



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ



ΤΣΟΥΒΑΛΑ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ. (Επιβλέπων)

Β. ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ.

Μ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ Π.Κ.

ΧΑΝΙΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2005

(Η φωτογραφία παρουσιάζει το νέο όργανο μικροδιάτρησης κατά την εφαρμογή του σε κτίριο στην Ολυμπία για την εκτίμηση επί τόπου της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη των δομικών λίθων.)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τα έτη 2002 – 2004 υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Γ. Εξαδάκτυλου στον οποίο οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την καθοδήγηση και συμπαράστασή του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Ζ. Αγιουτάντη για την προθυμία του να εκτελέσει χρέη επιβλέποντος καθηγητή και για τις σημαντικές του παρατηρήσεις στην τελική μορφοποίηση αυτού του κειμένου. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Β. Κελεσίδη και τον Λέκτορα κ. Μ. Γαλετάκη για τις παρατηρήσεις τους και το χρόνο που διέθεσαν στη διόρθωση αυτής της εργασίας. Τέλος ευχαριστώ την κ. Μ. Σταυροπούλου, Λέκτορα του Γεωλογικού τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών, για τη παραχώρηση σχημάτων από τις σχετικές με το θέμα εργασίες της καθώς και τον κ. Π. Λιόλιο, μεταπτυχιακό φοιτητή του Εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων για τη βοήθεια που μου παρείχε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μέθοδος της περιστροφικής μικροδιάτρησης και η εφαρμογή της για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Καταρχήν γίνεται περιγραφή της μεθόδου η οποία περιλαμβάνει την παρουσίαση ενός πρωτότυπου μικρο-διατρητικού οργάνου, που αναπτύχθηκε και αναπτύσσεται έως σήμερα στα πλαίσια δύο Ερευνητικών Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων, το οποίο φέρει κοπτικό άκρο διαμέτρου 5 mm , καθώς και των βασικών αρχών της περιστροφικής διάτρησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών μικροδιάτρησης που εκτελέστηκαν σε σειρά διαφόρων τύπων ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, τα οποία έχουν ένα εύρος αντοχών σε ανεμπόδιστη θλίψη από $3 - 120\text{ MPa}$ και εύρος γωνιών εσωτερικής τριβής από $13^\circ - 60^\circ$. Κατόπιν περιγράφεται η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και γίνεται μια πρώτη προσπάθεια στατιστικής συσχέτισής τους με τις ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και στατιστική ανάλυση και γίνονται προτάσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη της μεθόδου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
2. Μέθοδος περιστροφικής μικροδιάτρησης	4
2.1 Αρχή της μεθόδου	4
2.2 Πειραματική συσκευή.....	6
2.3 Φαινομενολογικό μοντέλο της περιστροφικής διάτρησης πετρώματος	10
3. Δοκιμές μικροδιάτρησης	15
3.1 Φυσικομηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου	18
3.2 Πειραματικά αποτελέσματα.....	19
4. Συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων	24
5. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	37
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	42

1. Εισαγωγή

Η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων και του βαθμού φθοράς των δομικών λίθων, καθώς και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων αποκατάστασης της αντοχής ή των μεθόδων προστασίας αυτών από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. βάθος διείσδυσης των στερεοποιητικών ουσιών (π.χ. τσιμεντενέσεις), αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής και παρακολούθηση της ανθεκτικότητας στο χρόνο) είναι αναγκαία για τη βελτιστοποίηση των μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας αλλά και των μεθόδων αποκατάστασης μνημείων και μνημειακών κατασκευών (παλιά κτίρια, ναοί κλπ.). Οι κλασσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται έως σήμερα για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων και την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των στερεοποιητικών των πετρωμάτων και άλλων υλικών μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: τις καταστροφικές και τις μη-καταστροφικές.

Ως *καταστροφικές* μέθοδοι δοκιμής υλικών και κατασκευών ορίζονται αυτές κατά τις οποίες τεμάχια του πετρώματος αποσπώνται από την υπόψη θέση, αν αυτό επιτρέπεται (π.χ. από μνημεία είναι δύσκολο έως αδύνατο να επιτραπεί απόσπαση δοκιμίων), ακολούθως διαμορφώνονται σε τυποποιημένα δοκίμια για δοκιμές θλίψης, διάδοσης της υγρασίας κλπ. με σκοπό το μετέπειτα εργαστηριακό προσδιορισμό των αντίστοιχων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων. Από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες καταστροφικές μεθόδους υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων είναι η δοκιμή σε τριαξονική θλίψη και η δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη οι οποίες γίνονται σύμφωνα με την τυποποίηση της Διεθνούς Ένωσης για τη Μηχανική Πετρωμάτων (International Society of Rock Mechanics (ISRM) (1978)).

Ως *μη-καταστροφικές* μέθοδοι δοκιμής υλικών και κατασκευών ορίζονται οι μέθοδοι που, σε αντίθεση με τις καταστροφικές δοκιμές, δεν αλλάζουν το σχήμα, το μέγεθος ή τη δομή του ελεγχόμενου υλικού, δηλαδή δεν το καταστρέφουν. Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις μεθόδους που μετρούν μόνο στην εκτεθειμένη επιφάνεια μιας

κατασκευής, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τις μεθόδους που μετρούν μέχρι κάποιο βάθος από την επιφάνεια.

Στις μη-καταστροφικές μεθόδους που μετρούν μόνο στην εκτεθειμένη επιφάνεια μιας κατασκευής ανήκουν κυρίως οι σκληρομετρήσεις, που μπορεί να είναι διαφόρων τύπων ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης της αντίστασης σε διείσδυση και τη γεωμετρία του διεισδυτή (π.χ. κρουσίμετρο αναπήδησης Schmidt hammer και σκληρόμετρα Vickers, Shore κλπ.). Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι ότι: α) δίνουν δεδομένα που αφορούν μόνο στην επιφάνεια και όχι στο βάθος του δομικού υλικού, β) τα αποτελέσματά τους χαρακτηρίζονται από μεγάλη διασπορά γεγονόσ που τα καθιστά χρήσιμα μόνο για ποιοτική εκτίμηση, γ) η επιφάνεια του υπό μελέτη υλικού πρέπει να είναι λεία και δ) δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε μικρής αντοχής βραχώδη υλικά. Συνεπώς, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ετερογενή υλικά, όπως τα πετρώματα, οι τοιχοποιίες και το σκυρόδεμα, με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Από την άλλη πλευρά είναι μέθοδοι μη-καταστροφικές, γρήγορες στην εκτέλεση, οικονομικές και μπορούν να εφαρμοσθούν επί τόπου.

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι με ικανότητα διεισδυτικότητας σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια μιας κατασκευής βασίζονται στην αρχή των υπερήχων ή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (radar techniques). Αυτές όπως και οι πρώτες χρησιμοποιούνται συχνά εφόσον είναι οι μόνες που μπορούν να εφαρμοσθούν επί τόπου με μη-καταστροφικό τρόπο, αλλά επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους (διεπιφάνεια αισθητήρα-κατασκευής, υγρασία, πίεση επαφής, τραχύτητα επιφάνειας, συχνότητα κυμάτων κλπ.) με αποτέλεσμα να μη δίνουν ακριβή και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Παραδείγματος χάριν η αποσάθρωση εξωτερικών προσόψεων κτιρίων ή μνημείων προσδίδει σε αυτές μια τραχύτητα ανάλογα με την ένταση των αποσθρωτικών ή διαβρωτικών φαινομένων. Σε τέτοιες τραχείες επιφάνειες η εφαρμογή ή/και η ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών υπερήχων καθίσταται πολύ δύσκολη έως ανεφάρμοστη. Επίσης, με τις μεθόδους αυτές δεν μπορεί να μετρηθεί η παραμένουσα αντοχή της τοιχοποιίας ή τμήματος του φέροντος οργανισμού ενός κτιρίου ή μνημείου.

Η μέθοδος της περιστροφικής διάτρησης μικρής διαμέτρου 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 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 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.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα γίνει κατ' αρχήν περιγραφή της μεθόδου της περιστροφικής μικροδιάτρησης (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν πειράματα περιστροφικής μικροδιάτρησης σε διάφορα πετρώματα (Κεφάλαιο 3). Θα ακολουθήσει η ανάπτυξη της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και μια προσπάθεια συσχέτισής τους με κλασσικές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, γωνία εσωτερικής τριβής, συνοχή, αντοχή σε εφελκυσμό) (Κεφάλαιο 4). Τέλος θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία (Κεφάλαιο 5).

2. Μέθοδος περιστροφικής μικροδιάτρησης

2.1 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), συναρτήσει του βάθους διείδυσης 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 (σφράγισμα με το ίδιο υλικό που προκύπτει μετά τη διάτρηση σε μορφή σκόνης).

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 αυτών¹ (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.

Οι ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων που είναι και σχεδιαστικές παραμέτροι για την διαστασιολόγηση κατασκευών που υποβάλλονται σε μηχανική φόρτιση, είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η συνοχή (και οι δύο μετρούνται σε μονάδες kg/cm^2

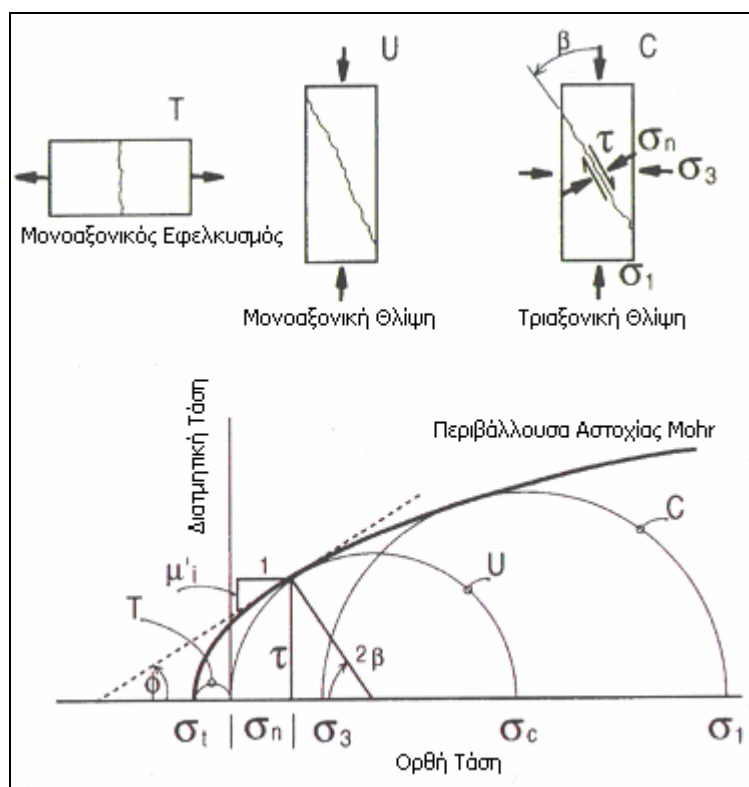
¹ Λ.χ. το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζει σε δεύτερο βαθμό την αντίσταση στη διάτρηση εφόσον αυτή είναι «καταστροφικού χαρακτήρα» διαδικασία.

ή 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:

$$|\tau| = c + \tan \varphi \sigma_n \quad (2.1)$$

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 θλιπτική τάση που μπορεί να αντέξει ένα υλικό μέχρι τη θραύση του, η συνοχή χαρακτηρίζει τη συνεκτικότητα των κόκκων του υλικού, ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής δείχνει κατά προσέγγιση τη γωνία θραύσης του υλικού β , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχ. 2.1. Μη-γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb και σχέση των τάσεων με τις ιδιότητες αντοχής ψαθυρού πετρώματος, που είναι η γωνία εσωτερικής τριβής φ και η συνοχή c (αποτείνουσα του μη-γραμμικού κριτηρίου και του άξονα των τετμημένων) (Lockner (1995)).

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

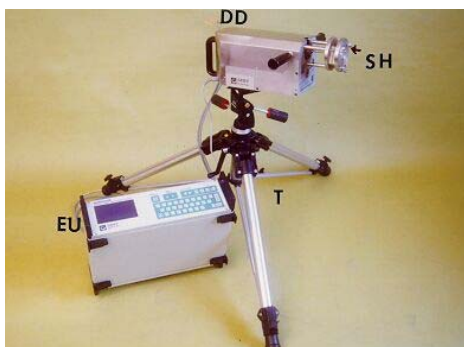
$$UCS = \frac{2 c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2.2)$$

2.2 Πειραματική συσκευή

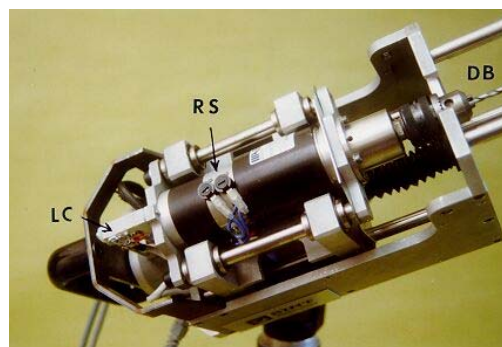
Το μεταφερόμενο πρωτότυπο όργανο που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση επί τόπου ή εργαστηριακών δοκιμών σε διαφορετικά δοκίμια φυσικών ή τεχνητών υλικών (π.χ. πετρωμάτων διακοσμητικών ή μη, αδρανών, δομικών ή ασφαλτικών υλικών, κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, κεραμικών κ.ά.), με τη μέθοδο της περιστροφικής διάτρησης μικρής διαμέτρου, ονομάζεται Drilling Force-Torque Measurement System (DFTMS) (Tiano et al. (2000)). Το DFTMS αποτελείται από τα εξής τμήματα (Σχ. 2.2):

- *Μηχανική συσκευή:* είναι εξοπλισμένη με κινητήρες για τη μετατόπιση και την περιστροφή του διατρητικού στελέχους (DD στο Σχ. 2.2α) καθώς και με κελιά φορτίου (LC στο Σχ. 2.2β) 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. 2.2α).
- *Ορθοστάτης τύπου τρίποδα:* Μπορεί να ρυθμιστεί σε ύψος από 830 έως 1600 mm με τα σκέλη του να βρίσκονται σε απόσταση έως 900 mm 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. 2.2α).
- *Λοιπός εξοπλισμός:* μεταλλικές πλάκες, οι οποίες προσαρμόζονται με κοχλίες στο ρύγχος της μηχανικής συσκευής, για τη στερέωση διαμορφωμένων δοκιμών ή

θραυσμάτων (SH στο Σχ. 2.2α), καλώδια τροφοδοσίας και συνδέσεων και λογισμικό για την επεξεργασία των μετρήσεων.



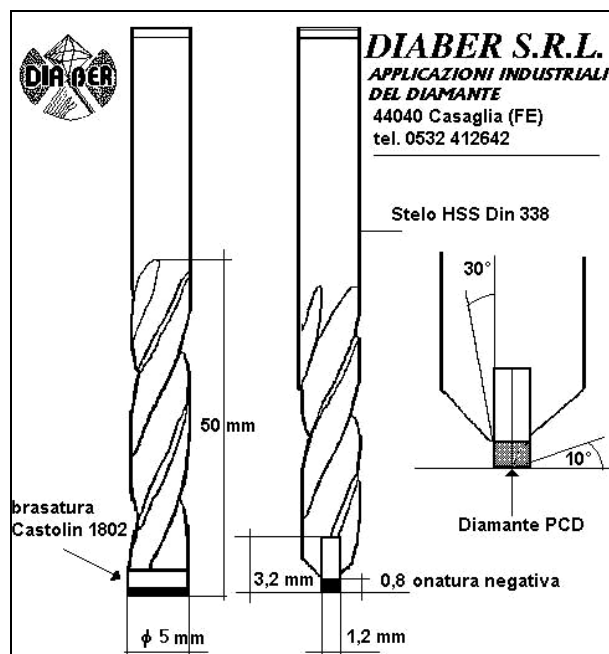
(α)



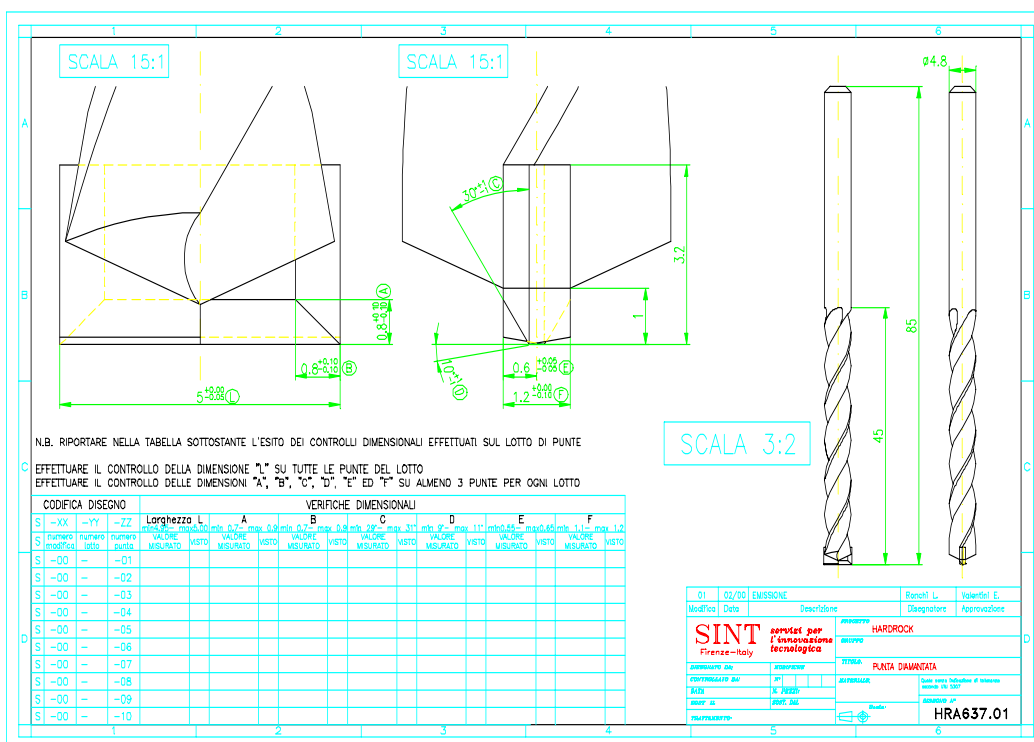
(β)

Σχ. 2.2. 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).

Τα κοπτικά άκρα είναι τύπου συνθετικού πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (Polycrystalline Diamond (PCD)) της Diaber Ltd (Σχ. 2.3).



(α)



(β)

Σχ. 2.3(α,β). Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μικροκοπτικής ακμής Diaber από συνθετικό πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD μήκους 5 mm που έχει συγκολληθεί στο άκρο κανονικού ατσάλινου στελέχους διαμέτρου 4,8 mm.

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 στο Σχ. 2.2β). Η ταχύτητα διάτρησης κυμαίνεται από 1-40 *mm/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 τη 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.

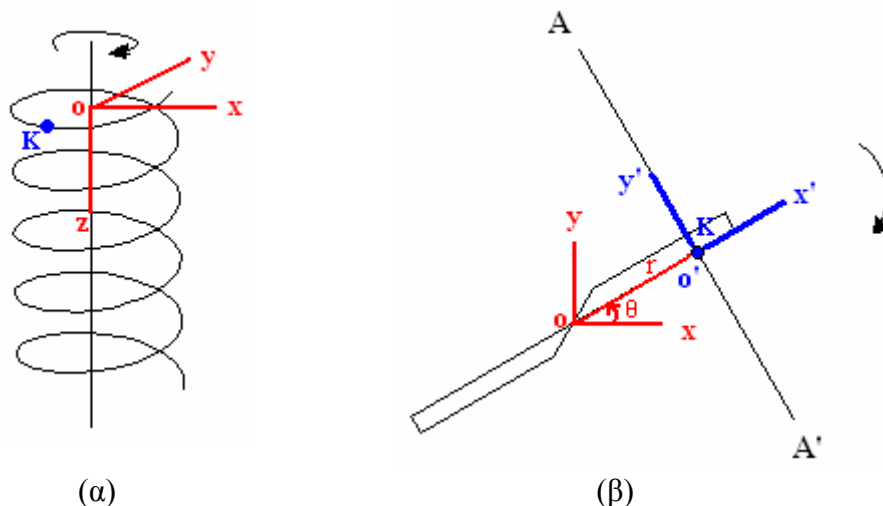
Κατά την διάρκεια της δοκιμής και ενώ η συσκευή μετράει την αξονική δύναμη διάτρησης και τη ροπή περιστροφής συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια του τοίχου ή του δοκιμίου, το λογισμικό αποθηκεύει και αναπαριστά γραφικά τις τιμές αυτών συναρτήσει του βάθους διάτρησης (Σχ. 2.4).



Σχ. 2.4. Οθόνη του φορητού ηλεκτρονικού υπολογιστή για την αυτόματη λειτουργία του DFTMS. Παράδειγμα καταγραφής της αξονικής δύναμης διάτρησης και της ροπής περιστροφής συναρτήσει του βάθους κοπής κατά τη διάρκεια δοκιμής.

2.3 Φαινομενολογικό μοντέλο της περιστροφικής διάτρησης πετρώματος

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 λεπτό στρώμα υλικού σταθερού ύψους, 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. 2.4α).



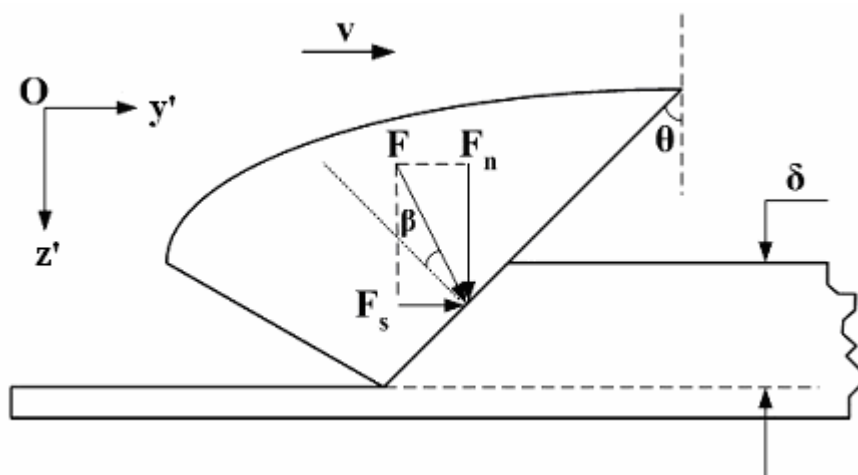
Σχ. 2.4. Κίνηση των σημείων του κοπτικού άκρου κατά την περιστροφική διάτρηση: α) ελικοειδής κίνηση σημείου που βρίσκεται στην αιχμή του κοπτικού άκρου κατά την περιστροφική διάτρηση, β) κάτοψη του κοπτικού άκρου.

Από την κάτοψη του κοπτικού άκρου (Σχ. 2.4β) μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θέση του σημείου K στο επίπεδο Oxy μπορεί να δοθεί με την απόστασή 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 τη σχέση:

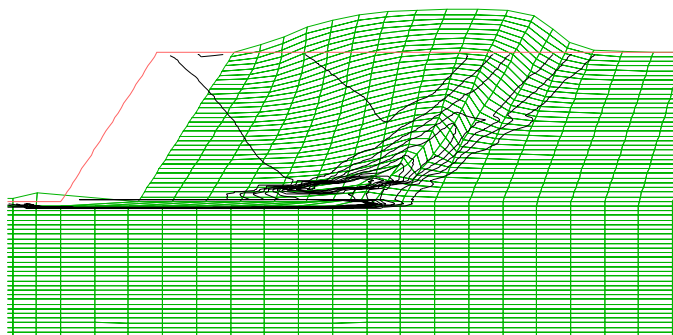
$$v = \omega \cdot r \quad (2.1)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα. Η ταχύτητα v είναι κατά πολύ μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών ακουστικών κυμάτων (C_p), 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. 2.4β) το οποίο ακολουθεί την κίνηση του σημείου (περιστροφή και μεταφορά). Στο Σχήμα 2.5 έχει σχεδιαστεί η τομή του αιχμηρού κοπτικού άκρου κατά μήκος του άξονα y' η οποία περνάει από το σημείο K (τομή A-A'). Στο Σχήμα 2.6 μπορεί να παρατηρηθεί ένας τυπικός μηχανισμός θραύσης των πετρωμάτων εξαιτίας της επαφής τους με κοπτικό άκρο.

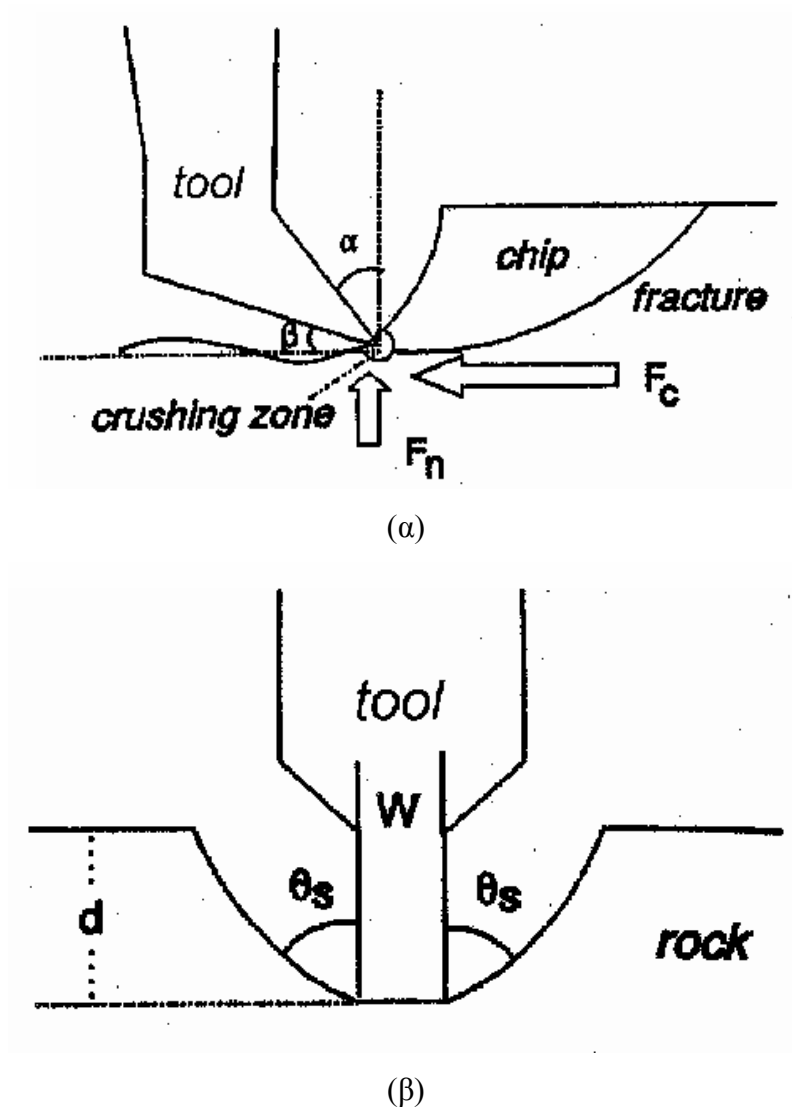


Σχ. 2.5. Τομή A-A': Σύστημα δυνάμεων που δρουν στο πέτρωμα κατά την επαφή του με αιχμηρό κοπτικό άκρο το οποίο κινείται προς τα δεξιά.



Σχ. 2.6. Μηχανισμός αστοχίας (με τη μορφή της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης) πετρώματος σε πεπερασμένες διαφορές εξαιτίας της δράσης τάσης που αναπτύσσεται στην επαφή κοπτικού άκρου-πετρώματος όπου το κοπτικό άκρο κινείται προς τα δεξιά και το πέτρωμα υπακούει στο γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (Stavropoulou (2005)).

Παρόμοιοι μηχανισμοί θραύσης με βάση τη θεωρία της πλαστικότητας έχουν προταθεί αρχικά από τον Merchant (1944, 1945a,b) (Σχ. 2.7(α,β)). Ο Merchant πρότεινε μοντέλο που προϋποθέτει την κοπή μετάλλων επί επιπέδου διατμητικής αστοχίας και το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Όμως, το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου αυτού περιορίζεται αισθητά εξαιτίας της θεώρησης 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. 2.5).



Σχ.2.7. Σκίτσο μηχανισμού κοπής του πετρώματος με σχηματισμό «φλούδας»: (α) τομή παράλληλα προς την διεύθυνση της κοπής και (β) κάθετα προς τη διεύθυνση της κοπής, όπου β = γωνία ανοχής (clearance angle), θ_s = γωνία κοπής, α = γωνία κοπτικού άκρου (rake angle).

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):

$$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_s \quad (2.2)$$

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 προχώρησή 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:

$$F_s = \frac{T}{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad [F] \quad (2.3)$$

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 2.5, λόγω συμμετρίας ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$F_n = \tan(\theta + \beta)F_s \quad (2.4)$$

όπου θ είναι η αρνητική κλίση της γωνίας του κοπτικού άκρου και β η γωνία τριβής της διεπιφάνειας κοπτικού άκρου – πετρώματος (Σχ. 2.4).

Το βάθος κοπής ανά περιστροφή δ είναι:

$$\delta = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (2.5)$$

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:

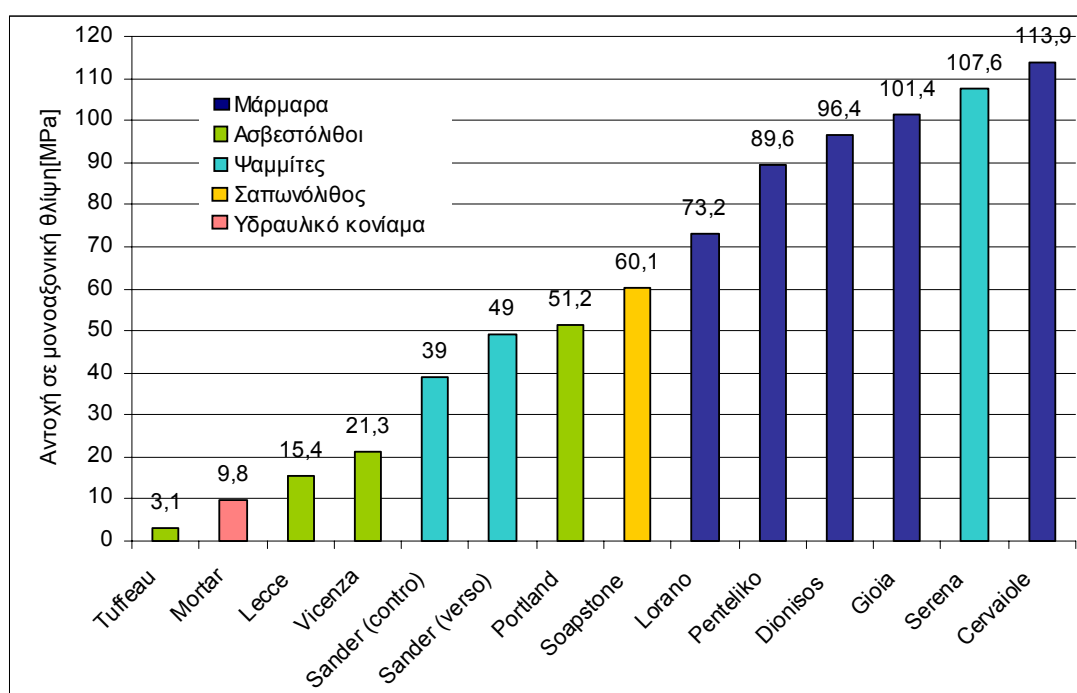
$$J = \frac{F_n}{\alpha\delta} \quad [FL^{-2}] \quad (2.6)$$

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

$$E = \frac{F_s}{\alpha\delta} \quad [FL^{-2}] \quad (2.7)$$

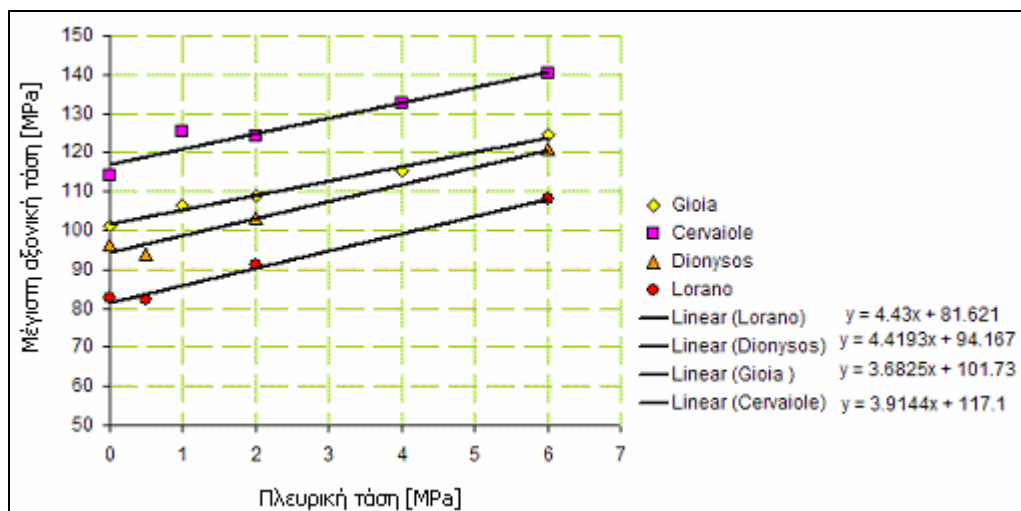
3. Δοκιμές μικροδιάτρησης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μικροδιάτρησης σε 13 διαφορετικά πετρώματα (πέντε μάρμαρα, τέσσερις ασβεστόλιθους, δύο ψαμμίτες, ένα σαπωνόλιθο και ένα υδραυλικό κονίαμα). Η επιλογή των πετρωμάτων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι αντοχές τους σε μονοαξονική θλίψη να καλύπτουν ένα εύρος τιμών από μερικά MPa (πετρώματα πολύ μικρής αντοχής) μέχρι σχεδόν $120 MPa$. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται συγκεντρωτικά τα πετρώματα που επιλέχθηκαν και οι αντίστοιχες αντοχές τους σε μονοαξονική θλίψη.



Σχ. 3.1. Συγκεντρωτικό διάγραμμα πετρωμάτων που μελετήθηκαν και αντοχές σε μονοαξονική θλίψη (Exadaktylos et al. (2002-2005)).

Οι αντοχές αυτές προέκυψαν από πειράματα τριαξονικής θλίψης² όπως για παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.2 όπου παρουσιάζονται γραφικά τα προσαρμοσμένα γραμμικά κριτήρια Mohr-Coulomb τεσσάρων τύπων μαρμάρων στο χώρο των κυρίων τάσεων ($\sigma_1 - \sigma_3$).



Σχ.3.2. Προσαρμογή ευθειών στα πειραματικά αποτελέσματα εξάρτησης της μέγιστης τάσης κατά τη θραύση με την πλευρική τάση κατά τις τριαξονικές δοκιμές σε τέσσερεις τύπους μαρμάρων.

Σε κάθε πέτρωμα μετρήθηκε η αξονική δύναμη διάτρησης και η ροπή περιστροφής που απαιτείται για τη διάτρησή του σε ένα εύρος ρυθμίσεων ταχύτητας διάτρησης και ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού άκρου. Ο στόχος των πειραμάτων ήταν 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).

² Τα τυποποιημένα πειράματα βραχομηχανικής έγιναν στο Εργαστήριο Μηχανικής των Πετρωμάτων και κατόπιν επεξεργάστηκαν από το Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος DIAS (Αριθμός Συμβολαίου: DIAS-EVK4-CT-2002-00080).

Εως 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 $\nu = 10 \text{ mm/min}$ (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 (ν, ω), δεν περικλείει όλες τις παραμέτρους που προσδιορίζουν την αντοχή των πετρωμάτων και επιπλέον διαστασιολογικά δεν είναι «τάση». Η πρωτοτυπία της εργασίας αυτής έγκειται στο γεγονός ότι, με τη βοήθεια της νέας αυτής συσκευής, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια συσχέτισης των ειδικών ενεργειών που δαπανώνται κατά την διάτρηση, δηλαδή της ειδικής ενέργειας που σχετίζεται με την αξονική δύναμη (σχέση (2.6)) και αυτής που σχετίζεται με την ροπή στρέψης (σχέση (2.7)), και έχουν μονάδες τάσης, με τις ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια ύψους \times διάμετρο = $2\text{cm} \times 5\text{cm}$ από κάθε ένα από τα μελετούμενα πετρώματα³. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια θα μπορούσαν να έχουν και ακανόνιστο σχήμα. Λόγω του όγκου των δεδομένων, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων μόνο για το μάρμαρο Διονύσου. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε σε όλα τα πετρώματα και για όλες τις δοκιμές, ενώ τα αποτελέσματα, καθώς και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες και τα σχετικά μητρώα πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης που διενεργήθησαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής για τα υπόλοιπα πετρώματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

³ Τα πειράματα μικροδιατρήσεων έγιναν από την συγγραφέα στο Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

3.1 Φυσικομηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το μάρμαρο Διονύσου δημιουργήθηκε πιθανώς κατά την Τριαδική - Ιουρασική γεωλογική περίοδο. Εξορύσσεται στην περιοχή που αποκαλείται «Διονυσοβούνι» και η οποία βρίσκεται περίπου 30 km Βόρεια του κέντρου της πόλης της Αθήνας. Το κύριο τμήμα του κοιτάσματος μαρμάρου του Διονύσου ανήκει στο αποκαλούμενο μάρμαρο «χαμηλότερου ορίζοντα» που έχει μέγιστο πάχος μεγαλύτερο από 800 m. Το μάρμαρο που εξορύσσεται από το λατομείο του Διονύσου είναι λευκό ασβεστιτικό, με παρουσία μαρμαρυγιών και κόκκων χαλαζία, ενώ τοπικά παρουσιάζει δολομιτικές παραλλαγές σύνθεσης και χρώματος. Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 δίνονται οι αντιπροσωπευτικές φυσικές⁴ και μηχανικές⁵ ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1. Φυσικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου

Τύπος πετρώματος	μάρμαρο Διονύσου
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστιτικό μάρμαρο
Μέγεθος κόκκου (μm)	300-400
Πραγματική πυκνότητα (g/cm ³)	2,70 ± 0,1
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,66 ± 0,1
Ενεργό πορώδες (%)	0,6 ± 0,1
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	1,6 ± 0,2
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	1,4 ± 0,2
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	-

⁴ Οι μετρήσεις έγιναν από το Ερευνητικό Ινστιτούτο ICVBC-CNR της Ιταλίας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DIAS.

⁵ Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Μηχανικής των Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης και στο Ερευνητικό Ινστιτούτο SINTEF Petroleum Research της Νορβηγίας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DIAS.

Πίνακας 3.2. Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	94,2
Συνοχή, c (MPa)	21,5
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	39,7
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	4,4 (verso [*]) 8,4 (contro [*])

(*)verso= διαμήκης προσανατολισμός φόρτισης

(*)contro= εγκάρσιος προσανατολισμός φόρτισης

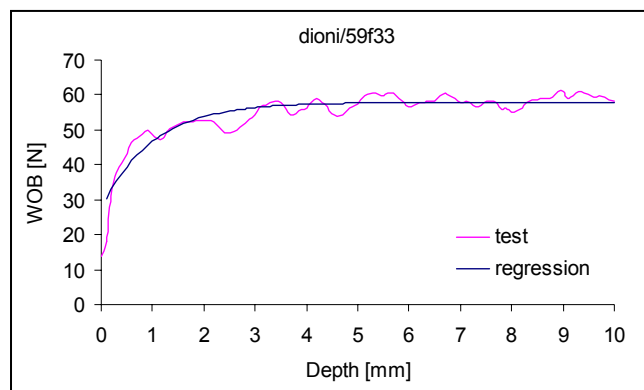
3.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Κατά την εκτέλεση του πειράματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γίνεται μέτρηση της αξονικής δύναμης διάτρησης και της ροπής που απαιτούνται για τη διάτρηση του πετρώματος. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται τα διαγράμματα της αξονικής δύναμης διάτρησης (Σχ. 3.1α) και της ροπής (Σχ. 3.1β) συναρτήσει του βάθους διείσδυσης, για ταχύτητα διάτρησης $v = 10 \text{ mm/min}$ και ταχύτητα περιστροφής $\omega = 600 \text{ rpm}$ του κοπτικού άκρου, που προέκυψαν από δοκιμή περιστροφικής μικροδιάτρησης σε μάρμαρο Διονύσου. Στα διαγράμματα φαίνεται επίσης η ομαλή καμπύλη η οποία προσαρμόστηκε στις μετρήσεις με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

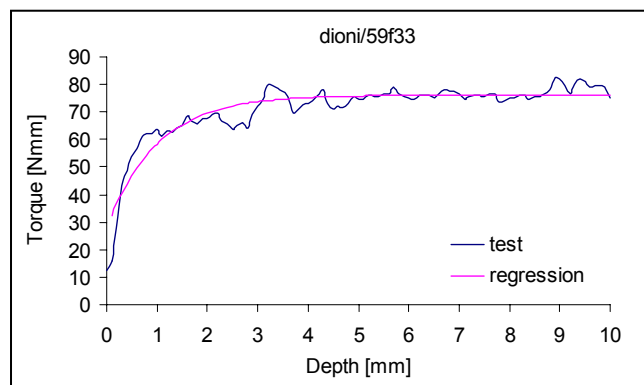
Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ομαλής καμπύλης είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις και δίνεται από την εκθετική σχέση:

$$y = \alpha + \beta e^{-x} \quad (3.1)$$

όπου x είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού άκρου, y η αξονική δύναμη διάτρησης ή η ροπή ανάλογα με το ποιες μετρήσεις χρησιμοποιούνται, και α , β είναι οι συντελεστές που προκύπτουν από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



(α)



(β)

Σχ. 3.1. α) Διάγραμμα αξονικής δύναμης διάτρησης (WOB) και β) διάγραμμα ροπής (Torque) συναρτήσει του βάθους διείσδυσης (Depth) από δοκιμή σε μάρμαρο Διονύσου με το όργανο DFTMS (test) (με ταχύτητα διάτρησης $v = 10 \text{ mm/min}$ και ταχύτητα περιστροφής $\omega = 600 \text{ rpm}$) και προσαρμογή ομαλής καμπύλης στις μετρήσεις (regression).

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα του Σχήματος 3.1 η αξονική δύναμη και η ροπή μεταβάλλονται έντονα στην αρχή της διάτρησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εκκίνηση της διάτρησης το κοπτικό άκρο δεν βρίσκεται σε τέλεια επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια οι μετρήσεις σταθεροποιούνται και τείνουν ασυμπτωτικά σε μια τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά από τα πρώτα 1-2 mm 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 τιμή στην οποία τείνει ασυμπτωτικά η κάθε καμπύλη είναι ο συντελεστής α της εξίσωσης (3.1), εφόσον όταν το x τείνει στο άπειρο ο όρος βe^{-x} μηδενίζεται. Οι συντελεστές α που αντιστοιχούν στη δύναμη διάτρησης και τη ροπή μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικές τιμές του πετρώματος για τις συγκεκριμένες ταχύτητες διάτρησης και περιστροφής που χρησιμοποιήθηκαν.

Η διαδικασία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο εφαρμόστηκε για διάφορα ζεύγη ταχύτητας διάτρησης και ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού άκρου στο ίδιο πέτρωμα. Το σχετικό μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης που εκτελέστηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας για το μάρμαρο Διονύσου φαίνεται στον Πίνακα 3.3.

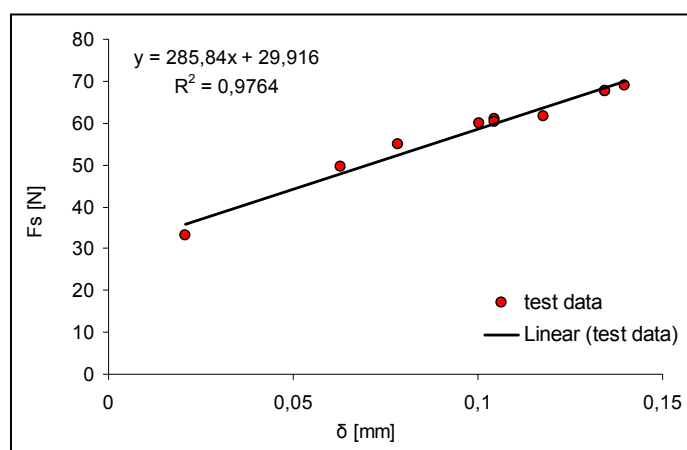
Πίνακας 3.3. Μητρώο πειραμάτων μικροπεριστροφικής διάτρησης στο μάρμαρο Διονύσου

Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
DIONI_D59F30NN	300	1	0,0209
DIONI_D59F31NN	400	4	0,0628
DIONI_D59F32NN	500	8	0,1005
DIONI_D59F33NN	600	10	0,1047
DIONI_D59F34NN	700	15	0,1346
DIONI_D59F35NN	700	15	0,1346
DIONI_D59F36NN	900	20	0,1396
DIONI_D59F37NN	800	10	0,0785
DIONI_D59F38NN	900	15	0,1047
DIONI_D59F39NN	800	15	0,1178
DIONI_D59F95NN	600	10	0,1047

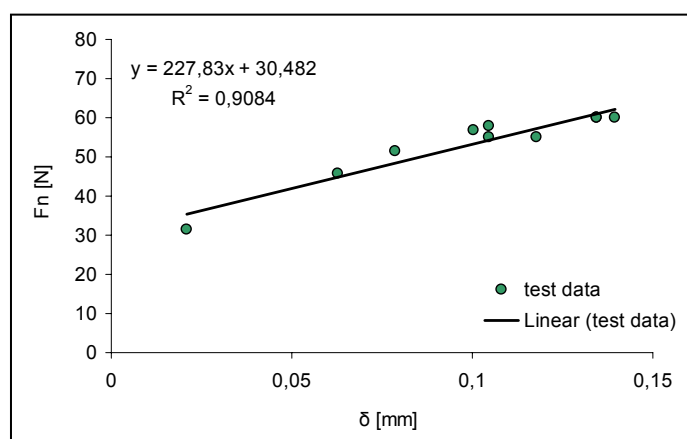
Στο κάθε ζεύγος ρυθμίσεων αντιστοιχεί ένα βάθος κοπής ανά περιστροφή (δ) που δίνεται από την εξίσωση (2.5). Επίσης, η κάθετη δύναμη επί του κοπτικού άκρου (F_n) ισούται με την αξονική δύναμη διάτρησης, ενώ η παράλληλη δύναμη (F_s) δίνεται από τη σχέση (2.3). Οι δύο αυτές συνιστώσες της δύναμης κοπής που υπολογίστηκαν για κάθε δοκιμή απεικονίστηκαν γραφικά συναρτήσει του βάθους κοπής δ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 (α και β). Γραφικά απεικονίστηκε επίσης και η κάθετη δύναμη συναρτήσει της παράλληλης δύναμης (Σχ. 3.2γ).

Από τα διαγράμματα του Σχήματος 3.2 παρατηρείται ότι οι συνιστώσες της δύναμης κοπής σχετίζονται γραμμικά με το βάθος και ότι η σχέση μεταξύ τους είναι επίσης γραμμική. Για το λόγο αυτό γίνεται γραμμική παρεμβολή στα αποτελέσματα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

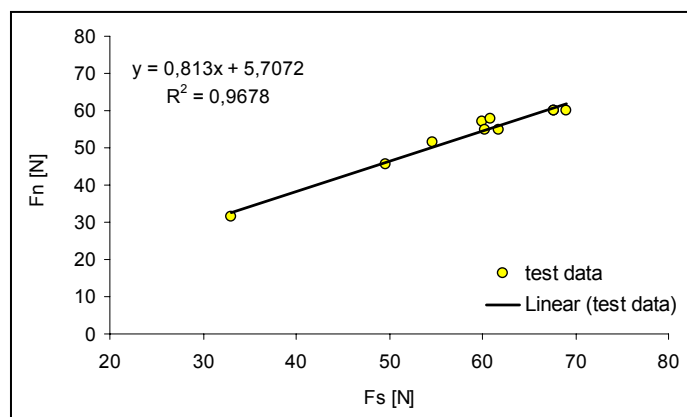
Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα μελετούμενα πετρώματα ώστε να εξαχθούν παρόμοια διαγράμματα για κάθε ένα από αυτά (Παράρτημα Α). Η κλίση της ευθείας στα δύο πρώτα διαγράμματα, η οποία έχει διαστάσεις δύναμης/μήκος και τελικά τάσης αν διαιρεθεί με μοναδιαίο μήκος κάθετα προς το κατακόρυφο επίπεδο της κοπής, καθώς και η αδιάστατη κλίση του τρίτου διαγράμματος, χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις γνωστές μηχανικές ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων που μελετήθηκαν, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. 3.2. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το μάρμαρο Λιονύσου όπου φαίνονται τα σημεία που προέκυψαν από τις δοκιμές (test data) και οι γραμμικές παρεμβολές τους (Linear): 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).

4. Συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε πέτρωμα εκτελέστηκε σειρά δοκιμών για διάφορες ρυθμίσεις της ταχύτητας διάτρησης και περιστροφής του κοπτικού άκρου. Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των F_n και F_s συναρτήσει του δ καθώς και του F_n συναρτήσει του F_s για κάθε πέτρωμα, υπολογίστηκαν οι κλίσεις των γραμμικών παρεμβολών (κλίσεις των ευθειών). Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται συγκεντρωτικά οι κλίσεις που υπολογίστηκαν για κάθε υλικό καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες έχουν προκύψει από τριαξονικές δοκιμές.

Οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων απεικονίστηκαν γραφικά ως συνάρτηση των κλίσεων που υπολογίστηκαν. Από τη διάταξη των σημείων πάνω στα διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι η σχέση που συνδέει τις κλίσεις με τις μηχανικές ιδιότητες είναι σχέση δύναμης της μορφής:

$$y = ax^b \quad (4.1)$$

όπου y τιμές της μηχανικής ιδιότητας για κάθε πέτρωμα, x η κλίση των διαγραμμάτων $F_n - \delta$, $F_s - \delta$ ή $F_n - F_s$ και a , b σταθερές που προκύπτουν από παρεμβολή με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν συσχετίζοντας κάθε μία από τις τέσσερις υπό μελέτη μηχανικές ιδιότητες με κάθε μία από τις τρεις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_n - \delta$, $F_s - \delta$ και $F_n - F_s$, επιλέχθηκαν αυτά που είχαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση για κάθε μηχανική ιδιότητα και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4.

Στο κάθε διάγραμμα σχεδιάστηκαν επίσης το ανώτερο και το κατώτερο όριο εμπιστοσύνης για 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Σκοπός ήταν να δηλωθεί ο βαθμός εμπιστοσύνης στην εκτίμηση των αγνώστων μηχανικών ιδιοτήτων ενός πετρώματος. Το διάστημα εμπιστοσύνης ορίζεται ως εξής (Ταγαράς (2001)): «Το $100(1-\alpha)\%$ διάστημα εμπιστοσύνης μιας προς εκτίμηση παραμέτρου θ , με πιθανότητα $(1-\alpha)$ η

εκτιμώμενη παράμετρος να περιέχεται στο διάστημα εμπιστοσύνης, εκφράζεται με τη μορφή:

$$P[L(\hat{\theta}, \alpha) \leq \theta \leq U(\hat{\theta}, \alpha)] = 1 - \alpha \quad (4.2)$$

όπου θ η πραγματική τιμή της παραμέτρου, $\hat{\theta}$ η εκτιμώμενη τιμή της παραμέτρου, $(1 - \alpha)$ ο συντελεστής εμπιστοσύνης (συνήθως $\alpha = 0,01$ ή $\alpha = 0,05$) και $L(\hat{\theta} - \alpha)$, $U(\hat{\theta} - \alpha)$ το κατώτερο και το ανώτερο όριο εμπιστοσύνης αντίστοιχα».

Επομένως το 95% διάστημα εμπιστοσύνης είναι το διάστημα μέσα στο οποίο περιέχεται η πραγματική τιμή της εκτιμώμενης μηχανικής ιδιότητας με εμπιστοσύνη 95%. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του διαστήματος εμπιστοσύνης, τόσο λιγότερο σαφείς είναι οι πληροφορίες για την πραγματική τιμή της άγνωστης θ , αλλά και τόσο μεγαλύτερη η είναι η εμπιστοσύνη ότι η τιμή της θ περιέχεται στο διάστημα αυτό. Επίσης για συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης η ακρίβεια της εκτίμησης είναι μεγαλύτερη (δηλαδή το μήκος του διαστήματος μειώνεται) όταν το μέγεθος του δείγματος μεγαλώνει.

Πίνακας 4.1. Κλίσεις των ευθειών από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα F_s - δ , F_n - δ και F_n - F_s και μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων.

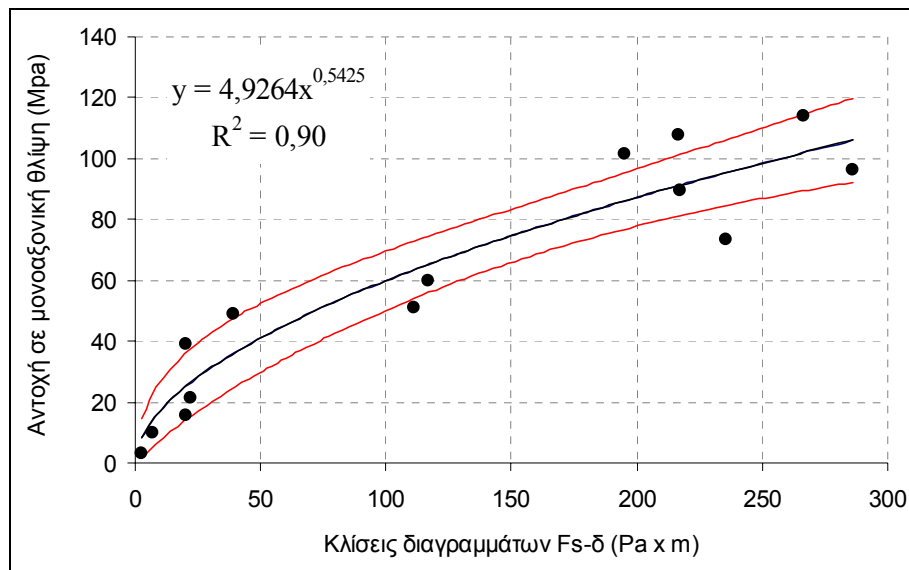
Υλικό	Κλίσεις ευθειών			Μηχανικές ιδιότητες			
	Διάγραμμα F_s - δ [N/mm]	Διάγραμμα F_n - δ [N/mm]	Διάγραμμα F_n - F_s	UCS ⁽¹⁾ (MPa)	c ⁽²⁾ (MPa)	ϕ ⁽³⁾ (°)	TS ⁽⁴⁾ (MPa)
Μάρμαρο Διονύσου	285,84	227,83	0,81	94,2	22,4	39,1	4,40
Μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia)	194,92	128,38	0,67	101,4	26,4	35,0	7,50
Μάρμαρο Carrara (τύπος Loro)	235,37	144,99	0,62	73,2	18,3	39,4	5,60
Μάρμαρο Carrara (τύπος Cerviaiole)	266,52	233,88	0,89	113,9	28,8	36,4	9,40
Πεντελικό Μάρμαρο	217,41	158,48	0,77	89,6	26,0	28,8	-
Ασβεστόλιθος Lecce	19,95	6,64	0,31	15,4	6,7	14,2	1,93
Ασβεστόλιθος Vicenza	21,87	12,98	0,59	21,3	6,8	24,6	2,70
Ασβεστόλιθος Portland	111,46	59,58	0,54	51,2	12,0	39,6	4,70
Ασβεστόλιθος Tuffeau de Maastricht	2,53	1,36	0,37	3,1	1,2	13,3	0,51
Ψαμμίτης Serena	216,66	315,79	1,47	107,6	14,6	59,7	4,78
Ψαμμίτης Sander (verso)	39,03	28,60	0,67	49,0	10,5	43,7	2,40
Ψαμμίτης Sander (contro)	19,96	16,17	0,32	39,0	8,9	41,1	3,00
Σαπωνόλιθος Νιδαρού	116,87	29,74	0,25	60,1	18,5	25,9	5,63
Υδραυλικό κονίαμα	6,81	7,00	0,37	9,8	2,9	34,6	0,83

*⁽¹⁾ UCS: αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη

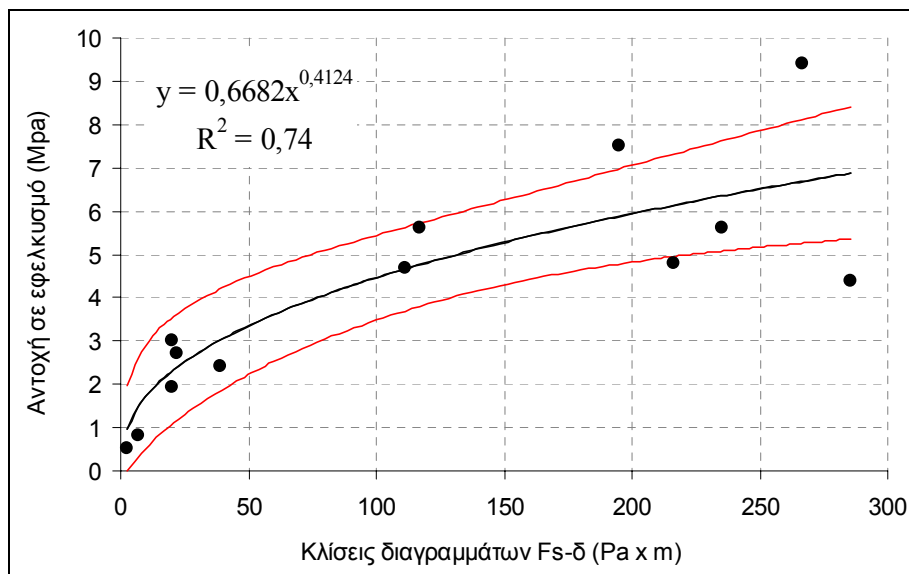
*⁽²⁾ c : συνοχή του υλικού

*⁽³⁾ ϕ : γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού

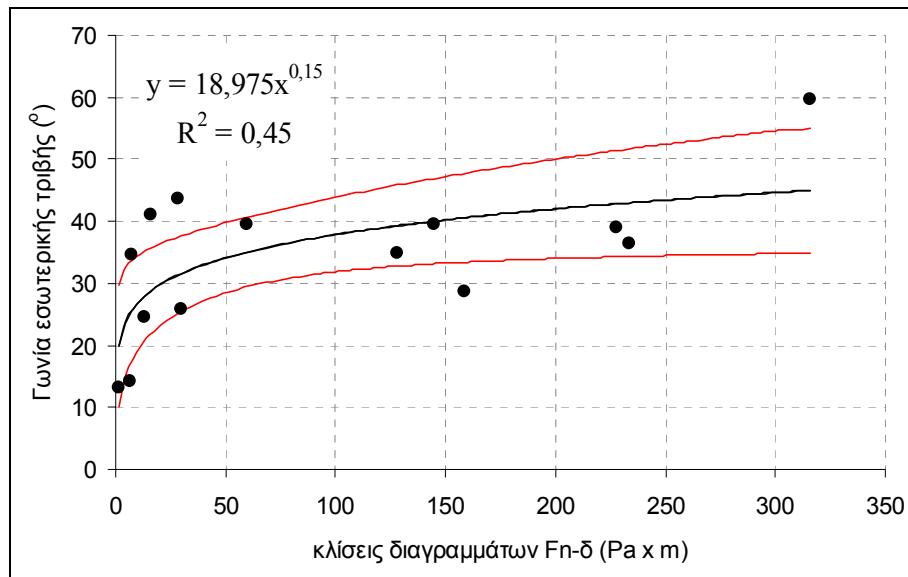
*⁽⁴⁾ TS: αντοχή του υλικού σε έμμεσο ή άμεσο εφελκυσμό



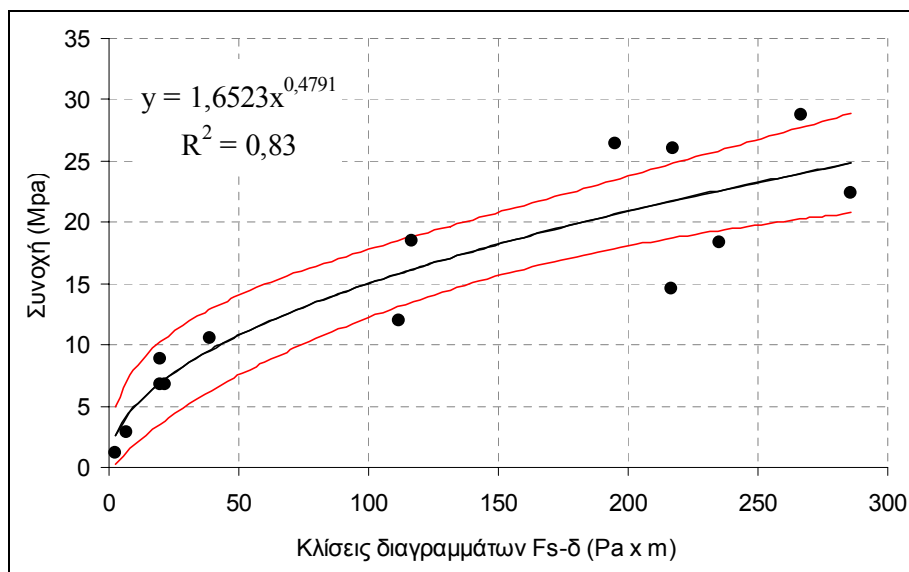
Σχ. 4.1. Συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$.



Σχ. 4.2. Συσχέτιση της αντοχής σε εφελκυσμό με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$.



Σχ. 4.3. Συσχέτιση της γωνίας εσωτερικής τριβής με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_n - \delta$.



Σχ. 4.4. Συσχέτιση της συνοχής με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα του Σχήματος 4.1 υπάρχει καλή συσχέτιση των κλίσεων των διαγραμμάτων $F_s - \delta$, που προέκυψαν από τις δοκιμές, με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (συντελεστής συσχέτισης $R^2 = 0,90$). Αυτό

σημαίνει ότι το εν λόγω διάγραμμα εκτιμάται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα για την εκτίμηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ενός νέου πετρώματος.

Από το Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι υπάρχει επίσης καλή συσχέτιση των κλίσεων των διαγραμμάτων $F_s - \delta$ των δοκιμών με την αντοχή σε εφελκυσμό (συντελεστής συσχέτισης $R^2 = 0,74$). Παρόλα αυτά, η συσχέτιση στο διάγραμμα αυτό υστερεί ως προς τη συσχέτιση του Σχήματος 4.1. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι δυνατόν να βελτιωθεί με την εκτέλεση περισσότερων πειραμάτων. Επομένως εκτιμάται ότι το διάγραμμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα διατηρώντας κάποια επιφύλαξη, λόγω της όχι και τόσο υψηλής συσχέτισης που παρουσιάζει.

Σε αντίθεση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την αντοχή σε εφελκυσμό που παρουσιάζουν καλή συσχέτιση με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$, η γωνία εσωτερικής τριβής συσχετίζεται καλύτερα με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_n - \delta$ (Σχήμα 4.3). Παρόλα αυτά ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ μικρός ($R^2 = 0,45$) και φαίνεται να είναι απίθανο να βελτιωθεί με τη διεξαγωγή επιπλέον πειραμάτων. Το διάγραμμα αυτό δεν θεωρείται αξιόπιστο ώστε να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα.

Τέλος η συνοχή φαίνεται να παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τις κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$ των δοκιμών (έχει τη δεύτερη καλύτερη συσχέτιση μετά την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,83$). Το συγκεκριμένο διάγραμμα εκτιμάται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νομόγραμμα δίνοντας σχετικά καλά αποτελέσματα, ενώ είναι πιθανή η βελτίωση της συσχέτισης που παρουσιάζει με την εκτέλεση περισσότερων δοκιμών.

Γενικότερα παρατηρείται ότι η δύναμη F_s , η οποία προκαλεί κατά κύριο λόγο ορθή φόρτιση στο κομμάτι του πετρώματος που αποκολλάται, παρουσιάζει καλή συσχέτιση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο

λόγω της κατά προσέγγιση ομοιότητας της δύναμης F_s με τη δύναμη που ασκείται σε δοκίμιο κατά τη φόρτισή του σε μονοαξονική θλίψη. Επίσης, λόγω της κατά προσέγγιση αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την αντοχή σε εφελκυσμό (περίπου 10 προς 1), η δύναμη F_s παρουσιάζει αρκετά καλή συσχέτιση και με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Ακόμη, η καλή συσχέτιση που παρατηρείται μεταξύ της δύναμης F_s και της συνοχής πιθανόν να οφείλεται στο ότι το βάθος κοπής δ είναι στην τάξη μεγέθους του κόκκου. Συγκεκριμένα κατά τη θραύση του πετρώματος – στην οποία κύριο λόγο φαίνεται να έχει η δύναμη F_s – πρακτικά αποκολλώνται κόκκοι από το πέτρωμα. Η διαδικασία αυτή συνδέεται άμεσα με τη συνεκτικότητα των κόκκων που εκφράζεται από τη συνοχή του πετρώματος.

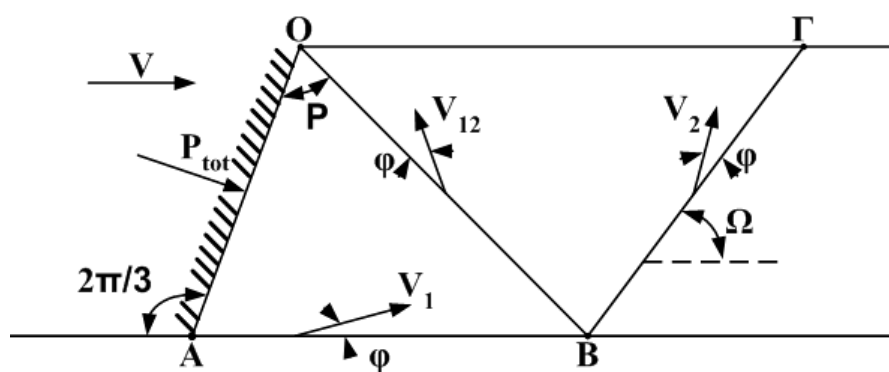
Αντίθετα η γωνία εσωτερικής τριβής δε συσχετίζεται με τα μετρούμενα μεγέθη. Αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι δε φαίνεται να υπάρχει κάποιος απλά ερμηνεύσιμος μηχανισμός που να συνδέει τις μετρήσεις με τη γωνία εσωτερικής τριβής, έτσι ώστε η τελευταία να συσχετίζεται άμεσα με τις κλίσεις των διαγραμμάτων. Περαιτέρω μελέτη απαιτείται ώστε να συσχετισθεί με κάποιο τρόπο η μηχανική αυτή ιδιότητα με τα πειραματικά δεδομένα. Θα πρέπει ακόμη να αναφερθεί ότι οι κλίσεις των διαγραμμάτων $F_n - F_s$ δεν έδωσαν τόσο καλές συσχετίσεις όσο οι κλίσεις των διαγραμμάτων $F_s - \delta$ και $F_n - \delta$ για καμία από τις τέσσερις μηχανικές ιδιότητες.

Ανακεφαλαιώνοντας, η πειραματική αυτή εργασία κατέδειξε ότι η καλύτερη συσχέτιση που μπορεί να επιτευχθεί παρουσιάζει συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,90$ και αφορά στη σχέση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με την ειδική ενέργεια της ροπής στρέψης, η οποία χαρακτηρίζεται από την κλίση $F_s - \delta$ (παρόλο που η ειδική ενέργεια έχει μονάδες τάσης ενώ η κλίση έχει μονάδες δύναμης/μήκος, η τελευταία μετατρέπεται σε τάση αν διαιρεθεί με την ακτίνα του διατρήματος, που παραμένει σταθερή σε όλα τα πειράματα). Ο λόγος της μη υψηλής συσχέτισης των ειδικών ενεργειών διάτρησης με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έγκειται στο γεγονός ότι οι πρώτες δεν εξαρτώνται μόνο από την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αλλά και από

τη γωνία εσωτερικής τριβής. Αυτό φαίνεται από τη σχέση (4.3) μεταξύ της παθητικής ειδικής δύναμης θραύσης P_{tot} και των ιδιοτήτων αντοχής του πετρώματος που μπορεί να εξαχθεί στα πλαίσια της Θεωρίας Οριακής Ανάλυσης (Chen (1975)):

$$P_{tot} = c \delta K_{pc}(\varphi, \beta, \theta, P, \Omega, \dots) \quad (4.3)$$

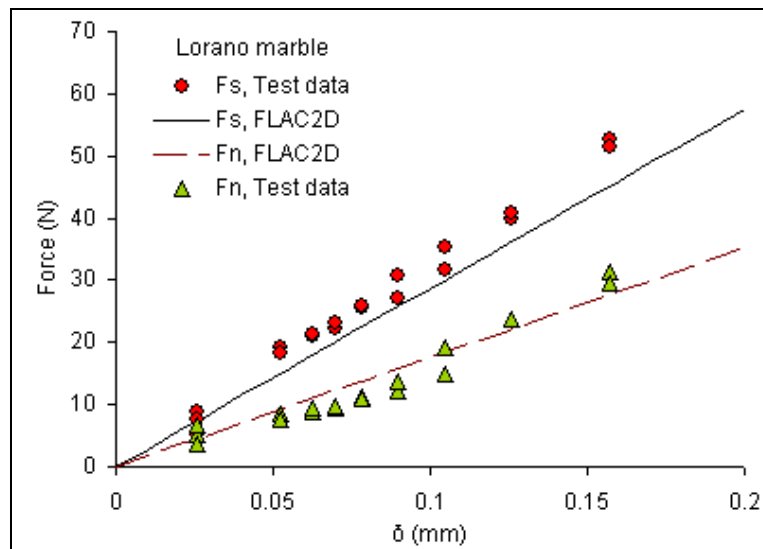
όπου K_{pc} είναι καθαρός αριθμός που εξαρτάται από την γωνία εσωτερικής τριβής φ , τη γωνία επαφής β και τη γωνία θ (Σχ. 2.5), καθώς και τις γωνίες του κινηματικού μηχανισμού θραύσης που αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 4.5.



Σχ. 4.5. Κινηματικός μηχανισμός θραύσης πετρώματος με δύο τρίγωνα (Chen (1975)).

Η ορθότητα της παραπάνω σχέσης καταδεικνύεται από το γεγονός ότι η σχέση αυτή μπορεί να προβλέψει ιδιαιτέρως καλά τα πειραματικά αποτελέσματα σε όλα σχεδόν τα πετρώματα. Ενδεικτικά φαίνεται η σύγκριση της θεωρίας με τα πειραματικά αποτελέσματα στο μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

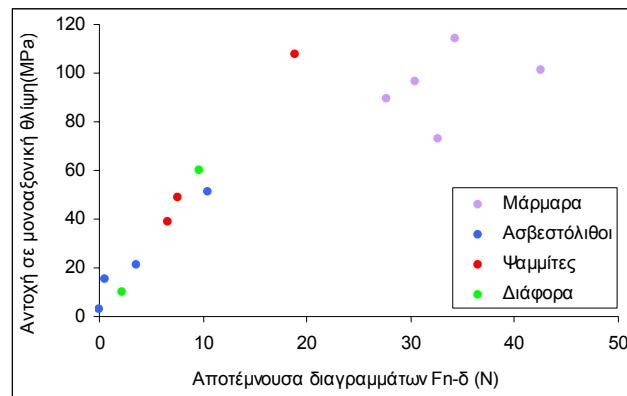
Η συνέχιση της έρευνας προς αυτήν την κατεύθυνση και όχι προς την κατεύθυνση των στατιστικών συσχετίσεων των ιδιοτήτων αντοχής των πετρωμάτων με κάθε μια εκ των παραμέτρων κοπής όπως καταγράφονται από το όργανο είναι αναγκαία για την αξιοποίηση του προτεινόμενου οργάνου.



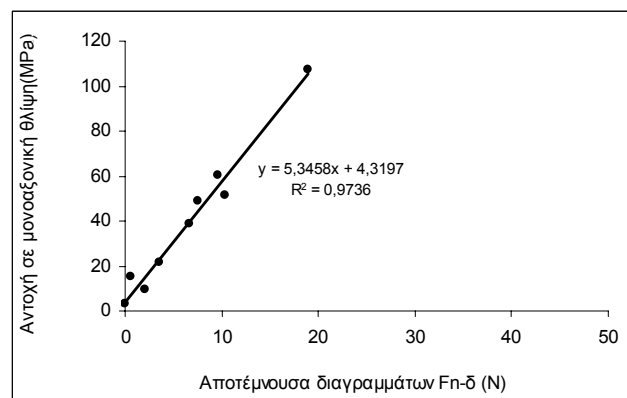
Σχ. 4.6. Σύγκριση των προβλέψεων της θεωρίας οριακής ανάλυσης με τα πειραματικά αποτελέσματα μικροδιάτρησης στο μάρμαρο Lorano (Stavropoulou et al. (2005)).

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι θα μπορούσε επίσης να συσχετισθεί η αποτέμνουσα της αξονικής δύναμης κοπής F_n , στο διάγραμμα $F_n - \delta$, της ευθείας καλύτερης προσαρμογής για κάθε τύπο πετρώματος με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.7(α,β). Αυτό βασίζεται σε περιορισμένες πειραματικές παρατηρήσεις ότι η αρχική ταχύτητα περιστροφικής διάτρησης (v_0) με την αξονική δύναμη που απαιτείται για την περιστροφική διάτρηση (WOB) για δεδομένη περιστροφική ταχύτητα ω σε ορισμένο πέτρωμα έχει τη μορφή του Σχήματος 4.8. Η τέμνουσα της πειραματικής αυτής καμπύλης με τον άξονα WOB, αν υποθεθεί ότι η σχέση είναι εξ' ολοκλήρου γραμμική, εκφράζει το έργο που πρέπει να δαπανηθεί για την διείδυση του κοπτικού άκρου στο πέτρωμα (εφόσον $\delta \rightarrow 0$).

Συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων

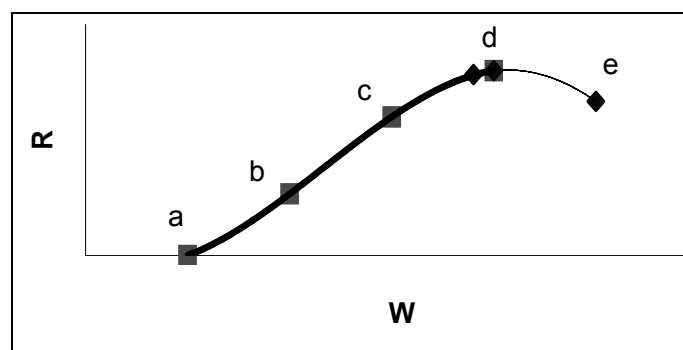


(α)



(β)

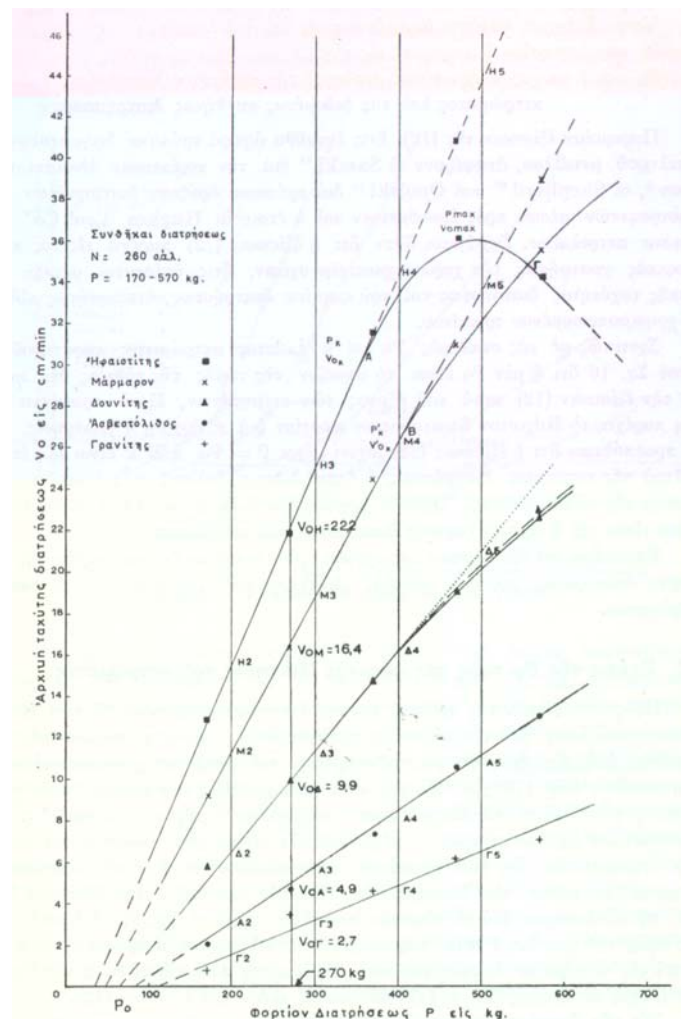
Σχ. 4.7. (α) Πειραματική σχέση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και της αποτέμνουσας των εμπειρικών γραμμικών συσχετίσεων $F_n-\delta$ για όλους τους τύπους πετρωμάτων και (β) γραμμική συσχέτιση $UCS - F_{no}$ (αποτέμνουσα) αν εξαιρεθούν τα μάρμαρα.



Σχ. 4.8. Σχέση της αρχικής ταχύτητας διάτρησης (R) με την αξονική δύναμη διάτρησης W (ή WOB σύμφωνα με το συμβολισμό της παρούσας εργασίας) (Κελεσίδης (2001)).

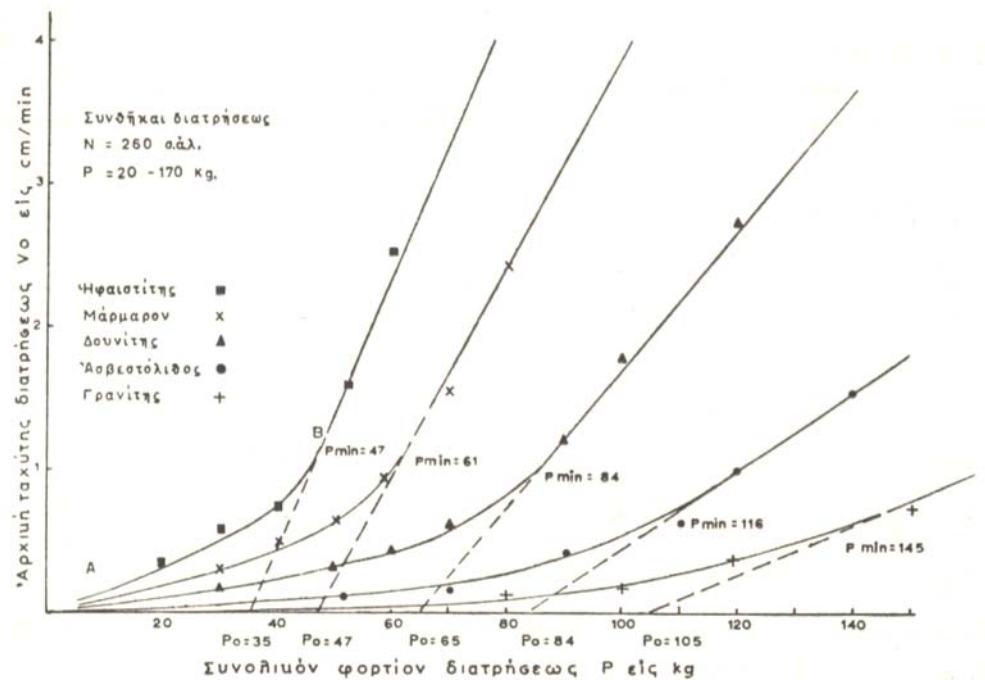
Αυτό όμως καταρρίπτεται από τα πειραματικά αποτελέσματα περιστροφικής διάτρησης σε ψαθυρά πετρώματα του Τσουτρέλη (1968). Πράγματι τα αρχικά πειραματικά αποτελέσματα του ως άνω ερευνητή, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9, δείχνουν καταρχήν ότι η αποτέμνουσα εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος αν όμως θεωρηθεί γραμμική η σχέση και προεκβληθεί επί του οριζοντίου άξονα. Η επανάληψη των πειραμάτων για πολύ μικρά φορτία διάτρησης κατέδειξε, όπως άλλωστε φαίνεται στο Σχήμα 4.10, ότι η σχέση $V_o = f(P)$ ($v_o = f(WOB)$ στην παρούσα εργασία) δεν συνεχίζει να είναι γραμμική για μικρά δ (ή V_o), αλλά σχέση δύναμης που δίνει $V_o = 0$ για $P = 0$ ή για πολύ μικρό P . Επίσης, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Σχ. 4.6α, τα μάρμαρα ξεφεύγουν εντελώς από αυτή τη γραμμική σχέση που φαίνεται ότι υπακούουν οι άλλοι τύποι πετρωμάτων (Σχ. 4.6β), επομένως θα πρέπει μια τέτοια συσχέτιση (ή μοντέλο) να μην ισχύει σύμφωνα με βασικές επιστημονικές αρχές.

Συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων



Σχ. 4.9. Σχέση της αξονικής δύναμης διάτρησης (P) (WOB στην παρούσα εργασία) με την αρχική ταχύτητα διάτρησης V_0 (v_0 στην παρούσα εργασία) για διάφορους τύπους πετρωμάτων και για σταθερή ταχύτητα περιστροφής $\omega = 260 \text{ rpm}$ (Τσουτρέλης (1968)).

Συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων μικροδιάτρησης με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων



Σχ. 17. Μορφή της συναρτήσεως $V_o = f(P)$ υπό μικρά φορτία διατρήσεως και καθορισμός εκ ταύτης των τιμών P_o και P_{min} .

Σχ. 4.10. Μορφή της συνάρτησης $V_o = f(P)$ για μικρά φορτία διάτρησης (Τσουντρέλης (1968)).

Τα ίδια μπορούν να ειπωθούν και για την αποτέμνουσα της εμπειρικής γραμμικής σχέσης $F_s - \delta$. Σ' αυτήν την περίπτωση η αποτέμνουσα της υπ' όψιν σχέσης εκφράζει το έργο που δαπανάται σε τριβή λόγω απόξεσης του πετρώματος από το κοπτικό άκρο για απειροστά βάθη κοπής.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις

Η μέθοδος της περιστροφικής μικροδιάτρησης με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, όπως παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, οδηγεί σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ασφαλώς, εφόσον πρόκειται για μια νέα και πρωτοποριακή μέθοδο, απαιτούνται περαιτέρω πειραματικές δοκιμές στα ίδια και σε άλλα πετρώματα και συνθετικά υλικά με σκοπό τη βελτίωση της αξιοπιστίας των νομογραμμάτων, την επιβεβαίωση της λειτουργικότητάς της και την τεκμηρίωσή της ως σχεδόν μη-καταστροφικής μεθόδου εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων.

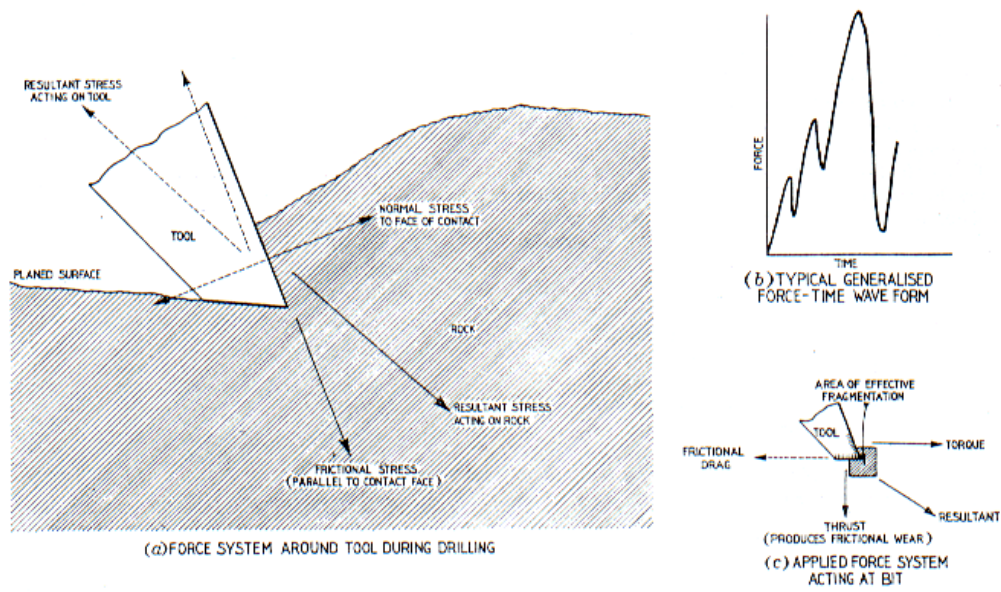
Αναλυτικότερα θα πρέπει να σημειωθεί η καλή προβλεψιμότητα της μεθόδου στον χαρακτηρισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, της αντοχής σε εφελκυσμό και της συνοχής των πετρωμάτων. Αντίθετα, όπως προέκυψε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, η μέθοδος αυτή δεν κρίνεται ικανοποιητική στην εκτίμηση της γωνίας εσωτερική τριβής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κλίση της σχέσης $F_n - F_s$ δεν εξαρτάται από την γωνία της εσωτερικής τριβής του πετρώματος αλλά από την γωνία επαφής β του κοπτικού άκρου με το πέτρωμα. Αναμένεται όμως ότι για φθαρμένα κοπτικά άκρα (πεπλατυσμένα) που αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις τριβής μεταξύ του πεπλατυσμένου άκρου και του πετρώματος θα δώσουν την επιθυμητή καλή συσχέτιση μεταξύ της κλίσης $F_n - F_s$ και φ .

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

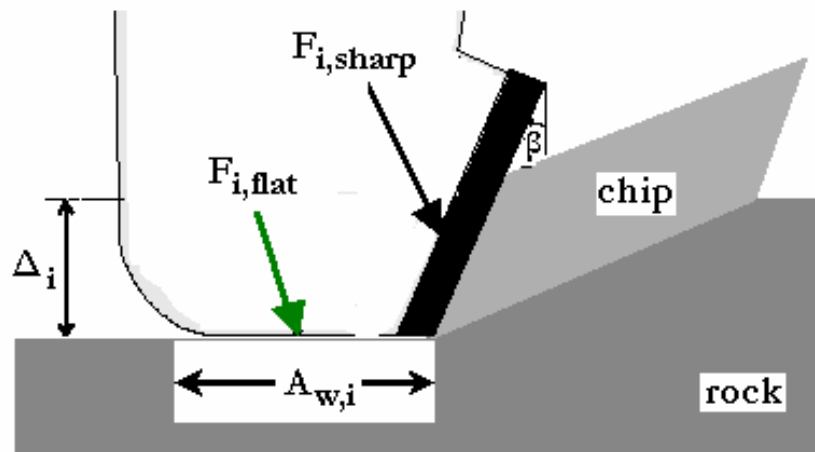
- η διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών στα ήδη μελετημένα πετρώματα, με σκοπό (α) την αύξηση του μεγέθους της βάσης δεδομένων και (β) την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμένων σημείων των νομογραμμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους,
- η εκτέλεση δοκιμών και σε άλλους τύπους πετρωμάτων (π.χ. γρανίτες) ή τεχνητών υλικών (π.χ. τσιμέντο) ώστε να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα της

μεθόδου και σε υλικά διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης και κοκκομετρίας από αυτές των πέντε κατηγοριών πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

- Η διενέργεια των πειραμάτων με φθαρμένα κοπτικά άκρα για την εύρεση της συσχέτισης της γωνίας τριβής φ του πετρώματος και της κλίσης της ευθείας $F_n - F_s$ που αναπτύσσονται στην φθαρμένη πλευρά του κοπτικού άκρου.
- Για την τυποποίηση της προτεινόμενης μεθόδου πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της φθοράς του κοπτικού άκρου, κατά την διάτρηση σε φθοροποιά πετρώματα, στα πειραματικά αποτελέσματα με σκοπό να αφαιρεθεί η επίδραση της φθοράς του κοπτικού άκρου από τα αποτελέσματα αυτά. Λ.χ. οι Fairhurst & Lacabanne (1957) πρότειναν ότι δύο μηχανισμοί λειτουργούν ταυτόχρονα κατά την κοπή με φθαρμένα κοπτικά άκρα: (1) ο μηχανισμός κοπής και (2) επαφή με τριβή κάτω από το κοπτικό (Σχ. 5.1).
- Η ανάπτυξη θεωρητικού και υπολογιστικού μοντέλου αλληλεπίδρασης κοπτικών άκρων και πετρωμάτων κατά την περιστροφική διάτρηση, βαθμονομημένων πάνω στο όργανο, με σκοπό την αναβάθμιση του λογισμικού του για την επί τόπου αξιόπιστη εκτίμηση των ιδιοτήτων αντοχής των πετρωμάτων και την πλήρη αξιοποίηση του οργάνου που είναι πρωτοποριακό στην πειραματική μηχανική.



(α)



(β)

Σχ. 5.1. (α) Δυνάμεις που δρουν στην επαφή του κοπτικού άκρου-πετρώματος (Fairhurst & Lacabanne (1957)), (β) Δύναμη επαφής $F_{i, sharp}$ και δύναμη τριβής $F_{i, flat}$ που δρουν σε φθαρμένο κοπτικό άκρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

1. Chen, W-F. (1975). Limit analysis and soil plasticity, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
2. Chen W.F. and Han D.J. (1988). Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, Berlin.
3. 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. 13-23.
4. 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. 307-340.
5. Exadaktylos G. et al. (2002-2005). "Integrated tool for in situ characterization of effectiveness and durability of conservation techniques in historical structures (DIAS)", Proposal No. DIAS-EVK4-2001-00141 (EESD-2000-4.2.2 Sub-Programme: Environment & Sustainable Development, KA 4: City of Tomorrow & Cultural Heritage - Development of innovative conservation strategies).
6. Fairhurst C. and Lacabanne W.D. (1957). Hard rock drilling techniques. *Min. Quarry Engineering* 157-161, pp. 194-197
7. ISRM (International Society of Rock Mechanics) (1978). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, pp. 49-51.
8. Lockner, D.A. (1995). Rock Failure, In Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants, American Geophysical Union, pp. 127-147.
9. Merchant M.E. (1944). Basic mechanics of the metal-cutting process. *J. Appl Mech*, 11(A), pp. 168-175.
10. 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.
11. Merchant M.E. (1945b). Mechanics of metal cutting process ii. Plasticity conditions in orthogonal cutting. *J. Appl Phys*, 16(6), pp. 318-324.
12. Stavropoulou, M. (2005). Numerical modelling of small-diameter rotary drilling tests on marbles, paper in preparation for submission to *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*
13. Stavropoulou M., Giannakopoulos K. and Exadaktylos G. (2005). A theoretical and experimental study of rock, *Journal of Mechanical Behavior of Materials*, in print.
14. 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.

15. 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. 555-566.

Ελληνική

1. Κελεσίδης, Β. (2001). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωτρήσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Ταγαράς, Γ. (2001). Στατιστικός έλεγχος ποιότητας, εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
3. Τσουτρέλης, Χ. Ε. (1968). Διερεύνηση της επιδράσεως των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων επί της ταχύτητος διατρήσεως τούτων δια περιστροφικών τρυπάνων, Διατριβή επί Διδακτορία, ΕΜΠ, Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A.1 Μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia)

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο Gioia βρίσκεται στην πόλη Carrara της Ιταλίας. Το πέτρωμα τοποθετείται χρονολογικά στην Ιουρασική περίοδο. Το μάρμαρο του λατομείου Gioia που χρησιμοποιείται για την παρούσα έρευνα είναι ασβεστίτικο με κύριο χαρακτηριστικό του τα γκρίζα νερά λευκής ή, συχνότερα, ελαφρώς γκρίζας απόχρωσης. Τα νερά του μαρμάρου οφείλονται στην παρουσία δευτερογενών συγκεντρώσεων, μέσα στην ασβεστίτική μάζα. Δευτερεύοντα ορυκτά όπως χαλαζίας και μοσχοβίτης είναι συχνά.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.1.1 και A.1.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.1.1. Φυσικές ιδιότητες μαρμάρου Gioia

Τύπος πετρώματος	μάρμαρο Gioia
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστίτικο μάρμαρο
Μέγεθος κόκκου (μm)	150-250
Πραγματική πυκνότητα (g/cm^3)	$2,71 \pm 0,1$
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm^3)	$2,67 \pm 0,1$
Ενεργό πορώδες (%)	$1,0 \pm 0,2$
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	$1,5 \pm 0,2$
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	$0,9 \pm 0,1$
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας A.1.2. Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Gioia

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	101,4
Συνοχή, c (MPa)	26,4
Γωνία εσωτερικής τριβής, $\phi(^{\circ})$	35,0
Αντοχή σε εφέλκυσμό, TS (MPa)	7,5

Μητρώο πειραμάτων

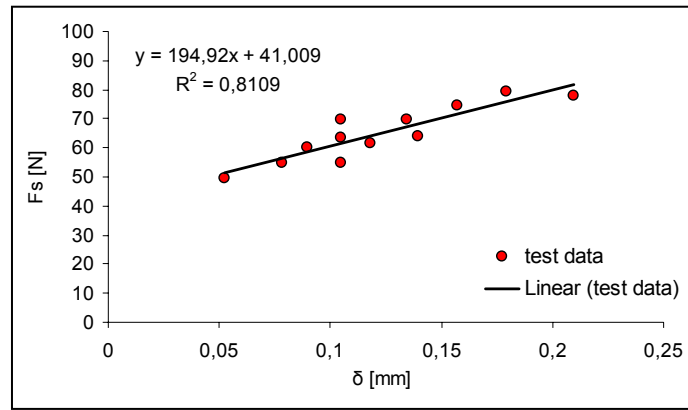
Στον Πίνακα Α.1.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για το μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia).

Πίνακας Α.1.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στο μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia)

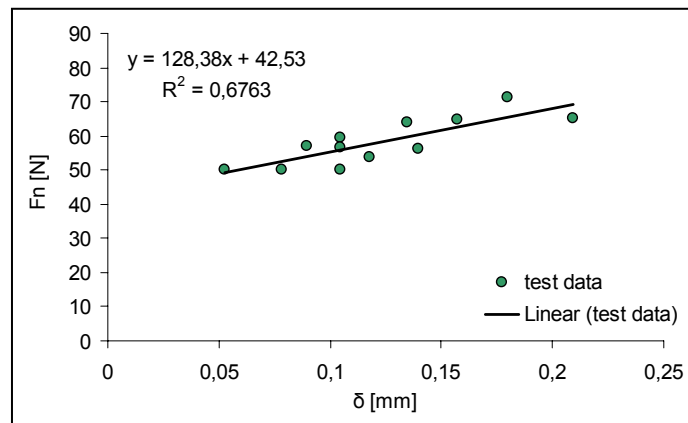
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	ν (mm/min)	δ (mm/rev)
MG D59F48NN	600	10	0,1047
MG D59F49NN	700	10	0,0897
MG D59F50NN	800	10	0,0785
MG D59F51NN	800	20	0,1570
MG D59F52NN	700	20	0,1795
MG D59F53NN	1200	20	0,1047
MG D59F54NN	1200	40	0,2094
MG D59F55NN	600	5	0,0523
MG D59F56NN	700	15	0,1346
MG D59F57NN	800	15	0,1178
MG D59F58NN	900	20	0,1396
MG D59F93NN	600	10	0,1047

Πειραματικά αποτελέσματα

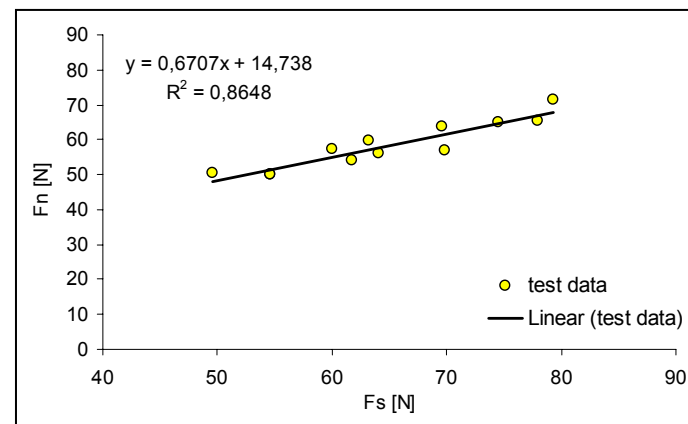
Στο Σχήμα Α.1 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.1α και Α.1β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.1γ) για το μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia).



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.Ι. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το μάρμαρο Carrara (τύπος Gioia): 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).

A.2 Μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano)

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο Lorano βρίσκεται στην πόλη Carrara της Ιταλίας. Απ' το λατομείο αυτό εξορύσσεται άσπρο μάρμαρο με ένα ακανόνιστο δίκτυο φλεβών. Το πέτρωμα βρίσκεται στα στρώματα που χαρακτηρίζονται από ζώνες ιδιαιτέρως ρωγματομένου υλικού. Τα δύο κύρια συστήματα ρωγμών στις αποθέσεις μαρμάρου των Άλπεων Αρπυαν είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθούν στο Lorano.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.2.1 και A.2.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.2.1. Φυσικές ιδιότητες μαρμάρου Lorano

Τύπος πετρώματος	μάρμαρο Lorano
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστιτικό μάρμαρο
Μέγεθος κόκκου (μm)	200-250
Πραγματική πυκνότητα (g/cm ³)	2,70
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,67 ± 0,1
Ενεργό πορώδες (%)	-
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	1,1 ± 0,1
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	-
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας A.2.2. Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Lorano

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	73,2*
Συνοχή, c (MPa)	18,3*
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	39,4*
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	5,6
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη

*δοκιμές που εκτελέστηκαν από SINTEF, ενώ όλα τα άλλα μηχανικά δεδομένα από TUC

Μητρώο πειραμάτων

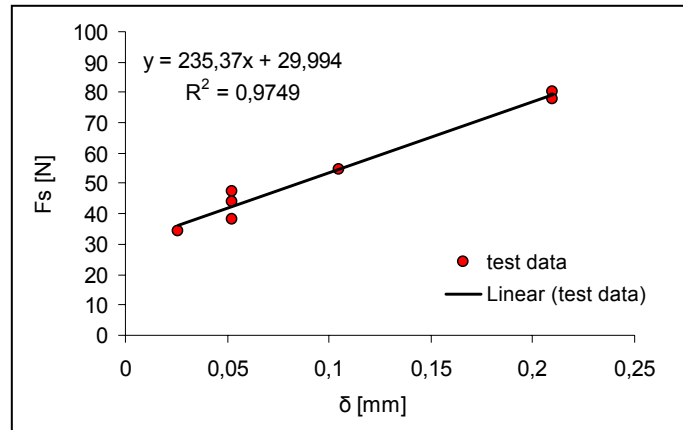
Στον Πίνακα Α.2.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για το μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano).

Πίνακας Α.2.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στο μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano)

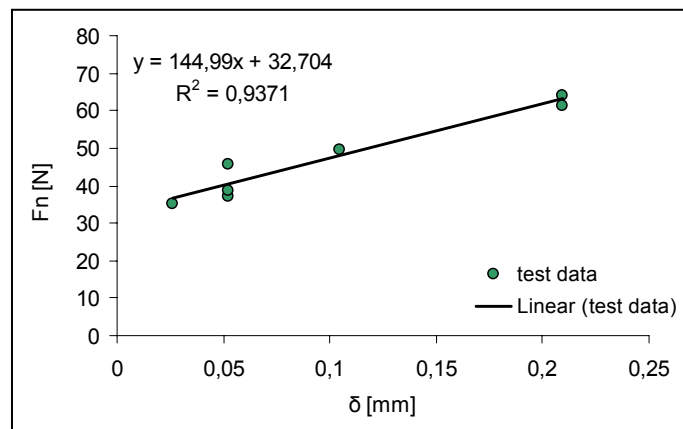
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
CARRA D59F13	600	10	0,1047
CARRA D59F14	600	20	0,2094
CARRA D59F15	600	5	0,0524
CARRA D59F16	1200	10	0,0524
CARRA D59F17	1200	20	0,1047
CARRA D59F18	1200	5	0,0262
CARRA D55F21	600	10	0,1047
CARRA D55F22	600	20	0,2094
CARRA D55F23	1200	10	0,0524

Πειραματικά αποτελέσματα

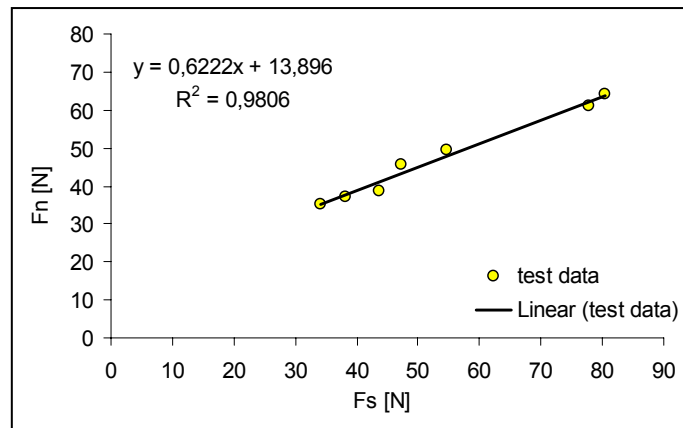
Στο Σχήμα Α.2 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.2α και Α.2β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.2γ) για το μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano).



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.2. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το μάρμαρο Carrara (τύπος Lorano): 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).

A.3 Μάρμαρο Carrara (τύπος Cervairole)

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο Cervairole βρίσκεται στην πόλη Carrara της Ιταλίας. Το πέτρωμα τοποθετείται χρονολογικά στην Ιουρασική περίοδο. Το μάρμαρο Carrara (τύπος Cervairole) είναι μεταμορφωμένο πέτρωμα φτιαγμένο από σχεδόν μικροσκοπικούς κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου. Περιέχει περιορισμένη ποσότητα δευτερογενών συγκεντρώσεων οι οποίες δεν τροποποιούν το φυσικό χρώμα του ασβεστίτη (κύριο συστατικό του μαρμάρου). Συνεπώς το χρώμα του πετρώματος είναι «μαργαριταρένιο» λευκό, συχνά με γκριζωπά νερά.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.3.1 και A.3.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.3.1. Φυσικές ιδιότητες μαρμάρου Cervairole

Τύπος πετρώματος	μάρμαρο Cervairole
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστιτικό μάρμαρο
Μέγεθος κόκκου (μm)	300
Πραγματική πυκνότητα (g/cm ³)	-
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,17 ± 0,2
Ενεργό πορώδες (%)	-
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	1,3 ± 0,3
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	-
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας A.3.2. Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Cervairole

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	113,9
Συνοχή, c (MPa)	28,8
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	36,4
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	9,4

Μητρώο πειραμάτων

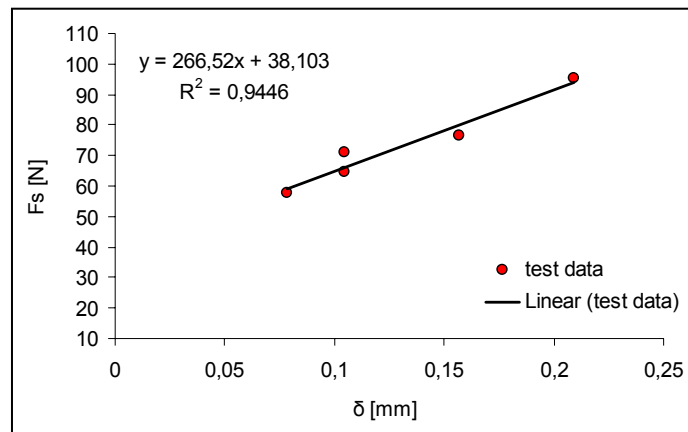
Στον Πίνακα Α.3.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για το μάρμαρο Carrara (τύπος Cervairole).

Πίνακας Α.3.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στο μάρμαρο Carrara (τύπος Cervairole)

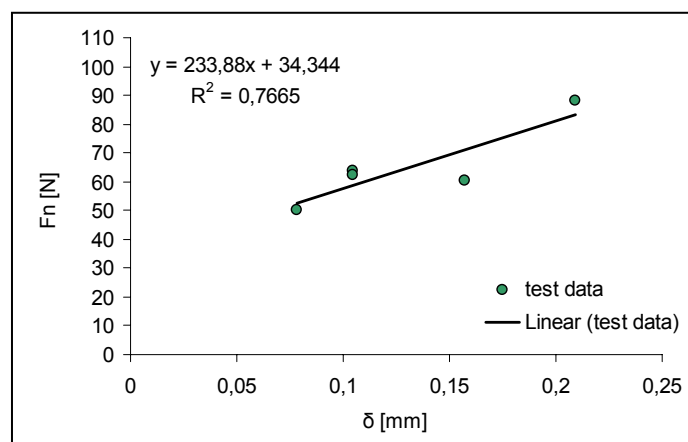
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	ν (mm/min)	δ (mm/rev)
MC D59F33NN	600	10	0,1047
MC D59F34NN	600	10	0,1047
MC D59F36NN	600	20	0,2094
MC D59F37NN	800	20	0,1570
MC D59F38NN	800	10	0,0785

Πειραματικά αποτελέσματα

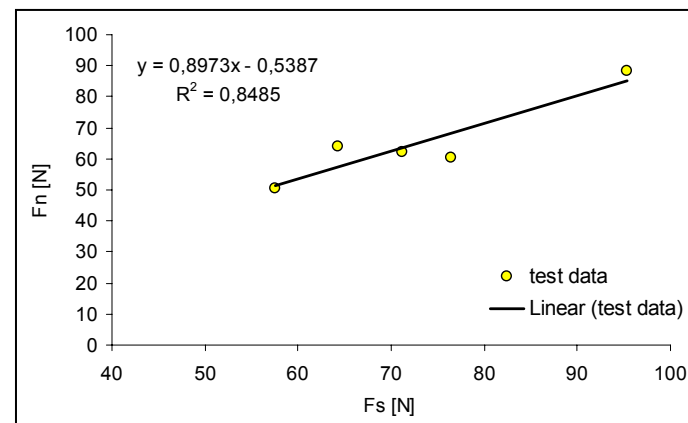
Στο Σχήμα Α.3 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.3α και Α.3β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.3γ) για το μάρμαρο Carrara (τύπος Cervairole).



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.3. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το μάρμαρο Carrara (τύπος Cervaiolle): 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).

Α.4 Πεντελικό μάρμαρο

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Τα δείγματα μαρμάρου Πεντέλης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία προέρχονται από το παλαιό λατομείο Πεντέλης. Το μάρμαρο Πεντέλης προέρχεται από μεταμόρφωση καθαρών ασβεστόλιθων νηριτικής φάσης, με πολύ μικρή συμμετοχή μαγνησιούχων και αργιλοπυριτικών ουσιών. Η συνηθέστερη χρωματική παραλλαγή του πεντελικού μαρμάρου είναι εκείνη που παρουσιάζει λευκό χρώμα με παράλληλες ζώνες κυανότεφρου και σμαραγδοπράσινου χρώματος. Το κύριο ορυκτολογικό συστατικό είναι ο ασβεστόλιθς και μπορεί να περιέχει σε μικρό ποσοστό το ορυκτό δολομίτη.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στοιχεία σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες του Πεντελικού μαρμάρου δεν βρέθηκαν (Πίνακας Α.4.1). Στον Πίνακα Α.4.2 δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.

Πίνακας Α.4.1. Φυσικές ιδιότητες Πεντελικού μαρμάρου

Τύπος πετρώματος	Πεντελικό μάρμαρο
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστιτικό μάρμαρο
Μέγεθος κόκκου (μm)	-
Πραγματική πυκνότητα (g/cm ³)	-
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	-
Ενεργό πορώδες (%)	-
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	-
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	-
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	-
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας Α.4.2. Μηχανικές ιδιότητες Πεντελικού μαρμάρου

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	89,6
Συνοχή, c (MPa)	26,0
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	28,8
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	-

Μητρώο πειραμάτων

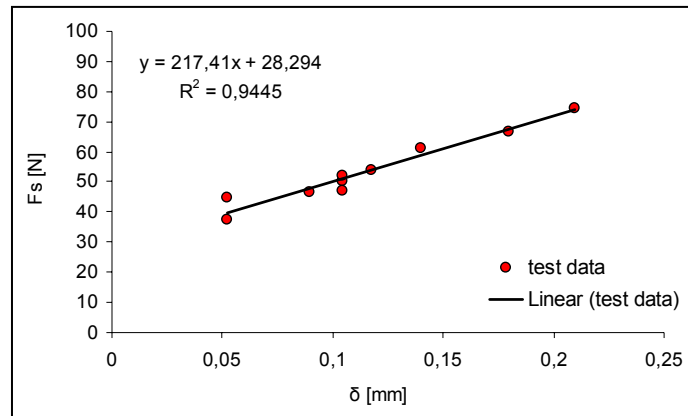
Στον Πίνακα Α.4.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για το Πεντελικό μάρμαρο.

Πίνακας Α.4.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στο Πεντελικό μάρμαρο

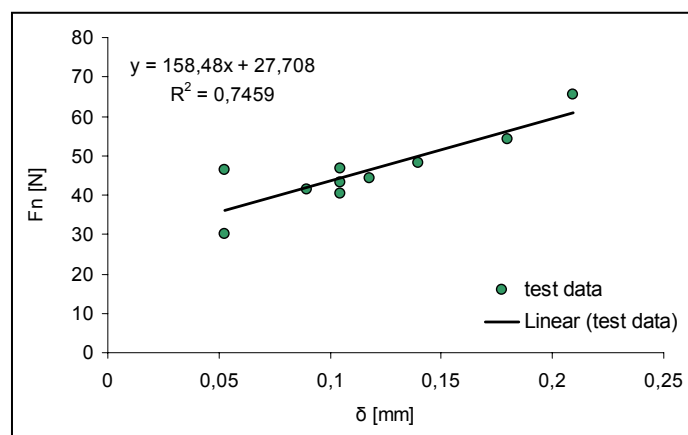
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
PENTE D59F40NN	600	10	0,1047
PENTE D59F41NN	600	5	0,0524
PENTE D59F42NN	700	10	0,0897
PENTE D59F43NN	800	15	0,1178
PENTE D59F44NN	900	20	0,1396
PENTE D59F45NN	1200	40	0,2094
PENTE D59F46NN	700	20	0,1795
PENTE D59F49NN	600	5	0,0524
PENTE D55F39NN	600	10	0,1047
PENTE D52F39NN	600	10	0,1047
PENTE D52F40NN	600	10	0,1047
PENTE D53F01NN	600	10	0,1047
PENTE D53F07NN	600	10	0,1047
PENTE D53F10NN	600	10	0,1047
PENTE D53F16NN	600	10	0,1047
PENTE D53F23NN	600	10	0,1047
PENTE D53F30NN	600	10	0,1047

Πειραματικά αποτελέσματα

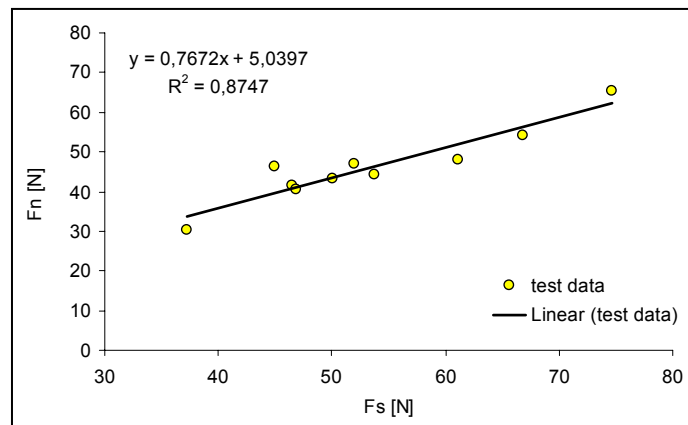
Στο Σχήμα Α.4 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.4α και Α.4β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.4γ) για το Πεντελικό μάρμαρο.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.4. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το Πεντελικό μάρμαρο: 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).

A.5 Ασβεστόλιθος Lecce

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο εξόρυξης ασβεστόλιθου Lecce βρίσκεται στην Ιταλία. Το πέτρωμα είναι βιοκλαστικός ασβεστόλιθος. Σπάνια μπορούν να ανιχνευθούν συγκεντρώσεις χαλαζία και αστρίων. Είναι πλούσιο σε συνδετικό υλικό το οποίο αποτελείται από ασβεστιτική μάζα.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.5.1 και A.5.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.5.1. Φυσικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Lecce

Τύπος πετρώματος	Ασβεστόλιθος Lecce
Πετρογραφική ταξινόμηση	βιοκλαστικός ασβεστόλιθος
Μέγεθος κόκκου (μm)	80-100
Πραγματική πυκνότητα (g/cm^3)	$2,70 \pm 0,1$
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm^3)	$1,42 \pm 0,2$
Ενεργό πορώδες (%)	$39,0 \pm 0,2$
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	$47,4 \pm 1,2$
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	$35,8 \pm 2,1$
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	ασβεστίτης

Πίνακας A.5.2. Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Lecce

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	15,4
Συνοχή, c (MPa)	6,71
Γωνία εσωτερικής τριβής, $\varphi(^{\circ})$	14,2
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	1,93

Μητρώο πειραμάτων

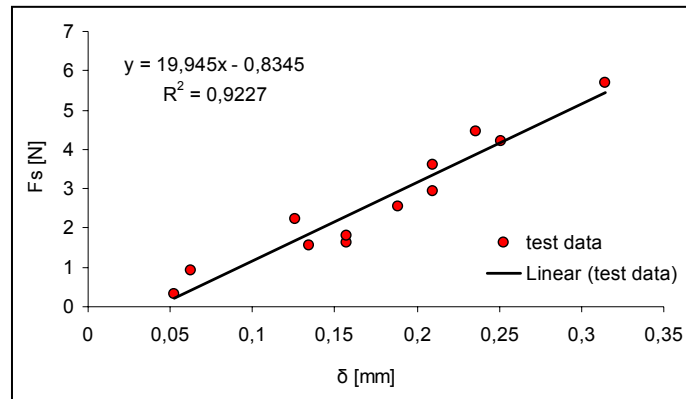
Στον Πίνακα Α.5.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον ασβεστόλιθο Lecce.

Πίνακας Α.5.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ασβεστόλιθο Lecce

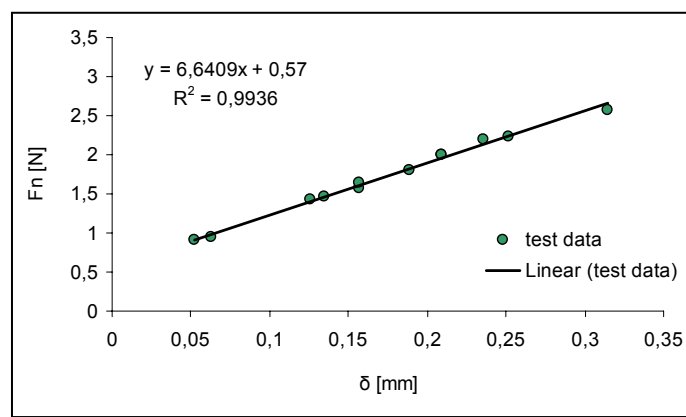
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
LECCE D52F01NN	600	5	0,0524
LECCE D52F02NN	900	10	0,0698
LECCE D52F03NN	400	3	0,0471
LECCE D52F04NN	700	7	0,0628
LECCE D52F05NN	500	2	0,0251
LECCE D52F06NN	600	15	0,1570
LECCE D52F07NN	500	15	0,1885
LECCE D52F08NN	400	15	0,2356
LECCE D52F09NN	600	20	0,2094
LECCE D52F10NN	500	10	0,1256
LECCE D52F11NN	400	10	0,1570
LECCE D52F13NN	300	10	0,2094
LECCE D52F14NN	700	15	0,1346
LECCE D52F15NN	500	20	0,2513
LECCE D52F16NN	700	10	0,0897
LECCE D52F17NN	400	20	0,3141

Πειραματικά αποτελέσματα

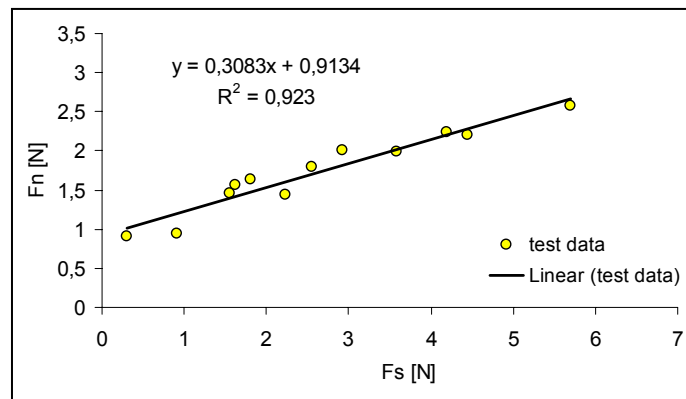
Στο Σχήμα Α.5 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.5α και Α.5β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.5γ) για τον ασβεστόλιθο Lecce.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.5. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ασβεστόλιθο Lecce: 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).

A.6 Ασβεστόλιθος Vicenza

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο εξόρυξης ασβεστόλιθου Vicenza βρίσκεται στην Ιταλία. Το πέτρωμα είναι χονδρόκοκκο βιοκλαστικό με χρώμα υπόλευκο που τείνει στο υποκίτρινο, λόγω των ελάχιστων ιχνών αργίλου που περιέχει. Το συνδετικό υλικό είναι ασβεστιτική μάζα.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.6.1 και A.6.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.6.1. Φυσικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Vicenza

Τύπος πετρώματος	ασβεστόλιθος Vicenza
Πετρογραφική ταξινόμηση	βιοκλαστικός ασβεστόλιθος
Μέγεθος κόκκου (μm)	400-2000
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	1,94 ± 0,1
Ενεργό πορώδες (%)	27,5 ± 0,5
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	29,3 ± 0,6
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	22,9 ± 1,4
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	-
Είδος συνδετικού υλικού	ασβεστίτης

Πίνακας A.6.2. Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Vicenza

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	21,3
Συνοχή, c (MPa)	6,8
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	24,6
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	2,7

Μητρώο πειραμάτων

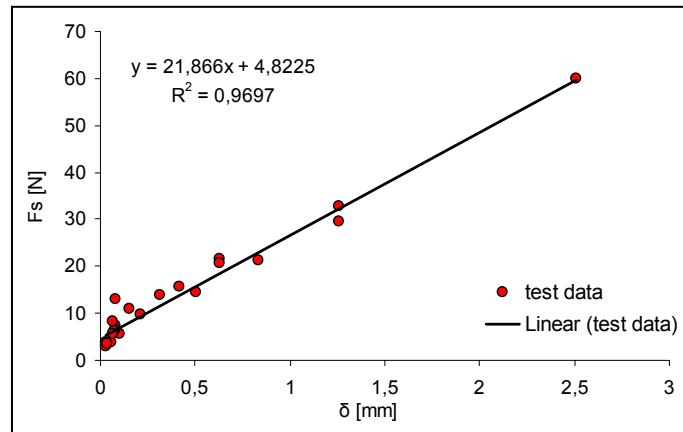
Στον Πίνακα Α.6.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον ασβεστόλιθο Vicenza.

Πίνακας Α.6.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ασβεστόλιθο Vicenza

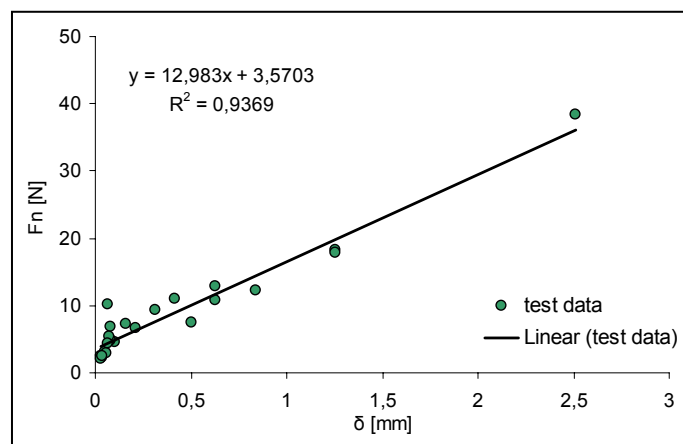
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	ν (mm/min)	δ (mm/rev)
VA D59F15NN	600	10	0,1047
VA D59F16NN	600	20	0,2094
VA D59F17NN	600	40	0,4188
VA D59F18NN	400	5	0,0785
VA D59F19NN	400	20	0,0785
VA D59F20NN	400	10	0,1570
VA D59F21NN	400	40	0,6283
VA D59F22NN	800	10	0,0785
VA D59F23NN	200	10	0,3141
VA D59F24NN	500	40	0,5026
VA D59F27NN	200	40	1,2566
VA D59F28NN	200	40	1,2566
VA D59F29NN	200	20	0,6283
VA D59F30NN	300	40	0,8377
VA D59F31NN	100	40	2,5133
VA D59F32NN	900	10	0,0698
VA D59F33NN	900	5	0,0349
VA D59F34NN	1000	5	0,0314
VA D59F35NN	1100	5	0,0285
VA D59F36NN	1200	10	0,0523
VA D59F37NN	1100	10	0,0571
VA D59F38NN	1100	7	0,0399
VA D59F39NN	1000	10	0,0628
VA D59F40NN	1000	10	0,0628

Πειραματικά αποτελέσματα

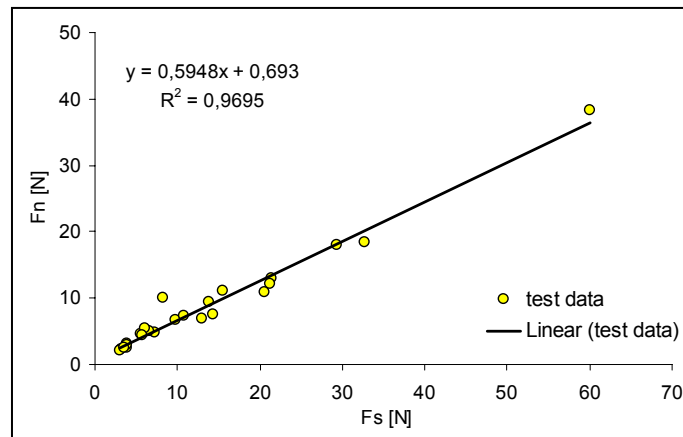
Στο Σχήμα Α.6 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.6α και Α.6β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.6γ) για τον ασβεστόλιθο Vicenza.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.6. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ασβεστόλιθο *Vicenza*: 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).

A.7 Ασβεστόλιθος Portland

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο εξόρυξης ασβεστόλιθου Portland βρίσκεται στην Ιταλία. Ο ασβεστόλιθος Portland τοποθετείται χρονολογικά στην Ιουρασική περίοδο (145 εκατομμύρια έτη πριν). Το πέτρωμα είναι ωολιθικός ασβεστόλιθος (αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ωολιθικό υλικό). Οι κόκκοι του υλικού είναι συνδεδεμένοι με λιγοστό υλικό που αποτελείται από ασβεστίτη.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.7.1 και A.7.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.7.1. Φυσικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Portland

Τύπος πετρώματος	ασβεστόλιθος Portland
Πετρογραφική ταξινόμηση	ωολιθικός ασβεστόλιθος
Μέγεθος κόκκου (μm)	300
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,17 ± 0,2
Ενεργό πορώδες (%)	18,5 ± 1,0
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	20,1 ± 0,5
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	19,8 ± 0,5
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	3-7
Είδος συνδετικού υλικού	ασβεστίτης

Πίνακας A.7.2. Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Portland

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	51,2
Συνοχή, c (MPa)	12,0
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	39,6
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	4,7

Μητρώο πειραμάτων

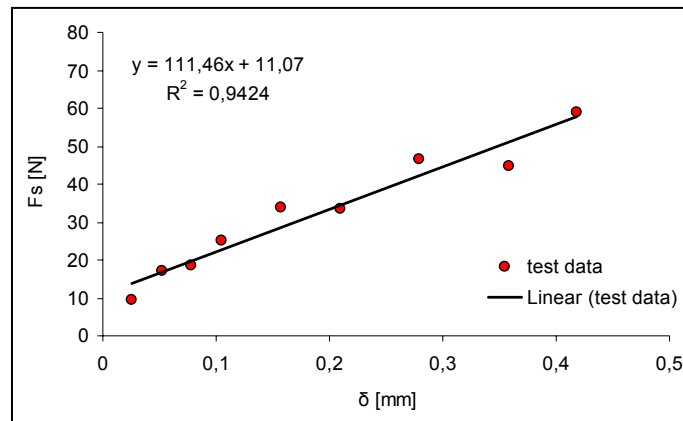
Στον Πίνακα Α.7.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον ασβεστόλιθο Portland.

Πίνακας Α.7.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ασβεστόλιθο Portland

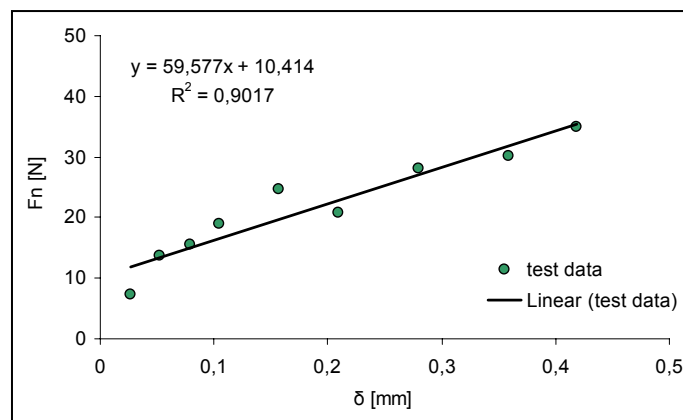
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	ν (mm/min)	δ (mm/rev)
PW_D59F39NN	600	10	0,1047
PW_D59F40NN	600	20	0,2094
PW_D59F41NN	600	40	0,4188
PW_D59F42NN	800	20	0,1570
PW_D59F43NN	800	10	0,0785
PW_D59F44NN	1200	10	0,5235
PW_D59F45NN	1200	5	0,0262
PW_D59F46NN	700	40	0,3590
PW_D59F47NN	900	40	0,2792

Πειραματικά αποτελέσματα

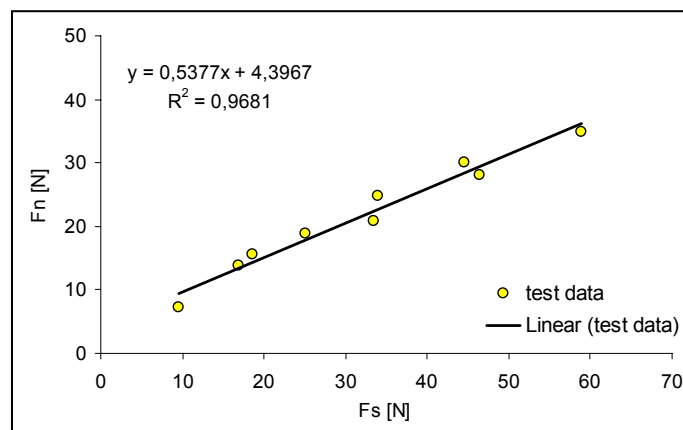
Στο Σχήμα Α.7 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.7α και Α.7β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.7γ) για τον ασβεστόλιθο Portland.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.7. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ασβεστόλιθο Portland: 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).

A.8 Ασβεστόλιθος Tuffeau de Maastricht (ή Mergel)***Σύντομη περιγραφή του πετρώματος***

Το λατομείο εξόρυξης ασβεστόλιθου Tuffeau βρίσκεται στην πόλη Maastricht της Ολλανδίας. Ο ασβεστόλιθος Tuffeau δημιουργήθηκε 60 έως 120 εκατομμύρια έτη πριν, κατά τη διάρκεια της Κρητιδικής περιόδου. Το πέτρωμα είναι τόφος (ιζηματογενές), αποτελεί κιμωλία και ποικίλλει στο χρώμα από άσπρο έως υποκίτρινο. Είναι ένα πολύ μαλακό, εύθρυπτο υλικό που διαμορφώνεται από τη βαθμιαία απόθεση τεμαχίων σπασμένων κελυφών και σκελετικά υπολείμματα θαλάσσιων οργανισμών. Οι κόκκοι του πετρώματος αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη. Το συνδετικό υλικό είναι λιγοστό και φτιαγμένο από ασβεστίτη.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.8.1 και A.8.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.8.1. Φυσικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Tuffeau de Maastricht

Τύπος πετρώματος	ασβεστόλιθος Tuffeau de Maastricht
Πετρογραφική ταξινόμηση	ασβεστόλιθος
Μέγεθος κόκκου (μm)	100
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	1,34 ±0,7
Ενεργό πορώδες (%)	49,7 ±1,5
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	50,0 ±1,0
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	49,4 ±1,8
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	ίχνη
Είδος συνδετικού υλικού	ασβεστίτης

Πίνακας A.8.2. Μηχανικές ιδιότητες ασβεστόλιθου Tuffeau de Maastricht

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	3,1
Συνοχή, c (MPa)	1,23
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	13,3
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	0,51

Μητρώο πειραμάτων

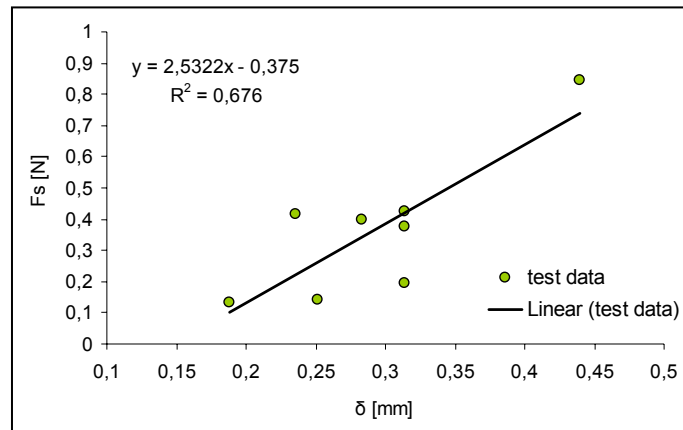
Στον Πίνακα Α.8.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον ασβεστόλιθο Tuffeau de Maastricht.

Πίνακας Α.8.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ασβεστόλιθο Tuffeau de Maastricht

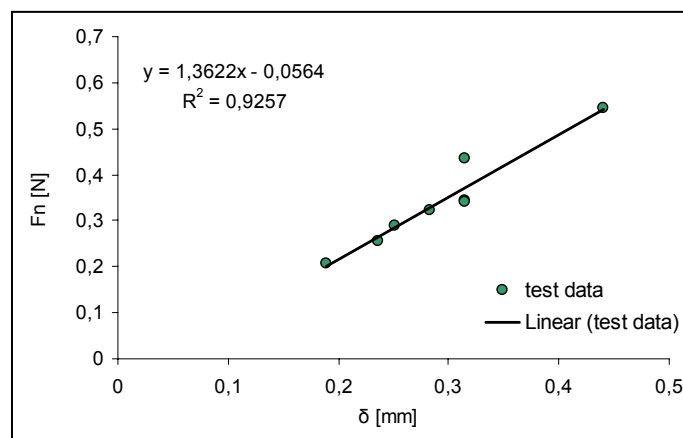
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
TUFFE D52F18NN	400	20	0,3141
TUFFE D52F19NN	500	20	0,2513
TUFFE D52F20NN	400	15	0,2356
TUFFE D52F21NN	600	20	0,2094
TUFFE D52F22NN	500	15	0,1885
TUFFE D52F23NN	600	15	0,1570
TUFFE D52F24NN	300	15	0,3141
TUFFE D52F25NN	100	5	0,3141
TUFFE D52F26NN	200	9	0,2827
TUFFE D52F27NN	100	5	0,3141
TUFFE D54F01NN	100	6	0,3769
TUFFE D54F02NN	100	7	0,4398

Πειραματικά αποτελέσματα

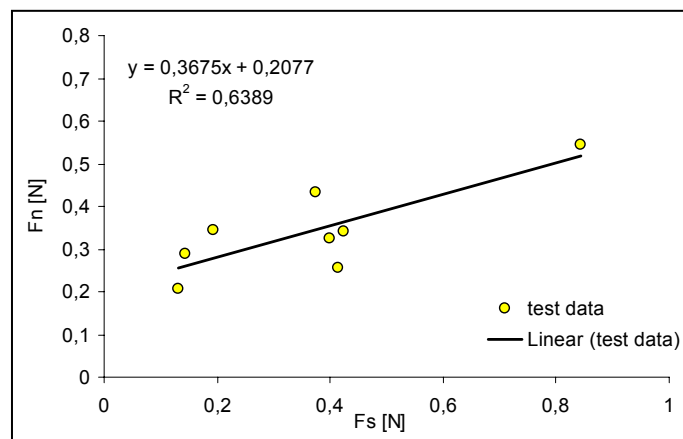
Στο Σχήμα Α.8 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.8α και Α.8β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.8γ) για τον ασβεστόλιθο Tuffeau.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.8. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ασβεστόλιθο Tuffeau de Maastricht: 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).

A.9 Ψαμμίτης Serena

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο εξόρυξης ψαμμίτη Serena βρίσκεται στην Ιταλία. Ο ψαμμίτης Serena είναι Ολιγόκαινου ηλικίας (περίπου 35 εκατομμύρια έτη πριν). Το πέτρωμα αυτό έχει σαφή διαβάθμιση μεγέθους κόκκων στην οποία η λεπτότερη κατηγορία συνίσταται από χαλαζία, αστρίους και φολίδες αστρίων και η πιο χονδροειδής κατηγορία από μαρμαρυγία και σπάνια από βιοκλαστικούς κόκκους. Το συνδετικό υλικό είναι άφθονο και κυρίως αποτελούμενο από μάζα αργίλου.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.9.1 και A.9.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.9.1. Φυσικές ιδιότητες ψαμμίτη Serena

Τύπος πετρώματος	ψαμμίτης Serena
Πετρογραφική ταξινόμηση	ψαμμίτης
Μέγεθος κόκκου (μm)	200-800
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm^3)	$2,49 \pm 0,3$
Ενεργό πορώδες (%)	$6,2 \pm 0,1$
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	$6,5 \pm 0,2$
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	$6,4 \pm 0,2$
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	30-35
Είδος συνδετικού υλικού	άργιλος

Πίνακας A.9.2. Μηχανικές ιδιότητες ψαμμίτη Serena

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	107,6
Συνοχή, c (MPa)	14,6
Γωνία εσωτερικής τριβής, $\varphi(^{\circ})$	59,7
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	4,78 (verso [*]) 6,70 (contro [*])

(*)verso= διαμήκης προσανατολισμός φόρτισης

(*)contro= εγκάρσιος προσανατολισμός φόρτισης

Μητρώο πειραμάτων

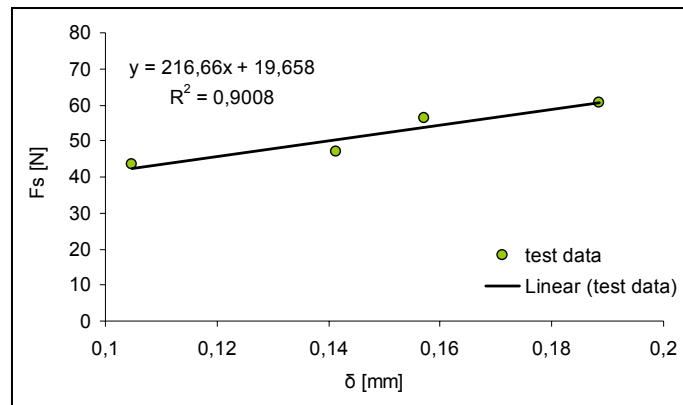
Στον Πίνακα Α.9.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον ψαμμίτη Serena.

Πίνακας Α.9.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ψαμμίτη Serena

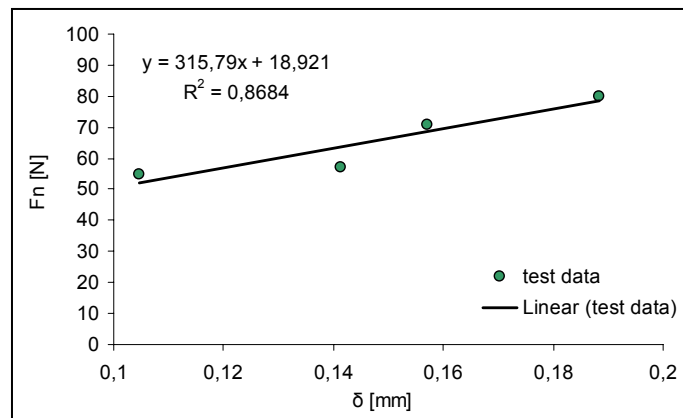
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
SERV D53F19NN	600	10	0,1047
SERV D53F20NN	400	9	0,1414
SERV D53F21NN	300	8	0,1675
SERV D53F22NN	700	8	0,0718
SERV D53F24NN	200	6	0,1885
SERV D53F25NN	200	5	0,1570

Πειραματικά αποτελέσματα

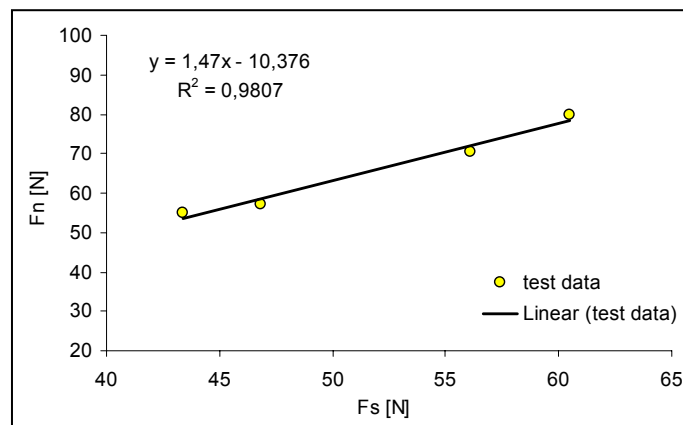
Στο Σχήμα Α.9 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.9α και Α.9β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.9γ) για τον ψαμμίτη Serena.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.9. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ψαμμίτη Serena: 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).

A.10 Ψαμμίτης Sander

Σύντομη περιγραφή του πετρώματος

Το λατομείο εξόρυξης ψαμμίτη Sander βρίσκεται στην Ιταλία. Ο ψαμμίτης αυτός δημιουργήθηκε στην ανώτερη Τριαδική περίοδο, περίπου 200 εκατομμύρια έτη πριν. Το πέτρωμα είναι σχιστολιθικός-ψαμμίτης, με χρωματικές αποχρώσεις από καφέ ως κιτρινοπράσινο. Το πράσινο χρώμα οφείλεται στην παρουσία τυχαία κατανεμημένου χλωρίτη. Οι κόκκοι του πετρώματος αποτελούνται από χαλαζία, μαρμαρυγίες και αστρίους. Επίσης είναι εμφανής μια ισχυρή παρουσία οξειδίων και υδροξειδίων. Οι κόκκοι περιβάλλονται από σχετικά άφθονο αργιλικό υλικό, αλλά παρόν είναι και πυριτικό συνδετικό υλικό.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες πετρώματος

Στους Πίνακες A.10.1 και A.10.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.10.1. Φυσικές ιδιότητες ψαμμίτη Sander

Τύπος πετρώματος	ψαμμίτης Sander
Πετρογραφική ταξινόμηση	Ψαμμίτης
Μέγεθος κόκκου (μm)	150-200
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,14 ± 0,2
Ενεργό πορώδες (%)	17,0 ± 0,1
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	19,7 ± 0,8
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	16,2 ± 0,8
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	45-55
Είδος συνδετικού υλικού	άργιλος, πυριτικό υλικό

Πίνακας A.10.2. Μηχανικές ιδιότητες ψαμμίτη Sander

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	39,0 (contro [*]) 49,0 (verso [*])
Συνοχή, c (MPa)	8,9 (contro [*]) 10,5 (verso [*])
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	41,1 (contro [*]) 43,7 (verso [*])
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	3,0 (contro [*]) 2,4 (verso [*])

(*)verso= διαμήκης προσανατολισμός φόρτισης

(*)contro= εγκάρσιος προσανατολισμός φόρτισης

Μητρώα πειραμάτων

Στους Πίνακες Α.10.3 και Α.10.4 φαίνονται τα μητρώα πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν σε δοκίμια του ψαμμίτη Sander (verso) και Sander (contro) αντίστοιχα.

Πίνακας Α.10.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον ψαμμίτη Sander (verso)

Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
SV D53F11NN	600	10	0,1047
SV D53F12NN	400	9	0,1414
SV D53F13NN	300	8	0,1675
SV D53F14NN	700	8	0,0718
SV D53F15NN	200	6	0,1885
SV D53F17NN	300	10	0,2094
SV D53F18NN	200	5	0,1570

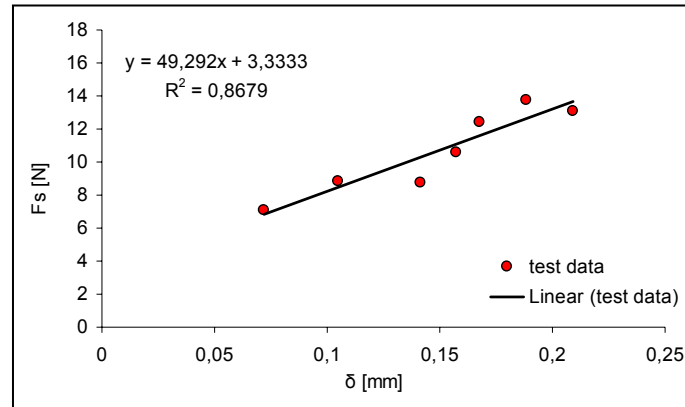
Πίνακας Α.10.4. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικρο διάτρησης στον ψαμμίτη Sander (contro)

Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
SC D53F02NN	600	10	0,1047
SC D53F03NN	400	9	0,1414
SC D53F04NN	300	8	0,1675
SC D53F05NN	700	8	0,0718
SC D53F06NN	200	6	0,1884
SC D53F08NN	300	10	0,2094
SC D53F09NN	200	5	0,1570
SC D53F28NN	500	4	0,0502
SC D53F29NN	700	4	0,0359

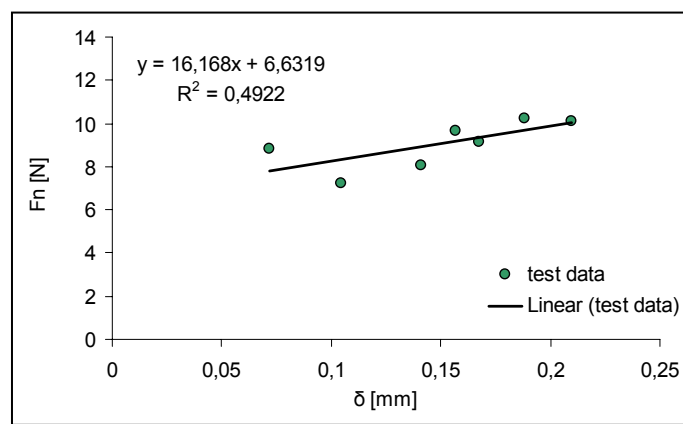
Πειραματικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα Α.10.1 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.10.1α και Α.10.1β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.10.1γ) για τον ψαμμίτη Sander (verso).

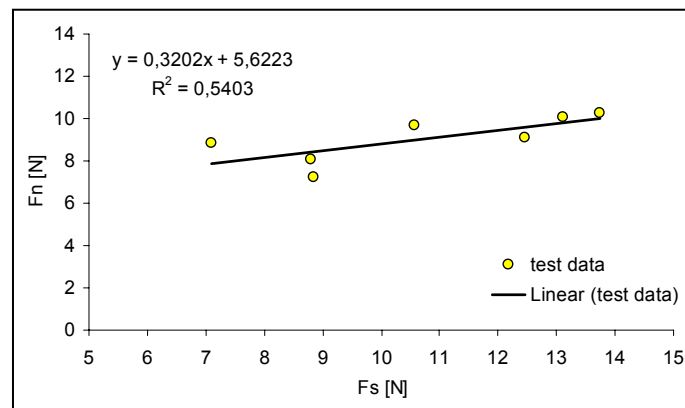
Στο Σχήμα Α.10.2 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.10.2α και Α.10.2β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.10.2γ) για τον ψαμμίτη Sander (contro).



(α)

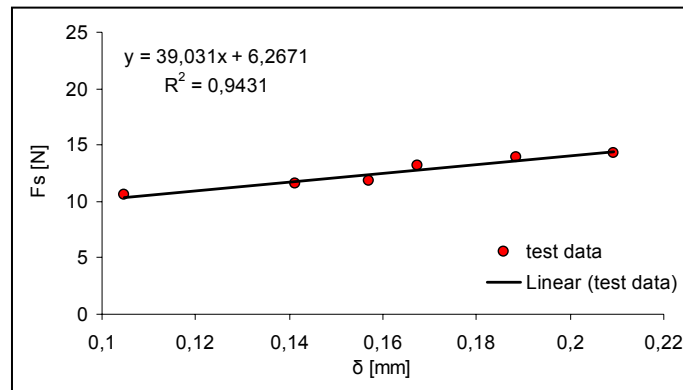


(β)

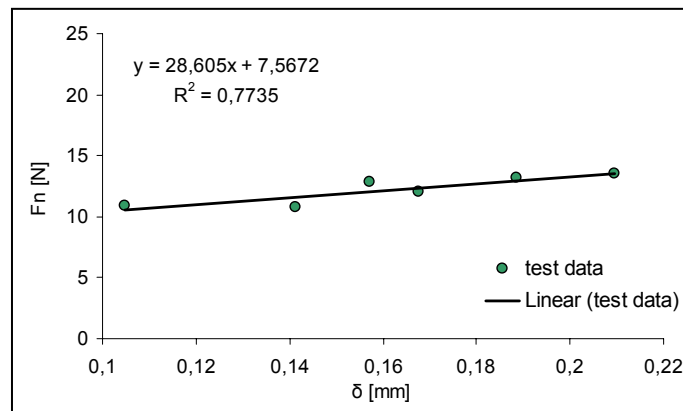


(γ)

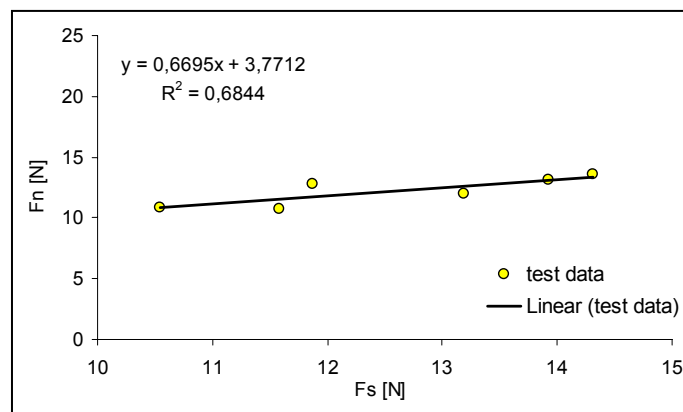
Σχ. Α.10.1. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ψαμμίτη *Sander (contro)*: α) Εφαπτομενική δύναμη διάτρησης (F_s) συναρτήσει του βάθους κοπής (δ), β) Αξονική δύναμη διάτρησης (F_n) συναρτήσει του βάθους κοπής (δ) και γ) Αξονική δύναμη διάτρησης (F_n) συναρτήσει της εφαπτομενικής δύναμης διάτρησης (F_s).



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.10.2. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον ψαμμίτη *Sander (verso)*: 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).

A.11 Σαπωνόλιθος Nidaros**Σύντομη περιγραφή του πετρώματος**

Το λατομείο εξόρυξης ψαμμίτη σαπωνόλιθου Nidaros βρίσκεται στη Νορβηγία. Ο σαπωνόλιθος Nidaros είναι μεταμορφωμένο πέτρωμα. Αποτελείται κυρίως από τάλκη και χλωρίτη, ενώ σαν δευτερεύοντα ορυκτά είναι παρόντα δολομίτης και τρεμολίτης.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.11.1 και A.11.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.11.1. Φυσικές ιδιότητες σαπωνόλιθου Nidaros

Τύπος πετρώματος	σαπωνόλιθος Nidaros
Πετρογραφική ταξινόμηση	σχιστολιθικός τάλκης
Μέγεθος κόκκου (μm)	800-2000
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,95 ± 0,1
Ενεργό πορώδες (%)	0,5 ± 0,3
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	0,8 ± 0,2
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	0,6 ± 0,1
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	-
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας A.11.2. Μηχανικές ιδιότητες σαπωνόλιθου Nidaros

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	60,1
Συνοχή, c (MPa)	18,5
Γωνία εσωτερικής τριβής, φ(°)	25,9
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	5,63

Μητρώο πειραμάτων

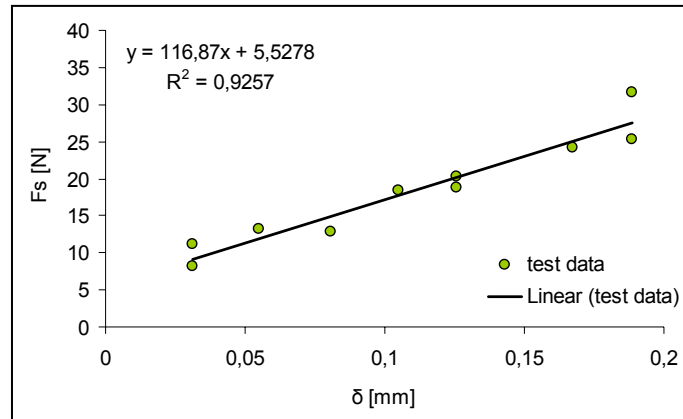
Στον Πίνακα Α.11.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για τον σαπωνόλιθο Νιδαρού.

Πίνακας Α.11.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στον σαπωνόλιθο Nidaros

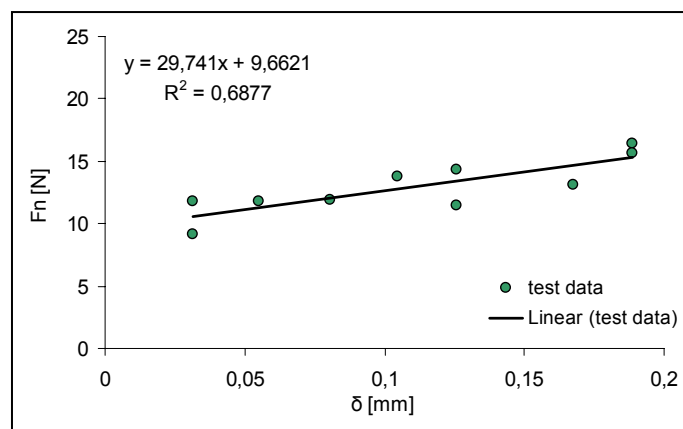
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	ν (mm/min)	δ (mm/rev)
SOAP D52FF29NN	600	10	0,1047
SOAP D52FF30NN	700	15	0,1346
SOAP D52FF31NN	400	10	0,1570
SOAP D52FF32NN	300	6	0,1256
SOAP D52FF33NN	700	9	0,0807
SOAP D52FF34NN	800	7	0,0549
SOAP D52FF35NN	500	10	0,1256
SOAP D52FF36NN	500	15	0,1885
SOAP D52FF37NN	300	8	0,1675
SOAP D52FF38NN	200	6	0,1885
SOAP D53FF26NN	800	4	0,0314
SOAP D53FF27NN	800	4	0,0314

Πειραματικά αποτελέσματα

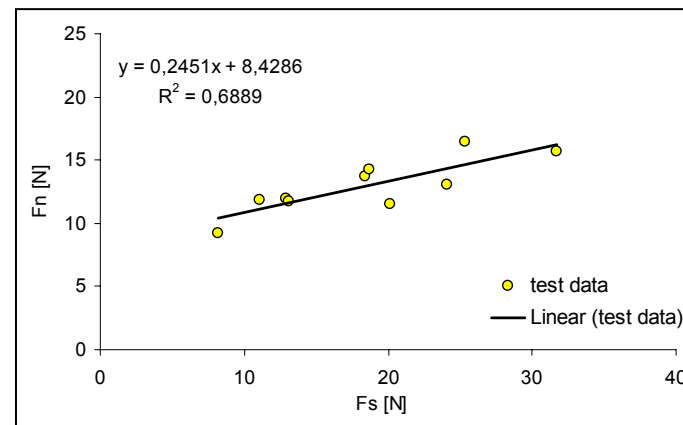
Στο Σχήμα Α.11 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.11α και Α.11β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.11γ) για τον σαπωνόλιθο Nidaros.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. Α.11. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον σαπωνόλιθο Nidaros: 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).

A.12 Υδραυλικό κονίαμα***Σύντομη περιγραφή του πετρώματος***

Το υδραυλικό κονίαμα είναι ένα τεχνητό πέτρωμα που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες ερευνητικού προγράμματος. Η κατανομή μεγέθους κόκκου του υλικού ποικίλλει από 150 μm έως 2 mm με μια επικράτηση της κατηγορίας 500 μm . Το σχήμα του κόκκου ποικίλλει από υπο-γωνιακό σε υπο-στρογγυλεμένο. Στο σύνολο το υλικό αποτελείται από χαλαζία, αστρίους και τεμάχια βράχων όπως ιζηματογενή πετρώματα (ψαμμίτες και ασβεστιτικά πετρώματα) και μεταμορφωμένα πετρώματα.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες του πετρώματος

Στους Πίνακες A.12.1 και A.12.2 δίνονται οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αντίστοιχα.

Πίνακας A.12.1. Φυσικές ιδιότητες υδραυλικού κονιάματος

Τύπος πετρώματος	υδραυλικό κονίαμα
Πετρογραφική ταξινόμηση	υδραυλικό κονίαμα
Μέγεθος κόκκου (μm)	-
Φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm^3)	$1,77 \pm 0,4$
Ενεργό πορώδες (%)	$32,3 \pm 1,3$
Συνολικό ανοικτό πορώδες (%)	$33,0 \pm 1,0$
Μέσο-πορώδες (%) (0,0037-150 μm ακτίνα πόρου)	$28,4 \pm 1,0$
Περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)	27
Είδος συνδετικού υλικού	-

Πίνακας A.12.2. Μηχανικές ιδιότητες υδραυλικού κονιάματος

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, UCS (MPa)	9,6-10,0
Συνοχή, c (MPa)	2,62-3,10
Γωνία εσωτερικής τριβής, $\phi(^{\circ})$	34,2-34,9
Αντοχή σε εφελκυσμό, TS (MPa)	0,825

Μητρώο πειραμάτων

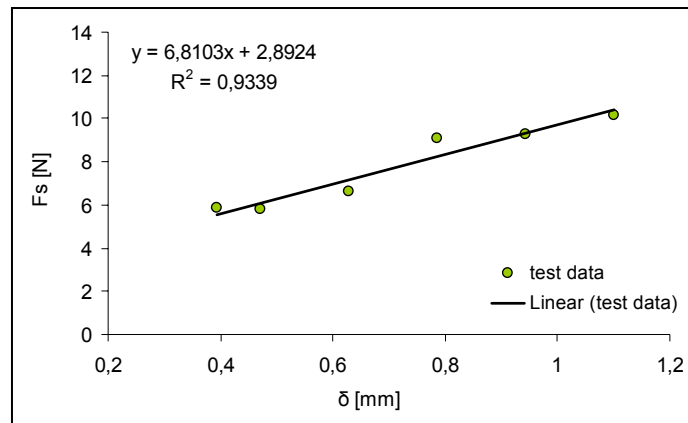
Στον Πίνακα Α.12.3 φαίνεται το μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης τα οποία εκτελέστηκαν για το υδραυλικό κονίαμα.

Πίνακας Α.12.3. Μητρώο πειραμάτων περιστροφικής μικροδιάτρησης στο υδραυλικό κονίαμα

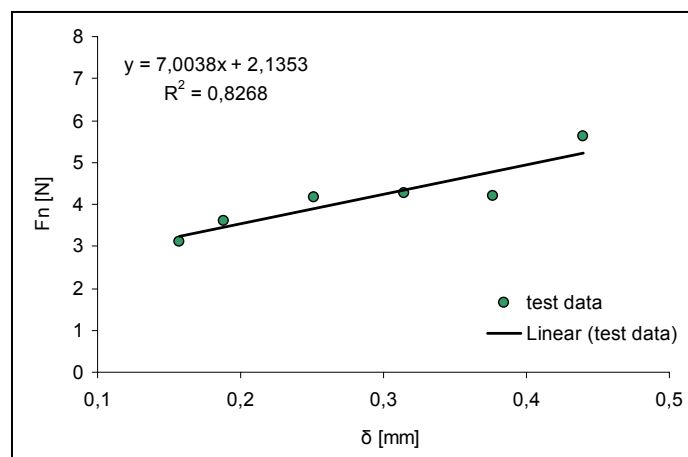
Κωδικός Δοκιμής	ω (rpm)	v (mm/min)	δ (mm/rev)
TUC1 D54F11NN	100	5	0,3142
TUC1 D54F14NN	100	7	0,4398
TUC1 D54F15NN	400	10	0,1570
TUC1 D54F16NN	500	15	0,1885
TUC1 D54F17NN	500	20	0,2513
TUC1 D54F18NN	100	6	0,3769

Πειραματικά αποτελέσματα

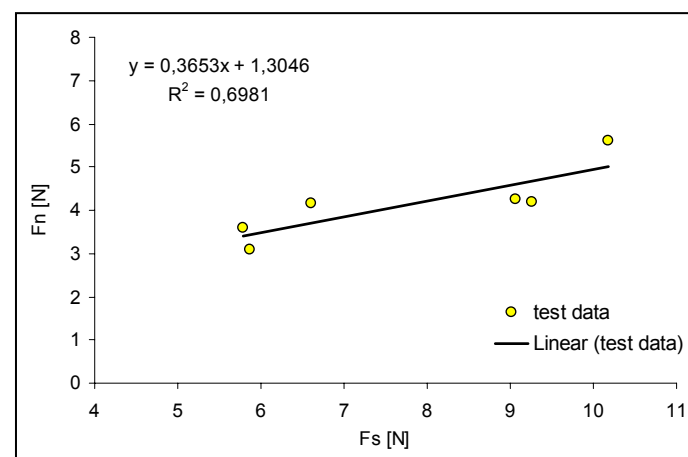
Στο Σχήμα Α.12 απεικονίζονται γραφικά οι δύο συνιστώσες της δύναμης κοπής F_s και F_n συναρτήσει του βάθους κοπής δ (Σχ. Α.12α και Α.12β) καθώς και η κάθετη δύναμη F_n συναρτήσει της παράλληλης δύναμης F_s (Σχ. Α.12γ) για το υδραυλικό κονίαμα.



α)



β)



γ)

Σχ. Α.12. Συγκεντρωτικά διαγράμματα για το υδραυλικό κονίαμα. 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).