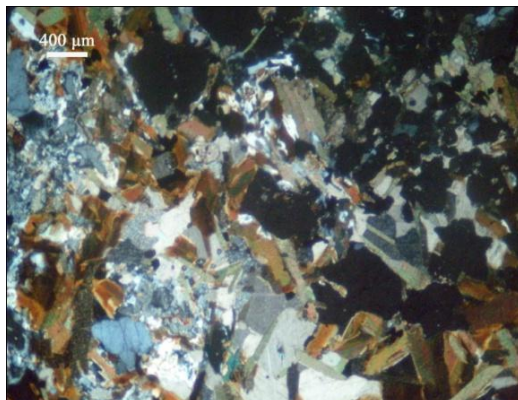




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
Εργαστήριο Μελέτης & Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης και της
μικροδομής των πετρωμάτων στην αντοχή και στην
αντίσταση τους στην διάτρηση»**



ΠΕΤΡΟΣ Σ. ΚΡΟΜΥΛΟΥΣΑΣ

Εξεταστική επιτροπή:

Γ. Εξαδάκτυλος Καθηγητής (Επιβλέπων)

Ζ. Αγιουτάντης Καθηγητής

Γ. Αλεβίζος Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά
Ιούνιος 2010

(Στην φωτογραφία στο εξώφυλλο φαίνονται κρύσταλλοι πλαγιοκλάστων, γκρανατών, βιοτίτη, και αμφίβολων. Διερχόμενο φως, (x-nicols))

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της ορυκτολογικής σύστασης και της μικροδομής στις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Αρχικά περιγράφεται η μεθοδολογία για την ορυκτολογική ανάλυση των πετρωμάτων και παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές αναλύσεις των πετρωμάτων που μελετήθηκαν σ' αυτήν την εργασία. Στην συνέχεια δίδονται οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων που αναλύθηκαν (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, συνοχή, κλπ.) καθώς και η αντίσταση που παρουσιάζουν σε διάτρηση. Τέλος γίνεται μια προσπάθεια συσχέτισης των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων με την ορυκτολογική τους σύσταση και την μικροδομή τους και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και στατιστική ανάλυση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Περίληψη	σελ.	iii
	Περιεχόμενα	σελ.	v
	Κατάλογος Σχημάτων - Πινάκων	σελ.	vii
Κεφάλαιο 1:	Εισαγωγή	σελ.	1
Κεφάλαιο 2:	Πετρώματα και ορυκτά	σελ.	3
	2.1 Ακτινοσκοπία κρυστάλλων	σελ.	6
	2.2 Μέθοδος X-Ray Diffraction	σελ.	6
	2.3 Περιγραφή των πετρωμάτων που αναλύθηκαν	σελ.	9
	2.4 Περιγραφή των ορυκτολογικών συστατικών	σελ.	11
Κεφάλαιο 3:	Μηχανικές ιδιότητες	σελ.	17
	3.1 Βάση δεδομένων βραχομηχανικής	σελ.	17
	3.2 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων	σελ.	18
Κεφάλαιο 4:	Μέθοδος περιστροφικής μικροδιάτρησης	σελ.	27
	4.1 Αρχή μεθόδου	σελ.	27
	4.2 Πειραματική συσκευή	σελ.	28
	4.3 Φαινομενολογικό μοντέλο	σελ.	30
Κεφάλαιο 5:	Δοκιμές μικροδιάτρησης	σελ.	35
	5.1 Πειραματικά αποτελέσματα	σελ.	36
Κεφάλαιο 6:	Συσχέτιση αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης, μηχανικών ιδιοτήτων, ορυκτολογικών συστατικών και της μικροδομής των πετρωμάτων	σελ.	41
Κεφάλαιο 7:	Συμπεράσματα και προτάσεις	σελ.	49
Βιβλιογραφία:		σελ.	51
Παράρτημα Α:	Πειραματικά αποτελέσματα	σελ.	52
Παράρτημα Β:	Ορυκτολογικές αναλύσεις	σελ.	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 2.1	Ο κύκλος των πετρωμάτων	σελ.	4
Σχήμα 2.2	Ανάκλαση των ακτίνων-X	σελ.	7
Σχήμα 2.3	Δείγμα ακτινογραφήματος	σελ.	8
Σχήμα 2.4	Κρύσταλλοι χαλαζία, αστρίων, βιοτίτη, μοσχοβίτη και γρανατών σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols.	σελ.	11
Σχήμα 3.2	Κριτήριο H-B και ισοδύναμο M-C για τον υπολογισμό της συνοχής (c) της εσωτερικής τριβής και του συντελεστή μί μέσω του προγράμματος RockLab	σελ.	21
Σχήμα 4.1	Φωτογραφίες της μικροδιατρητικής συσκευής	σελ.	29
Σχήμα 4.2	Κίνηση των σημείων του κοπτικού άκρου κατά την περιστροφική διάτρηση	σελ.	30
Σχήμα 4.3	Σύστημα δυνάμεων που δρουν στο πέτρωμα κατά την επαφή του με αιχμηρό κοπτικό άκρο το οποίο κινείται προς τα δεξιά	σελ.	31
Σχήμα 5.1	Συγκεντρωτικά διαγράμματα του ασβεστολίθου	σελ.	37
Πίνακας 5.1	Μητρώο δοκιμών διάτρησης του ασβεστολίθου	σελ.	38
Πίνακας 5.2	Ορυκτολογική σύσταση του ασβεστολίθου	σελ.	38
Σχήμα 5.2	(α) Δοκίμιο πειραμάτων, (β) Κόκκοι ασβεστίτη με διερχόμενο φως σε διασταυρωμένα nicols.	σελ.	38
Σχήμα 5.3	Συγκεντρωτικά διαγράμματα του ασβεστολίθου το οποίο περιλαμβάνει και διατρήματα στα οποία συναντήθηκε και χαλαζίας	σελ.	39
Πίνακας 6.1	Μηχανικές ιδιότητες, ορυκτολογική σύσταση πετρωμάτων και κλίσεις από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα (Τσουβάλα 2005)	σελ.	42
Πίνακας 6.2	Μηχανικές ιδιότητες, ορυκτολογική σύσταση πετρωμάτων και κλίσεις από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα	σελ.	43
Πίνακας A.1	Ορυκτολογική σύσταση του αμφιβολίτη	σελ.	52
Σχήμα A.1	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι αλβίτη, χαλαζία, αλμανδίνη και βιοτίτη με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	52
Πίνακας A.2	Ορυκτολογική σύσταση του πτυχωμένου γενέσιου	σελ.	53
Σχήμα A.2	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι γρανάτη και κόκκοι χαλαζία, βιοτίτη με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	53
Πίνακας A.3	Ορυκτολογική σύσταση του γενέσιου Αυστρίας	σελ.	54
Σχήμα A.3	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι αστρίων και κόκκοι χαλαζία, βιοτίτη με διερχόμενο φως σε διασταυρωμένα nicols	σελ.	54
Πίνακας A.5	Ορυκτολογική σύσταση του αμφιβολίτη Αυστρίας	σελ.	55
Σχήμα A.5	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι γρανατών, αστρίων, χαλαζία, αμφιβόλων με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	55

Πίνακας Α.6	Ορυκτολογική σύσταση του σχιστολιθικού γενέσιου	σελ.	56
Σχήμα Α.6	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι γρανατών, αστρίων, χαλαζία, μοσχοβίτη με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	56
Πίνακας Β.1	Ορυκτολογική σύσταση του πηγματίτη	σελ.	57
Σχήμα Β.1	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι γρανατών, αστρίων, χαλαζία, με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	57
Πίνακας Β.2	Ορυκτολογική σύσταση του γενέσιου	σελ.	58
Σχήμα Β.2	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι αστρίων και χαλαζία με διερχόμενο φως σε διασταυρωμένα nicols	σελ.	58
Πίνακας Γ.1	Ορυκτολογική σύσταση του δολομίτη	σελ.	59
Σχήμα Γ.1	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών	σελ.	59
Πίνακας Γ.3	Ορυκτολογική σύσταση του ψαμμίτη Στύριας	σελ.	60
Σχήμα Γ.3	Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β), Κρύσταλλοι καλιούχων αστρίων και χαλαζία, με διερχόμενο φως σε παράλληλα και διασταυρωμένα nicols	σελ.	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Τα πετρώματα είναι κοκκώδη ή κρυσταλλώδη και πορώδη υλικά. Τα πετρώματα έχουν χαρακτηριστική μικροδομή που οφείλεται στον τρόπο γένεσης τους και σε όλες τις αιτίες που επέδρασαν σ' αυτό κατά το παρελθόν (τάσεις, θερμότητα, νερά κτλ.). Η μικροδομή εκφράζεται με τη φύση, το σχήμα και τη διάταξη και τον τρόπο σύνδεσης των κόκκων ή κρυστάλλων, καθώς και των πόρων ή μικρορωγμών που το διασχίζουν. Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής και της χημικής σύστασης ενός πετρώματος γίνεται στο ορυκτολογικό εργαστήριο και είναι σημαντικός για την εφαρμογή που προορίζεται ένα δεδομένο πέτρωμα. Απ' την άλλη πλευρά στη βραχομηχανική ενδιαφέρει ο γρήγορος, αξιόπιστος και αν είναι δυνατόν επί τόπου χαρακτηρισμός της αντοχής, της ελαστικότητας και των φθοροποιών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να γίνει η διερεύνηση συσχέτισης των ορυκτολογικών συστατικών και της μικροδομής των πετρωμάτων με τις μηχανικές ιδιότητες τους και πιο συγκεκριμένα στην αντοχή τους ανεμπόδιστη θλίψη και εφελκυσμό καθώς και στην αντίστασή τους στην διάτρηση. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού διεξήχθησαν ορυκτολογικές αναλύσεις, εκτελέστηκαν δοκιμές και χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων στην σελίδα <http://minelab.mred.tuc.gr/rmdb>.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται καταρχήν ο ορυκτολογικός χαρακτηρισμός των πετρωμάτων. Έπειτα δίδονται οι μηχανικές τους ιδιότητες και αφού παρουσιαστεί η αρχή της μεθόδου της μικροδιάτρησης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Τέλος γίνεται συσχέτιση μεταξύ των μηχανικών και των ορυκτολογικών χαρακτηριστικών και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και στατιστική αυτή ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πετρώματα και Ορυκτά

Ορυκτά ονομάζονται στερεά σώματα ορισμένης χημικής συστάσεως, τα οποία αποτελούν τα συστατικά των πετρωμάτων.

Πετρώματα είναι στερεά σώματα, που αποτελούνται από παραγενέσεις διαφόρων ορυκτών ή συσσωματώσεις ενός ορυκτού, καταλαμβάνουν αξιόλογα, από άποψης χώρου, τμήματα του στερεού φλοιού της Γης και παρουσιάζουν σχετική ομοιομορφία σε όλη τους την έκταση καθώς ακολουθούν έναν κύκλο δημιουργίας τους (Σχ. 2.1).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ένα πέτρωμα μπορεί να αποτελείται είτε από παραγένεση διαφόρων ορυκτών, όπως π.χ. ο *γρανίτης*, που αποτελείται από παραγένεση των ορυκτών *χαλαζία*, *αστρίων* και *μαρμαρυγιών*, είτε από τη συσσωμάτωση ενός ορυκτού, όπως π.χ. το *μάρμαρο*, που αποτελείται από συσσωματώσεις του ασβεστίτη. (Δαβή, 1991).

Τα πετρώματα σχηματίζουν τα στρώματα ή τις διαπλάσεις, δηλαδή τις δομικές μονάδες του στερεού φλοιού της Γης. Μέσα σε ένα στρώμα ή μία διάπλαση το πέτρωμα παρουσιάζει ομοιομορφία, η οποία χαρακτηρίζεται από την ίδια περίπου ορυκτολογική σύσταση και τον ίδιο ιστό.

Σε περίπτωση που το πέτρωμα αποτελείται από συσσωματώσεις ενός μόνο ορυκτού (μάρμαρο, ασβεστόλιθος), μία ουσιώδης διαφορά μεταξύ πετρώματος και ορυκτού είναι η μεγάλη ανάπτυξη του πρώτου σε σχέση με το δεύτερο.

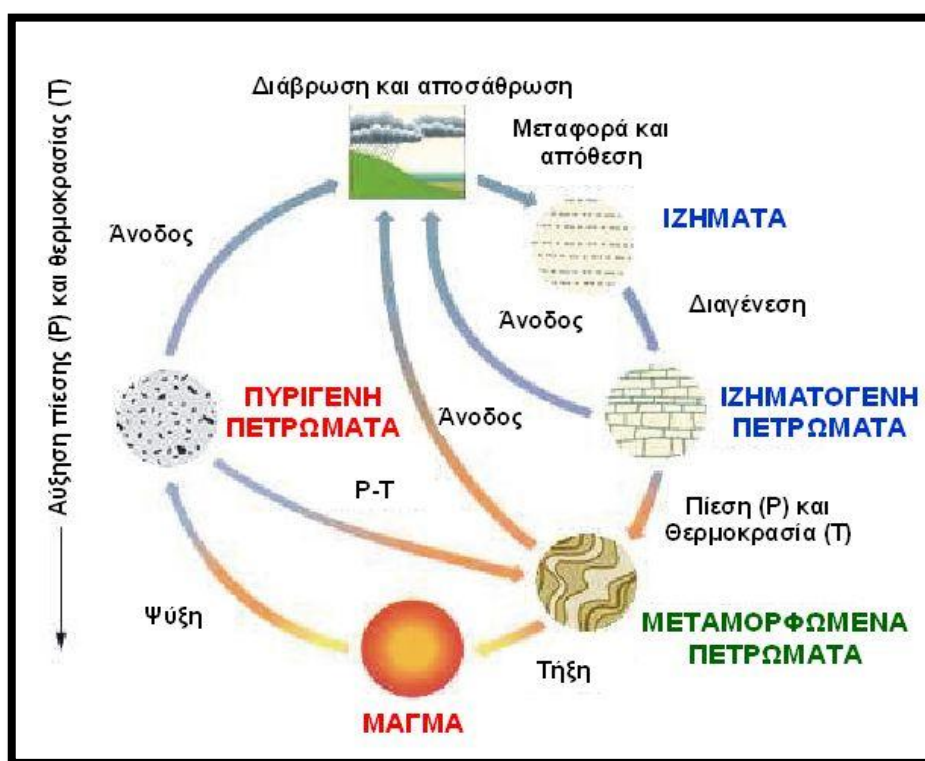
Τα ορυκτολογικά συστατικά των πετρωμάτων είναι συνήθως ευδιάκριτα με το μάτι, όπως π.χ. στο γρανίτη. Άλλοτε όμως δεν διακρίνονται ευδιάκριτα παρά μόνο με την βοήθεια μεγεθυντικού φακού ή μικροσκοπίου, όπως π.χ. σε μερικούς βασάλτες. Ειδικά, προκειμένου για αργίλους, για τον καθορισμό των ορυκτολογικών συστατικών που τις αποτελούν, πρέπει να γίνει χρήση ακτίνων-X, ή ακόμη και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Υπάρχουν όμως και πετρώματα, που δεν περιέχουν ορυκτά. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση των ηφαιστειακών υάλων, που είναι συστατικά ομογενή και άμορφα.

Τα περισσότερα πετρώματα είναι σκληρά και συμπαγή. Υπάρχουν όμως και μαλακά, όπως είναι λ.χ. οι ιλυόλιθοι.

Στην εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί σκληρά και συμπαγή κυρίως δείγματα πετρωμάτων που έχουν σαν ουσιαστικές ορυκτολογικό συστατικό χαλαζία, άστριους και μαρμαρυγίες.

Τα πετρώματα, ανάλογα με τις συνθήκες γενέσεως και προελεύσεώς τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) *εκρηξιγενή ή πυριγενή*, τα οποία προέρχονται από τη στερεοποίηση φυσικού πυριτικού τήγματος, του μάγματος, β) *ιζηματογενή*, τα οποία προκύπτουν από την καθίζηση υλικού που βρίσκεται εν διαλύσει ή εν αιωρήσει μέσα στο νερό ή άλλο ρευστό μέσο, γ) *κρυσταλλοσχιστώδη ή μεταμορφωσιγενή* πετρώματα, τα οποία προέρχονται από τη μεταμόρφωση των εκρηξιγενών ή ιζηματογενών πετρωμάτων. (Δαβή, 1991).



Σχήμα 2.1: Ο κύκλος των πετρωμάτων

(όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα www.pangea.gr)

Στην περίπτωση που το πέτρωμα αποτελείται από παραγενέσεις διαφόρων ορυκτών, τα ορυκτολογικά συστατικά του πετρώματος διακρίνονται σε (Δαβή, 1991):

- ο *Ουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά*. Χαρακτηρίζονται τα ορυκτολογικά συστατικά, χωρίς τα οποία δεν είναι δυνατό να νοηθεί το πέτρωμα, π.χ. ο χαλαζίας, ο άστριος και ο μαρμαρυγίας αποτελούν τα ουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά του γρανίτη.
- ο *Επουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά*. Ονομάζονται εκείνα, τα οποία δεν είναι απαραίτητα για την ύπαρξη του πετρώματος και που συμμετέχουν σε μικρή αναλογία στο πέτρωμα, π.χ. το ζirkόνιο και το ρουτίλιο είναι επουσιώδη συστατικά του γρανίτη.
- ο *Συμπτωματικά ορυκτολογικά συστατικά*. Είναι όσα τυχαίως υπάρχουν στο πέτρωμα, λόγω της δημιουργίας φαινομένου γεωλογικού ή μεταλλογενετικού, π.χ. τουρμαλίνης και γρανάτης σε γρανίτες, διαμάντι σε κιμπερλίτη κτλ.

Η ταξινόμηση των ορυκτολογικών συστατικών των πετρωμάτων γίνεται από πετρογραφική ανάλυση. Κατ' αρχήν λαμβάνεται υπ' όψη η σημασία των διαφόρων ορυκτών των συστατικών του πετρώματος. Στη συνέχεια δίνεται σημασία στους κρυσταλλοχημικούς χαρακτήρες τους. Με τον τρόπο αυτό μελετώνται διεξοδικά τα πυριτικά άλατα. Στη συνέχεια και με πιο απλό τρόπο τα ανθρακικά, τα θειικά και φωσφορικά άλατα, οι αλογονούχες (χλωριούχες, φθοριούχες) και θειούχες ενώσεις, τα οξειδία και υδροξείδια και τέλος τα αυτοφυή στοιχεία.

Η πλήρης μελέτη ενός ορυκτού γίνεται ασφαλώς με τον προσδιορισμό των κρυσταλλογραφικών και οπτικών του σταθερών καθώς και με την πλήρη ποσοτική χημική ανάλυση και την ακτινογραφική του έρευνα.

Για πολλά ορυκτά η διάγνυσή τους είναι αμφίβολη ακόμα και μετά από προσεκτική μελέτη των φυσικών τους ιδιοτήτων ή ακόμη και μετά από εξέταση με ειδικές δοκιμασίες (υπεριώδης ακτινοβολία, φθορισμός, φωταύγεια, μαγνητισμός, κτλ.). Για τα ορυκτά αυτά είναι αναγκές οι χημικές διαδικασίες (πυροχημική, υγροχημική ή μικροχημική εξέταση).

Στην παρούσα εργασία η ανάλυση γίνεται με την μέθοδο XRD Analysis (XRay Diffraction), δηλαδή, της περιθλασιμετρίας των ακτίνων-X.

2.1 Ακτινοσκοπία κρυστάλλων

Οι ακτίνες-X αποτελούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εννοούνται συνήθως οι ακτίνες εκείνες που καλύπτουν το μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που βρίσκεται μεταξύ περίπου $0,1\text{\AA}$ και $100\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$). Όπως όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα οι ακτίνες-X είναι δυνατόν να παρουσιάζουν τα φαινόμενα της πόλωσης, της σκέδασης και της περίθλασης, ενώ διεγείρουν φθορίζουσες ουσίες σε φωταύγεια, μαυρίζουν φωτογραφικές πλάκες και παράγουν έντονο ιονισμό σε αέρια. Έχουν επίσης πολύ μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης στην ύλη και κατά τη διάθλαση εκτρέπονται όχι προς την κατεύθυνση της καθέτου επί της οριακής επιφάνειας του πυκνότερου μέσου αλλά απομακρύνονται ελάχιστα απ' αυτή, έτσι ώστε ο δείκτης διάθλασης τους να είναι μικρότερος της μονάδας. Ακτίνες-X δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια που έχουν μεγάλη ταχύτητα προσπίπτουν σε ένα σώμα και μπορούν να παράγονται σε ειδικές λυχνίες για να τις χρησιμοποιούμε και στην ακτινοσκοπία των κρυστάλλων. (Κωστάκης, 2005)

2.2 Μέθοδος X-Ray Diffraction

Το φαινόμενο της περίθλασης των ακτίνων-X πάνω στους κρυστάλλους οφείλεται στην αλληλεπίδραση που έχουν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων των κρυστάλλων, που έχει σαν αποτέλεσμα την σκέδαση των ακτίνων-X.

Με την μέθοδο *X-Ray Diffraction Analysis*, του περιθλασιμέτρου ακτίνων-X, είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X.

Οι βασικές μονάδες που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων-X είναι η μονάδα παραγωγής της υψηλής τάσεως, η λυχνία των ακτίνων, το γωνιόμετρο, ο απαριθμητής των ακτίνων με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και τέλος η μονάδα του μικροϋπολογιστή μέσω του οποίου καθοδηγείται ολόκληρο το σύστημα και αξιολογούνται τα δεδομένα που προκύπτουν από την εξέταση του δείγματος.

Το προς ανάλυση δείγμα βρίσκεται σε μορφή σκόνης μέσα στην κοιλότητα ενός μεταλλικού ή πλαστικού πλακιδίου. Το πλακίδιο τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο αριθμητής των ακτίνων-X

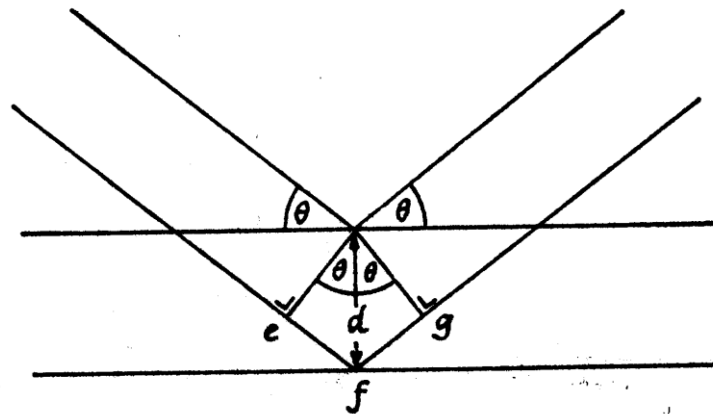
και μάλιστα έτσι ώστε το επίπεδο του παρασκευάσματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου.

Ταυτόχρονα ως προς τον ίδιο άξονα γύρω από τον οποίο διαγράφει τον κύκλο, περιστρέφεται ο απαριθμητής με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα ίση με την μισή του απαριθμητή έτσι ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση, ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος όπως και το σημείο εξόδου των ακτίνων-X της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων-X των προερχομένων από τη λυχνία, ώστε να πληρούται η γνωστή εξίσωση του Bragg (Κωστάκης, 2005), η οποία είναι:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

όπου, n ακέραιος αριθμός, λ το μήκος κύματος των ακτίνων X, d η απόσταση μεταξύ των επιπέδων των ατόμων και θ είναι η γωνία πρόσπτωσης ή ανάκλασης της ακτίνας X σε σχέση με τα κρυσταλλικά επίπεδα, και την ορίζουμε εμείς αφού ελέγχουμε τον ρυθμό περιστροφής του δείγματος. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.2.

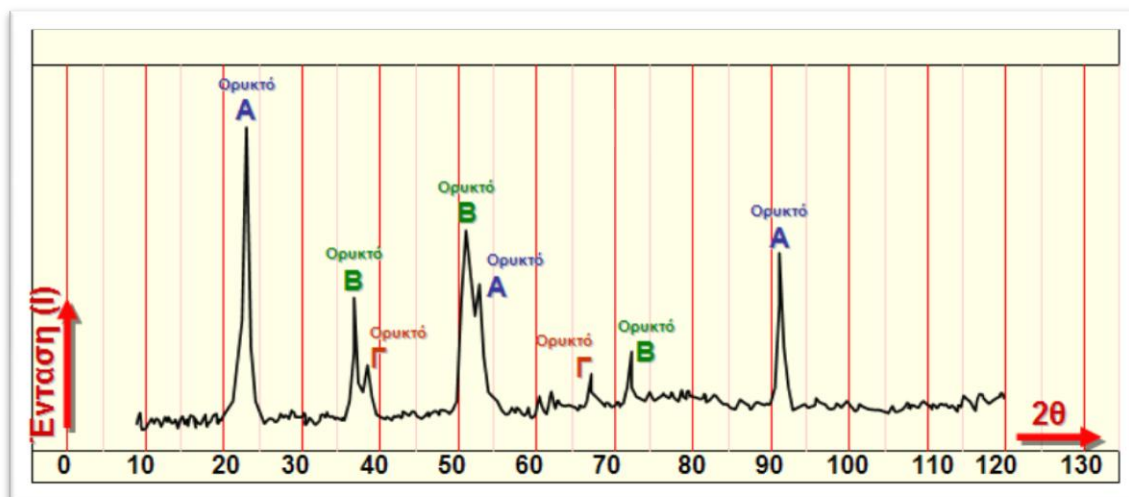


Σχήμα 2.2: Ανάκλαση των ακτίνων-X (Von Laue, 1908)

(όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα <http://en.wikipedia.org>)

Κατά την περιφορά του απαριθμητή των ακτίνων-X με σταθερή ταχύτητα είναι δυνατή η ακριβής καταγραφή των ανακλάσεων και των εντάσεων αυτών που προέρχονται από τα πλεγματικά επίπεδα διαφόρων εντάσεων. Το αποτέλεσμα τελικά είναι ένα διάγραμμα με οριζόντιο άξονα την γωνία θ (ή πιο σωστά 2θ , επειδή είναι το άθροισμα της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτίνας, δηλαδή $\theta + \theta = 2\theta$) και

κάθετο στην ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν πολλαπλές κορυφές που αντιστοιχούν σε ανακλάσεις (Σχ.2.3).



Σχήμα 2.3: Δείγμα ακτινογραφήματος

(όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα www.metal.ntua.gr)

Από τις κορυφές δίνεται το 2θ , υπολογίζεται το θ , και εφαρμόζεται στην εξίσωση του Bragg λύνοντας ως προς d . Τα πετρώματα αποτελούνται από ορυκτά, συνήθως περισσότερα του ενός σε αριθμό. Αναμένεται λοιπόν ότι και το σύνολο των d στα διαγράμματα περίθλασης των ακτίνων-Χ θα είναι μια ανάμειξη των d όλων των ορυκτών φάσεων.

Πρέπει να ξεχωριστούν τα d που ανήκουν σε κάθε ορυκτό. Από πίνακες υπάρχουν τα d του κάθε ορυκτού και πλέον με την βοήθεια υπολογιστών και ειδικών προγραμμάτων με πλούσιες βάσεις δεδομένων (παλαιότερα τυπωμένοι πίνακες ή σύστημα καρτών) και μηχανές ανεύρεσης ταυτίζονται τα d του διαγράμματος με τα d των ορυκτών από την βάση δεδομένων.

Τα ορυκτά των οποίων τα d ταυτίζονται με αυτά του διαγράμματός είναι και τα πιθανότερα ορυκτά που περιέχονται στο δείγμα. Η εμπειρία είναι ένας επιπλέον παράγοντας για σωστά αποτελέσματα.

Η μέθοδος αυτή είναι ταχύτερη και ακριβέστερη στη μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων από ότι άλλες μεθόδοι.

Το ακτινογράφημα κάθε κρυσταλλικής ουσίας είναι χαρακτηριστικό για την ουσία και κατα συνέπεια αποτελεί ένα είδος «ταυτότητας», βάσει της οποίας μπορεί να προσδιοριστεί η ουσία.

2.3 Περιγραφή των πετρωμάτων που αναλύθηκαν

Τα δείγματα που ήταν διαθέσιμα για την εκπόνηση της εργασίας προέρχονται από δύο κυρίως γεωτρήσεις στην περιοχή της Αυστρίας, τα οποία στάλθηκαν από το Graz University of Technology, Laboratory for Rock Mechanics and Tunnelling.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πετρωμάτων από τις γεωτρήσεις με κωδικό, *TB-D01/05* (A), *KB-D12/02* (B), και *V6, V8, V11* (Γ), καθώς επίσης αναφέρονται και τα ορυκτολογικά συστατικά του καθενός έπειτα από την εργαστηριακή ανάλυση με την μέθοδο XRD.

A.1 Αμφιβολίτης

Προέρχεται από καθολική μεταμόρφωση βασικών έως ενδιαμέσων εκρηξιγενών πετρωμάτων (γάββρων έως διοριτών), αλλά και από ιζηματογενή, ιδίως μάργες πλούσιες σε SiO₂. Βρέθηκε σε βάθος 140÷224m και περιέχει 39% πλαγιόκλαστα, 23% χαλαζία, 9% γρανάτη, 6% αμφίβολους και 23% βιοτίτη.

A.2 Πτυχωμένος γνεύσιος

Βρέθηκε σε βάθος 240÷503m και ανήκει στην κατηγορία του γνεύσιου. Συνίσταται από 54% χαλαζία, 9% βιοτίτη, 2% επίδοτο, 7% γρανάτη, 5% καλ. άστριο και 28% πλαγιόκλαστα. Το είδος του γνεύσιου και το φεμικό συστατικό ποικίλλουν στις διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις συνθήκες σχηματισμού. Λόγω του ότι τα πλαγιόκλαστα είναι όξινα (αλβίτης), θεωρείται γνεύσιος επιζώνης (σε χαμηλές θερμοκρασίες).

A.3 Γνεύσιος Αυστρίας

Προέρχεται από την περιοχή της Αυστρίας. Πρόκειται για πτυχωμένο γνεύσιο ο οποίος συνυπάρχει μαζί με χαλαζίτη και μάρμαρο. Περιέχει 58% χαλαζία, 10% καλ. άστριο, 24% πλαγιόκλαστα και 8% βιοτίτη. Βρέθηκε σε βάθος 519÷547m.

A.4 Γνεύσιος Στύριας

Πρόκειται για γνεύσιο που υπάρχει στην περιοχή της Στύριας, ο οποίος συνυπάρχει μαζί με χαλαζίτη και μάρμαρο. Προήλθε από την ίδια γεώτρηση σε βάθος 547÷725m. Περιέχει 52% χαλαζία, 20% διοψίδιο (πυρόξενο), 15% ζωϊσίτη, 10% καλ. άστριο και 3% μοσχοβίτη.

A.5 Αμφιβολίτης Αυστρίας

Προέρχεται από την περιοχή της Αυστρίας. Αποτελεί προϊόν αμφιβολιτίωσης εκλογιτών που υπέστησαν μεταμόρφωση υπέρ-υψηλών πιέσεων. Η γεωχημεία των κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων δείχνει ότι οι πρωτόλιθοι τους ήταν γάββροι, οι οποίοι κρυσταλλώθηκαν σε περιβάλλον διεύρυνσης. Περιέχει 35% χαλαζία, 16% βιοτίτη, 29% πλαγιόκλαστα, 15% αλμανδίνη (γρανάτη) και 5% αμφιβόλους. Βρέθηκε σε βάθος 1000m.

A.6 Σχιστολιθικός γνεύσιος

Ακόμα ένα είδος γνεύσιου σε βάθος 1042m. Το χαρακτηριστικό του είναι η σχιστότητα που παρουσιάζει. Περιέχει 52% χαλαζία, 32% πλαγιόκλαστα, 11% μοσχοβίτη και 5% γρανάτη (Σχ. 2.4).

B.1 Πηγματίτης

Χαρακτηρίζεται ως χονδροκοκκώδες φλεβικό πέτρωμα με σύσταση κυρίως γρανιτική. Προέρχεται από τη στερεοποίηση, μέσα σε φλέβες, των θερμών διαλύσεων του μάγματος, πλούσιων σε πτητικά συστατικά. Έχει ιδιάζοντα πηγματικό ιστό, ο οποίος συνίσταται από αδρομερείς κρυστάλλους οι οποίοι διεισδύουν οι μεν στους δε, ενώ συγχρόνως προϋποθέτει ιδιάζουσες συνθήκες γενέσεως, καθώς και συγκρυστάλλωση χαλαζία και αλκαλικού αστρίου. Βρέθηκε σε βάθος 62m, όπως επίσης και στην (Α) γεώτρηση σε μεγαλύτερο βάθος 1124m. Περιέχει 55% χαλαζία, 9% μοσχοβίτη, 17% καλ. άστριους, 9% μοσχοβίτη, 3% γρανάτη και 16% πλαγιόκλαστα.

B.2 Γνεύσιος

Έχει ως θεμελιώδη συστατικά αστρίου και χαλαζία. Είναι κατά το πλείστον μεσόκοκκο και χαρακτηρίζεται από τη σχιστότητα και τη γνευσιοειδή υφή. Περιέχει 43% χαλαζία, 17% μοσχοβίτη, 19% σταυρόλιθο και 21% πλαγιόκλαστα. Βρέθηκε σε βάθος 63÷106m, αλλά και στην (Α) γεώτρηση σε πολύ μεγαλύτερο βάθος 1146m.

Γ.1 Δολομίτης

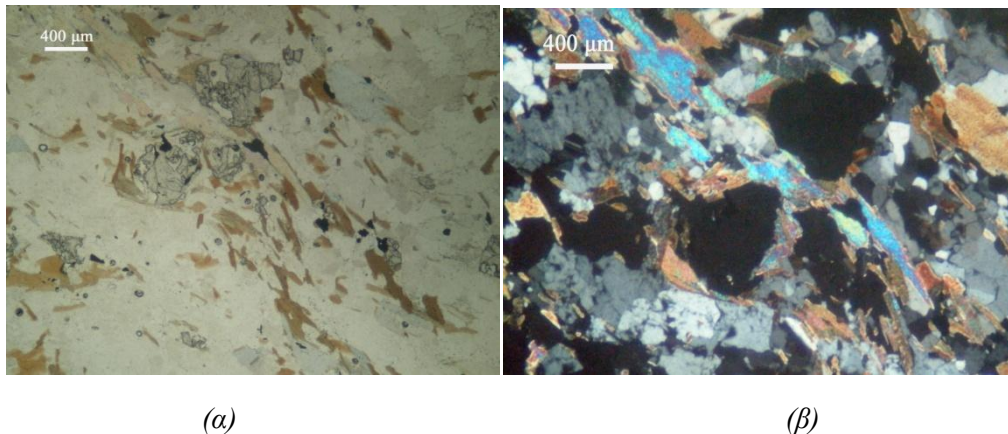
Πέτρωμα μονόμεικτο αποτελούμενο από 100% δολομίτη. Σχηματίζεται όταν ένα μέρος του ασβεστίου του ασβεστολίθου αντικατασταθεί από μαγνήσιο (δολομιτίωση). Μπορεί να υπάρχουν όλα τα ενδιάμεσα σε σύσταση πετρώματα μεταξύ ασβεστολίθου και δολομίτη. Γεώτρηση V6.

Γ.2 Ασβεστόλιθος “Warstein”

Πήρε το όνομα του από την πόλη War stein της Γερμανίας διότι υπάρχουν πάρα πολλά σπήλαια εκεί από όπου εξορύσσεται αυτός ο τύπος ασβεστολίθου. Είναι μονόμεικτο ιζηματογενές πέτρωμα και αποτελείται από 99% ασβεστίτη και 1% χαλαζία. Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να είναι είτε χημική είτε βιογενής. Γεώτρηση V8.

Γ.3 Ψαμμίτης Στύριας

Προέρχεται από την περιοχή της Στύριας στην Αυστρία. Συμπαγές πέτρωμα που προκύπτει από διαγένεση της άμμου (μηχανικό ιζηματογενές πέτρωμα). Η άμμος είναι δυνατό να δημιουργείται από τη διαβρωτική δράση του ύδατος ή του ανέμου. Το συνδετικό υλικό ποικίλει. Στην προκειμένη περίπτωση είναι χαλαζιακό όπου και προσδίδει μεγάλη συνεκτικότητα στο πέτρωμα. Αποτελείται από 90% χαλαζία και 10% καλ. άστριο.



Σχήμα 2.4: Δείγμα σχιστολιθικού γνεύσιου. Κρύσταλλοι χαλαζία, αστρίων, βιοτίτη, μοσχοβίτη και γρανατών. Διερχόμενο φως, σε // nicols (α) και x nicols (β)

2.4 Περιγραφή ορυκτολογικών συστατικών

Για την μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, είναι απαραίτητη η γνώση των αντίστοιχων ιδιοτήτων των πετρογενετικών τους ορυκτών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κυριότερες ιδιότητες των σημαντικότερων ορυκτών που βρέθηκαν στα δείγματα των πετρωμάτων που αναλύθηκαν.

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες ορυκτών

A. Χαλαζίας

Γενικά	
Κατηγορία	Οξείδια
Χημικός τύπος	SiO ₂
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,65 g/cm ³
Χρώμα	Ποικίλλει
Σύστημα κρυστάλλωσης	Τριγωνικό ή εξαγωνικό
Κρύσταλλοι	Πρισματικοί ή ρομβοεδρικοί
Υφή	Ευδιάκριτοι κρύσταλλοι
Διδυμία	Ναι (1120)
Σκληρότητα (Mohs)	7
Σχισμός	Ασθενής
Θραύση	Κογχώδεις
Λάμψη	Υαλώδεις
Παρατηρήσεις	
Εμφανίζει διπλοθλαστικότητα και πιεζοηλεκτρισμό. Είναι το δεύτερο πιο διαδεδομένο ορυκτό στη φύση και το μοναδικό που αποτελείται αποκλειστικά από Si και O. Στηρίζονται κυρίως στην σκληρότητα του και στην αντοχή του στην αποσάρθρωση.	

B. Μαρμαρυγίες

Πρόκειται για μια ομάδα υδροξυλιούχων αργιλοπυριτικών ορυκτών του K, Mg, Fe, Na κ.α. πολύ διαδεδομένων στη φύση. Βρίσκονται σε όλες τις κατηγορίες πετρωμάτων, ωστόσο η αρχική τους προέλευση είναι, κυρίως, πυριγενής. Στην ομάδα αυτή ανήκουν ο βιοτίτης και ο μοσχοβίτης.

B.1 Βιοτίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Φυλλοπυριτικά. (Μαρμαρυγίες)
Χημικός τύπος	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,8-3,2 g/cm ³
Χρώμα	Σκούρο πράσινο, καστανό, μέλαν
Σύστημα κρυστάλλωσης	Μονοκλινές
Κρύσταλλοι	Σπάνια καλοσχηματισμένοι, πινακοειδής
Υφή	Φυλλώδης, λεπιδοειδής
Διδυμία	Ναι (001)
Σκληρότητα (Mohs)	2,5-3
Σχισμός	Τέλειος (001)
Θραύση	Σπάνια παρατηρούμενη λόγω σχισμού
Λάμψη	Ημιμεταλλική, υαλώδεις
Παρατηρήσεις	
Τα φυλλάρια είναι εύκαμπτα και ιδιαίτερα ελαστικά. Αποσαθρώνεται σχετικά εύκολα ιδιαίτερα όταν είναι πλούσιος σε Fe.	

B.2 Μοσχοβίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Φυλλοπυριτικά. (Μαρμαρυγίες)
Χημικός τύπος	$KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,8-2,9 g/cm ³
Χρώμα	Συνήθως άχρωμος. Καστανός, ερυθρωπός
Σύστημα κρυστάλλωσης	Μονοκλινές
Κρύσταλλοι	Πινακοειδείς, βραχυπρισματικοί
Υφή	Φυλλώδης, συμπαγής σε φυλλάρια
Διδυμία	(001), (310) με αποτέλεσμα κρυστ. "αστέρα"
Σκληρότητα (Mohs)	2-2,5
Σχισμός	Τέλειος (001) και αποχωρισμός (110), (010)
Θραύση	Σπάνια παρατηρούμενη λόγω σχισμού
Λάμψη	Υαλώδεις έως μαργαριταρώδης
Παρατηρήσεις	
Τα φυλλάρια είναι εύκαμπτα και ιδιαίτερα ελαστικά. Εμφανίζει ασθενή πλεοχρωισμό.	
Θεωρείται δυσθερμαγωγό και δυσηλεκτραγωγό υλικό. Είναι πολύ ανθεκτικός στην αποσάθρωση, ωστόσο στα αδρανή θεωρείται αρνητικός παράγοντας.	

Γ. Άστριοι και Πλαγιόκλαστα

Αποτελούν ομάδα ορυκτών, τα συνηθέστερα των οποίων αποτελούνται από τα μόρια ορθόκλαστο, αλβίτη και ανορθίτη. Χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα και η διάκριση των διαφόρων ειδών αστρίων γίνεται με πολωτικό μικροσκόπιο. Είναι κύρια ορυκτά στα όξινα και ενδιάμεσα μαγματικά πετρώματα (γρανίτες, πηγματίτες) και στα αντίστοιχα μεταμορφωμένα (γνεύσιοι).

Γ.1 Ορθόκλαστο

Γενικά	
Κατηγορία	Τεκτοπυριτικά (αλκαλιούχοι άστριοι)
Χημικός τύπος	$KAlSi_3O_8$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,65 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο, λευκό
Σύστημα κρυστάλλωσης	Μονοκλινές
Κρύσταλλοι	Βραχυπρισματικοί, επιμηκυσμένοι
Υφή	Αλλοτριόμορφη
Διδυμία	Ναι, απλές
Σκληρότητα (Mohs)	7
Σχισμός	Τέλειοι (001) και (010) τέμνονται κάθετα
Θραύση	Καλή
Λάμψη	Υαλώδεις
Παρατηρήσεις	
Θεωρείται αδιάλυτο και ανθεκτικό στην αποσάθρωση	

Γ.2 Αλβίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Πλαγιόκλαστα
Χημικός τύπος	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,6-2,8 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο, λευκό
Σύστημα κρυστάλλωσης	Μονοκλινές
Κρύσταλλοι	Πλακώδεις, επιμήκεις
Υφή	Ακανόνιστοι κόκκοι, σχισμογενείς μάζες
Διδυμία	Ναι, απλές
Σκληρότητα (Mohs)	6
Σχισμός	Τέλειοι (001) και (010) τέμνονται κάθετα
Θραύση	Καλή
Λάμψη	Υαλώδεις, μαργαριταρώδης
Παρατηρήσεις	
Θεωρείται αδιάλυτο και ανθεκτικό στην αποσάθρωση	

Γ.3 Ανορθίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Πλαγιόκλαστα
Χημικός τύπος	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,6-2,8 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο, λευκό
Σύστημα κρυστάλλωσης	Μονοκλινές
Κρύσταλλοι	Πλακώδεις, επιμήκεις
Υφή	Ακανόνιστοι κόκκοι, σχισμογενείς μάζες
Διδυμία	Ναι, απλές
Σκληρότητα (Mohs)	6
Σχισμός	Τέλειοι (001) και (010) τέμνονται κάθετα
Θραύση	Καλή
Λάμψη	Υαλώδεις, μαργαριταρώδης
Παρατηρήσεις	
Σε αντίθεση με τον αλβίτη συναντάται μη αποσαθρωμένος	

Δ. Γρανάτες

Είναι τυπικά ορυκτά των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, βρίσκονται ενίοτε και σε πυριγενή πετρώματα. Χρησιμοποιούνται ως λειαντικά μέσα λόγω σκληρότητας. Θεωρούνται επίσης ημιπολύτιμοι λίθοι.

Δ.1 Αλμανδίνη

Γενικά	
Κατηγορία	Νησοπυριτικά
Χημικός τύπος	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	3,5-4,3 g/cm ³
Χρώμα	Εξαρτάται από την σύσταση, κόκκινο
Σύστημα κρυστάλλωσης	Κυβικό
Κρύσταλλοι	Ρομβοεδρικοί, εικοσιτετραεδρικοί
Υφή	Αποστρογγυλεμένοι κόκκοι
Διδυμία	(001), (310) με αποτέλεσμα κρυστ. "αστέρα"
Σκληρότητα (Mohs)	6,5-7,5
Σχισμός	Ασαφής
Θραύση	Συνήθεις ρωγμές
Λάμψη	Υαλώδεις, ρητινώδης
Παρατηρήσεις	
Το έντονο ανάγλυφο και η ισοτροπία είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες.	

Ε. Ανθρακικά ορυκτά

Ε.1 Ασβεστίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Ανθρακικά άλατα
Χημικός τύπος	CaCO_3
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,7 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο έως λευκό
Σύστημα κρυστάλλωσης	Τριγωνικό
Κρύσταλλοι	Ρομβόεδρα ή πρίσματα
Υφή	Συμπαγή συσσωματώματα, κοκκώδη
Διδυμία	Συχνή (00001), πολυδυμία (01-12)
Σκληρότητα (Mohs)	3
Σχισμός	Τέλειος (1100)
Θραύση	Κογχώδεις, ακανόνιστη
Λάμψη	Υαλώδεις, θαμπή
Παρατηρήσεις	
Εμφανίζει διπλοθλαστικότητα και φθορισμό σε υπεριώδη ακτινοβολία. Αποτελεί το κύριο συστατικό των ασβεστολίθων, των μαρμάρων και της κρητίδας. Οι σταλακτίτες των σπηλαίων αποτελούνται από ασβεστίτη.	

Ε.2 Δολομίτης

Γενικά	
Κατηγορία	Ανθρακικά
Χημικός τύπος	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά	
Πυκνότητα	2,8 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο έως λευκό
Σύστημα κρυστάλλωσης	Τριγωνικό
Κρύσταλλοι	Κάθε μορφής και τύπου
Υφή	Συμπαγής, κοκκώδης, σταλακτική
Διδυμία	Επαφής (0001), (1010) ή (1120)
Σκληρότητα (Mohs)	3,5-4
Σχισμός	Τέλειος (1011)
Θραύση	Ατελώς κογχώδης
Λάμψη	Υαλώδεις, μαργαριταρώδης
Παρατηρήσεις	
Χρησιμοποιείται για την παρασκευή πυρίμαχων δομικών υλικών. Προκαλεί την "δολομιτίωση".	

ΣΤ. Πυρόξενοι και αμφίβολοι

Αποτελούν δυο ομάδες πυριτικών πετρογενετικών ορυκτών. Απαντώνται στα πετρώματα μαζί με άλλα ορυκτά ή και μόνα τους. Ένα από τα κυριότερα μέλη των πυροξένων είναι ο διοψίδιος ενώ των αμφιβόλων η κεροστίλβη. Και οι πυρόξενοι και οι αμφίβολοι έχουν σκληρότητα 5-6 ενώ ειδικό βάρος 2,9-3,5 g/cm³. Δεν είναι πάντα εφικτό να διακριθούν χωρίς την μικροσκοπική εξέταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μηχανικές ιδιότητες

Η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης υπογείων και υπαίθριων έργων. Άλλωστε και οι γεωτρήσεις που αναρύχθηκαν και από τις οποίες λήφθηκαν πυρήνες των χαρακτηρισθέντων πετρωμάτων, έγιναν για την έρευνα πριν τον σχεδιασμό διάνοιξης σήραγγας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν έγιναν πειράματα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

3.1 Βάση δεδομένων

Την σχεσιακή βάση δεδομένων του εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων μπορεί να την επισκεφτεί κανείς στην ιστοσελίδα <http://minelab.mred.tuc.gr/rmdb>. Είναι πολύ χρήσιμη στην προτυποποίηση και στις τεχνικές προσαρμογής καταστατικών μηχανικών μοντέλων σε αποτελέσματα εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών. Περιέχει πολλά πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων καθώς εμπλουτίζεται από μικροσκοπικό και μακροσκοπικό φωτογραφικό υλικό και ανανεώνεται συνεχώς προσθέτοντας νέες πειραματικές δοκιμές σε νέα πετρώματα.

3.2 Μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων

Η εντατική κατάσταση ενός υλικού είναι δυνατόν να αναχθεί σε μια μορφή τέτοια, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη της αντοχής του υλικού. Συνηθέστερα στα πετρώματα τα κριτήρια αστοχίας εκφράζονται συναρτήσει των αντοχών ενός υλικού σε θλίψη, εφελκυσμό ή διάτμηση. Όταν οποιαδήποτε παράμετρος αντοχής του υλικού βρεθεί μικρότερη από την αντίστοιχη τάση καταπόνησης, τότε θεωρείται ότι επέρχεται αστοχία του υλικού.

Η ορθή και η διατμητική τάση σε ένα επίπεδο όπως διατυπώθηκε από τον Mohr περί το 1900, συνδέονται με μια γενική συνάρτηση της μορφής :

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (3.1)$$

η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Η συνάρτηση αυτή παριστάνεται από μια καμπύλη στο επίπεδο (σ, τ) . Αν οι τιμές σ, τ που περιγράφουν την εντατική κατάσταση κάποιου υλικού βρίσκονται κάτω από την καμπύλη $f(\sigma)$, τότε οι συνθήκες αστοχίας δεν πληρούνται. Συνεπώς ένα υλικό πρόκειται να αστοχήσει, όταν ο κύκλος του Mohr, που κατασκευάζεται για μια δεδομένη εντατική κατάσταση, εφάπτεται ή τέμνει την καμπύλη $f(\sigma)$. Ο προσδιορισμός της καμπύλης αυτής η οποία ονομάζεται περιβάλλουσα αστοχίας του Mohr, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί πειραματικά για κάθε πέτρωμα, για το οποίο έχουν γίνει τρεις τουλάχιστον τριαξονικές δοκιμές θλίψης.

Οι ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων που είναι κύριες για τον υπολογισμό της σταθερότητας τεχνικών έργων είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η συνοχή (και οι δύο μετρούνται σε μονάδες MPa) και η γωνία εσωτερικής τριβής (μετράται σε μοίρες ή ακτίνια), οι οποίες υπολογίζονται από τριαξονικές δοκιμές και προσαρμογή του γραμμικού κριτηρίου Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση:

$$|\tau| = c + \tan \varphi \sigma_n \quad (3.2)$$

όπου, τ συμβολίζει τη διατμητική αντοχή, c τη συνοχή και φ τη γωνία εσωτερικής τριβής του ψαθυρού πετρώματος, και σ_n την ορθή τάση.

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αξονική θλιπτική τάση που μπορεί να αντέξει ένα κυλινδρικό δοκίμιο μέχρι τη θραύση του, η συνοχή χαρακτηρίζει την δύναμη των δεσμών μεταξύ των κόκκων του γεωυλικού, ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής δείχνει κατά προσέγγιση τη γωνία θραύσης του υλικού.

Σύμφωνα με το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS) δίνεται από τη σχέση (Chen (1988)):

$$UCS = \frac{2ccos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3.3)$$

Το κριτήριο αστοχίας του Mohr-Coulomb έχει ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας. Ένα παραβολικό κριτήριο αστοχίας που προβλέπει μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό απ' ότι το Mohr-Coulomb και θεωρείται ότι περιγράφει καλύτερα τον συσχετισμό των αντοχών σε θλίψη και εφελκυσμό ενός πετρώματος είναι το κριτήριο αστοχίας των Hoek-Brown (Hoek et.al 2002) το οποίο έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{UCS} + 1} \quad (3.4)$$

όπου: σ_1, σ_3 = μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας

UCS = μοναξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (χωρίς ασυνέχειες)

m_i = σταθερά αντοχής

Η μοναξονική θλιπτική αντοχή (UCS) του πετρώματος μπορεί να εκτιμηθεί από εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια χωρίς ασυνέχειες δεδομένου ότι η επιρροή των ασυνεχειών της βραχώμαζας λαμβάνεται υπόψη μέσω άλλων παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown.

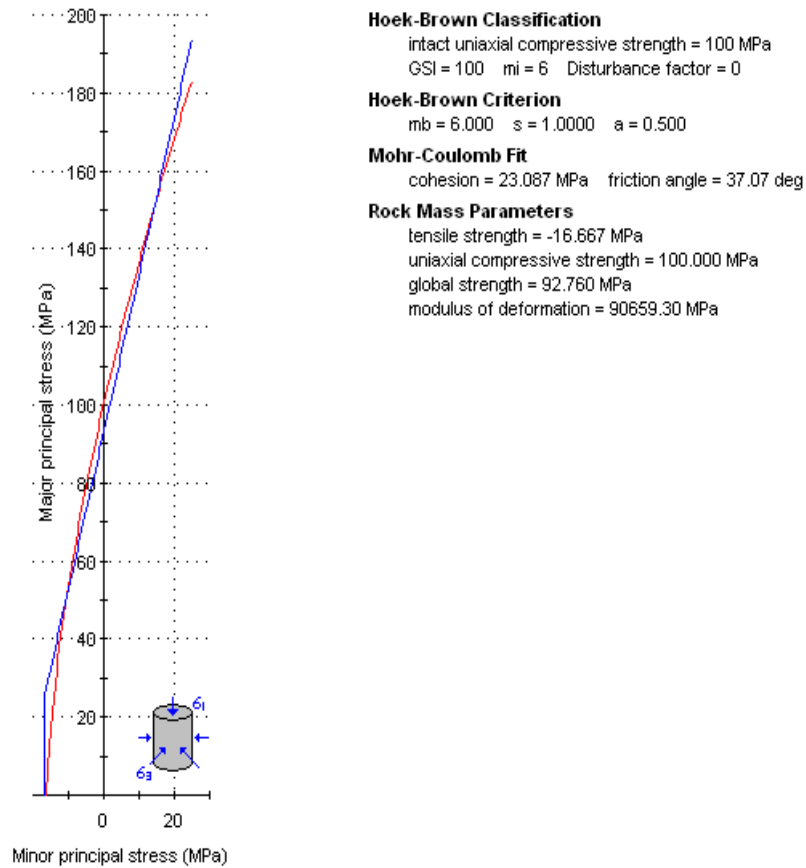
Αρκετά αριθμητικά προγράμματα μοντελοποίησης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση μεταξύ των δυο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c , ϕ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας (παραβολική καμπύλη περιβάλλουσα στο κριτήριο Hoek-Brown και ευθύγραμμη στο κριτήριο Mohr-Coulomb) η αντιστοιχία μεταξύ των δυο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων που μελετήθηκαν. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και η αντοχή σε εφελκυσμό (TS) υπήρχαν καταγεγραμμένες στην βάση δεδομένων. Η παράμετρος της συνοχής (c) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) του κριτηρίου M-C υπολογίστηκαν είτε άμεσα από δοκιμές αντοχής για την καλύτερη γραμμική παρεμβολή, είτε έμμεσα από το κριτήριο H-B. Σε αρκετές περιπτώσεις δεν υπήρχαν αρκετά πειραματικά δεδομένα ώστε να χρησιμοποιηθούν και τα δυο κριτήρια.

Για την προσαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα RockLab από την ιστοσελίδα www.rocsienc.com, ενώ για το κριτήριο Mohr-Coulomb, έγινε απλή γραμμική παρεμβολή με την βοήθεια του Excel.

Στο πρόγραμμα RockLab κατ' αρχήν εισάγεται η αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη από τα πειράματα. Στην συνέχεια μεταβάλλεται ο συντελεστής m_i , έτσι ώστε το κριτήριο αστοχίας να προβλέπει την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό του πετρώματος που προέκυψε από πειράματα. Όταν το κριτήριο συγκλίνει στα πειραματικά δεδομένα UCS και TS τότε λαμβάνονται οι τιμές της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού όπως υπολογίζονται από το πρόγραμμα σύμφωνα με την μέθοδο των Hoek et al. (2002) καθώς επίσης και η τιμή του συντελεστή m_i (Σχ.3.2). Τέλος συγκρίθηκε ο συντελεστής m_i που υπολογίστηκε, με αυτόν που υπάρχει στην βάση δεδομένων του Hoek-Brown για το κάθε πέτρωμα. Με βάση αυτήν την διαδικασία δημιουργήθηκαν οι παρακάτω πίνακες.

Analysis of Rock Strength using RocLab



Σχήμα 3.1: Κριτήριο H-B και ισοδύναμο M-C για τον υπολογισμό της συνοχής (c), της εσωτερικής τριβής και του συντελεστή m_i μέσω του προγράμματος RocLab

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων

A.1 Αμφιβολίτης

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	17,99	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	52,4	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	101,34	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	4,8	

Συντελεστής m _i (Hoek-Brown)	21
Συντελεστής m _i (Hoek-Brown's Database)	26 ± 6

A.2 Πτυχωμένος γενύσιος

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	37,35	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	52	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	213,65	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	8,5	

Συντελεστής m _i (Hoek-Brown)	25
Συντελεστής m _i (Hoek-Brown's Database)	28 ± 5

A.3 Γενύσιος Αυστρίας

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	24,67	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	53,8	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	142,73	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	4,6	

Συντελεστής m _i (Hoek-Brown)	31
Συντελεστής m _i (Hoek-Brown's Database)	28 ± 5

A.4 Γνεύσιος Στυρίας

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	18,80	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	53,6	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	108,63	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	3,6	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	30
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	28 ± 5

A.5 Αμφιβολίτης Αυστρίας

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	42,06	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	50	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	235,61	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	11,8	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	20
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	26 ± 6

A.6 Σχιστολιθικός γνεύσιος

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	13,96	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ (°)	52	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	79,85	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	3,2	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	25
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	28 ± 5

B.1 Πηγματούτης

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	13,89	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	51,6	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	79,24	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	3,4	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	24
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	20 ± 5

B.2 Γενύσιος

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	32,97	(μη επαρκή δεδομένα)
Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	51,2	(μη επαρκή δεδομένα)
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	187,37	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	8,1	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	23
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	28 ± 5

Γ.1 Δολομύτης

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	7,28	13,46
Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	43	50,2
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	36,81	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	3,76	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	10
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	9 ± 3

Γ.2 Ασβεστόλιθος “Warstein”

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	9,76	13,91
Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	49,5	43,9
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	54,37	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	2,87	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	19
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	12 ± 3

Γ.3 Ψαμμίτης Στυρίας

Μηχανικές ιδιότητες	Κριτήρια	
	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Συνοχή, c (MPa)	9,08	14,4
Γωνία εσωτερικής τριβής, ϕ (°)	48,7	41
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	50,03	
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	2,85	

Συντελεστής m_i (Hoek-Brown)	17,5
Συντελεστής m_i (Hoek-Brown's Database)	17 ± 4

Από τις μηχανικές ιδιότητες που φαίνονται στον πίνακα 3.1 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τα πετρώματα Α.1÷Γ.3, ο συντελεστής αντοχής m_i που υπολογίστηκε απ’ την καλύτερη προσαρμογή του κριτηρίου H-B στα πειραματικά δεδομένα TS και UCS, βρίσκεται εντός των ορίων που προτείνεται από τη βάση δεδομένων με εξαίρεση τον ασβεστόλιθο «Warstein» Γ2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδος περιστροφικής μικροδιάτρησης

Η μέθοδος της περιστροφικής διάτρησης μικρής διαμέτρου ($2\div 5\text{mm}$) είναι η μοναδική μέθοδος που υπάρχει έως σήμερα για τον επί τόπου, σχεδόν μη-καταστροφικό χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων δομικών λίθων ή υλικών πίσω από την επιφάνεια μιας φυσικής ή τεχνητής κατασκευής (*Exadaktylos et al. (2002)*, *Exadaktylos et al. (2000)*, *Tiano et al. (2000)*, *Tiano & Viggiano (2000)*). Στην περίπτωση που η διάμετρος του διατρήματος είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών η διάτρηση δεν επιφέρει σημαντική καταστροφή του δομικού λίθου ενώ αυτή η μερική καταστροφή, λόγω της όρυξης του μικροδιατρήματος, είναι εύκολα αποκαταστάσιμη (σφράγισμα με κονίαμα εκ της σκόνης του υλικού που προκύπτει κατά τη διάτρηση). Σημειωτέον ότι μ' αυτή τη μέθοδο δεν χρειάζεται μορφοποίηση δοκιμίων αλλά αρκούν και ακανόνιστα τεμάχια πετρώματος μεγέθους λίγων εκατοστών.

4.1 Αρχή της μεθόδου

Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στη συνεχή και ακριβή μέτρηση της *αξονικής δύναμης διάτρησης* (*Weight-on-bit, WOB*) και της *ροπής περιστροφής* (*Torque, T*), συναρτήσεως του βάθους διεξόδου κοπτικού άκρου, κατά την εκτέλεση δοκιμών περιστροφικής διάτρησης στο υλικό. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών η *ταχύτητα διάτρησης* v (**mm/min**) και η *ταχύτητα περιστροφής* ω (**rpm**), διατηρούνται σταθερές. Το βάθος των διατρημάτων κυμαίνεται από 5 έως 30 mm και η διάμετρος των διατρημάτων από 3 έως 9 mm. Η πολύ μικρή διάμετρος του διατρήματος είναι που καθιστά τη μέθοδο αυτή σχεδόν μη-καταστροφική, εφόσον είναι δυνατή η αποκατάσταση του διατρήματος μετά το πέρας μιας δοκιμής.

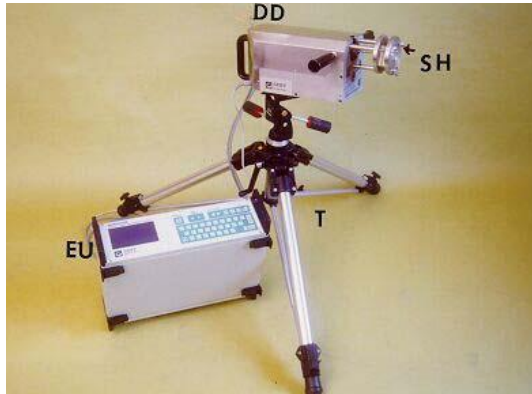
Οι ιδιότητες των πετρωμάτων που επηρεάζουν σε πρώτο βαθμό την αξονική δύναμη και τη ροπή περιστροφής που απαιτούνται για τη διάτρησή τους είναι οι βασικές ιδιότητες αντοχής αυτών (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζει σε δεύτερο βαθμό την αντίσταση στη διάτρηση εφόσον αυτή είναι «καταστροφικού χαρακτήρα»

διαδικασία) (*Detournay & Defourny (1992)*). Έτσι τα μετρούμενα μεγέθη της αξονικής δύναμης και της ροπής στρέψης κατά την περιστροφική μικροδιάτρηση μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν ως χαρακτηριστικές ιδιότητες αντοχής του εκάστοτε υλικού, είτε να συσχετισθούν μ' αυτές τις ιδιότητες αντοχής με σκοπό την χρήση αυτών των σχέσεων για την εκτίμηση της αντοχής των πετρωμάτων με βάση δοκιμές μικροδιάτρησης.

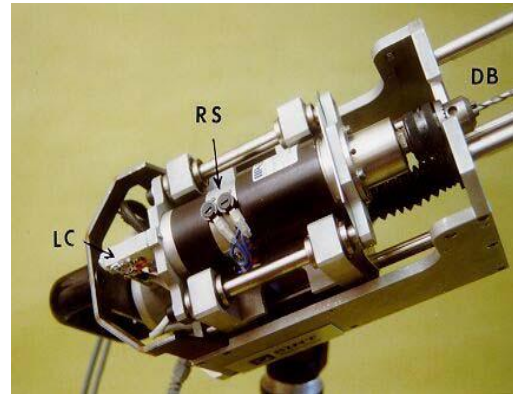
4.2 Πειραματική συσκευή

Το μεταφερόμενο πρωτότυπο όργανο που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση επί τόπου ή εργαστηριακών δοκιμών σε διαφορετικά δοκίμια φυσικών ή τεχνητών υλικών (π.χ. πετρωμάτων διακοσμητικών ή μη, αδρανών, δομικών ή ασφαλικών υλικών, κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, κεραμικών κ.ά.), με τη μέθοδο της περιστροφικής διάτρησης μικρής διαμέτρου, ονομάζεται *Drilling Force-Torque Measurement System (DFTMS)* (*Tiano et al. (2000)*). Το DFTMS αποτελείται από τα εξής τμήματα (Σχ.4.1):

- *Μηχανική συσκευή*: είναι εξοπλισμένη με κινητήρες για τη μετατόπιση και την περιστροφή του διατρητικού στελέχους (DD στο Σχ.4.1α) καθώς και με κελιά φορτίου (LC στο Σχ.4.1β) για τη μέτρηση της αξονικής δύναμης διάτρησης και της ροπής περιστροφής.
- *Ηλεκτρονική συσκευή*: περιλαμβάνει τη μονάδα ισχύος και τον πίνακα ελέγχου του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC), ενισχυτή σήματος κελιών φορτίου και φορητό Η/Υ (ΕΥ στο Σχ.4.1α).
- *Ορθοστάτης τύπου τρίποδα*: Μπορεί να ρυθμιστεί σε ύψος από 830 έως 1600mm με τα σκέλη του να βρίσκονται σε απόσταση έως 900mm από τη θέση διάτρησης. Τα σκέλη του τρίποδα μπορούν να σταθεροποιηθούν στο δάπεδο εργασίας με τη χρήση κοχλίων ή καρφιών. Η κεφαλή του τρίποδα έχει τη δυνατότητα της τρισδιάστατης κίνησης με σκοπό τη σωστή τοποθέτηση της διατρητικής μονάδας (Τ στο Σχ.4.1α).
- *Λοιπός εξοπλισμός*: μεταλλικές πλάκες, οι οποίες προσαρμόζονται με κοχλίες στο ρύγχος της μηχανικής συσκευής, για τη στερέωση διαμορφωμένων δοκιμίων ή θραυσμάτων (SH στο Σχ.4.1α), καλώδια τροφοδοσίας και συνδέσεων και λογισμικό για την επεξεργασία των μετρήσεων.



(α)



(β)

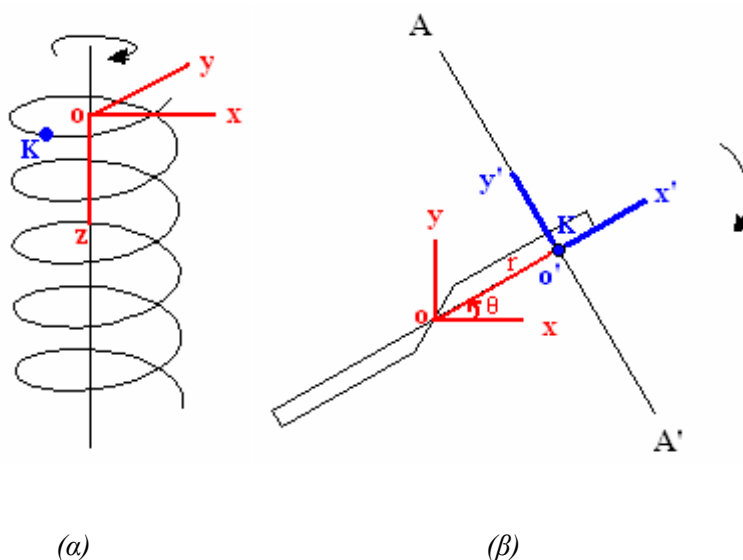
Σχήμα 4.1. Φωτογραφίες της μικροδιατρητικής συσκευής: α) εξαρτήματα του οργάνου (DFTMS). EU= ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου και φορητός Η/Υ (electronic control unit), DD= συσκευή διάτρησης (drilling device), SH= συγκρατητής δοκιμίου (sample holder), T= τρίποδας με κεφαλή για τρισδιάστατη κίνηση (tripod with three-dimensional moving head), β) LC= κελί φορτίου (load cell), RS= αισθητήρες ταχύτητας περιστροφής (rotational speed sensors), DB= κοπτικό άκρο (drill bit)

Το DFTMS είναι σχεδιασμένο να εκτελεί μια απλή αλλά με ακρίβεια δοκιμή αντίστασης σε διάτρηση, με συνεχή μέτρηση της αξονικής δύναμης και της ροπής που απαιτείται για να ανοιχτεί μια οπή στο πέτρωμα, κατά την προχώρηση και περιστροφή του κοπτικού άκρου. Η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού άκρου κυμαίνεται από 100-1200 rpm και ελέγχεται από την ηλεκτρονική συσκευή (RS στην Σχ.4.1β). Η ταχύτητα διάτρησης κυμαίνεται από 1-40mm/min και ελέγχεται από βηματικό κινητήρα με ευκρίνεια 0,0025 mm/περιστροφή. Οι δύο ταχύτητες μπορούν να προδιαγραφούν από το χρήστη και παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια της δοκιμής. Η θέση του κοπτικού άκρου ως προς την επιφάνεια του υλικού (σημείο εκκίνησης) είναι γνωστή γιατί ελέγχεται απευθείας από το λογισμικό μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής και ενώ η συσκευή μετράει την αξονική δύναμη διάτρησης και τη ροπή περιστροφής συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια του τοίχου ή του δοκιμίου, το λογισμικό αποθηκεύει και αναπαριστάνει γραφικά τις τιμές αυτών συναρτήσει του βάθους διάτρησης.

4.3 Φαινομενολογικό μοντέλο περιστροφικής διάτρησης

Θεωρείται ένα τέλεια αιχμηρό κοπτικό άκρο, κάθετο σε οριζόντια επιφάνεια πετρώματος, το οποίο εκτελεί περιστροφική διάτρηση. Θεωρείται επίσης ότι το κοπτικό άκρο περιστρέφεται και προωθείται με σταθερή γωνιακή και αξονική ταχύτητα αντίστοιχα. Καθώς κινείται θραύει ανά περιστροφή λεπτό στρώμα υλικού σταθερού πάχους, ενώ ένα σημείο (σημείο K) στην αιχμή του κοπτικού άκρου εκτελεί ελικοειδή κίνηση ως προς σταθερό σύστημα συντεταγμένων $Oxyz$, με κέντρο πάνω στον άξονα περιστροφής και άξονα z παράλληλο με αυτόν (Σχ.4.2α).



Σχήμα4.2: Κίνηση των σημείων του κοπτικού άκρου κατά την περιστροφική διάτρηση: α) ελικοειδής κίνηση σημείου που βρίσκεται στην αιχμή του κοπτικού άκρου κατά την περιστροφική διάτρηση, β) κάτοψη του κοπτικού άκρου

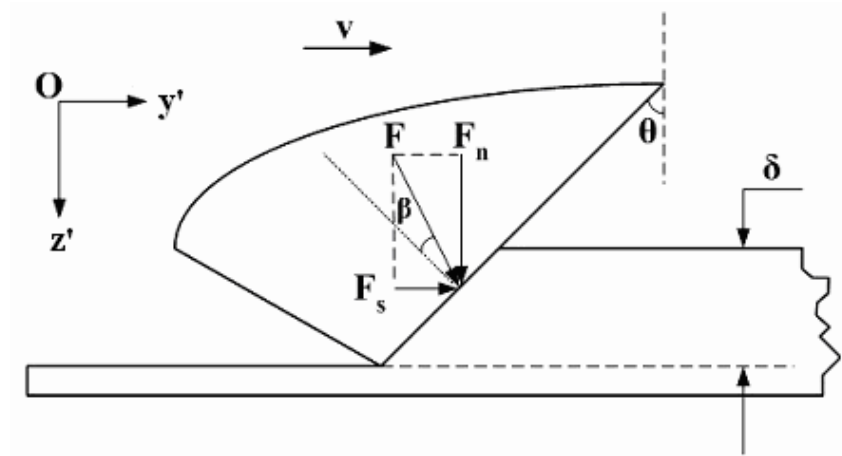
Από την κάτοψη του κοπτικού άκρου (Σχ. 4.2β) μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θέση του σημείου K στο επίπεδο Oxy μπορεί να δοθεί με την απόσταση του (r) από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων $Oxyz$ και τη γωνία (θ) που σχηματίζει το διάνυσμα της απόστασης ($\vec{r}$) με τον άξονα Ox . Η γραμμική ταχύτητα v του σημείου K δίνεται από την σχέση:

$$v = \omega r \quad (4.1)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα. Η ταχύτητα v είναι κατά πολύ μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών ακουστικών κυμάτων, οπότε μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι το κοπτικό άκρο ασκεί στο πέτρωμα σχεδόν στατική φόρτιση.

Με κέντρο το σημείο K θεωρείται τοπικό σύστημα συντεταγμένων $O'x'y'z'$ (Σχ.4.2β) το οποίο ακολουθεί την κίνηση του σημείου (περιστροφή και μεταφορά).

Στο Σχήμα 4.3 έχει σχεδιαστεί η τομή του αιχμηρού κοπτικού άκρου κατά μήκος του άξονα η οποία περνάει από το σημείο K (τομή A-A').



Σχήμα 4.3: Τομή A-A': Σύστημα δυνάμεων που δρουν στο πέτρωμα κατά την επαφή του με αιχμηρό κοπτικό άκρο το οποίο κινείται προς τα δεξιά

Μηχανισμοί θραύσης με βάση τη θεωρία της πλαστικότητας έχουν προταθεί αρχικά από τον Merchant (1944, 1945a,b). Ο Merchant πρότεινε μοντέλο που προϋποθέτει την κοπή μετάλλων επί επιπέδου διατμητικής αστοχίας και το κριτήριο αστοχίας των Mohr-Coulomb. Όμως, το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου αυτού περιορίζεται αισθητά εξαιτίας της παραδοχής που γίνεται ότι η κοπτική αιχμή του εργαλείου «γέρνει» προς τα πίσω. Αντίθετα, στην κοπή των πετρωμάτων με το όργανο DFTMS το κοπτικό «γέρνει» προς τα μπροστά (Σχ. 4.3).

Κατά τη διάρκεια της κοπής μεταδίδεται από το κοπτικό άκρο στο πέτρωμα μια δύναμη F , η οποία μπορεί να αναλυθεί σε μια δύναμη παράλληλη στην επιφάνεια του πετρώματος (F_s) και μια δύναμη κάθετη στην επιφάνεια του πετρώματος (F_n):

$$F = F_s + F_n \quad (4.2)$$

Η δύναμη F_s , δρώντας σχεδόν κάθετα στο ύψος του λεπτού στρώματος που θραύεται ανά περιστροφή, έχει τον κύριο λόγο στην αποκόλληση και θραύση των κόκκων του πετρώματος. Παράλληλα ο ρόλος της δύναμης F_n , είναι να επιτυγχάνει

τη συνεχή επαφή του κοπτικού άκρου με το πέτρωμα και να εξασφαλίζει την προχώρηση του σε βάθος. Πιο συγκεκριμένα η δύναμη F_n είναι η αξονική δύναμη διάτρησης (ή το βάρος στο κοπτικό άκρο, WOB), ενώ η δύναμη F_s , δίνεται από τη σχέση:

$$F_s = \frac{T}{\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (4.3)$$

όπου a είναι η ακτίνα του κοπτικού άκρου και T είναι η ροπή.

Σε μια ιδανική περίπτωση αιχμηρού κοπτικού άκρου και αγνοώντας τη δύναμη τριβής, κάθετα προς το χαρτί στο Σχήμα 4.3, λόγω συμμετρίας ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$F_n = \tan(\theta + \beta) F_s \quad (4.4)$$

όπου θ είναι η αρνητική κλίση της γωνίας του κοπτικού άκρου και β η γωνία τριβής της διεπιφάνειας κοπτικού άκρου-πετρώματος.

Το βάθος κοπής ανά περιστροφή δ είναι:

$$\delta = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (4.5)$$

όπου v είναι ο ρυθμός διάτρησης και ω η ταχύτητα περιστροφής ή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού άκρου.

Η ειδική ενέργεια διάτρησης J που σχετίζεται με την αξονική δύναμη διάτρησης δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{F_n}{a\delta} \quad (4.6)$$

και η ειδική ενέργεια διάτρησης E που σχετίζεται με τη ροπή στρέψης δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{F_s}{a\delta} \quad (4.7)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Δοκιμές μικροδιάτρησης

Δοκιμές μικροδιάτρησης έγιναν μόνο σε δυο πετρώματα λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης χαλαζία των πετρωμάτων, που έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική φθορά των κοπτικών άκρων, που καθιστά την μέθοδο αντιοικονομική. Μετρήθηκε η αξονική δύναμη διάτρησης και η ροπή περιστροφής που απαιτείται για την διάτρηση του σε ένα εύρος ρυθμίσεων ταχύτητας διάτρησης και ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού άκρου. Ο στόχος των πειραμάτων είναι να συσχετισθούν οι μετρούμενες ποσότητες (αξονική δύναμη, ροπή) με τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, γωνία εσωτερικής τριβής, συνοχή, αντοχή σε εφελκυσμό), καθώς να γίνει και μια στατιστική προσέγγιση με τα ορυκτολογικά συστατικά του πετρώματος.

Εώς σήμερα το όργανο DFTMS χρησιμοποιείται από διάφορους ερευνητές για τον συσχετισμό της αξονικής δύναμης διάτρησης με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των πετρωμάτων για δεδομένες παραμέτρους διάτρησης $\omega = 600 \text{ rpm}$ και $v = 10 \text{ mm / min}$ (λ.χ. *Tiano et al. (2000)*, *Tiano & Viggiano (2000)*). Η προσέγγιση αυτή δεν έδωσε μέχρι σήμερα καλές συσχετίσεις, εφόσον η αξονική δύναμη διάτρησης, από μόνη της και για συγκεκριμένες παραμέτρους διάτρησης (v , ω), δεν περικλείει όλες τις παραμέτρους που προσδιορίζουν την αντοχή των πετρωμάτων και επιπλέον διαστασιολογικά δεν είναι «τάση».

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια ύψους $\times$ διάμετρο = $2\text{cm} \times 5\text{cm}$ από κάθε ένα από τα μελετούμενα πετρώματα στο Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Λόγω του όγκου δεδομένων, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του ασβεστόλιθου «Warstein». Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και τον δολομίτη ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

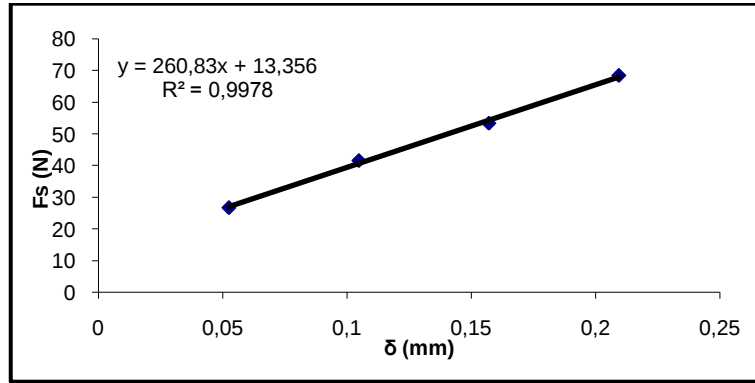
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Αρχικά ρυθμίζεται για ταχύτητα διάτρησης $v = 5mm/min$ και ταχύτητα περιστροφής $\omega = 600 rpm$ του κοπτικού άκρου. Η αξονική δύναμη και η ροπή μεταβάλλονται έντονα στην αρχή της διάτρησης λόγω του ότι κατά την εκκίνηση της διάτρησης το κοπτικό άκρο δεν βρίσκεται σε τέλεια επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου. Στην συνέχεια οι μετρήσεις σταθεροποιούνται και προσεγγίζουν ασυμπτωτικά σε μια τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά από τα πρώτα 1-2mm της διάτρησης, το πέτρωμα και το κοπτικό βρίσκονται σε τέλεια επαφή μεταξύ τους και η διάτρηση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σε φάση σταθερής κατάστασης.

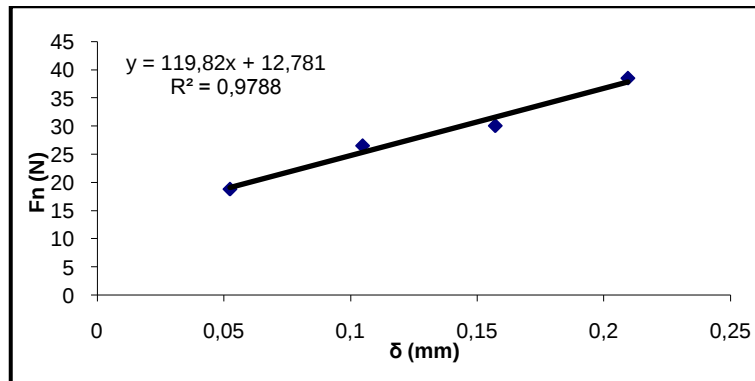
Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για διάφορα ζεύγη ταχύτητας διάτρησης και ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού άκρου στο ίδιο πέτρωμα σε διαφορετικό σημείο ώστε να διαπερνάει διαφορετικούς κρυστάλλους κάθε φορά και για το ίδιο ζεύγος ταχύτητας διάτρησης και ταχύτητας περιστροφής να γινόταν παρατήρηση για τυχόν μεταβολές στο αποτέλεσμα.

Στο κάθε ζεύγος ρυθμίσεων αντιστοιχεί ένα βάθος κοπής ανά περιστροφή (δ) που δίνεται από την εξίσωση (4.5). Επίσης, η κάθετη δύναμη επί του κοπτικού άκρου (F_n) ισούται με την αξονική δύναμη διάτρησης, ενώ η παράλληλη δύναμη (F_s) δίνεται από τη σχέση (4.3).

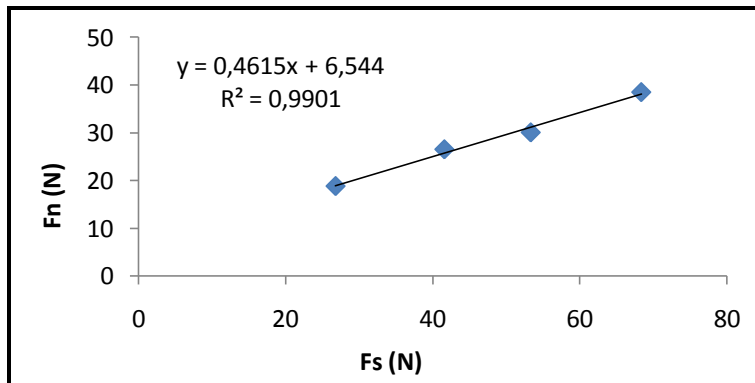
Οι δύο αυτές συνιστώσες της δύναμης κοπής που υπολογίστηκαν για κάθε δοκιμή απεικονίστηκαν γραφικά συναρτήσει του βάθους κοπής όπως φαίνεται στα αμέσως επόμενα συγκεντρωτικά διαγράμματα, ενώ υπολογίστηκε επίσης και αποτέμνουσα της ορθής δύναμης (F_n). Γραφικά απεικονίστηκε επίσης και η κάθετη δύναμη συναρτήσει της παράλληλης δύναμης κοπής.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.1: Συγκεντρωτικά διαγράμματα του ασβεστόλιθου “Warstein” όπου φαίνονται τα σημεία που προέκυψαν από τις δοκιμές, και οι γραμμικές παρεμβολές τους: α) Εφαπτομενική δύναμη διάτρησης (F_s) συναρτήσει του βάθους κοπής (δ), β) Αξονική δύναμη διάτρησης (F_n) συναρτήσει του βάθους κοπής (δ) και γ) αξονική δύναμη διάτρησης (F_n) συναρτήσει της εφαπτομενικής δύναμης διάτρησης (F_s)

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα του Σχ. 5.1 παρατηρείται ότι οι συνιστώσες της δύναμης κοπής σχετίζονται γραμμικά με το βάθος και ότι η σχέση μεταξύ τους είναι επίσης γραμμική. Το μητρώο δοκιμών διάτρησης που εκτελέστηκαν για τον ασβεστόλιθο «Warstein» φαίνεται στον πίνακα 5.1.

Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
WARST_PYF01NN.DRM	600	5	0,0523
WARST_PYF02NN.DRM	600	10	0,1047
WARST_PYF03NN.DRM	600	15	0,1571
WARST_PYF04NN.DRM	600	20	0,2094
WARST_PYF05NN.DRM	600	5	0,0523

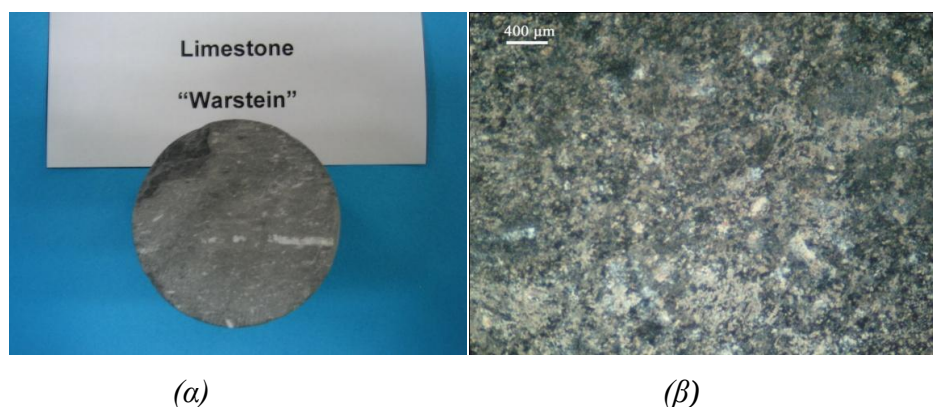
Πίνακας 5.1. Μητρώο δοκιμών διάτρησης του ασβεστόλιθου «Warstein»

Η ορυκτολογική ανάλυση του πετρώματος όπως προέκυψε με την μέθοδο XRay Diffraction υπάρχει στο παράρτημα, ενώ στον πίνακα 5.2 φαίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

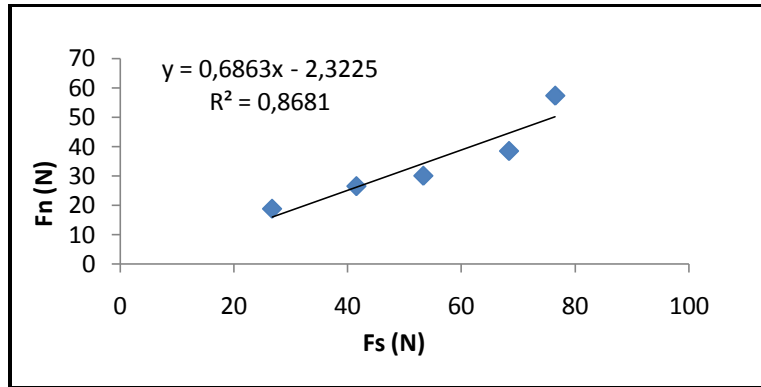
Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Ασβεστίτης	99%	100-200	150
Χαλαζίας	1%		

Πίνακας 5.2 : Ορυκτολογική σύσταση του ασβεστόλιθου «Warstein»

Ανάλογα την ορυκτολογική σύσταση ενός πετρώματος και την μικροδομή του παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στην αξονική δύναμη διάτρησης και στην ροπή περιστροφής που απαιτείται για την διάτρηση του.



Σχήμα 5.2: (α) Δοκίμιο πειραμάτων, (β) Κόκκοι ασβεστίτη.Διερχόμενο φως.(x-nicols)



Σχήμα 5.3: Συγκεντρωτικό διαγράμματα του ασβεστόλιθου “Warstein” το οποίο περιλαμβάνει και διατρήματα στα οποία συναντήθηκε και χαλαζίας

Για παράδειγμα, στο ασβετόλιθο “Warstein” στις δοκιμές που έγιναν σε μερικά σημεία, παρόλο που το πέτρωμα και το ζεύγος ρυθμίσεων είναι το ίδιο παρατηρείται μεγάλη αύξηση της αξονικής δύναμης διάτρησης και αύξηση της ροπής περιστροφής του κοπτικού άκρου που απαιτείται για την διάτρηση του. Αυτό οφείλεται στην διαφοροποίηση της μικροδομής του πετρώματος από σημείο σε σημείο. Συναντήθηκε κρύσταλλος με μεγαλύτερη αντοχή από πριν, πιθανότατα χαλαζία. (σκληρότητα μεγαλύτερη του ασβεστίτη). Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κλίσης της ευθείας του διαγράμματος της αξονικής δύναμης διάτρησης (F_n) συναρτήσει της εφαπτομενικής δύναμης διάτρησης (F_s), (Σχ. 5.3).

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τον δολομίτη ο οποίος αποτελείται εξ ολοκλήρου από ένα μόνο ορυκτό, ώστε να εξαχθούν παρόμοια διαγράμματα και για αυτόν. Η κλίση της ευθείας στα δύο πρώτα διαγράμματα στο Σχ. 5.1, η οποία έχει διαστάσεις δύναμης/μήκος και τελικά τάσης αν διαιρεθεί με μοναδιαίο μήκος κάθετα προς το κατακόρυφο επίπεδο της κοπής, καθώς και η αδιάστατη κλίση του τρίτου διαγράμματος, χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την μικροδομή των πετρωμάτων όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Σύμφωνα με την ορυκτολογική σύσταση του κάθε πετρώματος και με τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές των μικροδιατρήσεων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα για να διερευνηθεί η επιρροή της μικροδομής στις ειδικές ενέργειες που δαπανώνται κατά την διάτρηση. Δηλαδή, της ειδικής ενέργειας που σχετίζεται με την αξονική δύναμη και αυτής που σχετίζεται με την ροπή στρέψης και έχουν μονάδες

τάσης, οι οποίες με την σειρά τους συσχετίζονται με τις ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συσχέτιση αποτελεσμάτων δοκιμών μικροδιάτρησης, μηχανικών ιδιοτήτων, ορυκτολογικών συστατικών και της μικροδομής των πετρωμάτων

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για δυο πετρώματα από αυτά εκτελέστηκε μια σειρά δοκιμών για διάφορες ρυθμίσεις της ταχύτητας διάτρησης και περιστροφής του κοπτικού άκρου. Λόγω όμως της σημαντικής φθοράς των κοπτικών άκρων δεν έγιναν δοκιμές και σε άλλα πετρώματα. Επειδή τα πειραματικά δεδομένα μας είναι ελάχιστα για να συσχετιστούν με την ορυκτολογική ανάλυση των πετρωμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από πειράματα που έγιναν σε πετρώματα για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας της κ. Τσουβάλα (2005). Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1

Στον πίνακα 6.2 φαίνονται συγκεντρωτικά οι κλίσεις που υπολογίστηκαν για τον ασβεστόλιθο «Warstein» και τον δολομίτη, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες όλων των πετρωμάτων οι οποίες ήταν καταγεγραμμένες στην βάση δεδομένων, όπως και τα ποσοστά των ορυκτών που υπάρχουν σε κάθε πέτρωμα.

Η μέση σκληρότητα κατά Mohs κάθε πετρώματος υπολογίστηκε από την σκληρότητα (της κλίμακας Mohs) των ορυκτών που υπάρχουν σε αυτό. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \text{Μέση σκληρότητα} = \sum ((\text{σκληρ. } 1^{\text{ου}} \text{ ορυκτού} \times \text{ποσοστό } 1^{\text{ου}} \text{ ορυκτού}) + \dots \dots \dots \\ \dots + (\text{σκληρ. } N^{\text{ου}} \text{ ορυκτού} \times \text{ποσοστό } N^{\text{ου}} \text{ ορυκτού}) \end{aligned}$$

Επίσης σημειώνεται ότι για τα κοκκώδη μεταλλικά υλικά έχει προταθεί η ακόλουθη σχέση της αντοχής σ_y με το μέσο μέγεθος κόκκων d που ονομάζεται Hall-Petch relationship (<http://en.wikipedia.org>).

Εκφράζεται από την σχέση:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (6.1)$$

Όπου σ_0 είναι η παράμετρος του υλικού για την τάση εκκίνησης της κινητικότητας των εξαρμώσεων (dislocations) και k_y είναι συντελεστής αντοχής.

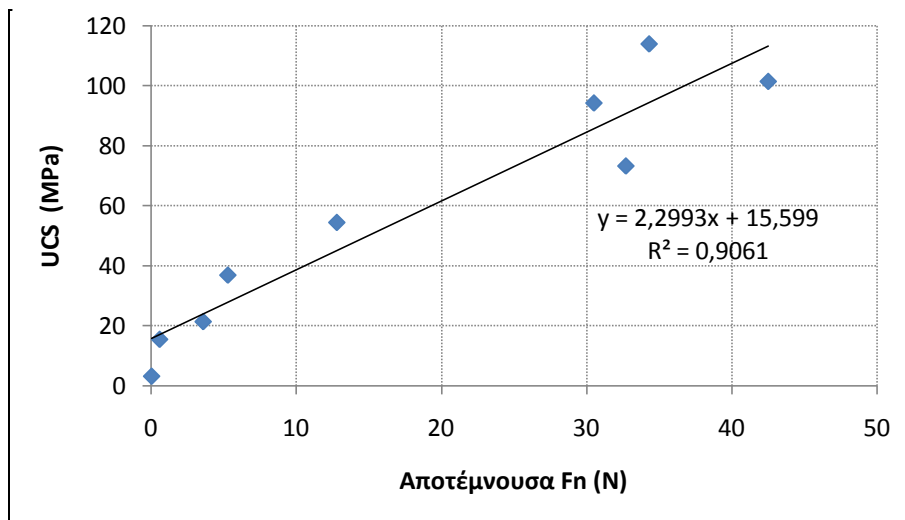
Υλικό	Μηχανικές ιδιότητες				Σύσταση (κ. β.)		Κλίσεις ευθειών				Μέση σκληρότητα (Mohs)	Μέσο μέγεθος κόκκων (d) (μm)
	UCS (Mpa)	c (Mpa)	φ (°)	TS (Mpa)	Ορυκτό	(%)	Fs - δ [N/mm]	Fn - δ [N/mm]	Fn - Fs	Αποτέμνουσα Fn [N]		
Μάρμαρο Διονύσου	94,2	22,4	39,1	4,40	ασβεστίτης δολομίτης άστριοι χαλαζίας μαρμαρυγίες	99 0,25 0,25 0,25 0,25	285,84	227,83	0,81	30,5	3,026	300
Μάρμαρο Gioia	101,4	26,4	35	7,50	ασβεστίτης δολομίτης άστριοι χαλαζίας μαρμαρυγίες	99 0,25 0,25 0,25 0,25	194,92	128,38	0,67	42,5	3,026	100
Μάρμαρο Lorano	73,2	18,3	39,4	5,60	ασβεστίτης άστριοι χαλαζίας μαρμαρυγίες	99 0,30 0,30 0,30	235,37	144,99	0,62	32,7	3,027	200
Μάρμαρο Cervairole	113,9	28,8	36,4	9,40	ασβεστίτης δολομίτης	95 5	266,52	233,88	0,89	34,3	3,0375	200
Ασβεστόλιθος Lecce	15,4	6,7	14,2	1,93	χαλαζίας ασβεστίτης μαρμαρυγίες	0,10 95 4,90	19,95	6,64	0,31	0,6	3,1265	100
Ασβεστόλιθος Vicenza	21,3	6,8	24,6	2,70	χαλαζίας ασβεστίτης μαρμαρυγίες	0,10 95 4,90	21,87	12,98	0,59	3,6	3,1265	200
Ψαμμίτης Serena	107,6	14,6	59,7	4,78	ασβεστίτης άστριοι χαλαζίας μαρμαρυγίες	11 26 33 30	216,66	315,79	1,47	18,9	5,98	500

Πίνακας 6.1 : Μηχανικές ιδιότητες, ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων και κλίσεις από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα. (Τσουβάλα, (2005))

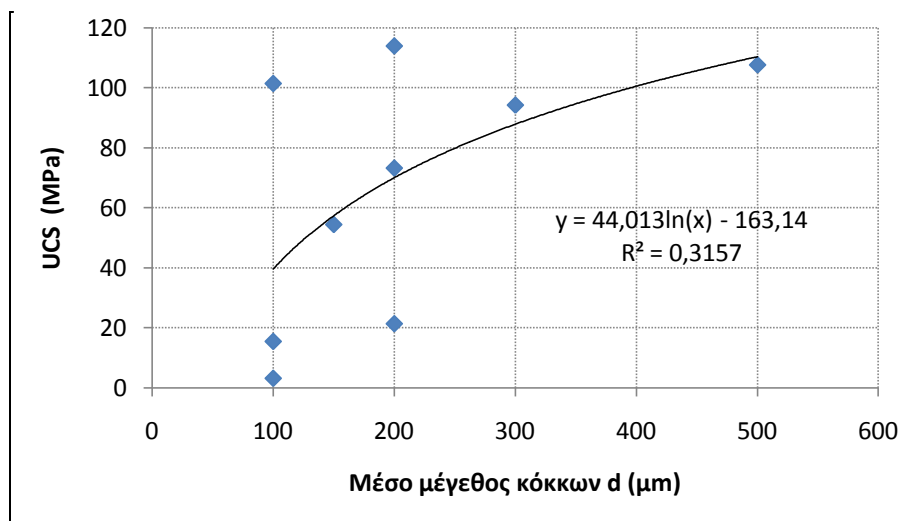
Υλικό	Μηχανικές ιδιότητες				Σύσταση (κ. β.)		Κλίσεις ευθειών				Μέση σκληρότητα (Mohs)	Μέσο μέγεθος κόκκων (d) (μm)
	UCS (Mpa)	c (Mpa)	φ (°)	TS (Mpa)	Ορυκτό	(%)	Fs - δ [N/mm]	Fn - δ [N/mm]	Fn - Fs	Αποτέ-μνουσα Fn [N]		
Ασβεστόλιθος Warstein	54,37	9,76	49,48	2,87	ασβεστίτης χαλαζίας	99 1	260,83	119,82	0,4615	12,8	3,04	150
Δολομίτης	36,81	7,28	42,95	3,76	δολομίτης	100	36,60	16,29	0,3719	5,3	3,75	-
Ψαμμίτης	50,03	9,08	48,69	2,85	χαλαζίας καλ. άστριος	90 10	—	—	—	—	7	250
Αμφιβολίτης	101,3	17,99	52,41	4,8	χαλαζίας γρανάτης βιοτίτης πλαγιόκλαστα αμφίβολοι	23 09 23 39 06	—	—	—	—	5,77	500
Πτυχωμένος γενύσιος	213,6	37,35	51,99	8,5	χαλαζίας βιοτίτης επίδοτο πλαγιόκλαστα γρανάτης καλ. άστριος	54 09 02 23 07 05	—	—	—	—	6,425	100
Γενύσιος Αυστρίας	142,7	24,67	53,84	4,6	χαλαζίας καλ. άστριος πλαγιόκλαστα βιοτίτης	58 10 24 08	—	—	—	—	6,5	250
Γενύσιος Στύριας	108,6	18,80	53,57	3,6	χαλαζίας διοψίδιος ζωισίτης καλ. άστριος μοσχοβίτης	52 20 15 10 03	—	—	—	—	6,345	200

Αμφιβολίτης Αυστρίας	235,6	42,06	49,96	11,8	χαλαζίας πλαγιόκλαστα βιοτίτης γρανάτης αμφιβολίτης	35 29 16 15 05	—	—	—	—	5,95	300
Σχιστολιθικός γνεύσιος	79,85	13,96	51,99	3,2	χαλαζίας πλαγιόκλαστα μοσχοβίτης γρανάτης βιοτίτης	50 30 08 06 06	—	—	—	—	6,1575	350
Πηγματίτης	79,24	13,89	51,62	3,4	χαλαζίας πλαγιόκλαστα μοσχοβίτης καλ. άστριοι γρανάτης	55 16 09 17 03	—	—	—	—	6,365	100
Γνεύσιος	187,3	32,97	51,24	8,1	χαλαζίας πλαγιόκλαστα μοσχοβίτης σταυρόλιθος	43 21 17 19	—	—	—	—	5,6025	300

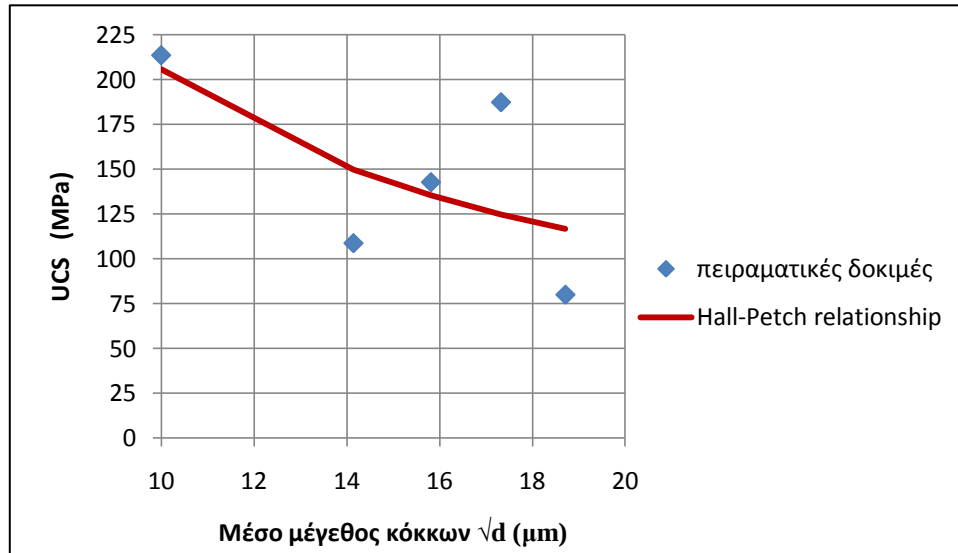
Πίνακας 6.2 : Μηχανικές ιδιότητες, ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων και κλίσεις από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα



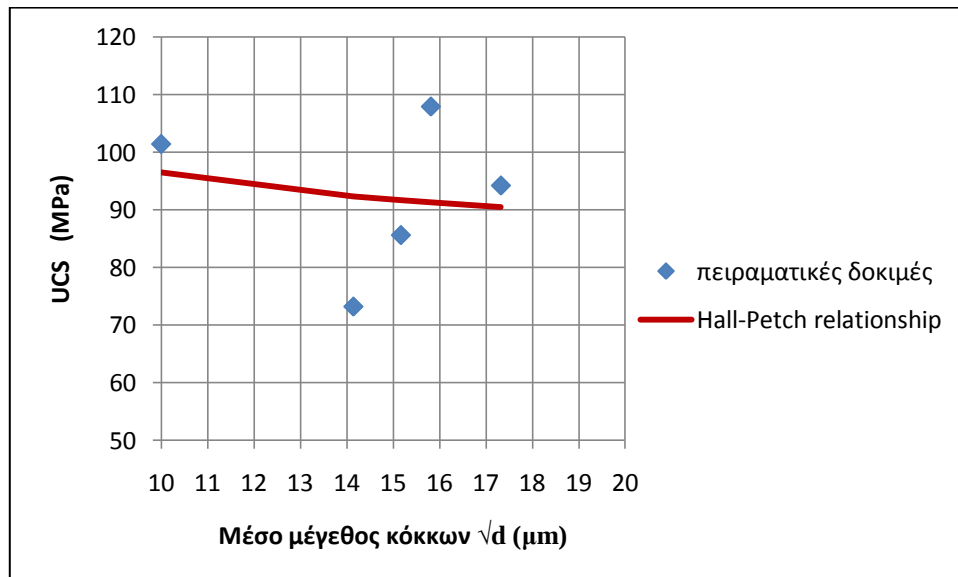
Σχήμα 6.1: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με την αποτέμνουσα της αξονικής δύναμης διάτρησης



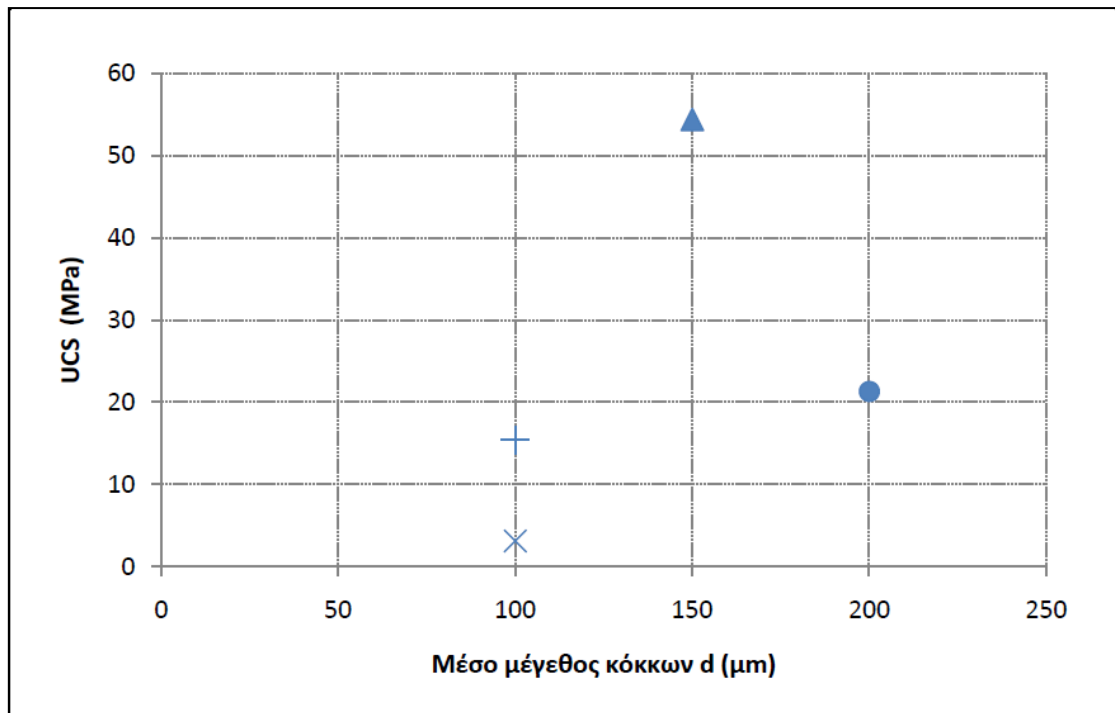
Σχήμα 6.2: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων όλων των πετρωμάτων



Σχήμα 6.3: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων της ομάδας των γενέσιων



Σχήμα 6.4: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων της ομάδας των μαρμάρων



Σχήμα 6.5: Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων της ομάδας των ασβεστολίθων

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα του σχήματος 6.1 υπάρχει καλή συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με την αποτέμνουσα της αξονικής δύναμης διάτρησης, (συντελεστής συσχέτισης $R^2 = 0,90$). Αυτό σημαίνει πως το εν λόγω διάγραμμα εκτιμάται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα για την εκτίμηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ενός νέου πετρώματος.

Σε αντίθεση με την αποτέμνουσα της αξονικής δύναμης διάτρησης από το διάγραμμα του σχήματος 6.2 φαίνεται ότι υπάρχει συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων των πετρωμάτων. Παρόλα αυτά ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ μικρός ($R^2 = 0,31$) και φαίνεται να είναι απίθανο να βελτιωθεί με την διεξαγωγή επιπλέον πειραμάτων. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης καθώς και την περιεκτικότητα σε χαλαζία των πετρωμάτων. Το διάγραμμα αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο ώστε να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα.

Στα διαγράμματα των σχημάτων 6.3, 6.4, και 6.5 γίνεται προσπάθεια συσχέτισης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το μέσο μέγεθος κόκκων της ομάδας των

γνεύσιων, των μαρμάρων και των ασβεστολίθων ξεχωριστά. Φαίνεται ότι οι τιμές τις αντοχής κυμαίνονται σε μικρό εύρος σε σχέση με το μέσο μέγεθος κόκκων για κάθε ομάδα ξεχωριστά. Λόγω του μικρού όγκου δεδομένων όμως, χρειάζονται επιπλέον πειραματικές δοκιμές για την βελτίωση της αξιοπιστίας των διαγραμμάτων. Επίσης στα διαγράμματα 6.3 και 6.4 φαίνεται και η βέλτιστη καμπύλη της σχέσης Hall-Petch relationship.

Η συνοχή είναι γνωστό πως παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τις κλίσεις των διαγραμμάτων (Τσουβάλα, (2005)). Γενικά παρατηρείται ότι η δύναμη F_s η οποία προκαλεί κατά κύριο λόγο ορθή φόρτιση στο κομμάτι του πετρώματος που αποκολλάται, αυξάνεται αισθητά στα σκληρά ορυκτά καθώς μειώνεται και βάθος κοπής. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο.

Από την άλλη μεριά δεν υπάρχει τρόπος συσχέτισης της μικροδομής των πετρωμάτων με την συνοχή ή με την γωνία εσωτερικής τριβής ή με τις κλίσεις των διαγραμμάτων F_s - δ .

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των πετρωμάτων είναι αρκετά σύνθετη και πολύπλοκη. Αν "σκληρά" και "μαλακά" ορυκτά συνυπάρχουν, η αντοχή δεν αυξάνει γραμμικά με την αύξηση του ποσοστού των "σκληρών" ορυκτών. Αν η παρουσία των "σκληρών" ορυκτών είναι πολύ μικρή, η συμπεριφορά του πετρώματος είναι ανάλογη με αυτή ενός μονοκρυσταλλικού που αποτελείται από "μαλακά" ορυκτά. Η αντοχή του πετρώματος αυξάνει όσο αυξάνει το ποσοστό και το μέγεθος των "σκληρών" ορυκτών. Όταν τα "σκληρά" ορυκτά γίνουν κυρίαρχα στη σύνθεση του πετρώματος, η αντοχή θα πλησιάσει αυτή ενός μονοκρυσταλλικού "σκληρού" πετρώματος, αν και σε συνθήκες υψηλού ρυθμού καταπόνησης μπορεί οι συγκεντρώσεις των "μαλακών" ορυκτών να διασυνδεθούν μεταξύ τους.

Ανακεφαλαιώνοντας, η πειραματική αυτή εργασία έδειξε ότι εφόσον υπάρχει τρόπος να συσχετισθούν οι μηχανικές ιδιότητες με τα πειραματικά δεδομένα των μικροδιατρήσεων, τότε μέσω των κλίσεων των διαγραμμάτων, είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτή η επίδραση της σκληρότητας των ορυκτών πάνω στην αντοχές και στις αντιστάσεις των πετρωμάτων. Αντιθέτως δεν υπάρχει ακριβής τρόπος για να βρεθεί η

επίδραση της μικροδομής των πετρωμάτων πάνω στις αντοχές τους διότι υπάρχουν αρκετοί παράγοντες εξωτερικοί (πχ. θερμοκρασία,) και λιθολογικοί (πχ. προσανατολισμός) που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο ορυκτού, δηλαδή κρυστάλλων και κόκκων και είναι διαφορετικοί κάθε φορά στη φάση της ανακρυστάλλωσης των ορυκτών για τον ίδιο τύπο πετρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα και προτάσεις

Η εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, και της αντίστασης τους στην διάτρηση, γνωρίζοντας την ορυκτολογική σύσταση και την μικροδομή των πετρωμάτων, όπως παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, δεν οδηγεί σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ασφαλώς απαιτούνται πειραματικές δοκιμές στα ίδια και σε άλλα πετρώματα και συνθετικά υλικά με την μέθοδο της περιστροφικής μικροδιάτρησης για την συσχέτιση της με την ποιοτική και ποσοτική ορυκτολογική ανάλυση καθώς και την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας της.

Όσον αφορά στην μελλοντική ανάπτυξη της υπ' όψιν πειραματικής μεθόδου προτείνεται:

- η διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών στα ήδη μελετημένα πετρώματα με σκοπό την αύξηση του μεγέθους της βάσης δεδομένων και την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμένων σημείων των νομογραμμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και την βελτίωση της αξιοπιστίας τους,
- η εκτέλεση δοκιμών και σε άλλους τύπους πετρωμάτων ώστε να εξασφαλισθεί η λειτουργικότητα της μεθόδου και σε υλικά διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης,
- η διενέργεια των πειραματικών δοκιμών με φθαρμένα άκρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

1. Detournay E. and Defourny P. (1992). A phenomenological model for drilling action of drag bits, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 29 (1), pp. 28
2. Exadaktylos, G., Tiano, P. and Filareto, C. (2000). Validation of a model of rotary drilling of rocks with the drilling force measurement system, *International Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege* 6. Jahrgang, Aedificatio Publishers, Heft 3, pp. 27
3. Merchant M.E. (1944). Basic mechanics of the metal-cutting process. *J. Appl Mech*, 11(A), pp.168-175.
4. Merchant M.E. (1945a). Mechanics of metal cutting process i. orthogonal cutting and a type 2 chip. *J. Appl Phys*, 16(5), pp. 267-275.
5. Merchant M.E. (1945b). Mechanics of metal cutting process ii. Plasticity conditions in orthogonal cutting. *J. Appl Phys*, 16(6), pp. 318-324.
6. Hoek, E., Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion pp.19-20
7. Hoek, E., Wood D. and Shah S. 1992. A modified Hoek-Brown criterion for joined rock masses. *Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.*: 209-214. London, Brit. Geotech. Soc.
8. Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal* 2 (2), 4-16.
9. Tiano, P., Filareto, C., Ferrari, M., Ponticelli, S. and C., Valentini., E. (2000). Drilling Force Measurement System, a new standardizable methodology to determine the “Superficial Hardness” of monumental stones: Prototype design and validation. *International Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege* 6. Jahrgang, Aedificatio Publishers, Heft 2, pp. 115-132.
10. Tiano P., Viggiano A. (2000). A new diagnostic tool for the evaluation of the hardness of natural and artificial stones. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 6 (5), pp. 27-28, 38

Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων Εκδόσεις «Ιων», Αθήνα
2. Δαβή, Ε (1991). Πετρολογία, Εκδόσεις «Συμμετρία», Αθήνα
3. Κωστάκης, Γ. (2005). Σημειώσεις Γενικής Ορυκτολογίας, Πολυτεχνείο Κρήτης
4. Κωστάκης, Γ. (2005). Σημειώσεις Φυσικές Ιδιότητες Των Ορυκτών, Πολυτεχνείο Κρήτης
5. Τσουβάλα, Σ. (2005). Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς πετρωμάτων κατά την περιστροφική διάτρηση. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης

Διαδύκτιο

1. <http://en.wikipedia.org>
2. <http://minelab.mred.tuc.gr/rmdb>
3. www.metal.ntua.gr
4. www.pangea.gr
5. www.rocsience.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πειραματικά αποτελέσματα και αναλύσεις

Α1. Αμφιβολίτης

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

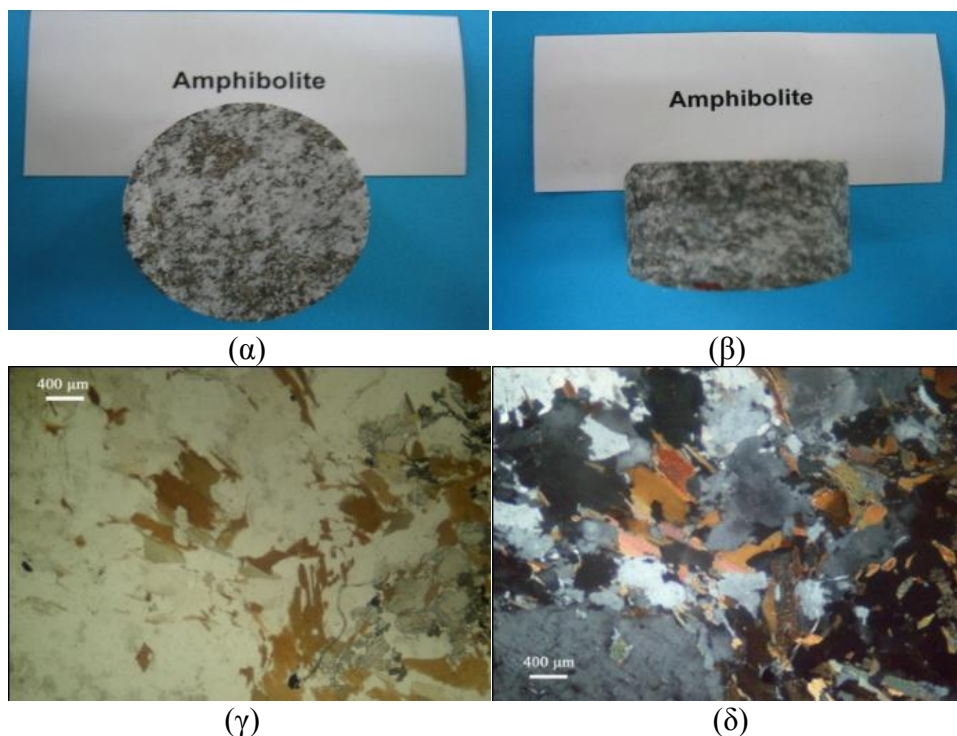
Συνίσταται από αμφίβολους, χαλαζία, βιοτίτη, επίδοτο και αλβίτη. Το είδος του αμφιβολίτη και το φεμικό συστατικό ποικίλλουν στις διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις συνθήκες σχηματισμού.

Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Πλαγιόκλαστο	39%	100-1000	500
Χαλαζίας	23%		
Αμφίβολοι	6%		
Γρανάτης	9%		
Βιοτίτης	23%		

Πίνακας Α1: Ορυκτολογική σύσταση αμφιβολίτη

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Α1: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι πλαγιοκλάστων, χαλαζία, αμφιβόλων, γρανατών και βιοτίτη. Διερχόμενο φως σε (// nicols) και (x-nicols)

A2. Πτυχωμένος γνεύσιος

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Προέρχεται από καθολική μεταμόρφωση βασικών έως ενδιάμεσων εκρηξιγενών πετρωμάτων (γάββρων έως διοριτών), αλλά και από ιζηματογενή, ιδίως μάργες πλούσιες σε SiO₂.

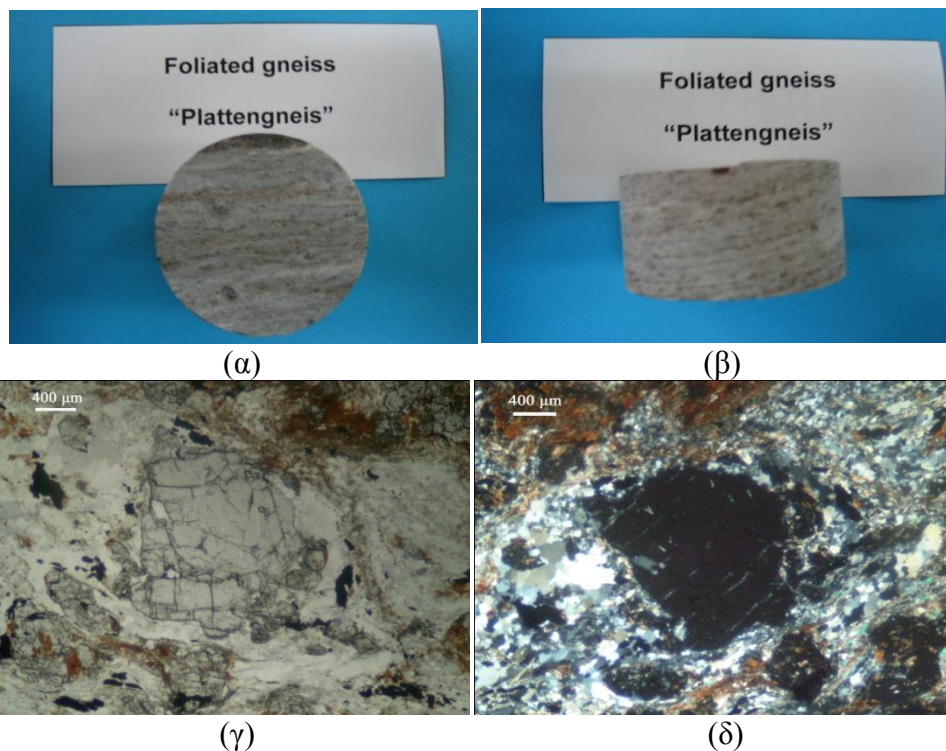
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα Α.2 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Πλαγιόκλαστο	23%	50-1000	100
Χαλαζία	54%		
Επίδοτο	2%		
Γρανάτης	7%		
Καλ. άστριος	5%		
Βιοτίτης	9%		

Πίνακας Α.2: Ορυκτολογική σύσταση του πτυχωμένου γνεύσιου

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Α2: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι γρανάτη και κόκκοι χαλαζία, βιοτίτη. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

Α3. Γνεύσιος Αυστρίας

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Πρόκειται για γνεύσιο που προέρχεται από την περιοχή της Αυστρίας και συνυπάρχει με μάρμαρο και χαλαζίτη.

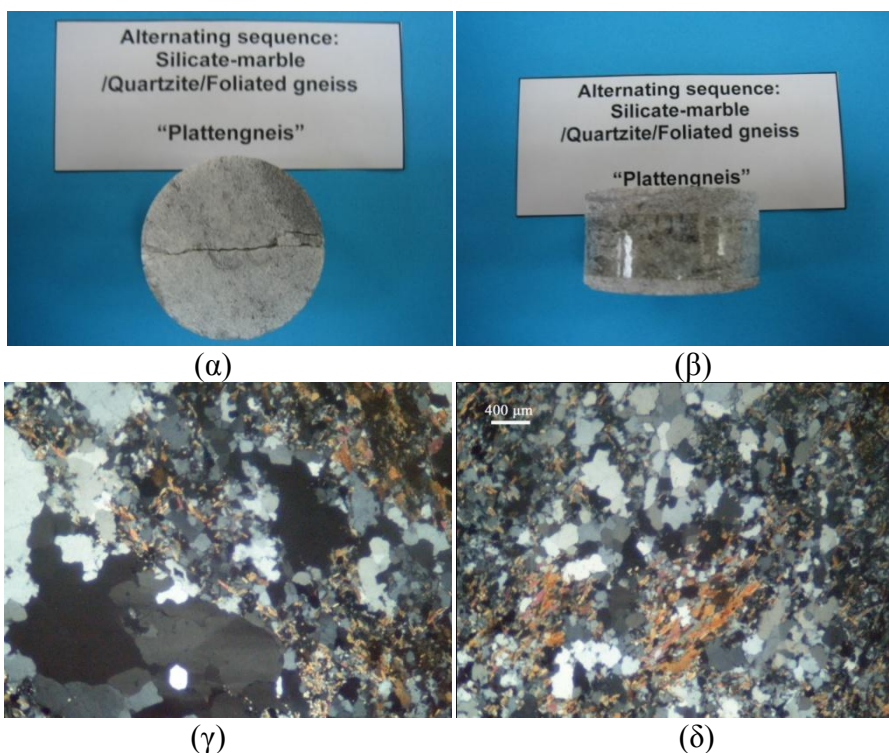
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα Α.3 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζίας	58%	150-1500	250
Καλ. άστριος	10%		
Πλαγιόκλαστο	24%		
Βιοτίτης	8%		

Πίνακας Α.3: Ορυκτολογική σύσταση του γνεύσιου Αυστρίας

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Α3: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι πλαγιοκλάστων και κόκκοι χαλαζία, βιοτίτη. Διερχόμενο φως. (x- nicols) (γ) και (δ)

A5. Αμφιβολίτης Αυστρίας

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Αποτελεί προϊόν αμφιβολιτίωσης εκλογιτών που υπέστησαν μεταμόρφωση υπέρ-υψηλών πιέσεων.

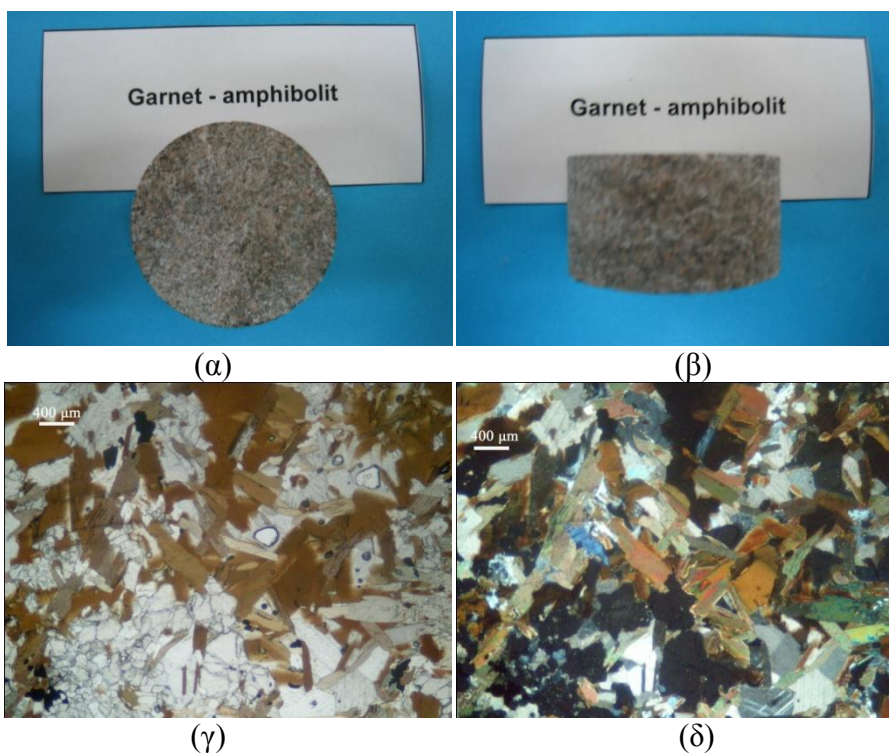
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα A.5 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζία	35%		
Γρανάτης	15%	100-700	300
Πλαγιόκλαστο	29%		
Βιοτίτης	16%		
Αμφίβολοι	5%		

Πίνακας A.5: Ορυκτολογική σύσταση του αμφιβολίτη Αυστρίας

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα A.5: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι γρανατών, πλαγιοκλάστων χαλαζία, αμφιβόλων. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

Α6. Σχιστολιθικός γνεύσιος

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Σχιστολιθικός γνεύσιος. Είδος γνεύσιου. Το χαρακτηριστικό είναι η σχιστότητα που παρουσιάζει.

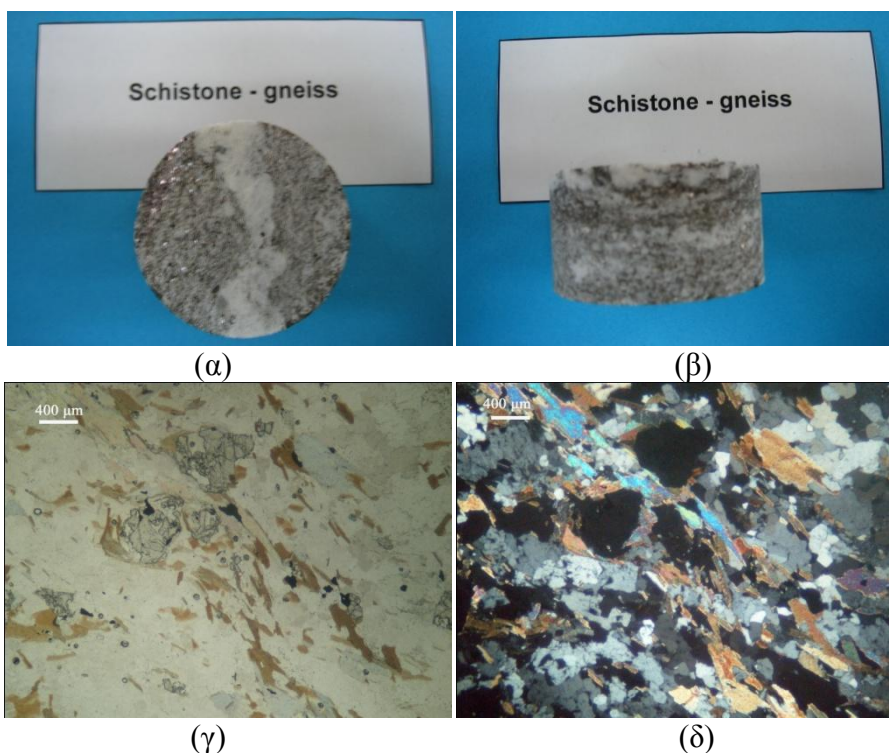
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα Α.6 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζίας	52%	100-500	350
Γρανάτης	5%		
Πλαγιόκλαστο	32%		
Μοσχοβίτης	11%		

Πίνακας Α.6: Ορυκτολογική σύσταση του σχιστολιθικού γνεύσιου

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Α.6: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι γρανατών, πλαγιοκλάστων, χαλαζία, μοσχοβίτη. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

B1. Πηγματίτης

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Προέρχεται από τη στερεοποίηση, μέσα σε φλέβες, των θερμών διαλύσεων του μάγματος, πλούσιων σε πτητικά συστατικά. Έχει ιδιάζοντα πηγματικό ιστό καθώς και συγκρυστάλλωση χαλαζία και αλκαλικού αστρίου.

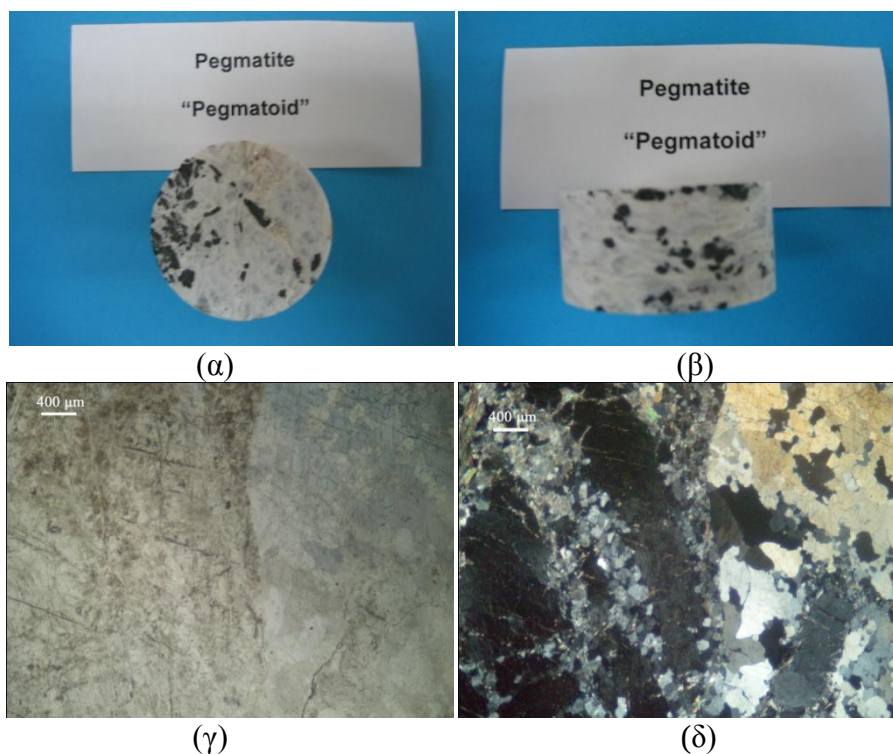
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα B.1 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζίας	55%		
Καλ. άστριος	17%	50-500	100
Πλαγιόκλαστο	16%		
Γρανάτης	3%		
Μοσχοβίτης	9%		

Πίνακας B.1: Ορυκτολογική σύσταση του πηγματίτη

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα B.1: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι γρανατών, αστρίων χαλαζία. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

B2. Γνεύσιος

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Γνεύσιος. Έχει ως θεμελιώδη συστατικά αστρίους και χαλαζία. Είναι κατά το πλείστον μεσόκοκκο και χαρακτηρίζεται από τη σχιστότητα και τη γνευσιοειδή υφή. Κύριο συστατικό είναι ο μοσχοβίτης αλλά περιέχει και σταυρόλιθο και αλβίτη.

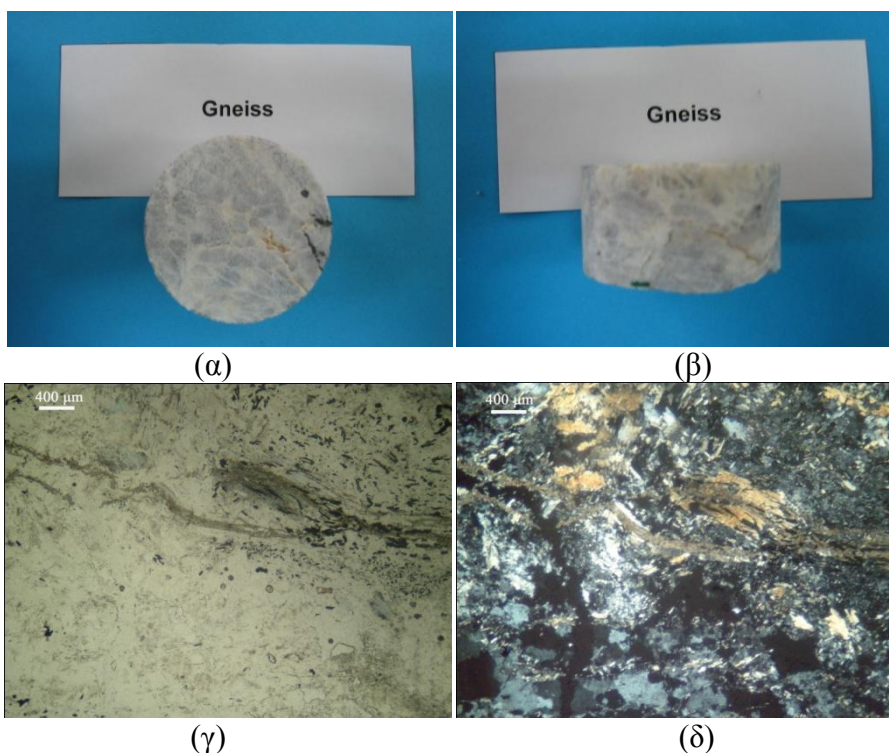
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα B.2 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζίας	43%		
Σταυρόλιθος	19%	200-400	300
Πλαγιόκλαστο	21%		
Μοσχοβίτης	17%		

Πίνακας B.2: Ορυκτολογική σύσταση του γνεύσιου

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα B.2: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι πλαγιοκλάστων, μοσχοβίτη και χαλαζία. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

Γ1. Δολομίτης

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Είναι πέτρωμα μονόμεικτο αποτελούμενο κυρίως από δολομίτη. Σχηματίζεται όταν ένα μέρος του ασβεστίου του CaCO_3 του ασβεστολίθου αντικατασταθεί από μαγνήσιο (δολομιτίωση).

Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος

Στον πίνακα Γ.1 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Δολομίτης	100%	-	-

Πίνακας Γ.1: Ορυκτολογική σύσταση του δολομίτη

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Γ.1: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α) και (β)

Γ3. Ψαμμίτης Στύριας

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Συμπαγές πέτρωμα που προκύπτει από διαγένεση της άμμου (μηχανικό ιζηματογενές πέτρωμα). Η άμμος είναι δυνατό να δημιουργείται από τα νερά ή από τη δράση του ανέμου. Το συνδετικό υλικό ποικίλει. Στην περίπτωση μας είναι χαλαζιακό όπου και προσδίδει μεγάλη συνεκτικότητα στο πέτρωμα.

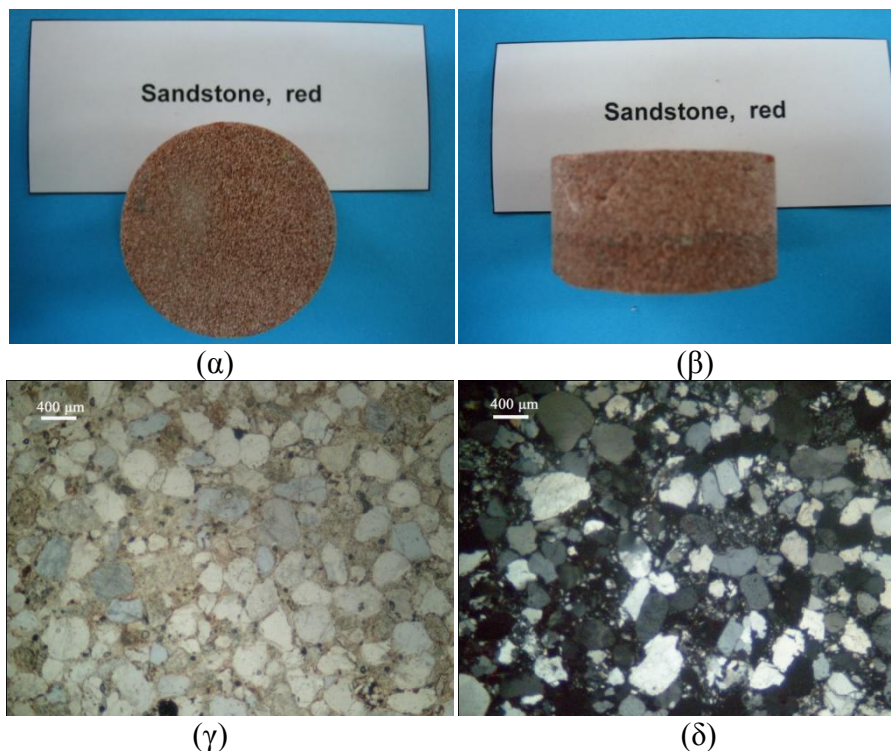
Ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Στον πίνακα Γ.3 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος.

Ορυκτά	Ποσοστό	Μέγεθος κόκκων (μm)	Μέσο μέγεθος κόκκων (μm)
Χαλαζίας	90%		
Καλ. άστριος	10%	150-500	2500

Πίνακας Γ.3: Ορυκτολογική σύσταση του ψαμμίτη Στύριας

Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση του πετρώματος



Σχήμα Γ.3: Δοκίμια πειραματικών δοκιμών (α), (β). Κρύσταλλοι καλιούχων αστρίων και χαλαζία. Διερχόμενο φως. (// nicols) (γ) και (x-nicols) (δ)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παράρτημα αυτό επισυνάπτονται τα ακτινογραφήματα από την μέθοδο XRD για τα μελετούμενα πετρώματα.

A1. Ακτινογράφημα αμφιβολίτη

A2. Ακτινογράφημα πτυχωμένου γνεύσιου

A3. Ακτινογράφημα γνεύσιου Αυστρίας

A4. Ακτινογράφημα γνεύσιου Στύριας

A5. Ακτινογράφημα αμφιβολίτη Αυστρίας

A6. Ακτινογράφημα σχιστολιθικού γνεύσιου

B1. Ακτινογράφημα πηγματίτη

B2. Ακτινογράφημα γνεύσιου

Γ1. Ακτινογράφημα δολομίτη

Γ2. Ακτινογράφημα ασβεστόλιθου «Warstein»

Γ3. Ακτινογράφημα ψαμμίτη Στύριας