ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Θ. ΤΣΙΚΡΙΚΗΣ
Πτυχιούχος Μηχανικός Έργων Υποδομής

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΓΩΝΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ m_i ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ HOEK & BROWN

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2015

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Θ. ΤΣΙΚΡΙΚΗΣ
Πτυχιούχος Μηχανικός Έργων Υποδομής

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΓΩΝΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ m_i ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ HOEK & BROWN

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών
'Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας'
Τομέας Τεχνικής Γεωλογίας
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 13/11/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Θ. Παπαλιάγκας, Επιβλέπων
Επίκουρος Καθηγητής Β. Μαρίνος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Καθηγητής Β. Χρηστάρας, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Αναστάσιος Θ. Τσικρίκης, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΓΩΝΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ m_i ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ HOEK & BROWN

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής
φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 3
   2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ 3
   2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK & BROWN ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 6
   2.3 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΩΝ 11
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ 33
   3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ 33
   3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 47
   3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ 53
   3.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ 59
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 70
   4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ 70
   4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 82
   4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ 84
   4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ϕ_m -m_i 103
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 105
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 107

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τσουτρέλης, 1985). 3
Σχήμα 2. Δύο τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική (Mogi,1974). 4
Σχήμα 3. Μη γραμμική περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας και η σύνδεση της με τον μηχανισμό αστοχίας. Μετάβαση από αξονική αστοχία (σ_3=0 MPa) σε διατμητική αστοχία (σ_3=10 MPa). Πολλαπλές διατμητικές ζώνες αστοχίας (σ_3=35 MPa) και διόγκωση του δοκιμίου (πλαστική παραμόρφωση) πέρα από την γραμμή Mogi (σ3=100MPa). Δεδομένα και φωτογραφίες δοκιμίων από τον Paterson (1958). 5
Σχήμα 4. Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980). 6
Σχήμα 5. Δεδομένα δοκιμών τριαξονικής θλίψης από 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που παρίστανται με διαφορετικό σύμβολο. Τα δείγματα που δείχνουν το άνω και κάτω όριο των δεδομένων παριστάνονται με μεγαλύτερα σύμβολα (Kaiser & Kim, 2008). 9
Σχήμα 6. Κύριοι παράγοντες για την αξιολόγηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών (Hencher & Richards, 2014). 12
Σχήμα 7. Προφίλ από την επιφάνεια κοπής μετρούμενο με τη χρήση ενός μορφομέτρου Talysurf (Hencher & Richards, 2014). 13
Σχήμα 8. Μέτρηση τραχύτητας στο ύπαιθρο (Fecker & Rengers ,1971). 14
Σχήμα 9. Πειράματα του Patton για τα μελέτη της επιρροής της τραχύτητας των ασυνεχειών (Hoek, Kaiser & Badwen, 1995). 17
Σχήμα 10. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977). 19
Σχήμα 11. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton, 1987). 20
Σχήμα 12. Μέθοδος εκτίμησης JRC με βάση το μήκος και το εύρος των ασυνεχειών (Barton, 1982). 21
Σχήμα 13. Εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας μέσω του κρουσίμετρου Schmidt. 22
Σχήμα 14. Επαφή δυο τραχειών βραχωδών επιφανειών (Papaliangas , 1997). 24
Σχήμα 15. Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas. 26
Σχήμα 16. Γραφική μορφή των κριτηρίων Barton και Papaliangas. 29
Σχήμα 17. Μεγέθη δοκιμίων. 31
Σχήμα 18. Μέγιστος λόγος τάσεων(τ_p/σ) σε σχέση με το μήκος δοκιμίου i) με διαστολή ii) χωρίς διαστολή. 32
Σχήμα 19. Γεωλογικός Χάρτης με τα λατομικά κέντρα της Αν. Μακεδονίας (Τσιραμπίδης ,1996). 40
Σχήμα 20. Περιθλασιόγραμμα XRD για το Μάρμαρο Κεχρόκαμπου Καβάλας, (Bulgarian Academy of Sciences, 2015). 40
Σχήμα 21. Περιθλασιόγραμμα XRD για τον Ψαμμίτη Δεματίου, (Bulgarian Academy of Sciences, 2015). 42
Σχήμα 22. Περιθλασιόγραμμα του Ασβεστόλιθου Μεσαίου (Καντηράνης, 2014). 45
Σχήμα 23. Πετρογραφικοί τύποι ασβεστολιθικών και δολομιτικών πετρωμάτων και ταξινόμηση του ασβεστόλιθου Μεσαίου (Harben, 1992). 46
Σχήμα 24. Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (ELE INTERNATIONAL). 54
Σχήμα 25. Ανάγωγή ορθής και διατμητικής τάσης σε κεκλιμένο επίπεδο. 68

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Σχήμα 26. Διαγράμματα διατμητικής μετατόπισης - διατμητικής τάσης και διατμητικής μετατόπισης - ορθής μετατόπισης. Υπολογίζεται η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή καθώς και η αντίστοιχη διαστολή. 68
Σχήμα 27. Διάγραμμα Αξονικής παρμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Ψαμμίτη Δεματίου. 72
Σχήμα 28. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Γρανίτη Αρναίας. 74
Σχήμα 29. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για το Μάρμαρο Καβάλας. 75
Σχήμα 30. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου. 76
Σχήμα 31. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Ψαμμίτη Δεματίου. 78
Σχήμα 32. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Γρανίτη Αρναίας. 79
Σχήμα 33. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου. 80
Σχήμα 34. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για το Μάρμαρο Καβάλας. 81
Σχήμα 35. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς m_i και του λόγου σc/ | σt | 83
Σχήμα 36. Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Ψαμμίτη Δεματίου. 95
Σχήμα 37. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ψαμμίτη Δεματίου. 95
Σχήμα 38.Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για το Μάρμαρο Καβάλας. 97
Σχήμα 39. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για το Μάρμαρο Καβάλας. 97
Σχήμα 40. Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Γρανίτη Αρναίας. 99
Σχήμα 41. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Γρανίτη Αρναίας. 99
Σχήμα 42.Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου. 101
Σχήμα 43.Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου. 101
Σχήμα 44. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου ύστερα από επιλογή για κάθε δοκίμιο των τιμών της πρώτης και δεύτερης κύριας δοκιμής. 102
Σχήμα 45. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς m_i του κριτηρίου Hoek & brown και της γωνίας τριβής χωρίς διαστολή ϕ_m. 103
Σχήμα 46. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς mi του κριτηρίου Hoek & brown και της γωνίας τριβής χωρίς διαστολή εφφm. 104

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Χρήση δίσκων διαφορετικού μεγέθους για τον χαρακτηρισμό και τον προσδιορισμό της επιφανειακής τραχύτητας (Hencher & Richards ,2014). 14
Εικόνα 2. Τοπογραφικό σκαρίφημα που δείχνει το περίγραμμα της περιοχής εμφάνισης του γρανίτη Αρναίας. Περιέχει τις θέσεις δειγματοληψίας της περιοχής έρευνας του Oladeji (1997) και της παρούσας έρευνας. 35
Εικόνα 3. Θέση δειγματοληψίας ΤΠ20, Google earth. 36
Εικόνα 4. θέση δειγματοληψίας ΤΠ20. 37
Εικόνα 5. Θέση δειγματοληψίας ΤΠ20. 38
Εικόνα 6. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του Ασβεστόλιθου Μεσαίου (Καντηράνης, 2014). 44
Εικόνα 7. Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψης. 48
Εικόνα 8. Εφελκυστική διάρρηξη 48
Εικόνα 9. Πυρηνοληψία πετρωμάτων. 49
Εικόνα 10. Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού. 50
Εικόνα 11. Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος 51
Εικόνα 12. Συσκευή λείανσης δοκιμίων. 52
Εικόνα 13. Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων γρανίτη Αρναίας. 52
Εικόνα 14. Διάταξη τριαξονικής θλίψης. 56
Εικόνα 15. Διαδικασία για τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης (ELE INTERNATIONAL). 57
Εικόνα 16. Εγκιβωτισμός του κάτω μέρους δοκιμίου. 59
Εικόνα 17. Εγκιβωτισμός του πάνω μέρους δοκιμίου. 60
Εικόνα 18. Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας. 60
Εικόνα 19. Προφιλόμετρο. 61
Εικόνα 20. Μήτρες δοκιμίων. 62
Εικόνα 21. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών βράχου. 63
Εικόνα 22. Περιβάλλον WINHOST κατά την διάρκεια μιας δοκιμής άμεσης διάτμησης. 65
Εικόνα 23. Παράθυρο Controller Configuration. 66
Εικόνα 24. Παράθυρο DST. 67
Εικόνα 25. Εύρεση σταθεράς m_i για τον Ψαμμίτη Δεματίου. 73
Εικόνα 26. Εύρεση σταθεράς m_i για τον Γρανίτη Αρναίας. 74
Εικόνα 27. Εύρεση σταθεράς mi για το Μάρμαρο Καβάλας. 76
Εικόνα 28. Εύρεση σταθεράς mi για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου. 77

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Τιμές της σταθερά m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek , 2000). 10
Πίνακας 2. Σύγκριση των παραμέτρων του κριτηρίου Papaliangas και του κριτηρίου Barton..... 30
Πίνακας 3. Εμβαδομέτρηση γρανίτη στην περιοχή έρευνας (Oladeji, 1997). 34
Πίνακας 4. Ποσοστό λευκοκρατικών ορυκτών % (Oladeji (1997). 34
Πίνακας 5. Ορυκτολογική και χημική σύσταση Μαρμάρου Κεχρόκαμπου Καβάλας (Τσιραμπίδης, 1996) 39
Πίνακας 6. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά Μαρμάρου Κεχρόκαμπου Καβάλας (Τσιραμπίδης, 1996) 41
Πίνακας 7. Ορυκτολογική και χημική σύσταση Ψαμμίτη Δεματίου (Τσιραμπίδης, 1996). 41
Πίνακας 8. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά Ψαμμίτη Δεματίου (Τσιραμπίδης, 1996). 42
Πίνακας 9. Ορυκτολογική σύσταση(% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος με περιθλασιμετρία ακτίνων – Χ και ισοδύναμο MgO (Καντηράνης, 2014). 45
Πίνακας 10. Έντυπο δοκιμών εφελκυσιτκής αντοχής(Brazilian test). 82

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως σκοπό τη πειραματική διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης δυο βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων, της γωνίας τριβής ασυνεχειών πετρωμάτων και του συντελεστή mi του κριτηρίου Hoek & Brown. Οι παράμετροι αυτές απαιτούνται για τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων σε βράχο. Συγκεκριμένα, η γωνία τριβής των ασυνεχειών των πετρωμάτων χρησιμοποιείται για την ανάλυση σε ανισότροπες αστοχίες, όπως επίπεδες και σφηνοειδείς ολισθήσεις ενώ ο συντελεστής m_i χρησιμοποιείται για την ανάλυση έναντι ισότροπων ολισθήσεων με την χρήση του συστήματος GSI και του γενικευμένου κριτηρίου Hoek & Brown. Γίνεται αντιληπτό πως η σημασία και η αξία ύπαρξης μια συσχέτισης που θα μπορεί να αποδίδει τιμές για το συντελεστή mi ενός πετρώματος μέσω του προσδιορισμού της γωνίας τριβής ασυνεχειών του ίδιου πετρώματος με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών ή και το αντίστροφο, είναι μεγάλη. Δεδομένης μάλιστα της έλλειψης πρόβλεψης διεξαγωγής δοκιμών τριαξονικής θλίψης άρρηκτων πετρωμάτων για τον άμεσο προσδιορισμό της σταθεράς mi όπως συνιστάται από τους Hoek & Brown, στα περισσότερα προγράμματα γεωτεχνικών δοκιμών, η ύπαρξη μιας τέτοιας συσχέτισης θα αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την επιλογή αξιόπιστων παραμέτρων σχεδιασμού που θα είναι βασισμένες σε στοιχεία από το συγκεκριμένο τεχνικό έργο το οποίο αφορούν.

Με την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της και ιδιαίτερα στους καθηγητές μου και συγκεκριμένα:

Τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Παπαλιάγκα Θεοδόσιο για την ανάθεση του θέματος, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθώς και την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διατριβής.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μαρίνο Βασίλειο για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις, τις πολύτιμες συμβουλές του και το συνεχές ενδιαφέρον για την πορεία της διατριβής.

Τον Καθηγητή κ. Χρηστάρα Βασίλειο για την συμμετοχή στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνάται η πιθανή συσχέτιση μεταξύ της γωνίας τριβής των ασυνεχειών πετρωμάτων και της σταθεράς mi του κριτηρίου Hoek & Brown. Σύμφωνα με τον Hoek (1983) η σταθερά mi προσδιορίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών σε εύρος πλευρικών πιέσεων (σ_3) $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$, όπου σ_{ci} είναι η θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών περιελάμβανε μια σειρά από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε τεχνητές ασυνέχειες που προέκυψαν από εφελκυστική διάρρηξη και μια σειρά από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δείγματα ακεραίου πετρώματος. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι πετρωμάτων με εύρος θλιπτικής αντοχής 59 έως 117 MPa: Γρανίτης Αρναίας, Ψαμμίτης Δεματίου, Ασβεστόλιθος Μεσαίου και το Μάρμαρο Καβάλας. Τα δοκίμια για τους δύο τύπους εργαστηριακών δοκιμών προέκυψαν από το ίδιο αρχικό τέμαχος. Στη δοκιμή άμεσης διάτμησης χρησιμοποιήθηκαν πέντε ή έξι δοκίμια για κάθε τύπο πετρώματος μήκους 8-12 cm τα οποία υποβλήθηκαν σε 6 ορθές τάσης στο εύρος 0-2MPa, συμπεριλαμβανομένης μιας δοκιμής υπό το ίδιο βάρος που αντιστοιχεί σε ορθή τάση περίπου 5 kPa, η οποία πραγματοποιήθηκε στην αρχή. Συνολικά εκτελέστηκαν 138 δοκιμές άμεσης διάτμησης. Τουλάχιστον οκτώ κυλινδρικά δοκίμια για κάθε τύπο πετρώματος διαμορφώθηκαν με διάμετρο 54cm και λόγο διαμέτρου/ύψους 1:2 τα οποία υποβλήθηκαν σε τριαξονική θλίψη σε εύρος πλευρικής πίεσης 0-70 MPa. Ο συνολικός αριθμός τριαξονικών δοκιμών ήταν 42, εκ των οποίων οι 4 μονοαξονικής θλίψης. Οι τιμές της γωνίας τριβής του υλικού των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ϕ_m υπολογίστηκαν από την μετρούμενη μέγιστη διατμητική αντοχή αφαιρώντας την αντίστοιχη ενεργοποιούμενη διαστολή. Οι τιμές της σταθεράς mi του κριτηρίου Hoek & Brown υπολογίστηκαν από τις τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε εύρος πλευρικών πιέσεων $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$. Τα εργαστηριακά δεδομένα δείχνουν πως η σταθερά mi του κριτηρίου Hoek & Brown αυξάνεται λογαριθμικά με τη μείωση της γωνίας τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών (ϕ_m), από m_i=8.9 για το μάρμαρο Καβάλας (ϕ_m =39°) σε m_i=34.0 για το γρανίτη Αρναίας (ϕ_m =35°). Η κυριότερη χρησιμότητα της μεθόδου συνίσταται στον προσδιορισμό του mi μέσω μιας σειράς δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών με σκοπό την εύρεση της γωνίας τριβής ϕ_m, δεδομένου ότι ο εργαστηριακός προσδιορισμός του απαιτεί σειρά τριαξονικών δοκιμών σε ικανό εύρος πλευρικών πιέσεων, εργασία που απαιτεί σημαντικά ακριβέστερη προετοιμασία και μεγαλύτερο κόστος. Τέλος, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός διαφορετικών τύπων πετρωμάτων ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των πειραματικών σημείων στο διάγραμμα και η αξιοπιστία της σχέσης, η οποία με τον τρόπο αυτό θα λάβει ακριβέστερη έκφραση.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate experimentally the relation between the friction angle of rock surfaces determined by direct shear testing and the constant mi of the Hoek & Brown criterion for intact rock. According to Hoek (1983) the constant mi, that is determined from triaxial tests under confining pressures (σ_3) in the range $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$, where σ_{ci} is the unconfined compressive strength, is very approximately analogous to the angle of friction, of the conventional Mohr-Coulomb failure criterion. The testing program consisted of a series of laboratory direct shear tests on artificially generated tensile fractures and a series of triaxial compression tests on intact core rock specimens on four different rock types with unconfined compressive strength between 59 and 117 MPa: Arnaia granite, Demati sandstone, Mesaio limestone and Kavala marble. For each rock type, the specimens used for the two types of tests were prepared from the same block. Five or six 8-12 cm long samples from each rock type were subjected to direct shear testing under 6 normal stress levels in the range 0-2 MPa, including one under their self weight which corresponds to a normal stress of approximately 5 kPa. A total of 138 tests were carried out. At least eight cylindrical specimens per rock type, with a diameter of 54cm and a ratio diameter/height of 1:2 were tested in triaxial compression in a standard Hoek triaxial cell, under confining pressures in the range 0 - 70 MPa. The total number of triaxial compression tests was 42, including 4 uniaxial compression tests. The values of the friction angle of the rock wall material (ϕ_m) were determined from the measured peak shear strength after elimination of the effect of dilation. The values of the constant m_i of the Hoek-Brown criterion was determined from the triaxial tests carried out under confining pressures in the range $0 \leq \sigma 3 \leq 0.5\sigma ci$. The experimental results show that the constant mi of the Hoek & Brown criterion increases logarithmically with decreasing friction angle of the rock wall material (ϕ_m), from $_{mi}$=8.9 for Kavala marble (ϕ_m =39°) to m_i=34.0 for Arnaia granite (ϕ_m =35°). The main utility of the method is the indirect determination of the constant mi using a series of direct shear tests on discontinuities from the same rock, especially in the case of weathered rock, where direct shear on joints can be carried out without any experimental difficulty, whereas the preparation of cylindrical specimens from weathered rock pieces for triaxial testing is quite difficult. More work is needed in order to establish a more accurate expression based on a wider range of rock types.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιεχόμενο της μεταπτυχιακής διατριβής αναλύεται ανά κεφάλαιο ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση έτσι ώστε να αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο και οι περιορισμοί των παραμέτρων m_i και ϕ_m . Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή της συμπεριφοράς των πετρωμάτων όταν υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη. Επίσης περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμίων και οι τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική. Στην συνέχεια περιγράφεται το κριτήριο Hoek & Brown άρρηκτου πετρώματος καθώς και ο τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή m_i . Στο τέλος του κεφαλαίου αναλύεται η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών καθώς και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Επίσης, περιγράφεται το κριτήριο Patton που πρώτος προσπάθησε να ερμηνεύσει και να αποδώσει μια αναλυτική προσέγγιση στην εύρεση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών. Έπειτα περιγράφεται το κριτήριο Barton και των συνεργατών του που μέχρι σήμερα αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο. Στη συνέχεια παρατίθεται το κριτήριο Papaliangas το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην διατριβή για την εύρεση της γωνίας τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ϕ_m. Το κριτήριο στηρίζεται σε ένα αναλυτικό μηχανισμό διάτμησης και βασίζεται μόνο σε παραμέτρους με σαφή φυσική σημασία που αποτελούν ιδιότητες του υλικού και όχι σε αντίστοιχες εμπειρικές.

Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται η περιγραφή των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως προς την προέλευση τους , την ορυκτολογική σύσταση και όπου υπήρχαν βιβλιογραφικά δεδομένα δίνονται οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία δειγματοληψίας των πετρωμάτων καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός με τον οποίο διαμορφώθηκαν τα δείγματα , έτσι ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές για την εκτέλεση των δοκιμών. Έπειτα, αναλύεται η προετοιμασία και η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών τριαξονικής θλίψης και άμεσης διάτμησης ασυνεχειών, οι προδιαγραφές που ακολουθούνται, οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν καθώς και το λογισμικό καταγραφής των δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ένα έντυπο τριαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκε και στην συνέχεια τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τεσσάρων πετρωμάτων. Δίνονται οι τιμές του συντελεστή m_i που προκύπτουν για το καθένα καθώς και διαγράμματα αξονικής τάσης – παραμόρφωσης και

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

αξονικής -πλευρικής τάσης. Στην συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά ένα δοκίμιο άμεσης διάτμησης και στην συνέχεια τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των πετρωμάτων και η αντίστοιχη γωνία τριβής. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζεται η συσχέτιση $\phi_m - m_i$.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την συσχέτιση $\phi_m - m_i$, οι προτάσεις για την βελτίωση καθώς και την χρησιμότητα της και ο τρόπος που συστήνεται για την εφαρμογής της.

Στο Κεφάλαιο 6 δίνεται η βιβλιογραφία της μεταπτυχιακής διατριβής.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα εργαστηριακά αποτελέσματα μορφοποιημένα σε τυποποιημένα έντυπα. Επιπλέον, σε κάθε δοκίμιο υπάρχει σχετική φωτογραφική τεκμηρίωση και ό,τι άλλο προβλέπεται να καταγράφεται πριν και μετά από κάθε δοκιμή.

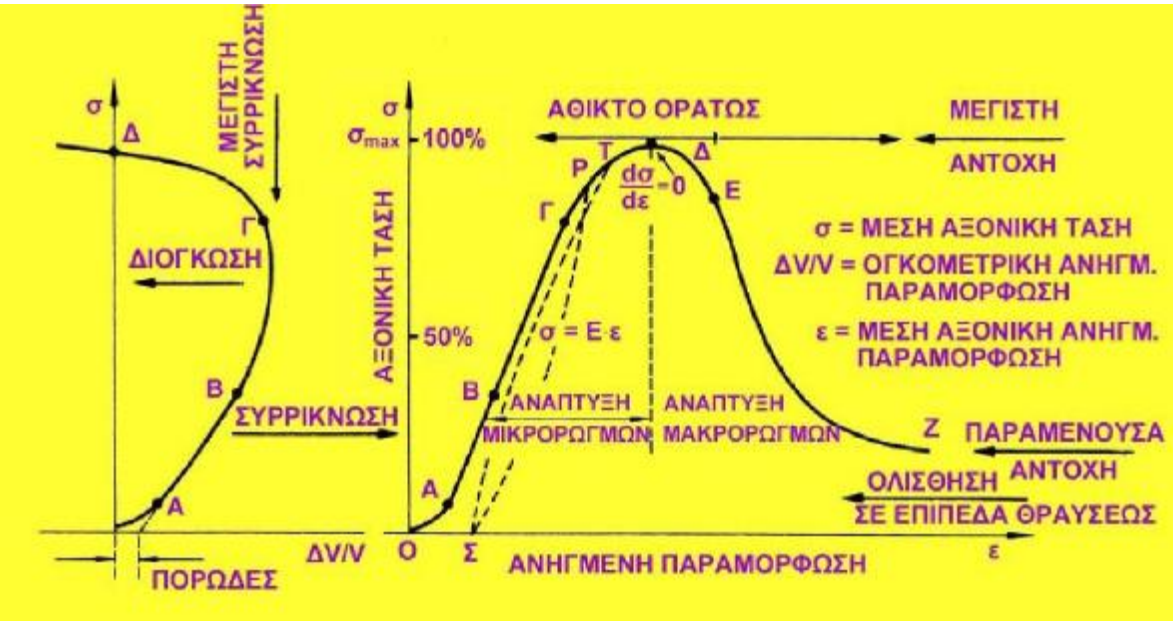
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Η συμπεριφορά ενός άρρηκτου πετρώματος σε τριαξονική θλίψη περιγράφεται συνήθως από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Το Σχήμα 1 δείχνει διάφορες καταστάσεις από τις οποίες διέρχεται το πέτρωμα καθώς καταπονείται. Μέχρι το σημείο Γ το πέτρωμα συμπεριφέρεται σαν ελαστικό σώμα, ενώ πέρα από αυτό η συμπεριφορά του χαρακτηρίζεται ως πλαστική. Πιο συγκεκριμένα ως όλκιμη συμπεριφορά χαρακτηρίζεται η πλαστική εκείνη κατάσταση του υλικού που καθώς σε αυτό αυξάνεται η μόνιμη παραμόρφωσή του, συνεχίζει να αυξάνεται και η αντίστασή του προς το επιβαλλόμενο φορτίο.

Στη πράξη έχει επικρατήσει να αναφέρονται γενικά σαν όλκιμα τα υλικά εκείνα, που παραμορφώνονται σημαντικά πριν την θραύση, ενώ ψαθυρά χαρακτηρίζονται εκείνα που θραύονται χωρίς να υποστούν σημαντικές παραμορφώσεις (Τσουτρέλης, 1985).

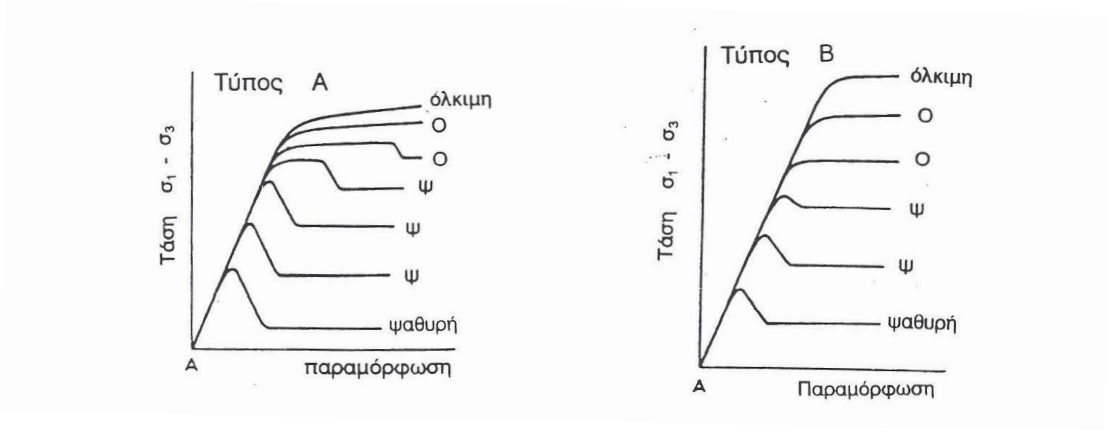


Σχήμα 1. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τσουτρέλης, 1985).

Σύμφωνα με τον Mogi (1972, 1974) υπάρχουν δυο απλοποιημένοι μηχανισμοί παραμόρφωσης των βραχωδών υλικών. Με βάση τους δυο μηχανισμούς ερμηνεύεται η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν χαρακτηριστεί ως τύπος Α (Σχήμα 2Α) και τύπος Β (Σχήμα 2Β) και αντιπροσωπεύουν δυο οριακές καταστάσεις παραμόρφωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος

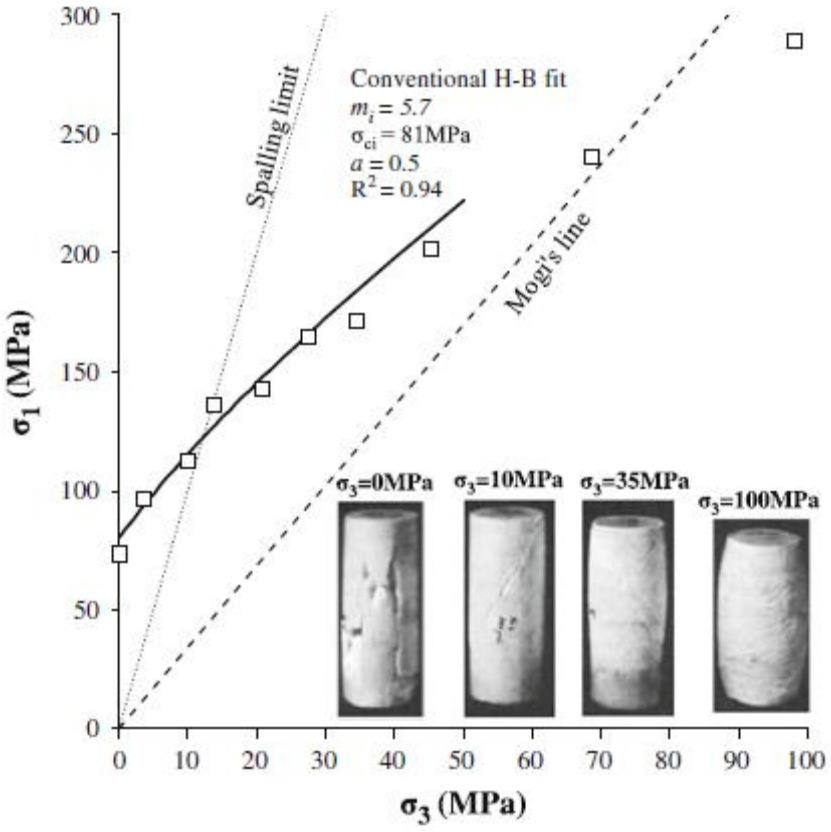
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Α αντιστοιχεί σε βραχώδη υλικά που παραμορφώνονται στην πλαστική περιοχή αποκλειστικά με κρυσταλλική πλαστική παραμόρφωση (crystal plasticity), σε αντίθεση ο τύπος Β αποκλειστικά με κατακλαστική ροή (cataclastic flow). Μερικά ανθρακικά πετρώματα, κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες ακολουθούν συμπεριφορά τύπου Α, ενώ τα χαλαζιακά πετρώματα ακολουθούν συμπεριφορά τύπου Β. Στην πραγματικότητα όμως τα περισσότερα πετρώματα ακολουθούν μια ενδιάμεση συμπεριφορά και στην περιοχή της μετάπτωσης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συνυπάρχει τόσο ψαθυρή θραύση όσο και πλαστική παραμόρφωση (Mogi, 1974).



Σχήμα 2. Δύο τύποι αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική (Mogi,1974).

Επίσης, ο Mogi(1966, 2007) έχει αποδείξει πως αριστερά της ευθείας σ_1-σ_3 =3.4σ_3 (Σχήμα 3) κυριαρχεί η ψαθυρή θραύση ενώ από τα δεξιά η όλκιμη. Σε αυτό το συμπέρασμα κατέληξε παρατηρώντας την ψαθυρότητα των πετρωμάτων, δηλαδή την πτώση της αξονικής τάσης μετά την θραύση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η πτώση τόσο μεγαλύτερη είναι ψαθυρότητα, ενώ αν η πτώση είναι μηδενική τότε η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δοκίμιο είναι μεταβατική από ψαθυρή σε όλκιμη και εάν δεν υπάρχει θραύση και το φορτίο συνεχώς αυξάνεται τότε βρίσκεται στην όλκιμη περιοχή. Σύμφωνα με τον Hoek (1968) με την αύξηση της πλευρικής πίεσης οι εφελκυστικές ρωγμές του ακέραιου δοκιμιού καταστέλλονται και πραγματοποιείται μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από αξονική σε διατμητική αστοχία. Ο Kaiser (2000) αναφέρει πως η αξονική θραύση είναι κυρίαρχη αστοχία για πολύ ισχυρά άρρηκτα πετρώματα και εμφανίζεται στα αριστερά της ευθείας του ορίου θρυμματισμού (spalling limit). Αυτό υποστηρίζεται και από τον Buzzi (2013) που εκτέλεσε δοκιμές σε δείγματα άνθρακα. Το όριο αυτό εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και την ετερογένεια του δοκιμίου και η μετάβαση αυτή μπορεί να περιγραφεί με μια ευθεία με κλίση $\sigma_1/\sigma_3 \approx 10$.



Σχήμα 3. Μη γραμμική περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας και η σύνδεση της με τον μηχανισμό αστοχίας. Μετάβαση από αξονική αστοχία (σ_3=0 MPa) σε διατμητική αστοχία (σ_3=10 MPa). Πολλαπλές διατμητικές ζώνες αστοχίας (σ_3=35 MPa) και διόγκωση του δοκιμίου (πλαστική παραμόρφωση) πέρα από την γραμμή Mogi (σ3=100MPa). Δεδομένα και φωτογραφίες δοκιμίων από τον Paterson (1958).

2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK & BROWN ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Οι Hoek & Brown με βάση τις θεωρίες θραύσης του Griffith(1921,1924) και των McClintock & Walsh (1962) παρουσίασαν το 1980 το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας. Το κριτήριο αυτό ορίζει την τιμή της κύριας τάσης σ_1 ($\sigma_1>\sigma_3=\sigma_2$) για την οποία επέρχεται η θραύση σε αντίθεση με το κριτήριο του Mohr – Coulomb που ορίζει την τιμή της διατμητικής τάσης για την οποία αστοχεί ένα υλικό . Το κριτήριο (Σχήμα 4), αναφέρεται σε βράχο με ομοιόμορφη κατάτμηση και ορίζεται με την εξίσωση

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s{\sigma_c}^2}$$

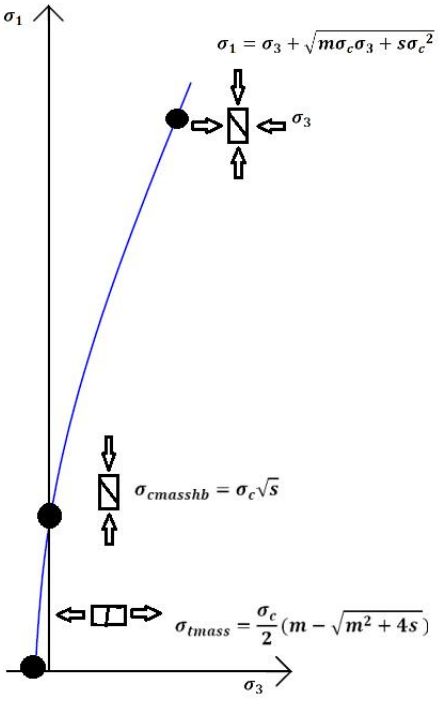
Όπου,

σ_1 η μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά τη θραύση,

σ_3 η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο,

σ_c η θλιπτική αντοχή του πετρώματος το οποίο συνθέτει το δοκίμιο εκφράζει τη συνεισφορά της συμπαγούς ύλης στην αντοχή το δοκιμίου,

m, s σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βράχου και από το βαθμό στον οποίο ο βράχος είναι διακλασμένος πριν υποβληθεί στις τάσεις σ_1, σ_3.



Σχήμα 4. Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980).

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Το 1992 οι Hoek & Brown παρουσίασαν μία νέα τροποποιημένη σχέση του κριτηρίου

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \sigma_c$$

Όπου,

α παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος και λαμβάνει τιμές από 0,5-0,65 .

Επιπλέον, στην παραπάνω σχέση η παράμετρος m συμβολίζεται με m_b και εκφράζει τις συνθήκες τριβής μεταξύ των συνιστωσών των ορυκτών του πετρώματος.

Η ανάγκη να τροποποιηθεί το κριτήριο προέκυψε όταν πρόσθετα εμπειρικά στοιχεία έδειξαν ότι η εφαρμογή της αρχικής σχέσης πρέπει να περιοριστεί μόνο σε καλής ποιότητας βράχο, κυρίως σε βράχους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από γωνιώδη στοιχεία κατάτμησης τα οποία βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η παραπάνω σχέση γράφεται

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5}$$

Για άρρηκτο πέτρωμα η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή

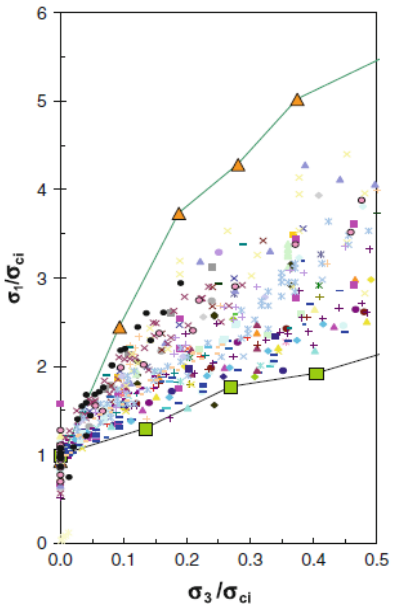
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Γίνεται αντιληπτό πως η σχέση μεταξύ κύριων τάσεων (σ_1,σ_3) κατά την αστοχία για ένα συγκεκριμένο πέτρωμα καθορίζεται από δύο παράγοντες: την σταθερά m_i του πετρώματος και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} .

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου m_i ο Hoek προτείνει μια διαδικασία λήψης δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές και σε συγκεκριμένο εύρος, το οποίο είναι $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ καθώς επίσης και δεδομένα από δοκιμές εφελκυσμού ώστε να προσαρμοστεί καλύτερα η περιβάλλουσα καμπύλη. Το παραπάνω εύρος σύμφωνα με τον Hoek (1983) δόθηκε διότι θεωρεί πως «η πλευρική πίεση θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερη της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος γιατί από το όριο αυτό και μετά το πέτρωμα συμπεριφέρεται πλαστικά. Επίσης σημειώνει πως σε πετρώματα με μικρή τιμή m_i το όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς μπορεί να βρεθεί ασκώντας πλευρική πίεση αρκετά πιο χαμηλά από την θλιπτική αντοχή του πετρώματος». Για την σωστή προσαρμογή της περιβάλλουσας και το προσδιορισμό του m_i απαιτούνται τουλάχιστον 5 σημεία με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους έτσι ώστε να καλύπτουν το εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ καθώς και δεδομένα για την εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου.

Το κριτήριο στηρίχθηκε σε εκατοντάδες τριαξονικές δοκιμές, συγκεκριμένα σε 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που εκτελέστηκαν με βάση το παραπάνω εύρος και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Όταν τα δοκίμια υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη, η αντοχή τους προσδιορίζεται καλύτερα με ένα μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας. Η μη γραμμικότητα προκύπτει όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 στην αλλαγή συμπεριφοράς του τρόπου αστοχίας του ακέραιου δοκιμίου με την ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής πίεσης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο διάφορων τύπων πετρωμάτων σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Σχήμα 5. Δεδομένα δοκιμών τριαξονικής θλίψης από 68 ομάδες δειγμάτων βράχου που παρίστανται με διαφορετικό σύμβολο. Τα δείγματα που δείχνουν το άνω και κάτω όριο των δεδομένων παριστάνονται με μεγαλύτερα σύμβολα (Kaiser & Kim, 2008).

Πίνακας 1. Τιμές της σταθερά m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek , 2000).

Τύπος		Ομάδα	Υφή			
			Αδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή * Λατυποπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2 Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργιλόλιθοι 4 ± 2 Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαριτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
		Οργανικά				Κρητίς 7 ± 2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 9 ± 3	Χαλαζίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Κερατόλιθοι (19 ± 4)	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτόχρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5 Γρανοδιορίτης (29 ± 3)		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά		Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτης (25 ± 5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Ηφ.Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

* Το m_i των κροκαλοπαγών και λατυποπαγών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού και το βαθμό συγκόλλησης. Έτσι η τιμή του m_i μπορεί να κυμαίνεται από αυτήν που αντιστοιχεί στους ψαμμίτες (17±4) έως αυτήν των λεπτόκοκκων ιζημάτων (μικρότερη του 10)

** Οι τιμές του m_i αναφέρονται για δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάσθηκαν κάθετα στη στρώση ή σχιστότητα. Το m_i μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές αν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

2.3 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΒΡΑΧΩΝ

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών μιας βραχομάζας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά της και για αυτό το λόγο αποτελούν βασικότατο παράγοντα για την επίλυση προβλημάτων Βραχομηχανικής.

ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

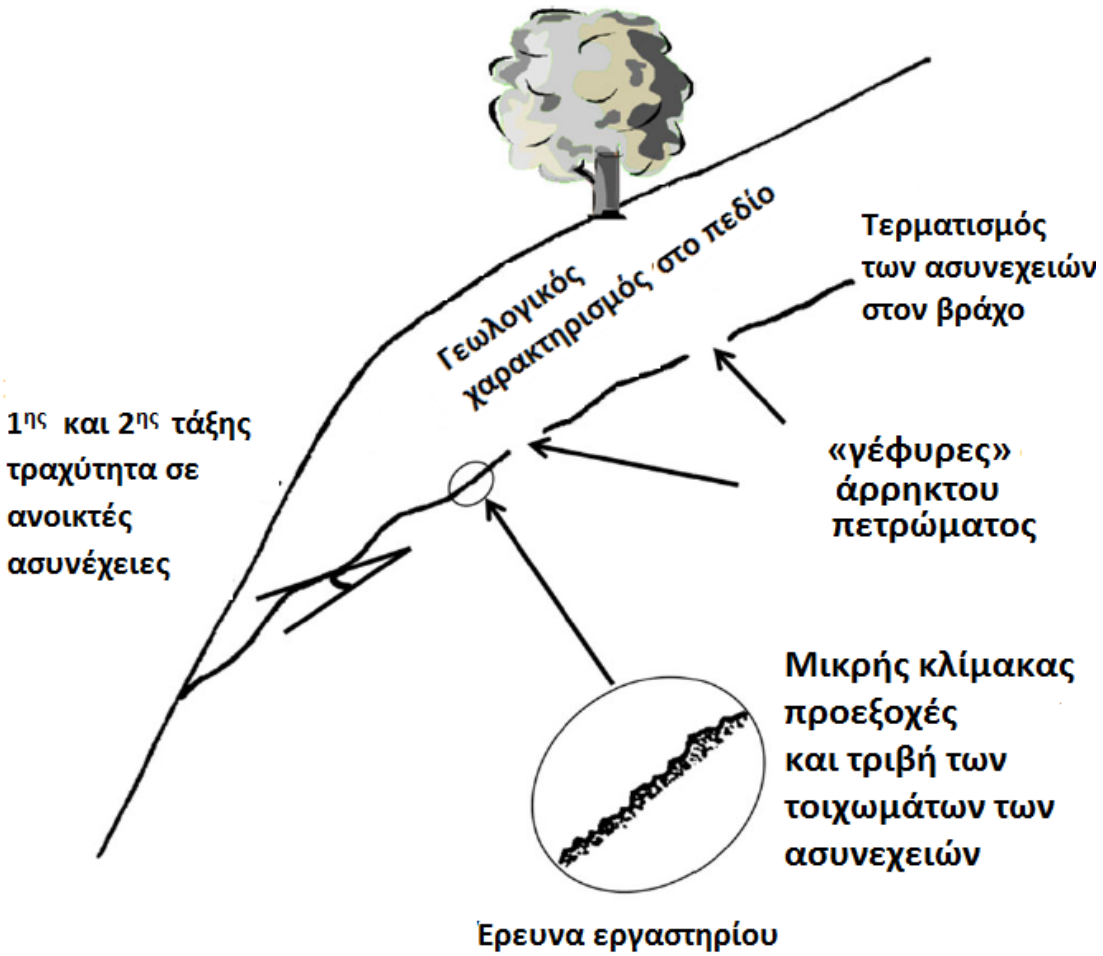
Οι παράγοντες που συμβάλουν στην αντοχή σε διάτμηση των ασυνεχειών στο πεδίο όπως φαίνονται στο Σχήμα 6 είναι:

α) Η πραγματική συνοχή που δημιουργείται από την αντοχή των τοπικών «γεφυρών» μεταξύ των τοιχωμάτων του άρρηκτου πετρώματος.

β) Η τραχύτητα που σε μεγάλη κλίμακα προκαλεί αλληλοεμπλοκή της βραχομάζας και διαστολή. Σημειώνεται πως η κυμάτωση μεγέθους μέτρων ονομάζεται πρώτης τάξεως, ενώ μικρότερης κλίμακας τραχύτητα ονομάζεται δευτέρας τάξεως (Patton and Deere, 1970)

γ) Σε εργαστηριακή κλίμακα μπορεί να εξεταστεί η αλληλεπίδραση των μικροεξοχών και της τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας .

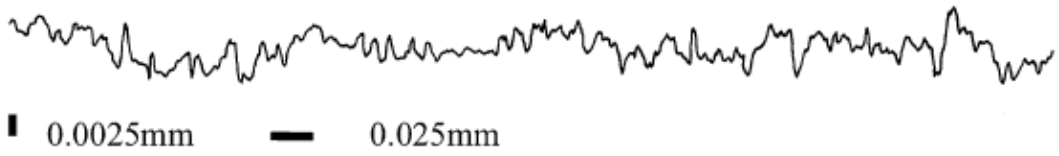
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Σχήμα 6. Κύριοι παράγοντες για την αξιολόγηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών (Hencher & Richards, 2014).

Βασική γωνία τριβής

Η παράμετρος που επηρεάζει μια επίπεδη ανοικτή ασυνέχεια (μη διαστελλόμενη) είναι η αντίσταση τριβής σε διάτμηση που είναι ανάλογη προς την ορθή τάση. Αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με τον «Δεύτερο νόμο της τριβής, Amonton (1699), η βασική γωνία τριβής των επίπεδων ασυνεχειών των πετρωμάτων είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της επιφάνειας που υποβάλλεται σε διάτμηση. Ωστόσο, ακόμα και φαινομενικά λείες επιφάνειες διαμορφωμένες με κοπή με τροχό στην πραγματικότητα είναι τραχειές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7, όπου η κατακόρυφη κλίμακα είναι πενταπλάσια της οριζόντιας.



Σχήμα 7. Προφίλ από την επιφάνεια κοπής μετρούμενο με τη χρήση ενός μορφομέτρου Talysurf (Hencher & Richards, 2014).

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθούν μερικά παραδείγματα επιστημόνων που ερεύνησαν την βασική γωνία τριβής. Ο Alejano *et al*. (2012) πραγματοποίησε δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου (tilting tests) σε ένα ενιαίο τέμαχος γρανίτη και η γωνία τριβής κυμαινόταν από 10^o – 40^o. Παρόμοια μεταβλητότητα διαπίστωσε και ο Nicholson (1994) όταν πραγματοποίησε στον ψαμμίτη Berea δοκιμές άμεσης διάτμησης σε λείες επιφάνειες διαμορφωμένες με κοπή. Η απόκλιση ήταν της τάξεως των $12,5^o$ παρότι υπήρχε μεγάλη προσοχή στην διαμόρφωση των δειγμάτων και στην επαναληψιμότητα.

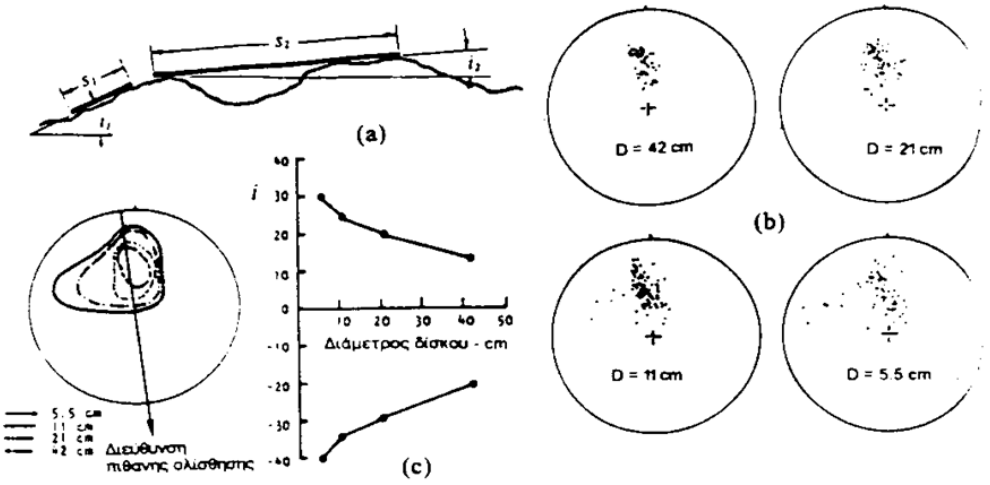
Συμπερασματικά είναι μια κοινή εσφαλμένη εκτίμηση ότι μια δοκιμή διάτμησης σε επιφάνεια «λεία» διαμορφωμένη με κοπή θα δώσει μια μοναδική τιμή για τη βασική γωνία τριβής. Επιπλέον, ότι αυτή η τιμή είναι επαναλαμβανόμενη και ότι δίνει τη κατώτερη αντίσταση διάτμησης για κάποιο πέτρωμα, και κατά συνέπεια, πολύ περισσότερο ότι αυτή η βασική γωνία τριβής συσχετίζεται με την διατμητική αντοχή μιας φυσικής ασυνέχειας.

Γωνία κλίσης των μικροεξοχών – διαστολή

Η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα με τη πραγματοποίηση μετρήσεων της επιφανειακής τραχύτητας. Επιπλέον, εφόσον ενεργοποιηθεί όλη η τραχύτητα, η γωνία κλίσης των μικροεξοχών ισούται με την γωνία διαστολής. Στο ύπαιθρο, η γωνία αυτή προσδιορίζεται με φωτογραμμετρικές ή προφιλομετρικές μεθόδους ή τη μέθοδο δίσκου-πυξίδας των Fecker & Rengers (1971). Σύμφωνα με την τελευταία μέθοδο, πραγματοποιείται ένας αρκετός αριθμός μετρήσεων της διεύθυνσης κλίσης και της γωνίας κλίσης της υπό εξέταση ασυνέχειας με τη βοήθεια διαφόρων μεγεθών κυκλικών δίσκων πάνω στους οποίους προσαρμόζεται μια γεωλογική πυξίδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 και στην Εικόνα 1. Οι μετρήσεις αυτές παριστάνονται σαν πόλοι σε στερεογραφικό διάγραμμα προβολών (Σχήμα 5 a,b,c), στο οποίο μπορούν να προκύψουν καμπύλες ίσης μέγιστης γωνίας κλίσης καθώς και η μεταβολή της μέγιστης γωνίας κλίσης με το μέγεθος των δίσκων. Αν η επιφάνεια ολίσθησης δεν

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

είναι ορατή, η γωνία κλίσης των μικροεξοχών μπορεί να εκτιμηθεί από άλλες παρόμοιες επιφάνειες με ορατές εμφανίσεις ή με αναγωγή από μετρήσεις σε επιφάνειες δοκιμίων εργαστηριακής κλίμακας.



Σχήμα 8. Μέτρηση τραχύτητας στο ύπαιθρο (Fecker & Rengers ,1971).

Εικόνα 1. Χρήση δίσκων διαφορετικού μεγέθους για τον χαρακτηρισμό και τον προσδιορισμό της επιφανειακής τραχύτητας (Hencher & Richards ,2014).

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Ο σκοπός της δοκιμής άμεσης διάτμησης σε ασυνέχειες βράχων είναι ο προσδιορισμός:

α) της γωνίας τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας

β) των χαρακτηριστικών της επιφάνειας, π.χ. ορυκτολογική σύσταση, αποσάθρωση, βαθμός λείανσης και κατά επέκταση της επιρροής στην διατμητική αντοχή σε ένα συγκεκριμένο εύρος ορθών τάσεων.

γ) της απομείωσης της τραχύτητας και της θραύσης προεξοχών των δοκιμίων κατά την διάρκεια της διάτμησης σε συγκεκριμένα επίπεδα ορθών τάσεων.

Έτσι, μπορεί να καταστεί δυνατός ο βαθμός επίδρασης της τραχύτητας στον σχεδιασμό ενός έργου σε βράχο.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

ΚΡΙΤΗΡΙΟ PATTON

Η επίδραση της τραχύτητας των ασυνεχειών στη διατμητική αντοχή τους, μελετήθηκε για πρώτη φορά από τον Patton (1966) που έδειξε ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή τραχειών επιφανειών του πετρώματος έχει την παρακάτω σχέση:

$$\boldsymbol{\tau = \sigma_n \varepsilon\varphi(\varphi_b + i)}$$

όπου,

σ_n η επιβαλλόμενη ορθή τάση,

ϕ_b η βασική γωνία τριβής και

i η γωνία που εκφράζει την τραχύτητα.

Ο Patton ουσιαστικά κατέδειξε την επίδραση της τραχύτητας στην διατμητική αντοχή των ασυνεχειών των πετρωμάτων μέσα από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε δοκίμια πριονωτής μορφής (Σχήμα 9).

Η παραπάνω σχέση ισχύει για καθαρές τραχείες ασυνέχειες και σε μικρές τιμές της ορθής τάσης, δηλαδή πριν την θραύση των προεξοχών. Για μεγαλύτερες τάσεις ισχύει η σχέση:

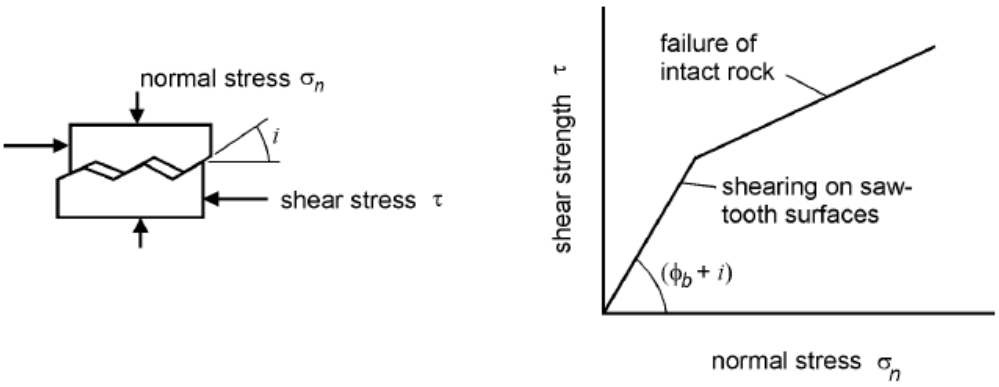
$$\boldsymbol{\tau = c + \sigma_n \varepsilon\varphi\varphi_r}$$

όπου,

c η συνοχή και

ϕr η παραμένουσα γωνία τριβής

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Σχήμα 9. Πειράματα του Patton για τα μελέτη της επιρροής της τραχύτητας των ασυνεχειών (Hoek, Kaiser & Badwen, 1995).

ΚΡΙΤΗΡΙΟ BARTON

Οι Barton *et al.* (1973,1976,1977) βασιζόμενοι στην θεωρία του Patton και αφού μελέτησαν λεπτομερειακά τη συμπεριφορά των φυσικών ασυνεχειών, πρότειναν την παρακάτω σχέση για την εκτίμηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών πετρωμάτων:

$$t = \sigma_n \varepsilon \varphi \left[\varphi_b + JRC log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Όπου,

T μέγιστη διατμητική αντοχή

σ_n η ορθή τάση

ϕ_b βασική γωνία τριβής

JRC είναι ο συντελεστής τραχύτητας των ασυνεχειών (Joint Roughness Coefficient)

JCS είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (Joint wall Compression Strength).

Οι Barton & Bandis (1990) βασιζόμενοι σε αποτελέσματα 130 δειγμάτων αποσαθρωμένων ασυνεχειών μετέτρεψαν την παραπάνω σχέση σε:

$$\tau = \sigma_n \varepsilon \varphi \left[\varphi_r + JRC log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Όπου,

ϕ_r η παραμένουσα γωνία τριβής που υπολογίζεται με βάση τους Barton – Choubey από την σχέση

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right)$$

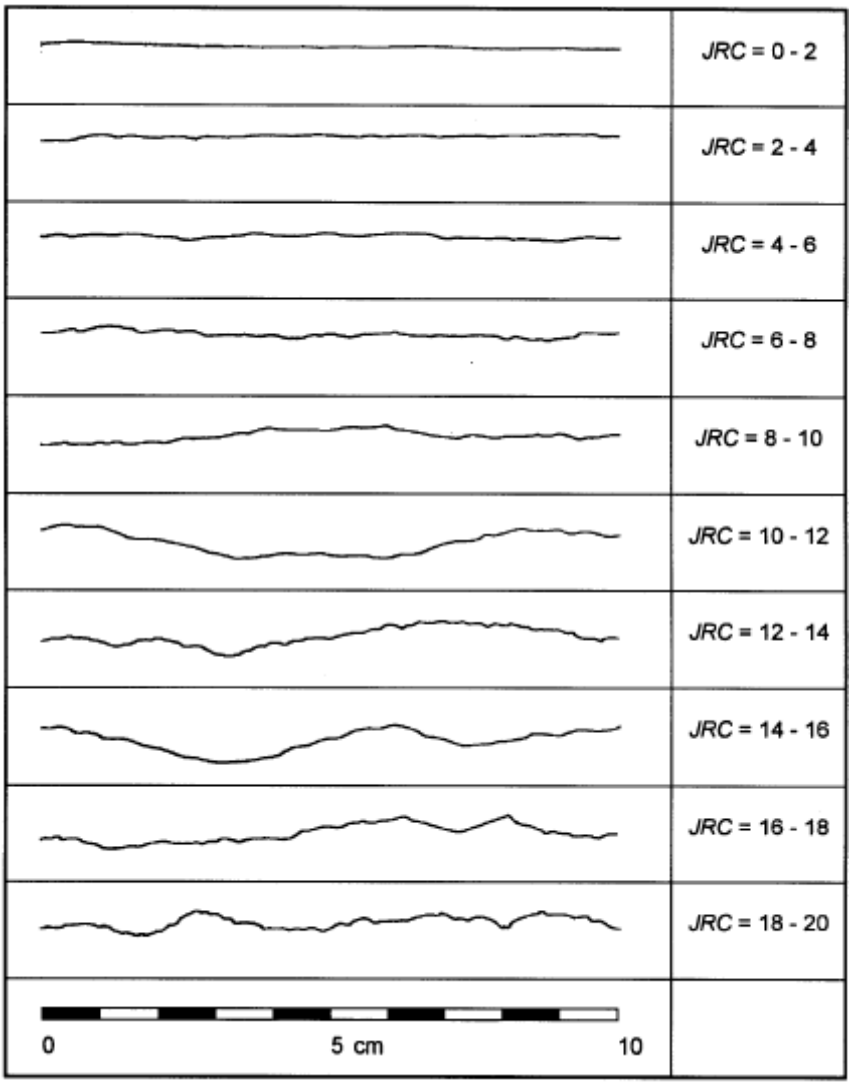
Όπου,

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

r η τιμή του κρουσίμετρου Schmidt σε αποσαθρωμένες και κορεσμένες με νερό επιφάνειες

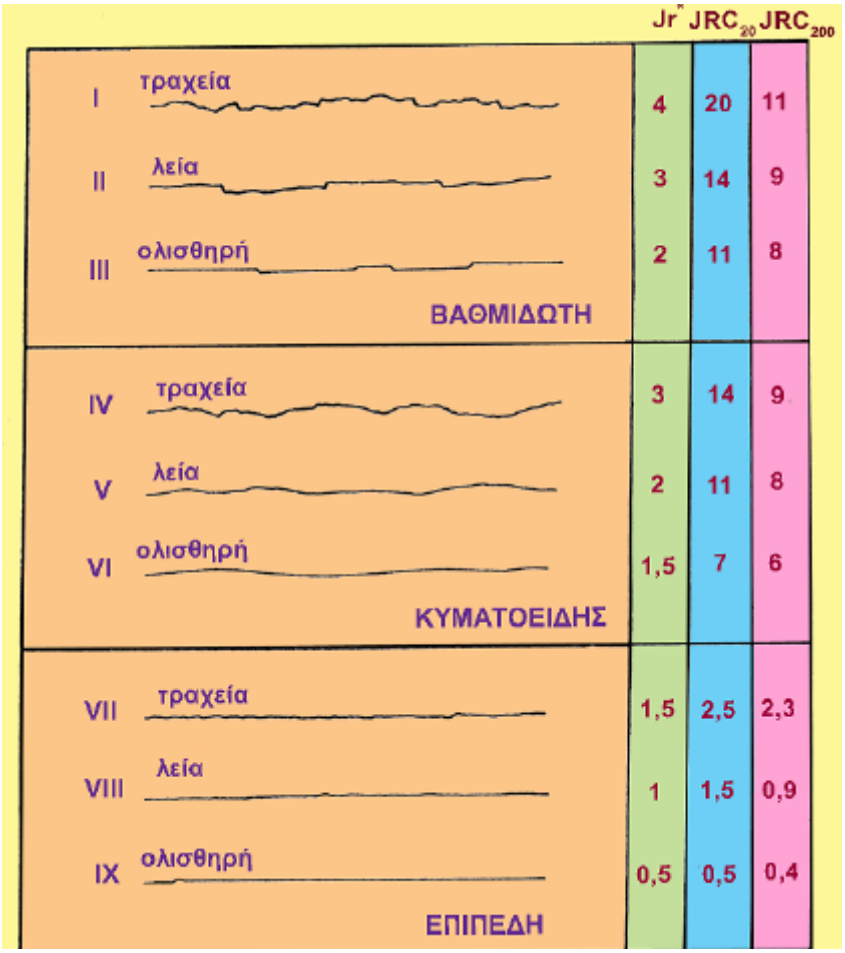
R η τιμή του κρουσίμετρου Schmidt σε υγιείς και στεγνές επιφάνειες

Ο συντελεστής τραχύτητας JRC είναι ένας αριθμός που μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας την επιφάνεια της ασυνέχειας με τυποποιημένα προφίλ που είναι δημοσιευμένα από τους Barton et al. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ένα από τα πιο χρήσιμα πρότυπα προφίλ από τους Barton & Choubey (1977).



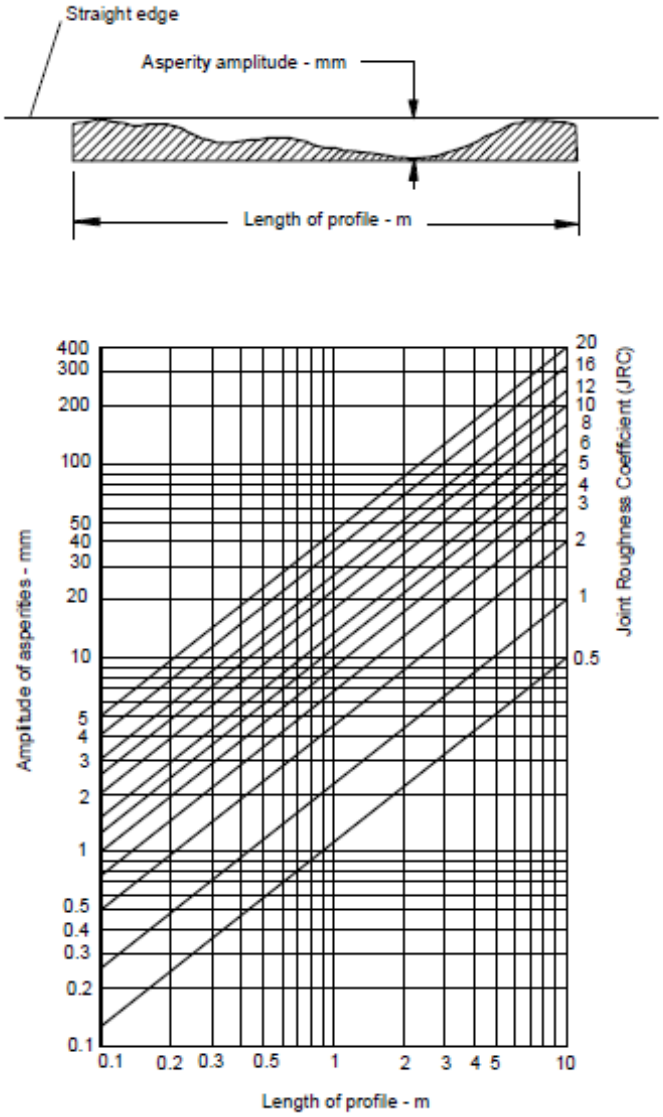
Σχήμα 10. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977).

Στην περίπτωση μικρής κλίμακας εργαστηριακών δειγμάτων τα προφίλ του παραπάνω σχήματος και οι αντίστοιχες τιμές του JRC έρχονται σε συμφωνία. Ωστόσο, στο πεδίο το μήκος της ασυνέχειας μπορεί να είναι αρκετά μέτρα ή ακόμη και δεκάδες μέτρα, έτσι η τιμή του JRC θα πρέπει να λαμβάνεται με βάση το σύνολο της επιφάνειας. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν από τον Barton (1987) προφίλ με βάση ασυνέχειες 2m (Σχήμα 11).



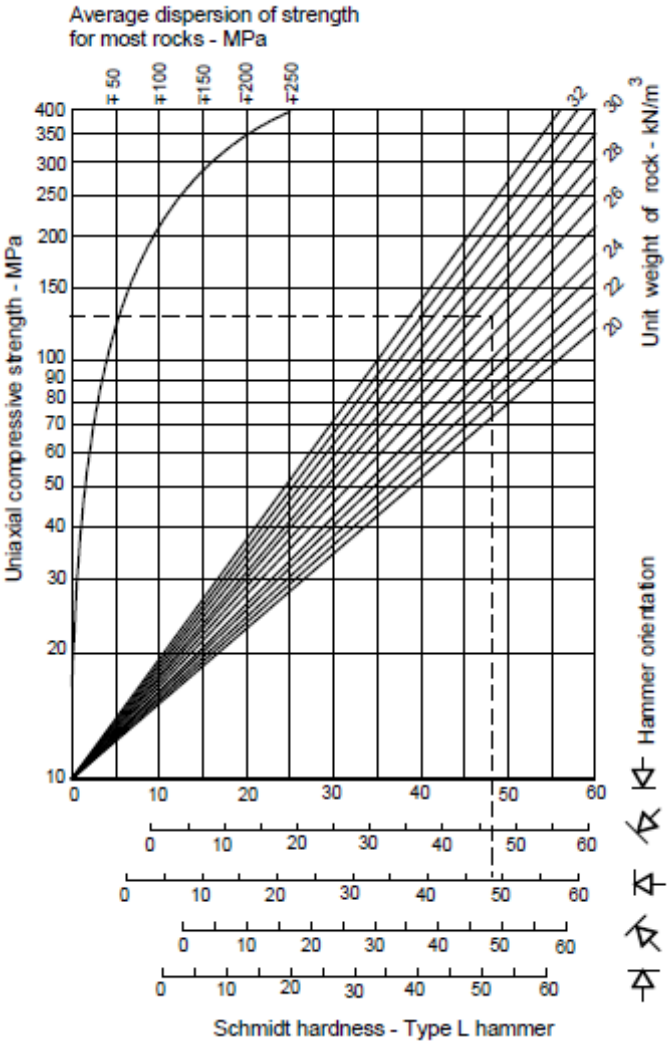
Σχήμα 11. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton, 1987).

Επίσης στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται μια διαφορετική μεθοδολογία εύρεσης του JRC υπολογίζοντας το μήκος του εξεταζόμενου προφίλ και το αντίστοιχο μέγιστο πλάτος της τραχύτητας.



Σχήμα 12. Μέθοδος εκτίμησης JRC με βάση το μήκος και το εύρος των ασυνεχειών (Barton, 1982).

Για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας JCS έχουν προταθεί από προτεινόμενες μέθοδοι από την ISRM(1978). Η χρήση του κρουσίμετρου Schmidt για την εκτίμηση της αντοχής των τοιχωμάτων σε θλίψη προτάθηκε από τους Deere & Miller(1966) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13. Εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας μέσω του κρουσίμετρου Schmidt.

Επίδραση της κλίμακας στους συντελεστές JRC και JCS

Με βάση την εκτεταμένη έρευνα που έχουν πραγματοποιήσει οι Barton & Bandis στις ασυνέχειες και με ανασκόπηση της βιβλιογραφίας το 1982 προτείνουν διορθώσεις λόγω κλίμακας στους συντελεστές JRC και JCS με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$JRC_n = JRC_o \left(\frac{L_n}{L_o}\right)^{-0.02JRC_o}$$

$$JCS_n = JCS_o \left(\frac{L_n}{L_o}\right)^{-0.03JRC_o}$$

Όπου,

$\boldsymbol{JRC_o}$, **JCSo** και $\boldsymbol{L_o}$ αναφέρονται σε κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων 100mm,

$\boldsymbol{JRC_n}$, **JCSn** και $\boldsymbol{L_n}$ αναφέρονται σε κλίμακα πεδίου.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ PAPALIANGAS

Το κριτήριο Papaliangas αποτελεί ένα απλό, θεωρητικό κριτήριο που βασίζεται σε ένα μηχανισμό διάτμησης ασυνεχειών ανάλογο με αυτόν που έχει μελετηθεί από τους Bowden & Tabor (1950) για την περίπτωση των μεταλλικών υλικών. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, όταν σε μια ασυνέχεια εφαρμοστεί μια ορθή τάση, τα τοιχώματά της έρχονται σε επαφή σε ορισμένες μόνο περιοχές που αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας. Η ορθή τάση σε αυτές τις περιοχές επαφής είναι τόσο υψηλή ώστε προκαλεί πλαστική "συγκόλληση" των δυο τμημάτων της ασυνέχειας (Terzaghi, 1925) όπως συμβαίνει στην περίπτωση των μετάλλων (Bowden & Tabor, 1950). Η μικρότερη τιμή της πραγματικής ορθής τάσης που έχει την ικανότητα να προκαλέσει πλαστική συμπεριφορά στο υλικό είναι η τάση που αντιστοιχεί στη μετάβαση από ψαθυρή σε πλαστική συμπεριφορά του βραχώδους υλικού. Έτσι, γίνεται αποδεκτό ότι τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής αντοχής οι περιοχές επαφής βρίσκονται στη μεταβατική περιοχή ψαθυρής-πλαστικής συμπεριφοράς. Επιπρόσθετα, στο τέλος της διατμητικής μετατόπισης παρατηρούνται "κόμβοι επαφής" που έχουν δημιουργηθεί από τον παραπάνω μηχανισμό. Αυτοί οι κόμβοι κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια της ασυνέχειας, και έχουν διαφορετική κλίση σε σχέση με το μέσο επίπεδο της (Σχήμα 14).

Σχήμα 14. Επαφή δυο τραχειών βραχωδών επιφανειών (Papaliangas , 1997).

Η εφαρμογή μιας διατμητικής δύναμης προκαλεί σχετική ολίσθηση των δυο τμημάτων της ασυνέχειας κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου που η διεύθυνση του εξαρτάται από τη μέση κλίση των κόμβων επαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διατμητική αντίσταση σε οποιαδήποτε ορθή τάση να μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από απότμηση των πλαστικών κόμβων επαφής, η οποία πραγματοποιείται κατά μήκος αυτού του κεκλιμένου επιπέδου και εξαιτίας του προκαλείται διαστολή. Επομένως η αντίσταση αυτή εμπεριέχει δυο επιμέρους συνιστώσες. Η μια οφείλεται στη διατμητική αντοχή του υλικού των τοιχωμάτων σε εντατική κατάσταση υψηλών τάσεων και η δεύτερη αποτελεί μια γεωμετρική συνιστώσα που οφείλεται στη μέση κλίση των

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

περιοχών επαφής. Εφόσον γίνεται δεκτό ότι οι κόμβοι επαφής βρίσκονται στο όριο ψαθυρής-πλαστικής συμπεριφοράς, η διατμητική αντίσταση είναι ίση με την αντίσταση τριβής (Orowan, 1960) και επομένως η πρώτη συνιστώσα είναι ανάλογη της ορθής τάσης και είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας και της κλίμακας. Η δεύτερη συνιστώσα αποδίδεται στην επιφανειακή τραχύτητα και εξαρτάται από την ορθή τάση. Κατά συνέπεια το μέγεθος της συνιστώσας τριβής προσδιορίζεται από τη γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων. Για τον προσδιορισμό του μεγέθους της γεωμετρικής συνιστώσας εφαρμόζονται οι αρχές της «θεωρίας ορθής επαφής» των Greenwood & Williamson (1966), με αξιοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας.

Με βάση την παραπάνω ρεαλιστική περιγραφή του μηχανισμού διάτμησης, το κριτήριο Papaliangas, έχει τη γνωστή απλή μορφή

$$\boldsymbol{\tau_p = \sigma_n \varepsilon\varphi(\varphi_m + \psi)}$$

Όπου,

τ_p η μέγιστη διατμητική αντοχή

σ_n η ορθή τάση

ϕ_m η γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων αυτής ασυνέχειας και

ψ η γωνία διαστολής που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή.

Η τιμή της γωνίας μεταβάλλεται λογαριθμικά με την ορθή τάση και δίνεται από τη σχέση (Papaliangas, 1995)

$$\boldsymbol{\varepsilon\varphi\psi = \varepsilon\varphi\psi_o log_{10}\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} \Big/ log_{10}\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_{no}}}$$

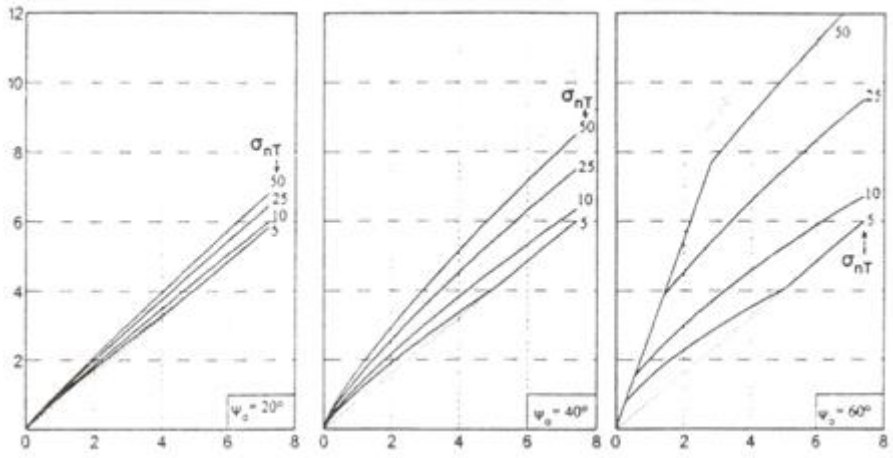
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Όπου,

ψ_o η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας και

σ_{nT} η ορθή τάση η οποία εμποδίζει πλήρως την ασυνέχεια να διασταλεί.

σ_{no} εκφράζει μια μικρή τιμή της ορθής τάσης η οποία προκαλεί μηδενική παραμόρφωση στην επιφάνεια της ασυνέχειας, και μπορεί να ληφθεί π.χ. 1 kPa



Σχήμα 15. Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas.

Στο Σχήμα 15 παρατίθενται τρεις οικογένειες περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής, σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή της γωνίας ψ_0, ενώ σε κάθε καμπύλη δίνεται η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου σ_{nT}. Για λόγους απλότητας η τιμή της γωνίας τριβής ϕ_m έχει ληφθεί ίση με 39^o σε όλες τις περιπτώσεις. Γίνεται δεκτό πως η τιμή της μέγιστης γωνίας τριβής δεν μπορεί να ξεπεράσει τις 70° (arctan(τ/σn) =70° όπως έχει προταθεί από τους Barton & Choubey (1977) και γι αυτό στο δεξιό διάγραμμα το αρχικό τμήμα της καμπύλης έχει αντικατασταθεί από την ευθεία τ = σ tan70°. Ο προσδιορισμός των τριών βασικών παραμέτρων του κριτηρίου, δηλαδή των ϕ_m , ψ_o και σ_{nT} μπορεί να γίνει ως εξής:

Η γωνία ϕ_m μπορεί να προσδιοριστεί με δυο τρόπους , είτε από τριαξονικές δοκιμές σε άρρηκτο δοκίμιο υπό πλευρική πίεση αρκετά υψηλή τέτοια ώστε να προσεγγιστεί το όριο ψαθυρής-πλαστικής συμπεριφοράς (Papaliangas, 1997) ή από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε ασυνέχειες πετρωμάτων, αν από τη μέγιστη διατμητική αντοχή αφαιρεθεί η γεωμετρική συνιστώσα (διαστολή).

Η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας ψ_o μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα με τη πραγματοποίηση μετρήσεων της επιφανειακής τραχύτητας. Επίσης, η γωνία αυτή

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

είναι ισοδύναμη με τη γωνία διαστολής, εφόσον ενεργοποιείται όλη η τραχύτητα (αμελητέα επιφανειακή φθορά). Η γωνία διαστολής προκύπτει στο εργαστήριο από δοκιμές διάτμησης υπό ορθή τάση που προέρχεται μόνο από το ίδιο βάρος του δοκιμίου(νεκρό φορτίο). Στο ύπαιθρο, η γωνία αυτή προσδιορίζεται με φωτογραμμετρικές ή προφιλομετρικές μεθόδους ή τη μέθοδο δίσκου-πυξίδας των Fecker & Rengers (1971). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η τιμή της γωνίας ψ_0 εξαρτάται από το βήμα της διατμητικής μετατόπισης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της. Προτείνεται η τιμή για το βήμα αυτό να είναι το 0.2%L, όπου L το μήκος της ασυνέχειας, που σύμφωνα με τον Patton (1966) αντιστοιχεί στην τραχύτητα δευτέρας τάξεως.

Τέλος η ορθή τάση σ_{nT} εκφράζει τη μετάβαση από διάτμηση με δυνατότητα διαστολής σε διάτμηση χωρίς διαστολή και μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με τη χρήση ενός διαγράμματος διαστολής- ορθής τάσης ($tan\psi - log\sigma_n$) που προκύπτει από την ίδια σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας ϕ_m . Για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά μπορεί να ληφθεί η τιμή της γωνίας ψο από μια δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό την επίδραση μόνο του ιδίου βάρους. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται πριν από την κύρια δοκιμή στην οποία θα υποβληθεί το συγκεκριμένο δοκίμιο. Είναι σημαντικό πως για τιμές της ορθής τάσης μεγαλύτερες της σ_{nT} η τραχύτητα δεν παίζει κανένα ρόλο, ενώ η διατμητική αντοχή είναι ανάλογη της ορθής τάσης. Η αναλογία αυτή ισχύει μέχρι η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας να γίνει ίση με τη διατμητική αντοχή του συμπαγούς πετρώματος, πέρα από αυτή η διατμητική αντοχή είναι ίση με αυτή του συμπαγούς βραχώδους υλικού. Για φυσικές ασυνέχειες η σ_{nT} είναι αισθητά χαμηλότερη από τη θλιπτική αντοχή και από την τάση που προκαλεί την αλλαγή της συμπεριφοράς του υλικού από ψαθυρή σε πλαστική. Αυτό αποδεικνύεται από αποτελέσματα πολλών ερευνητών, όπως οι Goodman & Dubois (1972), Schneider (1976), Leichnitz (1985) κ.α. Έτσι αν θεωρήσουμε σαν τυπικές τιμές σ_{nT} = 10MPa. και σ_{no} = 1kPa , η παραπάνω σχέση δίνει:

$$\varepsilon\varphi\psi = \frac{\varepsilon\varphi\psi_o}{4} log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n}$$

Η πρακτική σημασία των δύο σχέσεων είναι μεγάλη και βρίσκεται στη χρήση μιας απλής φυσικής παραμέτρου της επιφάνειας της ασυνέχειας, που μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Με άλλα λόγια της μέγιστης κλίσης των μικροεξοχών ενώ η τάση σ_{nT} μπορεί να προσδιοριστεί από μια σειρά δοκιμών σε δείγματα φυσικής ασυνέχειας, χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε ειδική προετοιμασία των επιφανειών τους.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Για τους περισσότερους τύπους υγιών πετρωμάτων η τιμή της γωνίας τριβής φm όπως προσδιορίζεται από τριαξονικές δοκιμές βρίσκεται μεταξύ 33° και 43°. Οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε ορισμένους τύπους βράχων χαλαζιακής σύστασης ενώ οι μεγαλύτερες σε βράχους ασβεστιτικής σύστασης (Papaliangas, 1996). Όμως υπάρχει η πιθανότητα να υπάρξουν περιπτώσεις με αισθητά χαμηλότερες τιμές σε περιπτώσεις πετρωμάτων όπως οι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και γενικά πετρώματα που περιέχουν ορυκτά χαμηλής διατμητικής αντοχής, ή όταν τα τοιχώματα εμφανίζουν αποσάθρωση ή είναι καλυμμένα με επιστρώσεις εδαφικών υλικών ή ορυκτών χαμηλής γωνίας τριβής. Επίσης, χαμηλότερες γωνίες τριβής, ιδιαίτερα σε χαμηλές ορθές τάσεις προκύπτουν σε περιπτώσεις που η επιφάνεια μιας ασυνέχειας έχει λειανθεί λόγω κάποιας φυσικής ή τεχνικής διεργασίας . Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της γωνίας ϕ_m πρέπει να προσδιοριστεί μόνο από δοκιμές άμεσης διάτμησης, επειδή οι τριαξονικές δοκιμές δεν είναι ικανές και δεν "αντιλαμβάνονται" πλήρως τα διαφοροποιημένα επιφανειακά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών.

Το κριτήριο Papaliangas δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση ασυνεχειών με υλικό πληρώσεως, για τις οποίες άλλα κριτήρια είναι ποιο ενδεδειγμένα(Papaliangas 1993 και 1995).

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ BARTON

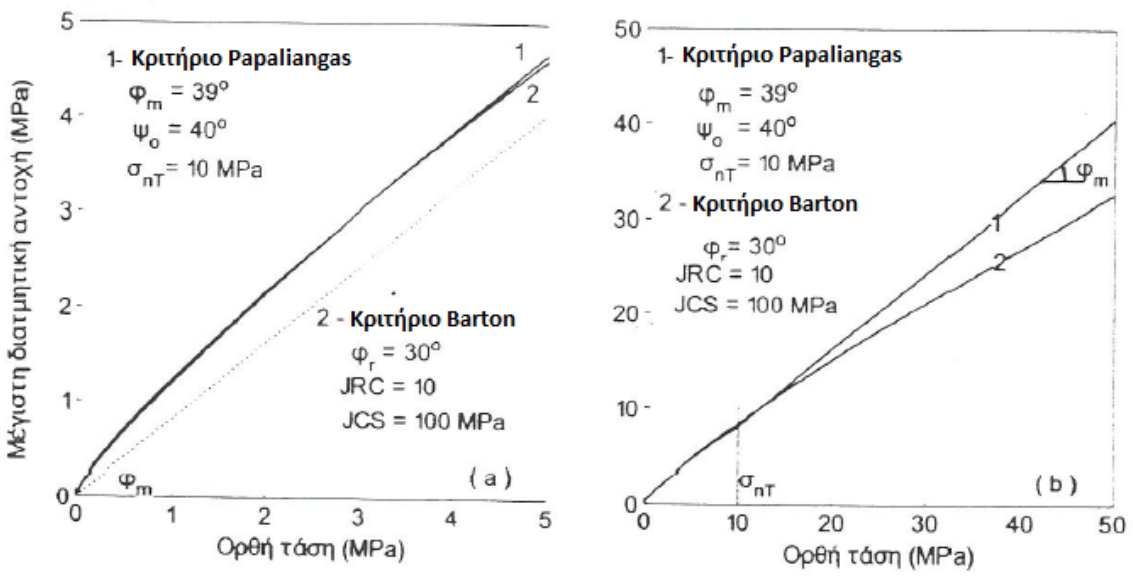
Η μορφή του θεωρητικού κριτηρίου είναι παρόμοια με αυτή του εμπειρικού κριτηρίου Barton που έχει ευρεία εφαρμογή. Όμως το κριτήριο Papaliangas έχει σαφή θεωρητική βάση, διαθέτει ένα πολύ ρεαλιστικό μηχανισμό διάτμησης και εφαρμόζει παραμέτρους με φυσική έννοια. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να προσδιορίζουν εύκολα από μια σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης σε δείγματα της προς εξέταση φυσικής ασυνέχειας, χωρίς κάποια ειδική προετοιμασία των επιφανειών της π.χ. κοπή δοκιμίων κλπ. Στις δοκιμές αυτές καταγράφονται η κατακόρυφη μετατόπιση του δοκιμίου μαζί με την οριζόντια, όπως προδιαγράφεται από τη Διεθνή Εταιρεία Βραχομηχανικής (Brown, 1981). Επίσης δεν χρησιμοποιούνται εμπειρικές παράμετροι, ούτε πρόσθετες δοκιμές και εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό τους όπως συμβαίνει με τη μέθοδο Barton.

Τα δυο κριτήρια παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 16, από το οποίο προκύπτει ότι στην περιοχή των χαμηλών ορθών τάσεων μπορεί να ταυτίζονται (Σχήμα 16.a), όμως σε υψηλότερες ορθές τάσεις αποκλίνουν σημαντικά (Σχήμα 16.b), καθώς το κριτήριο Barton προβλέπει πως η μέγιστη γωνία τριβής θα είναι ίση με την παραμένουσα γωνία τριβής ($\phi_p=\phi_r$), τιμή η οποία είναι χαμηλή (Barton, 1973 και 1976), ενώ το κριτήριο Papaliangas προβλέπει ότι θα

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

είναι ίση με τη γωνία τριβής των τοιχωμάτων (ϕ_p=ϕ_m), που θεωρείται πιο ρεαλιστική τιμή (Byerlee, 1978). Συγκριτική παράθεση των επιμέρους παραμέτρων των δυο κριτηρίων γίνεται στον Πίνακα 2, ενώ ενδεικτικές εφαρμογές του νέου κριτηρίου δίνονται σε άλλες εργασίες (Papaliangas et al., 1996 , 1997).

Το κριτήριο μέγιστης διατμητικής αντοχής ασυνεχειών βράχων που περιγράφηκε σύντομα παραπάνω, είναι βασισμένο σε ένα ρεαλιστικό μηχανισμό τριβής και ευρέως αποδεκτή θεωρία παραμόρφωσης τραχειών επιφανειών. Η βασική παραδοχή είναι ότι η διατμητική αντοχή προέρχεται από αποτίμηση κόμβων επαφής των δυο τμημάτων της ασυνέχειας, στους οποίους η ορθή τάση είναι ίση με την τάση που προκαλεί αλλαγή της συμπεριφοράς από ψαθυρή σε πλαστική. Το κριτήριο απαιτεί μια απλή γεωμετρική παράμετρο που χαρακτηρίζει την επιφάνεια, συγκεκριμένα τη μέγιστη γωνία κλίσης των επιφανειακών προεξοχών, μια βασική ιδιότητα του βραχώδους υλικού (γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων) και την ορθή τάση πέραν της οποίας η διαστολή μηδενίζεται.



Σχήμα 16. Γραφική μορφή των κριτηρίων Barton και Papaliangas.

Και οι τρεις αυτές παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα από μια απλή σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης σε δείγματα της υπό εξέταση ασυνέχειας. Το κριτήριο Papaliangas υιοθετεί τις αρχές της θεωρίας τριβής των Bowden & Tabor (1950) για την ερμηνεία της προέλευσης της διατμητικής αντοχής, ενώ για τον προσδιορισμό της γεωμετρικής συνιστώσας σε οποιαδήποτε ορθή τάση χρησιμοποιούνται οι βασικές αρχές της θεωρίας ορθής επαφής των Greenwood & Williamson (1966) με χρήση μόνο μιας γεωμετρικής παραμέτρου της επιφάνειας της ασυνέχειας.

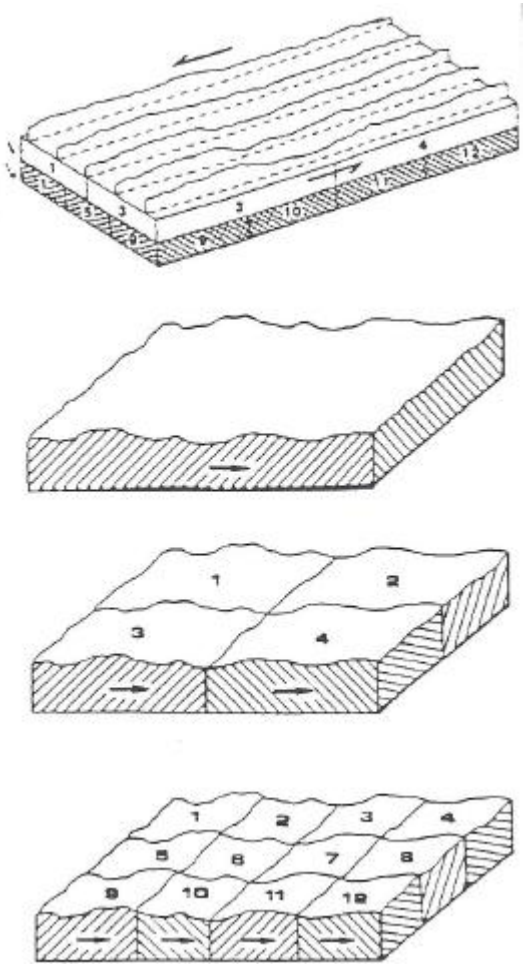
Τα πλεονεκτήματα του νέου κριτηρίου φαίνονται σε μια παράμετρο προς σύγκριση με το ευρέως χρησιμοποιούμενο στην πράξη εμπειρικό κριτήριο Barton.

Πίνακας 2. Σύγκριση των παραμέτρων του κριτηρίου Papaliangas και του κριτηρίου Barton.

	Κριτήριο Papaliangas		Κριτήριο Barton
1. Μορφή	$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_m + \psi)$		$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$
2.Παράμετρος τριβής	ϕ_m :Γωνία τριβής υλικού τοιχωμάτων		ϕ_r : Παραμένουσα γωνία τριβής
	-βασική ιδιότητα του υλικού -προσδιορίζεται από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε δείγματα φυσικής ασυνέχειας (αμεσότητα)		-δεν είναι ιδιότητα του υλικού -προσδιορίζεται από τη γωνία τριβής επίπεδων διαμορφωμένων επιφανειών με εμπειρικό τρόπο (κρουσίμετρο Schmidt)
3. Παράμετρος τραχύτητας	$\tan\psi = \tan\psi_o \log_{10}\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} / \log_{10}\frac{\sigma_{nT}}{\sigma_{no}}$		$i = JRC \log_{10}\frac{JCS}{\sigma_n}$
	$\tan\psi$: αποτέλεσμα μόνο της διαστολής		i : αποτέλεσμα της διαστολής και της απότμησης των μικροεξοχών
	ψ_o : μέγιστη γωνία κλίσης μικροεξοχών -φυσική παράμετρος -προσδιορίζεται με άμεση μέτρηση		JRC: δείκτης τραχύτητας ασυνέχειας -εμπειρική παράμετρος -προσδιορίζεται εμπειρικά
	σ_{nT} : ορθή τάση ικανή να περιορίσει πλήρως τη διαστολή -προσδιορίζεται από τις ίδιες δοκιμές όπως και η ϕ_m		JCS: θλιπτική αντοχή τοιχωμάτων - για αποσαθρωμένες επιφάνειες προσδιορίζεται έμμεσα με το κρουσίμετρο Schmidt
4. Οριακές συνθήκες	χαμηλές ορθές τάσεις	$\tau_p = \sigma_n \tan 70°$	$\tau_p = \sigma_n \tan 70°$
	υψηλές ορθές τάσεις	$\tau_p = \sigma_n \tan\phi_m$	$\tau_p = \sigma_n \tan\phi_b$

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Η μεταβολή της διατμητικής αντοχής με το μέγεθος και την τραχύτητα των δοκιμίων, οφείλεται αποκλειστικά σε διαφορετική τιμή της ενεργοποιούμενης γωνίας διαστολής, ενώ η συνιστώσα «θραύσης» δεν επηρεάζεται. Αυτή η αρχή τεκμηριώνεται με μια σειρά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τους Papaliangas κ.α. (1997) σε ομοιώματα από έναν τύπο φυσικής ασυνέχειας σε ασβεστόλιθο. Τα δοκίμια είχαν τρία μεγέθη, τα μεγάλα (354mm × 150mm), τα μεσαία (177mm × 75mm το καθένα) και τα μικρά(88mm × 50mm το καθένα). Τα μεσαία δοκίμια προήλθαν από τα μεγάλα με διαίρεση σε 4 ίσα τεμάχια και τα μικρά με διαίρεση σε 12 ίσα τεμάχια (Σχήμα 17).

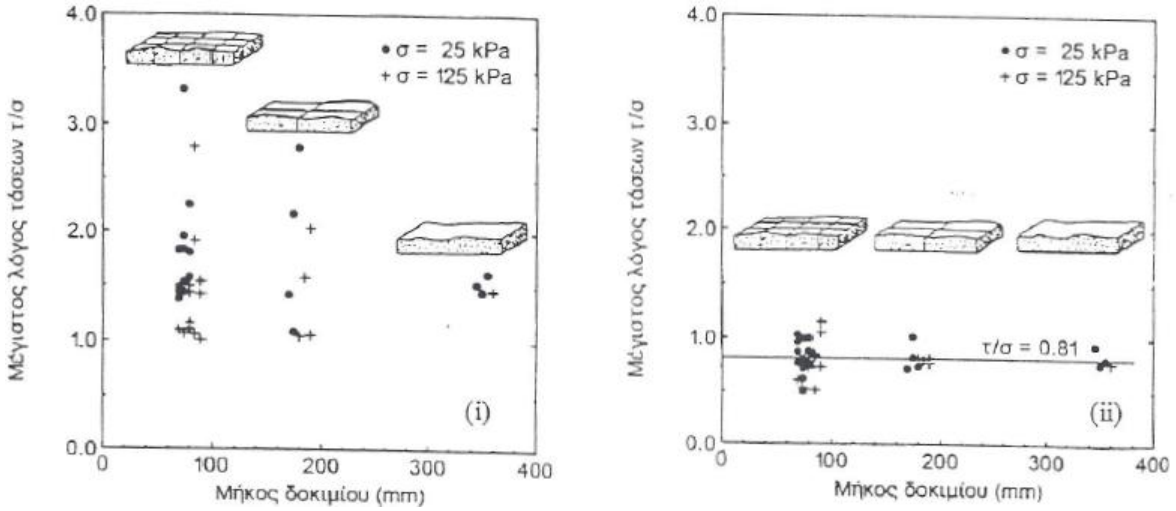


Σχήμα 17. Μεγέθη δοκιμίων.

Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δύο τάσεις (25 kPa και 125 kPa) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή του λόγου της μέγιστης διατμητικής αντοχής προς την αντίστοιχη ορθή τάση (τ_p/σ). (Σχήμα 18) . Είναι φανερό πως τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη διακύμανση και αναφέρονται σε ίδιου μεγέθους δοκίμια ,αλλά διαφορετικής τραχύτητας η

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

οποία ευθύνεται για αυτή την διασπορά. Επιπλέον παρατηρείται και μείωση την διατμητικής αντοχής με την αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου. Όταν όμως υπολογιστεί ο λόγος τάσεων που αντιστοιχεί σε διάτμηση χωρίς διαστολή τότε όλες οι τιμές τοποθετούνται σε μια μικρή περιοχή τιμών με μέση τιμή την 0,81 ($\phi=39^o$)



Σχήμα 18. Μέγιστος λόγος τάσεων(τ_p/σ) σε σχέση με το μήκος δοκιμίου i) με διαστολή ii) χωρίς διαστολή.

Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε πλήρη συμφωνία με την συνέπεια του κριτήριου Papaliangas ,ότι οποιαδήποτε μεταβολή στην μέγιστη διατμητική αντοχή εξαιτίας της ανισοτροπίας (τραχύτητα) ή εξαιτίας του μεγέθους του δοκιμίου, οφείλεται στην διαφορετική τιμή της διαστολής που ενεργοποιείται .

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν τέσσερα πετρώματα. Η επιλογή των πετρωμάτων έγινε με βάση δύο κριτήρια, πρώτον την κάλυψη όσο το δυνατόν καλυτέρα του εύρους του m_i και δεύτερον να υπάρχει τουλάχιστον ένα πέτρωμα από κάθε κατηγορία (ιζηματογενή, μεταμορφωμένα, πυριγενή). Με βάση τα παραπάνω επιλέχτηκαν το μάρμαρο (mi : 9 ± 3), ο ασβεστόλιθος(mi : 12 ± 3), ο ψαμμίτης(mi : 17 ± 4) και ο γρανίτης(mi : 32 ± 3). Για την δημιουργία της συσχέτισης $m_i - \phi_m$ προγραμματίστηκαν δύο κατηγορίες εργαστηριακών δοκιμών, ένας για την εύρεση του m_i μέσω τριαξονικών δοκιμών και ένας για την εύρεση της ϕ_m μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών των πετρωμάτων.

ΓΡΑΝΙΤΗΣ

Το πυριγενές πέτρωμα που επιλέχθηκε ήταν ο γρανίτης Αρναίας. Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος γρανίτης είναι ότι έχει ερευνηθεί αρκετά στο παρελθόν από άλλους ερευνητές και υπάρχουν διαθέσιμα βιβλιογραφικά στοιχεία. Ο γρανίτης αυτός ανήκει στην σερβομακεδονική μάζα. Ο γρανίτης της Αρναίας δεν έχει σημάδια σημαντικών μεταβολών του υλικού του. Το χρώμα του είναι λευκό έως ανοικτό γκρίζο, επομένως αποτελεί έναν λευκοκρατικό γρανίτη και έχει χρωματικό δείκτη που κυμαίνεται από 0.1 -7.5%. Το μέγεθος των κόκκων του κυμαίνεται από <1mm (λεπτόκοκκο) έως <5mm (μεσόκοκκο). Όμως σε μερικά δείγματα που έχουν αναλυθεί παρουσιάζει σχεδόν ισομετρικούς μεσόκοκκους κρυστάλλους με μέσο όρο μεγέθους 2mm περίπου. Γενικά ο γρανίτης της Αρναίας μοιάζει με έναν απλίτη ή απλιτικό γρανίτη, ενώ σε μερικές θέσεις μεταπίπτει σε τυπικό γρανίτη. Μακροσκοπικά παρατηρείται ότι είναι σχιστοποιημένος και γνευσιωμένος σχεδόν στο μεγαλύτερο μέρος του με λίγες περιοχές σχετικά που δείχνουν λιγότερη σχιστότητα . Ο γρανίτης της Αρναίας εμπεριέχει ένα σημαντικό πλήθος μελανοκρατικών φλεβών με πολύ λίγες περιπτώσεις λευκοκρατικών αν και στα γειτονικά μεταμορφωμένα πετρώματα παρατηρούνται και τα δύο είδη (Oladeji, 1997).

Συγκεκριμένα ο γρανίτης που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία βρίσκεται στην θέση ΤΠ20 (Εικόνα 2, 3, 4, 5). Για τον προσδιορισμό του πετρογραφικού τύπου στην θέση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν εμβαδομέτρηση σε λεπτές τομές από τον Oladeji (1997). Τα αποτελέσματα του παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

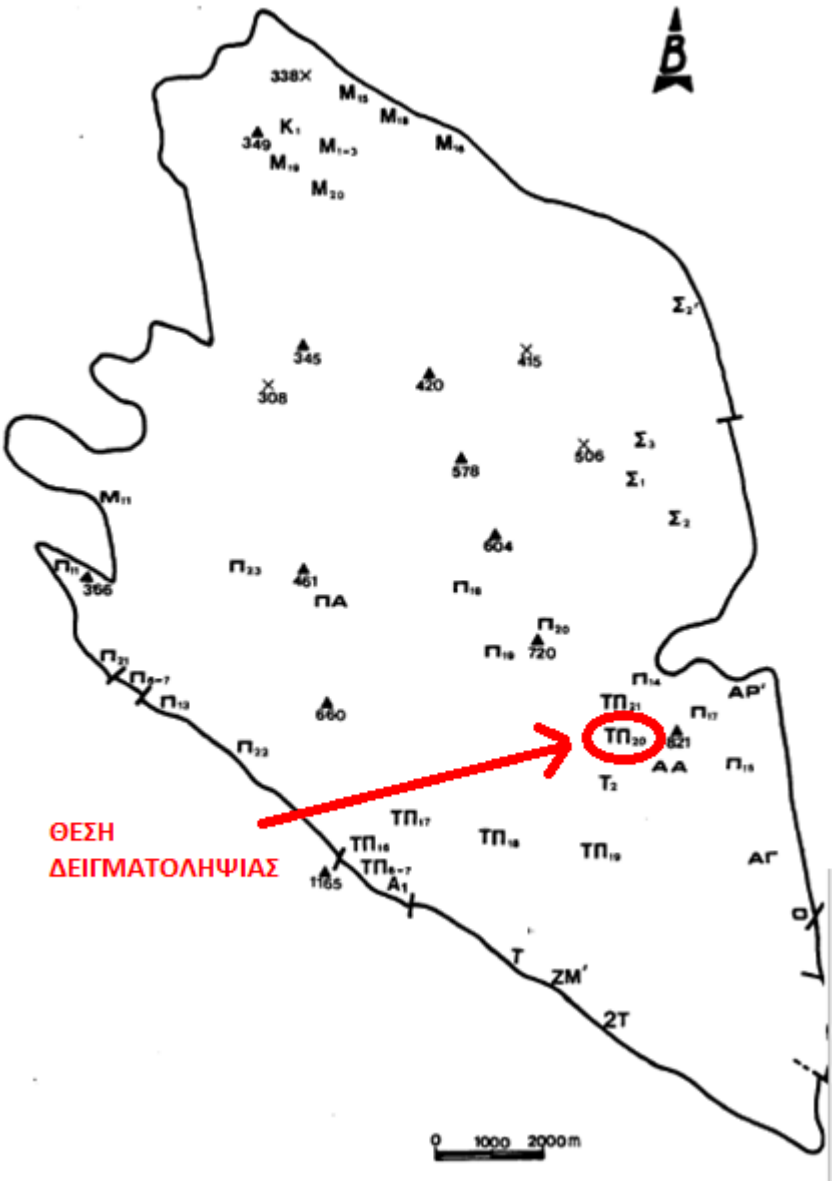
Πίνακας 3. Εμβαδομέτρηση γρανίτη στην περιοχή έρευνας (Oladeji, 1997).

ΟΡΥΚΤΑ/ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	**ΤΠ20**
Χαλαζίας	49,6
Καλιούχος άστριος	26,3
Πλαγιόκλαστο	15,15
Μοσχοβίτης	6,25
Βιοτίτης	-
Επουσιώδη ορυκτά	0,05
Δευτερογενή ορυκτά	2,65
Σύνολο	100
Αριθμός σημείων κατά την μέτρηση	2000

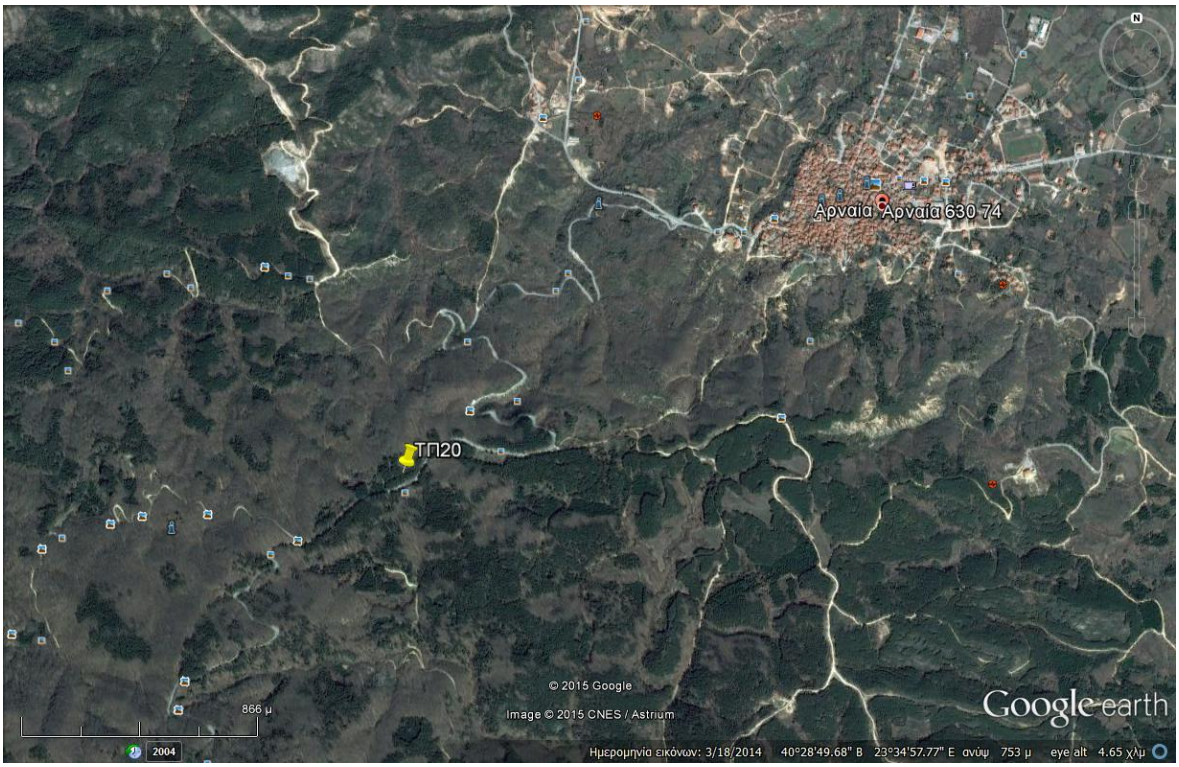
Πίνακας 4. Ποσοστό λευκοκρατικών ορυκτών % (Oladeji (1997).

Χαλαζίας	54,48
Καλιούχος άστριος	28,89
Πλαγιόκλαστο	16,64

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 2. Τοπογραφικό σκαρίφημα που δείχνει το περίγραμμα της περιοχής εμφάνισης του γρανίτη Αρναίας. Περιέχει τις θέσεις δειγματοληψίας της περιοχής έρευνας του Oladeji (1997) και της παρούσας έρευνας.



Εικόνα 3. Θέση δειγματοληψίας ΤΠ20, Google earth.

Εικόνα 4. θέση δειγματοληψίας ΤΠ20.

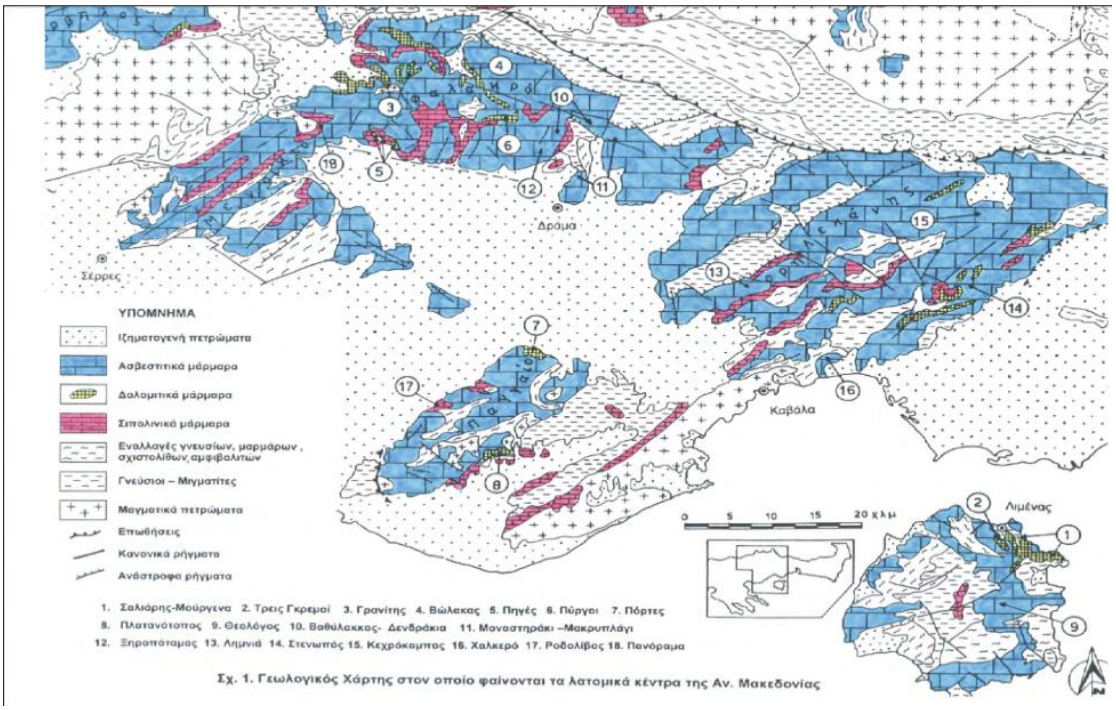
Εικόνα 5. Θέση δειγματοληψίας ΤΠ20.

ΜΑΡΜΑΡΟ

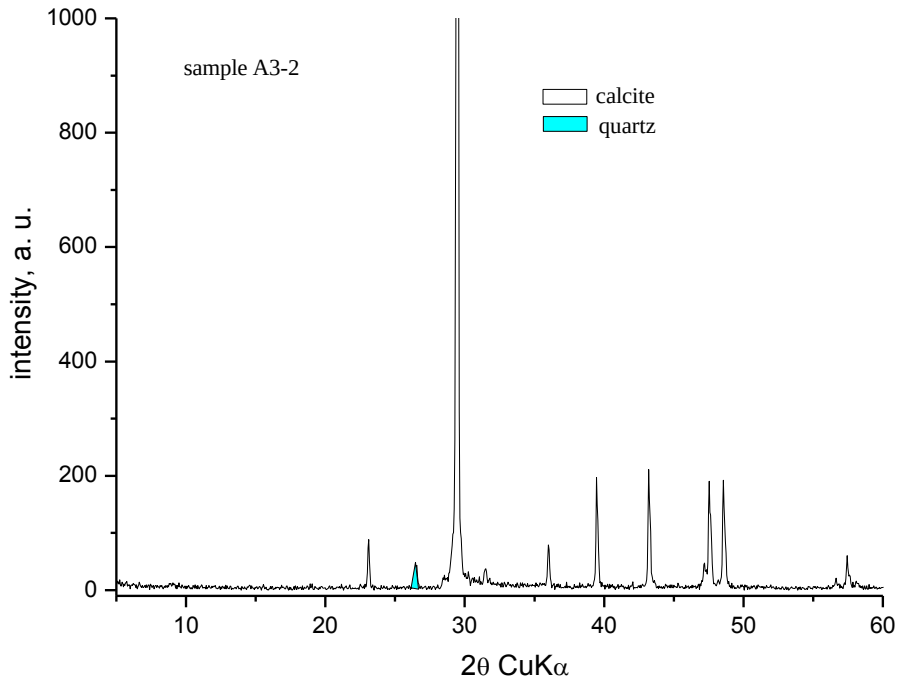
Το μεταμορφωμένο πέτρωμα που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή ήταν το μάρμαρο Καβάλας και συγκεκριμένα το λευκό Κεχρόκαμπου Καβάλας (Σχήμα 20). Η προμήθεια του τεμάχους από το οποίο διαμορφώθηκαν τα δείγματα του συγκεκριμένου πετρώματος έγινε από την εταιρεία με την επωνυμία «Κάρτας Μάρμαρα ΑΕΒΕ, Σίνδος». Η ορυκτολογική και χημική σύστασή του αναφέρεται από τον Τσιραμπίδη (1996) και παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. Ενώ έχει πραγματοποιηθεί περιθλασιόγραμμα XRD (Σχήμα 21) του συγκεκριμένου δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για τις εργαστηριακές δοκιμές από το Institute of Mineralogy and Crystallography της Bulgarian Academy of Science (2015).

Πίνακας 5. Ορυκτολογική και χημική σύσταση Μαρμάρου Κεχρόκαμπου Καβάλας (Τσιραμπίδης, 1996)

Ορυκτό	**Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.)**	**Χημική σύσταση**	**% κ.β.**
Ασβεστίτης	97	CaCO3	55
Δολομίτης	1	MgO	0,5
Χαλαζίας	2	SiO_2	0,7
		Fe_2O_3	0,11
		Al_2O_3	0,2
		K_2O	0,02
		Na_2O	0,03
		MnO	0
		CO_2	43,5



Σχήμα 19. Γεωλογικός Χάρτης με τα λατομικά κέντρα της Αν. Μακεδονίας (Τσιραμπίδης ,1996).



Σχήμα 20. Περιθλασιόγραμμα XRD για το Μάρμαρο Κεχρόκαμπου Καβάλας, (Bulgarian Academy of Sciences, 2015).

Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά

Ο Τσιραμπίδης (1996) αναφέρει στοιχεία από το Μάρμαρο Κεχρόκαμπου Καβάλας ως προς τα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά Μαρμάρου Κεχρόκαμπου Καβάλας (Τσιραμπίδης, 1996) .

Φαινόμενο βάρος (MPa)	26,8
Υδαταπορροφητικότητα (%)	0,09
Θλιπτική αντοχή (MPa)	78,5
Αντοχή σε Κάμψη (MPa)	16,95
Αντοχή στη φθορά από τριβή (mm)	6,16

ΨΑΜΜΙΤΗΣ

Ο ψαμμίτης Δεματίου αποτέλεσε το ένα από τα ιζηματογενή πετρώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών. Η ορυκτολογική και χημική σύσταση του αναφέρεται από τον Τσιραμπίδη (1996) και παρουσιάζεται στον Πίνακα 7. Ενώ έχει πραγματοποιηθεί περιθλασιόγραμμα XRD (Σχήμα 21) του συγκεκριμένου δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για τις εργαστηριακές δοκιμές από την από το Institute of Mineralogy and Crystallography της Bulgarian Academy of Science (Bulgarian Academy of Science, 2015).

Πίνακας 7. Ορυκτολογική και χημική σύσταση Ψαμμίτη Δεματίου (Τσιραμπίδης, 1996).

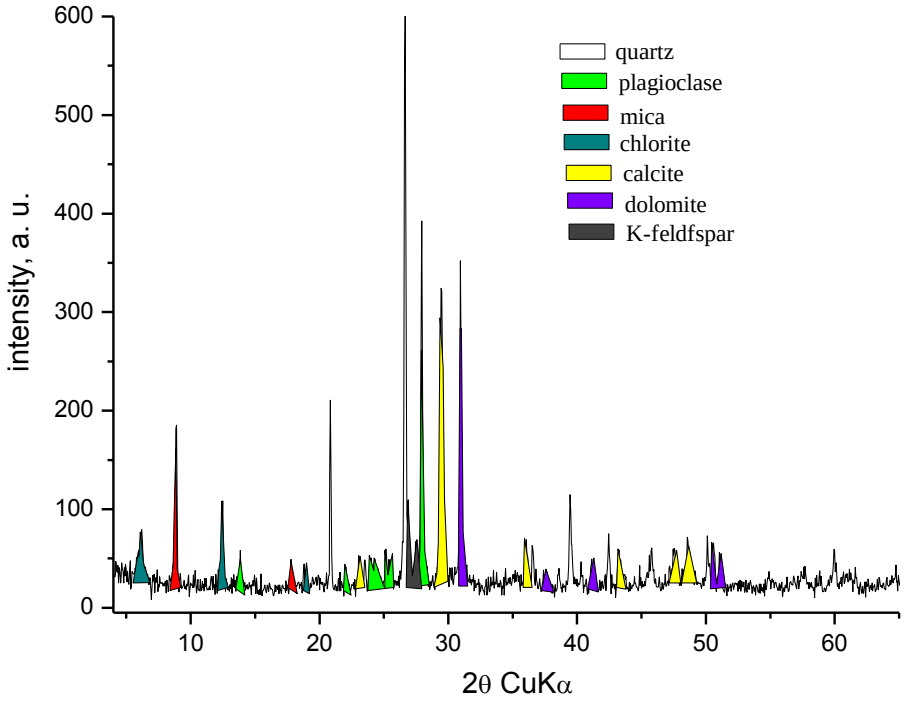
Ορυκτό	**Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.)**	**Χημικός σύσταση**	**% κ.β.**
Ασβεστίτης	45	CaO	18
Δολομίτης	16	MgO	7
Χαλαζίας	12,5	SiO_2	43
Μοσχοβίτης	13	Fe_2O_3	1,72
		Al_2O_3	6,84
Χλωρίτης	2	K_2O	1,43
		Na_2O	1,34
Αλβίτης	10,5	MnO	0,07
		CO_2	19,8

Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά

Ο Τσιραμπίδης (1996) αναφέρει στοιχεία από τον Ψαμμίτη Δεματίου ως προς τα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά Ψαμμίτη Δεματίου (Τσιραμπίδης, 1996).

Φαινόμενο βάρος (MPa)	26,1
Υδαταπορροφητικότητα (%)	1,06
Θλιπτική αντοχή (MPa)	68,9
Αντοχή σε Κάμψη (MPa)	6,21
Αντοχή στη φθορά από τριβή (mm)	4,45



Σχήμα 21. Περιθλασιόγραμμα XRD για τον Ψαμμίτη Δεματίου, (Bulgarian Academy of Sciences, 2015).

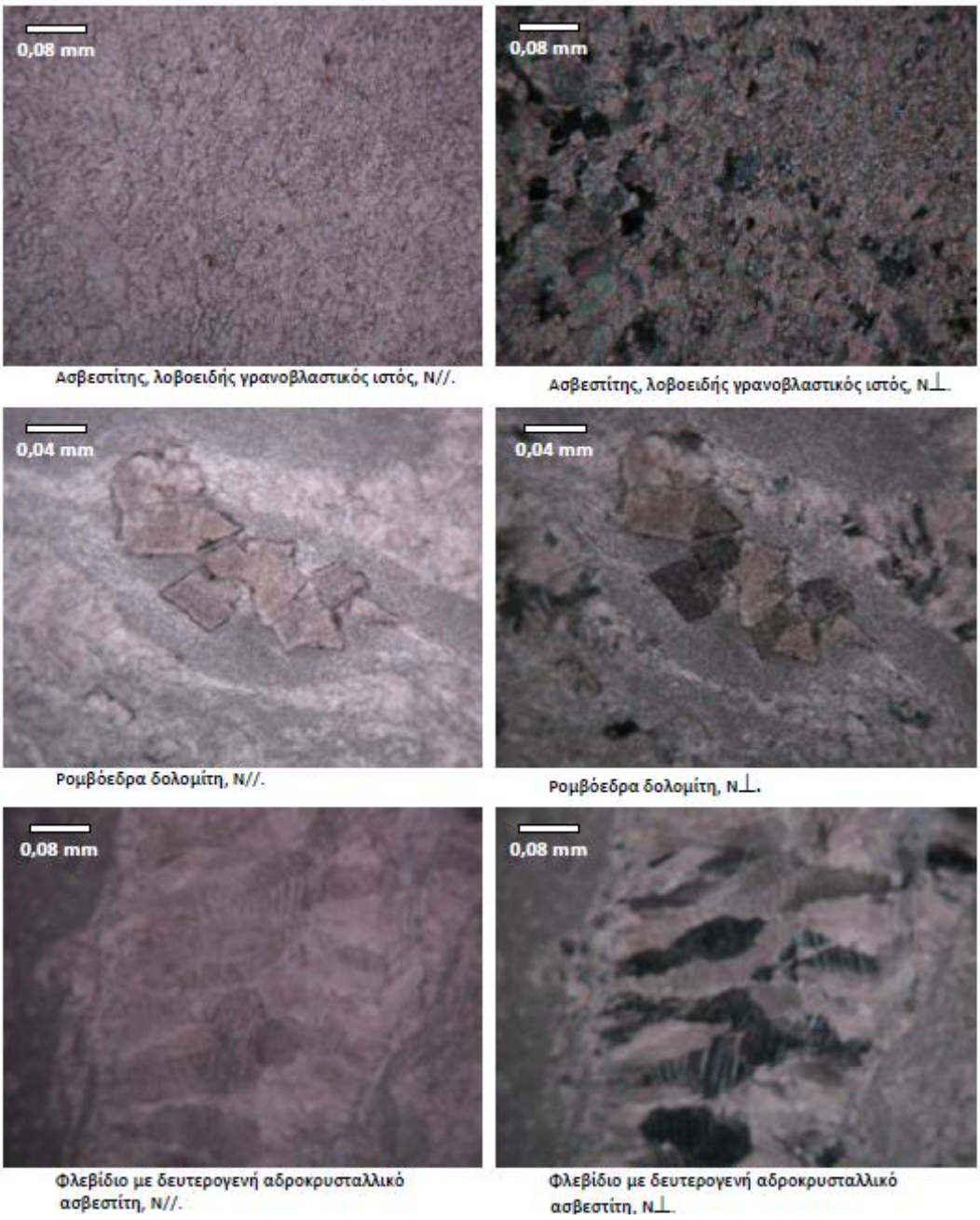
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ

Ο ασβεστόλιθος Μεσαίου αποτέλεσε το δεύτερο ιζηματογενή πέτρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του εργαστηριακού προγράμματος. Όλα τα παρακάτω ορυκτολογικά και πετρογραφικά στοιχεία προέρχονται από δεδομένα της Lafarge Beton ABEE στο λατομείο της στο Μεσαίο Θεσσαλονίκης.

Πετρογραφικά στοιχεία

Ο Ασβεστόλιθος Μεσαίου χαρακτηρίζεται μακροσκοπικά από συμπαγής δομή, ιδιαίτερα υψηλή συνεκτικότητα, τεφρό έως τεφρόμαυρο χρώμα και εμφανίζει διάσπαρτα δευτερογενή φλεβίδια πληρωμένα με λευκό υλικό που πιθανόν είναι δευτερογενής ασβεστίτης. Από τη μικροσκοπική μελέτη προέκυψε ότι το εξεταζόμενο πέτρωμα αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη, ο οποίος εμφανίζεται αρκετά λεπτομερείς στην κύρια μάζα και ιδιαίτερα αδρομερής στα φλεβίδια. Επιπλέον, κατά θέσεις και σε συσχέτιση κυρίως με τα δευτερογενή φλεβίδια, αναγνωρίστηκαν ιδιόμορφοι ρομβοεδρικοί κρύσταλλοι δολομίτη (Εικόνα 6). Η υφή του πετρώματος χαρακτηρίζεται ως ισότροπη, δεν παρουσιάζει φολίδωση και ο ιστός του χαρακτηρίζεται ως λοβοειδής γρανοβλαστικός όσον αφορά την κύρια μάζα και πολυγωνικός γρανοβλαστικός όσον αφορά τα φλεβίδια. Δεν παρατηρούνται εξαλλοιώσεις ή οξειδώσεις. (Καντηράνης, 2014)

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 6. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του Ασβεστόλιθου Μεσαίου (Καντηράνης, 2014).

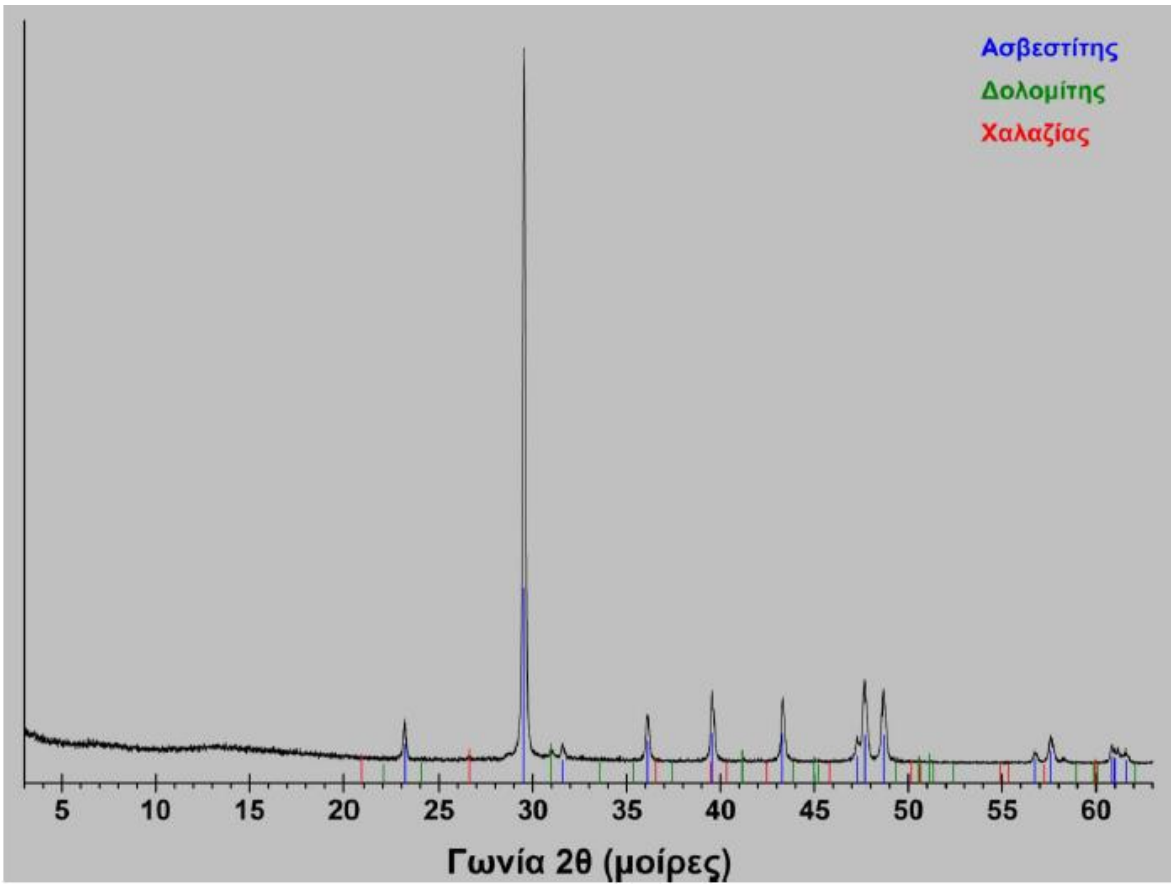
Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Folk (1959) το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως βιοσπαριτικός ασβεστόλιθος, ενώ σύμφωνα με τον Dunham (1962) ως κρυσταλλικός ασβεστόλιθος.

Ορυκτολογική σύσταση

Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης με τη μέθοδο XRD, ενώ στην εικόνα 10 δίνεται το περιθλασιόγραμμα του ασβεστόλιθου.

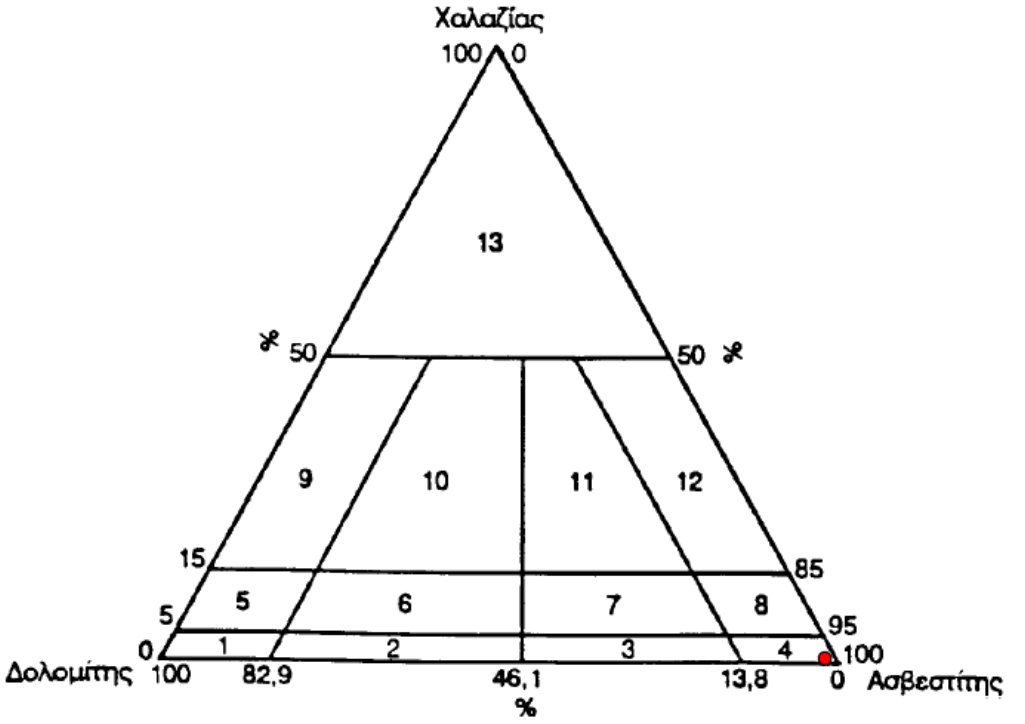
Πίνακας 9. Ορυκτολογική σύσταση(% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος με περιθλασιμετρία ακτίνων – Χ και ισοδύναμο MgO (Καντηράνης, 2014).

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.	Ισοδύναμο MgO (% κ.β.)
Ασβεστίτης	$CaCO_3$	99,0	-
Δολομίτης	$MgCa(CO_3)_2$	0,8	0,21
Χαλαζίας	SiO_2	0,2	-



Σχήμα 22. Περιθλασιόγραμμα του Ασβεστόλιθου Μεσαίου (Καντηράνης, 2014).

Σύμφωνα με την εμπορική ταξινόμηση των πετρογραφικών τύπων των ασβεστολιθικών και δολομιτικών πετρωμάτων (Harben 1992) και λαμβάνοντας υπόψη την ορυκτολογική σύσταση του εξεταζόμενου δείγματος το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως ασβεστόλιθος. (Σχήμα 23)



1: Δολομίτης, 2: Ασβεστιτικός δολομίτης, 3: Μαγνησιούχος ασβεστόλιθος, 4: Ασβεστόλιθος, 5: Δολομίτης που περιέχει 5-15% SiO_2, 6: Ασβεστιτικός δολομίτης που περιέχει 5-15% SiO_2, 7: Μαγνησιούχος ασβεστόλιθος που περιέχει 5-15% SiO_2, 8: Ασβεστόλιθος που περιέχει 5-15% SiO_2, 9: Πυριτιούχος δολομίτης (15-50% SiO_2), 10: Πυριτιούχος ασβεστιτικός δολομίτης (15-50% SiO_2), 11: Πυριτιούχος μαγνησιούχος ασβεστόλιθος (15-50% SiO_2), 12: Πυριτιούχος ασβεστόλιθος (15-50% SiO_2), 13: Κερατόλιθοι ή χαλαζίτες.

Σχήμα 23. Πετρογραφικοί τύποι ασβεστολιθικών και δολομιτικών πετρωμάτων και ταξινόμηση του ασβεστόλιθου Μεσαίου (Harben, 1992).

3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

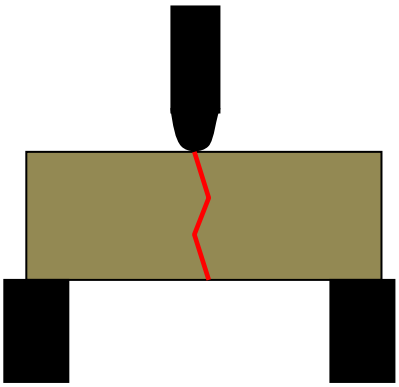
Η μεθοδολογία της λήψης των δειγμάτων ήταν η εξής: για τα μάρμαρα της Καβάλας και του Ψαμμίτη Δεματίου τα δείγματα προήλθαν από προμηθευτή λατομικών προϊόντων(επωνυμία: Κάρτας Μάρμαρο ΑΕΒΕ, Σίνδος). Η δειγματοληψία του ασβεστόλιθου πραγματοποιήθηκε στο λατομείο της Lafarge στο Μεσαίο Θεσσαλονίκης, ενώ για τον Γρανίτη Αρναίας από επιτόπου επίσκεψη στο ύπαιθρο.

Η δειγματοληψία έγινε με τρόπο ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό του σχηματισμού από τον οποίο προέρχεται. Επίσης, εφόσον η δειγματοληψία έγινε με σκοπό τον εργαστηριακό προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος, το δείγμα έπρεπε να είναι όσο είναι δυνατόν υγιές, χωρίς σημεία αποσάθρωσης και χωρίς ασυνέχειες. Η δειγματοληψία του γρανίτη και του ασβεστόλιθου πραγματοποιήθηκε σε επιφανειακές εμφανίσεις των πετρωμάτων και για αυτό το λόγο χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή. Δόθηκε σημασία στην αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος ως προς το σχηματισμό από τον οποίο προέρχεται. Έτσι, εκεί όπου κρίθηκε σκόπιμο, δηλαδή η εμφάνιση του εν λόγω σχηματισμού παρουσίαζε διαφοροποίηση σε όλη της την έκταση, ελήφθησαν περισσότερα από ένα δείγματα. Τα δείγματα του γρανίτη και του ασβεστόλιθου αποκολλήθηκαν από τη βραχομάζα σε μορφή που να προσεγγίζει τον κύβο διαστάσεων τουλάχιστον 40 x 40 cm. Από κάθε δείγμα που μεταφέρθηκε στο εργαστήριο διαμορφώθηκαν δοκίμια για τον εργαστηριακό προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του βραχώδους υλικού. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως από το ίδιο δείγμα διαμορφώθηκαν δοκίμια για μονοαξονική και τριαξονική θλίψη καθώς και για άμεση διάτμηση ασυνεχειών πετρωμάτων.

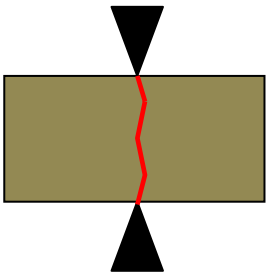
Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν και εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης με εργαστηριακό εξοπλισμό που περιγράφεται στη συνέχεια.

Η δημιουργία των ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε είτε με υποβολή πρισμάτων πετρώματος σε κάμψη (Εικόνα 7), είτε με εφελκυστική διάρρηξη με τη χρήση δυο γωνιακών ελασμάτων μέσω των οποίων εφαρμόστηκε το απαιτούμενο γραμμικό φορτίο σε προδιαμορφωμένη εγκοπή κατά πλάτος του δοκιμίου(Εικόνα 8). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δημιουργούμενες ασυνέχειες να είναι οι πολύ τραχειές και να αντιπροσωπεύουν το άνω όριο της τραχύτητας που είναι δυνατό να απαντηθούν στο ύπαιθρο.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 7. Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψης.



Εικόνα 8. Εφελκυστική διάρρηξη **.**

Για τα κυλινδρικά δοκίμια της μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκε αδαμαντοτρύπανο (απλή καροταρία) που είναι εφοδιασμένο με ειδικό κοπτικό άκρο λεπτού τοιχώματος με διαμάντια (Εικόνα 9). Εσωτερικά από το αδαμαντοτρύπανο διέρχεται νερό για την απομάκρυνση των θραυσμάτων πετρώματος και για την ψύξη του κοπτικού άκρου.

Εικόνα 9. Πυρηνοληψία πετρωμάτων.

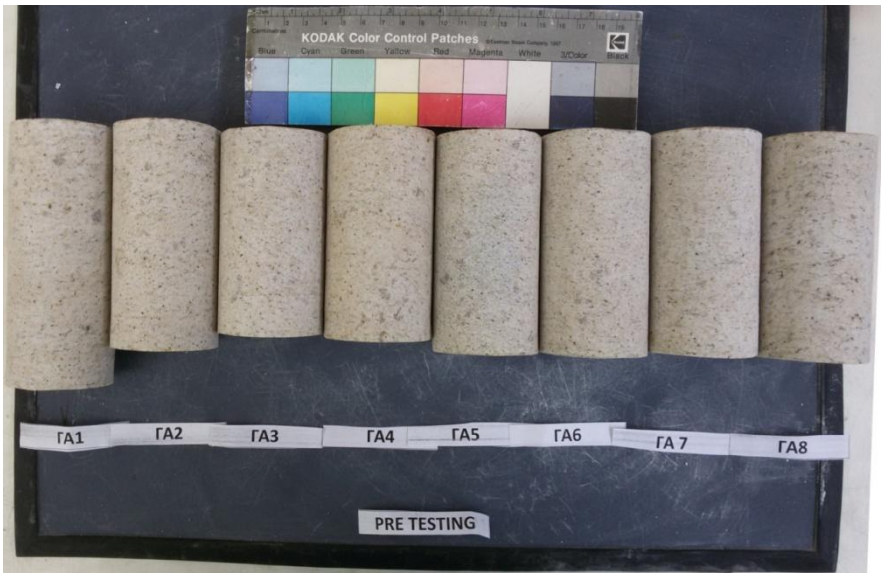
Επιπλέον, το βραχώδες δείγμα, πριν την τοποθέτησή του στην συσκευή της εργαστηριακής καροταρίας διαμορφώθηκε με τη βοήθεια αδαμαντοτροχού (Εικόνα 10), ώστε να υπάρχει λεία βάση για την καλύτερη έδραση στην τράπεζα και να διευκολύνεται στην χρήση το σύστημα συγκράτησης του δείγματος σε αυτή.

Εικόνα 10. Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού**.**

Από τη διάτρηση του κάθε πετρώματος προέκυψαν τουλάχιστον οκτώ (8) δοκίμια (Εικόνα 13) τα οποία, αφού ελέγχθηκαν για την παρουσία εμφανών μικρορωγμών, αποκόπηκαν και λειάνθηκαν στα άκρα με την χρήση αδαμαντοτροχού και συσκευής λείανσης (Εικόνα 11 ,12).

Εικόνα 11. Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος .

Εικόνα 12. Συσκευή λείανσης δοκιμίων.



Εικόνα 13. Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων γρανίτη Αρναίας.

3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της αντοχής σε τριαξονική θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων ορθού κυλινδρικού σχήματος. Η δοκιμή αυτή δίνει τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της γωνίας εσωτερικής τριβής φ και της συνοχής c του πετρώματος. Τέλος, οι τιμές της αντοχής όπως προσδιορίζονται με την παραπάνω μέθοδο δίνονται σε τιμές ολικών τάσεων, γιατί δεν υπάρχει πρόβλεψη για την μέτρηση της πίεσης πόρων.

Προετοιμασία δοκιμής τριαξονικής θλίψης

Μετά την πυρηνοληψία των δοκιμίων και τη διαμόρφωση τους με τον κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, τα δοκίμια θα πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους προς διάμετρο (H/D) ίσο με 2,0 με απόκλιση αυτού του λόγου κατά 3%, σε αντίθετη περίπτωση το δοκίμιο θα πρέπει να απορρίπτεται. Επίσης, είναι απαραίτητο η διάμετρος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών του πετρώματος.

Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές με τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, επομένως οι συνθήκες αυτές της δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο έντυπο αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας $105^{o}\pm 5^{o}C$ για 24 ώρες.

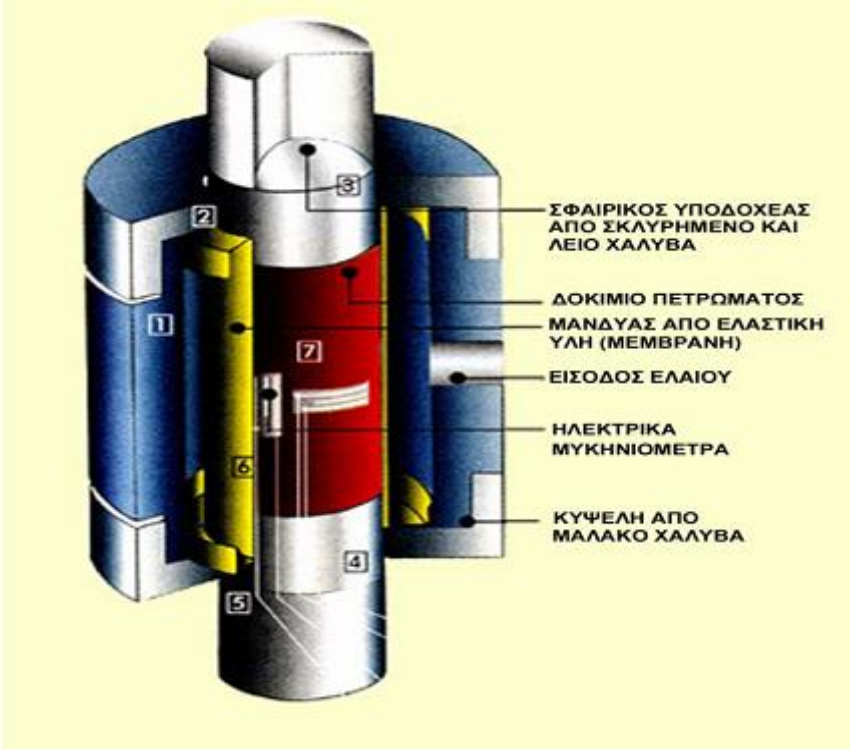
Ο αριθμός των δοκιμίων και των τιμών της πλευρικής πιέσεως εξαρτάται από τον σκοπό για τον οποίο γίνονται οι δοκιμές. Συνιστάται πάντως τα δοκίμια να είναι περισσότερα από πέντε για κάθε δείγμα πετρώματος.

Εκτέλεση δοκιμής τριαξονικής θλίψης

Αρχικά τοποθετείται το δοκίμιο στο τριαξονικό κελί Hoek (Hoek cell) και ακολουθείται η διαδικασία όπως περιγράφεται στην Εικόνα 16. Στη συσκευή αυτή τοποθετούνται τα δοκίμια αφού πρώτα τοποθετηθεί μία αδιαπέρατη εύκαμπτη μεμβράνη ως περίβλημα μέσω της οποίας ασκείται η πλευρική πίεση στο δοκίμιο χωρίς να υπάρχουν διαρροές υδραυλικού υγρού στο δοκίμιο. Επίσης, το κελί είναι εξοπλισμένο με δύο χαλύβδινες πλάκες με σφαιρικές εδράσεις που προσαρμόζονται στις άκρες του δοκιμίου οι οποίες έχουν σκληρότητα κατά Rockwell όχι

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

μικρότερη από HRC 58. Μια ακόμη προδιαγραφή που θα πρέπει να έχει το τριαξονικό κελί είναι να διαθέτει ένα κύλινδρο υψηλής πιέσεως, με κατάλληλες εισόδους για την πλήρη πλήρωσή του με το υδραυλικό υγρό, καθώς επίσης και μια βαλβίδα διαφυγής του αέρα. Σημειώνεται πως το όριο πλευρικής πίεσης του Hoek cell είναι στα 70 MPa.



Σχήμα 24. Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (ELE INTERNATIONAL).

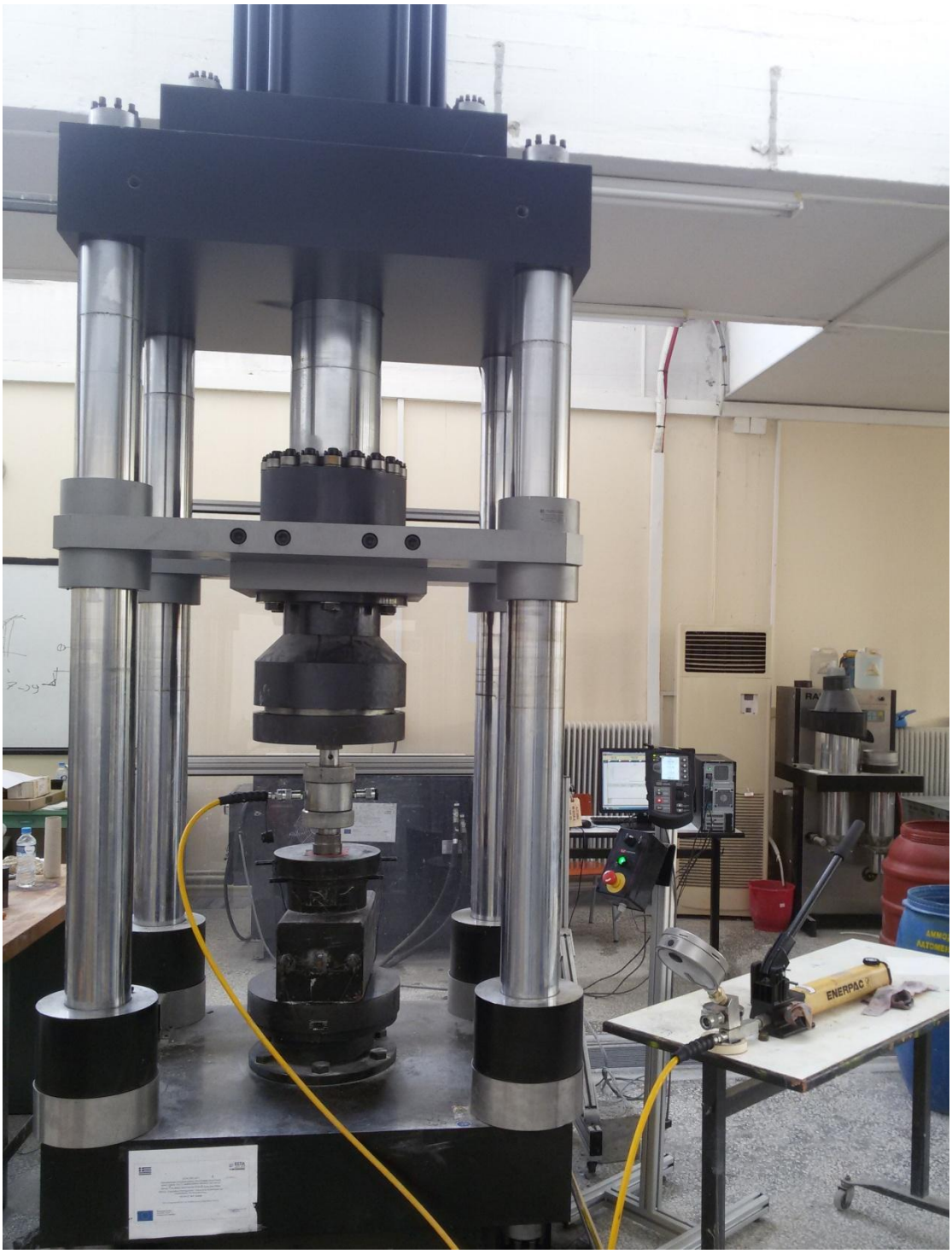
Στην συνέχεια γεμίζει το κελί με το υδραυλικό λάδι και απομακρύνεται ο εγκλωβισμένος αέρας από τη βαλβίδα εξαγωγής. Έπειτα κλείνει η βαλβίδα και εξασκείται μια μικρή πλευρική πίεση για να συγκρατήσει το σύστημα των πλακών και του δοκιμίου στο διάστημα μεταξύ των πλακών της μηχανής φορτίσεως και ασκείται ένα χαμηλό αξονικό φορτίο ενώ γίνεται ταυτόχρονα πραγματοποιείται ευθυγράμμιση του κελιού με τον άξονα φορτίσεως. Έπειτα, αυξάνεται προοδευτικά και ομοιόμορφα το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση ώστε να εξασφαλίζεται υδροστατική φόρτιση και μέχρι η αξονική και πλευρική πίεση να γίνουν ίσες με την τελική επιθυμητή πλευρική πίεση. Μετά, αυξάνεται συνεχώς και βαθμιαία το αξονικό φορτίο ενώ η πλευρική πίεση διατηρείται σταθερή με απόκλιση από την επιθυμητή τιμή μικρότερη του 2%.

Η ταχύτητα φορτίσεως πρέπει να είναι τέτοια ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει μέσα σε 5-15 min από την αρχή της φορτίσεως ή η τιμή της να κυμαίνεται από 0,5 - 1,0 MPa/sec. Επίσης η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης. Στην περίπτωσή μας

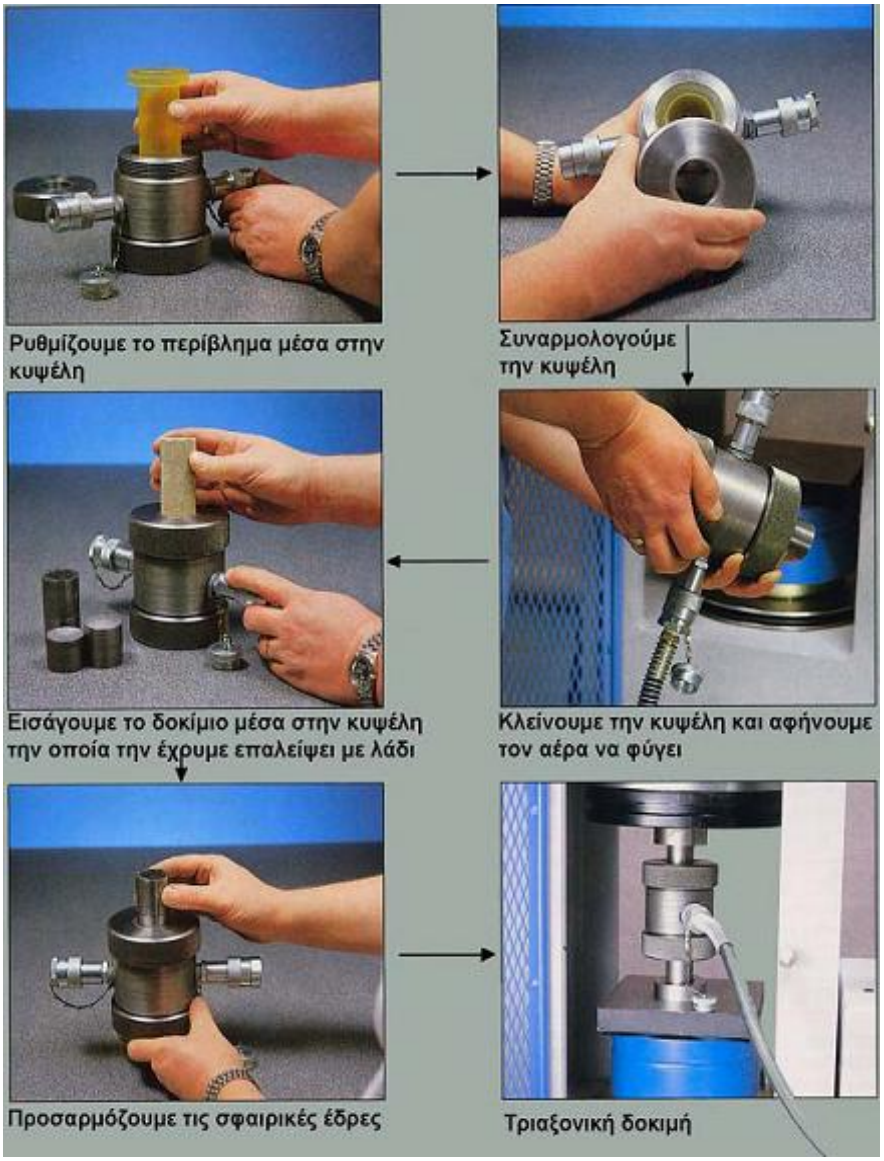
επιλέχθηκε για λόγους σύγκρισης με άλλα βιβλιογραφικά δεδομένα ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης (ΔΗ/Ηο) 10^{-4} έως 10^{-5} ανά δευτερόλεπτο.

Η τιμή της πλευρικής πιέσεως και του αξονικού φορτίου θραύσεως καθώς και του παραμένων φορτίου αναγράφονται στο δελτίο της δοκιμής.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 14. Διάταξη τριαξονικής θλίψης.



Εικόνα 15. Διαδικασία για τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης (ELE INTERNATIONAL).

Υπολογισμοί

Η αντοχή του δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη υπολογίζεται δια διαιρέσεως του μεγίστου φορτίου που επιβλήθηκε στο δοκίμιο με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}$$

Όπου,

σ_1 αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου σε MPa.

P μέγιστο αξονικό φορτίο σε kN .

A εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε mm^2.

Η τιμή της αξονικής τάσης σ_1 αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο εφόσον αυτό αστοχεί ψαθυρά. Όταν όμως βρίσκεται στην πλαστική περιοχή η τιμή της σ_1 δεν αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο αλλά στο σημείο που αλλάζει η σταθερή αύξηση του φορτίου με την βράχυνση σε μεταβαλλόμενη.

Εκτός από την αντοχή του δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη χρειάζεται και η παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου. Αυτή υπολογίζεται δια διαιρέσεως του παραμένοντος φορτίου μετά την θραύση με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_r = \frac{P_r}{A}$$

Όπου,

σ_r παραμένουσα αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου σε MPa.

P_r παραμένων αξονικό φορτίο σε kN .

A εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε mm^2.

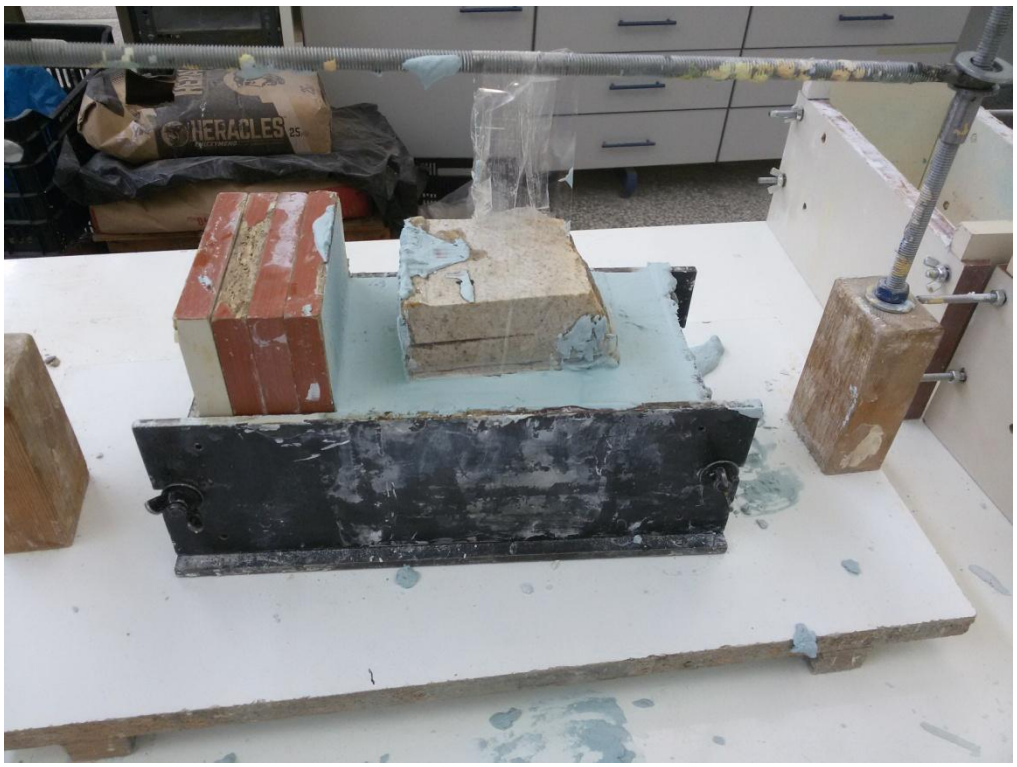
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

3.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής του πετρώματος όπως βρίσκεται επί τόπου και μάλιστα κατά προκαθορισμένη επιφάνεια κρίσιμη για το υπολογιζόμενο έργο (π.χ. ασυνέχειες).

Προετοιμασία διάταξης δοκιμίου

Πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή διάτμησης το δοκίμιο εγκιβωτίζεται σε ειδικά καλούπια (Εικόνα 16, 17) πλήρως οριζοντιωμένα και κεντραρισμένα ώστε να δέχονται ομοιόμορφα την τάση τοποθετημένα στην πρέσα διάτμησης, αυτό γίνεται με την βοήθεια οδοντιατρικής γύψου ταχείας πήξεως και αντοχής μεγαλύτερης από 30 MPa με αυστηρά καθορισμένες αναλογίες νερού και κονίας. Τα καλούπια είναι δύο, το ένα χρησιμοποιείται για τον εγκιβωτισμό του κάτω τμήματος και το δεύτερο για τον εγκιβωτισμό του άνω τμήματος της ασυνέχειας.

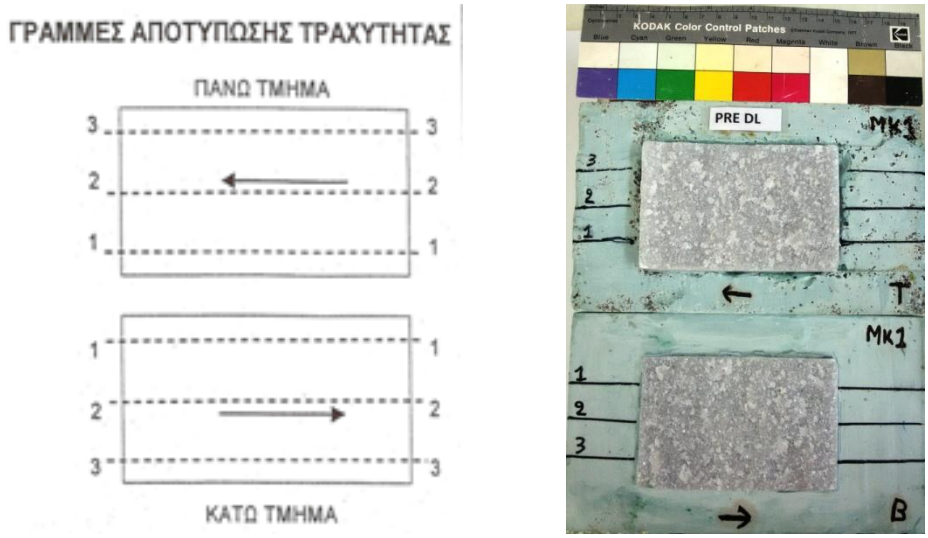


Εικόνα 16. Εγκιβωτισμός του κάτω μέρους δοκιμίου.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Εικόνα 17. Εγκιβωτισμός του πάνω μέρους δοκιμίου.

Μετά την πήξη της γύψου και έχει δημιουργηθεί το δοκίμιο χαράσσονται 3 γραμμές όπως φαίνονται στην Εικόνα 18.



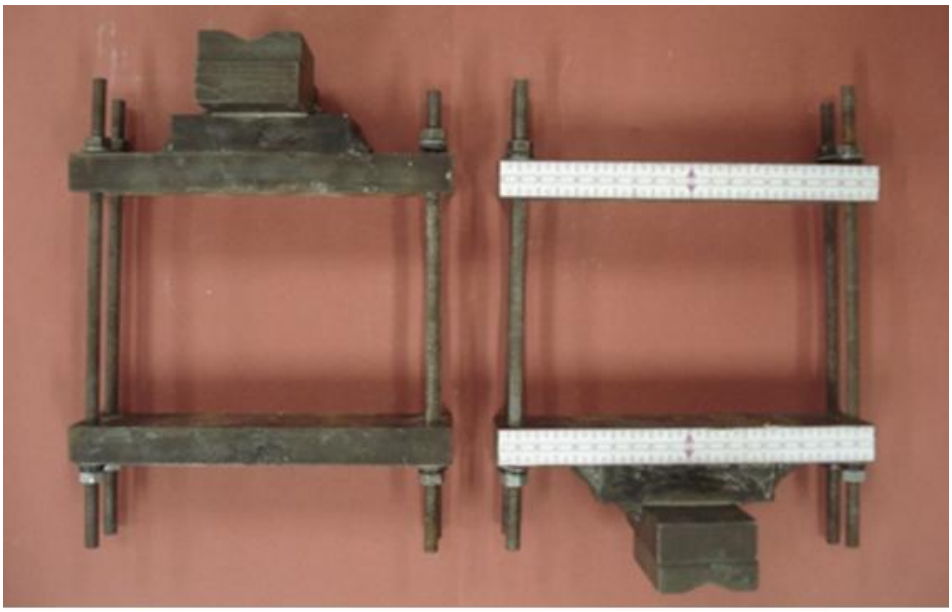
Εικόνα 18. Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας.

Στην συνέχεια η επόμενη ενέργεια αφορά την αποτύπωση της τραχύτητας της ασυνέχειας πάνω στις τρεις γραμμές που έχουν αποτυπωθεί με την βοήθεια ενός προφιλόμετρου (Εικόνα 19).

Εικόνα 19. Προφιλόμετρο.

Η αποτύπωση της τραχύτητας πραγματοποιείται πριν και μετά από κάθε δοκιμή άμεσης διάτμησης και αναγράφεται η ορθή τάση στην οποία υποβλήθηκε. Έτσι πέρα από τον χαρακτηρισμό της ασυνέχειας, αποτυπώνονται και οι αποτμήσεις των προεξοχών στις αντίστοιχες τάσεις. Το σύνολο των καταγραφών των προφίλ τραχύτητας για κάθε δοκίμιο και στάδιο ορθής τάσης της παρούσας διατριβής παρατίθεται στο Παράρτημα.

Πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή διάτμησης το δοκίμιο τοποθετείται σε ειδικές μήτρες, άνω και κάτω τμήματος αντίστοιχα, με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσαρμογή του κατά τη διατμητική μετατόπιση. Στο πρώτο στάδιο τάση που πραγματοποιείται με μόνη ορθή δύναμη το ίδιο βάρος του δοκιμίου, χρησιμοποιούνται μήτρες από ελαφρύ υλικό plexiglass, ενώ για τα επόμενα στάδια ορθών τάσεων χρησιμοποιούνται χαλύβδινες (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Μήτρες δοκιμίων.

Τέλος, πριν και μετά από κάθε δοκιμή άμεσης διάτμησης φωτογραφίζεται το δοκίμιο και αναγράφεται η τάση στην οποία πρόκειται να υποβληθεί ή στην οποία υποβλήθηκε. Όλες οι φωτογραφίες των δοκιμίων της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Εκτέλεση δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

Η κυρίως διάταξη της δοκιμής άμεσης διάτμησης βράχου αποτελείται από τον δυναμοδακτύλιο (των 2, 10 ή 30 kN) ο οποίος έρχεται σε επαφή μέσω χαλύβδινης σφαίρας με το άνω μεταλλικό πλαίσιο του δοκιμίου και καταγράφει την διατμητική παραμόρφωση μέσω ενός οριζόντιου μηκυνσιομέτρου. Επίσης, υπάρχει ένα οριζόντιο μηκυνσιόμετρο που έρχεται σε επαφή με το κάτω μεταλλικό πλαίσιο του δοκιμίου και καταγράφει την οριζόντια (διατμητική) μετατόπιση. Επιπλέον, στο κάτω μεταλλικό πλαίσιο του δοκιμίου έρχεται σε επαφή το έμβολο της μηχανής TRISCAN 100 το οποίο επιβάλλει την διατμητική με σταθερή επιλεγόμενη ταχύτητα. Αντίστοιχα στο πάνω τμήμα του δοκιμίου, τοποθετούνται δύο κατακόρυφα μηκυνσιόμετρα εκ δεξιών και αριστερών του κέντρου του δοκιμίου, πάνω σε ειδικά σχεδιασμένο κάναβο. Όλες οι τιμές συλλέγονται μέσω του καταγραφικού MPX 3000, οι οποίες παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων με το πρόγραμμα WINHOST.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Εικόνα 21. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών βράχου.

Αρχικά τίθενται σε λειτουργία η μηχανή TRISCAN 100 για την εφαρμογή της διατμητικής δύναμης, ο επεξεργαστής MPX 3000 καθώς και ο υπολογιστής στον οποίο είναι συνδεδεμένα όλα τα παραπάνω(Εικόνα 21). Στην συνέχεια πραγματοποιείται η προετοιμασία του δοκιμίου με πρώτο στάδιο την τοποθέτηση του δοκιμίου σε μεταλλικά πλαίσια για ορθές τάσεις άνω των 5-6 KPa ή plexiglass για δοκιμές σε νεκρές(μόνο με το βάρος του δοκιμίου) ορθές τάσεις. Για την πρώτη δοκιμή άμεσης διάτμησης λειαίνεται η επιφάνεια της γύψου του πάνω μέρους του δοκιμίου με την χρήση σπάτουλας ώστε η επιφάνεια να είναι όσο το δυνατόν επίπεδη , διότι έρχονται σε επαφή τα μηκυνσιόμετρα μέτρησης της ορθής μετακίνησης. Στην συνέχεια ο διανομέας τοποθετείται στο κέντρο του πάνω μέρους του υλικού εγκιβωτισμού του δοκιμίου και σχεδιάζεται το περίγραμμα του. Ύστερα, πρέπει να σημειωθούν δυο σημεία εκατέρωθεν και σε απόσταση 1 cm από τα άκρα του πάνω μέρους υλικού εγκιβωτισμού του δοκιμίου, όπου θα έρθουν σε επαφή τα δύο μηκυνσιόμετρα, ώστε σε κάθε δοκιμή τα μηκυνσιόμετρα να τοποθετούνται στην ίδια θέση. Αφού πραγματοποιηθεί η δοκιμή με το πρώτο στάδιο ορθής τάσης (ίδιο βάρος), ασκείται στη συνέχεια η επόμενη ορθή τάση, η οποία ανάλογα με την τιμή της διακρίνεται σε δυο διαφορετικές διαδικασίες:

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Για τάση ≤100 KPa:

Γίνεται η τοποθέτηση του διανομέα εντός του περιγράμματος που είχε σχεδιαστεί κατά την προετοιμασία του δοκιμίου και στην συνέχεια τοποθετείται το πλαίσιο που στο κάτω μέρος του τοποθετούνται τα ανάλογα βάρη για να επιτευχθεί η αντίστοιχη τάση

Για τάση >100 KPa:

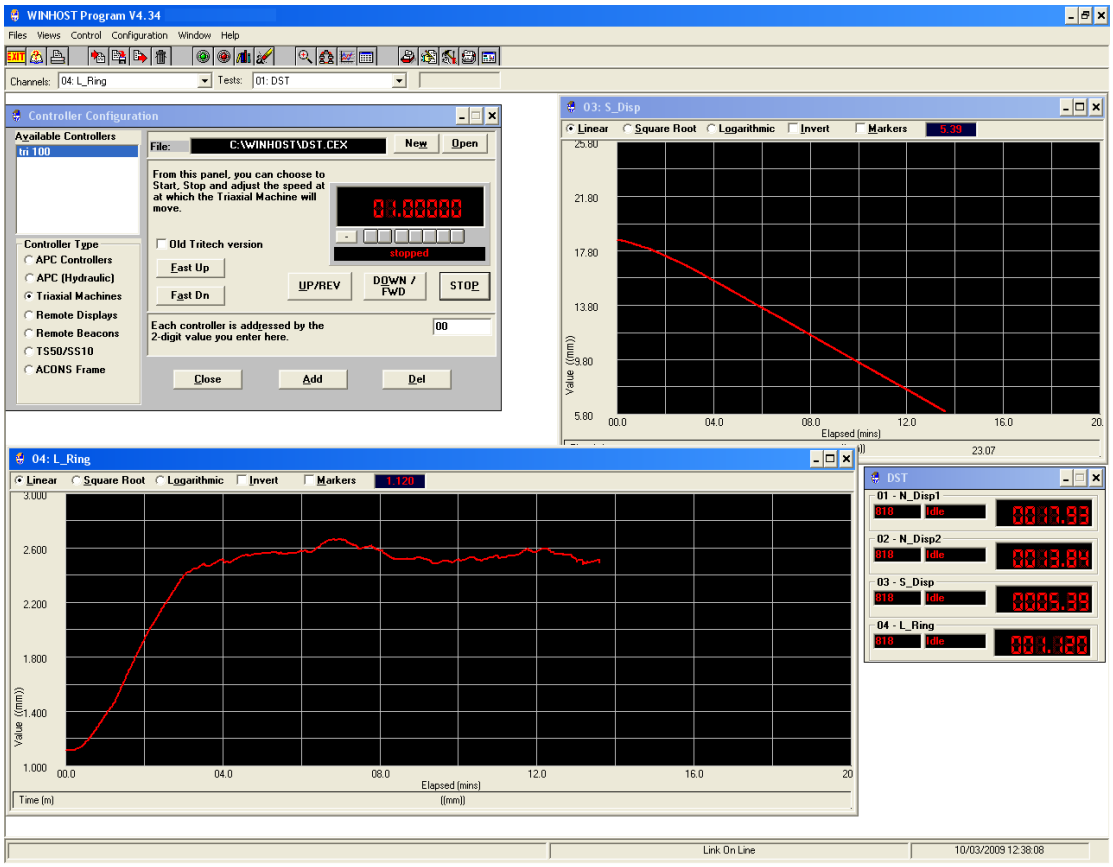
Το κεντράρισμα του δοκιμίου γίνεται ως προ το έμβολο της ορθής τάσης και μετά γίνεται η επιβολή της ορθής τάσης με τη βοήθεια της ανάλογης αντλίας σταθερής πίεσης (3,5 MPa - controls ή 70 MPa - ELE).

Τέλος είναι απαραίτητο να γίνεται σωστά η κέντρωση του δοκιμίου ως προς την οριζόντια διεύθυνση με άξονα αυτόν που δημιουργείται από το έμβολο του πλαισίου φόρτισης και από το δυναμοδακτύλιο. Για την εξασφάλιση της οριζόντιας διεύθυνσης τοποθετούνται παράλληλα του άξονα του δοκιμίου δύο μεταλλικές μπάρες πρισματικές ράβδοι χαμηλής τριβής .

DATALOGIC WINHOST V 4.34

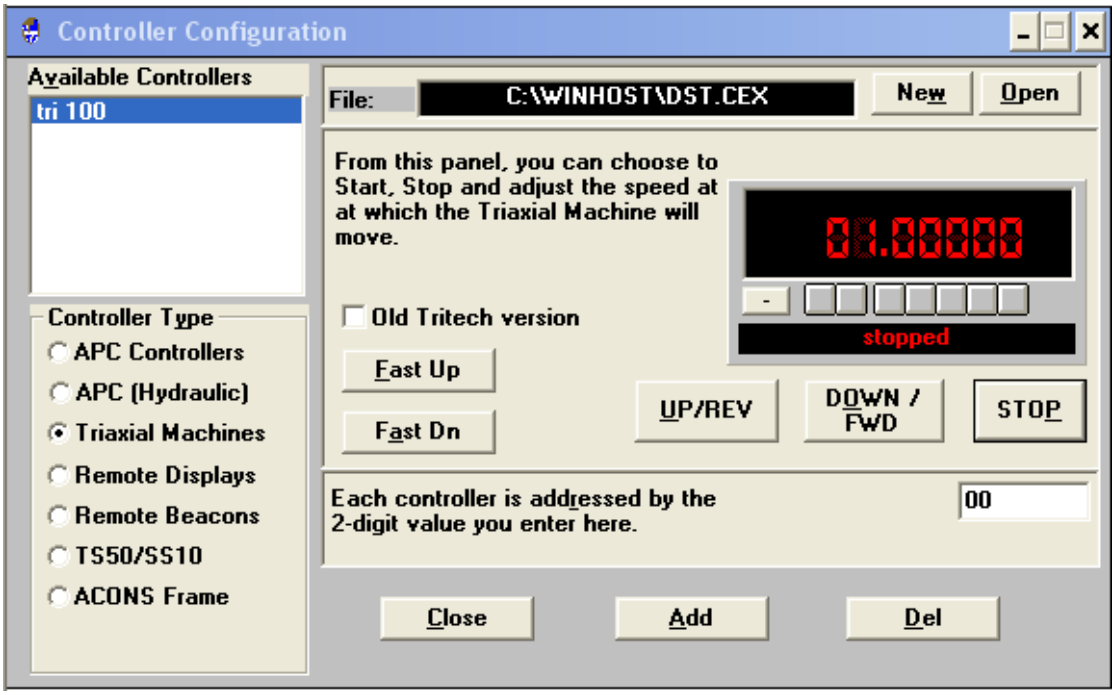
Για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πετρωμάτων η ψηφιοποίηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας την εφαρμογή WINHOST V 4.34 (Εικόνα 22) της Datalogic. Είναι μία εφαρμογή σε λειτουργικό περιβάλλον WINDOWS. Τις τιμές των δοκιμών τις ψηφιοποιεί μέσω του επεξεργαστή MPX 3000 το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τις παρουσιάζει με την μορφή διαγραμμάτων. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η παρακολούθηση και ο έλεγχος της πορείας της δοκιμής.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



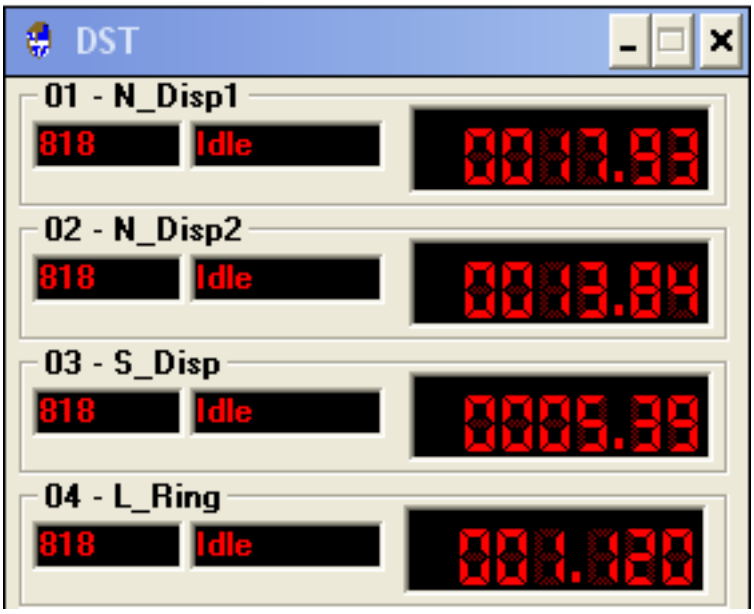
Εικόνα 22. Περιβάλλον WINHOST κατά την διάρκεια μιας δοκιμής άμεσης διάτμησης.

Συγκεκριμένα στο παράθυρο Configuration του αρχικού καταλόγου επιλογής και στην συνέχεια από τον υποκατάλογο η επιλογή controllers εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο από μία λίστα στα αριστερά του παραθύρου (Εικόνα 23) πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή controller. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται το Triaxial machines και πιο συγκεκριμένα την TRISCAN 100. Στα δεξιά του παραθύρου υπάρχει ένα πλαίσιο που ρυθμίζεται ο ρυθμός (ταχύτητα) με τον οποίο πρόκειται να πραγματοποιηθεί η δοκιμή με μονάδα μέτρησης mm/min (χιλιοστά ανά λεπτό). Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερό ρυθμό το 1 mm/min. Αριστερά του πλαισίου υπάρχουν δύο κουμπιά Fast Up και Fast Dn με τα οποία μετακινείται το έμβολο της TRISCAN 100 πίσω-μπρος ώστε να τοποθετηθεί το δοκίμιο σε ευθεία με τον δυναμοδακτύλιο. Τέλος, κάτω από το πλαίσιο υπάρχουν τρία κουμπιά, από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν μονό τα δύο, το UP/REV και το STOP όπου με το πρώτο αρχίζει η δοκιμή και με το δεύτερο τερματίζεται.



Εικόνα 23. Παράθυρο Controller Configuration.

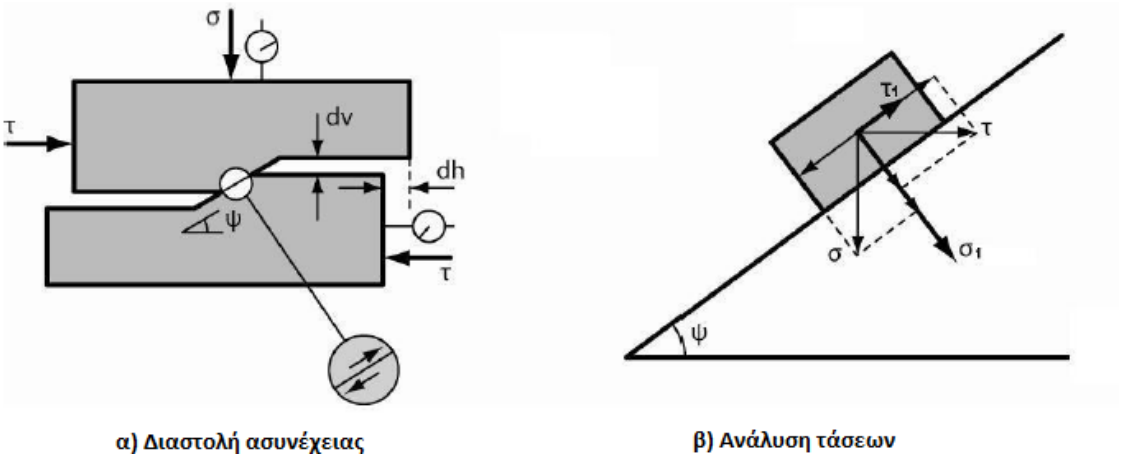
Τέλος, στο παράθυρο DST (Εικόνα 24) παρουσιάζονται τα τέσσερα μηκυνσιόμετρα (N_Disp1, N_Disp2 , S_Disp) και ο δυναμοδακτύλιος(L_Ring) που χρησιμοποιούνται κατά την δοκιμή. Τα μηκυνσιόμετρα(N_Disp1, N_Disp2) χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ορθής μετακίνησης του άνω τμήματος στα δυο άκρα του για τον προσδιορισμό της διαστολής. Το μηκυνσιόμετρο(S_Disp) για την καταγραφή της διατμητικής μετατόπισης και το (L_Ring) για την καταγραφή της παραμόρφωσης του δυναμοδακτυλίου. Αριστερά ο αριθμός 818 που απεικονίζεται σε κάθε ένα από τα παραπάνω, αναφέρεται στον αριθμό της μέτρησης ο οποίος μεταβάλλεται μέχρι το τέλος της δοκιμής ενώ στα δεξιά είναι οι τιμές που καταγράφονται αντίστοιχα. Η καταγραφή της κάθε μέτρησης έχει ρυθμιστεί να γίνεται ανά 5 δευτερόλεπτα. Αντίστοιχα για κάθε μηκυνσιόμετρο καθώς και για τον δυναμοδακτύλιο οι τιμές παρουσιάζονται συνολικά καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής με την μορφή διαγραμμάτων πατώντας την επιλογή Views της πάνω μπάρας των μενού και στην συνέχεια από το υπομενού την επιλογή Channels (π.χ. 01,02,03,04)



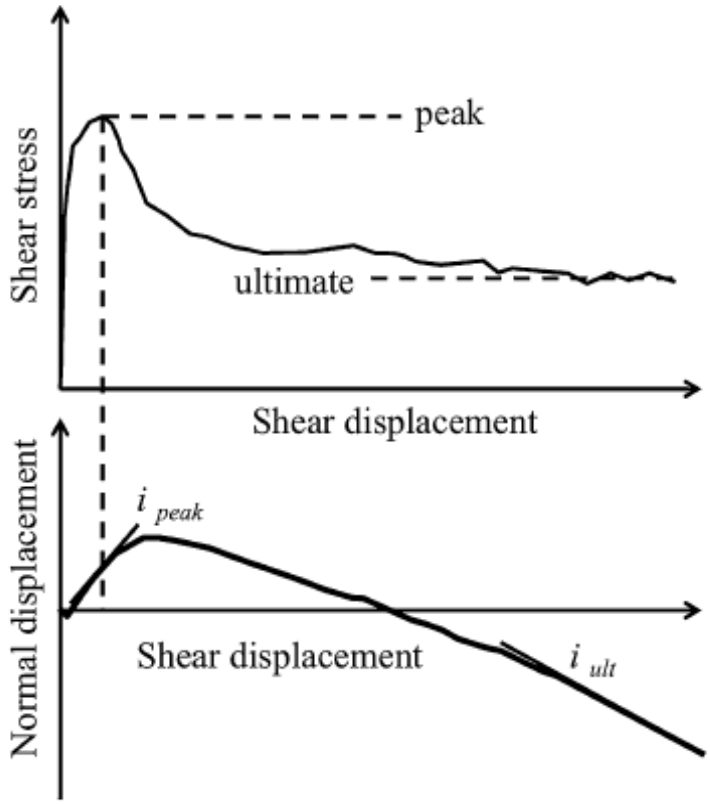
Εικόνα 24. Παράθυρο DST.

Υπολογισμοί

Για την εφαρμογή του κριτηρίου Papaliangas που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 απαιτείται ο προσδιορισμός τριών παραμέτρων. Αυτές είναι η γωνία τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ϕ_m , η μέγιστη γωνία κλίσης της επιφάνειας ψ_o και η τιμή της τάσης σ_{nT} για την οποία η διάτμηση καθίσταται αδιάσταλτη, δηλαδή η διαστολή μηδενίζεται. Αρχικά τα δοκίμια υποβάλλονται σε άμεση διάτμηση μόνο με την επίδραση του ιδίου τους βάρους, από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της μέγιστης γωνίας διαστολής που είναι πρακτικά ίση με την γωνία κλίσης ψ_o . Στο επόμενο στάδιο τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές άμεσης διάτμησης σε προκαθορισμένο εύρος ορθών τάσεων. Στις δοκιμές αυτές καταγράφονται η διατμητική και ορθή μετατόπιση καθώς και η διατμητική δύναμη. Με βάση τους Hencher & Richards (1989) η διατμητική κίνηση εξομοιώνεται με την κίνηση κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης ίση με τη στιγμιαία γωνία διαστολής (Σχήμα 26).



Σχήμα 25. Ανάγωγή ορθής και διατμητικής τάσης σε κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 26. Διαγράμματα διατμητικής μετατόπισης - διατμητικής τάσης και διατμητικής μετατόπισης - ορθής μετατόπισης. Υπολογίζεται η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή καθώς και η αντίστοιχη διαστολή.

Η ανάλυση τάσεων κατά τη διεύθυνση του κεκλιμένου επιπέδου και την κάθετό της δίνει:

$$\sigma_1 = (\sigma cos\psi - \tau sin\psi)cos\psi$$

$$\tau_1 = (\tau cos\psi - \sigma sin\psi)cos\psi$$

Όπου

ψ είναι η στιγμιαία γωνία διαστολής

τ είναι η τιμή της διατμητικής αντοχής που μετρήθηκε

σ είναι η ορθή τάση

$\boldsymbol{\tau_1}$ η διατμητική τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής

$\boldsymbol{\sigma_1}$ η ορθή τάση κατά μήκος κεκλισμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής

Η εύρεση της γωνίας ϕ_m προκύπτει ως γωνία κλίσης της βέλτιστης ευθείας γραμμής που προσαρμόζεται στα δεδομένα ενός διαγράμματος σ-τ στο οποίο έχουν παρασταθεί οι τιμές της διατμητικής τάσης τ_1 και της ορθής τάσης σ_1 για κάθε στάδιο.

Για την εύρεση της σ_{nT} αρκεί μόνο να παρασταθούν τα δεδομένα από μια απλή σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης σε ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα ορθής τάσης – ρυθμού διαστολής (logσ-tanψ), στην συνέχεια να προσαρμοστεί η βέλτιστη ευθεία στα δεδομένα και το σημείο που τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης δίνει την τιμή για την οποία η διαστολή μηδενίζεται.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Το πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής θλίψης περιελάμβανε τουλάχιστον οκτώ δοκίμια ανά πέτρωμα. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε μια και μοναδική πλευρική πίεση. Συγκεκριμένα, για τον Γρανίτη Αρναίας εκτελέστηκαν οκτώ δοκιμές τριαξονικής θλίψης και μια μονοαξονική. Για το Μάρμαρο Καβάλας εκτελέστηκαν δέκα τριαξονικές δοκιμές και δύο μονοαξονικές. Για τον Ψαμμίτη Δεματίου πραγματοποιήθηκαν εννέα τριαξονικές δοκιμές και μια μονοαξονική. Τέλος, για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου εκτελέστηκαν έντεκα τριαξονικές δοκιμές και μια μονοαξονική. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 38 δοκιμές τριαξονικής θλίψης και 4 μονοαξονικής θλίψης.

Σκοπός ήταν να καλυφθεί το εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ με πέντε τουλάχιστον σημεία τα οποία να ισαπέχουν, ώστε να βρεθεί η τιμή της σταθερά m_i με την βοήθεια του RocLab. Συμπληρωματικά έγιναν δοκιμές σε μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις ώστε να γίνει αξιολόγηση της ενδεχόμενης απόκλισης του κριτήριου Hoek & Brown από τις πραγματικές τιμές. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα έντυπο τριαξονικής θλίψης και τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για κάθε πέτρωμα στο οποίο απεικονίζεται το κριτήριο Hoek & Brown και η τιμή του m_i. Τα υπόλοιπα έντυπα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης παρατίθενται στο παράρτημα.

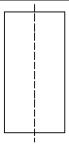
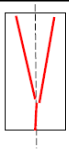
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
TRIAXIAL COMPRESSION TEST OF INTACT CORE ROCK SPECIMEN
(E103 - 84(4), ASTM D7012 - 14 A)

ΔΟΚΙΜΙΟ-SPECIMEN:
S9

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ/SAMPLE DESCRIPTION
ΨΑΜΜΙΤΗΣ ΔΕΜΑΤΙΟΥ

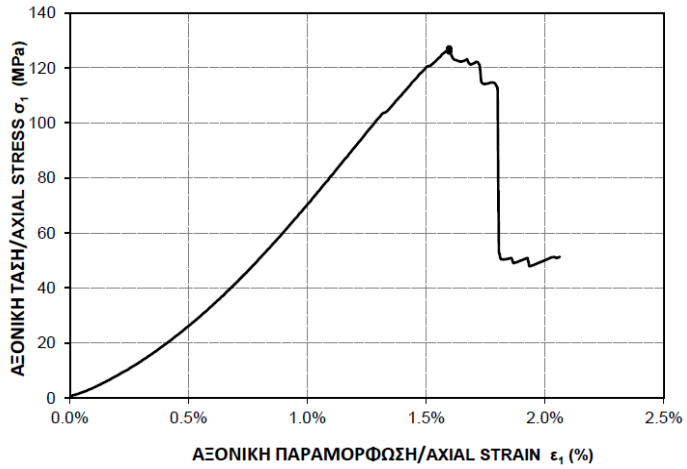
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ SAMPLE DATA		ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ RESULTS	
Do (mm) =	54.32	σ_3 (MPa) =	5.0
Ho (mm) =	109.71	F_1 (kN) =	292.0
W(g)=	667.00	σ_1 (MPa) =	126.0
γ (kN/m^3)=	26.24	σr (MPa) =	50.9
Υγρασία:	ΞΗΡΟ/~~ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ~~	ε_f (%) =	1.5970%
		E_{50} (GPa)=	9.90

ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ SAMPLE INTEGRITY		ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ/SKETCH	
		ΠΡΙΝ/ PRE	ΜΕΤΑ/POST
ΑΡΡΗΚΤΟ/INTACT	ΝΑΙ		
ΜΕ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ/WITH DISCONTINUITIES	ΟΧΙ		
ΤΥΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ/FAILURE TYPE			
ΧΑ	θ (°)= 10		

Διάρκεια δοκιμής/Test duration (s) : 685

Ρυθμός φόρτισης/Loading Rate (MPa/s): 0.18

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ-ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
AXIAL STRESS - AXIAL STRAIN DIAGRAM



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ/PHOTOS

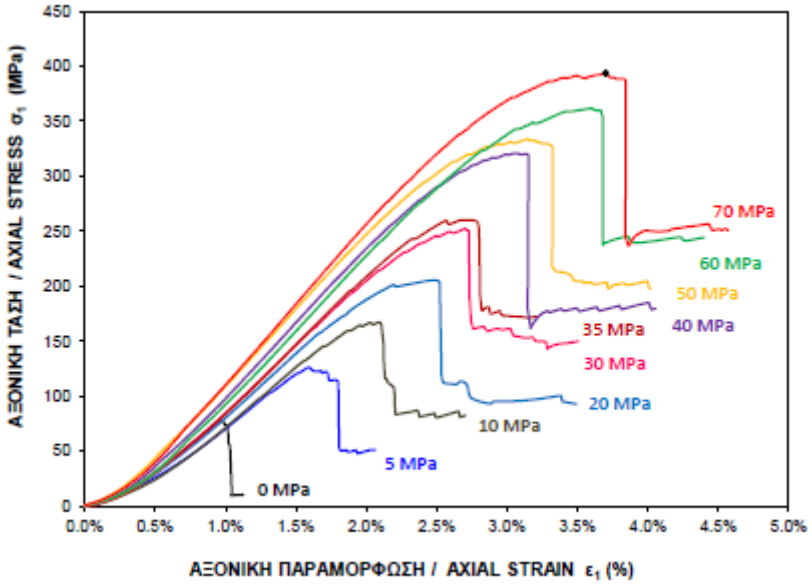
ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ/PRE-TESTING

ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ/POST-TESTING

ΕΡΓΟ/PROJECT: A.Tsikrikis MSc thesis

ΨΑΜΜΙΤΗΣ ΔΕΜΑΤΙΟΥ

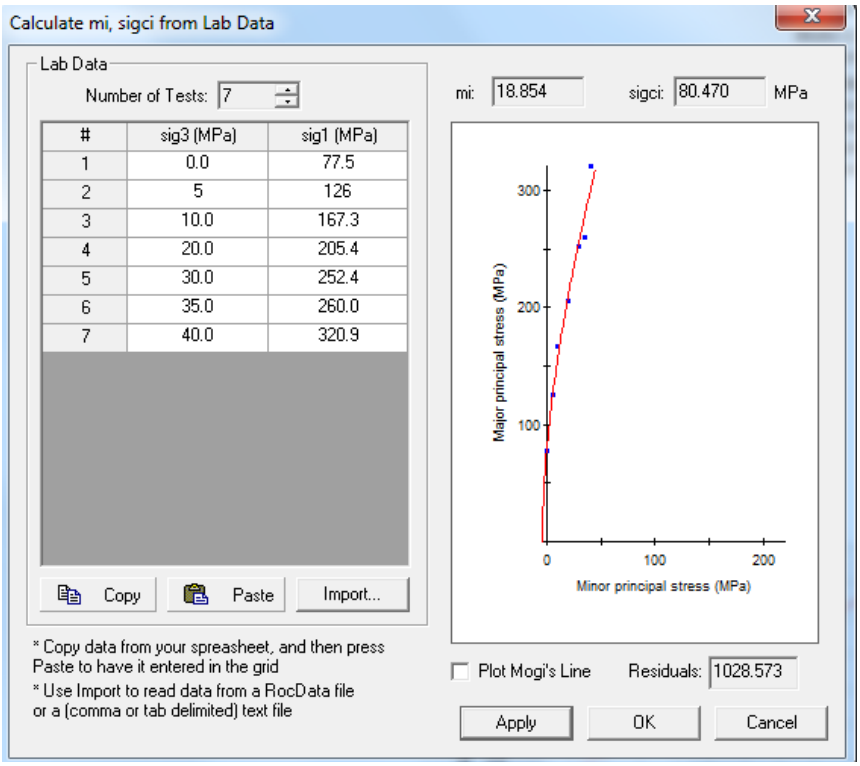
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο ψαμμίτης μέχρι τα 70 MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά και αυτό τεκμηριώνεται από την απότομη πτώση τάσης μετά την θραύση. Παρότι η πλευρική πίεση είναι πολύ κοντά στην τιμή της μονοαξονικής αντοχής του πετρώματος , αυτό δεν συμπεριφέρεται πλαστικά όπως θα αναμένονταν σύμφωνα με τον Hoek (1983).



Σχήμα 27. Διάγραμμα Αξονικής παρμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Ψαμμίτη Δεματίου.

Παρότι ο Ψαμμίτης Δεματίου σε όλο το εύρος πλευρικών πιέσεων που πραγματοποιήθηκε εμφάνισε ψαθυρή θραύση, για την εύρεση της σταθεράς m_i χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δοκιμές που πληρούσαν το εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$. Σύμφωνα με το RocLab η τιμή του m_i για τον Ψαμμίτη Δεματίου είναι 18,85, τιμή η οποία βρίσκεται μέσα στα προβλεπόμενα όρια για ψαμμίτη (17±4) που δίνονται από τους Marinos & Hoek (2000).

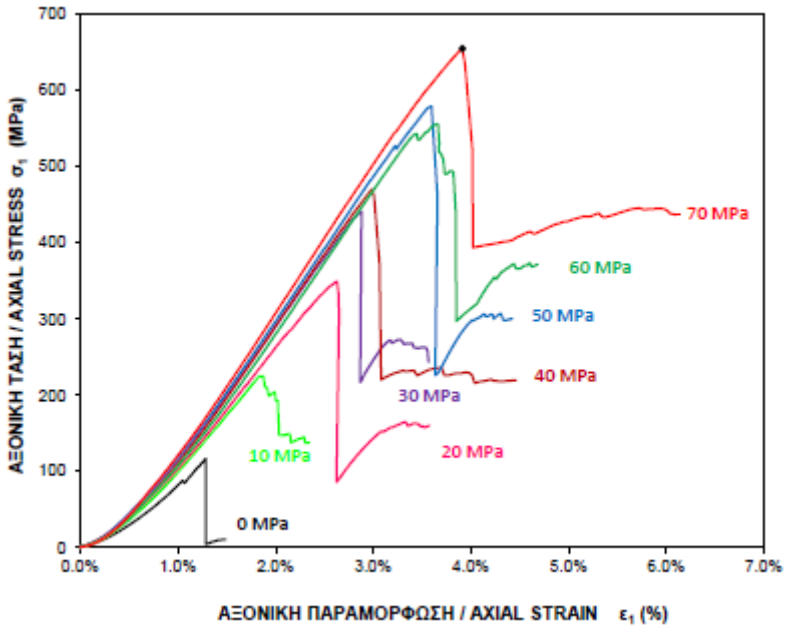
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 25. Εύρεση σταθεράς m_i για τον Ψαμμίτη Δεματίου.

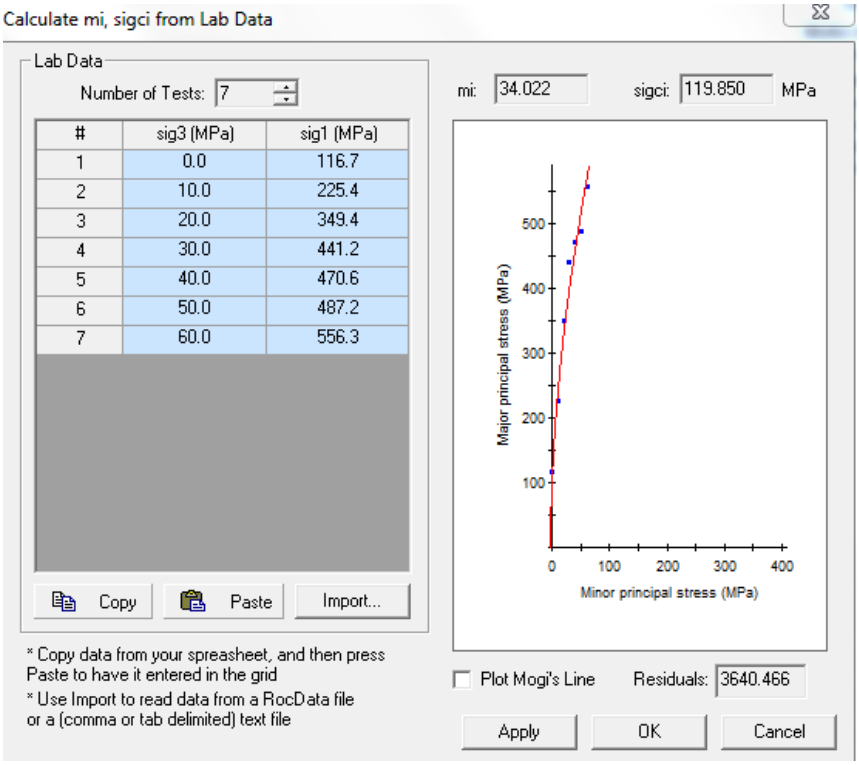
ΓΡΑΝΙΤΗΣ ΑΡΝΑΙΑΣ

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο Γρανίτης Αρναίας μέχρι τα 70MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά και αυτό τεκμηριώνεται από την πτώση τάσης μετά την θραύση.



Σχήμα 28. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Γρανίτη Αρναίας.

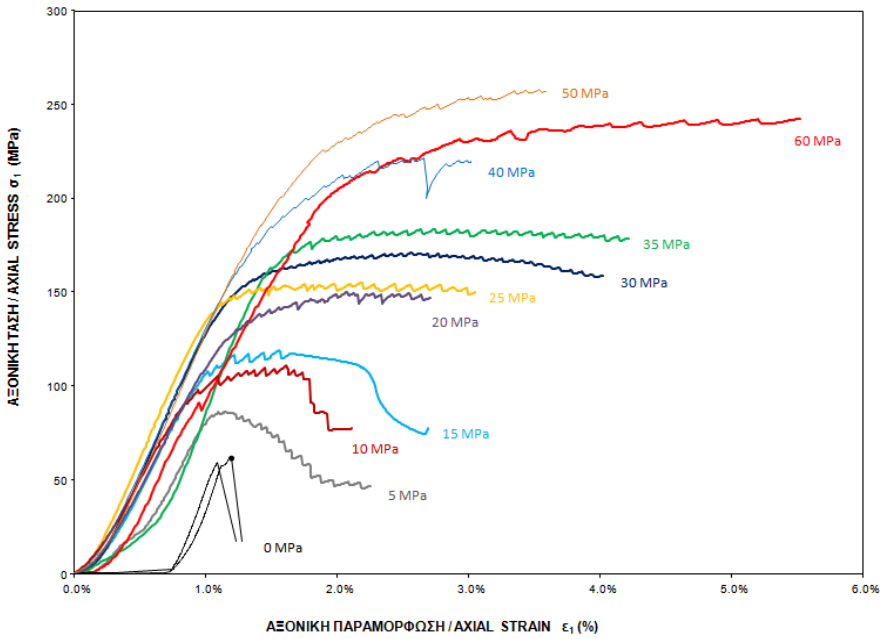
Για την εύρεση της σταθεράς m_i χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δοκιμές που πληρούσαν το ακόλουθο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$. Σύμφωνα με το RocLab η τιμή του m_i για τον Γρανίτη Αρναίας είναι 34, τιμή η οποία βρίσκεται μέσα στα προβλεπόμενα όρια για γρανίτη (32±3) που δίνονται από τους Marinos & Hoek (2000).



Εικόνα 26. Εύρεση σταθεράς m_i για τον Γρανίτη Αρναίας.

ΜΑΡΜΑΡΟ ΚΑΒΑΛΑΣ

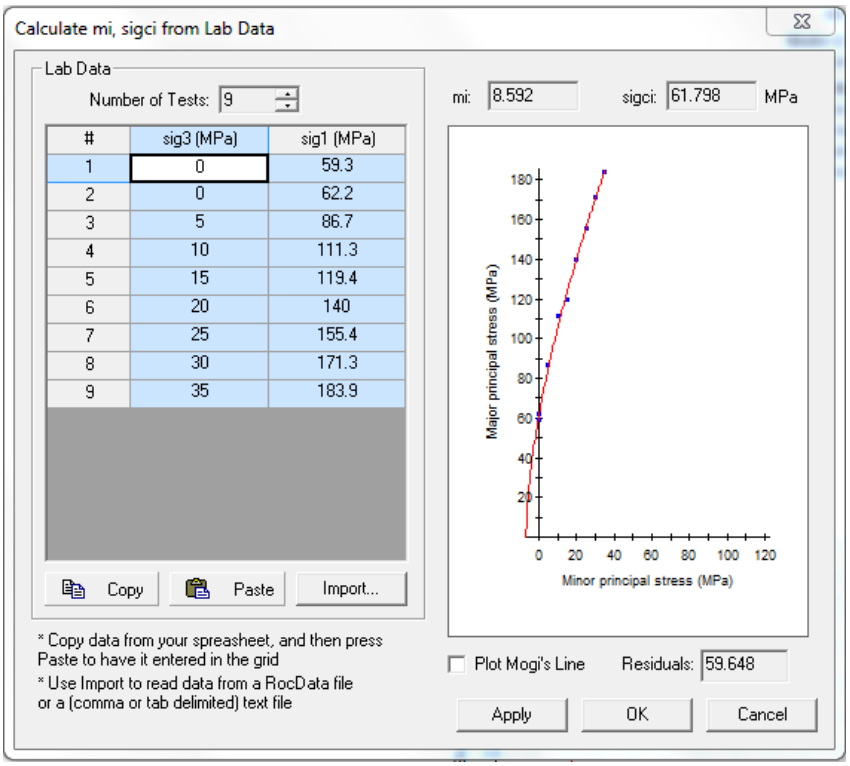
Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως το Μάρμαρο περίπου μέχρι τα 30 MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά. Στα 35 MPa βρίσκεται στην μετάβαση από ψαθυρή σε πλαστική συμπεριφορά.



Σχήμα 29. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για το Μάρμαρο Καβάλας.

Για την εύρεση της σταθεράς m_i χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δοκιμές που πληρούσαν το ακόλουθο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$. Σύμφωνα με το RocLab η τιμή του m_i για του Μαρμάρου Καβάλας είναι 8,59. Η τιμή αυτή επίσης βρίσκεται μέσα στα προβλεπόμενα όρια για μάρμαρο (9±3) που δίνονται από τους Marinos & Hoek (2000).

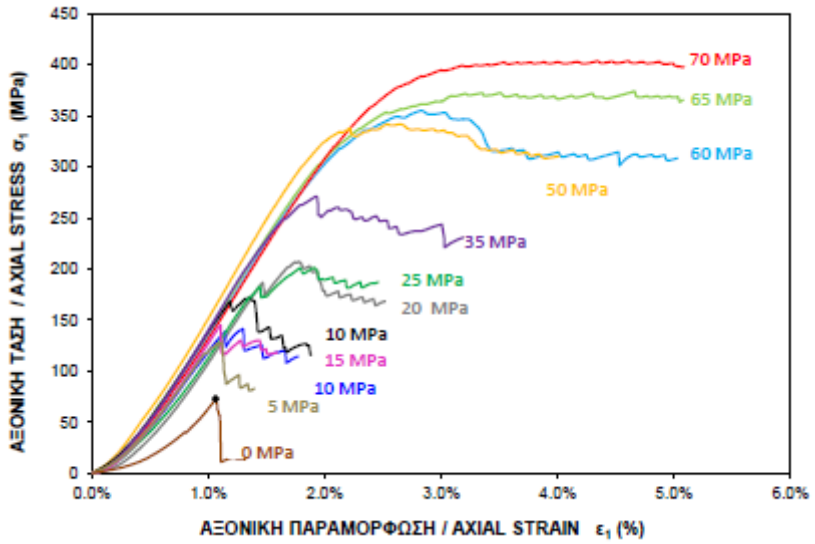
02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 27. Εύρεση σταθεράς mi για το Μάρμαρο Καβάλας.

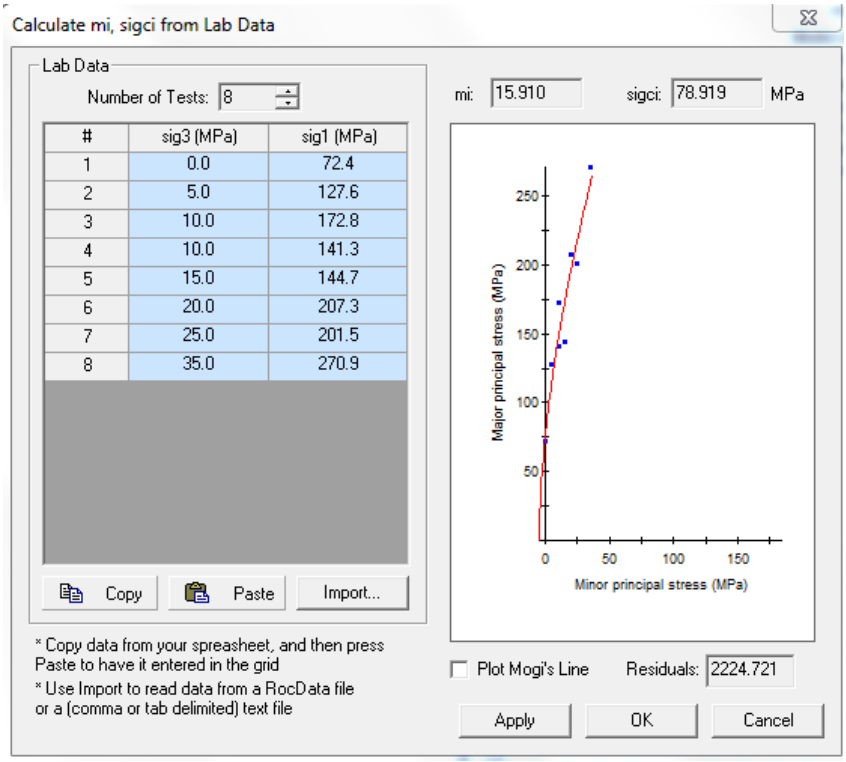
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ ΜΕΣΑΙΟΥ

Στο συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης-αξονική τάσης παρουσιάζονται όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης που ασκήθηκαν. Φαίνεται από το διάγραμμα πως ο Ασβεστόλιθος Μεσαίου περίπου μέχρι τα 60 MPa συμπεριφέρεται ψαθυρά. Η μετάβαση βρίσκεται στην περιοχή 65-70 MPa. Πάνω από αυτή την πλευρική τάση βρίσκεται στην πλαστική περιοχή.

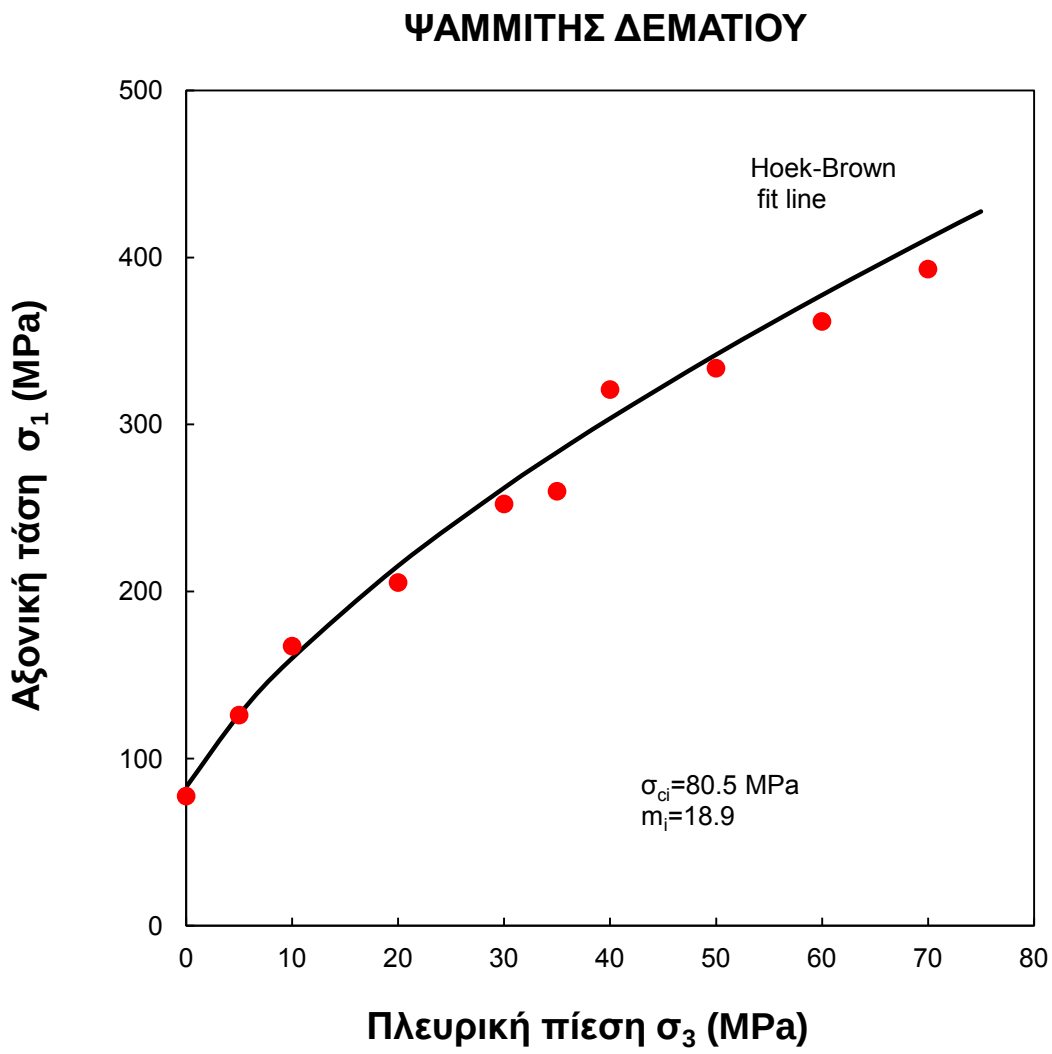


Σχήμα 30. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου.

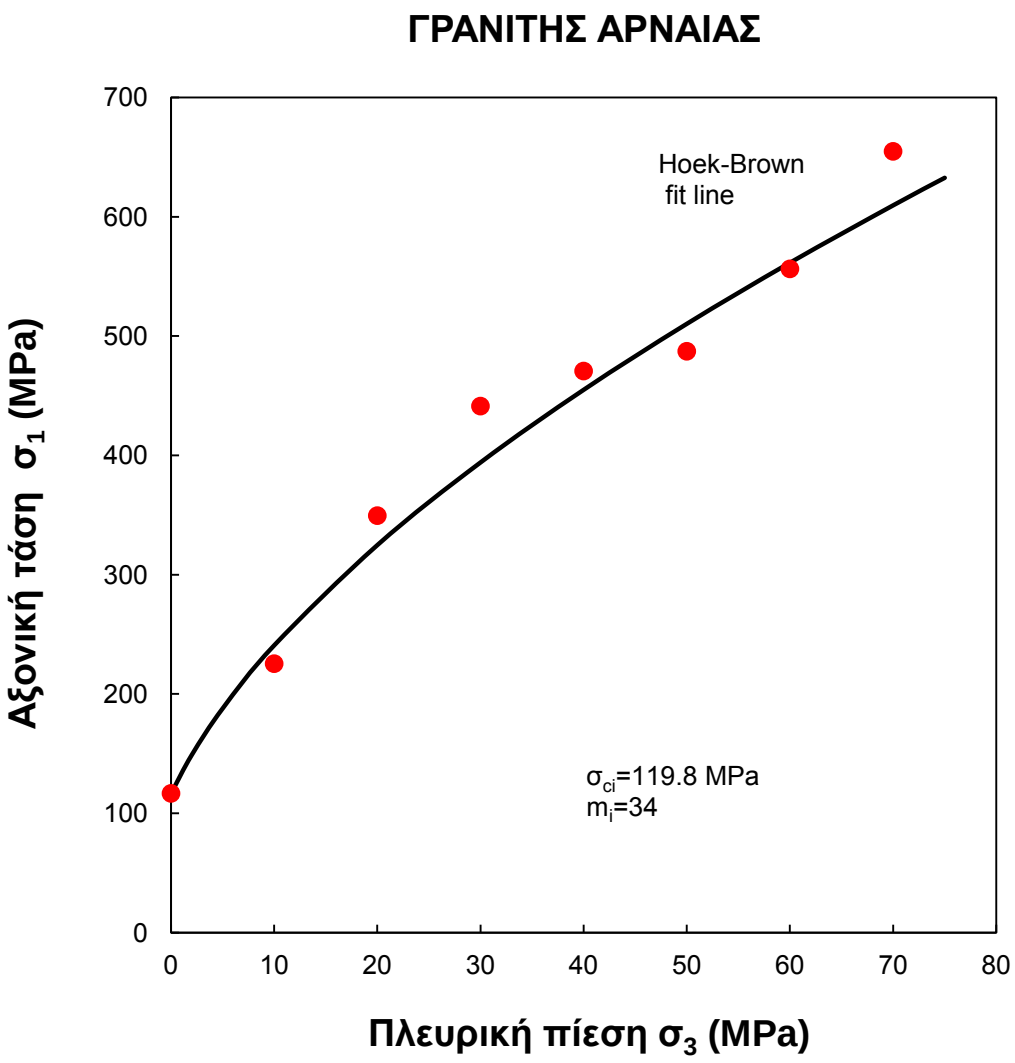
Παρότι ο Ασβεστόλιθος Μεσαίου μέχρι τα 60 MPa πλευρικής πίεσης εμφάνισε ψαθυρή θραύση, για την εύρεση της σταθεράς m_i χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δοκιμές που πληρούσαν το ακόλουθο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$. Σύμφωνα με το RocLab η τιμή του m_i για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου είναι 15,91. Η τιμή αυτή είναι λίγο μεγαλύτερη από το ανώτερο όριο για κρυσταλλικό ασβεστόλιθο (12±3) που δίνεται από τους Marinos & Hoek (2000).



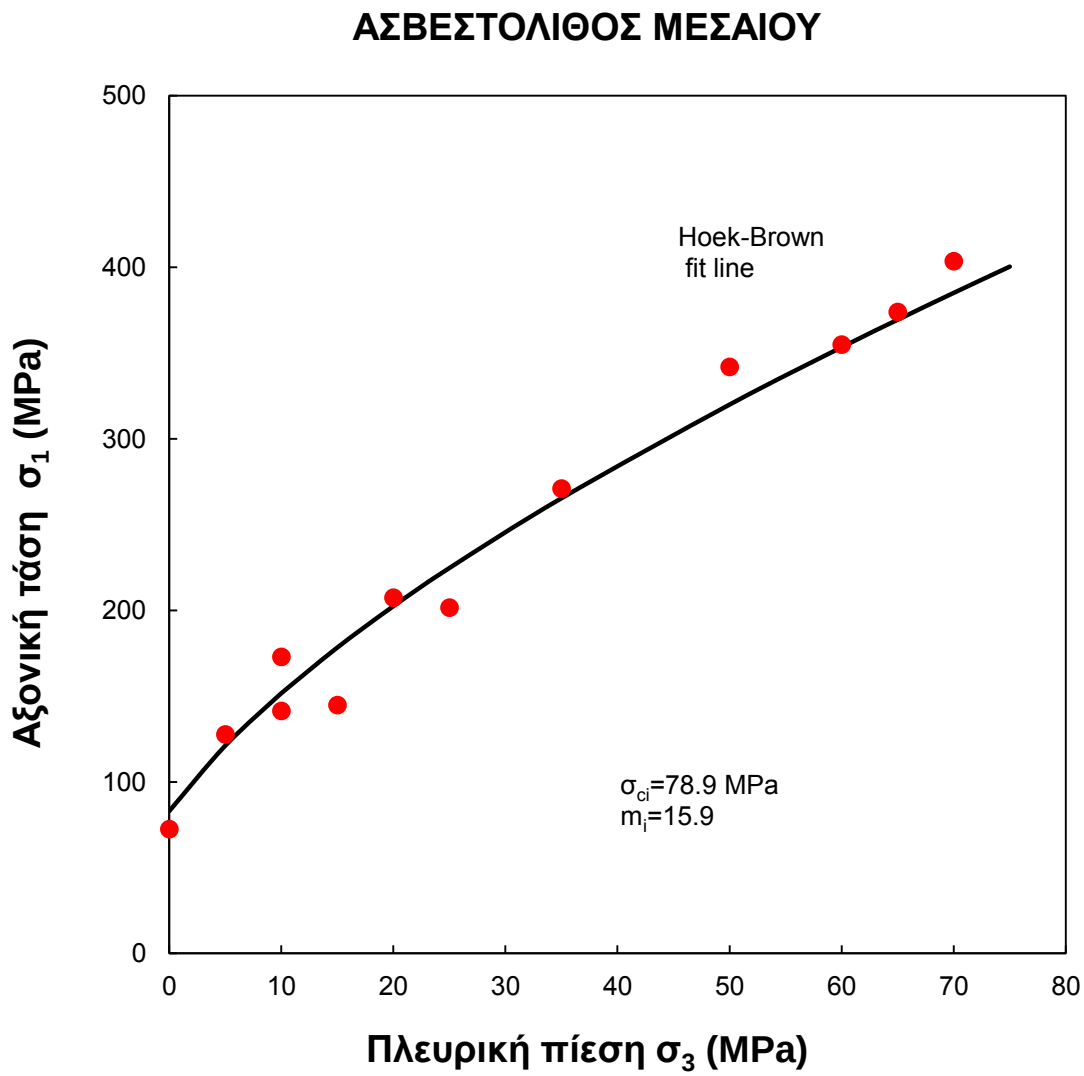
Εικόνα 28. Εύρεση σταθεράς mi για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου.



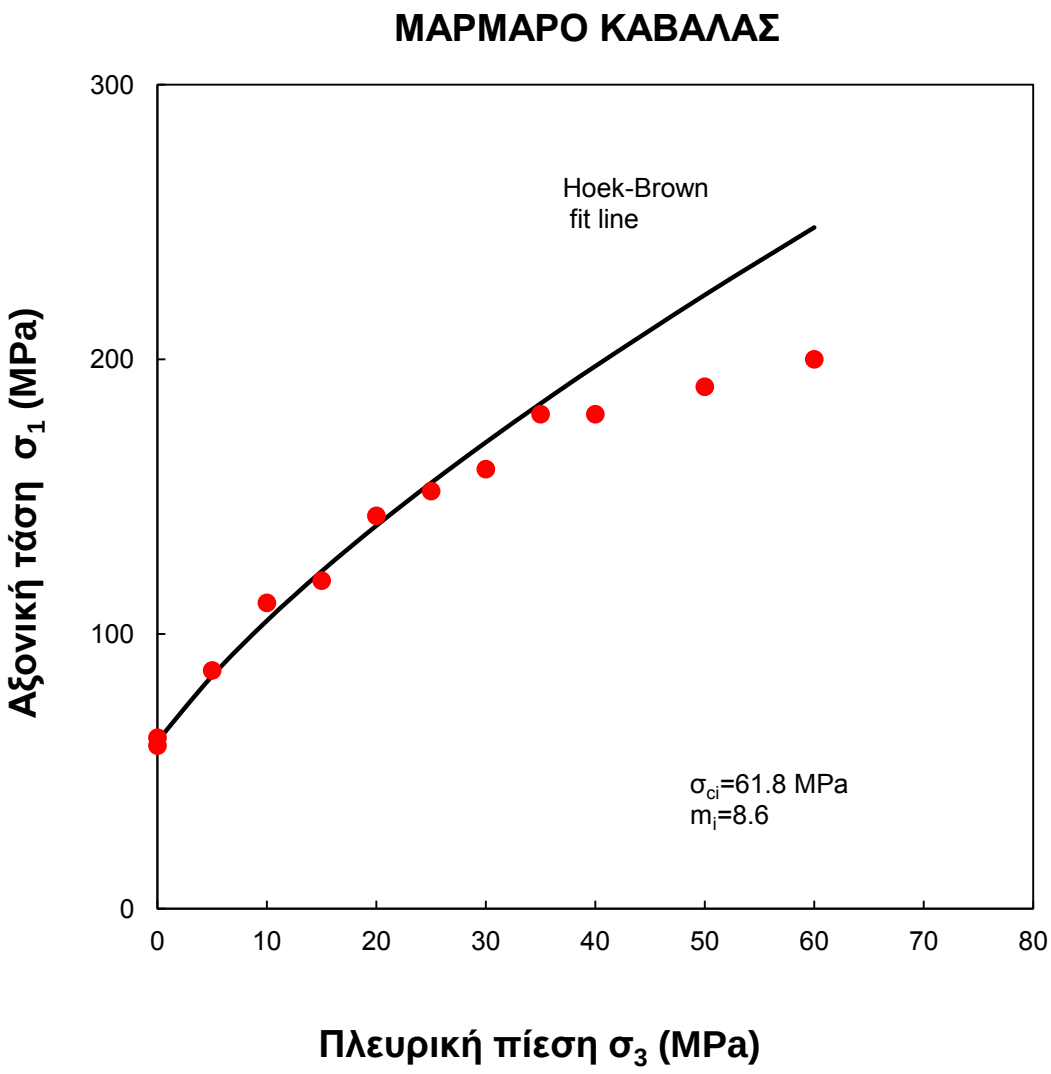
Σχήμα 31. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Ψαμμίτη Δεματίου.



Σχήμα 32. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Γρανίτη Αρναίας.



Σχήμα 33. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου.



Σχήμα 34. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής τάσης για το Μάρμαρο Καβάλας.

4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για κάθε τύπο πετρώματος πραγματοποιήθηκαν 5 δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test) σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου περίπου 54 mm. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με βάση την προδιαγραφή προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής(Brazilian). (ISRM, 1981).

Τα δοκίμια έχουν σχήμα δίσκου του οποίου το ύψος (L) είναι περίπου ίσο με το μισό της διαμέτρου (D/2). Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον το 10πλάσιο του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου είναι επίπεδα και παράλληλα μεταξύ τους. Η εφαρμογή του φορτίου στο δοκίμιο πραγματοποιείται συνεχώς και βαθμιαία με σταθερή ταχύτητα φόρτισης περίπου 150 – 200 N/sec, ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει σε 15 – 30 sec.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10. Έντυπο δοκιμών εφελκυσιτκής αντοχής(Brazilian test).

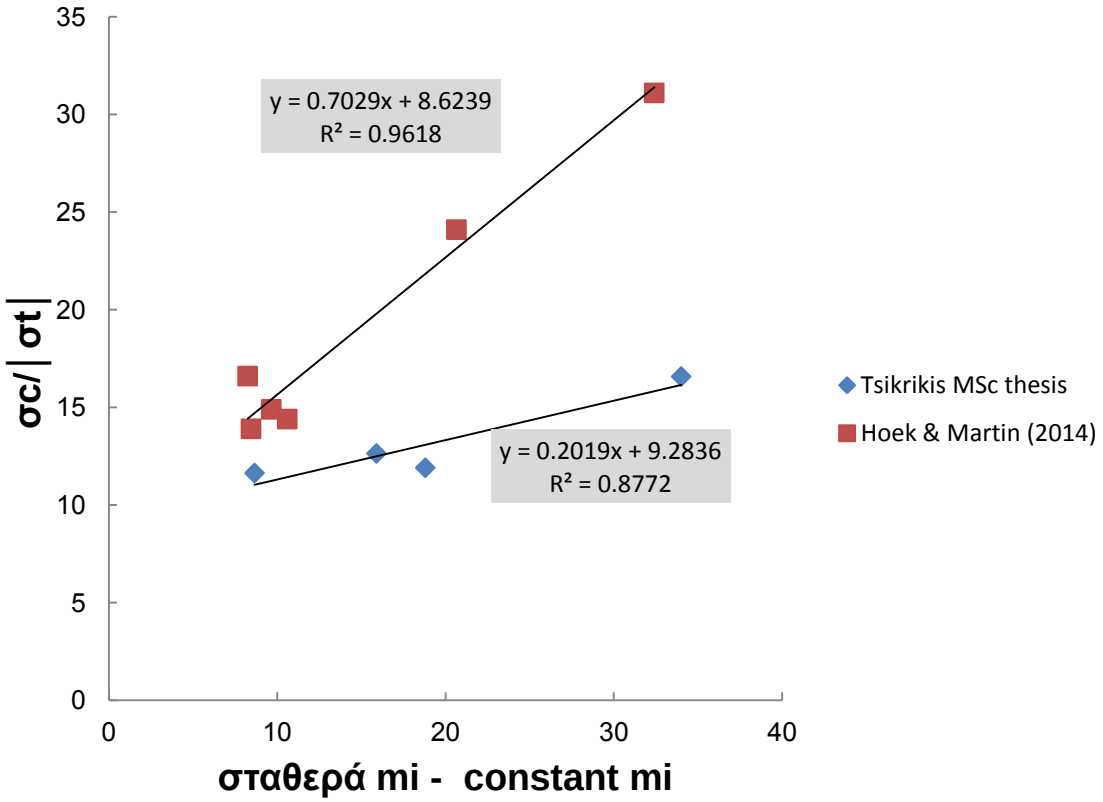
ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981) BRAZILIAN TEST (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981)												
ΔΟΚΙΜΙΟ	W	D1	D2	D	L1	L2	L	γ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	σt	stdv	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
	gr	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(kN/m³)	kN	MPa	MPa	MPa
ΓΑ1	173.2	54.49	53.35	53.92	29.20	29.40	29.30	25.89	19.24	7.75		
ΓΑ2	149.9	53.05	53.20	53.13	26.75	26.64	26.70	25.33	16.49	7.40		
ΓΑ3	156.7	54.45	54.65	54.55	26.64	26.84	26.74	25.07	11.64	5.08	1.54	7.04
ΓΑ4	163.6	53.36	53.32	53.34	28.83	28.93	28.88	25.35	21.77	9.00		
ΓΑ5	168.7	54.74	54.75	54.75	28.81	28.46	28.64	25.03	14.70	5.97		

ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981) BRAZILIAN TEST (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981)												
ΔΟΚΙΜΙΟ	W	D1	D2	D	L1	L2	L	γ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	σt	stdv	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
	gr	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(kN/m³)	kN	MPa	MPa	MPa
S1	188.1	54.29	54.32	54.31	31.26	31.63	31.45	25.83	17.87	6.66		
S2	164.0	53.47	53.56	53.52	28.46	28.00	28.23	25.83	17.14	7.22		
S3	154.8	54.33	54.21	54.27	26.12	26.13	26.13	25.62	16.39	7.36	1.15	6.51
S4	164.4	54.04	53.88	53.96	28.32	27.89	28.11	25.58	10.74	4.51		
S5	165.4	54.34	54.30	54.32	27.35	27.84	27.60	25.86	15.97	6.78		

ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981) BRAZILIAN TEST (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981)												
ΔΟΚΙΜΙΟ	W	D1	D2	D	L1	L2	L	γ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	σt	stdv	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
	gr	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(kN/m³)	kN	MPa	MPa	MPa
LM1	160.9	54.13	54.28	54.21	26.84	26.83	26.84	25.98	12.58	5.51		
LM2	160.2	54.34	54.35	54.35	26.56	26.83	26.70	25.87	9.96	4.37		
LM3	185.5	54.17	54.42	54.30	30.23	30.16	30.20	26.53	12.92	5.02	1.12	5.73
LM4	195.0	54.18	54.35	54.27	31.61	31.53	31.57	26.71	18.48	6.87		
LM5	166.6	54.16	54.24	54.20	27.19	27.21	27.20	26.55	15.95	6.89		

ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981) BRAZILIAN TEST (ISRM SUGGESTED METHODS, 1981)												
ΔΟΚΙΜΙΟ	W	D1	D2	D	L1	L2	L	γ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	σt	stdv	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
	gr	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(kN/m³)	kN	MPa	MPa	MPa
MK1	171.9	54.29	54	54.19	28.08	27.97	28.03	26.60	10.88	4.56		
MK2	186.7	54.23	54.27	54.25	30.00	30.27	30.14	26.80	12.48	4.86		
MK3	182.1	54.19	54.26	54.23	29.40	29.58	29.49	26.74	15.46	6.15	0.69	5.20
MK4	186.2	54.25	54.26	54.26	30.53	30.63	30.58	26.34				
MK5	170.4	54.37	54.39	54.38	27.60	27.76	27.68	26.51	12.36	5.23		

Η συσχέτιση μεταξύ της σταθεράς m_i και του λόγου της αντοχής σε θλίψη προς την εφελκυστική αντοχή($\sigma_c/|\sigma_t|$) δίνεται στο Σχήμα 35. μαζί με την αντίστοιχη συσχέτιση των Hoek & Martin(2014).



Σχήμα 35. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς m_i και του λόγου $\sigma c/|\sigma t|$.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Το πρόγραμμα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών περιελάμβανε 6 στάδια ορθής τάσης ανά δοκίμιο. Οι ορθές τάσεις ανά δοκιμή επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλυφθεί το εύρος 0 – 2 MPa. Για τον Γρανίτη Αρναίας, τον Ψαμμίτη Δεματίου και το Μάρμαρο Καβάλας διαμορφώθηκαν έξι(6) δοκίμια ενώ για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου πέντε(5) δοκίμια. Σύνολο πραγματοποιήθηκαν 138 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών. Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών από ένα δοκίμιο καθώς και οι αντίστοιχες τραχύτητες και φωτογραφίες πριν και μετά από κάθε στάδιο, τα υπόλοιπα παρατίθενται στο Παράρτημα των εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμίων.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΤΑΔΙΟ 1

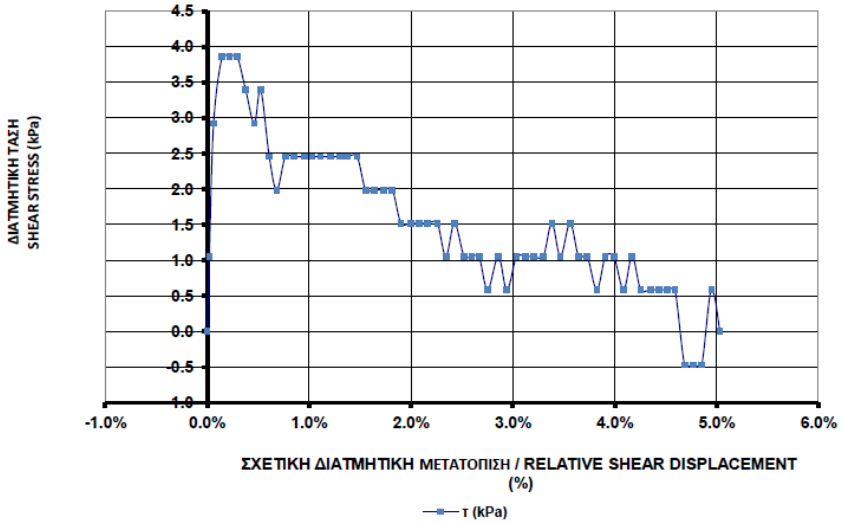
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : **S5**

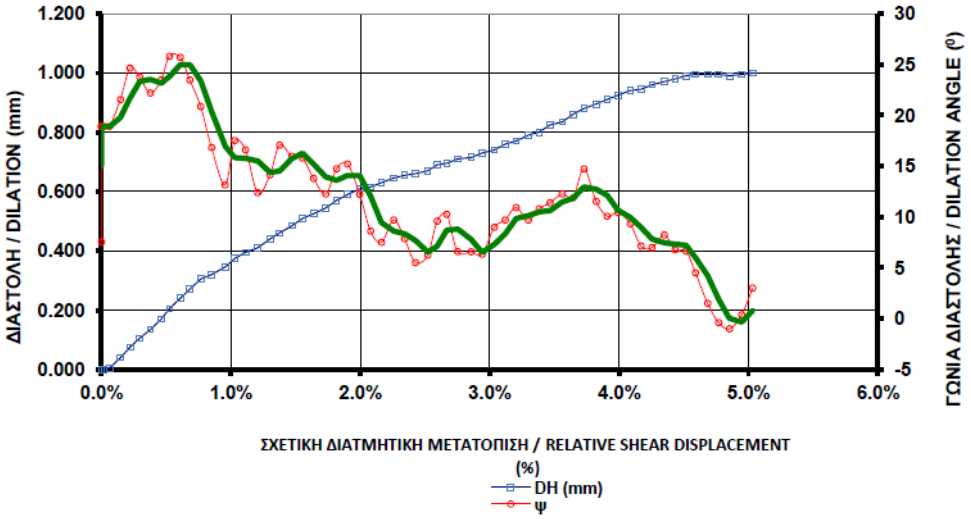
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	5.80 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (^{0})
τ (kPa)	**3.86**	3.86	3.39
τ_m (kPa)	1.24	**1.24**	0.46
ψ (^{0})	21.54	0.33	**25.8**
φ_m (^{0})	12.09	12.09	4.51
$\Delta H/L_0$ (%)	0.147%	0.147%	0.525%
k_s (MPa)	-	2.623	-

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
SHEAR STRESS - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



ΔΙΑΣΤΟΛΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
DILATION - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΤΑΔΙΟ 2

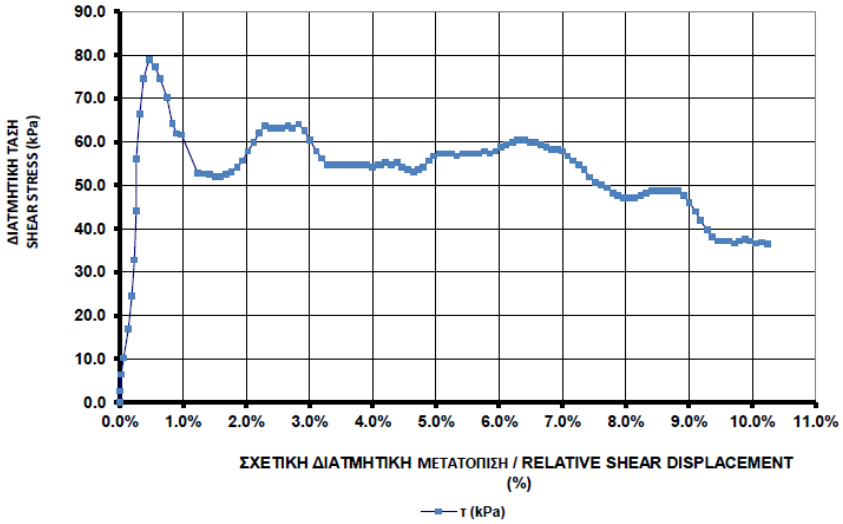
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : **S5**

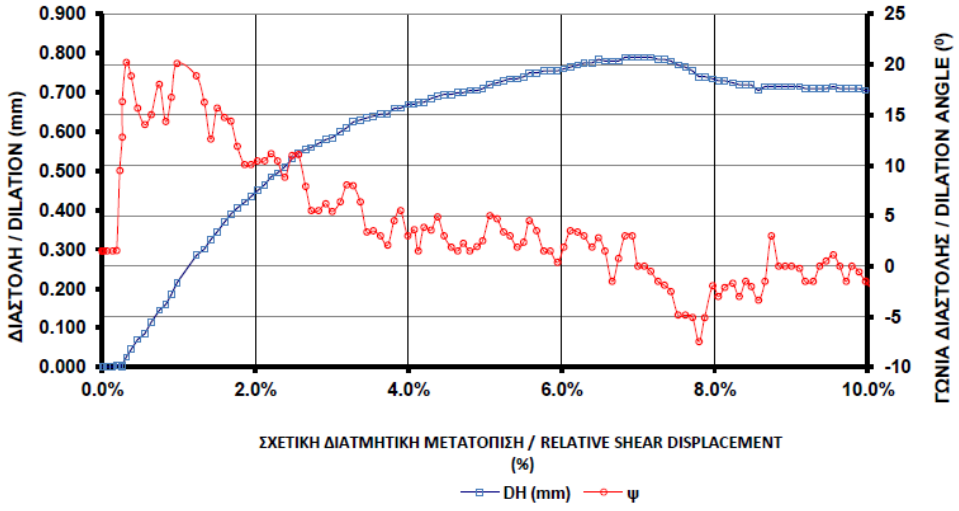
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	100.00 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (^{0})
τ (kPa)	86.93	48.73	70.47
τ_m (kPa)	50.85	66.10	26.73
ψ (^{0})	14.05	7.61	20.21
φ_m (^{0})	26.95	33.46	14.96
$\Delta H/L_0$ (%)	0.557%	7.796%	0.315%
k_s (MPa)	-	0.625	-

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
SHEAR STRESS - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



ΔΙΑΣΤΟΛΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
DILATION - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΤΑΔΙΟ 3

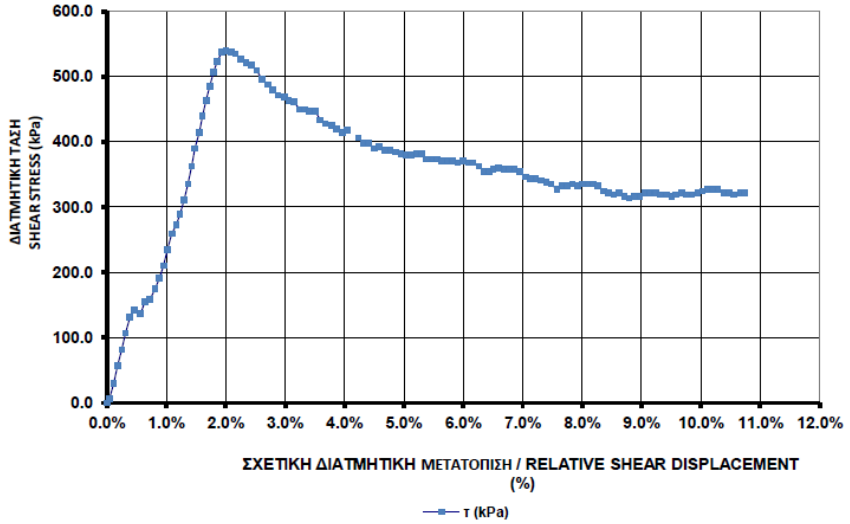
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : **S5**

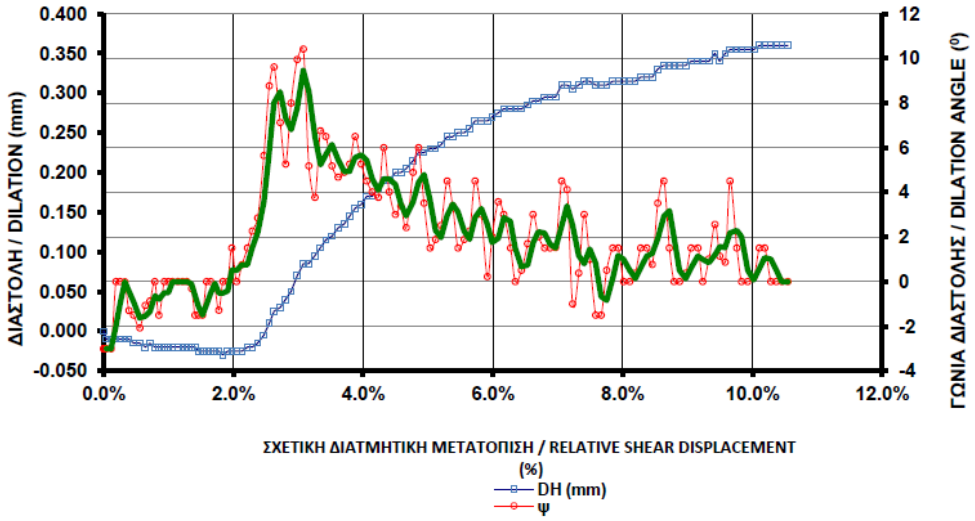
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	500.00 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (^{0})
τ (kPa)	540.01	485.35	406.33
τ_m (kPa)	455.14	476.62	339.88
ψ (^{0})	8.56	1.84	4.89
φ_m (^{0})	42.31	43.63	34.21
$\Delta H/L_0$ (%)	2.007%	1.734%	4.234%
k_s (MPa)	-	27.998	-

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
SHEAR STRESS - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



ΔΙΑΣΤΟΛΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
DILATION - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



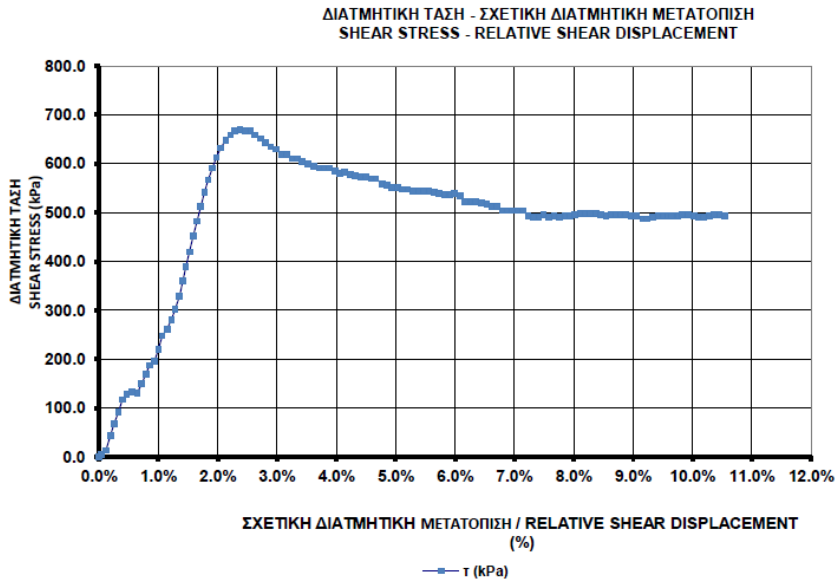
ΣΤΑΔΙΟ 4

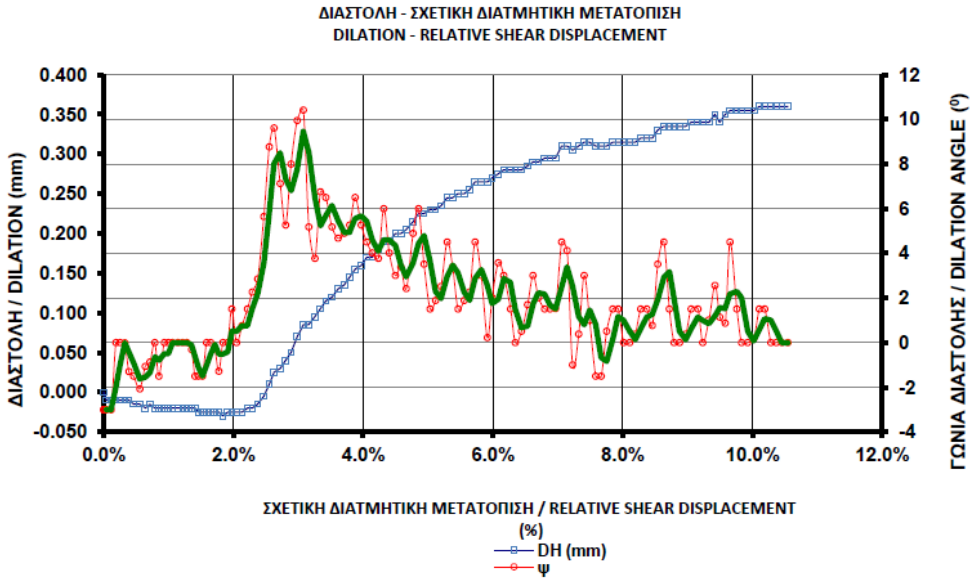
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : **S5**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	750.00 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (^{0})
τ (kPa)	670.41	632.21	618.38
τ_m (kPa)	606.05	632.21	417.23
ψ (^{0})	2.85	2.14	10.42
φ_m (^{0})	38.94	40.13	29.09
$\Delta H/L_0$ (%)	2.374%	2.049%	3.078%
k_s (MPa)	-	30.858	-





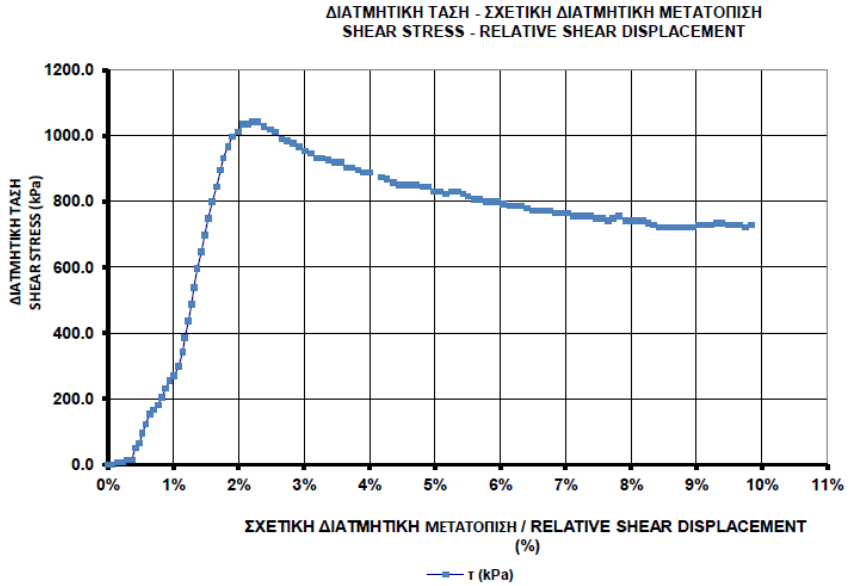
ΣΤΑΔΙΟ 5

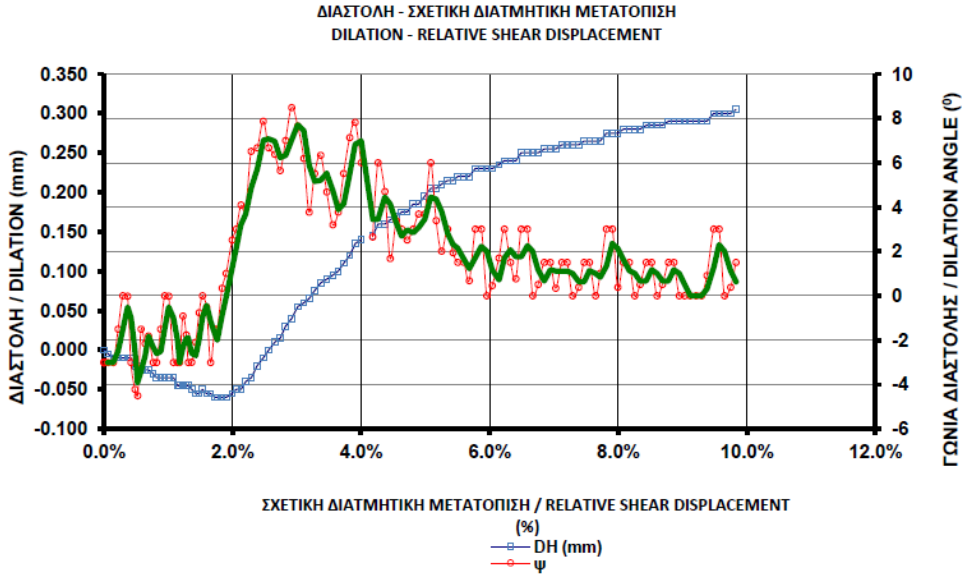
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : **S5**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	1250.00 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (^{0})
τ (kPa)	1041.59	932.50	967.69
τ_m (kPa)	903.27	984.63	700.38
ψ (^{0})	3.95	1.87	8.48
φ_m (^{0})	35.85	38.23	29.26
$\Delta H/L_0$ (%)	1.000%	1.765%	2.921%
k_s (MPa)	-	52.831	-





02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΤΑΔΙΟ 6

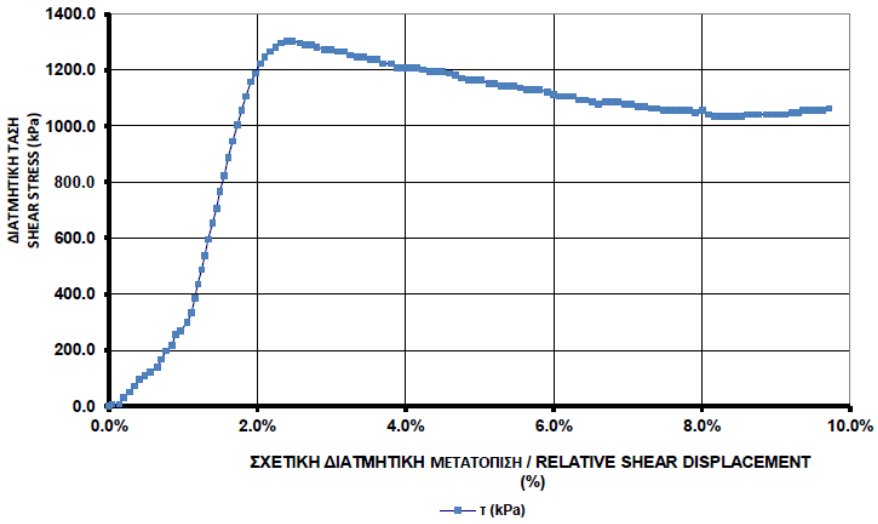
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
DIRECT SHEAR TEST OF JOINTS

ΔΟΚΙΜΙΟ / SAMPLE : S5

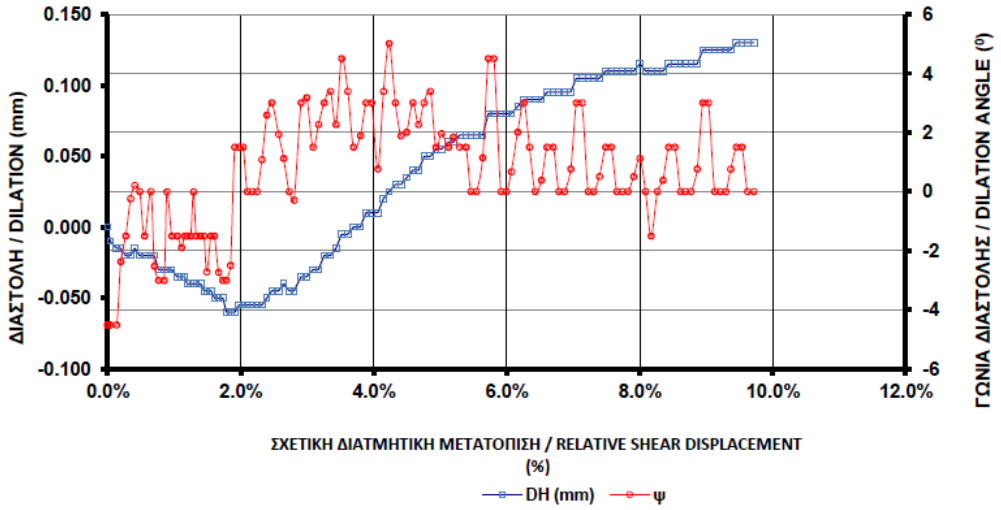
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ / SAMPLE CHARACTERISTICS	
ΜΗΚΟΣ / LENGTH	95.2 mm
ΠΛΑΤΟΣ / WIDTH	71.1 mm
ΥΨΟΣ / HEIGTH	- mm
ΒΑΡΟΣ / WEIGTH	2928 gr
ΕΜΒΑΔΟ / AREA	6766.35 mm^2
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ / NORMAL STRESS	1750.00 kPa

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ / MAXIMUM VALUES			
	τ (kPa)	τ_m (kPa)	ψ (°)
τ (kPa)	1303.75	1280.87	1201.70
τ_m (kPa)	1184.85	1294.53	988.78
ψ (°)	2.59	2.86	5.01
φ_m (°)	34.10	36.49	29.47
$\Delta H/L_0$ (%)	2.395%	2.805%	4.234%
k_s (MPa)	-	45.661	-

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
SHEAR STRESS - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



ΔΙΑΣΤΟΛΗ - ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ
DILATION - RELATIVE SHEAR DISPLACEMENT



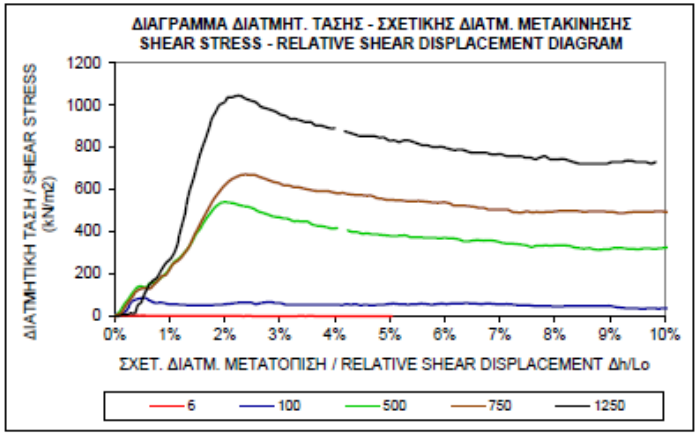
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ S5

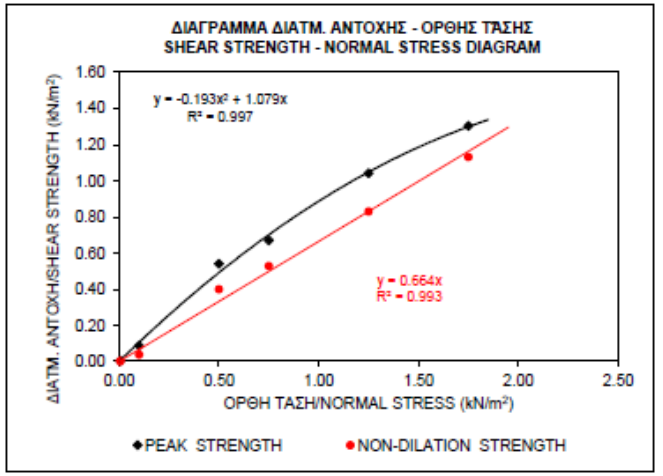
ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ- DIRECT SHEAR TEST OF ROCK JOINT

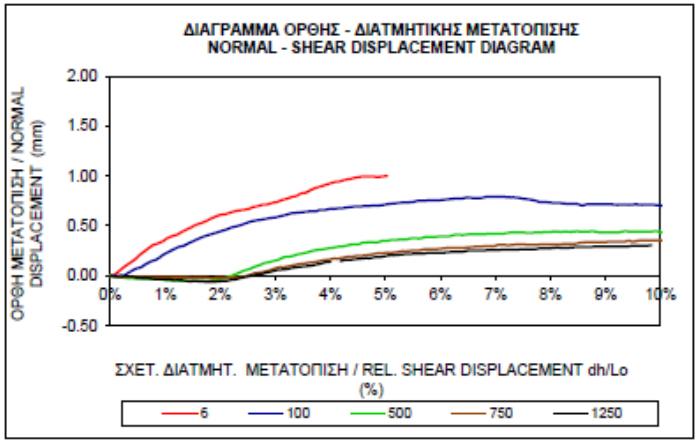
ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (2014)

ΔΟΚΙΜΙΟ/SPECIMEN: **S5**

ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ/SAMPLE LENGTH (mm): **95.18**





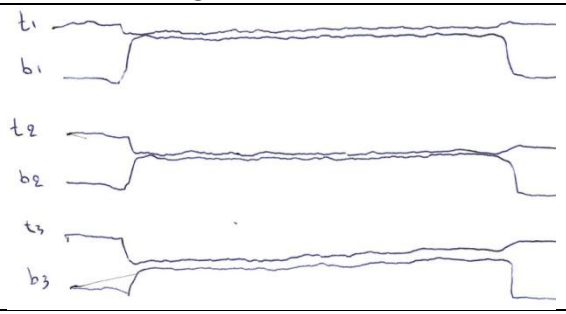
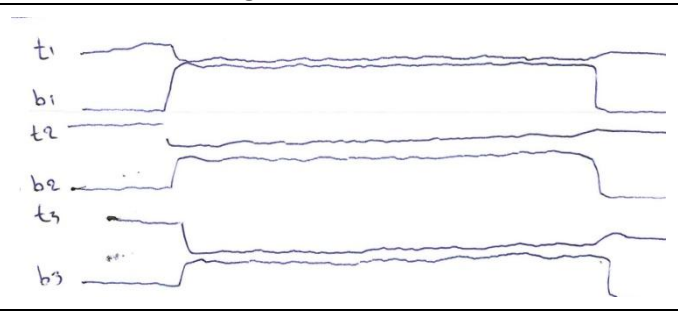
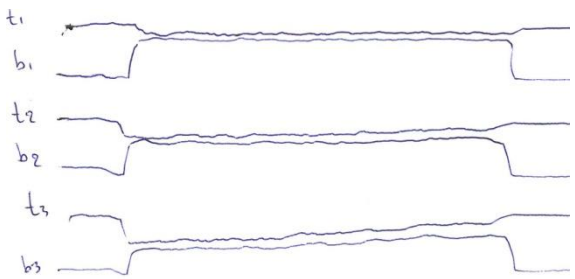
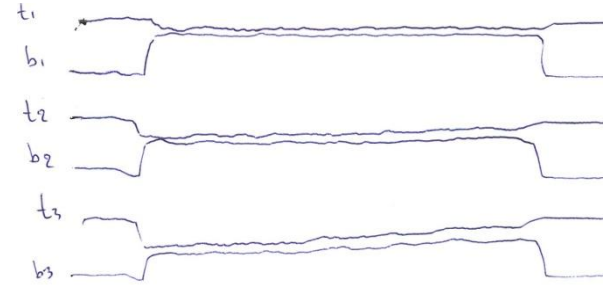
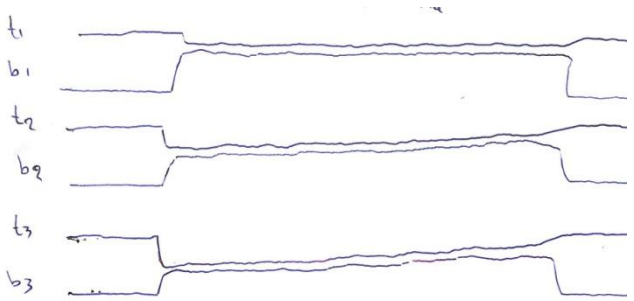
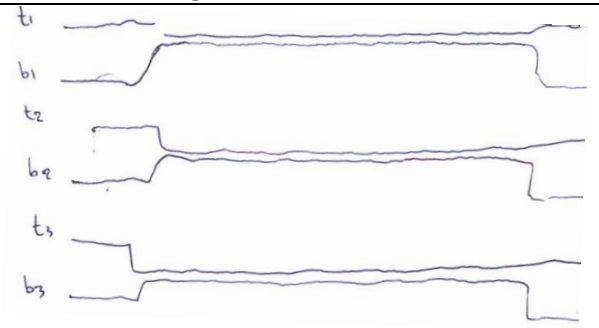


	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ /SHEAR STRENGTH	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
Γωνία τριβής/phi (°)	36.9	33.6
Συνοχή/ c (kPa)	62.1	0.0

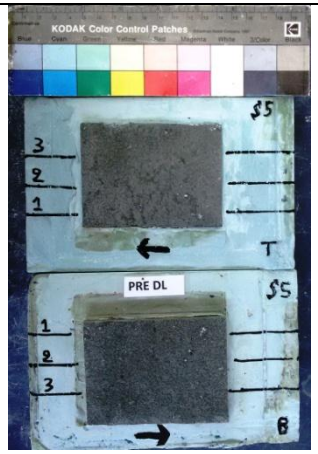
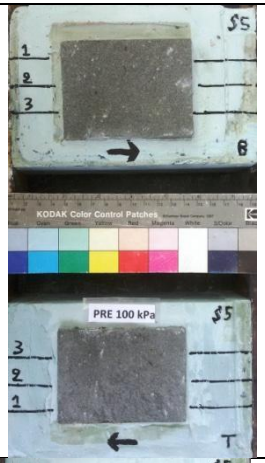
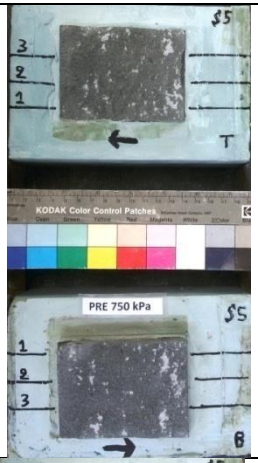
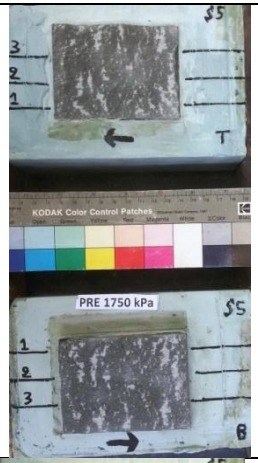
ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ/ NORMAL STRESS (kPa)	ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗ/SHEAR STRENGTH (kPa)	
	ΜΕΓΙΣΤΗ/PEAK	ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ/ NON-DILATION
0.006	0.00	0.00
0.100	0.09	0.04
0.500	0.54	0.40
0.750	0.67	0.53
1.250	1.04	0.83
1.750	1.30	1.13

ΕΡΓΟ/PROJECT: A. Tsikrikis MSc thesis

TEST SAMPLE : S4

Stage 1: Pre 100 kPa	Stage 2: Post 100 kPa	cm
		6 4 2
Stage 3: Post 500 kPa	**Stage 4: Post 750 kPa**	
		6 4 2
Stage 5: Post 1250 kPa	**Stage 6: Post 1750 kPa**	
		6 4 2
2 4 6 8 10 12 14	2 4 6 8 10 12 14	cm

TEST SAMPLE : S5

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6
Pre-test						
Post-test						
	σ=5.13 kPa	σ=100 kPa	σ=500 kPa	σ=750 kPa	σ=1250 kPa	σ=1750 kPa

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ S5

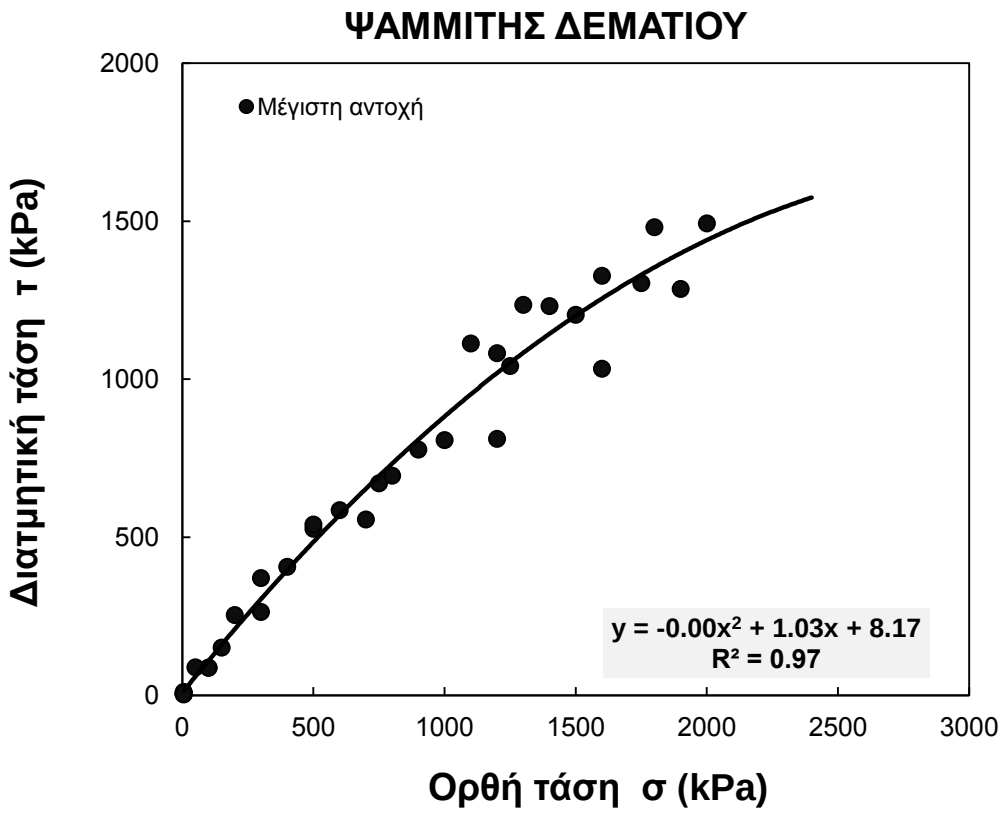
Α. Ίδιο βάρος δοκιμίου (ορθή τάση 5.13 kPa).

Μας δίνει τη μέγιστη διαστολή που μπορεί να εμφανιστεί στο δοκίμιο (25,8°).

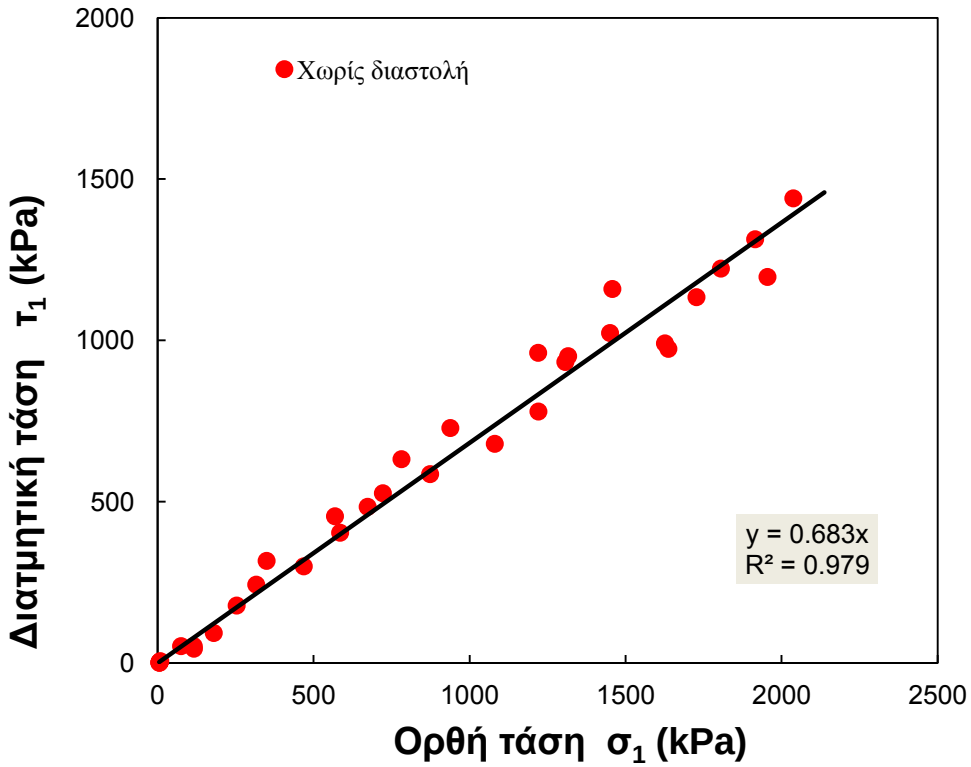
Β. Είναι φανερό από τα διαγράμματα πως με την αύξηση της ορθής τάσης η διαστολή μειώνεται καθώς και ότι η μέγιστη αντοχή είναι περίπου ίδια με την παραμένουσα .

Η αντοχή χωρίς διαστολή αντιστοιχεί σε μια σταθερή γωνία τριβής ίση με 33,6°

ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΨΑΜΜΙΤΗ ΔΕΜΑΤΙΟΥ



Σχήμα 36. Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Ψαμμίτη Δεματίου.



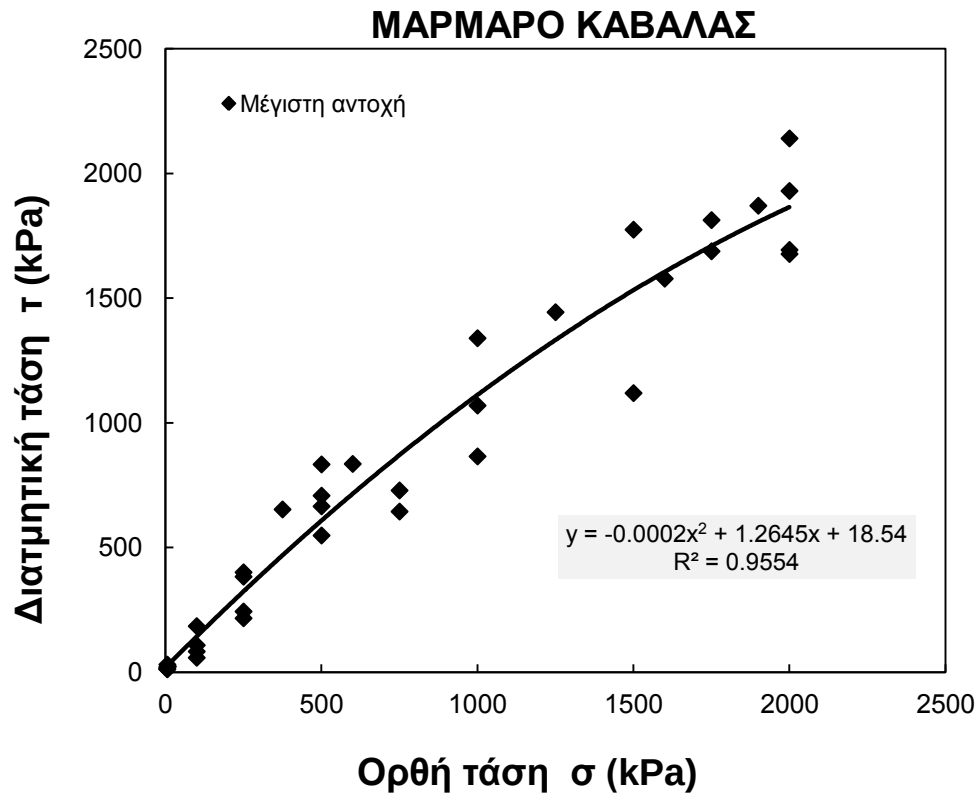
Σχήμα 37. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ψαμμίτη Δεματίου.

Α. Είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα πως με την αύξηση της ορθής τάσης η διαστολή μειώνεται καθώς και ότι η μέγιστη αντοχή είναι περίπου ίδια με την παραμένουσα.

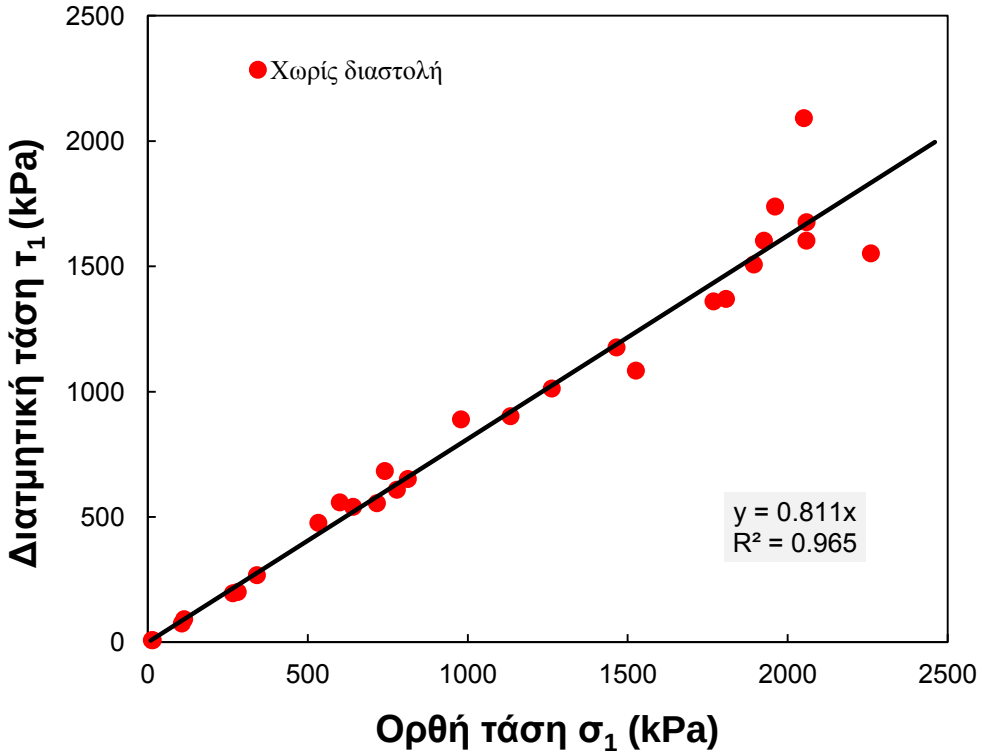
Η διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή αντιστοιχεί σε μια γωνία τριβής ίση με 34,4^{o}.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΡΜΑΡΟ ΚΑΒΑΛΑΣ



Σχήμα 38.Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για το Μάρμαρο Καβάλας.

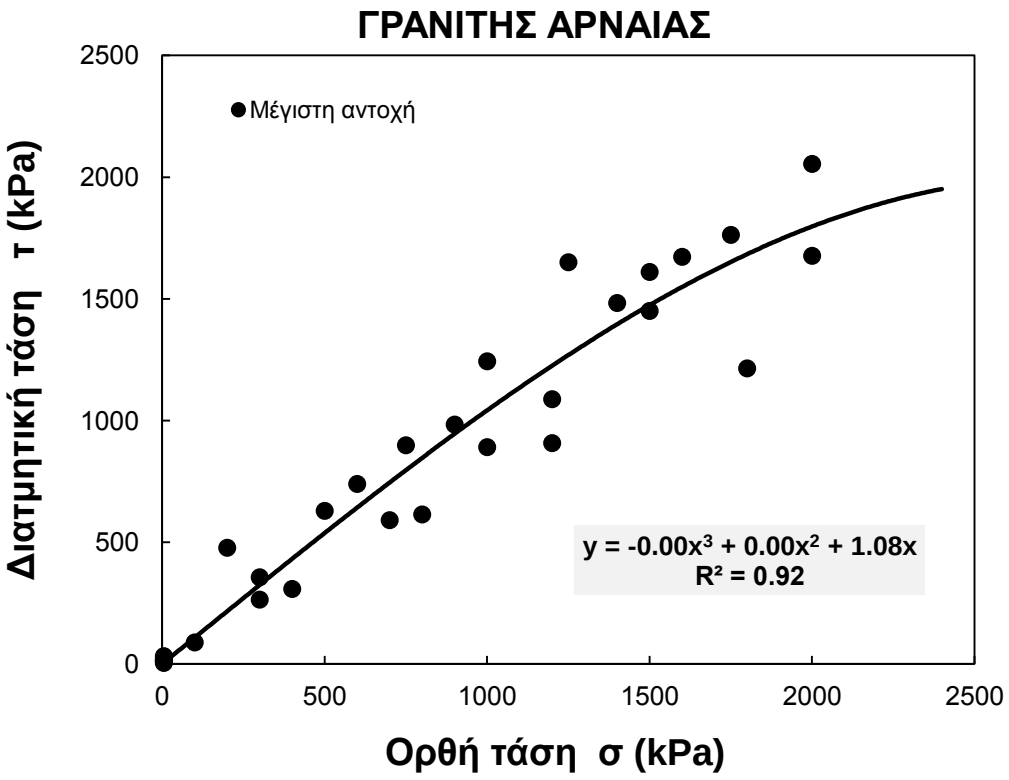


Σχήμα 39. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για το Μάρμαρο Καβάλας.

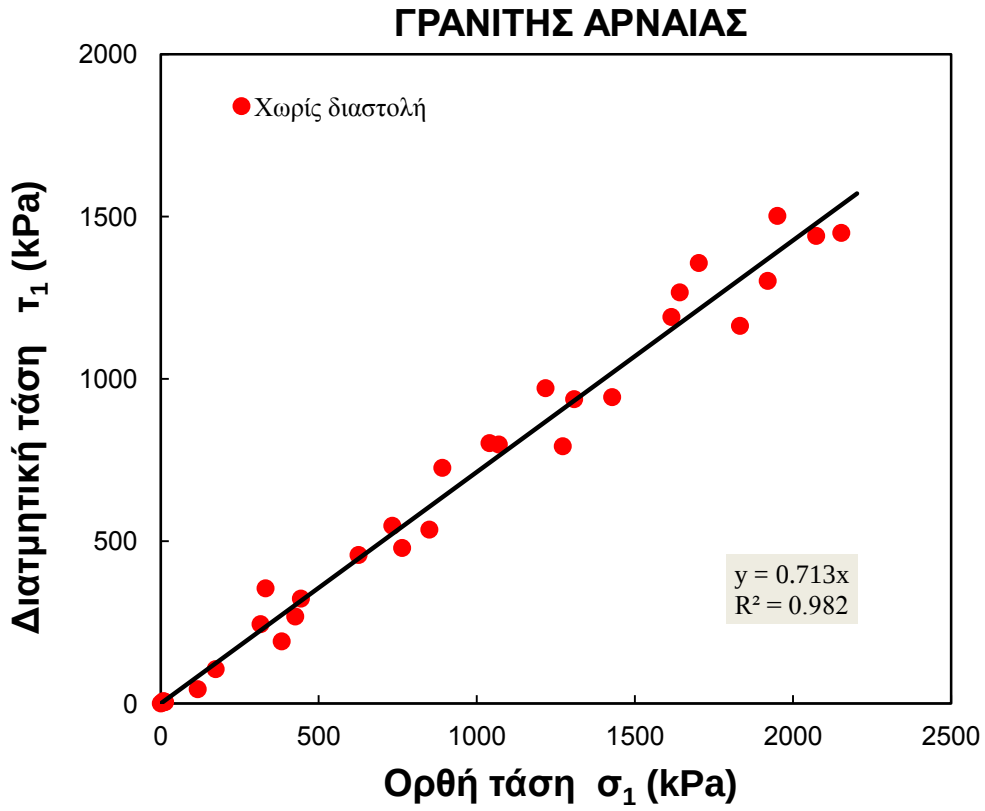
Είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα πως με την αύξηση της ορθής τάσης η διαστολή μειώνεται καθώς και ότι η μέγιστη αντοχή είναι περίπου ίδια με την παραμένουσα.

Η διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή αντιστοιχεί σε μια γωνία τριβής ίση με 39^{o}.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Σχήμα 40. Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Γρανίτη Αρναίας.

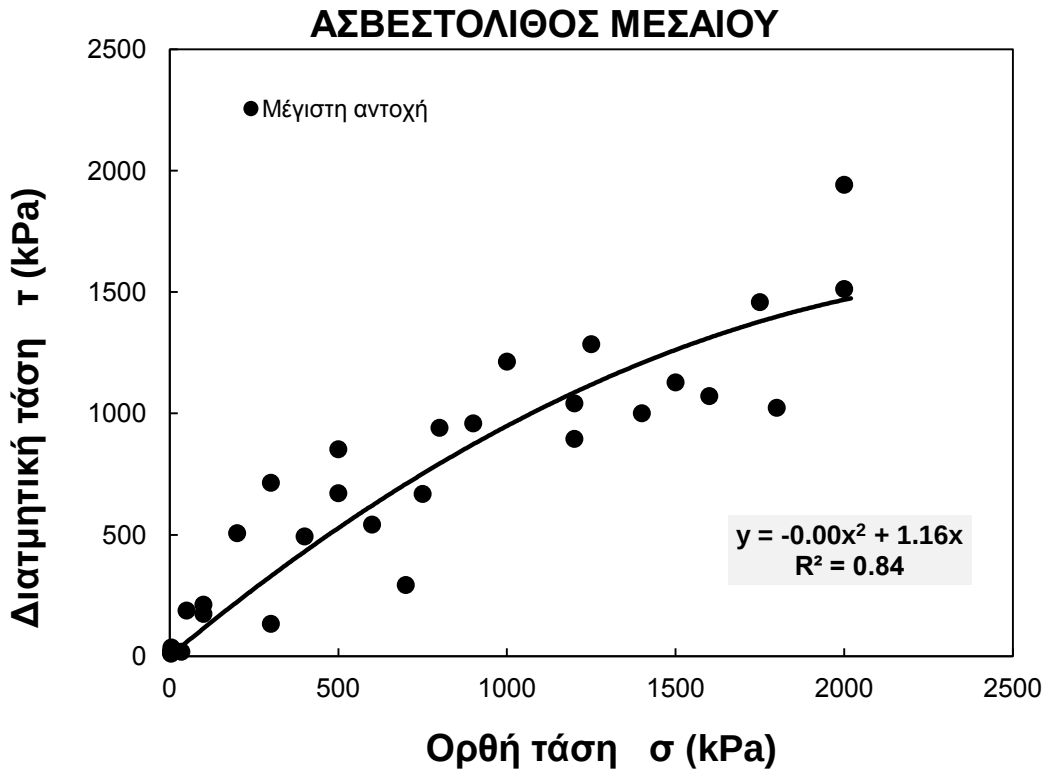


Σχήμα 41. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Γρανίτη Αρναίας.

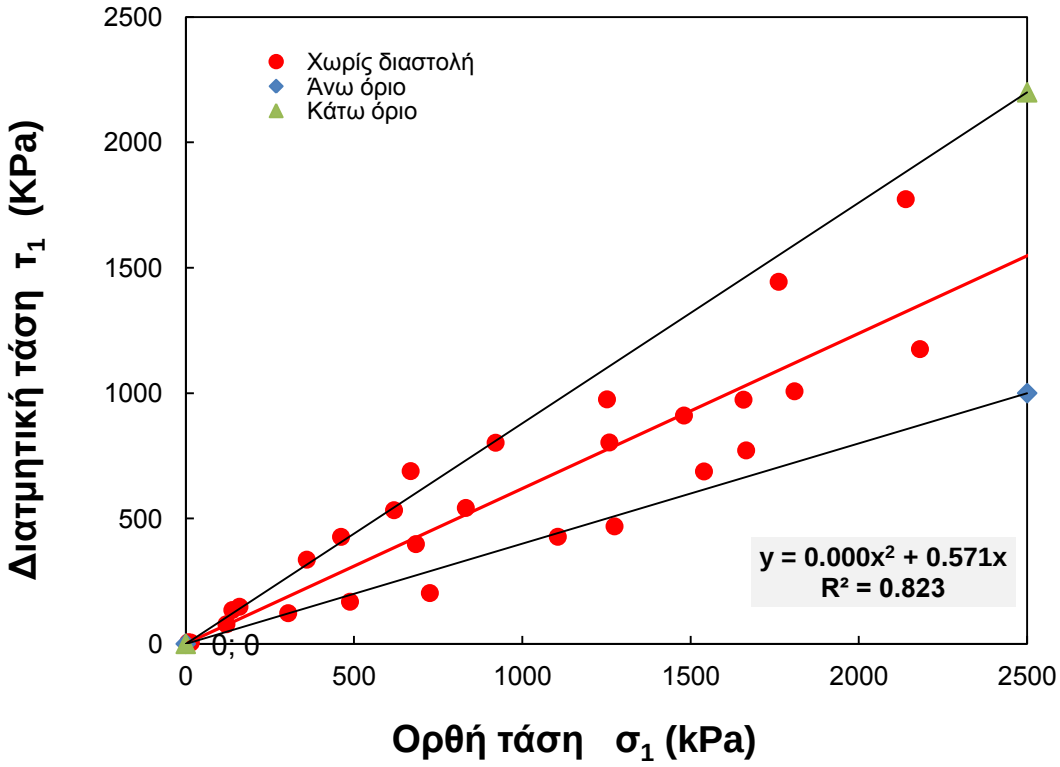
Φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα πως με την αύξηση της ορθής τάσης η διαστολή μειώνεται καθώς και ότι η μέγιστη αντοχή είναι περίπου ίδια με την παραμένουσα.
Η διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή αντιστοιχεί σε μια γωνία τριβής ίση με 35,5^{o}.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ

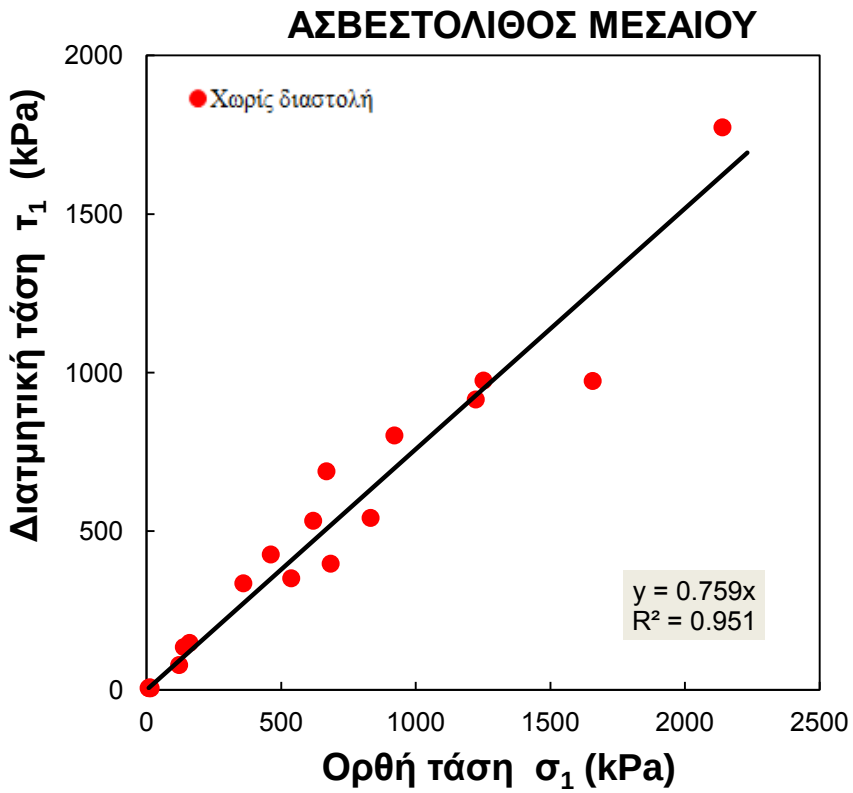


Σχήμα 42.Μέγιστη διατμητική αντοχή με διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου.



Σχήμα 43.Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών στον ασβεστόλιθο έδωσαν ένα σχετικά μεγάλο εύρος τιμών τόσο στη μέγιστη όσο και στην διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στις λείες επιφάνειες των μικροκρυστάλλων που υπάρχουν στις επιφάνειες των ασυνεχειών. Έτσι, όταν οι κόμβοι επαφής δημιουργούνται σε αυτές τις περιοχές η διατμητική αντοχή είναι χαμηλή σε σχέση με τις βιβλιογραφικές τιμές. Για τον λόγο αυτό από κάθε δοκίμιο κρατήθηκαν οι τιμές της πρώτης και της δεύτερης κύριας δοκιμής. Έτσι το διάγραμμα που προκύπτει είναι το εξής:



Σχήμα 44. Μέγιστη διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή για τον Ασβεστόλιθο Μεσαίου ύστερα από επιλογή για κάθε δοκίμιο των τιμών της πρώτης και δεύτερης κύριας δοκιμής.

Η διατμητική αντοχή χωρίς διαστολή με βάση το παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχεί σε μια γωνία τριβής ίση με 38,6^{o}.

4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ϕ_m -m_i

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της σταθεράς m_i του κριτηρίου Hoek & Brown και της γωνίας τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ϕ_m. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η συσχέτιση m_i-ϕ_m, ενώ στο δεύτερο η συσχέτιση mi-tanϕ_m. Η βέλτιστη προσαρμογή στα πειραματικά σημεία αντιστοιχεί σε λογαριθμική. Όπως φαίνεται, η γωνία τριβής των ασυνεχειών μειώνεται με την αύξηση της σταθεράς mi. Η συσχέτιση περιγράφεται από τις εξισώσεις:

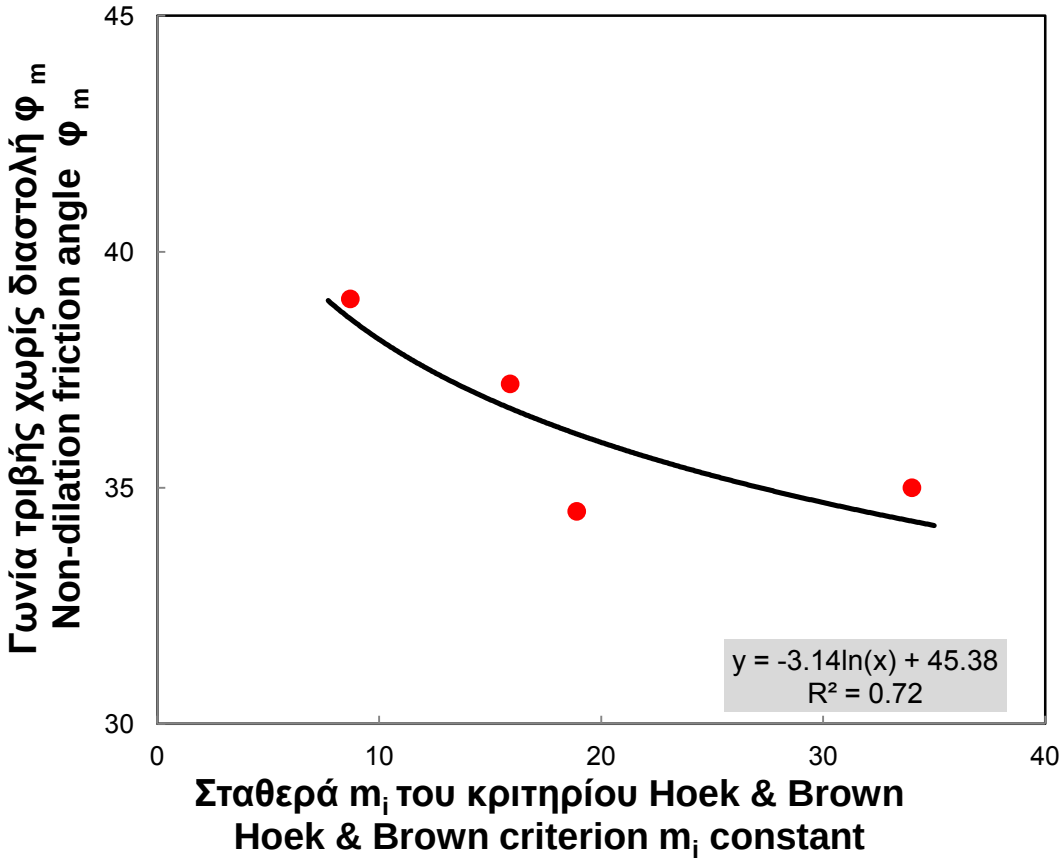
$$\boldsymbol{\varphi_m = 45.38 - 3.14\ln(m_i)}$$

ή

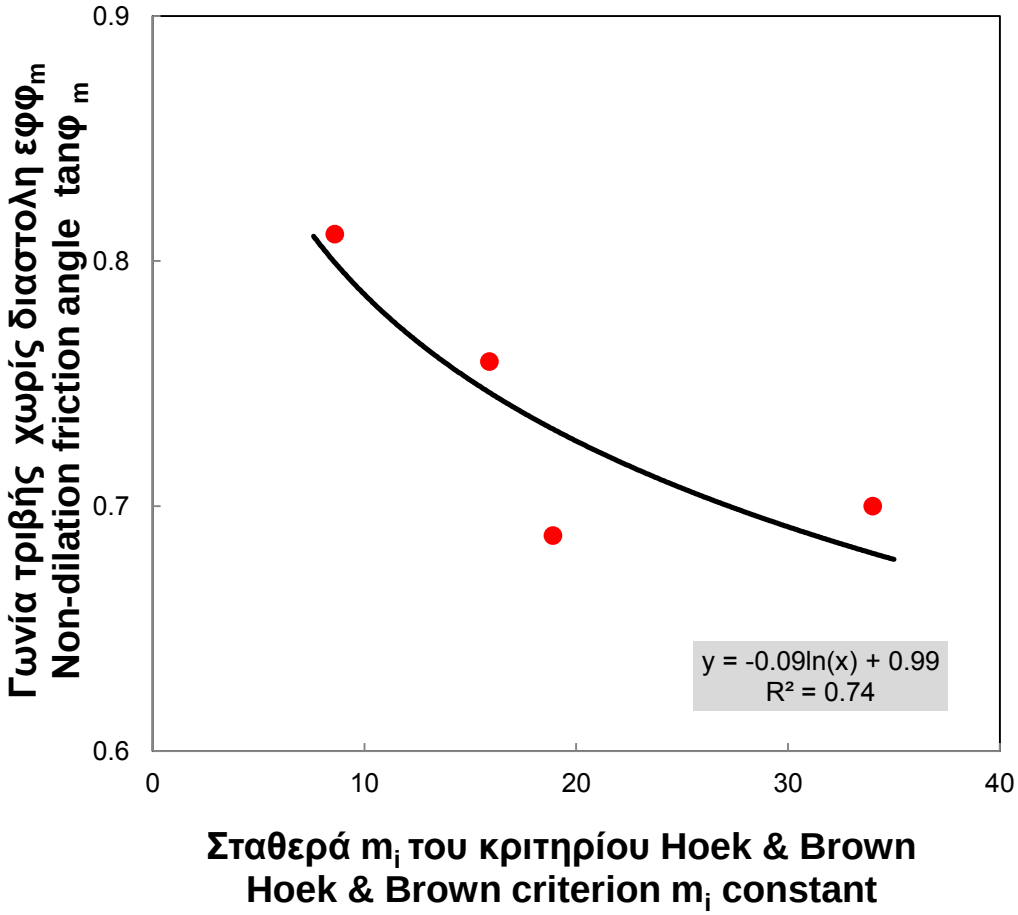
$$\boldsymbol{\varepsilon\varphi\varphi_m = 0.99 - 0.09ln(m_i)}$$

Αντίστοιχα η τιμή του mi συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ_m δίνεται από τη σχέση :

$$\boldsymbol{m_i = e^{\frac{45.38-\varphi_m}{3.14}}}$$



Σχήμα 45. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς m_i του κριτηρίου Hoek & brown και της γωνίας τριβής χωρίς διαστολή ϕ_m.



Σχήμα 46. Συσχέτιση μεταξύ σταθεράς mi του κριτηρίου Hoek & brown και της γωνίας τριβής χωρίς διαστολή εφφm.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1) Η σταθερά m_i του κριτηρίου Hoek & Brown για 4 αντιπροσωπευτικούς τύπους πετρωμάτων που καλύπτουν σχεδόν όλο το εύρος τιμών των πετρωμάτων που καλύπτονται από τον Πίνακα 1 των Marinos & Hoek, βρίσκονται μέσα στα όρια που προβλέπονται από το συγκεκριμένο πίνακα.
2) Η σταθερά m_i του κριτηρίου Hoek & Brown αυξάνεται λογαριθμικά με την μείωση της γωνίας τριβής των τοιχωμάτων του υλικού των ασυνεχειών ϕ_m. Η σχέση μεταξύ των δυο παραμέτρων περιγράφεται από την εξίσωση

$$\boldsymbol{m_i = e^{\frac{45.38-\varphi_m}{3.14}}}$$

Η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμφίδρομα, δηλαδή τόσο για την εκτίμηση της σταθεράς m_i μέσω του προσδιορισμού της γωνίας ϕ_m από την εργαστηριακή δοκιμή της άμεσης διάτμησης ασυνεχειών, όσο και για την εκτίμηση της γωνίας τριβής ϕ_m από την τιμή της σταθεράς m_i.

Η κυριότερη χρησιμότητα της μεθόδου συνίσταται στον προσδιορισμό του m_i μέσω μιας σειράς δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών με σκοπό την εύρεση της γωνίας τριβής ϕ_m, δεδομένου ότι ο εργαστηριακός προσδιορισμός του απαιτεί σειρά τριαξονικών δοκιμών σε ικανό εύρος πλευρικών πιέσεων, εργασία που απαιτεί σημαντικά ακριβέστερη προετοιμασία και μεγαλύτερο κόστος.

Με δεδομένο ότι οι τιμές m_i του Πίνακα 1 βασίζονται σε στοιχεία δοκιμών σε υγιή δείγματα, και για περιπτώσεις αποσαθρωμένου πετρώματος απαιτείται κάποια μείωση της τιμής αυτής, μια άλλη σημαντική συνεισφορά αυτής της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι μπορεί να αποδώσει την σταθερά m_i ενός αποσαθρωμένου πετρώματος. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί διότι η δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών μπορεί να εκτελεστεί και σε αποσαθρωμένες επιφάνειες, ενώ η διαμόρφωση κυλινδρικών δοκιμίων από δείγματα που εμφανίζουν αποσάθρωση και εξαλλοίωση είναι σχεδόν αδύνατη. Επομένως, η

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

απομείωση του m_i σε ένα αποσαθρωμένο πέτρωμα και κατά επέκταση στην βραχομάζα που πρόκειται να κατασκευαστεί ένα τεχνικό έργο μπορεί να γίνει μέσω αυτής της προσέγγισης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η σχέση αυτή έχει προκύψει μόνο από τέσσερεις διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων, που ωστόσο καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τιμών m_i (8-34). Συνεπώς η σχέση δείχνει περισσότερο μια τάση παρά μια ακριβή εκτίμηση του συντελεστή m_i μέσω της γωνίας ϕ_m.

Απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός διαφορετικών τύπων πετρωμάτων ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των πειραματικών σημείων στο διάγραμμα και η αξιοπιστία της σχέσης, η οποία με τον τρόπο αυτό θα λάβει ακριβέστερη έκφραση.

Επιπλέον, για την περαιτέρω διερεύνηση της συσχέτισης προτείνεται να υποβληθεί σε άμεση διάτμηση αριθμός δοκιμίων που θα έχουν ήδη υποβληθεί σε τριαξονική θλίψη και θα εμφανίσουν διατμητική αστοχία.

02/16/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alejano LR, Javier G, Muralha J (2012). Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment. Rock Mech Rock Eng, 45,1023–1035

Amontons G (1699) De la re´sistance cause´e dans les machines. Memoires de l'Academie Royale A, 257–282

Amidu Jimoh Oladeji (1997). Η έρευνα του Γρανίτη Αρναίας νομού Χαλκιδικής από Γεωλογική και Πετρογραφική άποψη. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη

Bandis S, Lumsden AC, Barton NR (1981) Scale effects on the shearbehavior of rock joints. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,18,1–21

Barton N.R (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engng Geology, 7 , 287-232

Barton N (1976). The shear strength of rock and rock joints . Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 13, 255-279

Barton N (2013). Shear strength criteria for rock , rock joints , rockfill and rock masses : Problems and some solutions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, 249-261

Barton N. (2000). Rock Mechanics Review, 13, 255-279.

Barton N, Choubey V (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mechanics, 10, 1–54

Brown ET (ed) (1981). Suggested methods for determining shear strength. In: Rock characterisation testing and monitoring, Pergamon Press, Oxford, pp 129–140

Bodwen F.P & Tabor D (1950). The Friction and Lubrication of Solids. Claredon Press. Oxford

Bulgarian Academy of Sciences (2015). Personal communication.

Buzzi O, Sieffert Y, Mendes J, Liu X (2013). Strength of Australian coal under low confinement. Rock Mech Rock Eng. doi:10.1007/s00603-013-0493-5

Byerlee, J.D. (1978). Friction of rocks. Pure & Appl. Geophys, 116, 615-626.

Deere, D. U. & Miller R. P (1966). Engineering classification and index properties of rock. Tech. Report Air Force Weapons Lab. New Mexico, 65-116.

Dunham R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. No 1.

Fecker E, Rengers N (1971). Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass. In: Proceedings symposium on rock fracture, Nancy, France, 1–18

Greenwood J.A & Williamson J.B.P (1966). Contact of nominally flat surfaces. Proc. Royal Society, A 295, 300-319.

Griffith A. A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. Phil Trans. Royal Soc., London , Series A, 221,163-198

Griffith A. A. (1924) Theory of rupture , Proc. Intern. Congress Appl. Mech. , Delft, 55-63.

Goodman R. E & Dubois J. (1972). Duplication of dilatancy in analysis of jointed rock. J. Soil Mech. & Found. Div. , Proc. ASCE 98, SM4, 399-422.

Hencher S.R & Richards L.R (1989). Laboratory direct shear testing on rock discontinuities. Ground Engng 22, 24-31

Hencher S. Richards L. (2014). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 883-905

Hoek E (1968). Brittle failure of rock. In: Stagg KG, Zienkiewicz OC(eds) Rock mechanics in engineering practice. Wiley, London, 99–124

Hoek E, Brown ET (1980). Empirical strength criterion for rock masses. J Geotech Eng Div ASCE 106(GT9):1013–1035

Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture. Géotechnique. 33 (3), 187-223

Hoek E. ,Kaiser P. K., Bawden W. F., (1995) Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, Rotterdan/Brookfield.

Hoek E, Brown ET (1997) Practical estimates of rock mass strength. Int J Rock Mech Min Sci 34(8),1165–1186

Hoek, E., & Martin, C. D. (2014). Fracture initiation and propagation in intact rock . Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering , 6, 287-300

International Society for Rock Mechanics Commission on Standardisation of Laboratoryand Field Tests. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.15, 319-368.

Καντηράνης Ν (2014). Πετρογραφική και ορυκτολογική μελέτη ασβεστόλιθου Μεσαίου Θεσσαλονίκης, Lafarge beton ABEE

Kaiser PK, Diederichs MS, Martin CD, Sharp J, Steiner W (2000). Underground works in hard rock tunneling and mining. Geo Eng 2000, An international conference on geotechnical and geological

Kaiser PK, B-H Kim (2008) Rock mechanics challenges in underground construction and mining. Lecture notes in, 1st Southern hemisphere international rock mechanics symposium, 1,23–38

Leichnitz W. (1985). Mechanical properties of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 313-321.

Marinos, P. & Hoek, E. "GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation". International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000), Technomic publ., 1422-1442, Melbourne (2000)

McClintock F. A, Walsh J. B. (1962) Friction on Griffith cracks under pressure, Proc. 4th National Congress Appl.Mech. , 1015-1021

Mogi K (1966) Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. Bull Earthq Res Inst, 44,215–232

Mogi K. (1972).Fracture and flow of Rocks. Tectonophysics, 13, 541-568.

Mogi K. (1974). On the pressure dependence of strength of rocks and the Coulomb fracture criterion. Tectonophysics, 21, 273-285.

Mogi K. (2007). Experimental Rock Mechanics. Taylor & Francis Group. London, UK.

Nicholson GA (1994) A test is worth a thousand guesses–a paradox. In: Nelson, Laubach (eds) Proceedings of 1st NARMS symposium, 523–529

Orowan E.(1960). Mechanism of seismic faulting. Geol. Soc. Amer. Memoirs 79, 323-345.

Papaliangas T. Hencher S. & Lumsden A. (1995). A comprehensive peak shear strength criterion for rock joints. Proc. 8th Int. Congress ISRM, Tokyo, 1,359-366.

Papaliangas T. Lumsden A. & Hencher S. (1996). Prediction of in situ peak shear strength of rock joints. EUROCK' 96. Proc. Int. Symp on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Barla G(ed.), 1 ,143-149. Rotterdam : Balkema.

Papaliangas T. (1997) Origin and Magnitude of Shear Resistance of Rocks. 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering. 1, 145-152

Papaliangas T. (1997) A New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints, 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering, 1, 153-159

Papaliangas T. Manolopoulou S. Lumsden A. Hencher S. (1997) Applications of a New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints. 3rd Hellenic conference on geotechnical engineering, 1, 161-168

Paterson MS (1958) Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. Bull Geol Soc Am 69,476–485

Patton F.D (1966). Multiple modes of shear failure in rock and related materials. Ph.D. Thesis, Univ. Illinois, U.S.A

Patton FD, Deere DU (1970) Significant geological factors in rock slope stability. In: Proceedings symposium on planning open pitmines. A.A. Balkema, Johannesburg, 143–151

Richards, S. R. H and Richards L. (2014). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. Rock Mech. and Rock Eng 48, 883- 905

Schneider H.J (1976). The friction and deformation behavior of rock joints. Rock Mech. 8,169-184.

Τσουτρέλης Χ. (1985). Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνεί ο. Αθήνα.

Τσιραμπίδης Α. (1996). Τα ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα, University Studio Press

Terzaghi K. (1925). The physical causes of proportionality between pressure and frictional resistance, from Erdbaumechanic, transl. by A. Casagrande in: From theory to practice in soil mechanics. Wiley and Sons.