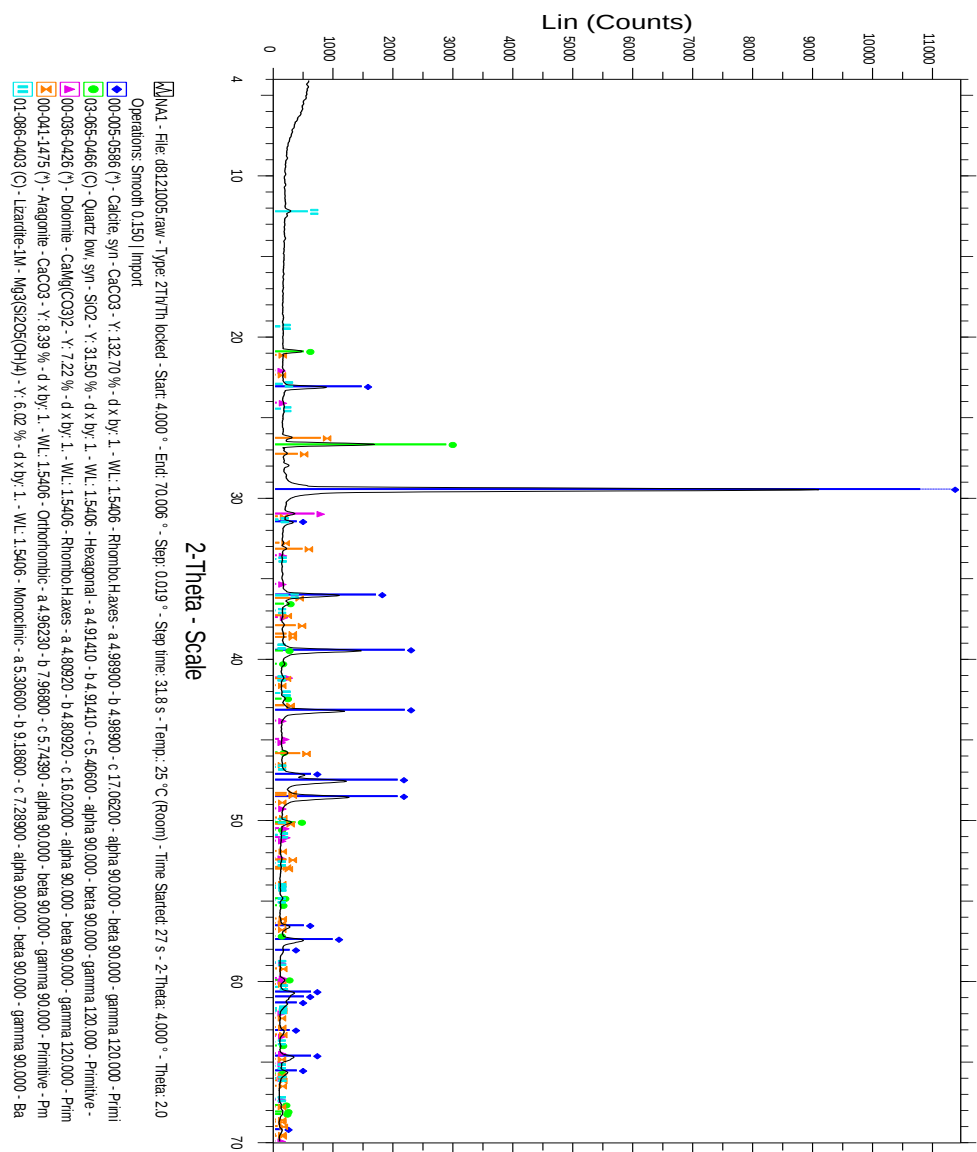
για Θ2: $C = (0,275429 - 0,248456) \text{ kg} / 0,0025 \text{ m}^2 \sqrt{86.400} = 0,0367 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ sec}^{0,5}$

5.1.4 Δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD)

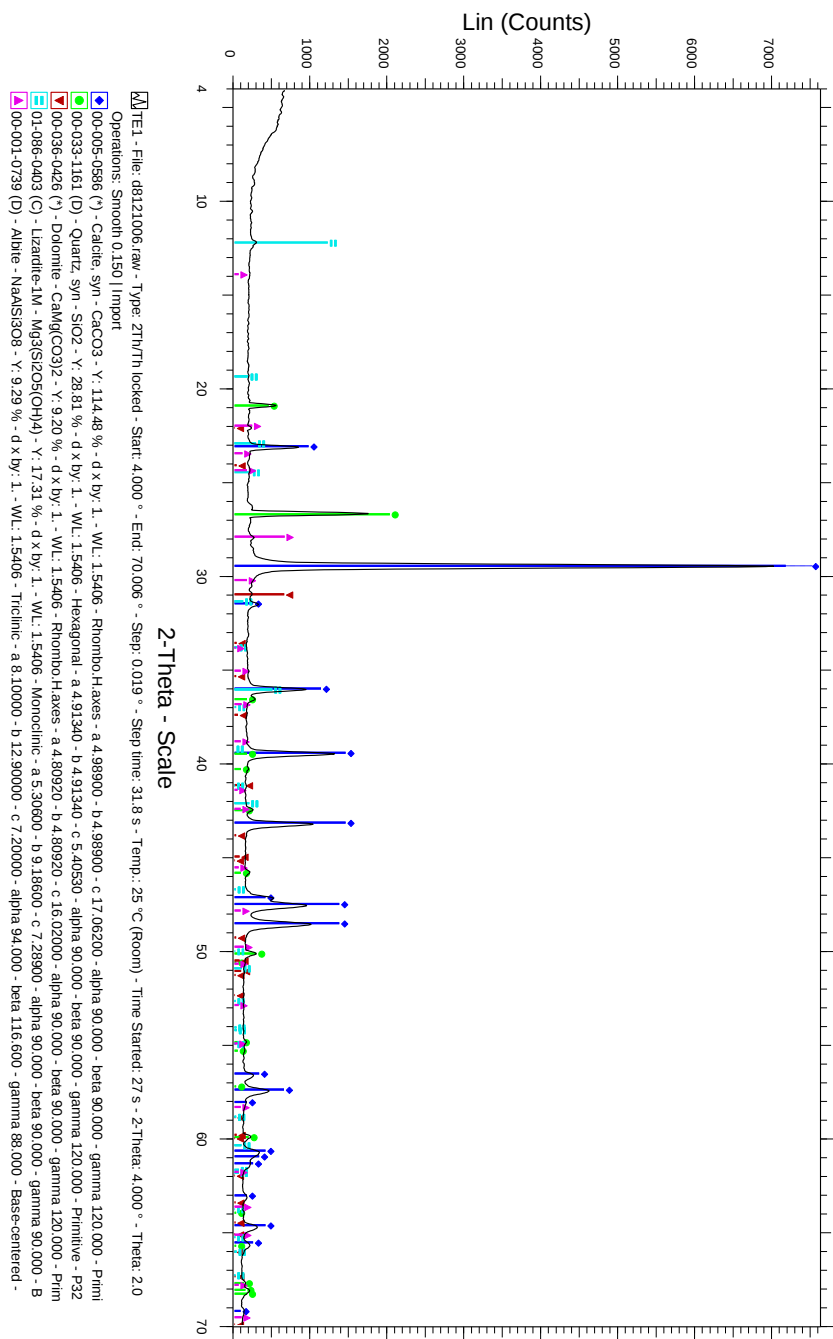
Ενδεικτικά παρατίθενται ένα ακτινογράφημα για το δείγμα φυσικού πωρόλιθου και ένα ακτινογράφημα για το δείγμα του τεχνητού. Τα υπόλοιπα ακτινογραφήματα τού περιθλασίμετρου παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.

Στο κονιοποιημένο πρώτο δείγμα φυσικού πωρόλιθου (NA1), το οποίο υποβλήθηκε σε δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (Εικόνα 5.13), παρατηρείται ασβεστίτης, χαλαζίας, δολομίτης, αραγωνίτης καθώς και λιζαρδίτης.

Στο δείγμα τεχνητού πωρόλιθου (TE1), το οποίο υποβλήθηκε σε δοκιμή περιθλασιμετρίας ακτίνων X (Εικόνα 5.14), παρατηρείται χαλαζίας, ασβεστίτης, δολομίτης, λιζαρδίτης και αλβίτης.



Εικόνα 5.13: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πυρόλιθου.



Εικόνα 5.14: Ακτινογράφημα δείγματος τεχνητού πυρόλιθου.

5.1.5 Απόλεια πύρωσης

Δείγμα	Βάρος δείγματος (60°C) gr	Βάρος κάψας gr	Βάρος δείγματος- κάψας (1050°C) gr
Φυσικός	5.0178	34.4044	37.5181
Τεχνητός	5.0958	33.1465	36.4762

Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα δοκιμής απώλειας πύρωσης για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.

Ο συντελεστής απώλειας πύρωσης όπως έχει προαναφερθεί υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LOI_{1050} = ((DW_{60} - DW_{1050}) / DW_{60}) * 100$$

Οπότε για το δείγμα φυσικού πωρόλιθου έχουμε:

$$LOI_{1050} = ((DW_{60} - DW_{1050}) / DW_{60}) * 100 = [(5.0178 - 3.1137) / 5.0178] * 100\% = 37.94\%$$

$$\text{Όπου } DW_{1050} = \text{Βάρος δείγματος-κάψας}_{1050}^{\circ}\text{C} - \text{Βάρος κάψας} = 37.5181 - 34.4044 = 3.1137 \text{ gr}$$

Για το δείγμα τεχνητού πωρόλιθου έχουμε:

$$LOI_{1050} = ((DW_{60} - DW_{1050}) / DW_{60}) * 100 = [(5.0958 - 3.3297) / 5.0958] * 100\% = 34.65\%$$

$$\text{Όπου } DW_{1050} = \text{Βάρος δείγματος-κάψας}_{1050}^{\circ}\text{C} - \text{Βάρος κάψας} = 36.4762 - 33.1465 = 3.3297 \text{ gr}$$

5.1.6 Δοκιμή αδιάλυτου υπολοίπου

Δείγμα	Βάρος Διηθητικού (gr)	Βάρος υλικού (gr)	Βάρος μετά την αντίδραση (gr)
Φυσικός	2.543	10.765	3.8856
Τεχνητός	2.683	10.845	4.8832

Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα δοκιμής αδιάλυτου υπολοίπου για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.

Ποσοστό CaCO_3 δείγματος φυσικού πωρόλιθου:

$$[(10.765 - (3.8856 - 2.543)) / 10.765] * 100\% = 87.528\%$$

Οπότε το αδιάλυτο υπόλοιπο στο δείγμα φυσικού πωρόλιθου είναι:

$$(100 - 87.528)\% = 12.47\%$$

Ποσοστό CaCO_3 δείγματος τεχνητού πωρόλιθου:

$$[(10.845 - (4.8832 - 2.683)) / 10.845] * 100\% = 79.712\%$$

Οπότε το αδιάλυτο υπόλοιπο στο δείγμα τεχνητού πωρόλιθου είναι:

$$(100 - 79.712)\% = 20.287\%$$

5.1.7 Φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (XRF)

Δείγμα	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	CO ₂ (%)	SUM (%)
NA1	1.09	0.03	44.82	0.12	12.02	0.35	1.70	0.00	37.94	98.07
TE1	2.11	0.04	41.24	0.16	18.63	1.00	1.65	0.00	34.65	99.48

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα φασματομετρίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF).

Η φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού (XRF) για το δείγμα φυσικού πωρόλιθου (NA1) καταδεικνύει την ύπαρξη ως επί το πλείστον οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και σε μικρότερα ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂), τριοξειδίου του σιδήρου (Fe₂O₃), οξειδίου του μαγνησίου (MgO), οξειδίου του καλίου (K₂O), τριοξειδίου του αργιλίου (Al₂O₃) και σε μικρό ποσοστό οξείδιο του μαγγανίου (MnO).

Προσθέτοντας τα ποσοστά των ενώσεων αυτών που περιέχονται στο δείγμα φυσικού πωρόλιθου με το ποσοστό του οργανικού και ανθρακικού περιεχομένου που προέκυψε από τη δοκιμή απώλειας πυρώσεως, το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να είναι 100%. Στην προκειμένη περίπτωση το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 98.07%, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται σε πειραματικά σφάλματα.

Αντίστοιχα για το δείγμα του τεχνητού πωρόλιθου η φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού έδειξε την ύπαρξη, κατά κύριο λόγο, οξειδίου του ασβεστίου (CaO), διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂), τριοξειδίου του σιδήρου (Fe₂O₃), οξειδίου του μαγνησίου (MgO), οξειδίου του καλίου (K₂O), τριοξειδίου του αργιλίου (Al₂O₃) και οξειδίου του μαγγανίου (MnO).

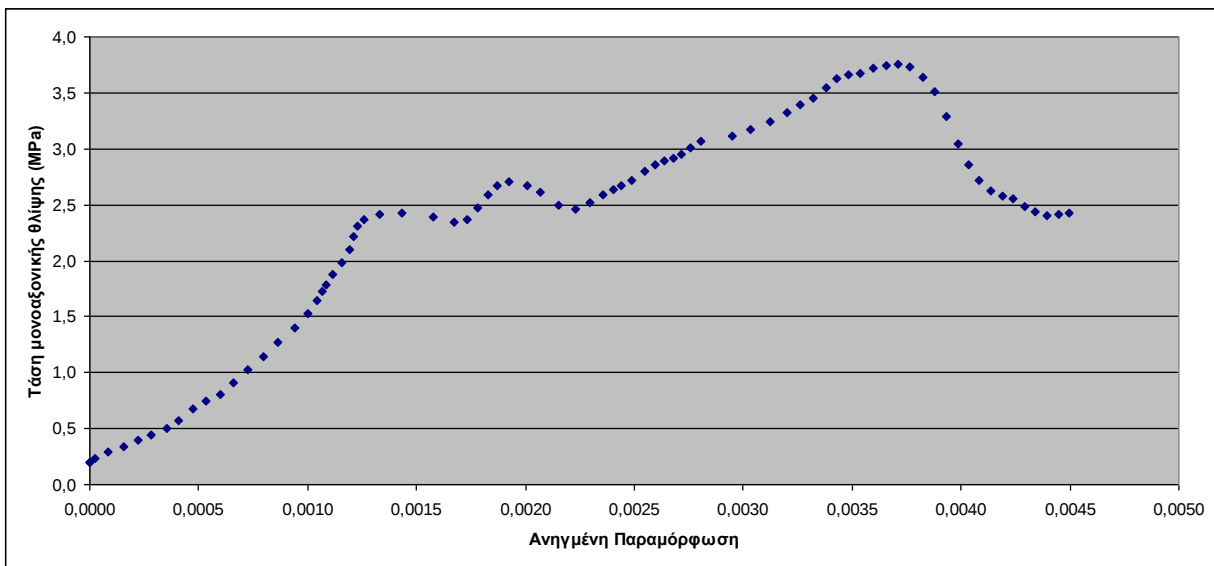
Το άθροισμα των ποσοστών των συστατικών αυτών με το ποσοστό της δοκιμής απώλειας πυρώσεως ανέρχεται στο 99.48%, αποτέλεσμα δηλαδή με λιγότερα πειραματικά σφάλματα σε σχέση με το δείγμα φυσικού πωρόλιθου.

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) στον τεχνητό πωρόλιθο, κάτι που οφείλεται στην παρουσία τσιμέντου. Όσον αφορά τις υπόλοιπες ενώσεις δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

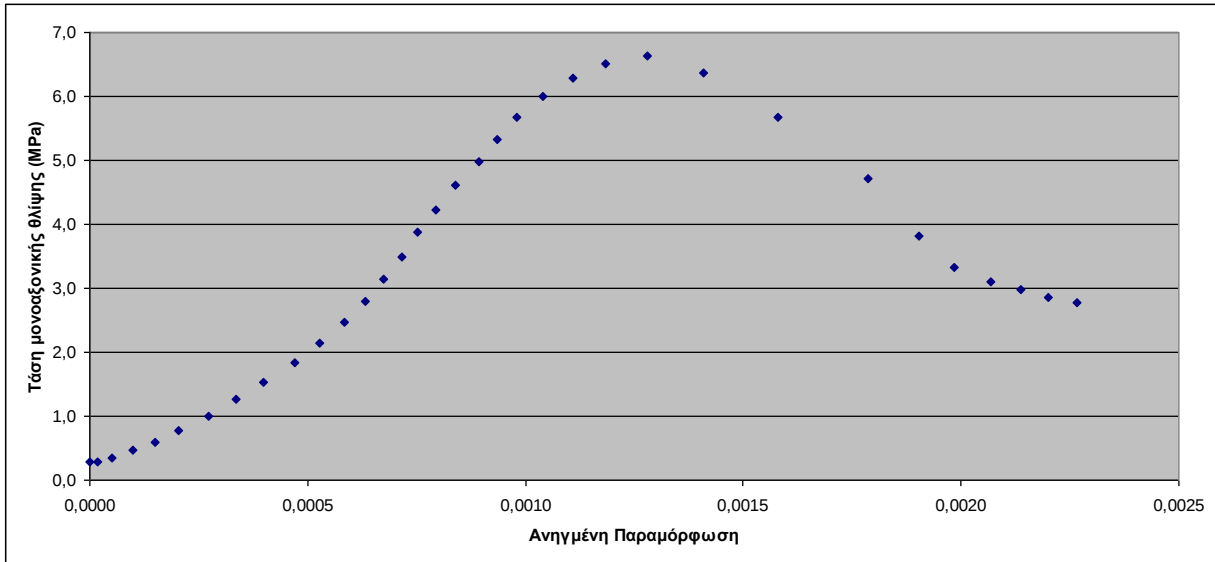
5.2 Αναλύσεις μηχανικών ιδιοτήτων

5.2.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης

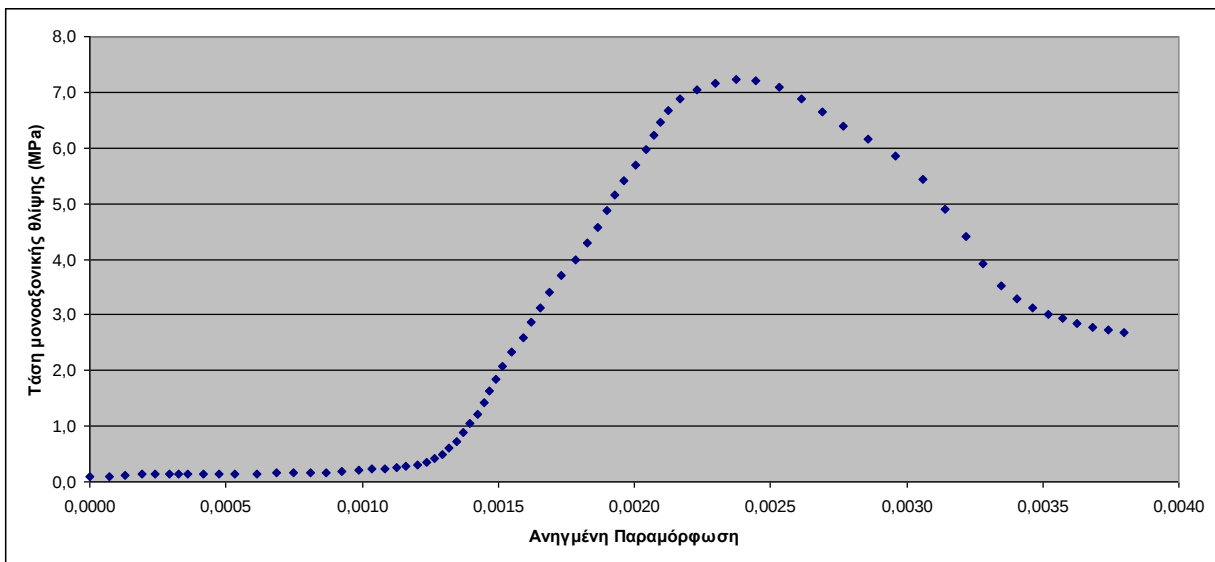
Από τη δοκιμή ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης σε τέσσερα δοκίμια φυσικού και τέσσερα τεχνητού πωρόλιθου διαγράμματα τάσης (MPa) – ανηγμένης παραμόρφωσης εκ των οποίων παρατίθενται ενδεικτικά τα ακόλουθα:



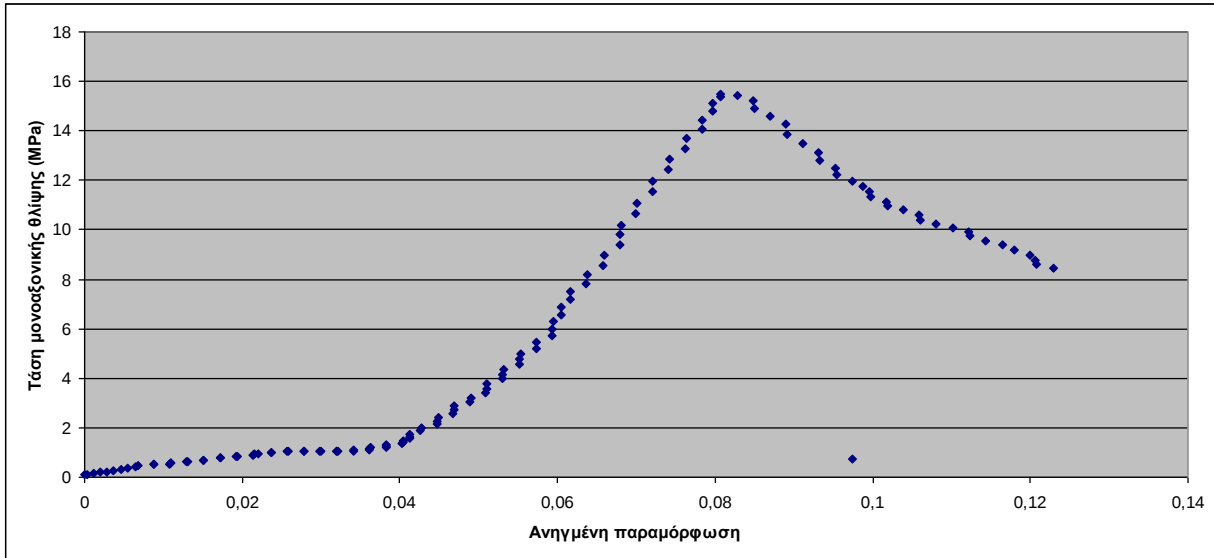
Διάγραμμα 5.1: δοκίμιο 2, φυσικού πωρόλιθου.



Διάγραμμα 5.2: δοκίμιο 3, φυσικού πωρόλιθου.



Διάγραμμα 5.3: δοκίμιο 1, τεχνητού πωρόλιθου.



Διάγραμμα 5.4: δοκίμιο 4, τεχνητού πωρόλιθου.

Παρατηρείται δηλαδή για τα δοκίμια καλής ποιότητας φυσικού πωρόλιθου αντοχή της τάξης 7-9 MPa και για τα δοκίμια πιο χαμηλής ποιότητας φυσικού πωρόλιθου αντοχή περίπου 3,5-4 MPa.

Τα δύο από τα τέσσερα δοκίμια τεχνητού πωρόλιθου παρουσίασαν υψηλές αντοχές, περίπου 15-16 MPa, ενώ τα υπόλοιπα 7-8 MPa.

5.2.2 Μέτρηση διαπερατότητας

Εκτελέσθηκαν μετρήσεις για την εκτίμηση της διαπερατότητας σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο τεχνητού πωρολίθου και σε ένα φυσικού. Μετρήθηκε η παροχή (ml/min) για διαφορετική κάθε φορά πίεση (bar). Η πίεση αναφοράς της αντλίας μετρήθηκε 2,3 bar και η πίεση στεγάνωσης 50 atm.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους πίνακες:

Δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου:

Ύψος (cm)	Διάμετρος (cm)
4,67	2,58

Παροχή (ml/min)	Πίεση (bar)
100	2,8
150	3,3
200	3,95
50	2,45

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα δοκιμής διαπερατότητας για κυλινδρικό δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου.

Δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου

Ύψος (cm)	Διάμετρος (cm)
4,67	2,58

Παροχή (ml/min)	Πίεση (bar)
50	5
75	6,9
100	9
125	11,2
150	13,65
200	18,5

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα δοκιμής διαπερατότητας για κυλινδρικό δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου.

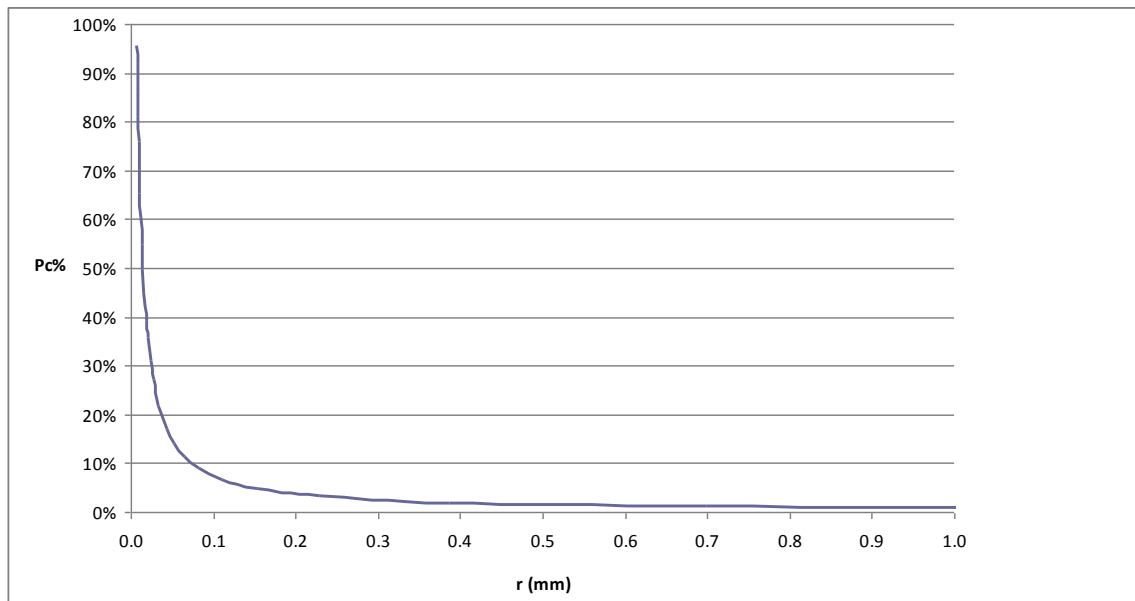
Η διαπερατότητα K για το δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου υπολογίζεται κάθε φορά για τις διάφορες παροχές με τη βοήθεια του νόμου του Darcy και τις πιέσεις και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος ο οποίος είναι 0.45785 mD.

Αντίστοιχα, για το δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου ο μέσος όρος της διαπερατότητας υπολογίστηκε ότι είναι 0.1302 mD. Οι μετρήσεις και για τα δύο δοκίμια παρατίθενται στο παράρτημα.

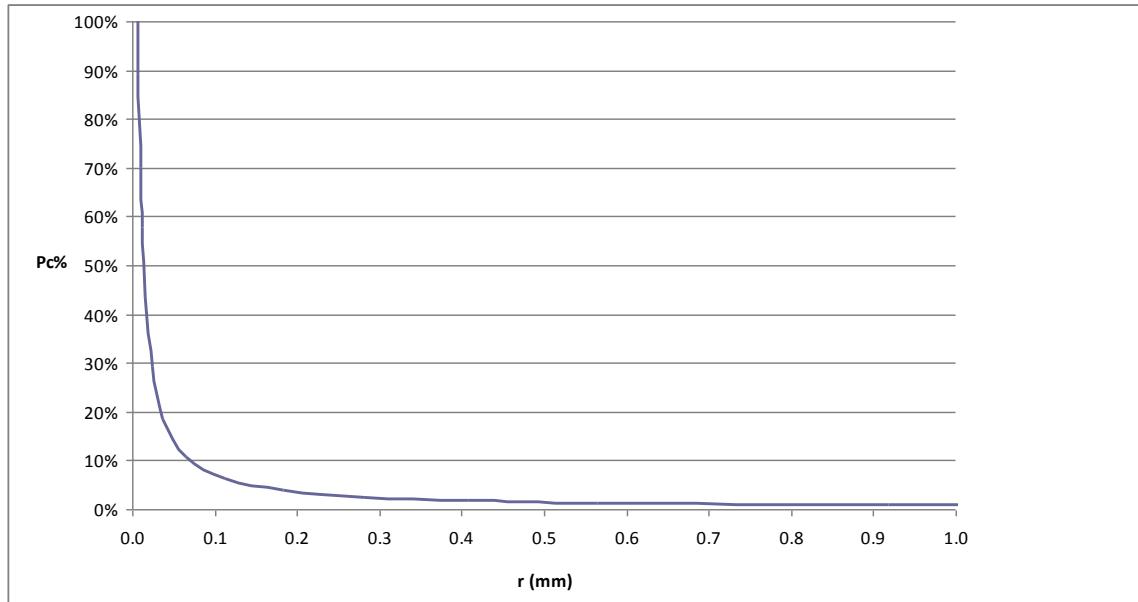
5.2.3 Πορομετρία υδραργύρου

Από την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτουν δύο διαγράμματα, ένα για το κάθε υλικό, όπου φαίνεται η αθροιστική κατανομή του πορώδους σε σχέση με την ακτίνα του εκάστοτε δοκιμίου πωρόλιθου.

Τα διαγράμματα που προέκυψαν είναι τα εξής:



Διάγραμμα 5.5: δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου.



Διάγραμμα 5.6: δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρώτο συμπέρασμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πως το φυσικό υλικό δομής των ιστορικών μνημείων Ρόδου, ευρέως γνωστό ως πωρόλιθος, είναι βιοκλαστικός ασβεστόλιθος και όχι ψαμμιτικό υλικό όπως λανθασμένα είχε καθιερωθεί να θεωρείται. Αυτό προέκυψε κυρίως από τις ορυκτολογικές αναλύσεις (ασβεστιμετρία, περιθλασιμετρία ακτίνων-X, φασματομετρία ακτίνων-X φθορισμού κ.α.)

Χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Υψηλό πορώδες με σχετικά ομαλή κατανομή μεγέθους πόρων.
- Βιογενής κατά κύριο λόγο προέλευση, με τα απολιθώματα να συνεχονται με ασβεστιτικό υλικό.
- Χαμηλές μηχανικές αντοχές, ανάλογες με την ποσότητα του συνδετικού υλικού ή αντιστρόφως ανάλογες με το πορώδες.
- Σχετικά υψηλές τιμές του συντελεστή υδατοαπορρόφησης και γενικά χαρακτηριστικά που ευνοούν τη διείσδυση και κυκλοφορία διαλυμάτων.

Η παρασκευή του τεχνητού πωρόλιθου, έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός υλικού με βελτιωμένες τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του φυσικού υλικού με την ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας οδήγησαν σε αυτό ακριβώς το συμπέρασμα. Πως ο τεχνητός πωρόλιθος αποτελεί ένα τεχνητό υλικό το οποίο περιλαμβάνει όλες τα φυσικά χαρακτηριστικά του φυσικού όπως είναι η το χρώμα και η υφή αλλά με βελτιωμένες τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

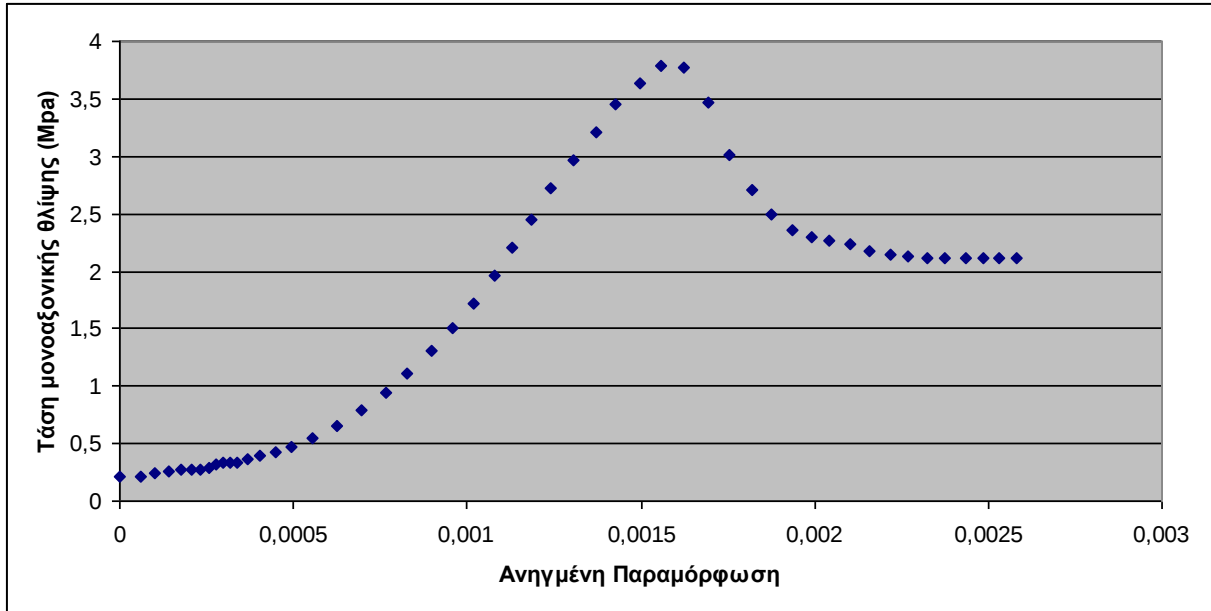
- Μειωμένο πορώδες με ομοιόμορφη την κατανομή του μεγέθους των πόρων.
- Υψηλότερες μηχανικές αντοχές που αποδίδονται στη χρήση τού λευκού τσιμέντου τύπου Portland το οποίο είναι ταχείας πήξεως και υψηλότερης αντοχής από το συμβατικό.

-Μικρότερες τιμές του συντελεστή υδατοαπορρόφησης που αποτρέπουν τη διείσδυση διαλυμάτων και κατά συνέπεια τη φθορά και αλλοίωση του πετρώματος από περιβαλλοντικούς παράγοντες.

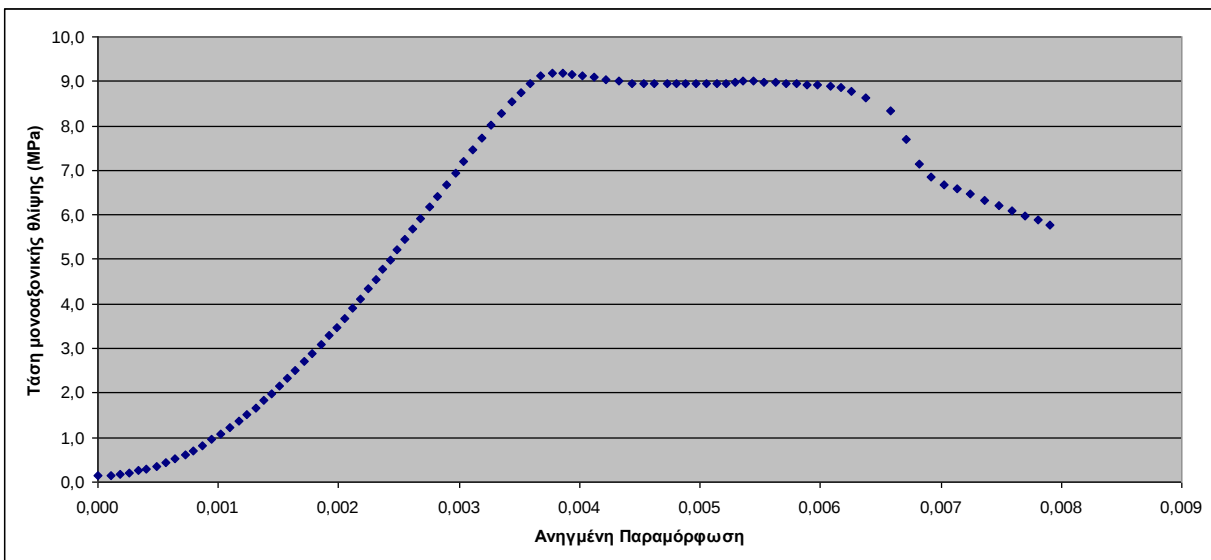
Αποδεικνύεται, λοιπόν, πως ο τεχνητός πωρόλιθος είναι ικανός να αντικαταστήσει το φυσικό ο οποίος πέρα από το υψηλό κόστος εξόρυξης που τον χαρακτηρίζει, είναι δυσεύρετος, ενώ τέλος οι τεχνοκρατικές δυσκολίες δυσχεραίνουν τη διαδικασία εκλατόμευσης του.

Το κεντρικό συμπέρασμα της εργασίας αυτής είναι ότι η ίδια μεθοδολογία αναλύσεων η οποία εμπλέκει τη μικροδομή με τα μακρομηχανικά χαρακτηριστικά του φυσικού πωρόλιθου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό ενός τεχνητού υλικού, με βελτιωμένες ιδιότητες, κατάλληλου για τη συντήρηση μνημείων και ιστορικών κτιρίων με σαφώς μειωμένο κόστος παρασκευής. Κατά αυτόν τον τρόπο ενθαρρύνονται οι αρμόδιοι φορείς να προστατεύσουν την ιστορική, εθνική κληρονομιά έχοντας ένα εύχρηστο, φθηνό, βελτιωμένο και κυρίως πανομοιότυπο με το πρωτότυπο, τεχνητό υλικό.

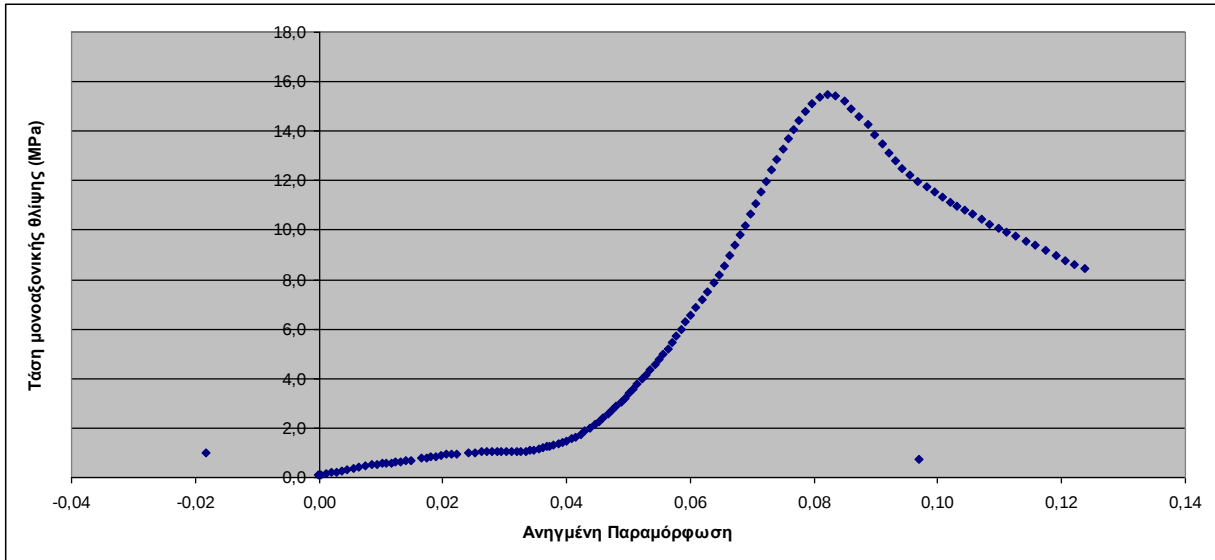
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



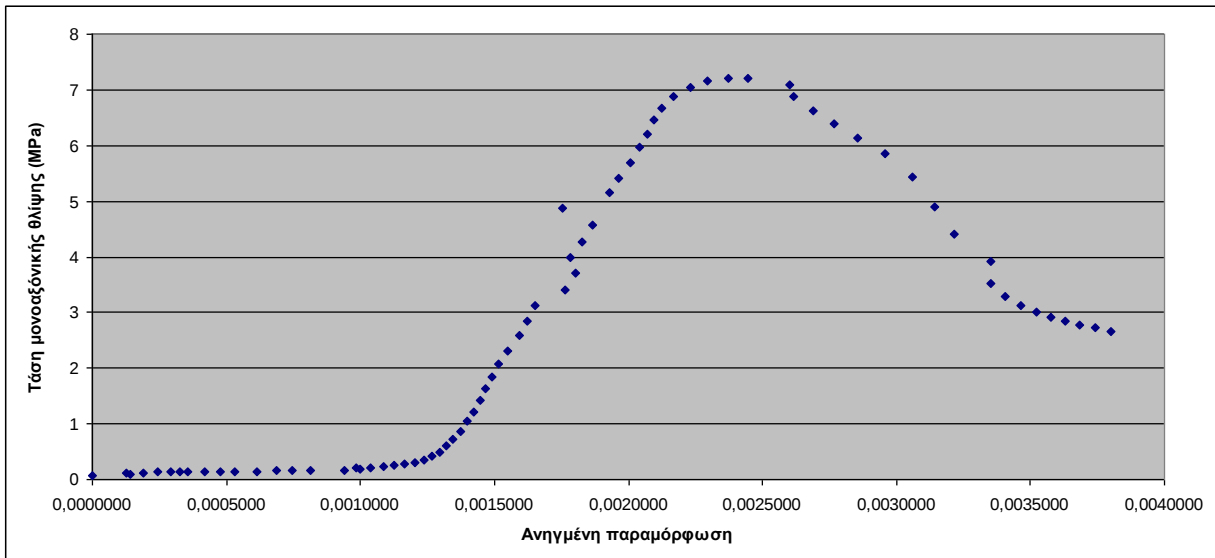
Διάγραμμα δοκιμίου 1, φυσικού παρόλιθου.



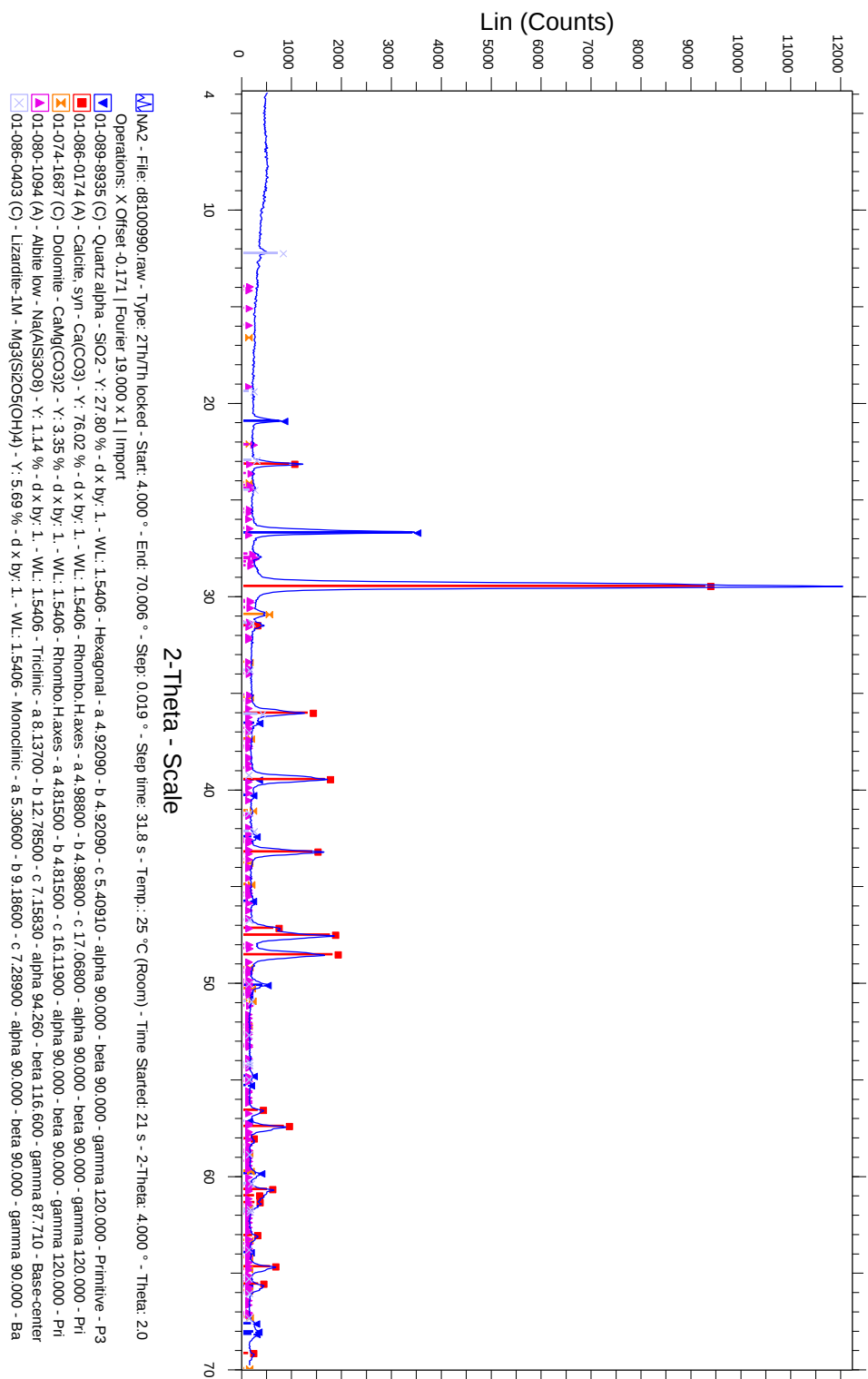
Διάγραμμα δοκιμίου 4, φυσικού παρόλιθου.



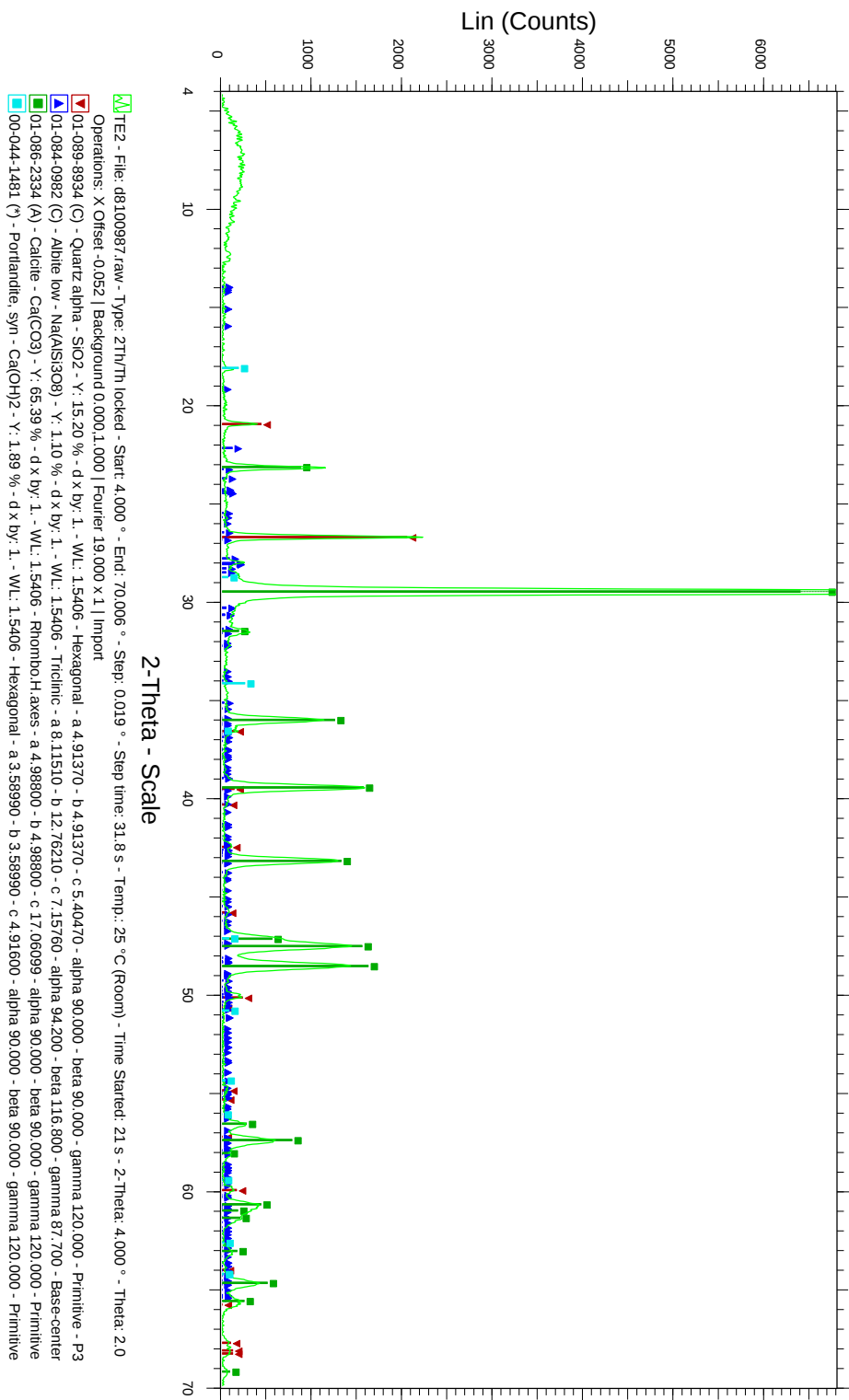
Διάγραμμα δοκιμίου 2, τεχνητού πωρόλιθου.



Διάγραμμα δοκιμίου 3, τεχνητού πωρόλιθου.



Εικόνα 1: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πωρόλιθου.



Εικόνα 1: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πωρόλιθου.

r (mm)	Pc res (psi)	Pc%
1.838506663	0.409918663	0.40%
1.225671109	0.614877995	0.60%
0.700383491	1.076036491	1.06%
0.387054034	1.94711365	1.91%
0.229813333	3.279349305	3.22%
0.153208889	4.919023958	4.82%
0.111424646	6.763657942	6.63%
0.083568485	9.018210589	8.84%
0.064793186	11.63144207	11.41%
0.052528762	14.34715321	14.07%
0.043514951	17.31906352	16.98%
0.034204775	22.03312814	21.61%
0.027440398	27.46455043	26.93%
0.02387671	31.56373706	30.95%
0.020715568	36.38028135	35.68%
0.018760272	40.17202899	39.40%
0.016563123	45.50097161	44.62%
0.01485662	50.72743457	49.75%
0.013468913	55.95389752	54.87%
0.012256711	61.48779947	60.30%
0.011313887	66.61178276	65.33%
0.010520782	71.63328639	70.25%
0.009753351	77.269668	75.78%
0.009146799	82.39365129	80.80%
0.008601201	87.62011425	85.93%
0.008028413	93.87137386	92.06%
0.007724818	97.56064183	95.68%
0.007390982	101.9672675	100.00%

Πίνακας 1: Μετρήσεις για τις τριχοειδείς πιέσεις του φυσικού παρόλιθου.

r (mm)	Pc res (psi)	Pc%
1.225671109	0.614877995	0.57%
0.919253332	0.819837326	0.76%
0.565694358	1.332235655	1.24%
0.408557036	1.844633984	1.71%
0.282847179	2.66447131	2.48%
0.183850666	4.099186632	3.81%
0.113138872	6.661178276	6.19%
0.065660952	11.47772257	10.67%
0.037712957	19.98353483	18.57%
0.023954484	31.4612574	29.24%
0.016091962	46.83320727	43.52%
0.012135358	62.10267747	57.71%
0.010005478	75.32255435	70.00%
0.007865269	95.81848751	89.05%
0.007003835	107.6036491	100.00%

Πίνακας 2: Μετρήσεις για τις τριχοειδείς πιέσεις του φυσικού πορώλιθου.

Παροχή (ml/s)	ΔP (atm)	K (mD)
0.83	4.94	0.1203
1.25	6.81	0.1308
1.67	8.88	0.1337
2.08	11.06	0.1343
2.50	13.47	0.1322
3.33	18.26	0.1301

Πίνακας 3: Μετρήσεις για τη δοκιμή διαπερατότητας δοκιμίου φυσικού πορώλιθου.

Παροχή (ml/s)	ΔP (atm)	K (mD)
1.67	2.76	0.42972
2.50	3.26	0.54691
3.33	3.90	0.60922
0.83	2.42	0.24555

Πίνακας 4: Μετρήσεις για τη δοκιμή διαπερατότητας δοκιμίου τεχνητού πορώλιθου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χαράλαμπος Δ. Κόκκινος (2002), *Για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς: πολιτισμικές, τεχνολογικές και επιστημολογικές συνιστώσες, τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [2] Στέργιος Σ. Θεοδωρίκας (2002). *Ορυκτολογία-Πετρολογία*, Εκδόσεις Χρυσούλα Σαούλη Ο.Ε. , Θεσσαλονίκη.
- [3] Ελευθερία Ναβή (1991), *Πετρολογία έκδοση Β'*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- [4] Χαρίκλεια Τυροδήμου (2009), *Μελέτη καταλληλότητας ανθρακικών πετρωμάτων τού Ν. Ηλείας για χρήση τους σε περιβαλλοντικές εφαρμογές*, Πανεπιστήμιο Πατρών, τμήμα Γεωλογίας, πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον», Πάτρα.
- [5] Χρηστίδης (2005), *Κοιτασματολογία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- [6] Φωτεινή Πομόνη-Παπαϊωάννου (2005). *Ταξινόμηση Ασβεστολίθων*, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα.
- [7] Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Ι. Πουλάκος (2006), *Τεχνικά Υλικά*, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [8] Παναγιώτης Θεουλάκης (1993), *Μελέτη των αιτιών και των μηχανισμών διάβρωσης τού ψαμμίτη τού κάστρου και της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου*, τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [9] http://www.tmth.edu.gr/aet/thematic_areas/p226.html

- [10] Θ. Σκουληκίδης, Νίκος Μπελογιάννης, Τόνια Μοροπούλου, Παναγιώτης Θεουλάρης (2000), *Το Δομικό Υλικό της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου, Μορφές Διάβρωσης-Αποτελεσματικότητα Ορισμένων Μέσων Προστασίας*, Αθήνα.
- [11] Marco Cavallini, Claudio Chimenti (2001), *Pietre & Marmi Artificiali*, Alinea editrice s.r.l., Firenze.
- [12] Kim Sten Hansen (1999). *Development of a prograding carbonate wedge during sea level fall: Lower Pleistocene of Rhodes, Greece*
- [13] Jan Kresten Nielsen, Nils-Martin Hanken, Jesper Kresten Nielsen & Kim Sten Hansen (2006), *Biostratigraphy and palaeoecology of the marine Pleistocene of Rhodes, Greece, Scleractinia, Serpulidae Mollusca and Brachiopoda*, Bulletin of Geosciences, Czech Geological Survey, Prague.
- [14] Mutti E., Orombelli, G. and Pozzi, R. (1970) *Geological studies on the Dodecanese islands*.
- [15] Βερύκιος, Παπασπυριδάκος Ε., Μπαθρέλλος Γ., Σκυλοδήμου Χ., *Φυσικογεωγραφικές παρατηρήσεις της παράκτιας ζώνης της βορειοανατολικής Ρόδου*, Δελτίο της ελληνικής Γεωλογικής εταιρείας τομ. XXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
- [16] L. Jeftic, S. Keckes, J.C. Pernetta, editors. *Climatic change and the Mediterranean. Environmental and societal impacts of climate change and sea level rise in the Mediterranean region*. Volume 2. xi, 564p. United Nations Environment Programme, 1996.
- [17] S. N. Leondaris (1992), *Implications of expected climatic changes on the island of Rhodes*, Fourth Meeting of the Task Team on Climatic Changes on the Island of Rhodes, 30-31 March, Athens.

- [18] Απόστολος Αλεξόπουλος (2005), *Τεκτονική και Γεωλογικές Χαρτογραφήσεις*, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα.
- [19]<http://www.scribd.com/doc/55046686/%CE%9F%CF%80%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CF%82%CE%B9%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82%CE%BF%CF%81%CF%85%CE%BA%CF%84%CF%89%CE%BD>
- [20] Περδικάτσης Β. και Πεντάρη Δ. (2003), *Εργαστηριακές Ασκήσεις Γεωχημείας*, Εργαστηριακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [21] http://www.civ.uth.gr/lessons/52%5Ckephalaio_5.pdf
- [22] Κωστάκης Γ. (2005), *Συστηματική Ορυκτολογία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- [23] Oliver Heiri, Andre F. Lotter, Gerry Lemcke (2001). *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results*, Journal of Paleolimnology, September-November.
- [24] Ζαχαρίας Γ. Αγιουτάντης (2002), *Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδόσεις Ιών, Αθήνα.
- [25] Μιχάλης Ι. Καββαδάς (2005), *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.
- [26] Περδικάτσης Β. και Πεντάρη Δ. (2003), *Εργαστηριακές Ασκήσεις Γεωχημείας*, Εργαστηριακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κατάλογος εικόνων, σχημάτων και πινάκων.

1. Εικόνα 2.1: Βασικοί ασβεστολιθικοί τύποι κατά Folk (1959).
2. Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση ανθρακικών πετρωμάτων σύμφωνα με τον ιστό απόθεσης (Dunham, 1962).
3. Πίνακας 2.1: Standard μικροφασικοί τύποι κατά Wilson και Flugel.
4. Εικόνα 3.1: Τοποθεσία της ευρύτερης περιοχής μελέτης στην Καλλιθέα. Τα γράμματα αναφέρονται σε τμήματα της παράκτιας περιοχής που περιγράφονται στο κείμενο.
5. Εικόνα 3.2 :Τοποθεσία περιοχής μελέτης στη ΒΔ ακτή Ρόδου
6. Εικόνα 3.3 :Γεωλογικός χάρτης Ρόδου.
7. Εικόνα 3.4 :Στρωματογραφική στήλη των πετρωμάτων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3.
8. Εικόνα 3.5 : Οι λιθοστρωματογραφικοί σχηματισμοί Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας σύμφωνα με τον Mutti.
9. Εικόνα 3.6 : Γεωμορφολογικός χάρτης Ρόδου.
10. Εικόνα 4.1 : Πολωτικό μικροσκόπιο
11. Εικόνα 4.2 :Ασβεστίμετρο τύπου Dietrich-Frunhling.
12. Εικόνα 4.3 : Ανάκλαση ακτίνων -X στα πλεγματικά επίπεδα ενός κρυστάλλου

13. Εικόνα 4.4 : Σχηματική παράσταση της διάταξης εστιασμού των ακτίνων $-X$. 1) λυχνία ακτίνων- X , 2) διαφράγματα, 3)παρασκευάσμα, 4) βάση απαριθμητή ακτίνων $-X$ και 5) απαριθμητής ακτίνων $-X$.

14. Εικόνα 4.5: Σχηματική διάταξη φασματομέτρου ακτίνων- X

15. Εικόνα 4. 6: Φασματοσκόπιο ακτίνων- X φθορισμού του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

16. Σχήμα 4.5 : Μονοδιάστατη ροή διαμέσου εδαφικού υλικού

17. Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα δοκίμης ασβεστιμετρίας για δείγμα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.

18. Εικόνα 5.1 : φυσικός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).

19. Εικόνα 5.2: φυσικός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols)

20. Εικόνα 5.3: φυσικός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).

21. Εικόνα 5.4: φυσικός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).

22. Εικόνα 5.5: φυσικός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).

23. Εικόνα 5.6 : φυσικός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).

24. Εικόνα 5.7 : τεχνητός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).

25. Εικόνα 5.8 : τεχνητός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).

26. Εικόνα:5.9 τεχνητός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).
27. Εικόνα 5.10 : τεχνητός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).
28. Εικόνα 5.11 : τεχνητός πωρόλιθος (παράλληλα Nicols).
29. Εικόνα 5.12 : τεχνητός πωρόλιθος (διασταυρωμένα Nicols).
30. Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα της μέτρησης τού συντελεστή υδατοαπορρόφησης για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.
31. Εικόνα 5.13: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πωρόλιθου.
32. Εικόνα 5.14: Ακτινογράφημα δείγματος τεχνητού πωρόλιθου.
33. Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα δοκιμής απώλειας πύρωσης για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.
34. Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα δοκιμής αδιάλυτου υπολοίπου για δείγματα φυσικού και τεχνητού πωρόλιθου.
35. Διάγραμμα 5.1: δοκίμιο 2, φυσικού πωρόλιθου.
36. Διάγραμμα 5.2: δοκίμιο 3, φυσικού πωρόλιθου.
37. Διάγραμμα 5.3: δοκίμιο 1, τεχνητού πωρόλιθου.
38. Διάγραμμα 5.4: δοκίμιο 4, τεχνητού πωρόλιθου.
39. Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα δοκιμής διαπερατότητας για κυλινδρικό δοκίμιο τεχνητού πωρόλιθου.

40. Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα δοκιμής διαπερατότητας για κυλινδρικό δοκίμιο φυσικού πωρόλιθου.
41. Διάγραμμα δοκιμίου 1, φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
42. Διάγραμμα δοκιμίου 4, φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
43. Διάγραμμα δοκιμίου 2, τεχνητού πωρόλιθου. (παράρτημα)
44. Διάγραμμα δοκιμίου 3, τεχνητού πωρόλιθου. (παράρτημα)
45. Εικόνα 1: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
46. Εικόνα 1: Ακτινογράφημα δείγματος φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
47. Πίνακας 1: Μετρήσεις για τις τριχοειδείς πιέσεις τού φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
48. Πίνακας 2: Μετρήσεις για τις τριχοειδείς πιέσεις τού φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
49. Πίνακας 3: Μετρήσεις για τη δοκιμή διαπερατότητας δοκιμίου φυσικού πωρόλιθου. (παράρτημα)
50. Πίνακας 4: Μετρήσεις για τη δοκιμή διαπερατότητας δοκιμίου τεχνητού πωρόλιθου. (παράρτημα)