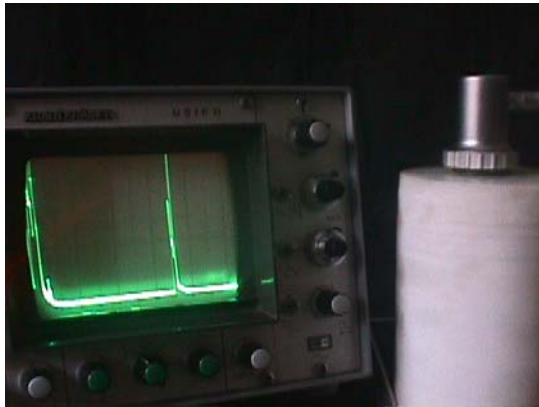




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ :
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
Β' ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

**ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΥΠΕΡΗΧΟΣΚΟΠΗΣΗΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΙ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ
ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ Χ. ΠΙΝΕΛΗ
Πολιτικού Μηχανικού

ΑΘΗΝΑ 2003

Επιτροπή Εξέτασης:

- Καθηγητής Π. Καρύδης
- Καθηγήτρια Α. Μοροπούλου
- Καθηγητής Γ. Μπατής
- Αναπληρωτής Καθηγητής Ι. Πρασιανάκης
- Επίκουρη Καθηγήτρια Π. Ανδριωτάκη-Παναγιωτουνάκου

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης:

- Καθηγήτρια Α. Μοροπούλου (επιβλέπουσα)
- Αναπληρωτής Καθηγητής Ν. Ανδριανόπουλος
- Αναπληρωτής Καθηγητής Ι. Πρασιανάκης
- Δρ. Α. Μπακόλας
- Υπ. Δρ. Ελένη Αγγελικοπούλου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας κλείνει για εμένα ο δεύτερος κύκλος ακαδημαϊκών σπουδών μου που πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια της Β΄ κατεύθυνσης: «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης» του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος: «Προστασία Μνημείων». Με αυτή την ευκαιρία θα ήθελα να αναφερθώ σε κάποιους ανθρώπους των οποίων η συμβολή υπήρξε σημαντική για τη διεκπεραίωση αυτού του κύκλου των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Δε θα μπορούσα να ευχαριστήσω αρχικά άλλο πρόσωπο από την καθηγήτρια Χημικό Μηχανικό και διευθύντρια της Β΄ κατεύθυνσης του προγράμματος «Προστασία Μνημείων», κα Αντωνία Μοροπούλου για την επιλογή μου ως μία από τους 16 μεταπτυχιακούς φοιτητές, στους οποίους δόθηκε η ευκαιρία να εγγραφούν στο εν λόγω πρόγραμμα σπουδών τον Οκτώβριο του 2001. Επίσης, εδώ θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στα τρία άλλα μέλη της υπεύθυνης επιτροπής για την επιλογή των μεταπτυχιακών φοιτητών τον Ιούλιο του 2001, που είναι οι κύριοι καθηγητές Γεώργιος Μπατής, Παναγιώτης Καρύδης και Φραγκίσκος Γουλιέλμος.

Για την άσπογη συνεργασία του και την απaráμιλλη ευγένεια που μου έδειξε θα επιθυμούσα εδώ να εκφράσω ένα θερμό ευχαριστώ στον καθηγητή του τμήματος Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, κ. Ιωάννη Πρασιανάκη, στο εργαστήριο του οποίου πραγματοποίησα ένα μέρος της εξέτασης των δομικών λίθων με υπερήχους. Ευχαριστώ απευθύνω και στον καθηγητή κ. Νίκο Ανδριανόπουλο, που επέτρεψε να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές μηχανικών αντοχών στο εργαστήριό του.

Ευχαριστίες αξίζουν και στο διδάκτορα κ. Αστέριο Μπακόλα του εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Ε.Μ.Π., που με την πολύτιμη και μακρόχρονη επιστημονική εμπειρία του υποστήριξε σημαντικά την εκπόνηση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας μου. Αναμφισβήτητα ένα ευχαριστώ πρέπει να απευθυνθεί από εμένα και στη Χημικό Μηχανικό και υποψήφια διδάκτορα του Ε.Μ.Π., Ελένη Αγγελακοπούλου για την αρμονική συνεργασία της μαζί μου κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Επιπρόσθετα, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην τεχνικό κα Άννα Αργυρίου – Ναθαναήλ του εργαστηρίου των υπερήχων του κτιρίου Μηχανικής των

Υλικών καθώς και στο προσωπικό του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π..

Δε θα μπορούσα να ξεχάσω σε αυτό το σημείο και τους κυρίους Χάρη Λαμπρίδη, που μου έστειλε το γκρίζο πωρόλιθο της Ρόδου που μελέτησα και Μιχάλη Τρουλινό, ο οποίος έστειλε το λευκό πωρόλιθο του Ρεθύμνου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους της οικογένειάς μου που με την αγάπη, και την υλική και ηθική βοήθειά τους με στήριξαν στο δρόμο της ζωής γενικότερα και στο μονοπάτι της μόρφωσης ειδικότερα, το οποίο κατάληξε στην πραγματοποίηση και αυτού του κύκλου σπουδών μου στο Ε.Μ.Π.. Πρόκειται για τη μητέρα μου, Δήμητρα Πινέλη, τον αδελφό μου, Δημήτρη Πινέλη καθώς και για τη γιαγιά μου Τριανταφυλλιά Πινέλη, που κατά το διάστημα εκπόνησης αυτής της εργασίας έφυγε για πάντα από κοντά μου.

Τριανταφυλλιά Πινέλη,
Πολιτικός Μηχανικός.
Οκτώβριος 2003.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δομικοί λίθοι που έχουν χρησιμοποιηθεί ως δομικά υλικά των μνημείων της Ελλάδας ή που βρίσκουν εφαρμογή ως υλικά αποκατάστασης αυτών παρουσιάζουν μία μεγάλη ποικιλία στις μηχανικές τους ιδιότητες και τις παραμέτρους της μικροδομής τους. Οι μηχανικές ιδιότητες των δομικών λίθων μπορούν να προσδιοριστούν τόσο με τις κλασικές, καταστρεπτικές δοκιμές της αντοχής των υλικών όσο και με τη μη καταστρεπτική μέθοδο των υπερήχων ενώ ο προσδιορισμός των παραμέτρων μικροδομής είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με διάφορες ενόργανες και μη εργαστηριακές δοκιμές. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των δομικών υλικών με μη καταστρεπτικό τρόπο είναι πολύ χρήσιμος στις περιπτώσεις μελετών συντήρησης και αποκατάστασης μνημείων πολιτισμού, αφού σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αδύνατη η λήψη αυθεντικού υλικού για την πραγματοποίηση καταστρεπτικών δοκιμών.

Στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των δυναμικών ελαστικών σταθερών τεσσάρων ειδών δομικών λίθων με τη μέθοδο των υπερήχων, η οποία εφαρμόστηκε με τη χρήση δύο διαφορετικών συσκευών. Στη συνέχεια έγινε η πραγματοποίηση των δοκιμών της υδαταπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση, της εμβάπτισης, σε απιονισμένο νερό και της πορομετρίας υδραργύρου με σκοπό την εκτίμηση των παραμέτρων της μικροδομής τους. Στο τέλος έγινε η μελέτη των συσχετίσεων των δυναμικών ελαστικών σταθερών με τις παραμέτρους της μικροδομής με στόχο τη διερεύνηση του κατά πόσο η μικροδομή των υλικών επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά τους. Τελικά η έρευνα απέδειξε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων και των παραμέτρων της μικροδομής των δομικών λίθων και ότι η παράμετρος της μικροδομής με την οποία συσχετίζονται περισσότερο οι ελαστικές σταθερές είναι το ολικό πορώδες τους.

ABSTRACT

The building stones that have been used as structure materials of the monuments of Greece or are applied as materials for the restoration interventions present a large variety of mechanical properties and parameters of microstructure. The mechanical properties of the building stones can be determined by both the classical destructive tests of the mechanics of the materials and the non-destructive ultrasonic technique. The microstructure properties are possible to be determined by various instrumental and non-instrumental tests. The determination of the material properties in a non-destructive way is very useful in cases of studies of conservation and restoration interventions, since in these cases it is impossible to get original material from them in order to realize destructive tests.

In this Postgraduate Dissertation, the determination of the elastic constants of four kinds of building stones was realized with the use of the ultrasonic technique, which was applied with two different ultrasonic apparatuses. Additionally, the tests of water absorption by capillary rising, immersion and mercury porosimetry were applied in order to estimate the parameters of microstructure. Finally there was made a study of the correlation of the dynamic elastic constants with the parameters of microstructure in order to investigate the way the microstructure influences the mechanical behavior of the stones. The research showed that there is a correlation between the mechanical properties and the parameters of the microstructure of the building stones and that the elastic constants are correlated most with the total porosity among the other parameters.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	Σελ. i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	Σελ. iii
ABSTRACT	Σελ. v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελ. vii
A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	Σελ. 1
B. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	Σελ. 5
B.1 ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΙ ΛΙΘΟΙ ΩΣ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	Σελ. 7
B.2 ΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ	Σελ. 9
B.2.1 ΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	Σελ. 9
B.2.1.1 Είδη πετρωμάτων	Σελ. 9
B.2.1.1.1 Τα πυριγενή πετρώματα	Σελ. 9
B.2.1.1.2 Τα ιζηματογενή πετρώματα	Σελ. 11
B.2.1.1.2.1 Κλαστικά ή μηχανικά ιζηματογενή πετρώματα	Σελ. 11
B.2.1.1.2.2 Χημικά και βιογενή ιζηματογενή πετρώματα	Σελ. 12
B.2.1.1.3 Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα	Σελ. 12
B.2.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	Σελ. 16
B.3 Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 25
B.3.1 ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ	Σελ. 26
B.3.2 ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 27
B.3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΦΘΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 27
Γ. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	Σελ. 31
Γ.1. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	Σελ. 33
Γ.1.1 Η ΑΡΧΗ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	Σελ. 33
Γ.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	Σελ. 34
Γ.1.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ, ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ	

ΣΥΣΚΕΥΕΣ	Σελ. 35
Γ.1.4 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	Σελ. 38
Γ.2 ΗΔΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	Σελ. 40
Γ.2.1 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	Σελ. 40
Γ.2.2 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	Σελ. 42
Γ.2.3 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	Σελ. 42
Γ.2.4 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	Σελ. 43
Γ.2.5 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 43
Γ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑ- ΡΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	Σελ. 49
Γ.3.1 ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ	Σελ. 49
Γ.3.2 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Σελ. 54
Γ.3.3 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΚΥΠΡΟΥ	Σελ. 56
Γ.3.4 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΡΟΔΟΥ	Σελ. 56
Δ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	Σελ. 59
Δ.1 ΟΙ ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ	Σελ. 61
Δ.1.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	Σελ. 61
Δ.1.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ	Σελ. 61
Δ.1.2.1 Το πείραμα της θλίψης	Σελ. 62
Δ.1.2.2 Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young	Σελ. 64
Δ.1.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	Σελ. 66
Δ.1.4 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	Σελ. 67
Δ.1.5 ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	Σελ. 68
Δ.1.6 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ	Σελ. 70
Δ.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	Σελ. 71
Δ.2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	Σελ. 71
Δ.2.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ DTA –	

TG	Σελ. 73
Δ.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 74
Δ.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	Σελ. 74
Δ.2.5 Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ	Σελ. 79
Δ.2.6 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ	Σελ. 83
Δ.2.7 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ	Σελ. 84
Δ.2.8 ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	Σελ. 85
Ε. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	Σελ. 87
E.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ	Σελ. 89
E.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	Σελ. 90
E.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ	Σελ. 90
E.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	Σελ. 99
E.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ	Σελ. 100
E.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ	Σελ. 102
E.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑΣ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	Σελ. 105
E.8 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 110
E.8.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ PUNDIT ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 111
E.8.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON , vd , ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 114
E.8.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ , Ed , ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 116
E.8.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 118
E.8.5 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	

ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ	Σελ. 120
E.8.6 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΙΣΩΣΕΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΚΑΘΩΣ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΣ	Σελ. 124
ΣΤ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	Σελ. 127
Ζ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	Σελ. 133
Η. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	Σελ. 143

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση των τιμών των ελαστικών σταθερών των δομικών υλικών οποιουδήποτε μνημείου αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορθό σχεδιασμό των επεμβάσεων αποκατάστασής του. Η δομοστατική μελέτη κάθε μνημείου απαιτεί τον καθορισμό αυτών των σταθερών των υλικών του. Επιπρόσθετα, η επιλογή των νέων υλικών που θα εφαρμοστούν στην ιστορική κατασκευή στα πλαίσια των επεμβάσεων αποκατάστασής της, απαιτεί τη συμβατότητά τους με τα ιστορικά υλικά ως προς τις μηχανικές ιδιότητές τους και τις ιδιότητες της μικροδομής τους.

Οι ελαστικές σταθερές κάθε υλικού είναι δυνατό να καθοριστούν με στατικές ή με δυναμικές μεθόδους. Οι δυναμικές μέθοδοι βασίζονται στην απότομη και σύντομη εφαρμογή τάσης στο δοκίμιο του υπό εξέταση υλικού. Αντίθετα, οι στατικές μέθοδοι απαιτούν την αργή αύξηση της τιμής του φορτίου στο δοκίμιο προκειμένου ν' αποφευχθούν δυναμικά φαινόμενα (1).

Στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, η δυναμική και μη καταστρεπτική μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να προσδιοριστούν οι ελαστικές σταθερές τεσσάρων ειδών δομικών λίθων (μαρμάρου Διονύσου, λευκού πωρόλιθου Ρεθύμνου, γκρίζου πωρόλιθου Κύπρου και γκρίζου πωρόλιθου Ρόδου) που συναντιούνται σε κάποια πολύ σημαντικά μνημεία της χώρας μας ή χρησιμοποιούνται ως υλικά επεμβάσεων αποκατάστασης αυτών. Δύο διαφορετικές συσκευές υπερήχων χρησιμοποιήθηκαν προς αυτό το σκοπό, οι οποίες έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα μετρήσεων ανάλογα με της βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνοντας έτσι την αξιοπιστία τους. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου των υπερήχων σε μελέτες αποκατάστασης ιστορικών κτιρίων είναι ένα θέμα που απασχολεί πολύ τους επιστήμονες τα τελευταία χρόνια. Η συμβολή της εν λόγω μεθόδου σε τέτοιου είδους έργα είναι πολύ σημαντική εξαιτίας του μη καταστρεπτικού χαρακτήρα της. Πραγματικά είναι αδύνατη σε αυτές τις περιπτώσεις η λήψη δοκιμίων των ιστορικών υλικών από τα ίδια τα κτίρια, προκειμένου να μελετηθούν με τις δοκιμές των μηχανικών αντοχών στο εργαστήριο και έτσι να εκτιμηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Αντίθετα, η επί τόπου εφαρμογή στα μνημεία της μεθόδου των υπερήχων καθιστά δυνατή την εκτίμηση των ιδιοτήτων των υλικών χωρίς την πρόκληση οποιασδήποτε καταστροφής.

Επιπρόσθετα, στο σύνολο των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν γι' αυτή την εργασία, συμπεριλήφθηκε ο προσδιορισμός των στατικών ελαστικών σταθερών των ίδιων δομικών λίθων με τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης. Αυτό έγινε με τη βοήθεια ειδικής μηχανής και βελόμετρων προσαρμοσμένων κάθετα προς

τον άξονα των κυλινδρικών δοκιμών. Ο στόχος ήταν η σύγκριση των στατικών με τις δυναμικές σταθερές των υλικών. Τελικά, οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων φάνηκαν να παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους, που το μέγεθός τους ήταν διαφορετικό ανάλογα με το είδος του υπό μελέτη λίθου. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σαφέστατα σε ανθρώπινα και άλλου είδους σφάλματα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων της μονοαξονικής θλίψης.

Το τελευταίο σύνολο πειραματικών δοκιμών της εργασίας αυτής αφορούσε τον προσδιορισμό των πολύ σημαντικών ιδιοτήτων της μικροδομής των δομικών λίθων. Δοκιμές υδαταπορρόφησης και εμβάπτισης σε νερό πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να μελετηθούν ιδιότητες όπως ο συντελεστής υδαταπορρόφησης, ο ολικός ειδικός όγκος, το ολικό πορώδες, η μέση ακτίνα πόρων και η ειδική επιφάνειά τους.

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, η στατιστική μέθοδος της παλινδρόμησης εφαρμόστηκε προκειμένου οι προαναφερόμενες μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες να συσχετιστούν μεταξύ τους και να καθοριστούν οι ακριβείς μαθηματικές σχέσεις που τις συνδέουν.

B. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

B.1 ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΙ ΛΙΘΟΙ ΩΣ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Οι φυσικοί λίθοι είναι από τα σημαντικότερα δομικά υλικά και συναντιούνται στην ιστορία των κατασκευών από τους προϊστορικούς χρόνους μέχρι και σήμερα. Πρόκειται για υλικά αποτελούμενα από κόκκους συνδεδεμένους μεταξύ τους με ορυκτό συγκολλητικό υλικό και κενά. Προέρχονται από τα θραύσματα των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της γης. Η κατάταξή τους με βάση την προέλευσή τους ταυτίζεται με την κατάταξη των πετρωμάτων από τα οποία προέρχονται.

Στην ιστορία των κατασκευών οι λίθοι εμφανίζονται υπό διάφορες μορφές κατεργασίας. Ο βαθμός και η ποιότητα της κατεργασίας τους εξαρτάται από τη χρονική περίοδο στην οποία ανάγονται οι κατασκευές στις οποίες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν αλλά κυρίως από το σκοπό της χρήσης τους. Έτσι διακρίνονται οι αργοί, οι ημιλαξευτοί, οι λαξευτοί λίθοι, οι ογκόλιθοι και οι πλάκες (2).

Οι αργοί λίθοι χρησιμοποιούνται όπως εξορύσσονται στα λατομεία. Μία μικρή κατεργασία τους μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την τοποθέτησή τους για την καλύτερη προσαρμογή τους στις κατασκευές. Τέτοιου είδους κατασκευές είναι οι ξηρολιθοδομημένοι τοίχοι αντιστήριξης ανδρήρων που συναντιούνται στη χώρα μας ήδη από την προϊστορική περίοδο (π.χ. στη Μινωική Αρχιτεκτονική) καθώς και τα πέτρινα σπίτια της ίδιας περιόδου (3).

Οι ημιλαξευτοί λίθοι συναντιούνται επίσης από τους προϊστορικούς χρόνους μέχρι και τις μέρες μας. Πρόκειται για λίθους που έχουν υποστεί κατεργασία μόνο στις επιφάνειές τους που είναι ορατές μετά τη δόμηση. Χρήση τους γίνεται σε όψεις λιθοδομών και σε γωνιόλιθους διασταυρώσεων τοίχων.

Οι λαξευτοί λίθοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε μνημειακές κατασκευές αλλά και σε περιπτώσεις κατασκευών που λόγοι αισθητικής επέβαλαν την αποφυγή του επιχρίσματος. Στην Ελλάδα συναντιούνται για πρώτη φορά σε Μυκηναϊκούς τοίχους και ταφικά μνημεία (1580 – 1100 π.Χ. περίπου). Κατά τους κλασικούς χρόνους (480 – 323 π.Χ.) η τέλεια εφαρμογή των λαξευτών λίθων στην ελληνική αρχιτεκτονική οδήγησε στην κατασκευή αρκετών από τα ωραιότερα και γνωστότερα μνημεία της πατρίδας μας (3).

Όλα τα προαναφερόμενα είδη λίθων έχουν διαστάσεις της τάξης των 15 – 50 cm. Αντιθέτως, οι ογκόλιθοι είναι πολύ μεγαλύτεροι και συνήθως έχουν υποστεί μικρή

επεξεργασία. Η χρήση τους γίνεται κυρίως στις λιθορριπές των λιμενικών έργων ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δόμηση (2).

Πλάκες καλούνται οι λίθοι των οποίων οι δύο διαστάσεις είναι μεγαλύτερες από το πάχος. Η προέλευσή τους είναι από ιζηματογενή ή κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα και ανάλογα με τη χρήση τους υφίστανται διάφορα στάδια κατεργασίας (προλείανση, λείανση, στίλβωση). Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν για επιστρώσεις δρόμων και στεγάσεις κτιρίων αλλά πλέον η χρήση τους έχει κυρίως διακοσμητικό χαρακτήρα (2).

Τα αδρανή (χαλίκι και άμμος) αποτελούν το σημαντικότερο προϊόν των φυσικών λίθων και βασικό συστατικό του σκυροδέματος. Προέρχονται κατά κανόνα από ιζηματογενή πετρώματα (2).

Οι σημαντικότεροι φυσικοί λίθοι που συναντιούνται στα μνημεία της ελληνικής αρχιτεκτονικής είναι πολλά είδη πωρόλιθων, διάφορα είδη ασβεστόλιθων, ο γυψόλιθος, οι ψαμμίτες, οι σχιστόλιθοι, ο βασάλτης, ο αμυγδαλίτης και βεβαίως τα μάρμαρα διαφόρων περιοχών και χρωματισμών (3).

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας παραγράφου, οι φυσικοί λίθοι είναι θραύσματα των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της γης. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο ν' ακολουθήσει στις επόμενες παραγράφους μία κατατοπιστική αναφορά στα πετρώματα και τις ιδιότητές τους. Με αυτόν τον τρόπο θα καταστεί δυνατή μία ολοκληρωμένη προσέγγιση των λίθων ως δομικά υλικά.

B.2. ΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

B.2.1 ΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Ορυκτά ονομάζονται οι χημικές ενώσεις, οι οποίες έχουν κρυσταλλική μορφή. Πρόκειται για υλικά ομογενών, θεμελιωδών, βασικών δομικών μερών της γης, των μετεωριτών και των άλλων υπολοίπων ουρανίων σωμάτων. Τα ορυκτά του στερεού φλοιού της γης περισσότερο από το 90% αποτελούνται από πυριτικές ενώσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται τα γνωστότερα πυριτικά ορυκτά, που είναι ο χαλαζίας, οι άστριοι, οι μαρμαρυγίες, οι πυρόξενοι, οι αμφίβολοι, ο ολιβίνης και τα ορυκτά της αργίλου. Τα σπουδαιότερα μη πυριτικά ορυκτά είναι ο ασβεστίτης, (CaCO_3), ο δολομίτης ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Mg CO}_3$) και ο γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (4).

Πετρώματα ονομάζονται τα στερεά υλικά από τα οποία αποτελείται ο στερεός φλοιός της γης. Τα πετρώματα είναι σωρεύματα από ορυκτά ή μείγματα ορυκτών, όπως π.χ. το μάρμαρο που αποτελείται από ασβεστίτη ή δολομίτη, τις περισσότερες φορές, όμως, έχουν πολυορυκτολογική σύσταση, π.χ. οι γρανίτες αποτελούνται από αστρίους, χαλαζία και μαρμαρυγίες κ.ο.κ. (4).

Διακρίνονται τρία είδη πετρωμάτων ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού αυτών. Είναι τα εξής (5-13) :

- i) Τα Πυριγενή ή Μαγματικά ή Εκριξηγενή πετρώματα
- ii) Τα Ιζηματογενή πετρώματα
- iii) Τα Μεταμορφωσιγενή ή Κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα .

B.2.1.1. Είδη πετρωμάτων

B.2.1.1.1 Τα πυριγενή πετρώματα

Τα πυριγενή πετρώματα δημιουργήθηκαν από τη στερεοποίηση του μάγματος, δηλαδή ενός ρευστού και διάπυρου υλικού προερχόμενου από το εσωτερικό της γης, όταν αυτό έφτασε με κάποιο είδος εκρήξεως στους επιφανειακούς σχηματισμούς του στερεού φλοιού της γης.

Διακρίνονται τρία είδη πυριγενών πετρωμάτων: τα **πλουτώνια**, τα **ηφαιστειογενή** και οι **φλεβίτες** (5-12).

Τα **πλουτώνια** πετρώματα δημιουργούνται από τη στερεοποίηση του μάγματος μέσα στο στερεό φλοιό της γης υπό συνθήκες υψηλής πίεσης. Σε αυτή την περίπτωση η στερεοποίηση του μάγματος εξελίσσεται με αργό ρυθμό ενώ τα αέρια του παραμένουν μέσα στη μάζα των πετρωμάτων. Τα ορυκτολογικά συστατικά των πλουτώνιων πετρωμάτων εμφανίζονται σε σχεδόν ισομεγέθεις κόκκους και έτσι ο ιστός τους καλείται κοκκώδης (5-12).

Η δημιουργία των **ηφαιστειογενών** πετρωμάτων πραγματοποιείται κατά τη στερεοποίηση πάνω στην επιφάνεια της γης, της λάβας, δηλαδή του μάγματος που βγαίνει από τους κρατήρες των ηφαιστείων. Η ψύξη της λάβας γίνεται με γρήγορο ρυθμό, υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης ενώ τα αέρια της αποβάλλονται στο περιβάλλον. Η μάζα των ηφαιστειογενών πετρωμάτων αποτελείται κατά ένα μέρος από κρυσταλλικά ορυκτολογικά συστατικά, τους φαινοκρυστάλλους και κατά το υπόλοιπο, συνήθως μεγαλύτερο μέρος από μία άμορφη, υαλώδη μάζα (5-12).

Η δημιουργία των **φλεβιτών** γίνεται υπό συνθήκες ενδιάμεσες αυτών που ισχύουν κατά τη γένεση των άλλων πυριγενών πετρωμάτων. Τα εν λόγω πετρώματα σχηματίζονται υπό μορφή φλεβών σε μικρά κενά και ρήγματα διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών. Η ταχύτητα στερεοποίησης του μάγματος και η υφιστάμενη πίεση είναι σε αυτή την περίπτωση μέτριες ενώ τα αέρια αποβάλλονται μερικώς.

Μία ακόμη διάκριση, η οποία γίνεται στα πυριγενή πετρώματα βασίζεται στη χημική σύσταση αυτών και συγκεκριμένα στο ποσοστό ύπαρξης ελεύθερου SiO_2 μέσα στη μάζα τους. Έτσι ξεχωρίζουν τα όξινα ($\text{SiO}_2 > 65\%$), τα ενδιάμεσα ($55\% < \text{SiO}_2 < 65\%$), τα βασικά ($45\% < \text{SiO}_2 < 55\%$) και τέλος τα υπερβασικά ($\text{SiO}_2 < 45\%$) πυριγενή πετρώματα (5).

Μερικά από τα πιο γνωστά πλουτώνια πετρώματα είναι ο γρανίτης, το πιο διαδεδομένο πλουτώνιο πέτρωμα του στερεού φλοιού της γης, που λόγω των μεγάλων μηχανικών αντοχών του χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό (όξινο πέτρωμα), ο διορίτης (όξινο ή ενδιάμεσο πέτρωμα), ο γάββρος (βασικό πέτρωμα) και ο περιδοτίτης, ο οποίος χρησιμοποιείται σε επενδύσεις στοιχείων τεχνικών έργων.

Τα πιο γνωστά ηφαιστειογενή πετρώματα είναι τα εξής: Ο λιπαρίτης που συναντιέται σε δύο παραλλαγές, τον οψιδιανό και την κίσσηρη, η οποία χρησιμοποιείται στην οικοδομική για την κατασκευή ελαφρών τσιμεντοκονιαμάτων και ως μονωτικό υλικό του δώματος των οικοδομών. Ο τραχείτης και ο ανδεσίτης, που είναι σκληρά ενδιάμεσα πετρώματα, από τα οποία παλαιότερα κατασκευάζονταν

οι μυλόπετρες. Τέλος, ο βασάλτης και ο διαβάσης, που είναι βασικά ηφαιστειογενή πετρώματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη σκληρότητα ούτως ώστε να χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αντισιδηρών επιφανειών στα οδοστρώματα.

B.2.1.1.2 Τα ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα δημιουργούνται από τη μεταφορά και την απόθεση στην ξηρά ή στο βυθό θαλασσών και λιμνών, υλικών που είναι είτε αιωρούμενα στον αέρα είτε αιωρούμενα ή διαλυμένα στο νερό. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τη διάβρωση και την αποσάθρωση προϋπαρχόντων πετρωμάτων (5, 6, 8, 9).

Για τη γένεση των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση τεσσάρων ειδών φυσικών διεργασιών. Σε αυτές προηγείται η αποσάθρωση των ήδη υπαρχόντων πετρωμάτων μέσω μηχανικών, φυσικών και χημικών διεργασιών, οι οποίες προκαλούνται από το νερό, τον άνεμο ή τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Ακολουθεί η μεταφορά των προϊόντων της αποσαθρώσεως μέσω του νερού ή του αέρα και έπεται η απόθεση των αιωρούμενων υλικών. Η τελευταία φάση της δημιουργίας ενός ιζηματογενούς πετρώματος είναι η διαγένεση, κατά την οποία πραγματοποιείται η λιθοποίηση των ιζημάτων εξαιτίας της πίεσης που ασκούν σε αυτά μεταγενέστερες αποθέσεις ή λόγω της κυκλοφορίας διαφόρων διαλυμάτων στα κενά μεταξύ των ιζημάτων που συγκολλούν τους κόκκους τους (5,7, 10-12).

Και στην περίπτωση των ιζηματογενών πετρωμάτων διακρίνονται τρεις κατηγορίες αυτών ανάλογα με το είδος και την προέλευση των ιζημάτων. Πρόκειται για τα μηχανικά ή κλαστικά, τα χημικά και τα βιογενή ή οργανογενή ιζηματογενή πετρώματα (5-12).

B.2.1.1.2.1 Κλαστικά ή μηχανικά ιζηματογενή πετρώματα

Τα πετρώματα αυτής της κατηγορίας δημιουργούνται από τη διαγένεση ιζημάτων τα οποία προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση άλλων πετρωμάτων χωρίς τη μεσολάβηση χημικών μεταβολών (5-9, 11).

Τα κλαστικά ιζήματα, από τα οποία γεννιούνται αυτά τα πετρώματα, διακρίνονται σε επτά κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους. Έτσι ξεχωρίζουν οι **τρογμάλες** με διαστάσεις τεμαχίων μεγαλύτερες των 250 mm, οι

λατύπες με διαστάσεις τεμαχίων από 70 mm έως 250 mm, οι κροκάλες με τεμάχια διαστάσεων και πάλι από 70 έως 250 mm αλλά με στρογγυλεμένα άκρα, οι χάλικες με διαστάσεις τεμαχίων από 2 έως 70 mm, η άμμος με διαστάσεις κόκκων μεταξύ 0,2 και 2 mm, η ιλύς με διαστάσεις κόκκων από 0,002 έως 0,2 mm και τέλος η άργιλος που αποτελείται από κρυσταλλικούς κόκκους διαστάσεων μικρότερων των 0,002 mm ορισμένων ένυδρων αργιλοπυριτιτικών ορυκτών (5).

Από τη διαγένεση των προαναφερόμενων ιζημάτων δημιουργούνται τα ακόλουθα είδη ιζηματογενών πετρωμάτων:

- Τα τρογματοπαγή από τις τρογμάλες
- τα λατυποπαγή από τις λατύπες
- τα κροκαλοπαγή από τις κροκάλες
- τα χαλικοπαγή από τους χάλικες
- οι ψαμμίτες από την άμμο και
- η σχιστή άργιλος και ο αργιλικός σχιστόλιθος από τις αργίλους .

Στα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα κατατάσσονται επίσης και τα εξής δύο :

- Ο φλύσχος, ο οποίος είναι σχηματισμός αποτελούμενος από αργιλικούς σχιστόλιθους, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή πετρώματα και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, που εναλλάσσονται σε στρώσεις πάχους λίγων εκατοστόμετρων μέχρι και δέκα μέτρων. Πρόκειται για ένα είδος πετρώματος που συναντιέται συχνά στην Ελλάδα και έχει ιδιαίτερη σημασία για τα τεχνικά έργα εξαιτίας των κατολισθήσεων που σημειώνονται, ιδιαίτερα στα επιφανειακά στρώματά του (5, 6, 11).
- Οι ηφαιστειογενείς τόφοι, που προέρχονται από αποθέσεις στερεών αναβλημάτων ηφαιστειών (6, 7).

B.2.1.1.2.2 Χημικά και βιογενή ιζηματογενή πετρώματα

Το χαρακτηριστικό των πετρωμάτων αυτής της κατηγορίας είναι ότι στα ιζήματά τους συμμετέχει και ο οργανικός κόσμος. Τα πιο σημαντικά πετρώματα αυτού του είδους, τα οποία σχετίζονται με τεχνικά έργα είναι ο ασβεστόλιθος, ένα από τα καλύτερα υλικά κατασκευών όταν ικανοποιεί ορισμένα όρια αντοχής, οι μάργκες, ο τραβερτίνης, η κρητίδα, ο δολομίτης και οι κερατόλιθοι (6, 13).

B.2.1.1.3 Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα

Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα δημιουργούνται από τη μεταμόρφωση προϋπαρχόντων πυριγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων. Η μεταμόρφωση αυτών των πετρωμάτων πραγματοποιείται όταν κάτω από συνθήκες μεγάλων πιέσεων ή υψηλών θερμοκρασιών ή και υπό την επίδραση της ενέργειας αερίων και θερμών διαλυμάτων λαμβάνουν χώρα μεταβολές στα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά τους. Τέτοιου είδους μεταβολές είναι η παράλληλη διάταξη των ορυκτολογικών συστατικών των πετρωμάτων, η ανακρυστάλλωσή τους και η δημιουργία νέων ορυκτολογικών χαρακτηριστικών (5-7, 11, 12).

Ανάλογα με τις αιτίες που τις προκαλούν, οι μεταμορφώσεις των πετρωμάτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (5-7, 11):

- Η **Δυναμική Μεταμόρφωση** των πετρωμάτων πραγματοποιείται από την επενέργεια μεγάλων κατακόρυφων και πλευρικών πιέσεων, οι οποίες συχνά συντελούν στη δημιουργία σχιστότητας.

- Η **Μεταμόρφωση Επαφής** προκαλείται από το διάπυρο μάγμα, κατά τη μετακίνησή του, στα γειτονικά προς αυτό στρώματα.

- Η **Περιφερειακή Μεταμόρφωση** πραγματοποιείται σε μεγάλες μάζες πετρωμάτων υπό την ταυτόχρονη επίδραση υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών και μαγματικών εκρήξεων. Η μεταμόρφωση αυτού του είδους λαμβάνει χώρα σε τρεις ζώνες: στην Επί ζώνη, που είναι η ανώτατη μεταμορφωσιγενής ζώνη, στη Μέσο ζώνη και στην Κατά ζώνη. Μερικά από τα πιο γνωστά μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι τα εξής:

- Οι **φυλλίτες**, οι οποίοι αποτελούν το πρώτο στάδιο παραμορφώσεως των αργιλικών σχιστόλιθων.
- Οι **μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι**, που προέρχονται από εντονότερη παραμόρφωση των αργιλικών σχιστόλιθων και έχουν την ιδιότητα να σχίζονται σε πλάκες, όπως οι φυλλίτες.
- Οι **γνεύσιοι**, οι οποίοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους ορθογνεύσιους και στους παραγνεύσιους. Οι ορθογνεύσιοι δημιουργούνται από τη μεταμόρφωση των γρανιτών ενώ οι παραγνεύσιοι από τη μεταμόρφωση των αργιλικών σχιστόλιθων.
- Τα **μάρμαρα**, που δημιουργούνται από την ανακρυστάλλωση του ασβεστόλιθου. Ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχονται στους αρχικούς ασβεστόλιθους και το βαθμό μεταμορφώσεως διακρίνονται διάφορα είδη μαρμάρων. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρακτικά ο όρος μάρμαρο δε χρησιμοποιείται μόνο για την αναφορά στο εν λόγω μεταμορφωσιγενές πέτρωμα αλλά και σε οποιοδήποτε

πέτρωμα κόβεται σε πλάκες, λειαίνεται, στιλβώνεται και χρησιμοποιείται στην τεχνική.

Στον πίνακα Β.1 (5) γίνεται μία παρουσίαση των φυσικών χαρακτηριστικών μερικών από τα πετρώματα στα οποία έγινε αναφορά στην παράγραφο Β.2.1, όταν αυτά είναι σε συμπαγή, βραχώδη μορφή.

Στον πίνακα Β.2 (5) παρουσιάζεται μία ταξινόμηση των μαρμάρων της Ελλάδας ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους.

Πίνακας Β.1: Φυσικές ιδιότητες χαρακτηριστικών πετρωμάτων υπό συμπαγή, βραχώδη μορφή (5)

Πετρώματα	Ε.Β. gr/cm ³	Πορώδες όλικό %	Πορώδες ένεργό %	*Ηλεκτ. αντίσταση Ωhm-m	*Αγωγιμότητα 10 ⁻³ cal/cm ² sec C°	Υρ* Km /sec
<u>Πυριγενή</u>						
*Ανδεσίτης	2.2-2.7	2 -11	0.1- 4.9	20- 5.000	4.0- 8.5	5.0-6.3
βασάλτης	2.2-2.8	0.1 -10	0.1- 9.9	20- 5.000	4.0- 8.6	5.0-6.6
Διορίτης	2.8-2.9	0.1 - 4	0.1- 0.4	500- 20.000	6.0- 8.5	5.2-6.6
Γάββρος	2.7-3.0	0 - 2	0 - 0.3	500- 20.000	6.0- 9.0	5.4-6.7
Γρανίτης	2.5-2.7	0.05- 3	0.2- 1.6	500- 20.000	6.2- 9.0	4.6-6.0
Ρυόλιθος	2.5-2.7	1 - 7	0.1- 5.6	10- 5.000	7.4- 8.8	4.5-6.3
<u>Ίζηματογενή</u>						
Δολομίτης	2.5-2.7	0.3 -25	0.3- 1.2	50- 10.000	8.9-13.9	3.0-7.0
*Ασβεστόλιθος	2.5-2.7	0.8 -27	0.1- 1.8	200- 10 ⁵	4.7- 8.0	2.8-7.1
Κιμωλία	2.3-2.5	4 -42	0.3- 4.1	50- 10.000	4.7- 6.4	1.7-4.2
Ψαμίτης	1.9-2.6	0.5 -42	0.7-13.8	20- 500	3.5- 7.7	1.0-4.4
*Ίλιόλιθος	2.2-2.5	2.2 -24	0.4- 6.3	20- 500	3.0- 7.5	1.4-4.4
*Αργιλ. Σχιστόλιθος	2.3-2.7	2.9 -55	0.2- 6.1	150- 500	2.2- 6.9	1.5-3.5
<u>Μεταμορφωσιγενή</u>						
Γνεύσιοξ	2.6-3.2	0.3 - 2	0.1- 0.8	100- 5.000	4.9-10.4	3.5-7.5
Ψάρμαρα	2.4-2.7	0.1 - 6	0.1- 0.8	1,000- 10 ⁵	4.7- 8.0	3.8-6.9
Χαλαζίτης	2.6-2.7	0.8 - 7	0.1- 0.8	500- 5.000	7.4-18.9	5.8-6.3
Μαρμαρ. Σχιστόλιθος	2.6-2.8	0.4 -10	0- 0.6	100- 3.000	4.1- 8.9	2.3-5.7

* ταχύτητα επέκτασης σεισμικών κυμάτων.

Πίνακας Β.2 : Ταξινόμηση ελληνικών μαρμάρων ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους (5)

Κατηγορία	Χρῶμα - Προέλευση	Μάζα
Μετ/σιγενή	Λευκά καί ἡμίλευκα μάρμαρα Πεντέλης, Πάρου, Ἰκαρίας Κρυσταλλικά μάρμαρα Νάξου Ποικιλόχρωμα μάρμαρα Σύρου Σιπολλίνες Στύρων Εύβοίας Τεφρό μάρμαρο Κέας, Ἰκαρίας, Ὑμηττοῦ Λατυποπαγές Ἰκαρίας Λευκά, ἡμίλευκα καί Κρυσταλλικά μάρμαρα Δράμας, Καβάλας, Θάσου Μαῦρο μάρμαρο Κοζάνης Κόκκινο μάρμαρο Μόνης	Ἀττικ/κή Ροδόπης Πελαγονική Πελ. & Κρήτης
Ἰζημ/γενή	Μαῦρα μάρμαρα Ἰωαννίνων, Κέρκυρας, Κεφαλληνίας Κρήτης, Βυτίνας Ποικιλόχρωμα μάρμαρα Ἰωαννίνων, Ἀστακοῦ, Ρόδου	
Πυριγενή	Πράσινα μάρμαρα: Τήνου, Σύρου καί Λαρίσης Ἐλαιοπράσινα μάρμαρα: Κροκεῶν Λακωνίας Γρανιτικές πλάκες: Σερίφου, Νάξου, Ἰκαρίας Ἡφαιστειακές πλάκες: Μήλου	

B.2.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν οποιοδήποτε πέτρωμα είναι οι ακόλουθες:

1) Η υφή, η οποία αφορά τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του (13, 15):

- i) Το μέγεθος των κόκκων του. Η κατάταξη ενός πετρώματος γίνεται με βάση το μέγεθος των κόκκων του όπως φαίνεται στον πίνακα Β.3:

Πίνακας Β.3 Κατάταξη των πετρωμάτων με βάση το μέγεθος των κόκκων τους.

Μέγεθος κόκκων (mm)	Χαρακτηρισμός
> 60	Πολύ Αδρόκοκκο
60 – 2	Αδρόκοκκο
2 – 0,06	Μεσόκοκκο
0,06 – 0,002	Λεπτόκοκκο
< 0,002	Πολύ Λεπτόκοκκο

- ii) Το σχετικό μέγεθος των κόκκων του. Αυτό το χαρακτηριστικό αφορά τη διαβάθμιση των κόκκων των ορυκτών, με βάση την οποία το πέτρωμα κατατάσσεται σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ομοιόμορφο
- Ανομοιόμορφο
- Πορφυριτικό .

- iii) Τη μορφή των κόκκων του. Η μορφή των κόκκων ενός πετρώματος χαρακτηρίζεται από:

- Τη γωνιότητά τους, αφού αυτοί μπορούν να είναι γωνιώδεις, υπογωνιώδεις, υποστρογγυλεμένοι ή αποστρογγυλεμένοι.
- Το σχήμα τους, το οποίο μπορεί να είναι ισοδιαστατικό, επίπεδο, επίμηκες, επίπεδο και επίμηκες ή ακανόνιστο.
- Την επιφανειακή υφή τους, που μπορεί να είναι είτε τραχεία είτε λεία.

2) Το χρώμα, που προσδιορίζεται με ακρίβεια από το συνδυασμό του χρώματος, της απόχρωσης και της φωτεινότητας του πετρώματος (13-15).

3) Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

Αυτή η σημαντική μηχανική ιδιότητα των πετρωμάτων δύναται να προσδιοριστεί με δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια με ύψος ίσο με το διπλάσιο της διαμέτρου της βάσεώς τους ή με δοκιμές σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5 cm × 5 cm × 5 cm με καλά διαμορφωμένες παράλληλες έδρες. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη εκφράζεται από το πηλίκο της δύναμης θραύσεως προς την επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη αυτή. Η μονάδα μέτρησής της είναι συνήθως το MPa. Ο πίνακας Β.4 που ακολουθεί, παρουσιάζει την κατάταξη των πετρωμάτων με βάση αυτή τους την ιδιότητα (13, 14, 16).

Πίνακας Β.4 Κατάταξη των πετρωμάτων με βάση την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη.

Αντοχή (MPa)	Χαρακτηρισμός
< 1	Συνεκτικό έδαφος
1,5 – 15	Μαλακό
15 – 50	Μέτρια Σκληρό
50 – 120	Σκληρό
120 – 230	Πολύ σκληρό
> 230	Εξαιρετικά Σκληρό

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα μάρμαρα κατατάσσονται στις κατηγορίες των μέτρια σκληρών μέχρι και των σκληρών πετρωμάτων ενώ οι πορώλιθοι χαρακτηρίζονται από πολύ μαλακοί έως σκληροί (17).

4) Η αντοχή σε σημειακή φόρτιση.

Αυτή η μηχανική ιδιότητα των πετρωμάτων προσδιορίζεται με την εφαρμογή δύο σημειακών φορτίων σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία ενός κυλινδρικού δοκιμίου. Έτσι υπολογίζεται ο συντελεστής:

$$I_s = P/d^2, \quad (B.1)$$

όπου P είναι το φορτίο και d η διάμετρος του δοκιμίου. Η αντοχή σε σημειακή φόρτιση λαμβάνεται από το γινόμενο του συντελεστή Is επί ένα συντελεστή K = 20 – 24, ανάλογο προς τη διάμετρο του δοκιμίου (13, 18, 19).

5) Η αντοχή σε εφελκυσμό.

Κατά τον έλεγχο σε εφελκυσμό ενός πετρώματος πραγματοποιούνται επίσης ο προσδιορισμός της συνοχής του, c (MPa) και της γωνίας εσωτερικής τριβής του, φ (°). Αυτά τα μεγέθη υπολογίζονται με την πραγματοποίηση της δοκιμής «Brazilian» σε κυλινδρικό δοκίμιο. Η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος παρέχεται από τη μαθηματική σχέση:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (\text{B.2})$$

όπου P είναι η δύναμη θραύσης του δοκιμίου, L είναι το μήκος του και D το πάχος του. Τα c και φ υπολογίζονται με την κατασκευή των κύκλων του Mohr (13), (15), (16).

6) Η αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη.

Η εν λόγω μηχανική ιδιότητα είναι η τάση που προκαλεί τη θραύση της κάτω πλευράς μίας λίθινης αμφιέριστης δοκού διαστάσεων διατομής b × h και μήκους ανοίγματος Ls , όταν αυτή κάμπτεται υπό την επίδραση φορτίου P (13-16). Η μαθηματική σχέση που παρέχει την τιμή αυτή της ιδιότητας είναι η:

$$T = \frac{3}{2} \times \frac{PLs}{bh^2} \left(\frac{Kp}{cm^2} \right) \text{ ή MPa} \quad (\text{B.3})$$

7) Η σκληρότητα.

Η σκληρότητα εκφράζει την αντίσταση ενός ορυκτού ή ενός πετρώματος στη χάραξη ή τη λείανσή του. Ένας πρώτος τρόπος για τον καθορισμό της σκληρότητας ενός πετρώματος είναι η χρήση της εμπειρικής, σκληρομετρικής κλίμακας Mohs. Αυτή αποτελείται από 10 ορυκτά διαφορετικής σκληρότητας τοποθετημένα σε σειρά. Το καθένα από αυτά χαράσσει τα προηγούμενά του και χαράσσεται από τα επόμενά του. Στον πίνακα Β.5 δίδονται η σκληρομετρική κλίμακα Mohs σε συνδυασμό με τις τιμές σκληρότητας λείανσης των ορυκτών αυτής της κλίμακας κατά ROSIWAL. Σε

αυτές τις τιμές ως μονάδα σκληρότητας λαμβάνεται το 1/1000 της σκληρότητας του κορουνδίου.

Ένας δεύτερος τρόπος για να καθοριστεί η σκληρότητα κάποιου πετρώματος είναι η χρήση του σκληρόμετρου αναπήδησης 'Shore'. Το όργανο αυτό διαθέτει σφύρα με κεφαλή από αδάμαντα. Η σφύρα αφήνεται να πέσει από καθορισμένο ύψος πάνω στην επιφάνεια του λίθινου δοκιμίου και το μετρούμενο ύψος αναπήδησης της χαρακτηρίζει τη σκληρότητα του υλικού σύμφωνα με την κλίμακα Shore. Στον πίνακα Β.6 παρουσιάζονται κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές σκληρομετρήσεων κατά Shore.

Σημειώνεται, τέλος, ότι η σκληρότητα σε λείανση ενός πετρώματος μπορεί να προσδιοριστεί με μία τυποποιημένη διαδικασία κατά την οποία γίνεται χρήση του τροχού λείανσης ορυκτολογικών παρασκευασμάτων (13, 14, 20).

Πίνακας Β.5 Κλίμακα σκληρότητας Mohs (20)

Βαθμός Σκληρότητας	Πρότυπο ορυκτό	Χημική σύσταση	Μέσα απλής δοκιμής	Σκληρότητα λείανσης ROSIWAL (Κορούνδιο 1.000)
1	Τάλκης	$Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$		0,03
2	Γύψος	$CaSO_4 \bullet 2H_2O$	Όνυχας (2,5)	1,25
3	Ασβεστίτης	$CaCO_3$	Μαλακό μεταλλικό	4,50
4	Φθορίτης	CaF_2	νόμισμα (≈ 4)	5,00
5	Απατίτης	$Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$	Μαχαίριδιο, ύαλος, σκληρή πορσελάνη	6,50
6	Ορθόκλαστο	$CaSi_3O_8$	(5,5-6)	37,0
7	Χαλαζίας	SiO_2		120,0
8	Τοπάζιο	$Al_2(F,OH)_2SiO_4$		175,00
9	Κορούνδιο	Al_2O_3	Ανθρακοκορούνδιο (SiC)	1000,00
10	Αδάμας	C		140000,00

Πίνακας Β.6 Αντιπροσωπευτικές τιμές σκληρομετρήσεων κατά Shore (21)

Πέτρωμα	Βαθμοί σκληρότητας κατά Shore (H)
Ηφαιστίτης	28
Μάρμαρο	37
Δουνίτης	52
Ασβεστόλιθος	69
Γρανίτης	88

7) Η ταχύτητα των υπερήχων.

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων μέσα σε κάποιο πέτρωμα είναι πολύ σημαντικός επειδή συντελεί στον πολύ αξιόπιστο και μη καταστρεπτικό προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων ελαστικότητάς του, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητάς του (E), του μέτρου διατμήσεώς του (G) και του λόγου Poisson του (ν). Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της μεθόδου των υπερήχων δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του βάθους της αποσάθρωσης από την επιφάνεια ενός πετρώματος (13, 15, 16).

8) Η ανισοτροπία.

Η ανισοτροπία ενός βραχώδους υλικού αφορά τη μεταβολή των φυσικών και των μηχανικών ιδιοτήτων αυτού ανάλογα με τη διεύθυνση. Ένας συνήθης τρόπος απεικόνισης αυτής της συμπεριφοράς ενός υλικού είναι η αναπαράσταση του τριαξονικού ελλειψοειδούς της ανισοτροπίας του. Επειδή το μέτρο ελαστικότητας, E και η μεταβολή αυτού στις διάφορες διευθύνσεις μπορεί να χαρακτηρίσει επιτυχώς την ανισότροπη συμπεριφορά κάποιου υλικού και εφόσον η εν λόγω μηχανική παράμετρος συνδέεται μέσω συγκεκριμένης μαθηματικής σχέσης με τις ταχύτητες διαδόσεως των διαμήκων και των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων μέσα σε αυτό, η απεικόνιση των ταχυτήτων αυτών είναι δυνατόν να περιγράψει με ευκρίνεια την εν λόγω ανισοτροπία του (13, 22).

9) Η παραμορφωσιμότητα.

Η συγκεκριμένη μηχανική ιδιότητα εκφράζει την παραμόρφωση που παρουσιάζει κάποιο στερεό υλικό υπό ορισμένη φόρτιση. Το μέτρο ελαστικότητας (E), και ο λόγος Poisson (ν), είναι οι δύο ελαστικές σταθερές που συνήθως χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτή την ιδιότητα των υλικών. Αυτές οι σταθερές ορίζονται ως εξής:

α) Μέτρο ελαστικότητας, E:

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (\text{B.4})$$

Όπου : - σ = αξονική τάση

$$- \frac{\Delta l}{l} = \text{ανηγμένη αξονική παραμόρφωση}$$

β) Λόγος Poisson, ν :

$$\nu = \frac{\frac{\Delta z}{z}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (\text{B.5})$$

Όπου : - $\frac{\Delta z}{z}$ = ανηγμένη πλευρική παραμόρφωση

$$- \frac{\Delta l}{l} = \text{ανηγμένη αξονική παραμόρφωση (13).}$$

11) Η θερμική διαστολή.

Η ικανότητα θερμικής διαστολής των ουρικών στις συνήθεις θερμοκρασίες εκφράζεται από το συντελεστή θερμικής διαστολής, α , ο οποίος παρέχεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$\alpha = \frac{I_t - I_0}{I_0 t} \quad (\text{B.6})$$

όπου : - I_0 : μήκος σε θερμοκρασία 0°C

- I_t : μήκος σε θερμοκρασία $t^\circ\text{C}$

- Οι μεταβολές είναι της τάξης $10^{-6}/\text{grad}$.

Σε ανισότροπα υλικά, ο συντελεστής θερμικής διαστολής δύναται να είναι διαφορετικός στις διάφορες διευθύνσεις (13, 15, 16).

12) Το ειδικό βάρος.

Το ειδικό βάρος ενός πετρώματος ισούται με το βάρος ορισμένου όγκου των στερεών συστατικών του προς το βάρος ίσου όγκου αποσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4 °C, δηλαδή:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (\text{B.7})$$

Επειδή το ειδικό βάρος του νερού σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας ισούται με 1, τελικά το ειδικό βάρος ενός πετρώματος ισούται προς το βάρος των στερεών συστατικών του προς τον αντίστοιχο όγκο τους (13-16).

13) Το φαινόμενο βάρος.

Το φαινόμενο βάρος ενός εδάφους ισούται με το συνολικό βάρος ενός δείγματός του προς τον όγκο αυτού του δείγματος. Με τον όρο «συνολικό βάρος» νοείται το βάρος του ίδιου του εδάφους μαζί με αυτό του αέρα και του νερού που εμπεριέχονται στους πόρους του. Συνεπώς το φαινόμενο βάρος παρέχεται από τη σχέση (13, 15, 16):

$$\gamma = \frac{W}{V} \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (\text{B.8})$$

14) Το ξηρό φαινόμενο βάρος.

Το ξηρό φαινόμενο βάρος ενός πετρώματος ισούται με το βάρος ενός δοκιμίου του προς τον όγκο αυτού όταν έχει προηγηθεί ξήρανση του δοκιμίου στους 110 °C για χρονικό διάστημα 24 h (13, 15, 16).

15) Το πορώδες.

Το πορώδες ενός πετρώματος ισούται με τον όγκο των κενών ενός δοκιμίου αυτού προς το συνολικό όγκο του δοκιμίου, V, δηλαδή:

$$N = \frac{V_v}{V} \cdot 100\% \quad (\text{B.9})$$

Το πορώδες διακρίνεται στο ολικό και στο ενεργό. Το ολικό πορώδες αφορά το σύνολο των πόρων του βραχώδους υλικού ενώ το ενεργό αφορά μόνο τους πόρους μέσω των οποίων είναι δυνατή η ροή του νερού.

Μία ακόμη σχετική με το πορώδες ιδιότητα είναι ο **λόγος κενών**, ο οποίος εκφράζει τον όγκο των κενών ορισμένου όγκου πετρώματος προς τον όγκο των στερεών που περιλαμβάνεται σε αυτόν (13, 14, 15, 16).

16) Η φυσική υγρασία.

Η ιδιότητα αυτή εκφράζει την ποσότητα του νερού που περιέχεται σε ένα πέτρωμα στο φυσικό περιβάλλον του και μετριέται σε ποσοστό % (13, 15, 16).

17) Η απορροφητικότητα.

Η συγκεκριμένη ιδιότητα εκφράζεται ως ποσοστό του ξηρού φαινόμενου βάρους του υλικού έπειτα από 24ωρο εμποτισμό σε νερό. Ο λόγος του όγκου των πόρων που είναι γεμάτοι με νερό προς το συνολικό όγκο των πόρων καλείται βαθμός υδατοκορεσμού (13-15).

18) Η αντοχή σε επίδραση θεικών αλάτων.

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό αυτής της ιδιότητας πραγματοποιείται μετά από προσβολή των δοκιμίων με θειικά άλατα (13).

19) Η αντοχή στον παγετό.

Για τον υπολογισμό της αντοχής ενός λίθου στον παγετό προαπαιτείται η βύθιση στο νερό για χρονικό διάστημα 24 ή 36 ωρών κυβικών δοκιμίων του που έχουν προηγουμένως ξηρανθεί και ζυγιστεί. Κατόπιν αυτά υποβάλλονται σε θερμοκρασία πήξεως του νερού που εσωκλείεται στους πόρους τους και αμέσως μετά σε θερμοκρασία τήξεως του δημιουργούμενου κατά την πήξη πάγου. Η διαδικασία πήξης και τήξης επαναλαμβάνεται 25 ή 40 φορές σύμφωνα με τους αμερικάνικους κανονισμούς και στη συνέχεια τα δοκίμια ξηραίνονται και αφαιρούνται από την επιφάνειά τους τα χαλαρωμένα τμήματα. Τα δοκίμια ζυγίζονται πάλι και το πηλίκο του βάρους που χάθηκε προς το αρχικό βάρος τους παρέχει την εκατοστιαία απώλεια βάρους (14).

20) Η αντοχή στην πύρωση και στην πυρκαγιά.

Η αντοχή των λίθων στην πυρκαγιά εξαρτάται από τη χημική και την ορυκτολογική σύστασή τους καθώς και από την πυκνότητα και τη δομή του ιστού τους (14).

21) Η αντοχή σε κρούση.

Ο υπολογισμός της ιδιότητας αυτής είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την περίπτωση κατασκευών από λίθους που δέχονται κρουστικές δυνάμεις. Η αντοχή σε κρούση ελέγχεται με τη βοήθεια λίθινων κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου βάσεως 2,5 cm και ύψους 25 cm και ισούται με το ύψος σε cm από το οποίο πρέπει να πέσει βάρος 2 Kp ώστε να προκληθεί η θραύση τους. Συνήθως μία ικανοποιητική τιμή της αντοχής των λίθων σε κρούση είναι τα 8 cm. Τιμές της αντοχής αυτής που υπερβαίνουν τα 12 cm θεωρούνται εξαιρετικά ικανοποιητικές (14).

Ορισμένες από τις προαναφερόμενες ιδιότητες κάποιων σημαντικών πετρωμάτων παρατίθενται στον πίνακα Β.7.

Πίνακας Β.7 Μέσες τιμές βασικών χαρακτηριστικών των κυριότερων πετρωμάτων

(2)

Πέτρωμα	Πυκνότητα (Kg/m³)	Υδαταπορρο- φητικότητα (% κ.β.)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)
<i>Πυριγενή</i>			
Γρανίτης	2650	0,3	150
Συηνίτης	2740	0,4	180
Διορίτης , Γάββρος	2900	0,3	230
Πορφυρίτης	2700	0,5	250
Βασάλτης	3000	0,2	320
Βασαλτική λάβα	2250	7,0	100
Διαβάσης	2850	0,2	210
<i>Ιζηματογενή</i>			
Ασβεστόλιθος	2650	0,9	100
Δολομίτης	2700	1,1	140
Αργιλ. σχιστόλιθος	2750	0,5	150
Κροκαλοπαγή	2700	1,2	70
Ψαμμίτης	2600	2,0	100
<i>Μεταμορφωσιγενή</i>			
Γνεύσιος	2750	0,3	220
Σχίστης	2850	0,4	200
Κρυστ. σχιστόλιθος	2750	0,5	280
Χαλαζίτης	2700	0,3	210
Μάρμαρα	2650	0,2	120
Σερπεντίνης	2650	0,6	200

Β.3 Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ

Όπως είναι γνωστό, στη φύση τα πάντα μεταβάλλονται και τίποτα δεν παραμένει σταθερό. Πρόκειται για μία πραγματικότητα, η οποία αφορά ασφαλώς και τις ποικίλες αλλαγές που συνεχώς πραγματοποιούνται στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των υλικών σωμάτων που υπάρχουν στο περιβάλλον, οι οποίες αλλαγές συνήθως ταυτίζονται με τη φθορά τους.

Η φθορά, δηλαδή η απομείωση στο χρόνο των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών τους είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζει όλα τα υλικά που εφαρμόζονται στη δομική, άρα και τους λίθους και οδηγεί στην αποσάθρωσή τους.

Τα φαινόμενα της φθοράς των λίθων οφείλονται σε ενδογενή και εξωγενή αίτια ενώ κάθε παράγοντας προκαλεί την ανάπτυξη συγκεκριμένων μηχανισμών της

φθοράς. Ακολούθως αναφέρονται συνοπτικά τα αίτια που οδηγούν στη φθορά των δομικών λίθων, τα σπουδαιότερα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την εξέλιξή της και τέλος οι μηχανισμοί της σε σχέση με τον κάθε παράγοντα ξεχωριστά που τους προκαλεί.

B.3.1 ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ

Τα αίτια που προκαλούν τη φθορά των λίθων στις κατασκευές ή διαφορετικά οι παράγοντες που καθορίζουν την εμφάνιση των φαινομένων της φθοράς διακρίνονται σε ενδογενείς και εξωγενείς και είναι οι εξής:

I) Ενδογενείς παράγοντες (17, 23, 24):

- α) Οι ιδιότητες των λίθων, που ξεχωρίζουν σε ορυκτολογικές, φυσικές, φυσικοχημικές, χημικές και μηχανικές.
- β) Η μακροδομή και η μικροδομή τους.
- γ) Η προέλευσή τους.
- δ) Η ιστορία των λίθων στην κατασκευή.
- ε) Η συμβατότητα μεταξύ αυτών και των άλλων υλικών της κατασκευής, όπως π.χ. των συνδετικών υλικών της τοιχοποιίας.

II) Εξωγενείς παράγοντες (17, 23, 24):

- α) Τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος, όπως είναι η ένταση των περιβαλλοντικών παραγόντων.
- β) Το μικροκλίμα, που εξαρτάται από την ιδιαίτερη θέση του υλικού στο κτίριο, τον τρόπο προσβολής του από τη βροχή κ.λ.π..
- γ) Η ατμόσφαιρα. Ως γνωστό, η ρυπασμένη και η θαλασσινή ατμόσφαιρα είναι παράγοντες σημαντικής φθοράς των λίθων.
- δ) Το νερό, που ως ουσιαστικός παράγοντας φθοράς μπορεί να έχει μορφή αεροζόλ, βροχής, ανερχόμενης υγρασίας ή διαλύματος αλάτων.
- ε) Οι βιολογικοί παράγοντες, στους οποίους ανήκουν η μικροπανίδα, τα φυτά και τα πτηνά.
- στ) Οι συνθήκες χρήσης της κατασκευής, στις οποίες υπάγονται οι συνθήκες λειτουργίας του εσωτερικού χώρου της και οι χωροταξικές και οι πολεοδομικές συνθήκες που υφίστανται στην περιοχή της.

ζ) Οι μηχανικές φορτίσεις, που αναφορικά είναι οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η διάγνωση των μεταλλικών συνδέσμων, η κρυστάλλωση των αλάτων, ο παγετός, οι σεισμικές δονήσεις και η εκτριβή.

B.3.2 ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Τα συνηθέστερα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την εξέλιξη της φθοράς των δομικών λίθων είναι τα εξής (17, 23):

α) Οι επιφανειακές κρούστες, κάτω από τις οποίες η φθορά εξελίσσεται σε βάθος. Συνήθη είδη κρούστας είναι η όξινη ανθρακική και ο γύψος. Γνωστό παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι η δημιουργία γύψου στα πρόσωπα και τους χιτώνες των Καρυάτιδων που είναι από πεντελικό μάρμαρο.

β) Η κρυστάλλωση των αλάτων, η οποία εξελισσόμενη οδηγεί σε κυψέλωση.

γ) Η εντεινόμενη κυψέλωση σε διεπιφάνειες ασύμβατων δομικών υλικών στις κατασκευές. Πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κρατήρες που δημιουργήθηκαν στους πυρόλιθους τοιχοποιιών της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου λόγω της ασυμβατότητας μεταξύ των λίθων αυτών και του τσιμεντιτικού κονιάματος που έπαιξε το ρόλο του συνδετικού υλικού σε κάποιες επεμβάσεις αποκατάστασης.

B.3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ

Ο καθένας από διάφορους παράγοντες φθοράς των δομικών λίθων, όπως είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση, το νερό και ποικίλοι μηχανικοί παράγοντες δημιουργεί και ένα διαφορετικό μηχανισμό, ο οποίος ελέγχει τη την εξέλιξη της φθοράς αυτής. Παρακάτω γίνεται σύντομη αναφορά στους μηχανισμούς που αναπτύσσονται υπό την επίδραση αυτών των παραγόντων.

- 1: Η ατμοσφαιρική ρύπανση (17, 23, 24).

Υπό συνθήκες ρυπασμένης ατμόσφαιρας, στις επιφάνειες των λίθων είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιδράσεις γυψοποίησης, να προκληθεί όξινη διάβρωση και να αποτεθούν αιωρούμενα σωματίδια με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων τύπων επιφανειακής κρούστας. Η φθορά, λοιπόν, που παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση μπορεί να έχει τη μορφή αποπλυμένης επιφάνειας είτε κιτρινόμαυρης

κρούστας οξείδωσης είτε τσιμεντιτικής κρούστας ή μαύρης, χαλαρής απόθεσης ή, τέλος, φαιόμαυρης κρούστας.



Εικόνα Β.1: Φθαρμένη επιφάνεια μαρμάρου του Παρθενώνα εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (25).

- 2: Το νερό (13, 17).

Το νερό είναι υπεύθυνο για ένα μεγάλο πλήθος μηχανισμών φθοράς. Καταρχάς ελέγχει τη μεταφορά και την κρυστάλλωση των αλάτων στο εσωτερικό των λίθων. Επίσης, όταν περιέχει αέριους ρύπους, δύναται να σχηματίζει όξινα διαλύματα, επικίνδυνα για τους λίθους ανθρακικής σύστασης. Επιπρόσθετα, το νερό αποτελεί αναγκαίο παράγοντα για την πραγματοποίηση ενός πλήθους χημικών αντιδράσεων κρίσιμων για τη διάβρωση των αργιλοπυριτικών πετρωμάτων καθώς και του συνόλου των βιολογικών δράσεων.

- 3: Οι μηχανικές δράσεις (23).

Σ' αυτή την κατηγορία πρέπει καταρχάς ν' αναφερθούν οι θερμοκρασιακές μεταβολές και οι πυρκαγιές που συντελούν στην ανάπτυξη τάσεων στο εσωτερικό των λίθων εξαιτίας του διαφορετικού βαθμού και της ταχύτητας διαστολής των ορυκτών τους.

Μία ακόμη μηχανική αιτία της φθοράς των δομικών λίθων είναι η διαστολή και η διάβρωση των μεταλλικών συνδέσμων τους στις κατασκευές, που προκαλούν πολύ ισχυρές τάσεις στο εσωτερικό τους και συντελούν στη ρήξη του υλικού τους όταν ξεπεραστεί η αντοχή τους (23, 25).



Εικόνα Β.2: Ένας παλιός, οξειδωμένος, μεταλλικός σύνδεσμος του Παρθενώνα δίπλα στον αντικαταστάτη του από τιτάνιο (25).

Τέλος, απαιτείται ν' αναφερθεί ο σπουδαιότερος παράγοντας του σεισμού, ο οποίος δύναται να προκαλεί βλάβες στο λίθινο υλικό των κτισμάτων.

Κλείνοντας την παράγραφο Β.2.4 πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο της φθοράς με απόσπαση κόκκων που παρουσιάζεται, είναι διαφορετικό σε καθένα από τα τρία βασικά είδη πετρωμάτων. Έτσι, στα ιζηματογενή πετρώματα η φθορά εμφανίζεται με την απόσπαση των κόκκων τους, στα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζεται είτε απολέπιση είτε απόσπαση κόκκων τους και τέλος, στα κρυσταλλοσχιστώδη πραγματοποιείται απόσπαση των κρυστάλλων τους (23).

Επιπρόσθετα, το είδος του λίθου καθορίζει και το είδος των επεμβάσεων συντήρησης που εφαρμόζονται σε αυτόν. Στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, λοιπόν, η σειρά των επεμβάσεων που πραγματοποιείται είναι: καθαρισμός – στερέωση – προστασία ενώ στα πυριγενή και τα ιζηματογενή λαμβάνουν χώρα διαδοχικά η προστερέωση, η στερέωση και η προστασία τους (23).

Γ. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γ.1 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Γ.1.1 Η ΑΡΧΗ, Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Οι πρώτες επιστημονικές προσπάθειες αξιοποίησης των διαδιδόμενων υπερήχων στον έλεγχο των υλικών χρονολογούνται στο 1929 και πραγματοποιήθηκαν από τον Sokolon. Ακολούθησε μία σειρά σημαντικών επιστημόνων που συνέχισαν την έρευνα σε αυτόν τον τομέα, όπως ήταν ο Mulhauser, ο Firestone και ο Simons. Οι δύο τελευταίοι ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της παλμοχούς (1940 και 1945 αντίστοιχα). Μετά από το Β΄ παγκόσμιο πόλεμο αναπτύχθηκαν πολλές σημαντικές εφαρμογές των υπερήχων και στην ιατρική επιστήμη με πρωτοπόρους σε αυτές του Ιάπωνες και τους Αμερικάνους ν' ακολουθούν (26).

Κατά τον πρώτο καιρό, ο πρωτεύων σκοπός της εφαρμογής των υπερήχων ήταν η ανίχνευση ελαττωμάτων μέσα σε τμήματα κατασκευών. Αργότερα προέκυψε η απαίτηση της ποσοτικής αποτίμησης των εν λόγω ελαττωμάτων με στόχο τον προσδιορισμό της απομένουσας ζωής των κατασκευών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για αυτά τα πεδία έδειξαν αρχικά οι βιομηχανίες άμυνας και πυρηνικής ενέργειας (26).

Στον τομέα της επιστήμης των υλικών, οι διαδικασίες των μετρήσεων που αναπτύχθηκαν αρχικά για τα μέταλλα επεκτάθηκαν στη συνέχεια στα τεχνικά υλικά, όπως τα σύνθετα που χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και ανισοτροπία (26).

Πλέον το ενδιαφέρον υπάρχει όχι μόνο προς την κατεύθυνση της ανίχνευσης, του χαρακτηρισμού και του υπολογισμού του μεγέθους των ελαττωμάτων αλλά και προς το χαρακτηρισμό των υλικών στα οποία βρίσκονται αυτά (26).

Το μέλλον προβλέπεται ευοίωνο για την ποσοτική μη καταστρεπτική αποτίμηση των υλικών με υπερήχους. Σήμερα παρατηρείται ένας αυξανόμενος παγκόσμιος ανταγωνισμός στα πεδία της ανάπτυξης προϊόντων και των επιχειρήσεων, όπου υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για το μη καταστρεπτικό έλεγχο. Ταυτόχρονα η γήρανση των κατασκευών, από δρόμους και κτίρια μέχρι αεροσκάφη, παρουσιάζει νέες ευκαιρίες και αιτιολογεί τη συνεχιζόμενη ανάγκη για την ύπαρξη της μη καταστρεπτικής αποτίμησης με διάφορες μεθόδους, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η μέθοδος των υπερήχων (26).

Γ.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ (20)

Η ηχητική και η υπερηχητική μέθοδος ελέγχου των υλικών βασίζονται στη χρήση ελαστικών τασικών κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται από εφελκυστικές, θλιπτικές, διατμητικές ή καμπτικές δυνάμεις πολύ μικρής έντασης (27-29).

Η ηχητική μη καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου των υλικών έχει τις ρίζες της στο μακρινό παρελθόν και συγκεκριμένα στην εποχή που ο άνθρωπος προσπαθούσε να ελέγξει εμπειρικά την ποιότητα των υλικών κρούοντάς τα με κατάλληλο σφυρί και εξετάζοντας την ηχώ που δημιουργούταν. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η ποιοτική αποτίμηση των υλικών με την εκτίμηση των παραγόμενων ήχων αντικαταστάθηκε από αυτή με τη χρήση των υπερήχων. Σε αυτή την περίπτωση το ανθρώπινο όργανο της ακοής και το σφυρί έχουν αντικατασταθεί από συσκευές παραγωγής και ανίχνευσης ηχητικών σημάτων (27-29).

Το υλικό που ελέγχεται, ηχοβολείται από μία δέσμη ηχητικών κυμάτων συχνότητας > 20 KHz (μηχανικά κύματα). Με τον τρόπο αυτό ανιχνεύονται επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες και προσδιορίζονται ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητές του, όπως το μέτρο ελαστικότητας (ή Young), E , το μέτρο διάτμησης, G , ο λόγος του Poisson, ν , η αντοχή, σ , η σκληρότητα και άλλες χωρίς να υπάρχει η απαίτηση κατασκευής και θραύσης ειδικών δοκιμίων. Επιπρόσθετα, η μέθοδος των υπερήχων βρίσκει πολλές άλλες εφαρμογές, οι οποίες αναφέρονται στην παράγραφο Γ.1.4 του παρόντος κεφαλαίου της Μεταπτυχιακής Εργασίας (27-29).

Η μη καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου με υπερήχους παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της απλότητας, της χρησιμοποίησης φορητών συσκευών, οι οποίες έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και βάρος (έως 15 Kg), της ευαισθησίας, του μη επηρεασμού των ιδιοτήτων των υλικών που ελέγχονται και κυρίως της ακινδυνότητας για την υγεία του ανθρώπου. Ακόμη, με τη μέθοδο των υπερήχων είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των γεωμετρικών στοιχείων μίας ατέλειας μέχρι το σημαντικό βάθος των 15 m (27-29).

Γ.1.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ , ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Η κεφαλή ή ανιχνευτής ατελειών είναι το πιο σημαντικό στοιχείο μίας συσκευής υπερήχων. Με αυτή σαρώνεται η επιφάνεια του δοκιμίου και ανιχνεύονται οι ασυνέχειές του με τα υπερηχητικά κύματα που εκπέμπει και κατόπιν επιστρέφουν πίσω σε αυτή, αφού προηγουμένως ανακλαστούν είτε σε κάποια ασυνέχεια του υλικού είτε σε μία εξωτερική επιφάνειά του. Ο βαθμός δυσκολίας ανίχνευσης μίας ρωγμής εξαρτάται από τον προσανατολισμό της ως προς τη δέσμη των παραγόμενων ηχητικών ταλαντώσεων, από τον αριθμό των διαστάσεων της ρωγμής (διδιάστατη ή τρισδιάστατη) ή από το αν η ρωγμή βρίσκεται σε συγκόλληση. Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζεται στην ανίχνευση διδιάστατων ρωγμών κάθετων στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και ρωγμών σε συγκολλήσεις (27-29).

Οι κυριότερες μέθοδοι με τις οποίες παράγονται τα υπερηχητικά κύματα είναι οι ακόλουθες τρεις:

1) Οι μηχανικές μέθοδοι με τις οποίες παράγονται υπέρηχοι στον αέρα με κατάλληλες σφυρίχτρες ή γεννήτριες ακροφυσίου ή σειρήνες. Η εν λόγω μέθοδος δεν μπορεί να παράγει υπέρηχους υψηλών συχνοτήτων και γι' αυτό δε χρησιμοποιείται στο μη καταστρεπτικό έλεγχο των υλικών (27-29).

2) Η μέθοδος της μαγνητοσυστολής που βασίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο όταν μαγνητιστεί μία ράβδος από σιδηρομαγνητικό υλικό, εισαχθεί σε πηνίο και κατόπιν βραχυνθεί ή επιμηκυνθεί, τότε στα άκρα του πηνίου αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη. Σιδηρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο καθώς και κάποια κράματα (27-29).

3) Η πιεζοηλεκτρική μέθοδος κατά την οποία όταν ένας ειδικός κρύσταλλος κατάλληλα προσανατολισμένος υποβληθεί σε εφελκυσμό ή θλίψη, τότε στις επιφάνειές του παρουσιάζονται ηλεκτρικά φορτία. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο είναι εναλλασσόμενο και ο κρύσταλλος έχει κατάλληλα γεωμετρικά στοιχεία, τότε η ταλάντωση που παράγεται, η οποία έχει τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος, μπορεί να είναι υπερηχητικής συχνότητας (27-29).

Στην πιεζοηλεκτρική μέθοδο χρησιμοποιούνται πλέον οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές. Το ενεργό στοιχείο αυτών είναι ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό. Αυτό το κεραμικό αποτελεί την καρδιά της κεφαλής που μετατρέπει την ηλεκτρική σε ακουστική ενέργεια και αντιστρόφως. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Πριν από αυτά,

χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των κεφαλών πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι από χαλαζία. Εξαιτίας, όμως, του υψηλού κόστους κατασκευής τους και των περιορισμών των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, σπάνια χρησιμοποιούνται σε κεφαλές σήμερα (29).

Η δεύτερη και η τρίτη μέθοδος από αυτές που αναφέρθηκαν, λειτουργούν και αντιστρόφως.

Προκειμένου να ανιχνευτούν οι ατέλειες, απαιτείται η διοχέτευση ενός υπερηχητικού παλμού πολύ μικρής διάρκειας μέσα στο υλικό που ελέγχεται. Γνωρίζοντας την ταχύτητα, c , του ήχου στο υλικό και μετρώντας το χρόνο, t , που απαιτείται για να συναντήσει ο παλμός την ατέλεια και να επιστρέψει στην κεφαλή, η απόσταση, a , στην οποία βρίσκεται η ατέλεια προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$a = ct \quad (\Gamma.1)$$

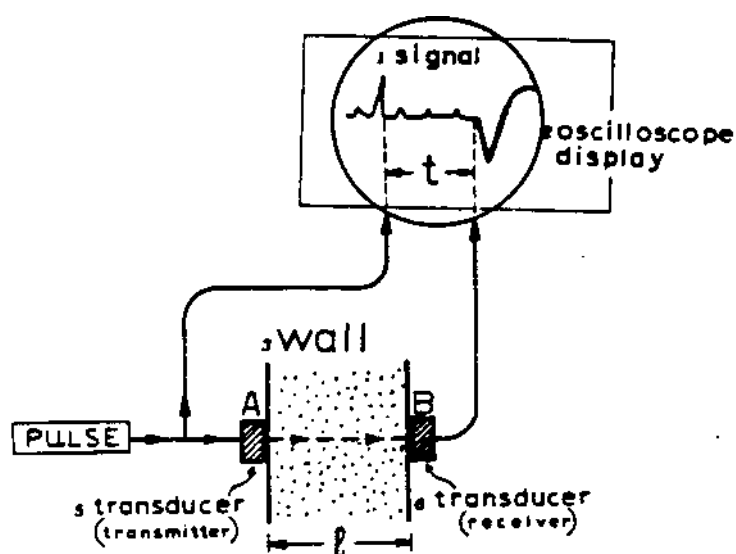
Ο ανακλώμενος υπερηχητικός παλμός καλείται ηχώ. Σε αυτή αποδίδεται η ονομασία της αντίστοιχης μεθόδου της παλμοηχούς. Με την κεφαλή στέλνονται ηχητικοί παλμοί στο δοκίμιο και οι ανακλώμενοι παλμοί λαμβάνονται με την ίδια ή άλλη κεφαλή. Ισχυροί ηλεκτρικοί παλμοί παράγονται όταν το πιεζοηλεκτρικό υλικό της κεφαλής διεγείρεται από τους ηλεκτρικούς παλμούς που παράγει ο ηλεκτρικός πομπός. Ο ηλεκτρικός δέκτης είναι συνήθως ένας ταλαντωτής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μία οθόνη CRT (Cathod Ray Tube), σωλήνα καθοδικών ακτίνων, η οποία είναι εφοδιασμένη με κατάλληλη κλίμακα, με τη βοήθεια της οποίας αντιστοιχίζονται οι μετρούμενες τιμές προς τις ενδείξεις της οθόνης CRT (27, 28).

Αναλυτικότερα, συμβαίνουν τα εξής: Ενώ από την κεφαλή εκπέμπεται ένας υπέρηχος, στην άκρη της οθόνης εμφανίζεται ένα φωτεινό σημείο, το οποίο διαγράφει τη βασική της γραμμή κατά τη διάρκεια της διάδοσης του υπερηχητικού παλμού μέσα στο υλικό. Η συσκευή ρυθμίζεται κατάλληλα έτσι ώστε να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ της ταχύτητας του ήχου στο υλικό και της ταχύτητας του φωτεινού σημείου στην οθόνη. Όταν ο ανακλώμενος ηχητικός παλμός επιστρέψει στην κεφαλή, παράγεται ένας ηλεκτρικός ή τασικός παλμός σύμφωνα με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κάθετη εκτροπή του φωτεινού σημείου της οθόνης. Η εκτροπή συμβαίνει πολύ γρήγορα λόγω του ότι ο ηχητικός παλμός είναι πολύ βραχύς και κατόπιν πραγματοποιείται η επιστροφή του φωτεινού σημείου στη βασική γραμμή της οθόνης για να συνεχίσει την αρχική, ευθύγραμμη πορεία του.

Το ποσοστό του ηχητικού παλμού που δεν εισέρχεται στην κεφαλή αλλά ανακλάται στη διαχωριστική επιφάνεια δοκιμίου – κεφαλής εισέρχεται πάλι στο δοκίμιο και το φαινόμενο που περιγράφηκε προηγουμένως επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο ηχητικός παλμός να εξαφανιστεί πλήρως έπειτα από μερικές ανακλάσεις (27-29).

Με την προαναφερθείσα διαδικασία λαμβάνεται ένα παλμογράφημα στην οθόνη, το οποίο παρέχει, έπειτα από κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής, το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ατέλεια από την τετμημένη της πρώτης παλμικής εκτροπής και το μέγεθος της ατέλειας από την τεταγμένη του εκτραπέντος παλμού. Η αρχή του πρώτου παλμού δε συμπίπτει με την αρχή της κλίμακας αφού ο ηχητικός παλμός δεν ξεκινά από την επιφάνεια του δοκιμίου αλλά πιο μπροστά, από το πιεζοηλεκτρικό υλικό της κεφαλής (27-29).

Στην περίπτωση ύπαρξης ατέλειας στο δοκίμιο εμφανίζονται στην οθόνη τρεις παλμοί με διαφορετικό εύρος, εκ των οποίων ο πρώτος είναι ο αρχικός παλμός ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος είναι η πρώτη και η δεύτερη ηχώ. Πιο συγκεκριμένα, ο δεύτερος παλμός ονομάζεται ενδιάμεση ηχώ και οφείλεται στη μερική ανάκλαση του ηχητικού παλμού στην ατέλεια του δοκιμίου ενώ ο τρίτος προκαλείται από την ανάκλαση του ηχητικού παλμού στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζεται στον εντοπισμό ατελειών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου, προς το μέρος της κεφαλής, αφού σε αυτή την περίπτωση η ηχώ της ατέλειας καλύπτεται από τον αρχικό παλμό. Απομακρύνοντας τον αρχικό παλμό από την οθόνη, η προαναφερθείσα δυσκολία μπορεί να αντιμετωπιστεί.



Εικόνα Γ.1: Η αρχή της μεθόδου των υπερήχων (30).

Γ.1.4 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο Γ.1.1 του παρόντος κεφαλαίου, οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου των υλικών, στις οποίες ανήκει και η μέθοδος των υπερήχων, ξεκίνησαν με σκοπό την ανίχνευση ατελειών και του μεγέθους αυτών μέσα σε μέλη κατασκευών. Η εξέλιξη της μεθόδου των υπερήχων και η ανακάλυψη σχέσεων που συνδέουν τη συμπεριφορά των ηχητικών κυμάτων με τις ιδιότητες των υλικών συνετέλεσαν στην ανάπτυξη υπερηχητικών μεθόδων για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών και τον προσδιορισμό κάποιων από τις μηχανικές σταθερές τους (27-29).

Τα πεδία, λοιπόν, στα οποία βρίσκει σήμερα εφαρμογή αυτή η πολύ σημαντική μέθοδος είναι συνοπτικότερα τα ακόλουθα:

- α) Ο προσδιορισμός της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων μέσα σε ένα υλικό.
- β) Τα υπερηχητικά παχύμετρα με τα οποία προσδιορίζεται το πάχος λεβήτων, κελυφών, σωλήνων, τοιχωμάτων πλοίων κ.λ.π.
- γ) Ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών E, G, ν ενός υλικού.
- δ) Ο προσδιορισμός των εσωτερικών και εξωτερικών τάσεων σε ένα υλικό.
- ε) Ο έλεγχος της δομής του υλικού.
- στ) Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος της ψαθυρότητας των υλικών.
- ζ) Η μη συμβατική κατεργασία υλικών, όπως το διαμάντι, τα σκληρά μέταλλα, το γυαλί και τα κεραμικά, η κατεργασία των οποίων πραγματοποιείται δύσκολα με τις συμβατικές μεθόδους.
- η) Η απομάκρυνση των λεπτών στρωμάτων της δύστηκτης οξειδωσης του αλουμινίου, η οποία απαιτείται να γίνει πριν από τη συγκόλλησή του.
- θ) Ο υπερηχητικός καθαρισμός των υλικών.
- ι) Η αποπαραφίνωση του πετρελαίου.
- ια) Η εξαέρωση υγρών και λιωμένων μετάλλων.
- ιβ) Ο έλεγχος ξύλινων κατασκευών και δένδρων.
- ιγ) Η ιατρική, στην οποία οι υπέρηχοι εφαρμόζονται τόσο ως διαγνωστική όσο και ως θεραπευτική μέθοδος αντί της κλασσικής χειρουργικής επέμβασης.
- ιδ) Η κτηνοτροφία, στην οποία η μέθοδος χρησιμεύει στον προσδιορισμό του πάχους των μυών και του λίπους των ζώων.
- ιε) Η βιομηχανία, όπου η μέθοδος των υπερήχων βρίσκει πραγματικά ένα τεράστιο και ενδιαφέρον πλήθος εφαρμογών. Κάποιες από αυτές είναι: ο έλεγχος

σιδηροδρομικών υλικών, πλακών, ελασμάτων, κυλίνδρων, σωλήνων, μεταλλικών υλικών, πλακών, πυρηνικών αντιδραστήρων κ.α., η συγκόλληση πλαστικών και μετάλλων (P.V.C., αλουμίνιο κ.α.), ο έλεγχος της λειτουργίας αυτοματοποιημένων μηχανών, ο προσδιορισμός του σχήματος ενός εξαρτήματος μίας μηχανής, ο προσδιορισμός της στάθμης υγρών σε αδιαφανή δοχεία, ο προσδιορισμός της ταχύτητας ροής των υγρών, ο προσδιορισμός θερμοκρασίας υγρών και αερίων κ.λ.π.. Ακόμη, οι υπέρηχοι εφαρμόζονται στον έλεγχο μη μεταλλικών υλικών και κατασκευών, όπως πετρωμάτων, σκυροδέματος, κεραμικών, γυαλιού, ξύλου, ελαστικών, πλαστικών, δέρματος κ.λ.π..

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία ενδιαφέρει ιδιαίτερα η εφαρμογή των υπερήχων στον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών E, G και ν τεσσάρων ειδών δομικών λίθων. Προκειμένου να οι υπολογιστούν αυτές οι σταθερές ενός υλικού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων, C_l και της ταχύτητας των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων, C_t , μέσα σε αυτό καθώς επίσης και η πυκνότητα, ρ , του υλικού. Έτσι, οι ελαστικές σταθερές παρέχονται τελικά από τις κάτωθι μαθηματικές σχέσεις (27-29):

- Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young, E:

$$E = 4 \cdot \rho \cdot C_l^2 \cdot \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} \quad (\Gamma.2)$$

- Λόγος Poisson , ν:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} \quad (\Gamma.3)$$

- Μέτρο διάτμησης, G:

$$G = \rho \cdot C_t^2 \quad (\Gamma.4)$$

Γ.2 ΗΛΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία εξέλιξη που έχει πραγματοποιηθεί στο επιστημονικό πεδίο του μη καταστρεπτικού χαρακτηρισμού των υλικών συνετέλεσε στην εκπόνηση ενός πολύ μεγάλου πλήθους ερευνητικών εργασιών σχετικών με το αντικείμενο αυτό από επιστήμονες πολλών πανεπιστημίων και των πέντε κατοικημένων ηπείρων του πλανήτη μας. Μία από τις σημαντικότερες μη καταστρεπτικές μεθόδους με την οποία ασχολείται ευρέως η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα είναι αυτή των υπερήχων, που ενδιαφέρει ιδιαίτερος και την παρούσα εργασία. Με αυτή οι ερευνητές προσπαθούν να υπολογίσουν τις τιμές διαφόρων ιδιοτήτων των υλικών και κατόπιν να κάνουν συγκρίσεις με τις τιμές των ίδιων ιδιοτήτων, οι οποίες προκύπτουν από συμβατικές και συνήθως καταστρεπτικές μεθόδους αποτίμησής τους. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζουν την ακρίβεια που έχει η μη καταστρεπτική μέθοδος των υπερήχων για να διερευνήσουν αν είναι δυνατή η αξιόπιστη εφαρμογή της για την πραγματοποίηση περαιτέρω υπολογισμών. Επιπρόσθετα, πολλές από τις τιμές των ιδιοτήτων που προσδιορίζονται με τη μέθοδο των υπερήχων, συσχετίζονται με τιμές άλλων ιδιοτήτων των ίδιων υλικών που προκύπτουν με διάφορες μεθόδους, με σκοπό τη δημιουργία χρήσιμων γραφικών παραστάσεων. Θα ήταν ίσως σκόπιμη σε αυτό το σημείο μία αναφορά στην έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί παγκοσμίως προς την κατεύθυνση αυτή.

Γ.2.1 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι υπέρηχοι είναι η πρώτη μη καταστρεπτική τεχνική που αναπτύχθηκε για την μελέτη του σκυροδέματος. Για τον έλεγχο αυτού του υλικού απαιτούνται υπερηχητικά κύματα όσο το δυνατόν χαμηλότερων συχνοτήτων, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εισχώρησή τους σε αυτό και να μειωθεί ο διασκορπισμός τους λόγω των πολυάριθμων «υλικών συνόρων» που υφίστανται (31).

Σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί από επιστήμονες στην προσπάθεια συσχέτισης των ταχυτήτων των διαμήκων και των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων μέσα στο σκυρόδεμα των κατασκευών με το πορώδες αυτού (32). Η έρευνα έδειξε ότι

το πορώδες προσδιοριζόμενο με τη βοήθεια των υπερήχων έχει τιμές παρόμοιες με αυτές που προκύπτουν από μεθόδους όπως η πορομετρία υδραργύρου και κατά συνέπεια οι υπέρηχοι αποτελούν αξιόπιστο εργαλείο προς αυτή την κατεύθυνση. Πρόκειται για μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή του μη καταστρεπτικού ελέγχου στον προσδιορισμό μίας σημαντικής φυσικής ιδιότητας που ελέγχει την επιδεκτικότητα στη φθορά των κατασκευών από σκυρόδεμα. Επιπρόσθετα, με την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων της μικρομηχανικής κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του μέτρου του Young και της αντοχής του σκυροδέματος από τις ταχύτητες των υπερήχων. Οι τιμές αυτών των μηχανικών ιδιοτήτων προέκυψαν παραπλήσιες με εκείνες που έδωσε ο καταστρεπτικός έλεγχος (33).

Αλλά οι συσχετίσεις που έχουν γίνει και αφορούν το σκυρόδεμα είναι πολυάριθμες και δε σταματούν εκεί. Κάποιες έχουν γίνει προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε διαδοχικούς κύκλους καμπτικής καταπόνησης (34). Έχουν δημιουργηθεί γραφικές παραστάσεις που φανερώνουν σαφείς συσχετίσεις μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του και των ιδιοτήτων της μικροδομής του κατά την πορεία της επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν πολύ καλές συσχετίσεις μεταξύ της απομένουσας αντοχής του σκυροδέματος και του πορώδους, του μέτρου του Young και του πορώδους, της απομένουσας αντοχής και του μέσου μεγέθους των πόρων και τέλος του μέτρου του Young και του μέσου μεγέθους των πόρων.

Πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζει και μία επιστημονική έρευνα που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να δημιουργηθεί ένα εύχρηστο γράφημα για τον επί τόπου προσδιορισμό της αντοχής του σκυροδέματος στις κατασκευές (35). Το γράφημα αυτό συσχετίζει την αντοχή του σκυροδέματος με την ταχύτητα των υπερήχων μέσα σε αυτό και τον αριθμό των αναπηδήσεων του σφυριού πάνω του. Επιδιώκεται, δηλαδή, η ταυτόχρονη εφαρμογή δύο μη καταστρεπτικών μεθόδων για την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων. Διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επαλήθευσαν την ισχύ του συγκεκριμένου γραφήματος και απέδειξαν ότι όντως υφίσταται σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων μεγεθών.

Άλλη σημαντική έρευνα που έχει γίνει στον τομέα των συσχετίσεων που αφορούν το τσιμέντο, συσχετίζει τιμές εφαρμοζόμενης υδροστατικής πίεσης σε δοκίμια αυτού με τιμές του μέτρου ελαστικότητάς τους, του μέτρου διάτμησής τους και των ταχυτήτων των υπερήχων σε αυτά (36).

Επιπρόσθετα, εργασία έχει πραγματοποιηθεί και πάνω στη συσχέτιση της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων με τη θλιπτική αντοχή, το μέγεθος των αδρανών και την περιεχόμενη υγρασία του σκυροδέματος (37).

Γ.2.2 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Στην έρευνα των κονιαμάτων, συσχετίσεις γίνονται μεταξύ της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτων και του πορώδους τους, όπως αυτό προκύπτει από καταστρεπτικούς και μη καταστρεπτικούς ελέγχους (38).

Σε άλλη περίπτωση οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων παρείχαν την ανισοτροπία τους, η οποία παρουσίαζε μείωση με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της ενανθράκωσής τους. Σε αυτή την περίπτωση ο στόχος ήταν ο καθορισμός του κονιάματος με την ελάχιστη συνολική ανισοτροπία και η σύγκριση των εξελίξεων των δειγμάτων των κονιαμάτων με την πάροδο του χρόνου (39).

Γ.2.3 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Πολύ μεγάλη έρευνα πραγματοποιείται τελευταία και στον τομέα της εξέτασης διαφόρων ειδών κεραμικών υλικών με υπερήχους. Διάφορα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί, συσχετίζουν τις ταχύτητες διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων μέσα στα κεραμικά με άλλες ιδιότητές τους (40). Δύο ιδιότητες που ενδιαφέρει συνήθως η μεταξύ τους συσχέτιση είναι το μέτρο ελαστικότητας και το πορώδες των υλικών αυτών (41). Είναι λογικό σε όλες τις περιπτώσεις των κεραμικών όπως και άλλων υλικών να παρατηρείται μείωση της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων με την αύξηση του πορώδους τους. Πολυάριθμες δημοσιευμένες γραφικές παραστάσεις κάνουν εύκολη αυτή τη διαπίστωση. Επιπλέον, άλλες συνήθεις συσχετίσεις που παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις δημοσιεύσεων είναι αυτές μεταξύ της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων των υπερήχων και του πορώδους καθώς και του λόγου του Poisson και του πορώδους (42).

Ιδιαίτερα προσεκτικές μετρήσεις εκτελούνται σε πολύ πορώδη κεραμικά υλικά, κατά τη μελέτη των οποίων μεριμνάνται οι υπέρηχοι να έχουν μικρό μήκος κύματος σε σχέση με το μήκος του κάθε εξεταζόμενου δοκιμίου, έτσι ώστε να μην εξασθενίζει το κύμα (43).

Η μεγάλη πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της εξέτασης των κεραμικών υλικών με υπερήχους έχει φτάσει στο σημείο να καθιστά δυνατό τον εντοπισμό ατελειών υπερβολικά μικρού μεγέθους μέσα στη μάζα τους και σε ικανό βάθος από την επιφάνειά τους, που παίζουν σημαντικά αρνητικό ρόλο στην αντοχή τους (44).

Στα κεραμικά υλικά ανήκουν και τα δομικά τούβλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει μία ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε γι' αυτά από το Πανεπιστήμιο της Γρανάδας της Ισπανίας (45). Στα πλαίσια αυτής, οι ταχύτητες των υπερήχων και η αντοχή των τούβλων σε μονοαξονική, ανεμπόδιστη θλίψη συνδυάστηκαν για την εξαγωγή μίας παραμέτρου με την οποία σχετίζεται η τεχνική ποιότητά τους. Η στατιστική ανάλυση που ακολούθησε, με τη βοήθεια του προγράμματος Η/Υ "Statistica", χρησίμευσε στη μελέτη του πώς οι παράμετροι της ποιότητας της αργίλου από την οποία κατασκευάστηκε το κάθε είδος τούβλου, η παρουσία ή η απουσία προσθέτων και η θερμοκρασία επιδρούν στην ποιότητα των υλικών.

Γ.2.4 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Συσχετίσεις πορώδους – μέτρου ακαμψίας και πορώδους – μέτρου ελαστικότητας έχουν πραγματοποιηθεί και για τεχνητά πορώδη υλικά που μιμούνται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους πραγματικούς πωρόλιθους (46). Οι συσχετίσεις αυτές έχουν γίνει τόσο με βάση τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων, από τις οποίες προέκυψαν οι παραπάνω ιδιότητες όσο και με βάση τα αποτελέσματα που έδωσαν συγκεκριμένα μαθηματικά μοντέλα. Μάλιστα από την έρευνα προέκυψε ότι πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα βρίσκονται πιο κοντά στην περίπτωση των συσχετίσεων που αφορούν το μέτρο ακαμψίας παρά εκείνων που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας.

Γ.2.5 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί παγκοσμίως έως τώρα με στόχο τις συσχετίσεις αποτελεσμάτων από μετρήσεις με υπερήχους με αποτελέσματα καταστρεπτικών δοκιμών μηχανικών αντοχών και με ιδιότητες μικροδομής λίθων είναι πολλές και είναι αυτές που αφορούν περισσότερο από οποιοσδήποτε άλλες την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αφού και αυτή πραγματεύεται τη μελέτη τεσσάρων ειδών λίθων.

Έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες, στα πλαίσια των οποίων μελετήθηκε ένα πολύ σημαντικό πλήθος ιδιοτήτων διαφόρων λίθων, όπως η πετρογραφία τους, το ειδικό βάρος, η υδαταπορρόφησή τους, το ενεργό και το ολικό πορώδες τους, ταχύτητα των υπερήχων, η σκληρότητα, ο δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητάς τους (47). Οι σχέσεις μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων έχουν εξεταστεί με τη βοήθεια της ανάλυσης παλινδρόμησης και τα αποτελέσματα έχουν πάντα μεγάλο ενδιαφέρον. Σημαντικές είναι οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τη συσχέτιση των ιδιοτήτων, όπως της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων και του ολικού πορώδους ή, τέλος, της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και της εφελκυστικής αντοχής ή του μέτρου ελαστικότητας. Συχνά προκύπτουν πολύ καλές συσχετίσεις μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων.

Πολύ ενδιαφέρουσα ανάμεσα στις δημοσιευμένες εργασίες που πραγματεύονται συσχετίσεις ποικίλων ιδιοτήτων λίθων είναι και αυτή που αφορά τρία είδη τοπικών λίθων της Ινδίας, ένα γρανίτη, ένα βασάλτη και ένα χαλαζίτη (48). Στα πλαίσια της προσδιορίστηκαν ο συντελεστής αντοχής σε σημειακή φόρτιση, η εφελκυστική αντοχή, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, ο αριθμός αναπηδήσεων του σφυριού Schmidt, το ειδικό βάρος, η ξηρή και η υγρή πυκνότητα, η περιεχόμενη υγρασία, ο λόγος των κενών, το ολικό και το ενεργό πορώδες, ο συντελεστής υδαταπορρόφησης και τέλος οι ταχύτητες των υπερήχων για καθένα από αυτά τα πετρώματα και για διάφορα επίπεδα φθοράς τους. Οι τιμές των προαναφερόμενων φυσικών ιδιοτήτων προέκυψαν μετά από μετρήσεις σε 25 δοκίμια κάθε είδους πετρώματος και κατάστασης φθοράς. Από αυτές τις μετρήσεις προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τις μεταβολές στις ιδιότητες των λίθων με την πρόοδο της φθοράς τους. Πολύ χρήσιμες είναι οι γραφικές παραστάσεις που δημιουργήθηκαν και παρουσιάζουν τις συσχετίσεις του συντελεστή της αντοχής σε σημειακή φόρτιση, της εφελκυστικής αντοχής και της θλιπτικής αντοχής με το ολικό πορώδες, την ταχύτητα των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων και του αριθμού των αναπηδήσεων του σφυριού Schmidt. Οι συσχετίσεις αυτές άλλοτε είναι γραμμικές και άλλοτε εκθετικές. Οι τελευταίες συσχετίσεις που έγιναν είναι του συντελεστή αντοχής σε σημειακή φόρτιση με τη θλιπτική αντοχή και της εφελκυστικής με τη θλιπτική αντοχή. Τα τελικά συμπεράσματα των επιστημόνων είναι ότι η φθορά αφορά περισσότερο την εφελκυστική παρά τη θλιπτική αντοχή των συγκεκριμένων πετρωμάτων, ότι η επίδραση της φθοράς στις ποικίλες ιδιότητες εξαρτάται από το είδος του λίθου και

ασφαλώς ότι η αντοχή σε θλίψη των λίθων εξαρτάται από την κατάσταση της φθοράς τους.

Διάφορες συσχετίσεις έχουν πραγματοποιηθεί και για το ελαφρύ αδρανές που καλείται «σκωρία» και συναντιέται στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας (49). Από αυτές προέκυψε η αρνητική γραμμική σχέση που συνδέει την υδαταπορρόφηση με το ειδικό βάρος του υλικού και η ασαφής σχέση που συνδέει την υδαταπορρόφηση με το πορώδες του.

Μία ενδιαφέρουσα μελέτη έχει γίνει και για τις μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του τόφου της Καππαδοκίας (50). Ένα μεγάλο πλήθος αυτών προσδιορίστηκε αρχικά αλλά και μετά από διαδοχικούς κύκλους διαφόρων ειδών επιταχυνόμενης γήρανσης (π.χ. κύκλους κρυστάλλωσης αλάτων, κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης, κύκλους θέρμανσης – ψύξης). Οι τιμές των ιδιοτήτων συναρτήσεως του αύξοντος αριθμού του κύκλου επιταχυνόμενης γήρανσης παραστάθηκαν γραφικά και έτσι προσδιορίστηκε η επιδεκτικότητα του λίθου στη φθορά και η σημαντικότερη αιτία αυτής. Επίσης η έρευνα οδήγησε και σε γενικότερα συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του λίθου που είναι το μικρό ειδικό βάρος, του μεγάλο πορώδες, η μεγάλη παραμορφωσιμότητα, η φτωχή ανθεκτικότητα σε διάρκεια κ.λ.π..

Παρόμοιου είδους μελέτες και συσχετίσεις έχουν πραγματοποιηθεί και για διάφορα δείγματα ασβεστόλιθου της Κωνσταντινούπολης, διαφορετικής σύστασης και κατάστασης φθοράς (51). Και σε αυτή την περίπτωση επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των σχέσεων που συνδέουν μεταξύ τους ένα μεγάλο πλήθος ιδιοτήτων των λίθων και η μεταβολή κάποιων από αυτές συναρτήσεως του βαθμού φθοράς. Έτσι βρέθηκε μία αρνητική γραμμική σχέση μεταξύ του πορώδους και του ξηρού ειδικού βάρους ή της ταχύτητας των υπερήχων. Επίσης διαπιστώθηκε η αύξηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής με την αύξηση του ξηρού ειδικού βάρους και της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων. Από την άλλη πλευρά, όπως αναμενόταν, διαπιστώθηκε ότι υφίστανται αντίστροφες σχέσεις μεταξύ της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του ολικού καθώς και του ενεργού πορώδους. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε μία πολύ σημαντική γραμμική συσχέτιση ($r = 0,90$) ανάμεσα στην εφελκυστική αντοχή και την μονοαξονική θλιπτική αντοχή των ασβεστολίθων καθώς και μία γραμμική σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής.

Άλλοι δομικοί λίθοι, οι οποίοι έχουν εξεταστεί στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας τόσο με καταστρεπτικές δοκιμές όσο και με ηχητικές και υπερηχητικές

δοκιμές είναι ο καλκαρενίτης και ο τραβερτίνης. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν αυτά τα υλικά που ανήκουν στον καθεδρικό ναό του Νότο της Ιταλίας ώστε να εξακριβωθεί η κατάστασή τους και να ελεγχθεί η επίδραση των ενεμάτων ως πιθανή τεχνική επισκευής της κατεστραμμένης τοιχοποιίας (52). Σε αυτή τη μελέτη τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου των υπερήχων ήταν παρόμοια με εκείνα των καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου, με αποτέλεσμα να φανεί για μία ακόμη φορά η σπουδαιότητα και η αξιοπιστία της πρώτης μεθόδου. Συνοπτικά αναφέρεται ότι οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τα συγκεκριμένα υλικά ήταν η ορυκτολογική, αυτή της αντοχής σε θλίψη και ο προσδιορισμός της υδαταπορρόφησης, του πορώδους και των ταχυτήτων των υπερήχων σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, από τις οποίες υπολογίστηκε και η ανισοτροπία των υλικών. Επίσης σημειώνεται ότι οι μετρήσεις των ταχυτήτων των υπερήχων πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα των λίθων σε διάφορα στάδια της εξέλιξης της διαδικασίας της επιταχυνόμενης γήρανσής τους καθώς και μετά από την εφαρμογή διαφόρων στερεωτικών υλικών σε αυτά προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι από τη μελέτη προέκυψε μία πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων των υπερήχων και των θλιπτικών αντοχών των υλικών.

Αποτίμηση στερεωτικών επεμβάσεων με τη βοήθεια καταστρεπτικών μεθόδων και της μεθόδου των υπερήχων έχει πραγματοποιηθεί και για ένα βιοκλαστικό καλκαρενίτη της πύλης ενός ναού του 17^{ου} αιώνα, που βρίσκεται σε ένα χωριό κοντά στη Γρανάδα της Ισπανίας (53). Στα πλαίσια της εν λόγω μελέτης προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες του «λίθου του Ασπερόν», όπως η υδαταπορρόφησή του, το πορώδες και η πυκνότητά του και επίσης η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων σε δείγματά του που είχαν υποβληθεί σε στερεωτικές επεμβάσεις με διάφορα στερεωτικά υλικά ή που είχαν υποστεί επιταχυνόμενη γήρανση. Επιπρόσθετα, η θλιπτική αντοχή του λίθου σε κάθε κατάσταση, που προσδιορίστηκε από το πείραμα της θλίψης, βρέθηκε να συσχετίζεται πολύ με την ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων μέσα σε αυτόν.

Ένας σικελικός παρόλιθος που συναντιέται στο μνημειώδες κτίριο: D' Amico Palace, στο Μιλάτσο της Ιταλίας μελετήθηκε με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που ακολουθήθηκε στη μελέτη των τεσσάρων ειδών λίθων της παρούσας εργασίας (54). Εφαρμόστηκε και σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος των υπερήχων τόσο επιτόπου στο μνημείο όσο και σε κυβικά και σε κυλινδρικά δοκίμια ίδιου υλικού με το αυθεντικό. Από τις ταχύτητες των υπερήχων προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο

ελαστικότητας για κάθε κατηγορία δοκιμίων. Επίσης, τα κυλινδρικά δοκίμια υπέστησαν μηχανικές δοκιμές, από τις οποίες υπολογίστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Σημειώνεται ότι από τις δοκιμές στα κυβικά δοκίμια προέκυψε ο λόγος της ταχύτητας εγκάρσιων προς ταχύτητα διαμήκων κυμάτων. Τελικά έγινε συσχέτιση του δυναμικού και του στατικού μέτρου ελαστικότητας για τα κυλινδρικά δοκίμια, η οποία προέκυψε γραμμική με συντελεστή 0,97 και τέλος συσχετίστηκαν οι επί τόπου μετρήσεις των ταχυτήτων με το στατικό μέτρο ελαστικότητας του πωρόλιθου.

Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόστηκε και στη μελέτη του ασβεστόλιθου από τον οποίο είναι κατασκευασμένος ο Πύργος του Ωρολογίου στην Πλατεία του Αγίου Μάρκου της Βενετίας (55). Κατ' αρχάς προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων επί τόπου στο μνημείο, σε κάποιους κίονες του ισογείου του. Στη συνέχεια σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα που ελήφθησαν από το λατομείο, από το ίδιο υλικό με αυτό των κίωνων, μετρήθηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων που έδωσαν το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και επίσης πραγματοποιήθηκε το πείραμα της θλίψης που έδωσε το στατικό μέτρο ελαστικότητας. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή τη διαδικασία είναι ότι οι ασβεστόλιθοι των κίωνων είναι υπερφορτισμένοι αφού η μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων σε αυτούς βρέθηκε μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα που προσδιορίστηκε στα δοκίμια.

Με τη μέθοδο των υπερήχων ελέγχθηκε και ο ασβεστόλιθος του ιερού της “Nostra Signora delle Grazie” στην Ιταλία (56). Προσδιορίστηκαν καταρχάς οι διαστάσεις των ρωγμών του υλικού και επίσης αποτιμήθηκαν οι επεμβάσεις στερέωσής του με εποξειδικές ρητίνες και οι επεμβάσεις αντικατάστασης κάποιων κατεστραμμένων λιθοσωμάτων με υγιή κομμάτια του ίδιου υλικού. Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια των υπερήχων εκτιμήθηκε η θλιπτική αντοχή και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του ασβεστόλιθου. Αποτίμηση στερεωτικών επεμβάσεων με τη βοήθεια των υπερήχων παρουσιάζεται και σε εργασία επιστημόνων που ασχολήθηκαν με τη συντήρηση των τειχών της αρχαίας Ρόκα κοντά στην Αδριατική θάλασσα, που είναι κατασκευασμένα από καλκαρενίτες και βιοκαλκαρενίτες (57).

Έλεγχος τόσο με τη μέθοδο των υπερήχων όσο και με καταστρεπτικές μεθόδους, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας σε δοκίμια μαρμάρου, προκειμένου να διερευνηθεί η αξιοπιστία της πρώτης μεθόδου στη μελέτη των υλικών μνημειωδών κτιρίων και έργων τέχνης. Η μέθοδος των υπερήχων αλλά και το πείραμα του εφελκυσμού εφαρμόστηκαν σε πρισματικά, κυλινδρικά αλλά και

σχήματος «οστού» μαρμάρινα δοκίμια και οι στατικές και δυναμικές ελαστικές σταθερές που προέκυψαν, οι οποίες είχαν παραπλήσιες τιμές, απέδειξαν την αξιοπιστία του μη καταστρεπτικού ελέγχου με υπερήχους (58).

Σε μία άλλη ερευνητική εργασία, το μάρμαρο του Διονύσου μελετήθηκε με το συνδυασμό της μεθόδου των υπερήχων και των πειραμάτων του άμεσου εφελκυσμού, της θλίψης και της κάμψης προκειμένου να προσδιοριστεί η εσωτερική καταστροφή του και επίσης να ελεγχθεί ένα προτεινόμενο, απλό θεωρητικό μοντέλο προσομοίωσής της. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων και του θεωρητικού μοντέλου ήταν παραπλήσια, έτσι ώστε να αποδειχτεί ότι ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους μπορεί να χρησιμοποιείται ασφαλώς για τη μελέτη της μηχανικής κατάστασης και του βαθμού φθοράς ενός πλήθους μνημείων κατασκευασμένων από μάρμαρο Διονύσου, όπου είναι προφανές ότι οι παραδοσιακές, καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν (59).

Τέλος, σε μία πολύ ενδιαφέρουσα επιστημονική έρευνα που το αντικείμενό της μοιάζει πολύ με αυτό της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε η σύγκριση δυναμικών και στατικών μεθόδων προσδιορισμού των ελαστικών σταθερών οκτώ ειδών λίθων της Γαλλίας (1). Οι δυναμικές μέθοδοι περιέλαβαν τόσο τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικών κυμάτων μέσω κυλινδρικών δοκιμίων των λίθων όσο και τη μελέτη των ταλαντώσεων ειδικής μορφής λίθινων δοκιμίων μετά από ελαφρά, εξωτερική διέγερσή τους. Μάλιστα, η συσκευή των υπερήχων που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια με μία από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα η Pundit. Με ειδικές φυσικομαθηματικές σχέσεις προσδιορίστηκαν οι δυναμικές ελαστικές σταθερές E και ν των υλικών. Εν συνεχεία τα κυλινδρικά δοκίμια υπέστησαν το πείραμα της θλίψης, από το οποίο προέκυψαν οι στατικές ελαστικές σταθερές. Με τη βοήθεια της στατιστικής μεθόδου της παλινδρόμησης προσδιορίστηκαν οι πολύ καλές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων, οι οποίες παρουσιάστηκαν γραφικά. Έτσι εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι εν λόγω μέθοδοι έδωσαν συγκρίσιμα αποτελέσματα και κατά συνέπεια ότι οι μη καταστρεπτικές δυναμικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό των στατικών ελαστικών σταθερών των λίθων.

Γ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ, ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία πραγματεύεται τη μελέτη τεσσάρων ειδών λίθων. Πρόκειται για το μάρμαρο Διονύσου, το λευκό πωρόλιθο Ρεθύμνου, που είναι γνωστός ως αλφόπετρα, τον πωρόλιθο Ρόδου και το γκρίζο πωρόλιθο Κύπρου. Το μάρμαρο Διονύσου εφαρμόζεται στις επεμβάσεις αποκατάστασης πολλών αθηναϊκών μνημείων και κυρίως των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών. Ο πωρόλιθος Ρεθύμνου απαντά σε ορισμένα σημαντικά μνημεία της Κρήτης, όπως στα φρούρια Φορτέσα Ρεθύμνου και Ηρακλείου, στις Βασιλικές των Πέτρου και Παύλου και Αγίου Τίτου στο Ηράκλειο, στο κτίριο συνεδριάσεων της Ενετικής Γερουσίας (Λότζια) Ηρακλείου κ.λ.π.. Επίσης χρησιμοποιείται και ως υλικό των επεμβάσεων αποκατάστασης αυτών των μνημείων. Ο πωρόλιθος της Ρόδου αποτελεί βασικό δομικό υλικό των σπουδαίων μνημείων της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου. Τέλος, ο πωρόλιθος της Κύπρου χρησιμεύει ως υλικό αποκατάστασης των μνημείων της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου.

Μετά την προηγηθείσα αναφορά της ενότητας Β.2.2 στις ιδιότητες των πετρωμάτων γενικά, παρατίθενται σε αυτή την ενότητα μερικά στοιχεία της βιβλιογραφίας που αφορούν συγκεκριμένα τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τεσσάρων ειδών λίθων που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας. Αυτά τα στοιχεία έχουν ενδιαφέρον γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκρίσεις με τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας.

Γ.3.1 ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

Στα πλαίσια των μελετών αποκατάστασης του Παρθενώνα που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, κατέστη αναγκαία η απόκτηση μίας συνολικής εικόνας των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς και σχεδόν αποκλειστικά στις επεμβάσεις αποκατάστασης. Αυτό το υλικό δεν είναι άλλο από το πεντελικό μάρμαρο του Διονύσου. Πραγματοποιήθηκαν, λοιπόν, καταρχάς δοκιμές αντοχής του υλικού σε άμεσο μονοαξονικό εφελκυσμό καθώς και δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη (60, 61).

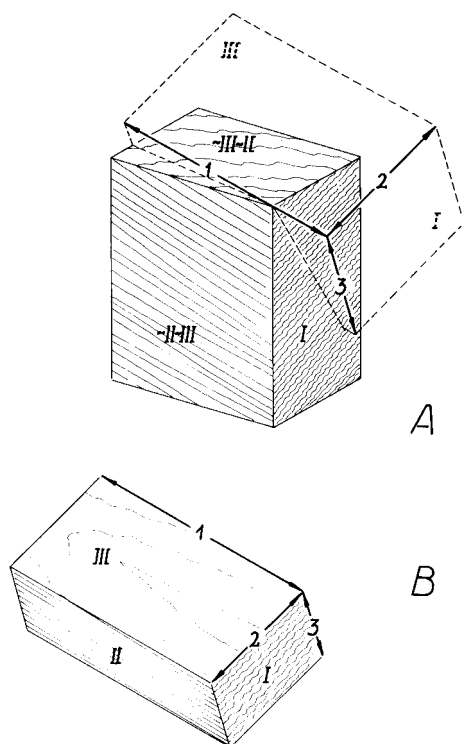
Η επιλογή του μαρμάρου Διονύσου ως υλικού αποκατάστασης του Παρθενώνα έγινε εξαιτίας του ότι παρουσιάζει παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με το ιδιαίτερα ανθεκτικό μάρμαρο των μνημείων (60, 62, 63).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αυτό το είδος μαρμάρου αποτελείται από 98 % ασβεστίτη, 0,5 % μοσχοβίτη, 0,5 % σερεσίτη, 0,5 % χαλαζία και 0,5 % χλωρίτη. Παραταύτα, ένα μικρό ποσοστό δολομίτη μπορεί να είναι παρόν στη σύνθεσή του (64). Η ειδική πυκνότητά του έχει υπολογιστεί ότι είναι ίση με 2730 Kg/m^3 , η φαινόμενη πυκνότητά του 2717 Kg/m^3 και ο συντελεστής υδαταπορρόφησής του 0,11 % κατά βάρος. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του έχει προσδιοριστεί ότι ισούται με $9 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ σε θερμοκρασίες από 15 έως $100 ^\circ \text{C}$.

Το υλικό παρουσιάζει πολύ χαμηλή τιμή πορώδους, η οποία, σύμφωνα με ήδη υπάρχουσες μελέτες, κυμαίνεται από 0,3 % όταν αυτό είναι σε άθικτη κατάσταση έως 0,7 %, όταν αυτό έχει υποστεί την επίδραση διαφόρων παραγόντων φθοράς. Το μέγεθος των κόκκων του βρίσκεται γύρω στα $0,43 \times 10^{-3} \text{ m}$ και οι κρύσταλλοί του είναι πολυγωνικοί (με τις διαστάσεις των μεγαλύτερων από αυτούς να κυμαίνονται μεταξύ $900 \mu\text{m} \times 650 \mu\text{m}$ και $950 \mu\text{m} \times 874 \mu\text{m}$) και περίπου ομοιόμορφου μεγέθους. Το χρώμα του μαρμάρου Διονύσου είναι λευκό και παρουσιάζει λίγες λευκές, παράλληλες, σταχτοπράσινες φλέβες με διεύθυνση αυτή της σχιστότητας του μαρμάρου καθώς και ορισμένες ασημόχρωμες περιοχές, που οφείλουν το χρώμα τους στην παρουσία χλωρίτη και μοσχοβίτη (60, 65, 66).

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου, τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη διασπορά (67). Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής του υλικού ποικίλουν από 2,38 έως 19,4 GPa ενώ της θλιπτικής αντοχής από 58,5 έως 116 GPa. Το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει τιμές από 23 έως 90 GPa και ο λόγος του Poisson τιμές από 0,33 μέχρι 0,35. Τέλος, βρέθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας του μαρμάρου Διονύσου που προκύπτει από τη δοκιμή του εφελκυσμού δεν είναι ακριβώς ίδιο με αυτό που προκύπτει από τη δοκιμή της θλίψης. Αυτή η διασπορά των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων οφείλεται τόσο στις διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές όσο και στην ανισοτροπία του μαρμάρου κατά τις διαφορετικές διευθύνσεις που ονομάζονται μήκος (1), πλάτος (2) και πάχος (3) του κρυσταλλικού ιστού του (εικόνα Γ.2). Το μήκος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εφελκυστική – καμπτική αντοχή, ενώ το πάχος τη μικρότερη. Οι νοητές επιφάνειες III, οι οποίες ορίζονται από τις διευθύνσεις 1 και 2,

είναι μαλακότερες και συγχρόνως εκείνες κατά τις οποίες είναι δυνατός ένας κάπως ομαλός σχισμός. Ο σχισμός αυτός αναπτύσσεται ευκολότερα κατά τη διεύθυνση 1 και δυσκολότερα κατά τη διεύθυνση 2. Οι νοητές επιφάνειες *I*, οι οποίες ορίζονται από τις διευθύνσεις 2, 3 είναι οι σκληρότερες και συγχρόνως εκείνες κατά τις οποίες δεν είναι δυνατός ο ομαλός σχισμός. Τέλος, οι νοητές επιφάνειες *II*, που ορίζονται από τις διευθύνσεις 1, 3 είναι σκληρότερες από τις *III* και μαλακότερες από τις *I*. Ο σχισμός κατά τις επιφάνειες *II* είναι δυσκολότερος και ατελέστερος από εκείνον των επιφανειών *III* (68).



Εικόνα Γ.2: Κρυσταλλικός ιστός και τομή ή λιθοτομία (68).

Τομή : **A** Πλαγίως προς τον κρυσταλλικό ιστό.

B Παραλλήλως προς τον κρυσταλλικό ιστό.

I μήκος του ιστού **I** κεφάλι του
(μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή) πετρώματος,
φορά εμπήξεως σφηνών -----> σκληρή όψη

2 πλάτος του ιστού **II** παρειά του
(μέτρια εφελκυστική αντοχή) πετρώματος,
φορά πλευρικής ----- -> μετρίως σκληρή όψη
εμπήξεως σφηνών

3 πάχος του ιστού **III** πρόσωπο του
(μικρή εφελκυστική αντοχή) πετρώματος ή
επιφαν. σχισμού,
φορά λαξεύσεως < ----- μαλακή όψη
λατομικών αυλάκων

Ακολουθώς παρατίθενται τέσσερις πίνακες, στους οποίους παρουσιάζονται οι τιμές των μηχανικών αντοχών του υλικού, όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί από διάφορους επιστήμονες.

Πίνακας Γ.1 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών αντοχής του μαρμάρου σε ανεμπόδιση θλίψη (69).

α/α	ΠΗΓΗ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (cm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (MPa)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	Διαμαντοπούλου [3.1] 1973	Πλάκες d=2	2	116	Φόρτιση σε επιφάνεια Φ3.5cm
2	Ζάμπας [3.10] 1983	Πρισματικά 5X5X15	43	58.5	Κέντρο Ερευνών Δ.Ε.
3	Θεοχάρης [3.2] 1976	Πρισματικά 7X7X7	3	77.8	Από άμορφο αρχαίο θραύσμα.
5	Mitsui et all [3.7] 1992	Κυλινδρικά Φ5X11	6	86.1	80.1min - 92.4max
4	Τάσσιος * 1984	Κυλινδρικά Φ10X10	-	75	*Αδημοσίευτα αποτελέσματα.
5	Τασσογιαννόπουλος [3.10] 1986	Κυλινδρικά Φ6X15	-	60	Ικανός αριθμός δοκιμών.

* Κοινοποιήθηκαν στην ΕΣΜΑ με έγγραφο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ στις 29/11/1984.

Πίνακας Γ.2 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών εφελκυστικής αντοχής Πεντελικού μαρμάρου (69).

α/α	ΠΗΓΗ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (cm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (MPa)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	Ζάμπας [3.13] 1989	Κυλινδρικά Φ3.5X15	68	19.4 ± 3 13.1 ± 2.7	Κάμψη 3 σημείων.
2	Θεοχάρης [3.2] 1976	Πρισματικά 2X2X26	3	18.4	Κάμψη 3 σημείων.
3	Mitsui et all [3.7] 1992	Πρισματικά 4X4X16	6	14.8	Κάμψη 3 σ.12min-16.3max
4	Σκουλικίδης et all [3.9] 1993	Πρισματικά .5X1.2X10	5	2.38 1.65	Μονοαξονικός εφελκυσμός.
5	Τάσσιος * 1984	Κυλινδρικά Φ10X10	-	3.4	Brazilian test.
6	Τασσογιαννόπουλος [3.10] 1986	Πρισματικά 2X2X20	-	21.5	Κάμψη 3 σημείων.
7	Zeza [3.15] 1992	Κυλινδρικά Φ3.5-5.2	-	6 ± 0.7 4.1 ± 0.3	Brazilian test. h=0.5÷1Φ

Πίνακας Γ.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας πεντελικού μαρμάρου (69).

α/α	ΠΗΓΗ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (cm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ E (MPa)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	Ζάμπας [3.13] 1989	Πρισματικά 19X16.5X80	3	23000	Κάμψη 3 σημείων.()
2	Θεοχάρης [3.2] 1976		-	42880	Δυναμικό Ε.
3	Mitsui et all [3.7] 1992	Κυλινδρικά Φ5X11	6	89800	Θλίψη.
4	Τάσιος * 1984	Κυλινδρικά Φ10X10	-	62000	Θλίψη.
5	Τασσογιαννόπουλος [3.10] 1986	Πρισματικά 2X2X24	-	55200	Δυναμικό Ε.

Πίνακας Γ.4 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών προσδιορισμού συντελεστή Poisson πεντελικού μαρμάρου (69).

α/α	ΠΗΓΗ	ΤΥΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (cm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ν	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1	Mitsui et all [3.7] 1992	Κυλινδρικά Φ5X11	6	0.33	Θλίψη. max .35 min .31
2	Τάσιος * 1984	Κυλινδρικά Φ10X10	-	0.35	Θλίψη.

Επίσης, η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής του μαρμάρου Διονύσου για στρώσεις κάθετες προς τον άξονα έχει προσδιοριστεί ίση με 14,4 MPa και η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής για στρώσεις κάθετες προς τον άξονα έχει βρεθεί ίση με 13,1 MPa (70).

Γ.3.2 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΡΕΘΥΜΝΟΥ (ΑΛΦΟΠΕΤΡΑ)

Η αλφόπετρα Κρήτης χαρακτηρίζεται ως ένας απολιθωματοφόρος, μικριτικός ασβεστόλιθος Μειοκαινικής ηλικίας με λίγα απολιθώματα ασπόνδυλων (κυρίως τρηματοφόρα και θραύσματα οστρακωδών) ενώ μερικές φορές υπάρχουν και καλά διατηρημένα απολιθώματα (ιχθύες) (71).

Μακροσκοπικά εμφανίζεται σε χρώματα υποκίτρινο έως μπεζ, θραυσμό ακανόνιστο, υφή ελαφρά ταινιωτή, μερικές φορές λίγο εύθρυπτος, τις περισσότερες φορές όμως συμπαγής (71).

Μικροσκοπικά εμφανίζεται ν' αποτελείται από μία κύρια μάζα μικριτική ασβεστιτική με λίγους κλαστικούς κόκκους χαλαζία, εμποτισμένη με λίγα υδροξείδια του σιδήρου ή του μαγγανίου. Η μέση χημική του σύσταση δείχνει ότι πρόκειται για ένα σχεδόν καθαρό ασβεστόλιθο με λίγο αυξημένη την παρουσία του SiO₂ (71).

Πρόκειται για ένα πέτρωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εσωτερικές και εξωτερικές επενδύσεις, τόσο υπό μορφή τυποποιημένων αγυάλιστων πλακών, όσο κυρίως υπό μορφή τυποποιημένων «κυβόλιθων» ελεύθερου μήκους και πάχους 12 – 20 cm με την εξωτερική τους επιφάνεια λεία ή λαξευμένη. Επίσης αποτελεί άριστο υλικό για κάθε είδους καλλιτεχνήματα, όπως βρύσες και ανίδες. Εξορύσσεται από την περιοχή στα νότια της κοινότητας Αλφά (θέση Τρόχαλα) και ανατολικά του χωριού Καλλέργος, μεταξύ των υψομέτρων 220 – 240 m, η οποία έχει έκταση σχεδόν 450 στρέμματα (71).

Οι τιμές των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου λίθου, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία, παρουσιάζονται στον πίνακα Γ.5 που ακολουθεί.

Πίνακας Γ.5 Ιδιότητες παρόλιθου Ρεθύμνου (αλφόπετρας) (72)

A: Δοκιμές μηχανικής αντοχής	
Αντοχή σε θλίψη (Kg/cm ²)	238
Αντοχή σε κάμψη (Kg/cm ²)	104
B: Δοκιμές πορώδους δομής	
Απόλυτη πυκνότητα (g/cm ³)	2,45
Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	1,73
Πορώδες (%)	29,3
Γ: Δοκιμές μεταφοράς νερού	
Απορροφητικότητα σε νερό (%)	14,0
Συντελεστής διαπερατότητας σε νερό (×10 ⁻⁸)	12
Διόγκωση σε νερό (×10 ⁻⁶)	13
Δ: Δοκιμές προσομοίωσης φθορών	
Απώλεια λόγω δοκιμής Υγείας (%)	48
Απώλεια λόγω δοκιμής L.A. (%)	45

Γ.3.3 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΚΥΠΡΟΥ

Για τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες του πωρόλιθου Κύπρου που απασχολούν αυτή την εργασία η βιβλιογραφία αναφέρει τα εξής :

Πίνακας Γ.6 Φυσικές ιδιότητες πωρόλιθου Κύπρου (73).

Φαινόμενη Πυκνότητα (Kg/m³)	Απόλυτη πυκνότητα (Kg/m³)	Πορώδες %	Υδαταπορρόφηση %	Διαπερατότητα × 10⁻¹⁰ (m/s)	Διόγκωση σε νερό (×10⁻⁶)
2,04	2,54	21,1	4,4	200	13

Πίνακας Γ.7 Μηχανικές ιδιότητες πωρόλιθου Κύπρου (73)

Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Τάση αστοχίας (MPa)	Μέτρο του Young (GPa)	Λόγος του Poisson	Παραμόρφωση Αστοχίας	Ειδικό Βάρος (KN/m³)
8,9	33,4	7,2	0,26	0,006	19,3

Γ.3.4 ΠΩΡΟΛΙΘΟΣ ΡΟΔΟΥ

Ο γκρίζος πωρόλιθος της Ρόδου, δομικό υλικό της Μεσαιωνικής Πόλης της, είναι ένας τοπικός, πολύ πορώδης, ιζηματογενής βιοκαλκαρενίτης προερχόμενος από λατομεία που βρίσκονται στην ανατολική πλευρά του νησιού. Αποτελείται κυρίως από θραύσματα θαλάσσιων οστράκων και μικρά απολιθώματα με χαλαζία και βιοτίτη. Το συνδετικό υλικό του είναι ένα μικροκρυσταλλικό, ασβεστιτικό στρώμα συμπλήρωσης του χώρου μεταξύ των κόκκων. Η υψηλή τιμή του πορώδους οφείλεται στην ανεπαρκή ποσότητα του συνδετικού υλικού, γύρω στο 28 %, η πυκνότητά του λίθου είναι 2 g/cm³ και το ποσοστό του ασβεστίτη είναι περίπου 70 %. Η αντοχή του πωρόλιθου της Ρόδου είναι σχετικά χαμηλή (74, 75). Αναλυτικά, οι τιμές των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου λίθου, όπως παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας Γ.6 Ιδιότητες παρόλιθου Ρόδου (72)

Αντοχή σε θλίψη (Kg/cm ²)	54
Αντοχή σε κάμψη (Kg/cm ²)	18
Απόλυτη πυκνότητα (g/cm ³)	2,69
Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	1,57
Πορώδες (%)	41,5
Απορροφητικότητα σε νερό (%)	18,8
Συντελεστής διαπερατότητας σε νερό (×10 ⁻⁸ m/s)	122
Διόγκωση σε νερό (×10 ⁻⁶)	<1

Δ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Δ.1 ΟΙ ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας εφαρμόστηκε ένα πλήθος ενόργανων μεθόδων εξέτασης και χαρακτηρισμού των τεσσάρων ειδών δομικών λίθων που μελετήθηκαν. Οι μέθοδοι αυτές καθώς και ο ρόλος της κάθε μίας στην εξέταση των συγκεκριμένων υλικών αναφέρονται συνοπτικά ακολούθως.

Δ.1.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Η εφαρμογή της μη καταστρεπτικής μεθόδου των υπερήχων στον έλεγχο των υλικών αποτελεί ένα από τα βασικά ζητούμενα της παρούσας εργασίας και οι αρχές που τη διέπουν έχουν ήδη αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο Γ.1 του Ειδικού Θεωρητικού Μέρους της.

Δ.1.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

Οι δοκιμές των μηχανικών αντοχών των φυσικών λίθων είναι ένα επιστημονικό αντικείμενο, το οποίο απασχολεί τους μηχανικούς εδώ και πολλούς αιώνες. Ήδη από το 15^ο μ.Χ. αιώνα ο Λεονάρντο ντα Βίντσι συνέλαβε τη δοκιμή του άμεσου εφελκυσμού ενώ δύο αιώνες αργότερα ο Γαλιλαίος ασχολήθηκε με το πείραμα της κάμψης λίθινης δοκού. Κατά τον 20ο αιώνα ο Mohr, ο Βον Κάρμαν και άλλοι μηχανικοί ασχολήθηκαν με τη δοκιμή της τριαξονικής θλίψης ενώ ο Βον Κάρμαν και άλλοι μελέτησαν τον τρόπο αστοχίας των λίθων υπό μονοαξονική θλίψη. Άλλοι πάλι επιστήμονες έδειξαν ενδιαφέρον για το πείραμα του έμμεσου εφελκυσμού των λίθων, τη λεγόμενη «βραζιλιάνικη δοκιμή» (61).

Γενικά ο έλεγχος των τεχνικών υλικών με την πραγματοποίηση των μηχανικών πειραμάτων γίνεται για έναν ή περισσότερους από τους εξής σκοπούς (76):

α) Για τη συγκέντρωση ή επιβεβαίωση στοιχείων σχετικών με την ποιότητα κάποιου συνηθισμένου τεχνικού υλικού (εμπορικός έλεγχος).

β) Για τον εμπλουτισμό πληροφοριών ποιότητας νέων υλικών ή την ανάπτυξη νέων υλικών με επιθυμητές ιδιότητες (έρευνα και ανάπτυξη νέων προϊόντων).

γ) Για την επίτευξη ακριβών μετρήσεων των βασικών ιδιοτήτων ή των φυσικών σταθερών ενός τεχνικού υλικού (επιστημονικές μετρήσεις).

Οι μηχανικές δοκιμές διακρίνονται σε στατικές, δυναμικές, επαναλαμβανόμενης φόρτισης και ερπυσμού ανάλογα με τη μηχανική ιδιότητα που πρόκειται να διερευνηθεί. Για την πραγματοποίησή τους χρησιμοποιούνται δοκίμια του ελεγχόμενου υλικού προκαθορισμένου μεγέθους και σχήματος (76).

Τα πιο συνηθισμένα στατικά πειράματα είναι του εφελκυσμού και της θλίψης. Κατά την εκτέλεσή τους τα φορτία αυξάνονται βαθμιαία και με αργό ρυθμό για την αποφυγή εμφάνισης δυναμικών φαινομένων. Άλλα στατικά πειράματα είναι της κάμψης, της στρέψης, της διάτμησης και της σκληρότητας (28), (29), (76).

Δυναμικό πείραμα είναι αυτό της κρούσης, που πραγματοποιείται για τη διερεύνηση της ικανότητας του υλικού να ανθίσταται σε απότομη επιβολή φορτίων. Τα πειράματα επαναλαμβανόμενης φόρτισης γίνονται για να διαπιστωθεί η αντοχή σε κόπωση του υλικού. Τέλος, τα πειράματα του ερπυσμού πραγματοποιούνται για τη διαπίστωση της επίπτωσης του χρόνου στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών (76).

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές της ταχύτητας της φόρτισης ενώ στα ψαθυρά υλικά η ταχύτητα της δοκιμής ελάχιστα επηρεάζει τα αποτελέσματα (77). Σημειώνεται ότι όλκιμα καλούνται τα υλικά που δέχονται σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι το σημείο θραύσεως ενώ ψαθυρά λέγονται αυτά που θραύονται πριν ν' αποκτήσουν σχετικά μεγάλη παραμόρφωση.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, από τις δοκιμές των μηχανικών αντοχών πραγματοποιήθηκε αυτή της θλίψης με στόχο να προσδιοριστεί τόσο η αντοχή του κάθε είδους λίθου σε μονοαξονική θλίψη όσο και το μέτρο ελαστικότητάς του, E. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες βιβλιογραφικές πληροφορίες για τη συγκεκριμένη δοκιμή.

Δ.1.2.1 Η δοκιμή της θλίψης

Το πείραμα της θλίψης συνίσταται στην εφαρμογή ενός αξονικού φορτίου σε ένα δοκίμιο συγκεκριμένων διαστάσεων, που έχει σαν αποτέλεσμα τη βαθμιαία βράχυνσή του. Η διατομή του δοκιμίου μπορεί να είναι κυκλική ή ορθογωνική. Οι βασικές μετρήσεις που γίνονται και καταγράφονται είναι το μέγεθος της αξονικής δύναμης και οι αλλαγές των διαστάσεων ενός μήκους αναφοράς του δοκιμίου.

Οι βασικές δυσκολίες για την πραγματοποίηση αυτού του πειράματος είναι (28), (29, 76):

α) Οι δυσκολίες εφαρμογής στο δοκίμιο πραγματικά αξονικού φορτίου.

β) Το ότι υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο, για διάφορους λόγους, να αναπτυχθούν καμπτικές τάσεις στο δοκίμιο καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο μεγαλώνει.

γ) Η ανάπτυξη δυνάμεων τριβής μεταξύ του εξαρτήματος εφαρμογής του φορτίου και του δοκιμίου εξαιτίας της πλευρικής επέκτασης.

δ) Η απαίτηση για μεγάλη εγκάρσια διατομή του δοκιμίου.

ε) Η δυσκολία μέτρησης των πλευρικών παραμορφώσεων.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης το δοκίμιο τοποθετείται μεταξύ δύο απαραμόρφωτων πλακών ειδικής μηχανής, μέσω των οποίων εφαρμόζεται το αξονικό φορτίο. Η μηχανή είναι δυνατόν να κινείται είτε ηλεκτρικά είτε μηχανικά. Οι τιμές της εκάστοτε εφαρμοζόμενης δύναμης διαιρούνται με το αρχικό εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου και βρίσκονται οι αντίστοιχες ορθές τάσεις. Η βράχυνση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη δύναμη καθορίζεται μετρώντας το πλησίασμα των διατομών στη θέση των άκρων του μήκους αναφοράς. Οι ανηγμένες αξονικές παραμορφώσεις βρίσκονται με τη διαίρεση της βράχυνσης του μήκους αναφοράς με το μήκος αναφοράς (28, 76).

Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συντεταγμένων, του οποίου ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην τάση και ο οριζόντιος στην παραμόρφωση, σημειώνονται τα σημεία που ορίζονται από τα ζεύγη των τιμών της τάσης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης. Ενώνοντας το σύνολο των σημείων μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα, δημιουργείται το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων (διάγραμμα σ – ε) του συγκεκριμένου υλικού. Από το εν λόγω διάγραμμα εξάγονται χρήσιμες πληροφορίες για τις τιμές ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως είναι το όριο αναλογίας του, το όριο ελαστικότητάς του, το άνω και το κάτω όριο διαρροής του, το όριο αντοχής του και το όριο θραύσης του. Στα όλκιμα υλικά παρατηρείται διαρροή (πλαστικοποίηση) και θραύση των δοκιμίων τους όταν οι επιβαλλόμενες τάσεις ισούνται με το όριο θραύσης ενώ στα ψαθυρά υλικά γίνεται θραύση των δοκιμίων τους χωρίς μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Η δοκιμή της θλίψης χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο ψαθυρών υλικών, όπως είναι ο χυτοσίδηρος, ο χαλκός, ο ορείχαλκος, το σκυρόδεμα, τα κεραμικά το ξύλο και οι λίθοι, που εξετάζονται σε αυτή τη διατριβή (76).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε μία προσπάθεια τυποποίησης των τεχνικών μεθόδων για ελέγχους υλικών, διάφοροι εθνικοί φορείς έχουν καθορίσει προδιαγραφές δοκιμών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές χώρες. Για

τις δοκιμές θλίψης χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον οι εξής κανονισμοί (28), (71):

- Για τη δοκιμή μεταλλικών υλικών : DIN 50106
- Για τη δοκιμή οικοδομικού μπετόν και σιδηρομπετόν : DIN 1048 , ASTM C 39 – 72 και ASTM C 192, 1964
- Για τη δοκιμή φυσικών λίθων : DIN 52105
- Για τη δοκιμή ξύλου : DIN 52185
- Για τη δοκιμή συνθετικών υλικών : DIN 53452
- Για τις προδιαγραφές των μηχανών θλίψεως : DIN 51233

Τα δοκίμια ενός ψαθυρού υλικού που υπόκειται σε στατική θλιπτική φόρτιση έχουν συνήθως σχήμα κυλινδρικό με ύψος το διπλάσιο της διαμέτρου, σύμφωνα με τους αμερικάνικους κανονισμούς (ASTM). Το ύψος τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να αποφεύγεται ο λυγισμός τους (28).

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι η αντοχή σε θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι υψηλότερη από την αντοχή ενός κυβικού ή ενός πρισματικού δοκιμίου. Συγχρόνως, η αντοχή μειώνεται με την αύξηση του όγκου του δοκιμίου ακόμη κι αν διατηρείται η ομοιότητα των διαστάσεων (28).

Δ.1.2.2 Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young (76, 77)

Όπως προαναφέρθηκε, ένας από τους στόχους της πραγματοποιήσεως του πειράματος της θλίψης κατά την εκπόνηση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας ήταν ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των υπό εξέταση λίθων. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί σε αυτό το σημείο η έννοια αυτής της μηχανικής ιδιότητας των υλικών.

Με τον όρο «μέτρο ελαστικότητας» ενός υλικού, λοιπόν, ονομάζουμε τη σταθερά αναλογίας στη σχέση τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων του. Αριθμητικά ισούται με την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων και έχει τις ίδιες μονάδες με την τάση. Ο όρος «μέτρο ελαστικότητας» δεν ακριβολογεί, αφού το μέτρο ελαστικότητας δεν είναι στην πραγματικότητα το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού αλλά είναι ένα μέτρο της

δυσπαραμορφωσιμότητας του. Δυσπαραμορφωσιμότητα ενός υλικού είναι η ικανότητά του να δέχεται μεγάλες τάσεις ενώ αναπτύσσονται σε αυτό μικρές παραμορφώσεις. Όσο πιο δυσπαραμόρφωτο είναι ένα υλικό, τόσο πιο μεγάλο είναι το μέτρο ελαστικότητάς του.

Για υλικά των οποίων η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων δεν είναι γραμμική, η κλίση της καμπύλης μεταβάλλεται και το μέτρο ελαστικότητας δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της δυσπαραμορφωσιμότητάς τους. Για τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι μέτρησης της δυσπαραμορφωσιμότητάς τους:

α) Το μέτρο ελαστικότητας της αρχικής εφαπτομένης (Initial Tangent Modulus) (E_0). Αυτό το μέτρο ελαστικότητας ισούται με την κλίση της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων στην αρχή του συστήματος αξόνων $\sigma - \epsilon$ (Σχ. Δ.1), ήτοι:

$$E_0 = \tan\theta_1.$$

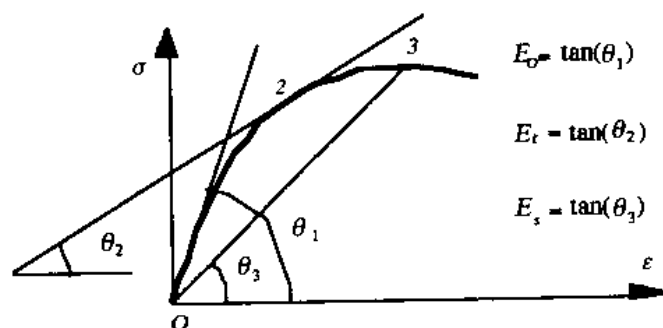
β) Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (Tangent Modulus) (E_t). Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t ισούται με την κλίση της εφαπτομένης ευθείας σε ένα σημείο 2 της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων (Σχ.Δ.1) , ήτοι:

$$E_t^{(2)} = \tan\theta_2.$$

γ) Το μέτρο της τέμνουσας (Secant Modulus) (E_s) . Το μέτρο της τέμνουσας ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων $\sigma - \epsilon$ με κάποιο σημείο 3 της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων (Σχ. Δ.1) , ήτοι:

$$E_s^{(3)} = \tan\theta_3.$$

$$E_s^{(3)} = \tan\theta_3$$



Εικόνα Δ.1: Μέτρα Ελαστικότητας (δυσπαραμορφωσιμότητας) μη-γραμμικά ελαστικού υλικού (76)

Δ.1.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Από τις θερμικές μεθόδους χαρακτηρισμού των υλικών, οι δύο συγκεκριμένες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι η Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA) και η Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (TG). Ο σκοπός των θερμικών μεθόδων ανάλυσης χημικής σύστασης είναι η εκτίμηση των θερμικών μεταβολών που υφίσταται ένα δείγμα του εξεταζόμενου υλικού όταν υπόκειται σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Το πρόγραμμα αυτό για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα προτιμάται να είναι η θέρμανση ταχύτητας $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ σε μία θερμοκρασιακή περιοχή $25^{\circ}\text{C}-1000^{\circ}\text{C}$. Έτσι επιτυγχάνεται ποιοτική και κατά περιπτώσεις ποσοτική ανάλυση εάν η θερμική μεταβολή που υφίσταται το δείγμα του υλικού συνοδεύεται και από μεταβολή βάρους (23, 78, 79).

Με τη μέθοδο DTA παρατηρούνται οι θερμικές μεταβολές που λαμβάνουν μέρος στο δείγμα, συνήθως στη θερμοκρασιακή περιοχή $25^{\circ}\text{C}-1000^{\circ}\text{C}$ ή και άνω των 1000°C , και εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα για τις χημικές ενώσεις που υπάρχουν σε αυτό. Συγχρόνως η μέθοδος TG καταγράφει τις αντίστοιχες μεταβολές βάρους, βάσει των οποίων γίνεται ο ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών του δείγματος (23, 78, 79).

Πιο συγκεκριμένα, σε θερμοκρασίες μικρότερες των 120°C οι μεταβολές οφείλονται στην απώλεια του φυσικά δεσμευμένου νερού, σε θερμοκρασίες $120^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ πραγματοποιείται η αποβολή του νερού των ένυδρων αλάτων, στη θερμοκρασιακή περιοχή $200^{\circ}\text{C}-600^{\circ}\text{C}$ λαμβάνει χώρα η αποβολή του χημικά δεσμευμένου νερού των ένυδρων αργιλοπυριτικών φάσεων και του χημικά δεσμευμένου νερού των υδροξειδίων του ασβεστίου και του μαγνησίου εφόσον απουσιάζουν οργανικές προσμίξεις και, τέλος, πάνω από τους 600°C πραγματοποιείται η αποσύνθεση των ανθρακικών ενώσεων απελευθερώνοντας CO_2 (78, 79).

Ο προσδιορισμός της μεταβολής των θερμοκρασιακών μεταβολών του δείγματος που εξετάζεται, επιτυγχάνεται με σύγκριση με ένα δείγμα αναφοράς, στο οποίο δεν υφίστανται θερμοκρασιακές μεταβολές στην περιοχή $25^{\circ}\text{C}-1000^{\circ}\text{C}$. Το δείγμα αυτό είναι η αλουμίνα ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$). Η ποσότητα του υλικού που απαιτείται για να γίνει η θερμική ανάλυση είναι πολύ μικρή (περίπου 100 mg) και προαπαιτείται η κονιορτοποίησή της σε κόκκους με όσο το δυνατόν μικρότερη διάμετρο. Το δείγμα

τοποθετείται σε αυτή τη μορφή μέσα στο χωνευτήρι πορσελάνης του φούρνου της ειδικής διατάξεως που επιτυγχάνει τη θερμική ανάλυση. Η ευαισθησία των μετρήσεων και του προσδιορισμού της απώλειας βάρους είναι 0,01 mg. Ηλεκτρονικός υπολογιστής που διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό πραγματοποιεί τη συλλογή των δεδομένων και τη μετατροπή τους σε διαγράμματα (78, 79).

Όσον αφορά τις χημικές μεταβολές που υφίστανται συγκεκριμένα οι ασβεστόλιθοι, μπορεί καταρχάς να παρατηρηθεί η διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η συγκεκριμένη διάσπαση πραγματοποιείται στη θερμοκρασιακή περιοχή των 810°C - 900°C , ανάλογα με τη χημική σύσταση του αρχικού ασβεστολίθου και τη μερική πίεση του CO_2 . Επιπρόσθετα, γίνεται η καταγραφή της απώλειας βάρους που οφείλεται στο CO_2 (%) που εκλύεται από τον ασβεστόλιθο, από την οποία προσδιορίζεται η ποσότητα του CaCO_3 . Επίσης, η μέθοδος DTA-TG παρέχει τη δυνατότητα διάκρισης της ασβεστιτικής ή δολομιτικής σύστασης των εξεταζόμενων ασβεστολίθων καθώς και τη δυνατότητα ανίχνευσης προσμίξεων, όπως είναι ο χαλαζίας (78-79).

Οι προαναφερόμενες μέθοδοι θερμικής ανάλυσεως, εκτός από τους λίθους, βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύτατο πλήθος υλικών, όπως είναι τα βιολογικά υλικά, τα τρόφιμα, τα καύσιμα, τα ορυκτά, τα κεραμικά και άλλα δομικά υλικά (78).

Δ.1.4 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Η μέθοδος της περίθλασης των ακτίνων Χ αποσκοπεί στην ποιοτική και την ποσοτική ανάλυση των κρυσταλλικών ενώσεων που βρίσκονται σε ανόργανα υλικά. Βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος λ , πάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων και στη συνέχεια στον προσδιορισμό μέσω της αντίστοιχης γωνίας θ , των εσωτερικών διαστημάτων d των επιπέδων με εφαρμογή του τύπου του Bragg (80):

$$n\lambda = 2d \cdot \eta \mu\theta \quad (\eta = 1, 2, 3 \dots \eta \text{ τάξη περίθλασης})$$

Τα προσδιορισθέντα d είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση και με τον προσδιορισμό τους αναγνωρίζονται οι ενώσεις από τις οποίες αποτελείται η εξεταζόμενη ουσία (ποιοτική ανάλυση) (80).

Η ένταση της περιθλόμενης ακτινοβολίας σε κάθε γωνία θ είναι συνάρτηση της ποσότητας της κρυσταλλικής ένωσης. Έτσι είναι δυνατόν να γίνει ποσοτική ανάλυση μίας ένωσης με κατάλληλη μέτρηση της έντασης της ακτινοβολίας σε επιλεγμένη γωνία θ (80).

Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται με τη χρήση ειδικού οργάνου, γνωστού ως περιθλασίμετρου ακτίνων X (γωνιόμετρου), από το οποίο λαμβάνονται τα ακτινοδιαγράμματα που ερμηνεύονται με τη χρήση ειδικών πινάκων ή με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τέλος, σημειώνεται ότι τα προς ανάλυση στερεά δείγματα υφίστανται αρχικά λειοτρίβηση στην επιθυμητή κοκκομετρία, που προτιμάται να βρίσκεται κάτω από τα 25 μm (80).

Η περιθλασιμετρία ακτίνων X ή απλούστερα XRD αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης των πετρωμάτων και χαρακτηρίζεται από ταχύτητα και οικονομία. Στα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά της συγκαταλέγεται η δυνατότητα προσδιορισμού ορυκτών πολύ μικρού μεγέθους ($< 2 \mu\text{m}$), που δεν μπορούν να διακριθούν στο οπτικό μικροσκόπιο. Τέλος, στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνεται η μη δυνατότητα ανίχνευσης ορυκτολογικών φάσεων που περιέχονται σε ποσοστό μικρότερο του 2 %, πρόβλημα που ξεπερνάται με τον εμπλουτισμό των ορυκτολογικών φάσεων που μας ενδιαφέρουν με διάφορους τρόπους (81).

Δ.1.5 ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ

Ο προσδιορισμός του πορώδους αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο στη μελέτη κάποιου δομικού υλικού. Το πορώδες και η κατανομή του μεγέθους των πόρων μέσα σε ένα υλικό καθορίζει φυσικές και φυσικομηχανικές ιδιότητές του. Επίσης η γνώση της μεταβολής του πορώδους και της κατανομής του μεγέθους των πόρων ενός υλικού μετά από επεμβάσεις στερέωσης και προστασίας είναι αναγκαία για την επιλογή των κατάλληλων υλικών αποκατάστασης, τα οποία απαιτείται να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά μικροδομής της ίδιας τάξης με αυτά του αυθεντικού υλικού.

Με την εφαρμογή της πορομετρίας υδραργύρου λαμβάνουμε τις καμπύλες εισόδου – απομάκρυνσης του υδραργύρου από ένα ξηρό δείγμα του υπό μελέτη υλικού, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ένα υποδοχέα της ειδικής συσκευής. Η εισόδου του υδραργύρου, που είναι μη διαβρέχον υγρό, στο δείγμα γίνεται με σταδιακή αύξηση της πίεσης, από 0-1 bar και κατόπιν από 1 bar – 2000 bar, οπότε και το υγρό μπαίνει πρώτα στους μεγάλους και κατόπιν στους μικρούς πόρους του υλικού (78).

Η αναγκαία τιμή της πίεσης για τη διείσδυση του υδραργύρου στους πόρους σχετίζεται με το μέγεθός τους και στην περίπτωση που αυτοί είναι κυλινδρικοί, με την ακτίνα τους. Δίνεται από την εξίσωση Laplace (78, 82):

$$P = - (2\gamma \cdot \cos\theta)/r,$$

Όπου:

- P: η εξασκούμενη πίεση
- γ : η επιφανειακή τάση του υδραργύρου
- θ : η γωνία επαφής του υδραργύρου με το υλικό
- r: η ακτίνα των πόρων

Με τον προσδιορισμό του όγκου του υδραργύρου που εισδύει στους πόρους του δείγματος σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση και με δεδομένη τη μάζα του δείγματος, τη μάζα του υδραργύρου και τη μάζα του υποδοχέα, η μέθοδος αυτή παρέχει (78):

- τη φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος, d_B , (g/cm^3)
- τη διορθωμένη τιμή της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος, d_{Bcor} , (g/cm^3)
- τον ολικό ειδικό όγκο V_{cum} (mm^3/g) του υδραργύρου που μπαίνει στους πόρους του δείγματος
- την ειδική επιφάνεια (m^2/g) των πόρων του δείγματος και τέλος
- τη μέση τιμή της ακτίνας, r, των πόρων.

Η πορομετρία υδραργύρου είναι μία απλή και γρήγορη μέθοδος. Ο μόνος περιορισμός της είναι ότι εφαρμόζεται σε μακροπορώδη υλικά ($R_p > 500 \text{ \AA}$) και σε ορισμένα μεσοπορώδη ($37,5 \text{ \AA} \leq R_p \leq 500 \text{ \AA}$). Για τα υπόλοιπα μεσοπορώδη

($20 \text{ \AA} \leq R_p \leq 37,5 \text{ \AA}$) και τα μικροπορώδη υλικά ($R_p < 20 \text{ \AA}$) μπορούν να εφαρμοστούν άλλες μέθοδοι (82).

Δ.1.6 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ

Τα τριχοειδή φαινόμενα που παρατηρούνται στα πορώδη μέσα, δηλαδή η άνοδος και η πτώση ενός υγρού μέσα στη μάζα τους, οφείλονται στην επιφανειακή τάση και εξαρτώνται από τα σχετικά μεγέθη συνοχής του υγρού και συνάφειας του υγρού με τα τοιχώματα των πόρων των μέσων (83).

Η μελέτη της τριχοειδούς αναρρίχησης που πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη του μηχανισμού της μεταφοράς του νερού μέσω των τριχοειδών πόρων των πορώδων δομικών υλικών που εξετάστηκαν σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο UNI 10859. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το υπό μελέτη δείγμα του υλικού ξηραίνεται μέχρι να σταθεροποιηθεί η μάζα του. Στη συνέχεια έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του νερού. Η αύξηση της μάζας του που προκαλείται από την υδαταπορρόφηση σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα παρίσταται γραφικά ως συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται, προσδιορίζεται διακόπτοντας την εξέλιξη της υδαταπορρόφησης και εξάγοντας το δείγμα, σκουπίζοντάς το ελαφρά με ένα στεγνό ύφασμα προκειμένου να αφαιρεθεί το επιπλέον νερό της επιφάνειας επαφής του και μετρώντας τη μάζα του. Πάντως, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει και διάφορα σφάλματα όπως την κατά διαστήματα διακοπή της πορείας της υδαταπορρόφησης ή το υπερβολικό στέγνωμα του δοκιμίου κατά το σκούπισμά του όταν απομακρύνεται το επιπλέον νερό. Επιπλέον, όταν το εξεταζόμενο υλικό χαρακτηρίζεται από μικρή συνεκτικότητα, όπως διάφοροι καλκαρενίτες, σημαντικά σφάλματα προκαλούνται από τις απώλειες των κόκκων του δείγματος (84).

Ενημερωτικά αναφέρεται ότι πλέον έχουν αναπτυχθεί και πιο εξελιγμένες μέθοδοι μελέτης της υδαταπορρόφησης των υλικών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση μηχανικών συστημάτων που ελέγχονται από υπολογιστή (84).

Δ.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου του Πειραματικού Μέρους της Μεταπτυχιακής Εργασίας έγινε γενική αναφορά στις βασικές αρχές και το σκοπό της κάθε πειραματικής μεθόδου που εφαρμόστηκε με στόχο τη μελέτη των τεσσάρων ειδών δομικών λίθων.

Στο παρόν, δεύτερο μέρος αναφέρονται πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο οι προηγούμενες μέθοδοι εφαρμόστηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Σημειώνεται ότι η πειραματική μελέτη των υλικών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο της Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, στο Εργαστήριο των Υπερήχων και στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Δ.2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας, απαιτήθηκε η δημιουργία τριών ειδών δοκιμίων των υπό εξέταση υλικών.

Για τις δοκιμές μηχανικών αντοχών χρειάστηκαν πέντε δοκίμια διαμέτρου βάσεως 10 cm και ύψους 20 cm από κάθε είδος λίθου. Στα ίδια δοκίμια προηγήθηκε εξέταση και με τη μη καταστρεπτική μέθοδο των υπερήχων. Επειδή θεωρήθηκε από την αρχή αδύνατο να ελεγχθούν οι κύλινδροι των παρόλιθων κατά τη διεύθυνση του άξονά τους με τη συσκευή υπερήχων USIP 11 της εταιρίας Krautkramer, κατασκευάστηκαν και πέντε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα δοκίμια από κάθε είδος λίθου, διαστάσεων 10 cm × 10 cm × 4 cm προς αυτό το σκοπό.

Επιπρόσθετα, υπήρξε η απαίτηση δημιουργίας κυβικών δοκιμίων των λίθων, διαστάσεων 5cm × 5cm × 5cm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές υδαταπορρόφησης και εμβάπτισης προκειμένου να προσδιοριστούν ορισμένες ιδιότητες μικροδομής των λίθων. Μικρά τεμάχια από τους εν λόγω κύβους χρησιμοποιήθηκαν στο τέλος για τη μορφοποίηση δοκιμίων για την πραγματοποίηση της πορομετρίας υδραργύρου, με σκοπό τον προσδιορισμό μερικών ακόμη παραμέτρων της μικροδομής των λίθων.

Σημειώνεται ότι όλα τα δοκίμια από το ίδιο είδος λίθου κόπηκαν από το ίδιο μεγάλο κομμάτι του.

A



B



Γ



Δ



E



ΣΤ



Εικόνα Δ.1 : Δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών: Α) Κυλινδρικά και πρισματικά μαρμάρου Διονύσου, Β) Κυλινδρικά και πρισματικά παρόλιθου Ρεθύμνου, Γ) Κυλινδρικά και πρισματικά παρόλιθου Κύπρου, Δ) Κυλινδρικά και πρισματικά παρόλιθου Ρόδου, Ε) Κυβικά παρόλιθων Ρεθύμνου και Κύπρου, ΣΤ) Κυβικά παρόλιθου Ρόδου.

Δ.2.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ DTA – TG.

Η θερμική ανάλυση της χημικής σύστασης των τεσσάρων ειδών λίθων που μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ειδικού οργάνου DTA – TG του εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών (Εικόνα Δ.3). Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις με το συγκεκριμένο όργανο, τεμάχια των λίθων έγιναν σκόνη με κόκκους όσο το δυνατόν μικρότερης διατομής (Εικόνες Δ.2.A και Δ.2.B).

Η εφαρμογή της μεθόδου DTA – TG, έδωσε τη σχετική θερμοβαρυμετρική καμπύλη για κάθε είδος λίθου, με τη βοήθεια της οποίας εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για τη χημική σύστασή του. Οι θερμοβαρυμετρικές καμπύλες παρατίθενται στο παράρτημα, στο τέλος της παρούσας εργασίας.

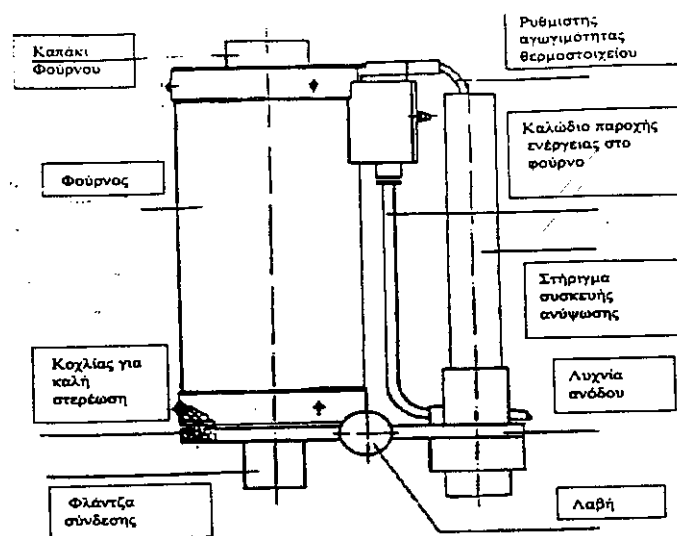


A



B

Εικόνα Δ.2 : Κονιορτοποίηση πωρόλιθου Ρόδου για τις ανάγκες των πειραμάτων DTA – TG και XRD.



Εικόνα Δ.3 : Όργανο μέτρησης DTA – TG (78)

Δ.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Η ορυκτολογική μελέτη των τεσσάρων λίθων που εξετάστηκαν, έγινε με περιθλασιμετρία ακτίνων X. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το σκοπό είναι το D5000 της εταιρίας SIEMENS. Η παραγωγή των σχετικών ακτινοδιαγραμμάτων έγινε μέσω H/Y. Και για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε κονιορτοποιημένο υλικό των λίθων. Τα ακτινοδιαγράμματα που ελήφθησαν, παρατίθενται στο Παράρτημα της εργασίας.

Δ.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Για το μη καταστρεπτικό έλεγχο των λίθων με υπερήχους χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές συσκευές, ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP 11 της εταιρίας Krautkramer Γερμανίας του Εργαστηρίου Υπερήχων του Τομέα Μηχανικής και η συσκευή Pundit του Εργαστηρίου Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Ε.Μ.Π..

Ο ανιχνευτής USIP 11 έχει διαστάσεις 36 cm × 18 cm × 40 cm και βάρος 11,5 Κρ. Η τροφοδοσία του γίνεται με ρεύμα πόλης και με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Είναι μία εξαιρετικά αξιόπιστη συσκευή, κατάλληλη για μεγάλο αριθμό χρήσεων

(18). Κατά τη χρησιμοποίησή της για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας έγινε εφαρμογή κεφαλών διαμήκων και εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων συχνότητας 2 MHz. Η κεφαλή ερχόταν κάθε φορά σε επαφή με την πάνω κυκλική επιφάνεια κάθε κυλινδρικού δοκιμίου ή με την πάνω τετραγωνική επιφάνεια διαστάσεων 10 cm × 10 cm του κάθε ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου δοκιμίου. Οι διορθώσεις των μετρούμενων ταχυτήτων έγιναν με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των πραγματικών και των μετρούμενων τιμών τους. Η βαθμονόμηση του οργάνου έγινε με τη χρήση χαλύβδινου δοκιμίου.

Μεταξύ της κεφαλής των υπερήχων και του κάθε εξεταζόμενου δοκιμίου γινόταν παρεμβολή μίας κατάλληλης ουσίας που είχε ως στόχο της την καλή επαφή και την εξουδετέρωση του στρώματος του αέρα που υπήρχε ανάμεσα στα δύο σώματα, το οποίο θα ανακλούσε το 100 % σχεδόν του υπερηχητικού κύματος. Η ουσία αυτή επιλέχθηκε να είναι το γράσο κατά την εφαρμογή της κεφαλής των διαμήκων κυμάτων και το μέλι κατά την εφαρμογή της κεφαλής των εγκαρσίων κυμάτων.

Επειδή οι τρεις πωρόλιθοι που εξετάστηκαν ήταν υλικά με υψηλή απόσβεση (δηλαδή μεγαλύτερη των 100 dB/m), δεν κατέστη δυνατό να ληφθούν γι' αυτούς οι ταχύτητες διαδόσεως των διαμήκων και των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων, καταρχάς με τη μέθοδο της παλμοηγούς, τόσο σε όλα τα κυλινδρικά δοκίμια όσο και στα πρισματικά των πωρολίθων Κύπρου και Ρόδου. Γι' αυτό το λόγο επιχειρήθηκε και η μελέτη τους με την τεχνική της διελεύσεως, που όμως ούτε αυτή απέφερε αποτελέσματα. Κεφαλές με αρκετά μικρότερη συχνότητα κυμάτων θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες σε αυτή την περίπτωση, αφού ως γνωστό, η διασπορά των κυμάτων μειώνεται με τη μείωση της συχνότητάς τους.

Κατά τη χρησιμοποίηση της συσκευής Pundit, εφαρμόστηκαν μόνο κεφαλές διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων, οι οποίες είχαν συχνότητα 54 KHz και τα υλικά μελετήθηκαν με τη μέθοδο της διελεύσεως. Η βαθμονόμηση του οργάνου έγινε με τη βοήθεια ειδικού κυλινδρικού δοκιμίου από πορώδες υλικό με περίβλημα από μέταλλο. Η βαθμονόμηση έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά την εφαρμογή των δύο κεφαλών της συσκευής στις δύο βάσεις του ειδικού δοκιμίου, η ένδειξη της οθόνης του οργάνου να είναι 25 μsec, δηλαδή ο χρόνος διέλευσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων από τη μία βάση του δοκιμίου μέχρι την άλλη να ισούται με 25 μsec. Οι δύο κεφαλές εφαρμόζονταν κάθε φορά στις δύο βάσεις των λίθινων κυλινδρικών δοκιμίων και στις τετραγωνικές επιφάνειες των ορθογώνιων

παραλληλεπίπεδων δοκιμίων. Σε αυτή την περίπτωση, κατέστη δυνατό να γίνουν μετρήσεις σε όλα τα δοκίμια εκτός από τους κυλίνδρους του πωρόλιθου Ρόδου, που η μεγάλη ανομοιογένεια του υλικού τους δεν επέτρεψε τη λήψη σαφούς σήματος.

Όπως είναι, βέβαια, γνωστό, για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών των εξεταζόμενων λίθων με τη βοήθεια των υπερήχων, απαιτείται και ο προσδιορισμός της ταχύτητας διαδόσεως των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων. Προκειμένου, λοιπόν, να υπολογιστούν οι εν λόγω ελαστικές σταθερές και δεδομένης της μη διαθεσιμότητας κεφαλών εγκαρσίων κυμάτων της συσκευής Pundit, έγιναν κάποιες παραδοχές για τις τιμές των ταχυτήτων των κυμάτων αυτών.

Θεωρήθηκε, λοιπόν, ότι οι λόγοι των ταχυτήτων των διαμήκων προς αυτές των εγκαρσίων κυμάτων είναι οι ίδιοι για κάθε υλικό και στις δύο περιπτώσεις μετρήσεων με τις δύο διαφορετικές συσκευές υπερήχων. Για τις περιπτώσεις των υλικών που δεν είχαν προηγουμένως καταστεί δυνατές μετρήσεις με τη συσκευή USIP 11, ώστε να έχουν προσδιοριστεί οι αντίστοιχοι λόγοι, η πρόβλεψή τους έγινε ως εξής: ο άγνωστος λόγος της ταχύτητας των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων θεωρήθηκε ίσος με το μέσο όρο των δύο λόγων που προέκυψαν με τους εξής δύο τρόπους:

- 1) Στη διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων στο μάρμαρο Διονύσου και τον πωρόλιθο Ρεθύμνου αντιστοιχεί κάποια συγκεκριμένη διαφορά στους λόγους ταχυτήτων διαμήκων προς ταχύτητες εγκαρσίων κυμάτων στα ίδια υλικά. Τότε, για τη γνωστή διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων στο μάρμαρο του Διονύσου και στον πωρόλιθο Κύπρου ή τον πωρόλιθο Ρόδου θα υπάρχει μία ανάλογη διαφορά ανάμεσα στους λόγους των ταχυτήτων των διαμήκων προς τις ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων σε αυτούς τους λίθους. Έτσι με την απλή μέθοδο των τριών προσδιορίζεται η ζητούμενη διαφορά των λόγων των δύο ταχυτήτων των δύο ειδών λίθων.
- 2) Στη γνωστή διαφορά του ολικού ειδικού όγκου προσβάσιμου στο νερό του πωρόλιθου Ρεθύμνου από αυτόν του μαρμάρου Διονύσου αντιστοιχεί γνωστή διαφορά του λόγου της ταχύτητας των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων του πωρόλιθου Ρεθύμνου από αυτόν του μαρμάρου Διονύσου. Οπότε στη γνωστή διαφορά του ολικού ειδικού όγκου προσβάσιμου στο νερό του πωρόλιθου Κύπρου ή Ρόδου από αυτόν του μαρμάρου Διονύσου αντιστοιχεί ανάλογη διαφορά του λόγου της ταχύτητας

των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων του πωρόλιθου Κύπρου ή Ρόδου από αυτόν του μαρμάρου Διονύσου. Με την απλή μέθοδο των τριών βρίσκεται η ζητούμενη διαφορά των λόγων. Τέλος, με γνωστό το λόγο που αντιστοιχεί στο μάρμαρο Διονύσου, προσδιορίζεται ο άγνωστος που αντιστοιχεί στον πωρόλιθο Κύπρου ή τον πωρόλιθο Ρόδου.

Όλα τα προαναφερόμενα αφορούν την πρόβλεψη των λόγων των ταχυτήτων στα πρισματικά δοκίμια των λίθων. Η πρόβλεψη των άγνωστων λόγων των ταχυτήτων που αντιστοιχούν στα κυλινδρικά δοκίμια των πωρόλιθων Ρεθύμνου, Κύπρου και Ρόδου έγινε ως εξής:

Στο γνωστό λόγο της ταχύτητας των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων που παρατηρείται στα πρισματικά δοκίμια του μαρμάρου Διονύσου αντιστοιχεί ένας γνωστός λόγος που παρατηρείται στα κυλινδρικά δοκίμια του ίδιου υλικού. Οπότε, στο λόγο της ταχύτητας των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων στα πρίσματα πωρόλιθου Ρεθύμνου ή Κύπρου αντιστοιχεί ένας ανάλογος λόγος ταχυτήτων στα κυλινδρικά δοκίμια, που προσδιορίζεται με την απλή μέθοδο των τριών.

Σημειώνεται πως η χρήση της συσκευής Pundit για παρόμοιους ερευνητικούς σκοπούς αναφέρεται και σε άλλα δημοσιευμένα επιστημονικά άρθρα (1), (85).

Όλες οι προαναφερόμενες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν καταρχάς στα δοκίμια των λίθων υπό συνθήκες φυσικής υγρασίας. Κατόπιν τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν σε λεκάνη με απιονισμένο νερό, στο οποίο παρέμειναν για τρεις ημέρες, μέχρι να κορεστούν. Την τέταρτη ημέρα πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των ταχυτήτων των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων με τη χρήση της συσκευής PUNDIT στα κορεσμένα πλέον με νερό υλικά. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκε αύξηση στις τιμές των εν λόγω ταχυτήτων σε σύγκριση με εκείνες που είχαν προσδιοριστεί αρχικά.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις δύο συσκευές των υπερήχων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο Ε που ακολουθεί. Υπενθυμίζεται ότι η εξαγωγή των δυναμικών ελαστικών σταθερών από τις προαναφερόμενες ταχύτητες έγινε με βάση τους ακόλουθους μαθηματικούς τύπους, που ήδη αναφέρθηκαν στην παράγραφο Γ.1.4:

- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας , Ed:

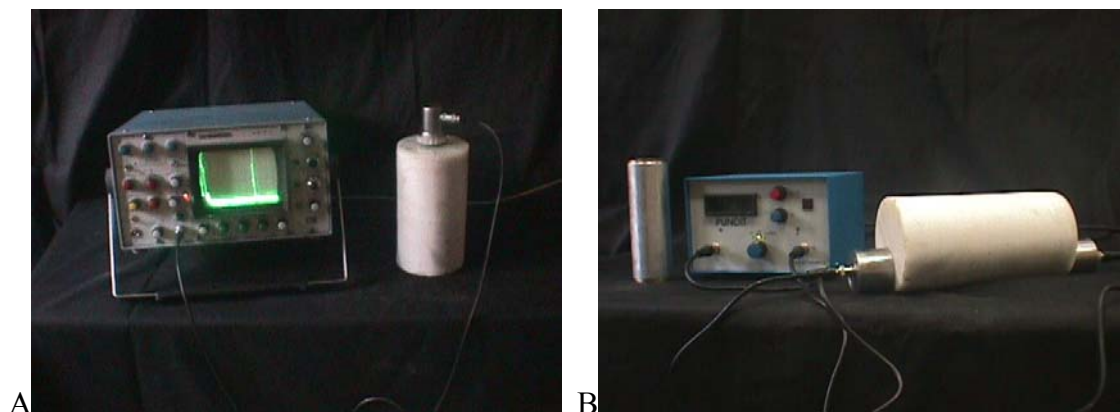
$$Ed = 4 \cdot \rho \cdot Ct^2 \cdot \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{Ct}{Cl}\right)^2}{1 - \left(\frac{Ct}{Cl}\right)^2} \quad (\Gamma.2)$$

- Δυναμικός λόγος Poisson , vd:

$$vd = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{Ct}{Cl}\right)^2}{1 - \left(\frac{Ct}{Cl}\right)^2} \quad (\Gamma.3)$$

- Δυναμικό μέτρο διάτμησης , Gd:

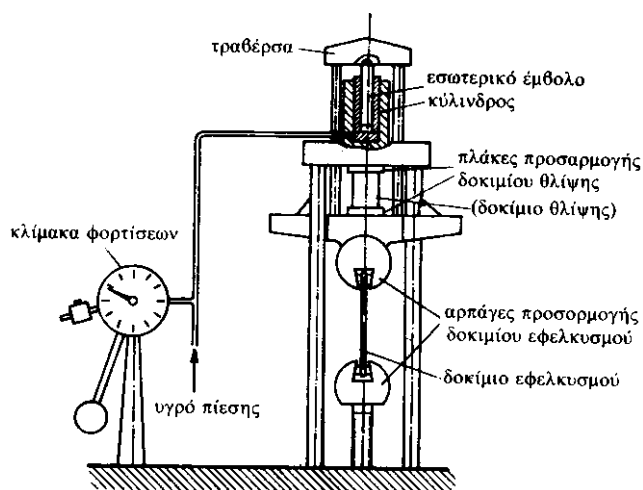
$$Gd = \rho \cdot Ct^2 \quad (\Gamma.4)$$



Εικόνα Δ.4: Οι δύο συσκευές υπερήχων που χρησιμοποιήθηκαν : A) USIP 11 της Krautkramer , B) PUNDIT

Δ.2.5 Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

Οι στατικές ελαστικές σταθερές των υλικών προσδιορίστηκαν με την πραγματοποίηση της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης. Αυτή έγινε με τη βοήθεια μίας πρέσας της εταιρίας Mohr – Fedrhauff Γερμανίας που βρίσκεται στο Εργαστήριο της Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π.. Η συγκεκριμένη μηχανή λειτουργεί με υδραυλική πίεση, είναι μέγιστου φορτίου 100 τόνων και παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών θλίψεως, εφελκυσμού, λυγισμού, κάμψεως, αναδιπλώσεως και διάτμησης με την προσθήκη διαφόρων κατάλληλων για το σκοπό του κάθε πειράματος εξαρτημάτων (28).



Εικόνα Δ.5



Εικόνα Δ.6

Εικόνα Δ.5 : Σκαρίφημα τυπικής μηχανής θλίψης (28)

Εικόνα Δ.6: Η μηχανή θλίψης της εταιρίας Mohr – Fedrhauff του Εργαστηρίου αντοχής των υλικών του Ε.Μ.Π.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα ήταν τα ίδια 5 κυλινδρικά κάθε τύπου λίθου, που είχαν προηγουμένως εξεταστεί με υπερήχους, διαμέτρου βάσεως 10 cm και ύψους 20 cm. Υπήρξε μέριμνα ώστε οι βάσεις τους να τείνουν όσο το δυνατόν περισσότερο προς την παραλληλία. Στα δοκίμια που υπήρχαν ατέλειες ως προς αυτό, τοποθετήθηκε γυψοκονίαμα στις βάσεις τους ώστε να

αποκτήσουν το ακριβές επιθυμητό σχήμα, για να υπάρχει τέλεια επαφή μεταξύ αυτών και της πρέσας.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η μεταβολή του αρχικού μήκους l_0 , του κάθε δοκιμίου, Δl , λόγω του φορτίου, μετρούταν με τη βοήθεια τριών βελομέτρων (ωρολογιακών μηκυνσιομέτρων), τα οποία είχαν τη δυνατότητα να μετρούν μεταβολές μήκους (βραχύνσεις) με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού. Η χρήση τριών μηκυνσιομέτρων τοποθετημένων στην περίμετρο του κάθε δοκιμίου και η θεώρηση του μέσου όρου των ενδείξεών τους θεωρήθηκε αναγκαία για να ληφθούν υπόψη τυχόν εκκεντρότητες της φορτίσεως ή τα σφάλματα στην τοποθέτηση των δακτυλίων (όχι απόλυτη παραλληλία μεταξύ τους) (28). Από τις ενδείξεις των φορτίων έγιναν οι υπολογισμοί των τάσεων με την παραδοχή της ισόογκης μεταβολής.

Με τον τρόπο που αναφέρθηκε στην παράγραφο Δ.1.2.1, δημιουργήθηκαν διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων, με σκοπό να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας του υλικού τους. Σημειώνεται ότι στον αρχικό στόχο συμπεριλαμβανόταν και ο προσδιορισμός του λόγου Poisson των υλικών. Γι' αυτό είχαν τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά στην κυλινδρική επιφάνεια των δοκιμίων και δύο βελόμετρα με δυνατότητα μέτρησης των μεταβολών του μήκους της διαμέτρου με ακρίβεια χιλιοστού του χιλιοστού. Τελικά κατέστη αδύνατο να ληφθούν σαφείς μετρήσεις από αυτά.

Οι τιμές των στατικών μέτρων ελαστικότητας, E_{st} , των τεσσάρων ειδών λίθων που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Είναι προφανείς οι αποκλίσεις τους από τις τιμές που έδωσαν οι μετρήσεις με υπερήχους, οι οποίες είναι αρκετά σημαντικές στο πιο πυκνό υλικό (το μάρμαρο Διονύσου) και μειώνονται όσο μειώνεται η πυκνότητα του υλικού, με αποτέλεσμα στον πωρόλιθο Ρόδου να λαμβάνονται παραπλήσιες τιμές. Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται σαφώς σε ανθρώπινα λάθη κατά την εκτέλεση των πειραμάτων της μονοαξονικής θλίψης, δεδομένου ότι στη βιβλιογραφία οι συγκεκριμένες τιμές παρουσιάζονται να προσεγγίζουν τις προερχόμενες από τις δοκιμές με υπερήχους.



A



B



Γ



Δ



E

Εικόνα Δ.7 : Αστοχία δοκιμίων μαρμάρου Διονύσου σε μονοαξονική θλίψη . Α) Δοκίμιο ΜΔΚ1, Β) Δοκίμιο ΜΔΚ2 , Γ) Δοκίμιο ΜΔΚ3 , Δ) Δοκίμιο ΜΔΚ4 , Ε) Δοκίμιο ΜΔΚ5 .



A



B



Γ



Δ



E

Εικόνα Δ.8 : Αστοχία δοκιμίων παρόλιθου Ρεθύμνου σε μονοαξονική θλίψη :
Δοκίμια: A) ΠΡΚ1 , B) ΠΡΚ2 , Γ) ΠΡΚ3 , Δ) ΠΡΚ4 , E) ΠΡΚ5.



A



B



Γ

Εικόνα Δ.9 : Αστοχία δοκιμίων παρόλιθου Κύπρου σε μονοαξονική θλίψη : A)
Δοκίμιο ΠΚ1 , B) Δοκίμιο ΠΚ4 , Γ) Δοκίμιο ΠΚ5



Α



Β



Γ



Δ



Ε

Εικόνα Δ.10 : Αστοχία δοκιμίων πωρόλιθου Ρόδου σε μονοαξονική θλίψη : Α) Δοκίμιο ΠΡΔ1 , Β) Δοκίμιο ΠΡΔ2 , Γ) Δοκίμιο ΠΡΔ3 , Δ) Δοκίμιο ΠΡΔ4 , Ε) Δοκίμιο ΠΡΔ5.

Δ.2.6 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ

Η δοκιμή της τριχοειδούς αναρρίχησης πραγματοποιήθηκε σε 5 κυβικά δοκίμια από κάθε είδος δομικού λίθου, διαστάσεων $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ περίπου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που περιγράφηκε στην παράγραφο Δ.1.6 και υπαγορεύεται από το πρότυπο UNI 10859. Για την πραγματοποίησή της έγινε χρήση απιονισμένου νερού. Πριν από την εκτέλεση των δοκιμών, τα δοκίμια παρέμειναν σε κλίβανο με θερμοκρασία 105°C , για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 24 h, προκειμένου να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία τους. Από τις καμπύλες που προέκυψαν από τις μετρήσεις, προσδιορίστηκε ο συντελεστής υδαταπορρόφησης για κάθε δοκίμιο.

Δύο προτεινόμενοι τρόποι από το πρότυπο UNI 10859 για τον προσδιορισμό του εν λόγω συντελεστή, έδωσαν σχεδόν ίδια αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο. Ως συντελεστής υδαταπορρόφησης κάθε υλικού θεωρήθηκε ο μέσος όρος των πέντε τιμών που ελήφθησαν από τα 5 δοκίμιά του.



Εικόνα Δ.11 : Δοκιμή υδαταπορρόφησης δοκιμίου ΠΡΔ1

Δ.2.7 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ

Οι δοκιμές της εμβάπτισης των υλικών έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο Normal 7 / 81.

Τα πέντε κυβικά δείγματα του κάθε είδους λίθου που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τις δοκιμές της υδαταπορρόφησης, στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν σε απιονισμένο νερό, στο οποίο παρέμειναν μέχρι τη σταθεροποίηση του βάρους τους. Κατόπιν ζυγίστηκαν και έτσι προσδιορίστηκε η μάζα του νερού που απορρόφησαν με αυτόν τον τρόπο, η οποία προέκυψε λίγο μεγαλύτερη από εκείνη που είχαν απορροφήσει κατά τις δοκιμές της υδαταπορρόφησης. Με γνωστή τη μάζα του νερού που απορροφήθηκε και τη θερμοκρασία του, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του ολικού ειδικού όγκου προσβάσιμου στο νερό του κάθε λίθου, ο οποίος εκφράζεται με τον όγκο του νερού που απορροφήθηκε προς τη μάζα του ξηρού δοκιμίου.

Δ.2.8 ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ

Από τα κυβικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές υδαταπορρόφησης και εμφάνισης, μικροσκοπικά θραύσματα ελήφθησαν για τις δοκιμές πορομετρίας υδραργύρου, τα οποία ξηράνθηκαν αρχικά στους 105° C για 24 h.

Οι αρχές και ο σκοπός της ποροσιμετρίας υδραργύρου αναφέρθηκαν ήδη στην παράγραφο Δ.1.5 και συμφωνούν με το πρότυπο: Normal 4 / 80. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το πορόμετρο της εταιρίας Fisons Instruments, το οποίο αποτελείται από δύο τμήματα: το Macropores Unit 120 και το Porosimeter 2000 series. Το πρώτο τμήμα (Macropores Unit 120) χρησιμεύει για τον προσδιορισμό μεγάλων πόρων (ακτίνας 7,5 – 100 μm) και το δεύτερο για τον προσδιορισμό μικρότερων πόρων (ακτίνας 37,5 Å – 7,5 μm). Και τα δύο τμήματα συνδέονται, μεταξύ τους με ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο γίνονται απευθείας η αποθήκευση και η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Ε. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

E.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Από την εξέταση των τεσσάρων ειδών δομικών λίθων με τη βοήθεια της μεθόδου DTA-TG έγινε αμέσως εμφανές ότι η πρωτεύουσα ορυκτή φάση όλων είναι ο ασβεστίτης (CaCO_3). Αυτή η διαπίστωση συμφωνεί και με τα αποτελέσματα της μεθόδου XRD που παρουσιάζονται στην παράγραφο E.2. Τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα E.1 που ακολουθεί:

Πίνακας E.1: Αποτελέσματα ανάλυσης χημικής σύστασης των λίθων με τις μεθόδους DTA-TG

Είδος λίθου	Περιεχόμενο CO_2 (% κ.β.)
Μάρμαρο Διονύσου	44,62
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	39,36
Πωρόλιθος Κύπρου	21,26
Πωρόλιθος Ρόδου	33,98

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης χημικής σύστασης δεν ανιχνεύτηκε χαλαζία σε κανένα λίθο.

Όπως φαίνεται στον πίνακα E.1, το μικρότερο ποσοστό CO_2 παρουσιάζεται στον πωρόλιθο της Κύπρου.

Ειδικά για το μάρμαρο Διονύσου, η περιεκτικότητα σε CO_2 που ισούται με 44,62 % κ.β., φανερώνει την παρουσία δολομίτη στο υλικό, αφού εάν υπήρχε μόνο ασβεστίτης σε αυτό, η περιεκτικότητα σε CO_2 θα ήταν το πολύ 43,97 %.

Επίσης, οι καμπύλες της θερμικής ανάλυσης του πωρόλιθου Κύπρου δείχνουν σχετικά υψηλό ποσοστό φυσικά δεσμευμένου νερού, που οφείλεται πιθανώς στην παρουσία αργιλικών ενώσεων που παρουσιάζουν μεγάλη υγροσκοπικότητα.

E.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Η ορυκτολογική μελέτη των λίθων με τη μέθοδο XRD έδωσε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα E.2:

Πίνακας E.2 Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης των λίθων με τη μέθοδο XRD

Είδος λίθου	Κύρια ορυκτή φάση	Δευτερεύουσες ορυκτές φάσεις
Μάρμαρο Διονύσου	Ασβεστίτης	Μοσχοβίτης, δολομίτης, χαλαζίας
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, μαρμαρυγίες
Πωρόλιθος Κύπρου	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, χλωρίτης, αλβίτης
Πωρόλιθος Ρόδου	Ασβεστίτης	Χαλαζίας, αλβίτης, μαρμαρυγίες

E.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Οι τιμές των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων και των εγκαρσίων κυμάτων των υπερήχων μέσα στους υπό μελέτη λίθους φαίνονται στον Πίνακα E.3 που ακολουθεί. Επίσης, ο πίνακας E.4 παρουσιάζει τις τιμές των δυναμικών ελαστικών σταθερών, που προσδιορίστηκαν βάσει των ταχυτήτων των υπερηχητικών κυμάτων με τη βοήθεια των σχέσεων (Γ.2)-(Γ.4).

Υπενθυμίζεται ότι, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Δ, επειδή δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων, C_t' , με τη συσκευή Pundit, οι λόγοι C_l'/C_t' της ταχύτητας των διαμήκων προς την ταχύτητα των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων που ήταν απαραίτητοι για τον προσδιορισμό του δυναμικού λόγου του Poisson, $\nu d'$, του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, $E d'$, και του δυναμικού μέτρου διάτμησης $G d'$, προβλέφθηκαν σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφεται στις σελίδες 71-72 της ενότητας Δ.2.4.

Πίνακας Ε.3 Ταχύτητες διάδοσης διαμήκων και εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων μέσα στα δοκίμια των λίθων . Οι πυκνότητες των λίθων παρουσιάζονται επίσης.

Είδος δοκιμίων	ρ (kg/m ³)		C _I (m/s)		C _t (m/s)		C _I /C _t		C _I ' (m/s)		C _t ' (m/s)	C _I '/C _t '	% Αύξηση μάζας λόγω εμφάνισης		Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)		C _I '' (m/sec)	
	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	M.T.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.
Πρίσματα Μαρμάρου Διονύσου	2700	24	6294	77	3300	67	1,907	0	6684	91	3505	1,907						
Πρίσματα Πωρόλιθου Ρεθύμνου	2080	72	3615	196	1987	128	1,819	0,819	3651	203	2007	1,819	7,48	1,38	74,86	13,76	3844	440
Πρίσματα Πωρόλιθου Κύπρου	1986	13							2832	73	1576	1,797	8,49	2,32	85,02	23,24	3304	175
Πρίσματα Πωρόλιθου Ρόδου	1724	24							2787	87	1547	1,802	7,90	1,00	79,04	10,03	3235	269
Κύλινδροι Μαρμάρου Διονύσου	2704	34	6157	158	3393	74	1,815	0,079	6489	334	3576	1,815						
Κύλινδροι Πωρόλιθου Ρεθύμνου	2092	4							2995	39	1723	1,731						
Κύλινδροι Πωρόλιθου Κύπρου	2027	13							2062	441	1206	1,710						
Κύλινδροι Πωρόλιθου Ρόδου	2040	38							4018									

Σημείωση: Το υπόμνημα με την επεξήγηση των συμβολισμών του πίνακα ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.

- **p**: Φαινόμενη πυκνότητα δοκιμίων
- **CI**: Ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων προσδιοριζόμενη με τη συσκευή USIP 11 της Krautkramer .
- **Ct**: Ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων προσδιοριζόμενη με τη συσκευή USIP 11 της Krautkramer .
- **CI'**: Ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων προσδιοριζόμενη με τη συσκευή Pundit της CNS Electronics.
- **Ct'**: Προβλεπόμενη ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων με τη συσκευή Pundit CNS Electronics.
- **O.E.O.**: Ολικός ειδικός όγκος προσβάσιμος στο νερό
- **CI''**: Ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων στα κορεσμένα με απιονισμένο νερό πρισματικά δοκίμια των λίθων .

Πίνακας Ε.4 Στατικές και δυναμικές ελαστικές σταθερές των δομικών λίθων

Είδος δοκιμίων		vd	Ed (GPa)	Gd (GPa)	vd'	Ed' (GPa)	Gd' (GPa)	Rc (MPa)	Est (GPa)	Rc Βιβλ.(MPa)	Ε.Βιβλ. (GPa)	ν βιβλ.
Πρίσματα Μαρμάρου Διονύσου	M.T.	0,310	77,02	29,41	0,310	86,92	33,12					
	T.A.	0,013	2,59	1,26	0,000	2,12	0,81					
Πρίσματα Πωρόλιθου Ρεθύμνου	M.T.	0,282	20,65	8,46	0,283	21,62	8,42					
	T.A.	0,030	2,65	0,86	0,000	3,19	1,24					
Πρίσματα Πωρόλιθου Κύπρου	M.T.				0,276	12,59	4,94					
	T.A.				0,000	0,64	0,64					
Πρίσματα Πωρόλιθου Ρόδου	M.T.				0,278	10,54	4,12					
	T.A.				0,000	0,807	0,316					
Κύλινδροι Μαρμάρου Διονύσου	M.T.	0,281	79,77	31,13	0,282	88,77	34,62	72,82	22,29	58,5-116	23-90	0,33-0,35
	T.A.	0,014	3,21	1,31	0,000	8,52	3,32	11,76	9,37	(67), (69)	(67), (69)	(67), (69)
Κύλινδροι Πωρόλιθου Ρεθύμνου	M.T.				0,250	15,65	6,26	23,27	5,91	23,8 (72)	12,5 (72)	
	T.A.				0,000	0,40	0,16	1,03	0,47			
Κύλινδροι Πωρόλιθου Κύπρου	M.T.				0,240	7,56	3,07	10,54	3,61	8,9 (73)	7,2 (73)	
	T.A.				0,000	0,64	1,16	1,63	2,90			
Κύλινδροι Πωρόλιθου Ρόδου	M.T.							21,30	9,43	5,4 -13,4	8,17(74)	
	T.A.							2,51	2,77	(72), (86)		

Σημείωση: Ακολουθεί υπόμνημα με την επεξήγηση των συμβολισμών του πίνακα στην επόμενη σελίδα.

Υπόμνημα Πίνακα Ε.4

vd: Δυναμικός λόγος του Poisson προσδιοριζόμενος με τη συσκευή USIP 11 της Krautkramer

Ed: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προσδιοριζόμενο με τη συσκευή USIP 11 της Krautkramer

Gd: Δυναμικό μέτρο διάτμησης προσδιοριζόμενο με τη συσκευή USIP 11 της Krautkramer

vd': Δυναμικός λόγος του Poisson προσδιοριζόμενος με τη συσκευή Pundit CNS Electronics

Ed': Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προσδιοριζόμενο με τη συσκευή Pundit CNS Electronics

Gd': Δυναμικό μέτρο διάτμησης προσδιοριζόμενο με τη συσκευή Pundit

Est : Στατικό μέτρο ελαστικότητας

Rc: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

E βιβλ.: Μέτρο ελαστικότητας που δίνει η βιβλιογραφία

Rc βιβλ. : Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που δίνει η βιβλιογραφία

v βιβλ.: Λόγος του Poisson που δίνει η βιβλιογραφία

Στον πίνακα E.3, που παρουσιάζει τις ταχύτητες διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων που προσδιορίζονται με τις συσκευές USIP II και Pundit, παρατηρούνται τα εξής: Η μέγιστη ταχύτητα διάδοσης τόσο των διαμήκων όσο και των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων παρουσιάζεται στο μάρμαρο Διονύσου. Ακολουθούν διαδοχικά οι ταχύτητες που εμφανίζονται στον πωρόλιθο Ρεθύμνου, στον πωρόλιθο Κύπρου και, τέλος, στον πωρόλιθο Ρόδου. Γενικά στα πρισματικά δοκίμια παρατηρείται η τάση της ελάττωσης της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων με τη μείωση της φαινόμενης πυκνότητας των λίθων. Η ίδια τάση παρατηρείται και στα κυλινδρικά δοκίμια, με μόνη εξαίρεση αυτά του πωρόλιθου της Ρόδου, στα οποία δεν υπήρχε καλή ανταπόκριση του οργάνου Pundit.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων και των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων παρουσιάζεται στον πωρόλιθο Ρεθύμνου στην περίπτωση των πρισματικών δοκιμίων. Αυτό υποδηλώνει μεγαλύτερη ανομοιογένεια του συγκεκριμένου υλικού σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Στην περίπτωση, όμως, των κυλινδρικών δοκιμίων, οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις εμφανίζονται στις τιμές των ταχυτήτων στον πωρόλιθο της Κύπρου, που στα πρισματικά δοκίμια έδινε τις μικρότερες τιμές τυπικών αποκλίσεων.

Συγκρίνοντας τις ταχύτητες των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων που αναπτύσσονται στα πρισματικά δοκίμια ενός υλικού με εκείνες που αναπτύσσονται στα κυλινδρικά δοκίμιά του, παρατηρούμε ότι στη δεύτερη περίπτωση αυτές είναι μικρότερες. Μάλιστα, τόσο μεγαλώνει η διαφορά αυτών των ταχυτήτων, όσο αυξάνεται το ολικό πορώδες των υλικών (Πίνακας E.6). Αυτό είναι λογικό γιατί στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων το μήκος που διανύει το υπερηχητικό κύμα (20 cm) είναι μεγαλύτερο από εκείνο που διανύει στην περίπτωση των πρισματικών δοκιμίων (4 cm). Κατά συνέπεια, στην πρώτη περίπτωση το κύμα συναντά περισσότερα κενά στην πορεία του, που επιβραδύνουν τη διάδοσή του.

Όσον αφορά τις διαφορές στις ταχύτητες διάδοσης των εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων στα πρισματικά και τα κυλινδρικά δοκίμια, παρατηρείται ελάττωσή τους με την αύξηση του πορώδους των λίθων.

Μία ακόμη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι η συσκευή Pundit δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες ταχύτητες υπερήχων από τη συσκευή USIP 11 της εταιρίας Krautkramer.

Παραταύτα, θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαφορές των ταχυτήτων που παρατηρούνται κατά τη χρήση διαφορετικής συσκευής ή κατά την εφαρμογή της μεθόδου των υπερήχων σε διαφορετικού σχήματος δοκίμια είναι πολύ μικρές.

Τέλος, όσον αφορά τα κορεσμένα με νερό δοκίμια των λίθων, οι ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων σε αυτά είναι μεγαλύτερες από εκείνες που είχαν προσδιοριστεί στα δοκίμια σε φυσική κατάσταση. Έτσι, στον πωρόλιθο Ρεθύμνου παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας κατά 5,28 %, στον πωρόλιθο Κύπρου κατά 16,67 % και, τέλος, στον πωρόλιθο Ρόδου κατά 16,20 % ενώ οι αντίστοιχοι ολικοί ειδικό όγκοι πόρων προσβάσιμοι στο νερό είναι ίσοι με $74,86 \text{ mm}^3/\text{g}$, $85,02 \text{ mm}^3/\text{g}$ και $79,04 \text{ mm}^3/\text{g}$.

Παρατηρείται, δηλαδή, ότι στα υλικά με μεγαλύτερο ολικό ειδικό όγκο προσβάσιμο στο νερό (Πίνακας Ε.5), παρουσιάζεται και μεγαλύτερη αύξηση στις ταχύτητες των υπερήχων όταν αυτά κορεστούν με νερό, φαινόμενο λογικό κι αναμενόμενο.

Στον Πίνακα Ε.4 παρουσιάζονται οι δυναμικές ελαστικές σταθερές των δομικών λίθων που εξήχθησαν από τις προσδιορισμένες τιμές των ταχυτήτων των υπερήχων και με τη βοήθεια των μαθηματικών σχέσεων (Γ.2), (Γ.3) και (Γ.4) του κεφαλαίου Γ. Παρατηρώντας το συγκεκριμένο πίνακα, μπορεί κανείς να κάνει τα ακόλουθα σχόλια:

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και με τις δύο συσκευές δείχνουν ότι το μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E_d ή E_d' , και το μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο διάτμησης, G_d ή G_d' , παρουσιάζονται στο μάρμαρο Διονύσου. Κατόπιν ακολουθούν με διαδοχική σειρά τα μέτρα ελαστικότητας και τα μέτρα διάτμησης του πωρόλιθου Ρεθύμνου, του πωρόλιθου Κύπρου και του πωρόλιθου Ρόδου.

Τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης που λαμβάνονται με τη συσκευή Pundit, είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από εκείνα που λαμβάνονται με τη συσκευή USIP 11. Αυτό συμβαίνει γιατί η προβλεπόμενη ταχύτητα διαδόσεως των εγκαρσίων υπερηχητικών κυμάτων της συσκευής Pundit είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαδόσεως των εγκαρσίων κυμάτων της συσκευής USIP II και όπως φαίνεται από τις σχέσεις (Γ.2) και (Γ.4), το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και το δυναμικό μέτρο διάτμησης είναι ανάλογα προς την ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων των υπερήχων .

Η διαφορά ανάμεσα στο μέτρο ελαστικότητας που λαμβάνεται με τη χρήση της συσκευής USIP II και σε αυτό που λαμβάνεται με τη χρήση της συσκευής PUNDIT για τον πωρόλιθο του Ρεθύμνου είναι μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο μάρμαρο του Διονύσου. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαφορά στις ταχύτητες διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων που λαμβάνονται από τις δύο συσκευές είναι μικρότερη στο πιο πορώδες υλικό, τον πωρόλιθο του Ρεθύμνου από ότι στο μάρμαρο του Διονύσου.

Τα ίδια με τα παραπάνω ισχύουν και για τα δυναμικά μέτρα διάτμησης G_d και G_d' και για τους δυναμικούς λόγους Poisson ν_d και ν_d' που παρέχουν οι δύο διαφορετικές συσκευές. Για το δυναμικό λόγο Poisson μπορεί επίσης να αναφερθεί ότι η μεγαλύτερη τιμή του παρουσιάζεται στο μάρμαρο Διονύσου και έπονται διαδοχικά ο πωρόλιθος του Ρεθύμνου, ο πωρόλιθος της Ρόδου και, τέλος, ο πωρόλιθος της Κύπρου. Και πάλι η συσκευή Pundit δίνει μεγαλύτερους λόγους Poisson από τη συσκευή USIP II.

Όσον αφορά τις τυπικές αποκλίσεις των τιμών των ελαστικών σταθερών, στην περίπτωση της εξέτασης των πρισματικών δοκιμίων οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στον πωρόλιθο του Ρεθύμνου και οι μικρότερες στον πωρόλιθο Κύπρου. Αντίθετα, στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων, οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις εμφανίζονται στο μάρμαρο Διονύσου. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι το υλικό αυτό είναι το πιο ανισότροπο από τα τέσσερα εξεταζόμενα.

E.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στον πίνακα E.4, δίπλα στις δυναμικές ελαστικές σταθερές που προέκυψαν από τις δοκιμές με υπερήχους, παρουσιάζονται το στατικό μέτρο ελαστικότητας,

Est, και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, R_c , των δομικών λίθων, που προσδιορίστηκαν με τις δοκιμές της μονοαξονικής θλίψης.

Παρατηρώντας κανείς τις τιμές των στατικών μέτρων ελαστικότητας και συγκρίνοντάς τις με αυτές που προέκυψαν από δοκιμές με υπερήχους όσο και με εκείνες που δίνει η βιβλιογραφία για τα συγκεκριμένα δομικά υλικά, εξάγει το εύκολα το συμπέρασμα ότι οι πρώτες από αυτές είναι εσφαλμένες. Αν και είναι κοινώς αποδεκτό ότι γενικά τα δυναμικά μέτρα ελαστικότητας των υλικών είναι μεγαλύτερα από τα στατικά (1),(71) οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται εδώ και αφορούν το μάρμαρο Διονύσου, τον πωρόλιθο Ρεθύμνου, τον πωρόλιθο Κύπρου και τον πωρόλιθο Ρόδου δε θεωρούνται αποδεκτές. Πιθανότατα ένα σύνολο πειραματικών σφαλμάτων κατά την εκτέλεση των δοκιμών της θλίψης οδήγησε στην εξαγωγή λανθασμένων αποτελεσμάτων. Στα σφάλματα αυτά συμπεριλαμβάνονται η αύξηση του φορτίου της πρέσας με πολύ γρήγορο ρυθμό, η παράλειψη ορισμένων μετρήσεων, άρα και σημείων των καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων, η μη πραγματοποίηση της αποφόρτισης των δοκιμίων και πιθανώς η μη παραλληλία των βάσεων των κυλινδρικών δοκιμίων.

Παρά την αποτυχία των καταστρεπτικών δοκιμών που έγιναν στους εξεταζόμενους λίθους, δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί επανάληψή τους μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα, αφού η εξασφάλιση νέων υλικών από τα λατομεία και η μορφοποίησή τους σε δοκίμια θα απαιτούσε πολύ περισσότερο χρόνο από το διατιθέμενο για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

E.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ

Στα γραφήματα των εικόνων E.1 – E.3 που ακολουθούν, φαίνονται οι καμπύλες υδαταπορρόφησης των 5 κυβικών δοκιμίων από καθένα από τα τρία είδη πωρόλιθων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των συγκεκριμένων δοκιμών. Επίσης, στα σχήματα που παρατίθενται στα παραρτήματα φαίνονται οι δύο διαφορετικές γραφικές μέθοδοι υπολογισμού των συντελεστών υδαταπορρόφησης των υπό εξέταση δομικών λίθων. Οι μέθοδοι αυτές υπαγορεύονται από το πρότυπο UNI 10859. Σημειώνεται ότι για το μάρμαρο Διονύσου δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή της υδαταπορρόφησης, αφού εξαιτίας του πάρα πολύ μικρού πορώδους του, οι τιμές των μετρήσεων θα βρίσκονταν μέσα στα όρια των πειραματικών σφαλμάτων.

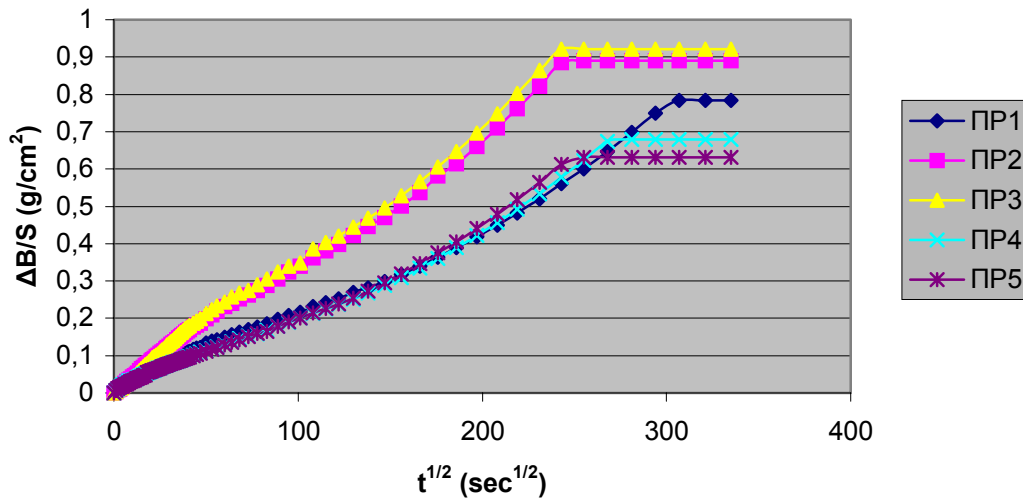
Η πρώτη γραφική μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή υδαταπορρόφησης τον λαμβάνει ίσο με την κλίση της εφαπτομένης ευθείας της καμπύλης υδαταπορρόφησης, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων.

Η δεύτερη μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή υδαταπορρόφησης απαιτεί τη χάραξη της εφαπτομένης της καμπύλης υδαταπορρόφησης στο τμήμα της ακριβώς πριν από το σημείο κορεσμού. Η τεταγμένη του σημείου κορεσμού προς την τετμημένη του σημείου τομής της συγκεκριμένης εφαπτομένης με εκείνη που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, παρέχει το συντελεστή υδαταπορρόφησης.

Οι συντελεστές υδαταπορρόφησης που προσδιορίστηκαν με τις δύο μεθόδους βρέθηκαν σχεδόν ίσοι μεταξύ τους και παρουσιάζονται στον Πίνακα E.5. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται το συνολικό ποσοστό της αύξησης της μάζας των δοκιμίων μετά από τη σταθεροποίησή της (%).

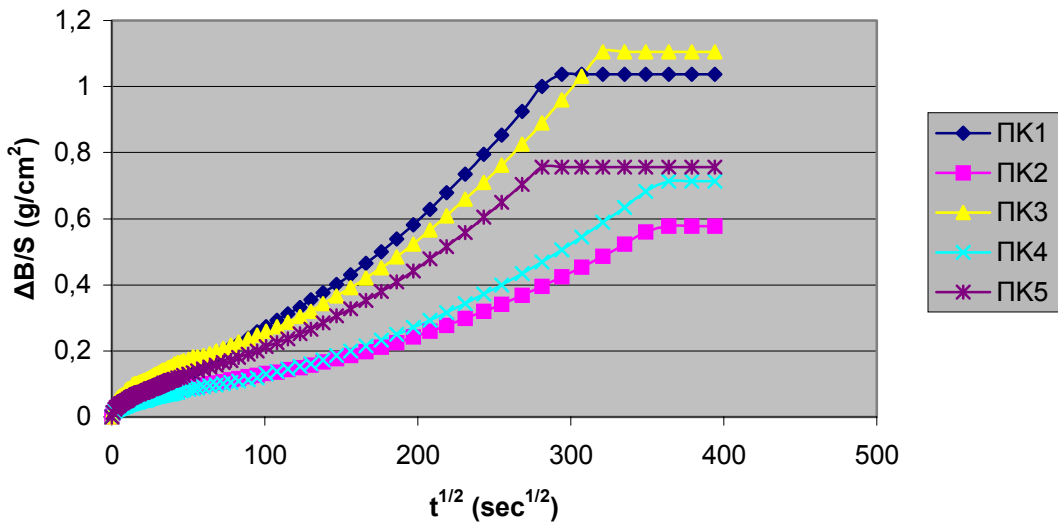
Στον πίνακα E.5 παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο συντελεστή υδαταπορρόφησης παρουσιάζει ο πωρόλιθος Ρόδου. Ακολουθεί ο πωρόλιθος Κύπρου και στο τέλος βρίσκεται ο πωρόλιθος του Ρεθύμνου. Επίσης το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης της μάζας του παρουσίασε ο πωρόλιθος Κύπρου (8,49 %). Τέλος, ο πιο ανομοιογενής λίθος φαίνεται να είναι ο πωρόλιθος της Ρόδου, που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή τυπικής απόκλισης του συντελεστή υδαταπορρόφησης, η οποία ισούται με 0,012.

Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Ρεθύμνου



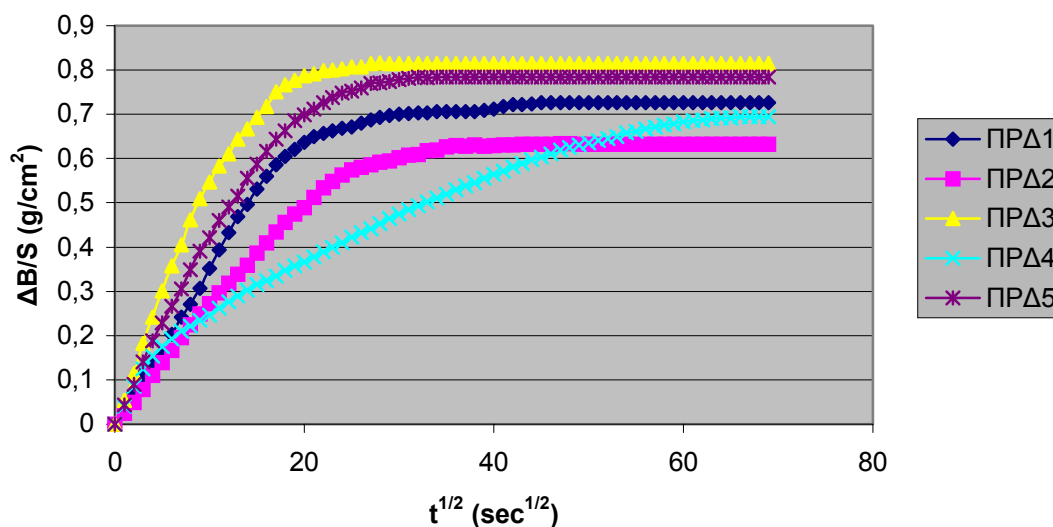
Εικόνα Ε.1 Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Ρεθύμνου

Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Κύπρου



Εικόνα Ε.2 Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Κύπρου

Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Ρόδου



Εικόνα Ε.3 Καμπύλες υδαταπορρόφησης πωρόλιθου Ρόδου

Ε.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ

Στον πίνακα Ε.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εμβάπτισης των λίθων σε απιονισμένο νερό. Καταρχάς δίνεται το συνολικό ποσοστό αύξησης της μάζας των υλικών μετά από την εμβάπτιση (%) και στη συνέχεια ο ολικός ειδικός όγκος τους (mm³/g) που προέκυψε από τη δοκιμή αυτή.

Ο ολικός ειδικός όγκος πόρων προσβάσιμων στο νερό των δομικών λίθων προσδιορίστηκε ως εξής: Καταρχάς προσδιορίστηκε η μάζα των δοκιμών τόσο στην ξηρή τους κατάσταση όσο και μετά από εμβάπτισή τους σε απιονισμένο νερό, μέσα στο οποίο παρέμειναν μέχρι τη σταθεροποίησή της. Η διαφορά των μαζών αυτών είναι ίση με τη μάζα του νερού που απορροφήθηκε κατά την εμβάπτιση. Με γνωστή τη θερμοκρασία του νερού κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των δοκιμών, προσδιορίστηκε η τιμή της πυκνότητάς του από ειδικούς πίνακες της βιβλιογραφίας (83). Έτσι κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του όγκου του απιονισμένου νερού

που απορροφήθηκε. Ο όγκος αυτός διαιρεμένος με την αρχική μάζα του ξηρού δείγματος κάθε λίθου έδωσε τον ολικό ειδικό όγκο των προσβάσιμο στο νερό πόρων του.

Στον πίνακα μπορεί κανείς εύκολα να δει ότι το ποσοστό της αύξησης της μάζας των λίθων μετά από τις δοκιμές της εμβάπτισης είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε μετά από τις δοκιμές της υδαταπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση. Πάλι το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης μάζας παρουσιάζει ο πωρόλιθος Κύπρου (10,49%).

Από τον ίδιο πίνακα φαίνεται επίσης ότι το μεγαλύτερο προσβάσιμο στο νερό ολικό ειδικό όγκο τον παρουσιάζει ο πωρόλιθος Κύπρου. Κατόπιν ακολουθεί ο πωρόλιθος Ρόδου και έπεται ο πωρόλιθος του Ρεθύμνου. Επιπρόσθετα, ο πωρόλιθος της Κύπρου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές του ολικού ειδικού όγκου του (10,47 %), γεγονός που φανερώνει μεγαλύτερη ανομοιογένεια στο συγκεκριμένο υλικό.

Πάντως θα πρέπει να σημειωθεί ότι και οι τρεις τιμές των τυπικών αποκλίσεων των τιμών των ολικών ειδικών όγκων που αντιστοιχούν στα τρία είδη πωρόλιθων που εξετάστηκαν είναι αρκετά μεγάλες.

Πίνακας Ε.5 Συντελεστές Υδαταπορρόφησης, ποσοστά αύξησης της μάζας των υλικών μετά από τις δοκιμές υδαταπορρόφησης και της εμβάπτισης και ολικοί ειδικό όγκοι των υλικών.

Υλικό	Υδαταπορρόφηση					
	% Αύξηση Μάζας		Σ.Υ.1 (g/(cm ² x sec ^{1/2}))		Σ.Υ.2 (g/(cm ² x sec ^{1/2}))	
	M.O.	T. A.	M.O.	T.A.	M.O.	T.A.
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	7,48	1,38	0,004	0,001	0,004	0,000
Πωρόλιθος Κύπρου	8,49	2,32	0,012	0,005	0,012	0,005
Πωρόλιθος Ρόδου	7,89	1,00	0,042	0,012	0,043	0,012
	Εμβάπτιση					
	% Αύξηση Μάζας		Ολικός Ειδικός Όγκος προσβάσιμος στο νερό (mm ³ /g)			
	M.O.	T.A.	M.O.		T.A.	
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	8,42	0,95	84,37		9,53	
Πωρόλιθος Κύπρου	10,49	1,05	105,13		10,47	
Πωρόλιθος Ρόδου	9,41	1,01	94,26		10,10	

Σημείωση : -Σ.Υ.1 : Συντελεστής υδαταπορρόφησης προσδιοριζόμενος από την κλίση της εφαπτομένης στην αρχή της καμπύλης

-Σ.Υ.2 : Συντελεστής υδαταπορρόφησης προσδιοριζόμενος από την τομή των 2 εφαπτομένων στην αρχή και το τέλος της καμπύλης υδαταπορρόφησης

-Μ.Ο.: Μέσος όρος

-Τ.Α.: Τυπική Απόκλιση

E.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΡΟΜΕΤΡΙΑΣ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ

Στον Πίνακα E.6 παρουσιάζονται οι παράμετροι της μικροδομής των εξεταζόμενων λίθων που προσδιορίστηκαν με την πορομετρία υδραργύρου. Οι παράμετροι αυτές είναι ο ολικός ειδικός όγκος (mm^3/g), η ειδική επιφάνεια (m^2/g), η μέση ακτίνα πόρων (Micron), η φαινόμενη πυκνότητα (g/cm^3), η διορθωμένη φαινόμενη πυκνότητα (g/cm^3) και, τέλος, το ολικό ανοιχτό πορώδες (%).

Η παρατήρηση του ολικού ειδικού όγκου καθιστά φανερό ότι η μεγαλύτερη τιμή αυτής της ιδιότητας παρουσιάζεται στον πωρόλιθο του Ρεθύμνου. Ακολουθούν με τη σειρά ο πωρόλιθος της Κύπρου, ο πωρόλιθος της Ρόδου και στο τέλος το μάρμαρο Διονύσου. Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές αυτής της παραμέτρου παρουσιάζεται στον πωρόλιθο της Κύπρου.

Παρατηρώντας τις τιμές των ειδικών επιφανειών, είναι προφανές ότι τη μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει ο πωρόλιθος της Κύπρου και ακολουθούν με τη σειρά ο πωρόλιθος Ρεθύμνου, ο πωρόλιθος Ρόδου και, τέλος, το μάρμαρο Διονύσου. Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές της ειδικής επιφάνειας εμφανίζεται στον πωρόλιθο του Ρεθύμνου και η μικρότερη στο μάρμαρο του Διονύσου.

Η μέγιστη μέση ακτίνα πόρων αντιστοιχεί στον πωρόλιθο της Ρόδου και είναι πολύ μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές του πωρόλιθου Κύπρου, του πωρόλιθου Ρεθύμνου και του μαρμάρου Διονύσου που έπονται διαδοχικά. Ο πωρόλιθος της Ρόδου παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές αυτής της ιδιότητας.

Οι διορθωμένες φαινόμενες πυκνότητες όλων των υλικών παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές μεταξύ τους αν και οι φαινόμενες πυκνότητές τους είναι αρκετά διαφορετικές. Λίγο μικρότερη από όλες είναι η διορθωμένη φαινόμενη πυκνότητα του πωρόλιθου Κύπρου. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ φαινόμενης και διορθωμένης πυκνότητας παρατηρείται στον πωρόλιθο της Ρόδου ενώ η μικρότερη στο μάρμαρο Διονύσου. Ακόμη, ο πωρόλιθος της Κύπρου έχει τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας ενώ το μάρμαρο Διονύσου εμφανίζει τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές της διορθωμένης φαινόμενης πυκνότητας.

Το μεγαλύτερο ολικό ανοιχτό πορώδες φαίνεται να το έχει ο πωρόλιθος του Ρεθύμνου αν και θα πρέπει να διατηρηθεί μία επιφύλαξη ως προς αυτό δεδομένου του ότι υπάρχει πιθανότητα να μη μετρήθηκε σωστά το πορώδες των λίθων της Ρόδου. Ο πωρόλιθος της Ρόδου είναι αυτός που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές του ολικού πορώδους.

Επιπρόσθετα, από τον πίνακα Ε.6 προκύπτει ότι υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας και του ολικού ειδικού όγκου καθώς και ανάμεσα στις τιμές του ολικού ανοιχτού πορώδους και του ολικού ειδικού όγκου. Δηλαδή όσο πιο μεγάλο ολικό ειδικό όγκο έχει ένας λίθος, τόσο μεγαλύτερο πορώδες και τόσο μικρότερη πυκνότητα έχει.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ολικός ειδικός όγκος του κάθε υλικού που προέκυψε από την πορομετρία υδραργύρου είναι διαφορετικός από εκείνον που έδωσε η δοκιμή της εμβάπτισης. Συγκεκριμένα, οι ολικοί ειδικοί όγκοι που προέκυψαν από τη δοκιμή της εμβάπτισης είναι μικρότεροι από εκείνους που έδωσε η πορομετρία υδραργύρου για τους πωρόλιθους Ρεθύμνου και Κύπρου ενώ ισχύει το αντίθετο για τον πωρόλιθο της Ρόδου. Οι ολικοί ειδικοί όγκοι που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους παρουσιάζονται από κοινού στο συγκριτικό πίνακα Ε.7.

Στον πίνακα Ε.7 φαίνεται καταρχάς ότι η πορομετρία υδραργύρου έδωσε μεγάλες τιμές για τους ολικούς ειδικούς όγκους των πωρόλιθων του Ρεθύμνου και της Κύπρου. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η μικρότερη διαφορά ανάμεσα στις τιμές του ολικού ειδικού όγκου που έδωσαν οι δύο διαφορετικές μέθοδοι παρουσιάζεται στον πωρόλιθο της Κύπρου ενώ η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται στον πωρόλιθο του Ρεθύμνου. Όσον αφορά την τιμή του ολικού ειδικού όγκου που έδωσε η πορομετρία υδραργύρου για τον πωρόλιθο της Ρόδου, αυτή είναι εσφαλμένη επειδή το πορόμετρο που χρησιμοποιήθηκε δεν έχει τη δυνατότητα να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για υλικά με πόρους ακτίνας μεγαλύτερης των 7 μm. Έτσι για τον πωρόλιθο της Ρόδου θεωρείται πιο αξιόπιστη η τιμή του ολικού ειδικού όγκου που προσδιορίστηκε με τη δοκιμή της εμβάπτισης σε απιονισμένο νερό. Επίσης, και στην περίπτωση της πορομετρίας υδραργύρου η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές των ολικών ειδικών όγκων παρουσιάζεται στον πωρόλιθο της Κύπρου.

Επιπρόσθετα, οι φαινόμενες πυκνότητες που προέκυψαν από την πορομετρία υδραργύρου παρουσιάζονται στον πίνακα Ε.8 δίπλα σε εκείνες που προσδιορίστηκαν από τη διαίρεση της μάζας των δοκιμίων που προέκυψε από τη ζύγισή τους με τον όγκο τους, με σκοπό την πραγματοποίηση συγκρίσεων. Η πορομετρία υδραργύρου παρέχει υψηλότερες τιμές φαινόμενων πυκνοτήτων για τους πωρόλιθους του Ρεθύμνου και της Κύπρου και χαμηλότερη τιμή για τον πωρόλιθο της Ρόδου από εκείνες που παρέχει η δεύτερη μέθοδος. Και σε αυτή την περίπτωση, η πορομετρία υδραργύρου θεωρείται λιγότερο αξιόπιστη για την περίπτωση του πωρόλιθου Ρόδου, αφού η μεγάλη μέση ακτίνα των πόρων του βρίσκεται έξω από τα όρια λειτουργίας του πορόμετρου.

Πίνακας Ε.6 Παράμετροι μικροδομής λίθων προερχόμενες από πορομετρία υδραργύρου

Είδος Λίθου	Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g)		Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)		Μέση Ακτίνα Πόρων (Micron)	
	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.
Μάρμαρο Διονύσου	1,38	0,07	0,03	0,01	0,12	0,12
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	111,37	4,21	2,10	0,02	0,31	0,03
Πωρόλιθος Κύπρου	109,70	9,27	5,17	0,26	3,37	0,54
Πωρόλιθος Ρόδου	52,92	5,28	1,38	0,25	32,09	1,40
	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)		Διορθωμένη Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)		Ολικό Πορώδες (%)	
	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.
Μάρμαρο Διονύσου	2,72	0,02	2,73	0,02	0,37	0,02
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	2,08	0,01	2,71	0,01	23,19	0,76
Πωρόλιθος Κύπρου	2,03	0,04	2,61	0,01	22,24	1,45
Πωρόλιθος Ρόδου	2,36	0,02	2,69	0,01	12,45	1,13

Πίνακας Ε.7 Ολικοί ειδικοί όγκοι προσβάσιμοι στο νερό των δομικών λίθων προσδιοριζόμενοι με δύο διαφορετικές μεθόδους: δοκιμή εμβάπτισης και πορομετρία υδραργύρου

Είδος λίθου	Ολικός ειδικός όγκος από δοκιμή εμβάπτισης (mm ³ /g)		Ολικός ειδικός όγκος από πορομετρία υδραργύρου (mm ³ /g)	
	M.T.	T.A.	M.T.	T.A.
Μάρμαρο Διονύσου			1,38	0,07
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	84,37	9,53	111,37	4,21
Πωρόλιθος Κύπρου	105,13	10,47	109,70	9,27
Πωρόλιθος Ρόδου	94,26	10,10	52,92	5,28

Σημείωση: - Μ.Τ.: Μέση Τιμή

- Τ.Α.: Τυπική Απόκλιση

Πίνακας Ε.8 Φαινόμενες πυκνότητες λίθων προσδιοριζόμενες με δύο τρόπους: με απλή ζύγιση και διαίρεση της μάζας με τον όγκο τους και με πορομετρία υδραργύρου

Είδος λίθου	Φαινόμενη πυκνότητα από διαίρεση της μάζας με τον όγκο των δοκιμίων (g/cm ³)		Φαινόμενη πυκνότητα από πορομετρία υδραργύρου (g/cm ³)	
	Μ.Τ.	Τ.Α.	Μ.Τ.	Τ.Α.
Μάρμαρο Διονύσου	2,70	0,024	2,72	0,02
Πωρόλιθος Ρεθύμνου	2,08	0,072	2,08	0,01
Πωρόλιθος Κύπρου	1,99	0,013	2,03	0,04
Πωρόλιθος Ρόδου	1,72	0,024	2,36	0,02

Σημείωση: - Μ.Τ.: Μέση Τιμή

- Τ.Α.: Τυπική Απόκλιση

E.8 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην Περίληψη και την Εισαγωγή, ο βασικότερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων που προέκυψαν από μετρήσεις με υπερήχους με τις στατικές ελαστικές σταθερές και τις παραμέτρους της μικροδομής του μαρμάρου Διονύσου, του πωρόλιθου Ρεθύμνου, του πωρόλιθου Κύπρου και του πωρόλιθου Ρόδου.

Η σπουδαιότητα αυτής της έρευνας έγκειται στο μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για τις μηχανικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μικροδομής των δομικών υλικών των ιστορικών κτιρίων με μη καταστρεπτικό τρόπο.

Τελικά, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο E.4, τα αποτελέσματα των δοκιμών της θλίψης δε θεωρούνται σωστά, πιθανώς λόγω πειραματικών σφαλμάτων. Αυτό συντελεί στο να μην μπορούν να πραγματοποιηθούν συσχετίσεις μεταξύ των ελαστικών σταθερών που προέκυψαν με μη καταστρεπτικό τρόπο και εκείνων που εξήχθησαν με τη βοήθεια των υπερήχων. Έτσι, παρουσιάζονται μόνο οι συσχετίσεις μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων που εξήχθησαν με τη βοήθεια της συσκευής υπερήχων Pundit και των ιδιοτήτων της μικροδομής των λίθων που προσδιορίστηκαν με άλλες μεθόδους. Οι συσχετίσεις αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια υπό μορφή γραφημάτων και σχολιάζονται.

Για την ευκολότερη ανάγνωση των γραφημάτων σημειώνεται προκαταρκτικά ότι αυτά που τα ζεύγη τιμών τους απεικονίζονται με τη μορφή γαλάζιων ρόμβων αφορούν τις συσχετίσεις των ελαστικών σταθερών των λίθων που προέκυψαν από την εξέταση των ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων δοκιμίων με τη μέθοδο των υπερήχων με τις παραμέτρους της μικροδομής τους ενώ εκείνα με του κίτρινους κύκλους αφορούν αποκλειστικά τις συσχετίσεις του συντελεστή υδαταπορρόφησης με τις υπόλοιπες ιδιότητες της μικροδομής των λίθων, που προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια των μικρών, κυβικών δοκιμίων.

E.8.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ PUNDIT ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Στα γραφήματα που παρατίθενται στο τέλος της παραγράφου (Εικόνα E.4) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της ταχύτητας διαδόσεως των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων, Cl' , με τις ποικίλες παραμέτρους της μικροδομής των λίθων. Όπως έχει ήδη σημειωθεί, τα γραφήματα αφορούν τις μετρήσεις ταχυτήτων που έγιναν στα πρισματικά δοκίμια. Βάσει της παρατηρήσεως αυτών μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

Η ταχύτητα Cl' των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων που μετρήθηκε στα πρισματικά δοκίμια συσχετίζεται πολύ στενά με λογαριθμική σχέση με το ολικό πορώδες ($r^2=0,8992$ – Εικόνα E.4) και με εκθετική σχέση με την πυκνότητα ($r^2=0,9395$ – Γράφημα Εικόνα E.4). Συγκεκριμένα φαίνεται μείωση της ταχύτητας των υπερήχων με την αύξηση του πορώδους και αύξηση της ταχύτητας με την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας.

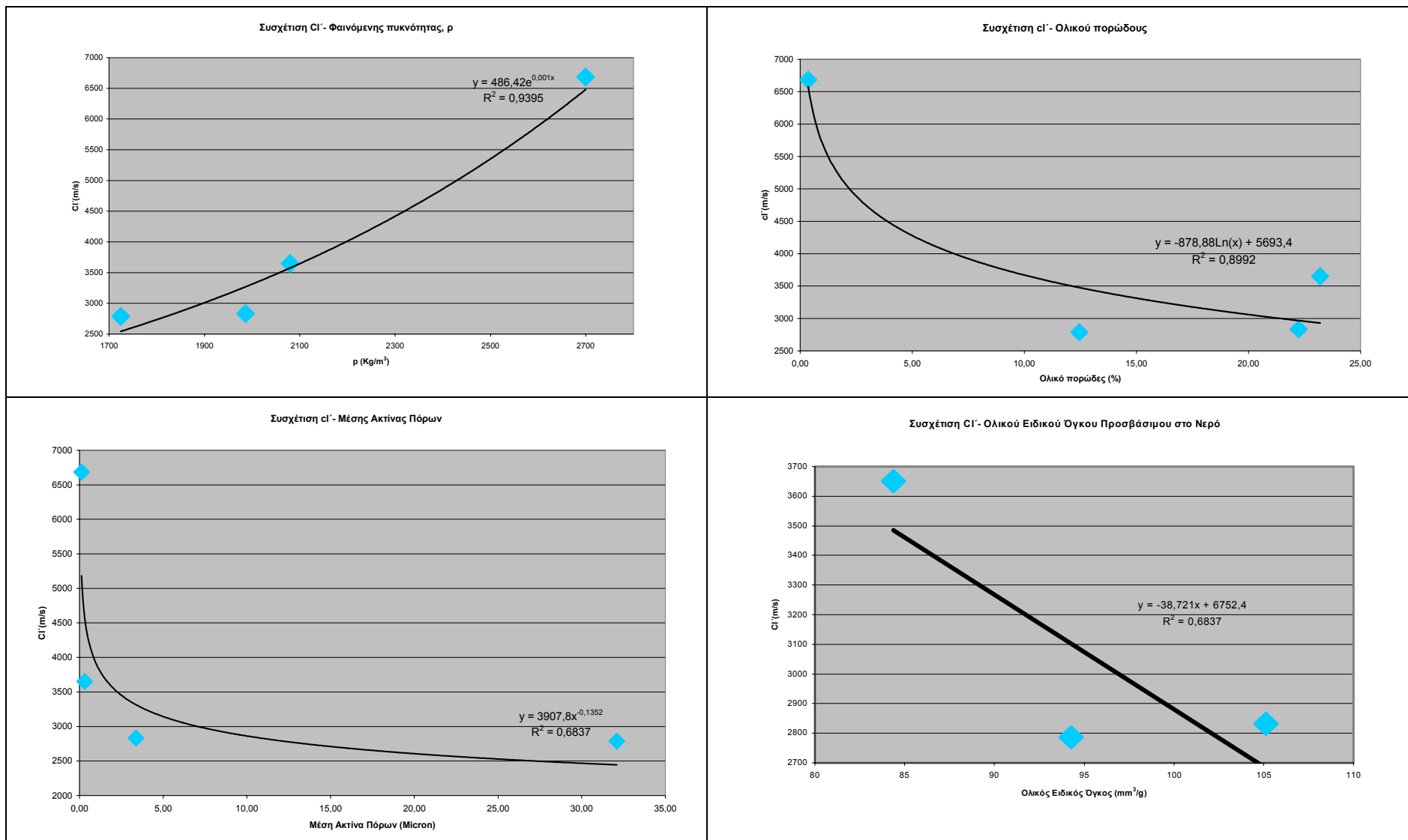
Επιπρόσθετα, παρατηρείται μία γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας των υπερήχων και του ολικού ειδικού όγκου ($r^2=0,6837$ -Εικόνα E.4) και μία σχέση υπερβολικής μορφής μεταξύ της ταχύτητας των υπερήχων και της μέσης ακτίνας των πόρων ($r^2=0,6837$ Εικόνα E.4). Μάλιστα, φαίνεται ότι με την αύξηση αυτών των δύο ιδιοτήτων της μικροδομής μειώνεται η ταχύτητα των υπερήχων.

Οι μαθηματικές σχέσεις που παρουσιάζουν τις συσχετίσεις των παραπάνω ιδιοτήτων παρουσιάζονται στον Πίνακα E.9).

Από όλα τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι τελικά η πυκνότητα είναι η παράμετρος που συσχετίζεται περισσότερο με την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων μέσα σε ένα δομικό λίθο.

Αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ λογικό, αφού όσο πιο πυκνό είναι ένα υλικό, τόσο λιγότερα κενά υπάρχουν στη μάζα του, τα οποία εξασθενίζουν τα υπερηχητικά κύματα. Επίσης, δεδομένου του ότι η φαινόμενη πυκνότητα συσχετίζεται μέσω των σχέσεων (Γ.2)–(Γ.4) με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E_d , και το δυναμικό μέτρο διάτμησης, G_d , και συγκεκριμένα αυτές οι ελαστικές σταθερές είναι ανάλογες της φαινόμενης πυκνότητας, επαγωγικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών

κυμάτων φανερώνει αυξημένες τιμές ελαστικών σταθερών, E_d και G_d . Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ενός υλικού είναι ανάλογη της πυκνότητάς του. Συνεπώς, αυξημένες ταχύτητες υπερηχητικών κυμάτων φανερώνουν και αυξημένη θλιπτική αντοχή των υλικών.



Εικόνα Ε.4 Γραφήματα συσχετίσεων ταχύτητας διάδοσης διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων συσκευής Pundit, Cl' με τις παραμέτρους μικροδομής των λίθων

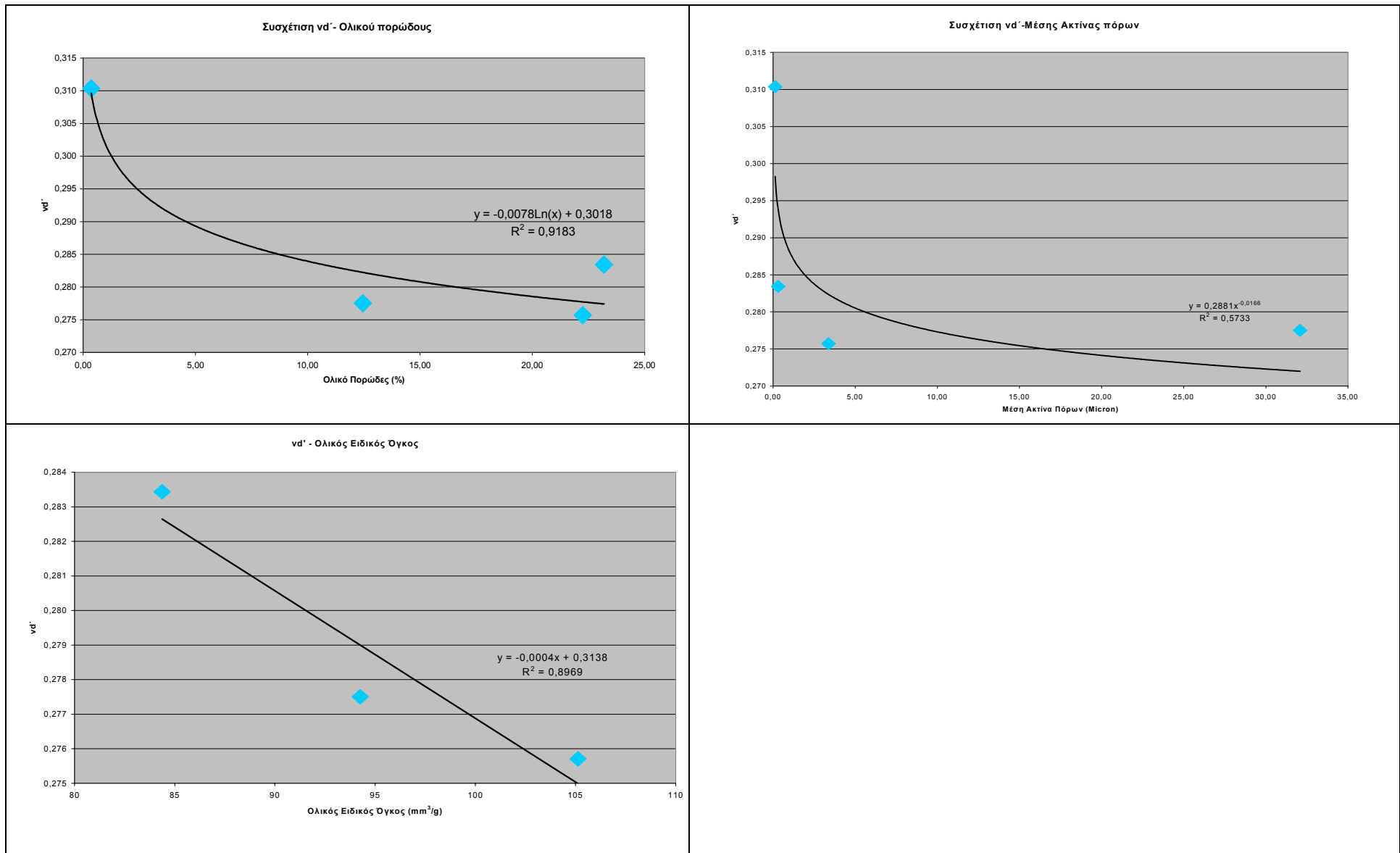
E.8.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ POISSON, ν_d' , ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Στα γραφήματα της Εικόνας E.5 παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ του δυναμικού λόγου Poisson, ν_d' και των παραμέτρων μικροδομής των τεσσάρων δομικών λίθων που εξετάζονται. Από την παρατήρησή τους μπορούν να σχολιαστούν τα εξής:

Μία πολύ στενή λογαριθμική συσχέτιση φαίνεται να υφίσταται μεταξύ του ν_d' και του ολικού πορώδους ($r^2=0,9183$ -Εικόνα E.5). Επίσης, πολύ σημαντική γραμμική σχέση ($r^2=0,8969$ Εικόνα-E.5) παρατηρείται ότι υπάρχει ανάμεσα στο λόγο του Poisson και τον ολικό ειδικό όγκο πόρων προσβάσιμων στο νερό. Το ν_d' μειώνεται όσο οι δύο παραπάνω ιδιότητες της μικροδομής αυξάνονται. Τέλος, υπερβολική συσχέτιση ($r^2=0,5733$ -Εικόνα E.5) υφίσταται μεταξύ του ν_d' και της μέσης ακτίνας των πόρων. Ο λόγος του Poisson μειώνεται με την αύξηση της μέσης ακτίνας των πόρων.

Οι ακριβείς εξισώσεις των συσχετίσεων των παραπάνω ιδιοτήτων παρουσιάζονται στον πίνακα E.9.

Όπως προκύπτει από τα προαναφερόμενα, το ολικό πορώδες είναι η παράμετρος της μικροδομής που συσχετίζεται περισσότερο με το δυναμικό λόγο του Poisson.



Εικόνα Ε.5 Γραφήματα συσχετίσεων λόγου Poisson προσδιοριζόμενου με τη συσκευή Pundit, ν_d' με τις παραμέτρους μικροδομής των λίθων

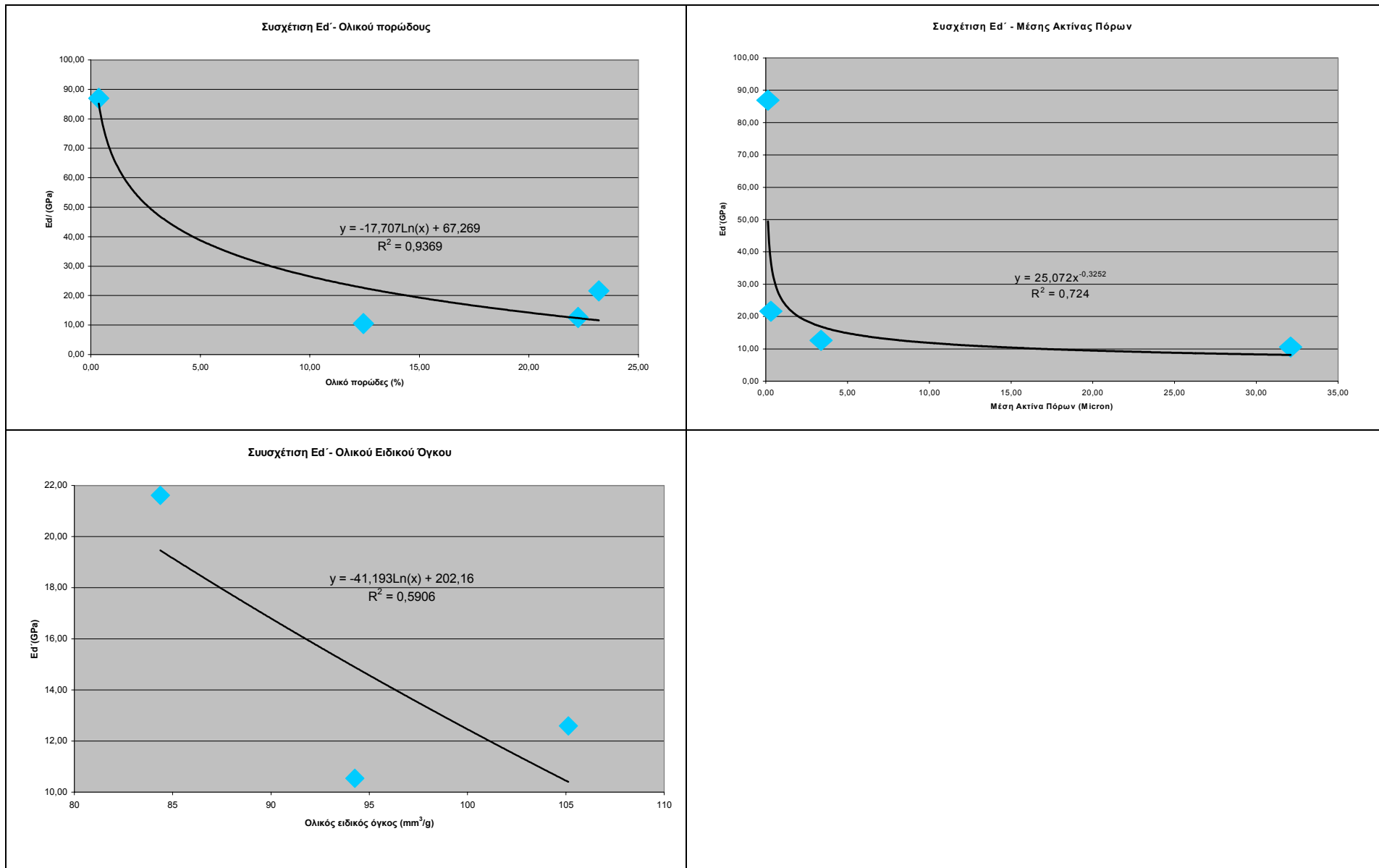
E.8.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ, E_d' , ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ

Στα γραφήματα της εικόνας E.6, παρουσιάζονται οι συσχετίσεις του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας των υλικών, E_d' , που προσδιορίστηκε από τον έλεγχο των πρισματικών δοκιμών με τις παραμέτρους της μικροδομής αυτών των υλικών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των γραφημάτων είναι τα ακόλουθα:

Καταρχάς φαίνεται να υφίσταται πολύ στενή λογαριθμική συσχέτιση ανάμεσα στο E_d' και το ολικό πορώδες των λίθων ($r^2=0,9369$ -Εικόνα E.6). Η αύξηση αυτής της ιδιότητας μικροδομής οδηγεί στη μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Επιπρόσθετα, πολύ στενή υπερβολική συσχέτιση υφίσταται μεταξύ του E_d' και της μέσης ακτίνας πόρων ($r^2=0,724$ -Εικόνα E.6). Μείωση της εν λόγω ιδιότητας μικροδομής οδηγεί στην ελάττωση του E_d' . Ακόμη, λογαριθμική σχέση υπάρχει ανάμεσα στο E_d' και τον ολικό ειδικό όγκο ($r^2=0,5906$ -Εικόνα E.6). Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας ελαττώνεται με την αύξηση του ολικού ειδικού όγκου.

Οι ακριβείς μαθηματικές εξισώσεις που συσχετίζουν τα προαναφερόμενα μεγέθη, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα E.9 μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισεως.

Όπως προκύπτει από τις προηγούμενες παρατηρήσεις, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E_d' , συσχετίζεται περισσότερο με το ολικό πορώδες από τις παραμέτρους της μικροδομής.



Εικόνα Ε.6 Γραφήματα συσχετίσεων μέτρου ελαστικότητας προσδιοριζόμενου με τη συσκευή Pundit, Ed' με τις παραμέτρους μικροδομής των λίθων

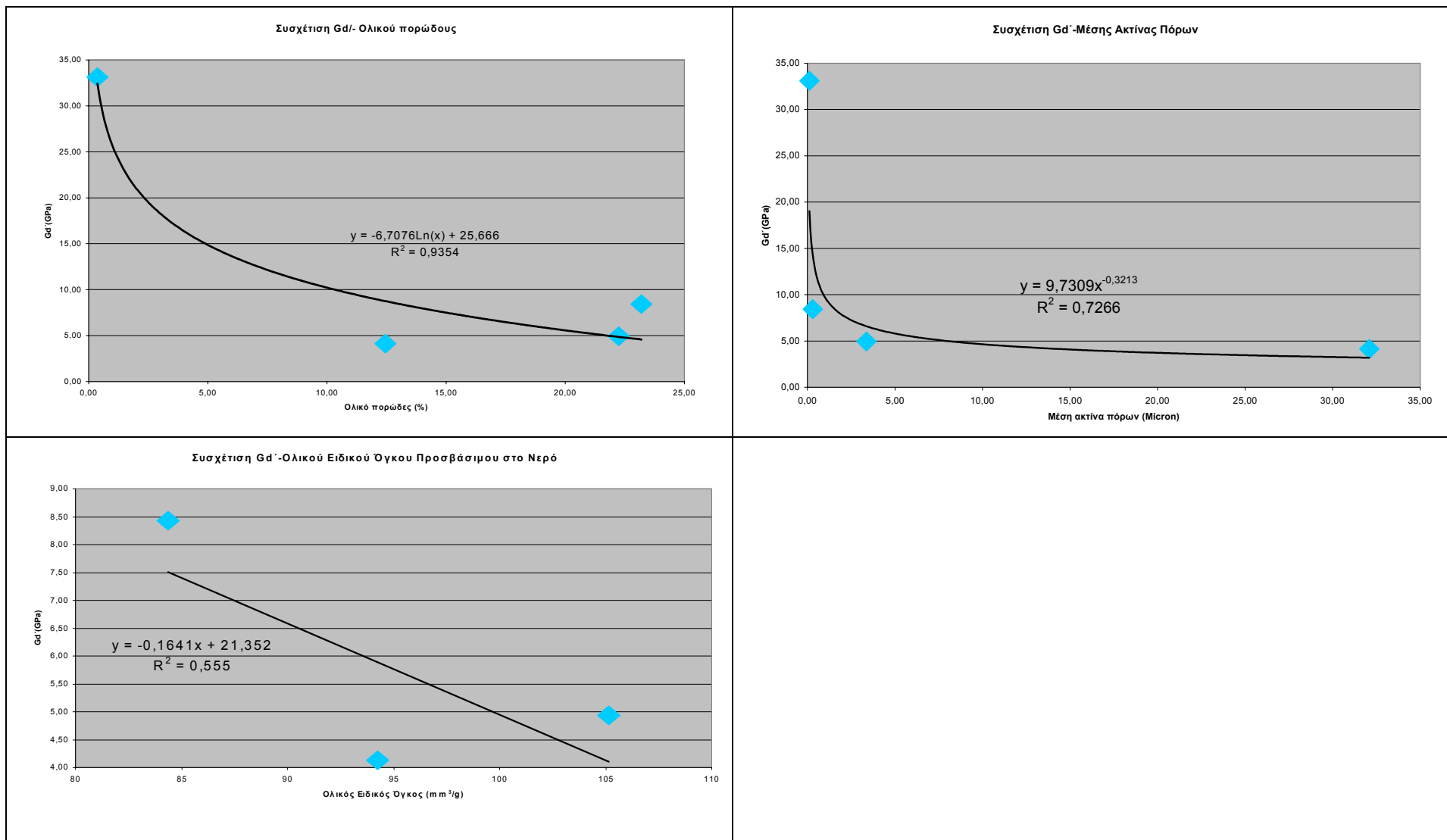
E.8.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ, Gd' ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ

Τα γραφήματα της εικόνας E.7 παρουσιάζουν τις συσχετίσεις του δυναμικού μέτρου διάτμησης των λίθων, Gd' , όπως αυτό προέκυψε από την εξέταση με υπερήχους των πρισματικών δοκιμίων, με τις παραμέτρους μικροδομής των ίδιων υλικών. Από τα γραφήματα βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

Πολύ στενή λογαριθμική συσχέτιση υφίσταται μεταξύ του Gd' και του ολικού πορώδους ($r^2=0,9354$ -Εικόνα E.7). Η τιμή του Gd' ελαττώνεται με την αύξηση του ολικού πορώδους.

Επιπρόσθετα, σχέση υπερβολικής μορφής ($r^2=0,7266$ -Εικόνα E.7) συνδέει το μέτρο διάτμησης με τη μέση ακτίνα πόρων και γραμμική σχέση ($r^2=0,555$ -Εικόνα E.7) συνδέει το μέτρο διάτμησης με τον ολικό ειδικό όγκο. Η ελάττωση των τιμών αυτών των παραμέτρων μικροδομής φαίνεται να συσχετίζεται με την αύξηση του Gd' .

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το ολικό πορώδες είναι η παράμετρος της μικροδομής που ελέγχει περισσότερο από κάθε άλλη το δυναμικό μέτρο διάτμησης των υλικών.



Εικόνα Ε.7 Γραφήματα συσχετίσεων μέτρου διάτμησης προσδιοριζόμενου με τη συσκευή Pundit, Gd' με τις ιδιότητες μικροδομής των λίθων

E.8.5 ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΛΙΘΩΝ

Πολύ στενές γραμμικές συσχετίσεις φαίνεται να υφίστανται μεταξύ του συντελεστή υδαταπορρόφησης των δομικών λίθων και της πυκνότητάς τους ($r^2=0,9961$ -Εικόνα E.8.1), του ολικού πορώδους τους ($r^2=0,9871$ - Εικόνα E.8.1) και, τέλος, της μέσης ακτίνας πόρων τους ($r^2=0,9888$ - Εικόνα E.8.1).

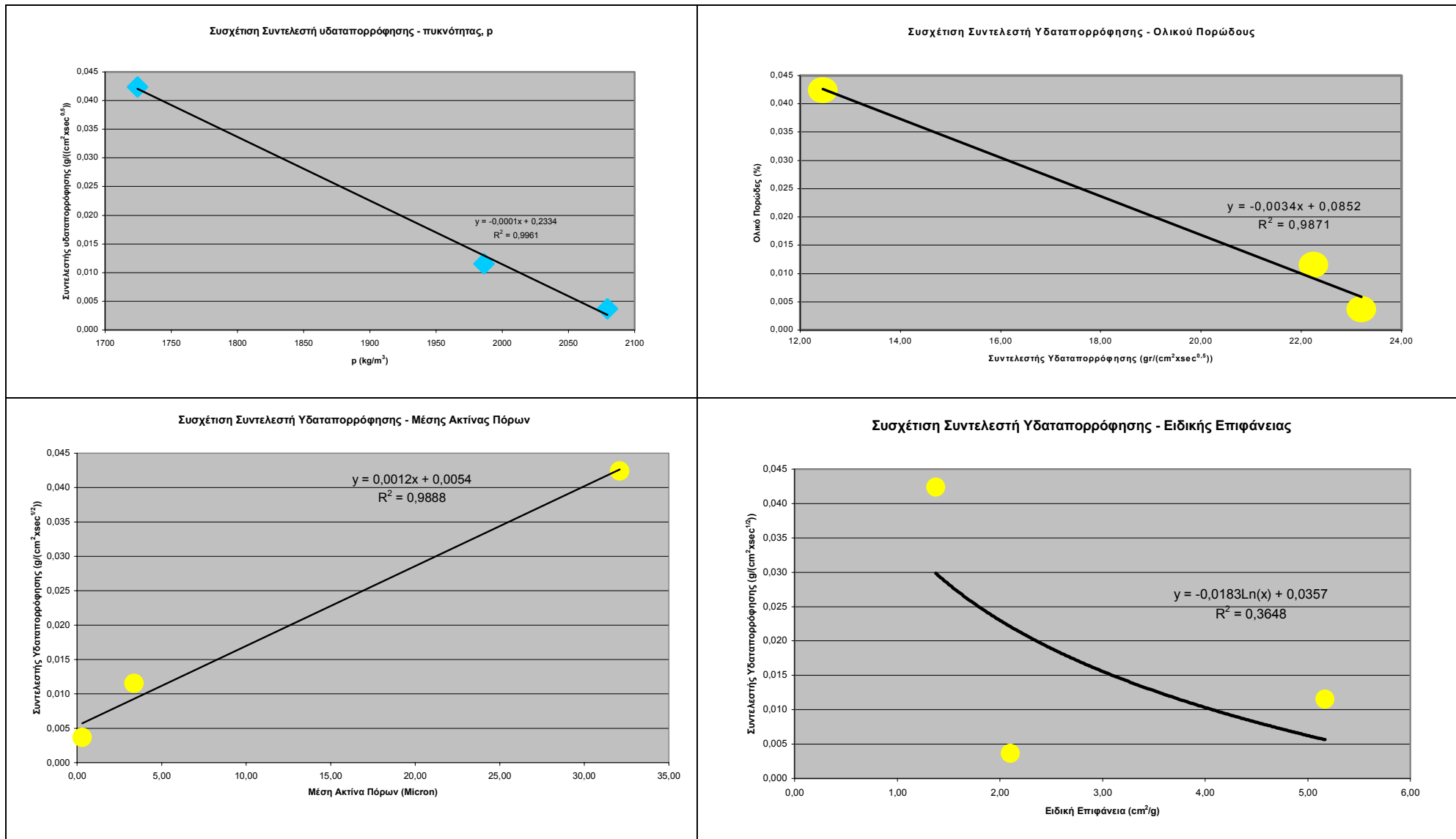
Επίσης, λογαριθμική συσχέτιση φαίνεται να υπάρχει ανάμεσα στο συντελεστή υδαταπορρόφησης και την ειδική επιφάνεια ($r^2=0,3648$ - Εικόνα E.8.1) ενώ υπερβολική συσχέτιση υπάρχει ανάμεσα σε αυτόν και τον ολικό ειδικό όγκο ($r^2=0,2229$ -Εικόνα E.8.2).

Αναλυτικά, η αύξηση της πυκνότητας, της ειδικής επιφάνειας και του ολικού πορώδους φαίνεται να συντελούν στη μείωση του συντελεστή υδαταπορρόφησης ενώ η αύξηση του ολικού ειδικού όγκου ή της μέσης ακτίνας των πόρων δείχνουν να οδηγούν στην αύξηση του συντελεστή υδαταπορρόφησης των υπό μελέτη δομικών λίθων. Τέλος, φαίνεται ότι η ιδιότητα της μικροδομής που επηρεάζει περισσότερο το συντελεστή υδαταπορρόφησης είναι η πυκνότητα των υλικών.

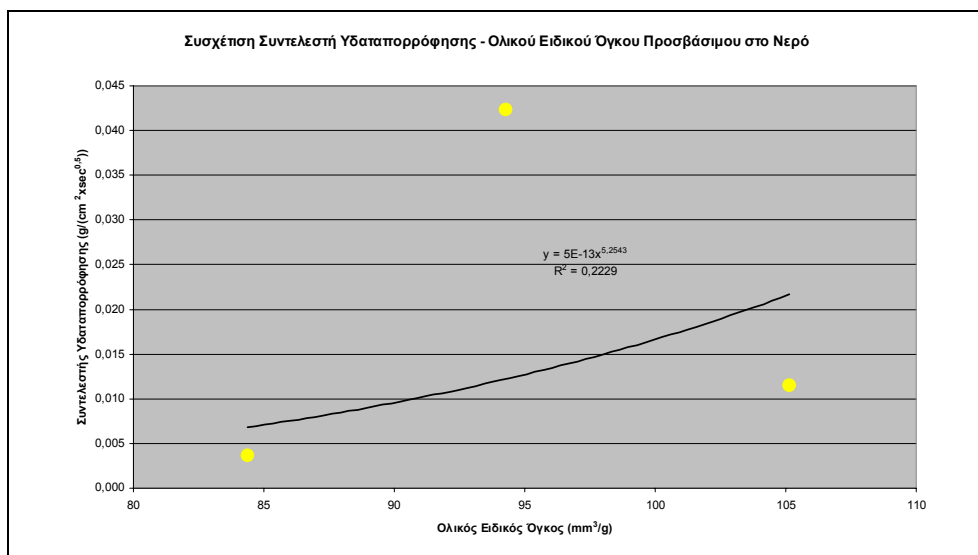
Από τα παραπάνω συμπεράσματα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με επιφύλαξη αυτό που αφορά τη γραμμική σχέση ανάμεσα στο συντελεστή υδαταπορρόφησης και το ολικό πορώδες, η οποία υποδεικνύει μείωση του συντελεστή υδαταπορρόφησης με την αύξηση του ολικού πορώδους. Αυτό το ίσως εσφαλμένο συμπέρασμα προέκυψε από την ανακριβή μέτρηση του ολικού πορώδους του πωρόλιθου της Ρόδου που πραγματοποίησε το πορόμετρο υδραργύρου.

Παραταύτα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι είναι δυνατό να υπάρχουν λίθοι με μικρό πορώδες που να χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο συντελεστή υδαταπορρόφησης από άλλους λίθους με μεγαλύτερο πορώδες. Αυτό οφείλεται στο ότι η είσοδος του νερού μέσα στο λίθο δεν εξαρτάται μόνο από τον όγκο των κενών αλλά και από τη μορφή και το μέγεθός τους. Μεγάλοι και ευθύγραμμοι πόροι επιτρέπουν εύκολα την είσοδο του νερού. Αντίθετα, πολύ μικροί (υποτριχοειδείς) και δαιδαλώδεις πόροι και πόροι που δε συγκοινωνούν μεταξύ τους (κυψελωτοί) δυσχεραίνουν πολύ και κάνουν αδύνατο τον εμποτισμό του λίθου με νερό (21).

Στον Πίνακα Ε.9 που ακολουθεί αμέσως μετά, γίνεται η παρουσίαση των μαθηματικών εξισώσεων που συνδέουν το συντελεστή υδαταπορρόφησης με τις άλλες ιδιότητες της μικροδομής των λίθων.



Εικόνα Ε.8.1 Γραφήματα συσχετίσεων συντελεστή υδαταπορρόφησης με τις υπόλοιπες παραμέτρους μικροδομής των λίθων



Εικόνα Ε.8.2 Γραφήματα συσχέτισεων συντελεστή υδαταπορρόφησης με τις υπόλοιπες παραμέτρους μικροδομής των λίθων (συνέχεια)

E.8.6 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΛΙΘΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΣ

Στον ακόλουθο Πίνακα E.9 παρουσιάζονται συνοπτικά όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους E.8.1 – E.8.5 για τις σχέσεις που συνδέουν τις διάφορες μηχανικές ιδιότητες με τις παραμέτρους μικροδομής των τεσσάρων δομικών λίθων που μελετήθηκαν.

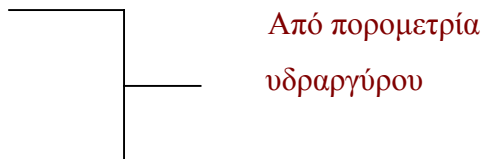
Πίνακας E.9 Εξισώσεις συσχέτισεων των ιδιοτήτων των λίθων και αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης

Συσχετιζόμενες Ιδιότητες	Εξίσωση Συσχέτισης	r²
Ορθογώνια Παραλληλεπίπεδα Δοκίμια		
Cl' (m/s) – p (Kg/m ²)	$Y = 486,42e^{0,001x}$	0,9025
Cl' (m/s) – Ο.Π. (%)	$Y = -878,88\text{Ln}(x) + 5693,4$	0,8992
Cl' (m/s) – Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)	$Y = -38,721x + 6752,4$	0,6837
Cl' (m/s) – Μ.Α.Π. (Micron)	$Y = 3907,8x^{-0,1352}$	0,6837
vd' - Ο.Π. (%)	$Y = -0,0078\text{Ln}(x) + 0,3018$	0,9183
vd' - Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)	$Y = -0,0004x + 0,3138$	0,8969
vd' - Μ.Α.Π. (Micron)	$Y = 0,2881x^{-0,0166}$	0,5733
Ed' (GPa) - Ο.Π. (%)	$Y = -17,707\text{Ln}(x) + 67,269$	0,9369
Ed' (GPa) - Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)	$Y = -41,193\text{Ln}(x) + 202,16$	0,5906
Ed' (GPa) - Μ.Α.Π. (Micron)	$Y = 2\,5,072x^{-0,3252}$	0,724
Gd' (GPa) - Ο.Π. (%)	$Y = -6,7076\text{Ln}(x) + 25,666$	0,9354
Gd' (GPa) – Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)	$Y = -0,1641x + 21,352$	0,555
Gd' (GPa) - Μ.Α.Π. (Micron)	$Y = 9,7309x^{-0,3213}$	0,7266
Κυβικά Δοκίμια		
$\Sigma.Y. \left(\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{sec}} \right) - p \text{ (Kg/m}^2\text{)}$	$Y = -0,0001x + 0,2334$	0,9961
$\Sigma.Y. \left(\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{sec}} \right) - \text{Ο.Π. (\%)} $	$Y = -0,0034x + 0,0852$	0,9871

Συσχετιζόμενες Ιδιότητες	Εξίσωση Συσχέτισης	r ²
Σ.Υ. ($\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{sec}}$) - Ε.Ε. (m ² /g)	Y = -0,0183Ln(x) + 0,0357	0,3648
Σ.Υ. ($\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{sec}}$) - Ο.Ε.Ο. (mm ³ /g)	Y = 5E - 13x ^{5,2543}	0,2229
Σ.Υ. ($\frac{g}{cm^2 \cdot \sqrt{sec}}$) - Μ.Α.Π. (Micron)	Y = 0,0012x + 0,0054	0,9888

Υπόμνημα συντομογραφιών και συμβόλων Πίνακα Ε.9:

- Cl' : Ταχύτητα διαδόσεως των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων της συσκευής Pundit .
- vd' : Δυναμικός λόγος του Poisson προσδιοριζόμενος από μετρήσεις με τη Pundit
- Ed' : Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας προσδιοριζόμενο από μετρήσεις με τη Pundit
- Gd' : Δυναμικό μέτρο διάτμησης προσδιοριζόμενο από μετρήσεις με τη Pundit
- Σ.Υ. : Συντελεστής υδαταπορρόφησης (από τις δοκιμές υδαταπορρόφησης)
- Ο.Ε.Ο. : Ολικός ειδικός όγκος πόρων προσβάσιμων στο νερό (από τις δοκιμές εμφύσησης)
- P : Φαινόμενη Πυκνότητα (από απλές ζυγίσεις μάζας και μετρήσεις διαστάσεων)
- Ο.Π. : Ολικό Πορώδες
- Ε.Ε. : Ειδική Επιφάνεια
- Μ.Α.Π. : Μέση ακτίνα πόρων



Από την παρατήρηση του παραπάνω πίνακα γίνεται προφανές ότι το ολικό πορώδες των δομικών λίθων είναι η παράμετρος της μικροδομής τους που συσχετίζεται περισσότερο με όλες τις μηχανικές τους ιδιότητες. Επίσης, το ολικό πορώδες, η μέση ακτίνα πόρων καθώς επίσης και η φαινόμενη πυκνότητα, συσχετίζονται πολύ στενά με το συντελεστή υδαταπορρόφησης των λίθων.

Τελικά, από όσα προηγούνται, προκύπτει το συμπέρασμα ότι αναμφισβήτητα οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών συσχετίζονται με τις ιδιότητες της μικροδομής τους. Οι αρκετά υψηλοί συντελεστές συσχέτισης που προσδιορίστηκαν, στηρίζουν αυτή τη διαπίστωση. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι η μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων των υπερήχων μέσα στη μάζα ενός δομικού λίθου μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για τις ιδιότητες της μικροδομής του χωρίς την απαίτηση πραγματοποίησης καταστρεπτικών δοκιμών σε δοκίμιά του. Οι τελευταίες, μάλιστα, είναι δύσκολο να γίνουν στην περίπτωση των λίθων που ανήκουν σε κτίρια με ιδιαίτερο ιστορικό ή καλλιτεχνικό ενδιαφέρον που προστατεύονται από ποικίλους διεθνείς χάρτες και διατάξεις.

ΣΤ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συζήτηση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου Ε, τα οποία αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες και τις παραμέτρους της μικροδομής των τεσσάρων ειδών δομικών λίθων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας, καταλήγει κανείς στα εξής:

Οι τέσσερις λίθοι που μελετήθηκαν καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών μηχανικών ιδιοτήτων και παραμέτρων μικροδομής.

Η μελέτη της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων μέσα στη μάζα των λίθινων δοκιμίων, που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δύο διαφορετικών συσκευών, της USIP 11 της εταιρίας Krautkramer και της Pundit της εταιρίας CNS Electronics, έδωσε την εξής σειρά κατάταξης των υλικών, ξεκινώντας από αυτό στο οποίο παρουσιάζονται οι μέγιστες ταχύτητες: 1) μάρμαρο Διονύσου, 2) πωρόλιθος Ρεθύμνου, 3) πωρόλιθος Κύπρου και 4) πωρόλιθος Ρόδου. Αποδείχτηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας των υλικών και μάλιστα κατά εκθετικό τρόπο. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η συσκευή Pundit δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες ταχύτητες από τη συσκευή USIP 11. Το υλικό που χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση στις τιμές διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων μέσα στα πρισματικά δοκίμιά του είναι ο πωρόλιθος του Ρεθύμνου, γεγονός που φανερώνει μεγαλύτερη ανομοιογένεια στο συγκεκριμένο υλικό.

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων φάνηκε να επηρεάζεται και από τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του δοκιμίου. Έτσι, στα κυλινδρικά δοκίμια οι μετρούμενες ταχύτητες ήταν μικρότερες από ότι στα πρισματικά. Πράγματι, στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων, το μήκος που διανύει ο υπέρηχος είναι μεγαλύτερο από αυτό που διανύει στα πρισματικά και έτσι συναντά περισσότερα κενά στην πορεία του, που επιβραδύνουν τη διάδοσή του.

Επιπρόσθετα, η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων φάνηκε να επηρεάζεται και από την παρουσία υγρασίας στους δομικούς λίθους και συγκεκριμένα παρουσίασε αύξηση 5,29 % στον πωρόλιθο Ρεθύμνου, 16,67 % στον πωρόλιθο Κύπρου και 16,07 % στον πωρόλιθο Ρόδου στην περίπτωση των κορεσμένων με απιονισμένο νερό δοκιμίων συγκριτικά με την περίπτωση των ξηρών δοκιμίων. Το υλικό με το μεγαλύτερο ολικό ειδικό όγκο, δηλαδή ο πωρόλιθος Ρεθύμνου ($85,02 \text{ mm}^3$), παρουσιάζει και μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων.

Τέλος, όσον αφορά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των ελαστικών σταθερών που προσδιορίστηκαν βάσει μαθηματικών σχέσεων, στις οποίες εμπεριέχονται οι μετρούμενες ταχύτητες των υπερήχων που έδωσαν οι δύο διαφορετικές συσκευές, είναι παραπλήσιες μεταξύ τους και συμφωνούν με τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Αυτό επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των μετρήσεων των δύο συσκευών και αποδεικνύει τη χρησιμότητα της μεθόδου των υπερήχων στο μη καταστρεπτικό προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών των δομικών υλικών, που είναι ιδιαίτερα σημαντικός στις περιπτώσεις μελετών αποκατάστασης ιστορικών κτιρίων.

Κατά τη μελέτη των παραμέτρων της μικροδομής των δομικών λίθων, η φαινόμενη πυκνότητά τους προσδιορίστηκε με δύο διαφορετικές μεθόδους. Η πρώτη ήταν η απλή ζύγιση των δοκιμίων τους και η διαίρεση της μάζας με τον όγκο τους. Η δεύτερη ήταν η πορομετρία υδραργύρου. Οι δύο αυτές μέθοδοι έδωσαν σχεδόν ίδιες τιμές φαινόμενων πυκνοτήτων για το μάρμαρο του Διονύσου και για τους πωρόλιθους του Ρεθύμνου και της Κύπρου. Στον πωρόλιθο της Ρόδου, όμως, υπήρξε αρκετά μεγάλη διαφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι το πορόμετρο του εργαστηρίου δεν είναι σε θέση να πραγματοποιήσει ακριβείς μετρήσεις σε ένα υλικό με τόσο μεγάλους πόρους όσο του πωρόλιθου της Ρόδου.

Ο ολικός ειδικός όγκος των λίθων προσδιορίστηκε επίσης με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η δοκιμή της εμβάπτισης και ο δεύτερος η πορομετρία υδραργύρου. Η δοκιμή της εμβάπτισης έδωσε μικρότερες τιμές για τους ολικούς ειδικούς όγκους των πωρόλιθων Ρεθύμνου και Κύπρου από εκείνες που έδωσε η πορομετρία υδραργύρου ενώ για τον πωρόλιθο της Ρόδου συνέβη το αντίθετο. Πιο αξιόπιστα θεωρούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών εμβάπτισης από αυτά της πορομετρίας υδραργύρου για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω στην περίπτωση των τιμών των φαινόμενων πυκνοτήτων.

Οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών των διαφόρων ιδιοτήτων των εξεταζόμενων δομικών λίθων δείχνουν το κατά πόσο είναι ομοιογενής καθένας από αυτούς ή όχι. Κατά τη μελέτη των υλικών δεν παρουσίαζε κάποιο συγκεκριμένο από αυτά τη μεγαλύτερη ή τη μικρότερη τυπική απόκλιση στις τιμές όλων των ιδιοτήτων του και έτσι δε θα μπορούσε γενικά να χαρακτηριστεί ένα από αυτά ως πιο ομοιογενές από τα υπόλοιπα. Γενικά, όπως ήδη αναφέρθηκε, από τις τιμές των ελαστικών σταθερών στα πρισματικά λίθινα δοκίμια φαίνεται ως πιο ανομοιογενές υλικό ο πωρόλιθος του

Ρεθύμνου . Από τις τιμές των ελαστικών σταθερών στα κυλινδρικά δοκίμια, όμως, προκύπτει ότι τα μάρμαρο του Διονύσου είναι το πιο ανομοιογενές υλικό ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες. Για την ομοιογένεια των λίθων ως προς τη μικροδομή των λίθων δεν είναι δυνατό να ειπωθεί κάτι γενικό.

Ο έλεγχος της ύπαρξης συσχετίσεων ανάμεσα στις μηχανικές ιδιότητες των λίθων και τις παραμέτρους της μικροδομής τους έδειξε ότι σαφέστατα υφίστανται τέτοιου είδους σχέσεις, πράγμα που σημαίνει ότι η μηχανική συμπεριφορά των συγκεκριμένων δομικών υλικών εξαρτάται από τη μικροδομή τους. Βέβαια, οι μηχανικές ιδιότητες δεν παρουσιάζουν το ίδιο στενές συσχετίσεις με όλες τις παραμέτρους της μικροδομής. Όπως φαίνεται, η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων συσχετίζεται περισσότερο με τη φαινόμενη πυκνότητα και το ολικό πορώδες και οι ελαστικές σταθερές των λίθων, οι οποίες προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια της συσκευής Pundit, συσχετίζονται πιο στενά με το ολικό πορώδες από ότι με τις άλλες παραμέτρους της μικροδομής.

Τέλος, όσον αφορά το συντελεστή υδαταπορρόφησης, των δομικών λίθων, αυτός φαίνεται να συσχετίζεται πολύ στενά με την πυκνότητά τους, το ολικό ανοιχτό πορώδες τους και τη μέση ακτίνα των πόρων τους. Ο συντελεστής υδαταπορρόφησης μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας και του ολικού ανοιχτού πορώδους και αυξάνεται ανάλογα προς την αύξηση της μέσης ακτίνας των πόρων.

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία θα μπορούσε αν χρησιμοποιηθεί ως βάση για άλλες μελλοντικές ερευνητικές εργασίες, που θ' αποτελούσαν την επέκτασή της. Στα πλαίσια αυτών, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθούν εκ νέου οι δοκιμές των μηχανικών αντοχών των δομικών λίθων που εξετάστηκαν, έτσι ώστε να επιβεβαιωθούν οι τιμές των ελαστικών σταθερών τους που προέκυψαν από την εφαρμογή της μη καταστρεπτικής μεθόδου των υπερήχων.

Επίσης, θα ήταν ενδιαφέρον να πραγματοποιηθούν δοκιμές μηχανικών αντοχών και να εφαρμοστεί η μέθοδος των υπερήχων σε δοκίμια διαφόρων διαστάσεων, έτσι ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαστάσεις των δοκιμίων τις πειραματικά λαμβανόμενες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Τέλος, για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία και η γενική ισχύς των συμπερασμάτων που εξήχθησαν στην παρούσα έρευνα για τις συσχετίσεις που υφίστανται ανάμεσα στις μηχανικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μικροδομής των δομικών λίθων, θα είναι ενδιαφέρουσα η μελλοντική πραγματοποίηση μίας ανάλογης ερευνητικής εργασίας,

στην οποία θα εξεταστούν περισσότερα από τέσσερα είδη δομικών λίθων με ιδιότητες που θα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών.

Z. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) Christaras B., Auger F., Mosse E. (1994), “Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods”, *Materials and Structures*, vol. 27, pp. 222 – 228.
- (2) Τριανταφύλλου Θ. Χ. (1995), «Δομικά Υλικά», 1^η έκδοση, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα .

- (3) Μπούρας Χ. Θ. (1991), «Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής – 1^{ος} τόμος», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- (4) Βγενόπουλος Ανδρέας (2000), «Γενική Ορυκτολογία (Σημειώσεις από την παράδοση)», Τυπογραφείο Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- (5) Δεμίρης Κ. Α. (1986), «Τεχνική Γεωλογία – Μέρος Α΄: Γεωλογικοί Σχηματισμοί», 1^η ανατύπωση, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- (6) Αυγουστίδης Κ. (1973), «Εγχειρίδιο γενικής γεωλογίας, Μέρος Ι», Αθήνα.
- (7) Δεμίρης Κ. (1978), «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας», Θεσσαλονίκη.
- (8) HMSO (1976), “Manual of applied geology for engineers”, Institution of Civil Engineering, London.
- (9) Knill J. (1975), “An introduction to engineering geology”, Ground engineering, Vol. 9, No 3, London.
- (10) Legget R. (1967), “Geology and engineering”, Mc Graw Hill, London.
- (11) Μελέντης Ι. (1982), «Γεωλογία», Μέρος Α και Β, Θεσσαλονίκη.
- (12) Παντελόπουλος Π. (1974), Στοιχεία Γεωλογίας – Ορυκτολογίας, Αθήνα.
- (13) Χρηστάρας Β. (1998), «Φυσικοί δομικοί λίθου», Σημειώσεις για το Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Ε.Μ.Π.: «Προστασία Μνημείων» – Β΄κατευθυνση: «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- (14) Geological Society Group working Party Report (1977), “The description of rock masses for engineering purposes”, Quart. J. Eng. Geol., vol. 10, 4, pp. 355-388.
- (15) NAVFAC (1971), “Design Manual DM-7. Soil mechanics, Foundations and earth structures, Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Va.
- (16) Winkler E.M. (1994, 1997), “Stone in Architecture – Properties, Durability”, 3rd Edition, Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg, Germany.
- (17) Bieniawski, Z.T. (1975), “The point-load test in geotechnical practice”, Eng. Geol., Vol. 9, pp. 1-11.
- (18) Brock, E. & Franklin, J.A. (1972), “The point-load strength test”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9 pp. 669-697.
- (19) Παπαγεωργάκης Ι. & Κουμαντάκης Ι. (1984), «Τεχνική πετρογραφία» Ε.Μ.Π., Αθήνα
- (20) Tsoutrelis, T.C. (1968), “An investigation on the effects of the physical properties of rocks on the speed of penetration by diamond drilling”, Geol. Geogr. Res., Athens, pp 1-259.
- (21) Λεγάκης Α. Α. (1982), «Δομικά Υλικά», Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.

- (22) Christaras B. (1994), “Anisotropy effects on the elastic parameters of rocks; determination using ultrasonic techniques”, 7th intern. Congr. Geol. Soc. Gr., XXX. 4, pp. 381-387.
- (23) Μοροπούλου Α. (2001), Σημειώσεις για το μάθημα: «Επιστήμη και Τεχνική των Δομικών υλικών και Αρχιτεκτονικών Επιφανειών» του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Π.: «Προστασία Μνημείων – Β’κατεύθυνση : Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», σελ. 140 - 144.
- (24) Cavallini T., Massa S., Traversi L., “Environment and deterioration of the monuments of Bari”, Proc. 4th Int. Symp. on the *Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin*, Edited by A. Moropoulou, F. Fezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol. 2, pp. 67 – 77.
- (25) Academy editions (1994), “Acropolis Restoration”, London.
- (26) Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University (2002), “History of Ultrasonics”, Ames, IA.
- (27) Πρασιανάκης Ι. (1993), «Μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών. Η μέθοδος των υπερήχων», Γ’ έκδοση, Αθήνα.
- (28) Πρασιανάκης Ι. και Κουρκουλής Σ. (1998), «Σημειώσεις για τα Εργαστήρια Πειραματικής Αντοχής Υλικών», Τυπογραφείο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- (29) Πρασιανάκης Ι., Κωνσταντέλος Β. και Μήλιος Ι. (1988), «Πειραματική Αντοχή Υλικών», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα .
- (30) Βιντζηλαίου Ε. (2001), Σημειώσεις για το μάθημα: «Εισαγωγή στην Παθολογία και Αποκατάσταση Μνημείων και Υλικών» του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Π.: «Προστασία Μνημείων – Β’κατεύθυνση: Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», σελ. 2.
- (31) McCann D. M. and Forde M. C. (2001), “Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures”, NDT & E International, vol. 34, pp. 71 – 84.
- (32) Hernandez M. G., Izquierdo M. A. G., Ibanez A., Anaya J. J. and Ullate L. G. (2000), “Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE”, Ultrasonics, vol. 38, issues 1 – 8, pp. 531 – 533.
- (33) Hernández M. G., Anaya J. J., Izquierdo M. A. G., Ullate L. G. (2002), “Application of micromechanics to the characterization of mortar by ultrasound”, Ultrasonics, vol. 40, pp. 217 – 221.
- (34) Zhang B. (1988), “Relationship Between Pore Structure and Mechanical Properties of Ordinary Concrete Under Bending Fatigue”, Cement and Concrete Research, Vol. 28, Issue 5, pp. 699 – 711.
- (35) Qasrawi Hisham Y. (2000), “Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted”, Cement and Concrete Research, vol. 30, issue 5. pp. 739 – 746.

- (36) Martin L. P., Lindgren E. A., Rosen M. and Sidhu H. (2000), "Ultrasonic determination of elastic moduli in cement during hydrostatic loading to 1 Gpa", *Materials Science and Engineering A*, vol. 279, issues 1-2, pp. 87 – 94.
- (37) Prachoomchit Teeranij (1991), "The estimation of concrete strength by an ultrasonic pulse technique", Diploma Thesis, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Thailand.
- (38) Vergara L., Miralles R., Gosalbeth J., Juanes F. J., Ullate L. G., Anaya J. J., Hernandez G. and Izquierdo M.A.G. (2001), "NDT & E International, vol. 34, issue 8, pp. 557 – 562.
- (39) Cazalla O., Sebastian E., Cultrone G., Nechar M. and Bagur M. G. (1999), "Three – way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, issue 11, pp. 1749 – 1752.
- (40) Garc'a V.J. and Schilling C. H. (1998), "Models Relating Ultrasonic Velocity to the Microstructures of Green and Sintered Ceramics", *Ceramic Transactions*, vol. 67, *Nondestructive Evaluation of Ceramics*, C. H. Schilling and J. N. Gray, editors, American Ceramic Society, Westville, Ohio, 1998, pp. 67 – 82.
- (41) Kim Jeongguk and Liaw Peter K. (1998), "The Nondestructive Evaluation of Advanced Ceramics and Ceramic Matrix Composites", *JOM*, vol. 50, no 11.
- (42) Chang L. – S., Chuang T. – H. and Wei W. J. (2000), "Characterization of alumina ceramics by ultrasonic testing", vol. 45, issue 3, pp. 221 – 226.
- (43) Wanner A. (1998), "Elastic modulus measurements of extremely porous ceramic materials by ultrasonic phase spectroscopy", *Materials Science and Engineering A*, vol. 248, issues 1-2, pp. 35 – 43.
- (44) Nicholson Patric S., "Ultrasonic NDE of Advanced Ceramics", *Proc. Int. Symposium Nondestructive characterization of Materials*, (eds. P. Holler – V. Hauk – G. Dobmann – C. Ruud and R. Green), Saarbrucken, FRG, 1998, pp. 46 – 55.
- (45) Cultrone G., Sebastian E., Cazalla O., Nechar M., Romero R., Bagur M. G. (2001), "Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality ", *Ceramics International*, vol. 27, pp. 401 – 406.
- (46) Poutet J., Manzoni D., Hage – Chehade F., Jaquin C. G., Bouteica M. J., Thovert J. – F. , Adler P. M. (1996), "The effective Mechanical Properties of Reconstructed Porous Media", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol 33, No 4, pp. 409 - 415.
- (47) Tugrul A. and Zarif I. H. (1999), "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey", *Engineering Geology*, vol. 51, issue 4, pp. 303 – 317.

- (48)Gupta A. S. – Seshagiri Rao K. (1998), “Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, abstract vol. 57, pp. 161 – 172.
- (49)Sabton A. A., Shehata W. M. (2000), “Evaluation of engineering properties of scoria in central Harrat Rahat, Saudi Arabia”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, abstract vol. 59, issue 3, pp. 219 – 225.
- (50)Topal T. and Doyuran V. (1998), “Analyses of deterioration of the Cappadocean tuff, Turkey”, *Bulletin of engineering Geology and the environment*, abstract vol. 34.
- (51)Tugrul A. and Zarif I. H. (2000), “Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, abstract vol. 58, pp. 191 – 206.
- (52)Binda L., Saisi A. and Tiraboschi C. (2001), “Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures”, *NDT & E International*, vol. 34, pp. 123 – 128.
- (53)Sebastian E. M., De la Torre M. J., Cazalla O., Cultrone G. and Rodriguez – Navarro C., “Evaluation of treatments on biocalcarenes with ultrasound”, *Proceedings of the 6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*, (eds AIPnl), Rome, Italy, 1999, vol. 4, no 12.
- (54)Luprano V. A. M., Montagna G., Giardina A., Rotella A., Montagna F and Massacci G. (2000), “Correlation between ultrasonic measurements and mechanical testings : A methodology applied to D’ Amico Palace of Milazzo”, *Proceedings of the 15th World Conference of Non Destructive Testing*, Rome, Italy 2000.
- (55)Almesberger D., Rizzo A., Meriani S., Geometrante R. (2000), “Non Destructive Investigations for the Safeguard of the Tower of the Orologio in San Marco Square in Venice”, *Proceedings of the 15th World Conference of Non Destructive testing*, Rome, Italy, 2000.
- (56)Pittarello L., Bellezza G., Almesberger D. and Geometrante R. (2000), “Anamnesis and Diagnosis of Columns and Capitals of ‘Nostra Signora Delle Grazie’ Sanctuary in Imperia (Italy) and Quality Control of their Consolidation by Ultrasonic Instruments”, *Proceedings of the 15th World Conference of Non Destructive Testing*, Rome, Italy, 2000.
- (57)Zeza F., Garzia Pasqua N. and Macri F. (1997), “Conservative treatments on archaeological remains and evaluation of their effectiveness by non-destructive ultrasonic controls”, *Proc. 4th Int. Symp. on the Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin, Edited by A. Moropoulou, F. Zeza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol, pp. 439 – 451.*

- (58) Prasianakis I. N., Kourkoulis S. K., Vardoulakis I. (2000), “Marble monuments examination using the NDT method of ultrasounds”, Proceedings of the 15th World Conference of Non Destructive Testing, Rome, Italy, 2000.
- (59) Prasianakis I. N., Kourkoulis S. K., Vardoulakis I. and Exadaktylos G. (2000), “Non-destructive characterization of marble subjected to bending”, Proceedings of the 2nd International Conference on Emerging Technologies in NDT, Athens, Greece, 1999, Edited by Danny Van Hemelrijk, Athanasios Athanassopoulos and Theodore Philipidis.
- (60) Kourkoulis S. K., Exadaktylos G. E. and Vardoulakis I. (1999), “U-notched Dionysos – Pentelikon marble beams in three point bending. The effect of nonlinearity, anisotropy and microstructure”, International Journal of Fracture vol. 98, pp. 369 – 392.
- (61) Vardoulakis I., Exadaktylos G., Kourkoulis S. and Papadopoulos C. (1997), “Characterization of mechanical properties and damage of natural building stones in historical monuments”, Proc. 4th Int. Symp. on the *Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin*, Edited by A. Moropoulou, F. Fezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol. 2, pp. 193 – 206.
- (62) Zambas C. (1988), “Principles for the structural restoration of the Acropolis Monuments”, The Engineering Geology of Ancient works, Monuments and Historical Sites (edited by P. Marinou and G. C. Koukis), Balkema, Rotterdam 3, pp. 1813 – 1818.
- (63) Zambas C. (1992), “Structural Repairs to the Monuments of the Acropolis – The Parthenon”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering 92, pp. 166 – 176.
- (64) Exadaktylos G.E., Vardoulakis I., S.K. Kourkoulis S.K. (2001), “Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams – II. Characterization of Dionysos marble” International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 4119-4145.
- (65) Βαρδουλάκης Ι., Κουρκουλής Σ., Εξαδάκτυλος Γ., Ροζάκης Α. (2002), «Μηχανικές ιδιότητες και συμβατότητα φυσικών δομικών λίθων στα αρχαία μνημεία: Το διονυσιακό μάρμαρο», Πρακτικά Διεπιστημονικής Ημερίδας: *Ο δομικός λίθος στα μνημεία*, Αθήνα – Μυτιλήνη, 2001, σελ. 187 – 210, Εκδόσεις ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- (66) Τασσογιανόπουλος Α. Γ. (1986), «Συνεισφορά στη μελέτη των ιδιοτήτων των φυσικών δομικών λίθων της Ελλάδας», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
- (67) Zambas C. (1994). “Mechanical Properties of Pentelik Marbles”, Committee for the Restoration of Parthenon Publications, Athens, Greece.
- (68) Κορρές Μ. (1994), «Από την Πεντέλη στον Παρθενώνα», Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα.

- (69) Ζάμπας Κ. (1989), «Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος – Τόμος 3β», Υπουργείο Πολιτισμού, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα.
- (70) Κορρές Μ., Τογανίδης Ν., Ζάμπας Κ. και Σκουλικίδης Θ. (1989), «Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος – Τόμος 2 α», Υπουργείο Πολιτισμού, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα.
- (71) Αργυριάδης Μάρκος (2000), «Αποτίμηση της φθοράς και των επεμβάσεων στερέωσης στο εργαστήριο και επί τόπου στην κλίμακα των μνημείων βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων των δομικών λίθων – Εφαρμογή σε πωρόλιθους (Ρόδου, Κύπρου, Κρήτης)», Μεταπτυχιακή Εργασία για το Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Π.: «Προστασία Μνημείων – Β'κατεύθυνση: Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης», Αθήνα.
- (72) Νινής Ν. Α., Κουρκουλής Σ. Κ., Σακελλαρίου Α. (2002): «Κριτήρια αξιολόγησης δομικών λίθων στα αναστηλωτικά έργα του Ασκληπιείου Επιδαύρου», Πρακτικά Διεπιστημονικής Ημερίδας: *Ο δομικός λίθος στα μνημεία*, Αθήνα – Μυτιλήνη, 2001, σελ. 235 – 248, Εκδόσεις ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- (73) Ninis N. and Kourkoulis S.K. (2001), “On selecting a compatible substitute for the Kenhcreae poros stone used in the Epidaurean Asklepieion”, Proc. Panhellenic Conference of Engineering, Thessaloniki, 2001.
- (74) Moropoulou A., Tsiourva Th., Michailidis P., Biscontin G., Bakolas A. and Zendri E. (1997), “Evaluation of consolidation treatments of porous stones – Application on the Medieval City of Rhodes”, Proc. 4th Int. Symp. on the *Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin*, Edited by A. Moropoulou, F. Fezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol. 3, pp. 239 – 256.
- (75) Theoulakis P. and Moropoulou A. (1997), “Porous stone decay by salt crystallization – The case of the building material of the Medieval City of Rhodes”, Proc. 4th Int. Symp. on the *Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin*, Edited by A. Moropoulou, F. Fezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol. 4, pp. 647 - 673.
- (76) Μαστρογιάννης Ε. (1995), «Μαθήματα μηχανικής των υλικών – Τόμος Ι», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.
- (77) Nash William A. (1972), (Μετάφραση: Περσίδης Σ. Κ. και Τυπάδης Γ. Γ., 1988), «Αντοχή των υλικών», ΕΣΠΙ, Αθήνα.
- (78) Κουλουμπή Ν., Μοροπούλου Α., Μπατής Γ., Χρυσουλάκης Ι., Βασιλείου Π., Κουή Μ. (2000), «Σημειώσεις ασκήσεων του εργαστηρίου επιστήμης και τεχνικής των υλικών για το μάθημα: Υλικά Ι 9^ο εξαμήνου Χ.Μ. Ε.Μ.Π.», Τυπογραφείο Ε.Μ.Π., Αθήνα.

- (79) Mackenzie R.C. (1970), "Differential Thermal Analysis 2", 1st Edition, Academic Press, London.
- (80) Συλογική Έκδοση Εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας Ε.Μ.Π. (1999), «Φυσικές Μέθοδοι Ανάλυσης – Εργαστηριακές Ασκήσεις», Συντονισμός και Επιμέλεια Έκδοσης: Μ. Οξενκιουν – Πετροπούλου, Έκδοση Ε.Μ.Π.
- (81) Κατσίκης Ι., Κωνσταντινίδου Ε., Δημητρούλα Μ. (2002), «Αναλυτικές τεχνικές στη μελέτη των δομικών λίθων», Πρακτικά Διεπιστημονικής Ημερίδας: *Ο δομικός λίθος στα μνημεία*, Αθήνα – Μυτιλήνη, 2001, σελ. 99 – 103, Εκδόσεις ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- (82) Zouridakis N. M., Economou I. G., Tzevelekos K. P. and Kikkinides E.S. (2000), "Investigation of the physicochemical characteristics of ancient mortars by static and dynamic studies", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, issue 7, pp. 1151 – 1155.
- (83) Giles Ranald V. (1962), (Μετάφραση: Νουτσόπουλος Γεώργιος, Μέγγος Αλέξανδρος, 1986), «Μηχανική των Ρευστών και Υδραυλική», ΕΣΠΙ, Αθήνα.
- (84) Martin J. and Mosquera M. J. (1997), "A new protocol for quantifying capillary water absorption by porous building materials", *Proc. 4th Int. Symp. on the Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin*, Edited by A. Moropoulou, F. Fezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Greece, 1997, vol. 2, pp. 161 – 170.
- (85) Luo Qixian and Bungey J. H. (1996), "Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 10, issue 4, pp. 237 - 242.
- (86) Theoulakis P. and Moropoulou A. (1997), "Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay", *Construction and Building Materials*, vol. 11, no 1, pp. 65-71.

Η. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ