



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΑΡΙΑ Γ. ΤΖΙΛΙΝΗ
MSc Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Πολιτικός Μηχανικός ΤΕ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ
ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΩΝ ΓΡΕΒΕΝΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020



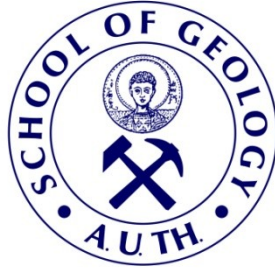


*"Αφιερώνεται στον Κυριάκο,
στον Θανάση και στην Ευδοκία"*





ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI
FACULTY OF SCIENCES
SCHOOL OF GEOLOGY



MARIA G. TZILINI
MSc Engineering Project Management

GEOTECHNICAL INVESTIGATION OF MOLASSING FORMATIONS IN
GREVENA AREA

DISSERTATION THESIS

THESSALONIKI
2020





ΜΑΡΙΑ Γ. ΤΖΙΛΙΝΗ
MSc Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Πολιτικός Μηχανικός ΤΕ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΩΝ
ΓΡΕΒΕΝΩΝ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Μάρτιο του 2020

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 4/5/2020

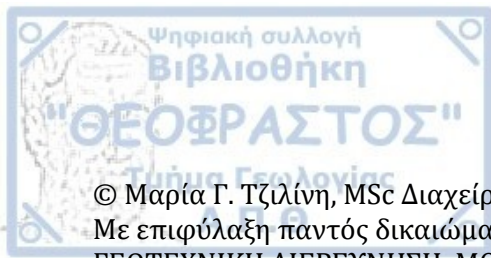
Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Νο: 203

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Χρηστάρας Βασίλειος, Επιβλέπων
Αν. Καθηγητής Καντηράνης Νικόλαος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Καθηγητής Παπαλιάγκας Θεοδόσιος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Χρηστάρας Βασίλειος, Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ
Αν. Καθηγητής Καντηράνης Νικόλαος, Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ
Καθηγητής Παπαλιάγκας Θεοδόσιος, Τμ. Μηχανικών Περιβάλλοντος ΔΙ.ΠΑ.Ε.
Καθηγητής Σαμπατακάκης Νικόλαος, Τμ. Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών
Καθηγητής Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος, Τμ. Μηχανικών Περιβάλλοντος ΔΙ.ΠΑ.Ε.
Αν. Καθηγητής Μαρίνος Βασίλειος, Τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ
Επ. Καθηγητής Παπαθανασίου Γεώργιος, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ.



© Μαρία Γ. Τζιλίνη, MSc Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Πολιτικός Μηχανικός ΤΕ, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΛΑΣΣΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΩΝ
ΓΡΕΒΕΝΩΝ – Διδακτορική Διατριβή

© Maria G. Tzilini, MSc Engineering Project Management, 2020
All rights reserved.
GEOTECHNICAL INVESTIGATION OF MOLASSING FORMATIONS IN GREVENA AREA – *Ph.D. Thesis*

Citation:

Τζιλίνη Μ.Γ., 2020. – Γεωτεχνική διερεύνηση μολασσικών σχηματισμών της λεκάνης των Γρεβενών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμ. Γεωλογίας Νο 203, 282 σελ.

Tzilini M.G., 2020. – Geotechnical investigation of molassing formations in Grevena area. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of the School of Geology No 203, 282 pp.

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.

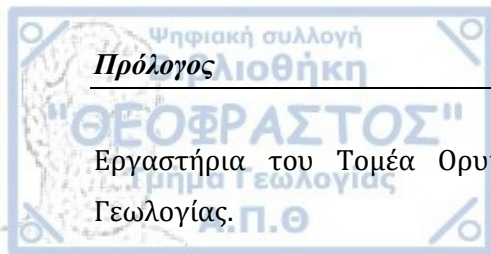
Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Γεωτεχνική διερεύνηση μολασσικών σχηματισμών της λεκάνης των Γρεβενών» εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωλογίας, του τμήματος Γεωλογίας με επιβλέποντα τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Χρηστάρα, ενώ η διεξαγωγή ενός μεγάλου τμήματος της διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Θεοδόσιου Παπαλιάγκα, μέλους της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή αποτελεί την προσπάθεια μιας σκληρής και ταυτόχρονα εποικοδομητικής προσπάθειας, η οποία δεν θα ολοκληρωνόταν χωρίς τη συμπαράσταση ορισμένων πολύ σημαντικών ανθρώπων.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Βασίλειο Χρηστάρα για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση του θέματος και για όλη τη βοήθεια, τη συμπαράσταση και την υπομονή που έδειξε όλα αυτά τα χρόνια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Θεοδόσιο Παπαλιάγκα, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τη συνεχή στήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στη χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Γεωμηχανικής και για την τεράστια και πολύχρονη βοήθεια σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Τον ευχαριστώ ολόψυχα για τον τρόπο που μου δίδαξε να δουλεύω καθώς και για την τεράστια συμβολή του στην επιστημονική μου κατάρτιση. Επίσης τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Ανανία Τσιραμπίδη που υπήρξε μέλος της τριμελούς επιτροπής για τις αρχικές σημαντικές συμβουλές και οδηγίες του και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Καντηράνη που τον αντικατέστησε για την άψογη συνεργασία και την ουσιαστική βοήθειά του στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα



Εργαστήρια του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας.

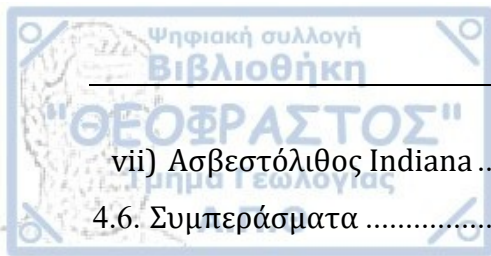
Ευχαριστώ ιδιαίτερα, τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Σαμπατακάκη του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Αναγνωστόπουλο του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος ΔΙ.ΠΑ.Ε., τον Αν. Καθηγητή κ. Βασίλειο Μαρίνο του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ καθώς και τον Επ. Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαθανασίου του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., για τα σχόλια, τις συμβουλές και τις επισημάνσεις τους που βοήθησαν σημαντικά στη βελτίωση του τελικού κειμένου της διατριβής, αλλά και τη συμμετοχή τους στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή.

Επίσης, ευχαριστώ τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙΠΑΕ κ. Κωνσταντινίδη Δημήτριο για την πρόσβαση στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος, τον υποψήφιο διδάκτορα Αναστάσιο Τσικρίκη και τον Δρ. Κωνσταντίνο Βοσνιάκο για τη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του ΔΙΠΑΕ και για την πολύτιμη βοήθειά τους στην δειγματοληψία και στις εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις.

Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω μέσα από την καρδιά στην οικογένειά μου, τον σύζυγό μου Κυριάκο και τα αγαπημένα μου παιδιά Θανάση και Ευδοκία που αποτελούν τη δύναμή μου. Τους ευχαριστώ για όλες εκείνες τις φορές που χρειάστηκα στήριξη, ψυχολογική και ηθική και ήταν πάντα δίπλα μου.

Πρόλογος.....	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
Περιεχόμενα πινάκων	14
Περιεχόμενα σχημάτων	16
Περιεχόμενα εικόνων	25
Πίνακας συμβόλων.....	26
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	29
Abstract	33
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	37
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	41
2.1. Φυσικές παράμετροι πετρωμάτων	41
2.2. Μηχανική συμπεριφορά άρρηκτου πετρώματος.....	43
2.3. Όριο ψαθυρής - όλκιμης συμπεριφοράς	56
2.4. Κριτήρια αστοχίας πετρωμάτων	61
2.4.1. Κριτήριο Mohr-Coulomb	61
2.4.2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.....	64
2.4.3. Δυναμικές παράμετροι πετρωμάτων.....	69
2.4.4. Διατμητική αντοχή ασυνεχειών πετρωμάτων	71
2.4.5. Κριτήρια προσδιορισμού διατμητικής αντοχής ασυνεχειών	79
2.4.6. Επιφάνειες επαφής μεταξύ δύο σωμάτων	97
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	103
3.1. Γεωλογία περιοχής μελέτης	103
3.2. Μεθοδολογία λήψης δειγμάτων	106
3.3. Ορυκτολογική εξέταση	108
3.4. Διαμόρφωση βραχωδών δοκιμίων.....	109
3.5. Δοκιμή τριαξονικής θλίψης	112

3.6. Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών	116
3.7. Μεθοδολογία επεξεργασίας επιφανειών επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	124
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΛΥΣΗ.....	127
4.1. Αποτελέσματα μικροσκοπικής και ορυκτολογικής μελέτης	127
i) Δείγμα τεφρού ψαμμίτη (GS)	127
ii) Δείγμα ερυθρού ψαμμίτη (SST).....	132
iii) Δείγμα λεπτόκοκκου ψαμμίτη (SLST)	137
iv) Δείγμα ασβεστόλιθου (GL)	142
v) Δείγμα σερπεντινίτη (GP)	145
4.2. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης	149
i) Τεφρός ψαμμίτης (GS)	150
ii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST).....	156
iii) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)	162
iv) Ασβεστόλιθος (GL)	168
v) Σερπεντινίτης (GP)	175
4.3. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών	181
i) Τεφρός ψαμμίτης (GS)	182
ii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST).....	193
iii) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)	202
iv) Ασβεστόλιθος (GL)	210
v) Σερπεντινίτης (GP)	223
4.4. Αποτελέσματα φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων.....	232
4.5. Αποτελέσματα επεξεργασίας επιφανειών πραγματικής επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.	234
i) Ψαμμίτης Δεματίου.....	235
ii) Τεφρός ψαμμίτης (GS)	240
iii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST).....	242
iv) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)	244
v) Ασβεστόλιθος (GL)	246
vi) Σερπεντινίτης (GP)	248



Περιεχόμενα

vii) Ασβεστόλιθος Indiana	250
4.6. Συμπεράσματα	256
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	267
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	275
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	283



Πίνακας 2.1.	Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (I.S.R.M., 1981).....	46
Πίνακας 2.2.	Ταξινόμηση βραχώδους υλικού κατά Deere και Miller (1966).....	47
Πίνακας 2.3.	Τιμές φυσικών παραμέτρων ενδεικτικών πετρωμάτων (https://www.academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials).....	48
Πίνακας 2.4.	Μηχανικές ιδιότητες ενδεικτικών πετρωμάτων, (https://www.academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials).....	49
Πίνακας 2.5.	Χαρακτηριστικές τιμές αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη UCS και μέτρου ελαστικότητας E_i , τυπικό εύρος και τυπική απόκλιση για ιζηματογενή πετρώματα και περιδοτίες της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Marinos & Tsiampaos, 2010 και Marinos, 2019).....	50
Πίνακας 2.6.	Ταξινόμηση αέριου πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (Bieniawski, 1975).....	51
Πίνακας 2.7.	Συσχετίσεις μονοαξονικής αντοχής UCS (q_u) και δείκτη σημειακής φόρτισης I_s Kahraman (2001).....	52
Πίνακας 2.8.	Συντελεστές συχέτισης k μεταξύ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σ_c και του δείκτη σημειακής φόρτισης, $I_{s(50)}$, για ιζηματογενή πετρώματα του ελληνικού χώρου (Από Tsiambaos και Sabatakakis, 2004).....	52
Πίνακας 2.9.	Εύρος τιμών των παραμέτρων αντοχής για πετρώματα του Ελληνικού χώρου (από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).....	54
Πίνακας 2.10.	Πίεση μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά για ορισμένα πετρώματα από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Paterson και Wong, 2005 and Byerlee, 1967).....	60
Πίνακας 2.11.	Τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek, 2000 και Hoek, 2007). Σημειώνεται ότι οι τιμές σε παρένθεση αποτελούν εκτίμηση. Το αναφερόμενο εύρος τιμών για κάθε υλικό εξαρτάται από την κοκκομετρία και την αλληλοσύνδεση της κρυσταλλικής δομής - υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε δομές με ισχυρότερη σύνδεση και μεγαλύτερη γωνία τριβής.....	68
Πίνακας 2.12.	Εύρος τιμών της σταθεράς m_i για επιλεγμένα πετρώματα του ελληνικού χώρου.....	69
Πίνακας 2.13.	Ταχύτητες κυμάτων P και S για διάφορους τύπους πετρωμάτων (Manko, 215).....	71
Πίνακας 2.14.	Ταξινόμηση άρρηκτου πετρώματος με βάση τη σκληρότητα Schmidt (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).....	76
Πίνακας 2.15.	Πίνακας : Τιμές βασικής γωνίας τριβής ϕ_b , για διάφορους τύπους πετρωμάτων (Από Alejano <i>et al</i> , 2012 και Grasselli & Egger, 2003).....	96
Πίνακας 4.1.1	Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GS με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.....	131
Πίνακας 4.1.2	Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος SST με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.....	136
Πίνακας 4.1.3	Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος SLST με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.....	140
Πίνακας 4.1.4	Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GL με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.....	143

Πίνακας 4.1.5	Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GP με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.....	146
Πίνακας 4.1.6	Αποτελέσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής ανάλυσης.....	148
Πίνακας 4.2.1.	Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης τεφρού ψαμμίτη GS.....	150
Πίνακας 4.2.2.	Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης ερυθρού ψαμμίτη SST.....	156
Πίνακας 4.2.3.	Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.....	162
Πίνακας 4.2.4.	Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης ασβεστόλιθου GL.....	168
Πίνακας 4.2.5.	Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σερπεντινίτη.....	175
Πίνακας 4.3.1.	Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης τεφρού ψαμμίτη GS.....	182
Πίνακας 4.3.2.	Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ερυθρού ψαμμίτη SST.....	193
Πίνακας 4.3.3.	Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.....	202
Πίνακας 4.3.4.	Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών ασβεστόλιθου GL.....	210
Πίνακας 4.3.5.	Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών σερπεντινίτη GP.....	223
Πίνακας 4.4.1.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τιμών των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.....	232
Πίνακας 4.6.1.	Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης.....	256
Πίνακας 4.6.2.	Τιμές πυκνότητας ρ , πορώδους n , αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σ_c , εφελκυστικής αντοχής σ_t , δείκτη σημειακής αντοχής $I_{s(50)}$, ένδειξη κρουσίμετρου Schmidt SHV και ταχύτητας υπερήχων διαμήκη κυμάτων V_p , εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_{50} και συντελεστής MR	257
Πίνακας 4.6.3.	Τιμές σταθεράς m_i , τάσης μετάβασης (σ_{1T} , σ_{3T}) και γωνία τριβής φ στην ψαθυρή-όλκιμη συμπεριφορά.....	258
Πίνακας 4.6.4.	Γωνίες τριβής (βασική φ_b , παραμένουσα φ_r , μη διαστολική φ_m) από τη δοκιμή διάτμησης και γωνία τριβής φ στην όλκιμη-ψαθυρή συμπεριφορά από δοκιμή τριαξονικής θλίψης.....	260
Πίνακας 4.6.5.	Γωνίες διαστολής ψ και αντίστοιχη τάση μηδενισμού διαστολής σ_{nT} για όλα τα στάδια, για τα πρώτα στάδια (0,1,2) και για το στάδιο 0 (επίδραση του ίδιου βάρους της ασυνέχειας).....	263
Πίνακας 4.6.6.	Τιμές ποσοστού πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r/A_0 και πραγματικής ορθής τάσης σ_{real}	266

Σχήμα 2.1.	Φάσεις βραχώδους υλικού	42
Σχήμα 2.2.	(α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου (Jaeger <i>et al.</i> 2007).....	44
Σχήμα 2.3.	Διάγραμμα τάσης- ανηγμένης αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης (Τσουτρέλης 1985).....	44
Σχήμα 2.4.	Διαγράμματα ορισμού μέτρου ελαστικότητας (Από ISRM, 1981)	45
Σχήμα 2.5.	Διάγραμμα μονοαξονικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για τις κατηγορίες των πετρωμάτων (Από Deere & Miller, 1966).....	47
Σχήμα 2.6.	Τυπικά διαγράμματα εκτροπικής τάσης - αξονικής παραμόρφωσης για ψαθυρή, μεταβατική και όλκιμη συμπεριφορά και σκαριφήματα των παρατηρούμενων θραύσεων ή της υπερβολικής παραμόρφωσης των δοκιμών μετά το τέλος των δοκιμών (από Santarelli and Brown, 1989, τροποποιημένο από Tsirikis <i>et al.</i> , 2019).....	55
Σχήμα 2.7.	Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής σε ασβεστόλιθο Indiana που πραγματοποιήθηκαν από τον Schwartz (1964) και δείχνουν τη μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά (Hoek, 1983).	57
Σχήμα 2.8.	Σχέση εκτροπικής (αποκλίνουσας) τάσης-πλευρικής πίεσης για τους δυο μηχανισμούς παραμόρφωσης (α) τύπος A, (β) τύπος B κατά Mogi (1972,1974).	58
Σχήμα 2.9.	Διάγραμμα κύκλου Mohr που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση δοκιμών τριαξονικής θλίψης (Orowan, 1960)	59
Σχήμα 2.10.	Διάγραμμα περιβάλλουσας κριτηρίου Mohr-Coulomb	63
Σχήμα 2.11.	Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Mohr-Coulomb.....	63
Σχήμα 2.12.	Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980).....	65
Σχήμα 2.13.	Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου H-B για διάφορες τιμές της παραμέτρου m_i	65
Σχήμα 2.14.	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).	67
Σχήμα 2.15.	Ταξινόμηση της απόστασης κατά I.S.R.M. (1981)	73
Σχήμα 2.16.	Κύριες γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών βράχου (Hudson, 1989).....	74
Σχήμα 2.17.	Ταξινόμηση τοιχωμάτων σύμφωνα με τη σκληρότητα Schmidt (Deere and Miller, 1966).....	75
Σχήμα 2.18.	Άνοιγμα ασυνεχειών κατά I.S.R.M., 1981.....	77
Σχήμα 2.19.	Επίδραση του υλικού πλήρωσης στη διατμητική αντοχή μιας τραχειάς ασυνέχειας (Papaliangas <i>et al.</i> , 1993).	78
Σχήμα 2.20.	Διγραμμική περιβάλλουσα αστοχίας του Patton (1966) (Ένα από τα δύο σχήματα)	80
Σχήμα 2.21.	Διάτμηση κατά μήκος τραχειάς επιφάνειας (Goldstein <i>et al.</i> , 1996).....	80
Σχήμα 2.22.	a) Ορισμός του βαθμού σύμπλεξης, η b) Αποτελέσματα σύμφωνα με το διγραμμικό κριτήριο c) Αποτελέσματα σύμφωνα με το κριτήριο Ladanyi και Archambault (Από Ladanyi and Archambault 1970).	82
Σχήμα 2.23.	a) Ορισμός του ρυθμού διαστολής και του λόγου της επιφάνειας διάτμησης. b) Περιβάλλουσες αστοχίας για τραχειές επιφάνειες και βραχώμαζα, αντίστοιχα. c) Μεταβολή του ρυθμού διαστολής και του λόγου	

	της επιφάνειας διάτμησης με την ορθή τάση (Από Ladanyi and Archambault 1970)	83
Σχήμα 2.24.	Ladanyi και Archambault (1970)	84
Σχήμα 2.25.	Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977).....	87
Σχήμα 2.26.	Επαφή δυο τραχειών βραχωδών επιφανειών (Papaliangas , 1997).....	92
Σχήμα 2.27.	Προσδιορισμός της γωνία τριβής άρρηκτου πετρώματος από τριαξονικές δοκιμές θλίψης (Papaliangas , 1997).	93
Σχήμα 2.28.	Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas (Papaliangas, 1997).	94
Σχήμα 2.29.	Μέτρηση τραχύτητας στο ύπαιθρο (κατά Fecker & Rengers, 1971).....	95
Σχήμα 2.30.	Μικροσκοπική όψη δύο επιφανειών σε επαφή (Lambe and Whitman 1969)	98
Σχήμα 2.31.	Σχέση μεταξύ (α) ποσοστιαίας επιφάνειας πραγματικής επαφής (β) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής και ασκούμενης ορθής τάσης κατά την ολίσθηση τριβής σε τρεις περιπτώσεις: SS/SS, ψαμμίτης /ψαμμίτης, LS/LS, ασβεστόλιθος/ασβεστόλιθος, SS/LS, ψαμμίτης/ ασβεστόλιθος (Logan and Teufel, 1986)	100
Σχήμα 3.1.	Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 1985). 1: Μάζα της Ροδόπης, 2: Σερβομακεδονική Μάζα, 3: Περιοδοπική Ζώνη, 4: Ζώνη Αξιού, 5: Πελαγονική Ζώνη, 6: Υποπελαγονική Ζώνη, 7:Αττικοκυκλαδική Μάζα, 8: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, 9: Ζώνη Πίνδου, 10: Ζώνη αβρόβου-Τριπόλεως, 11: Ιόνιος Ζώνη, 12: Ζώνη Παξών	103
Σχήμα 3.2.	Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Γρεβενά (επάνω), και λεπτομέρεια με τις θέσεις των δειγμάτων (κάτω) (Ο.Α.Σ.Π. Αθήνα 1999)	104
Σχήμα 3.3.	Συνοπτική στρωματογραφική στήλη της ευρύτερης λεκάνης των Γρεβενών (Μουντράκης και συνεργάτες, 1996).	106
Σχήμα 3.4.	Θάλαμος Hoek για την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (ELE INTERNATIONAL).....	113
Σχήμα 3.5.	Μέθοδος δοκιμής διάτμησης πολλαπλών σταδίων σε επαναλαμβανόμενες δοκιμές υπό διαφορετικές ορθές τάσεις στο ίδιο δοκίμιο (α) χωρίς επανατοποθέτηση, (β) με επανατοποθέτηση της ασυνέχειας στην αρχική της φυσική κατάσταση για κάθε στάδιο διάτμησης	119
Σχήμα 3.6.	Ανάγωγή ορθής και διατμητικής τάσης σε κεκλιμένο επίπεδο.	122
Σχήμα 3.7.	Διαγράμματα διατμητικής μετατόπισης - διατμητικής τάσης και διατμητικής μετατόπισης - ορθής μετατόπισης. Υπολογίζεται η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή καθώς και η αντίστοιχη διαστολή.....	122
Σχήμα 3.8.	Εκτίμηση μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής τάσης.	123
Σχήμα 3.9.	Σκαρίφημα δείγματος υπολογισμού επιφανειών πραγματικής επαφής.....	125
Σχήμα 3.10.	Βήματα υπολογισμού επιφανειών πραγματικής επαφής.....	125
Σχήμα 4.2.1.	Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον τεφρό ψαμμίτη GS.....	151
Σχήμα 4.2.2.	Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης σ_3 και: (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β)Λόγου αξονικής/παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης για τον τεφρό ψαμμίτη GS.	152
Σχήμα 4.2.3.	Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής τεφρού ψαμμίτη GS.....	153
Σχήμα 4.2.4.	Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον τεφρό ψαμμίτη GS.....	154
Σχήμα 4.2.5.	Διάγραμμα Ορθής-Διατμητικής τάσης τεφρού ψαμμίτη GS.	155

Σχήμα 4.2.6.	Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές τεφρού ψαμμίτη GS. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά.....	155
Σχήμα 4.2.7.	Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης ερυθρού ψαμμίτη SST.....	157
Σχήμα 4.2.8.	Διάγραμμα Πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής ερυθρού ψαμμίτη SST	158
Σχήμα 4.2.9.	Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον ερυθρό ψαμμίτη SST.....	159
Σχήμα 4.2.10.	Διαγράμματα πλευρικής πίεσης σ_3 και: (α) Παραμόρφωσης θραύσης, (β) Λόγου αξονικής /παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρου Ελαστικότητας, (δ) Γωνίας θραύσης για τον ερυθρό ψαμμίτη SST.....	160
Σχήμα 4.2.11.	Διάγραμμα Ορθής τάσης σ_n - Διατμητικής τάσης τ ερυθρού ψαμμίτη SST.	161
Σχήμα 4.2.12.	Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές ερυθρού ψαμμίτη SST. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.	161
Σχήμα 4.2.13.	Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης- αξονικής τάσης για την λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST.....	163
Σχήμα 4.2.14.	Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής αντοχής για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST.....	164
Σχήμα 4.2.15.	Διαγράμματα πλευρικής πίεσης σ_3 και (α) Παραμόρφωσης θραύσης, (β) Λόγου αξονικής /παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρου Ελαστικότητας, (δ) Γωνίας θραύσης για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST.	165
Σχήμα 4.2.16.	Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST.....	166
Σχήμα 4.2.17.	Διάγραμμα ορθής τάσης σ_n - διατμητικής τάσης τ , λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.....	167
Σχήμα 4.2.18.	Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.....	167
Σχήμα 4.2.19.	Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον ασβεστόλιθο GL.	169
Σχήμα 4.2.20.	Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης με (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β)Λόγο αξονικής-παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης για τον ασβεστόλιθο GL.	170
Σχήμα 4.2.21.	Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής για τον ασβεστόλιθο GL.	171
Σχήμα 4.2.22.	Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον ασβεστόλιθο GL.....	172
Σχήμα 4.2.23.	Διαγράμματα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον ασβεστόλιθο GL για τις δύο διακριτές συμπεριφορές θραύσης.....	173
Σχήμα 4.2.24.	Διάγραμμα Ορθής-Διατμητικής τάσης για τον ασβεστόλιθο GL.....	173
Σχήμα 4.2.25.	Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές με ψαθυρή συμπεριφορά ασβεστόλιθου GL. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.....	174
Σχήμα 4.2.26.	Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον σερπεντινίτη GP.....	176
Σχήμα 4.2.27.	Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής για τον σερπεντινίτη GP	177

Σχήμα 4.2.28.	Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης με (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β) Λόγο αξονικής-παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης για τον σερπεντινίτη GP.....	178
Σχήμα 4.2.29.	Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον σερπεντινίτη GP.....	179
Σχήμα 4.2.30.	Διάγραμμα Ορθής-Διατμητικής τάσης για τον Σερπεντινίτη GP.....	179
Σχήμα 4.2.31.	Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές σερπεντινίτη GP. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.	180
Σχήμα 4.3.1.	Δείγμα GS1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	184
Σχήμα 4.3.2.	Δείγμα GS2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τση	185
Σχήμα 4.3.3.	Δείγμα GS3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	186
Σχήμα 4.3.4.	Δείγμα GS4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	187
Σχήμα 4.3.5.	Δείγμα GS5: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	188
Σχήμα 4.3.6.	Δείγμα GS7: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	189
Σχήμα 4.3.7.	Διαγράμματα Ορθής τάσης σ_n με: (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) (γ) Μη διαστολική διατμητική αντοχή (δ) Διατμητική αντοχή (ε) Διατμητική δυσκαμψία κάθε δοκιμίου (στ) Διατμητική δυσκαμψία για το σύνολο των δοκιμών τεφρού ψαμμίτη GS.....	190
Σχήμα 4.3.8.	Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής ($\tan\psi$)-Ορθής τάσης: (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης: (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον τεφρό ψαμμίτη GS.....	191
Σχήμα 4.3.9.	Δείγμα SST1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	195
Σχήμα 4.3.10.	Δείγμα SST2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -	

	Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	196
Σχήμα 4.3.11.	Δείγμα SST3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	197
Σχήμα 4.3.12.	Δείγμα SST4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	198
Σχήμα 4.3.13.	(α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολικής-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση για το ερυθρό ψαμμίτη SST.....	199
Σχήμα 4.3.14.	Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα στάδια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους, ερυθρού ψαμμίτη SST.....	200
Σχήμα 4.3.15.	Δείγμα SLST1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	204
Σχήμα 4.3.16.	Δείγμα SLST2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	205
Σχήμα 4.3.17.	Δείγμα SLST4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	206
Σχήμα 4.3.18.	(α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολικής-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση, λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.	207
Σχήμα 4.3.19.	Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους, λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.	208

Σχήμα 4.3.20.	Δείγμα GL1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	212
Σχήμα 4.3.21.	Δείγμα GL2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	213
Σχήμα 4.3.22.	Δείγμα GL3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	214
Σχήμα 4.3.23.	Δείγμα GL4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	215
Σχήμα 4.3.24.	Δείγμα GL5: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	216
Σχήμα 4.3.25.	Δείγμα GL6: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	217
Σχήμα 4.3.26.	Δείγμα GL7: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση	218
Σχήμα 4.3.27.	Διαγράμματα Ορθής τάσης με: (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) (γ) Μη διαστολική διατμητική αντοχή (δ) Διατμητική αντοχή (ε) Διατμητική δυσκαμψία κάθε δοκιμίου (στ) Διατμητική δυσκαμψία για το σύνολο των δοκιμίων του ασβεστόλιθου GL.....	219
Σχήμα 4.3.28.	Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης και (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον ασβεστόλιθο GL	220
Σχήμα 4.3.29.	Δείγμα GP1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολικής)-Ορθή τάση.....	225
Σχήμα 4.3.30.	Δείγμα GP2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολικής)-Ορθή τάση.....	226
Σχήμα 4.3.31.	Δείγμα GP3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή	



	τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	227
Σχήμα 4.3.32.	Δείγμα GP4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση	228
Σχήμα 4.3.33.	(α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολικής-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση για τον σερπεντινίτη GP.....	229
Σχήμα 4.3.34.	Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον σερπεντινίτη GP.....	230
Σχήμα 4.4.1.	Διαγράμματα συσχέτισης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS) με: (α) τη μέση ένδειξη του κρουσίμετρου Schmidt (SHV), (β) την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (σ _t) και (γ) το δείκτη σημειακής αντοχής ($I_{s(50)}$) για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.....	233
Σχήμα 4.4.2.	Διαγράμματα συσχέτισης ταχύτητας υπερήχων διαμήκη κυμάτων V_p με (α) την πυκνότητα και (β) το πορώδες για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.....	233
Σχήμα 4.5.1.	Ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής σε συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου	235
Σχήμα 4.5.2.	Ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου	235
Σχήμα 4.5.3.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για διαφορετικά δοκίμια ασυνέχειας σε διαφορετική ονομαστική ορθή τάση για τον ψαμμίτη Δεματίου.....	236
Σχήμα 4.5.4.	Ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη DS	237
Σχήμα 4.5.5.	Ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής σε συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη DS.	238
Σχήμα 4.5.6.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 5 δείγματα στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά διαφορετική αυξανόμενη ορθή τάση για δείγματα ψαμμίτη DS.....	239
Σχήμα 4.5.7.	Ψαμμίτης GS: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.	240

Σχήμα 4.5.8.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 5 δείγματα ψαμμίτη GS στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.	241
Σχήμα 4.5.9.	Ψαμμίτης SST: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.	242
Σχήμα 4.5.10.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα ψαμμίτη SST στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.	243
Σχήμα 4.5.11.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 3 δείγματα λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.....	244
Σχήμα 4.5.12.	Λεπτόκοκκος ψαμμίτης SLST: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.....	245
Σχήμα 4.5.13.	Ασβεστόλιθος GL: Διαγράμματα ονομαστικής ορθής τάσης με (α) ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής (β) ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής.	246
Σχήμα 4.5.14.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα ασβεστόλιθου GL στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.	247
Σχήμα 4.5.15.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα σερπεντινίτη GP στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.	248
Σχήμα 4.5.16.	Σερπεντινίτης GP: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.....	249
Σχήμα 4.5.17.	Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για δείγματα ασβεστόλιθου Indiana στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.	250
Σχήμα 4.5.18.	Ασβεστόλιθος Indiana: Διαγράμματα ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.....	251

Σχήμα 4.5.19.	Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης για όλους τους τύπους πετρωμάτων.....	252
Σχήμα 4.5.20.	Συγκεντρωτικά διαγράμματα ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης (α) για όλο το εύρος ορθών τάσεων (β) για ορθή τάση μεγαλύτερη από 500kPa για όλους τους τύπους πετρωμάτων.....	253
Σχήμα 4.5.21.	Διαγράμματα (α) λόγου ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής σ_{real} προς της τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη κατάσταση σ_{3T} ($\sigma_{real}/\sigma_{3T}$) και (β) λόγου ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{real}/σ_c συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για όλους τους τύπους πετρωμάτων.....	254
Σχήμα 4.6.1.	Τιμές σταθεράς m_i υπολογιζόμενης με τι δύο εκδοχές του Hoek 2002 και των Hoek-Brown 2018.....	258
Σχήμα 4.6.2.	Τιμές παραμένουσας ή τελικής γωνία τριβής, μη διαστολικής και «βασικής» γωνίας τριβής ανά τύπο πετρώματος.....	260
Σχήμα 4.6.3.	Τιμές μη διαστολικής γωνίας τριβής δοκιμής διάτμησης και γωνία ψαθυρής-όλκιμης συμπεριφοράς τριαξονικής δοκιμής για όλους τους εξετασθέντες τύπους πετρωμάτων	261
Σχήμα 4.6.4.	Τιμές μέγιστης γωνίας διαστολής κατά τη διάτμηση ασυνεχειών για όλους τους εξετασθέντες τύπους πετρωμάτων, ανάλογα με τα στάδια ορθών τάσεων που υπολογίστηκαν. Στάδιο 0: μόνο ίδιο βάρος. Στάδιο 0,1,2. Μέση τιμή της μέγιστης γωνίας διαστολής κατά τα στάδια υπό την επίδραση του ίδιου βάρους και επόμενων 2 ορθών τάσεων. Όλα τα στάδια: Μέση τιμή της μέγιστης γωνίας διαστολής από όλα τα στάδια ορθών τάσεων.	263
Σχήμα 4.6.5.	Λόγος τάσης μηδενισμού της γωνίας διαστολής (σ_{nT}) κατά τη δοκιμή διάτμησης ασυνεχειών ως ποσοστό της πλευρικής πίεσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (σ_{3T}) κατά τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης του άρρηκτου υλικού.	264

Εικόνα 3.1.	Χάρτης με τις θέσεις των δειγμάτων και φωτογραφία της κάθε θέσης.....	107
Εικόνα 3.2.	Περιθλασίμετρο ακτίνων-X του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας.....	109
Εικόνα 3.3.	Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψης.....	110
Εικόνα 3.4.	Εφελκυστική διάρρηξη.....	110
Εικόνα 3.5.	Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού (αριστερά) και πυρηνοληψία πετρωμάτων (δεξιά).	111
Εικόνα 3.6.	Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος	111
Εικόνα 3.7.	Συσκευή λείανσης δοκιμίων.....	112
Εικόνα 3.8.	Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων GP.....	112
Εικόνα 3.9.	Διάταξη τριαξονικής θλίψης.....	114
Εικόνα 3.10.	Εγκιβωτισμός δοκιμίου.....	116
Εικόνα 3.11.	Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας.....	117
Εικόνα 3.12.	Προφیلόμετρο.....	117
Εικόνα 3.13.	Μήτρες δοκιμίων.....	118
Εικόνα 3.14.	Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών βράχου.....	120
Εικόνα 3.15.	Περιβάλλον WINHOST κατά την διάρκεια μιας δοκιμής άμεσης διάτμησης.....	121
Εικόνα 4.1.1.	Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GS.....	129
Εικόνα 4.1.2.	Περιθλασιόγραμμα δείγματος GS.....	131
Εικόνα 4.1.3.	Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος SST.....	134
Εικόνα 4.1.4.	Περιθλασιόγραμμα δείγματος SST.....	136
Εικόνα 4.1.5.	Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος SLST.....	138
Εικόνα 4.1.6.	Περιθλασιόγραμμα δείγματος SLST.....	140
Εικόνα 4.1.7.	Περιγραφή του τριγωνικού σχήματος Folk et al 1970.....	141
Εικόνα 4.1.8.	Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GL.....	142
Εικόνα 4.1.9.	Περιθλασιόγραμμα δείγματος GL.....	144
Εικόνα 4.1.10.	Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GP.....	146
Εικόνα 4.1.11.	Περιθλασιόγραμμα δείγματος GP.....	147

<i>ASTM</i>	Αμερικανική εταιρεία δοκιμών και υλικών (American society for testing and materials)
<i>BDT</i>	ψαθυρή-όλκιμη μετάβαση (brittle ductile transition)
<i>c</i>	συνοχή πετρώματος
<i>dl, dead load</i>	διάτμηση υπό την επίδραση μόνο του ιδίου βάρους του πάνω κομματιού του δοκιμίου
<i>d_{n,peak}</i>	μέγιστη γωνία διαστολής
<i>GSI</i>	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής
<i>i</i>	γωνία που εκφράζει την τραχύτητα
<i>I_{s(50)}</i>	δείκτης σημειακής φόρτισης
<i>ISRM</i>	Διεθνής κοινότητα βραχομηχανικής (International Society for Rock Mechanics)
<i>JCS</i>	αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (Joint wall Compression Strength).
<i>JRC</i>	συντελεστής τραχύτητας των ασυνεχειών (Joint Roughness Coefficient)
<i>JRC₀</i>	συντελεστής τραχύτητας σε μήκος <i>L₀</i> ,
<i>JRC_n</i>	συντελεστής τραχύτητας σε μήκος <i>L_n</i> .
<i>k_{S(50)}</i>	διατμητική δυσκαμψία
<i>L</i>	μήκος διαδρομής του κύματος
<i>m, s</i>	σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του βράχου
<i>n</i>	πορώδες
<i>SHV</i>	δείκτης σκληρότητας κρουσίμετρου Schmidt
<i>tanψ</i>	ρυθμός στιγμιαίας διαστολής
<i>t_p</i>	χρόνος διέλευσης του διαμήκους κύματος
<i>t_s</i>	χρόνος διέλευσης του εγκάρσιου κύματος
<i>V_p</i>	ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος
<i>V_s</i>	ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιου κύματος
<i>α</i>	μέση γωνία κλίσης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο
<i>A</i>	εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου
<i>A₀</i>	εμβαδόν ονομαστικής επιφάνειας
<i>A_r</i>	εμβαδόν πραγματικής επιφάνειας επαφής
<i>Δh, dh, δ_s</i>	διατμητική μετατόπιση
<i>Δv, dv</i>	ορθή μετατόπιση
<i>ε₁</i>	αξονική παραμόρφωση
<i>E₅₀</i>	μέτρο ελαστικότητας
<i>θ</i>	γωνία θραύσης
<i>θ*_{max}</i>	μέγιστη γωνία κλίσης σε σχέση με την κατεύθυνση της διάτμησης
<i>P</i>	μέγιστο αξονικό φορτίο
<i>ρ_d</i>	ξηρή πυκνότητα
<i>P_r</i>	παραμένων αξονικό φορτίο
<i>σ, σ_n</i>	ορθή τάση

σ_1	αξονική τάση, μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά τη θραύση, αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου, ορθή τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής
σ_3	πλευρική πίεση, ελάχιστη κύρια ενεργός τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο
σ_c	θλιπτική αντοχή πετρώματος
σ_{no}	μικρή τιμή ορθής τάσης που προκαλεί μηδενική παραμόρφωση στην επιφάνεια της ασυνέχειας
σ_{nT}	ορθή τάση η οποία εμποδίζει πλήρως την ασυνέχεια να διασταλεί
σ_r	παραμένουσα αντοχή
σ_t	εφελκυστική αντοχή του πετρώματος
τ	διατμητική τάση, διατμητική αντοχή ασυνεχειών
τ_1	διατμητική τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής
τ_m	μη διαστολική διατμητική αντοχή
τ_p	μέγιστη διατμητική αντοχή
φ	γωνία εσωτερικής τριβής
φ_b	βασική γωνία τριβής
φ_m	γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων
φ_r	παραμένουσα ή τελική γωνία τριβής
ψ	στιγμαία γωνία διαστολής
ψ_o	μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεσοχών της επιφάνειας



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αντοχή σε διάτμηση των γεωυλικών είναι καθοριστικής σημασίας για τη μηχανική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών στα πλαίσια της κατασκευής τεχνικών έργων. Στην περίπτωση των βραχωδών σχηματισμών η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται τόσο από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος όσο και από τον προσανατολισμό και τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Η διατμητική αντίσταση άρρηκτων βραχωδών υλικών εξετάζεται πληρέστερα με τη βοήθεια της δοκιμής τριαξονικής θλίψης ενώ η διατμητική αντίσταση κατά μήκος ασυνεχειών προσδιορίζεται με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης.

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η γεωτεχνική διερεύνηση μολασσικών σχηματισμών της λεκάνης των Γρεβενών και χαρακτηριστικών πετρωμάτων από τις παρυφές της λεκάνης στα όρια της Πίνδου (οφιολιθικό σύμπλεγμα), με εστίαση στη διερεύνηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής μέσω δοκιμών τριαξονικής θλίψης άρρηκτου υλικού και δοκιμών άμεσης διάτμησης κατά μήκος φυσικών και τεχνητών ασυνεχειών.

Προς την κατεύθυνση αυτή, πραγματοποιήθηκαν δυο ανεξάρτητες σειρές εργαστηριακών δοκιμών, που η μία καλύπτει τη μηχανική συμπεριφορά σε τριαξονική θλίψη επιλεγμένων τύπων άρρηκτων πετρωμάτων και η δεύτερη τη μηχανική συμπεριφορά σε άμεση διάτμηση τεχνητών και φυσικών ασυνεχειών των ιδίων πετρωμάτων.

Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων της περιοχής μελέτης, στους οποίους περιλαμβάνονται ψαμμίτης (3 τύποι), ασβεστόλιθος και σερπεντινίτης. Πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών σε τριαξονική θλίψη, σε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-

70 MPa, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, και αναλύθηκε η συμπεριφορά των υλικών, ιδιαίτερα στις υψηλότερες τιμές πλευρικής πίεσης, κατά τις οποίες το δοκίμιο μεταβάλλει σταδιακά τη συμπεριφορά του από ψαθυρή σε όλκιμη.

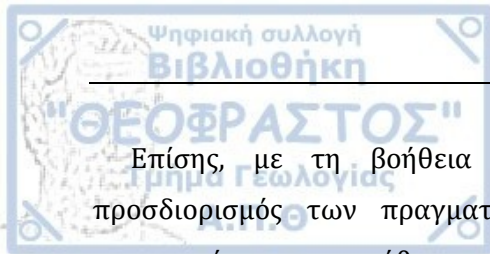
Συνολικά, στα πλαίσια της έρευνας λήφθηκαν βραχώδη τεμάχια από τέσσερις θέσεις δειγματοληψίας και πυρήνες από μία δειγματοληπτική γεώτρηση της ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ, από τα οποία διαμορφώθηκαν και εξετάστηκαν ως προς τις φυσικές, δυναμικές και μηχανικές τους ιδιότητες 317 δείγματα βραχώδους υλικού. Ειδικότερα πρόκειται για 2 θέσεις δειγματοληψίας με ψαμμιτικούς σχηματισμούς (128 δοκίμια), 1 θέση με ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (89 δοκίμια), 1 θέση με σερπεντινίτες (88 δοκίμια) και 1 θέση από γεώτρηση της ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ για την λήψη δειγμάτων λεπτόκοκκου ψαμμίτη (12 δοκίμια).

Έτσι, συνολικά εκτελέστηκαν:

- 100 δοκιμές προσδιορισμού του πορώδους, ξηρής πυκνότητας,
- 83 δοκιμές προσδιορισμού της ταχύτητας διάδοσης των επιμήκων κυμάτων υπερήχων
- 100 δοκιμές προσδιορισμού της σκληρότητας Schmidt
- 56 δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη σημειακής φόρτισης
- 10 δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη
- 42 δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό σ_t (Βραζιλιανή δοκιμή)
- 192 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών
- 92 δοκιμές τριαξονικής θλίψης άρρηκτου υλικού

Πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών σε τριαξονική θλίψη, σε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, και εξετάστηκε η συμπεριφορά των υλικών, ιδιαίτερα στις υψηλότερες τιμές πλευρικής πίεσης, κατά τις οποίες το δοκίμιο μεταβάλλει σταδιακά τη συμπεριφορά του από ψαθυρή σε όλκιμη.

Στους ίδιους τύπους πετρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης σταθερής ορθής τάσης στο εύρος 0-2 MPa, σε φυσικές και τεχνητές ασυνέχειες. Η συνολική διατμητική μετατόπιση σε όλες τις δοκιμές ήταν τουλάχιστο 5% του μήκους του δοκιμίου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην λεπτομερή καταγραφή της διαστολής του δοκιμίου, με τη βοήθεια της οποίας έγινε ανάλυση της διατμητικής αντοχής σε συνιστώσα τριβής και συνιστώσα διαστολής λόγω τραχύτητας.



Επίσης, με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των πραγματικών επιφανειών επαφής των δύο τοιχωμάτων των ασυνεχειών, και εκτιμήθηκε η τιμή της επ' αυτών αναπτυσσόμενης πραγματικής ορθής τάσης. Από τη συσχέτιση της τιμής αυτής της τάσης με την τάση που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά κατά την τριαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την ερμηνεία των τιμών των παραμέτρων διατμητικής αντοχής με τους δυο τύπους εργαστηριακών δοκιμών.

Τα αποτελέσματα συμβάλλουν στην κατανόηση του μηχανισμού της διάτμησης των ασυνεχειών, στο ρόλο της διαστολής και στη σχέση τους με την τριαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος στη μεταβατική περιοχή αλλαγής συμπεριφοράς από ψαθυρή σε όλκιμη.



Abstract

The shear strength of geological materials is of great importance for the mechanical behavior of geological formations within the framework of construction of technical works. In the case of rock formations, this behavior depends on both the mechanical characteristics of the intact rock material and the orientation and the geometric and mechanical characteristics of the discontinuities. The shear resistance of intact rock materials is best examined by triaxial compression testing, while the shear resistance along discontinuities is determined by direct shear testing.

The aim of the thesis is the geotechnical investigation of three rock types from the molassing formations of Grevena basin and two characteristic rocks from its western border with Pindos mountain (ophiolite complex). The study is focused on the of shear strength parameters through triaxial testing of intact rock material and direct shear testing along natural and artificial discontinuities.

Towards this goal, we conducted two independent series of laboratory tests: one covering the mechanical behavior in triaxial compression of selected types of intact rocks and the second one covering the shear behavior of artificial and natural discontinuities of the same rock.

Five different rock types from the study area were investigated, including three types of sandstone, one limestone and one serpentinite. Triaxial test series were performed at confining pressures range of 0-70 MPa, the shear strength parameters were determined,

and the behavior of the materials was examined, especially at the highest confining pressures, where the sample gradually changes its behavior from brittle to ductile.

Several rock blocks were obtained from four sampling sites and from one borehole drilling of Egnatia Motorway, from which 317 specimens of intact rock material were prepared and investigated in terms of their physical, and mechanical properties. Two of these sampling sites were in sandstone formations (128 specimens), one site in limestone formation (89 specimens) and one site with serpentinites (88 specimens). Finally, 12 specimens were prepared from borehole cores drilled during the construction of Egnatia Motorway.

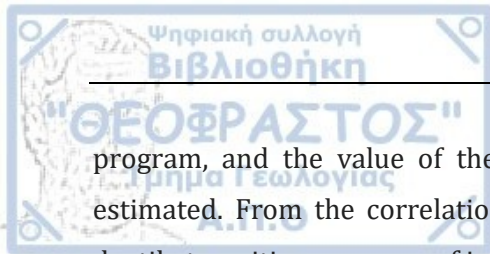
The properties and the number of tests performed for the determination of their values are:

- Porosity and dry density: 100
- P-wave velocity : 83
- Schmidt hardness tests: 100
- Point load strength: 56
- Unconfined compressive strength : 10
- Indirect tensile strength (Brazilian test): 42
- Triaxial compression of intact rock: 92
- Shear tests on discontinuities: 192

A series of triaxial compression tests were performed at confining pressures in the range of 0-70 MPa. The shear strength parameters were determined, and the behavior of the materials was studied, especially at the highest confining pressures, approaching the brittle-ductile transition.

Another series of direct shear tests on natural and artificial discontinuities of the same rock types, was carried out, under constant normal load conditions, under normal stresses in the range of 0-2 MPa. The total shear displacement in all tests was at least 5% of the specimen length. Particular emphasis was placed on the detailed recording of the dilation of the top block of the specimen during shearing and the dilation component of shear strength was accurately determined.

The real area of contact between the two walls of the discontinuities were determined for all direct shear tests, using ImageJ, a public domain processing and analysis



program, and the value of the real normal stress developed on the contact spots was estimated. From the correlation between the real normal stress at peak and the brittle-ductile transition pressure of intact specimens as determined from the triaxial compression tests, useful conclusions have been drawn for the interpretation of the values of shear strength parameters by the two types of laboratory tests.

The results of the thesis provide an interpretation of the shearing mechanism of discontinuities, the role of dilation, and their relationship to the triaxial strength of intact rock in the brittle-ductile transition.



Κεφάλαιο 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθοριστικής σημασίας για τη μηχανική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, στα πλαίσια της κατασκευής τεχνικών έργων, αποτελεί η διάταξη, τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, γεγονός που αναγνωρίζεται από την κυρίαρχη θέση που οι ασυνέχειες κατέχουν σε όλα τα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας. Ιδιαίτερα τονίζεται ότι, ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI), που έχει ευρύτατη εφαρμογή τα τελευταία χρόνια, βασίζεται στην εκτίμηση της δομής και της κατάστασης των ασυνεχειών της βραχομάζας. Επιπλέον, οι αστοχίες τύπου επίπεδης ή σφηνοειδούς ολίσθησης, ελέγχονται πλήρως από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, τα οποία καθορίζουν τη διατμητική τους αντοχή.

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας εξαρτάται επίσης, σε μικρότερο βαθμό, και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος. Το άρρηκτο πέτρωμα, κατά κανόνα αστοχεί με διατμητική αστοχία. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown αναπτύχθηκε για να περιγράψει τη μηχανική συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος, υπό τριαξονική θλιπτική εντατική κατάσταση και διατμητική αστοχία, που καλύπτει όλο το εύρος των πλευρικών πιέσεων από 0, που αντιστοιχεί στη μονοαξονική θλίψη έως την πίεση μετάβασης στο όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας (Hoek and Brown, 2018).

Η διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων διαφόρων περιοχών του ελλαδικού χώρου, αποτέλεσε το αντικείμενο μεγάλου αριθμού

μελετών. Ωστόσο, στις παραμέτρους των μελετών αυτών σπανίως περιλαμβάνεται η διερεύνηση της διατμητικής αντοχής των πετρωμάτων τόσο του άρρηκτου πετρώματος, όσο και, κυρίως, των ασυνεχειών.

Στην περίπτωση των άρρηκτων πετρωμάτων, η διατμητική αντοχή εξετάζεται πληρέστερα με τη βοήθεια της δοκιμής τριαξονικής θλίψης, ενώ η διατμητική αντίσταση κατά μήκος ασυνεχειών προσδιορίζεται με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης.

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η γεωτεχνική διερεύνηση χαρακτηριστικών πετρωμάτων από την ιζηματογενή λεκάνη των Γρεβενών, με εστίαση στη διερεύνηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής μέσω δοκιμών τριαξονικής θλίψης άρρηκτου υλικού και δοκιμών άμεσης διάτμησης κατά μήκος φυσικών και τεχνητών ασυνεχειών.

Προς την κατεύθυνση αυτή, πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές εργαστηριακών δοκιμών, που η μία καλύπτει τη μηχανική συμπεριφορά σε τριαξονική θλίψη επιλεγμένων τύπων άρρηκτων πετρωμάτων και η δεύτερη τη μηχανική συμπεριφορά τεχνητών και φυσικών ασυνεχειών των ιδίων πετρωμάτων.

Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων της περιοχής μελέτης, στους οποίους περιλαμβάνονται ψαμμίτης (3 τύποι), ασβεστόλιθος και σερπεντινίτης. Πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών σε τριαξονική θλίψη, σε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, και εξετάστηκε η συμπεριφορά των υλικών, ιδιαίτερα στις υψηλότερες τιμές πλευρικής πίεσης, κατά τις οποίες το δοκίμιο μεταβάλλει σταδιακά τη συμπεριφορά του από ψαθυρή σε όγκιμη.

Στους ίδιους τύπους πετρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης σταθερής ορθής τάσης στο εύρος 0-2 MPa, σε φυσικές και τεχνητές ασυνέχειες. Η συνολική διατμητική μετατόπιση σε όλες τις δοκιμές ήταν τουλάχιστο 5% του μήκους του δοκιμίου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην λεπτομερή καταγραφή της διαστολής του δοκιμίου, με τη βοήθεια της οποίας έγινε ανάλυση της διατμητικής αντοχής σε συνιστώσα τριβής και συνιστώσα διαστολής λόγω τραχύτητας.

Η ορθή τάση κατά τις δοκιμές διάτμησης κυμάνθηκε στο εύρος 0-2 MPa, που αντιστοιχεί σε ύψος υπερκειμένων 0-80 m, υποθέτοντας μια μέση τιμή πυκνότητας 2500 kg/m³. Αντίστοιχα στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa που αντιστοιχεί σε βάθος που υπερβαίνει τα 2,75 km. Η

μέγιστη πίεση των 70 MPa δεν είναι συνήθεις στις τεχνικογεωλογικές εφαρμογές, αποτελεί αστόσο συνήθη πίεση που αναπτύσσεται στις ολιγάριθμες, μικρού εμβαδού, πραγματικές περιοχές επαφής των δυο τεμαχών μιας ασυνέχειας και επιπλέον, βρίσκεται σε ευθυγράμμιση με τη νέα σύσταση των Hoek and Brown (2018) για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του m_i , σύμφωνα με την οποία, η μέγιστη πλευρική πίεση των τριαξονικών δοκιμών πρέπει να είναι ίση με την τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και όχι ίση με $0,5\sigma_{ci}$, όπου σ_{ci} η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, όπως εφαρμοζόταν μέχρι πρόσφατα.

Για την περιγραφή των πετρωμάτων πραγματοποιήθηκε μελέτη ορυκτολογικής σύστασης, υφής, και ιστού επιλεγμένων πετρωμάτων με XRD.

Ιδιαίτερο τμήμα αποτέλεσε ο προσδιορισμός του εμβαδού των επιφανειών επαφής κατά τη διάτμηση, για όλα τα δοκίμια και για όλες τις ορθές τάσεις. Επίσης, με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνας (ImageJ), υπολογίστηκε το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας επαφής των δύο τοιχωμάτων των ασυνεχειών, και εκτιμήθηκε η τιμή της επ' αυτής αναπτυσσόμενης πραγματικής ορθής τάσης. Από τη συσχέτιση της τιμής αυτής της τάσης με την τάση που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά κατά την τριαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την ερμηνεία των τιμών των παραμέτρων διατμητικής αντοχής τόσο με βάση τη δοκιμή διάτμησης ασυνεχειών, όσο και τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης άρρηκτων δοκιμών.

Το Κεφάλαιο 2 συγκεντρώνει όλη την απαραίτητη θεωρία για την κατανόηση των αναλύσεων. Περιλαμβάνει τις φυσικές παραμέτρους και αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος σε διάφορες καταπονήσεις, όπως η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η σημειακή φόρτιση, η εφελκυστική αντοχή και η τριαξονική θλίψη. Περιλαμβάνει επίσης την ανάλυση της συμπεριφοράς σε διάτμηση ασυνεχειών. Περιγράφεται η παραμόρφωση των πετρωμάτων με την άσκηση πλευρικών πιέσεων, το όριο ψαθυρής - όλκιμης συμπεριφοράς, οι τύποι συμπεριφοράς στην όλκιμη περιοχή και αντιστοίχως οι τύποι μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη κατάσταση. Αναλύονται τα κριτήρια αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος η διατμητική αντοχή ασυνεχειών πετρωμάτων και τα κριτήρια προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ασυνεχειών. Έμφαση δίνεται στη θεωρητική προσέγγιση των επιφανειών επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρεται η γεωλογία της περιοχής μελέτης και αναλύεται η πειραματική διαδικασία και το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία λήψης και διαμόρφωσης των δειγμάτων. Αναλύονται οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης και δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών καθώς και η μεθοδολογία της ορυκτολογικής εξέτασης και της επεξεργασίας των επιφανειών των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

Το Κεφάλαιο 4 χωρίζεται σε πέντε υποκεφάλαια και περιέχει τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα στο υποκεφάλαιο 4.1 δίνονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής και μικροσκοπικής μελέτης, στο υποκεφάλαιο 4.2 των δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης, στο υποκεφάλαιο 4.3 των δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών, στο 4.4 των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων και τέλος στο 4.5 τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των επιφανειών των τοιχωμάτων των ασυνεχειών για τον προσδιορισμό της πραγματικής επιφάνειας επαφής. Πραγματοποιείται επίσης, η ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και η συσχέτιση τους με τις παραμέτρους της διατμητικής αντοχής και τη συμπεριφορά κατά την τριαξονική θλίψη όλων των τύπων των πετρωμάτων ειδικότερα κατά την μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά.

Στο Κεφάλαιο 5 διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων για την ερμηνεία των τιμών των παραμέτρων διατμητικής αντοχής με τους δυο τύπους εργαστηριακών δοκιμών (τριαξονικής θλίψης και άμεσης διάτμησης ασυνεχειών) των πετρωμάτων και η συσχέτιση τους με το εμβαδό της πραγματικής επιφάνειας επαφής και τη αντίστοιχης τάσης στην πραγματική επιφάνειας επαφής και παρέχονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος παρατίθεται η σχετική Βιβλιογραφία και το Παράρτημα που περιλαμβάνει πίνακες με αποτελέσματα και φωτογραφίες των δειγμάτων από τις εργαστηριακές δοκιμές.

Κεφάλαιο 2

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Φυσικές παράμετροι πετρωμάτων

Ένα πέτρωμα δομείται από τη στερεή ύλη και τα κενά που υπάρχουν εσωτερικά σε αυτό. Τα κενά μεταξύ των ορυκτών και της συνδεδετικής ύλης του πετρώματος ονομάζεται πορώδες. Το πορώδες του υλικού μπορεί να είναι πληρωμένο με νερό ή αέρα. Έτσι, το πέτρωμα αποτελείται από τρεις φάσεις, την αέρια, την υγρή και την στερεή (Σχήμα 2.1). Με βάση τα παραπάνω οι κύριες φυσικές ιδιότητες του πετρώματος είναι: η περιεχόμενη υγρασία, το πορώδες, η πυκνότητα και το φαινόμενο βάρος τα οποία αναλύονται παρακάτω με βάση τις οδηγίες της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (ISRM, 1981).

i) Περιεχόμενη υγρασία

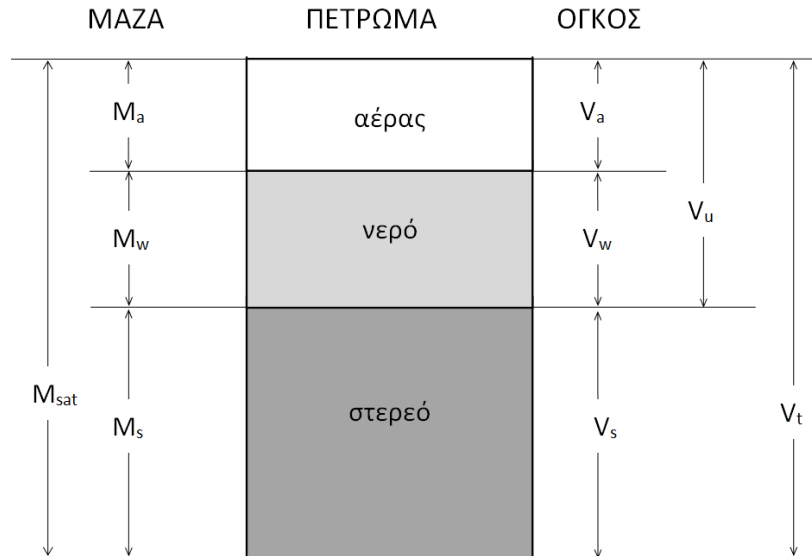
Εκφράζει τη μάζα του νερού που εμπεριέχει το πέτρωμα. Η περιεχόμενη υγρασία, w (%), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Περιεχόμενη υγρασία (\%)} = \frac{\text{Μάζα νερού (}M_w\text{)}}{\text{Μάζα στερεών (}M_s\text{)}} \times 100 \quad (2.1)$$

Η υγρασία που βρίσκεται στο πέτρωμα στη φυσική του κατάσταση ονομάζεται φυσική υγρασία. Συνήθως όλοι οι πόροι του ακέραιου πετρώματος δεν είναι πληρωμένοι με νερό, επομένως είναι αναγκαίο να υπολογιστεί ο βαθμός κορεσμού που εκφράζεται με τον λόγο

Ψηφιακή συλλογή
2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

του όγκου του περιεχομένου νερού προς τον όγκο των πόρων του πετρώματος ($S = V_w/V_u$). Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας ενός πετρώματος προκαλεί πτώση της μηχανική του αντοχής (Τσουτρέλης, 1985).



Σχήμα 2.1. Φάσεις βραχώδους υλικού

ii) Πορώδες

Το **πορώδες (n)**, ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο του πετρώματος εκφρασμένος σε εκατοστιαίο (%)

Πορώδες,

$$n = \frac{V_u}{V_t} \times 100 \text{ (\%)} \quad (2.2)$$

iii) Πυκνότητα

Η **πυκνότητα (ρ)**, εκφράζεται ως ο λόγος της συνολικής μάζας προς το συνολικό όγκο του πετρώματος. Η κατάσταση ενός πετρώματος μπορεί να εμφανιστεί σε δυο θεωρητικά ακραίες περιπτώσεις:

Την **κορεσμένη πυκνότητα (ρ_{sat})** που είναι ο λόγος της μάζας του κορεσμένου πετρώματος προς το συνολικό του όγκο και εκφράζεται σε Mg/m³.

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_u \times \rho_w}{V_t} \quad (2.3)$$

[42] - Γεωτεχνική διερεύνηση μολασσικών σχηματισμών της λεκάνης των Γρεβενών - Μ.Τζιλίνη

Την **ξηρή πυκνότητα (ρ_d)**, που είναι ο λόγος της μάζας του ξηρού πετρώματος προς το συνολικό του όγκο σε Mg/m^3 .

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.4)$$

iv) Το φαινόμενο βάρος (γ_b) έχει πρακτικά παρόμοια σημασία, εκφράζεται σε kN/m^3 και ισχύει

$$\gamma_b = \rho * g, \quad (2.5)$$

όπου g : επιτάχυνση της βαρύτητας

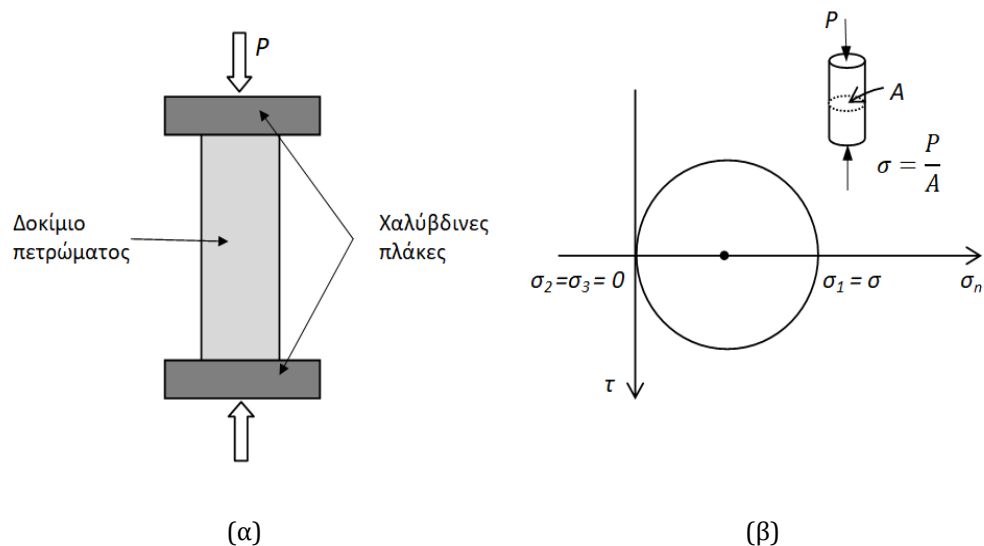
Το πορώδες και η πυκνότητα ενός πετρώματος εξαρτώνται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού του, καθώς και από τις διεργασίες που υπόκειται μετά τη γένεσή του (π.χ. διαγένεση, αποσάθρωση). Η αύξηση της πυκνότητας έχει ως αποτέλεσμα και στην μείωση του πορώδους των πετρωμάτων. Έχει παρατηρηθεί πως όταν αυξάνεται η πυκνότητα του ακέραιου πετρώματος, αυξάνονται και οι παράμετροι αντοχής (Τσουτρέλης, 1985).

2.2. Μηχανική συμπεριφορά άρρηκτου πετρώματος

Η έννοια του άρρηκτου πετρώματος αναφέρεται σε συνεχές μέσο χωρίς παρουσία δομικών ασυνεχειών και αντιπροσωπεύεται κυρίως από τον πυρήνα μιας τυπικής γεώτρησης. Η βραχόμαζα θεωρείται ως σύνολο τεμαχών άρρηκτου πετρώματος και παρεμβαλλόμενων δομικών ασυνεχειών. Για την κατανόηση των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας ως υλικά μηχανικής, είναι απαραίτητη η προηγούμενη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς του άρρηκτου πετρώματος (Hoek & Martin, 2014).

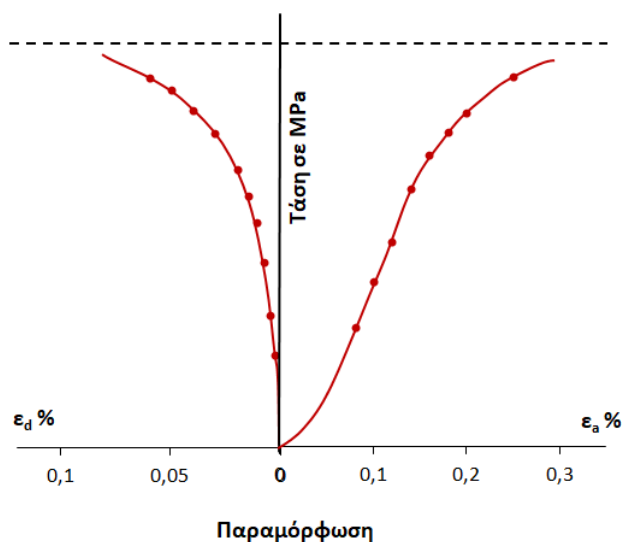
i) Μονοαξονική θλίψη

Για τον προσδιορισμό της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson ενός άρρηκτου πετρώματος χρησιμοποιείται η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης. Κατά την εργαστηριακή δοκιμή το βραχώδες δοκίμιο υποβάλλεται σε μονοαξονική εντατική κατάσταση ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = P/A$). Η δοκιμή πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης ή με σταθερό ρυθμό φορτίου μέχρι την θραύση του δοκιμίου. Η αξονική τάση στην οποία το πέτρωμα αστοχεί είναι γνωστή ως ανεμπόδιστη ή μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (Jaeger *et al.* 2007).



Σχήμα 2.2. (α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος, (β) κύκλος Mohr θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου (Jaeger *et al.* 2007)

Ταυτόχρονα με την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μπορεί να πραγματοποιηθούν επιπλέον μετρήσεις με την εγκατάσταση αξονικών και πλευρικών τροπόμετρων (strain gages) για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson (Σχήμα 2.3). Για δοκίμια που έχουν παρόμοια ορυκτολογική σύσταση, η θλιπτική αντοχή του πετρώματος θα μειώνεται με την αύξηση του πορώδους, του βαθμού αποσάθρωσης, της προϋπάρχουσας μικρορωγμάτωσης και της περιεχόμενης υγρασίας του δοκιμίου (Τσουτρέλης, 1985).



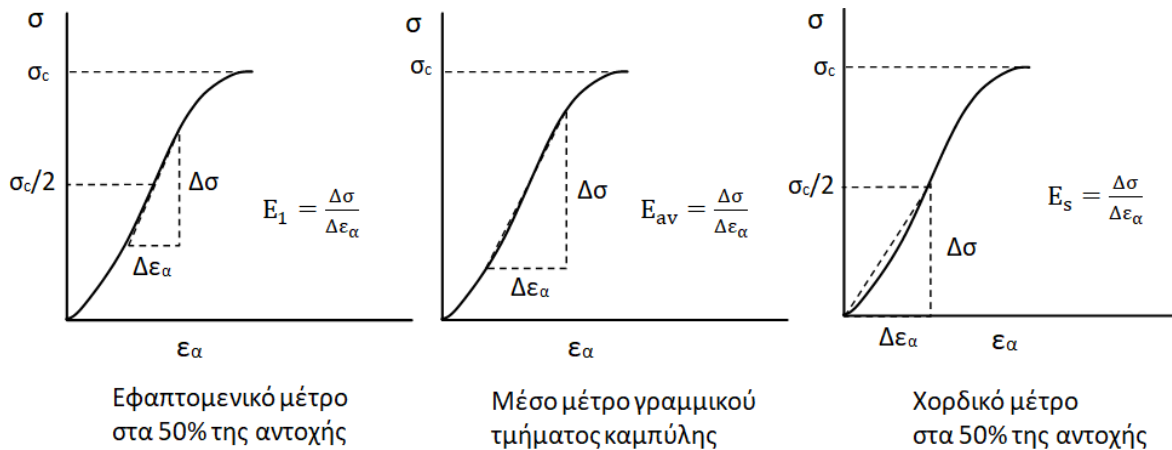
Σχήμα 2.3. Διάγραμμα τάσης- ανηγμένης αξονικής και διαμετρικής παραμόρφωσης (Τσουτρέλης 1985)

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1981) προτείνει τους παρακάτω ορισμούς (Σχ. 2.4):

Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας (Tangent Young's modulus, E_t) που προσδιορίζεται ως η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί σε δεδομένη τάση. Συνήθως ως τέτοια τάση λαμβάνεται το 50% της αντοχής του πετρώματος σε μοναξονική θλίψη.

Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας (Average Young's modulus, E_{av}). Υπολογίζεται από τη μέση κλίση του γραμμικού ελαστικού τμήματος της καμπύλης τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων,

Χορδικό Μέτρο Ελαστικότητας (Secant Young's modulus, E_s) που προσδιορίζεται ως η κλίση της ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στα 50% της αντοχής σε μοναξονική θλίψη.



Σχήμα 2.4. Διαγράμματα ορισμού μέτρου ελαστικότητας (Από ISRM, 1981)

2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

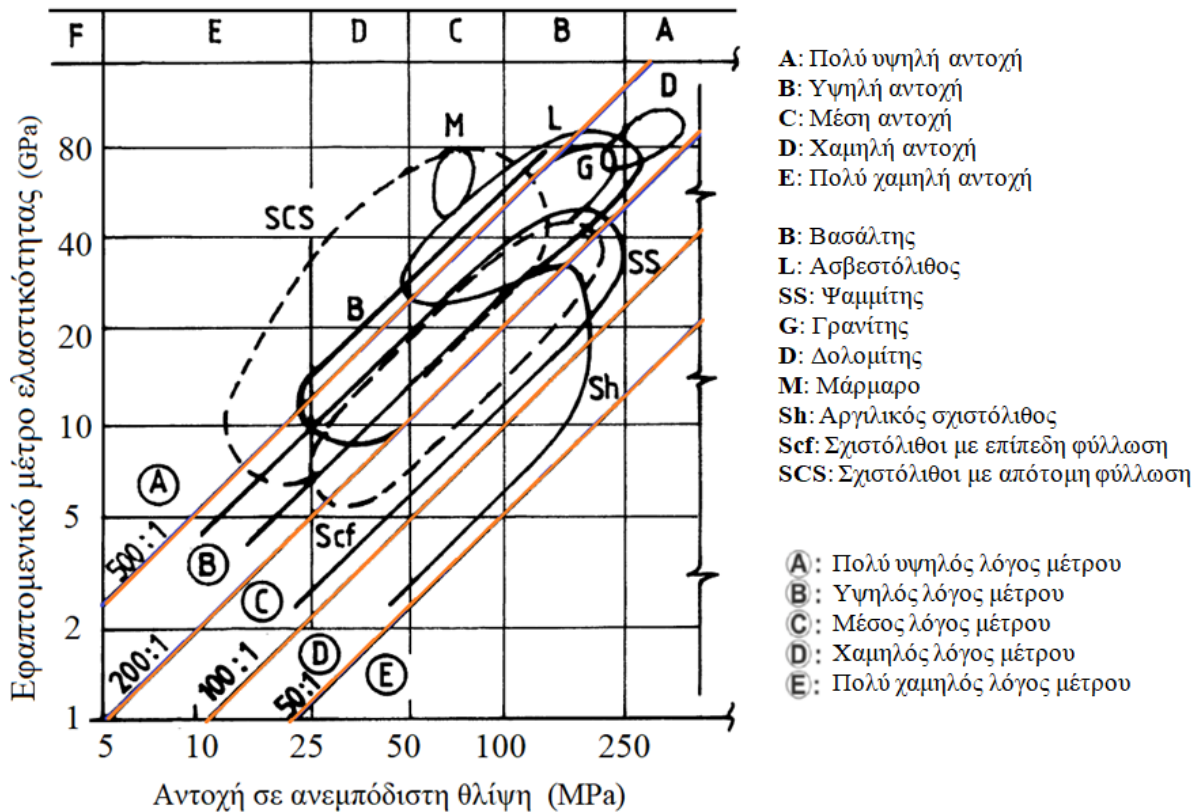
Πίνακας 2.1. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη (I.S.R.M., 1981)

Κατάταξη πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	>250	Ο πυρήνας (δείγμα) δεν σπάει με το γεωλογικό σφυρί
Πολύ υψηλής αντοχής	100-250	Για να σπάσει ο πυρήνας (δείγμα) χρειάζονται πολλά κτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί
Υψηλής αντοχής	50-100	Για να σπάσει ο πυρήνας (δείγμα) χρειάζονται περισσότερα από ένα κτυπήματα
Μέσης αντοχής	25-50	Ο πυρήνας δεν χαράσσεται με μαχαίριδιο και μπορεί να σπάσει με ένα κτυπήματα γεωλογικού σφυρού
Χαμηλής αντοχής	5-25	Ο πυρήνας χαράσσεται δύσκολα με το μαχαίριδιο και η μύτη του γεωλογικού σφυρού δημιουργεί αβαθείς χαρακιές
Πολύ χαμηλής αντοχής	1-5	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με ένα κτύπημα με το γεωλογικό σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαίριδιο
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0,25-1	Ο πυρήνας σπάει χαράσσεται εύκολα με το νύχι του αντίχειρα

Για την ταξινόμηση του βραχώδους υλικού οι Deere και Miller προτείνουν επίσης το λόγο παραμορφωσιμότητας E/σ_c , όπου E το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας και σ_c η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού. Οι δύο αυτές παράμετροι προβάλλονται σε λογαριθμικό διάγραμμα, όπου ο κάθε λιθολογικός τύπος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5, καταλαμβάνει συγκεκριμένη περιοχή.

Πίνακας 2.2. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού κατά Deere και Miller (1966).

Κατηγορία	E/σ_c	Πετρώματα
H	>500	Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες, Μάρμαρα
M	200-500	Εκρηξιγενή, Ιζηματογενή
L	<200	Αργυλικοί σχιστόλιθοι, Φυλλίτες



Σχήμα 2.5. Διάγραμμα μονοαξονικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για τις κατηγορίες των πετρωμάτων (Από Deere & Miller, 1966)

Στους Πίνακες 2.4 και 2.5 δίνονται τιμές φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων ενδεικτικών πετρωμάτων, ενώ στον Πίνακα 2.6 τιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη UCS και μέτρου ελαστικότητας E_i , για ιζηματογενή πετρώματα και περιδοτίτες της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

ΠΕΤΡΩΜΑ	Ξηρή πυκνότητα (g/cm ³)	Πορώδες (%)	Σκληρότητα με κρουσίμε- τρο Schmidt	Ταχύτητα P- κυμάτων (m/s)	Ταχύτητα S- κυμάτων (m/s)	Διαπερα- τότητα (m/s)
ΠΥΡΙΓΕΝΗ						
Γρανίτης	2,53-2,62	1,02-2,87	54-69	4500-6500	3500-3800	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Διορίτης	2,80-3,00	0,10-0,50	-	4500-6700	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Γάββρος	2,72-3,00	1,00-3,57	-	4500-7000	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Ρυόλιθος	2,40-2,60	0,4-4,00	-	-	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Ανδεσίτης	2,50-2,80	0,2-8,00	67	4500-6500	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Βασάλτης	2,21-2,77	0,22-22,1	61	5000- 7000	3660- 3700	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ						
Κροκαλοπαγές	2,47-2,76	-	-	-	-	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻⁸
Ψαμμίτης	1,91-2,58	1,62-26,4	10-37	1500- 4600	-	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻⁸
Αργιλικός σχιστόλιθος	2,00-2,40	20,0-50,0	-	2000- 4600	-	-
Μαργόλιθοι	1,82-2,72	-	27	-	-	10 ⁻¹¹ -10 ⁻⁹
Δολομίτης	2,20-2,70	0,20-4,00	-	5500	-	10 ⁻¹² -10 ⁻¹¹
Ασβεστόλιθος	2,67-2,72	0,27-4,10	35-51	3500- 6500	-	10 ⁻¹³ -10 ⁻¹⁰
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ						
Γνεύσιος	2,61-3,12	0,32-1,16	49	5000- 7500	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Σχιστόλιθος	2,60-2,85	10,0-30,0	31	6100- 6700	3460- 4000	10 ⁻¹¹ -10 ⁻⁸
Φυλλίτης	2,18-3,30	-	-	-	-	-
Σχίστες	2,71-2,78	1,84-3,64	-	3500- 4500	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹²
Μάρμαρο	2,51-2,86	0,65-0,81	-	5000- 6000	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹¹
Χαλαζίτες	2,61-2,67	0,40-0,65	-	-	-	10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹³

Πίνακας 2.4. Μηχανικές ιδιότητες ενδεικτικών πετρωμάτων,
(https://www.academia.edu/11169854/Chapter_4_Properties_of_Rock_Materials)

ΠΕΤΡΩΜΑ	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (MPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικό -τητας (GPa)	Λόγος Poisson	Αξονική Παραμόρφωση κατά την θραύση (%)	Σημειακή Φόρτιση $I_{s(50)}$ (MPa)
ΠΥΡΙΓΕΝΗ						
Γρανίτης	100-300	7-25	30-70	0,17	0,25	5-15
Δολερίτης	100-350	7-30	30-100	0,10-0,20	0,3	-
Γάββρος	150-250	7-30	40-100	0,20-0,35	0,3	6-15
Ρυόλιθος	80-160	5-10	10-50	0,2-0,4	-	-
Ανδεσίτης	100-300	5-15	10-70	0,2	-	10-15
Βασάλτης	100-350	10-30	40-80	0,1-0,2	0,35	9-15
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ						
Κροκαλοπαγές	30-230	3-10	10-90	0,10-0,15	0,16	-
Ψαμμίτης	20-170	4-25	15-50	0,14	0,2	1-8
Αργλικός σχιστόλιθος	5-100	2-10	5-30	0,1	-	-
Μαργόλιθοι	10-100	5-30	5-70	0,15	0,15	0,1-6
Δολομίτης	20-120	6-15	30-70	0,15	0,17	-
Ασβεστόλιθος	30-250	6-25	20-70	0,3	-	3-7
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ						
Γνεύσιος	100-250	7-20	30-80	0,24	0,12	5-15
Σχιστόλιθος	70-150	4-10	5-60	0,15-0,25	-	5-10
Φυλλίτης	5-150	6-20	10-85	0,26	-	-
Σχίστες	50-180	7-20	20-90	0,20-0,30	0,35	1-9
Μάρμαρο	50-200	7-20	30-70	0,15-0,30	0,4	4-12
Χαλαζίτες	150-300	5-20	50-90	0,17	0,2	5-15

Πίνακας 2.5. Χαρακτηριστικές τιμές αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη UCS και μέτρου ελαστικότητας Ei, τυπικό εύρος και τυπική απόκλιση για ιζηματογενή πετρώματα και περιδοτίτες της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Marinos & Tsiampaos, 2010 και Marinos, 2019).

Πέτρωμα	Ιδιότητες	Αριθμός δοκιμών	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Ψαμμίτης (φλύσχης)	UCS (MPa)	238	10,00	119,60	46,07	28,85
	Ei (MPa)	130	2019	56000	13354	12892
Ψαμμίτης (μολάσσα)	UCS (MPa)	258	10,76	116,73	35,06	21,05
	Ei (MPa)	132	2000	31300	8763	7373
Ιλυόλιθος (φλύσχης)	UCS (MPa)	107	2,43	62,00	17,36	12,68
	Ei (MPa)	76	698	17000	4628	4116
Ιλυόλιθος (μολάσσα)	UCS (MPa)	152	1,92	51,11	16,91	10,77
	Ei (MPa)	58	650	9070	2984	1845
Κροκαλοπαγές (φλύσχης)	UCS (MPa)	61	5,18	54,00	16,16	2,37
	Ei (MPa)	48	669	14400	4588	3321
Κροκαλοπαγές (μολάσσα)	UCS (MPa)	165	5,00	68,19	23,05	13,86
	Ei (MPa)	82	1140	19400	7432	5096
Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος	UCS (MPa)	35	5,71	49,00	20,64	10,93
	Ei (MPa)	30	725,93	15980	3844	2072
Περιδοτίτης	UCS (MPa)	118	12,20	131,60	43,34	24,62
	Ei (MPa)	33	5000	44554	19924	11874

ii) Σημειακή φόρτιση

Οι Broch και Franklin (1972) εισήγαγαν την δοκιμή σημειακής φόρτισης με κύριο σκοπό τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, καθώς και την εκτίμηση του δείκτη ανισοτροπίας στρωσιγενών δοκιμίων βράχου κανονικής και ακανόνιστης γεωμετρίας. Σύμφωνα με τον Bienawski (1975) ο δείκτης σημειακής αντοχής (I_{s50}) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας ταξινόμησης του άρρηκτου πετρώματος ως προς την αντοχή του. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κατηγορίες χαρακτηρισμού της αντοχής των πετρωμάτων.

Πίνακας 2.6. Ταξινόμηση ακέραίου πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (Bieniawski, 1975)

Χαρακτηρισμός αντοχής	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	>8
Υψηλής αντοχής	4-8
Μέσης αντοχής	2-4
Χαμηλής αντοχής	1-2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνιστάται η δοκιμή

Με τη βοήθεια του δείκτη σημειακής φόρτισης είναι δυνατή η εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των πετρωμάτων, μέσω της σχέσης

$$\sigma_c = k I_{s(50)} \quad (2.6)$$

με τον συντελεστή k να κυμαίνεται από 20 έως 25.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1981) για δοκίμια διαμέτρου 50 mm προτείνεται η σχέση: $\sigma_c = 24 I_{s(50)}$.

Ο Bieniawski (1974a, 1975) προτείνει συντελεστή συσχέτισης k ίσο με 23 για δοκίμια διαμέτρου NX (54 mm). Στον πίνακα 2.7 δίνονται διάφορες επιπλέον προτεινόμενες τιμές του k από τη διεθνή βιβλιογραφία όπως έχουν συγκεντρωθεί από τον Kahraman (2001) και στον πίνακα 2.8 από ιζηματογενή πετρώματα του ελληνικού χώρου από Tsiambaos και Sabatakakis (2004).

2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πίνακας 2.7. Συσχετίσεις μονοαξονικής αντοχής UCS (q_u) και δείκτη σημειακής φόρτισης I_s Kahraman (2001)

Αναφορά	Σχέση
I.S.R.M.	$q_u = 20-25I_{s50}$
D' Andrea <i>et al.</i>	$q_u = 15.3I_{s50} + 16.3$
Broch and Franklin	$q_u = 24I_{s50}$
Bieniawski	$q_u = 23I_{s50}$
Hassani <i>et al.</i>	$q_u = 29I_{s50}$
Read <i>et al</i>	
(1) Ιζηματογενή πετρώματα	$q_u = 16I_{s50}$
(2) Βασάλτες	$q_u = 20I_{s50}$
Forster	$q_u = 14.5I_{s50}$
Gunsallus and Kulhawy	$q_u = 16.5I_{s50} + 51.0$
Chargill and Shakoor	$q_u = 23I_{s54} + 13$
Chou and Wong	$q_u = 12.5I_{s50}$
Grasso <i>et al.</i>	$q_u = 9.30I_{s50} + 20.04$

q_u και I_s σε MPa

Πίνακας 2.8. Συντελεστές συχέτισης k μεταξύ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σ_c και του δείκτη σημειακής φόρτισης, $I_{s(50)}$, για ιζηματογενή πετρώματα του ελληνικού χώρου (Από Tsiambaos και Sabatakakis, 2004)

Τάξη	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa)	Συντελεστής k
I	<2	13
II	2-5	20
III	>5	28

Σύμφωνα με τους Broch και Franklin (1972) από τα άμεσα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι:

- απαιτείται μια μικρή και φορητή μηχανή δοκιμών, διότι οι δυνάμεις που απαιτούνται είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές της ανεμπόδιστης θλίψης.
- τα δείγματα που απαιτούνται είναι είτε σε μορφή πυρήνων ή ακανόνιστης γεωμετρίας και δεν απαιτούν συγκεκριμένη κοπή.
- Μπορούν να διεξαχθούν περισσότερες δοκιμές για το ίδιο κόστος και αυτό επιτρέπει επαρκή δειγματοληψία όταν οι συνθήκες του πετρώματος είναι μεταβλητές.

- Τα εύθραυστα ή σπασμένα υλικά μπορούν να δοκιμαστούν, ώστε να υπάρχει λιγότερη πιθανότητα να υπάρξουν μεροληπτικά αποτελέσματα υπέρ των πιο ικανών στρωμάτων του πετρώματος.
- Η μέτρηση της ανισοτροπίας αντοχής απλοποιείται.

iii) Μονοαξονικός εφελκυσμός

Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού. Η απόκριση των πετρωμάτων στις εφελκυστικές τάσεις είναι χρήσιμες σε τεχνικά έργα υπόγειων ανοιγμάτων, όπως γεωτρήσεις και σήραγγες που η εντατική τους κατάσταση εμπεριέχει τον εφελκυσμό. Επομένως, ο προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος υπό συνθήκες στατικής ή δυναμικής φόρτισης έχει μεγάλη αξία (Roberts,1977).

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος χρησιμοποιείται η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού. Πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια που είναι συγκολλημένα με ρητίνη υψηλής αντοχής στις βάσεις του δοκιμίου. Στην συνέχεια εφαρμόζεται εφελκυστική δύναμη που ασκείται ομοιόμορφα στην διατομή των βάσεων του δοκιμίου. Η δοκιμή πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό φορτίου ή με σταθερό ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης.

Λόγω των δυσκολιών της εργαστηριακής δοκιμής του άμεσου εφελκυσμού αναπτύχθηκαν έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής. Η περισσότερο εφαρμόσιμη εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής είναι η δοκιμή της αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test). Το δοκίμιο διαμορφώνεται σε μορφή δίσκου και υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη, ώστε το δοκίμιο να αστοχεί κατά την διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό. Η τάση θραύσης του δοκιμίου ισούται με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα εύρη τιμών των παραμέτρων αντοχής για πετρώματα του Ελληνικού χώρου

Πίνακας 2.9. Εύρος τιμών των παραμέτρων αντοχής για πετρώματα του Ελληνικού χώρου (από Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).

Ακέραιο πέτρωμα	Δείκτης κρουσίμετρου Schmidt (SHV)	$I_s^{(50)}$ (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
Ασβεστόλιθος	20-55	2-7.5	20-200	2-15
Μικροκρυσταλλικός συμπαγής ασβεστόλιθος	35-55	4-7.5	80-200	7-15
Δολομιτωμένος ασβεστόλιθος	15-45	1-6	10-100	1-10
Μαργαϊκός ασβεστόλιθος	10-35	<1-6	5-60	<1-6
Μαργόλιθος-ιλύλιθος	<10-30	<1-3	<1-40	<1-3
Ψαμμίτης	10-50	<1-5	<1-80	<1-8
Μάρμαρο	30-60	3-9	50-250	5-20
Σχιστόλιθος	10-45	<1-7	2-80	<1-6

iv) Τριαξονική θλίψη

Στη συμβατική δοκιμή τριαξονικής θλίψης ($\sigma_2 = \sigma_3$), η αρχική φόρτιση του δοκιμίου είναι υδροστατική. Στη συνέχεια, η πλευρική πίεση διατηρείται σταθερή, ενώ η αξονική τάση σ_1 αυξάνεται βαθμιαία μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Σε κάθε τιμή της φόρτισης φόρτισης οι κύριες τάσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 \quad (2.7)$$

Η μέση τάση είναι:

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2.8)$$

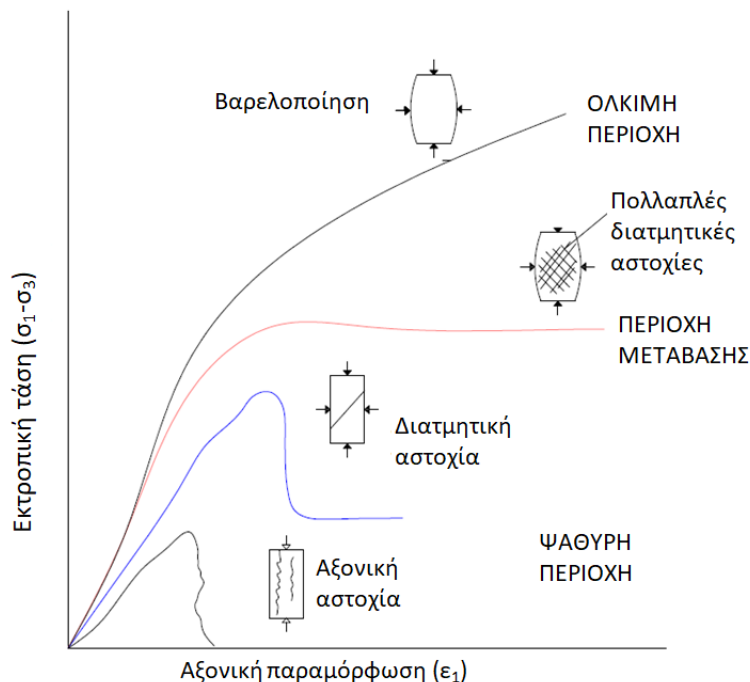
Η εκτροπική τάση είναι:

$$Q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.9)$$

Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος ενισχύεται όταν υφίστανται πλευρική πίεση. Η ποσοτική επίδραση της πλευρικής πίεσης στη συμπεριφορά του πετρώματος κατά τη φόρτιση περιγράφεται μέσω του διαγράμματος $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$. Η πλευρική πίεση πραγματοποιείται πειραματικά μέσω της δοκιμής τριαξονικής θλίψης που περιγράφεται αναλυτικά στο πειραματικό μέρος της παρούσας διατριβής (Κεφ 3).

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα σ_1 -dev- ϵ_{ax} , που προκύπτουν από δοκιμές τριαξονικής θλίψης για ένα πέτρωμα. Στο ίδιο σχήμα δίνονται σκαριφήματα της αντίστοιχης θραύσης ή παραμόρφωσης των δοκιμών. Από το Σχήμα 2.6 παρατηρείται ότι :

- Η αντοχή του πετρώματος αυξάνεται με την πλευρική πίεση
- Η αξονική παραμόρφωση πριν από την θραύση του πετρώματος αυξάνεται ανάλογα με την πλευρική πίεση
- Μετάβαση από την ψαθυρή στην πλαστική συμπεριφορά μετά από μια τιμή πλευρικής πίεσης. Σύμφωνα με τους Paterson & Wong (2005) η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά μπορεί να θεωρηθεί ως εκείνη η τιμή της πλευρικής πίεσης για την οποία η αξονική βράχυνση είναι της τάξης του 3-5% πριν από την μακροσκοπική θραύση του δοκιμίου.
- Σε μεγαλύτερη πλευρική πίεση το πέτρωμα συμπεριφέρεται όλκιμα
- Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή μειώνεται βαθμιαία και εξαφανίζεται τελείως σε υψηλές τιμές της πλευρικής πίεσης
- η επίδραση της πλευρικής πίεσης στη διατμητική αντοχή μειώνεται.



Σχήμα 2.6. Τυπικά διαγράμματα εκτροπικής τάσης - αξονικής παραμόρφωσης για ψαθυρή, μεταβατική και όλκιμη συμπεριφορά και σκαριφήματα των παρατηρούμενων θραύσεων ή της υπερβολικής παραμόρφωσης των δοκιμών μετά το τέλος των δοκιμών (από Santarelli and Brown, 1989, τροποποιημένο από Tsikrikis *et al.*, 2019).

Σχετικά τον τρόπο αστοχίας του πετρώματος (π.χ. Goodman 1989, Paterson & Wong 2005), με μηδενική πλευρική πίεση τα περισσότερα πετρώματα αστοχούν με μία ή περισσότερες αξονικές επιφάνειες θραύσεις παράλληλες με το αξονικό φορτίο. Ο Kaiser (2000) αναφέρει πως η αξονική θραύση είναι κυρίαρχη αστοχία υψηλής αντοχής σε άρρηκτα πετρώματα και εμφανίζεται αριστερά της ευθείας του ορίου θρυμματισμού (spalling limit). Το όριο αυτό περιγράφεται μέσω της ευθείας με κλίση $\sigma_1/\sigma_3 \approx 10$ και εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση και την ετερογένεια του δοκιμίου.

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης το δοκίμιο θραύεται με διατμητική αστοχία. Σε ορισμένα πετρώματα αυτός ο τρόπος αστοχίας μπορεί να εμφανισθεί και στη μονοαξονική θλίψη. Η διατμητική αστοχία είναι κυρίαρχη μέχρι την μεταβατική περιοχή ψαθυρής-όλκιμης συμπεριφοράς, όπου το πέτρωμα εμφανίζει συζυγείς διατμητικές αστοχίες με παράλληλη διόγκωση του δοκιμίου. Στην όλκιμη περιοχή δεν εμφανίζεται μία διακριτή επιφάνεια θραύσης, αλλά το παραμορφωμένο δοκίμιο εμφανίζει πολλαπλές μικροθραύσεις, που δίνουν την εικόνα διαρροής. Η μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου δείχνει ολισθήσεις πλεγματικών επιπέδων και θραύση των κρυστάλλων των ορυκτών του πετρώματος.

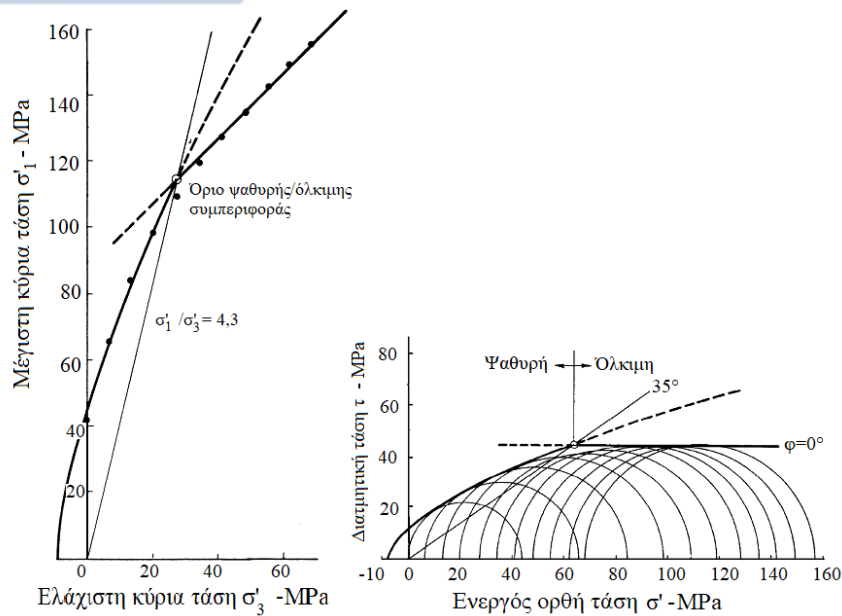
2.3. Όριο ψαθυρής - όλκιμης συμπεριφοράς

Τα πετρώματα γενικά συμπεριφέρονται με ψαθυρό τρόπο σε χαμηλές πλευρικές πιέσεις, αλλά υπό κατάλληλες συνθήκες (αυξημένη πλευρική πίεση και/ή θερμοκρασία) μπορούν να εμφανίσουν ολκιμότητα. Ο όρος μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά, ή ακριβέστερα, από ψαθυρή σε πλαστική συμπεριφορά (Rutter, 1986), χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ολόκληρη τη μετάβαση από καθαρά εύθραυστη σε καθαρά πλαστική συμπεριφορά. Αυτή η αλλαγή δεν είναι απότομη, αλλά περιλαμβάνει μια βαθμιαία μετάβαση μέσω μιας "ημι-ψαθυρής" κατάστασης (Evans *et al.*, 1990).

Όταν εξετάζονται φυσικοί μηχανισμοί, μπορεί να συμβεί πλήθος διαφορετικών πιθανών παραμορφώσεων τόσο στην όλκιμη κατάσταση όσο και στην μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη περιοχή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.7

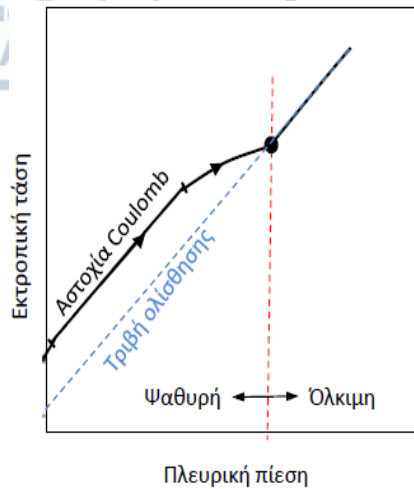
Η καμπύλη $\sigma_1-\sigma_3$ για άρρηκτο πέτρωμα και η καμπύλη της αντίστασης τριβής τέμνονται σε μια τιμή της πλευρικής πίεσης, όπου η συμπεριφορά του υλικού από ψαθυρή βαθμιαία μεταβάλλεται σε όλκιμη (σχήμα 2.6). Πέρα από την πίεση αυτή η αντίσταση τριβής κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας είναι μεγαλύτερη από την πλαστική παραμόρφωση του

δοκιμίου και έτσι η παραμόρφωση δεν πραγματοποιείται με ρηγμάτωση και σχετική μετακίνηση των δυο τοιχωμάτων αλλά με παραμόρφωση του δοκιμίου στο σύνολό του.

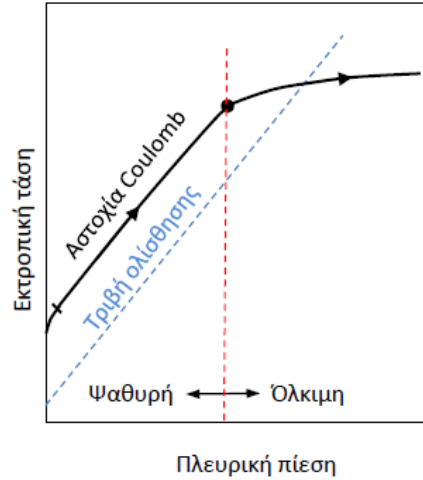


Σχήμα 2.7. Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής σε ασβεστόλιθο Indiana που πραγματοποιήθηκαν από τον Schwartz (1964) και δείχνουν τη μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά (Hoek, 1983).

Από πλευράς φυσικού μηχανισμού, υπάρχουν διάφοροι τύποι συμπεριφοράς στην όλκιμη περιοχή και αντιστοίχως διάφοροι τύποι μετάβασης από ψαθυρή σε πλαστική κατάσταση. Επομένως, καμία άποψη της μετάβασης αυτής δεν μπορεί να ισχύει υπό όλες τις συνθήκες (Paterson, 1978). Ωστόσο, υπάρχουν δυο απλοποιημένοι μηχανισμοί παραμόρφωσης των πετρωμάτων με τη βοήθεια των οποίων ερμηνεύεται η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Οι τύποι αυτοί έχουν χαρακτηριστεί από τον Mogi (1972, 1974) ως τύπος A (Σχήμα 2.8α) και τύπος B (Σχήμα 2.8β) και αντιπροσωπεύουν δυο οριακές καταστάσεις παραμόρφωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες: Ο τύπος A αντιστοιχεί σε βραχώδη υλικά που παραμορφώνονται στην πλαστική περιοχή αποκλειστικά με κρυσταλλική πλαστική παραμόρφωση (crystal plasticity), ενώ ο τύπος B αποκλειστικά με κατακλαστική ροή (cataclastic flow). Ορισμένα ανθρακικά πετρώματα, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες ακολουθούν συμπεριφορά τύπου A, ενώ τα χαλαζιακά πετρώματα ακολουθούν συμπεριφορά τύπου B. 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).



(α)



(β)

Σχήμα 2.8. Σχέση εκτροπικής (αποκλίνουσας) τάσης-πλευρικής πίεσης για τους δυο μηχανισμούς παραμόρφωσης (α) τύπος Α, (β) τύπος Β κατά Mogi (1972,1974).

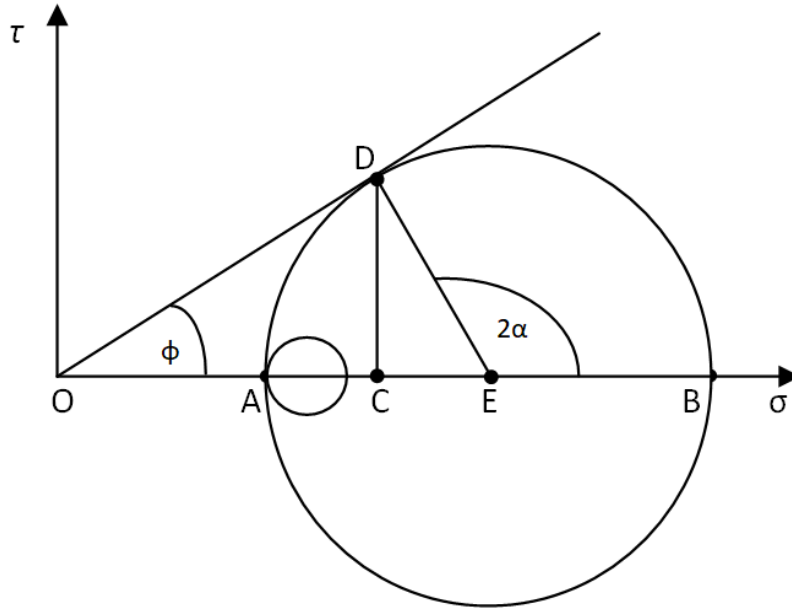
Ο Mogi (1966) βρήκε ότι το όριο μεταξύ ψαθυρής και όλκιμης συμπεριφοράς σε ένα διάγραμμα εκτροπικής τάσης - πλευρικής πίεσης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \approx 3.4\sigma_3 \quad (2.11)$$

για διάφορα πυριτικά πετρώματα, ενώ για ανθρακικά πετρώματα είναι κάπως διαφορετικό (Σχήμα 2.8).

Κατά τον Orowan (1960) η πτώση τάσης που ακολουθεί τη θραύση δεν συμβαίνει σε υψηλές πλευρικές πιέσεις επειδή η αντίσταση τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ρηγμάτωσης υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του βραχώδους υλικού (υπόθεση Orowan). Σύμφωνα με τον Byerlee (1968) η ψαθυρή ή όλκιμη κατάσταση ορίζεται ανάλογα με τον αν παρατηρείται ή όχι πτώση τάσης μετά τη ρηγμάτωση του δοκιμίου (η διαφορά μεταξύ μέγιστης και παραμένουσας αντοχής μηδενίζεται). Η πλευρική πίεση που αντιστοιχεί στη μεταβατική περιοχή ψαθυρής-όλκιμης συμπεριφοράς είναι ανεξάρτητη του τύπου του πετρώματος και η υπόθεση Orowan έχει γενική ισχύ, ενώ η γωνία τριβής συνδέεται με τις τάσεις σ_1 και σ_3 με τη σχέση:

$$\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα κύκλου Mohr που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση δοκιμών τριαξονικής θλίψης (Orowan, 1960)

Ορισμένα πυριτικά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως γρανίτης και χαλαζίτης συμπεριφέρονται ψαθυρά ακόμη και σε πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες των 1000 MPa (Byerlee 1968, Bergues *et al.* 1974). Οι Shimada *et al.* (1983) παρατήρησαν ότι ο μη πορώδης γρανίτης, γάββρος, δουνίτης και εκλογίτης παρέμειναν στην ψαθυρή περιοχή σε θερμοκρασία δωματίου και πλευρικές πιέσεις μέχρι 3 GPa.

Η πίεση μετάβασης μειώνεται με το πορώδες. Συσχετίσεις μεταξύ της τάσης μετάβασης και του πορώδους ορισμένων ψαμμιτών δίνονται από τους Scott & Nielsen (1991), Logan (1987), Wong (1990) κ.α.

Στα περισσότερα πετρώματα η μεταβατική συμπεριφορά συμβαίνει σε εύρος πλευρικών πιέσεων. Ο πίνακας 2.10 περιλαμβάνει τιμές της πίεσης μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά για ορισμένα πετρώματα.

Πίνακας 2.10. Πίεση μετάβασης από την ψαθυρή στην όγκιμη συμπεριφορά για ορισμένα πετρώματα από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Paterson και Wong , 2005 και Byerlee, 1967)

Πέτρωμα	Πίεση μετάβασης (MPa)	Αναφορά
Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα	30-100	Paterson and Wong (2005)
Ασβεστόλιθος (πορώδες 0,16)	10-20	Vajdova, Baud and Wong (2004)
Κρητίς (πορώδες 0,43)	<10	Homand and Shao (2000)
Δολομίτης	>100	Handin and Hager (1957), Mogi (1971)
Γύψος	40	Murrell and Ismail (1976a)
Ανυδρίτης	100	Handin and Hager (1957)
Ασβεστόλιθος	20-100	Goodman (1989)
Ορυκτό αλάτι	<20	Handin (1953), Mogi (2006)
Ορυκτό αλάτι	0	Goodman (1989)
Τάλκης	400	Edmond and Paterson (1972)
Σερπεντινίτης	300-500	Raleigh and Paterson (1965), Escartin, Hirth and Evans (1977)
Χλωρίτης	300	Murrell and Ismail (1976a)
Χαλαζίτης (πορώδες 0,07)	600	Hadizadech and Rutter (1983), Hirth and Tullis (1989)
Ψαμίτης (πορώδες 0,10)	<100	Wong, David and Zhu (1997)
Ψαμίτης	>100	Goodman (1989)
Ψαμίτης (πορώδες 0,10)	200-300	Paterson and Wong (2005)
Ιλυόλιθος	<100	Handin and Hager (1957), Hoshino et al (1972)
Βασάλτης (πορώδες 0,05)	300	Shimada and Yukutake (1982)
Γρανίτης	1000	Byerlee (1967)

Επίσης, ο Mogi (1966, 2007) έχει αποδείξει πως αριστερά της ευθείας $\sigma_1 - \sigma_3 = 4,4\sigma_3$ στο διάγραμμα $\sigma_1 - \sigma_3$ (γραμμή Mogi) κυριαρχεί η ψαθυρή θραύση ενώ από τα δεξιά η όγκιμη. 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 όγκιμη και εάν δεν υπάρχει θραύση και το φορτίο συνεχώς αυξάνεται τότε βρίσκεται στην όγκιμη περιοχή.

Με βάση τα παραπάνω και σύμφωνα με τον Hoek (1983) το εύρος των πιθανών τιμών σ_1' / σ_3' για μετάβαση από την ψαθυρή στην όγκιμη συμπεριφορά κυμαίνεται μεταξύ 3 με 5.

Επιπλέον, ο Hoek (1983) προτείνει για την θεώρηση της συμπεριφοράς του βραχώδους υλικού ως ψαθυρή, η τάση σ_3 να είναι μικρότερη από την αντοχή σ_c του υλικού σε μονοαξονική θλίψη. Για υλικά που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές τιμές του m_i το σημείο που ισχύει $\sigma_3' = \sigma_c$ μπορεί να είναι πέρα από το όριο μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά.

2.4. Κριτήρια αστοχίας πετρωμάτων

Τα επικρατέστερα και πιο συχνά εφαρμόσιμα στην πράξη είναι τα κριτήρια του Mohr-Coulomb και του Hoek-Brown.

2.4.1. Κριτήριο Mohr-Coulomb

Σύμφωνα με τον Coulomb (1776) όταν ένα πέτρωμα καταπονείται θλιπτικά τότε σε μια κρίσιμη τιμή φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί. Το επίπεδο της αστοχίας του πετρώματος δημιουργείται κατά μήκος ενός επιπέδου, εξαιτίας της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται σε αυτό. Η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική διατμητική αντοχή του πετρώματος. Στην συνέχεια ο Otto Mohr (1900) πρόσθεσε τους κύκλους Mohr (σχήμα) σε διάγραμμα αξόνων ορθής και διατμητικής τάσης. Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι μια ευθεία στην οποία εφάπτονται οι κύκλοι Mohr και εκφράζουν τις οριακές εντατικές καταστάσεις του πετρώματος. Έτσι, αρχικά ο Mohr εισήγαγε την υπόθεση της εξάρτησης της αστοχίας του πετρώματος από την μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση και ο Coulomb θεώρησε την γραμμική περιβάλλουσα ενός πετρώματος που αστοχεί σε κάποιο επίπεδο υπό την δράση ενός κρίσιμου συνδυασμού ορθής και διατμητικής τάσης.

Το κριτήριο M-C μπορεί να διατυπωθεί ως συνάρτηση:

(α) της μέγιστης και ελάχιστης τάσης στο επίπεδο των κύριων τάσεων σ_1 - σ_3 ,

(β) της ορθής και διατμητικής τάσης στο επίπεδο τ - σ .

Όταν όλες οι κύριες τάσεις είναι θλιπτικές, τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι το κριτήριο M-C ισχύει σε ικανοποιητικό βαθμό για τα πετρώματα. Εντούτοις, παρουσία εφελκυστικών τάσεων απαιτείται κάποια τροποποίηση, επειδή η (θεωρητική) μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό που προβλέπεται από το M-C δεν μετριέται στις δοκιμές εφελκυσμού.

Το κριτήριο Mohr-Coulomb στο επίπεδο ορθής και διατμητικής τάσης περιγράφεται με την σχέση:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.13)$$

όπου,

c : είναι η συνοχή του πετρώματος

φ : είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, που συνδέεται με τον συντελεστή εσωτερικής τριβής με τη σχέση $\mu = \tan \varphi$

Σε διάγραμμα αξόνων σ - τ η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb είναι ευθεία με γωνία κλίσης φ ως προς τον άξονα της ορθής τάσης (Σχήμα 2.9).

Ο κύκλος Mohr που εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου εκφράζει την οριακή εντατική κατάσταση στο επίπεδο αστοχίας, το οποίο κλίνει υπό γωνία β ως προς τον άξονα της σ_1 (Σχήμα 2.10). Η ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας εκφράζονται σε συνάρτηση με την ελάχιστη και μέγιστη κύρια τάση από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (2.14)$$

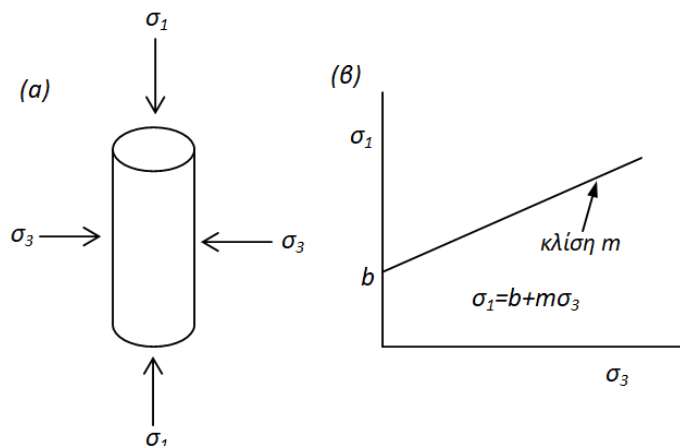
$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (2.15)$$

Από τη γεωμετρία της περιβάλλουσας και του κύκλου Mohr προκύπτει ότι η γωνία β συνδέεται με τη γωνία φ με τη σχέση:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (2.16)$$

Η εξίσωση του κριτηρίου M-C συναρτήσει των κύριων τάσεων:

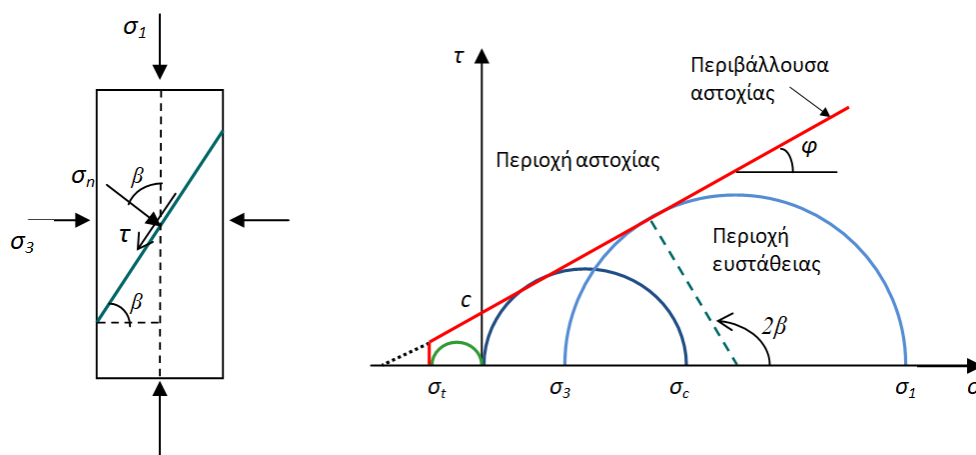
$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = m\sigma_3 + b \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα περιβάλλουσας κριτηρίου Mohr-Coulomb

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει την περιβάλλουσα του κριτηρίου Mohr-Coulomb σε διάγραμμα αξόνων κύριων τάσεων (σ_1 - σ_3), η οποία είναι ευθεία με τεταγμένη b και κλίση m όπου b είναι η αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Με τη βοήθεια της (2.17) και από τη γεωμετρία του κριτηρίου μπορούν να εξαχθούν διάφορες χρήσιμες σχέσεις, οι οποίες παρουσιάζονται πολύ επεξηγηματικά από τους Jaeger et al. (2007).



Σχήμα 2.11. Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου Mohr-Coulomb.

Με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα πρέπει η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Mohr-Coulomb να αποκόπτεται για τιμή της αντοχής του πετρώματος σε

εφελκυσμό, σ_1 , όπου προσδιορίζεται από εργαστηριακές δοκιμές. Συνεπώς, το κριτήριο Mohr-Coulomb παριστάνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.

Τα πλεονεκτήματα του κριτηρίου Mohr-Coulomb, όπως περιγράφονται από την προτεινόμενη μέθοδο ISRM είναι:

(α) απλή και εύχρηστη μαθηματική έκφραση,

(β) παράμετροι διατμητικής αντοχής του πετρώματος με φυσική σημασία (συνοχή και γωνία τριβής),

(γ) ευρεία αποδοχή του κριτηρίου σε πρακτικές εφαρμογές στη γεωτεχνική μηχανική.

Επιπρόσθετα, το κριτήριο Mohr-Coulomb εκφράζει ικανοποιητικά τα εργαστηριακά αποτελέσματα και ερμηνεύει ορθά, για ένα περιορισμένο εύρος τιμών της μέσης τάσης, την εντατική κατάσταση του πετρώματος κατά την αστοχία. Για το λόγο αυτό, η ISRM προτείνει την εφαρμογή του κριτηρίου Mohr-Coulomb ως μία αρχική προσέγγιση της συμπεριφοράς του πετρώματος, στις περιπτώσεις που οι τρεις κύριες τάσεις είναι θλιπτικές και πρόκειται για περιορισμένο εύρος τιμών της μέσης τάσης. (Labuz & Zang 2012).

2.4.2. Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Ένα από τα πιο διαδεδομένα κριτήρια αστοχίας είναι των Hoek & Brown (1980). Οι συγγραφείς αφού βασίστηκαν στην θεωρία θραύσης του Griffith (1921,1924) και των McClintock & Walsh (1962) παρουσίασαν την αρχική μορφή του εμπειρικού κριτηρίου αστοχίας. Το κριτήριο ορίζει την αστοχία ενός πετρώματος με βάση την τιμή της κύριας τάσης σ_1 ($\sigma_1 > \sigma_3 = \sigma_2$) σε αντίθεση με το κριτήριο του Mohr - Coulomb που ορίζει την τιμή της διατμητικής τάσης για την οποία αστοχεί ένα πέτρωμα. Το κριτήριο (Σχήμα 2.13), αναφέρεται σε βραχόμαζα με ομοιόμορφη κατάτμηση και ορίζεται με την εξίσωση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (2.18)$$

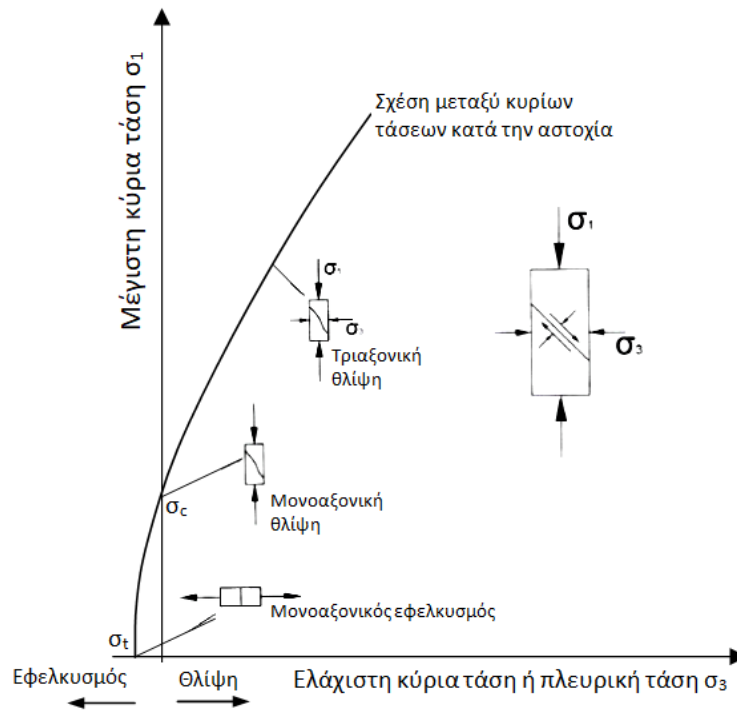
Όπου,

σ_1 η μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά τη θραύση,

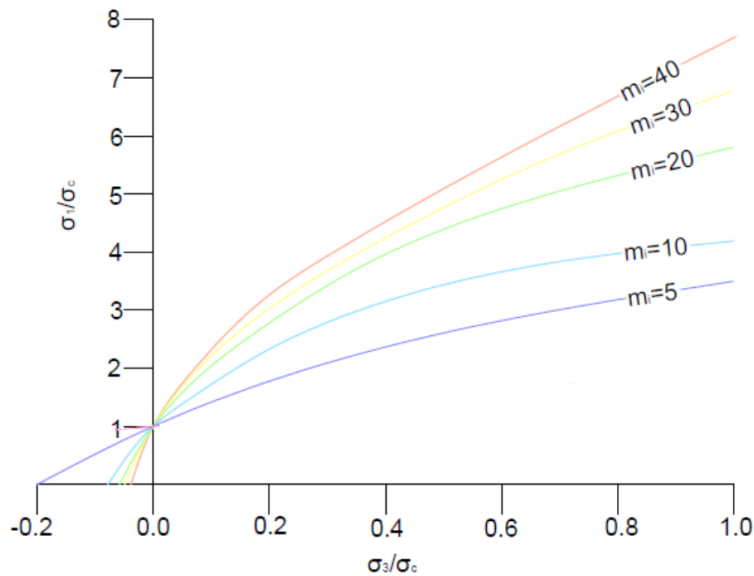
σ_3 η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο,

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 2.12. Κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980).



Σχήμα 2.13. Περιβάλλουσα αστοχίας κριτηρίου H-B για διάφορες τιμές της παραμέτρου m

Το 1992 οι Hoek et al (1992) πρότειναν μία τροποποιημένη σχέση του κριτηρίου

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^a \sigma_c \quad (2.19)$$

Όπου,

a 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 τροποποίηση του κριτηρίου προέκυψε όταν νεότερα εμπειρικά δεδομένα παρουσίασαν ότι η εφαρμογή του αρχικού τύπου πρέπει να εφαρμοστεί μόνο σε καλής ποιότητας βράχο, κυρίως σε βράχους με γωνιώδη στοιχεία κατάτμησης που βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. Στην παραπάνω περίπτωση σχέση γράφεται:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^{0.5} \quad (2.20)$$

Για το άρρηκτο πέτρωμα η εξίσωση παίρνει την μορφή

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1\right)^{0.5} \quad (2.21)$$

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

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου m_i ο Hoek (2002) προτείνει μια διαδικασία λήψης δεδομένων από τριαξονικές δοκιμές και σε συγκεκριμένο εύρος, το οποίο αρχικά ήταν το $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$ καθώς επίσης και δεδομένα από δοκιμές εφελκυσμού ώστε να προσαρμοστεί καλύτερα η περιβάλλουσα καμπύλη.

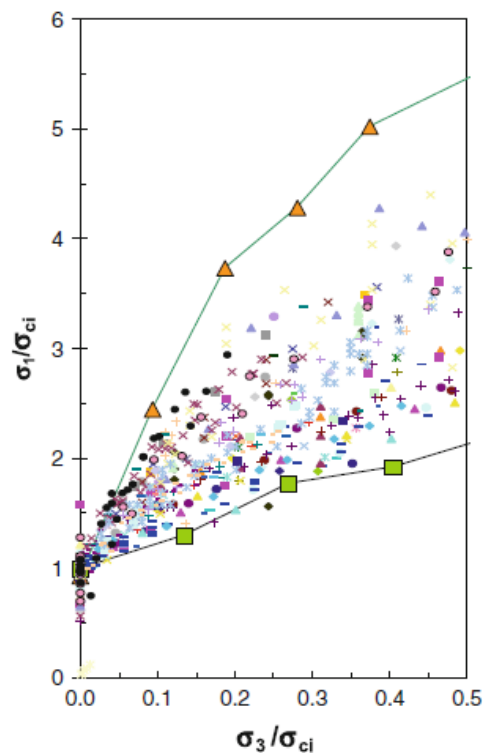
Το παραπάνω εύρος σύμφωνα με τον Hoek (1983) προτάθηκε διότι η πλευρική πίεση θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερη της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος γιατί θεωρήθηκε ότι από το όριο αυτό και μετά το πέτρωμα συμπεριφέρεται πλαστικά.

Ωστόσο οι Hoek & Brown (2018), λαμβάνοντας υπόψη ότι η θλιπτική αντοχή, για άλλα πετρώματα είναι μικρότερη και για άλλα μεγαλύτερη από τη τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά, πρότεινε οι τριαξονικές δοκιμές να πρέπει να γίνονται σε όλο το εύρος της ψαθυρής περιοχής, δηλαδή μέχρι την τιμή της πλευρικής πίεσης για την οποία το εκάστοτε πέτρωμα βρίσκεται στην περιοχή μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη κατάσταση.

Επίσης αναφέρει πως σε πετρώματα με μικρή τιμή m_i το όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς συνήθως βρίσκεται σε χαμηλότερες πλευρικές πιέσεις και 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 παραπάνω εύρος καθώς και δεδομένα για την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος.

Το κριτήριο βασίστηκε σε τριαξονικές δοκιμές, συγκεκριμένα σε 68 ομάδες δειγμάτων πετρωμάτων που εκτελέστηκαν με βάση το εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$ και παρουσιάζονται στο σχήμα 2.14. Κατά την τριαξονική θλίψη, η αντοχή των δοκιμών προσδιορίζεται καλύτερα με ένα μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας. Η μη γραμμικότητα προκύπτει όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12 στην αλλαγή συμπεριφοράς του τρόπου αστοχίας του ακέραιου δοκιμίου με την ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής πίεσης.

Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο διάφορων τύπων πετρωμάτων σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα.



Σχήμα 2.14. 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 παρίστανονται με μεγαλύτερα σύμβολα (Kaiser & Kim, 2008).

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πίνακας 2.11. Τιμές της σταθερά m_i για άρρηκτο βράχο διαφορετικών ομάδων πετρωμάτων (Marinos & Hoek, 2000 και Hoek, 2007). Σημειώνεται ότι οι τιμές σε παρένθεση αποτελούν εκτίμηση. Το αναφερόμενο εύρος τιμών για κάθε υλικό εξαρτάται από την κοκκομετρία και την αλληλοσύνδεση της κρυσταλλικής δομής – υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε δομές με ισχυρότερη σύνδεση και μεγαλύτερη γωνία τριβής.

ΤΥΠΟΣ	ΟΜΑΔΑ		ΥΦΗ			
			Αδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή* (21±3)	Ψαμμίτες (17±2)	Ιλυόλιθοι (7±2)	Αργιλόλιθοι (4±2)
			Λατυποπαγή* (19±5)		Γραουβάκες (18±3)	Αργιλικόι 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)	Κερατόλιθοι (19±4) Μεταψαμμίτες (19±3)	Χαλαζίτες (20±3)	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτες (29±3)	Αμφιβολίτες (26±6)	Γνεύσιοι (28±5)	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθοι (12±3)	Φυλλίτες (7±3)	Σχίστες (7±4)
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης (32±3) Γρανοδιορίτης (29±3)	Διορίτης (25±5)		
		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)	Οψιδιανός (19±3)
		Πυροκλαστικά	Ηφαιστ. Κροκαλοπαγή (19±3)	Ηφαιστ. Λατυποπαγή (19±5)	Τόφφοι (13±5)	

* Κροκαλοπαγή και λατυποπαγή μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών m_i ανάλογα με τη φύση του συνδετικού υλικού και το βαθμό σύμπλεξης, που μπορεί να μεταβάλλονται από τιμές παρόμοιες με του ψαμμίτη, μέχρι τιμές αντίστοιχες των λεπτόκοκκων ιζημάτων (ακόμη και κάτω από 10).

** Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε άρρηκτα πετρώματα κάθετα προς τη στρώση ή την πτύχωση. Η τιμή του m_i θα είναι πολύ διαφορετική για αστοχία κατά μήκος ενός επιπέδου αδυναμίας.

Πίνακας 2.12. Εύρος τιμών της σταθεράς m_i για επιλεγμένα πετρώματα του ελληνικού χώρου.

Τύπος	Πέτρωμα	m_i	Αναφορά
ΕΚΡΗΞΙΓΕΝΗ	Γρανίτης Αρναίας	34	Tsikrikis et al. (2016)
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Ασβεστόλιθος Μεσαίου	15,9	Tsikrikis et al. (2016)
	Ασβεστόλιθος (όλων των τύπων)	13 - 27	Tsiambaos & Sabatakakis (2004)
	Ασβεστόλιθος (βιοσπαρίτης)	8 - 29	Sabatakakis et al. (2008)
	Ασβεστόλιθος (βιομικρίτης)	15 - 25	Sabatakakis et al. (2008)
	Ψαμμίτης Δεματίου	18,9	Tsikrikis et al. (2016)
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩ- ΣΙΓΕΝΗ	Μάρμαρο Διονύσου (ασβεστιτικό)	13	Νομικός (2015)
ΣΙΓΕΝΗ	Μάρμαρο Καβάλας (ασβεστιτικό)	8,6	Tsikrikis et al. (2016)
	Μάρμαρο Νάξου (χονδροκρυσταλλικό)	16,6	Νομικός (2015)
	Μάρμαρο Βώλακα (δολομιτικό)	20.2	Νομικός (2015)
	Μάρμαρο Νευροκοπίου (δολομιτικό)	20,0	Παπαλιάγκας κ.α. (2014)

2.4.3. Δυναμικές παράμετροι πετρωμάτων

Δυναμική συμπεριφορά ενός πετρώματος ονομάζεται η απόκρισή του σε δυναμικές εντατικές καταστάσεις. Τα δυναμικά φορτία διαδίδονται με την μορφή τασικών κυμάτων, τα οποία εξασθενούν κατά τη διάδοσή τους. Στα πετρώματα η εξασθένιση των τασικών κυμάτων οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στην παρουσία μικρορωγμών στη δομή του πετρώματος. Το κύμα μεταδίδεται με ταχύτητα που εξαρτάται από το είδος του κύματος και από το μέσο διάδοσης.

Σύμφωνα με τον Kolsky (1963) στο εσωτερικό ενός ελαστικού μέσου απείρων διαστάσεων διαδίδονται δυο είδη τασικών κυμάτων, τα οποία καλούνται κύματα σώματος. Στο πρώτο είδος κύματος που είναι γνωστά ως διαμήκη κύματα, η διεύθυνση διαταραχής των υλικών σημείων είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στο δεύτερο είδος κύματος που καλείται εγκάρσιο κύμα, η διεύθυνση διαταραχής των υλικών σημείων του μέσου είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Σύμφωνα με την εργαστηριακή μέθοδο της ISRM (2007) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων, υπολογίζονται σε δοκίμια συγκεκριμένου μήκους το χρονικό διάστημα για κάθε τύπο κύματος (t_p και t_s)

Ψηφιακή συλλογή
2.Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι ταχύτητες διάδοσης του εγκάρσιου και διαμήκους κύματος υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_p = L/t_p \quad (2.22)$$

$$V_s = L/t_s \quad (2.23)$$

Όπου,

- V_p : ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος σε m/s
- V_s : ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιου κύματος σε m/s
- L : το μήκος της διαδρομής του κύματος σε m
- t_p : χρόνος διέλευσης του διαμήκους κύματος σε s
- t_s : χρόνος διέλευσης του εγκάρσιου κύματος σε s

Εφόσον υπολογιστούν οι παραπάνω ταχύτητες είναι εφικτό να προσδιοριστούν και οι ελαστικές δυναμικές παράμετροι. Εφόσον είναι γνωστή η πυκνότητα του πετρώματος μέσω των παρακάτω τύπων προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_o , ο λόγος Poisson ν και το δυναμικό μέτρο διάτμησης G_o .

$$G_o = \rho V_s^2 \quad (2.24)$$

$$E_o = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2.25)$$

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2.26)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τυπικές τιμές των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων για διάφορα γεωυλικά.

Πίνακας 2.13. Ταχύτητες κυμάτων P και S για διάφορους τύπους πετρωμάτων (Μανκο, 215)

Τύπος υλικού	Ταχύτητα P κυμάτων (m/s)	Ταχύτητα S κυμάτων (m/s)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Πυκνότητα του κρυσταλλικού υλικού (g/cm ³)
Φυτικό έδαφος	300-700	100-300	1,7-2,4	-
Ξηρή άμμος	400-1200	100-500	1,5-1,7	2,65 χαλαζίας
Υγρή άμμος	1500-2000	400-600	1,9-2,1	2,65 χαλαζίας
Κορεσμένες άργιλοι	1100-2500	200-800	2,0-2,4	-
Ασβεστιτικά εδάφη	2000-3000	750-1500	2,1-2,6	-
Κορεσμένες αργιλικόι σχιστόλιθοι	1500-2200	500-750	2,1-2,4	-
Πορώδης και κορεσμένοι ψαμμίτες	2000-3500	800-1800	2,1-2,4	2,65 χαλαζίας
Ασβεστόλιθος	3500-6000	2000-3300	2,4-2,7	2,71 ασβεσίτης
Κρητίδα	2300-2600	1100-1300	1,8-3,1	2,71 ασβεσίτης
Αλάτι	4500-5500	2500-3100	2,1-2,3	2,1 Αλίτης
Ανυδρίτης	4000-5500	2200-3100	2,9-3,0	-
Δολομίτης	3500-6500	1900-3600	2,5-2,9	(Ca,Mg) CO ₃ 2 8-2,9
Γρανίτης	4500-6000	2500-3300	2,5-2,7	-
Βασάλτης	5000-6000	2800-3400	2,7-3,1	-
Γνεύσιος	4400-5200	2700-3200	2,5-2,7	-
Ανθρακας	2200-2700	1000-1400	1,3-1,8	-
Νερό	1450-1500	-	1	-
Πάγος	3400-3800	1700-1900	0,9	-
Πετρέλαιο	1200-1250	-	0,6-0,9	-

2.4.4. Διατμητική αντοχή ασυνεχειών πετρωμάτων

Η αντοχή της βραχώμαζας επηρεάζεται περισσότερο από την αντοχή σε διάτμηση, δεδομένου ότι η αντοχή αυτή είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη του άρρηκτου βράχου. Επομένως, μια ακριβής εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών είναι σημαντική στην πρόβλεψη της ευστάθειας της βραχώμαζας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών είναι ο τύπος το βράχου, το μέγεθος της ορθής τάσης που εφαρμόζεται στις ασυνέχειες, η τραχύτητα, η αντοχή των τοιχωμάτων, η υγρασία, η πίεση του νερού και το υλικό πλήρωσης (Kulatilake *et al.* 1995). Μεταξύ αυτών, η τραχύτητα και η αντοχή των τοιχωμάτων είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (ISRM, 1981) η ποσοτική και περιγραφική ανάλυση των ασυνεχειών γίνεται με βάση τις παρακάτω :

- Προσανατολισμός (Orientation)
- Απόσταση (spacing)
- Εμμονή - Συνέχεια (persistence-continuity)
- Αντοχή τοιχωμάτων (wall strength)
- Τραχύτητα (roughness)
- Άνοιγμα (aperture)
- Υλικό πλήρωσης (filling)
- Συνθήκες υπόγειου νερού (seepage)

i) Προσανατολισμός

Η αρχική ερευνητική εργασία για την εκτίμηση της ευστάθειας ενός πρανούς που εν δυνάμει μπορεί να αστοχήσει ανισότροπα, δηλαδή κατά μήκος ενός ή δυο επιπέδων είναι η συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων προσανατολισμού των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Μια ασυνέχεια μπορεί να περιγράψει ως ένα επίπεδο στο χώρο με προσανατολισμό που ορίζεται με τα παρακάτω γεωμετρικά μεγέθη.

Μέγιστη κλίση (dip): Είναι η μέγιστη γωνία του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι κατακόρυφη γωνία και είναι κάθετη στην παράταξη, ώστε να αποτελεί την πραγματική κλίση (true dip). Η μέτρηση σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο αποτελεί τη φαινόμενη κλίση (apparent dip) που είναι μικρότερη της πραγματικής. Οι τιμές της κλίσης κυμαίνονται προφανώς από 0° μέχρι 90°.

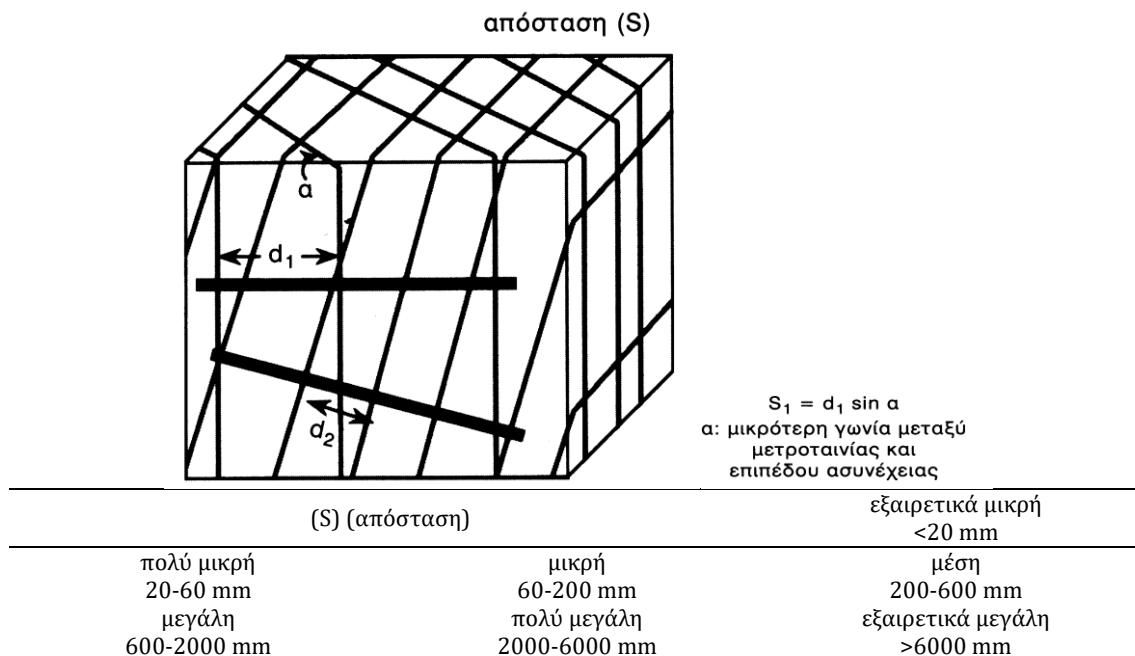
Φορά ή διεύθυνση μέγιστης κλίσης (dip direction): Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της μέγιστης κλίσης στο οριζόντιο επίπεδο με το γεωγραφικό βορά. Μετριέται δεξιόστροφα από το βορά, παίρνει τιμές από 0° μέχρι 360° και είναι πάντα κάθετη στην παράταξη του επιπέδου.

Οι παραπάνω γωνίες μπορούν να καταγραφούν με τη γεωλογική πυξίδα και να χρησιμοποιηθούν στην σφαιρική προβολή.

ii) Απόσταση

Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών καθορίζει τον όγκο των τεμαχίων που πιθανόν θα αποκολληθούν από την βραχώμαζα. Η ανισότροπη αστοχία ενός πρανούς κατά μήκος ενός επιπέδου μπορεί να μετατραπεί σε ισότροπη, δηλαδή σε περιστροφική ολίσθηση όταν η

απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών γίνει υπερβολικά μικρή. Οι μετρήσεις της απόστασης γίνονται με μετροταινία και κάθετα στο εκάστοτε σύστημα ασυνεχειών. Τελικά, έχουμε αποστάσεις S_1, S_2, \dots, S_n μεταξύ των ασυνεχειών σε μια βραχόμαζα, όπου (n) είναι τα κύρια συστήματα των ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχόμαζα. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις μπορούν να προσδιοριστεί ο δείκτης μεγέθους ID και ο δείκτης όγκου IV . Ο πρώτος ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των μέσων επί μέρους αποστάσεων κάθε συστήματος προς το συνολικό αριθμό των συστημάτων που διατέμνουν τη βραχόμαζα και ο δεύτερος ορίζεται ως το συνολικό άθροισμα του επί μέρους μέσου αριθμού των ασυνεχειών ανά τρέχον μέτρο (δηλαδή της πυκνότητας των ασυνεχειών) για κάθε σύστημα.

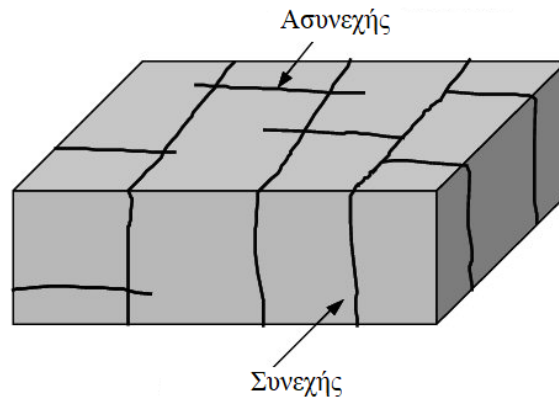


Σχήμα 2.15. Ταξινόμηση της απόστασης κατά I.S.R.M. (1981)

iii) Εμμονή (Persistence - Continuity)

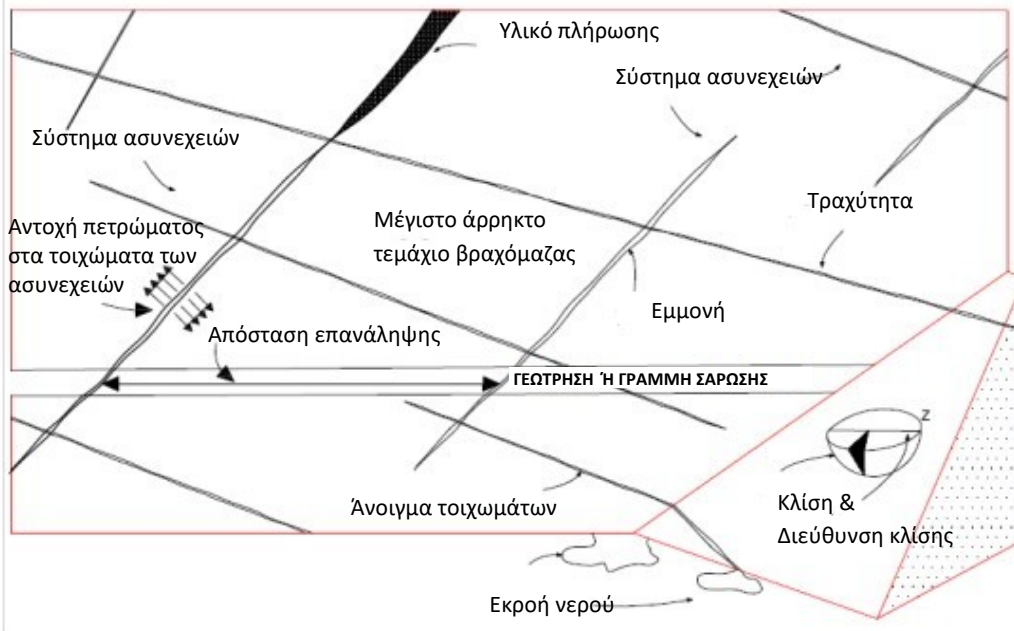
Ο παράγοντας αυτός εκφράζει τη συνέχεια (εμμονή) της ασυνέχειας σε όλη την έκταση της βραχόμαζας. Στην περίπτωση που η ασυνέχεια τέμνει τη βραχόμαζα σε όλη την έκταση η αστοχία ενός πρανούς μπορεί να πραγματοποιηθεί με ολίσθηση πάνω στην επιφάνεια της ασυνέχειας αυτής. Όταν η ασυνέχεια διακόπτεται από άλλες ασυνέχειες τότε η αστοχία δύναται να πραγματοποιηθεί κατά μήκος μιας πιο σύνθετης επιφάνειας, ενώ αν η διακοπή

πραγματοποιείται με γεφύρωση των δυο τοιχωμάτων της ασυνέχειας (rock bridges), η ευστάθεια βελτιώνεται. Οι μετρήσεις της συνέχειας γίνονται με μετροταινία.



Ταξινόμηση Εμμονής (I.S.R.M., 1981)

Χαρακτηρισμός	Πολύ μικρή	μικρή	μέση	υψηλή
Μήκος	<1 m	1-3m	3-10m	10-20m

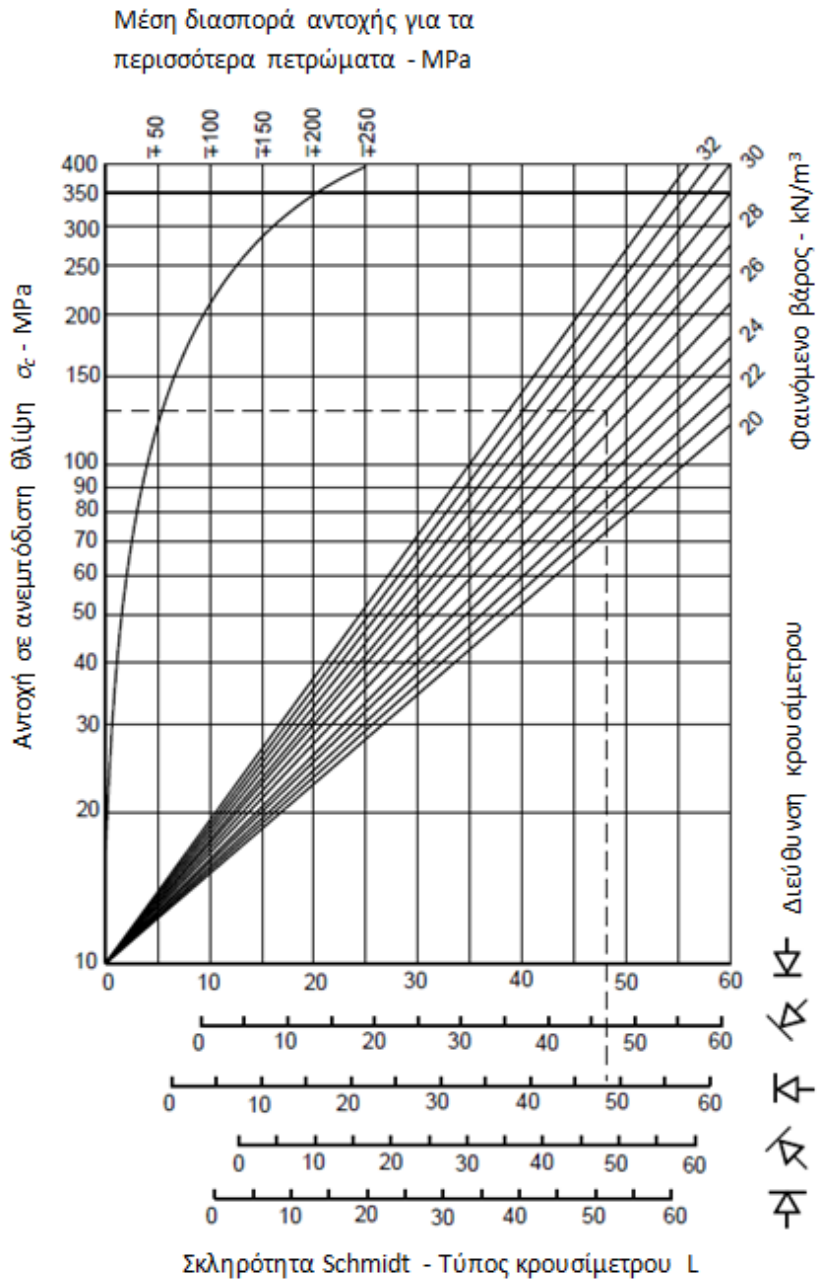


Σχήμα 2.16. Κύριες γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών βράχου (Hudson, 1989)

iv) Αντοχή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας

Η αντοχή των τοιχωμάτων των ασυνεχειών κυρίως έχουν μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με το άρρηκτο πέτρωμα. Αυτό οφείλεται στην αποσάθρωση που υπόκεινται τα τοιχώματα της ασυνέχειας με αποτέλεσμα τη δημιουργία αργιλικών ορυκτών ή και τον κερματισμό των πετρωμάτων στην περίπτωση που αποτελούνται από ανθρακικά ή αλατούχα ορυκτά.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των τοιχωμάτων των ασυνεχειών προσδιορίζεται έμμεσα με τη χρήση του σφυριού Schmidt τύπου L μέσω του νομογράμματος (σχήμα 2.18) των Deere and Miller, (1966). Η διεξαγωγή της δοκιμής μπορεί να γίνει στο ύπαιθρο. Σημαντική πληροφορία που πρέπει να καταγράφεται είναι η διεύθυνση του σφυριού κατά την δοκιμή.



Σχήμα 2.17. Ταξινόμηση τοιχωμάτων σύμφωνα με τη σκληρότητα Schmidt (Deere and Miller, 1966)

Πίνακας 2.14. Ταξινόμηση άρρηκτου πετρώματος με βάση τη σκληρότητα Schmidt (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)

Κατηγορία πετρωμάτων	Μέση ένδειξη κρουσίμετρου (SHV)
Πολύ μαλακά	<10
Μαλακά	10-20
Μέτρια	20-50
Σκληρά	50-60
Πολύ σκληρά	>60

ν) Τραχύτητα

Με τον όρο τραχύτητα νοούνται οι μικροεσοχές 2^{ης} τάξης που είναι αρκετά μικρές, ώστε κατά την διατμητική μετακίνηση να θραύονται. Όταν η τραχύτητα των τοιχωμάτων των ασυνεχειών είναι μεγάλη τότε αυτό συνεπάγεται σε αυξημένη διατμητική αντοχή. Αυτές οι επιδράσεις μειώνονται σημαντικά ή ακόμα εξαλείφονται όταν υπάρχει υλικό πλήρωσης. Αξίζει να σημειωθεί πως η κυμάτωση μεγέθους μέτρων ονομάζεται πρώτης τάξης και σε μεγάλη κλίμακα προκαλεί αλληλοεμπλοκή της βραχόμαζας και κατά επέκταση διαστολή (Patton and Deere, 1970). Για την μέτρηση της τραχύτητας μια ασυνέχειας έχουν συσταθεί κατά ISRM μια ομάδα περιγραφικών όρων που βασίζονται σε δυο κλίμακες παρατήρησης. Σε μικρή κλίμακα (μερικών cm) και στη ενδιάμεση κλίμακα (μερικά μέτρα). Η ενδιάμεση κλίμακα τραχύτητας εμπεριέχει τους όρους κλιμακωτή, κυματοειδή και επίπεδη ενώ η μικρή κλίμακα διακρίνεται σε τραχεία, λεία, κατοπτρική επιφάνεια. Σε κάθε διεύθυνση ολίσθησης η ασυνέχεια έχει διαφορετική διατμητική αντίσταση, επομένως η παραπάνω κατάταξη έχει νόημα μόνο όταν η διεύθυνση των προεσοχών είναι ίδια με την διατμητική μετατόπιση.

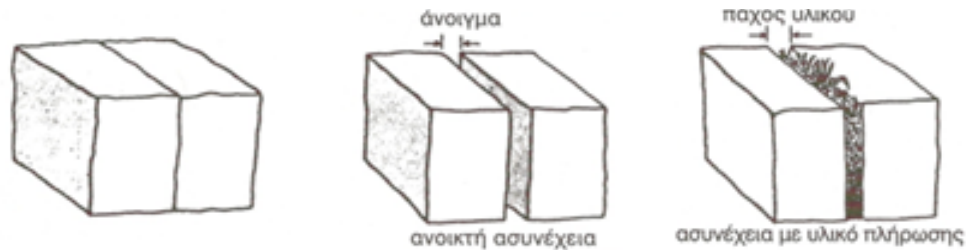
νί) Άνοιγμα

Άνοιγμα ονομάζεται η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας. Η ασυνέχεια διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες ως προς το άνοιγμα της.

- ανοικτή,
- κλειστή
- πληρωμένη με υλικά πλήρωσης όπως άργιλο, ιλύ, χλωρίτη, ασβεστίτη, λατυποπαγές κ.λπ.

Κατά την μέτρηση του ανοίγματος μιας ασυνέχειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη εξωγενείς παράγοντες που μπορεί να αυξήσουν το άνοιγμα της ασυνέχειας (π.χ. εκτόνωση τάσεων, αποσάθρωση, χρήση εκρηκτικών).

Μία ασυνέχεια ταξινομείται ημιποσοτικά σύμφωνα με τον πίνακα που φαίνεται στη συνέχεια. Αν εμφανίζει υλικό πλήρωσης αυτό περιγράφεται, καθώς η ύπαρξη του είναι καθοριστική στη διακύμανση της διατμητικής αντοχής της.



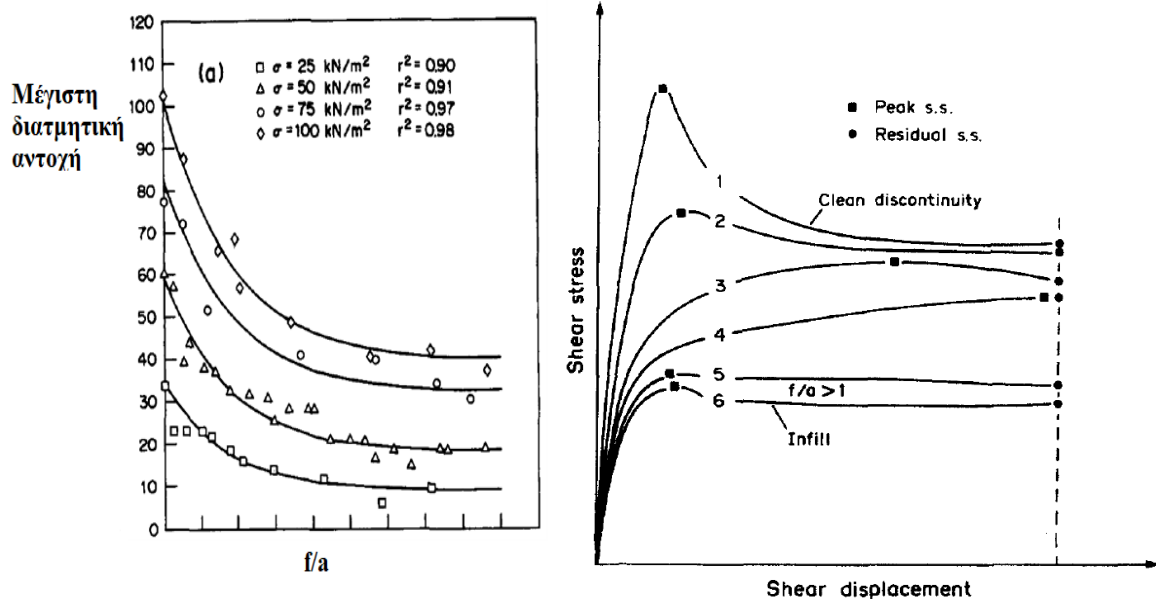
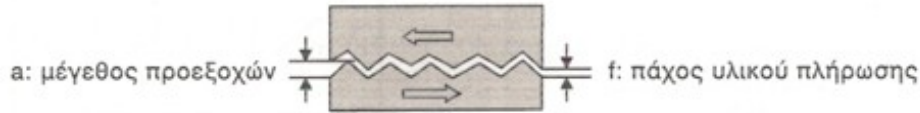
Πολύ κλειστές	<0,1 mm
Κλειστές	0.1-0.25 mm
Μερικά ανοικτές	0.25-0.5 mm
Μέτρια ανοικτές	0.5-2.5 mm
Μέτρια πλατιές	2.5-10 mm
Πλατιές	>10 mm
Πολύ πλατιές	1-10 cm
Εξαιρετικά πλατιές	10-100 cm

Σχήμα 2.18. Άνοιγμα ασυνεχειών κατά I.S.R.M., 1981

vii) Υλικό πλήρωσης

Υλικό πλήρωσης το υλικό που περιέχεται μεταξύ των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας. Η προέλευση του μπορεί να είναι ασβεστιτική, αργιλική, αμμώδης, κ.λπ. Η διατμητική αντοχή και η διαπερατότητα της ασυνέχειας εξαρτάται από το είδος και το πάχος του υλικού πλήρωσης ασυνέχειας.

Η επίδραση του πάχους του υλικού πλήρωσης στη διατμητική αντοχή μιας τραχειάς ασυνέχειας φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.20, όπου το υλικό πλήρωσης είναι τριμμένος μαρμαρυγίας (Goodman, 1970). Η αύξηση του πάχους του υλικού πλήρωσης (f) έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας σε σημείο που να τείνει προς την αντίστοιχη του υλικού πλήρωσης. Στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλο πάχος υλικού και μικρή τραχύτητα η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας εκφράζεται από αυτή του υλικού πλήρωσης, τότε εξετάζεται η συμπεριφορά του υλικού αυτού σύμφωνα με τις μεθόδους της Εδαφομηχανικής.



Σχήμα 2.19. Επίδραση του υλικού πλήρωσης στη διατμητική αντοχή μιας τραχειάς ασυνέχειας (Papaliangas et al., 1993).

viii) Συνθήκες υπόγειου νερού

Το νερό που κυκλοφορεί στις ασυνέχειες προκαλεί υδραυλικές, μηχανικές και χημικές διεργασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ρυθμίζουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας (αντοχή, παραμορφωσιμότητα, ανθεκτικότητα στο χρόνο κλπ.). Ο ρόλος της παρουσίας του υπόγειου νερού στις ασυνέχειες μπορεί κυρίως να προκαλέσει:

- Σημαντική μεταβολή στην ενεργή αντοχή της βραχώμαζας
- Διαβρωτικές δράσεις και γενικά πρόκληση ποιοτικής αλλοίωσης της βραχώμαζας (αποσάθρωση, καρστικοποίηση, μείωση ανθεκτικότητας κλπ.)

Η πιο συνηθισμένη περιγραφή της κατάστασης της ασυνέχειας είναι ξερή, υγρή, στάγδην ροή, συνεχής ροή.

2.4.5. Κριτήρια προσδιορισμού διατμητικής αντοχής ασυνεχειών

i) Κριτήριο Patton

Πρώτο κριτήριο που μελέτησε την επίδραση της τραχύτητας των ασυνεχειών στην διατμητική αντοχή τους πραγματοποιήθηκε από τον Patton (1966). Η ερευνά του έδειξε πως η μέγιστη διατμητική αντοχή του πετρώματος εκφράζεται μέσω της παρακάτω σχέσης.

$$\tau = \sigma_n \varepsilon \varphi (\varphi_b + i) \quad (2.27)$$

όπου,

- σ_n η επιβαλλόμενη ορθή τάση,
- φ_b η βασική γωνία τριβής και
- i η γωνία που εκφράζει την τραχύτητα.

Ο Patton κατέληξε σε αυτή την σχέση μέσω εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης πριονωτού σχήματος (σχήμα 2.20).

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:

$$\tau = c + \sigma_n \varepsilon \varphi \varphi_r \quad (2.28)$$

όπου,

- c η συνοχή και
- φ_r η παραμένουσα γωνία τριβής

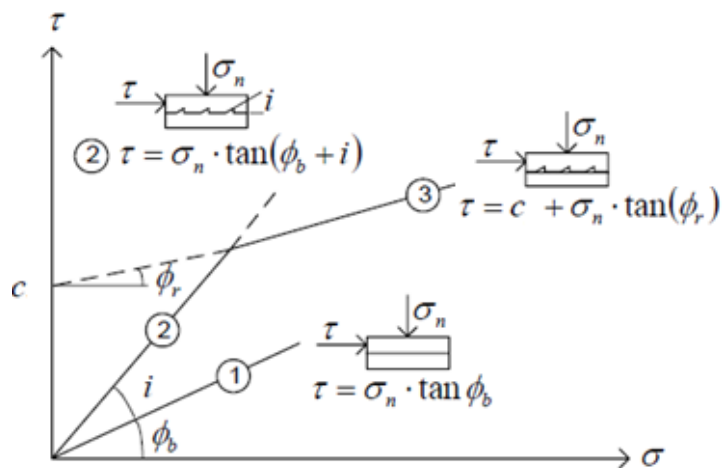
$$\tau = \sigma_n \tan(i + \varphi_b) \quad (2.29)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi_r \quad (2.30)$$

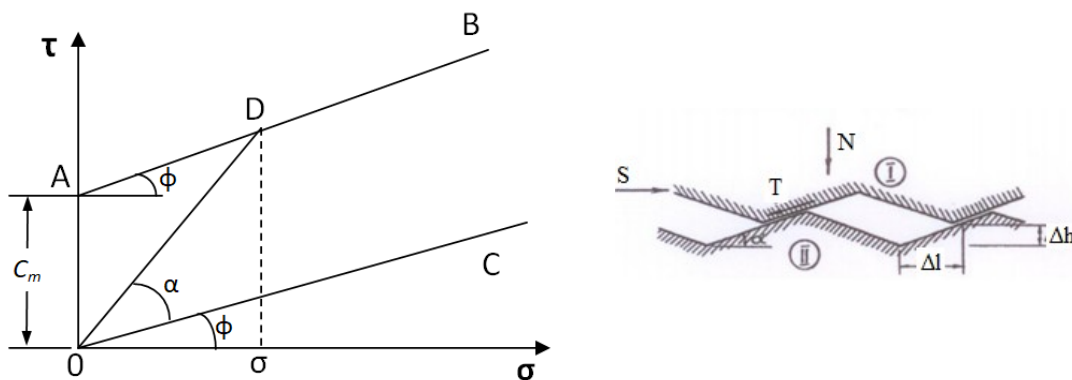
Την ίδια χρονιά, οι Goldstein et al (1966) μελέτησαν επίσης τη διατμητική αντοχή τραχειών ασυνεχειών και κατέληξαν στο ίδιο αποτέλεσμα. Με βάση αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης σε ασυνέχειες πριονωτής μορφής (σχήμα 2.21) κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + \alpha) \quad (2.31)$$

Όπου, φ : η γωνία τριβής της ασυνέχειας, α : η μέση γωνία κλίσης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, τ : η διατμητική τάση, σ : η επιβαλλόμενη ορθή τάση



Σχήμα 2.20. Διγραμμική περιβάλλουσα αστοχίας του Patton (1966) (Ένα από τα δύο σχήματα)



Σχήμα 2.21. Διάτμηση κατά μήκος τραχειάς επιφάνειας (Goldstein et al,1996)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.21 η παραπάνω σχέση ισχύει για μικρές ορθές τάσεις και σε τραχειές επιφάνειες. Με την αύξηση της ορθής τάσης ισχύει η σχέση

$$\tau = c_m + \sigma_n \epsilon \varphi \varphi \quad (2.32)$$

όπου, c_m η συνοχή και φ η γωνία τριβής της ασυνέχειας.

ii) Κριτήριο Ladanyi & Archambault

Μια μη γραμμική εξίσωση προτάθηκε αρχικά από τους Ladanyi and Archambault (1970). Η εξίσωση υπολογίζει τη μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας της ασυνέχειας κατά τη διατμητική μετατόπιση, λόγω της φθοράς των επιφανειακών ανωμαλιών, οι Ladanyi&Archambault (1969) δημιούργησαν ένα μη γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής για τις ασυνέχειες του πετρώματος (σχήμα 2.22, σχήμα 2.23), το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\tau^p = \frac{\sigma_n(1-\alpha_s)[\tan \varphi_\mu + \nu] + \alpha_s C_0(m-1/\eta)(1+\eta\sigma_n/C_0)^{1/2}}{1-\nu(1-\alpha_s)\tan \varphi_f} \quad (2.33)$$

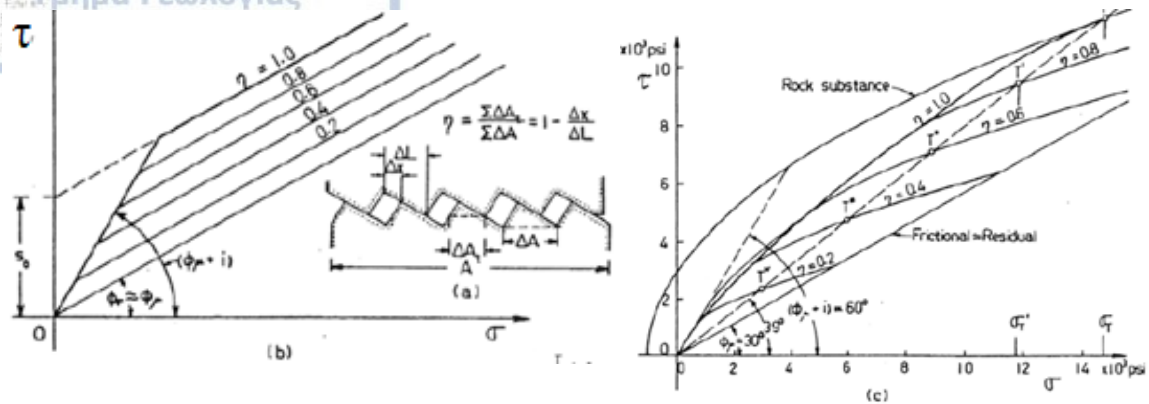
- α_s είναι ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας επαφής επί της συνολικής επιφάνειας της ασυνέχειας, υπολογιζόμενος από τη σχέση:

$$\alpha_s = 1 - \left[1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right]^{k_1} \quad \text{όπου } 0 \leq \sigma_n \leq \sigma_T \quad (2.34)$$

- ν είναι ο ρυθμός διαστολής κατά τη μέγιστη διατμητική τάση. Υπολογίζεται ως:

$$\nu = \left[1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right]^{k_2} \tan i \quad \text{όπου } 0 \leq \sigma_n \leq \sigma_T \quad (2.35)$$

- i είναι η αρχική γωνία διαστολής,
- σ_T είναι μία μεταβατική τιμή της ορθής τάσης, πέραν της οποίας η διαστολή της ασυνέχειας κατά την ολίσθηση παρεμποδίζεται πλήρως και η παρουσία της τραχύτητας δεν έχει ουσιαστική επίδραση στη συμπεριφορά της ασυνέχειας.
- k_1 και k_2 είναι συντελεστές που εξαρτώνται από το πέτρωμα, όμως μπορούν να λαμβάνουν προσεγγιστικά τις τιμές: $k_1 \sim 3/2$, και $k_2 \sim 4$.
- φ_μ είναι η γωνία τριβής για ολίσθηση στις προεξοχές της επιφάνειας της ασυνέχειας. Κατά τους Ladanyi Archambault (1969), η τιμή της φ_μ , για τα περισσότερα πετρώματα, κυμαίνεται εντός του εύρους $30 \pm 5^\circ$.
- φ_f είναι μία στατιστική μέση τιμή της γωνίας τριβής, όταν η ολίσθηση λαμβάνει χώρα κατά μήκος των διαφορετικού προσανατολισμού επιφανειακών ανωμαλιών της ασυνέχειας.
- C_0 είναι η αντοχή του πετρώματος των εξοχών της επιφάνειας της ασυνέχειας,
- η η ο λόγος της μονοαξονικής θλιπτικής προς τη μονοαξονική εφελκυστική αντοχή ($\eta = C_0/T_0$) και $m = (\eta + 1)1/2$.



Σχήμα 2.22. α) Ορισμός του βαθμού σύμπλεξης, η β) Αποτελέσματα σύμφωνα με το διγραμμικό κριτήριο γ) Αποτελέσματα σύμφωνα με το κριτήριο Ladanyi και Archambault (Από Ladanyi and Archambault 1970).

Σύμφωνα με τους Ladanyi και Archambault, η συνολική διατμητική δύναμη S αναλύεται σε 4 συνιστώσες. Μια εκ των οποίων η (S_4) σχετίζεται με τη αντοχή των προεξοχών και οι υπόλοιπες τρεις (S_1, S_2, S_3) με τη διαδικασία ολίσθησης των προεξοχών. Επομένως η διατμητική αντοχή καθορίζεται ως εξής:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (2.36)$$

όπου,

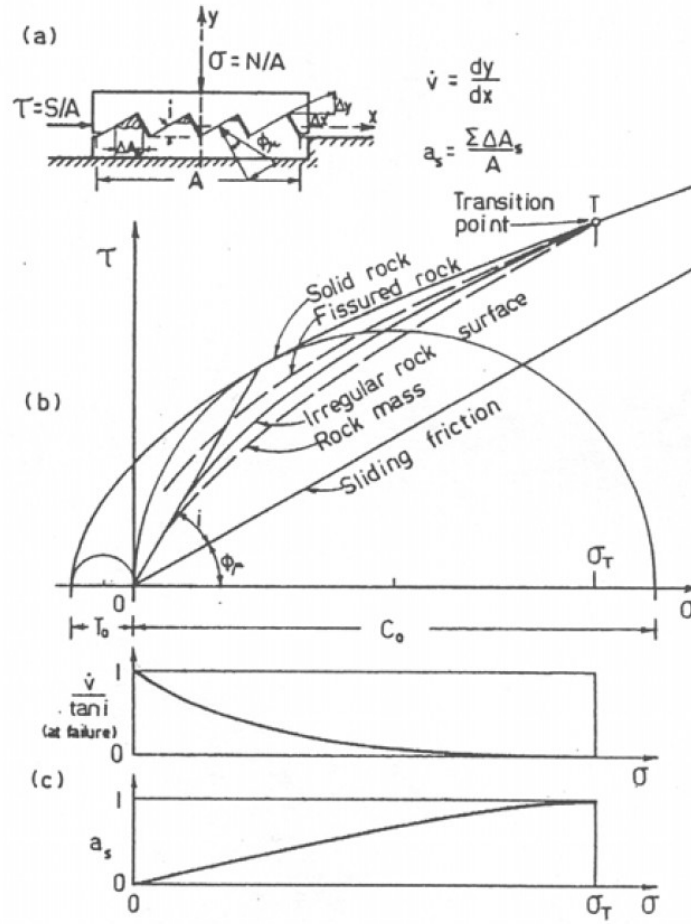
- S_1 =συνιστώσα οφειλόμενη στο εξωτερικό έργο που καταναλώνεται για τη διαστολή κατά τη διεύθυνση της ορθής δύναμης
- S_2 = συνιστώσα οφειλόμενη στο εσωτερικό έργο από την τριβή κατά τη διαστολή
- S_3 = συνιστώσα οφειλόμενη στο έργο από εσωτερική τριβή χωρίς μεταβολή όγκου

Αναγνωρίζοντας ότι σε μια ακανόνιστη επιφάνεια θα υπήρχαν ταυτόχρονα τόσο μηχανισμοί ολίσθησης όσο και μηχανισμοί διατμήσεως και καθορίζοντας την προβαλλόμενη επιφάνεια των επιφανειακών προεξοχών στο σημείο αστοχίας, ο Ladanyi και ο Archambault στη συνέχεια ορίζουν τη συνολική διατμητική δύναμη S

$$S = (S_1 + S_2 + S_3)(1 - \alpha_s) + S_4 \alpha_s \quad (2.37)$$

όπου,

- S_4 = συνιστώσα που οφείλεται στη διάτμηση των προεξοχών = $As_0 + N \tan \phi_0$ όπου A είναι η συνολική κοινή επιφάνεια επαφής, και s_0 και ϕ_0 είναι οι παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και
- a_s = ο λόγος της πραγματικής επιφάνειας διάτμησης προς την συνολική = A_s / A .

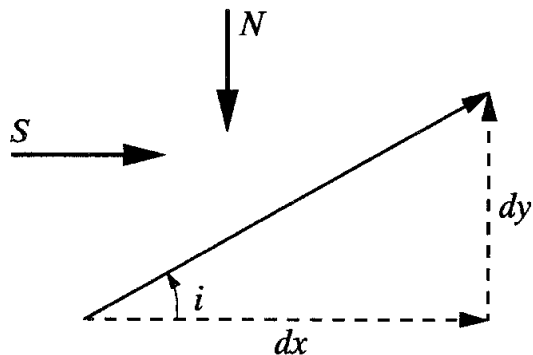


Σχήμα 2.23. a) Ορισμός του ρυθμού διαστολής και του λόγου της επιφάνειας διάτμησης. b) Περιβάλλουσες αστοχίας για τραχειές επιφάνειες και βραχώμαζα, αντίστοιχα. c) Μεταβολή του ρυθμού διαστολής και του λόγου της επιφάνειας διάτμησης με την ορθή τάση (Από Ladanyi and Archambault 1970)

Οι Ladanyi και Archambault ασχολούνται μόνο με μηχανισμούς ολίσθησης, επομένως περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω οι τρεις συνιστώσες ολίσθησης (S1 έως S3) και παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 2.24.

Ο ρυθμός διαστολής κατά την αστοχία, v είναι ίσος με τον λόγο αύξησης της διαστολής dy και της διατμητικής μετατόπισης dx . Ο λόγος dy / dx μπορεί ως εκ τούτου να

αντικαταστήσει το v σε κάθε μία από τις προηγούμενες εκφράσεις και οι συντελεστές S_1 , S_2 και S_3 να αντικατασταθούν από τις εξισώσεις Εξ. (2.36) ως εξής:



$$S_1 = N \frac{dy}{dx} = N \tan i$$

$$S_2 = S \tan i \tan \varphi_u$$

$$S_3 = N \tan \varphi_u$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

Σχήμα 2.24. Ladanyi και Archambault (1970)

$$S = N \frac{dy}{dx} + S \tan \varphi_u \frac{dy}{dx} + N \tan \varphi_u \quad (2.38)$$

Σημαντική υπόθεση στην ανάλυση του κριτηρίου/ Ladanyi και Archambault είναι ότι θεωρούνται οι προεξοχές άκαμπτες. Επίσης ο ρυθμός διαστολής, dy / dx , είναι ίσος με την εφαπτομένη της γωνίας προεξοχής, i . Επομένως η εξίσωση (2.38) μπορεί να αναδιαταχθεί και να μετατραπεί σε μονάδες τάσης για να δώσει:

$$\tau = \frac{\sigma_n (\tan i + \tan \varphi_u)}{(1 - \tan \varphi_u \tan i)} \quad (2.39)$$

που μπορεί να απλουστευθεί στην ακόλουθη έκφραση που προέκυψε από τους Ladanyi και Archambault:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_u + i) \quad (2.40)$$

Η εξίσωση (2.40) έχει ίδια μορφή με του Patton για την μέγιστη διατμητική αντοχή, i , σε επίπεδα ορθής τάσης μικρότερα από την πίεση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (Brittle-ductile transition, BDT).

Οι Ladanyi και Archambault προτείνουν ότι για ακανόνιστες επιφάνειες που παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωμετρία (και όχι επιφανειακές προεξοχές πρώτης τάξης όπως υποδηλώνεται από το απλό τριγωνικό μοντέλο) η γωνία προεξοχής i δεν μπορεί να προσδιοριστεί και ο ρυθμός διαστολής v θα πρέπει να αντικατασταθεί.

Επιπλέον, συνιστούν ότι το φ_u θα πρέπει να αντικατασταθεί ακριβέστερα από την εμπειρικά προσδιορισμένη στατιστική μέση τιμή της γωνίας τριβής, φ_f . Με βάση τις έρευνες

του Rowe (1962), οι Ladanyi και Archambault προσδιορίζουν για βραχώδεις επιφάνειες αρχικά με πολύ καλή εφαρμογή των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ότι το φ_f δεν θα ήταν πολύ διαφορετικό από φ_u . Ως εκ τούτου, στην απλούστερη και πιο βασική του μορφή, και αγνοώντας τη διατμητική συνιστώσα, οι Ladanyi και Archambault συνιστούν για την διατμητική αντίσταση των φυσικών ασυνεχειών με την αντίστοιχη σύνθετη γεωμετρία τους:

$$\tau = \frac{\sigma_n(v + \tan \varphi_u)}{1 - v \tan \varphi_u} \quad (2.41)$$

ή

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_u + v) \quad \text{όπου} \quad v = \tan^{-1}[v] \quad (2.42)$$

Στο έργο τους, δεν ελήφθη υπόψη η κλίμακα.

Ο Saeb (1990) τροποποίησε την έκδοση του κριτηρίου Ladanyi και Archambault. Αρχικά αναφέρει πως εφόσον δεν υπάρχει μετατόπιση των σωματιδίων πετρώματος, προτείνεται ότι το φ_u θα πρέπει να χρησιμοποιείται αντί φ_f . Επιπλέον, στον όρο S2 προτείνει ότι η συνολική δύναμη διάτμησης, S, θα πρέπει να αντικατασταθεί από τη συνολική δύναμη που απαιτείται για να ολισθαίνει πάνω από τις προεξοχές, S_f.

iii) Κριτήριο Barton

Ο Barton (1973) εξήγησε την έννοια της ολικής γωνίας τριβής της ασυνέχειας ως το άθροισμα της βασικής γωνίας τριβής (φ_b), της συνιστώσας διαστολής που σχετίζεται με τις γωνίες των προεξοχών (d_n) και της συνιστώσας διάτμησης που προκαλεί την καταστροφή των προεξοχών (s_n). Στην εξίσωση 2.43 και όπως προτείνεται από την εξ. 2.44, όπου ο όρος $d_n + s_n$ είναι μια συνάρτηση του συντελεστή τραχύτητας της ασυνέχειας (JRC), της θλιπτικής αντοχής της ασυνέχειας (JCS) και της ορθής τάσης.

Οι Barton και Choubey (1977) υποδεικνύουν ότι η παραμένουσα γωνία τριβής (φ_r) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του φ_b .

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + d_n + s_n) \quad (2.43)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log^{JCS} / \sigma_n + \varphi_b \right] \quad (2.44)$$

Όπου,

τ 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 ανεμπόδιση θλίψη των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (Joint wall Compression Strength).

Επειδή η εξίσωση (2.44) περιέχει παραμέτρους που είναι σχετικά εύκολο να κατανοηθούν και επιτρέπει μια αρχική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών στο πεδίο, έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς μηχανικούς μέχρι σήμερα. Ωστόσο, πολλοί ερευνητές προτιμούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια την επίδραση της τραχύτητας.

Οι Barton και Choubey (1977) βασιζόμενοι σε αποτελέσματα 130 δειγμάτων αποσαθρωμένων ασυνεχειών μετέτρεψαν την παραπάνω σχέση σε:

$$\tau = \sigma_n \varepsilon \varphi \left[\varphi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2.45)$$

Όπου,

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

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (2.46)$$

Όπου,

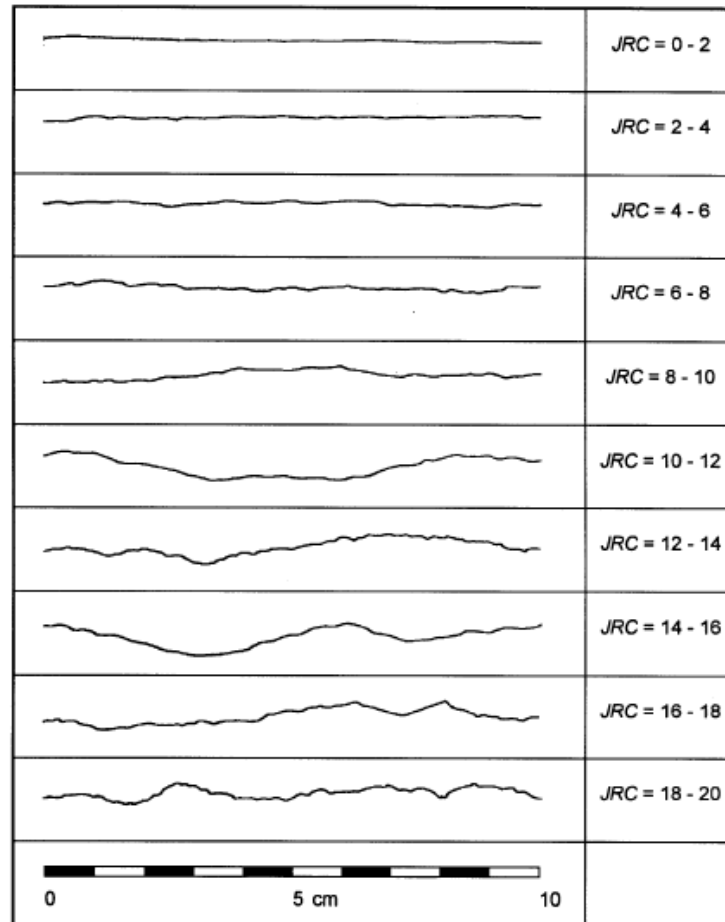
r η τιμή του κρουσίμετρου Schmidt σε αποσαθρωμένες και κορεσμένες με νερό επιφάνειες

R η τιμή του κρουσίμετρου Schmidt σε υγιείς και στεγνές επιφάνειες

Σύμφωνα με τον Barton (1976) σε υψηλά επίπεδα ενεργών ορθών τάσεων η αντοχή στην τριβή σχετίζεται με την αντοχή σε τριαξονική θλίψη η οποία αντιπροσωπεύεται από τη εκτροπική τάση ($\sigma_1 - \sigma_3$) κατά τη θραύση. Ο αδιάστατος λόγος $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_n$ (η οποία είναι

για μια ειδική περίπτωση, δηλ. $\sigma_3 = 0$) μεταβάλλεται σχετικά λίγο σε ένα ευρύ φάσμα σ_3 και οδηγεί σε περιορισμένη περιοχή τριβής σε υψηλά επίπεδα τάσης σε σύγκριση με το ευρύ φάσμα της αντοχής σε τριβή που παρουσιάζονται σε χαμηλά επίπεδα τάσεων.

Σε πολύ υψηλά επίπεδα τάσεων, η τάση διάτμησης που απαιτείται για την θραύση του άρρηκτου πετρώματος είναι μικρότερη από την αντοχή διάτμησης της επιφάνειας αστοχίας. Αυτή η σημαντική κατάσταση, που είναι γνωστή ως μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά, φαίνεται να εξαρτάται από τη βασική γωνία τριβής ϕ_b για το συγκεκριμένο πέτρωμα. Υψηλές τιμές όπως οι $35-40^\circ$ που είναι τυπικές για ασβεστόλιθους, έχουν ως αποτέλεσμα μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά σε σχετικά χαμηλά επίπεδα τάσεων, ενώ αντίθετα, χαμηλές τιμές γωνίας τριβής οδηγούν σε μετάβαση σε σχετικά υψηλά επίπεδα τάσεων.



Σχήμα 2.25. Τυπικά προφίλ και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC (Barton & Choubey, 1977).

Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας των ασυνεχειών JRC, όπως υπολογίζεται από το προφίλ της ασυνέχειας σε σχέση με τα τυπικά προφίλ (σχήμα 2.25), αναφέρεται στην κλίμακα των εργαστηριακών δειγμάτων πετρώματος. Όμως, για την επιτόπου εκτίμηση της διατμητικής αντοχής, απαιτείται να είναι γνωστός ο συντελεστής JRC στο μήκος της ασυνέχειας, που εν δυνάμει θα αστοχήσει.

Στην περίπτωση μικρής κλίμακας εργαστηριακών δειγμάτων τα προφίλ του παραπάνω σχήματος και οι αντίστοιχες τιμές του JRC έρχονται σε συμφωνία. Όμως, στο πεδίο το μήκος της ασυνέχειας ενδέχεται να έχει διαστάσεις μέτρων, έτσι η τιμή του JRC θα πρέπει να λαμβάνεται με βάση το σύνολο της επιφάνειας. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού της επίδρασης της κλίμακας στον συντελεστή JRC (Bandis *et al.*, 1981) έδειξαν ότι η τιμή του μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους, με τη μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στις περισσότερο τραχειές ασυνέχειες. Με βάση ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών σε ασυνέχειες, τεχνητές και φυσικές, οι Barton & Bandis (1982) πρότειναν την ακόλουθη σχέση για τη διόρθωση του συντελεστή JRC λόγω κλίμακας:

$$JRC_n = JRC_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.02JRC_o} \quad (2.47)$$

JRC_o είναι ο συντελεστής τραχύτητας που προσδιορίζεται σε δείγματα εργαστηριακής κλίμακας με μήκος L_o ,

ενώ ο JRC_n είναι ο συντελεστής τραχύτητας σε μήκος L_n .

Ομοίως, για τη μείωση της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας (JCS) με την αύξηση του μήκους της, οι Barton & Bandis (1982) προτείνουν τη σχέση:

$$JCS_n = JCS_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.03JCS_o} \quad (2.48)$$

Η σχέση του κριτηρίου Barton με τους διορθωμένους λόγω κλίμακας συντελεστές JCR_n και JCS_n (γνωστή ως κριτήριο Barton-Bandis) γράφεται ως:

$$\tau = \sigma_n \tan \left(JRC_n \log_{10} \frac{JCS_n}{\sigma_n} + \varphi_r \right) \quad (2.49)$$

Για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας JCS υπάρχουν προτεινόμενες μέθοδοι από την ISRM(1978). Η χρήση του κρουσίμετρου Schmidt για την εκτίμηση της αντοχής των τοιχωμάτων σε θλίψη προτάθηκε, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τους Deere & Miller (1966) στο σχήμα 2.17.

Για εφαρμογές που βασίζονται σε γραμμική περιβάλλουσα αντοχής, όπως το κριτήριο Mohr-Coulomb, ο Hoek (2007) εξήγαγε σχέσεις για την εκτίμηση της στιγμιαίας συνοχής c_i και γωνίας τριβής ϕ_i που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη τιμή της ορθής τάσης (ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb) του κριτηρίου Barton.

Η σύσταση να χρησιμοποιείται το μέσο μέγεθος των βραχοτεμαχών ως κλίμακα πεδίου προϋποθέτει ότι τα τεμάχια έχουν ελευθερία περιστροφής και έρχονται σε επαφή με την υποκείμενη επιφάνεια της ασυνέχειας.

Σύμφωνα με τον Johansson (2009), η υπόθεση αυτή δεν είναι δεδομένη για μια ασυνέχεια σε μικρό βάθος κάτω από ένα σκυρόδετο φράγμα. Τα τεμάχια σε κάποιο βαθμό αναμένεται να είναι κλειδωμένα από την υπερκείμενη κατασκευή, και η βραχόμαζα μεταξύ του φράγματος και της αβαθούς οριζόντιας ασυνέχειας συμπεριφέρεται ως άκαμπτο σώμα, που σημαίνει ότι η επιτόπια κλίμακα είναι ίση με τη διάσταση της υπερκείμενης κατασκευής. Όμως, οι προταθείσες εξισώσεις από τους Barton and Bandis (1982) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες κλίμακες, ειδικά για τις υψηλότερες τιμές του JRC_o .

Αξίζει επίσης να σχολιαστεί ότι ο Bandis (1980) χρησιμοποίησε έγχυτα φυσικά ομοιώματα ασυνεχειών για τις δοκιμές διάτμησης. Σε αυτά τα ομοιώματα, χρησιμοποίησε έναν συντελεστή γεωμετρικής κλίμακας για την αναγωγή σε μεγαλύτερες κλίμακες. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητες των υλικών των δοκιμών επιλέχτηκαν πιο αδύναμες για να αναχθούν από εργαστηριακή σε επιτόπια κλίμακα. Μια συνέπεια αυτής της μεθοδολογίας, η οποία επισημάνθηκε επίσης από τον Bandis (1980), είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστική τραχύτητα της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος της ασυνέχειας.

Προκειμένου να διερευνηθούν τα αποτελέσματα επίδρασης της κλίμακας των Bandis et al. (1981), οι Hencher κ.α. (1993) με βάση ένα πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών, που ακολούθησε την ίδια μέθοδο που περιγράφεται από τον Bandis κ.α. κατέληξαν στο συμπέρασμα, μεταξύ άλλων, ότι η βασική γωνία τριβής είχε μια εξαιρετικά μεγάλη διασπορά και ότι τα σαφή αποτελέσματα κλίμακας που παρατηρήθηκαν από τους Bandis et al. (1981) δεν επιβεβαιώθηκαν. Επιπλέον, δεν επιβεβαιώθηκε ότι η συνιστώσα απότμησης εξαρτάται από την κλίμακα. Στο σύνολό τους, κατέληξαν ότι "το υλικό μοντέλο που χρησιμοποιεί το Bandis και χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη έχει σοβαρούς περιορισμούς για την ακριβή και συνεπή προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς των περισσότερων πετρωμάτων".

iv) Κριτήριο Maksimovic

Ο Maksimovic (1992 και 1996) πρότεινε μια υπερβολική συνάρτηση για την περιγραφή της γωνίας διατμητικής αντίστασης ασυνεχειών βράχου.

Η μέγιστη διατμητική αντοχή εκφράζεται ως ακολούθως

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \frac{\Delta\varphi}{\left(1 + \frac{\sigma_n}{P_N}\right)} \right] \quad (2.50)$$

όπου φ_b είναι η βασική γωνία τριβής, $\Delta\varphi$ είναι η γωνία τραχύτητας της ασυνέχειας ή η γωνία μέγιστης διαστολής για μια άθικτη τραχειά επιφάνεια και P_N είναι η πίεση που αντιστοιχεί στη διάμεση τιμή της γωνίας που ισούται με την ορθή τάση στην οποία η συνεισφορά ισούται με το ήμισυ του $\Delta\varphi$. Σύμφωνα με τον Maksimovic (1996), το πλεονέκτημα έγκειται στο ότι το κριτήριο δίνει μια καλή προσέγγιση σε όλα τα επίπεδα ορθής τάσης.

v) Κριτήριο Kulatilake et al

Ο Kulatilake (1995) πρότεινε ένα νέο κριτήριο διατμητικής αντοχής για μη πληρωμένες ασυνέχειες με τη μορφή:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi + \alpha (SPR)^c \left[\log \frac{\sigma_j}{\sigma_n} \right]^d + I \right] \quad (2.51)$$

όπου το φ αντιπροσωπεύει τη βασική γωνία τριβής και το I τη μέση κλίση των επιφανειακών προεξοχών, σ_j είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του υλικού της επιφάνειας των ασυνεχειών. Τα α , c και d είναι εμπειρικές σταθερές, οι οποίες σύμφωνα με τους Kulatilake et al. (1995) θα πρέπει να προσδιορίζονται με ανάλυση παλινδρόμησης δεδομένων δοκιμών διάτμησης. Το SRP δηλώνει την παράμετρο σταθερής τραχύτητας που βασίζεται σε δύο παραμέτρους που προσδιορίζονται από κλαστική (fractal) ανάλυση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της τραχύτητας της επιφάνειας.

vi) Κριτήριο Grasselli & Egger

Με βάση εκτεταμένα πειραματικά αποτελέσματα, ο Grasselli (2001) πρότεινε ένα κριτήριο αστοχίας για καθαρές ασυνέχειες θεωρώντας την ανισοτροπία της διατμητικής αντοχής, το οποίο βασίζεται σε λεπτομερείς μετρήσεις της επιφανειακής τραχύτητας,

χρησιμοποιώντας ένα οπτικό σύστημα μέτρησης (Advanced Topometric System). Το αποτέλεσμα από τις μετρήσεις ήταν ένα νέφος σημείων το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοιωμένη επιφάνεια της ασυνέχειας με τριγωνική διακριτοποίηση, της οποίας μόνο τα τρίγωνα με όψη αντίθετα στην φορά της διάτμησης λήφθηκαν υπόψη για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διάτμηση. Με τον υπολογισμό του αθροίσματος των περιοχών αυτών των τριγώνων εκτιμάται ένα συνολικό δυνητικό ποσοστό επιφάνειας επαφής, που συμβολίζεται με A_c . Η συνεισφορά της προβολής κάθε τριγώνου περιγράφεται από μια παράμετρο που ονομάζεται φαινόμενη γωνία κλίσης θ^* .

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \left(\frac{\theta_{max}^*}{c} \right)^{1.18 \cos \alpha} \right] \times \left[1 + e^{-(\theta_{max}^*/9A_0C)(\sigma_n/\sigma_t)} \right] \quad (2.52)$$

Όπου,

- τ_p : η μέγιστη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας
- σ_n : η εφαρμοζόμενη ορθή τάση
- φ_b : η βασική γωνία τριβής της ασυνέχειας
- A_0 : η μέγιστη πιθανή περιοχή επαφής για την καθορισμένη κατεύθυνση διάτμησης
- θ_{max}^* : η μέγιστη γωνία κλίσης σε σχέση με την κατεύθυνση της διάτμησης
- C : παράμετρος τραχύτητας
- α : η γωνία μεταξύ του επιπέδου σχιστότητας και της ασυνέχειας. Σε περίπτωση που το πέτρωμα δεν έχει σχιστότητα το α ισούται με 0
- σ_t : η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος

vii) Κριτήριο Xia et al

Οι Xia et al (2014) λαμβάνοντας υπόψη την τρισδιάστατη αποτύπωση της τραχύτητας των ασυνεχειών αλλά και την παράμετρο της διαστολής του δοκιμίου κατά την διατμητική μετατόπιση εισήγαγαν ένα νέο κριτήριο μέσω δοκιμών άμεσης διάτμησης σε φυσικά ομοιώματα δοκιμίων.

$$d_{n,peak} = \frac{4A_0\theta_{max}^*}{C+1} \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{C+1 \sigma_t} \right) \right]_n \quad (2.53)$$

$$\tau_p = \sigma_n \tan[\varphi_b + d_{n,peak}] \quad (2.54)$$

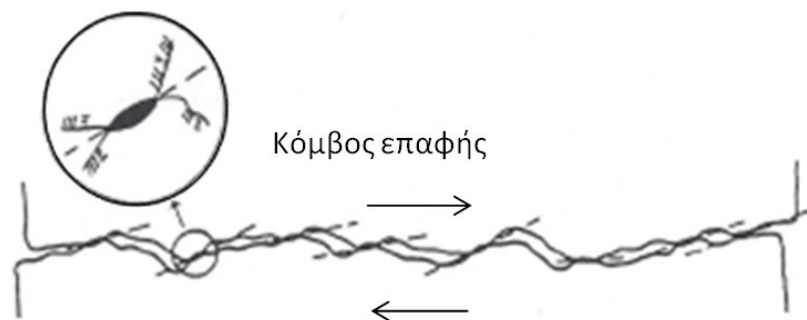
Όπου,

- τ_p : η μέγιστη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας
- σ_n : η εφαρμοζόμενη ορθή τάση
- φ_b : η βασική γωνία τριβής της ασυνέχειας
- $d_{n,peak}$: η μέγιστη γωνία διαστολής
- A_o : η μέγιστη πιθανή περιοχή επαφής για την καθορισμένη κατεύθυνση διάτμησης
- θ^*_{max} : η μέγιστη γωνία κλίσης σε σχέση με την κατεύθυνση της διάτμησης
- C : παράμετρος τραχύτητας
- α : η γωνία μεταξύ του επιπέδου σχιστότητας και της ασυνέχειας. Σε περίπτωση που το πέτρωμα δεν έχει σχιστότητα το α ισούται με 0
- σ_t : η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος

viii) Κριτήριο Papaliangas

Το κριτήριο Papaliangas βασίστηκε στο μηχανισμό διάτμησης ασυνεχειών μεταλλικών υλικών που έχει μελετηθεί από τους Bowden & Tabor (1950). Η παραπάνω μελέτη ερμηνεύει το ποσοστό επαφής και την πλαστική κατάσταση των κόμβων επαφής των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Το παραπάνω αποτέλεσμα γίνεται αντιληπτό εργαστηριακά μετά την μέγιστη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών καθώς προκύπτουν οι κόμβοι αυτοί. (Σχήμα 2.26).

Η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας χωρίζεται σε δυο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα αποτελεί την αντίσταση τριβής του συμπαγούς υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και εξαρτάται από το μέγεθος της ορθής τάσης. Η δεύτερη συνιστώσα προκύπτει λόγω της διαστολής που προκαλείται από την κλίση των κόμβων επαφής και η τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα.



Σχήμα 2.26. Επαφή δυο τραχειών βραχωδών επιφανειών (Papaliangas , 1997).

Το κριτήριο Papaliangas(1995) περιγράφεται με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_p = \sigma_n \varepsilon \varphi (\varphi_m + \psi) \quad (2.55)$$

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.

Σύμφωνα με τον Papaliangas (1995) η τιμή της γωνίας διαστολής ψ μεταβάλλεται λογαριθμικά με την ορθή τάση και δίνεται από τη σχέση

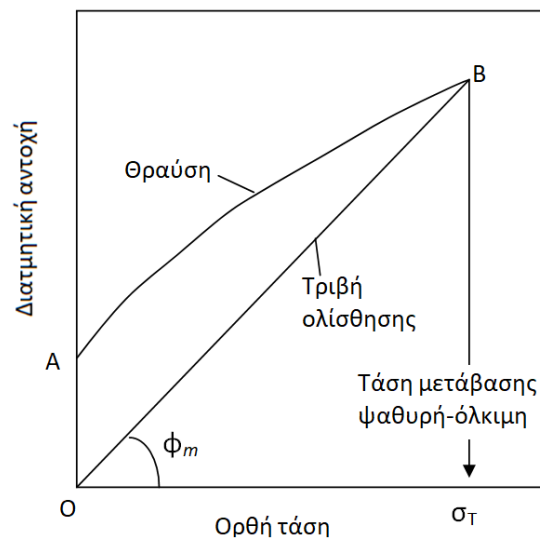
$$\varepsilon \varphi \psi = \varepsilon \varphi \psi_o \log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} / \log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_{no}} \quad (2.56)$$

Όπου,

ψ_o η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας και

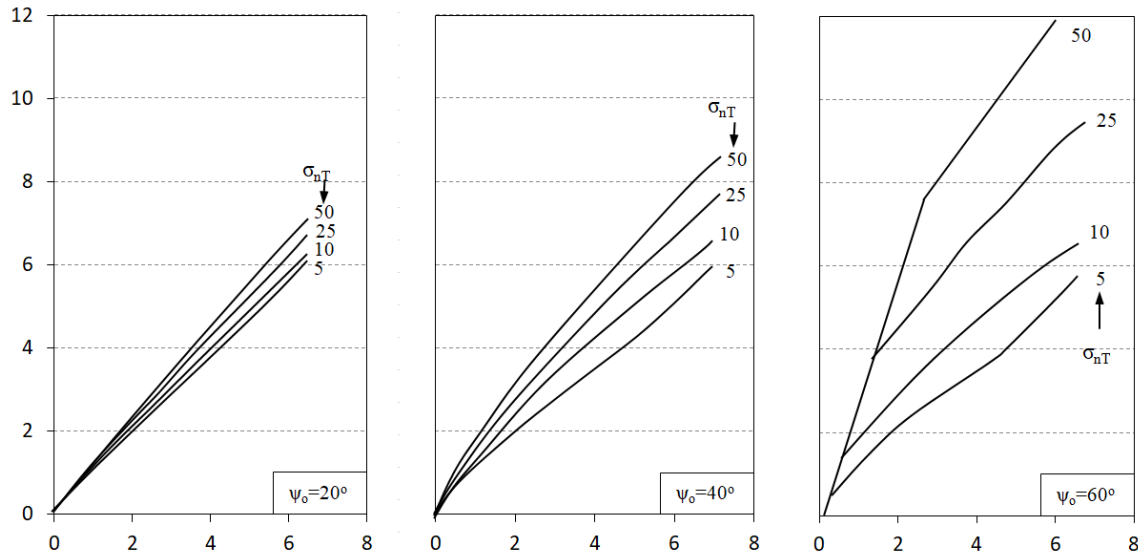
σ_{nT} η ορθή τάση η οποία εμποδίζει πλήρως την ασυνέχεια να διασταλεί.

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



Σχήμα 2.27. Προσδιορισμός της γωνία τριβής άρρηκτου πετρώματος από τριαξονικές δοκιμές θλίψης (Papaliangas , 1997).

Στο Σχήμα 2.28 παρουσιάζονται τρεις οικογένειες περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής. Η τιμή της γωνίας τριβής είναι ίση με 39° , ενώ για κάθε περιβάλλουσα καμπύλη τροποποιείται η αντίστοιχη γωνία ψ_0 . Επιπλέον, παρουσιάζεται και η διαφοροποίηση της παραμέτρου σ_{nT} . Ο ποσοτικός προσδιορισμός των τριών παραμέτρων φ_m , ψ_0 και σ_{nT} του κριτηρίου, γίνεται ως εξής:



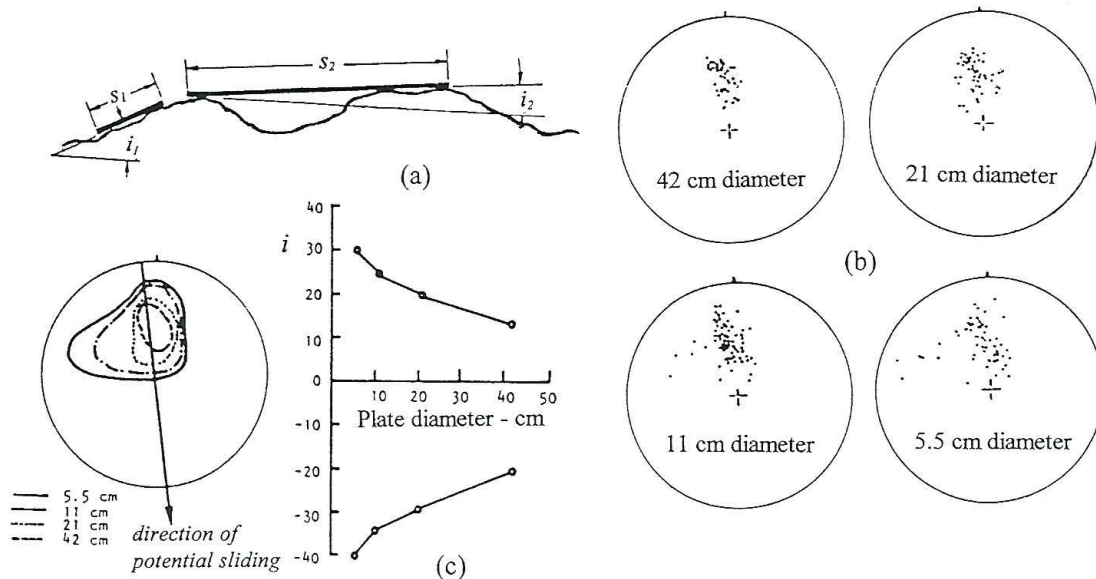
Σχήμα 2.28. Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas (Papaliangas, 1997).

- Η γωνία φ_m προσδιορίζεται με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι με δοκιμές τριαξονικής θλίψης (σχήμα 2.27) σε άρρηκτα δοκίμια με τιμή πλευρικής πίεσης ικανή να προσεγγίσει το όριο ψαθυρής-πλαστικής συμπεριφοράς (Papaliangas, 1997). Ο δεύτερος τρόπος είναι με δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πετρωμάτων. Στις δοκιμές αυτές θα πρέπει να αφαιρεθεί η διαστολή από τη μέγιστη διατμητική αντοχή.
- Η γωνία ψ_0 προσδιορίζεται άμεσα με την μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας. Επιπλέον, η γωνία αυτή ισούται με την γωνία διαστολής όταν ενεργοποιείται όλη η τραχύτητα κάτι που προσομοιάζεται εργαστηριακά με δοκιμές άμεσης διάτμησης υπό αμελητέα ορθή τάση (ίδιο βάρος δοκιμίου). Στο πεδίο, η γωνία αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με φωτογραμμετρικές ή προφίλομετρικές μεθόδους ή τη μέθοδο δίσκου-πυξίδας των Fecker & Rengers (1971), σχήμα 2.29.
- Τέλος η ορθή τάση σ_{nT} εκφράζει το όριο μετάβασης από διαστολική σε μη διαστολική διάτμηση και προσδιορίζεται με τη χρήση ενός ημιλογαριθμικού διαγράμματος διαστολής- ορθής τάσης ($\tan\psi - \log\sigma_n$). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για

κάθε δοκίμιο άμεσης διάτμησης ασυνεχιών αντιστοιχεί μια τιμή της γωνίας ψ_0 υπό την επίδραση μόνο του ίδιου βάρους. Είναι απαραίτητο η δοκιμή αυτή να πραγματοποιείται πριν από την κύρια δοκιμή. Είναι σημαντικό πως για τιμές της ορθής τάσης μεγαλύτερες της σ_{nT} η τραχύτητα δεν επηρεάζει την διατμητική αντοχή.

Συμπερασματικά η αξία των παραπάνω οφείλεται στο ότι χρησιμοποιείται μια απλή φυσικής παράμετρος της επιφάνειας της ασυνέχειας, που μπορεί να μετρηθεί εύκολα (μέγιστη κλίση των μικροεσοχών).

Για τα υγιή πετρώματα η τιμή της γωνίας τριβής ϕ_m προσδιοριζόμενη από τριαξονικές δοκιμές κυμαίνεται μεταξύ 32° και 42° . Οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε τύπους πετρωμάτων πυριτικής προέλευσης ενώ οι μεγαλύτερες σε πετρώματα ανθρακικής προέλευσης (Papaliangas, 1996). Εξάιρεση των παραπάνω είναι πιθανό να υπάρξουν σε περιπτώσεις πετρωμάτων με έντονη ανισοτροπία όπως οι σχιστόλιθοι, φυλλίτες ή όταν τα τοιχώματα της ασυνέχειας είναι αποσαθρωμένα.



Σχήμα 2.29. Μέτρηση τραχύτητας στο ύπαιθρο (κατά Fecker & Rengers, 1971)

Στον πίνακα 2.15 γίνεται αναφορά στις τιμές της βασικής γωνίας τριβής ϕ_b σε ξηρή και υγρή κατάσταση για διάφορους τύπους πετρωμάτων.

Πίνακας 2.15. Πίνακας : Τιμές βασικής γωνίας τριβής ϕ_b , για διάφορους τύπους πετρωμάτων (Από Alejano *et al*, 2012 και Grasselli & Egger, 2003)

Πέτρωμα	Βασική γωνία τριβής, ϕ_b (°)		Αναφορά
	Ξηρή Κατάσταση	Υγρή Κατάσταση	
Ιζηματογενή			
Ασβεστόλιθος	31-37	27-35	Coulson (1972)
Ασβεστόλιθος	36-37		Grasselli and Egger (2003)*
Ιλυόλιθος		31	Ripley and Lee (1962)
Ιλυόλιθος	31-33	27-31	Coulson (1972)
Κρητίδα		30	Hutchinson (1972)
Κροκαλοπαγές	35		Krsmanovic (1967)
Σχίστης		27	Ripley and Lee (1962)
Ψαμμίτης	26-35	25-33	Patton (1966)
Ψαμμίτης		29	Ripley and Lee (1962)
Ψαμμίτης	31-33		Krsmanovic (1967)
Ψαμμίτης	32-34	31-34	Coulson (1972)
Ψαμμίτης		33	Richards (1975)
Ψαμμίτης	37		Grasselli and Egger (2003)*
Πυριγενή			
Βασάλτης	35-38	31-36	Coulson (1972)
Γρανίτης (χονδρόκοκκος)	31-35	31-33	Coulson (1972)
Γρανίτης (λεπτόκοκκος)	31-35	29-31	Coulson (1972)
Γρανίτης	34		Grasselli and Egger (2003)*
Δολερίτης	36	32	Richards (1975)
Πορφύρης	31	31	Barton (1971)
Μεταμορφωσιγενή			
Αμφιβολίτης	32		Wallace et al. (1970)
Γνεύσιος	26-29	23-26	Coulson (1972)
Γνεύσιος	36		Grasselli and Egger (2003)*
Μάρμαρο	37		Grasselli and Egger (2003)*
Σερπεντινίτης	39		Grasselli and Egger (2003)*
Σχιστόλιθος	25-30		Barton (1971)
Σχιστόλιθος	30	21	Richards (1975)

* Προσδιορισμός από δοκιμές ανακυκλιζόμενες άμεσης διάτμησης σε επίπεδες επιφάνειες διαμορφωμένες με κοπή.

2.4.6. Επιφάνειες επαφής μεταξύ δύο σωμάτων

Βασικές αρχές μηχανικής της τριβής

Η αντίσταση ολίσθησης μεταξύ δύο σωμάτων επαφής στις διεπιφάνειές τους είναι ένα θέμα το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Στη συνέχεια γίνεται μία ανασκόπηση βασισμένη στους Lambe και Whitman (1969) και στη βιβλιογραφική μελέτη του Papaliangas (1996).

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός υλικού σε τριβή χρησιμοποιούνται δύο βασικοί νόμοι. Αυτοί οι νόμοι αναφέρθηκαν για πρώτη φορά από το Leonardo da Vinci στη δεκαετία του 1400. Ήταν σε μεγάλο βαθμό ξεχασμένοι, μέχρι να ανακαλυφθούν εκ νέου από το γάλλο μηχανικό Amontton (1699).

- Η αντίσταση τριβής μεταξύ δύο σωμάτων είναι ανάλογη της ορθής δύναμης μεταξύ των σωμάτων.
- Η αντίσταση τριβής μεταξύ δύο σωμάτων είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις των δύο σωμάτων.

Η γενικά αποδεκτή θεωρία για τη διαδικασία τριβής ονομάζεται θεωρία πρόσφυσης (adhesion theory) και δηλώθηκε για πρώτη φορά από τον Terzaghi (1925). Οι Bowden και Tabor (1950 και 1964) έδειξαν ότι μπορούσε να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά της τριβής για ένα ευρύ φάσμα υλικών.

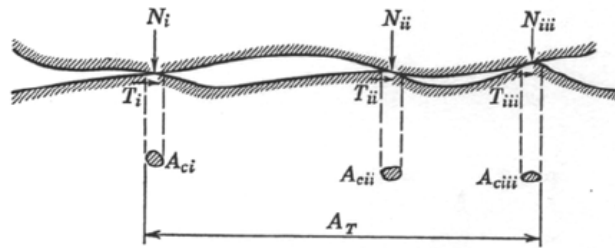
Η θεωρία πρόσφυσης της τριβής ολίσθησης αναφέρει ότι, όλες οι επιφάνειες, ακόμα και οι λείες, είναι σε μικροσκοπικό επίπεδο τραχειές. Τα σημεία επαφής αναπτύσσονται όταν οι προεξοχές των δύο επιφανειών αγγίζουν η μία την άλλη. Η πραγματική περιοχή επαφής θα είναι μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής ονομαστικής επιφάνειας επαφής των δύο επιφανειών. Κατά συνέπεια, οι ορθές τάσεις σε αυτά τα σημεία επαφής μπορεί να είναι τόσο υψηλές ώστε να επιτυγχάνεται η «συγκόλληση» και πλαστική συμπεριφορά του πετρώματος στην περιοχή των προεξοχών. Η πραγματική περιοχή επαφής, A_c , μπορεί να οριστεί ως:

$$A_c = \frac{N}{q_u} \quad (2.58)$$

όπου N είναι το η ορθή δύναμη και q_u είναι η τάση που απαιτείται για την επίτευξη πλαστικής ροής στα σημεία επαφής. Δεδομένου ότι το q_u είναι σταθερό, η πραγματική περιοχή επαφής θα αυξηθεί ανάλογα με την ορθή τάση. Σ' αυτά τα σημεία επαφής, οι δύο αντίθετες επιφάνειες θα "συγκολληθούν" μεταξύ τους, δημιουργώντας κόμβους πρόσφυσης. Η αντοχή σε διάτμηση, T , παρέχεται από την αντοχή των κόμβων, s_i , και ως εκ τούτου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T = \sum s_i \cdot A_{c,i} = s \cdot A_c \quad (2.59)$$

όπου $A_{c,i}$ είναι η επιφάνεια επαφής για το σημείο επαφής i , (Σχήμα 2.30)



Σχήμα 2.30. Μικροσκοπική όψη δύο επιφανειών σε επαφή (Lambe and Whitman 1969)

Ο συνδυασμός των εξισώσεων 2.58 και 2.59 οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$T = N \frac{s}{q_u} \quad (2.60)$$

Ο Λόγος s/q_u είναι γνωστός ως συντελεστής τριβής, μ , ή από μια γεωμετρική ερμηνεία της σχέσης μεταξύ της ορθής και της διατμητικής δύναμης, ως εφαπτομένη της γωνίας τριβής, φ .

$$\frac{s}{q_u} = \mu = \tan \varphi \quad (2.61)$$

Όταν τα s και q_u είναι σταθερά, η διατμητική δύναμη θα είναι ανάλογη μόνο με την ορθή τάση.

Όταν η τάση στα σημεία επαφής είναι μικρότερη από την τάση διαρροής q_u , οι προεξοχές σ' αυτά θα παραμορφωθούν ελαστικά. Ο Archard (1957 και 1974) έδειξε ότι για μια επιφάνεια με προεξοχές που ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή, το A_c αυξάνεται ανάλογα με το $N^{2/3}$. Από την άλλη πλευρά, για μια επιφάνεια με προεξοχές διαφορετικών μεγεθών που ακολουθούν κατανομή Gauss το A_c αυξάνεται ανάλογα με το $N^{44/45}$.

Επομένως, τόσο στις πλαστικές όσο και στις σύνθετες περιπτώσεις ελαστικής παραμόρφωσης των προεξοχών σε επαφή, η πραγματική περιοχή επαφής θα είναι ανάλογη προς την ορθή δύναμη (Paraliangas 1996).

Η θεωρία της πρόσφυσης αναπτύχθηκε από παρατηρήσεις κυρίως κατεργασμένων μεταλλικών επιφανειών των οποίων η τραχύτητα είναι σταθερή και κανονική σε σύγκριση με τις τραχείες επιφάνειες των ασυνεχειών πετρωμάτων. Ωστόσο, το μοντέλο των Greenwood και Tripp (1971) έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των διαφόρων βραχωδών ασυνεχειών, όπως για παράδειγμα από τους Swan (1983) και Swan και Zongqi (1985).

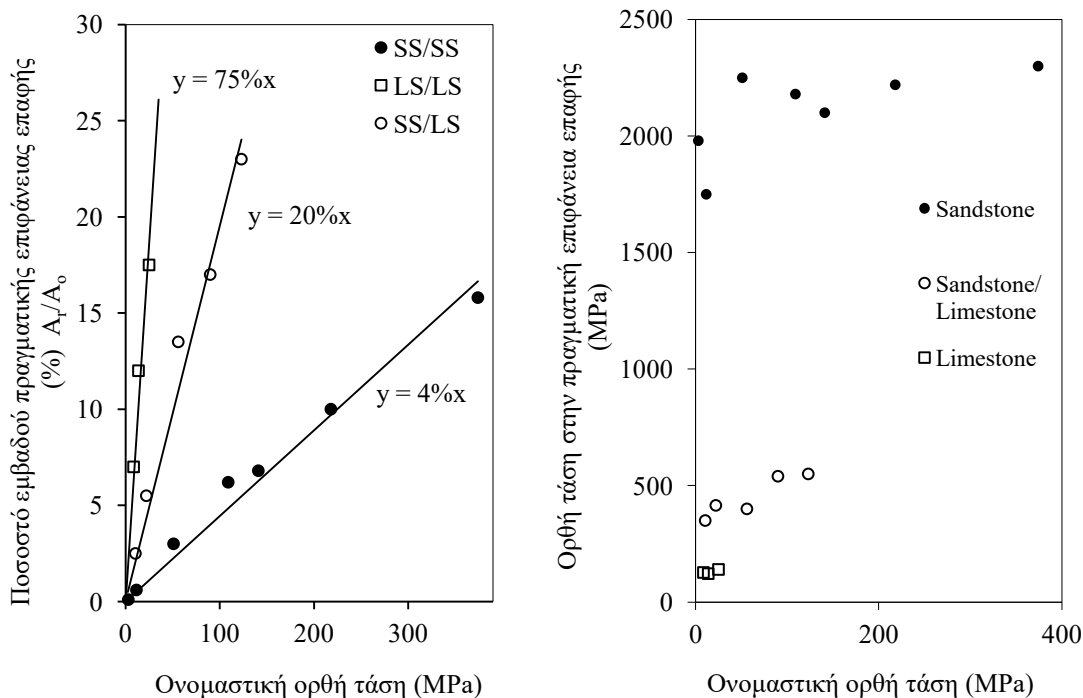
Εάν η τάση επαφής είναι επαρκώς υψηλή ώστε να προκαλέσει πλαστική ροή των προεξοχών ασυνεχειών πετρωμάτων που υπόκεινται σε διάτμηση, η αναλογία μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας την μετρούμενη επιφάνεια επαφής των εξεταζόμενων επιφανειών του δοκιμίου με την εφαρμοζόμενη ορθή τάση.

Οι Brown & Scholz (1985) υπολόγισαν την πραγματική επιφάνεια επαφής που βρέθηκε μικρότερη από το 1% της ονομαστικής επιφάνειας του δείγματος σε ορθή τάση άνω των 50 MPa.

Οι Logan και Teufel (1986) μέτρησαν τις περιοχές επαφής σε διαφορετικές ορθές τάσεις κατά τη διάρκεια της διάτμησης για επιφάνειες ψαμμίτη και ασβεστόλιθου (σχήμα 2.31). Οι υπολογισθείσες ορθές τάσεις στα σημεία επαφής ήταν περίπου 125 MPa για ασβεστόλιθο και 2200 MPa για τον ψαμμίτη. Αυτές οι τιμές είναι κοντά στην μονοαξονική αντοχή σε θλίψη για τον ασβεστίτη και τον χαλαζία, και τα δύο ορυκτά αποτελούν μέρος του ασβεστόλιθου και του ψαμμίτη αντίστοιχα. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η περιοχή επαφής αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της ορθής τάσης και ότι η τάση επαφής είναι περίπου σταθερή, η οποία ευθυγραμμίζεται με τη θεωρία πρόσφυσης.

Το ποσοστιαίο εμβαδό της επιφάνειας επαφής A_r/A_0 σε ονομαστική ορθή τάση 10 MPa ήταν της τάξης 1-7%, και χαμηλότερο σε χαμηλότερες ορθές τάσεις.

Παρόμοιες δοκιμές διεξήχθησαν επίσης και από τους Stesky and Hannan (1987) οι οποίοι μέτρησαν της περιοχές επαφής για διάφορες ορθές τάσεις για μάρμαρο, αλάβαστρο και χαλαζίτη.



Σχήμα 2.31. Σχέση μεταξύ (α) ποσοστιαίας επιφάνειας πραγματικής επαφής (β) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής και ασκούμενης ορθής τάσης κατά την ολίσθηση τριβής σε τρεις περιπτώσεις: SS/SS, ψαμμίτης /ψαμμίτης, LS/LS, ασβεστόλιθος/ασβεστόλιθος, SS/LS, ψαμμίτης/ασβεστόλιθος (Logan and Teufel, 1986)

Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι οι επιφανειακές προεξοχές στο μάρμαρο και στο αλάβαστρο αποδυναμώθηκαν με κατακλαστική ροή, γεγονός που οδήγησε στην αύξηση των περιοχών επαφής με την πίεση. Ακόμη και ο χαλαζίτης υφίσταται κάποια κατακλαστική παραμόρφωση και σημαντική αύξηση της επιφάνειας επαφής με την τάση. Το γεγονός ότι η αύξηση της επιφάνειας επαφής έγινε μη γραμμική σε ορθές τάσεις γύρω στο 1-2% της σκληρότητας διείδυσης για μάρμαρο και αλάβαστρο δεν είναι σημαντική, σύμφωνα με τους συγγραφείς, λόγω της αβεβαιότητας στις τιμές σκληρότητας και της καταλληλότητας της σκληρότητας ως μέτρου της σχετικής αντοχής των προεξοχών.

Εν κατακλείδι, η πειραματική τεκμηρίωση δείχνει πλαστική ροή να συμβαίνει στις επιφάνειες επαφής των προεξοχών, και αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη δεσμών πρόσφυσης στα σημεία επαφής, όπως προτάθηκε από τον Terzaghi (1925). Επομένως φαίνεται πιθανό ότι η επιφάνεια επαφής μπορεί να προσεγγιστεί από το λόγο της ασκούμενης τάσης προς την τάση διαρροής του υλικού.

Οι Johnson et al. (1971) και Fuller and Tabor (1975), οι οποίοι διερεύνησαν την πρόσφυση σημεία επαφής, ότι η πρόσφυση μειώνεται με την αυξανόμενη μικροσκοπική τραχύτητα. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν πρέπει να καθοριστεί η βασική γωνία τριβής. Οι Barton και Choubey (1977) υποδεικνύουν ότι η βασική γωνία τριβής πρέπει να προσδιοριστεί με τη διάτμηση δύο επιφανειών διαμορφωμένων με κοπή.

Είναι πιθανό ότι η κοπή με δισκοπρίονο δημιουργεί μακροσκοπικά επίπεδες επιφάνειες και με τον τρόπο αυτό αλλάζει τη βασική γωνία τριβής. Δοκιμές που εκτελέστηκαν από τους Hencher και Richards (1989) και Hencher et al. (1993) έδειξαν πρακτικές δυσκολίες στον προσδιορισμό της βασικής γωνίας τριβής. Τα αποτελέσματά τους παρουσίαζαν μεγάλη διακύμανση μεταξύ 12° και 32°. Οι παράγοντες που επηρεάζουν εκτιμήθηκε ότι είναι η τραχύτητα των επιφανειών, οι ιδιότητες του υλικού του δίσκου, σκόνη από το πέτρωμα, και άλλα υλικά που συγκεντρώθηκαν στην επιφάνεια.

Με βάση τα προηγούμενα, **προκύπτουν οι ακόλουθες αρχές** σχετικά με τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της τριβής:

- i) Η επιφάνεια επαφής είναι ανάλογη με την ορθή δύναμη.
- ii) Η πραγματική περιοχή επαφής μπορεί να προσεγγιστεί ως το πηλίκο της δύναμης που επενεργεί στην επιφάνεια προς την τάση διαρροής του υλικού.
- iii) Η βασική γωνία τριβής προέρχεται, με βάση της θεωρία της πρόσφυσης, από τη
- iv) διάτμηση μιας μικροσκοπικά τραχειάς αλλά μακροσκοπικά λείας επιφάνειας.

Από τα ανωτέρω γίνεται σαφές ότι η περιγραφή της διατμητικής αντίστασης κατά μήκος των ασυνεχειών πετρωμάτων, απαιτεί τη χρήση παραμέτρων με φυσική σημασία που λαμβάνουν υπόψη τον υποκείμενο μηχανισμό διάτμησης. Έχει καταστεί σαφές από τα προηγούμενα, ότι βασικό στοιχείο της διάτμησης ασυνεχειών είναι ότι η επαφή μεταξύ των δυο τεμαχών πραγματοποιείται σε περιορισμένο αριθμό περιοχών και συνακόλουθα η πραγματική αναπτυσσόμενη ορθή τάση στις περιοχές αυτές είναι πολλαπλάσια της ονομαστικής ορθής τάσης. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστεί ποσοτικά η τιμή της πραγματικής αυτής τάσης για πέντε διαφορετικά πετρώματα και να συσχετισθεί με την αντίστοιχη πίεση μετάβασης της συμπεριφοράς από ψαθυρή σε όγκιμη.

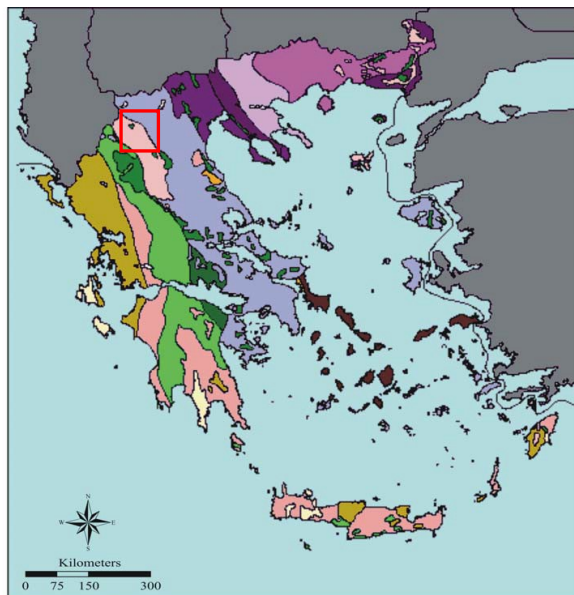


Κεφάλαιο 3

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. Γεωλογία περιοχής μελέτης

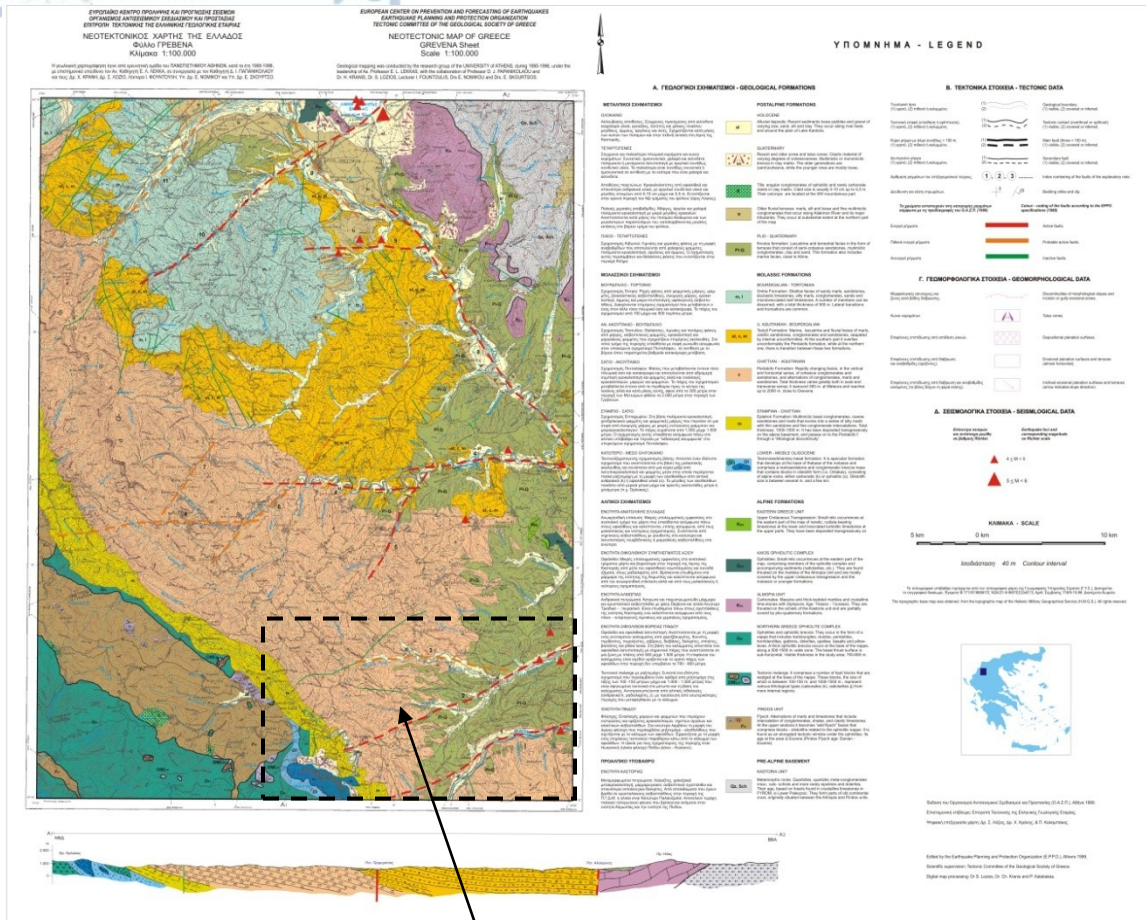
Περιοχή της έρευνας αποτελεί η λεκάνη των Γρεβενών. Σύμφωνα με τη γεωλογική διαίρεση του ελληνικού χώρου σε Γεωτεκτονικές Ζώνες (Μουντράκης, 1985), η περιοχή μελέτης ανήκει στην Υποπελαγονική Ζώνη (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 1985). 1: Μάζα της Ροδόπης, 2: Σερβομακεδονική Μάζα, 3: Περιοδοπική Ζώνη, 4: Ζώνη Αξιού, 5: Πελαγονική Ζώνη, 6: Υποπελαγονική Ζώνη, 7:Αττικοκυκλαδική Μάζα, 8: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, 9: Ζώνη Πίνδου, 10: Ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως, 11: Ιόνιος Ζώνη, 12: Ζώνη Παξών

3. Γεωλογία περιοχής - Μεθοδολογία - Πειραματική διαδικασία

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ο Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, το Φύλλο Γρεβενά καθώς και λεπτομέρεια με τις θέσεις των δειγμάτων.



Σχήμα 3.2. Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, Φύλλο Γρεβενά (επάνω), και λεπτομέρεια με τις θέσεις των δειγμάτων (κάτω) (Ο.Α.Σ.Π. Αθήνα 1999)

Τα πετρώματα της Υποπελαγονικής Ζώνης αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο, έχουν Μεσοζωική ηλικία και καλύπτονται από ιζήματα που ανήκουν στην Μεσοελληνική Αύλακα. Τα ιζήματα αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια Ολιγόκαινου - Μειόκαινου και είναι μολασσικού τύπου. Δεν εμφανίζονται πτυχωμένα. Τα ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας καλύπτονται από Πλείο - Πλειστοκαινικές ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις, αλλά και από πρόσφατες Τεταρτογενείς χερσαίες αποθέσεις μικρού πάχους.

Αναλυτικά όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή από το νεώτερο προς τον παλαιότερο, είναι σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη οι παρακάτω:

Τεταρτογενές:

Αποτελούνται από :

- αλλουβιακές αποθέσεις,
- παλιά και σύγχρονα πλευρικά κορήματα,
- αποθέσεις σε παλιές χερσαίες αναβαθμίδες.

Πλειόκαινο - Πλειστόκαινο:

Περιλαμβάνει:

- ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις σε αναβαθμίδες οι οποίες αποτελούνται από χαλαρά κροκαλοπαγή,
- κυανούς - υποπράσινους αργίλους,
- άμμους και χαλαρούς ψαμμίτες , κόκκινους αργίλους.

Πετρώματα της Μεσοελληνικής Αύλακας

Μειόκαινο:

Σχηματισμοί Τσοτυλίου. Οι ιζηματογενείς σειρά αποτελείται από:

- Κροκαλοπαγή,
- Ψαμμίτες,
- Μάργες και
- Ασβεστόλιθους

Σχηματισμοί Πενταλόφου (1ος Κύκλος). Αποτελείται από :

- Κροκαλοπαγή,
- Ψαμμίτες και
- ενδιάμεσες Μάργες.

Σχηματισμοί Πενταλόφου (2ος Κύκλος). Αποτελείται από :

- Κροκαλοπαγή

- τεφροκύανες συνεκτικές Μάργες σε εναλλαγές με λεπτόκοκκους μαργαϊκούς Ψαμμίτες

Ολιγόκαινο:

Σχηματισμοί Επταχωρίου (Στρώματα Βάσεως): Περιλαμβάνουν:

- κροκαλοπαγή και ποικιλόχρωμες
- Μάργες
- Ψαμμίτες

Σχηματισμοί Επταχωρίου (Μάργες Επταχωρίου). Περιλαμβάνουν

- εναλλαγές Μαργών Ψαμμιτών
- Ασβεστόλιθους
- Μάργες

Σχηματισμοί Υποβάθρου της

Υποπελαγονικής Ζώνης

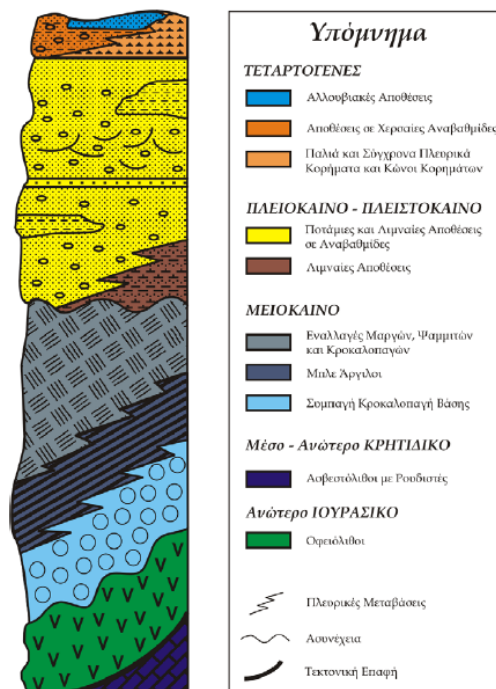
Μέσο - Ανώτερο Κρητιδικό:

Ασβεστόλιθοι με Ρουδιστές και
Λατυποπαγείς Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι.

Ανώτερο Ιουρασικό:

Σύμπλεγμα Οφειολίθων.

Όλοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αποτελούν τη δομή περιοχής παρουσιάζονται συνοπτικά στη στρωματογραφική στήλη της λεκάνης των Γρεβενών (Μουντράκης και συνεργάτες, 1996), στο Σχήμα 3.3.

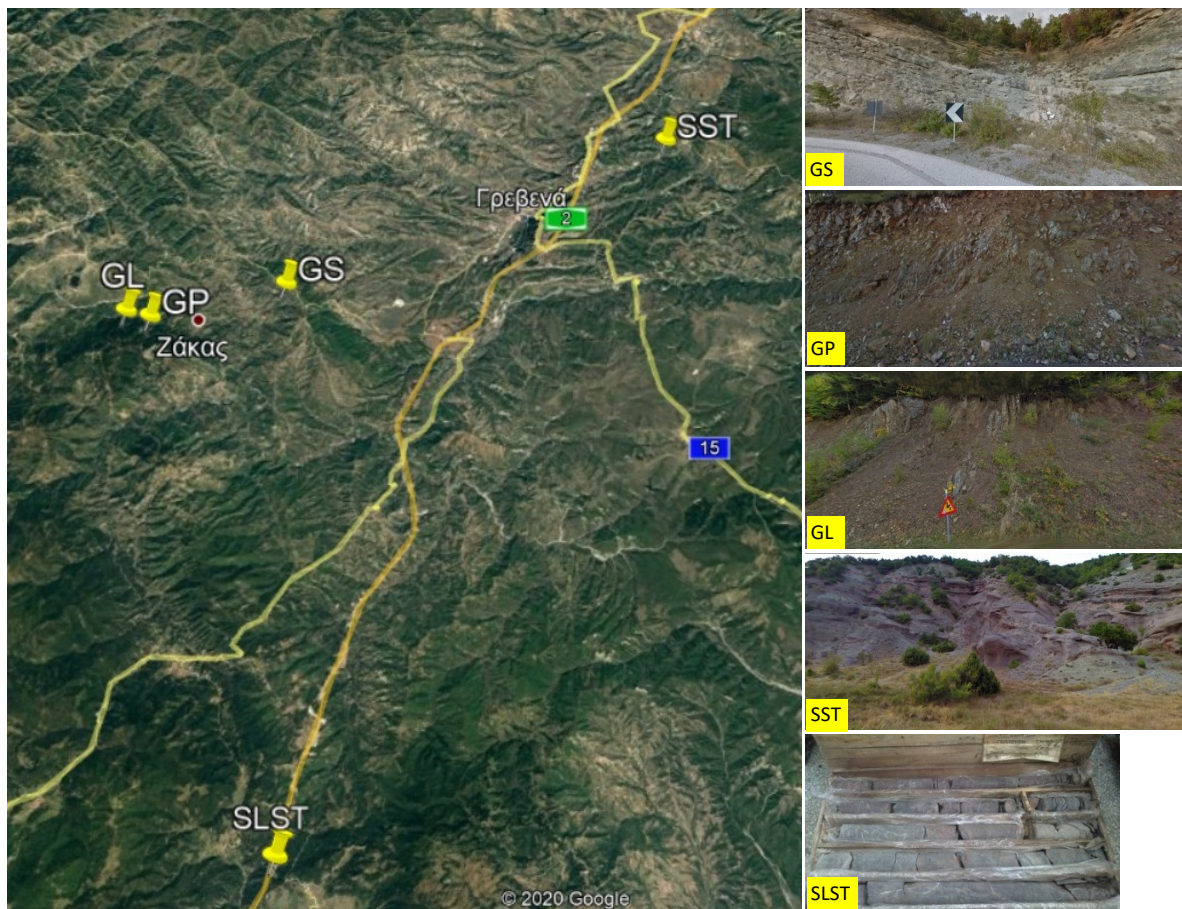


Σχήμα 3.3. Συνοπτική στρωματογραφική στήλη της ευρύτερης λεκάνης των Γρεβενών (Μουντράκης και συνεργάτες, 1996).

3.2. Μεθοδολογία λήψης δειγμάτων

Όλα τα δείγματα προήλθαν από επιτόπου επίσκεψή στο ύπαιθρο εκτός από τα δείγματα του λεπτόκοκκου ψαμμίτη τα οποία προήλθαν από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις της Εγνατίας οδού.

Στην εικόνα δίνονται ο χάρτης με τις θέσεις των δειγμάτων και φωτογραφία της κάθε θέσης



Εικόνα 3.1. Χάρτης με τις θέσεις των δειγμάτων και φωτογραφία της κάθε θέσης

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. 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 αποκολλήθηκαν από τη βραχώμαζα 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.

3.3. Ορυκτολογική εξέταση

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης, της υφής και του ιστού των πετρωμάτων έγινε με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-ray diffraction-XRD) και λεπτές τομές, σε αντιπροσωπευτικά δείγματα των πετρωμάτων που εξετάστηκαν. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στα Εργαστήρια του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ.

i) Μικροσκοπική μελέτη

Από τα εξεταζόμενα δείγματα κατασκευάστηκαν λεπτές τομές για τη λεπτομερή εξέτασή τους στο πολωτικό μικροσκόπιο. Από την μικροσκοπική μελέτη προσδιορίστηκε ο ιστός, η ορυκτολογική σύσταση, οι αλλοιώσεις και τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

ii) Περιθλασιμετρία ακτίνων-X

Αντιπροσωπευτική ποσότητα από κάθε δείγμα κονιοποιήθηκε σε αχάτινο γουδί μέχρι να ομογενοποιηθεί. Κονιοποίηση με το χέρι προτιμήθηκε από τη χρήση μηχανικών κονιοποιητών, για την αποφυγή φαινομένων διαστροφής ή και καταστροφής του πλέγματος ευαίσθητων ορυκτών, όπως π.χ. των αργλικών ορυκτών και του ασβεστίτη.

Η μελέτη της ορυκτολογικής σύστασης των εξεταζόμενων δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X. Χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο τύπου PHILIPSPW1820/00, εξοπλισμένο με μικροεπεξεργαστή PW1710/00, λυχνία Cu και φίλτρο Ni για τη λήψη CuK α ακτινοβολίας, ενώ η περιοχή σάρωσης γωνίας 2 θ ήταν 3-63° και η ταχύτητα σάρωσης 1,2°/min (Εικόνα 3.2). Πριν την ακτινογράφιση των δειγμάτων έγινε έλεγχος της ευαισθησίας και της ακρίβειας του περιθλασίμετρου με ειδικό πρότυπο καθαρού πυριτίου. Ο τρόπος προετοιμασίας των τυχαία προσανατολισμένων παρασκευασμάτων, οι δειγματολήπτες και οι συνθήκες σάρωσης όλων των δειγμάτων ήταν ακριβώς οι ίδιες. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων έγινε με

βάση τις απαριθμήσεις συγκεκριμένων ανακλάσεων, που δεν επηρεάζονται από καμία άλλη ανάκλαση και λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το συντελεστή απορρόφησης μάζας αυτών των ορυκτολογικών φάσεων. Διορθώσεις των ποσοστών των ορυκτών που αναγνωρίστηκαν έγιναν με χρήση εξωτερικών πρότυπων μιγμάτων των περισσότερων ορυκτών που συμμετέχουν στα εξεταζόμενα δείγματα. Σύμφωνα με τους Καντηράνης κ.ά. (2004) και Kantiranis et al. (2006) το όριο ανίχνευσης της μεθόδου είναι $\pm 1\%$ κ.β.

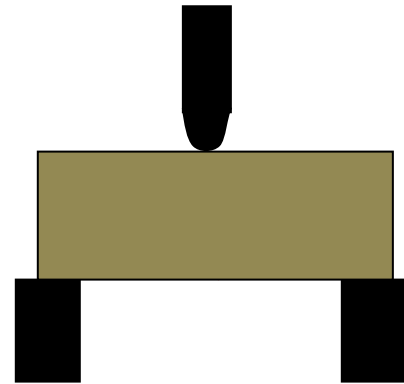


Εικόνα 3.2. Περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

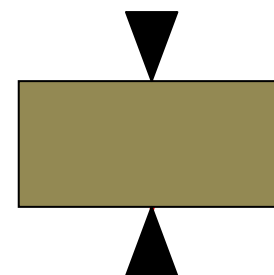
3.4. Διαμόρφωση βραχωδών δοκιμίων

Η διαμόρφωση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος (πρώην Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης) όπως και η εκτέλεση όλων των εργαστηριακών δοκιμών με εργαστηριακό εξοπλισμό που περιγράφεται στη συνέχεια.

Οι τεχνητές ασυνέχειες δημιουργήθηκαν με δυο τρόπους. Ο πρώτος με την αστοχία του πετρώματος σε κάμψη (Εικόνα 3.3), και ο δεύτερος με εφελκυστική διάρρηξη κατά πλάτος του δοκιμίου (Εικόνα 3.4). Η μεθοδολογία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ασυνεχειών με τραχειές επιφάνειες. Ουσιαστικά πρόκειται για το ανώτερο όριο της τραχύτητας που ενδέχεται να υπάρξει στο πεδίο. Για λόγους σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκε και μικρός αριθμός δοκιμίων από προϋπάρχουσες φυσικές ασυνέχειες.



Εικόνα 3.3. Εφελκυστική αστοχία λόγω κάμψης.



Εικόνα 3.4. Εφελκυστική διάρρηξη

Η διαμόρφωση των κυλινδρικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση αδαμαντοτροχών και αδαμαντοτρύπανου με κοπτικό άκρο που περιέχει στα τοιχώματα του διαμάντια (Εικόνα 3.5). Κατά την διάτρηση διέρχεται νερό ώστε να πραγματοποιείται η διαφυγή των θραυσμάτων του πετρώματος καθώς και η ταυτόχρονη ψύξη του κοπτικού άκρου.



Εικόνα 3.5. Κοπή και διαμόρφωση δειγμάτων με την χρήση αδαμαντοτροχού (αριστερά) και πυρηνοληψία πετρωμάτων (δεξιά).



Εικόνα 3.6. Κοπή των δυο άκρων του πυρήνα με τη χρήση αδαμαντοτροχού για τη διαμόρφωση κυλινδρικού σχήματος.

Μετά το πέρας της διάτρησης προκύπτουν κυλινδρικά δοκίμια (Εικόνα 3.8) που στην συνέχεια λειάνονται στις δυο έδρες τους με την χρήση συσκευής λείανσης (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7. Συσκευή λείανσης δοκιμίων.



Εικόνα 3.8. Σύνολο διαμορφωμένων κυλινδρικών δοκιμίων GP.

3.5. Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

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.

Προετοιμασία δοκιμής

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.

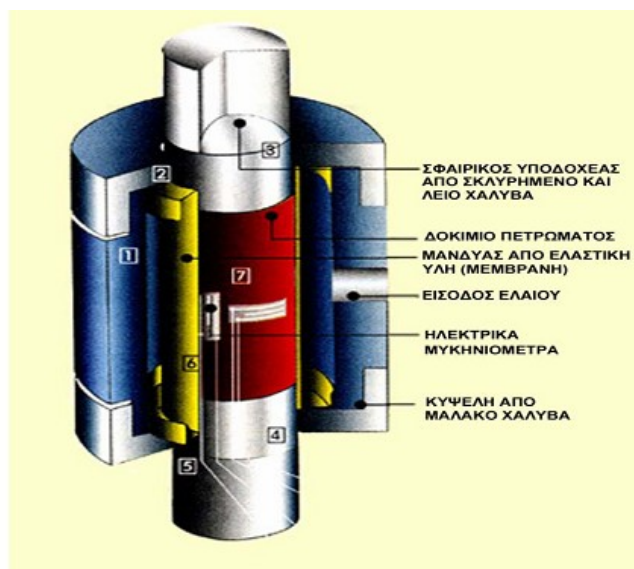
Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές με τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, επομένως οι συνθήκες αυτές της

δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο έντυπο αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας $105 \pm 5^\circ\text{C}$ για 24 ώρες.

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

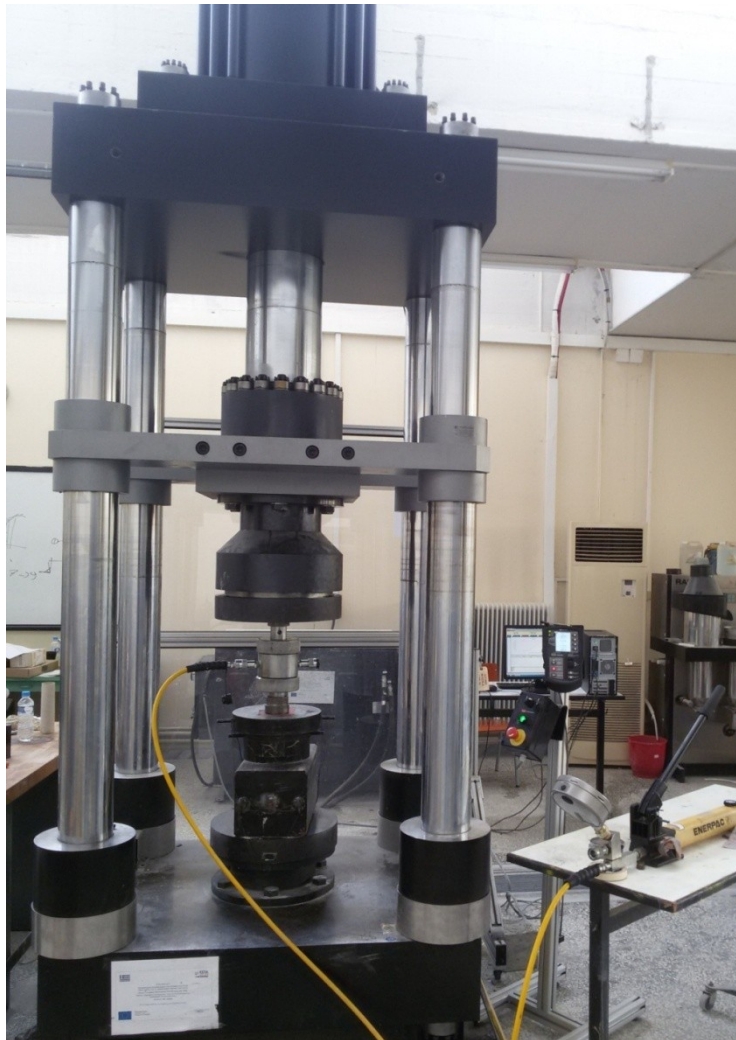
Εκτέλεση δοκιμής

Αρχικά τοποθετείται το δοκίμιο στο τριαξονικό κελί Hoek (Hoek cell), σχήμα 3.4. 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 μικρότερη από HRC 58. Μια ακόμη προδιαγραφή που θα πρέπει να έχει το τριαξονικό κελί είναι να διαθέτει ένα κύλινδρο υψηλής πίεσεως, 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 3.4. 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 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% (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9. Διάταξη τριαξονικής θλίψης.

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/s. Επίσης η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε για λόγους σύγκρισης με άλλα βιβλιογραφικά δεδομένα ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης ($\Delta H/H_0$) 10^{-4} έως 10^{-5} ανά δευτερόλεπτο.

Η τιμή της πλευρικής πίεσεως και του αξονικού φορτίου θραύσεως καθώς και του παραμένον φορτίου αναγράφονται στο δελτίο της δοκιμής.

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:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

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 mm².

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:

$$\sigma_r = \frac{P_r}{A} \quad (3.2)$$

Όπου,

σ_r παραμένουσα αντοχή σε τριαξονική θλίψη του δοκιμίου σε MPa.

P_r παραμένον αξονικό φορτίο σε kN .

A εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε mm².

Επίσης μετρείται και η γωνία του επιπέδου αστοχίας με τον άξονα του δοκιμίου.

3.6. Δοκιμή άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής του πετρώματος όπως βρίσκεται επί τόπου και μάλιστα κατά την προκαθορισμένη επιφάνεια της ασυνέχειας

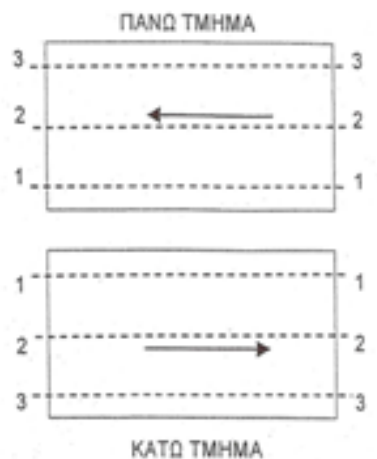
Προετοιμασία δοκιμίου

Πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή διάτμησης το δοκίμιο εγκιβωτίζεται σε ειδικά καλούπια (Εικόνα 3.10) 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 (εικόνα 3.10 αριστερά) και το δεύτερο για τον εγκιβωτισμό του άνω τμήματος της ασυνέχειας (εικόνα 3.10 δεξιά).



Εικόνα 3.10. Εγκιβωτισμός δοκιμίου.

Μετά την πήξη της γύψου τα δύο μέρη της ασυνέχειας διαχωρίζονται και στο δοκίμιο χαράσσονται 3 γραμμές όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11. Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας.

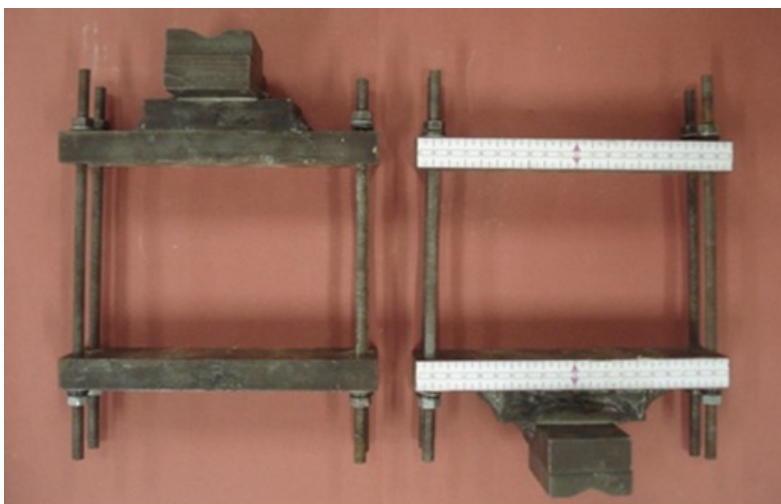
Η επόμενη ενέργεια αφορά την αποτύπωση της τραχύτητας της ασυνέχειας πάνω στις τρεις γραμμές που έχουν αποτυπωθεί με την βοήθεια ενός προφιλόμετρου (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12. Προφιλόμετρο.

Η αποτύπωση της τραχύτητας πραγματοποιείται πριν και μετά από κάθε στάδιο της δοκιμής 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 3.13).



Εικόνα 3.13. 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

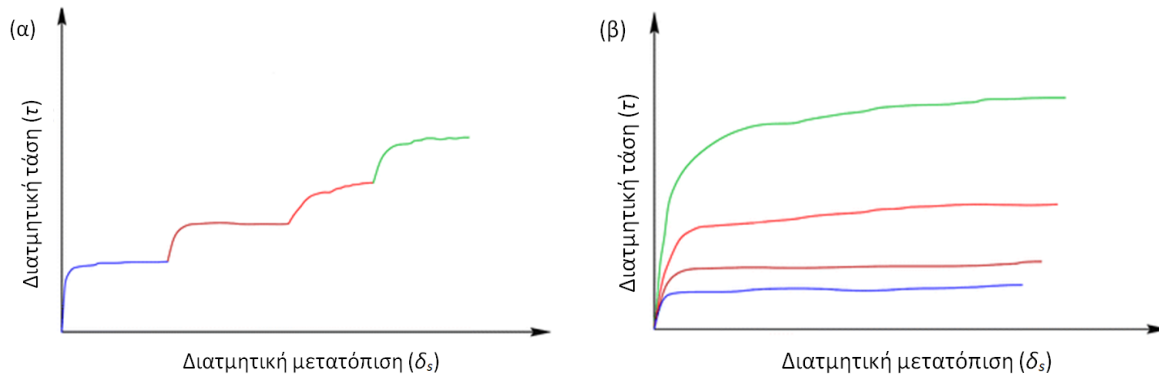
Υπάρχουν δύο μέθοδοι εκτέλεσης της δοκιμής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

A) Μέθοδος απλού σταδίου

B) Μέθοδος πολλαπλών σταδίων

Η μέθοδος της δοκιμής πολλαπλών σταδίων συνίσταται σε επαναλαμβανόμενες δοκιμές υπό διαφορετικές ορθές τάσεις στο ίδιο δοκίμιο. Υπάρχουν δυο παραλλαγές της μεθόδου: η πρώτη πραγματοποιείται χωρίς επανατοποθέτηση της ασυνέχειας στην αρχική της φυσική κατάσταση για κάθε στάδιο διάτμησης (Σχήμα 3.5α), ενώ η δεύτερη με επανατοποθέτηση

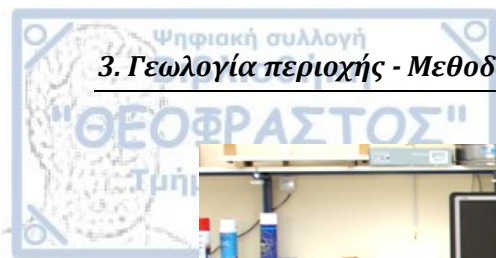
της ασυνέχειας στην αρχική της φυσική κατάσταση για κάθε στάδιο διάτμησης (Σχήμα 3.5β). (Muralha *et al*, 2014). Όλες οι δοκιμές που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, έγιναν σύμφωνα με τη δεύτερη παραλλαγή της μεθόδου.



Σχήμα 3.5. Μέθοδος δοκιμής διάτμησης πολλαπλών σταδίων σε επαναλαμβανόμενες δοκιμές υπό διαφορετικές ορθές τάσεις στο ίδιο δοκίμιο (α) χωρίς επανατοποθέτηση, (β) με επανατοποθέτηση της ασυνέχειας στην αρχική της φυσική κατάσταση για κάθε στάδιο διάτμησης

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση δοκιμής πολλαπλών σταδίων, η φαινόμενη συνοχή μπορεί να παρουσιαστεί αυξημένη λόγω της αυξημένης φθοράς με τις διαδοχικές διατμήσεις της ίδιας επιφάνειας (Muralha *et al*, 2014).

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 ηλεκτρικού μηκυσιομέτρου. Επίσης, υπάρχει ένα οριζόντιο μηκυσιόμετρο 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 ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα, συμμετρικά στα δυο άκρα της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου. Οι τιμές συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο μέσω επεξεργαστή (MPX 3000), και παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή (με το λογισμικό WINHOST).



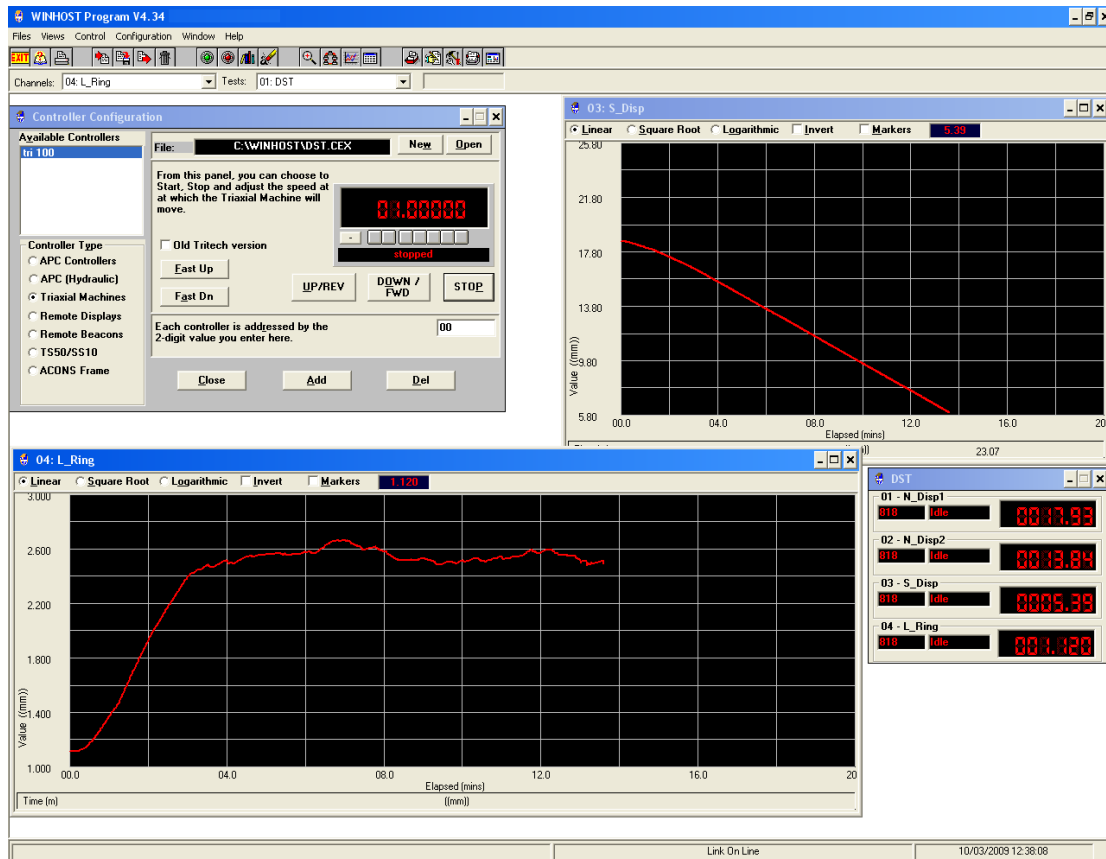
Εικόνα 3.14. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχειών βράχου.

Αρχικά τίθενται σε λειτουργία το πλαίσιο 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 3.14). 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 μηκυσιόμετρα 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 μηκυσιόμετρα, ώστε σε κάθε δοκιμή τα μηκυσιόμετρα να τοποθετούνται στην ίδια θέση.

Η ορθή τάση επιβάλλεται μέσω υδραυλικού κυλίνδρου και αντλίας σταθερής πίεσης (3,5 MPa –CONTROLS ή 70 MPa - ELE), ενώ για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας, για ορθές τάσεις μέχρι 100 kPa επιβάλλεται με προσθήκη βαρών.

Για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών πετρωμάτων η ψηφιοποίηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας την εφαρμογή WINHOST V 4.34 (Εικόνα 3.15) της Datalogic. Είναι μία εφαρμογή σε λειτουργικό περιβάλλον

WINDOWS. Οι τιμές ψηφιοποιούνται μέσω του επεξεργαστή MPX 3000 το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, που τις παρουσιάζει με την μορφή διαγραμμάτων. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η παρακολούθηση και ο έλεγχος της πορείας της δοκιμής.



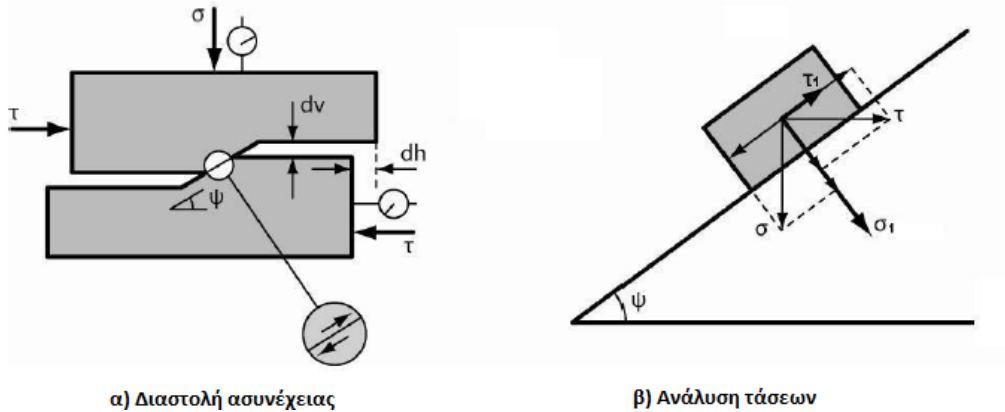
Εικόνα 3.15. Περιβάλλον WINHOST κατά την διάρκεια μιας δοκιμής άμεσης διάτμησης.

Η συχνότητα καταγραφής είναι ρυθμιζόμενη, και έχει καθοριστεί για όλες τις δοκιμές ανά 5 δευτερόλεπτα.

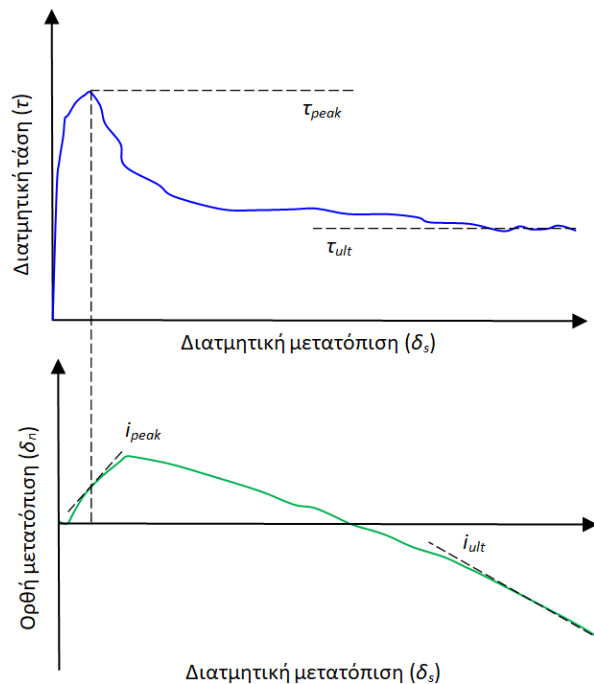
Υπολογισμοί

Για την εφαρμογή του κριτηρίου Paraliangas 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_0 και η τιμή της τάσης σ_{nT} για την οποία η διάτμηση καθίσταται μη διαστολική, δηλαδή η διαστολή μηδενίζεται. Αρχικά τα δοκίμια υποβάλλονται σε άμεση διάτμηση μόνο με την επίδραση του ίδιου τους βάρους, από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της μέγιστης γωνίας

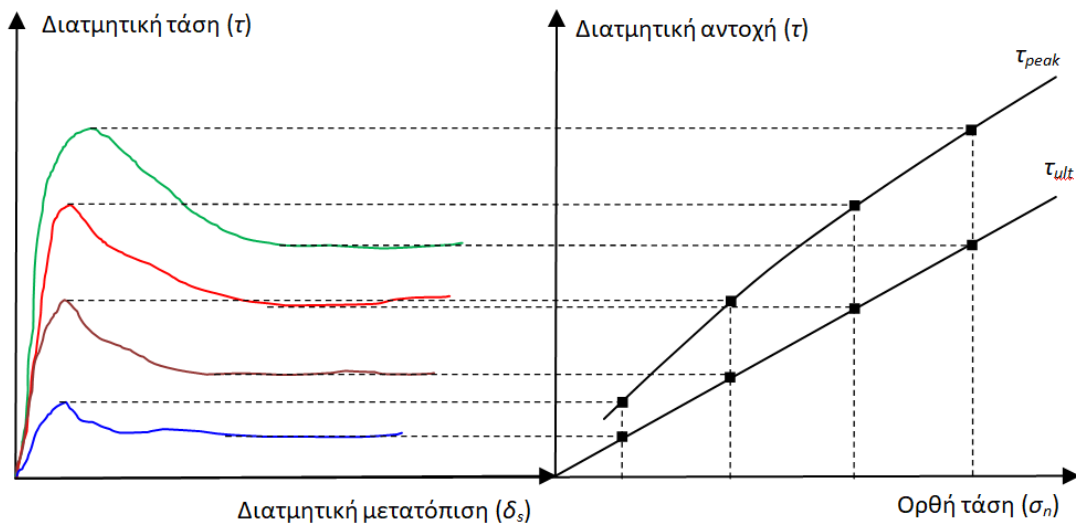
διαστολής που είναι πρακτικά ίση με την γωνία κλίσης ψ_0 . Στο επόμενο στάδιο τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές άμεσης διάτμησης σε προκαθορισμένο εύρος ορθών τάσεων. Στις δοκιμές αυτές καταγράφονται η διατμητική και ορθή μετατόπιση καθώς και η διατμητική δύναμη (σχήμα 3.7). Με βάση τους Hencher & Richards (1989) η διατμητική κίνηση εξομοιώνεται με την κίνηση κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης ίση με τη στιγμιαία γωνία διαστολής (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6. Ανάγωγή ορθής και διατμητικής τάσης σε κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 3.7. Διαγράμματα διατμητικής μετατόπισης - διατμητικής τάσης και διατμητικής μετατόπισης - ορθής μετατόπισης. Υπολογίζεται η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή καθώς και η αντίστοιχη διαστολή.



Σχήμα 3.8. Εκτίμηση μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

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

$$\sigma_1 = (\sigma \cos \psi + \tau \sin \psi) \cos \psi \quad (3.3)$$

$$\tau_1 = (\tau \cos \psi - \sigma \sin \psi) \cos \psi \quad (3.4)$$

Όπου

ψ είναι η στιγμιαία γωνία διαστολής

τ είναι η τιμή της διατμητικής αντοχής που μετρήθηκε

σ είναι η ορθή τάση

τ_1 η διατμητική τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής

σ_1 η ορθή τάση κατά μήκος κεκλιμένου 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 (σχήμα 3.8) 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 ($\log \sigma$ - $\tan \psi$), 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.

3.7. Μεθοδολογία επεξεργασίας επιφανειών επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

Μεθοδολογία επεξεργασίας εικόνων από φωτογράφιση των επιφανειών (τοιχωμάτων ασυνέχειας) των δοκιμίων της δοκιμής άμεσης διάτμησης. Η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας ImageJ [Rasband, 2018].

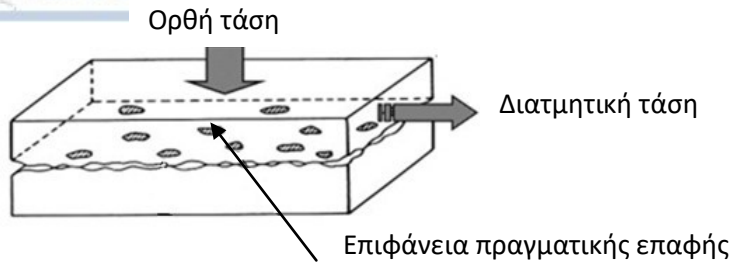
Τα δύο τοιχώματα των ασυνεχειών ενός δείγματος φωτογραφίζονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες, ίδια απόσταση κάμερας από το δείγμα σε παρόμοιες συνθήκες φυσικού φωτισμού με την τοποθέτηση κλίμακας για τον υπολογισμό των διαστάσεων του δείγματος και την προσαρμογή ανάλογης κλίμακας στο ImageJ.

Οι δύο φωτογραφίες (2 επιφάνειες τοιχωμάτων ασυνέχειας) τοποθετήθηκαν επάλληλα σε τέτοια θέση ώστε να αντιστοιχούν στην αρχική θέση του πάνω και κάτω τεμάχους του δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής. Το συνολικό εμβαδό αυτών των κοινών περιοχών αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της επιφάνειας επαφής των δυο τμημάτων της ασυνέχειας. Στα δύο επίπεδα της ασυνέχειας διακρίνονται τα σημεία που έρχονται σε επαφή καθ' όλη τη διάρκεια της διάτμησης λόγω της φθοράς και της αλλαγής του χρώματος (άσπρη επιφάνεια) σχήμα 3.10α.

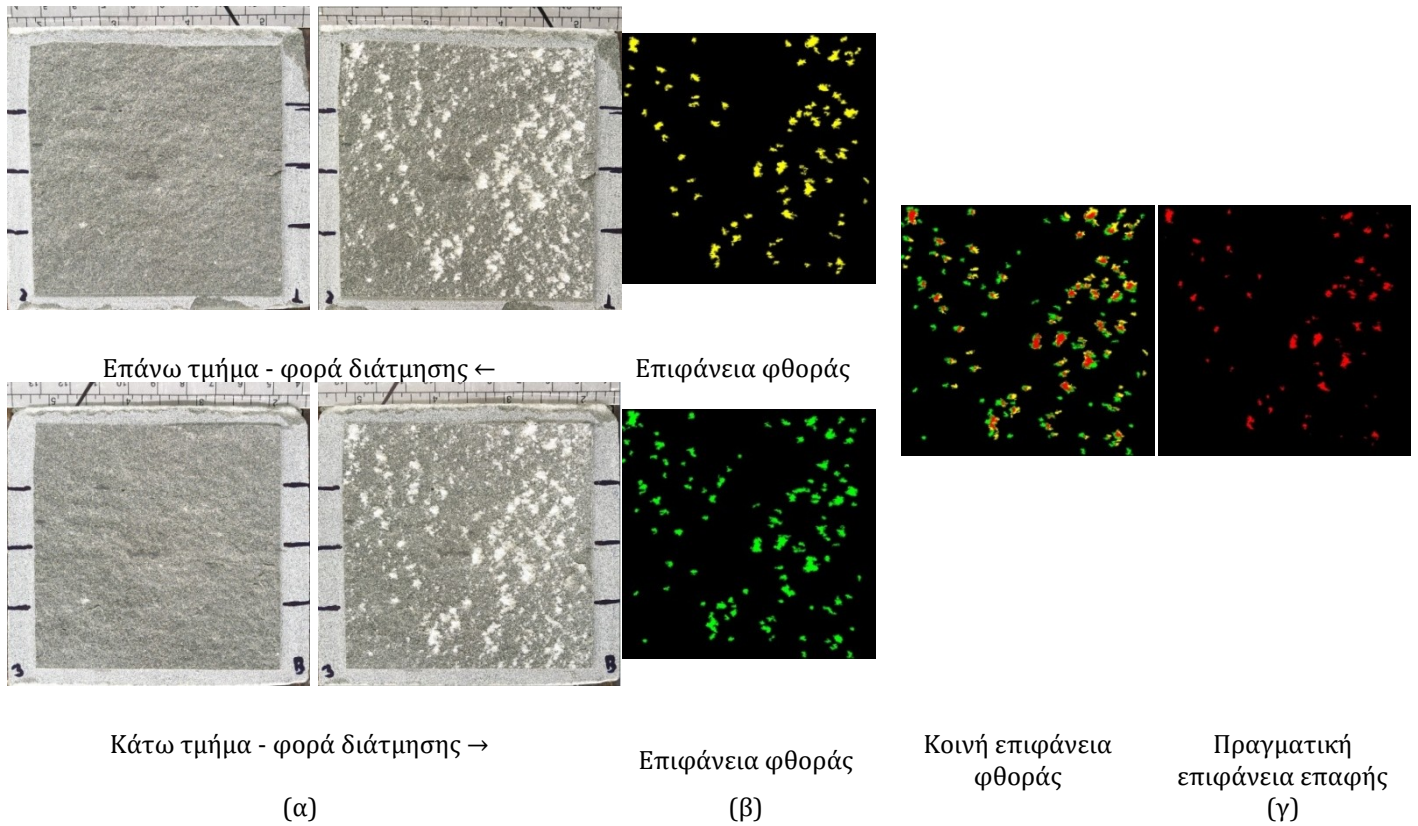
Το εμβαδόν της επιφάνειας φθοράς υπολογίζεται για κάθε τμήμα (με πράσινο χρώμα για το κάτω στέλεχος και κίτρινο για το επάνω) σχήμα 3.10β. Στη συνέχεια η μία φωτογραφία μετακινήθηκε κατά τη διεύθυνση διάτμησης σε σχέση με την άλλη κατά απόσταση ίση με τη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή και σημειώθηκαν οι κοινές περιοχές των επιφανειών φθοράς (κόκκινο χρώμα) και προσεγγίζεται το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας επαφής σχήμα 3.10γ.

Η τάση στην επιφάνεια της πραγματικής επαφής (σ_r) υπολογίζεται ως ο λόγος της ασκούμενης ορθής δύναμης (N) προς το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής (A_r) (σχήμα 3.9):

$$\sigma_r = \frac{N}{A_r} \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.9. Σκαρίφημα δείγματος υπολογισμού επιφανειών πραγματικής επαφής



Σχήμα 3.10. Βήματα υπολογισμού επιφανειών πραγματικής επαφής



3. Γεωλογία περιοχής - Μεθοδολογία - Πειραματική διαδικασία

Κεφάλαιο 4

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1. Αποτελέσματα μικροσκοπικής και ορυκτολογικής μελέτης

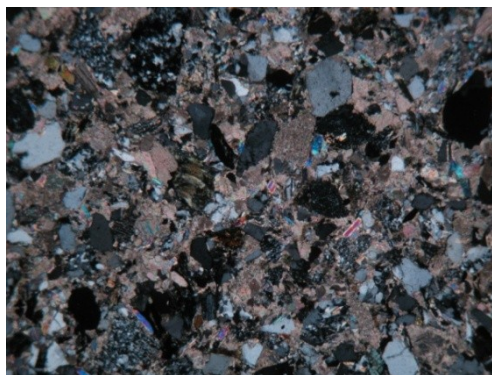
i) Δείγμα τεφρού ψαμμίτη (GS)

α) Μικροσκοπική παρατήρηση

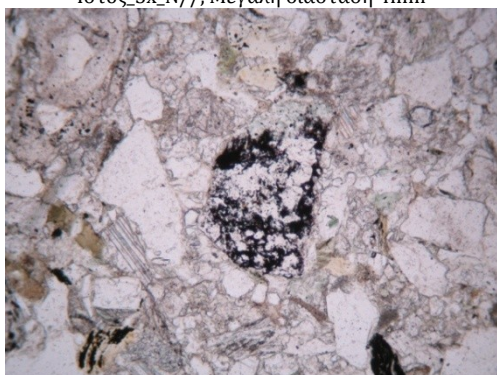
Στην Εικόνα 4.1.1 δίνονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του δείγματος GS όπως προέκυψαν από την εξέταση της λεπτής τομής του στο πολωτικό μικροσκόπιο.



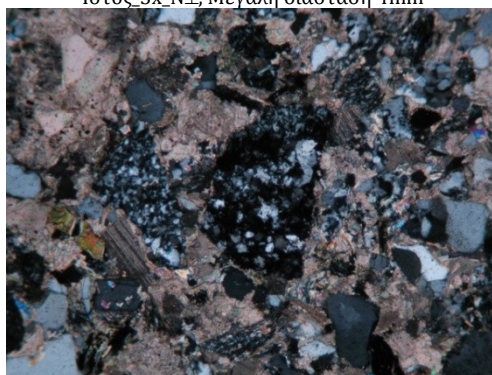
Ιστός_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Ιστός_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



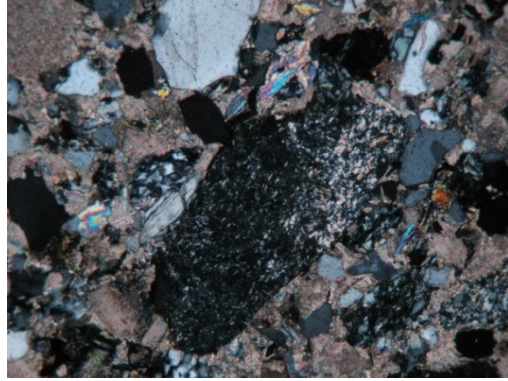
Θραύσματα Χαλαζία_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Θραύσματα Χαλαζία_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



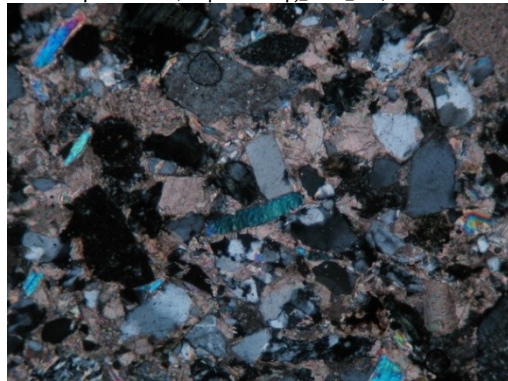
Πλαγιόκλαστα, Σερπεντίνης_10x_N//, Μδ 2mm



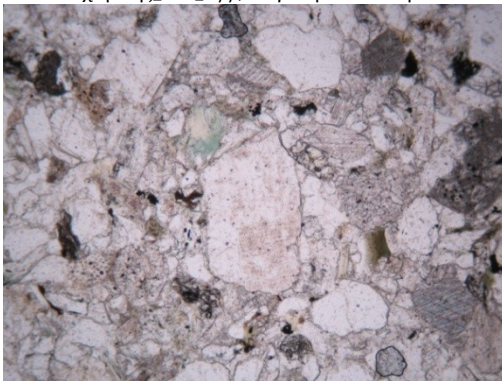
Πλαγιόκλαστα, Σερπεντίνης_10x_N⊥, Μδ 2mm



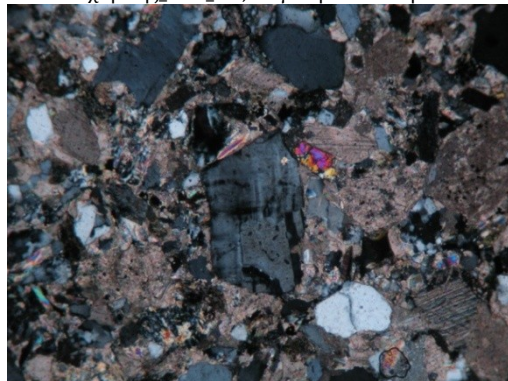
Μοσχοβίτης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Μοσχοβίτης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



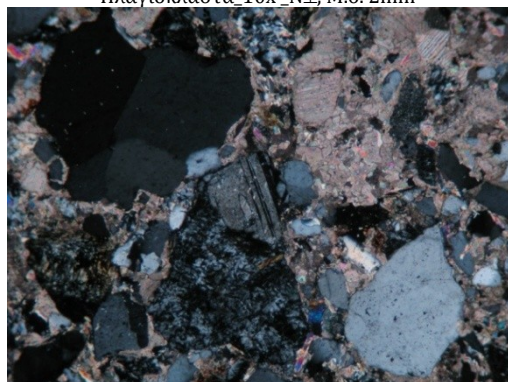
Πλαγιόκλαστα_10x_N//, Μδ 2mm



Πλαγιόκλαστα_10x_N⊥, Μ.δ. 2mm



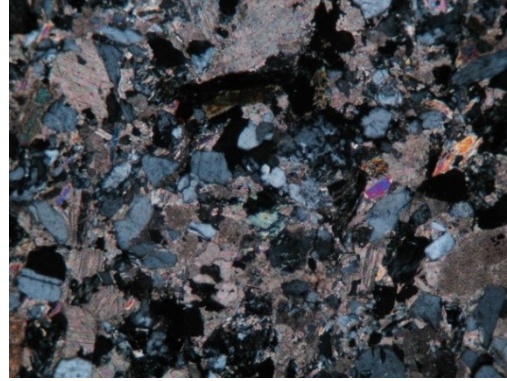
Πλαγιόκλαστα, Χαλαζίας, Ασβεστίτης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Πλαγιόκλαστα, Χαλαζίας, Ασβεστίτης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



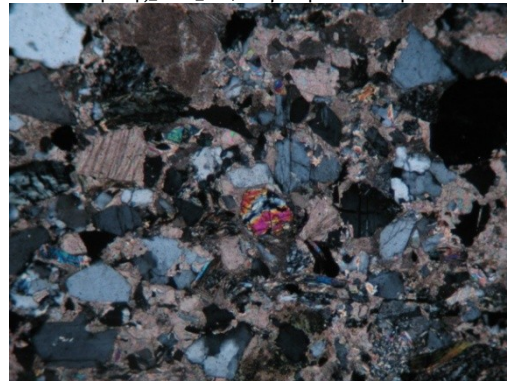
Χλωρίτης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Χλωρίτης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



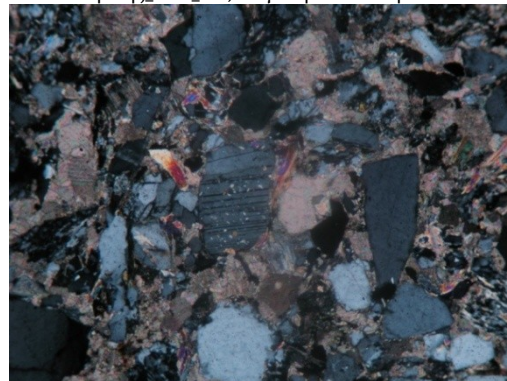
Ολιβίνης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Ολιβίνης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



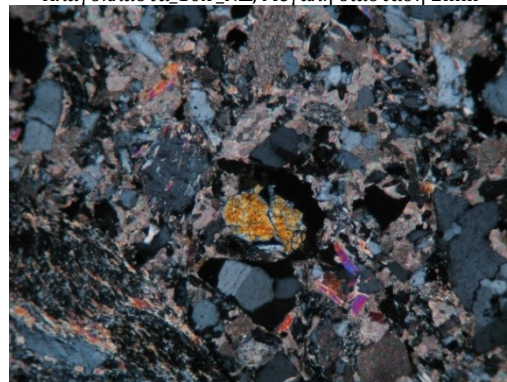
Πλαγιόκλαστα_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Πλαγιόκλαστα_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



Πυρόξενος_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Πυρόξενος_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm

Εικόνα 4.1.1. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GS

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψαν:

- Μέγιστο μέγεθος κόκκων: 2,3mm
- Βαθμός ταξινόμησης: Κακός
- Βαθμός στρογγυλότητας: Μέτριος-Κακός
- Σύσταση:

Κόκκοι + θραύσματα = 98% του συνολικού πετρώματος

Υλικό πλήρωσης = 2% του συνολικού πετρώματος

- Ορυκτό (%) και περιγραφή οπτικών χαρακτηριστικών:
 - α. Χαλαζίας 10-15%
 - β. Καλιούχοι άστριοι Kf 3-5%
 - γ. Πλαγιόκλαστα Pl 30-35% (αλλ)
 - δ. M 5-7% (Mu±Bi)
 - ε. Serp 1%
 - στ. Θραύσματα (Μεταμ) $\uparrow Q_2 + (\Psi)$ 15-20%
 - ζ. Μεταλλικά 1%
 - η. Ch 2-3%
 - θ. Cc 5
 - ι. Do 2-3%
 - ια. Ol 1%
- Στάδιο ιστολογικής ωριμότητας: Ανώριμο
- Στάδιο ορυκτολογικής ωριμότητας: Ανώριμο

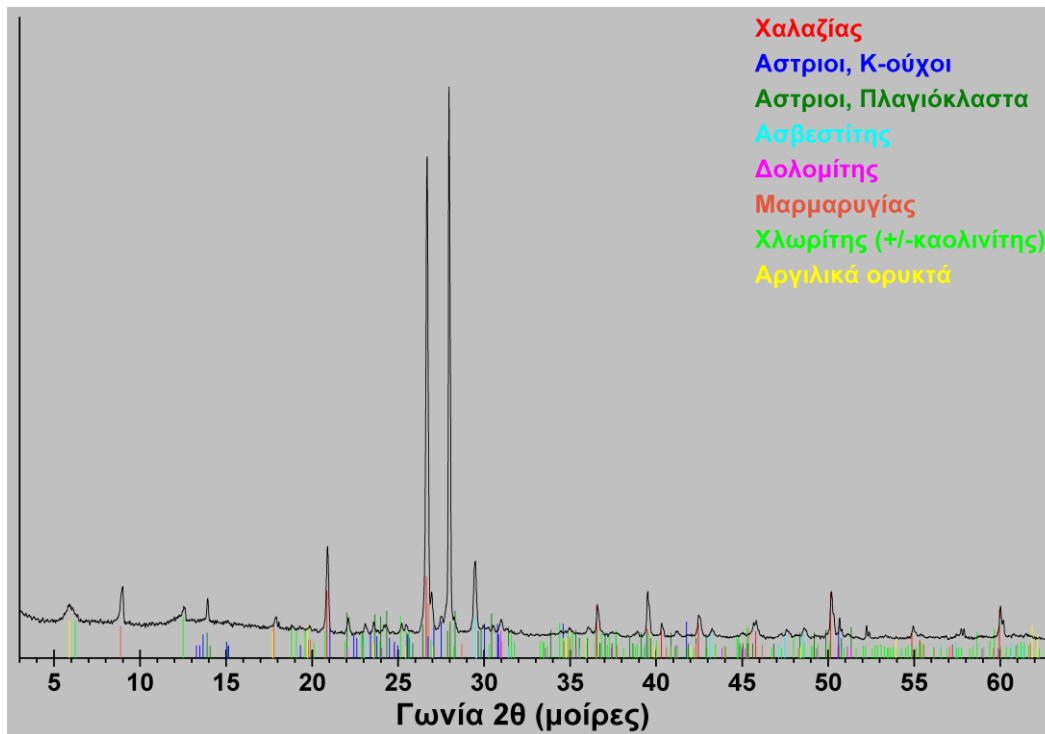
Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά το εξεταζόμενο δείγμα ταξινομείται κατά Folk et al (1970) ως λιθικός αστριοαρενίτης

β) Ορυκτολογική μελέτη

Στον Πίνακα 4.1.1 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του δείγματος GS, ενώ στην Εικόνα 4.1.2 παρουσιάζεται το περιθλασιόγραμμα ακτίνων -X του εξεταζόμενου δείγματος

Πίνακας 4.1.1 Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GS με περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ.

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.
Άστριοι, Πλαγιόκλαστα	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	48
Χαλαζίας	SiO_2	28
Ασβεστίτης	CaCO_3	12
Χλωρίτης	$\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	3
Μαρμαρυγίας		3
Δολομίτης	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	2
Άστριοι Κ-ούχοι		2
Αργιλικά ορυκτά		2



Εικόνα 4.1.2. Περιθλασιόγραμμα δείγματος GS

Από τον Πίνακα 4.1.1 διαπιστώνεται ότι το δείγμα GS αποτελείται από άστριους, πλαγιόκλαστα, χαλαζία, ασβεστίτη, χλωρίτη, μαρμαρυγία, δολομίτη, καλιούχους άστριους και αργιλικά ορυκτά.

Τα δεδομένα της ορυκτολογικής σύστασης βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις της μικροσκοπικής εξέτασης του δείγματος GS

ii) Δείγμα ερυθρού ψαμμίτη (SST)

α) Μικροσκοπική παρατήρηση

Στην Εικόνα 4.1.3 δίνονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του δείγματος SST όπως προέκυψαν από την εξέταση της λεπτής τομής του στο πολωτικό μικροσκόπιο.



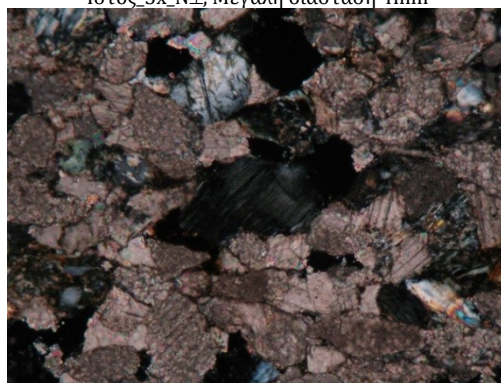
Ιστός_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



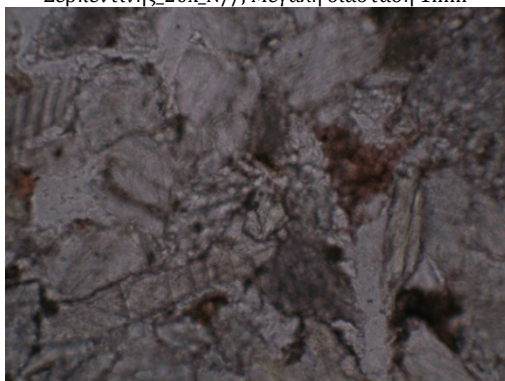
Ιστός_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



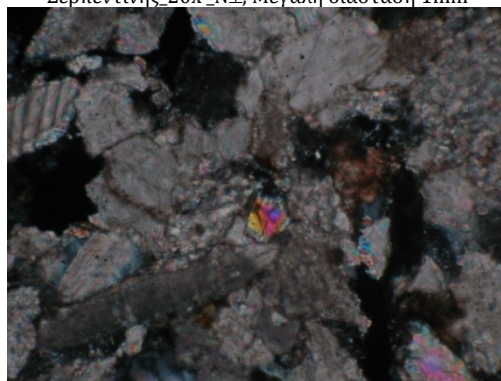
Σερπεντίνης_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Σερπεντίνης_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



Ολιβίνης_50x_N//, Μεγάλη διάσταση 0,5mm



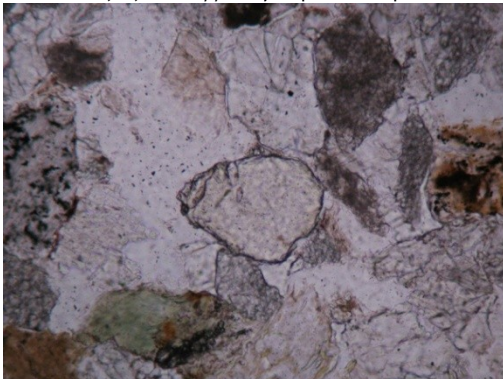
Ολιβίνης_50x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 0,5mm



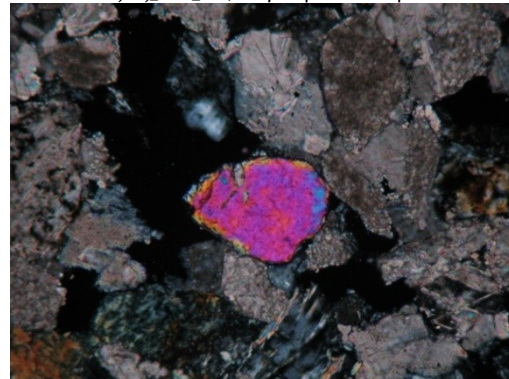
Χαλαζίας_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



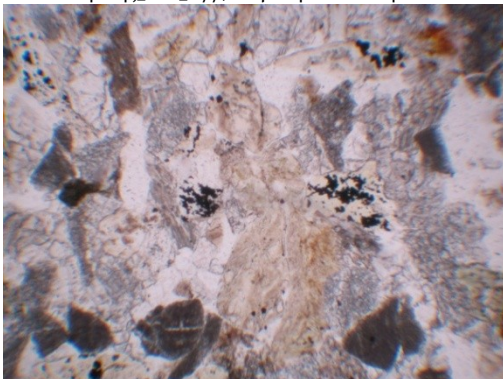
Χαλαζίας_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



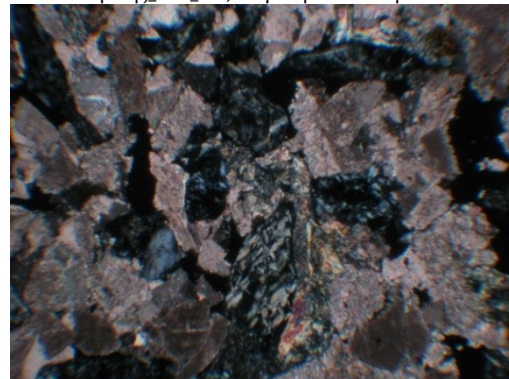
Ολιβίνης_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Ολιβίνης_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



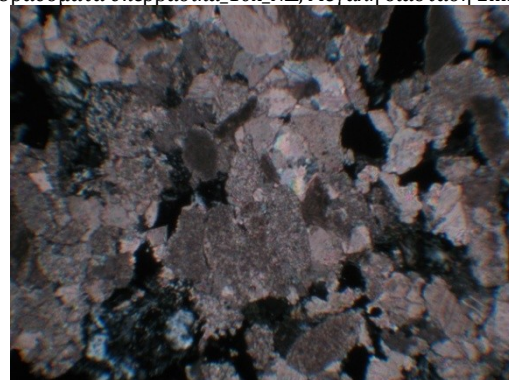
Θραύσματα υπερβασικά_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



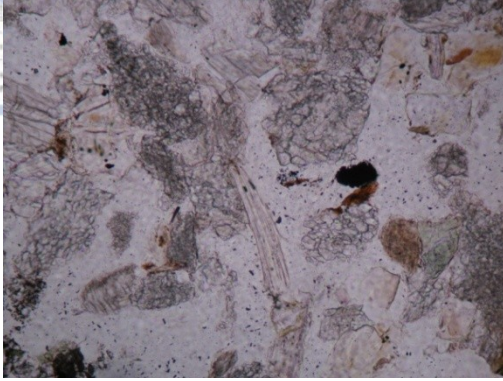
Θραύσματα υπερβασικά_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



Ασβεστίτης, Δολομίτης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Ασβεστίτης, Δολομίτης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



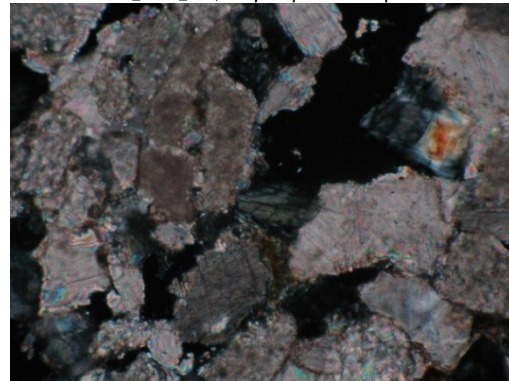
Micas_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



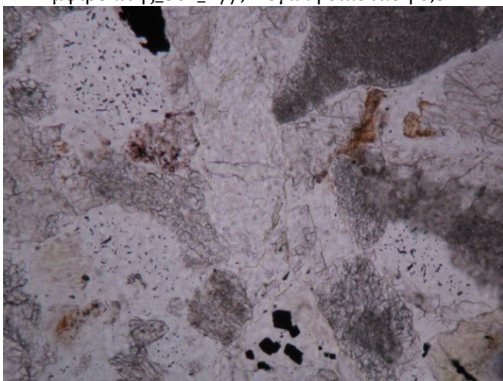
Micas_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



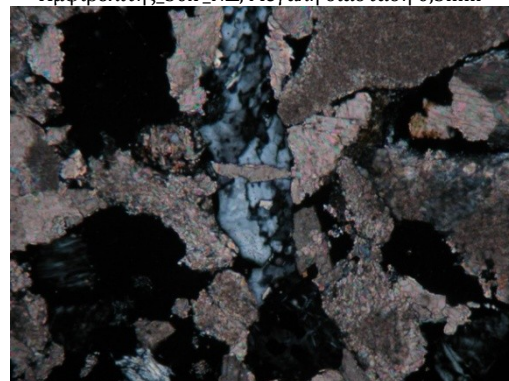
Αμφιβολίτης_50x_N//, Μεγάλη διάσταση 0,5mm



Αμφιβολίτης_50x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 0,5mm



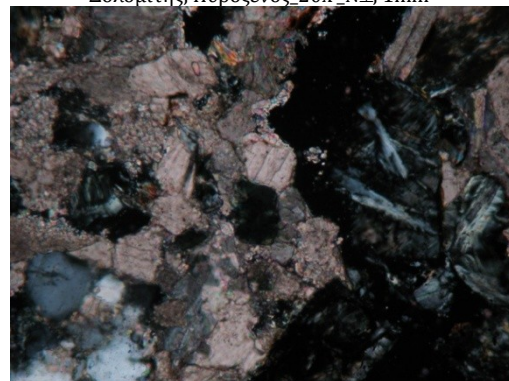
Μεταλλικά, Θραύσματα Χαλαζία, Χλωρίτης, Ασβεστίτης, Δολομίτης, Πυρόξενος_20x_N//, 1mm



Μεταλλικά, Θραύσματα Χαλαζία, Χλωρίτης, Ασβεστίτης, Δολομίτης, Πυρόξενος_20x_N⊥, 1mm



Πυρόξενος_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Πυρόξενος_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm

Εικόνα 4.1.3. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος SST

Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψαν:

- Μέγιστο μέγεθος κόκκων: 0,8mm
- Βαθμός ταξινόμησης: Καλός
- Βαθμός στρογγυλότητας: Μέτριος-Κακός
- Σύσταση:

Κόκκοι = 95% του συνολικού πετρώματος

Υλικό πλήρωσης = 5% του συνολικού πετρώματος

- Ορυκτό (%) και περιγραφή οπτικών χαρακτηριστικών:
 - α. Χαλαζίας 2-3%
 - β. Ασβεστίτης (2/3) + Δολομίτης (1/3) 77-65%
 - γ. Μαρμαρυγίας (Mu) + (Bi) 3-5%
 - δ. Σερπεντίνης 5-10%
 - ε. Χλωρίτης 2-3%
 - στ. Θραύσματα (Ψαμμιτικά) + (Υπερβασικά-Sp) 5-8%
 - ζ. Μεταλλικά 1%
 - η. Pl ίχνη < 1%
- Στάδιο ιστολογικής ωριμότητας: Ανώριμο
- Στάδιο ορυκτολογικής ωριμότητας: Ανώριμο

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά το εξεταζόμενο δείγμα ταξινομείται κατά Folk et al (1970) ως *ανθρακικός λιθαρενίτης*

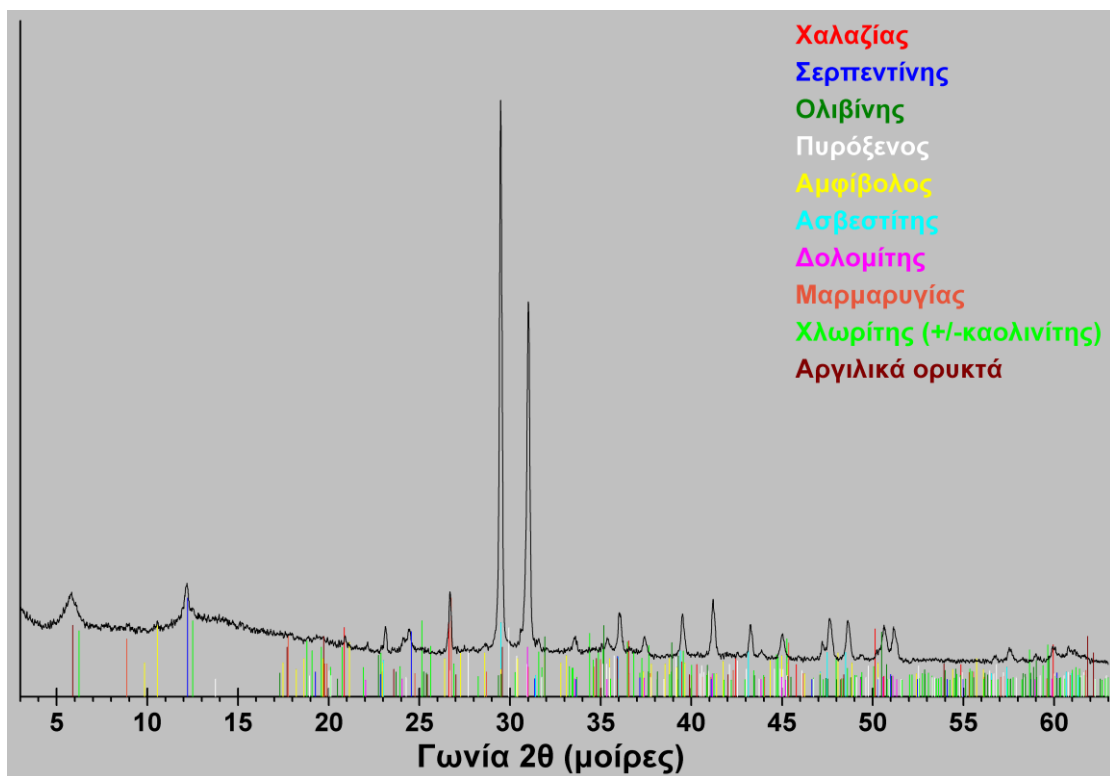
β) Ορυκτολογική μελέτη

Στον Πίνακα 4.1.2 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του δείγματος SST, ενώ στην Εικόνα 4.1.4 παρουσιάζεται το περιθλασιόγραμμα ακτίνων -X του εξεταζόμενου δείγματος

Ψηφιακή συλλογή
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Πίνακας 4.1.2 Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος SST με περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ.

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.
Ασβεστίτης	CaCO ₃	58
Δολομίτης	MgCa(CO ₃) ₂	24
Αργιλικά ορυκτά		5
Χλωρίτης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3
Σερπεντίνης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3
Χαλαζία	SiO ₂	2
Πυρόξενος		2
Ολιβίνης	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	1
Αμφίβολος		1
Μαρμαρυγία		1



Εικόνα 4.1.4. Περιθλασιόγραμμα δείγματος SST

Από τον Πίνακα 4.1.2 διαπιστώνεται ότι το δείγμα SST αποτελείται από ασβεστίτη, δολομίτη, αργιλικά ορυκτά, χλωρίτη, σερπεντίνη, χαλαζία, πυρόξενους, ολιβίνη, αμφίβολο, μαρμαρυγία.

Τα δεδομένα της ορυκτολογικής σύστασης βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις της μικροσκοπικής εξέτασης του δείγματος SST

iii) Δείγμα λεπτόκοκκου ψαμμίτη (SLST)

α) Μικροσκοπική παρατήρηση

Στην Εικόνα 4.1.5 δίνονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του δείγματος SLST όπως προέκυψαν από την εξέταση της λεπτής τομής του στο πολωτικό μικροσκόπιο.



Ιστός_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Ιστός_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



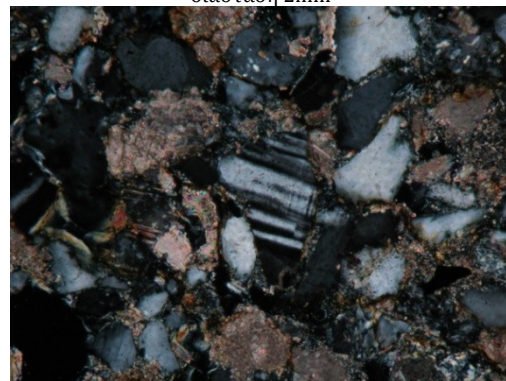
Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Χλωρίτης_10x_N//, Μεγάλη διάσταση 2mm



Χαλαζίας, Ασβεστίτης, Χλωρίτης_10x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 2mm



Πλαγιόκλαστα_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Πλαγιόκλαστα_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



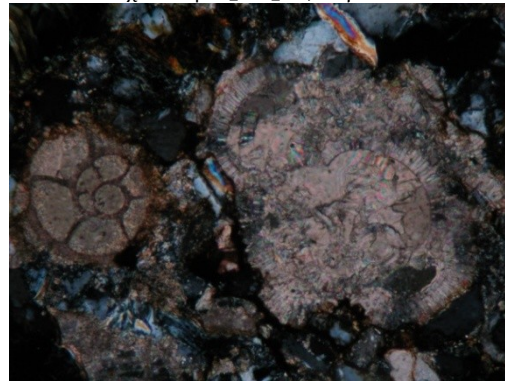
Καλιούχοι Άστριοι_20x_N//, Μεγ.διάσ. 1mm



Καλιούχοι Άστριοι_20x_N⊥, Μεγ.διάσ. 1mm



Ασβεστίτης, Απολιθώματα_20x_N//, Μ.δ.1mm



Ασβεστίτης, Απολιθώματα_20x_N⊥, Μ.δ.1mm



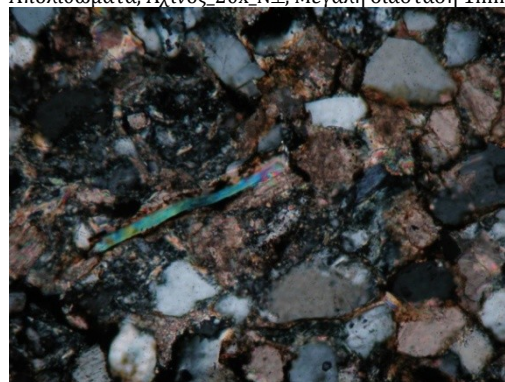
Απολιθώματα, Αχνός_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Απολιθώματα, Αχνός_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm



Μι, Χλωρίτης_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Μι, Χλωρίτης_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm

Εικόνα 4.1.5. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος SLST

Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψαν:

- Μέγιστο μέγεθος κόκκων: 0,9mm
- Βαθμός ταξινόμησης: Κακός
- Βαθμός στρογγυλότητας: Κακός
- Σύσταση:

Κόκκοι + θραύσματα = 95% του συνολικού πετρώματος

Υλικό πλήρωσης = 5% του συνολικού πετρώματος

- Ορυκτό (%) και περιγραφή οπτικών χαρακτηριστικών:
 - α. Χαλαζίας 35-40%
 - β. Άστριοι Κ-ούχοι 2-5%
 - γ. Άστριοι, Πλαγιόκλαστα 15-20%
 - δ. Μαρμαρυγίας (Mu) + (Bi) 3-5%
 - ε. Αβεστίτης 10-15%
 - στ. Δολομίτης 1-3%
 - ζ. Σερπεντίνης 1%
 - η. Χλωρίτης 3-5%
 - θ. Μεταλλικά 1%
 - ι. Θραύσματα 10-15% (Μεταμ.+Υπερβ.+Ψαμ.)
 - ια. Απολιθώματα 1-3%
- Στάδιο ιστολογικής ωριμότητας: Ανώριμο
- Στάδιο ορυκτολογικής ωριμότητας: Ανώριμο

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά το εξεταζόμενο δείγμα ταξινομείται κατά Folk et al (1970) ως λιθικός αστριοαρενίτης

β) Ορυκτολογική μελέτη

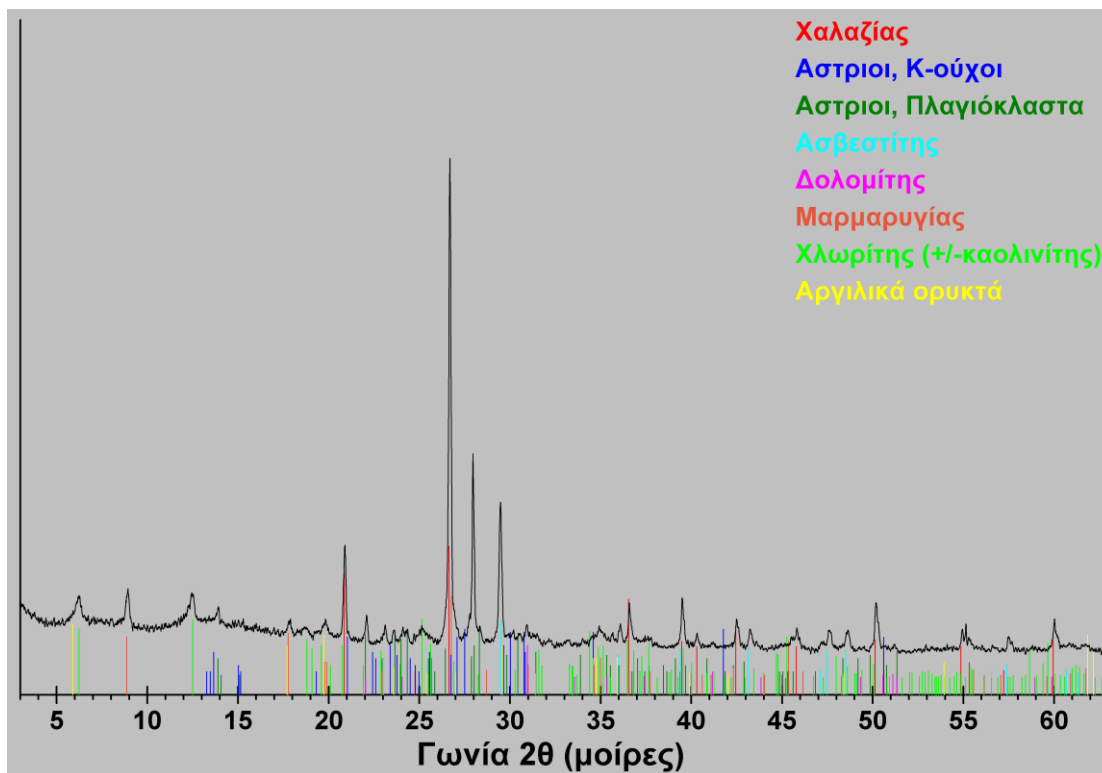
Στον Πίνακα 4.1.3 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του δείγματος SLST, ενώ στην Εικόνα 4.1.6 παρουσιάζεται το περιθλασιόγραμμα ακτίνων -X του εξεταζόμενου δείγματος

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Α.Π.Θ.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Πίνακας 4.1.3 Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος SLST με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.

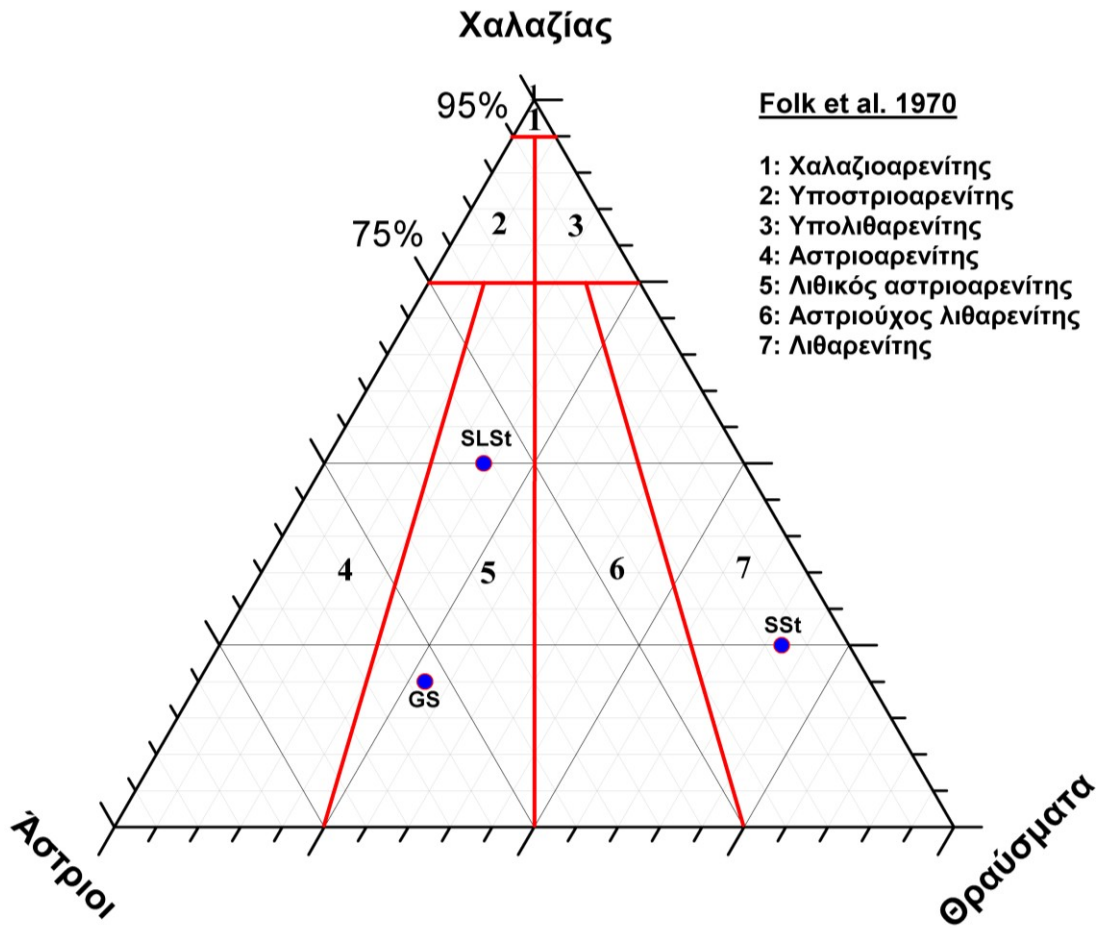
Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.
Χαλαζίας	SiO ₂	39
Ασβεστίτης	CaCO ₃	25
Άστριοι, Πλαγιόκλαστα	NaAlSi ₃ O ₈	20
Χλωρίτης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	6
Μαρμαρυγίας		5
Άστριοι Κ-ούχοι		2
Δολομίτης	MgCa(CO ₃) ₂	2
Αργιλικά ορυκτά		1



Εικόνα 4.1.6. Περιθλασιόγραμμα δείγματος SLST

Από τον Πίνακα 4.1.3 διαπιστώνεται ότι το δείγμα SLST αποτελείται από χαλαζία, ασβεστίτη, άστριοι, πλαγιόκλαστα, χλωρίτη, μαρμαρυγία, άστριοι κ-ούχοι, δολομίτη, αργιλικά ορυκτά.

Τα δεδομένα της ορυκτολογικής σύστασης βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις της μικροσκοπικής εξέτασης του δείγματος SLST

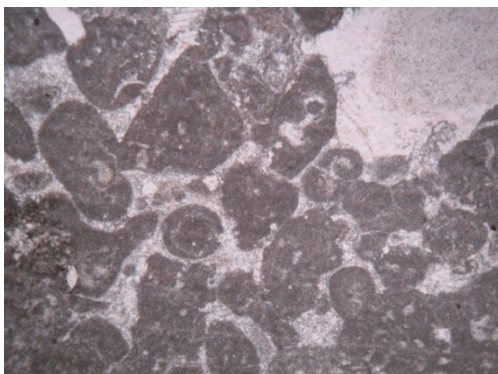


Εικόνα 4.1.7. Περιγραφή του τριγωνικού σχήματος Folk et al 1970

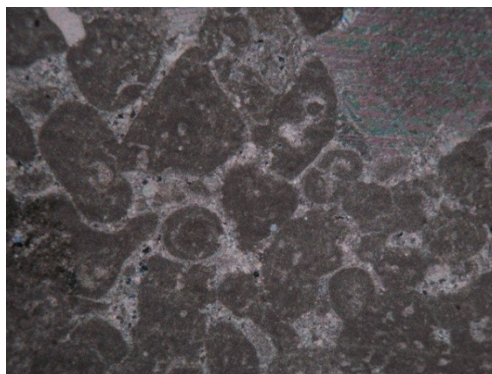
iv) Δείγμα ασβεστόλιθου (GL)

α) Μικροσκοπική παρατήρηση

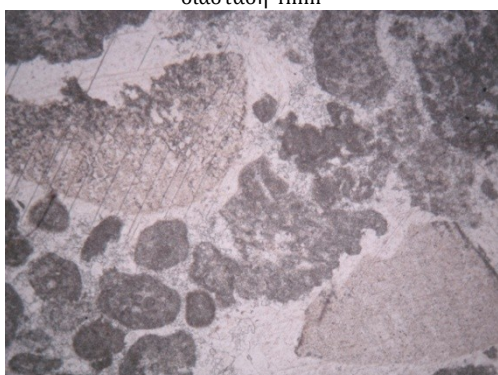
Στην Εικόνα 4.1.8 δίνονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του δείγματος GL όπως προέκυψαν από την εξέταση της λεπτής τομής του στο πολωτικό μικροσκόπιο.



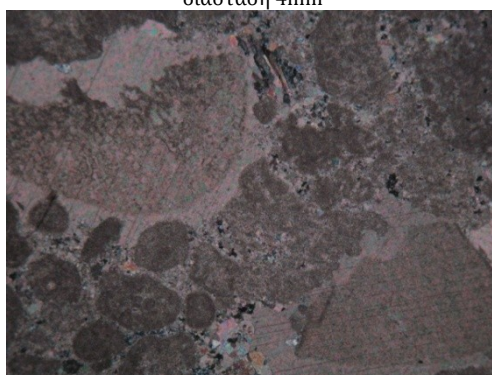
Ιστός δευτερογενής ασβεστίτης_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



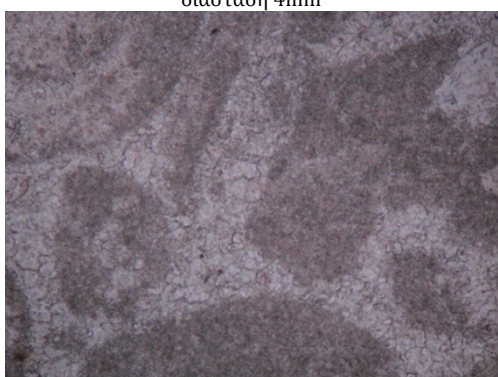
Ιστός δευτερογενής ασβεστίτης_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



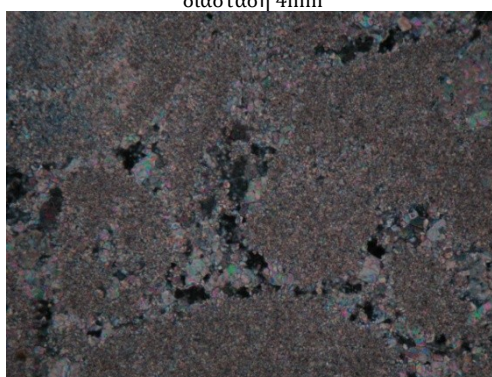
Ιστός δευτερογενής ασβεστίτης_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Ιστός δευτερογενής ασβεστίτης_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm

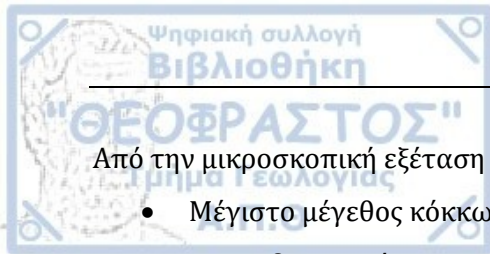


Σπαρίτης συγκολλητικό υλικό_20x_N//, Μεγάλη διάσταση 1mm



Σπαρίτης συγκολλητικό υλικό_20x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 1mm

Εικόνα 4.1.8. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GL



Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψαν:

- Μέγιστο μέγεθος κόκκων: 3mm
- Μη ασβεστιτικά συστατικά:
 - α. Χαλαζίας 1%
 - β. Θραύσματα 1%
- Αλλόχθονα συστατικά:
 - α. Βιοκλάστες πληρωμένοι με μικριτικό υλικό > 50%
 - β. Λιθοκλάστες 2%
 - γ. Ενδοκλάστες 15%

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά το εξεταζόμενο δείγμα ταξινομείται κατά Folk et al (1959) ως Βιομικρίτης ή/και Βιοσπαρίτης*, κατά Dunham (1962) ως Βακόλιθος ή/και Σωρόλιθος*

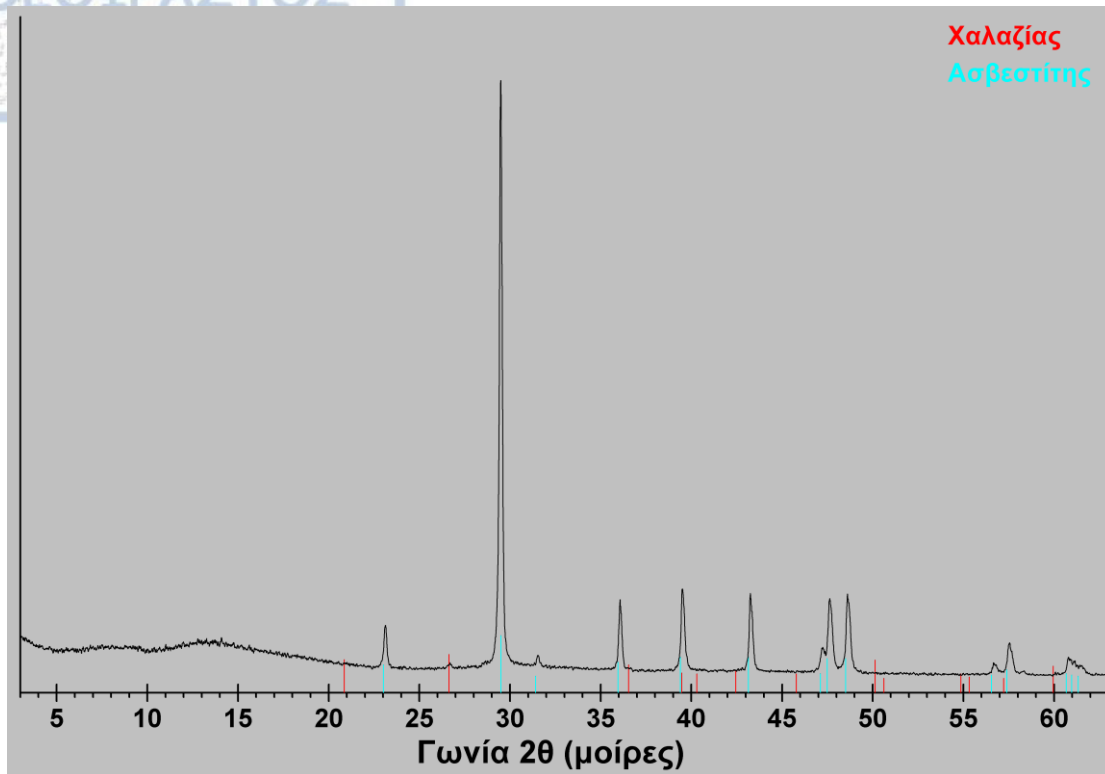
*Τα απολιθώματα είναι πληρωμένα με μικρίτη άρα ως προς τη συνολική εικόνα είναι βιομικρίτης. Επιπλέον, είναι αδροκρυσταλλικός ως προς το συγκολλητικό υλικό που είναι σπαρίτης.

β) Ορυκτολογική μελέτη

Στον Πίνακα 4.1.4 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του δείγματος GL, ενώ στην Εικόνα 4.1.9 παρουσιάζεται το περιθλασιόγραμμα ακτίνων -X του εξεταζόμενου δείγματος

Πίνακας 4.1.4 Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GL με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.
Ασβεστίτης	CaCO ₃	99
Χαλαζίας	SiO ₂	1



Εικόνα 4.1.9. Περιθλασιόγραμμα δείγματος GL

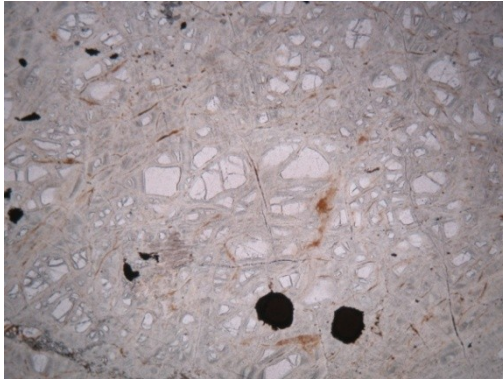
Από τον Πίνακα 4.1.4 διαπιστώνεται ότι το δείγμα GL αποτελείται από ασβεστίτη και χαλαζία.

Τα δεδομένα της ορυκτολογικής σύστασης βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις της μικροσκοπικής εξέτασης του δείγματος GL

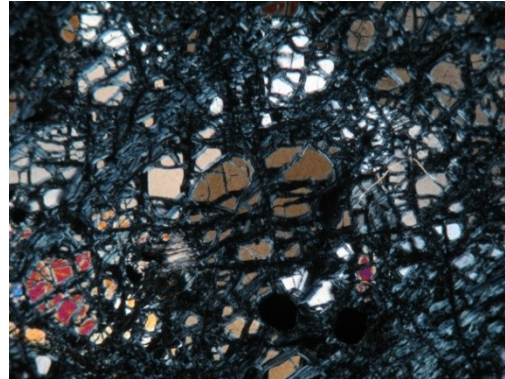
ν) Δείγμα σερπεντινίτη (GP)

α) Μικροσκοπική παρατήρηση

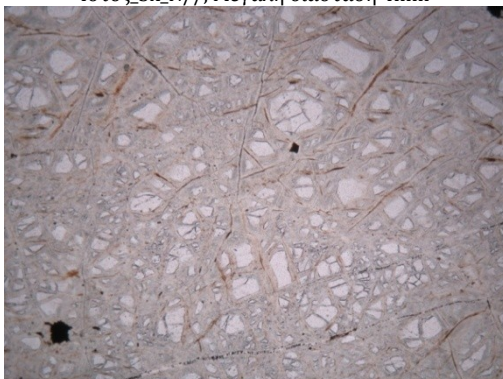
Στην Εικόνα 4.1.10 δίνονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του δείγματος GP όπως προέκυψαν από την εξέταση της λεπτής τομής του στο πολωτικό μικροσκόπιο.



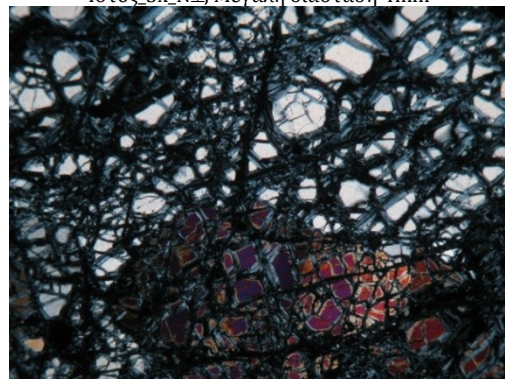
Ιστός_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Ιστός_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



Ολιβίνης, Σερπεντίνης_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



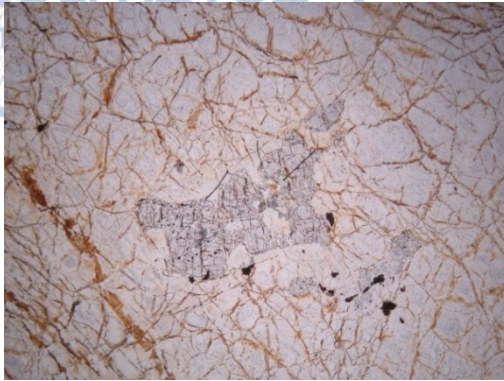
Ολιβίνης, Σερπεντίνης_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



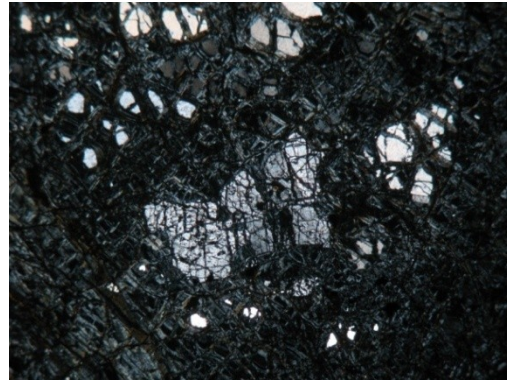
Σερπεντίνης_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Σερπεντίνης_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm



Πυρόξενος_5x_N//, Μεγάλη διάσταση 4mm



Πυρόξενος_5x_N⊥, Μεγάλη διάσταση 4mm

Εικόνα 4.1.10. Μικροφωτογραφίες από πολωτικό μικροσκόπιο του δείγματος GP

Από την μικροσκοπική εξέταση προέκυψαν:

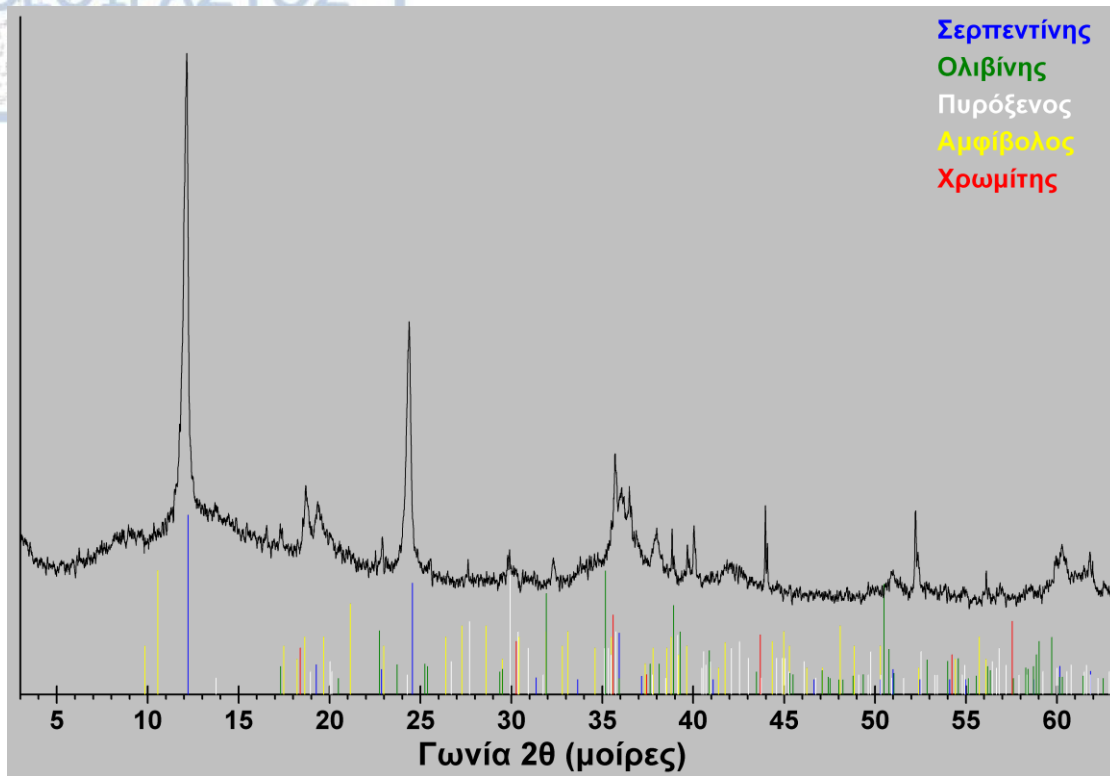
- Ορυκτά: σερπεντίνης, πυρόξενος, ολιβίνης
- Ιστός: γρανιτικός

β) Ορυκτολογική μελέτη

Στον Πίνακα 4.1.5 δίνεται η ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του δείγματος GP, ενώ στην Εικόνα 4.1.11 παρουσιάζεται το περιθλασιόγραμμα ακτίνων -X του εξεταζόμενου δείγματος

Πίνακας 4.1.5 Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του εξεταζόμενου δείγματος GP με περιθλασιμετρία ακτίνων-X.

Ορυκτό	Χημικός τύπος	% κ.β.
Σερπεντίνης	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	70
Ολιβίνης	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	19
Χρωμίτης	$FeCr_2O_4$	6
Πυρόξενος		3
Αμφίβολος		2



Εικόνα 4.1.11. Περιθλασιόγραμμα δείγματος GP

Από τον Πίνακα 4.1.5 διαπιστώνεται ότι το δείγμα GP αποτελείται από σερπεντίνη, ολιβίνη, χρωμίτη, πυρόξενο, αμφίβολο.

Το δείγμα με βάση τα δεδομένα της ορυκτολογικής σύστασης και της μικροσκοπικής εξέτασης με το πολωτικό μικροσκόπιο παρουσιάζει αλλοιώσεις (σερπεντινίωση) και ολοκρυσταλλικό γρανιτικό ιστό. Το δείγμα είναι *σερπεντινίτης*.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής και μικροσκοπικής μελέτης συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.1.6.

Πίνακας 4.1.6 Αποτελέσματα ορυκτολογικής και μικροσκοπικής ανάλυσης

Ορυκτό	Χημικός τύπος	Ποσοστό κατά βάρος (%)				
		GS	SST	SLST	GL	GP
Άστριοι, Πλαγιόκλαστα	NaAlSi ₃ O ₈	48		20		
Χαλαζίας	SiO ₂	28	2	39	1	
Ασβεστίτης	CaCO ₃	12	58	25	99	
Δολομίτης	MgCa(CO ₃) ₂	2	24	2		
Σερπεντίνη	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈		3			70
Ολιβίνης	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄		1			19
Χλωρίτης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3	3	6		
Χρωμίτης	FeCr ₂ O ₄					6
Μαρμαρυγίας		3	1	5		
Άστριοι Κ-ούχοι		2		2		
Αργιλικά ορυκτά		2	5	1		
Πυρόξενος			2			3
Αμφίβολος			1			2
		100	100	100	100	100
Μέγιστο μέγεθος κόκκων:		2,3mm	0,8mm	0,9mm	3mm	
Ταξινόμηση κατά Folk et al		Λιθικός αστριο- αρενίτης	Ανθρακικός λιθαρενίτης	Λιθικός αστριοαρενίτης	Βιομικρίτης ή/και Βιοσπαρίτης	
Ταξινόμηση κατά Dunham					Βακόλιθος ή/και Σωρόλιθος	
Ιστός:					Αδροκρυ- σταλλικός	Ολοκρυ- σταλλικός γρανιτικός

4.2. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης

Το πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης περιελάμβανε ένα αριθμό δοκιμών ώστε να καλυφθεί το εύρος των πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε μια και μοναδική πλευρική πίεση. Συγκεκριμένα,

- για τον τεφρό ψαμμίτη (GS) εκτελέστηκαν δώδεκα (12) δοκιμές τριαξονικής θλίψης και μία δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.
- για τον ερυθρό ψαμμίτη (SST) εκτελέστηκαν είκοσι πέντε (25) δοκιμές τριαξονικής θλίψης και πέντε (5) μονοαξονικής θλίψης.
- για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη (SLST) πραγματοποιήθηκαν επτά (7) δοκιμές τριαξονικής θλίψης και μία μονοαξονικής θλίψης.
- για τον ασβεστόλιθο (GL) εκτελέστηκαν είκοσι δύο (22) δοκιμές τριαξονικής θλίψης και δύο (2) μονοαξονικής θλίψης.
- τέλος, για τον σερπεντινίτη (GP) πραγματοποιήθηκαν είκοσι πέντε (25) δοκιμές τριαξονικής θλίψης και τρεις (3) δοκιμές μονοαξονικής θλίψης.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 91 δοκιμές τριαξονικής θλίψης και 12 μονοαξονικής θλίψης.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

i) Τεφρός ψαμμίτης (GS)

Για το άρρηκτο πέτρωμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ονομαστικής διαμέτρου 54mm και λόγο διαμέτρου/ύψος 1:2 σε πλευρικές πιέσεις 0-70 MPa με τη βοήθεια της τυποποιημένης τριαξονικής κυψέλης Hoek.

Στον Πίνακα 4.2.1 δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης του τεφρού ψαμμίτη GS

Πίνακας 4.2.1. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης τεφρού ψαμμίτη GS

A/A	Κωδικός δείγματος	Πλευρική πίεση	Αξονική τάση	Γωνία θραύσης	Παραμέ- νουσα τάση	Πτώση τάσης	Δείκτης ψαθυρό- τητας	Ολκμό- τητα	Μέτρο Ελαστι- κότητας
		σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	θ [°]	σ_r [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_r$	σ_1 / σ_r	[%]	E_{50} [GPa]
1	GS19	0	49		0			1,7%	7,7
2	GS11	5	108	25	34	74,0	3,2	1,7%	9,8
3	GS7	10	120	30	55	65,0	2,2	1,8%	8,6
4	GS4	20	160	25	100	60,0	1,6	2,9%	10,5
5	GS2	30	203	20	126	77,0	1,6	2,2%	11,9
6	GS10	35	216	30	136	80,0	1,6	3,3%	11,7
7	GS5	40	202	30	150	52,0	1,3	3,1%	10,5
8	GS8	45	264	28	170	94,0	1,6	3,1%	12,5
9	GS3	50	264	32	200	64,0	1,3	2,9%	13,7
10	GS1	60	296	28	224	72,0	1,3	4,1%	12,6
11	GS6	65	320	35	247	73,0	1,3	4,0%	13,3
12	GS17	70	346	32	222	124,0	1,6	4,0%	12,3
13	GS9	70	310	33	285	25,0	1,1	4,3%	14,9
Μέση τιμή:						71,7	1,6	3,0%	11,9
Τυπική απόκλιση:						23,6	0,6	0,9%	1,8

Τα πλήρη διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται στο σχήμα 4.2.1. Η τιμή δίπλα σε κάθε καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη πλευρική πίεση σε MPa.

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης:

(α) η αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη αντοχή (peak) από $\sigma_1=49$ MPa σε ανεμπόδιστη θλίψη ($\sigma_3=0$ MPa) αυξάνεται βαθμιαία μέχρι $\sigma_1=328$ MPa (μέση τιμή δύο δοκιμών) για $\sigma_3=70$ MPa. Η

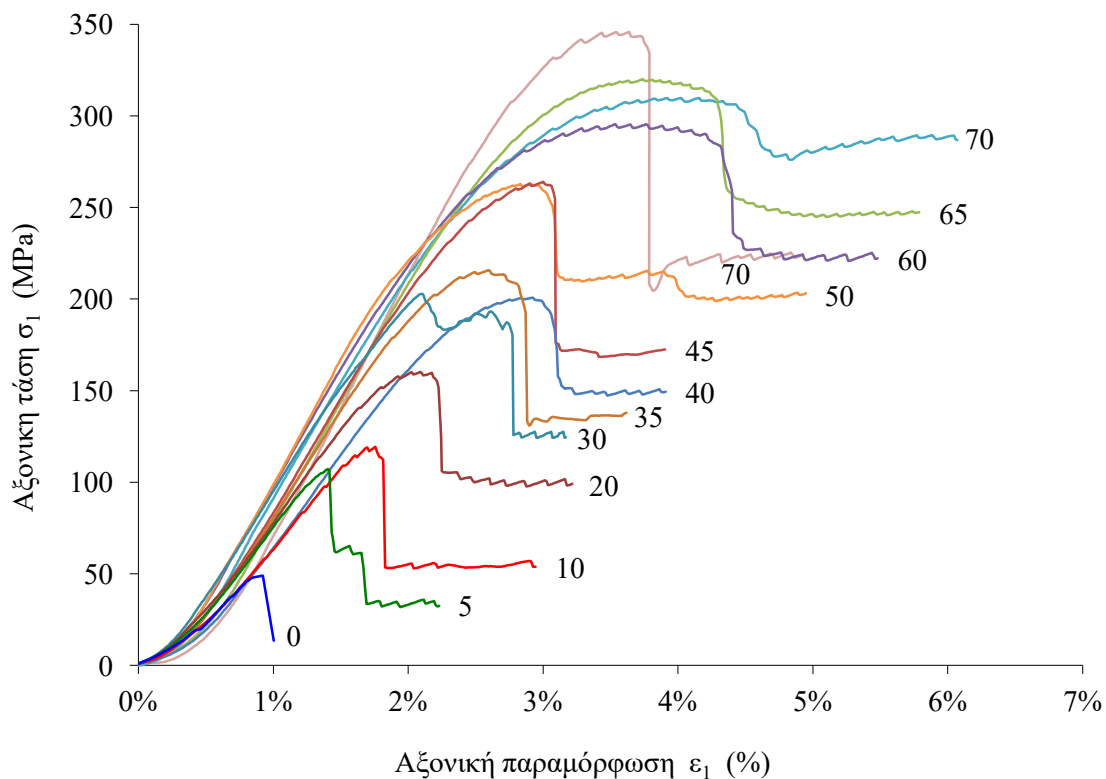
παραμένουσα αντοχή αυξάνεται από 34MPa για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 253,5MPa (μέση τιμή δύο δοκιμών) για $\sigma_3=70\text{MPa}$.

(β) η συμπεριφορά αλλάζει από ψαθυρή σε όλκιμη. Ο δείκτης ψαθυρότητας, οριζόμενος ως ο λόγος μέγιστης και παραμένουσας αντοχής μεταβάλλεται από 3,2 για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 1,3 για πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες από $\sigma_3=40\text{MPa}$ (σχήμα 4.2.2β)

(γ) η ολκιμότητα (ικανότητα μεγάλης παραμόρφωσης χωρίς θραύση), που ορίζεται ίση με την αξονική παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά, από 1,7% για $\sigma_3=0\text{MPa}$ σε 4,3% για $\sigma_3=70\text{MPa}$ (σχήμα 4.2.2α)

(δ) η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή παραμένει περίπου σταθερή με μέση τιμή 71,7MPa και τυπική απόκλιση 23,6MPa.

(ε) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται βαθμιαία από 7,7GPa σε 15GPa (σχήμα 4.2.2γ)



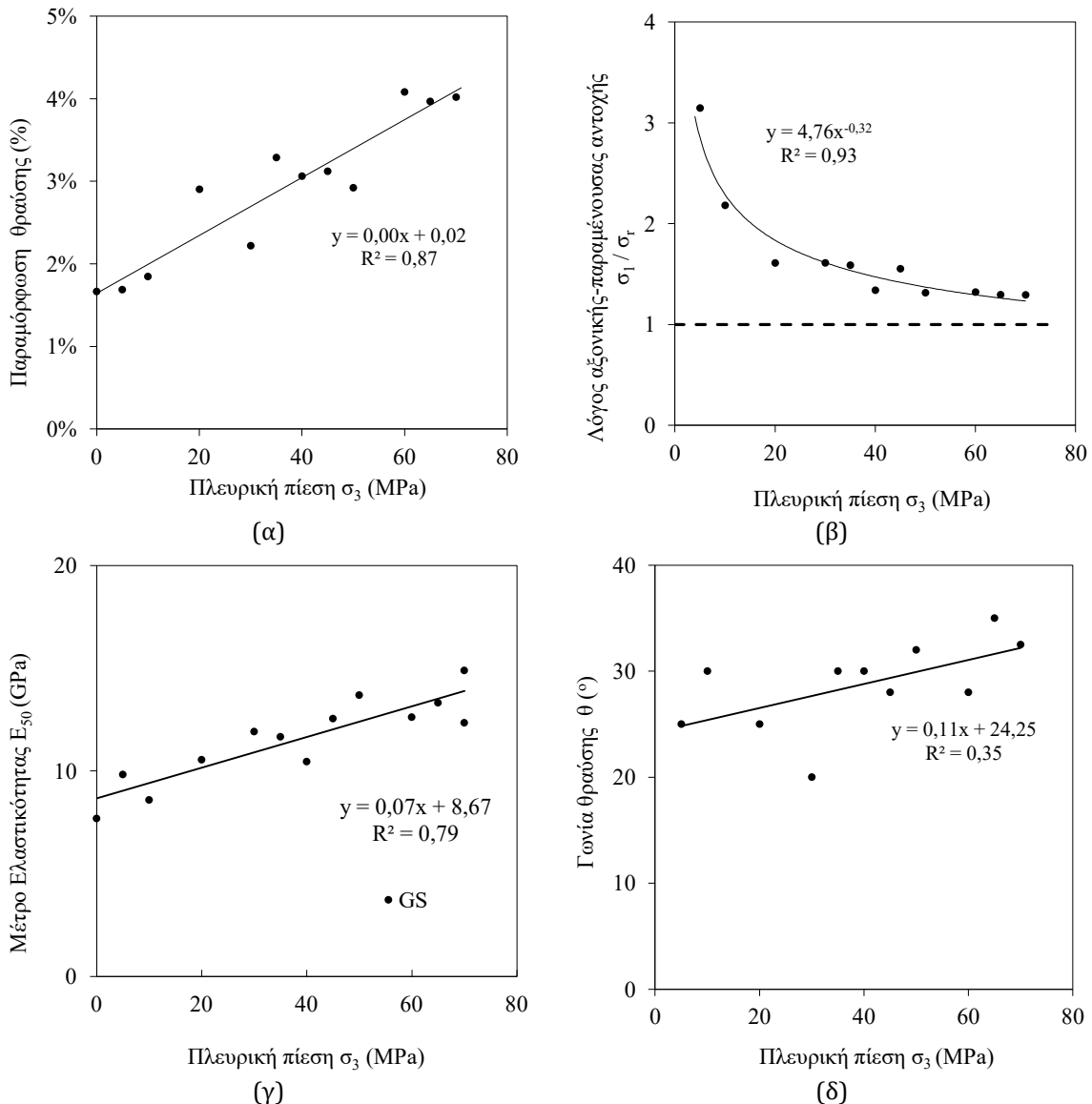
Σχήμα 4.2.1. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον τεφρό ψαμίτη GS.

Για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης ($\sigma_3=0$ έως 70 MPa), η αστοχία του δοκιμίου γίνεται με ψαθυρό τρόπο, γεγονός που αποτυπώνεται από την απότομη πτώση της τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή κάθε δοκιμής (σαφής διαφορά τιμών μέγιστης και

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

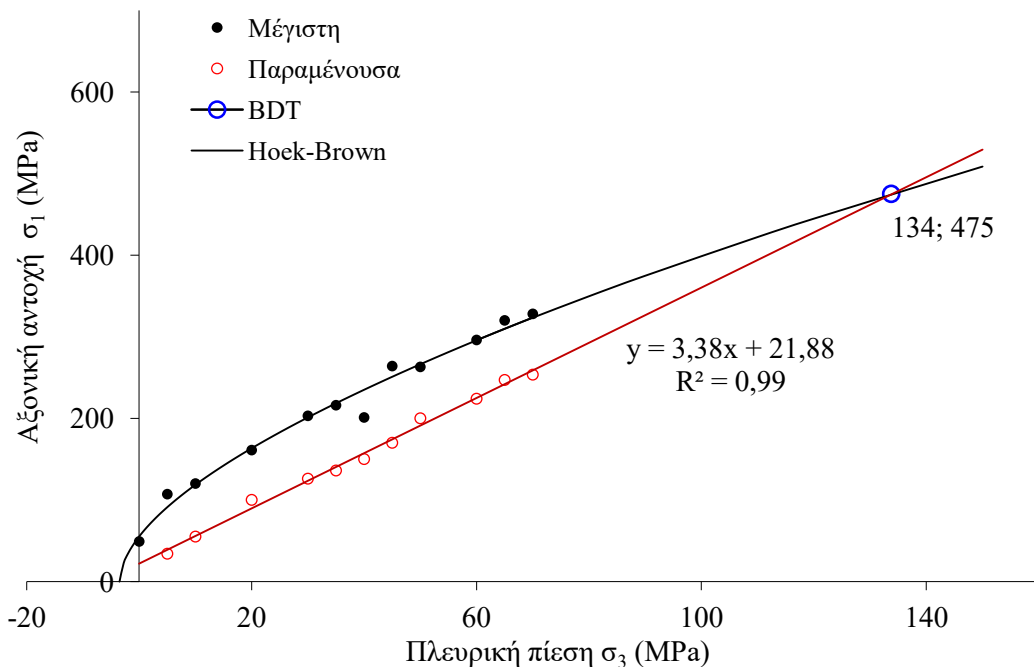
παραμένουσας αντοχής). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον τρόπο αστοχίας των δοκιμών. Όλα αστόχησαν με διατμητική θραύση – αστοχία κατά μήκος ενός επιπέδου-.

Σημειώνεται ότι επειδή η μέγιστη τιμή της πλευρικής πίεσης που μπορεί να εφαρμοστεί από την τυποποιημένη τριαξονική κυψέλη Hoek είναι 70 MPa, η διεξαγωγή δοκιμών περιορίστηκε από 0-70MPa.



Σχήμα 4.2.2. Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης σ_3 και: (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β) Λόγου μέγιστης αξονικής/παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης, για τον τεφρό ψαμίτη GS.

Η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 70MPa και δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς. Προσεγγιστικά εκτιμάται από την πλευρική πίεση στην οποία η μέγιστη αξονική αντοχή γίνεται ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή, δηλαδή από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής. (Byerlee 1967, Mair et al. 2002, Murell 1966). Για την παραμένουσα αντοχή χρησιμοποιείται η σχέση $\sigma_1 = m\sigma_3 + b$. Για την περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown για το σύνολο των δοκιμών (2018). Σύμφωνα με τα παραπάνω, το σημείο μετάβασης ψαθυρής -όλκιμης συμπεριφοράς προκύπτει $\sigma_3 = 134$, $\sigma_1 = 475$. Ο λόγος $\sigma_1/\sigma_3 = 475/134$ προκύπτει ίσος με 3,54, μικρότερος από την κλίση της ευθείας Mogi (4,3).

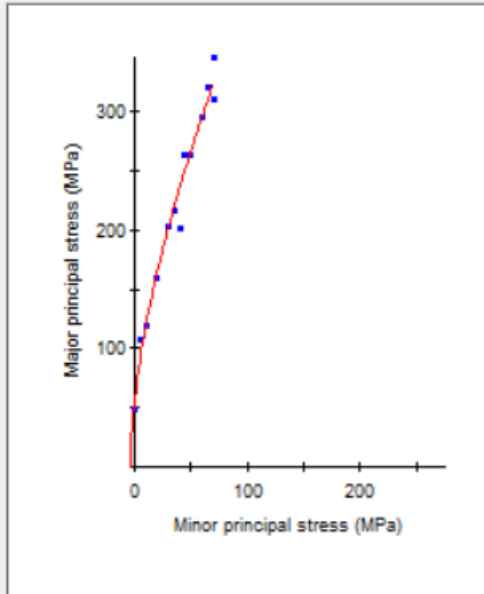


Σχήμα 4.2.3. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής τεφρού ψαμίτη GS.

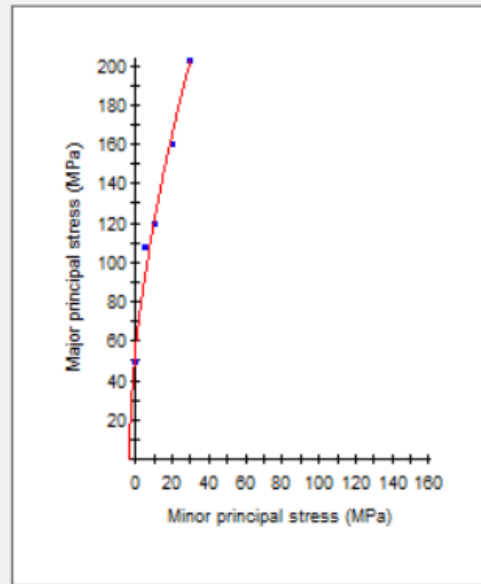
Στο σχήμα 4.2.3 παριστάνεται η μεταβολή της μέγιστης και παραμένουσας αξονικής αντοχής σ_1 συναρτήσει της πλευρικής πίεσης.

Τα πειραματικά στοιχεία για τη μέγιστη και την παραμένουσα αντοχή δίνονται με κυκλικά μαύρα και κόκκινα σύμβολα αντίστοιχα. Με μαύρη συμπαγή γραμμή παριστάνεται το κριτήριο H-B, όπως προέκυψε από το σύνολο των πειραματικών στοιχείων (όλο το εύρος του σ_3 0-70MPa), η οποία αντιστοιχεί σε $\sigma_{ci} = 55,3$ MPa και $m_i = 15,9$. Οι παράμετροι του κριτηρίου H-B όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που αντιστοιχούσαν στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$, είναι $\sigma_{ci} = 56,5$ MPa και $m_i = 15,9$ (σχήμα 4.2.4)

mi: 15.912 sigci: 55.276 MPa



mi: 15.913 sigci: 56.447 MPa



Σχήμα 4.2.4. Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον τεφρό ψαμμίτη GS.

Η τιμή του m_i βρίσκεται μέσα στα προβλεπόμενα όρια για τον ψαμμίτη (17 ± 4) που δίνονται από τους Marinou & Hoek (2000)

Η τιμή του σ_{ci} είναι 12% μεγαλύτερη από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (49,0 MPa) – Τονίζεται ότι η μονοαξονική θλίψη γίνεται σε δείγμα αναλογίας ύψους προς διάμετρο 2,5 ($h/d=2,5$).

Με βάση την υπόθεση Orowan (1960) η γωνία τριβής που αντιστοιχεί στην κατάσταση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (brittle-ductile transition, BDT) δίνεται από τη σχέση

$$\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (4.1)$$

και προκύπτει ίση με $34,1^\circ$

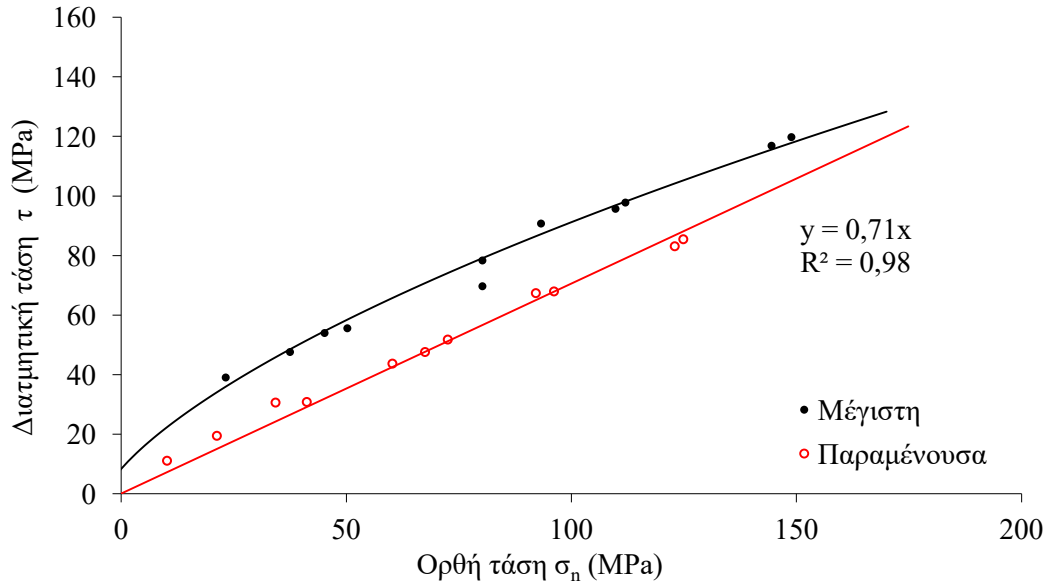
Στο σχήμα 4.4 παριστάνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ορθή τάση που προσδιορίστηκε με βάσει τις σχέσεις

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} * \sin 2\theta \quad (4.2)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} * \cos 2\theta \quad (4.3)$$

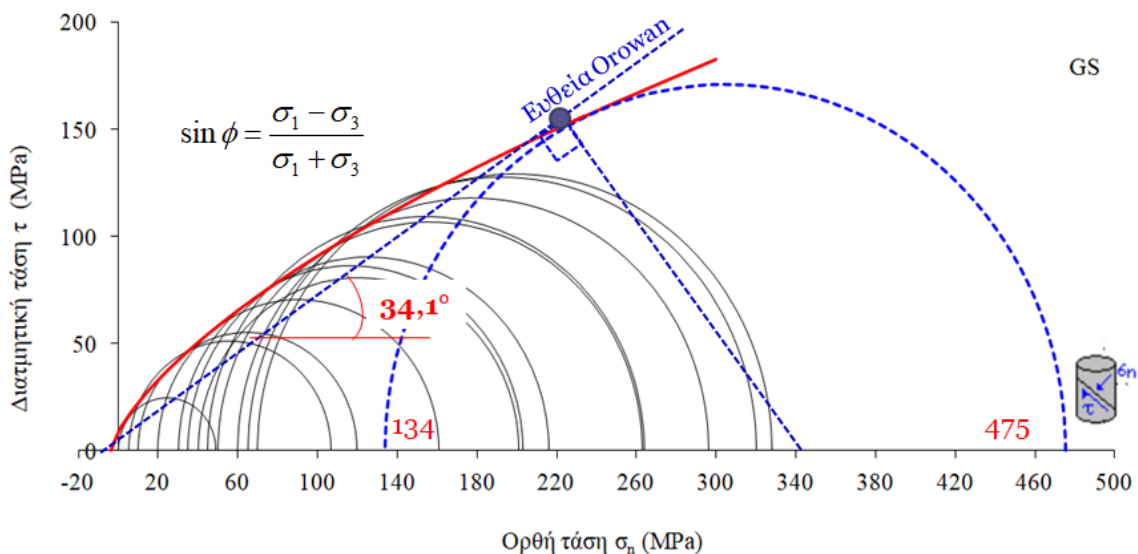
όπου θ η γωνία του επιπέδου αστοχίας με τον άξονα του δοκιμίου.

Με βάση τη γραμμή τάσης (κόκκινη) $\tau=0,71\sigma$ της παραμένουσας αντοχής προκύπτει γωνία τριβής $\phi=35,2^\circ$ (διαφορά $1,1^\circ$ σε σχέση με τη Orowan).



Σχήμα 4.2.5. Διάγραμμα Ορθής-Διατμητικής τάσης τεφρού ψαμμίτη GS.

Στο σχήμα 4.2.6 παριστάνεται το διάγραμμα των κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek - Brown με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.



Σχήμα 4.2.6. Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές τεφρού ψαμμίτη GS. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά.

ii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST)

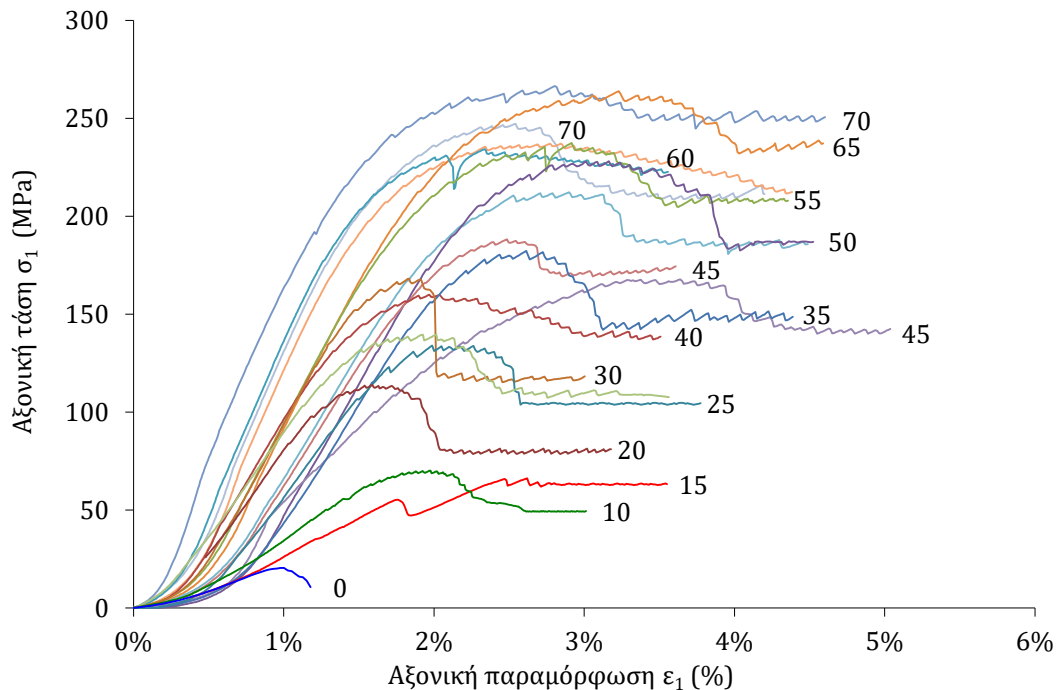
Για το άρρηκτο πέτρωμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ονομαστικής διαμέτρου 54mm και λόγο διαμέτρου/ύψους 1:2 σε πλευρικές πιέσεις 0-70 MPa με τη βοήθεια της τυποποιημένης τριαξονικής κυψέλης Hoek.

Στον πίνακα 4.2.2 δίνονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές τριαξονικής και ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης.

Πίνακας 4.2.2. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης ερυθρού ψαμμίτη SST

A/A	Κωδικός δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 [MPa]	Αξονική τάση σ_1 [MPa]	Γωνία θραύσης θ [°]	Παραμέ- σνουσα τάση σ_r [MPa]	Πτώση τάσης $\sigma_1 - \sigma_r$	Δείκτης ψαθυ- ρότητας σ_1 / σ_r	Ογκιμό- τητα [%]	Μέτρο Ελαστι- κότητας E_{50} [GPa]
1	SST8	0	18						
2	SST13	0	20						
3	SST14	0	30						
4	SST22	0	15					0,7%	2,0
5	SST31	0	21					0,8%	2,7
6	SST3	5	40						
7	SST11	10	70						
8	SST29	10	71	25	50	21,3	1,4	1,6%	5,6
9	SST6	15	90						
10	SST20	15	67	20	65	2,1	1,0	1,4%	4,0
11	SST5	20	102						
12	SST27	20	115	30	80	35,0	1,4	1,3%	11,0
13	SST2	25	125						
14	SST4	25	135	35	105	29,6	1,3	1,6%	10,7
15	SST26	25	144	25	112	32,0	1,3	1,6%	11,2
16	SST9	30	150						
17	SST23	30	169	30	120	49,2	1,4	1,5%	14,7
18	SST7	35	183	30	145	37,8	1,3	1,9%	12,8
19	SST10	40	170						
20	SST28	40	161	30	140	21,0	1,2	1,6%	13,0
21	SST19	45	170	35	144	26,0	1,2	2,5%	7,9
22	SST30	45	192						
23	SST32	45	189	30	172	17,3	1,1	2,0%	12,4
24	SST12	50	229	30	188	40,8	1,2	2,1%	13,0
25	SST25	50	213	30	187	26,0	1,1	2,3%	13,9
26	SST17	55	238	40	210	28,4	1,1	2,3%	14,5
27	SST1	60	180						
28	SST24	60	236	30	222	13,8	1,1	1,9%	17,8
29	SST16	65	265	30	238	27,1	1,1	2,6%	15,2
30	SST15	70	268	30	250	17,8	1,1	2,2%	16,9
31	SST18	70	238	30	213	25,0	1,1	2,3%	17,0
32	SST21	70	248	30	212	36,0	1,2	2,0%	17,3
Μέση τιμή:						27,0	1,2	1,8%	
Τυπική απόκλιση:						10,9	0,1	0,4%	4,9

Τα πλήρη διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται στο σχήμα 4.2.7. Η τιμή που αναγράφεται σε κάθε καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη πλευρική πίεση.



Σχήμα 4.2.7. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης ερυθρού ψαμμίτη SST

Με βάση τα αποτελέσματα φαίνεται ότι από την αύξηση της πλευρικής πίεσης:

(α) η αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη αντοχή (peak) από $\sigma_1=21\text{MPa}$ (μέση τιμή 5 δοκιμών) σε ανεμπόδιστη θλίψη ($\sigma_3=0\text{MPa}$) αυξάνεται βαθμιαία μέχρι $\sigma_1=268\text{MPa}$ για $\sigma_3=70\text{MPa}$. Η παραμένουσα αντοχή αυξάνεται από 50MPa για $\sigma_3=10\text{MPa}$ σε 250MPa για $\sigma_3=70\text{MPa}$.

(β) η συμπεριφορά αλλάζει από ψαθυρή σε όλκιμη. Ο δείκτης ψαθυρότητας, οριζόμενος ως ο λόγος μέγιστης και παραμένουσας αντοχής μεταβάλλεται από 1,4 για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 1,1 για πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες από $\sigma_3=40\text{MPa}$.

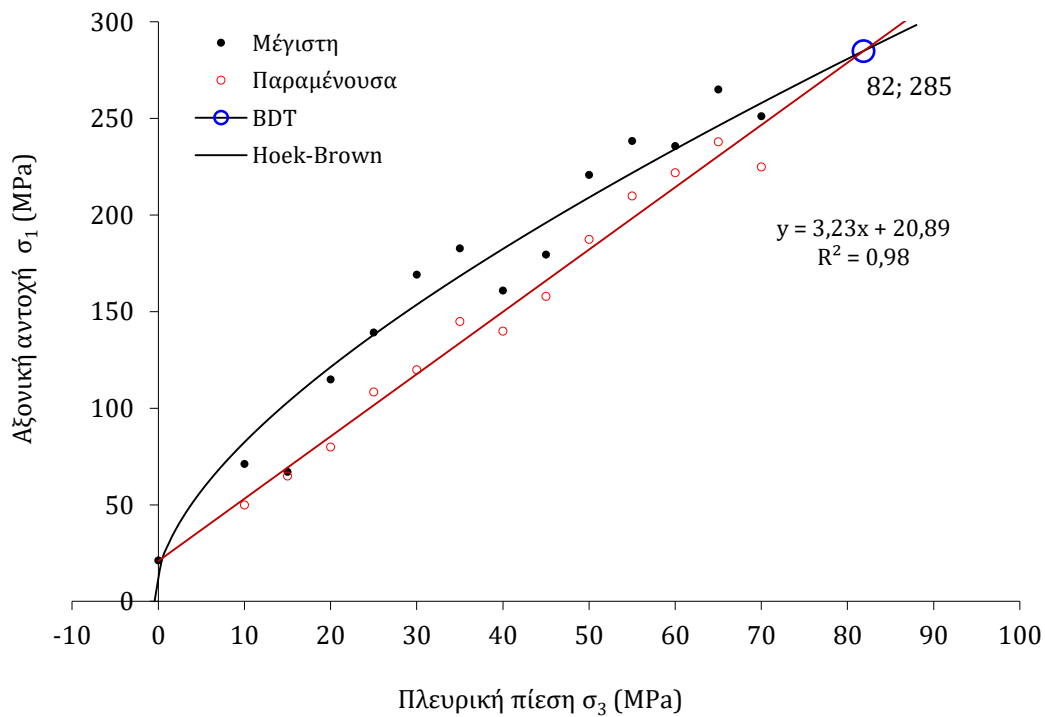
(γ) η όλκιμότητα (ικανότητα μεγάλης παραμόρφωσης χωρίς θραύση) αυξάνεται σημαντικά. Για $\sigma_3=0\text{MPa}$ 1,0%, σε 2,9% για $\sigma_3=70\text{MPa}$ (σχήμα 4.2.11β)

(δ) η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή έχει μέση τιμή $26,8\text{MPa}$ και τυπική απόκλιση $11,6\text{MPa}$.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

(ε) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται βαθμιαία από 2,7GPa σε 17,8GPa (σχήμα 4.2.10γ)

Η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά φαίνεται να συμβαίνει σε πλευρική πίεση κοντά την τιμή των 70MPa. Προσεγγιστικά εκτιμάται από την πλευρική πίεση στην οποία η μέγιστη αξονική αντοχή γίνεται ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή, δηλαδή από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Για την παραμένουσα αντοχή χρησιμοποιείται η σχέση $\sigma_1 = m\sigma_3 + b$. Για την περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown για το σύνολο των δοκιμών (2018).



Σχήμα 4.2.8. Διάγραμμα Πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής ερυθρού ψαμίτη SST

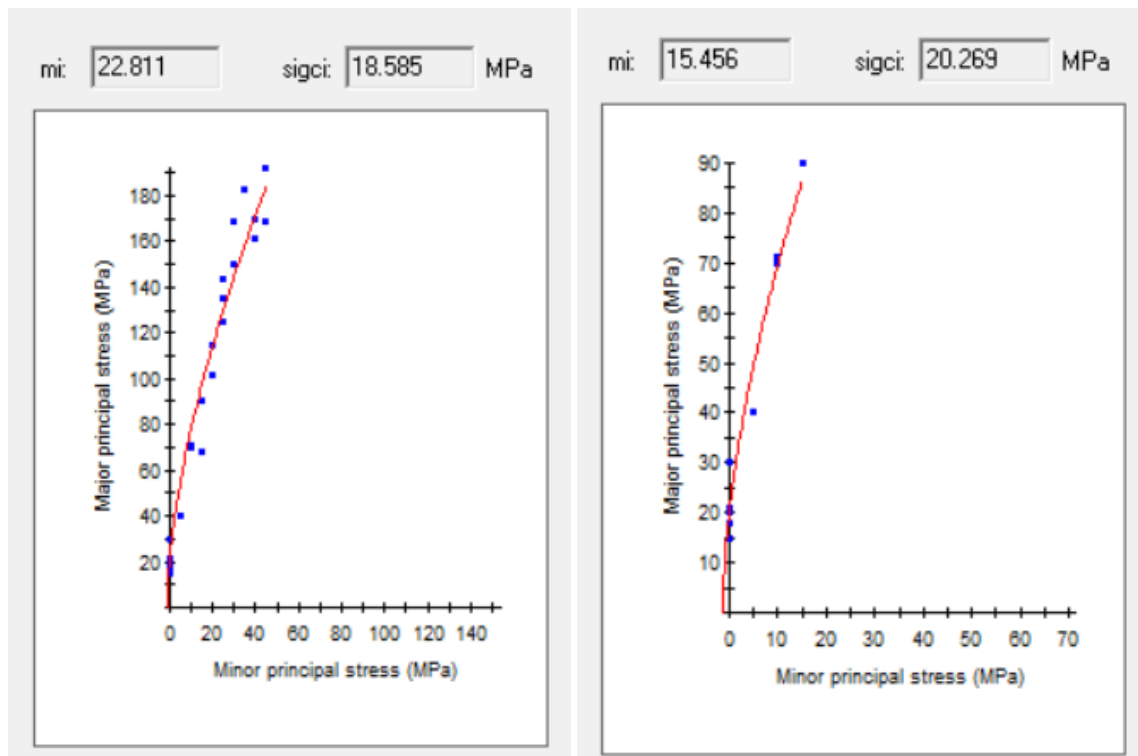
Στο σχήμα 4.2.8 παριστάνεται η μεταβολή της μέγιστης και παραμένουσας αξονικής αντοχής σ_1 συναρτήσει της πλευρικής πίεσης.

Για τις τιμές της πλευρικής πίεσης ($\sigma_3=0$ έως 65 MPa), η αστοχία του δοκιμίου γίνεται με ψαθυρό τρόπο, γεγονός που αποτυπώνεται από την πτώση που παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή κάθε δοκιμής (μικρή διαφορά τιμών μέγιστης και παραμένουσας αντοχής). Σε

πλευρική πίεση $\sigma_3=70$ MPa αρχίζει να παρατηρείται η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη περιοχή καθώς η καμπύλη παρουσιάζει μια σταθερή τιμή ίση με την μέγιστη τάση.

Τα πειραματικά στοιχεία για τη μέγιστη και την παραμένουσα αντοχή δίνονται με κυκλικά μαύρα και κόκκινα σύμβολα αντίστοιχα. Με μαύρη συμπαγή γραμμή παριστάνεται το κριτήριο H-B, όπως προέκυψε από το σύνολο των πειραματικών στοιχείων (όλο το εύρος του σ_3 0-70MPa), η οποία αντιστοιχεί σε $\sigma_{ci} = 18,6$ MPa και $m_i=22,8$. Οι παράμετροι του κριτηρίου H-B όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που αντιστοιχούσαν στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$, είναι $\sigma_{ci}=20,3$ MPa και $m_i=15,5$ (σχήμα 4.2.9).

Για το σημείο μετάβασης προκύπτει $\sigma_3=82$, $\sigma_1=285$. Ο λόγος $\sigma_1/\sigma_3=82/285$ προκύπτει ίσος με 3,5, τιμή λίγο μικρότερη από την κλίση της ευθείας Mogi (4,3).

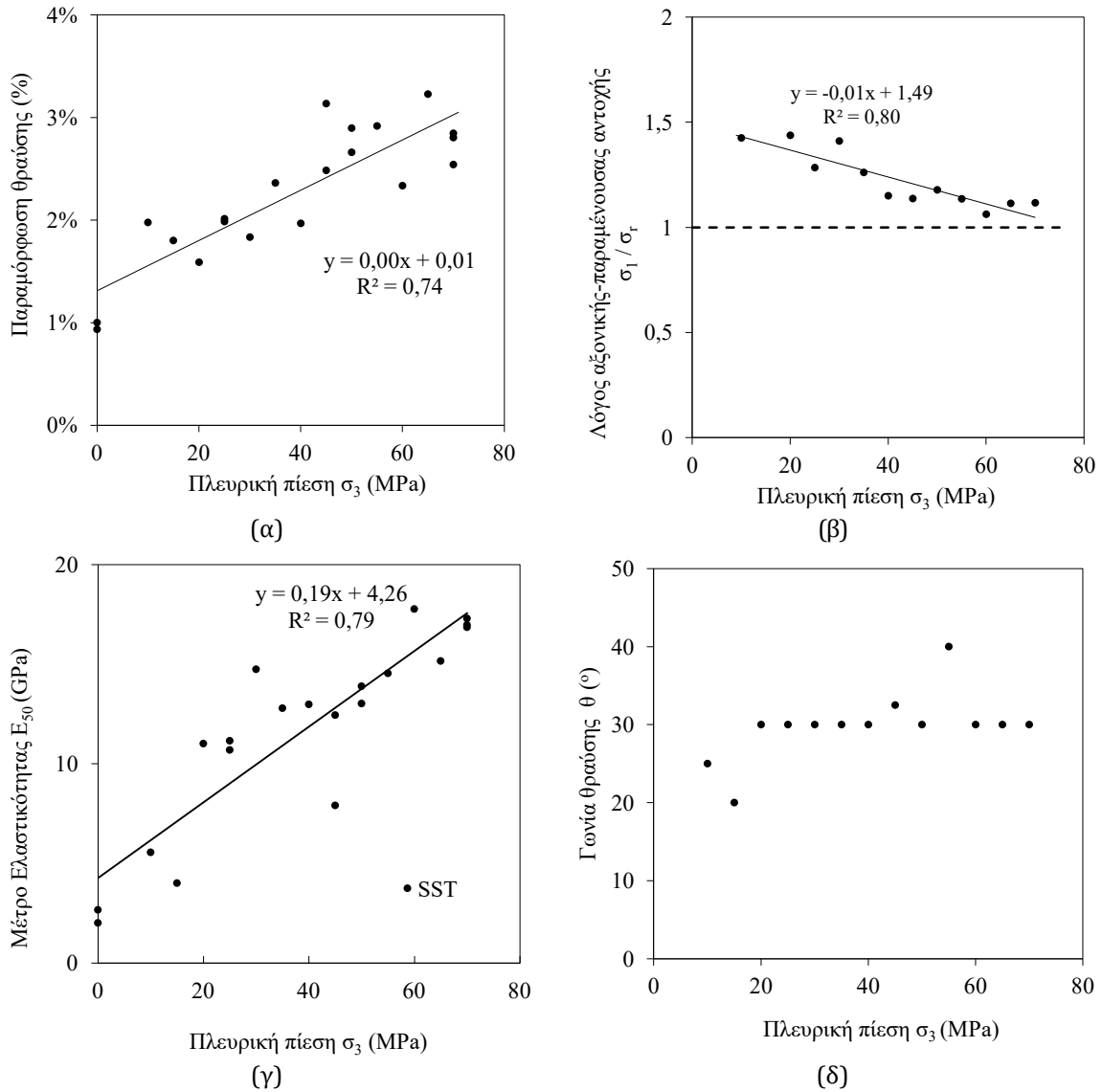


Σχήμα 4.2.9. Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον ερυθρό ψαμμίτη SST.

Η τιμή του m_i στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$ βρίσκεται μέσα στα προβλεπόμενα όρια για τον ψαμμίτη που δίνονται από τους Marininos & Hoek (2000) (πίνακας 2.8)

Η τιμή του σ_{ci} προέκυψε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και είναι 21,0MPa (μέση τιμή 5 δοκιμών).

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

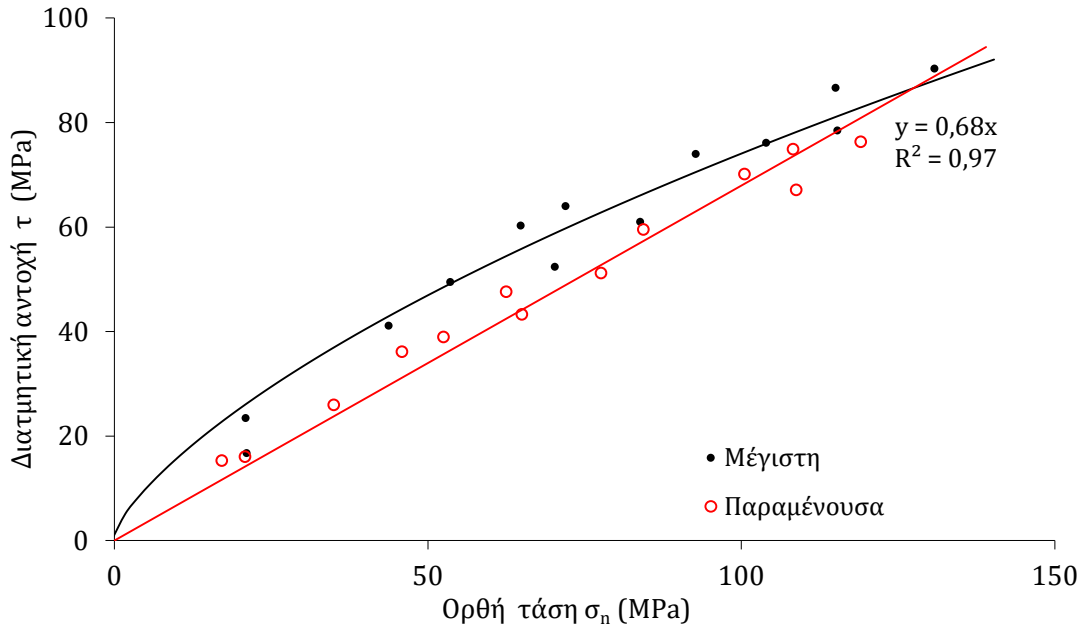


Σχήμα 4.2.10. Διαγράμματα πλευρικής πίεσης σ_3 και: (α) Παραμόρφωσης θραύσης, (β) Λόγου μέγιστης αξονικής /παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρου Ελαστικότητας, (δ) Γωνίας θραύσης για τον ερυθρό ψαμμίτη SST.

Με βάση την υπόθεση Orowan (1960) σχέση (1) η γωνία τριβής που αντιστοιχεί στην BDT προκύπτει ίση με $33,6^\circ$.

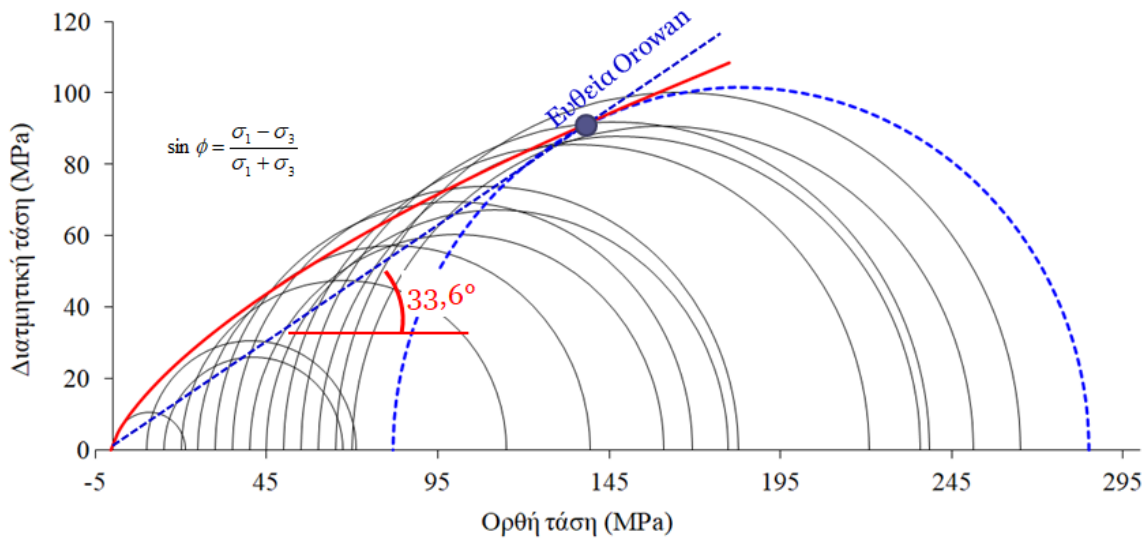
Στο σχήμα 4.2.11 παριστάνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ορθή τάση που προσδιορίστηκε με βάσει τις σχέσεις (2) και (3).

Με βάση τη γραμμή τάσης $\tau=0,68\sigma$ της παραμένουσας αντοχής προκύπτει γωνία τριβής $\varphi=34,2^\circ$.



Σχήμα 4.2.11. Διάγραμμα Ορθής τάσης σ_n - Διατμητικής αντοχής τ ερυθρού ψαμμίτη SST.

Στο σχήμα 4.2.12 παριστάνεται το διάγραμμα των κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek - Brown με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.



Σχήμα 4.2.12. Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές ερυθρού ψαμμίτη SST. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

iii) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)

Για το άρρηκτο πέτρωμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ονομαστικής διαμέτρου 54mm και λόγο διαμέτρου/ύψος 1:2 σε πλευρικές πιέσεις 0-70 MPa με τη βοήθεια της τυποποιημένης τριαξονικής κυψέλης Hoek.

Στον πίνακα 4.2.3 δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης

Πίνακας 4.2.3. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.

A/A	Κωδικός δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 [MPa]	Αξονική τάση σ_1 [MPa]	Γωνία θραύσης θ [°]	Παραμέ- νουσα τάση σ_r [MPa]	Πτώση τάσης $\sigma_1 - \sigma_r$	Δείκτης ψαθυρό- τητας σ_1 / σ_r	Ογκιμό- τητα [%]	Μέτρο Ελαστικό- τητας E_{50} [GPa]
1	SLST4	0	60		0			0,7%	8,0
2	SLST8	20	130	20	90	40,1	1,4	1,8%	9,2
3	SLST1	30	171	25	120	51,0	1,4	2,8%	8,8
4	SLST7	50	170	20	160	9,7	1,1	2,2%	8,8
5	SLST5	70	232	30	225	7,1	1,0	5,1%	11,7
6	SLST2	70	356	30	280	76,0	1,3	3,6%	12,6
7	SLST6	70	248	25	220	28,0	1,1	4,1%	12,1
8	SLST3	70	296	30	250	46,0	1,2	2,8%	10,1
Μέση τιμή:						36,8	1,2	2,9%	10,2
Τυπική απόκλιση:						24,2	0,2	1,4%	1,8

Τα πλήρη διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται στο σχήμα 4.2.13. Η τιμή που αναγράφεται σε κάθε καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη πλευρική πίεση σε MPa. Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης:

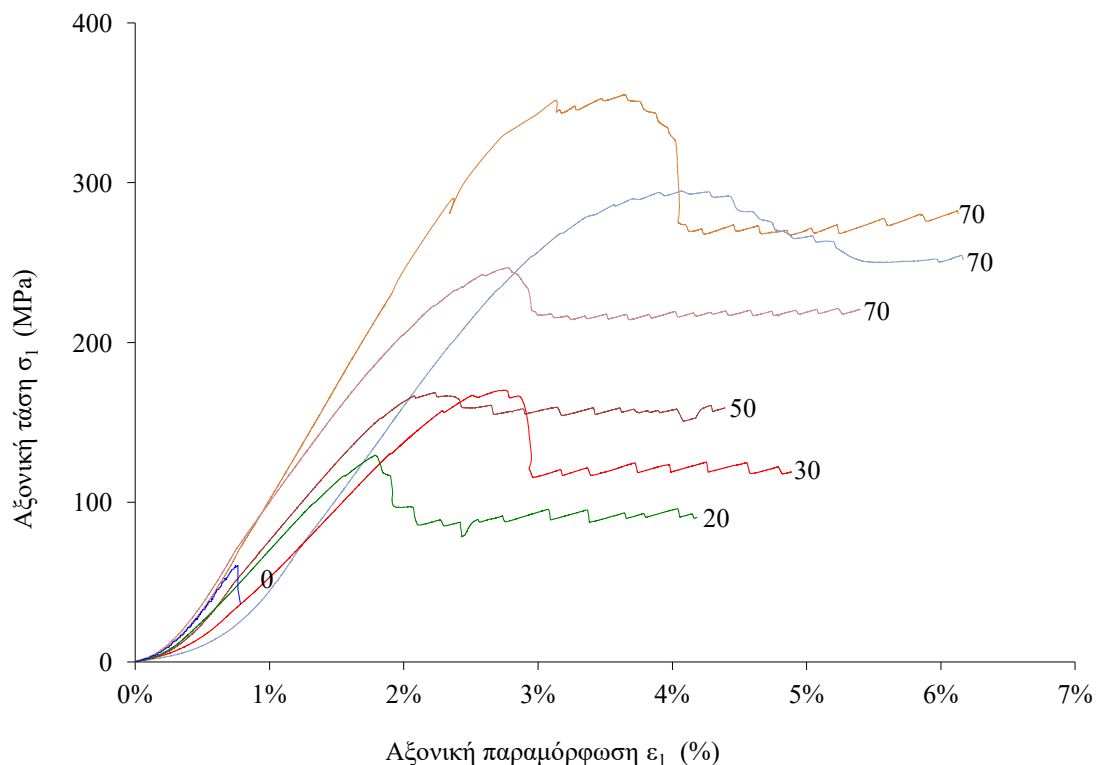
(α) η αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη αντοχή (peak) από $\sigma_1=60\text{MPa}$ σε ανεμπόδιστη θλίψη ($\sigma_3=0\text{MPa}$) αυξάνεται βαθμιαία μέχρι $\sigma_1=283\text{MPa}$ (μέση τιμή τεσσάρων δοκιμών) για $\sigma_3=70\text{MPa}$. Η παραμένουσα αντοχή αυξάνεται από 90MPa για $\sigma_3=20\text{MPa}$ σε 280MPa για $\sigma_3=70\text{MPa}$.

(β) η συμπεριφορά αλλάζει από ψαθυρή σε όλκιμη. Ο δείκτης ψαθυρότητας, οριζόμενος ως ο λόγος μέγιστης και παραμένουσας αντοχής μεταβάλλεται από 1,4 για $\sigma_3=20\text{MPa}$ σε 1,1 για πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες από $\sigma_3=50\text{MPa}$

(γ) η ολκιμότητα (ικανότητα μεγάλης παραμόρφωσης χωρίς θραύση) αυξάνεται από 0,7% για $\sigma_3=0\text{MPa}$ σε 5,1% για $\sigma_3=70\text{MPa}$ (σχήμα 4.2.15β).

(δ) η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή έχει μέση τιμή 35MPa και τυπική απόκλιση $17,7\text{MPa}$.

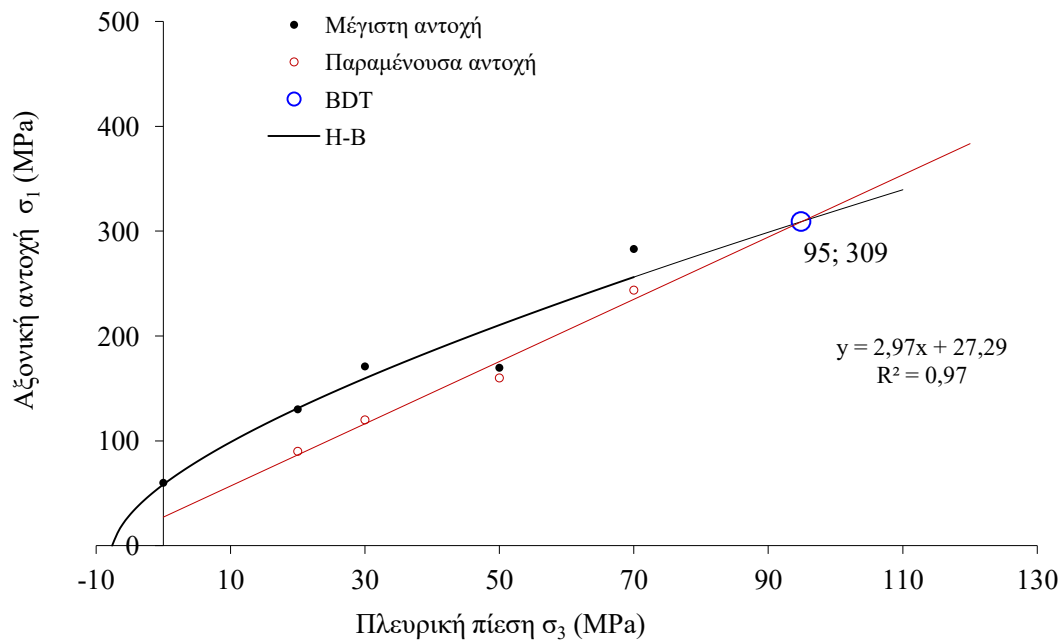
(ε) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται βαθμιαία από $8,0\text{GPa}$ σε $12,6\text{GPa}$ (σχήμα 4.2.15γ)



Σχήμα 4.2.13. Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης- αξονικής τάσης για την λεπτόκοκκο ψαμίτη SLST

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 70MPa και δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς. Προσεγγιστικά εκτιμάται από την πλευρική πίεση στην οποία η μέγιστη αξονική αντοχή γίνεται ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή, δηλαδή από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Για την παραμένουσα αντοχή χρησιμοποιείται η σχέση $\sigma_1 = m\sigma_3 + b$. Για την περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown για το σύνολο των δοκιμών (2018). Για το σημείο μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά προκύπτει $\sigma_3 = 95$, $\sigma_1 = 309$. Ο λόγος $\sigma_1/\sigma_3 = 309/95$ προκύπτει ίσος με 3,3, τιμή λίγο μικρότερη από την κλίση της ευθείας Mogi (4,3).

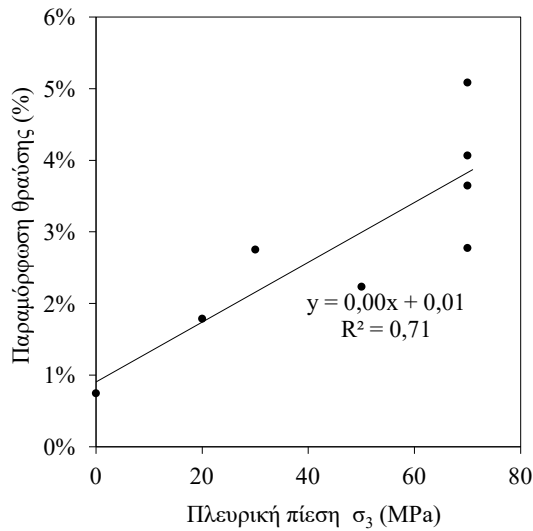


Σχήμα 4.2.14. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - αξονικής αντοχής για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST

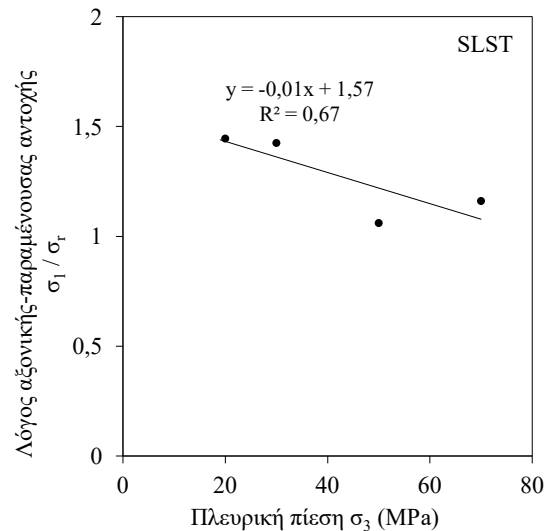
Για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης ($\sigma_3 = 0$ έως 70 MPa), η αστοχία του δοκιμίου γίνεται με ψαθυρό τρόπο, γεγονός που αποτυπώνεται από την απότομη πτώση της τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή κάθε δοκιμής (σαφής διαφορά τιμών μέγιστης και παραμένουσας αντοχής). Αυτό επιβεβαιώνεται και τη μορφή αστοχίας των δοκιμών. Όλα αστόχησαν με διατμητική θραύση - αστοχία κατά μήκος ενός επιπέδου - .

Στο σχήμα 4.2.14 παριστάνεται η μεταβολή της μέγιστης και παραμένουσας αξονικής αντοχής σ_1 συναρτήσει της πλευρικής πίεσης

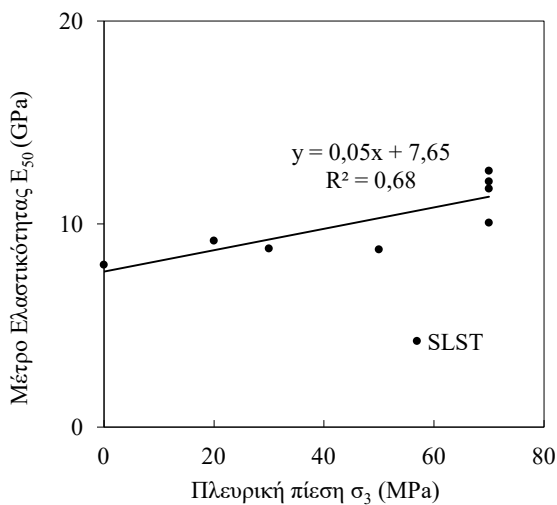
Με βάση την υπόθεση Orowan (1960) σχέση (4.1) η γωνία τριβής που αντιστοιχεί στην BDT προκύπτει ίση με $32,0^\circ$.



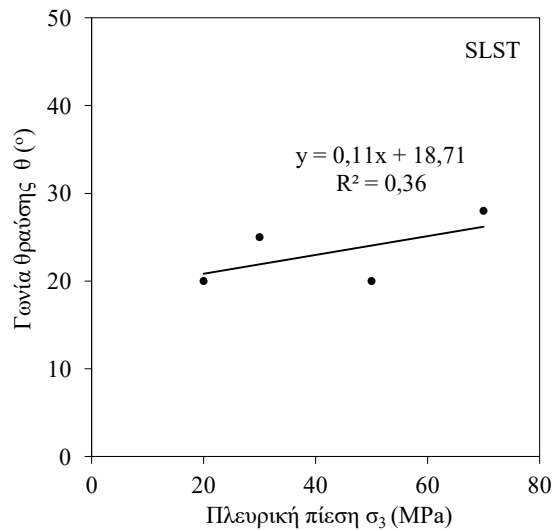
(α)



(β)



(γ)



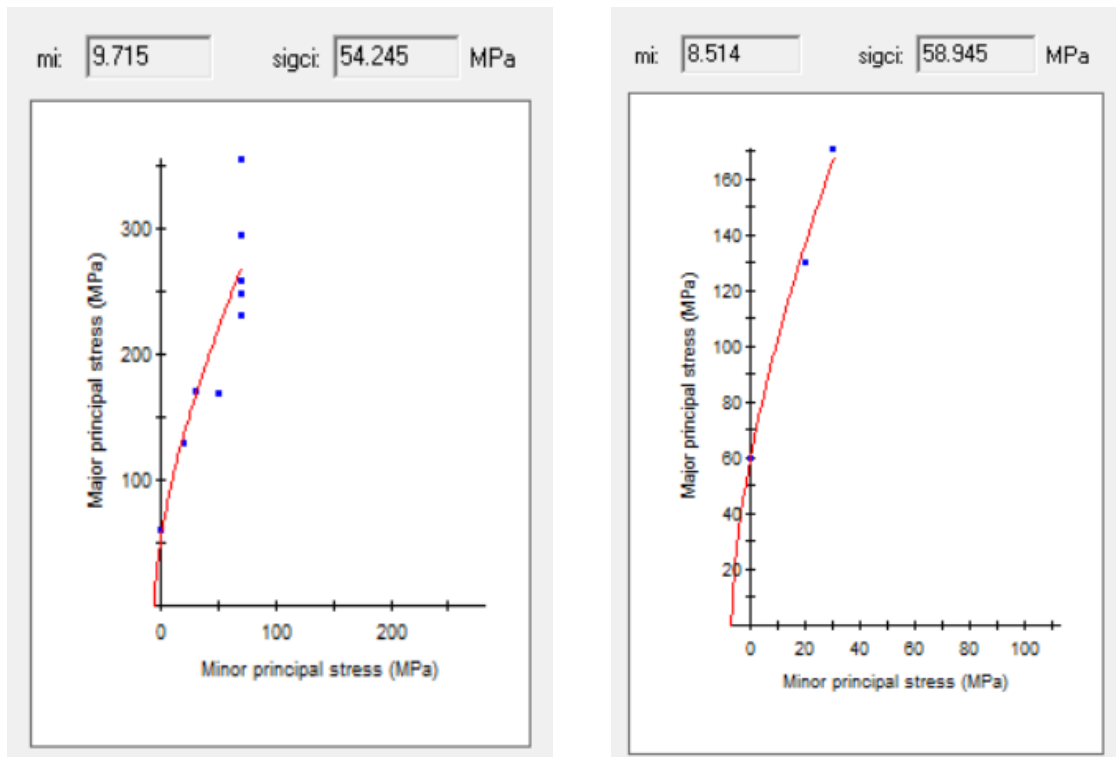
(δ)

Σχήμα 4.2.15. Διαγράμματα πλευρικής πίεσης σ_3 και (α) Παραμόρφωσης θραύσης, (β) Λόγου μέγιστης αξονικής /παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέρου Ελαστικότητας, (δ) Γωνίας θραύσης για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST.

Τα πειραματικά στοιχεία για τη μέγιστη και την παραμένουσα αντοχή δίνονται με κυκλικά μαύρα και κόκκινα σύμβολα αντίστοιχα. Με μαύρη συμπαγή γραμμή παριστάνεται το

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

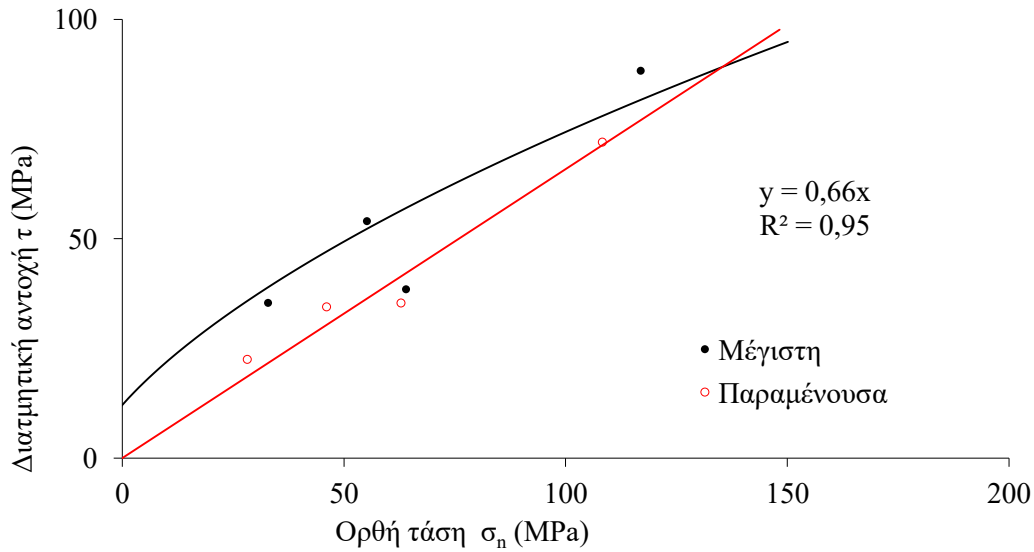
κριτήριο H-B, όπως προέκυψε από το σύνολο των πειραματικών στοιχείων (όλο το εύρος του σ_3 0-70MPa), η οποία αντιστοιχεί σε $\sigma_{ci} = 54,2$ MPa και $m_i=9,7$. Οι παράμετροι του κριτηρίου H-B όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που αντιστοιχούσαν στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$, είναι $\sigma_{ci} = 58,9$ MPa και $m_i = 8,5$ (σχήμα 4.2.16).



Σχήμα 4.2.16. Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον λεπτόκοκκο ψαμίτη SLST.

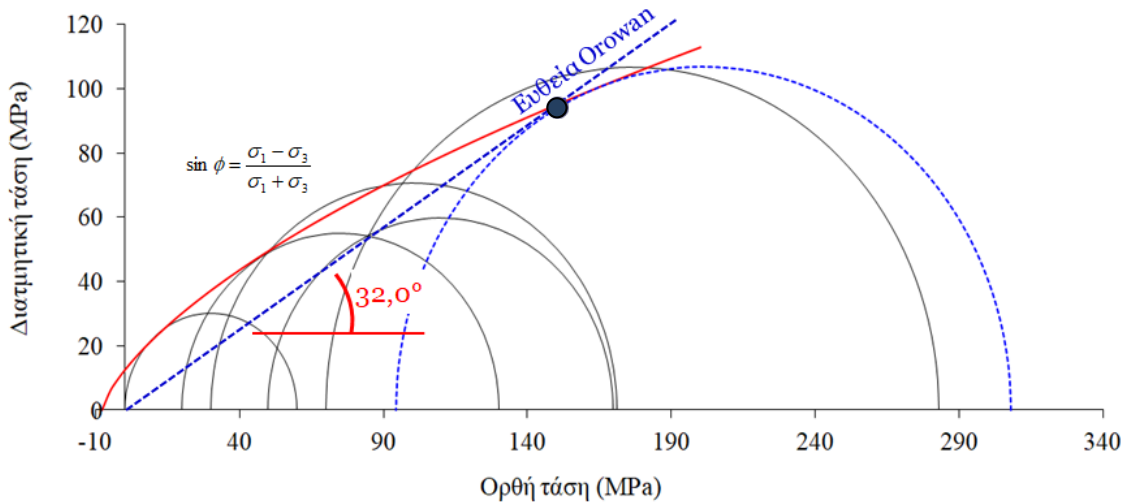
Στο σχήμα 4.2.17 παριστάνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ορθή τάση που προσδιορίστηκε με βάσει τις σχέσεις (4.2) και (4.3) .

Με βάση τη γραμμική τάσης $\tau=0,66\sigma$ της παραμένουσας αντοχής προκύπτει γωνία τριβής $\varphi=33,4^\circ$ (διαφορά $1,3^\circ$ σε σχέση με τη Orowan).



Σχήμα 4.2.17. Διάγραμμα ορθής τάσης σ_n - διατμητικής αντοχής τ , λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.

Στο σχήμα 4.2.18 παριστάνονται τα διαγράμματα των κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά



Σχήμα 4.2.18. Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη SLST. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

iv) Ασβεστόλιθος (GL)

Για το άρρηκτο πέτρωμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ονομαστικής διαμέτρου 54mm και λόγο διαμέτρου/ύψους 1:2 σε πλευρικές πιέσεις 0-70 MPa με τη βοήθεια της τυποποιημένης τριαξονικής κυψέλης Hoek.

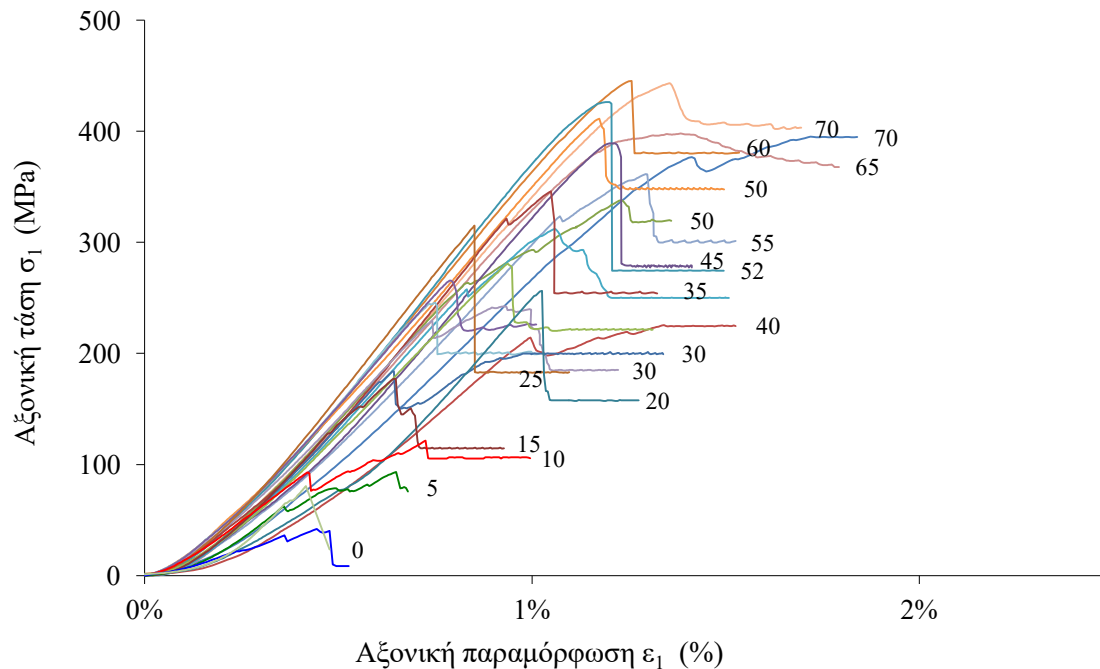
Στον Πίνακα 4.2.4 δίνονται οι τιμές των αποτελεσμάτων των δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης του ασβεστόλιθου GL

Πίνακας 4.2.4. Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης ασβεστόλιθου GL

A/A	Κωδικός δείγματος	Πλευρική πίεση	Αξονική τάση	Γωνία θραύσης	Παραμέ- νουσα τάση	Πτώση τάσης	Δείκτης ψαθυ- ρότητας	Ολκιμό- τητα	Μέτρο Ελαστι- κότητας
		σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	θ [°]	σ_r [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_r$	σ_1 / σ_r	[%]	E_{50} [GPa]
1	GL22	0	42					0,4%	10,5
2	GL23	0	80					0,5%	27,0
3	GL20	5	94	32	70	23,9	1,3	0,6%	25,9
4	GL7	10	121	15	100	21,5	1,2	0,6%	36,8
5	GL5	15	177	34	116	61,2	1,5	1,0%	35,7
6	GL14	20	256	24	150	106,3	1,7	0,9%	43,7
7	GL10	25	315	35	186	129,5	1,7	0,7%	36,1
8	GL29	25	281	30	200	81,2	1,4	1,0%	42,8
9	GL2	30	204	34	198	5,6	1,0	1,2%	28,4
10	GL28	30	266	29	220	45,9	1,2	1,2%	40,5
11	GL25	30	243	40	182	61,0	1,3	1,3%	39,6
12	GL27	32	246	30	200	46,0	1,2	1,2%	44,1
13	GL9	35	346	25	255	91,5	1,4	1,3%	43,0
14	GL3	40	228	33	226	2,2	1,0	1,6%	34,3
15	GL24	40	312	27	235	77,3	1,3	0,9%	34,0
16	GL11	45	390	20	250	139,9	1,6	0,8%	39,1
17	GL8	50	338	22	300	38,5	1,1	1,1%	38,6
18	GL26	50	412	20	333	78,7	1,2	1,2%	39,2
19	GL15	52	427	24	275	151,8	1,6	1,3%	35,9
20	GL32	55	362	35	306	55,9	1,2	1,4%	39,3
21	GL6	60	445	28	380	65,3	1,2	0,5%	33,9
22	GL31	65	398	35	363	35,3	1,1	0,9%	36,2
23	GL21	70	400	25	393	7,4	1,0	0,8%	39,2
24	GL30	70	443	30	405	38,4	1,1	1,4%	40,9
		Μέση τιμή:				62,0	1,3	1,0%	36,0
		Τυπική απόκλιση:				42,3	0,2	0,3%	7,3

Τα πλήρη διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται στο σχήμα 4.2.19.

Η τιμή δίπλα σε κάθε καμπύλη στα διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) δείχνει την αντίστοιχη πλευρική πίεση σε MPa.



Σχήμα 4.2.19. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον ασβεστόλιθο GL.

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης:

(α) η αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη αντοχή (peak) από $\sigma_1=61\text{MPa}$ (μέση τιμή δύο δοκιμών) σε ανεμπόδιση θλίψη ($\sigma_3=0\text{MPa}$) αυξάνεται βαθμιαία μέχρι $\sigma_1=422\text{MPa}$ (μέση τιμή δύο δοκιμών) για $\sigma_3=70\text{MPa}$. Αντίστοιχα η παραμένουσα αντοχή αυξάνεται από 70MPa για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 399MPa για $\sigma_3=70\text{MPa}$.

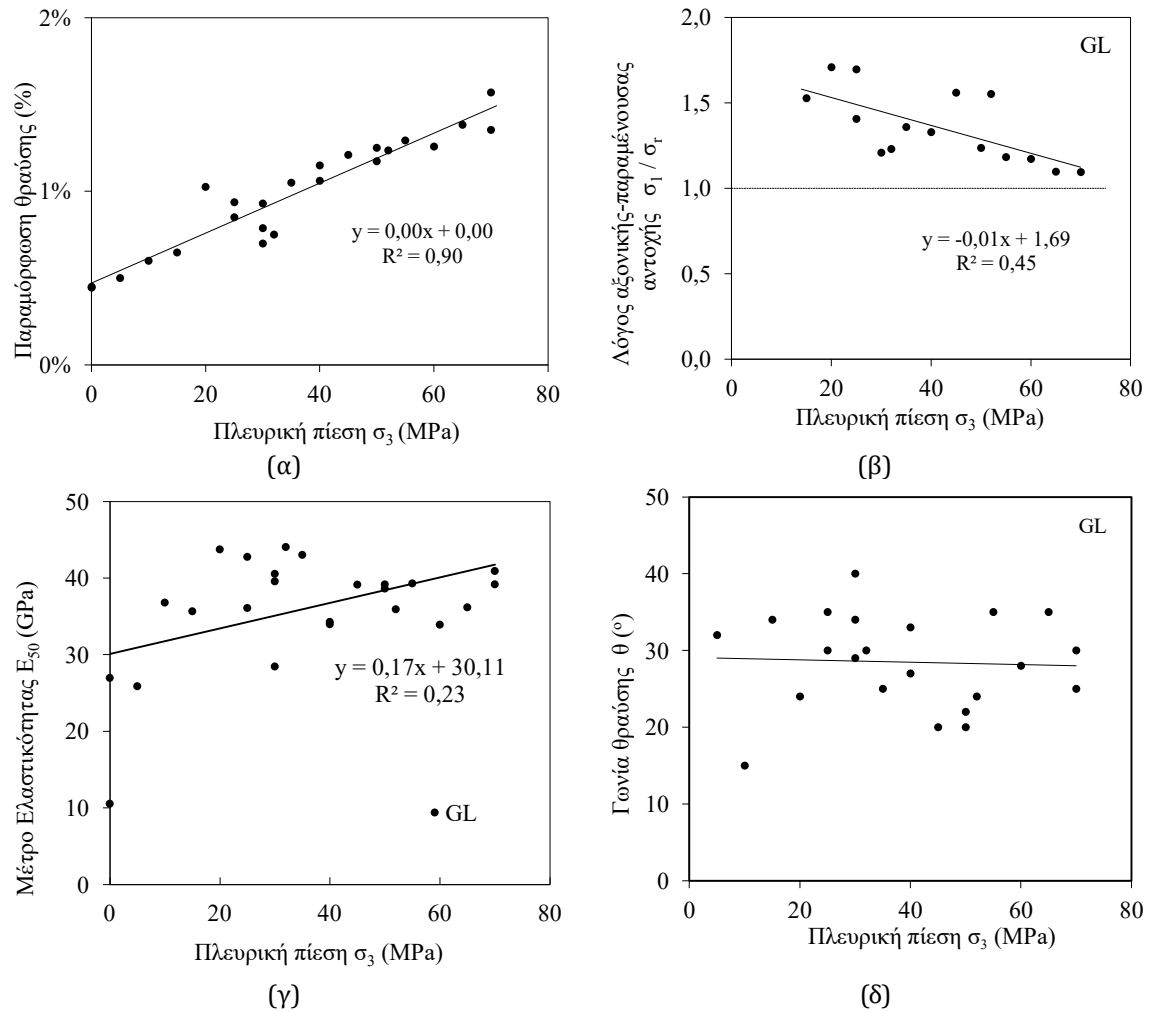
(β) η συμπεριφορά αλλάζει από ψαθυρή σε όλκιμη. Ο δείκτης ψαθυρότητας, οριζόμενος ως ο λόγος μέγιστης και παραμένουσας αντοχής μεταβάλλεται από 1,5 για $\sigma_3=15\text{MPa}$ σε 1,2 για πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες από $\sigma_3=55\text{MPa}$

(γ) η ολκιμότητα (ικανότητα μεγάλης παραμόρφωσης χωρίς θραύση) αυξάνεται σημαντικά. Για $\sigma_3=0\text{MPa}$ 0,4%, σε 1,4% για $\sigma_3=70\text{MPa}$ (σχήμα 4.2.20β)

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

(δ) η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή έχει μέση τιμή 62,0MPa και τυπική απόκλιση 42,0MPa.

(ε) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται βαθμιαία από 18,7GPa (μέση τιμή των δύο μονοαξονικών δοκιμών) σε 44GPa (σχήμα 4.2.20γ)

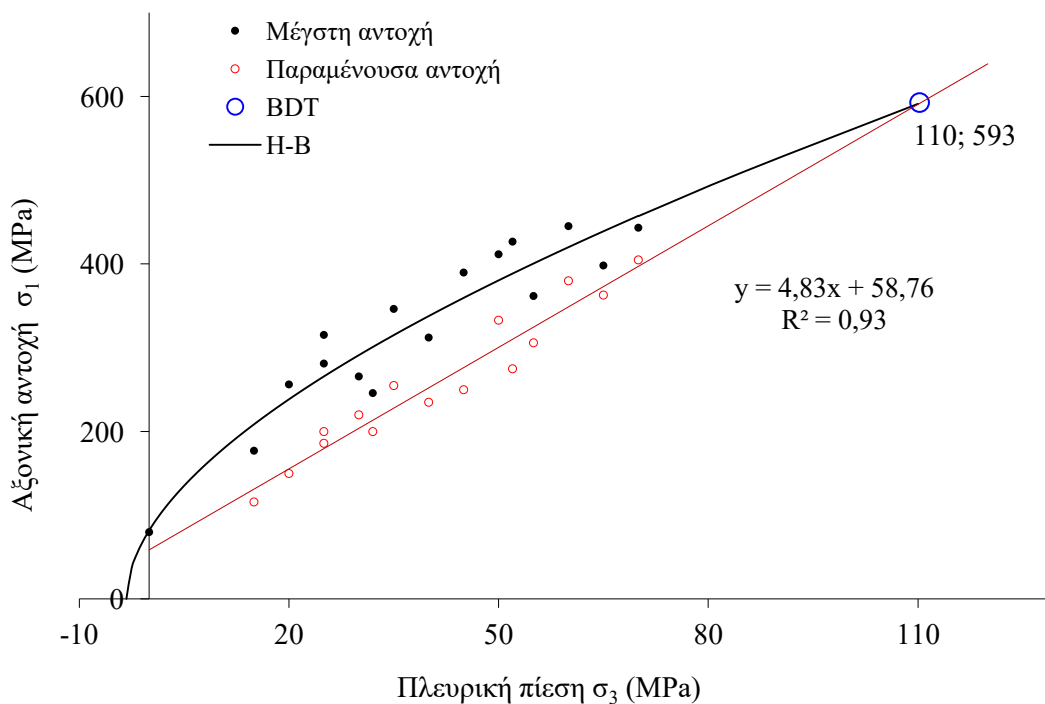


Σχήμα 4.2.20. Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης με (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β) Λόγο αξονικής-παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης για τον ασβεστόλιθο GL.

Η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 70MPa και δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς. Προσεγγιστικά εκτιμάται από την πλευρική πίεση στην οποία η μέγιστη αξονική αντοχή γίνεται ίση με την

παραμένουσα διατμητική αντοχή, δηλαδή από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

Για την παραμένουσα αντοχή χρησιμοποιείται η σχέση $\sigma_1 = m\sigma_3 + b$. Για την περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown για το σύνολο των δοκιμών (2018). Για το σημείο μετάβασης από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά προκύπτει $\sigma_3 = 110$, $\sigma_1 = 593$. Ο λόγος $\sigma_1/\sigma_3 = 593/110$ προκύπτει ίσος με 5,4, τιμή μεγαλύτερη από την κλίση της ευθείας Mogi (4,3).



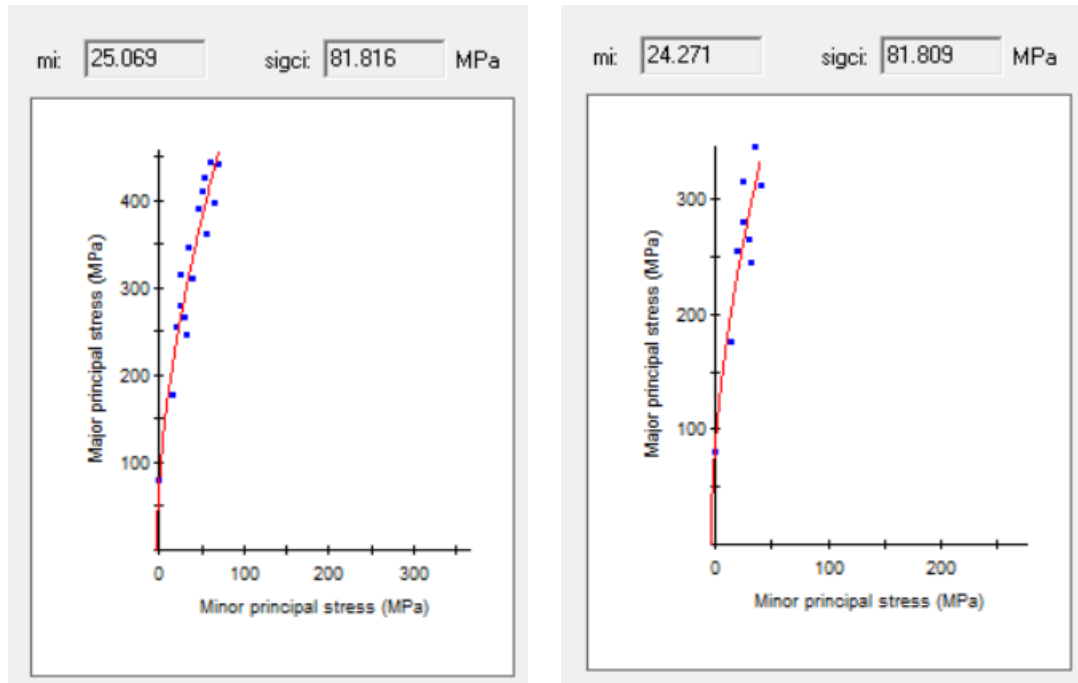
Σχήμα 4.2.21. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής για τον ασβεστόλιθο GL.

Στο σχήμα 4.2.21 παριστάνεται η μεταβολή της αξονικής αντοχής σ_1 συναρτήσει της πλευρικής πίεσης.

Τα πειραματικά στοιχεία για τη μέγιστη και την παραμένουσα αντοχή δίνονται με κυκλικά και τετραγωνικά σύμβολα αντίστοιχα. Με μαύρη συμπαγή γραμμή παριστάνεται το κριτήριο H-B, όπως προέκυψε από το σύνολο των πειραματικών στοιχείων (όλο το εύρος

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

του σ_3 0-70MPa), η οποία αντιστοιχεί σε $\sigma_{ci} = 81,8$ MPa και $m_i = 25,1$. Οι παράμετροι του κριτηρίου H-B όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που αντιστοιχούσαν στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0.5\sigma_{ci}$, είναι $\sigma_{ci} = 81,8$ MPa και $m_i = 24,3$ (σχήμα 4.2.22).

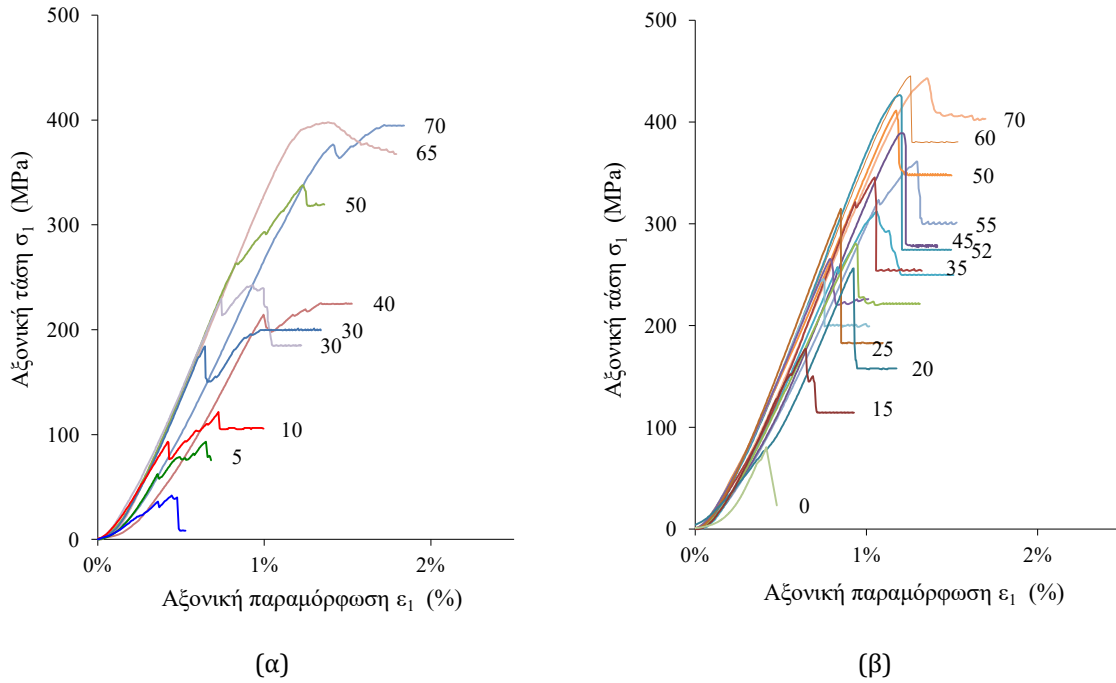


Σχήμα 4.2.22. Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον ασβεστόλιθο GL.

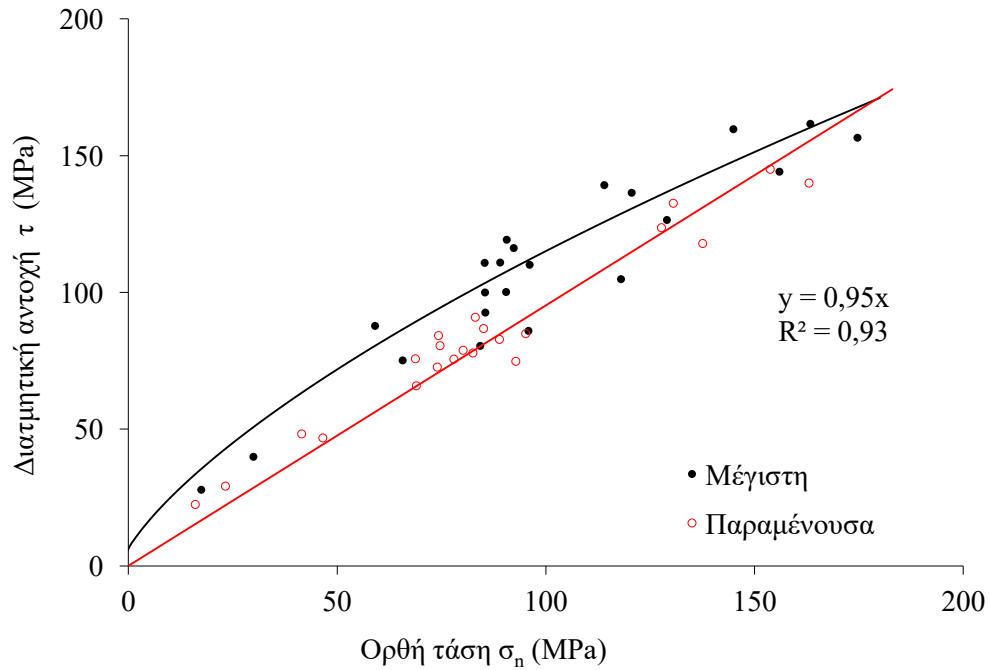
Η τιμή του σ_{ci} είναι ή μέση τιμή των τιμών των αντίστοιχων τιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (42,0 και 80,0MPa).

Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει δύο διακριτές περιπτώσεις αστοχίας του δοκιμίου κατά τη θραύση σε όλο το εύρος των πλευρικών πιέσεων (σχήμα 4.2.23)

Στην μία περίπτωση σε όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης ($\sigma_3=0$ έως 70 MPa), η αστοχία του δοκιμίου γίνεται με ψαθυρό τρόπο, γεγονός που αποτυπώνεται από την απότομη πτώση της τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή κάθε δοκιμής (σαφής διαφορά τιμών μέγιστης και παραμένουσας αντοχής) (σχήμα 4.2.23β). Ενώ στην άλλη περίπτωση υπάρχει μια μικρή πτώση και στη συνέχεια μια σταθερή τάση ως προς της αξονική παραμόρφωση (σχήμα 4.2.23α). Στη δεύτερη περίπτωση είναι πιθανόν στο δείγμα να προϋπάρχει κάποιο επίπεδο θραύσης και έτσι η μέγιστη τάση να αντιστοιχεί στην παραμένουσα αντοχή. Θεωρήθηκαν λοιπόν πιο αξιόπιστες οι τιμές από τη θραύση με εμφανή μέγιστη τιμή για τον υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής του πετρώματος.



Σχήμα 4.2.23. Διαγράμματα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον ασβεστόλιθο GL για τις δύο διακριτές συμπεριφορές θραύσης



Σχήμα 4.2.24. Διάγραμμα Ορθής τάσης-Διατμητικής αντοχής για τον ασβεστόλιθο GL

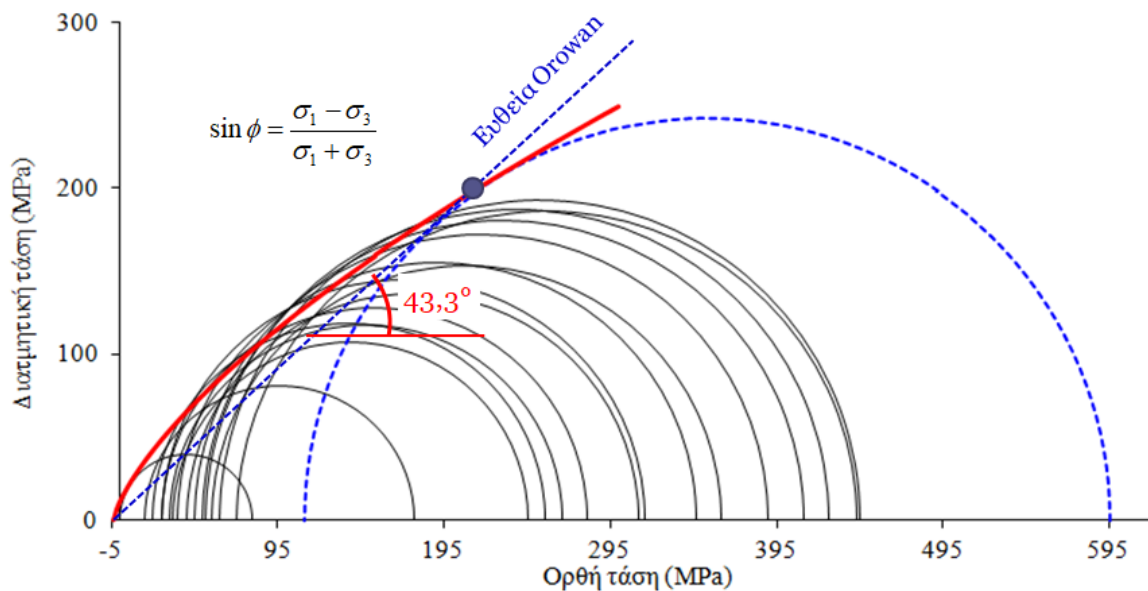
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Με βάση την υπόθεση Orowan (1960) σχέση (1) η γωνία τριβής που αντιστοιχεί στην BDT είναι ίση με $43,7^\circ$

Στο σχήμα 4.2.24 παριστάνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ορθή τάση που προσδιορίστηκε με βάσει τις σχέσεις (2) και (3)

Με βάση τη γραμμή τάσης $\tau=0,95\sigma$ της παραμένουσας αντοχής προκύπτει γωνία τριβής $\varphi=43,6^\circ$

Στο σχήμα 4.2.25 παριστάνεται το διάγραμμα των κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek - Brown με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.



Σχήμα 4.2.25. Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές με ψαθυρή συμπεριφορά ασβεστόλιθου GL. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.


 ν) Σερπεντινίτης (GP)

Για το άρρηκτο πέτρωμα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ονομαστικής διαμέτρου 54mm και λόγο διαμέτρου/ύψους 1:2 σε πλευρικές πιέσεις 0-70 MPa με τη βοήθεια της τυποποιημένης τριαξονικής κυψέλης Hoek.

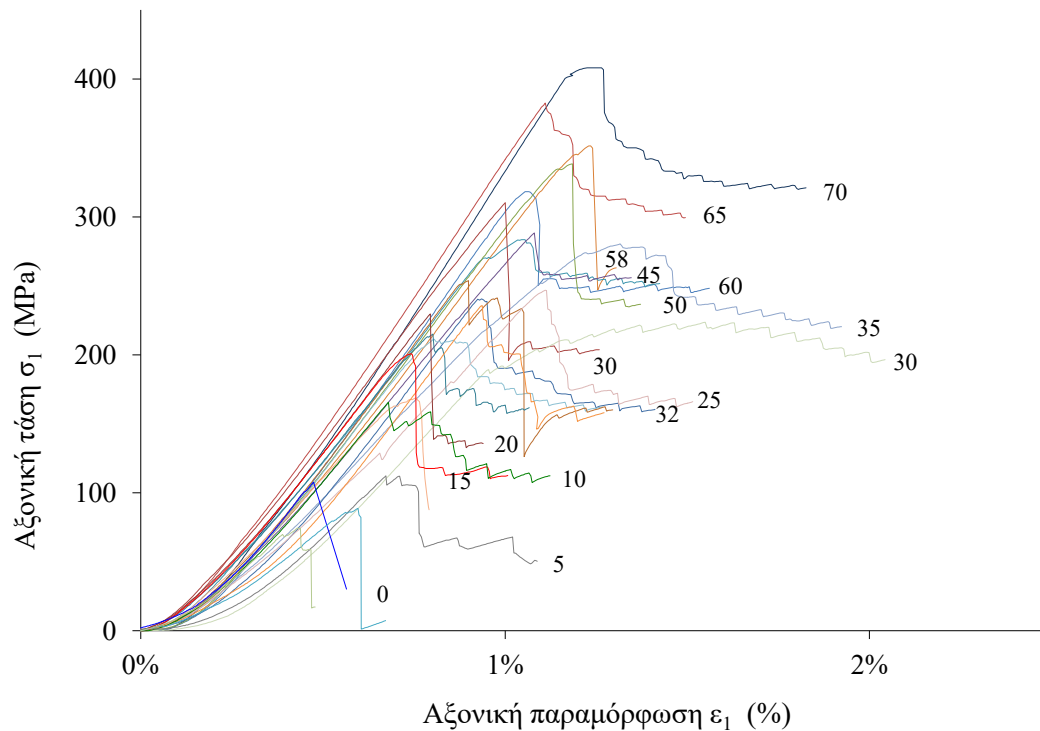
Στον πίνακα 4.2.5 δίνονται οι τιμές των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης του σερπεντινίτη GP.

Πίνακας 4.2.5. Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σερπεντινίτη

A/A	Κωδικός δείγματος	Πλευρική πίεση	Αξονική τάση	Γωνία θραύσης	Παραμέ- νουσα τάση	Πτώση τάσης	Δείκτης ψαθυρό- τητας	Ολκιμό- τητα	Μέτρο Ελαστικό- τητας
		σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	θ [°]	σ_r [MPa]	$\sigma_1-\sigma_r$	σ_1/σ_r	[%]	E_{50} [GPa]
1	GP17	0	108					0,8%	36,7
2	GP25	0	89					0,5%	24,9
3	GP27	0	75					0,3%	28,6
4	GP21	5	113	15	60	52,6	1,9	0,5%	30,1
5	GP10	10	166	23	110	56,3	1,5	0,5%	37,6
6	GP13	15	201	33	118	83,0	1,7	0,6%	41,4
7	GP8	20	230	20	136	94,4	1,7	0,8%	41,8
8	GP22	20	237	25	150	86,7	1,6	0,7%	42,6
9	GP12	25	216	28	160	55,8	1,3	0,6%	40,2
10	GP15	25	170	28	160	10,0	1,1	0,6%	34,7
11	GP30	25	247	28	160	87,0	1,5	0,9%	22,5
12	GP29	30	225	30	180	45,0	1,3	1,2%	35,8
13	GP26	30	255	22	160	94,7	1,6	1,0%	43,3
14	GP6	30	212	32	160	52,0	1,3	0,6%	42,6
15	GP18	32	241	38	162	79,2	1,5	0,7%	41,8
16	GP16	35	311	23	203	107,9	1,5	0,8%	44,4
17	GP28	35	281	10	212	68,7	1,3	1,1%	35,9
18	GP9	40	306	25	215	90,5	1,4	1,1%	44,9
19	GP7	45	289	43	255	34,0	1,1	0,9%	40,1
20	GP4	50	339	20	236	103,1	1,4	0,9%	44,4
21	GP2	55	284	35	250	34,2	1,1	0,8%	41,3
22	GP23	55	323	33	283	40,0	1,1	1,5%	28,7
23	GP14	58	352	27	247	105,1	1,4	1,0%	43,3
24	GP20	60	319	38	248	70,9	1,3	0,8%	46,1
25	GP1	65	383	18	300	83,2	1,3	0,9%	48,7
26	GP11	70	407	23	310	97,4	1,3	1,0%	49,2
27	GP24	70	325	22	260	64,9	1,2	0,9%	42,8
28	GP3	70	284	31	250	34,0	1,1	0,8%	40,8
29	GP19	70	347	30	318	28,7	1,1	1,0%	42,1
Μέση τιμή:						67,7	1,4	0,8%	39,2
Τυπική απόκλιση:						27,4	0,2	0,2%	6,7

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Τα πλήρη διαγράμματα αξονικής τάσης (σ_1) - αξονικής παραμόρφωσης (ϵ_1) για διάφορες τιμές της πλευρικής πίεσης δίνονται στο σχήμα 4.2.26.



Σχήμα 4.2.26. Διάγραμμα Αξονικής παραμόρφωσης - Αξονικής τάσης για τον σερπεντινίτη GP

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης:

(α) η αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη αντοχή (peak) από $\sigma_1=91\text{MPa}$ (μέση τιμή τριών δοκιμών) σε ανεμπόδιση θλίψη ($\sigma_3=0\text{MPa}$) αυξάνεται βαθμιαία μέχρι $\sigma_1=407\text{MPa}$ για $\sigma_3=70\text{MPa}$. Η παραμένουσα αντοχή αυξάνεται από 60MPa για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 318MPa για $\sigma_3=70\text{MPa}$.

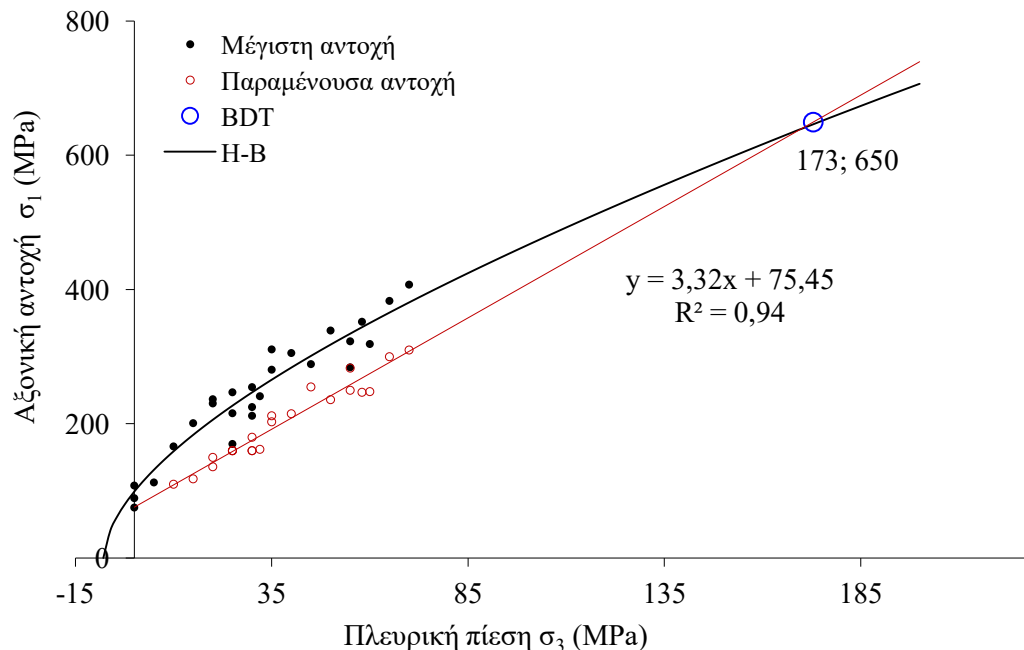
(β) ο δείκτης ψαθυρότητας μεταβάλλεται από 1,9 για $\sigma_3=5\text{MPa}$ σε 1,2 για πλευρικές πιέσεις μεγαλύτερες από $\sigma_3=45\text{MPa}$

(γ) η ολκιμότητα αυξάνεται από 0,3% για $\sigma_3=0\text{MPa}$ σε 1,0% για $\sigma_3=70\text{MPa}$

(δ) η πτώση τάσης που παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή έχει μέση τιμή $67,7\text{MPa}$ και τυπική απόκλιση $27,4\text{MPa}$.

(ε) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται βαθμιαία από 24 GPa σε 39,4GPa (σχήμα 4.2.28γ)

Η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 70MPa και δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς. Προσεγγιστικά εκτιμάται από την πλευρική πίεση στην οποία η μέγιστη αξονική αντοχή γίνεται ίση με την παραμένουσα διατμητική αντοχή, δηλαδή από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Για την παραμένουσα αντοχή χρησιμοποιείται η σχέση $\sigma_1 = m\sigma_3 + b$. Για την περιβάλλουσα μέγιστης αντοχής χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown για το σύνολο των δοκιμών (2018). Για το σημείο μετάβασης από την ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά προκύπτει $\sigma_3 = 173$, $\sigma_1 = 650$. Ο λόγος $\sigma_1/\sigma_3 = 650/173$ προκύπτει ίσος με 3,76, τιμή λίγο μικρότερη από την κλίση της ευθείας Mogi (4,3).



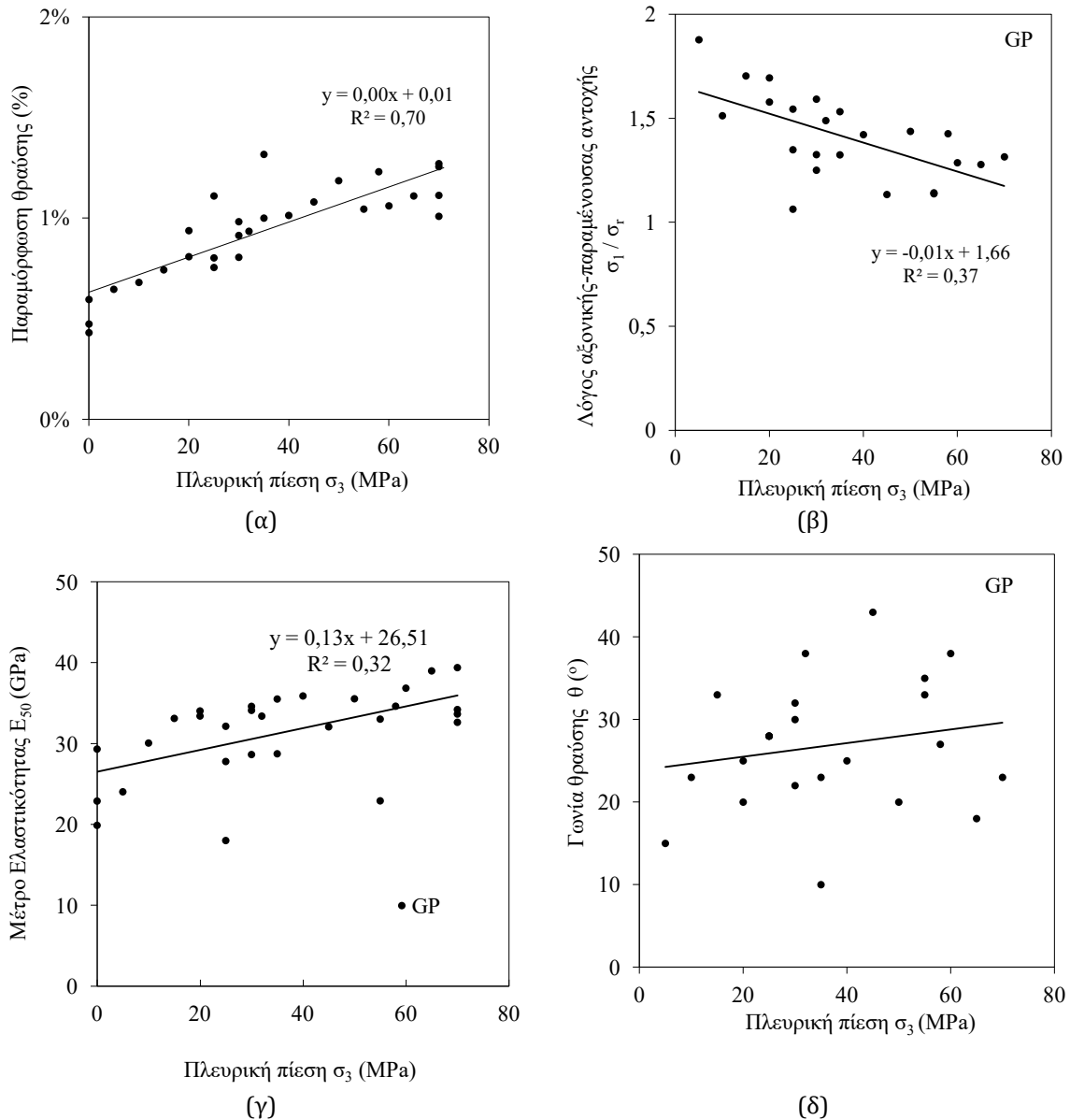
Σχήμα 4.2.27. Διάγραμμα πλευρικής πίεσης - Αξονικής αντοχής για τον σερπεντινίτη GP

Στο σχήμα 4.2.27 παριστάνεται η μεταβολή της αξονικής αντοχής σ_1 συναρτήσει της πλευρικής πίεσης.

Για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης ($\sigma_3 = 0$ έως 70 MPa), η αστοχία του δοκιμίου γίνεται με ψαθυρό τρόπο, γεγονός που αποτυπώνεται από την απότομη πτώση της τάσης που

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

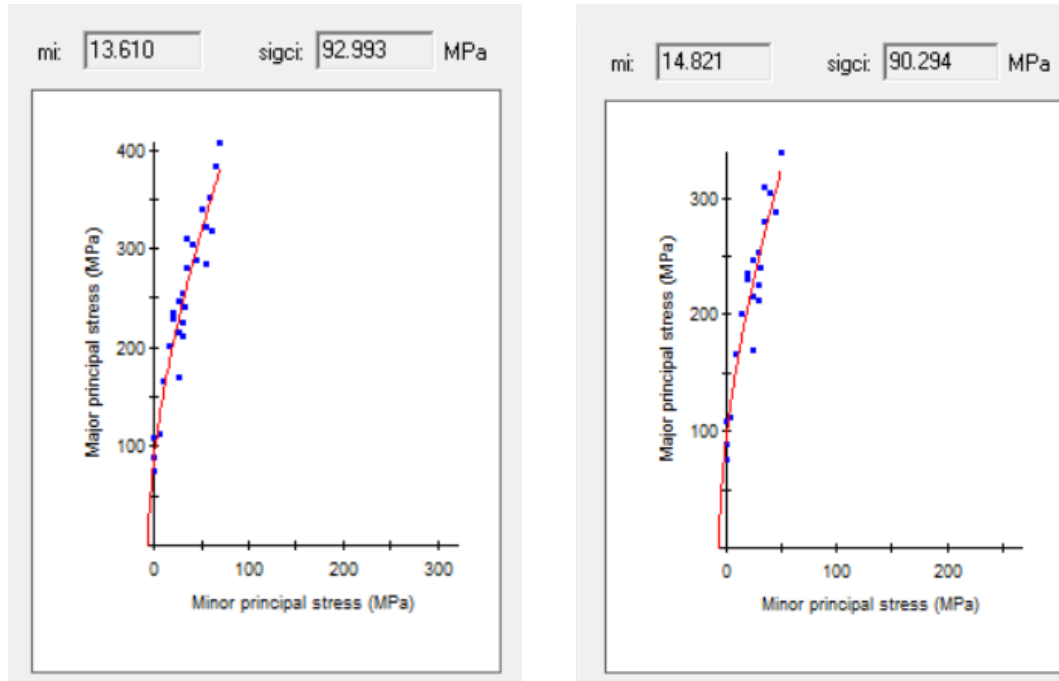
παρατηρείται μετά τη μέγιστη τιμή κάθε δοκιμής (σαφής διαφορά τιμών μέγιστης και παραμένουσας αντοχής). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον τρόπο αστοχίας των δοκιμών. Όλα αστόχησαν με διατμητική θραύση – αστοχία κατά μήκος ενός επιπέδου-.



Σχήμα 4.2.28. Διαγράμματα Πλευρικής πίεσης με (α) Παραμόρφωσης θραύσης (β) Λόγο αξονικής-παραμένουσας αντοχής, (γ) Μέτρο Ελαστικότητας (δ) Γωνίας θραύσης για τον σερπεντινίτη GP.

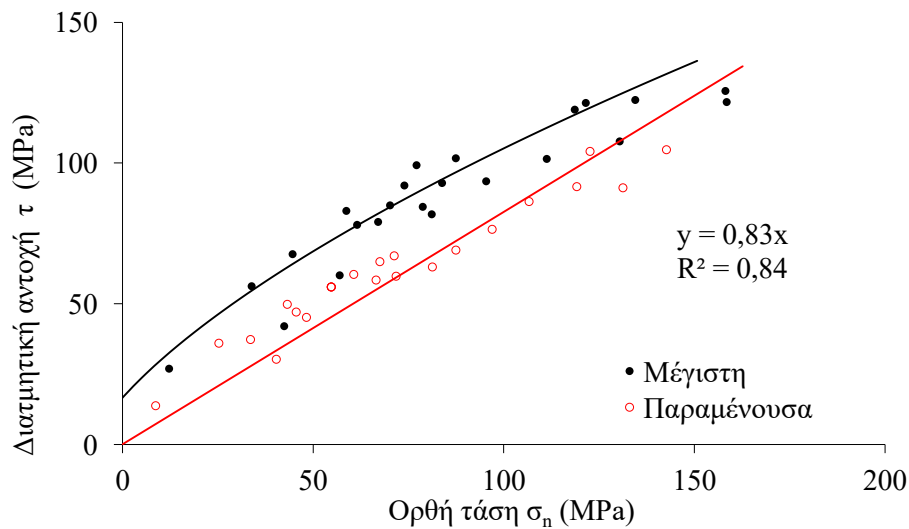
Τα πειραματικά στοιχεία για τη μέγιστη και την παραμένουσα αντοχή δίνονται με κυκλικά μαύρα και κόκκινα σύμβολα αντίστοιχα. Με μαύρη συμπαγή γραμμή παριστάνεται το κριτήριο H-B, όπως προέκυψε από το σύνολο των πειραματικών στοιχείων (όλο το εύρος

του σ_3 0-70MPa), η οποία αντιστοιχεί σε σ_{ci} =92,9 MPa και m_i =13,6. Οι παράμετροι του κριτηρίου H-B όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που αντιστοιχούσαν στο εύρος $0 \leq \sigma_3 \leq 0,5\sigma_{ci}$, είναι σ_{ci} =90,2 MPa και m_i =14,8 (σχήμα 4.2.29).



Σχήμα 4.2.29. Υπολογισμός συντελεστή m_i και σ_{ci} από RocData για τον σερπεντινίτη GP.

Η τιμή του σ_{ci} 98,9 MPa είναι περίπου ίση με τη μέση τιμή των αντίστοιχων τιμών που προέκυψαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (75,0, 89,0 και 108,0MPa).



Σχήμα 4.2.30. Διάγραμμα Ορθής τάσης-Διατμητικής αντοχής για τον Σερπεντινίτη GP

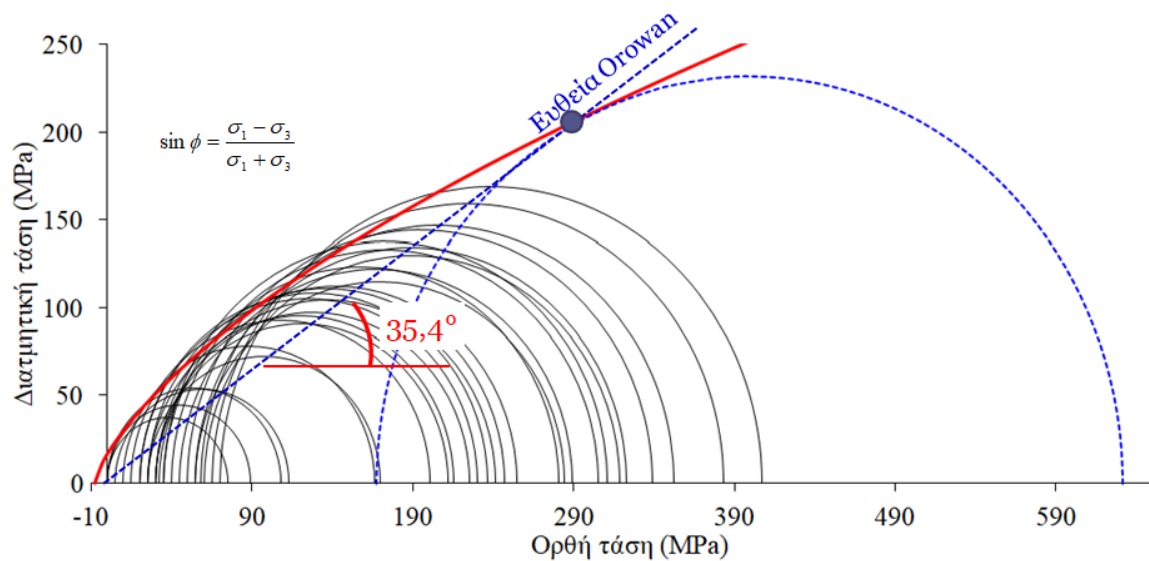
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Με βάση την υπόθεση Orowan (1960) σχέση (1) η γωνία τριβής που αντιστοιχεί στην BDT προκύπτει ίση με $35,4^\circ$ (σχήμα 4.2.14).

Στο σχήμα 4.2.30 παριστάνεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ορθή τάση που προσδιορίστηκε με βάσει τις σχέσεις (2) και (3).

Με βάση τη γραμμή τάσης $\tau=0,83\sigma$ της παραμένουσας αντοχής προκύπτει γωνία τριβής $\varphi=39,6^\circ$ (διαφορά $4,2^\circ$ σε σχέση με τη Orowan).

Στο σχήμα 4.2.31 παριστάνεται το διάγραμμα των κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek - Brown με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.



Σχήμα 4.2.31. Διαγράμματα κύκλων Mohr για όλες τις δοκιμές σερπεντινίτη GP. Με κόκκινο χρώμα η περιβάλλουσα με βάση το RocData και με μπλε διακεκομμένη γραμμή ο κύκλος που αντιστοιχεί στην μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και η ευθεία Orowan.

4.3. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

Το πρόγραμμα δοκιμών περιλαμβάνει ικανό αριθμό δοκιμών ώστε να καλυφθεί το εύρος των πλευρικών πιέσεων 0-2,5 MPa. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε αρχικά σε διάτμηση υπό την επίδραση μόνο του ιδίου βάρους του πάνω κομματιού του δοκιμίου (dead load, dl) και στη συνέχεια σε ορθές τάσεις από 25 έως 2500 kPa.

Για κάθε δοκίμιο εφαρμόστηκαν 4 έως 8 διαφορετικά στάδια ορθής τάσης. Σε κάθε στάδιο, μετά τη δοκιμή, τα δυο μισά κάθε δοκιμίου αφαιρούνταν από τη συσκευή, φωτογραφίζονταν, καθαρίζονταν και μετρούνταν η τραχύτητα σε τρία σημεία (μεθοδολογία δοκιμής διάτμησης Κεφ. 3), και επανατοποθετούνταν στην αρχική τους θέση για το επόμενο στάδιο.

Η σειρά εφαρμογής των ορθών τάσεων επιλέχτηκε ώστε η ορθή τάση που εφαρμόζεται στην αρχή, να είναι διαφορετική για να υπάρχουν ανέπαφες επιφάνειες σε κάθε ορθή.

i) μή Τεφρός ψαμμίτης (GS)

Για τον τεφρό ψαμμίτη (GS) διαμορφώθηκαν επτά (7) δοκίμια ασυνεχιών, από τα οποία έξι (6) δείγματα τεχνητών που διαμορφώθηκαν με αστοχία διάρρηξης όπως περιγράφεται στο Κεφ. 3 και 1 δείγμα επίπεδης επιφάνειας που διαμορφώθηκε με κοπή με δισκοπρίονο, τα οποία υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 44 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών.

Στον πίνακα 4.3.1. δίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας των ασυνεχιών κάθε δείγματος και τα στάδια εφαρμογής ορθής τάσης με την αντίστοιχη ονομαστική ορθή τάση.

Τα πλήρη διαγράμματα διατμητικής τάσης (τ) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$) για τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης δίνονται στο σχήμα 4.3.1α μέχρι 4.3.6α. Με την αύξηση της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη (peak) αντοχή αυξάνεται από 0,125 MPa για $\sigma=0,10$ MPa (Δοκ. GS7) μέχρι 1,9 MPa για $\sigma=2,0$ MPa (Δοκ. GS4).

Πίνακας 4.3.1. Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης τεφρού ψαμμίτη GS

A/A	Κωδικός δείγματος	Ασυνέχεια	Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Επιφάνεια [mm ²]	Στάδιο - Ορθή τάση [kPa]							
						1o	2o	3o	4o	5o	6o	7o	8o
1	GS1	Τεχνητή	73,7	57,4	4.232	7,5	100	250	500	1000	2000		
2	GS2	Τεχνητή	87,6	71,5	6.265	5	25	50	100	250	500	1000	2000
3	GS3	Τεχνητή	95,0	68,0	6.460	750	13	1350	2000	100	250		
4	GS4	Τεχνητή	97,0	79,0	7.663	7	500	1000	1500	2000	100	250	
5	GS5	Τεχνητή	73,0	67,0	4.891	16	1000	2080	2500	100	500		
6	GS7	Τεχνητή	94,0	80,0	7.520	11	2000	100	250	500	1000		
7	GS_flat	Κοπή-Επίπεδη	108,5	77,5	8.406	10	100	250	500	1000			

Στα σχήματα 4.3.1β μέχρι 4.3.6β. δίνονται τα διαγράμματα ορθής μετατόπισης (Δv) – ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις ορθές τάσεις υπάρχει μια αρχική συμπίεση/συστολή του δοκιμίου, μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή, που οφείλεται στο κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ή/και στην ελαστική συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων. Ακολουθεί διαστολή (αύξηση του Δv) με ρυθμό αυξανόμενο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της διατμητικής μετατόπισης και στη συνέχεια μείωση. Η σχετική διατμητική μετατόπιση στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός διαστολής (που αντιστοιχεί στη στιγμιαία γωνία διαστολής) παρατηρείται κατά τη μέγιστη αντοχή.

Στα σχήματα 4.3.1γ μέχρι 4.3.6γ δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n . Οι αριθμοί που εμφανίζονται δίπλα από κάθε σημείο αντιστοιχούν στο στάδιο της κάθε ορθής τάσης.

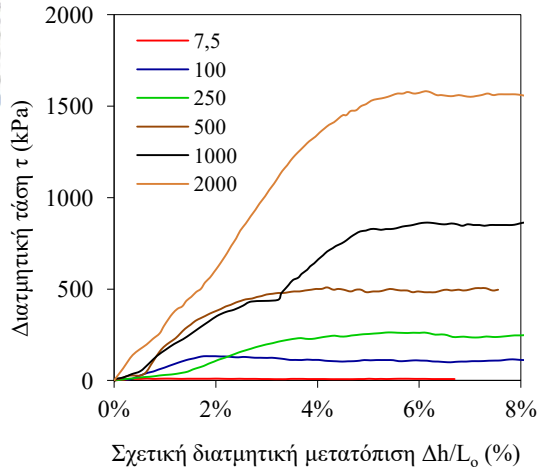
Η ανηγμένη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.1δ μέχρι 4.3.6δ

Στα σχήματα 4.3.1ε μέχρι 4.3.6ε δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών της διατμητικής δυσκαμψίας $k_{s(50)}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n . Η δυσκαμψία $k_{s(50)}$ προσδιορίζεται από την κλίση της καμπύλης της διατμητικής τάσης στο 50% της μέγιστης τιμής.

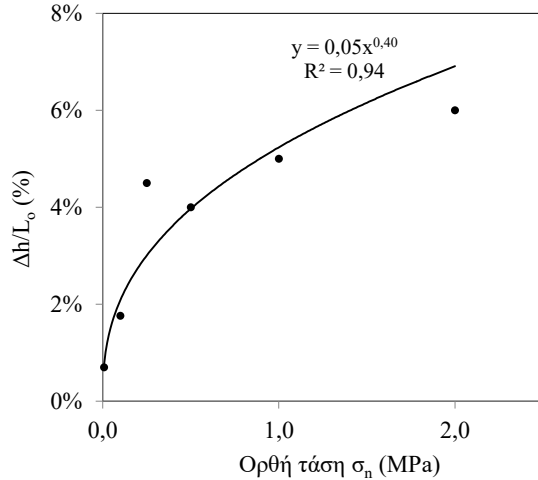
Στα σχήματα 4.3.1στ μέχρι 4.3.6στ φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της μη διαστολικής διατμητικής αντοχής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n .

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

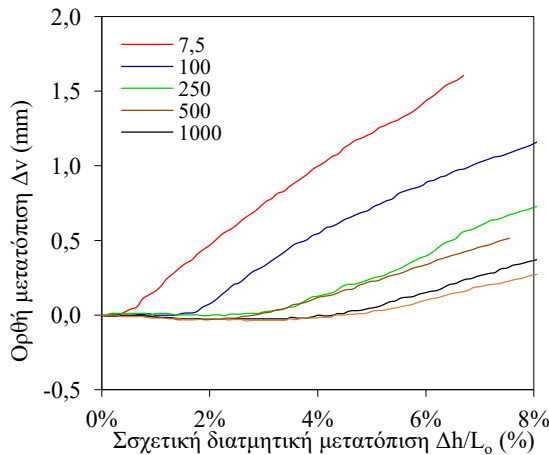
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



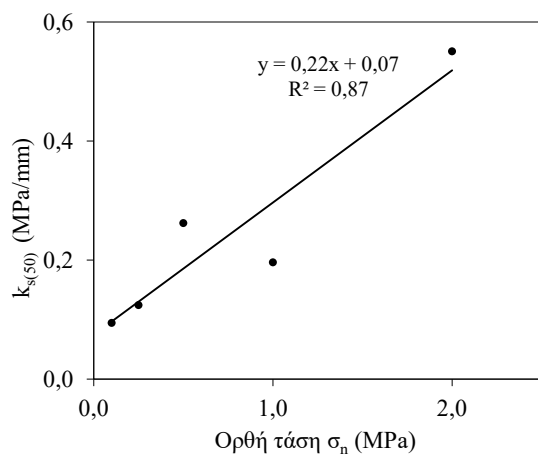
(α)



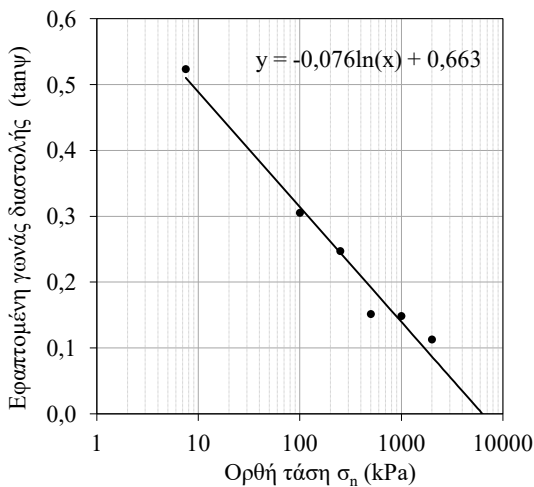
(δ)



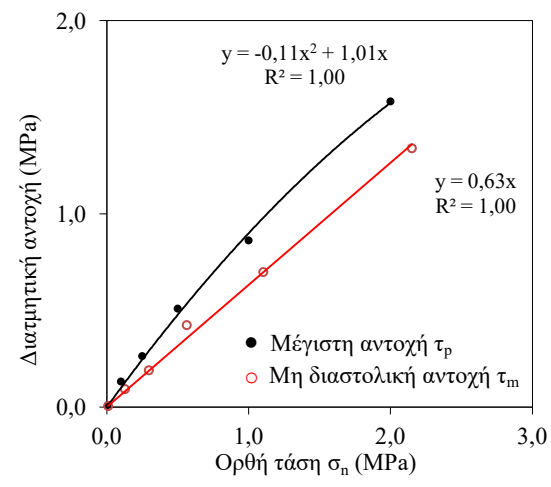
(β)



(ε)

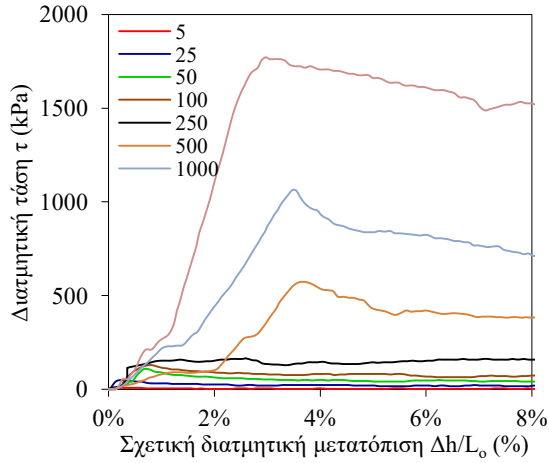


(γ)

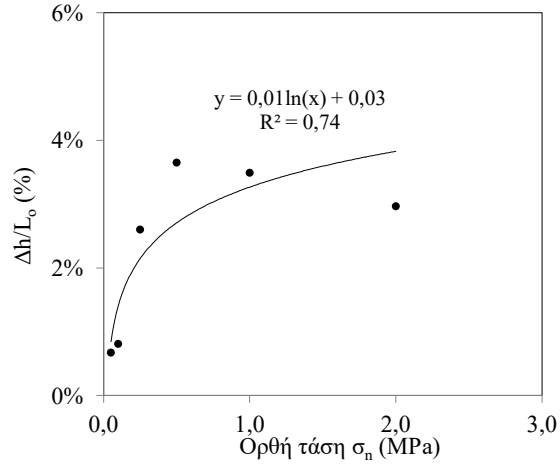


(στ)

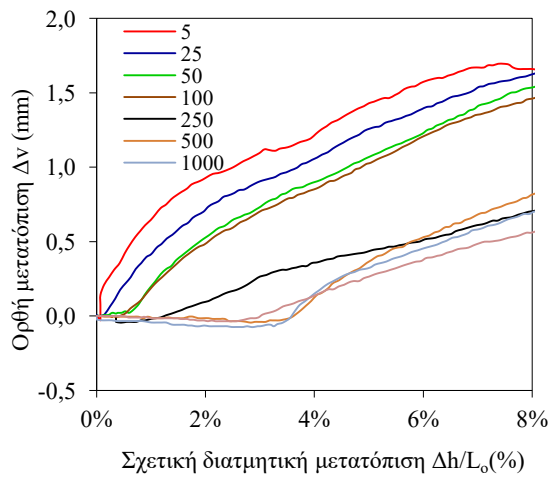
Σχήμα 4.3.1. Δείγμα GS1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση



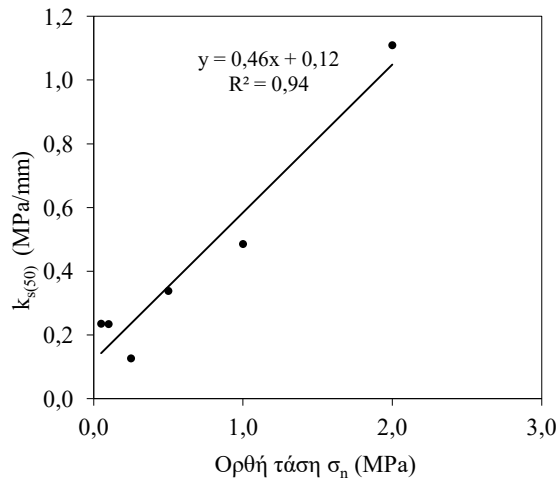
(α)



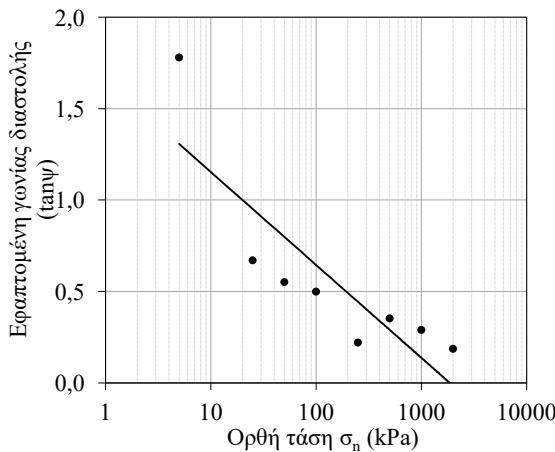
(δ)



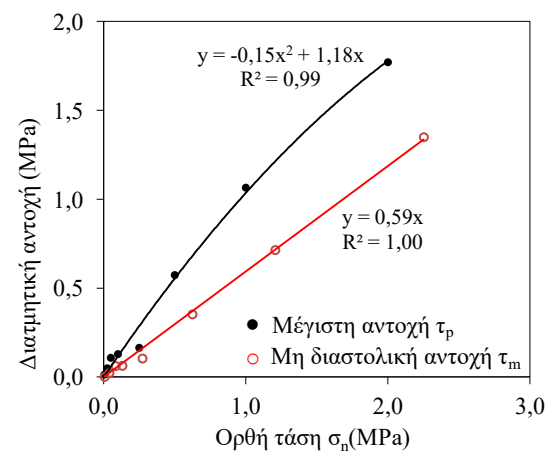
(β)



(ε)



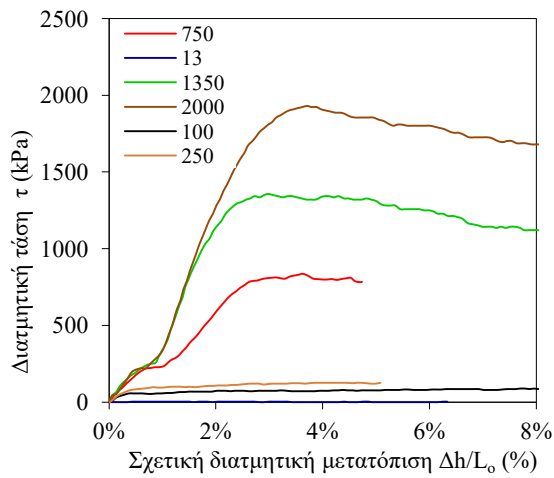
(γ)



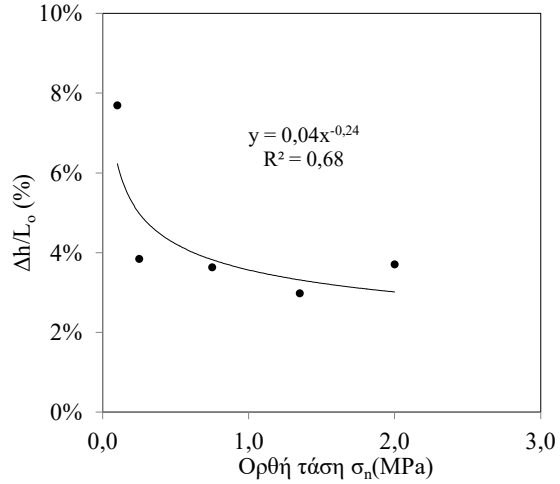
(στ)

Σχήμα 4.3.2. Δείγμα GS2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγγόμενη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

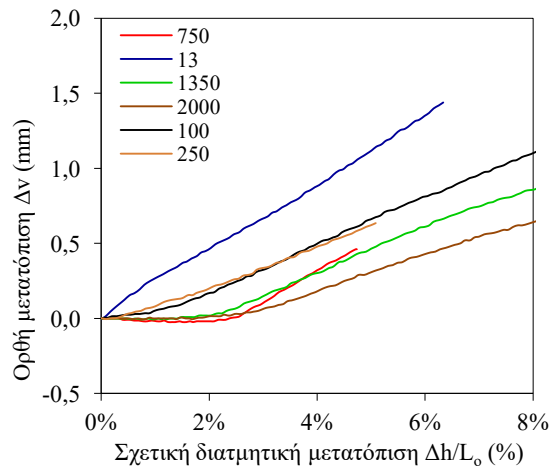
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



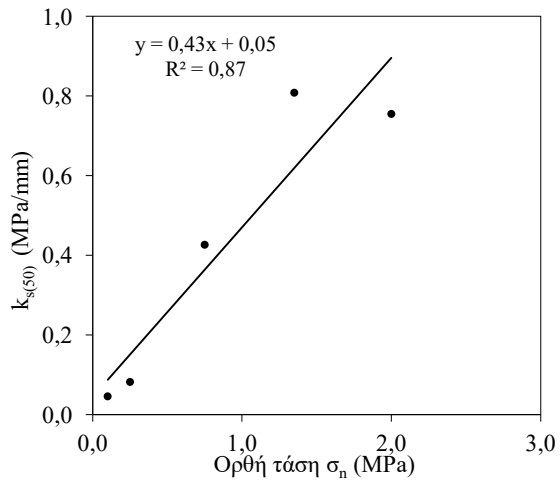
(α)



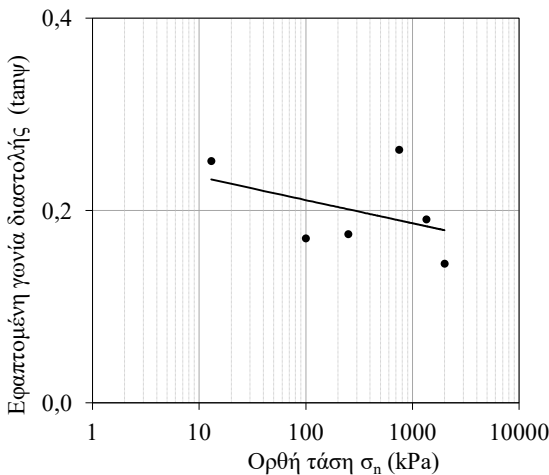
(δ)



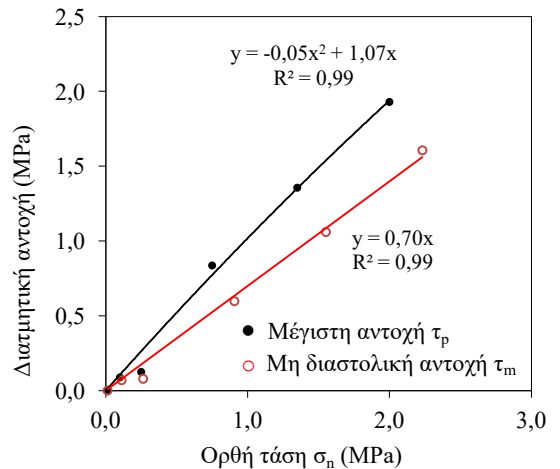
(β)



(ε)

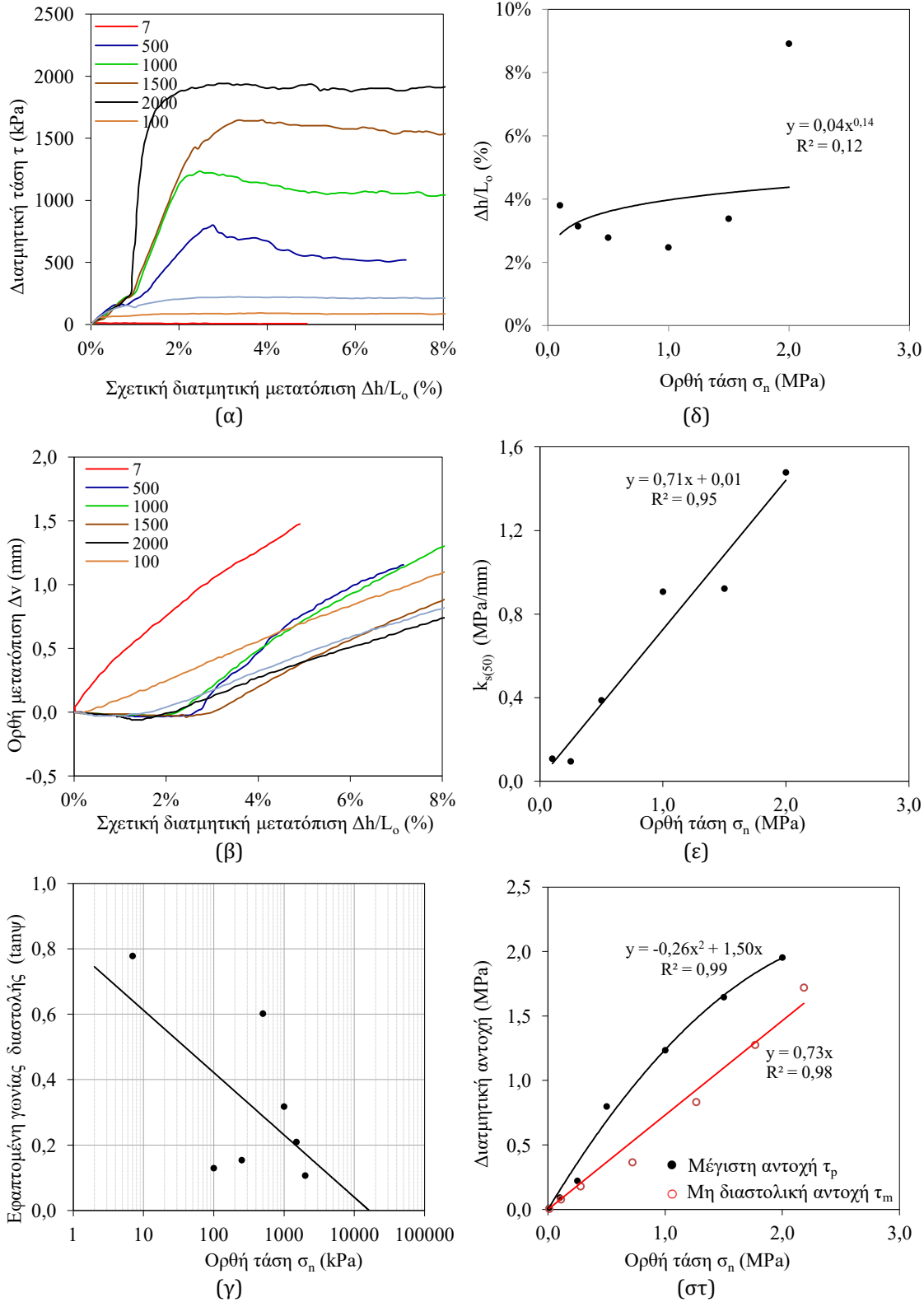


(γ)



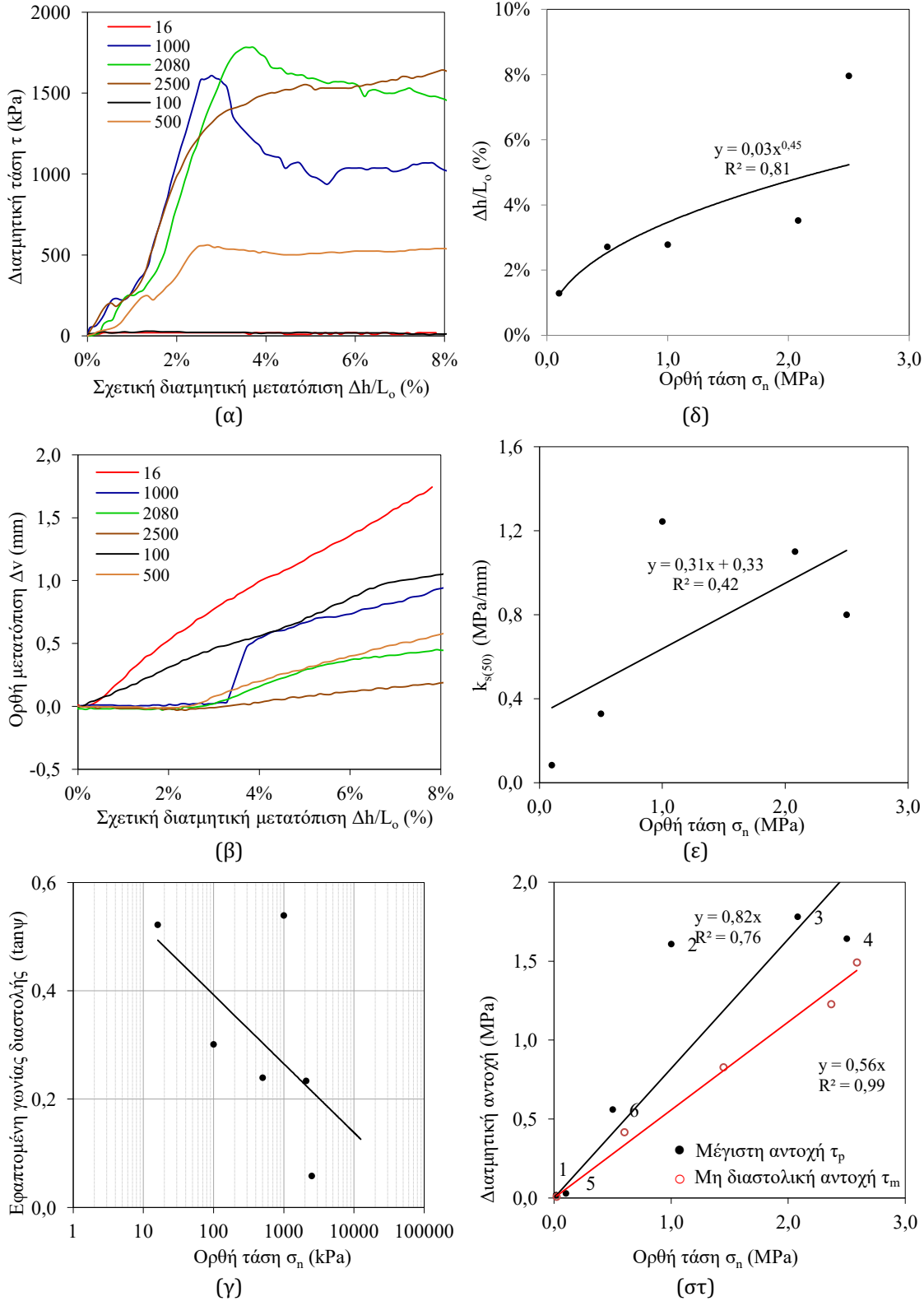
(στ)

Σχήμα 4.3.3. Δείγμα GS3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

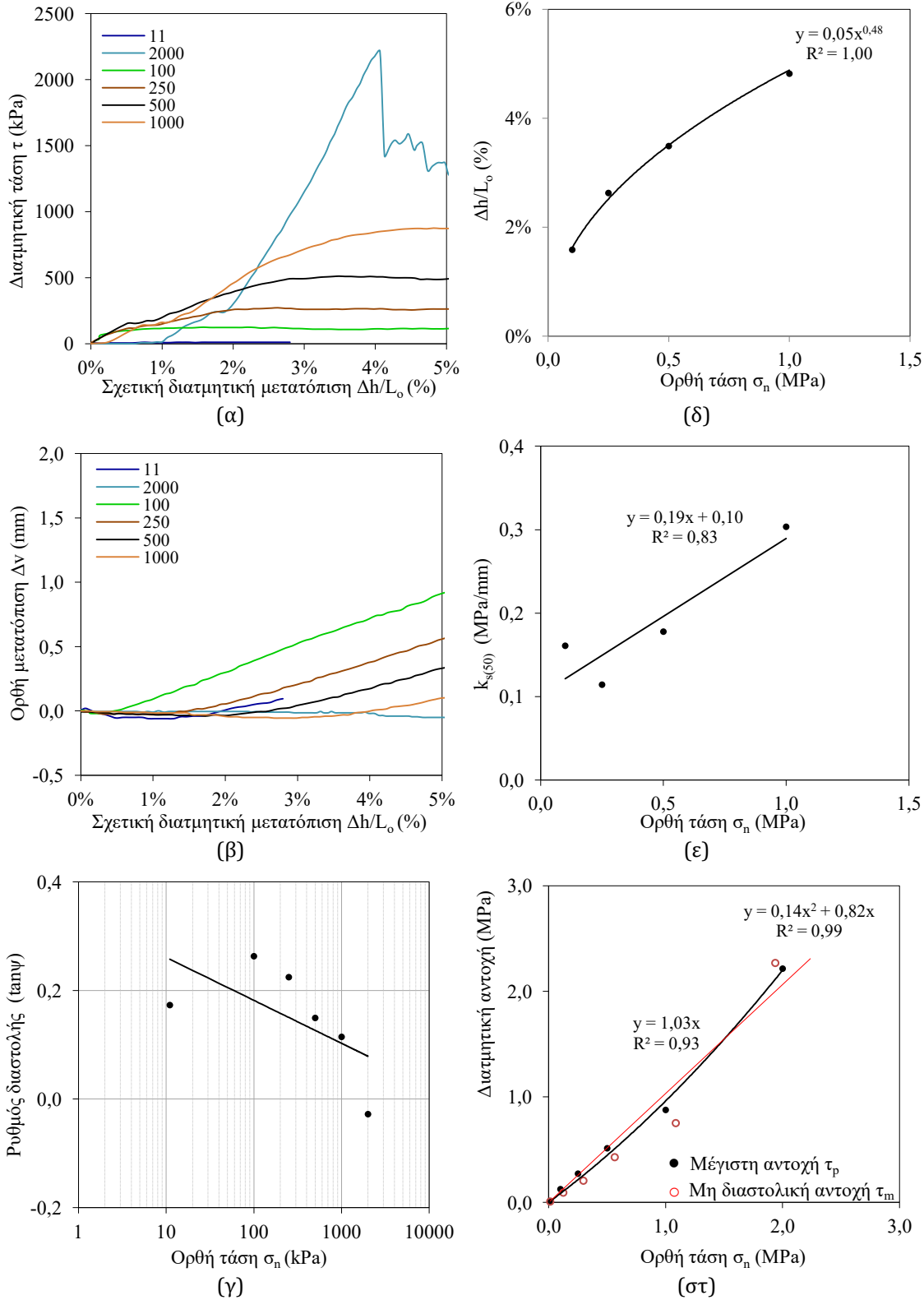


Σχήμα 4.3.4. Δείγμα GS4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

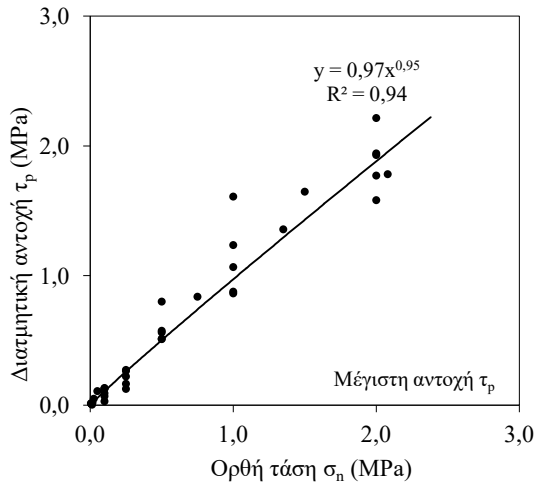


Σχήμα 4.3.5. Δείγμα GS5: (α) Διαμετρική τάση-Σχετική διαμετρική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διαμετρική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής-Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διαμετρική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διαμετρική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διαμετρική αντοχή-Ορθή τάση

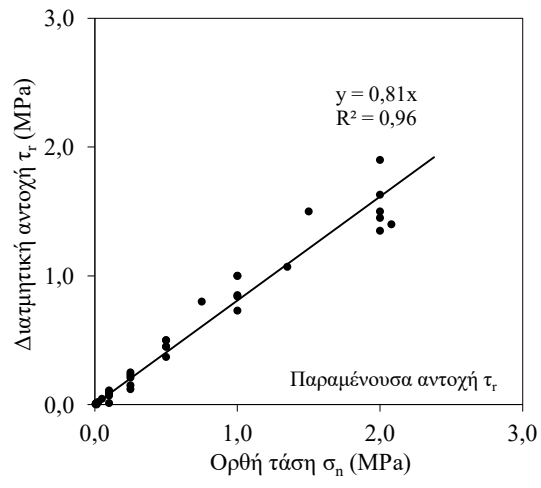


Σχήμα 4.3.6. Δείγμα GS7: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

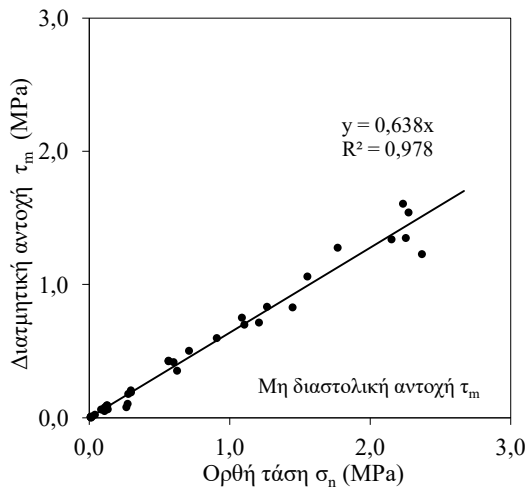
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



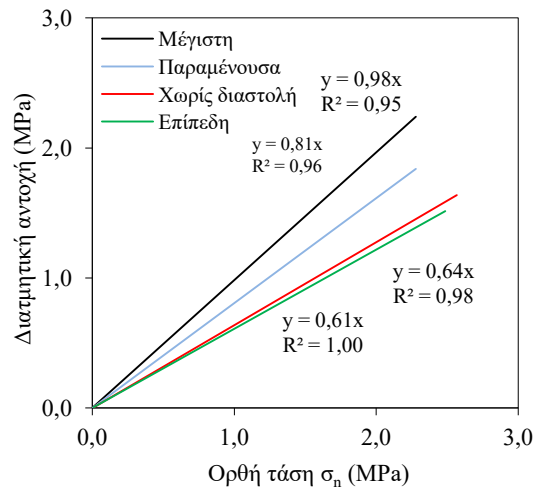
(α)



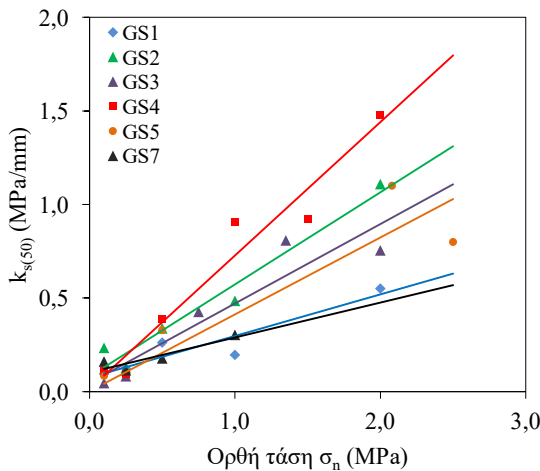
(β)



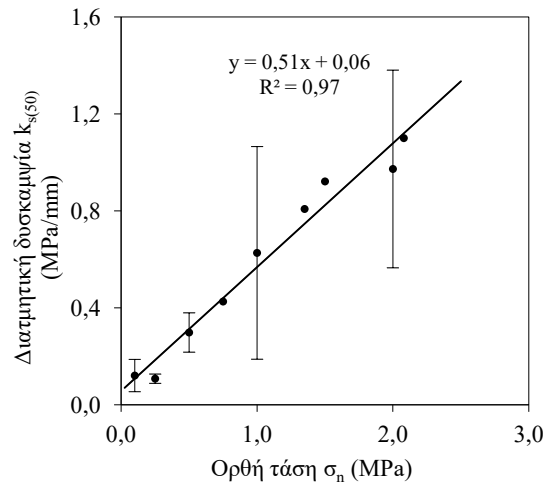
(γ)



(δ)

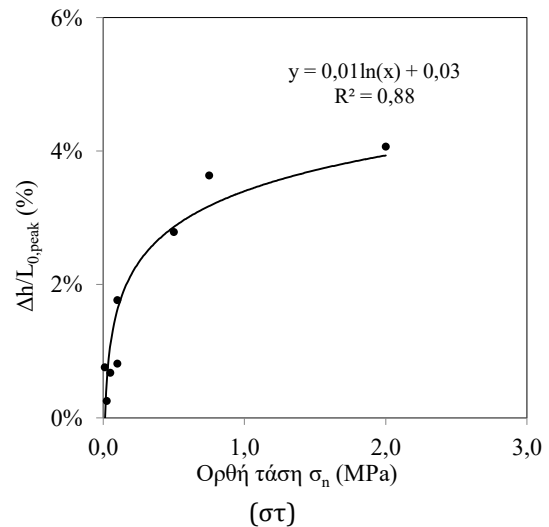
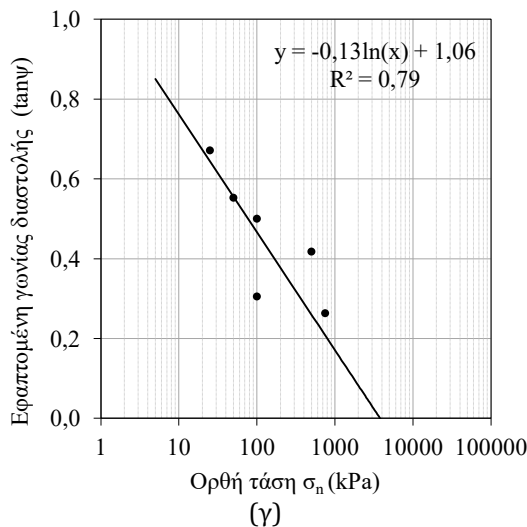
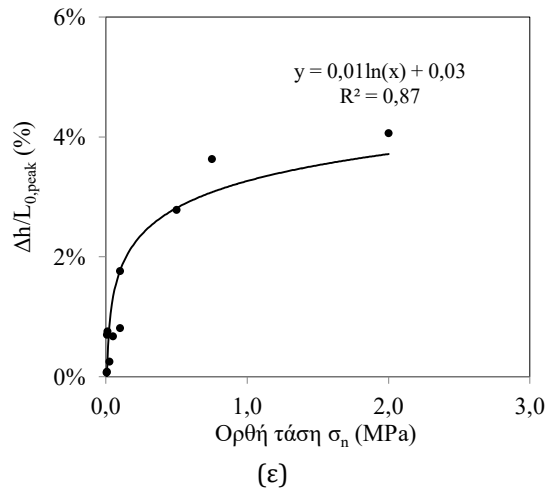
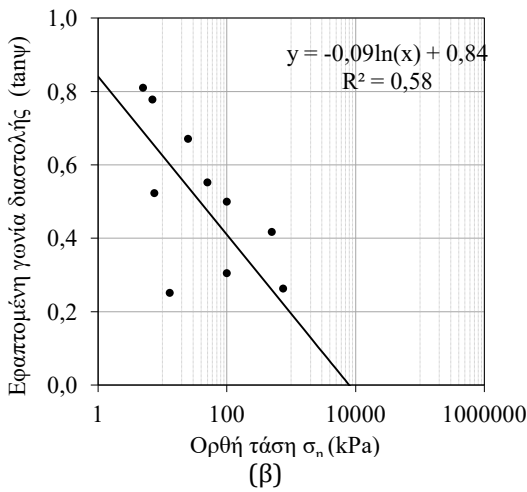
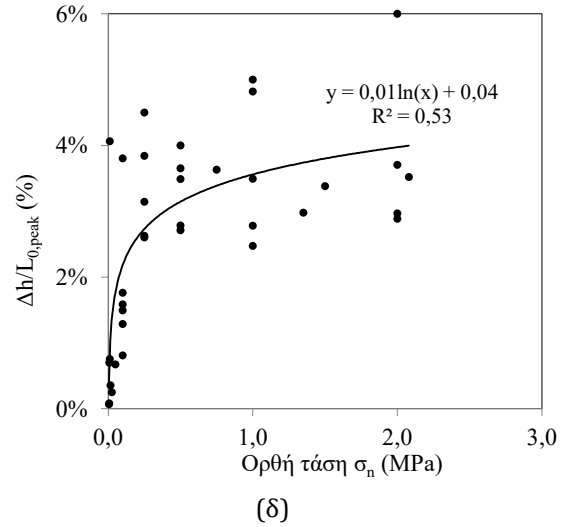
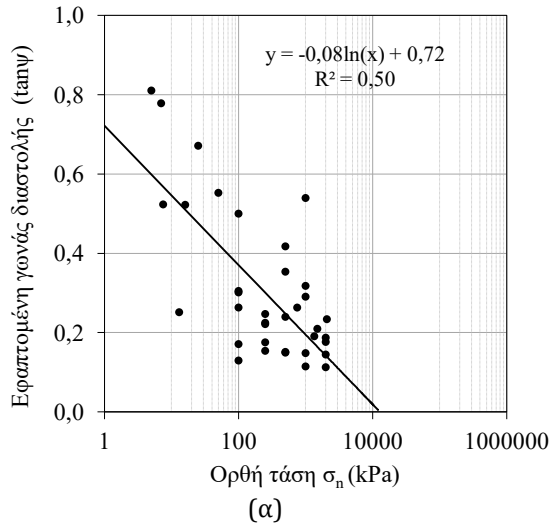


(ε)



(στ)

Σχήμα 4.3.7. Διαγράμματα Ορθής τάσης σ_n με: (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) (γ) Μη διαστολική διατμητική αντοχή (δ) Διατμητική αντοχή (ε) Διατμητική δυσκαμψία κάθε δοκιμίου (στ) Διατμητική δυσκαμψία για το σύνολο των δοκιμών τεφρού ψαμίτη GS.



Σχήμα 4.3.8. Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης: (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης: (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον τεφρό ψαμμίτη GS

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n διαπιστώνεται λογαριθμική μεταβολή με την ορθή τάση. Η διαστολή μηδενίζεται όταν η ορθή τάση είναι 13,3 MPa για το σύνολο των δοκιμών (σχ.4.3.8α). Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου (σχ.4.3.8β) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 7,6MPa. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους (σχ.4.3.8γ) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 3,9MPa. Η τάση αυτή είναι ίση περίπου με το 8% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και 3% της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη (θλιπτική αντοχή 49MPa, BDT=134MPa)

Αντιστοίχως τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.8δ για όλα τα δοκίμια, 4.3.8ε για τα πρώτα στάδια και 4.3.8στ για τα πρώτα στάδια πέραν του ίδιου βάρους.

Η γωνία διαστολής για ίδιο βάρος (πρακτικά χωρίς φθορά της επιφάνειας των τοιχωμάτων) προκύπτει 29° από το σύνολο των σταδίων. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου η αντίστοιχη γωνία διαστολής είναι 30° Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους η αντίστοιχη τιμή είναι 31,5°

Η διατμητική δυσκαμψία $k_{S(50)}$ μεταβάλλεται γραμμικά με την ορθή τάση σ_n και δίνεται από την εξίσωση $k_{S(50)} = 0,51\sigma_n + 0,06$ όπου για $\sigma_n=0$ προκύπτει $k_{S(50)} = 0,06$ MPa/mm (4.3.7στ)

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n υπολογίζονται:

- Η μέγιστη διατμητική αντοχή η οποία μεταβάλλεται μη γραμμικά με την ορθή τάση. Προσαρμόζεται καμπύλη της μορφής $y=ax^b$ όπου $a=0,97$ και $b=0,95$ $r^2=0,94$ (σχ.4.3.7α)
- Η παραμένουσα γωνία τριβής $\varphi_r=39^\circ$ (σχ.4.3.7β)
- Η μη διαστολική γωνία τριβής $\varphi_m=33,4^\circ$ (σχ.4.3.7γ)

ii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST)

Για τον ερυθρό ψαμμίτη Γρεβενών (SST) διαμορφώθηκαν 5 δείγματα (4 δείγματα τεχνητής ασυνέχειας και 1 δείγμα επίπεδης επιφάνειας που διαμορφώθηκε με κοπή από δισκοπρίονο) τα οποία υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Συνολικά έγινες 31 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.

Στον πίνακα 4.3.2 δίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας των ασυνεχειών κάθε δείγματος και τα στάδια εφαρμογής ορθής τάσης με την αντίστοιχη ονομαστική ορθή τάση.

Πίνακας 4.3.2. Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ερυθρού ψαμμίτη SST

Α/Α	Κωδικός δείγματος	Ασυνέχεια	Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Επιφάνεια [mm ²]	Στάδιο - Ορθή τάση (kPa)								
						1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο	
1	D6-SST1	τεχνητή	140	62	8.680	20	50	100	250	500	1000	2000		
2	D8-SST2	τεχνητή	110	55	6.050	7	500	1000	2000	25	50	100	250	
3	D11-SST3	τεχνητή	64	65	4.160	9	1000	2000	25	50	100	250	500	
4	D13-SST4	τεχνητή	59	55	3.245	11	25	50	100	250	500	1000	2000	
5	SST_flat	τεχνητή	119	76	9.103	10	100	250	500	1000				

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Τα πλήρη διαγράμματα διατμητικής τάσης (τ) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$) για τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης δίνονται στο σχήμα 4.3.9α μέχρι 4.3.12α. Με την αύξηση της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη (peak) αντοχή αυξάνεται από 0,06 MPa για $\sigma=0,10$ MPa (Δοκ.D8-SST2) μέχρι 1,87MPa για $\sigma=2,0$ MPa (Δοκ.D6-SST1).

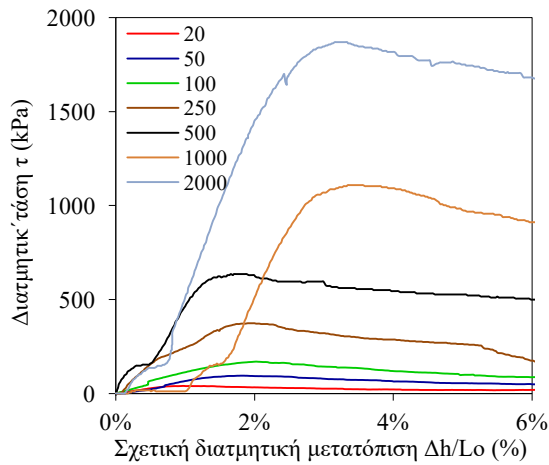
Στα σχήματα 4.3.9β μέχρι 4.3.12β. δίνονται τα διαγράμματα ορθής μετατόπισης (Δv) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις ορθές τάσεις υπάρχει μια αρχική συμπίεση/συστολή του δοκιμίου, μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή, που οφείλεται στο κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ή/και στην ελαστική συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων. Ακολουθεί διαστολή (αύξηση του Δv) με ρυθμό αυξανόμενο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της διατμητικής μετατόπισης και στη συνέχεια μείωση. Η σχετική διατμητική μετατόπιση στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός διαστολής (που αντιστοιχεί στη στιγμιαία γωνία διαστολής) παρατηρείται κατά τη μέγιστη αντοχή.

Στα σχήματα 4.3.9γ μέχρι 4.3.12γ. δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n . Οι αριθμοί που εμφανίζονται δίπλα από κάθε σημείο αντιστοιχούν στο στάδιο της κάθε ορθής τάσης.

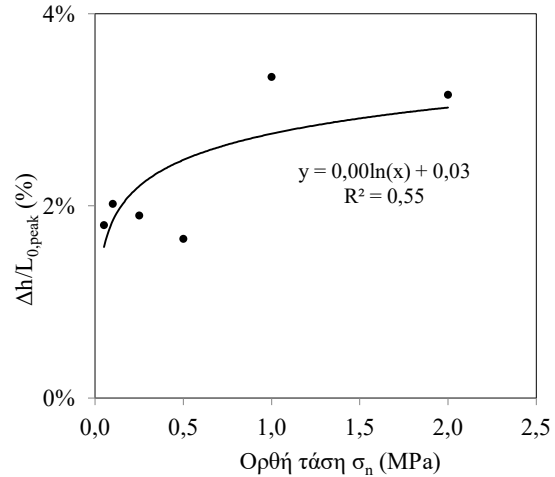
Η ανηγμένη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή ($\Delta h/L_0$)_{peak} συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.9δ μέχρι 4.3.12δ

Στα σχήματα 4.3.9ε μέχρι 4.3.12ε δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών της διατμητικής δυσκαμψίας $k_{S(50)}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n .

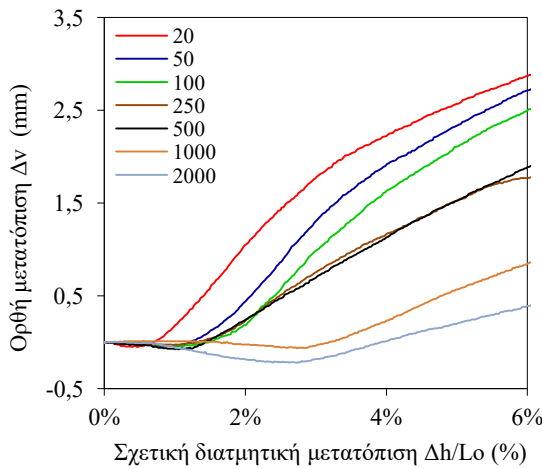
Στα σχήματα 4.3.9στ μέχρι 4.3.12στ φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n .



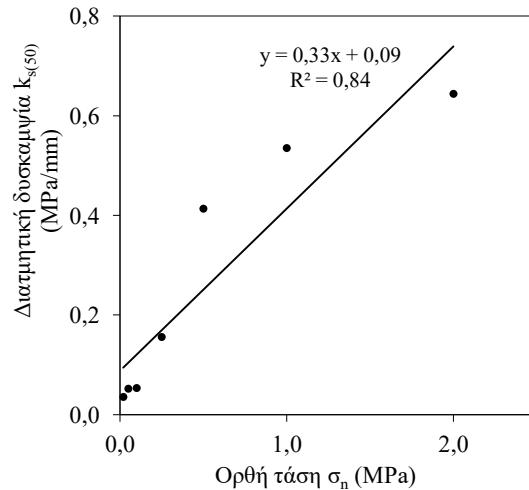
(α)



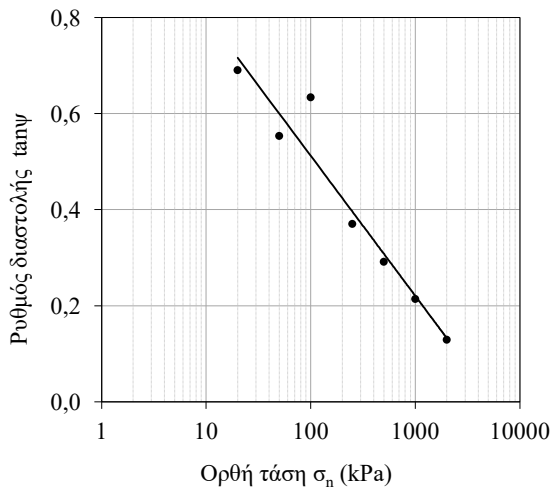
(δ)



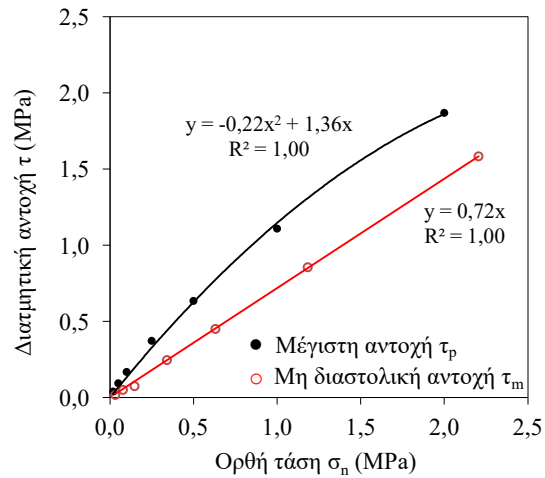
(β)



(ε)



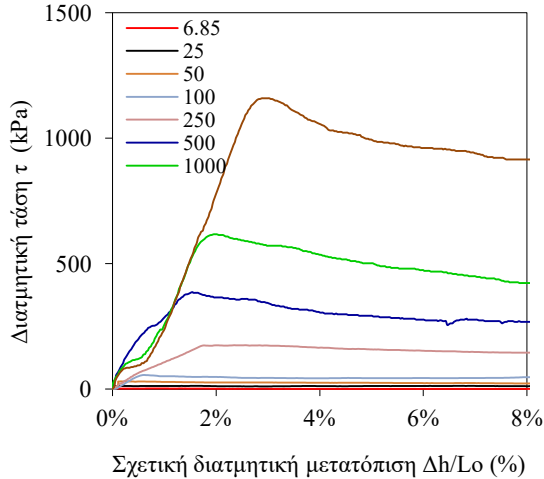
(γ)



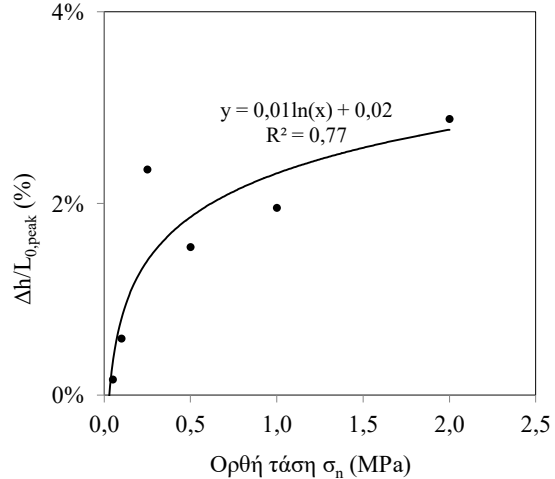
(στ)

Σχήμα 4.3.9. Δείγμα SST1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

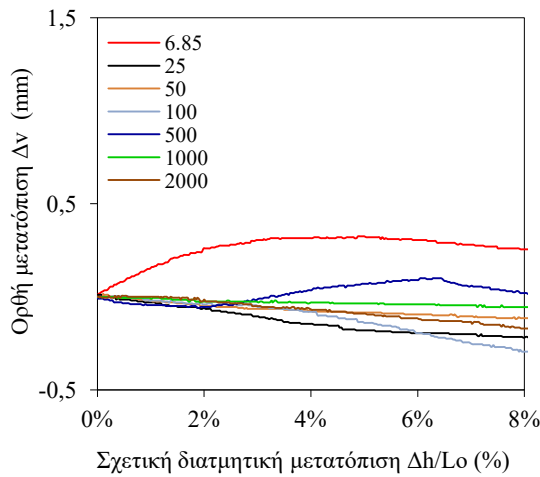
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



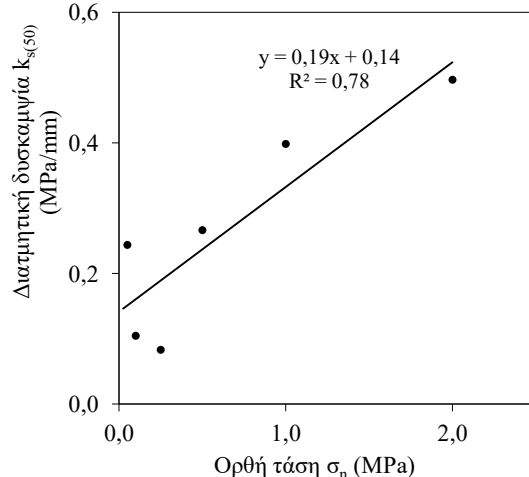
(α)



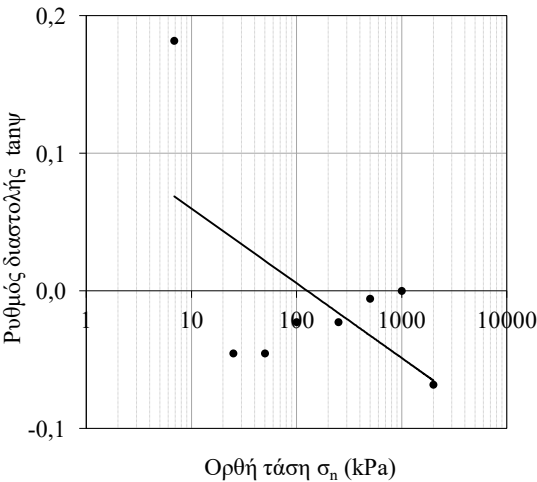
(δ)



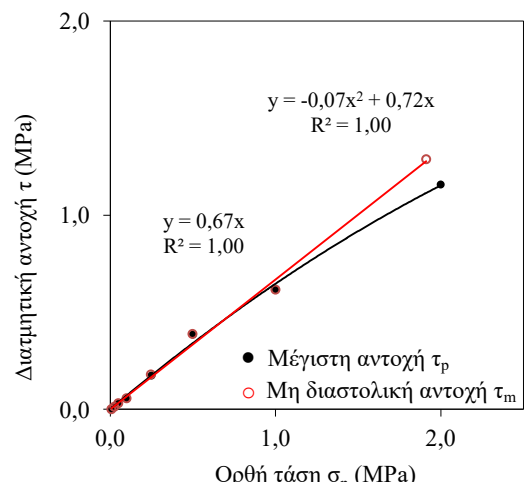
(β)



(ε)

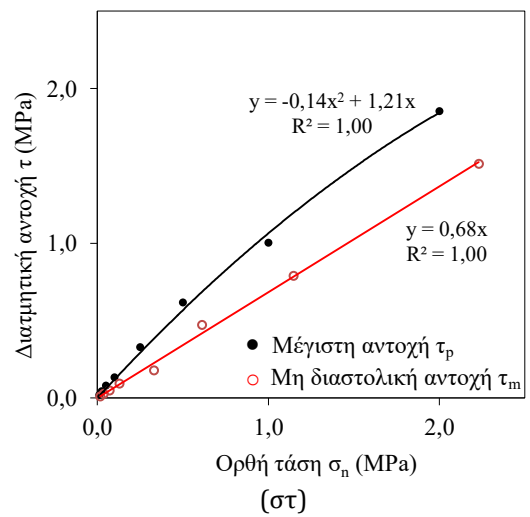
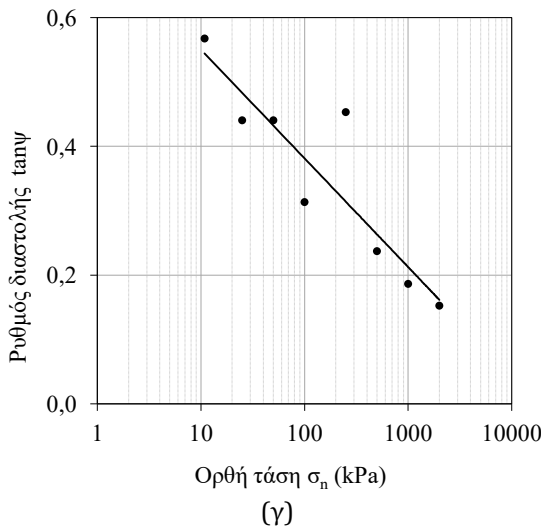
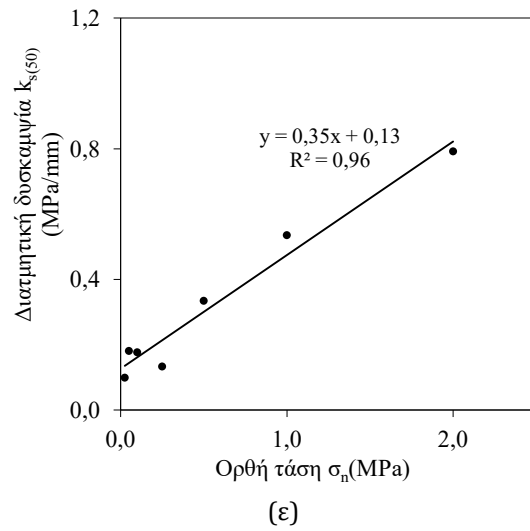
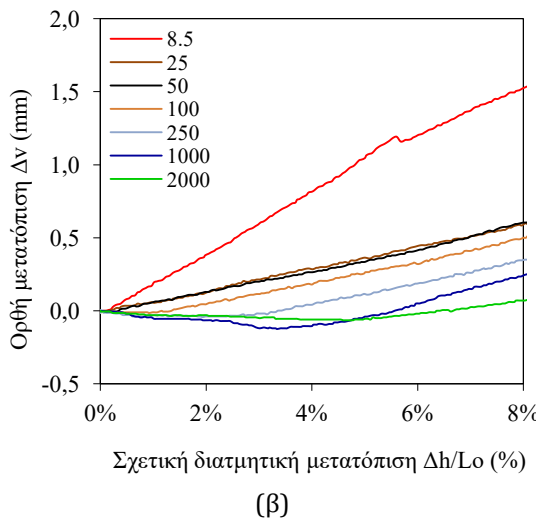
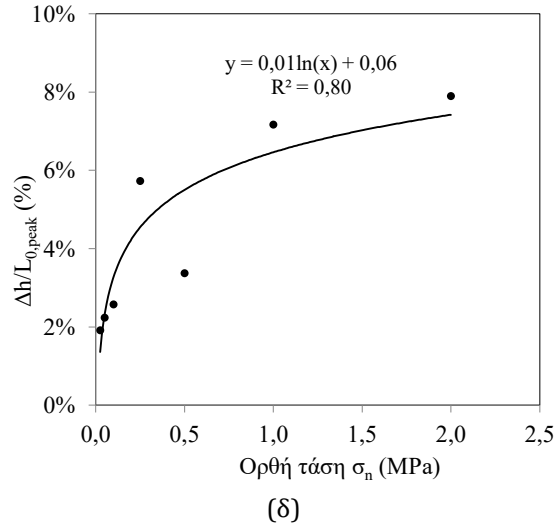
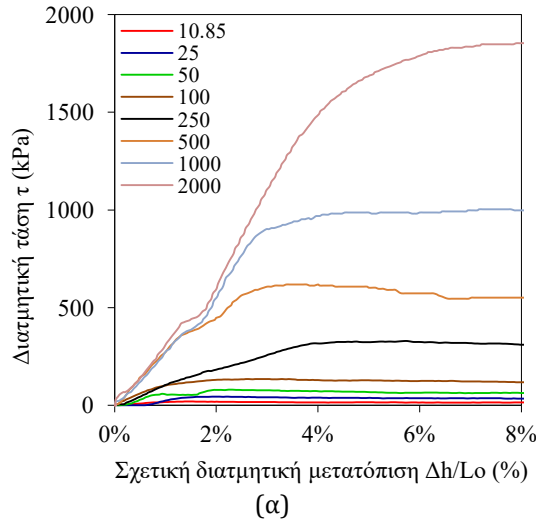


(γ)



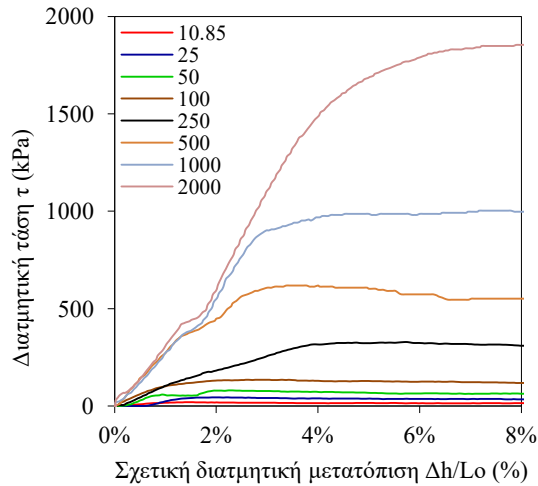
(στ)

Σχήμα 4.3.10. Δείγμα SST2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

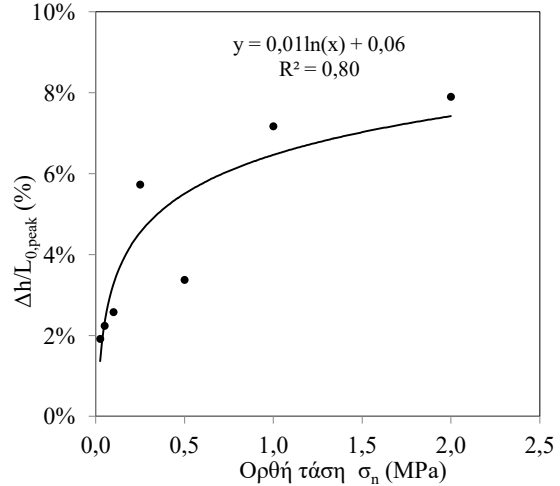


Σχήμα 4.3.11. Δείγμα SST3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

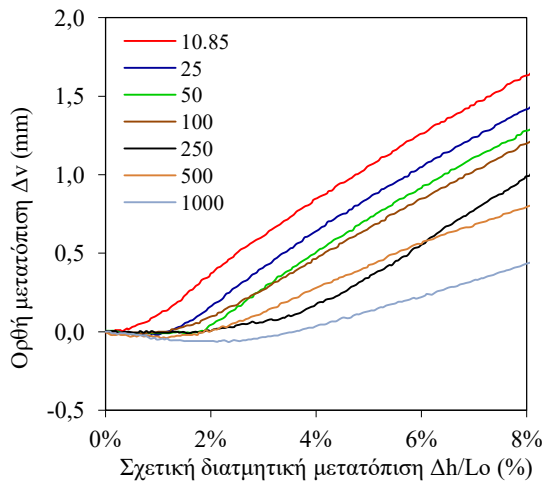
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



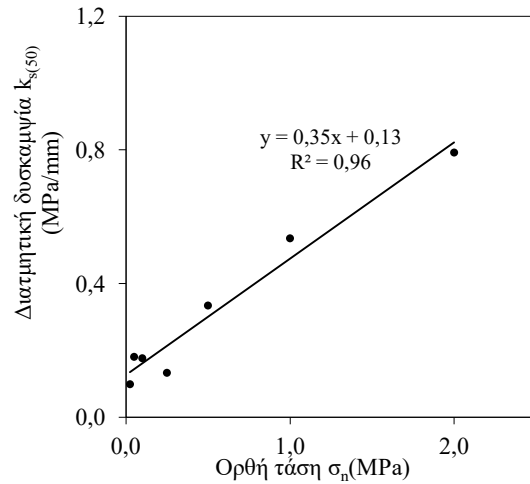
(α)



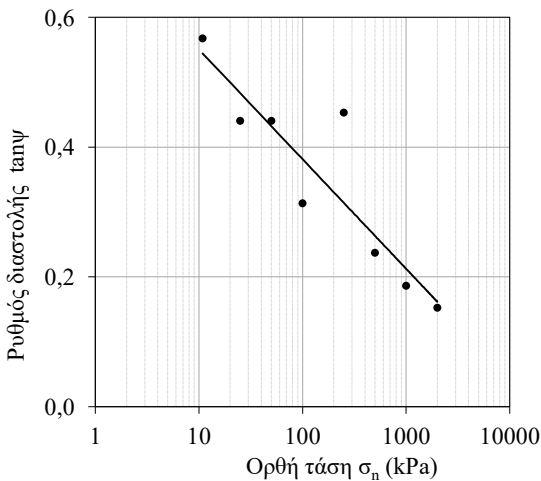
(δ)



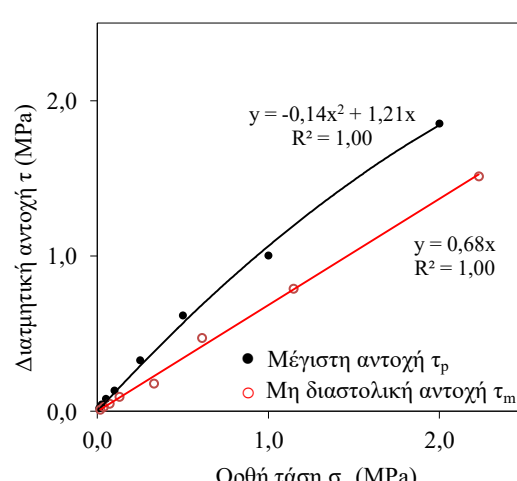
(β)



(ε)

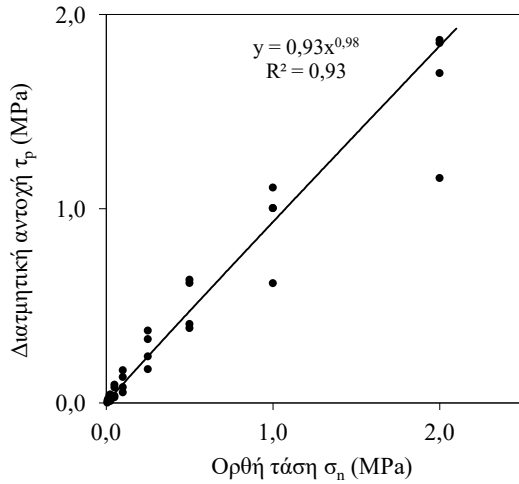


(γ)

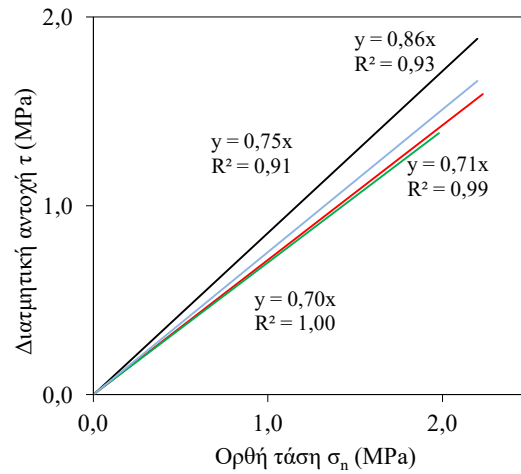


(στ)

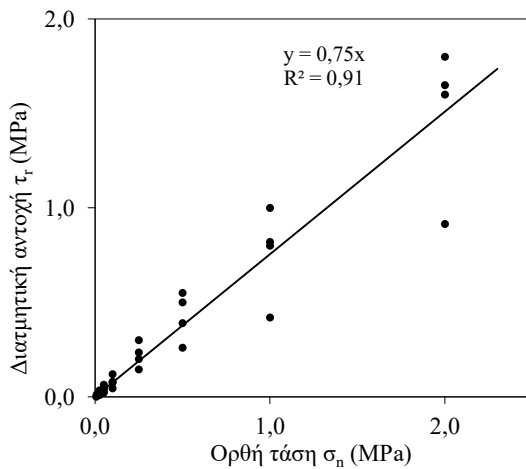
Σχήμα 4.3.12. Δείγμα SST4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση



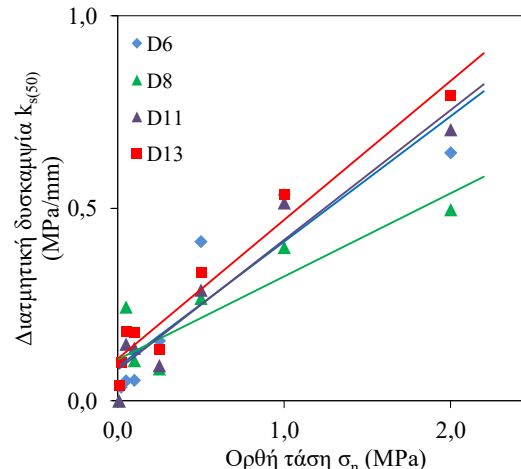
(α)



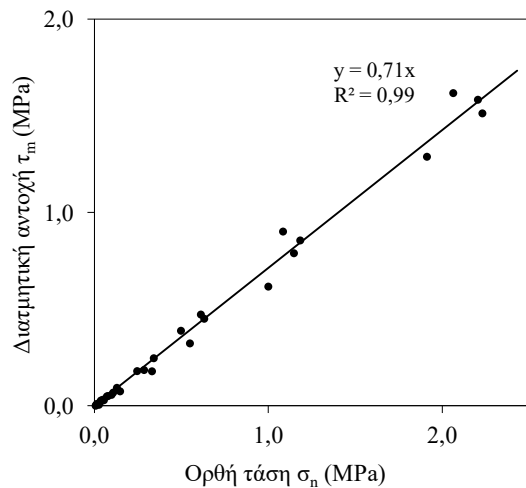
(δ)



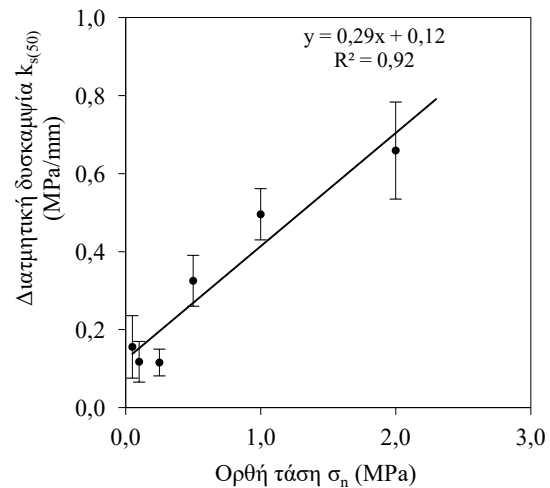
(β)



(ε)



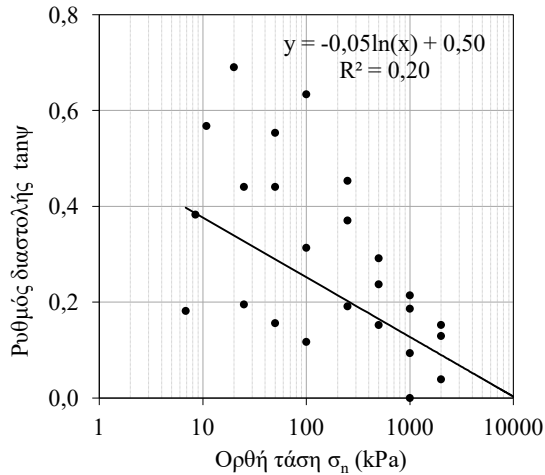
(γ)



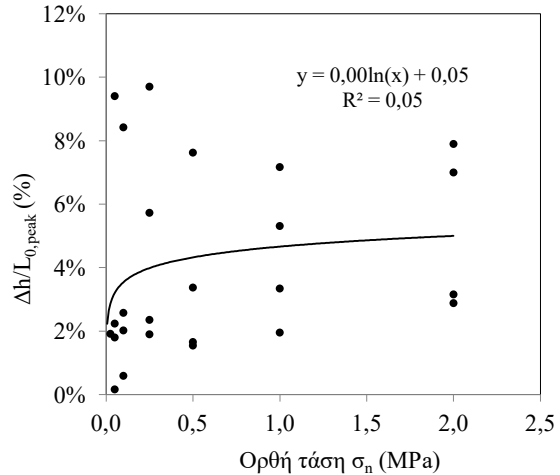
(στ)

Σχήμα 4.3.13. (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολική-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση, για το ερυθρό ψαμμίτη SST.

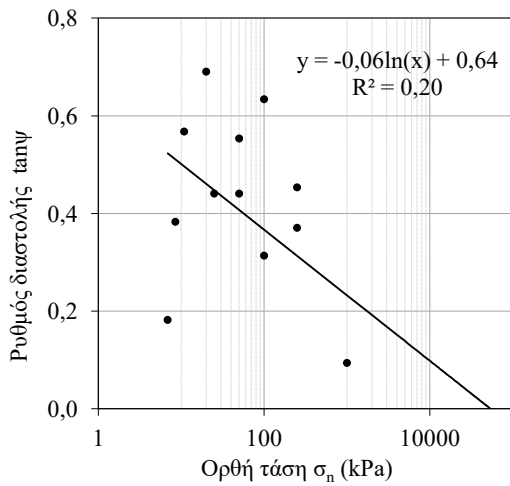
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



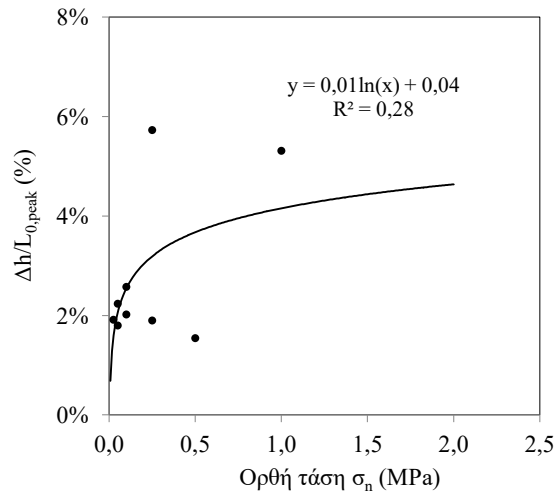
(α)



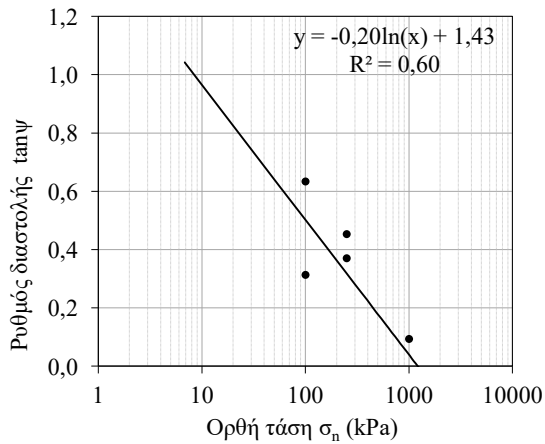
(δ)



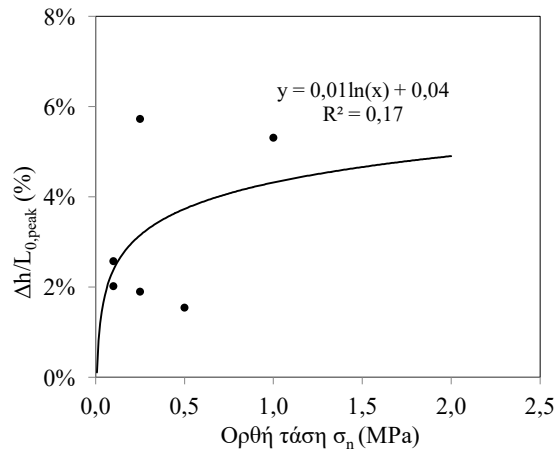
(β)



(ε)



(γ)



(στ)

Σχήμα 4.3.14. Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής ($\tan\psi$)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα στάδια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους, ερυθρού ψαμμίτη SST.

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n διαπιστώνεται λογαριθμική μεταβολή με την ορθή τάση. Η διαστολή μηδενίζεται όταν η ορθή τάση είναι 10,7MPa για το σύνολο των δοκιμών (σχ.4.3.14α). Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου (σχ.4.3.14β) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 3,8MPa. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους (σχ.4.3.14γ) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 4,1MPa. Η τάση αυτή είναι ίση περίπου με το 20% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και 5% της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη (θλιπτική αντοχή 21MPa, BDT= 82MPa).

Αντιστοίχως τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.14δ για όλα τα δοκίμια, 4.3.14ε για τα πρώτα στάδια και 4.3.14στ για τα πρώτα στάδια πέραν του ίδιου βάρους.

Η γωνία διαστολής για ίδιο βάρος (πρακτικά χωρίς φθορά της επιφάνειας των τοιχωμάτων) προκύπτει 22,5° από το σύνολο των σταδίων. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου η αντίστοιχη γωνία διαστολής είναι 29,9°. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους η αντίστοιχη τιμή είναι 31,7°

Η διατμητική δυσκαμψία $k_{S(50)}$ μεταβάλλεται γραμμικά με την ορθή τάση σ_n και δίνεται από την εξίσωση $k_{S(50)} = 0,29\sigma_n + 0,12$ όπου για $\sigma_n=0$ προκύπτει $k_{S(50)}=0,12$ MPa/mm (σχ.4.3.13στ)

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n υπολογίζονται:

- Η μέγιστη διατμητική αντοχή η οποία μεταβάλλεται μη γραμμικά με την ορθή τάση. Προσαρμόζεται καμπύλη της μορφής $y=ax^b$ όπου $a=0,93$ και $b=0,98$ $r^2=0,93$ (σχ.4.3.13α)
- Η παραμένουσα γωνία τριβής $\varphi_r=36,9^\circ$ (σχ.4.3.13β)
- Η μη διαστολική γωνία τριβής $\varphi_m=35,4^\circ$ (σχ.4.3.13γ)

iii) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)

Για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη της περιοχής των Γρεβενών (SLST) διαμορφώθηκαν 4 δείγματα (3 δείγματα τεχνητής ασυνέχειας και 1 δείγμα επίπεδης επιφάνειας που διαμορφώθηκε με κοπή από δισκοπρίονο) τα οποία υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Συνολικά έγινες 29 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.

Στον πίνακα 4.3.3 δίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας των ασυνεχειών κάθε δείγματος και τα στάδια εφαρμογής ορθής τάσης με την αντίστοιχη ονομαστική ορθή τάση.

Πίνακας 4.3.3. Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST

A/A	Κωδικός δείγματος	Ασυνέχεια	Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Επιφάνεια [mm ²]	Στάδιο - Ορθή τάση (kPa)							
						1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο
1	SLST1	τεχνητή	69	66	3608	9	32	64	127	321	640	1280	2550
2	SLST2	τεχνητή	105	67	7052	6	31	63	126	320	630	1270	2550
3	SLST4	τεχνητή	74	67	3912	9	640	1275	2550	32	64	127	320
4	SLST_flat	τεχνητή	100	77	3023	50	100	250	500	1000			

Τα πλήρη διαγράμματα διατμητικής τάσης (τ) – ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$) για τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης δίνονται στο σχήμα 4.3.15α μέχρι 4.3.17α. Με την αύξηση της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη (peak) αντοχή αυξάνεται από 0,11 MPa για $\sigma=0,127$ MPa (Δοκ.SLST4) μέχρι 2,4 MPa για $\sigma=2,5$ MPa (Δοκ.SLST4).

Στα σχήματα 4.3.15β μέχρι 4.3.17β. δίνονται τα διαγράμματα ορθής μετατόπισης (Δv) – ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις ορθές τάσεις υπάρχει μια αρχική συμπίεση/συστολή του δοκιμίου, μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή, που οφείλεται στο κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ή/και στην ελαστική συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων. Ακολουθεί διαστολή (αύξηση του Δv) με ρυθμό αυξανόμενο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της διατμητικής μετατόπισης και στη συνέχεια μείωση. Η σχετική διατμητική μετατόπιση στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός διαστολής (που αντιστοιχεί στη στιγμιαία γωνία διαστολής) παρατηρείται κατά τη μέγιστη αντοχή.

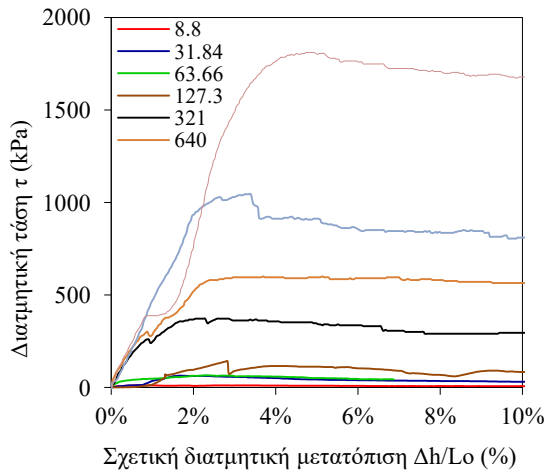
Στα σχήματα 4.3.15γ μέχρι 4.3.17γ. δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n . Οι αριθμοί που εμφανίζονται δίπλα από κάθε σημείο αντιστοιχούν στο στάδιο της κάθε ορθής τάσης.

Η ανηγμένη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή ($\Delta h/L_0$)_{peak} συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.15δ μέχρι 4.3.17δ

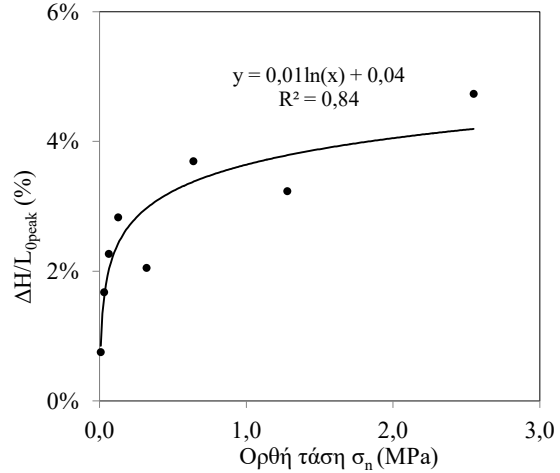
Στα σχήματα 4.3.15ε μέχρι 4.3.17ε δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών της διατμητικής δυσκαμψίας $k_{S(50)}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n .

Στα σχήματα 4.3.15στ μέχρι 4.3.17στ φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n .

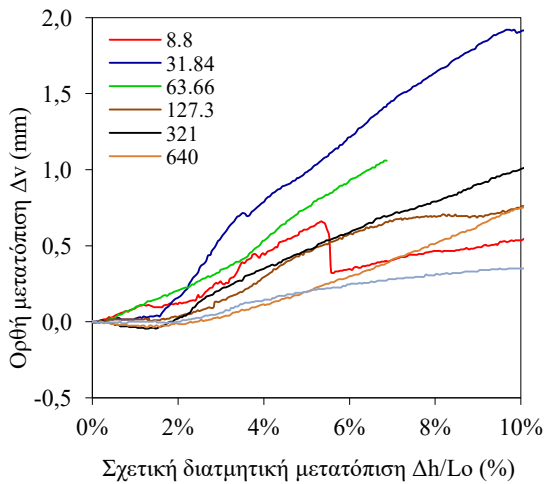
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



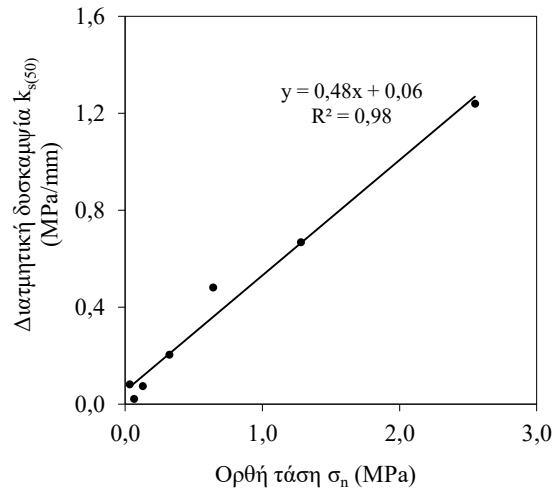
(α)



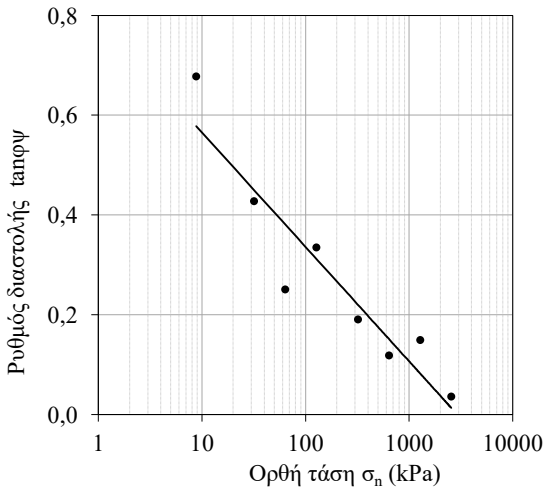
(δ)



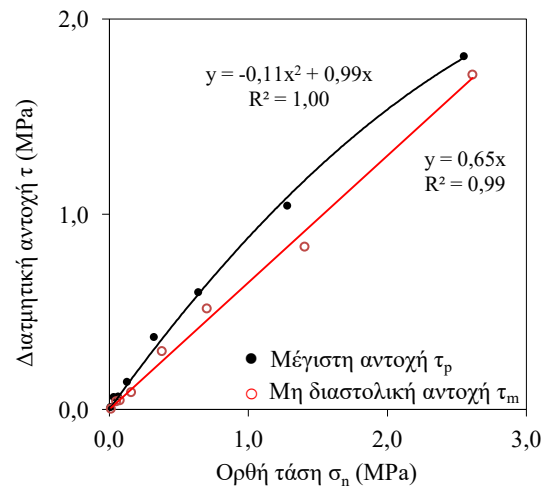
(β)



(ε)

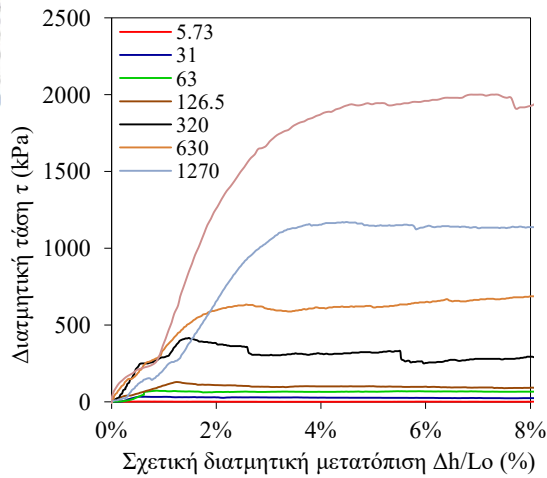


(γ)

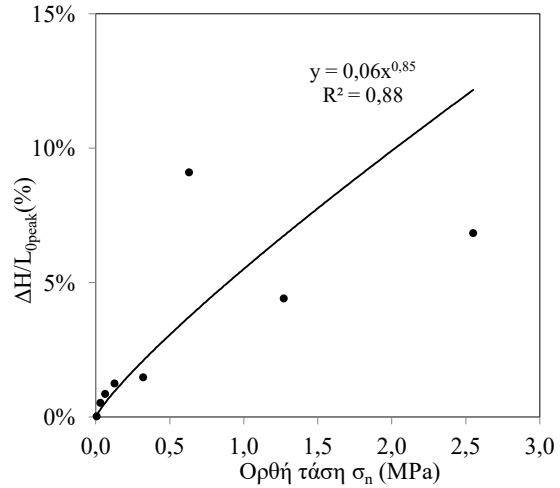


(στ)

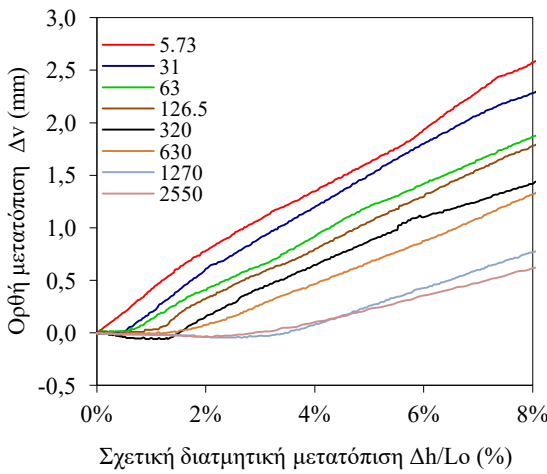
Σχήμα 4.3.15. Δείγμα SLST1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση



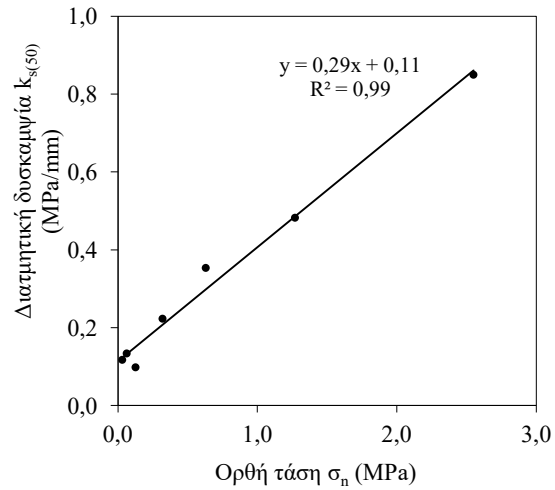
(α)



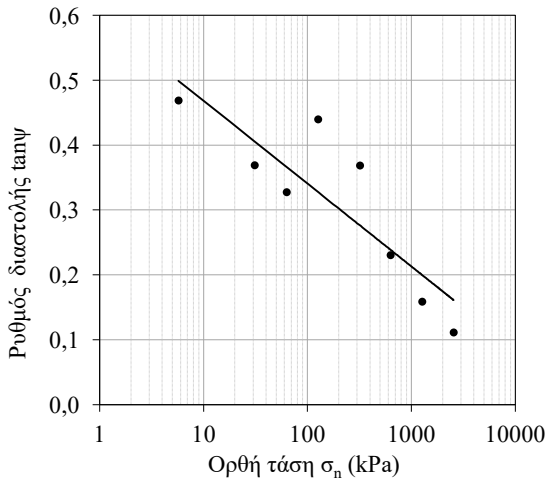
(δ)



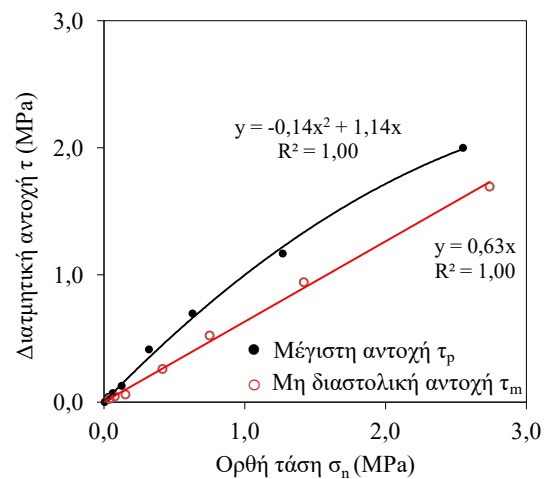
(β)



(ε)



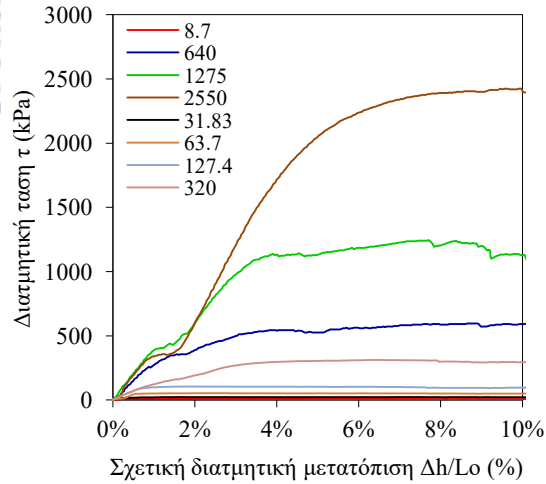
(γ)



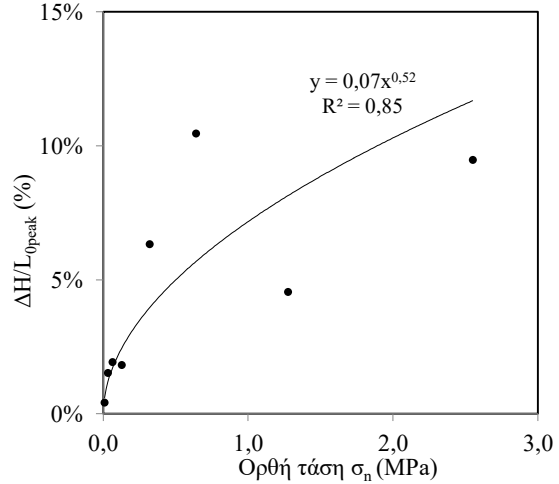
(στ)

Σχήμα 4.3.16. Δείγμα SLST2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

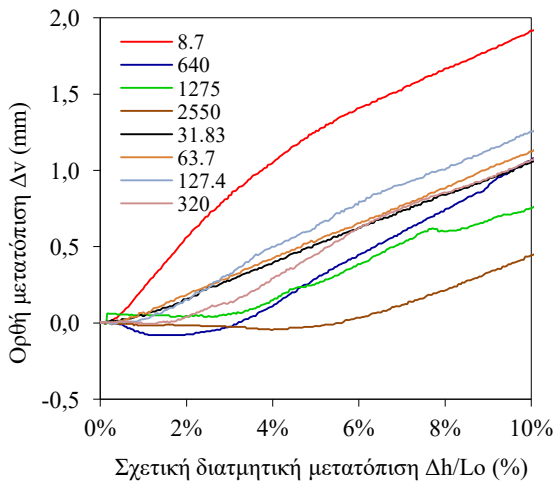
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



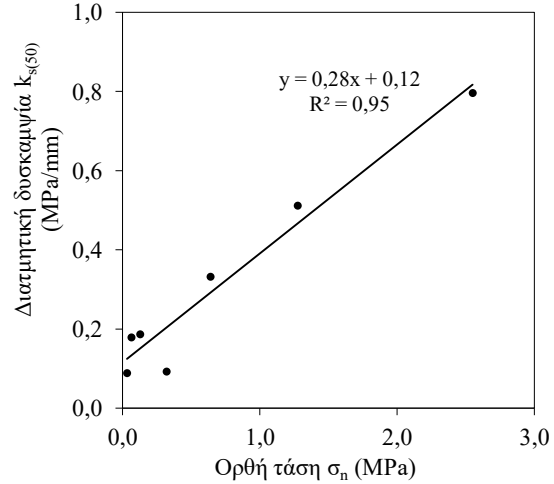
(α)



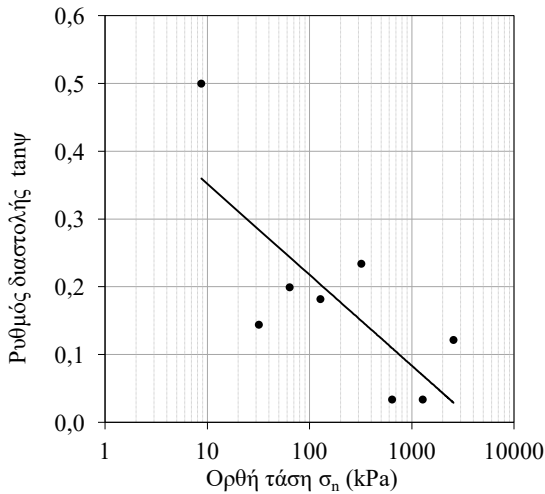
(δ)



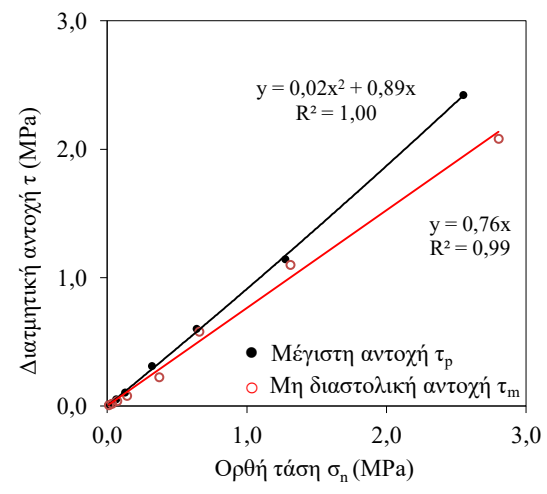
(β)



(ε)

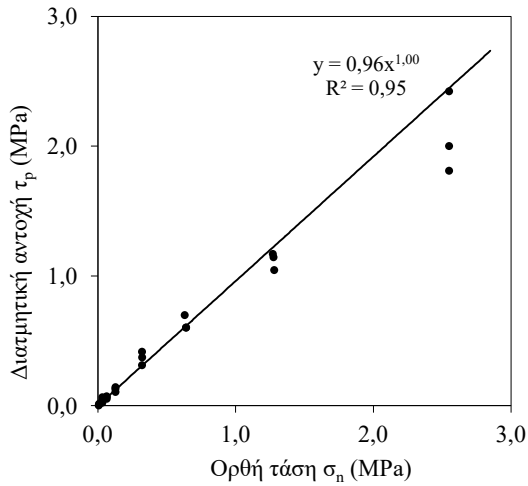


(γ)

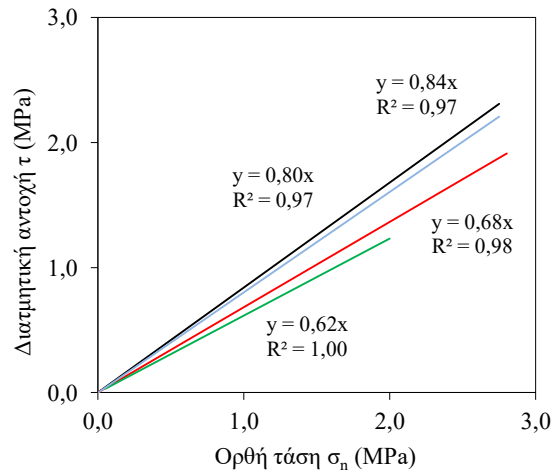


(στ)

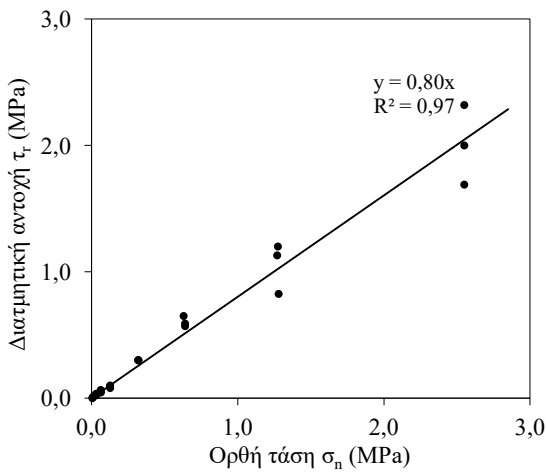
Σχήμα 4.3.17. Δείγμα SLST4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση



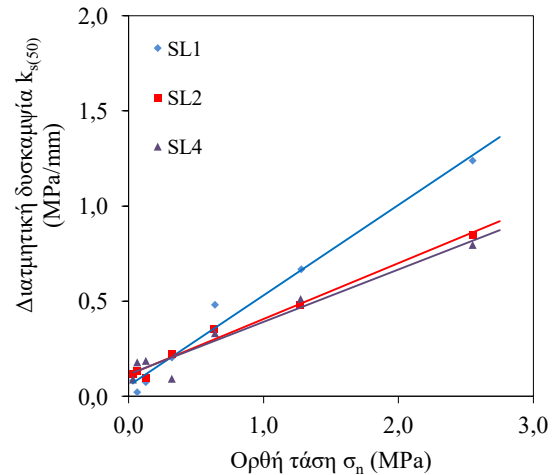
(α)



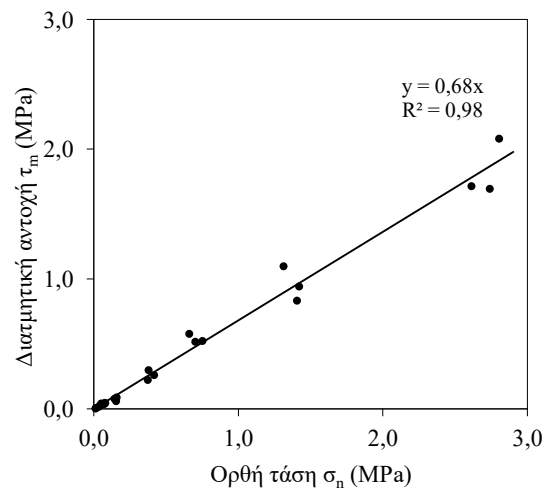
(δ)



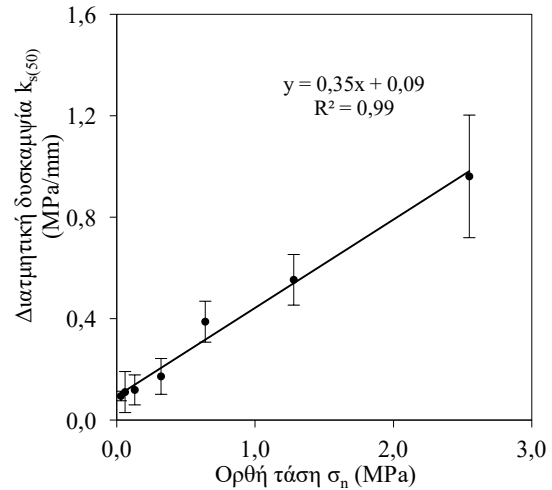
(β)



(ε)



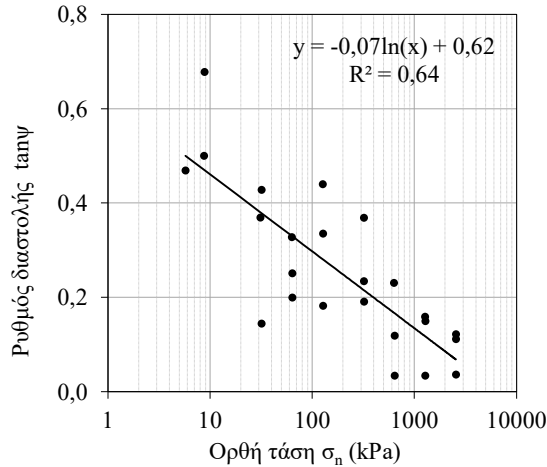
(γ)



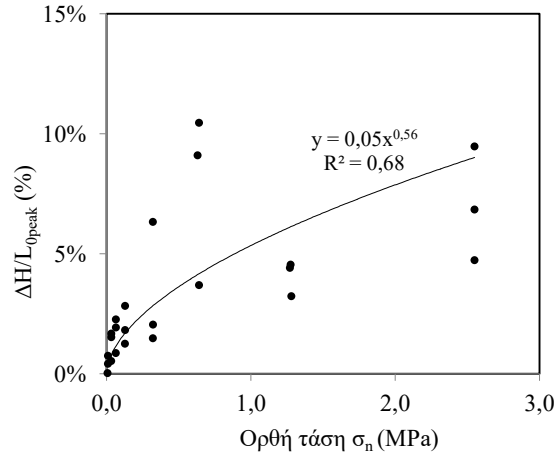
(στ)

Σχήμα 4.3.18. (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολικής-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση, λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.

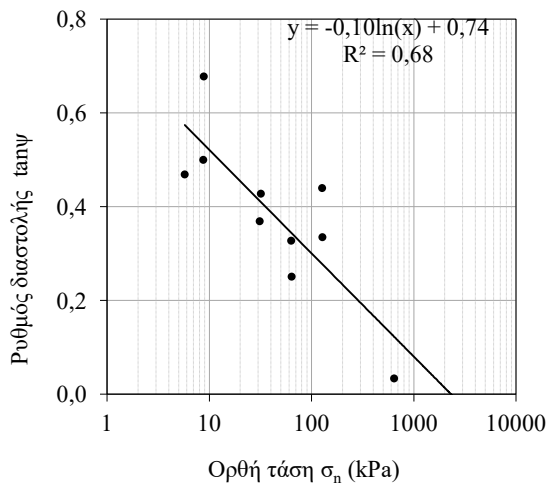
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



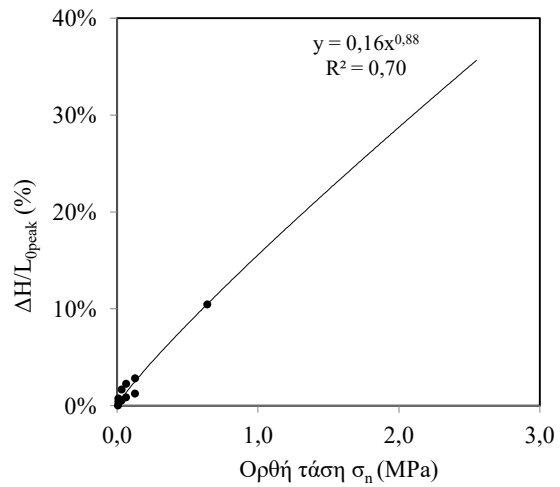
(α)



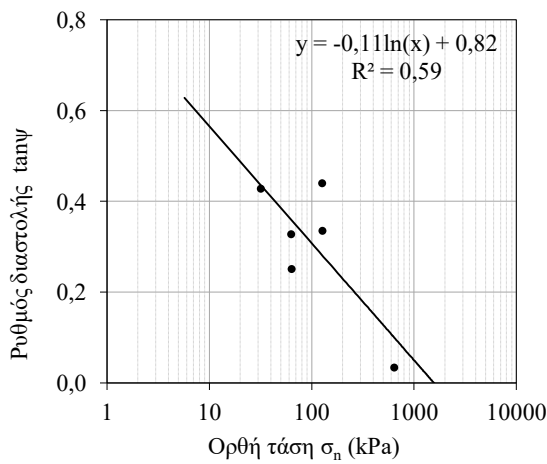
(δ)



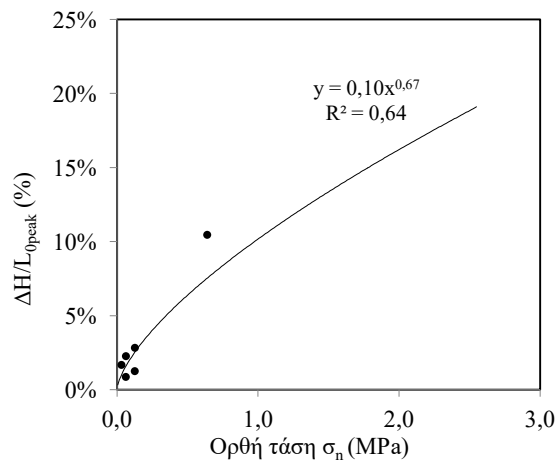
(β)



(ε)



(γ)



(στ)

Σχήμα 4.3.19. Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους, λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST.

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n διαπιστώνεται λογαριθμική μεταβολή με την ορθή τάση. Η διαστολή μηδενίζεται όταν η ορθή τάση είναι 7,4 MPa για το σύνολο των δοκιμών (σχ.4.3.19α). Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου (σχ.4.3.19β) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 2,3MPa. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους (σχ.4.3.19γ) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 1,6MPa. Η τάση αυτή είναι ίση περίπου με το 2,7% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και 1,7% της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη (θλιπτική αντοχή 60MPa, BDT= 95MPa)

Αντιστοίχως τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.19δ για όλα τα δοκίμια, 4.3.19ε για τα πρώτα στάδια και 4.3.19στ για τα πρώτα στάδια πέραν του ίδιου βάρους.

Η γωνία διαστολής για ίδιο βάρος (πρακτικά χωρίς φθορά της επιφάνειας των τοιχωμάτων) προκύπτει 27,1° από το σύνολο των σταδίων. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου η αντίστοιχη γωνία διαστολής είναι 30,4°. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους η αντίστοιχη τιμή είναι 32,7°

Η διατμητική δυσκαμψία $k_{S(50)}$ μεταβάλλεται γραμμικά με την ορθή τάση σ_n και δίνεται από την εξίσωση $k_{S(50)} = 0,35\sigma_n + 0,09$ όπου για $\sigma_n=0$ προκύπτει $k_{S(50)} = 0,09$ MPa/mm (σχ.4.3.18στ)

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της μη διαστολικής διατμητικής αντοχής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n υπολογίζονται:

- Η μέγιστη διατμητική αντοχή η οποία μεταβάλλεται μη γραμμικά με την ορθή τάση. Προσαρμόζεται καμπύλη της μορφής $y=ax^b$ όπου $a=0,96$ και $b=1$ $r^2=0,95$ (σχ.4.3.18α)
- Η παραμένουσα γωνία τριβής $\varphi_r=38,7^\circ$ (σχ.4.3.18β)
- Η μη διαστολική γωνία τριβής $\varphi_m=34,2^\circ$ (σχ.4.3.18γ)

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Α.Π.Θ.
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

iv) **Ασβεστόλιθος (GL)**

Για τον ασβεστόλιθο (GL) διαμορφώθηκαν 8 δείγματα (7 δείγματα τεχνητής ασυνέχειας και 1 δείγμα επίπεδης επιφάνειας που διαμορφώθηκε με κοπή από δισκοπρίονο) τα οποία υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Συνολικά έγινες 49 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.

Στον πίνακα 4.3.4 δίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας των ασυνεχειών κάθε δείγματος και τα στάδια εφαρμογής ορθής τάσης με την αντίστοιχη ονομαστική ορθή τάση.

Πίνακας 4.3.4. Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών ασβεστόλιθου GL

A/A	Κωδικός δείγματος	Ασυνέχεια	Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Επιφάνεια [mm ²]	Στάδιο - Ορθή τάση (kPa)						
						1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	8ο
1	GL1	τεχνητή	94,22	66,28	6244,90	6	100	250	500	1000	2000	
2	GL2	τεχνητή	85,62	50,00	4281,00	8	2000	1000	500	250	100	
3	GL3	τεχνητή	83,26	56,00	4662,56	8	18	200	500	1000	2000	
4	GL4	φυ+τεχ	82,00	68,00	5576,00	6	14	1000	2500	250	500	
5	GL5	φυσική	94,35	65,00	6132,75	14	500	1000	2000	100	250	
6	GL6	φυσική	86,00	76,00	6536,00	12,5	750	1000	2000	100	250	500
7	GL7	τεχνητή	100,95	55,78	5630,99	15	2500	100	250	500	1000	
8	GL_flat	τεχνητή	89,00	66,00	5874,00	6	100	250	500	1000	2000	

Τα πλήρη διαγράμματα διατμητικής τάσης (τ) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$) για τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης δίνονται στο σχήμα 4.3.20α μέχρι 4.3.26α. Με την αύξηση της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη (peak) αντοχή αυξάνεται από 0,5 MPa για $\sigma=0,10$ MPa (Δοκ.GL2) μέχρι 1,98 MPa για $\sigma=2,0$ MPa (Δοκ. GL2).

Στα σχήματα 4.3.20β μέχρι 4.3.26β δίνονται τα διαγράμματα ορθής μετατόπισης (Δv) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις ορθές τάσεις υπάρχει μια αρχική συμπίεση/συστολή του δοκιμίου, μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή, που οφείλεται στο κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ή/και στην ελαστική συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων. Ακολουθεί διαστολή (αύξηση του Δv) με ρυθμό αυξανόμενο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της διατμητικής μετατόπισης και στη συνέχεια μείωση. Η σχετική διατμητική μετατόπιση στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός διαστολής (που αντιστοιχεί στη στιγμιαία γωνία διαστολής) παρατηρείται μετά τη μέγιστη αντοχή.

Στα σχήματα 4.3.20γ μέχρι 4.3.26γ δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n . Οι αριθμοί που εμφανίζονται δίπλα από κάθε σημείο αντιστοιχούν στο στάδιο της κάθε ορθής τάσης.

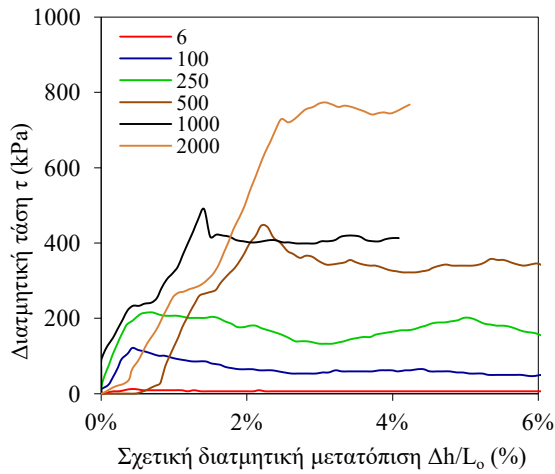
Η ανηγμένη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.20δ μέχρι 4.3.26δ

Στα σχήματα 4.3.20ε μέχρι 4.3.26ε δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών της διατμητικής δυσκαμψίας $k_{S(50)}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n .

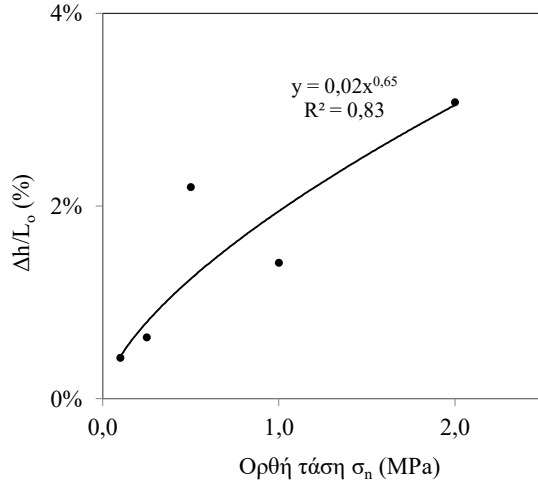
Στα σχήματα 4.3.20στ μέχρι 4.3.26στ φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n .

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

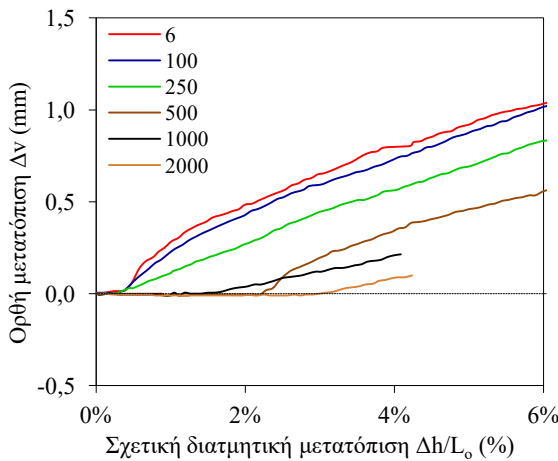
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



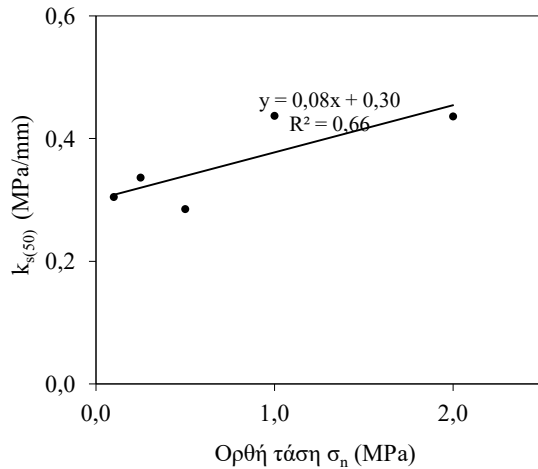
(α)



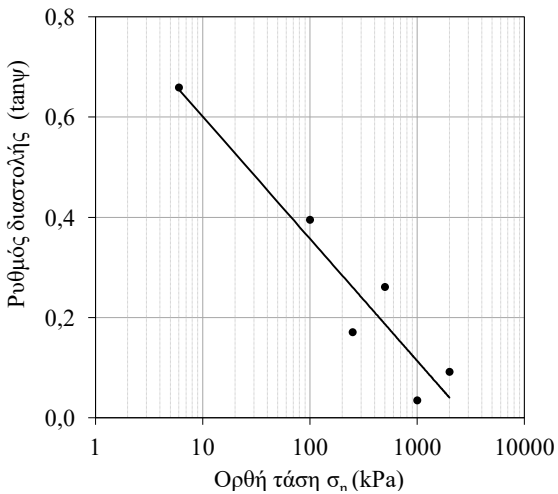
(δ)



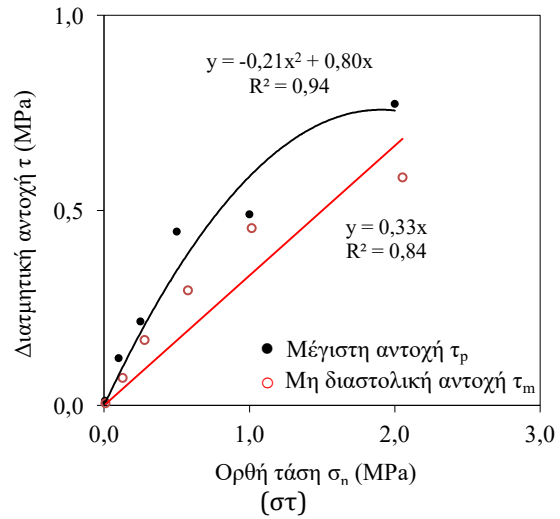
(β)



(ε)

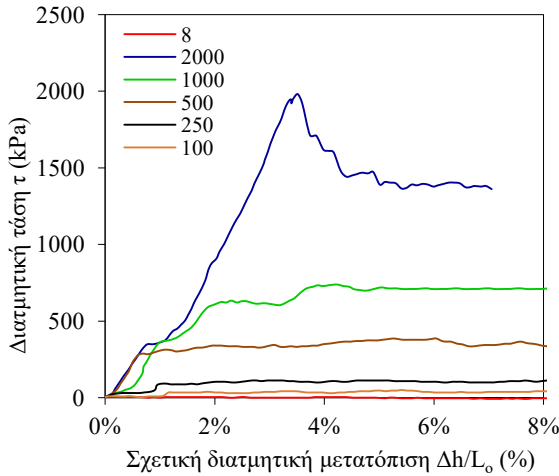


(γ)

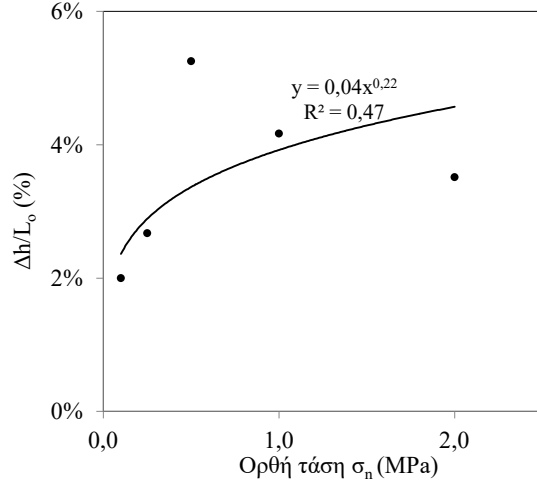


(στ)

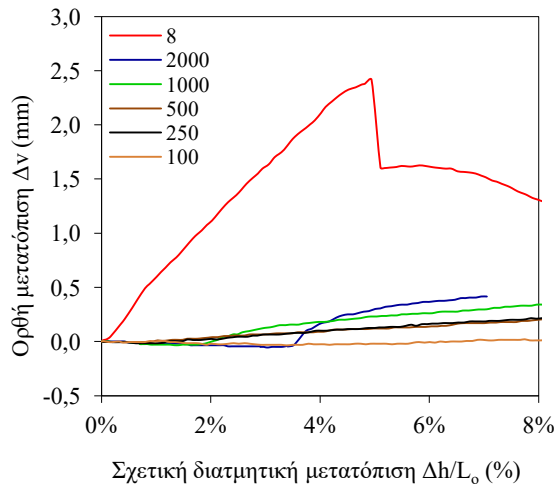
Σχήμα 4.3.20. Δείγμα GL1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση



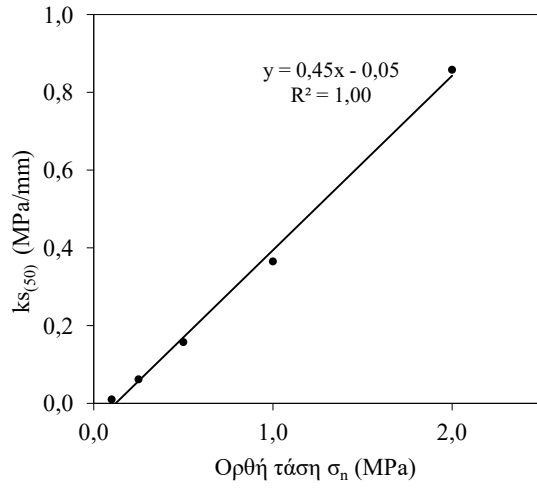
(α)



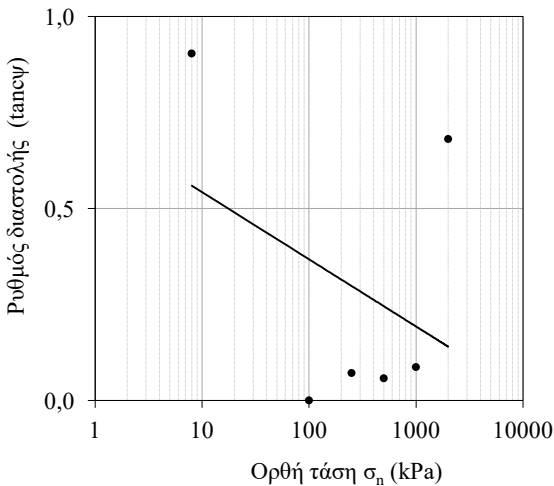
(δ)



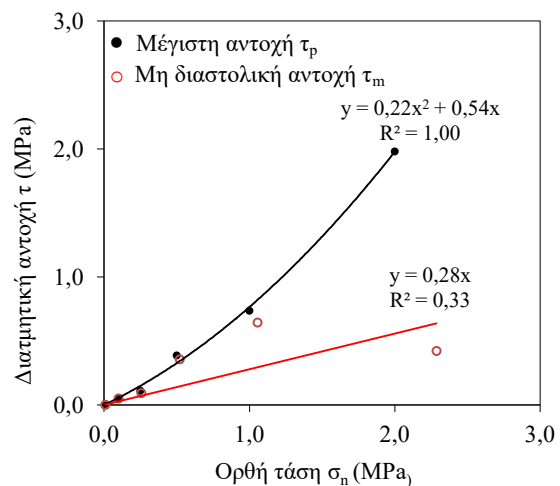
(β)



(ε)



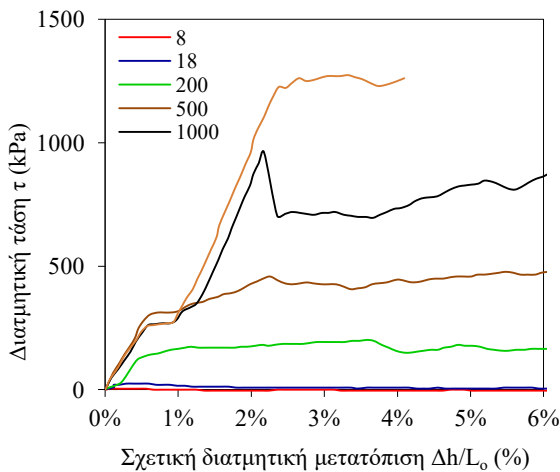
(γ)



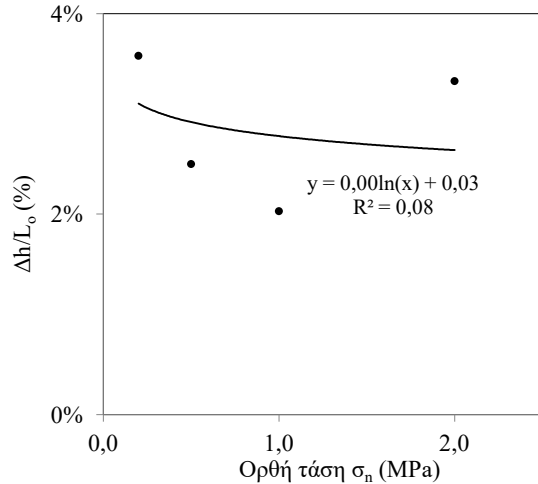
(στ)

Σχήμα 4.3.21. Δείγμα GL2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγόμενη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

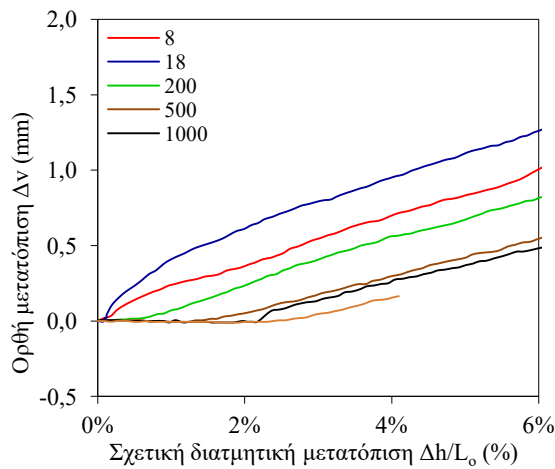
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



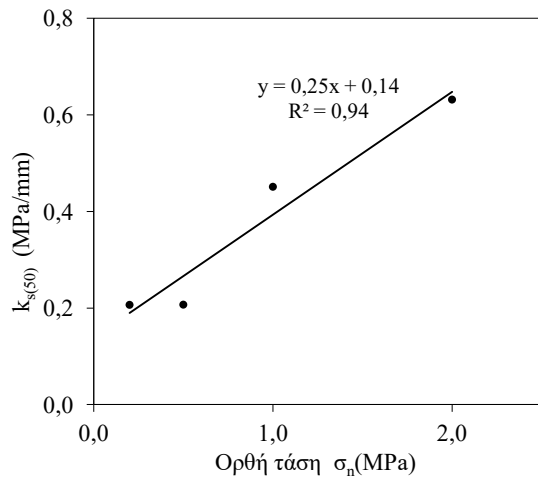
(α)



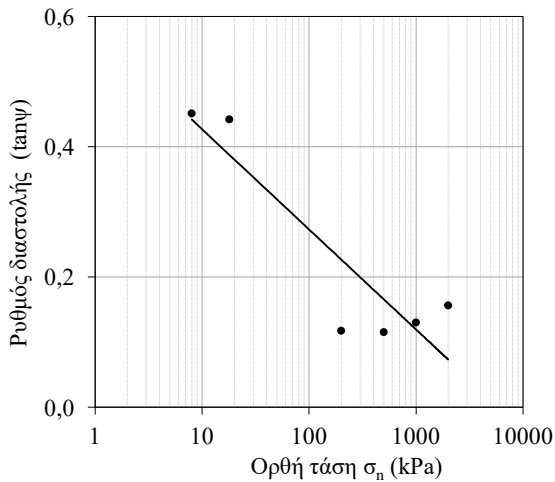
(δ)



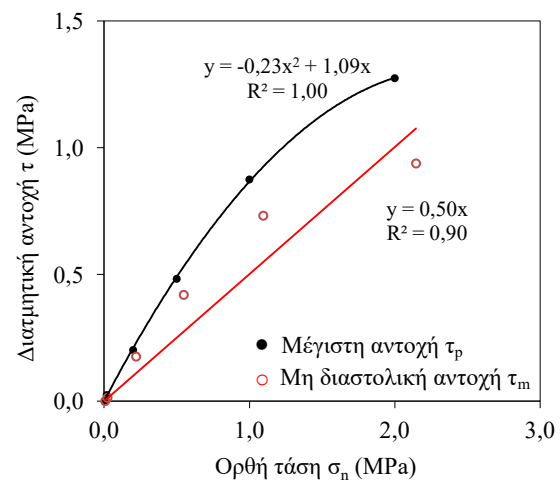
(β)



(ε)

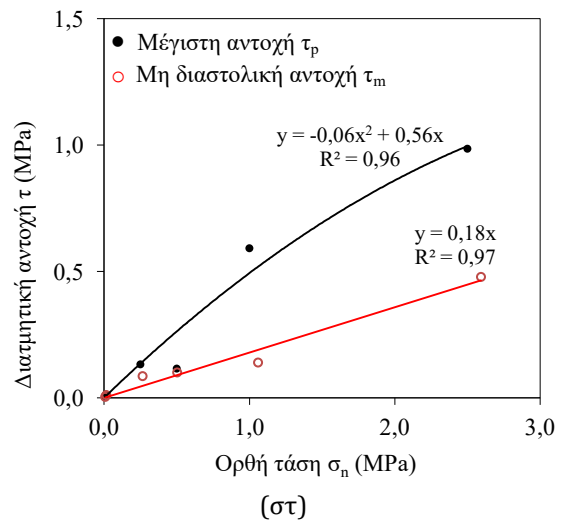
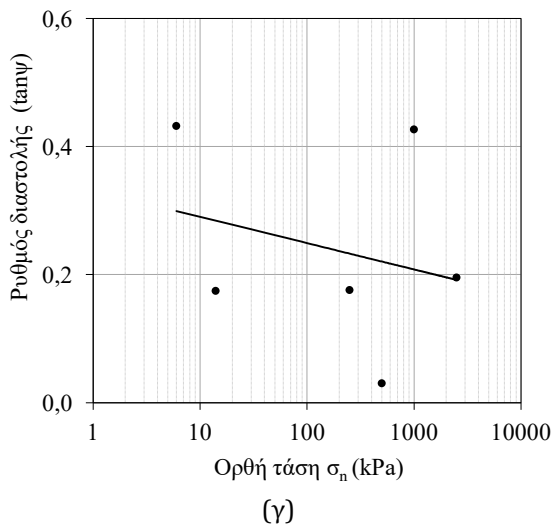
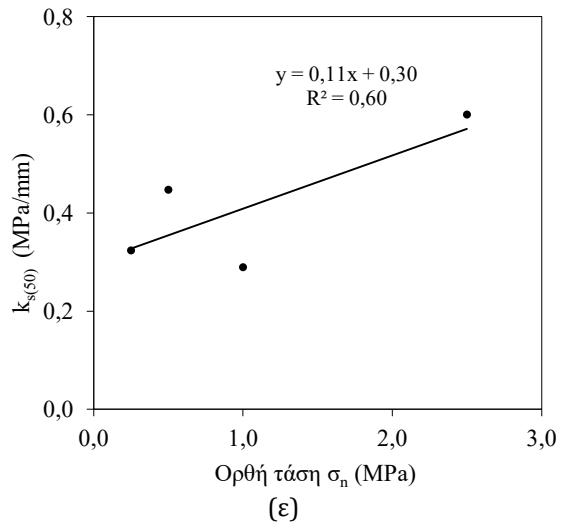
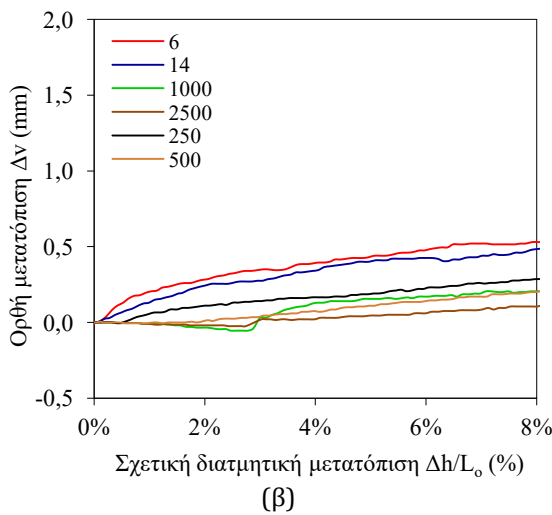
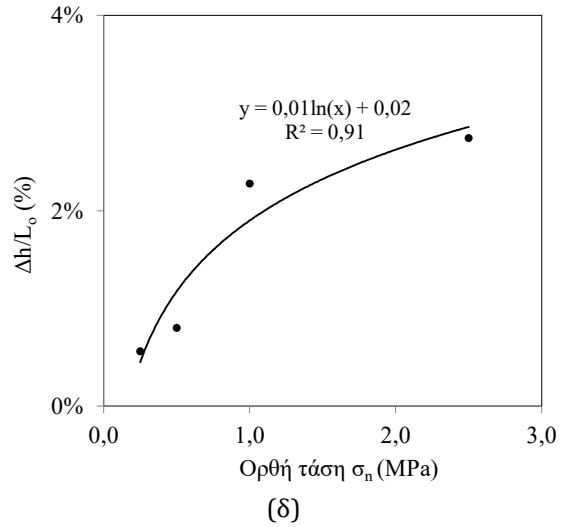
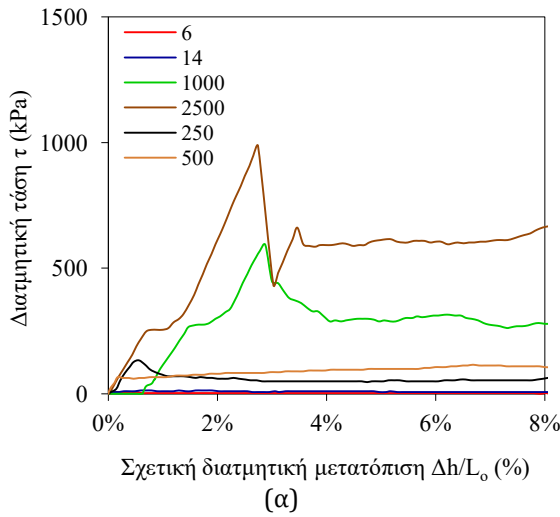


(γ)



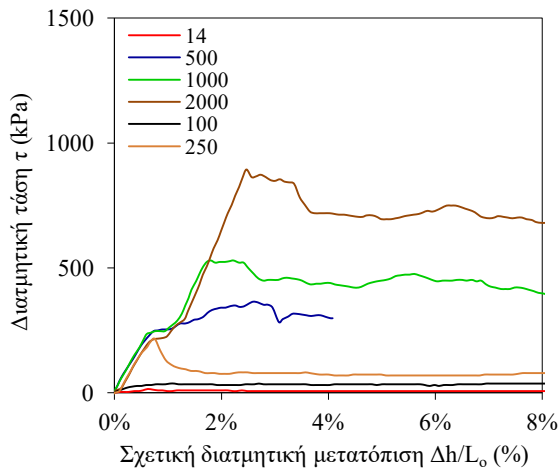
(στ)

Σχήμα 4.3.22. Δείγμα GL3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγόμενη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

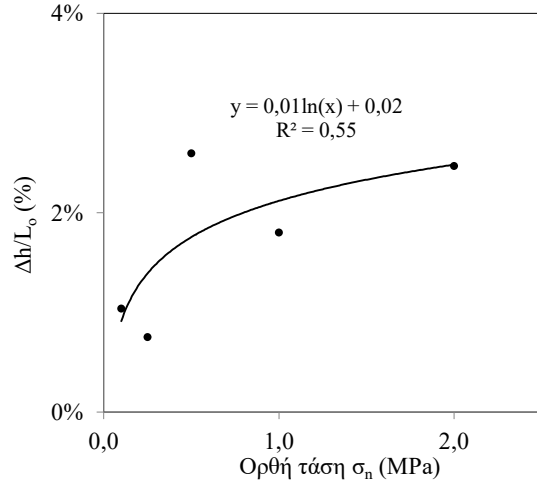


Σχήμα 4.3.23. Δείγμα GL4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

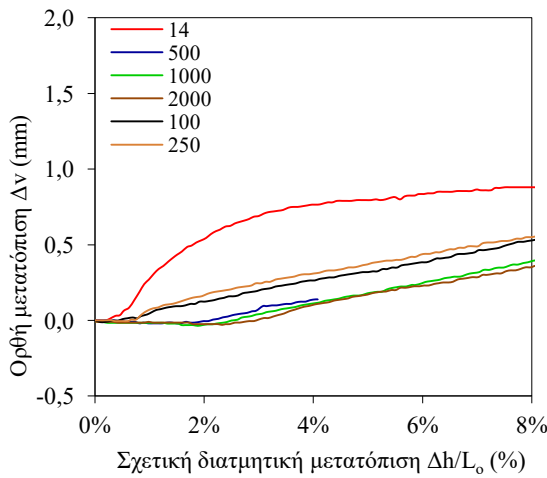
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



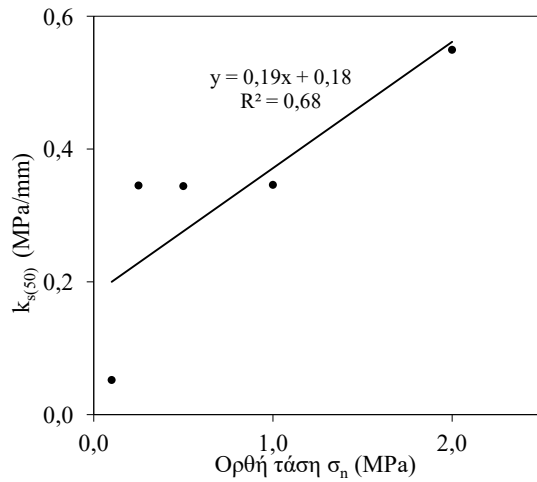
(α)



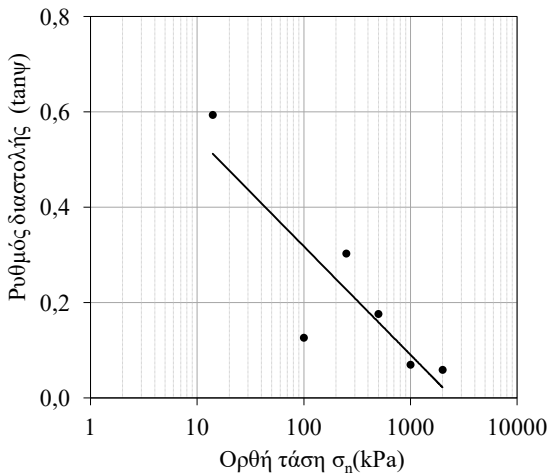
(δ)



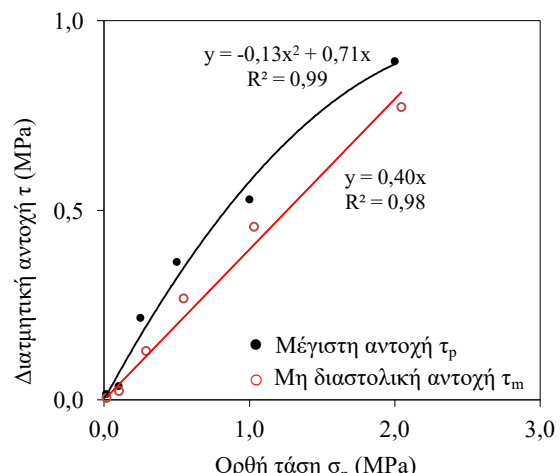
(β)



(ε)

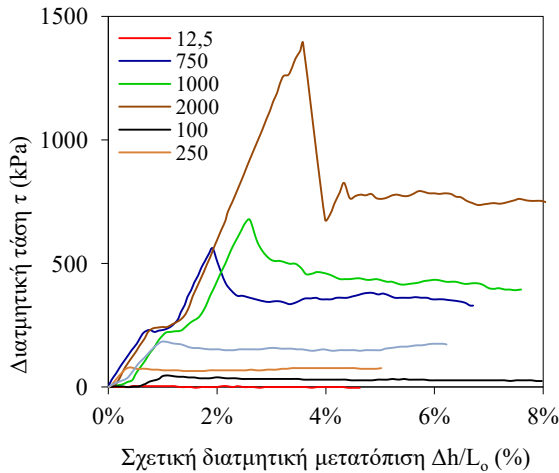


(γ)

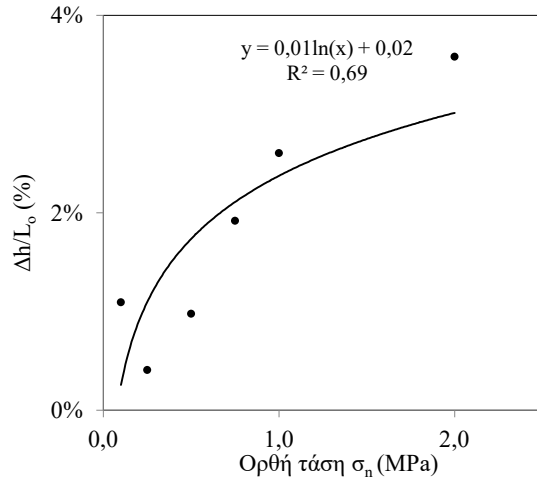


(στ)

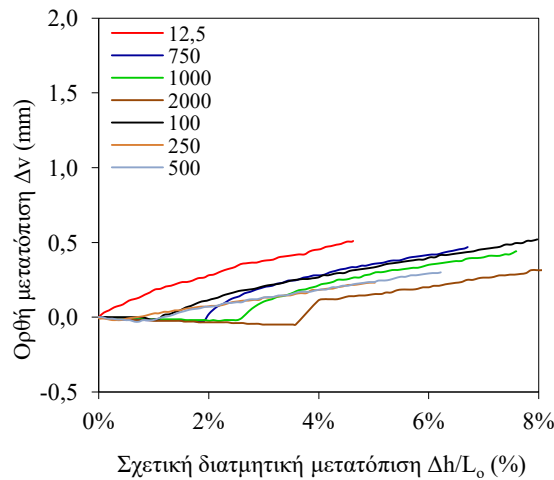
Σχήμα 4.3.24. Δείγμα GL5: (α) Διαμετρική τάση-Σχετική διαμετρική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διαμετρική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διαμετρική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διαμετρική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διαμετρική αντοχή-Ορθή τάση



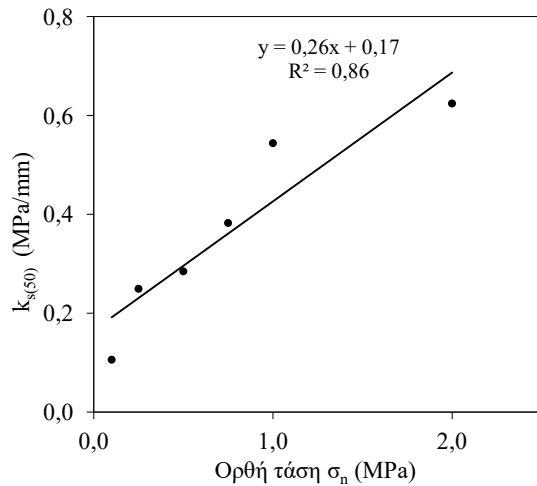
(α)



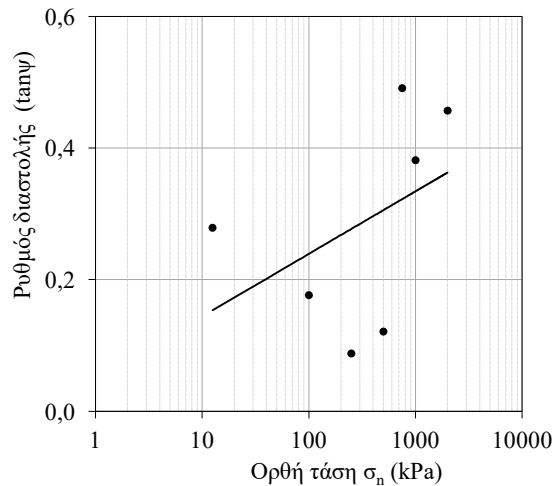
(δ)



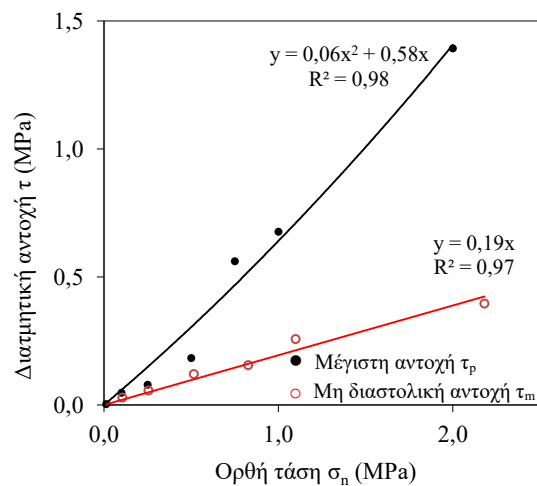
(β)



(ε)



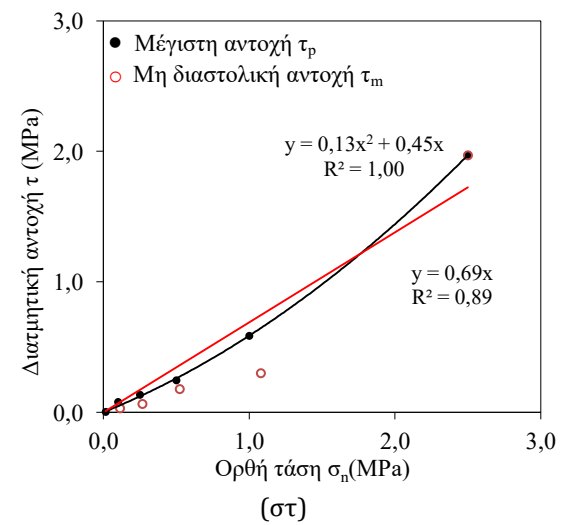
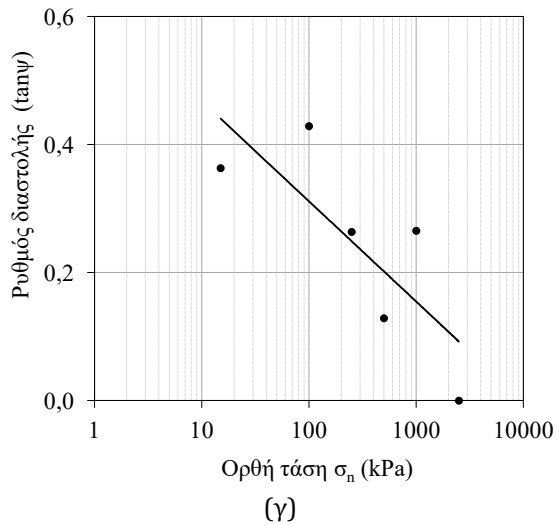
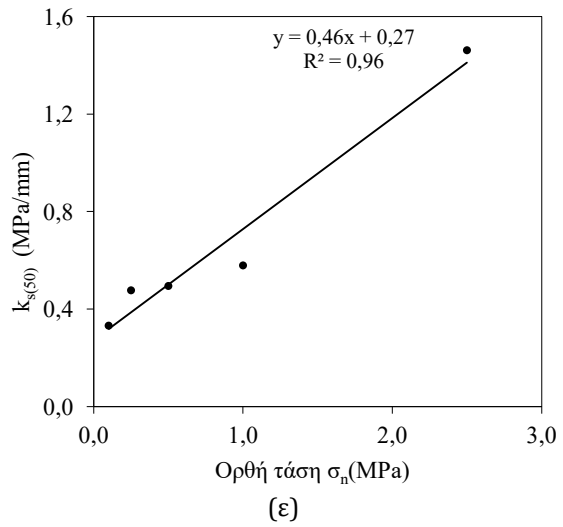
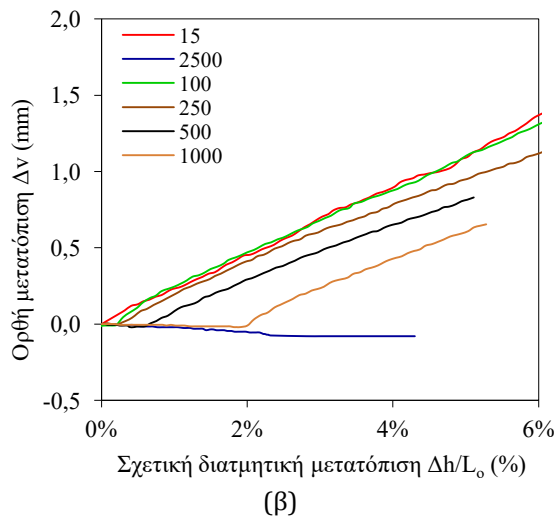
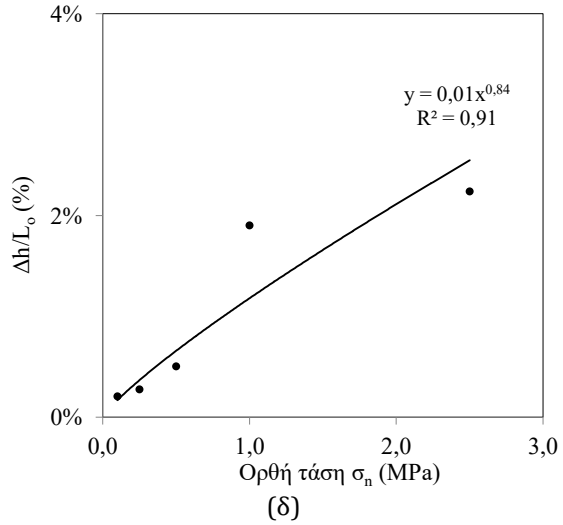
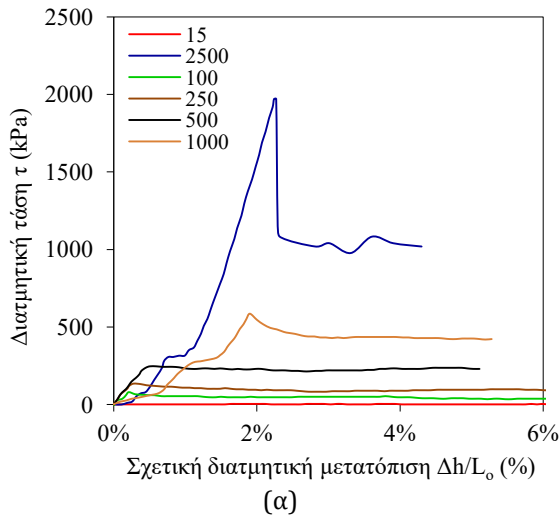
(γ)



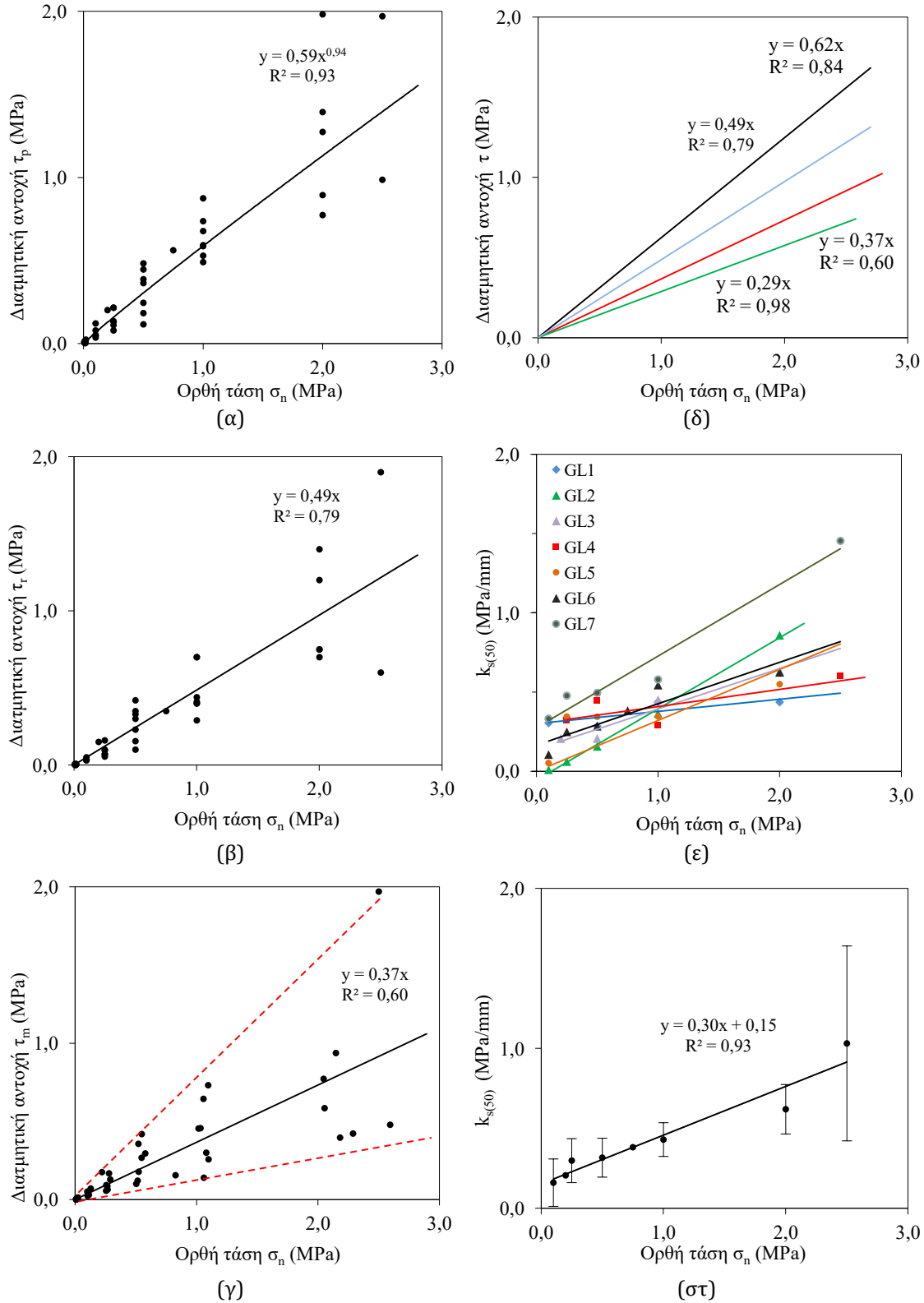
(στ)

Σχήμα 4.3.25. Δείγμα GL6: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

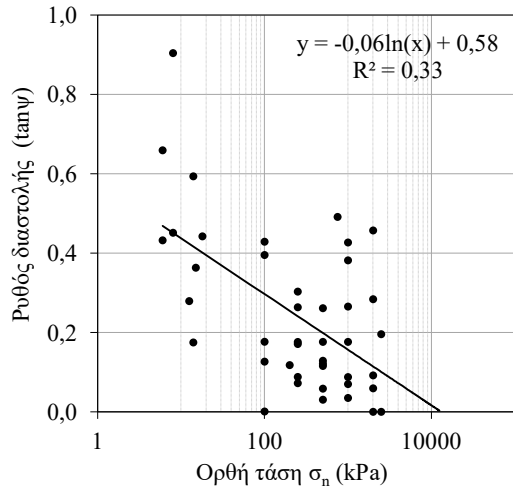


Σχήμα 4.3.26. Δείγμα GL7: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής -Ορθή τάση (δ) Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση

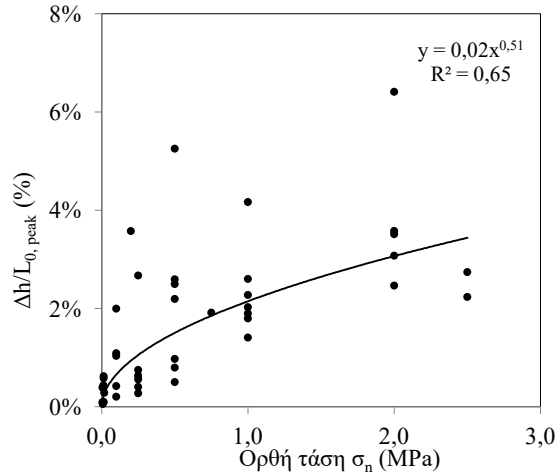


Σχήμα 4.3.27. Διαγράμματα Ορθής τάσης με: (α) Μέγιστη διατηρητική αντοχή (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) (γ) Μη διαστολική διατηρητική αντοχή (δ) Διατηρητική αντοχή (ε) Διατηρητική δυσκαμψία κάθε δοκιμίου (στ) Διατηρητική δυσκαμψία για το σύνολο των δοκιμών του αβεστούλιθου GL.

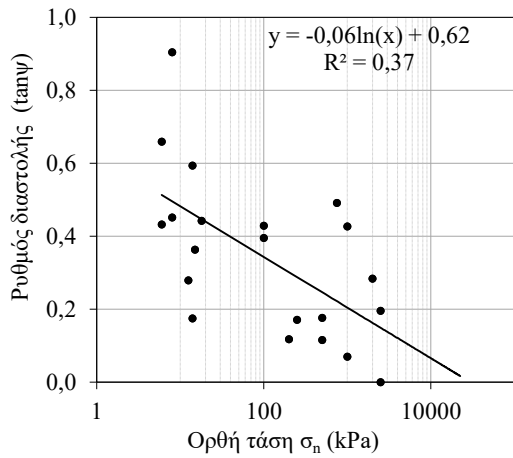
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



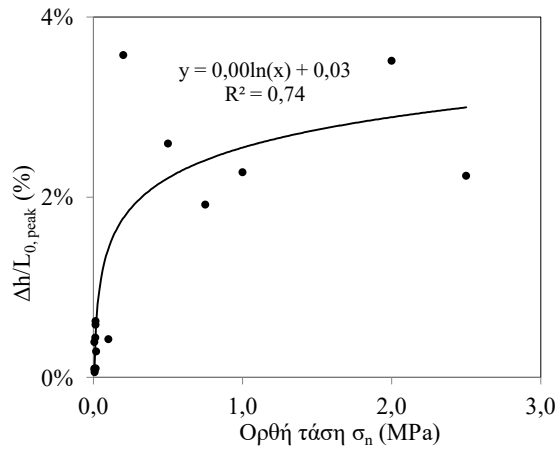
(α)



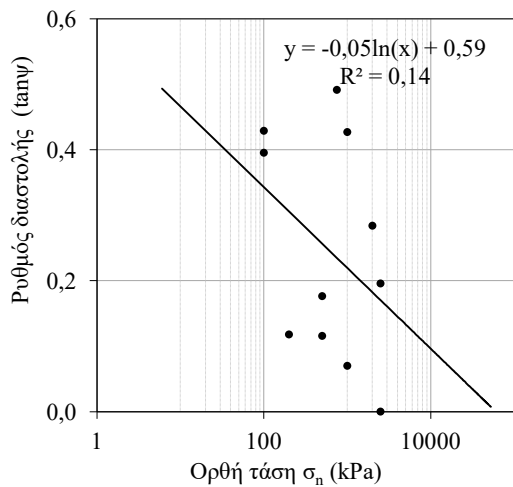
(δ)



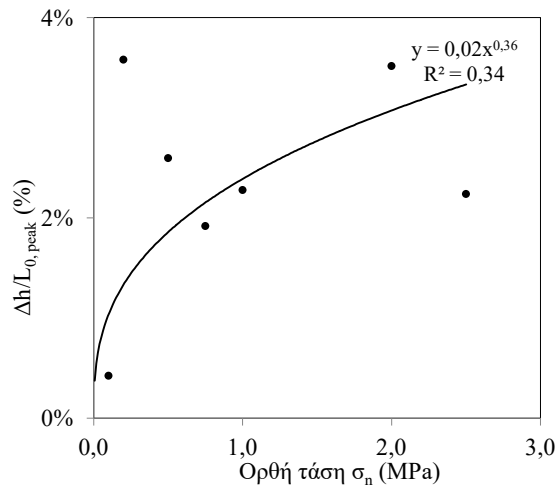
(β)



(ε)



(γ)



(στ)

Σχήμα 4.3.28. Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής (tanψ)-Ορθής τάσης και (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διαμητρικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον ασβεστόλιθο GL.

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n διαπιστώνεται λογαριθμική μεταβολή με την ορθή τάση. Η διαστολή μηδενίζεται όταν η ορθή τάση είναι 12,9 MPa για το σύνολο των δοκιμών (σχ.4.3.28α). Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου (σχ.4.3.28β) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 31,2MPa. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους (σχ.4.3.28γ) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 0,2MPa. Η τάση αυτή είναι ίση περίπου 0,3% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και 0,2% της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη (θλιπτική αντοχή 80MPa, BDT= 110MPa)

Αντιστοίχως τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.28δ για όλα τα δοκίμια, 4.3.28ε για τα πρώτα στάδια και 4.3.28στ για τα πρώτα στάδια πέραν του ίδιου βάρους.

Η γωνία διαστολής για ίδιο βάρος (πρακτικά χωρίς φθορά της επιφάνειας των τοιχωμάτων) προκύπτει 25,6° από το σύνολο των σταδίων. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου η αντίστοιχη γωνία διαστολής είναι 27,7° Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους η αντίστοιχη τιμή είναι 33,1°

Η διατμητική δυσκαμψία $k_{S(50)}$ μεταβάλλεται γραμμικά με την ορθή τάση σ_n και δίνεται από την εξίσωση $k_{S(50)} = 0,3\sigma_n + 0,15$ όπου για $\sigma_n=0$ προκύπτει $k_{S(50)} = 0,15$ MPa/mm (σχ.4.3.27στ)

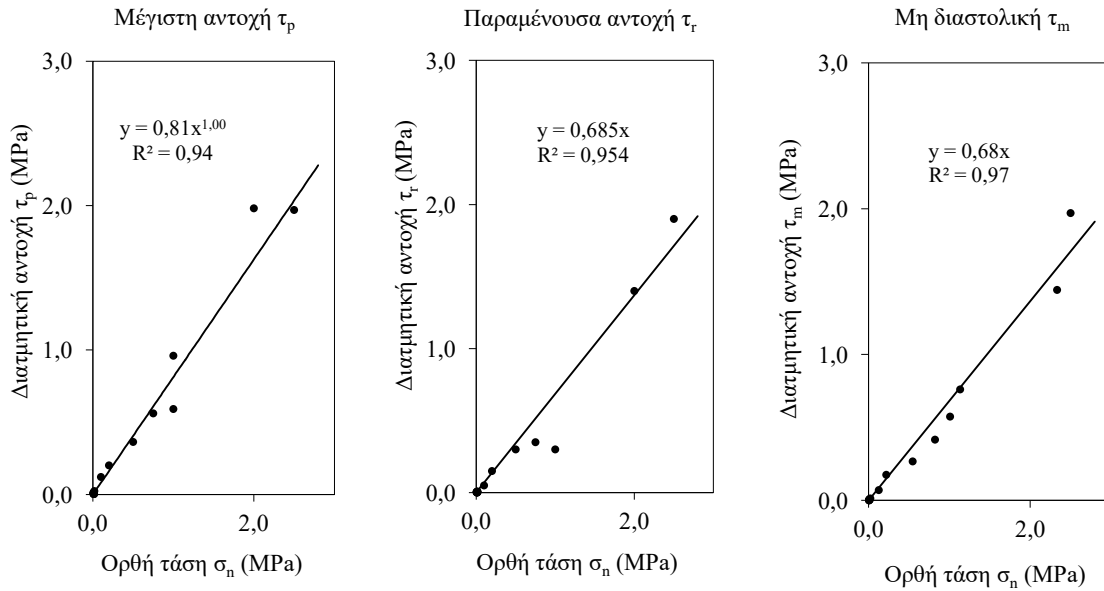
Τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών στον ασβεστόλιθο έδωσαν ένα σχετικά μεγάλο εύρος τιμών τόσο στη μέγιστη διατμητική αντοχή (τ_p) όσο και στην μη διαστολική διατμητική αντοχή (τ_m) (Σχήμα 4.3.27α,β,γ). Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στις λείες επιφάνειες των μικροκρυστάλλων που 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 κύριας δοκιμής που θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική για την ασυνέχεια αφού δεν έχει υποστεί κάποια αλλοίωση λόγω των επαναλαμβανόμενων διατμήσεων. Με βάσει τις τιμές αυτές

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 4.3.27ζ) και οι αντίστοιχες γωνίες τριβής για τον ασβεστόλιθο:

- Η παραμένουσα γωνία τριβής $\varphi_r=34,4^\circ$
- Η μη διαστολική γωνία τριβής $\varphi_m=34,2^\circ$



Σχήμα 4.3.27ζ. Διαγράμματα μέγιστης, παραμένουσας και μη διαστολικής διατμητικής αντοχής για τα πρώτα στάδια δοκιμών διάτμησης του ασβεστόλιθου.

Για τον Σερπεντινίτη της περιοχής των Γρεβενών (GP) διαμορφώθηκαν 5 δείγματα (4 δείγματα τεχνητής ασυνέχειας και 1 δείγμα επίπεδης επιφάνειας που διαμορφώθηκε με κοπή από δισκοπρίονο) τα οποία υποβλήθηκαν σε διάτμηση σε διαφορετικές ορθές τάσεις. Συνολικά έγινες 31 δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.

Στον πίνακα 4.3.5 δίνονται οι διαστάσεις της επιφάνειας των ασυνεχειών κάθε δείγματος και τα στάδια εφαρμογής ορθής τάσης με την αντίστοιχη ονομαστική ορθή τάση.

Πίνακας 4.3.5. Στοιχεία δοκιμών και στάδια εφαρμογής ορθής τάσης δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών σερπεντινίτη GP

A/A	Κωδικός δείγματος	Ασυνέχεια	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Επιφάνεια (mm ²)	Στάδιο - Ορθή τάση (kPa)							
						1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	6ο	7ο	8ο
1	GP1	τεχνητή	91,74	80,17	7.354	5	27,5	50	100	250	500	1000	2000
2	GP2	τεχνητή	103,80	61,20	6.352	13	500	1000	2000	100	250		
3	GP3	τεχνητή	110,00	85,00	9.350	9	100	250	500	1000	2000		
4	GP4	τεχνητή	106,00	86,00	9.116	9,5	1000	1500	2000	250	750		
5	GP_flat	τεχνητή	110,63	71,57	7.917	10,5	100	250	500	1000			

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Τα πλήρη διαγράμματα διατμητικής τάσης (τ) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$) για τις αντίστοιχες τιμές της ορθής τάσης δίνονται στο σχήμα 4.3.29α μέχρι 4.3.32α. Με την αύξηση της ορθής τάσης η διατμητική αντοχή αυξάνεται. Η μέγιστη (peak) αντοχή αυξάνεται από 0,04 MPa για $\sigma=0,10$ MPa (Δοκ. GP2) μέχρι 1,51 MPa για $\sigma=2,0$ MPa (Δοκ. GP1).

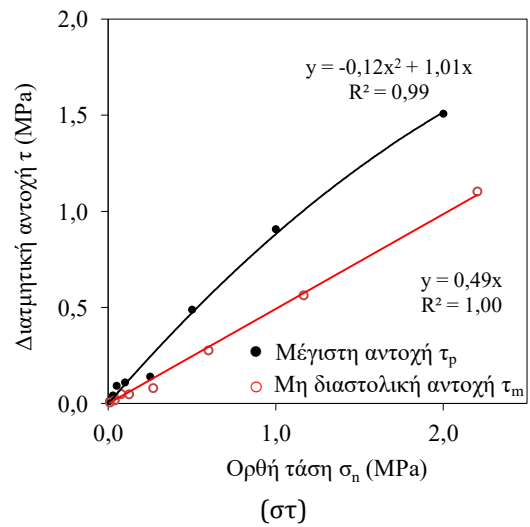
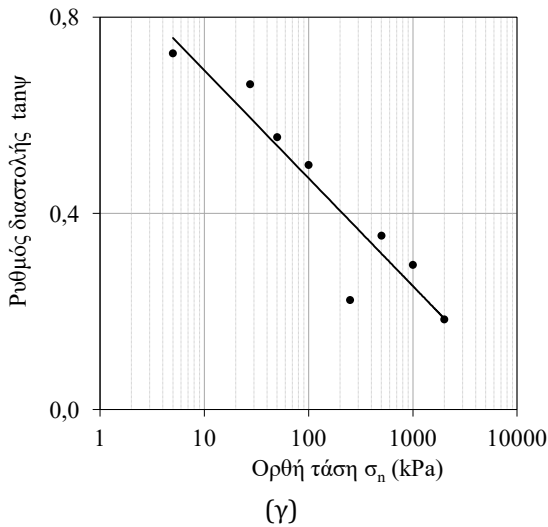
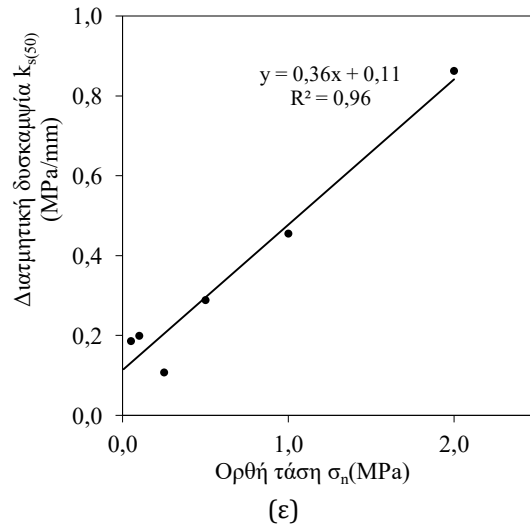
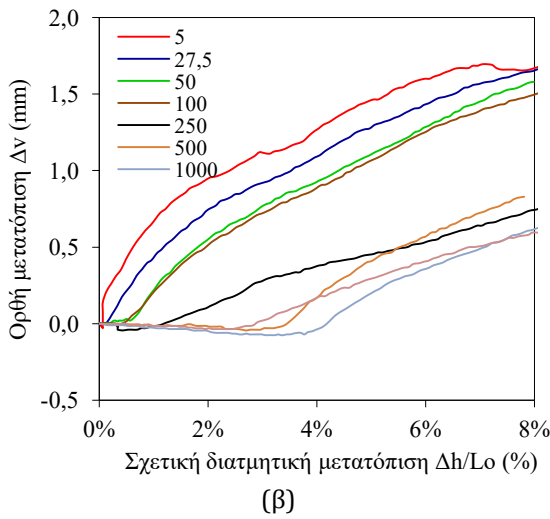
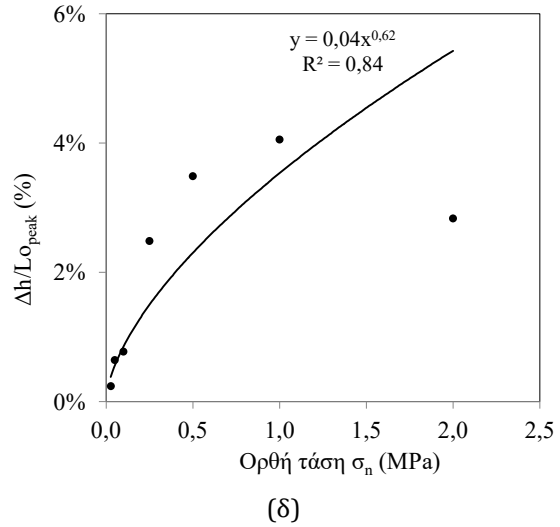
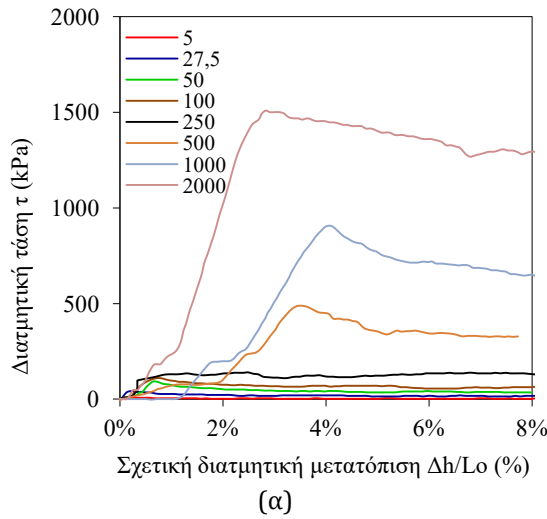
Στα σχήματα 4.3.29β μέχρι 4.3.32β. δίνονται τα διαγράμματα ορθής μετατόπισης (Δv) - ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης ($\Delta h/L_0$). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις ορθές τάσεις υπάρχει μια αρχική συμπίεση/συστολή του δοκιμίου, μέχρι μια ελάχιστη αρνητική τιμή, που οφείλεται στο κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας ή/και στην ελαστική συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων. Ακολουθεί διαστολή (αύξηση του Δv) με ρυθμό αυξανόμενο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της διατμητικής μετατόπισης και στη συνέχεια μείωση. Η σχετική διατμητική μετατόπιση στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός διαστολής (που αντιστοιχεί στη στιγμιαία γωνία διαστολής) παρατηρείται κατά τη μέγιστη αντοχή.

Στα σχήματα 4.3.29γ μέχρι 4.3.32γ. δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n . Οι αριθμοί που εμφανίζονται δίπλα από κάθε σημείο αντιστοιχούν στο στάδιο της κάθε ορθής τάσης.

Η ανηγμένη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.29δ μέχρι 4.3.32δ

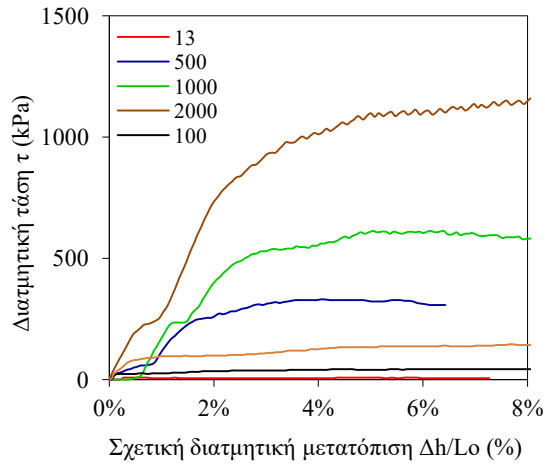
Στα σχήματα 4.3.29ε μέχρι 4.3.32ε δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των τιμών της διατμητικής δυσκαμψίας $k_{S(50)}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n .

Στα σχήματα 4.3.29στ μέχρι 4.3.32στ φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n .

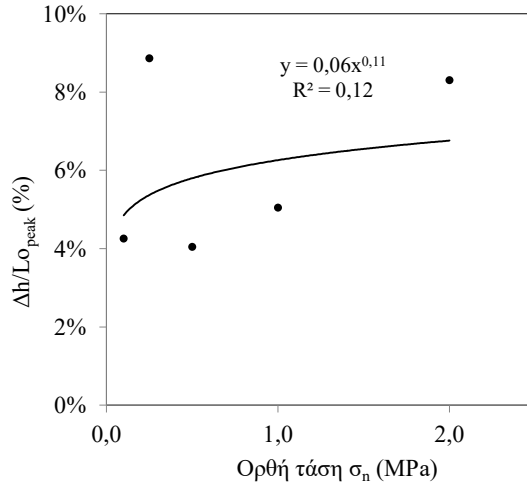


Σχήμα 4.3.29. Δείγμα GP1: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

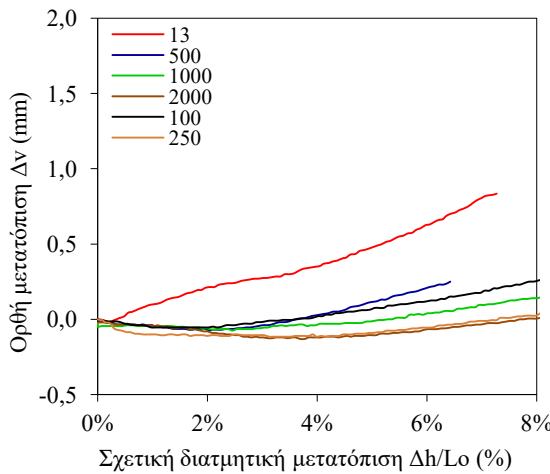
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



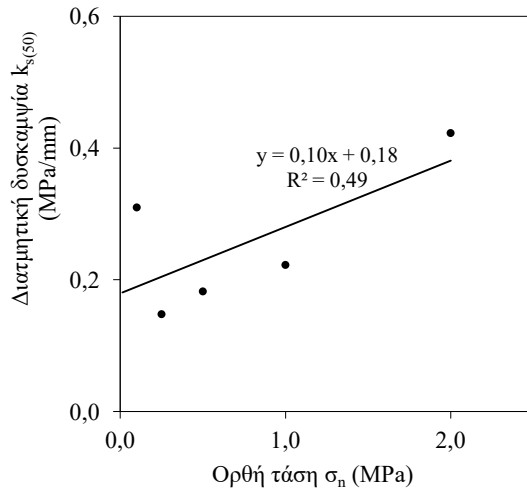
(α)



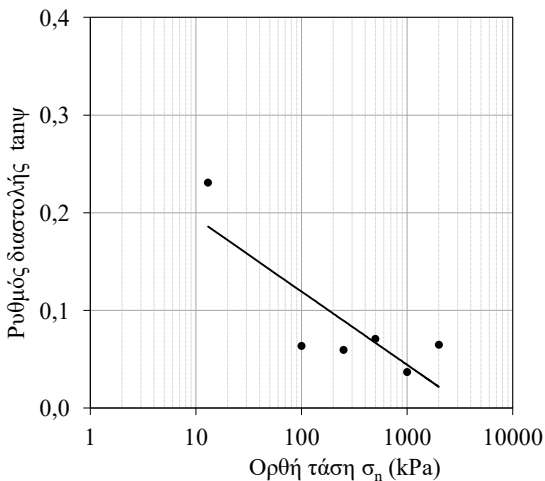
(δ)



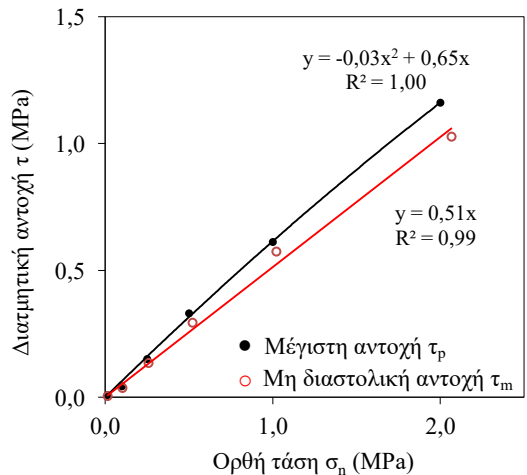
(β)



(ε)

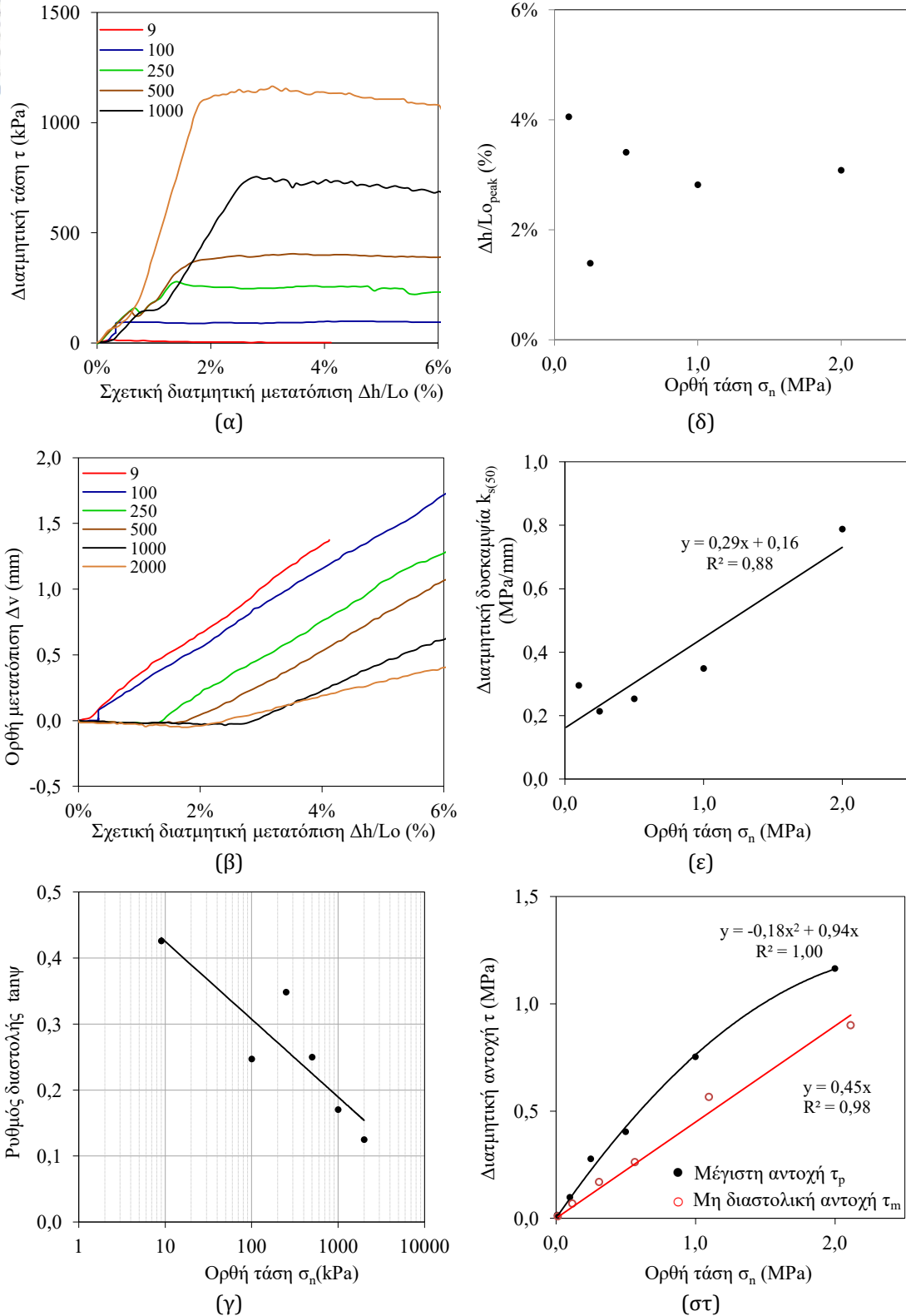


(γ)



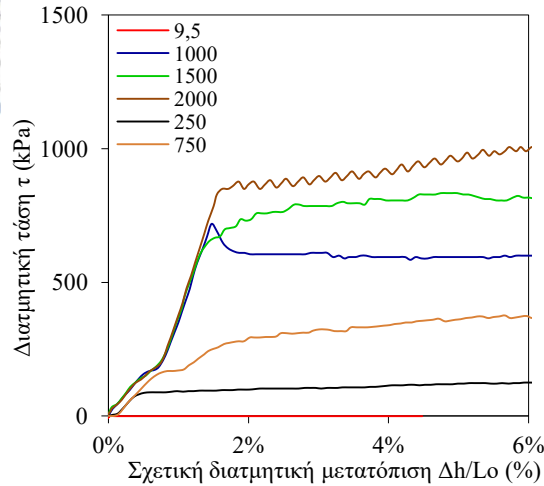
(στ)

Σχήμα 4.3.30. Δείγμα GP2: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

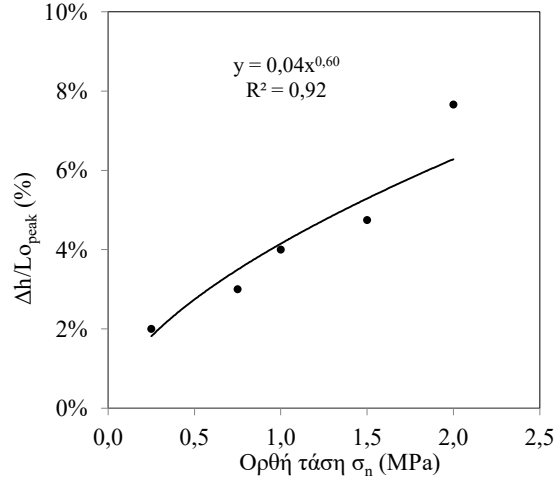


Σχήμα 4.3.31. Δείγμα GP3: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση

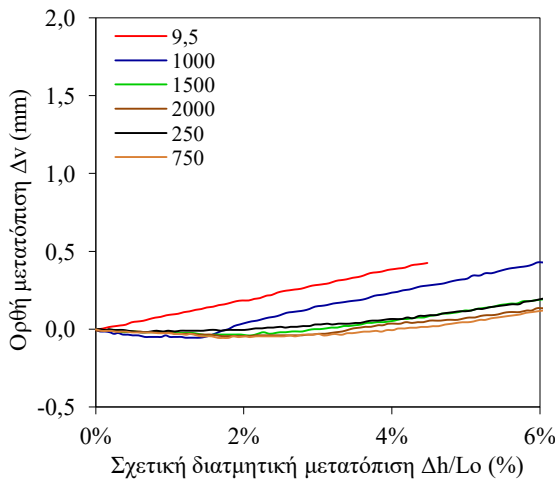
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



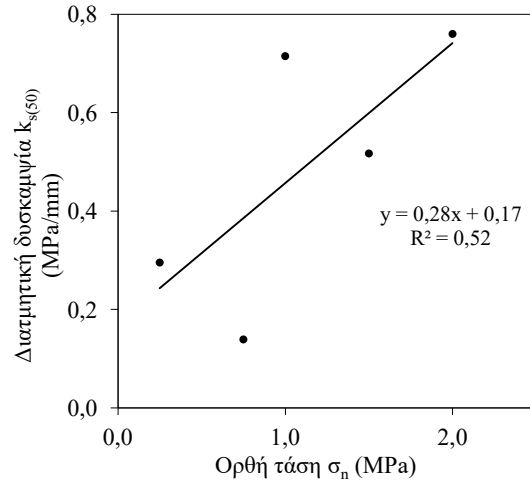
(α)



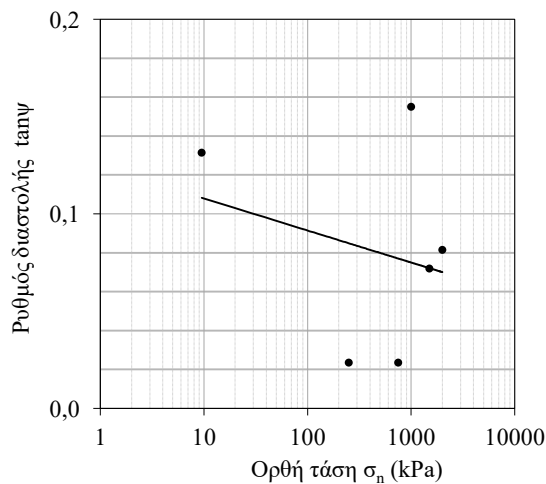
(δ)



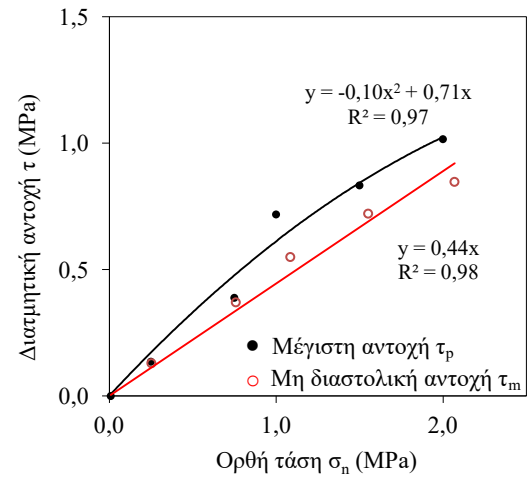
(β)



(ε)

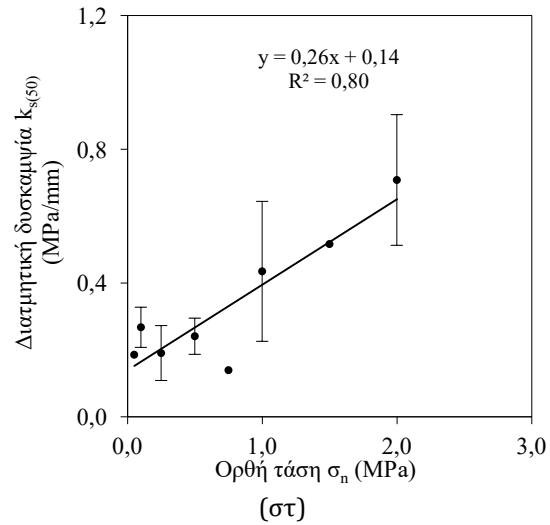
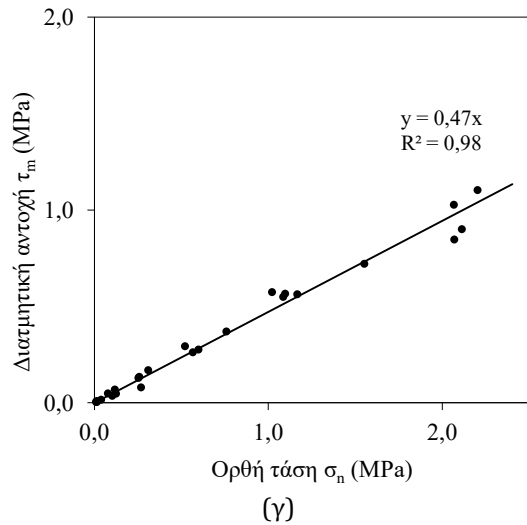
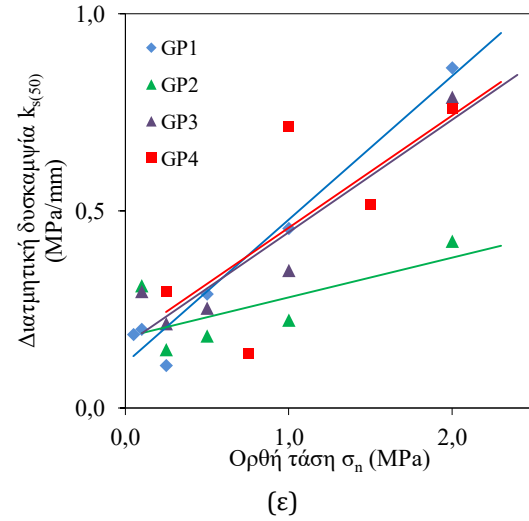
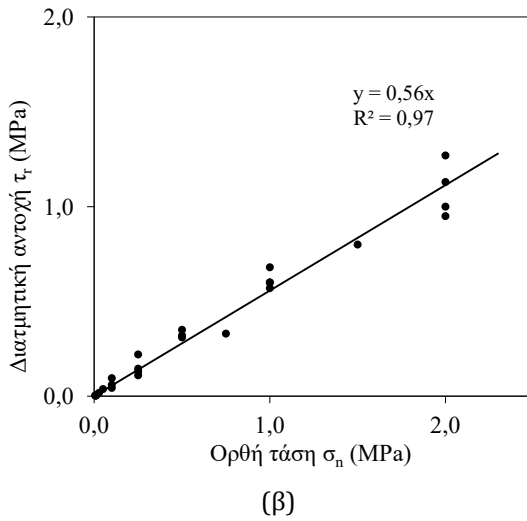
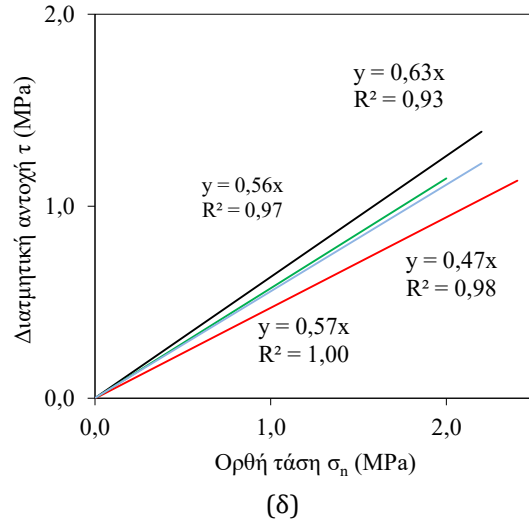
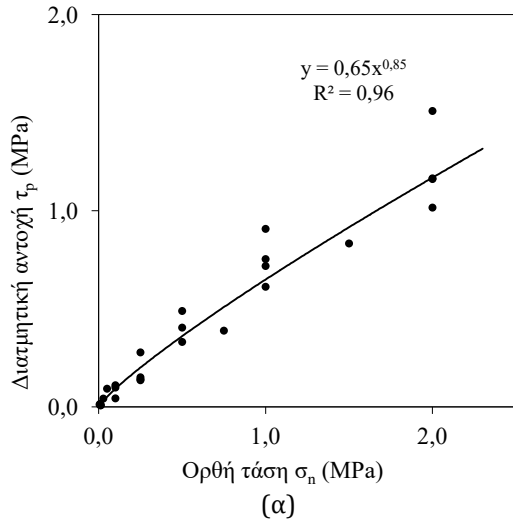


(γ)



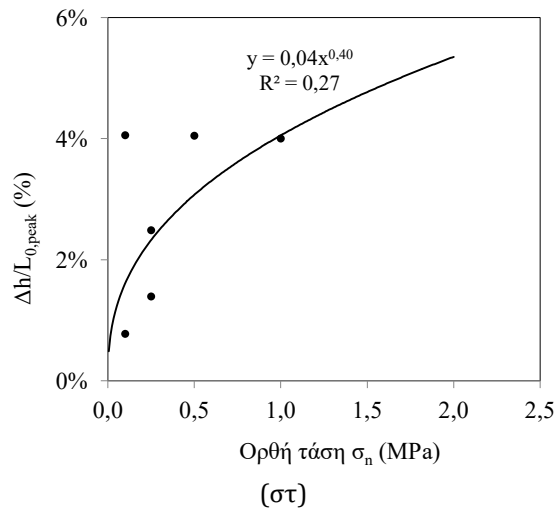
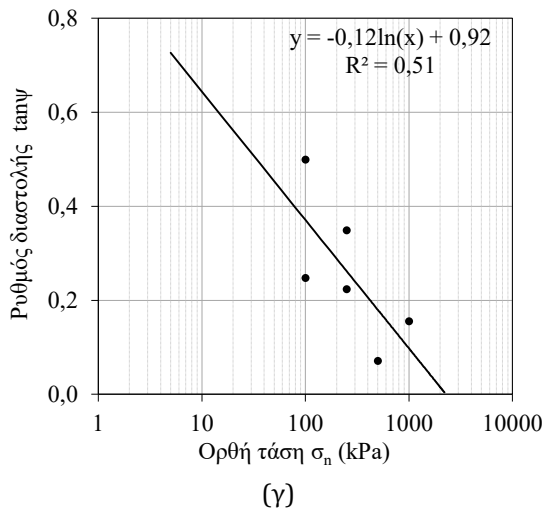
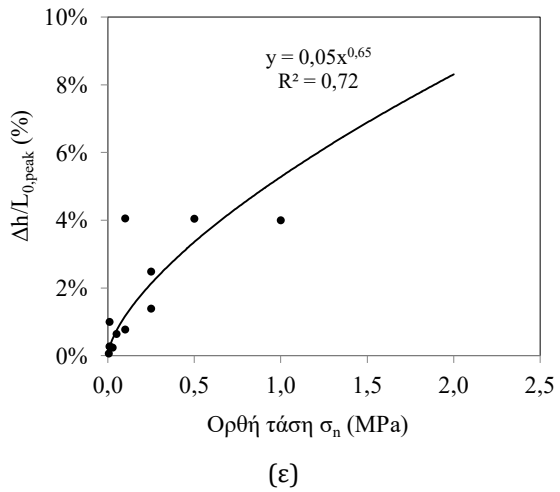
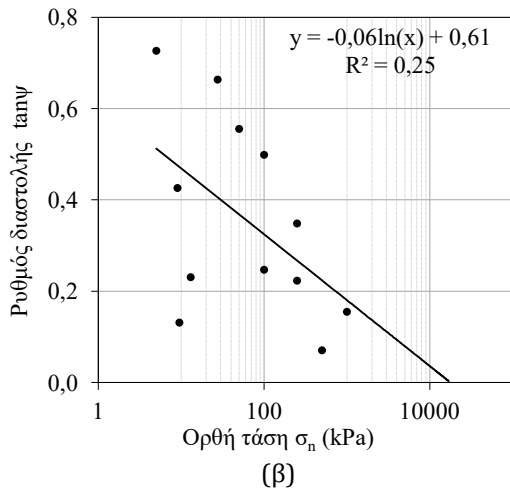
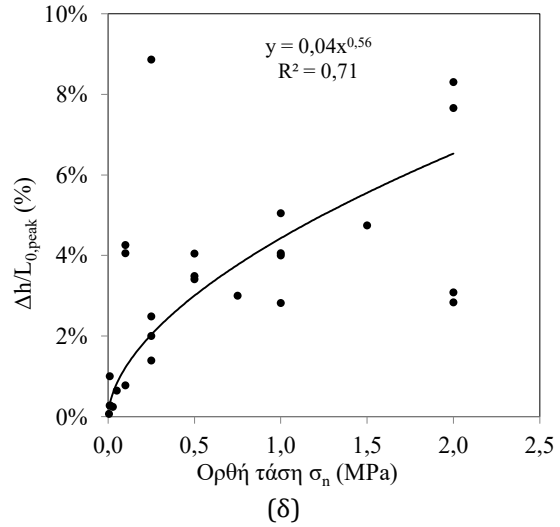
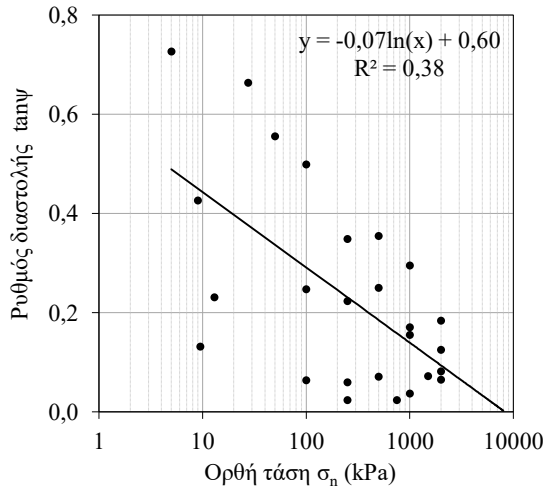
(στ)

Σχήμα 4.3.32. Δείγμα GP4: (α) Διατμητική τάση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (β) Ορθή μετατόπιση-Σχετική διατμητική μετατόπιση (γ) Ρυθμός διαστολής - Ορθή τάση (δ) Σχετική διατμητική μετατόπιση- Ορθή τάση (ε) Διατμητική δυσκαμψία-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή (μέγιστη και μη διαστολική)-Ορθή τάση



Σχήμα 4.3.33. (α) Μέγιστη διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (β) Τελική αντοχή (παραμένουσα) διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (γ) Διατμητική αντοχή μη διαστολικής-Ορθή τάση (δ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (ε) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση (στ) Διατμητική αντοχή-Ορθή τάση για τον σερπεντινίτη GP.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση



Σχήμα 4.3.34. Διαγράμματα Ρυθμού διαστολής ($\tan\delta$)-Ορθής τάσης (α) για όλα τα στάδια (β) για τα πρώτα στάδια, (γ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους και Ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης - Ορθής τάσης (δ) για όλα τα δοκίμια (ε) για τα πρώτα στάδια, (στ) για τα πρώτα στάδια χωρίς του ίδιου βάρους για τον σερπεντινίτη GP.

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής των τιμών του ρυθμού της στιγμιαίας διαστολής ($\tan\psi$) με την ορθή τάση σ_n διαπιστώνεται λογαριθμική μεταβολή με την ορθή τάση. Η διαστολή μηδενίζεται όταν η ορθή τάση είναι 8,3 MPa για το σύνολο των δοκιμών (σχ.4.3.34α). Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου (σχ.4.3.34β) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 4,4MPa. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους (σχ.4.3.34γ) η αντίστοιχη ορθή τάση είναι 2,2MPa. Η τάση αυτή είναι ίση περίπου με το 2,5% της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και 1,3% της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη (θλιπτική αντοχή 91MPa, BDT= 173MPa)

Αντιστοίχως τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ανηγμένης διατμητικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή $(\Delta h/L_0)_{peak}$ συναρτήσει της ορθής τάσης σ_n δίνεται στα σχήματα 4.3.34δ για όλα τα δοκίμια, 4.3.34ε για τα πρώτα στάδια και 4.3.34στ για τα πρώτα στάδια πέραν του ίδιου βάρους.

Η γωνία διαστολής για ίδιο βάρος (πρακτικά χωρίς φθορά της επιφάνειας των τοιχωμάτων) προκύπτει 26,1° από το σύνολο των σταδίων. Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου ή/και δευτέρου σταδίου η αντίστοιχη γωνία διαστολής είναι 27,1° Όταν χρησιμοποιούνται μόνον οι δοκιμές πρώτου σταδίου πέραν του ίδιου βάρους η αντίστοιχη τιμή είναι 36,0°.

Η διατμητική δυσκαμψία $k_{S(50)}$ μεταβάλλεται γραμμικά με την ορθή τάση σ_n και δίνεται από την εξίσωση $k_{S(50)} = 0,26\sigma_n + 0,14$ όπου για $\sigma_n=0$ προκύπτει $k_{S(50)} = 0,14$ MPa/mm (σχ.4.3.33στ)

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής αντοχής (τ_p) και της διατμητικής αντοχής μη διαστολικής (τ_m) με την ορθή τάση σ_n υπολογίζονται:

- Η μέγιστη διατμητική αντοχή η οποία μεταβάλλεται μη γραμμικά με την ορθή τάση. Προσαρμόζεται καμπύλη της μορφής $y=ax^b$ όπου $a=0,65$ και $b=0,85$ $r^2=0,96$ (σχ.4.3.33α)
- Η παραμένουσα γωνία τριβής $\varphi_r=29,1^\circ$ (σχ.4.3.33β)
- Η μη διαστολική γωνία τριβής $\varphi_m=25,3^\circ$ (σχ.4.3.33γ)

4.4. Αποτελέσματα φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων.

Στα δείγματα της μελέτης εκτελέστηκαν και δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων.

Έτσι, συνολικά εκτελέστηκαν:

- 100 δοκιμές προσδιορισμού του πορώδους n (%), ξηρής πυκνότητας ρ_d (t/m^3),
- 83 δοκιμές προσδιορισμού της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων V_p (m/s).
- 100 δοκιμές προσδιορισμού της σκληρότητας SHV.
- 56 δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη σημειακής φόρτισης $I_{s(50)}$ (MPa).
- 42 δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό σ_t (έμμεσου εφελκυσμού) (MPa).
- 10 δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σ_c (MPa)

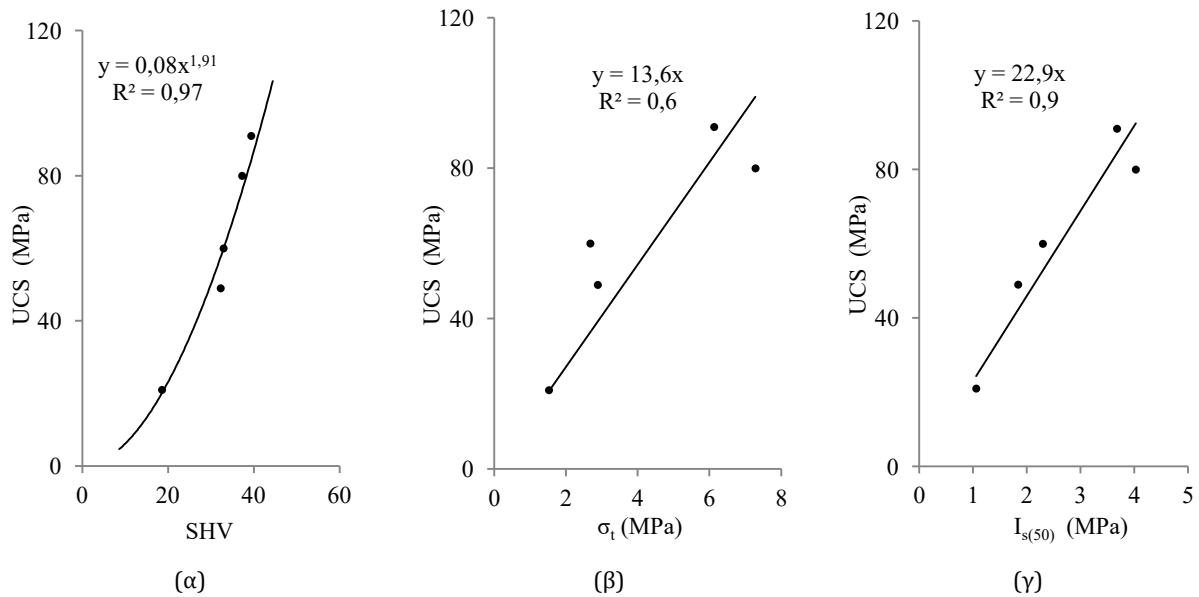
Στον πίνακα 4.4.1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών και στο παράρτημα παρουσιάζονται οι πίνακες με τις αναλυτικές τιμές και με φωτογραφίες των δειγμάτων.

Πίνακας 4.4.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τιμών των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.

Πέτρωμα	Σύμβολο	ρ_d [t/m ³]	σ_c [MPa]	n [%]	σ_t [MPa]	$I_{s(50)}$ [MPa]	SHV [-]	V_p [m/sec]
Τεφρός Ψαμμίτης	GS	2,5	49,0	4,7	2,9	1,8	32,3	2980
Ερυθρός Ψαμμίτης	SST	2,4	21,0	12,3	1,5	1,1	18,6	1650
Λεπτόκοκκος Ψαμμίτης	SLST	2,4	60,0	9,4	2,7	2,3	33,0	2018
Ασβεστόλιθος	GL	2,7	80,0	0,3	7,3	4,0	37,3	5780
Σερπεντινίτης	GP	2,6	91,0	2,1	6,1	3,7	39,4	5007

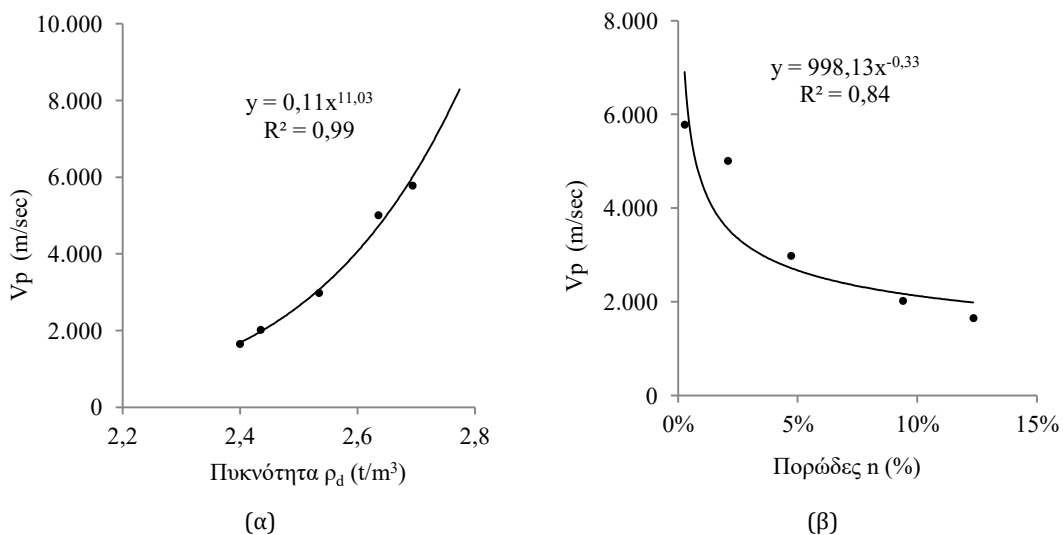
Στο διαγράμματα του σχήματος 4.4.1α φαίνεται η καλή συσχέτιση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη όλων των πετρωμάτων με την μέση τιμή της ένδειξης του κρουσίμετρου Schmidt.

Επίσης καλή συσχέτιση υπάρχει και στην αναλογία μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού που βρέθηκε 13,6 και είναι κοντά στις βιβλιογραφικές τιμές. Το ίδιο ισχύει και για τον λόγο $k=22,9$ της σχέσης τη μονοαξονικής θλίψης με τον δείκτη σημειακής αντοχής ο οποίος είναι μέσα στις προβλεπόμενες από τη βιβλιογραφία τιμές ($k=22-24$).



Σχήμα 4.4.1. Διαγράμματα συσχέτισης της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS) με: (α) τη μέση ένδειξη του κρουσίμετρου Schmidt (SHV), (β) την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (σ_i) και (γ) το δείκτη σημειακής αντοχής ($I_{s(50)}$) για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.

Στα διαγράμματα του σχήματος 4.4.2 φαίνεται η καλή συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας υπερήχων διαμήκη κυμάτων V_p με το πορώδες και την πυκνότητα.



Σχήμα 4.4.2. Διαγράμματα συσχέτισης ταχύτητας υπερήχων διαμήκη κυμάτων V_p με (α) την πυκνότητα και (β) το πορώδες για όλους τους τύπους των πετρωμάτων.

4.5. Αποτελέσματα επεξεργασίας επιφανειών πραγματικής επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

Με βάση την επεξεργασία των φωτογραφιών των επιφανειών των δοκιμών μετά από κάθε στάδιο δοκιμής, προσδιορίστηκε το συνολικό εμβαδό των περιοχών φθοράς, τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω ήμισυ του δοκιμίου.

Οι δύο φωτογραφίες τοποθετήθηκαν επάλληλα σε τέτοια θέση ώστε να αντιστοιχούν στην αρχική θέση του πάνω και κάτω τεμάχους του δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής.

Στη συνέχεια η μία φωτογραφία μετακινήθηκε κατά τη διεύθυνση διάτμησης σε σχέση με την άλλη κατά απόσταση ίση με τη διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή και σημειώθηκαν οι κοινές περιοχές των επιφανειών φθοράς.

Το συνολικό εμβαδό αυτών των κοινών περιοχών αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της επιφάνειας επαφής των δυο τμημάτων της ασυνέχειας. Λόγω του ότι τα ίχνη φθοράς πάνω σε κάθε επιφάνεια είναι αποτέλεσμα της συνολικής διατμητικής μετατόπισης που ήταν τουλάχιστο 5% του μήκους του δοκιμίου, το συνολικό εμβαδό επαφής των δυο επιφανειών, όπως προσδιορίστηκαν με την περιγραφείσα διαδικασία είναι προφανώς μεγαλύτερο από τις πραγματικές επιφάνειες, ωστόσο η προσέγγιση θεωρείται ικανοποιητική.

Η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας ImageJ (Rasband, 2018).

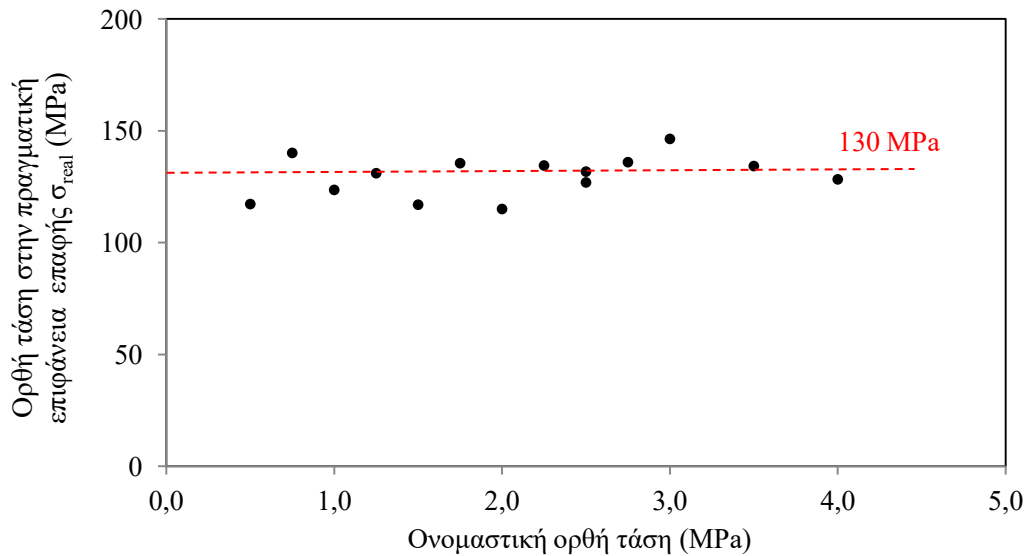
Η τάση στην επιφάνεια της πραγματικής επαφής (σ_r) υπολογίζεται ως ο λόγος της ασκούμενης ορθής δύναμης (N) προς το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας επαφής (A_r):

$$\sigma_r = \frac{N}{A_r} \quad (4.5)$$

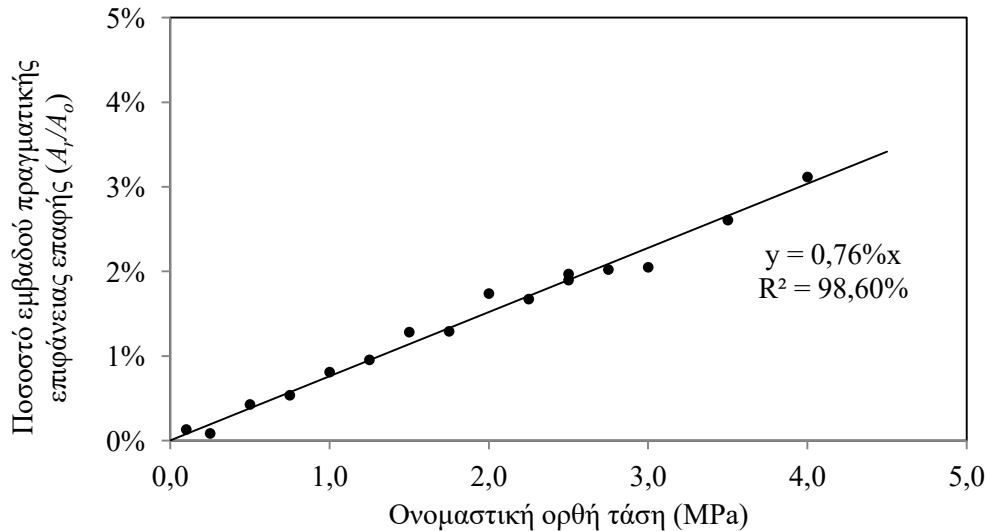
i) Ψαμμίτης Δεματίου

Για τον ψαμμίτη Δεματίου (δείγμα αναφοράς, αντιπροσωπευτικό μεσόκοκκο αδρομερές).

Στο σχήμα 4.5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα της ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής σ_{real} συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης μετά από την επεξεργασία των φωτογραφιών με το ImageJ (σχήμα 4.5.3). Παρατηρείται ότι η σ_{real} είναι σταθερή και ίση περίπου με 130 MPa για εύρος ονομαστικής ορθής τάσης 0-4 MPa. Η τιμή αυτή είναι περίπου διπλάσια της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη.

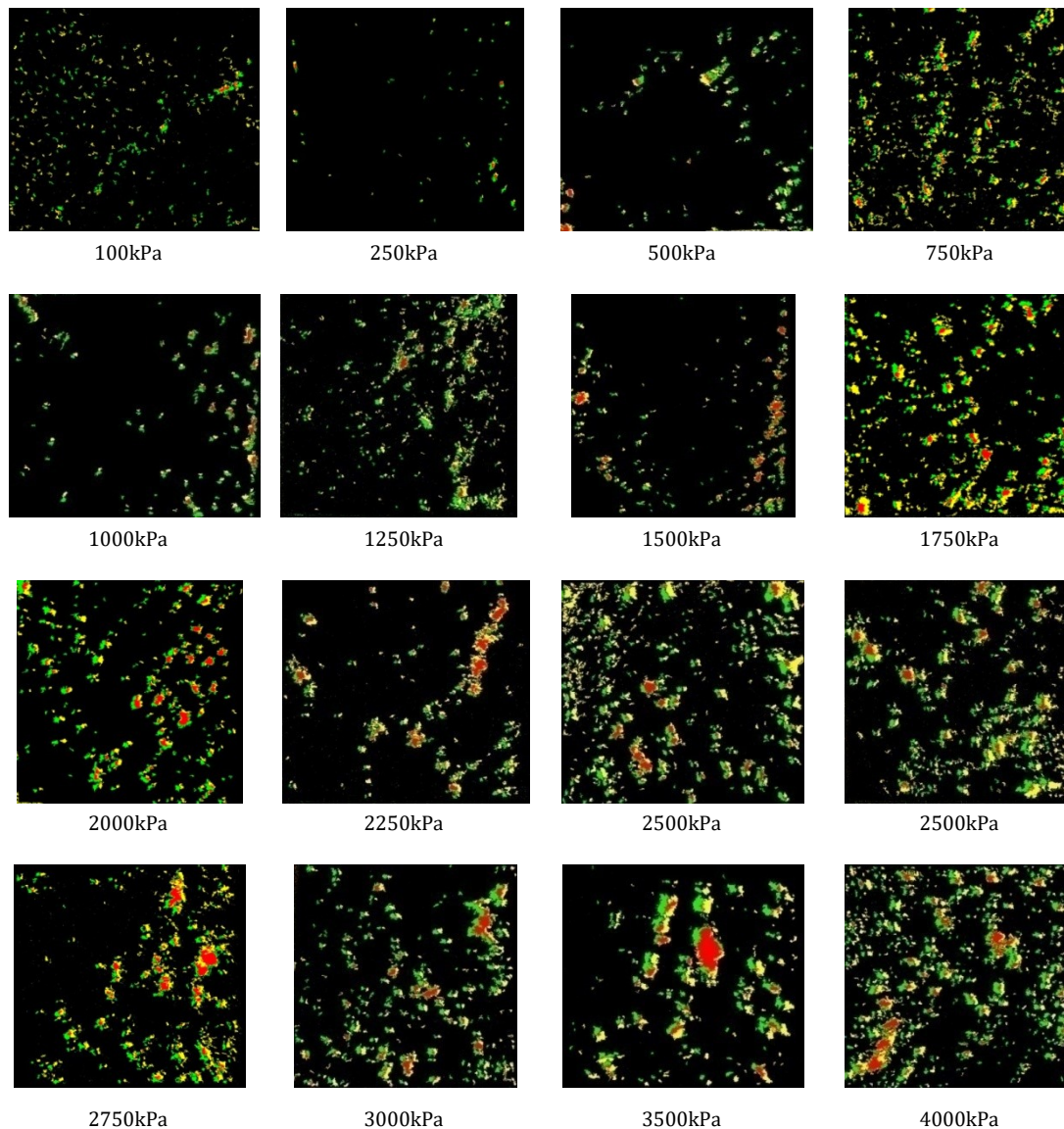


Σχήμα 4.5.1. Ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου



Σχήμα 4.5.2. Ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου.

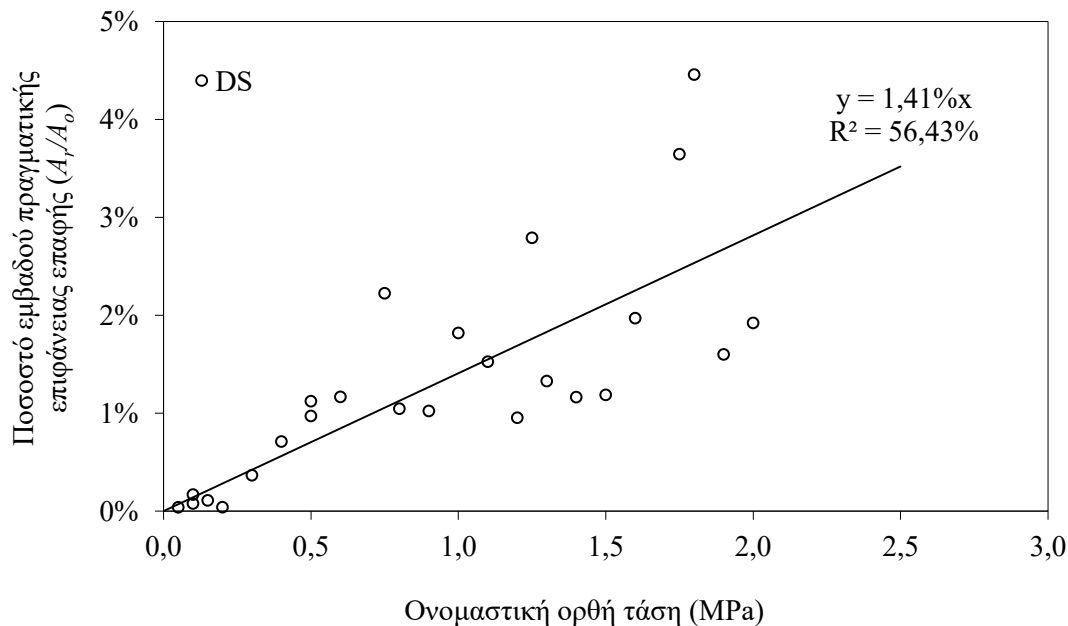
Στο σχήμα 4.5.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_0 . Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 0,76% για κάθε 1MPa της ονομαστικής ορθής τάσης.



Σχήμα 4.5.3.Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για διαφορετικά δοκίμια ασυνέχειας σε διαφορετική ονομαστική ορθή τάση για τον ψαμμίτη Δεματίου.

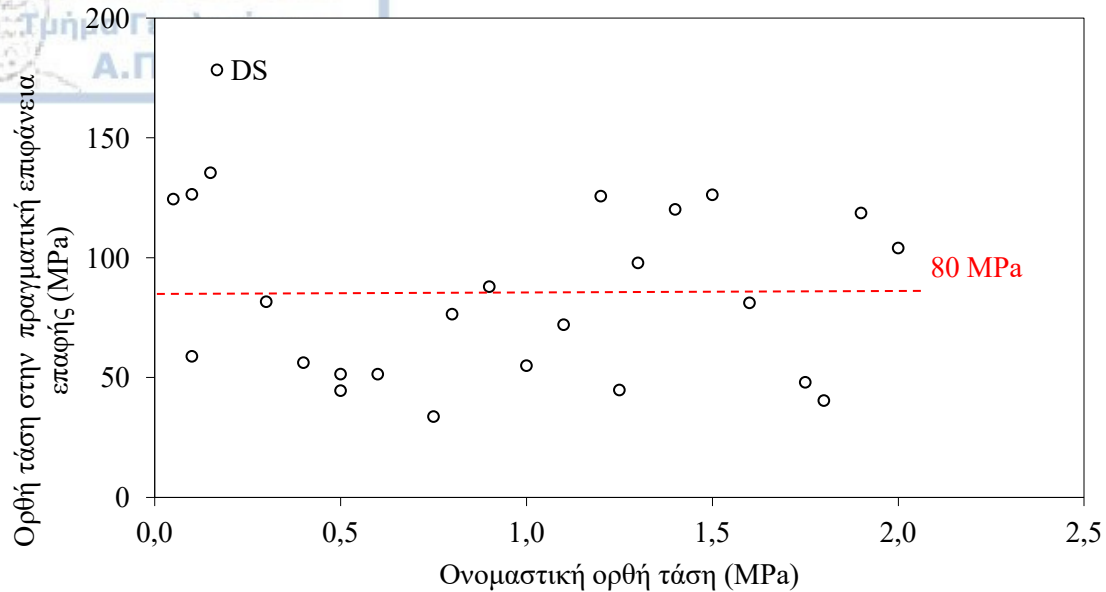
Για να μπορεί να γίνει σύγκριση των επιφανειών φθοράς με τα αποτελέσματα δοκιμών πολλαπλών σταδίων έγινε επεξεργασία των επιφανειών επαφής (σχήμα 4.5.6) εκ των υστέρων από φωτογραφίες των δοκιμών άμεσης διάτμησης που έγιναν στο ίδιο υλικό

(ψαμμίτη Δεματίου DS) από τον Τσικρίκης (2015), και προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στα σχήματα 4.5.4 και 4.5.5. Για λόγους ακριβέστερης προσέγγισης, λήφθηκαν υπόψη μόνο τα αποτελέσματα από δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές πολλαπλών σταδίων με αυξανόμενη τιμή ορθής τάσης (π.χ. $\sigma_{n1}=400$ kPa, $\sigma_{n2}=800$ kPa, $\sigma_{n3}=1200$ kPa, $\sigma_{n4}=1800$ kPa),



Σχήμα 4.5.4. Ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου DS

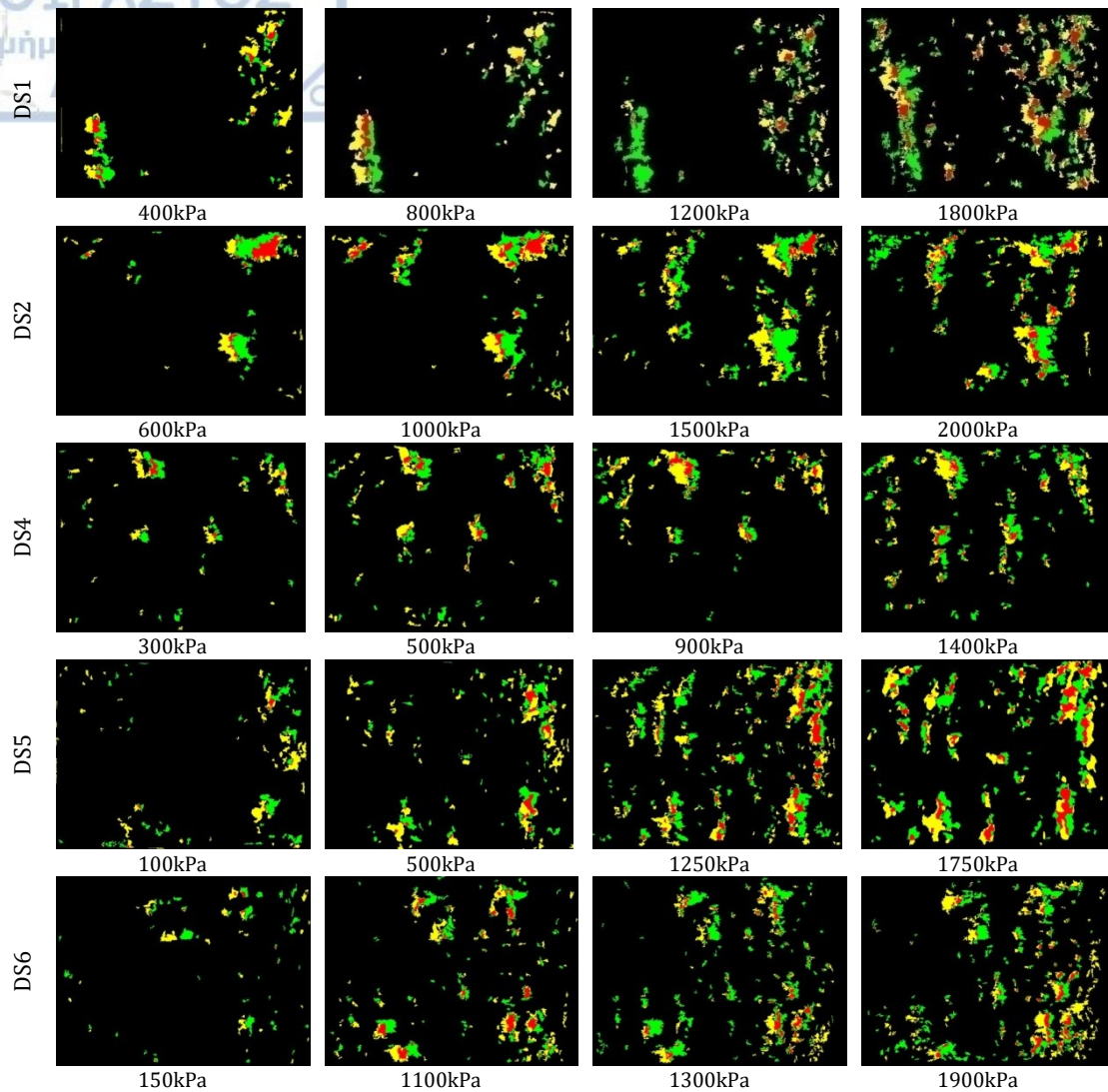
Το διάγραμμα του σχήματος 4.5.4 μεταβολής ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής με την ονομαστική ορθή τάση δίνει ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 1,41% για κάθε 1 MPa της ονομαστικής ορθής τάσης. Ο συντελεστής είναι περίπου διπλάσιος από αυτόν που προέκυψε από την ανάλυση επιφανειών ενός σταδίου (0,76%) και αποδίδεται στην μικρότερη ακρίβεια στην προσέγγιση μέτρησης των επιφανειών, λόγω των επανειλημμένων διατμήσεων των δοκιμίων.



Σχήμα 4.5.5. Ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για τον ψαμμίτη Δεματίου DS.

Στο σχήμα 4.5.5 παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Παρατηρείται ότι η σ_{real} εμφανίζει μεγάλη διακύμανση με μέση τιμή 80MPa (για εύρος ονομαστικής ορθής τάσης 0-2 MPa). Η τιμή αυτή είναι περίπου 65% από αυτήν που προέκυψε από την ανάλυση επιφανειών ενός σταδίου (130MPa) και αποδίδεται στην μικρότερη ακρίβεια στην προσέγγιση εντοπισμού των ορίων των επιμέρους περιοχών φθοράς, λόγω των επανειλημμένων διατμήσεων των δοκιμίων.

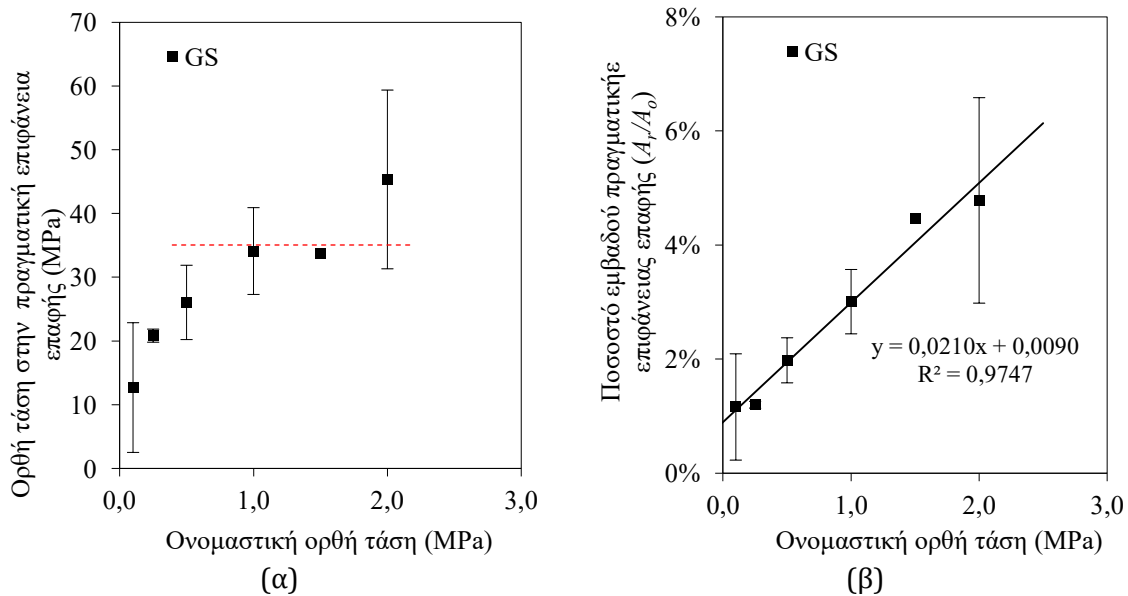
Φαίνεται ότι η δοκιμή διάτμησης με τη μέθοδο των πολλαπλών επαναλαμβανόμενων σταδίων στο ίδιο δείγμα και με διατμητική μετατόπιση μέχρι το 10% του μήκους της ασυνέχειας προκαλεί μεγαλύτερη φθορά με αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερη τιμή της πραγματικής επιφάνειας επαφής.



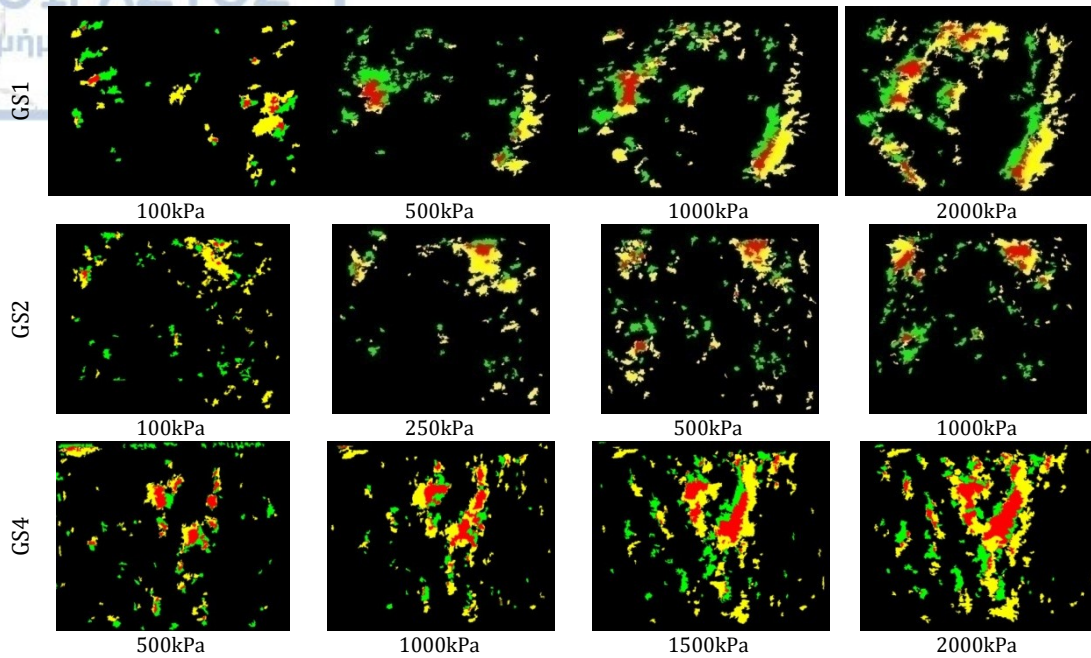
Σχήμα 4.5.6. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 5 δείγματα στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά διαφορετική αυξανόμενη ορθή τάση για δείγματα ψαμμίτη DS.

ii) Τεφρός ψαμμίτης (GS)

Για τον ψαμμίτη GS μετά την επεξεργασία των φωτογραφιών (σχήμα 4.5.8) στο σχήμα 4.5.7 στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Παρατηρείται μικρή αύξηση με την ορθή τάση στο εύρος 0-1MPa. Μεταξύ 1 και 2 MPa η μέση τιμή της σ_{real} είναι περίπου 39 MPa. Για όλο το εύρος από 0-2MPa η μέση τιμή είναι 30,50MPa (UCS=49MPa). Στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_0 . Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 2,73% για κάθε 1MPa αύξησης της ονομαστικής ορθής τάσης.



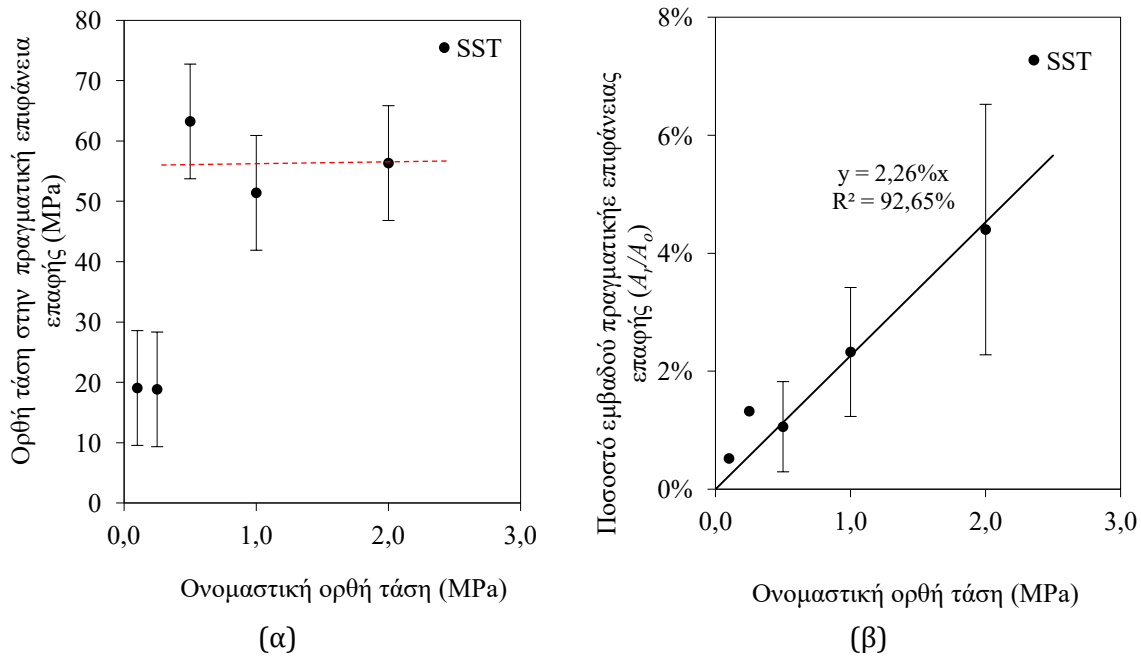
Σχήμα 4.5.7. Ψαμμίτης GS: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.



Σχήμα 4.5.8. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 5 δείγματα ψαμμίτη GS στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

iii) Ερυθρός ψαμμίτης (SST)

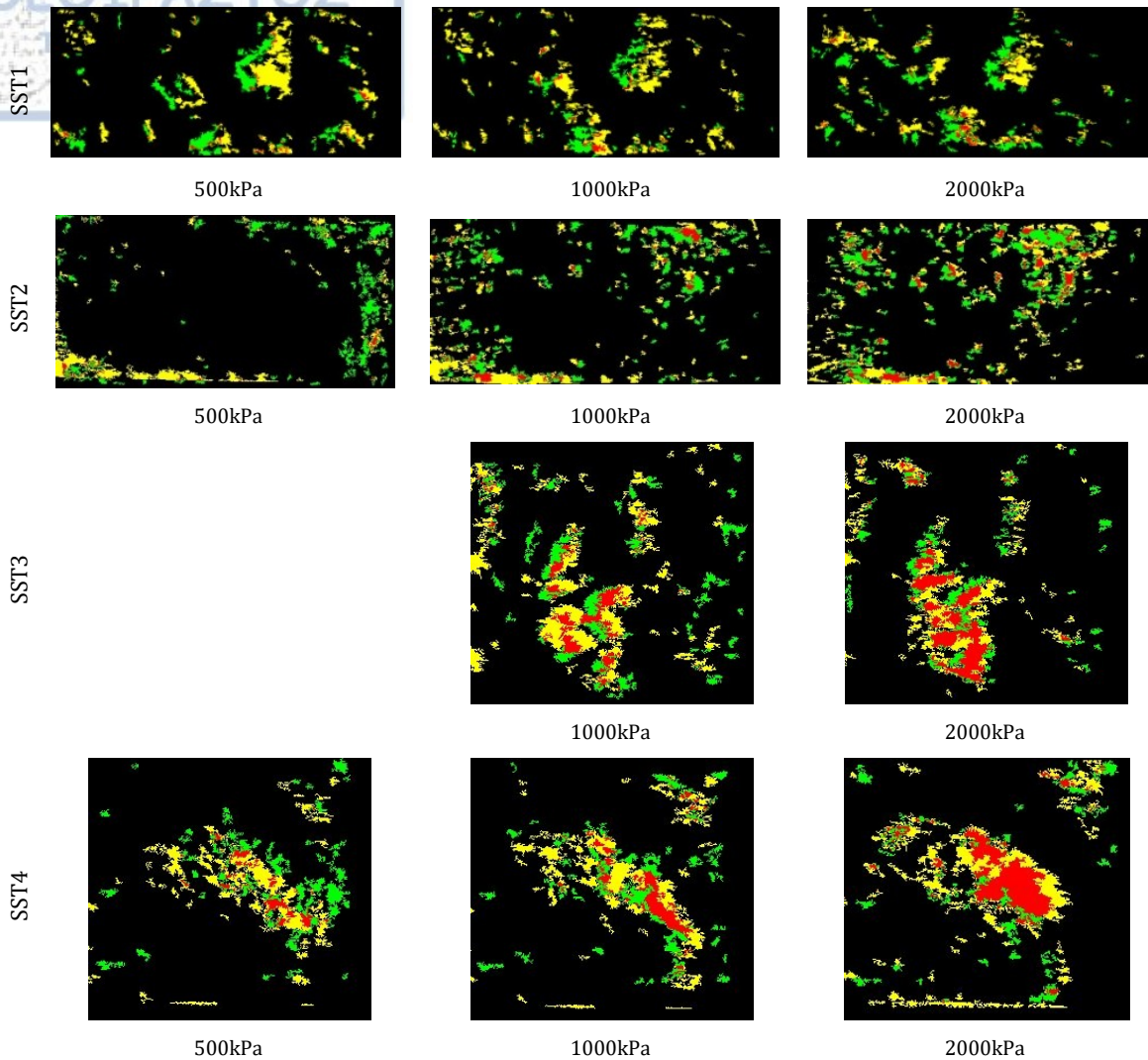
Για τον ψαμμίτη SST από την επεξεργασία των φωτογραφιών των τοιχωμάτων των ασυνχειών (σχήμα 4.5.10) προκύπτουν τα διαγράμματα του σχήματος 4.5.9. Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης.



Σχήμα 4.5.9. Ψαμμίτης SST: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.

Μεταξύ 0,5 και 2 MPa η μέση τιμή της σ_{real} είναι περίπου 57 MPa. Για όλο το εύρος από 0-2MPa η μέση τιμή είναι 50,7MPa.

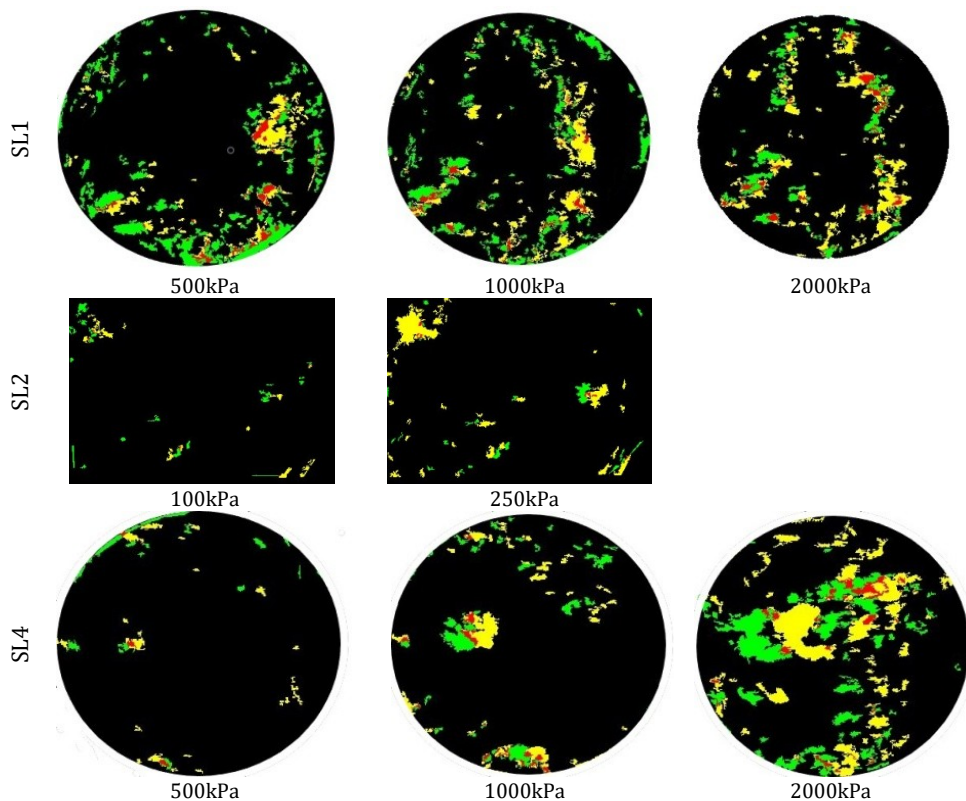
Στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_o . Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 2,26% για κάθε 1MPa αύξησης της ονομαστικής ορθής τάσης.



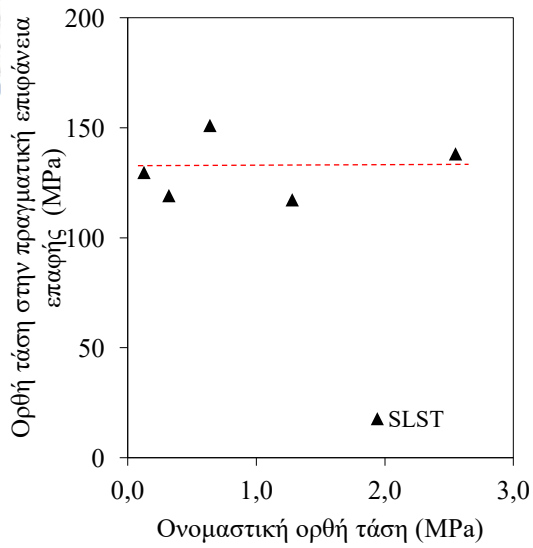
Σχήμα 4.5.10. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα ψαμμίτη SST στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

iv) Λεπτόκοκκος ψαμμίτης (SLST)

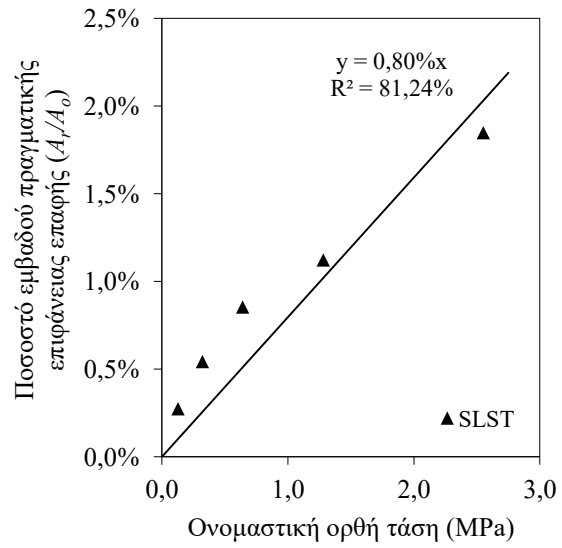
Για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη βάσει της επεξεργασίας των επιφανειών επαφής (σχήμα 4.5.11) στο σχήμα 4.5.12 στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Παρατηρείται ότι η σ_{real} είναι περίπου 130 MPa (για εύρος ονομαστικής ορθής τάσης 0-2,5MPa). Στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_0 . Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 0,80% για κάθε 1MPa αύξησης της ονομαστικής ορθής τάσης.



Σχήμα 4.5.11. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 3 δείγματα λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.



(α)



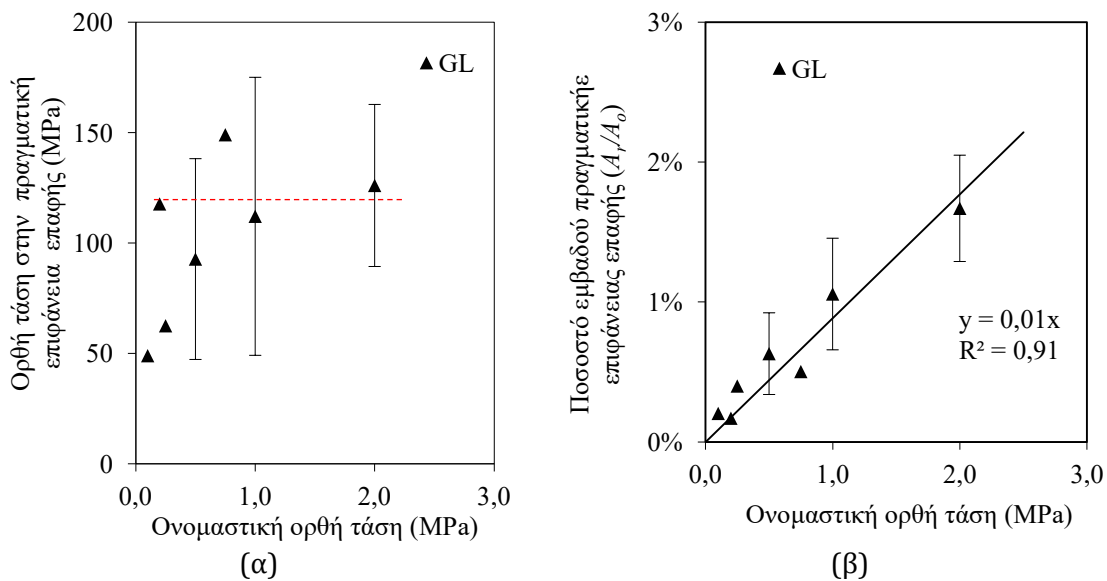
(β)

Σχήμα 4.5.12. Λεπτόκοκκος ψαμμίτης SLST: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.

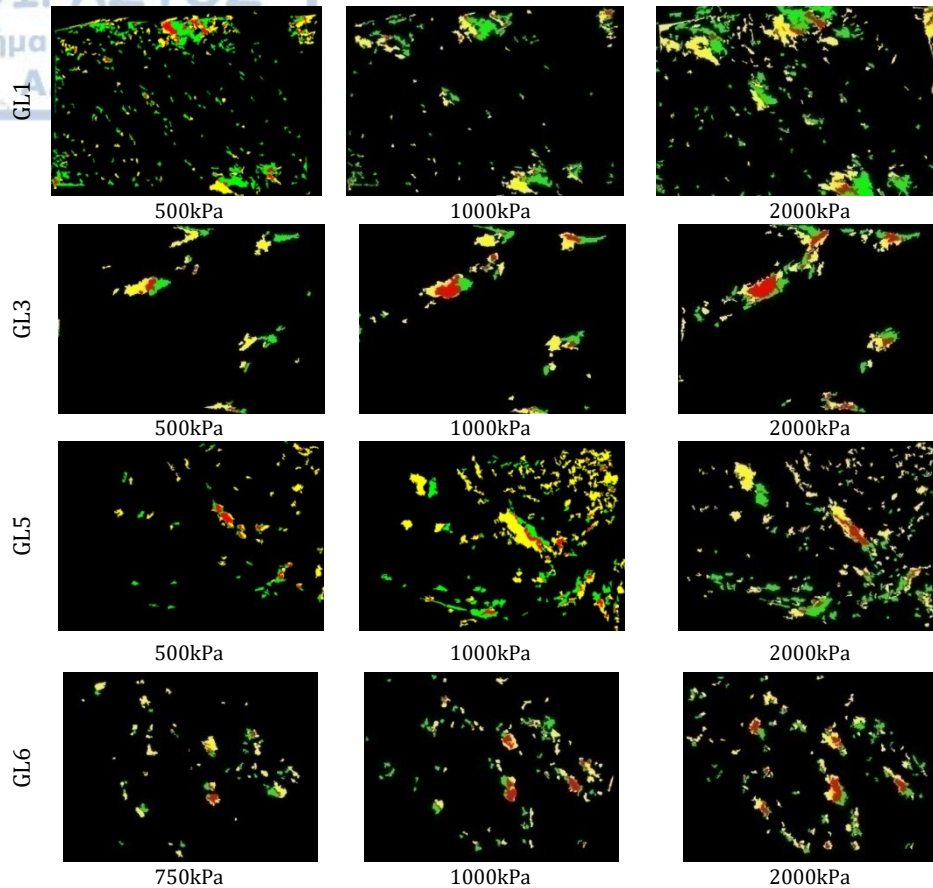
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση
v) Ασβεστόλιθος (GL)

Στο σχήμα 4.5.14 παρουσιάζονται οι επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα ασβεστόλιθου GL στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

Για τον ασβεστόλιθο στο σχήμα 4.5.13 στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Παρατηρείται ότι η σ_{real} είναι περίπου 120 MPa (για εύρος ονομαστικής ορθής τάσης 0-2 MPa). Η τιμή αυτή είναι περίπου διπλάσια της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη. Στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_0 . Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 0,89% για κάθε 1MPa της ονομαστικής ορθής τάσης.

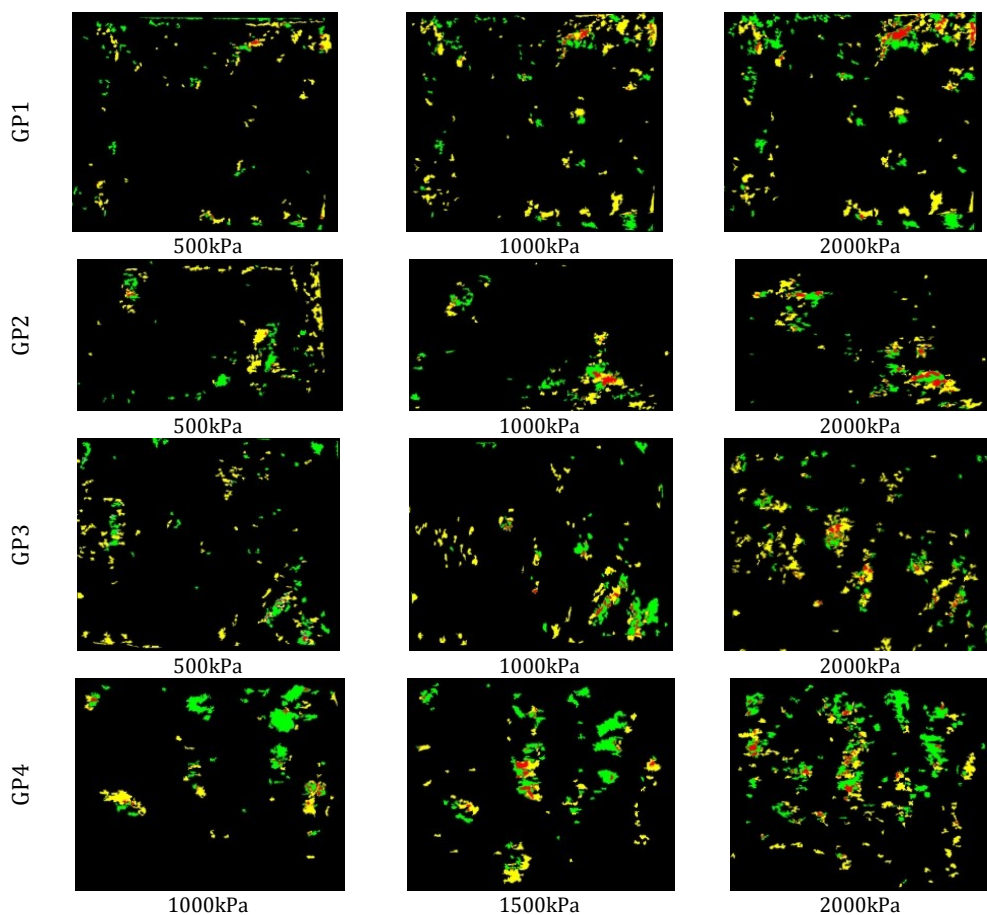


Σχήμα 4.5.13. Ασβεστόλιθος GL: Διαγράμματα ονομαστικής ορθής τάσης με (α) ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής (β) ποσοστό εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής.

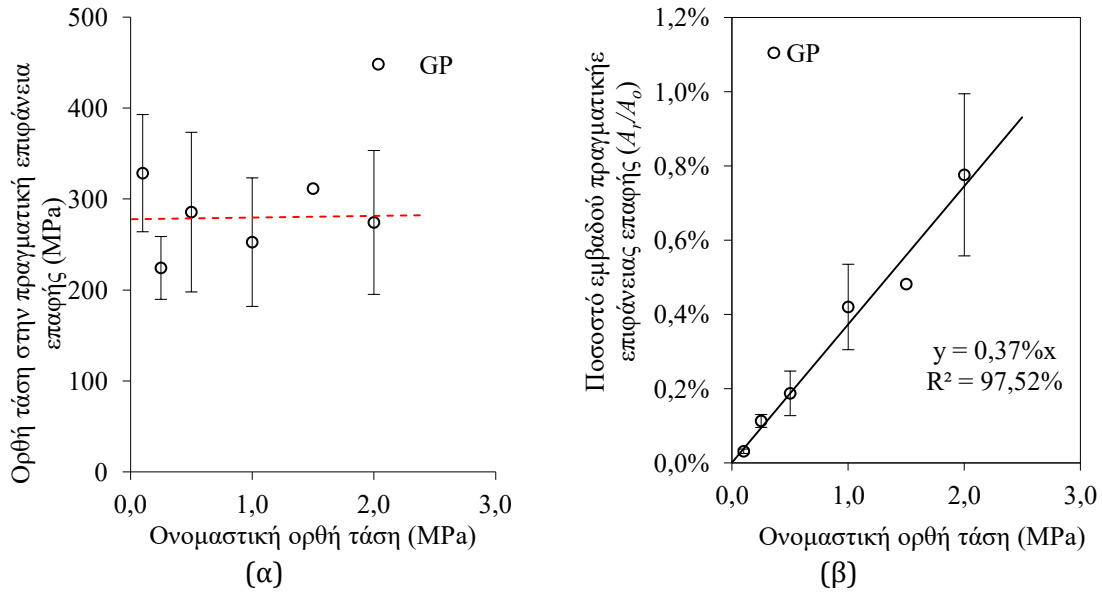


Σχήμα 4.5.14. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα ασβεστόλιθου GL στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

Για τον σερπεντινίτη GP μετά από την επεξεργασία των επιφανειών (σχήμα 4.5.15) στο σχήμα 4.5.16 στο διάγραμμα (α) παρουσιάζεται η ορθή τάση στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Παρατηρείται σταθερή τιμή ανεξάρτητα από την ορθή και περίπου ίση με 278 MPa. Στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_0 . Η μεταβολή είναι γραμμική και αντιστοιχεί σε 0,37% για κάθε 1MPa αύξησης της ονομαστικής ορθής τάσης.



Σχήμα 4.5.15. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για 4 δείγματα σερπεντινίτη GP στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

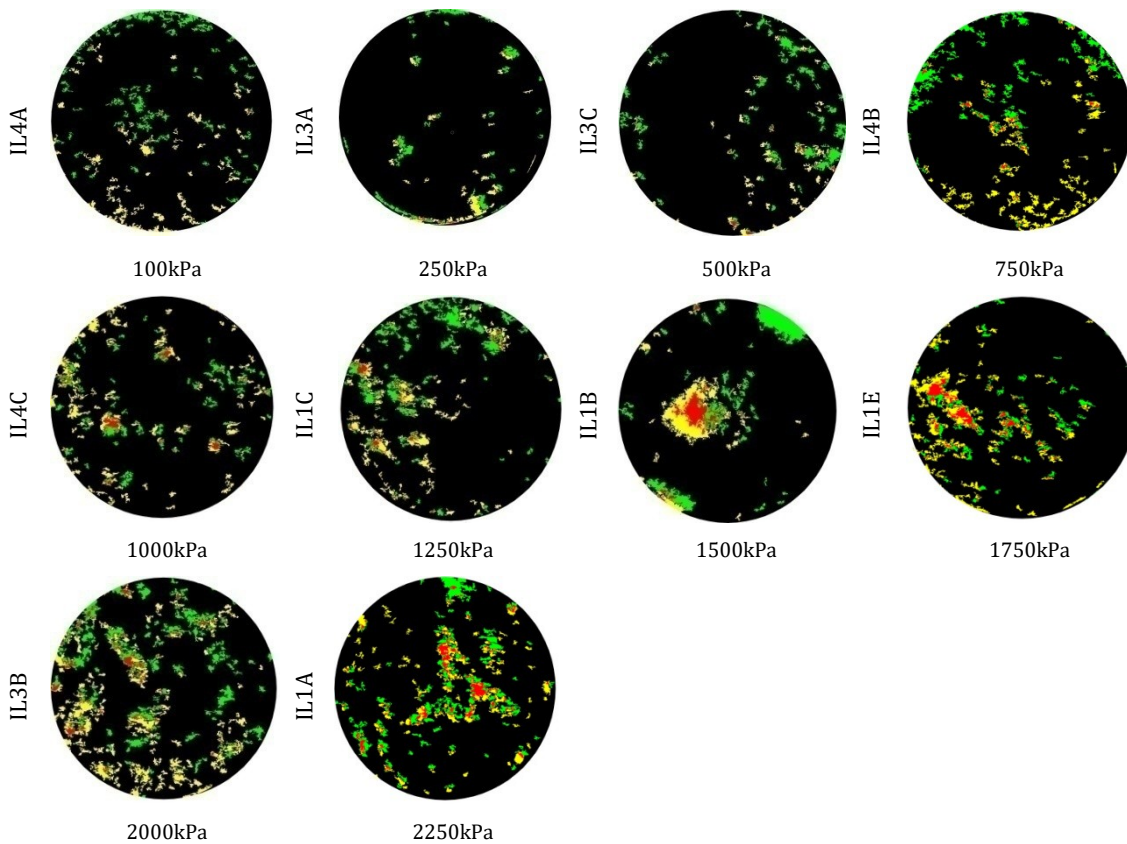


Σχήμα 4.5.16. Σερπεντινίτης GP: Διαγράμματα (α) ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης, (β) ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.

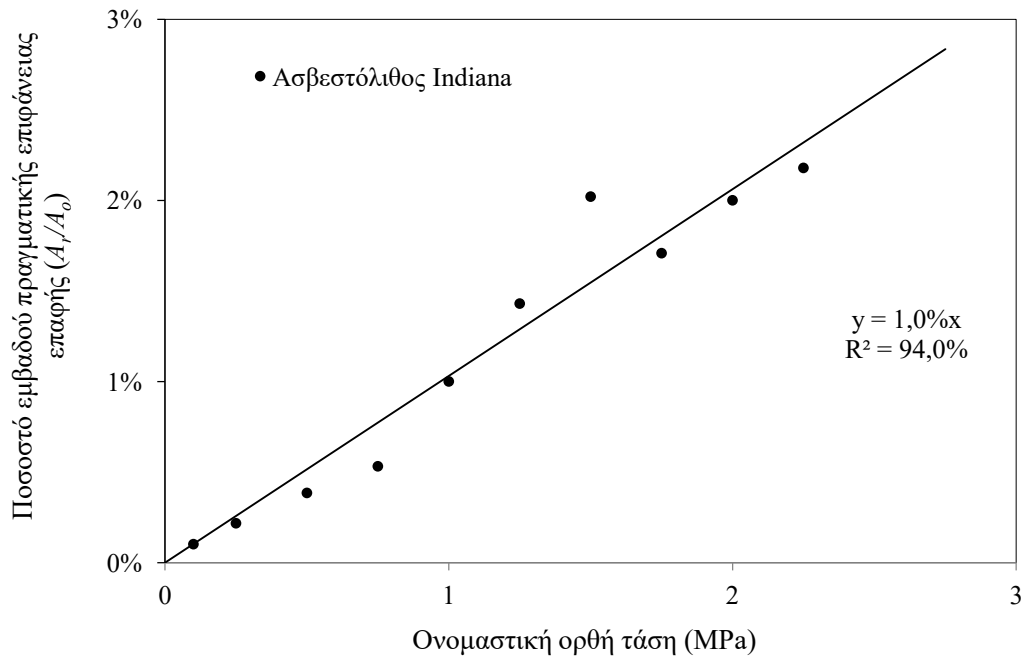
vii) Ασβεστόλιθος Indiana

Για συγκριτικούς λόγους, στο σχήμα 4.5.18 παρατίθενται στοιχεία από μετρήσεις σε επιφάνειες που προέκυψαν από εφελκυστική διάρρηξη πυρήνων διαμέτρου 70 mm ασβεστόλιθου Indiana. Στο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας της πραγματικής επαφής A_r ως ποσοστού της ονομαστικής επιφάνειας A_o .

για εύρος ονομαστικής ορθής τάσης 0-2,5MPa. Στο σχ. 4.5.17 παρουσιάζονται οι επεξεργασμένες εικόνες βάσει των οποίων προέκυψαν τα εμβαδά των πραγματικών επιφανειών επαφής.



Σχήμα 4.5.17. Επιφάνειες υπολογισμού πραγματικού εμβαδού επαφής (κόκκινη περιοχή) από την κοινή περιοχή μεταξύ των επιφανειών φθοράς του άνω (κίτρινη περιοχή) και του κάτω (πράσινη περιοχή) τοιχώματος της ασυνέχειας τη στιγμή της μέγιστης διατμητικής τάσης για δείγματα ασβεστόλιθου Indiana στα οποία εφαρμόζεται κάθε φορά αυξανόμενη ονομαστική ορθή τάση.

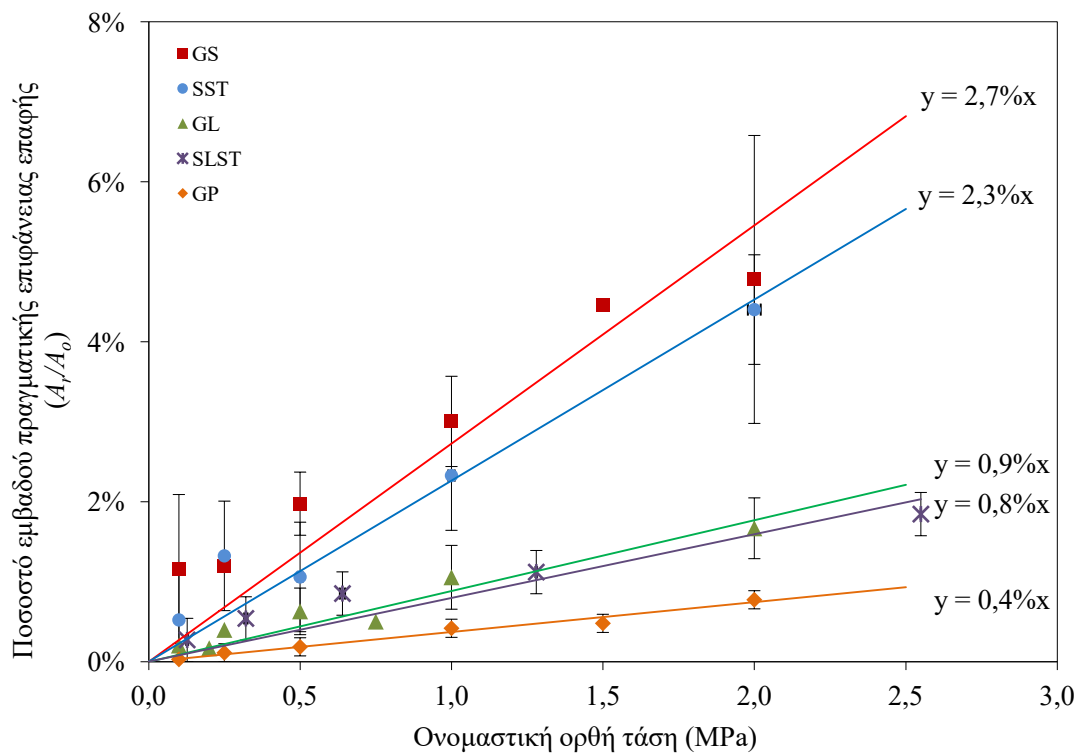


Σχήμα 4.5.18. Ασβεστόλιθος Indiana: Διαγράμματα ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης.

Συμπεράσματα

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της επεξεργασίας των επιφανειών επαφής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.

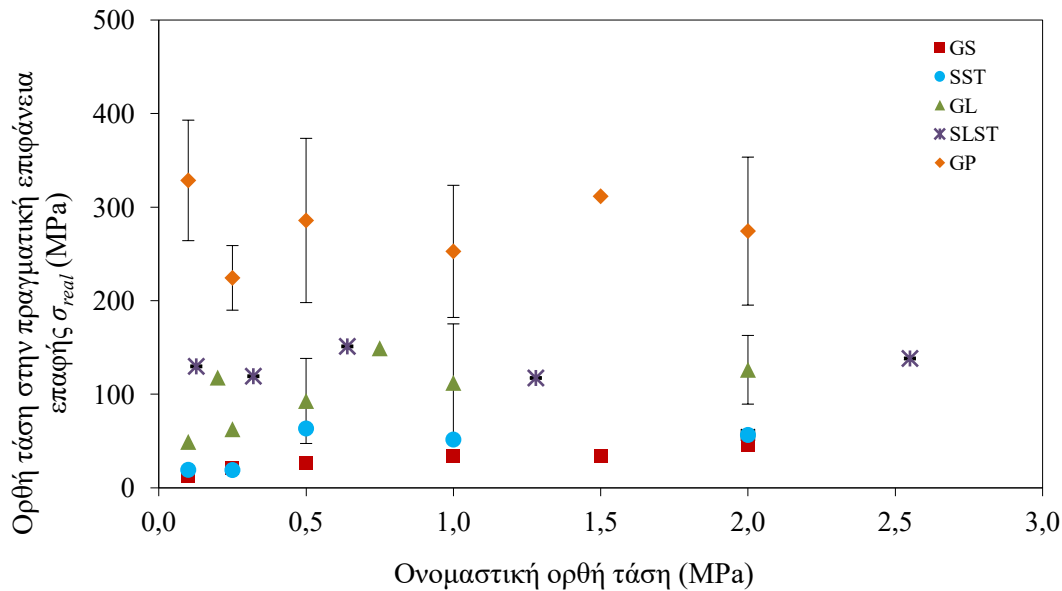
Στο σχήμα 4.5.19 δίνεται το εμβαδόν της πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r , ως ποσοστό της ονομαστικής επιφάνειας επαφής A_0 συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης. Οι ευθείες προσαρμογής επελέγησαν ώστε να διέρχονται από την αρχή των αξόνων. Από το διάγραμμα προκύπτει συντελεστής αναλογίας 0,4% για τον σερπεντινίτη, 0,8% για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, 0,9% για τον ασβεστόλιθο, 2,3% για τον ερυθρό ψαμμίτη και 2,7% για το τεφρό ψαμμίτη.



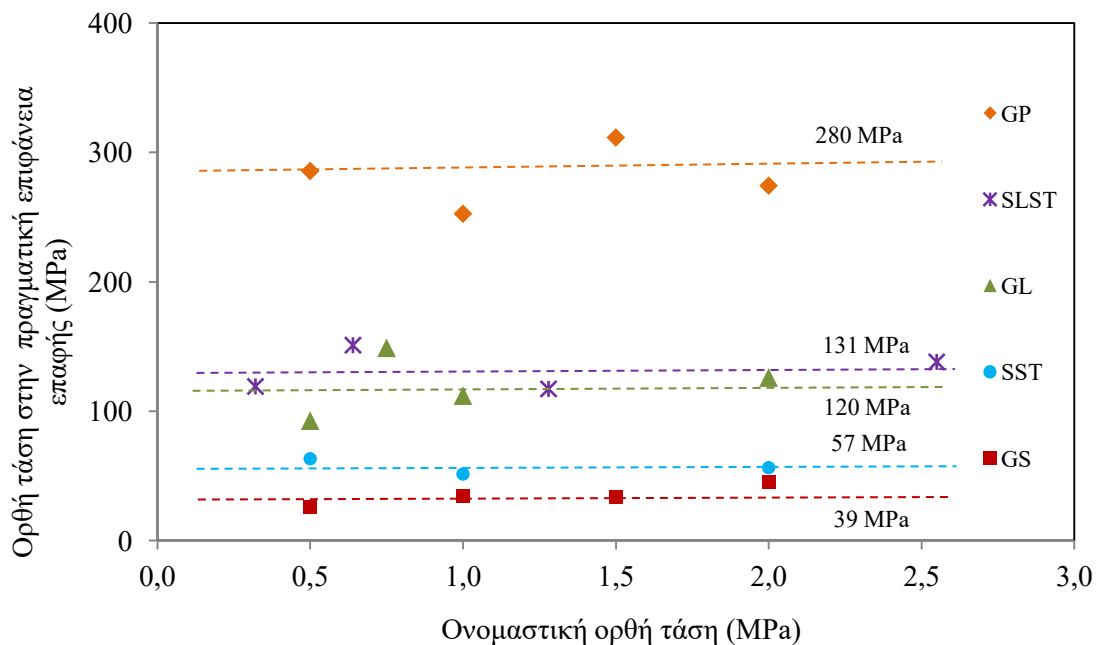
Σχήμα 4.5.19. Συγκεντρωτικό διάγραμμα ποσοστού εμβαδού πραγματικής επιφάνειας επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης για όλους τους τύπους πετρωμάτων.

Η πραγματική ορθή τάση επαφής των δυο τοιχωμάτων είναι περίπου σταθερή (ανεξάρτητη από την ονομαστική τάση) για τιμές ορθής ονομαστικής τάσης μεγαλύτερη από 500kPa, και κυμαίνεται από 35 MPa για τον τεφρό ψαμμίτη, 60 MPa ερυθρό ψαμμίτη,

120 MPa για τον ασβεστόλιθο, 130 MPa για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη και 280 MPa για τον σερπεντινίτη (σχήμα 4.5.20α, 4.5.20β)

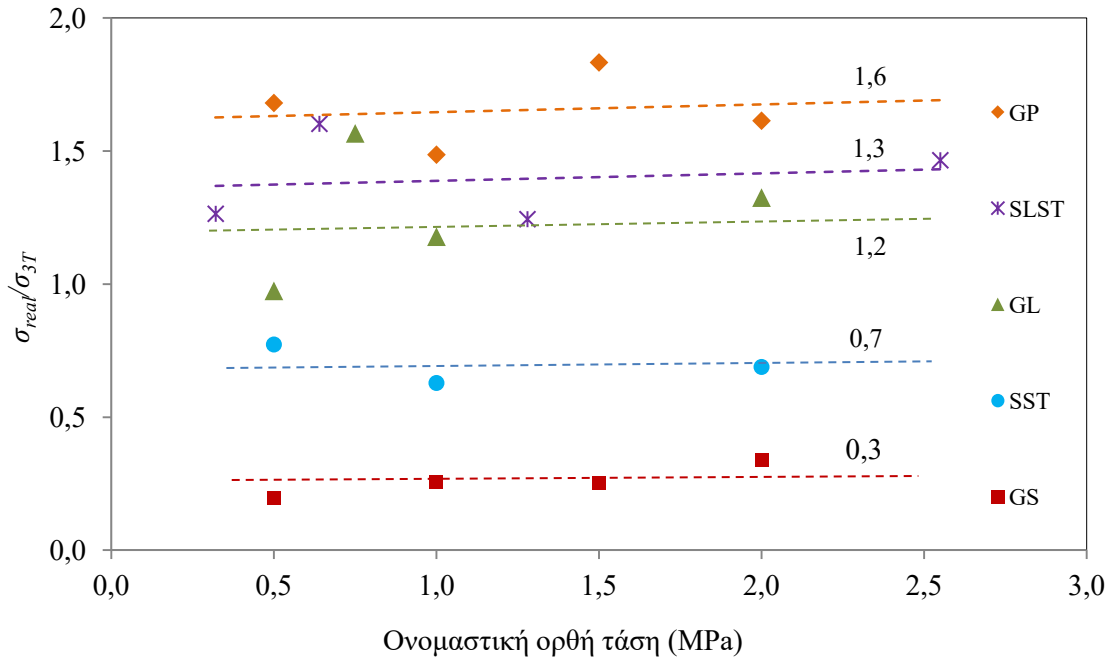


(α)

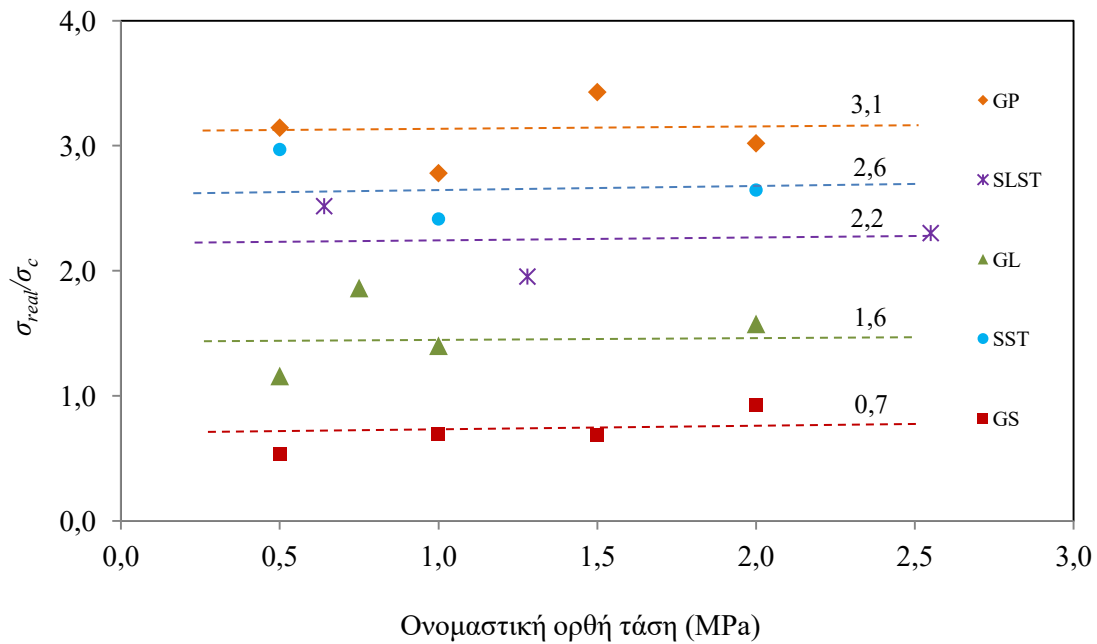


(β)

Σχήμα 4.5.20. Συγκεντρωτικά διαγράμματα ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής συναρτήσει ονομαστικής ορθής τάσης (α) για όλο το εύρος ορθών τάσεων (β) για ορθή τάση μεγαλύτερη από 500kPa για όλους τους τύπους πετρωμάτων.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5.21. Διαγράμματα (α) λόγου ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής σ_{real} προς της τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη κατάσταση σ_{3T} ($\sigma_{real}/\sigma_{3T}$) και (β) λόγου ορθής τάσης στην πραγματική επιφάνεια επαφής προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{real}/σ_c συναρτήσει της ονομαστικής ορθής τάσης για όλους τους τύπους πετρωμάτων.

Στα σχήματα 4.5.21α και 4.5.21β παρουσιάζονται διαγράμματα συσχέτισης της πραγματικής τάσης στην επιφάνεια επαφής με την τάση μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά όπως αυτή υπολογίστηκε από τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης και της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη για κάθε τύπο πετρώματος

Η αναλογία της πραγματικής τάση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της ασυνέχειας (σ_{real}) και της αντίστοιχης τάσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (σ_{3T}) είναι 1,6 για τον σερπεντινίτη, 1,3 για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, 1,2 για τον ασβεστόλιθο και 0,7 και 0,3 για τον ερυθρό και τεφρό ψαμμίτη αντίστοιχα (σχήμα 4.5.21α).

Η αναλογία της πραγματικής τάση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της ασυνέχειας και της αντίστοιχης αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη (σ_c) είναι 3,1 για τον σερπεντινίτη, 2,2 για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, 1,6 για τον ασβεστόλιθο και 2,6 και 0,7 για τον ερυθρό και τεφρό ψαμμίτη αντίστοιχα (σχήμα 4.5.21β).

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τους δυο βασικούς νόμους της τριβής (νόμοι Amonton)

- Η δύναμη της τριβής είναι ανάλογη με την ασκούμενη ορθή δύναμη. (1ος νόμος του Amonton).
- Η δύναμη της τριβής είναι ανεξάρτητη από το εμβαδόν της ονομαστικής επιφάνειας επαφής (2ος νόμος του Amonton).
- Η πραγματική επιφάνεια επαφής είναι ανάλογη της ορθής τάσης. Ο συντελεστής αναλογίας κυμαίνεται <1% (από 0,4%-0,9%) για ασβεστόλιθο, σερπεντινίτη και λεπτόκοκκο ψαμμίτη, και από >2% (2,3%-2,7%) για τους δυο άλλους ψαμμίτες.
- Με την υπόθεση ότι η γραμμικότητα ισχύει για μεγαλύτερες ορθές τάσεις, προκύπτει ότι για ονομαστική ορθή τάση 5 MPa, ο συντελεστής αναλογίας θα κυμαίνεται από 2%-4,5% για ασβεστόλιθο, σερπεντινίτη και λεπτόκοκκο ψαμμίτη, και πάνω από 10% (11,5%-13,5%) για τους άλλους δυο ψαμμίτες.

4.6. Συμπεράσματα

(α) Ορυκτολογική μελέτη

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής μελέτης συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.6.1.

Πίνακας 4.6.1. Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης

Ορυκτό	Χημικός τύπος	Ποσοστό κατά βάρος (%)				GP
		GS 2,3mm	SST 0,8mm	SLST 0,9mm	GL 3mm	
Άστριοι, Πλανιόκλαστα	NaAlSi ₃ O ₈	48		20		
Χαλαζίας	SiO ₂	28	2	39	1	
Ασβεστίτης	CaCO ₃	12	58	25	99	
Δολομίτης	MgCa(CO ₃) ₂	2	24	2		
Σερπεντίνης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈		3			70
Ολιβίνης	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄		1			19
Χλωρίτης	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3	3	6		
Χρωμίτης	FeCr ₂ O ₄					6
Μαρμαρυγίας		3	1	5		
Άστριοι Κ-ούχοι		2		2		
Αργιλικά ορυκτά		2	5	1		
Πυρόξενος			2			3
Αμφίβολος			1			2
		100	100	100	100	100

(β) Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες

Στον πίνακα 4.6.2 δίνονται οι τιμές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

Πίνακας 4.6.2. Τιμές πυκνότητας ρ , πορώδους n , αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σ_c , εφελκυστικής αντοχής σ_t , δείκτη σημειακής αντοχής $I_{s(50)}$, ένδειξης κρουσίμετρου Schmidt SHV , ταχύτητας διαμήκων κυμάτων V_p , εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας E_{50} και συντελεστή παραμορφωσιμότητας MR .

Πέτρωμα		ρ_d	n	σ_c	σ_t	$I_{s(50)}$	SHV	V_p	E_{50}	MR
		[t/m ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[m/sec]	[GPa]	
Τεφρός Ψαμμίτης	GS	2,5	4,7	49,0	2,9	1,8	32,3	2980	7,7	157
Ερυθρός Ψαμμίτης	SST	2,4	12,3	21,0	1,5	1,1	18,6	1650	2,3	111
Λεπτόκοκκος Ψαμμίτης	SLST	2,4	9,4	60,0	2,7	2,3	33,0	2018	8,0	133
Ασβεστόλιθος	GL	2,7	0,3	80,0	7,3	4,0	37,3	5780	18,7	234
Σερπεντινίτης	GP	2,6	2,1	91,0	6,1	3,7	39,4	5007	24,0	264

Οι τιμές της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας E για τους τρεις ψαμμίτες, βρίσκονται σε συμφωνία με τις τιμές των μολασικών ψαμμιτών που προτείνονται από τους Marinós & Tsiambaos (2010). Ειδικότερα, η μέση τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη των τριών ψαμμιτών της παρούσας έρευνας είναι 43,33 MPa (εύρος τιμών 21-60 MPa), και είναι συγκρίσιμη με την τιμή 35,06 MPa (εύρος τιμών 10,76-116,73 MPa), που προτείνονται από τους παραπάνω ερευνητές (βλ. Πίνακα 2.5). Αντίστοιχα η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας των τριών ψαμμιτών είναι 6,0 GPa (εύρος 2,3-8,0 GPa) και βρίσκονται εντός του εύρους τιμών 2,0-31,3 GPa (μέση τιμή 8,76 GPa) που προτείνεται από τους ως άνω ερευνητές εύρος τιμών τιμή. Η τιμή του συντελεστή παραμορφωσιμότητας MR (μέση τιμή 134, εύρος 111-157) είναι λίγο χαμηλότερη από τη μέση 170 που προτείνεται από τον Μαρίνο (2007). Αντίθετα, για τα δύο μη μολασικά πετρώματα της παρούσας έρευνας (ασβεστόλιθος και σερπεντινίτης) οι τιμές της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη, του μέτρου ελαστικότητας και του συντελεστή παραμορφωσιμότητας MR είναι υψηλότερες από αυτές που αναφέρονται από τον Μαρίνο (2007).

(γ) Τριαξονική δοκιμή και σταθερά m_i

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του m_i , χρησιμοποιήθηκε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa, που βρίσκεται σε ευθυγράμμιση με τη νέα σύσταση των Hoek - Brown (2018) σύμφωνα με την οποία, η μέγιστη πλευρική πίεση των τριαξονικών δοκιμών πρέπει να

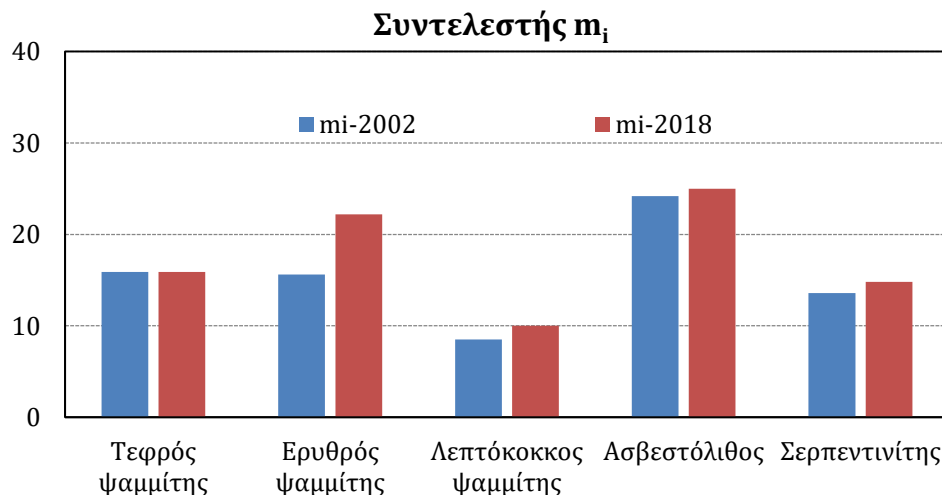
4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

είναι ίση με την τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (σ_{3T}). Για λόγους σύγκρισης όμως, το m_i υπολογίστηκε και με την αρχική έκδοση του 2002 όπου $0 < \sigma_3 < 0,5\sigma_{ci}$.

Πίνακας 4.6.3. Τιμές σταθεράς m_i , τάσης μετάβασης (σ_{1T} , σ_{3T}), λόγου σ_{1T}/σ_{3T} και γωνίας τριβής φ στην ψαθυρή-όλκιμη συμπεριφορά.

Πέτρωμα	Σύμβολο	m_i -2002	m_i -2018	σ_{3T} [MPa]	σ_{1T} [MPa]	σ_{1T}/σ_{3T}	φ [°]
Τεφρός ψαμμίτης	GS	15,9	15,9	134	475	3,5	34,1
Ερυθρός ψαμμίτης	SST	15,6	22,2	82	285	3,5	33,6
Λεπτόκοκκος Ψαμμίτης	SLST	8,5	10,0	95	309	3,3	32,0
Ασβεστόλιθος	GL	24,2	25,0	110	593	5,4	43,4
Σερπεντινίτης	GP	13,6	14,8	173	650	3,8	35,4

Η σταθερά m_i του κριτηρίου Hoek & Brown, προσδιορισμένη με βάση την έκδοση του 2002 και 2018 του κριτηρίου, δεν εμφάνισε ουσιώδεις διαφορές (Σχήμα 4.6.1), ωστόσο ο υπολογισμός με την έκδοση 2018 έδωσε τιμές αυξημένες μικρότερες από 20% με εξαίρεση τον ερυθρό ψαμμίτη που η τιμή της σταθεράς m_i ήταν αυξημένη κατά 40% με την έκδοση 2018. Στην περίπτωση του ερυθρού ψαμμίτη η τιμή του σ_{ci} ήταν χαμηλή (21MPa) και ο αριθμός των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με πλευρικές πιέσεις από 0 ως $0,5\sigma_c$ (10MPa) δεν κάλυπταν τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό των 5 δοκιμών.



Σχήμα 4.6.1. Τιμές σταθεράς m_i υπολογιζόμενης με τις δύο εκδοχές του Hoek 2002 και των Hoek-Brown 2018.

(δ) Μέγιστη διατμητική αντοχή

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την άμεση διάτμηση ήταν υγιή και οι επιφάνειες δημιουργήθηκαν από εφελκυστική διάρρηξη ή από κάμψη με αποτέλεσμα τη δημιουργία τραχειών επιφανειών με πολύ υψηλό βαθμό σύμπλεξης (interlocking), που μπορούν πρακτικά να θεωρηθούν ως επιφάνειες με τέλεια μεταξύ τους εφαρμογή.

Η διατμητική τάση διαχωρίστηκε σε δύο συνιστώσες: η πρώτη είναι η συνιστώσα διαστολής, που αντιστοιχεί στη γωνία διαστολής (ψ) και υπολογίζεται από το διάγραμμα μεταβολής της ορθής με τη διατμητική μετατόπιση ($dv-dh$). Η δεύτερη συνιστώσα προκύπτει από τη διαφορά της συνολικής διατμητικής τάσης και της διαστολικής συνιστώσας, χαρακτηρίζεται δε ως συνιστώσα μη διαστολικής αντοχής.

Η τάση μηδενικής διαστολής είναι κατά το μάλλον ή ήττον σταθερή για όλο το εύρος της διατμητικής μετατόπισης, με εξαίρεση την αρχική περιοχή πριν από την μέγιστη διατμητική αντοχή, όπου η διαστολή όταν υπάρχει, εμφανίζει χαμηλότερες τιμές. Η ανάλυση της διατμητικής τάσης με την διατμητική μετατόπιση εξαρτάται από το μέγεθος του βήματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας διαστολής. Αυτό το μέγεθος βήματος πρέπει να είναι αρκετά μικρό για να αποτυπώνει την επίδραση της μικροσκοπικής τραχύτητας, αλλά όχι σε υπερβολικό βαθμό, διότι μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές τιμές διαστολής. Σε όλες τις δοκιμές της μελέτης αυτής, το βήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίσο με 0,2% του μήκους του δοκιμίου.

(ε) Γωνία τριβής

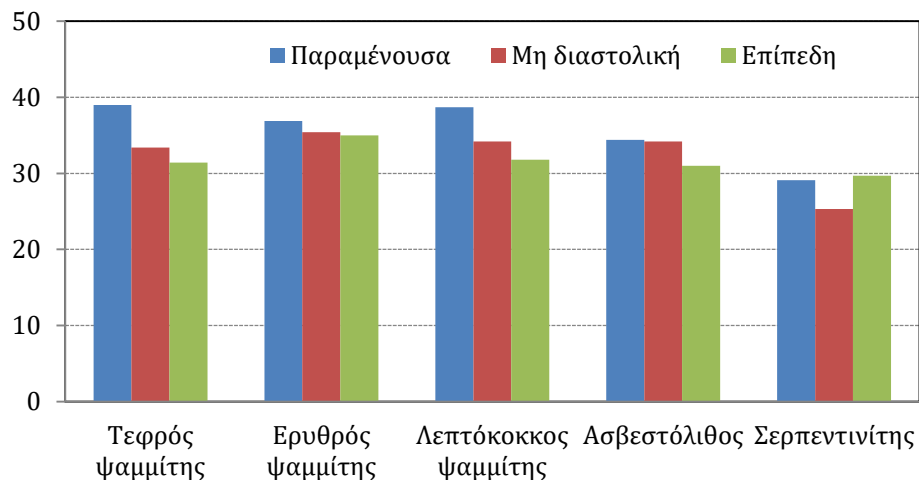
Εκτός από τον σερπεντινίτη, η μη διαστολική γωνία τριβής (φ_m) είναι συστηματικά μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε επίπεδες τεχνητές επιφάνειες διαμορφωθείσες με κοπή (φ_b) από 0,4° (ερυθρός ψαμμίτης) μέχρι 3,2° (ασβεστόλιθος) (Πίνακας 4.6.4, Σχήμα 4.6.2). Η αρνητική διαφορά για το σερπεντινίτη θα μπορούσε να αποδοθεί στην επιφανειακή σερπεντινίωση. Στην επιφάνεια που διαμορφώνεται με κοπή υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό υγιούς σερπεντινίτη, ενώ μια επιφάνεια που διαμορφώνεται με εφελκυστική διάρρηξη έχει μικρότερο αφού περιλαμβάνει μικρορωγμές στη μάζα που είναι αποσαθρωμένες. Η μη διαστολική γωνία τριβής «αισθάνεται» πιο αξιόπιστα τα φυσικά χαρακτηριστικά της ασυνέχειας τα οποία στην περίπτωση της τεχνητής με κοπή επιφάνειας εξαφανίζονται.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Η χρήση της μη διαστολικής συνιστώσας (συνιστώσας τριβής) της μέγιστης διατμητικής αντοχής παραμακρύνει το μεγαλύτερο μέρος της σκέδασης που παρατηρείται στη μετρηθείσα μέγιστη διατμητική αντοχή. Όσον αφορά τη μέγιστη γωνία τριβής, η τυπική απόκλιση είναι περίπου 10% για τις μετρούμενες τιμές και μόνο 3% για τη μη διαστολική συνιστώσα. Αυτό υποδηλώνει ότι οι μεταβολές που μετρούνται στην αντοχή της μέγιστης διατμητικής αντοχής οφείλονται σε διαφορετικές γωνίες διαστολής.

Πίνακας 4.6.4. Γωνίες τριβής (βασική φ_b , παραμένουσα φ_r , μη διαστολική φ_m) από τη δοκιμή διάτμησης και γωνία τριβής φ στην όγκιμη-ψαθυρή συμπεριφορά από δοκιμή τριαξονικής θλίψης.

Πέτρωμα	Σύμβολο	Δοκιμή διάτμησης			Δοκιμή τριαξονικής θλίψης (ψαθυρή-όγκιμη)
		φ_b [°]	φ_r [°]	φ_m [°]	φ [°]
Τεφρός ψαμμίτης	GS	31,4	39,0	33,4	34,1
Ερυθρός ψαμμίτης	SST	35,0	36,9	35,4	33,6
Λεπτόκοκκος Ψαμμίτης	SLST	31,8	38,7	34,2	32,0
Ασβεστόλιθος	GL	31,0	34,4	34,2	43,4
Σερπεντινίτης	GP	29,7	29,1	25,3	35,4



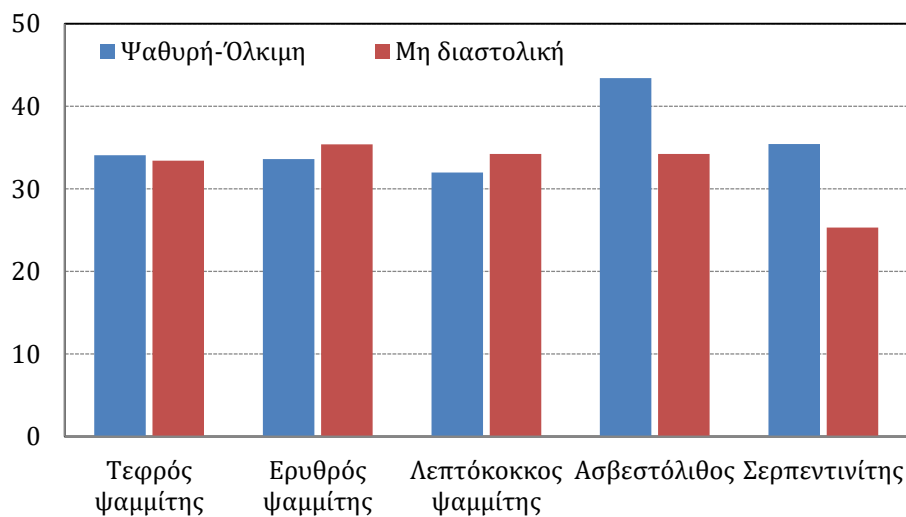
Σχήμα 4.6.2. Τιμές παραμένουσας ή τελικής γωνία τριβής, μη διαστολικής και «βασικής» γωνίας τριβής ανά τύπο πετρώματος.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας επιβεβαιώνουν ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή μιας ασυνέχειας μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, μία συνιστώσα

τριβής και μία συνιστώσα διαστολής, σε όλο το εύρος των ορθών τάσεων διαστολικής διάτμησης. Επομένως, η αρχή "φ + ψ" εφαρμόζεται σε ολόκληρη την κλίμακα διαστολικής διάτμησης, όπου φ είναι η γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και ψ η γωνία διαστολής (γεωμετρική συνιστώσα) που αντιστοιχεί στην μέγιστη διατμητική αντοχή. Συνεπώς, η κατά Barton συνιστώσα της απότμησης των επιφανειακών προεξοχών (asperity failure component), δεν μπορεί να διαχωριστεί από τη συνιστώσα της "βασικής γωνίας τριβής".

Η μη διαστολική συνιστώσα της μέγιστης γωνίας τριβής σχετίζεται με τη γωνία τριβής του υλικού του τοιχώματος της ασυνέχειας, που καθορίζεται από την κατάσταση τάσης κατά την μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (Σχήμα 4.6.3).

Γωνία τριβής (°)



Σχήμα 4.6.3. Τιμές μη διαστολικής γωνίας τριβής δοκιμής διάτμησης και γωνία ψαθυρής-όλκιμης συμπεριφοράς τριαξονικής δοκιμής για όλους τους εξετασθέντες τύπους πετρωμάτων

Αυτό υποδηλώνει ότι στα άκρα των προεξοχών επαφής υπάρχει κατάσταση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και επομένως η συνιστώσα τριβής της μέγιστης διατμητικής αντοχής μπορεί να προσδιοριστεί είτε από τριαξονικές δοκιμές υπό επαρκώς υψηλή πλευρική πίεση, ικανής να προκαλέσει μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά είτε από δοκιμές άμεσης διάτμησης μετά την απαλοιφή της επίδρασης της διαστολής.

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

Η τιμή της γωνίας τριβής που προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο είναι κατά κανόνα υψηλότερη από αυτή που προκύπτει από τεχνητές επιφάνειες που δημιουργήθηκαν με κοπή από τα πέντε είδη πετρωμάτων.

(στ) Διαστολή

Ο υπολογισμός της διαστολής πραγματοποιήθηκε με βήμα διατμητικής μετακίνησης ίσο με το 0,2% του μήκους του δοκιμίου. Έτσι για ένα δοκίμιο με ονομαστικό μήκος 100 mm, το βήμα διατμητικής μετακίνησης αντιστοιχεί σε 0,2 mm. Το μήκος αυτό είναι αισθητά μικρότερο από τη μέγιστη διάμετρο των κόκκων των εξετασθέντων τύπων πετρωμάτων, που για τους τρεις τύπους ψαμμίτη ήταν 2,3 mm (GS), 0,8 mm (SST) και 0,9 mm (SLST), ενώ για τον ασβεστόλιθο ήταν 3 mm. Άρα ο υπολογισμός της διαστολής γίνεται σε κλίμακα κόκκων, δηλαδή, τουλάχιστο σε κάποιο βαθμό, η γωνία σχετικής μετακίνησης πραγματοποιείται κατά μήκος διεπιφανειών μεταξύ κόκκων. Ειδικά για την περίπτωση του ασβεστόλιθου, με μέγιστο μέγεθος κόκκου 3 mm, η μετακίνηση αυτή κατά μήκος επίπεδων κρυσταλλικών επιφανειών ασβεσίτη, εκτιμάται ότι συμβαίνει σε μεγαλύτερο βαθμό, και ίσως στο μηχανισμό αυτό να οφείλεται και η σχετικά χαμηλή αντοχή γωνία τριβής που προέκυψε κατά την άμεση διάτμηση ασυνεχειών σε σχέση με αυτή που προέκυψε από την τριαξονική δοκιμή, όπου η αστοχία πραγματοποιείται και με ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση κόκκων ασβεσίτη.

Για κάθε δοκιμή, ο ρυθμός διαστολής υπολογίστηκε σε κάθε σημείο από το διάγραμμα ορθής μετατόπισης - διατμητικής μετατόπισης. Η γωνία διαστολής είναι συνάρτηση της απόστασης διάτμησης - μέγεθος του βήματος με το οποίο υπολογίζεται και είναι γνωστό ότι μειώνεται λογαριθμικά με το μέγεθος βήματος υπολογισμού (Barton, 1990, Papaliangas et al., 1994). Ο υπολογισμός με βήμα 0,2% του μήκους του δοκιμίου, για ασυνέχειες υπό ορθή τάση 6-8 kPa (ίδιο βάρος δοκιμίου και πλαισίου συγκράτησης) αντιστοιχεί σε αμελητέα φθορά της επιφάνειας και συνεπώς ή γωνία διαστολής μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μέγιστη κλίση των επιφανειακών προεξοχών με όψη αντίθετη προς τη φορά διάτμησης.

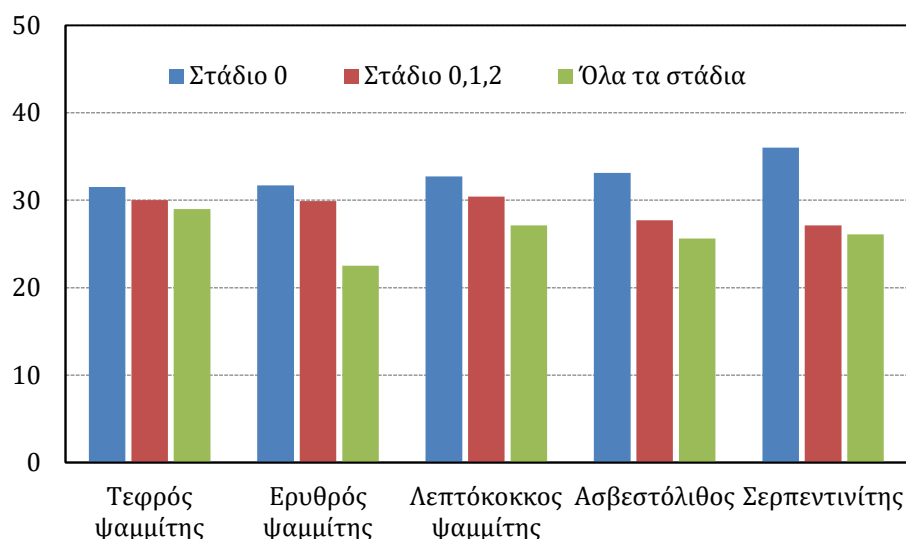
Εν προκειμένω, οι τιμές της μέγιστης γωνίας διαστολής δίνονται στο Σχήμα 4.6.4. Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται για τις δοκιμές υπό το ίδιο βάρος του δοκιμίου. Μεταξύ αυτών, οι μεγαλύτερες εμφανίζονται στον σερπεντινίτη (36°), στον ασβεστόλιθο (33,1°), και ακολουθούν οι ψαμμίτες, ο λεπτόκοκκος (32,7°), ο ερυθρός (31,7°) και ο τεφρός

(31,5°). Οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται όταν υπολογίζονται ως μέσος όρος όλων των σταδίων και τέλος για τα στάδια 0+1+2, προκύπτουν ενδιάμεσες τιμές. Σημειώνεται, ότι η τραχύτητα σε κάθε ορθή τάση, είναι απομειωμένη λόγω της δοκιμής που έχει διεξαχθεί στο προηγούμενο ή στα προηγούμενα στάδια (Πίνακας 4.6.5).

Πίνακας 4.6.5. Γωνίες διαστολής ψ και αντίστοιχη τάση μηδενισμού διαστολής σ_{nT} για όλα τα στάδια, για τα πρώτα στάδια (0,1,2) και για το στάδιο 0 (επίδραση του ίδιου βάρους της ασυνέχειας).

Πέτρωμα	Σύμβολο	Όλα τα στάδια		Στάδιο 0,1,2		Στάδιο 0	
		σ_{nT} [MPa]	ψ [°]	σ_{nT} [MPa]	ψ [°]	σ_{nT} [MPa]	ψ [°]
Τεφρός ψαμμίτης	GS	13,3	29,0	7,6	30,0	3,9	31,5
Ερυθρός ψαμμίτης	SST	10,7	22,5	3,8	29,9	4,1	31,7
Λεπτόκοκκος ψαμμίτης	SLST	7,4	27,1	2,3	30,4	1,6	32,7
Ασβεστόλιθος	GL	12,9	25,6	31,2	27,7	0,2	33,1
Σερπεντινίτης	GP	8,3	26,1	4,4	27,1	2,2	36,0

Μέγιστη γωνία διαστολής (°)



Σχήμα 4.6.4. Τιμές μέγιστης γωνίας διαστολής κατά τη διάτμηση ασυνεχειών για όλους τους εξετασθέντες τύπους πετρωμάτων, ανάλογα με τα στάδια ορθών τάσεων που υπολογίστηκαν. Στάδιο 0: μόνο ίδιο βάρος. Στάδιο 0,1,2. Μέση τιμή της μέγιστης γωνίας διαστολής κατά τα στάδια υπό την επίδραση του ίδιου βάρους και επόμενων 2 ορθών τάσεων. Όλα τα στάδια: Μέση τιμή της μέγιστης γωνίας διαστολής από όλα τα στάδια ορθών τάσεων.

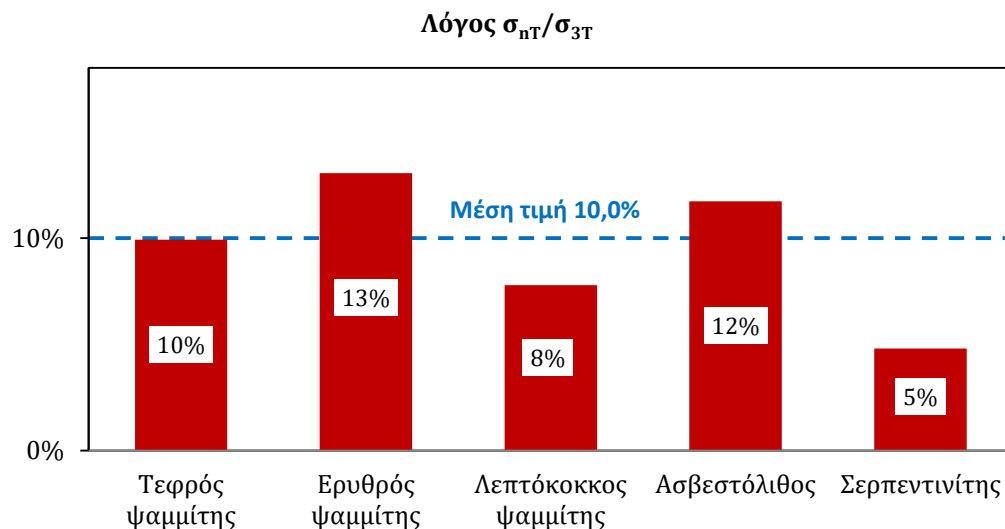
Οι υψηλότερες τιμές της γωνίας διαστολής ελήφθησαν από δοκιμές σε συνθήκες όπου ενεργούσε μόνο το ίδιο βάρος του δείγματος που πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί, ως

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

μηδενική ορθή τάση. Αυτό ισοδυναμούσε με 6 kPa - 8 kPa. Υπάρχει μια μεγάλη διασπορά σε χαμηλές ορθές τάσεις καθώς τα δείγματα έχουν διαφορετική τραχύτητα και παρουσιάζουν διαφορετικές γωνίες διαστολής, αλλά καθώς αυξάνεται η ορθή τάση, αυτή η διασπορά μειώνεται σημαντικά.

Η διαστολή καταστέλλεται πλήρως σε ορθή τάση (σ_{NT}) που κυμαίνεται από 7,4 MPa για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, έως 13,3 MPa για τον τεφρό ψαμμίτη και μέση τιμή για όλα τα πετρώματα ίση με 10,5 MPa. Αυτές οι τιμές αντιπροσωπεύουν το 10,0% \pm 5,0% (εύρος 5% για τον σερπεντινίτη έως το 13,0% για τον ερυθρό ψαμμίτη) της πλευρικής πίεσης που αντιστοιχεί στο όριο μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά σ_{3T} (Σχήμα 4.6.5). Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι, η τάση πλήρους καταστολής της διαστολής σχετίζεται με την πίεση στην περιοχή της μετάβασης από ψαθυρότητα σε ολκιμότητα (σ_{3T}), αλλά όχι με την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Ο μέγιστος ρυθμός διαστολής ($\tan\psi$), σε σχέση με την ορθή τάση για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα δείγματα, μεταβάλλεται με λογαριθμική μορφή σε ένα εύρος ορθής τάσης τριών τάξεων μεγέθους.



Σχήμα 4.6.5. Λόγος τάσης μηδενισμού της γωνίας διαστολής (σ_{NT}) κατά τη δοκιμή διάτμησης ασυνεχειών ως ποσοστό της πλευρικής πίεσης μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά (σ_{3T}) κατά τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης του άρρηκτου υλικού.

Η διαστολή κατά τη μέγιστη διατμητική αντοχή μειώνεται λογαριθμικά με την ορθή τάση, για εύρος τριών τάξεων μεγέθους (10^1 - 10^4 MPa). Η ορθή τάση στην οποία το δείγμα παύει να διαστέλλεται είναι χαμηλότερη από την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη, και περίπου μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την πλευρική πίεση που αντιστοιχεί στο όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας. Μπορεί πειραματικά να προσδιοριστεί από μια σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης.

(ζ) Διατμητική μετατόπιση κατά τη μέγιστη διατμητική αντοχή και μέγιστη διαστολή

Η μέγιστη γωνία διαστολής λαμβάνει χώρα λίγο μετά τη μέγιστη διατμητική αντοχή. Η διαφορά φάσης στα δύο μεγέθη οφείλεται πιθανώς στον βαθμό σύμπλεξης κατά την έναρξη της ολίσθησης.

Η μεταβολή της μετατόπισης διάτμησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή για τις ασυνέχειες δίνεται στα σχήματα.

Ο βαθμός σύμπλεξης (interlocking) των επιφανειακών προεξοχών, επηρεάζει τη διατμητική μετατόπιση για την πλήρη ενεργοποίηση της διαστολής του δοκιμίου. Για τις ασυνέχειες με μεγάλο βαθμό σύμπλεξης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, όπως σε ορισμένες περιπτώσεις των ασυνεχειών ασβεστολίθου, η μέγιστη διατμητική αντοχή έλαβε χώρα λίγο νωρίτερα από τη μέγιστη διαστολή.

Η διατμητική μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή αυξάνεται με την ορθή τάση. Στην προκειμένη περίπτωση, σε χαμηλές ορθές τάσεις είναι περίπου 1-2% του μήκους του δοκιμίου και αυξάνεται σε περίπου 4-5% του μήκους του δοκιμίου σε ορθές τάσεις 2,0 MPa.

(η) Επιφάνειες επαφής

Από τη μελέτη των επιφανειών επαφής από το σύνολο των δοκιμών διάτμησης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα (Πίνακας 4.6.6):

Το εμβαδό της πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r , ως ποσοστό της ονομαστικής επιφάνειας επαφής A_0 είναι ανάλογη της ορθής τάσης, με συντελεστή αναλογίας που κυμαίνεται από 0,4% για τον σερπεντινίτη έως 2,7% για το τεφρό ψαμμίτη. Για τα

4. Αποτελέσματα - Ανάλυση

υπόλοιπα πετρώματα είναι: 2,2% για τον ερυθρό ψαμμίτη, 0,9% για τον ασβεστόλιθο και 0,8% για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη. Δηλ. για ορθή τάση 5 MPa, θα κυμαίνεται από 2%-4,5% για ασβεστόλιθο, σερπεντινίτη και λεπτόκοκκο ψαμμίτη, και από >10% (11,5%-13,5%) για τους δυο ψαμμίτες. Το ποσοστό αυτό είναι ανάλογο του πορώδους του υλικού των τοιχωμάτων.

Η πραγματική ορθή τάση επαφής των δυο τοιχωμάτων είναι περίπου σταθερή (ανεξάρτητη από την ονομαστική τάση), και κυμαίνεται από 35 MPa για τον τεφρό ψαμμίτη, μέχρι 281 MPa για τον σερπεντινίτη. Για τους άλλους τύπους πετρωμάτων οι τιμές αυτές είναι 57, 120 και 131 MPa για τον ερυθρό ψαμμίτη, τον ασβεστόλιθο και τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί των ανωτέρω τιμών είναι προσεγγιστικός, επειδή οι επιφάνειες επαφής είναι δύσκολο να αποτυπωθούν με ακρίβεια, ειδικά στις περιπτώσεις των επανειλημμένων διατμήσεων στο ίδιο δοκίμιο, με διαφορετική ορθή τάση κάθε φορά. Ο λόγος των πραγματικών ορθών τάσεων επαφής, ως ποσοστό της πλευρικής πίεσης που αντιστοιχεί στην τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά είναι 26%, 70%, 138%, 109% και 162%, για τον τεφρό ψαμμίτη, τον ερυθρό ψαμμίτη, τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, τον ασβεστόλιθο και τον σερπεντινίτη αντίστοιχα. Η μέση τιμή για όλους του τύπους είναι 101% και η τυπική απόκλιση 54%.

Πίνακας 4.6.6. Τιμές ποσοστού πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r/A_0 και πραγματικής ορθής τάσης σ_{real} .

Πέτρωμα	Σύμβολο	σ_c [MPa]	σ_{3T} [MPa]	σ_{real} [MPa]	$\sigma_{real}/\sigma_{3T}$ [%]	σ_{real}/σ_c [%]	A_r/A_0 [%]
Τεφρός ψαμμίτης	GS	49	134	35	26	71	2,7
Ερυθρός ψαμμίτης	SST	21	82	57	70	272	2,3
Λεπτόκοκκος ψαμμίτης	SLST	60	95	131	138	218	0,8
Ασβεστόλιθος	GL	80	110	120	109	150	0,9
Σερπεντινίτης	GP	91	173	281	162	309	0,4
Μέση τιμή:					101	204	
Τυπική απόκλιση:					54	95	

Η γραμμική αύξηση του εμβαδού της περιοχής επαφής με την αύξηση της ορθής τάσης και η περίπου σταθερή τιμή της τάσης επαφής, είναι σύμφωνα με τη θεωρία πρόσφυσης της τριβής (adhesion theory).

Κεφάλαιο 5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η γεωτεχνική διερεύνηση χαρακτηριστικών πετρωμάτων από την λεκάνη των Γρεβενών, με εστίαση στη διερεύνηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής.

Στην περίπτωση των άρρηκτων πετρωμάτων, η διατμητική αντοχή εξετάζεται πληρέστερα με τη βοήθεια της δοκιμής τριαξονικής θλίψης, ενώ η διατμητική αντίσταση κατά μήκος ασυνεχειών προσδιορίζεται με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης.

Προς την κατεύθυνση αυτή, πραγματοποιήθηκαν δυο κύρια προγράμματα εργαστηριακών δοκιμών, εκ των οποίων το ένα καλύπτει τη μηχανική συμπεριφορά σε τριαξονική θλίψη επιλεγμένων τύπων άρρηκτων πετρωμάτων και η δεύτερη τη μηχανική συμπεριφορά τεχνητών και φυσικών ασυνεχειών των ιδίων πετρωμάτων.

Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων της περιοχής μελέτης, στους οποίους περιλαμβάνονται ψαμμίτης (3 τύποι), ασβεστόλιθος και σερπεντινίτης. Οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε άρρηκτο υλικό, πραγματοποιήθηκαν σε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa, προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής, και εξετάστηκε η συμπεριφορά των υλικών, ιδιαίτερα στις υψηλότερες τιμές πλευρικής πίεσης, κατά τις οποίες το δοκίμιο μεταβάλλει σταδιακά τη συμπεριφορά του από ψαθυρή σε όλκιμη. Η συμπεριφορά στην κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από διατμητική αστοχία, κατά μήκος

5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

μιας κύριας επιφάνειας με παράλληλη εμφάνιση μικρότερων συζυγών διατμητικών επιφανειών εκατέρωθεν.

Στους ίδιους τύπους πετρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών άμεσης διάτμησης σταθερής ορθής τάσης στο εύρος 0-2,5 MPa, σε φυσικές και τεχνητές τραχειές επιφάνειες ασυνεχειών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην λεπτομερή καταγραφή της διαστολής του δοκιμίου, με τη βοήθεια της οποίας έγινε ανάλυση της διατμητικής αντοχής σε συνιστώσα τριβής και συνιστώσα διαστολής λόγω τραχύτητας.

Ιδιαίτερο τμήμα αποτέλεσε ο προσδιορισμός του «πραγματικού» εμβαδού των επιφανειών επαφής κατά τη διάτμηση, για όλα τα δοκίμια και για όλες τις ορθές τάσεις. Ο προσδιορισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με φωτογράφιση των επιφανειών φθοράς των δυο τοιχωμάτων των δοκιμίων, και ανάλυση με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνας (ImageJ). Με βάση το εμβαδόν της «πραγματικής» επιφάνειας επαφής, υπολογίστηκε η τιμή της επ' αυτής αναπτυσσόμενης «πραγματικής» ορθής τάσης. Η «πραγματική» αυτή ορθή τάση, σύμφωνα με τη θεωρία «πρόσφυσης» της τριβής, κατά τη διάτμηση μιας ασυνέχειας, εφαρμόζεται στους κόμβους επαφής, οι οποίοι βρίσκονται σε μια κατάσταση «συγκόλλησης», και επομένως υπάρχει μια κατάσταση αντίστοιχη με αυτή που υπάρχει κατά την αστοχία του άρρηκτου δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη, υπό πλευρική πίεση, που προκαλεί μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά.

Για την περιγραφή των πετρωμάτων πραγματοποιήθηκε μελέτη ορυκτολογικής σύστασης, υφής, και ιστού επιλεγμένων πετρωμάτων με XRD.

Τα κυριότερα συμπεράσματα από τη μελέτη της συμπεριφοράς των εξετασθέντων πετρωμάτων συνοψίζονται ως εξής:

Από τις δοκιμές τριαξονικής θλίψης προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

(α) Παράμετρος m_i του κριτηρίου Hoek-Brown

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του m_i , χρησιμοποιήθηκε εύρος πλευρικών πιέσεων 0-70 MPa, που βρίσκεται σε ευθυγράμμιση με τη νέα σύσταση των Hoek - Brown (2018) σύμφωνα με την οποία, η μέγιστη πλευρική πίεση των τριαξονικών δοκιμών πρέπει να είναι ίση με την τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά και όχι $0,5\sigma_{ci}$, όπως εφαρμοζόταν μέχρι πρόσφατα. Με εξαίρεση τον ασβεστόλιθο, για τον οποίο ο υπολογισμός του m_i με βάση τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών στο εύρος 0- $0,5\sigma_{ci}$ ήταν 23,3 και

για όλο το εύρος 0-70 MPa ήταν 31,5, οι τιμές για τους άλλους τύπους πετρωμάτων βρισκόταν σε συμφωνία μεταξύ τους.

Η σταθερά m_i του κριτηρίου Hoek & Brown, προσδιορισμένη με βάση την έκδοση του 2002 και 2018 του κριτηρίου, δεν εμφάνισε ουσιώδεις διαφορές, ωστόσο ο υπολογισμός με την έκδοση 2018 έδωσε τιμές αυξημένες μικρότερες από 20%. Σε σχέση με τις προτεινόμενες τιμές από τους Hoek&Marinos 2000, σε συμφωνία βρίσκονται οι δύο ψαμμίτες (τεφρός και ερυθρός) και ο σερπεντινίτης. Για τον ασβεστόλιθο αντίστοιχες αποκλίσεις βρέθηκαν και από άλλους ερευνητές .

(β) Το όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας

Για όλους του εξετασθέντες τύπους πετρωμάτων, η τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 70MPa, και δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς, λόγω του περιορισμού της ικανότητας της κυψέλης Hoek, να δεχτεί υψηλότερες πιέσεις. Για το λόγο αυτό, και δεχόμενοι ότι κατά τη μετάβαση αυτή, στο διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ($\sigma_1-\epsilon_1$) δεν παρατηρείται πτώση τάσης μετά τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή η παραμένουσα αντοχή είναι ίση με μέγιστη αξονική αντοχή, το όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας εκτιμάται από το σημείο τομής των περιβαλλουσών μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής, σε διάγραμμα $\sigma_1-\sigma_3$. Με βάση αυτή τη μέθοδο, οι τιμές που προέκυψαν για την τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά ήταν 134 MPa για τον τεφρό ψαμμίτη, 95 MPa για τον ερυθρό ψαμμίτη, 170 MPa για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, 82 MPa για τον ασβεστόλιθο και 94 MPa για τον σερπεντινίτη.

(γ) Μέτρο ελαστικότητας - Παραμόρφωση αστοχίας

Η σειρά κατάταξης των πετρωμάτων που εξετάστηκαν κατά αύξουσα τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι ερυθρός ψαμμίτης, λεπτόκοκκος ψαμμίτης, τεφρός ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, σερπεντινίτης. Αντίστροφη σειρά κατάταξης ισχύει για την αξονική παραμόρφωση αστοχίας.

Από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

(α) Μέγιστη διατμητική αντοχή

5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η διατμητική τάση διαχωρίστηκε σε δύο συνιστώσες: η πρώτη είναι η συνιστώσα διαστολής, που αντιστοιχεί στη γωνία διαστολής (ψ) και υπολογίζεται από το διάγραμμα μεταβολής της ορθής με τη διατμητική μετατόπιση ($dv-dh$). Για τον υπολογισμό της διαστολής χρησιμοποιήθηκε βήμα dh ίσο με 0,2% του μήκους του δοκιμίου. Η δεύτερη συνιστώσα προκύπτει από τη διαφορά της συνολικής διατμητικής τάσης και της συνιστώσας της διαστολής, χαρακτηρίζεται δε ως συνιστώσα μη διαστολικής αντοχής. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, για όλους τους τύπους των πετρωμάτων που εξετάστηκαν, ερμηνεύονται με μεγάλη ακρίβεια με βάση αυτό το διαχωρισμό, σε όλο το εύρος των ορθών τάσεων διαστολικής διάτμησης. Επομένως, η αρχή " $\phi + \psi$ ", όπου ϕ είναι η γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και ψ η γωνία διαστολής (γεωμετρική συνιστώσα) που αντιστοιχεί στην μέγιστη διατμητική αντοχή, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλο το εύρος της διαστολικής διάτμησης. Συνεπώς, η κατά Barton συνιστώσα της απότμησης των επιφανειακών προεξοχών (asperity failure component), δεν μπορεί να διαχωριστεί από τη συνιστώσα της «βασικής» γωνίας τριβής.

Η μέγιστη διατμητική αντοχή, για όλους τους τύπους των πετρωμάτων που εξετάστηκαν, ερμηνεύεται με μεγάλη ακρίβεια σε όλο το εύρος των ορθών τάσεων της διαστολικής διάτμησης με βάση την αρχή " $\phi_m + \psi$ ", όπου ϕ_m είναι η γωνία τριβής μη διαστολικής διάτμησης της ασυνέχειας (συνιστώσα τριβής) και ψ η γωνία διαστολής (γεωμετρική συνιστώσα) που αντιστοιχεί στην μέγιστη διατμητική αντοχή.

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Μέγιστη γωνία} \\ \text{διατμητικής αντοχής} \\ (\phi_p) \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{γωνία τριβής } (\phi_m) \\ \text{(μη διαστολική} \\ \text{συνιστώσα)} \end{array}} + \boxed{\begin{array}{c} \text{Διαστολή } (\psi) \\ \text{(διαστολική} \\ \text{συνιστώσα)} \end{array}}$$

Η μη διαστολική γωνία τριβής (ϕ_m):

- είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε επίπεδες τεχνητές επιφάνειες διαμορφωθείσες με κοπή.
- ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ευαισθησία στα φυσικά χαρακτηριστικά της ασυνέχειας τα οποία στην περίπτωσης της τεχνητής με κοπή επιφάνειας εξαφανίζονται.
- πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη γωνία τριβής του βραχώδους υλικού του τοιχώματος της ασυνέχειας που καθορίζεται από την κατάσταση τάσης κατά την μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά

Οι χρησιμοποιούμενες στην πράξη χαρακτηριστικές γωνίες τριβής ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά της τιμής τους ως εξής: 1) μέγιστη διατμητική αντοχή 2) παραμένουσα ή τελική γωνία τριβής 3) μη διαστολική γωνία τριβής και 4) «βασική» γωνία τριβής.

Η μη διαστολική γωνία τριβής είναι συστηματικά μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε επίπεδες τεχνητές επιφάνειες διαμορφωθείσες με κοπή από $0,4^\circ$ (ερυθρός ψαμμίτης) μέχρι $7,4^\circ$ (ασβεστόλιθος). Εξάιρεση στον κανόνα αυτό αποτελεί ο σερπεντινίτης. Η μη διαστολική γωνία τριβής ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ευαισθησία στα φυσικά χαρακτηριστικά της ασυνέχειας τα οποία στην περίπτωση της τεχνητής με κοπή επιφάνειας εξαφανίζονται, είναι δε πρακτικά ίση με τη γωνία τριβής του βραχώδους υλικού του τοιχώματος της ασυνέχειας που καθορίζεται από την κατάσταση τάσης κατά την μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά, για τους δύο ψαμμίτες και τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, όχι όμως και για τον ασβεστόλιθο και τον σερπεντινίτη.

(γ) Διατμητική μετατόπιση κατά τη μέγιστη διατμητική αντοχή και μέγιστη διαστολή

Η μέγιστη διατμητική αντοχή έλαβε χώρα ταυτόχρονα με τη μέγιστη διαστολή εκτός από ορισμένες περιπτώσεις ασυνεχειών με μεγάλο βαθμό σύμπλεξης και μικρή επιφανειακή αδρότητα, κυρίως σε ορισμένες περιπτώσεις των ασυνεχειών ασβεστόλιθου όπου έλαβε χώρα λίγο νωρίτερα από τη μέγιστη διαστολή.

Η μέγιστη γωνία διαστολής υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του δοκιμίου, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, πρακτικά ισούται με τη μέγιστη ενεργοποιούμενη κλίση των επιφανειακών εξάρσεων της ασυνέχειας που έχουν όψη αντίθετα με τη φορά διάτμησης. Οι γωνίες αυτές ήταν $31,5^\circ$, $31,7^\circ$, $36,0^\circ$ και $32,7^\circ$ για τον ερυθρό ψαμμίτη, τον τεφρό ψαμμίτη, τον σερπεντινίτη, τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη και τον ασβεστόλιθο αντίστοιχα.

Η μέγιστη γωνία διαστολής, όπως προέκυψε από τις δοκιμές διάτμησης, αποτελεί ένα πολύ αξιόπιστο τρισδιάστατο δείκτη τραχύτητας της επιφάνειας.

Η διαστολή καταστέλλεται πλήρως σε ορθή τάση ($\sigma_{\pi\tau}$) ίση περίπου με το 10,0% της πλευρικής πίεσης που αντιστοιχεί στο όριο μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά

σ_{3T}

Η διαστολή κατά τη μέγιστη διατμητική αντοχή μειώνεται λογαριθμικά με την ορθή τάση, για εύρος τριών τάξεων μεγέθους (10^1 - 10^4 MPa). Η ορθή τάση στην οποία το δείγμα παύει να διαστέλλεται είναι χαμηλότερη από την αντοχή σε πλευρική πίεση στο όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας κατά μία τάξη μεγέθους περίπου.

Από τη μελέτη των επιφανειών επαφής από το σύνολο των δοκιμών διάτμησης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Το εμβαδό της πραγματικής επιφάνειας επαφής A_r , ως ποσοστό της ονομαστικής επιφάνειας επαφής A_0 είναι ανάλογη της ορθής τάσης, με συντελεστή αναλογίας που κυμαίνεται από 0,4% για τον σερπεντινίτη έως 2,7% για το τεφρό ψαμμίτη. Για τα υπόλοιπα πετρώματα είναι: 2,2% για τον ερυθρό ψαμμίτη, 0,9% για τον ασβεστόλιθο και 0,8% για τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη. Δηλ. για ορθή τάση 5 MPa, θα κυμαίνεται από 2%-4,5% για ασβεστόλιθο, σερπεντινίτη και λεπτόκοκκο ψαμμίτη, και από >10% (11,5%-13,5%) για τους δυο ψαμμίτες. Το ποσοστό αυτό είναι ανάλογο του πορώδους του υλικού των τοιχωμάτων.

Η πραγματική ορθή τάση επαφής των δυο τοιχωμάτων είναι περίπου σταθερή (ανεξάρτητη από την ονομαστική τάση), και κυμαίνεται από 35 MPa για τον τεφρό ψαμμίτη, μέχρι 281 MPa για τον σερπεντινίτη. Για τους άλλους τύπους πετρωμάτων οι τιμές αυτές είναι 59, 120 και 131 MPa για τον ερυθρό ψαμμίτη, τον ασβεστόλιθο και τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των ανωτέρω τιμών είναι προσεγγιστικός, επειδή οι επιφάνειες επαφής είναι δύσκολο να αποτυπωθούν με ακρίβεια, ειδικά στις περιπτώσεις των επανειλημμένων διατμήσεων στο ίδιο δοκίμιο, με διαφορετική ορθή τάση κάθε φορά. Ο λόγος των πραγματικών ορθών τάσεων επαφής, ως ποσοστό της πλευρικής πίεσης που αντιστοιχεί στην τάση μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά είναι 26%, 70%, 138%, 109% και 162%, για τον τεφρό ψαμμίτη, τον ερυθρό ψαμμίτη, τον λεπτόκοκκο ψαμμίτη, τον ασβεστόλιθο και τον σερπεντινίτη αντίστοιχα. Η μέση τιμή για όλους του τύπους είναι 101% και η τυπική απόκλιση 54%.

Η μέση τιμή της πραγματικής ορθής τάσης επαφής για όλα τα πετρώματα μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίση με την πλευρική πίεση που αντιστοιχεί στο όριο ψαθυρότητας-ολκιμότητας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν, ότι κατά τη διάτμηση τραχειών ασυνεχειών πετρωμάτων, ισχύουν οι δυο βασικοί νόμοι τριβής του Amonton :

- i) Η δύναμη της τριβής είναι ανάλογη με την ασκούμενη ορθή δύναμη.
- ii) Η δύναμη της τριβής είναι ανεξάρτητη από το εμβαδόν της ονομαστικής επιφάνειας επαφής.

Σε πρακτικό επίπεδο γεωτεχνικών εφαρμογών:

- Τα αποτελέσματα διατμητικής αντοχής ασυνεχειών μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τον έλεγχο γεωτεχνικών προβλημάτων ευστάθειας που ελέγχονται από ασυνέχειες (επίπεδες και σφηνοειδείς ολισθήσεις).
- Τα αποτελέσματα της τριαξονικής θλίψης του άρρηκτου υλικού (σ_{ci} και m_i) μπορούν σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών να χρησιμοποιηθούν για τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας.

Σε ευρύτερο επιστημονικό πεδίο επιβεβαιώνεται για τραχειές ασυνέχειες των εξετασθέντων τύπων πετρωμάτων η ισχύς των βασικών νόμων τριβής του Amonton.

Το γεγονός αυτό δίνει την απαραίτητη θεωρητική βάση για την ποσοτική έκφραση της διατμητικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών με παραμέτρους με φυσική σημασία.

3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας, προτείνονται ορισμένα ενδιαφέροντα θέματα για μελλοντική έρευνα:

- Επέκταση της έρευνας σε άλλους τύπους πετρωμάτων διαφορετικής γεωλογικής προέλευσης. Θα ήταν σκόπιμη η συμπερίληψη πετρωμάτων με ομοιογενή σύσταση, ώστε να υπάρχει επαναληψιμότητα.
- Λόγω της κομβικής σημασίας που αναδεικνύεται για τη συμπεριφορά στην μεταβατική περιοχή ψαθυρότητας-ολκιμότητας, είναι πολύ χρήσιμη η απόκτηση εξοπλισμού με δυνατότητα διεξαγωγής τριαξονικών δοκιμών σε υψηλότερες πλευρικές πιέσεις (π.χ. μέχρι 140 MPa).
- Προσδιορισμός του εμβαδού των επιφανειών επαφής με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως π.χ. με διεξαγωγή ειδικών σειρών δοκιμίου ενός σταδίου διάτμησης ασυνεχειών, μέχρι



5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

τη μέγιστη διατμητική αντοχή.

- Προσδιορισμός της επιφανειακής τραχύτητας των ασυνεχειών με σύγχρονο τεχνολογικό εξοπλισμό τρισδιάστατης αποτύπωσης
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς ασυνεχειών με λείες επιφάνειες και ασυνεχειών με επιφάνειες με πολύ μεγάλο βαθμό σύμπλεξης
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς σε διάτμηση ασυνεχειών υπό συνθήκες σταθερής ορθής δυσκαμψίας, που θα επιτρέψει τη μελέτη της επίδρασης συνθηκών όπου το δοκίμιο δεν είναι ελεύθερο να διασταλεί.

- Alejano, L.R., Gonzalez J., 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. "De la resistance caus"ee dans les machines,' Mémoires de l'Académie Royale, A, *Chez Gerard Kuyper, Amsterdam*, published in 1706, pp 257–282 (1699)
- Amontons (1699). Histoire de l'Academie Royale des Sciences avec les Memoires de *Mathematique et de Physique*. 206 pp.
- Archard J.F. (1957). Elastic deformation and the laws of friction. *Proc. R. Soc., London*, A243, 190-205.
- Archard J.F. (1974). Surface topography and tribology. *Tribology Int*. 7, 213-220.
- Bandis, S.C. 1980. Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints. *Ph.D. Thesis, Univ. of Leeds*: 385 p
- Bandis S, Lumsden A.C., Barton N.R. (1981). Scale effects on the shear behavior 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.R. and Bandis, S.C. 1982. Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock. *23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley*, 739-760.
- Barton N. and Choubey V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 10, 1–54
- Belem T., Homand-Etienne F., Souley M. (2000). Quantitative Parameters for Rock Joint Surface Roughness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 33(4), 217-242
- Bergues J., Derlich S., Habib P., Massat H. & Vodar B. (1974). Étude de Quatre Roches Sous Très Hautes Pressions. *Advances in Rock Mechanics; Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Denver, Colorado, Vol. IIA, pp. 493-498. Nat. Acad. Sci., Washington D.C.
- Bieniawski Z.T (1974a). Estimating the strength of rock materials. *Jl. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 74, No 8, pp. 312 – 320.
- Bieniawski Z.T. (1974b). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. *In Advances in Rock Mechanics 2 , part A: pp.27-32. Washington, D.C. National Academy of Sciences*
- Bowden F.P. & Tabor D. (1950). The Friction and Lubrication of Solids. *Claredon Press. Oxford*

- Bowden, F.P. and D. Tabor (1964), The Friction and Lubrication of Solids Part 2, *Clarendon Press, Oxford* p. 201.
- Broch E., Franklin J.A. (1972) The point-load strength test. *Int. J. Rock Mech. min. Sci. Vol. 9*, pp. 669-697. *Pergamon Press 1972*.
- Brown S.R. & Scholz C.H. (1985a). Closure of Random Elastic Surfaces in Contact. *J. Geophys. Res.* 90, 5531-5545.
- Brown S.R. & Scholz C.H. (1985b). Broad band width study of the topography of natural rock surfaces. *J. Geophys. Res.* 90, 12575-12582.
- Byerlee JD (1967). Frictional characteristics of granite under high confining pressure. *J Geophys Res* 72:3639–3648.
- Byerlee J.D. (1968). Brittle – ductile transition in rocks. *J. Geophys. Res.*, 73:14. *U.S. Geological Survey*.
- Byerlee J.D. (1978). Friction of rocks. *Pure & Appl. Geophys*, 116, 615-626.
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, vol. 7, pp. 343–387
- 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. In: Classification of Carbonate Rocks (Ed. W.E. Ham), *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, 1, 108–121.
- Fecker E, Rengers N (1971). Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological coss. In: *Proceedings symposium on rock fracture, Nancy, France, 1–18*
- Folk R.L. (1959). Practical petrographic classification of limestones: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 43, p. 1-38.
- Fuller K.N.G. and Tabor D. (1975). The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids. *Proc. R. Soc.* A345, 327-342.
- Goldstein M., Goosev B., Pyrogovsky N., Tulinov R., Turovskaya A. (1996) Investigation of mechanical properties of cracked rock. *Proc. 1st Coogr. Int. Soc. Rock. Mech., Lisbon, 1966, 1, 521-524*
- Goodman R.E. (1970). The deformability of joints. Determination of the in situ modulus of deformation of rock, *American Society for Testing and Materials Special Technical Publication*, No. 477, pp. 174-196.
- Goodman R.E. (1989). Introduction to rock mechanics. *Second Edition. John Wiley & Sons*, 562 p.

- 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.
- Grasselli G., Egger P., (2003) Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40(1), 25-40
- Grasselli G., Wirth J., Egger P., (2002) Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 39(6), 789-800
- Greenwood J.A. & Tripp J.H. (1971). The Contact of two Nominally Flat Rough Surfaces. *Proc. Inst. Mech. Engrs* 185, 625-633.
- Greenwood J.A & Williamson J.B.P (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proc. Royal Society, A* 295, 300-319.
- Griffith A.A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc.* 221A, 163-198.
- Griffith A.A. (1924). The theory of rupture, *Proc. Int. Congr. Appl. Mech.*, 56-63.
- Hencher S.R. & Richards L.R. (1989). Laboratory Direct Shear Testing of Rock Discontinuities. *Ground Engng* 22, 24-31.
- Hencher S.R. & Richards L.R. (2015). Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. *Rock Mech Rock Eng* 48, 883-905.
- Hencher S.R., Toy J.P. & Lumsden A.C. (1993). Scale dependent shear strength of rock joints. *Scale Effects in Rock Masses 93; Proc. 2nd Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses* (Pinto da Cunha, ed.), pp. 233-240. Balkema, Rotterdam.
- Hoek E. (1968). Brittle failure of rock. In: *Stagg KG, Zienkiewicz OC(eds) Rock mechanics in engineering practice*. Wiley, London, 99-124
- Hoek E. (1983). Strength of jointed rock masses, *23rd. Rankine Lecture. Géotechnique*. 33 (3), 187-223
- Hoek E. (2007). Practical rock engineering. <http://www.rocscience.com>. Πρόσβαση 12 Μαρτίου 2020.
- Hoek E, Brown ET (1980). Underground excavations in rock. *The Institution of Mining and Metallurgy*, London
- Hoek E., Brown E.T (2018) The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* , 11, 445-463
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., (2002). Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition. *Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 200, 1, 267-273*.
- Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006) Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203-215.

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

Hoek E., Wood D., Shah S. (1992) A Modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses. *Proc. Rock Characterization, Symp. Intl. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (Edited by Hudson J.A.), 209-214. London, British Geotechnical Society.*

Hudson J. A. (1989). *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice. CIRIA/ Butterworths, London, 72 pp.*

International Society for Rock Mechanics. Commission on Standardisation of Laboratory and 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.

International Society for Rock Mechanics. Suggested methods (1981). Rock characterization testing and monitoring. *Editor E. Brown, Pergamon press, 211p.*

International Society for Rock Mechanics. Suggested methods (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. In: R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, *International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara.*

Jaeger J. C., Cook N.G.W, & Zimmerman R.W (2007) *Fundamentals of Rock Mechanics, Blackwell Publishing,*

Jaeger, J., Cook, N.G.W., Zimmerman, R. (2007). *Deformation and Failure of Rocks. Fundamentals of Rock Mechanics.* 4th Edition, Blackwell Publishing.

Johnson, K.C., Kendall, K. and Roberts, A.D., (1971). Surface Energy and the contact of Elastic Solids. *Proc. of the Royal Society, Vol. A. 324, pp. 301-313.*

Kahraman S. (2001). Evaluation of simple methods for accessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 981 – 994.

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

Kolsky H. (1963). *Stress waves in Solids. Dover Publications, New York.*

Kulatilake P.H.S.W., Shou G., Huang T.H., Morgan R.M., (1995) New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.* 32, 673-697

Labuz, J.F., Zang, A. (2012) “Mohr–Coulomb Failure Criterion”. *Rock Mech Rock Eng* 45,975–979.

Ladanyi B., Archambault G. (1969) Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. 11th U.S. *Symposium on Rock Mechanics, USRMS 1969 pp. 105-125*

- Lambe T.W. & Whitman R.V. (1969). *Soil Mechanics*. J.Wiley & Sons, New York, p. 553.
- Leichnetz W. (1985). Mechanical properties of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22, 313-321.
- Logan J.M. (1987). Porosity and the Brittle-Ductile Transition in Sedimentary Rocks. *Physics and Chemistry of Porous Media II; AIP Conf. Proc. 154*, Ridgefield, CT, pp. 229-242.
- Logan J.M. & Teufel L.W. (1986). The Effect of Normal Stress on the Real Area of Contact During Frictional Sliding of Rocks. *Pure & Appl. Geophys.* 124, 471-485.
- Mair K, Elphick SC, Main IG (2002). Influence of confining pressure on the mechanical and structural evolution of laboratory deformation bands. *Geophys Res Lett* 29, 10.1029/2001GL013964.
- Maksimovic (1992). New description of shear strength for rock joints. *Rock Mech. Rock Enanz* 25. 275-28.
- Maksimovic M (1996). The shear strength components of a rough rock joint. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech. Abstr* 33:769-783
- Marinos, P. and Hoek, E., (2000). GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation *Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.*
- Marinos, P. and Hoek, E., (2001). Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses such as Flysch, *Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG)*, 60, 85-92.
- Marinos V (2019). A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bull Eng Geol Environ* 78(2):899-912.
- Marinos V & Carter TG (2018). Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock. *Eng Geol* 239:282-297.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005). The GSI: Applications and Limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ*, 64, 55-65
- Marinos, V. & Tsiambaos, G. (2010). Strength and deformability of specific sedimentary and ophiolitic rocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(3), 1259-1266. doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.11302>
- Mavko G. (2015). Conceptual Overview of Rock and Fluid Factors That IMPact Seismic Velocity and Impedance. <https://pangea.stanford.edu/courses/gp262/Notes/8.SeismicVelocity.pdf>
- McClintock F.A., Walsh J.B.(1962) Friction of Griffith cracks in rock under pressure. *Proc. Nat. Congr. Appl. Mech.*, 4th, Berkeley, pp. 1015-1022.
- 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.

Mohr, O. (1900). Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials. *Civilingenieur*, 44 (46) (1900), pp. 1572-1577 44(45):1524-1530

Muralha J, Grasselli G, Tatone B, Blümel M, Chryssanthakis P, Yujing J (2014). ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version. In: Ulusay R (ed) *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014*. Springer International Publishing AG, Cham, pp 131–142

Murrell SAF (1965). The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. *Geophys J Roy Astr S* 10:231–281.

Murrell S.A.F. (1966). The Effect of Triaxial Stress systems on Brittle Fracture on the Brittle-Ductile Transition. *Proc. Conf. on Physical Basis of Yield and Fracture, Oxford*, pp. 225-258.

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

Papaliangas, T.T. (1996). Shear behaviour of rock discontinuities and soil-rock interfaces. *PhD thesis, the University of Leeds*.

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

Papaliangas T, Hencher S, Lumsden A, Manolopoulou S (1993). The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 30(2):81–91

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*.

Park J.W., Song J.J. (2013) Numerical method for the determination of contact areas of a rock joint under normal and shear loads. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 58, 8-22

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

Paterson M.S., Wong T.F. (2005) *Experimental rock deformation - The brittle field*, pp. 1-347, Springer

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

- Perras M., Diederichs M. (2014) A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotech Geol Eng* 32,525–546
- Rasband W.S., ImageJ U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018.
- Sabatakakis N., Tsiambaos G., Ktena S., Bouboukas S. (2018). The effect of microstructure on m_i strength parameter variation of common rock types. *Bull Eng Geol Environ* 77, 1673–1688.
- Schneider H.J. (1976). The friction and deformation behavior of rock joints. *Rock Mech.* 8,169-184
- Schwartz, A.E. (1964). Failure of rock in the triaxial shear test. *Proc. 6th Symp. Rock Mech. Rolla, Missouri*, pp. 109 – 135.
- Scott T.E. & Nielsen K.C. (1991). The Effect of Porosity on the Brittle-Ductile Transition in Sandstones. *J. Geophys. Res.* 96, 405-414.
- Shimada M., Cho A. & Yukutake H. (1983). Fracture Strength of Dry Silicate Rocks at High Confining Pressures and Activity of Acoustic Emission. *Tectonophysics* 96, 159-172.
- Stesky R.M. & Hannan S.S. (1987). Growth of Contact Area between Rough Surfaces under Normal Stress. *Geophys. Res. Lett.* 14, 550-553.
- Swan G. (1983). Determination of Stiffness and Other Properties from Roughness Measurements. *Rock Mech. Rock Engng.* 16, 19-38.
- Swan G. & Zonghi S. (1985). Prediction of Shear Behaviour of Joints Using Profiles. *Rock Mech. and Rock Engnr.* 18, 183-212.
- 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.
- Tsiambaos, G. & Sabatakakis, N. (2004) Considerations on Strength of Intact Sedimentary Rocks. *Engineering Geology*, 72, 261-273.
- Tsikrikis A., Papaliangas T., & Marinos V. (2016). Laboratory investigation on the correlation between the friction angle of rock joints and the constant m_i of the Hoek and Brown criterion. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 50 (2) 987-994. doi: <https://doi.org/10.12681/bgsg.11803>
- Wong T.-F. (1990). Mechanical Compaction and the Brittle-ductile Transition in Porous Sandstones. *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. Geological Society Special Publication No 54* (Knipe, R.J. & Rutter, E.H., Eds), London, Geological Society, pp. 111-122.
- Xia C.C., Tang Z.C., Xiao W.M., Song Y.L. (2014) New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description. *Rock Mech Rock Eng (2014)* 47:387–400

Yang ZY, Chiang DY., (2000), An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth-shaped asperities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.37(8),1247-1259

Καντηράνης Ν, (2004). Στοιχεία Ορυκτολογίας-Μεταλλογνωσία. *Ι.Ε.Κ. Πολιτιστικού, Θεσσαλονίκη*, 49 σ.

Κούκης Γ. & Σαμπατακάκης Ν. (2002). Τεχνική Γεωλογία. *Εκδόσεις Παπασωτηρίου*. 520 σελ.

Μαρίνος Π. Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων. ΔΔατά τ Π. Β. (2007). Γεωτεχνική ταξινόμείας Γεωτεχνικής, Ε.Μ.Π.

Μουντράκης Δ, (1985). Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, 207 σελ.

Νομικός Π., (2015). Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3983>

Παπαλιάγκας Θ.Θ., Αλεξούδη Μ.Ν., Τσικρίκης Α.Θ., Πατρώνης Χ.Ι, Τζιλίνη Μ.Γ., Βοσνιάκος Κ.Φ, και Μανωλοπούλου Σ.Β. (2014). Ποσοτική εκτίμηση κινδύνου κατολίσθησης οδικών πρανών κατά μήκος των οδών Σέρρες – Λαϊλιάς και Σέρρες – Εξοχή. *Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Συνέδριου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα*, Εργασία Νο. Ρ124.

Τσικρίκης, Α. (2015). Πειραματική συσχέτιση μεταξύ γωνίας τριβής ασυνεχειών πετρωμάτων και συντελεστή m_i του κριτηρίου Hoek & Brown. *Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ*.

Τσουτρέλης Χ. (1985). Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα*



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Πίνακας Π.1	Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης.....	287
Πίνακας Π.2	Φωτογραφίες δειγμάτων πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή σημειακής φόρτισης.....	289
Πίνακας Π.3	Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test).....	291
Πίνακας Π.4	Φωτογραφίες δειγμάτων πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	292
Πίνακας Π.5	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη (GS) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.....	294
Πίνακας Π.6	Φωτογραφίες δειγμάτων Ασβεστόλιθου (GL) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.....	299
Πίνακας Π.7	Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη (GP) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.....	307
Πίνακας Π.8	Φωτογραφίες δειγμάτων Λεπτόκοκκου ψαμμίτη (SLST) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.....	317
Πίνακας Π.9	Φωτογραφίες δειγμάτων Ερυθρού ψαμμίτη (SST) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης.....	319
Πίνακας Π.10	Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS.....	325
Πίνακας Π.11	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	327
Πίνακας Π.12	Προφίλ τραχύτητας: GS1.....	328
Πίνακας Π.13	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	329
Πίνακας Π.14	Προφίλ τραχύτητας: GS2.....	330
Πίνακας Π.15	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	331
Πίνακας Π.16	Προφίλ τραχύτητας: GS3.....	332
Πίνακας Π.17	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	333
Πίνακας Π.18	Προφίλ τραχύτητας: GS4.....	334
Πίνακας Π.19	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS5 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	335
Πίνακας Π.20	Προφίλ τραχύτητας: GS5.....	336
Πίνακας Π.21	Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS7 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	337
Πίνακας Π.22	Προφίλ τραχύτητας: GS7.....	338
Πίνακας Π.39	Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Ασβεστόλιθου GL 356.....	
Πίνακας Π.40	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών.....	358
Πίνακας Π.41	Προφίλ τραχύτητας: GL1.....	359

Παράρτημα	
Πίνακας Π.42	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών360
Πίνακας Π.43	Προφίλ τραχύτητας: GL2361
Πίνακας Π.44	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών362
Πίνακας Π.45	Προφίλ τραχύτητας: GL3363
Πίνακας Π.46	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών364
Πίνακας Π.47	Προφίλ τραχύτητας: GL4365
Πίνακας Π.48	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL5 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών366
Πίνακας Π.49	Προφίλ τραχύτητας: GL5367
Πίνακας Π.50	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL6 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών368
Πίνακας Π.51	Προφίλ τραχύτητας: GL6369
Πίνακας Π.52	Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL7 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών370
Πίνακας Π.53	Προφίλ τραχύτητας: GL7371
Πίνακας Π.54	Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Σερπεντινίτη GP 372
Πίνακας Π.55	Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών374
Πίνακας Π.56	Προφίλ τραχύτητας: GP1375
Πίνακας Π.57	Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών376
Πίνακας Π.58	Προφίλ τραχύτητας: GP2377
Πίνακας Π.59	Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών378
Πίνακας Π.60	Προφίλ τραχύτητας: GP3379
Πίνακας Π.61	Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών380
Πίνακας Π.62	Προφίλ τραχύτητας: GP4381

Πίνακας Π.1 Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης.







































A/A	Βραχώδες υλικό	Δοκίμιο	Διάμετρος D mm	Πλάτος W mm	Εμβαδό διατομής A mm	Φορτίο θραύσης kN	Ισοδύναμη διάμετρος De mm	Σημειακή αντοχή Is MPa	Σημειακή αντοχή Is(50) MPa	Μέση τιμή / Is(50) MPa	De ²	D/W
1		Gs-1PLT	26,09	38,31	999,51	2,12	35,67	1,66	1,43	MAX	1273	0,7
2		Gs-2PLT	27,61	38,41	1060,50	3,62	36,75	2,68	2,33		1350	0,7
3		Gs-3PLT	27,45	41,36	1135,33	1,13	38,02	0,78	0,69		1446	0,7
4		Gs-4PLT	25,71	39,11	1005,52	3,27	35,78	2,55	2,20		1280	0,7
5		Gs-5PLT	45,23	66,81	3021,82	4,55	62,03	1,18	1,30	2,74	3847	0,7
6	GS	Gs-6PLT	32,49	65,25	2119,97	4,35	51,95	1,61	1,64	1,84	2699	0,5
7		Gs-7PLT	28,17	59,65	1680,34	5,44	46,25	2,54	2,46		2139	0,5
8		Gs-8PLT	28,36	57,94	1643,18	3,50	45,74	1,67	1,61	MIN	2092	0,5
9		Gs-9PLT	33,00	85,06	2806,98	6,90	59,78	1,93	2,09		3574	0,4
10		Gs-10PLT	36,93	80,08	2957,35	9,42	61,36	2,50	2,74	0,69	3765	0,5
11		Gs-11PLT	56,94	66,70	3797,90	7,42	69,54	1,53	1,78		4836	0,9
12		Gl-1PLT	20,76	24,59	510,49	3,43	25,49	5,28	3,90	MAX	650	0,8
13		Gl-2PLT	22,67	29,98	679,65	5,83	29,42	6,73	5,30		865	0,8
14		Gl-3PLT	20,60	35,48	730,89	5,44	30,51	5,85	4,68		931	0,6
15		Gl-4PLT	22,58	34,96	789,40	4,73	31,70	4,71	3,83	5,30	1005	0,6
16		Gl-5PLT	28,24	49,49	1397,60	7,40	42,18	4,16	3,85		1779	0,6
17		Gl-6PLT	25,56	57,92	1480,44	8,08	43,42	4,29	4,02	4,03	1885	0,4
18	GL	Gl-7PLT	32,42	48,50	1572,37	8,50	44,74	4,24	4,04		2002	0,7
19		Gl-8PLT	25,19	57,65	1452,20	6,72	43,00	3,63	3,40	MIN	1849	0,4
20		Gl-9PLT	32,17	52,74	1696,65	8,39	46,48	3,88	3,76		2160	0,6
21		Gl-10PLT	34,79	42,84	1490,40	8,11	43,56	4,27	4,01		1898	0,8
22		Gl-11PLT	46,67	52,01	2427,31	12,71	55,59	4,11	4,31	3,29	3091	0,9
23		Gl-12PLT	48,84	53,94	2634,43	10,32	57,92	3,08	3,29		3354	0,9
24		GP-1PLT	29,06	34,80	1011,29	9,30	35,88	7,22	6,22	MAX	1288	0,8
25		GP-2PLT	29,75	33,92	1009,12	1,46	35,84	1,13	0,97		1285	0,9
26		GP-3PLT	28,90	40,10	1158,89	8,87	38,41	6,01	5,34		1476	0,7
27		GP-4PLT	31,91	36,71	1171,42	3,05	38,62	2,04	1,82	6,22	1491	0,9
28		GP-5PLT	32,76	30,75	1007,37	7,48	35,81	5,83	5,02		1283	1,1
29		GP-6PLT	33,05	33,80	1117,09	3,64	37,71	2,56	2,25		1422	1,0
30		GP-7PLT	53,37	40,61	2167,36	1,39	52,53	0,50	0,51	3,68	2760	1,3
31	GP	GP-8PLT	33,27	35,17	1170,11	7,61	38,60	5,11	4,55	MIN	1490	0,9
32		GP-9PLT	29,75	36,77	1093,91	7,84	37,32	5,63	4,93		1393	0,8
33		GP-10PLT	32,99	38,35	1265,17	4,25	40,14	2,64	2,39		1611	0,9
34		GP-11PLT	47,75	59,63	2847,33	11,27	60,21	3,11	3,38	0,51	3625	0,8
35		GP-12PLT	24,07	38,64	930,06	7,16	34,41	6,04	5,11		1184	0,6
36		GP-13PLT	25,66	37,18	954,04	5,68	34,85	4,67	3,97		1215	0,7
37		GP-14PLT	23,7	33,72	799,16	6,38	31,90	6,27	5,12		1018	0,7

Ψηφιακή συλλογή
βιβλιοθήκη
Παράρτημα
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

A/A	Βραχώδες υλικό	Δοκίμιο	Διάμετρος D	Πλάτος W	Εμβαδό διατομής A	Φορτίο θραύσης	Ισοδύναμη διάμετρος De	Σημειακή αντοχή Is	Σημειακή αντοχή Is(50)	Μέση τιμή / Is(50)	De ²	D/W	
		mm	mm	mm	mm	kN	mm	MPa	MPa	MPa			
38		SD_PL_I2	44,00	53,00	2332,00	2,37	54,49	0,80	0,83		MAX	2969	0,8
39		SD_PL_I3	45,84	47,20	2163,65	4,40	52,49	1,60	1,63			2755	1,0
40		SD_PL_I4	41,21	45,02	1855,27	2,67	48,60	1,13	1,12			2362	0,9
41		SD_PL_I5	40,21	53,19	2138,77	2,85	52,18	1,05	1,07			2723	0,8
42		SD_PL_I6	40,54	53,00	2148,62	2,46	52,30	0,90	0,92		1,63	2736	0,8
43		SD_PL_I8	37,04	61,07	2262,03	3,15	53,67	1,09	1,13			2880	0,6
44		SD_PL_I9	40,13	61,39	2463,58	3,40	56,01	1,08	1,14			3137	0,7
45		SD_PL_I11	37,13	65,72	2440,18	2,90	55,74	0,93	0,98		MIN	3107	0,6
46		SD_PL_I12	40,52	56,05	2271,15	3,46	53,77	1,20	1,24			2892	0,7
47	SST	SD_PL_I13	40,13	50,29	2018,14	2,25	50,69	0,88	0,88	1,06		2570	0,8
48		SD_PL_I14	37,74	49,55	1870,02	1,81	48,80	0,76	0,75			2381	0,8
49		SD_PL_I15	44,47	62,45	2777,15	3,58	59,46	1,01	1,09			3536	0,7
50		SD_PL_A2	51,11	54,53	2787,03	3,77	59,57	1,06	1,15			3549	0,9
51		SD_PL_A3	30,40	54,37	1652,85	3,35	45,87	1,59	1,53		0,60	2104	0,6
52		SD_PL_D4	54,29	72,28	3924,08	4,04	70,68	0,81	0,94			4996	0,8
53		SD_PL_D3	54,02	106,01	5726,66	3,44	85,39	0,47	0,60			7291	0,5
54		SD_PL_I1	41,06	47,48	1949,53	2,62	49,82	1,06	1,05			2482	0,9
55		SD_PL_I7	35,00	51,00	1785,00	2,63	47,67	1,16	1,13			2273	0,7
56		SD_PL_I10	52,23	56,4	2945,77	3,54	61,24	0,94	1,03			3751	0,9

Πίνακας Π.2 Φωτογραφίες δειγμάτων πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή σημειακής φόρτισης

Τύπος πετρώματος	Pre-test	Post-test
Τεφρός Ψαμμίτης GS		
Ασβεστόλιθος GL		
Σερπεντινίτης GP		

Τύπος πετρώματος	Δείγματα						
Ερυθρός ψαμμίτης SST						Pre test	
						Post test	
	SD_PL_A2	SD_PL_A3	SD_PL_D3	SD_PL_D4			
							Pre test
							Post test
	SD_PL_I1	SD_PL_I2	SD_PL_I3	SD_PL_I4	SD_PL_I5		
Τύπος πετρώματος	Δείγματα						
Ερυθρός ψαμμίτης SST							Pre test
							Post test
	SD_PL_I16	SD_PL_I17	SD_PL_I18	SD_PL_I19	SD_PL_I10		
							Pre test
							Post test
	SD_PL_I111	SD_PL_I112	SD_PL_I113	SD_PL_I114	SD_PL_I115		

Πίνακας Π.3 Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test).

A/A	Δοκίμιο	Μέση διάμετρος Dm mm	Μέσο πάχος t mm	Φορτίο θραύσης kN	Χρόνος θραύσης s	Εφελκυστική Αντοχή MPa	Μέση τιμή σ _t MPa	Τυπική απόκλιση MPa
1	Gs-1BR	54,80	30,50	9,20		3,50		
2	Gs-2BR	54,80	31,12	9,01		3,36		
3	Gs-3BR	54,50	30,16	5,94		2,30		
4	Gs-4BR	54,80	30,50	8,22		3,13		
5	Gs-5BR	54,75	30,00	6,81		2,64		
6	Gs-6BR	54,76	27,60	8,03		3,38	2,89	0,49
7	Gs-7BR	54,45	26,47	4,47	28	1,97		
8	Gs-8BR	54,65	29,00	7,73	49	3,11		
9	Gs-9BR	54,83	27,00	5,47	32	2,35		
10	Gs-10BR	54,80	30,14	7,89	44	3,04		
11	Gs-11BR	54,55	30,2	6,98	37	2,70		
12	Gs-12BR	54,7	28,5	7,76	47	3,17		
13	GL-1BR	54,65	30,09	20,55	107	7,96		
14	GL-2BR	54,61	30,58	19,12	119	7,29		
15	GL-3BR	54,60	27,66	17,59	113	7,41		
16	GL-4BR	54,52	31,43	19,15	124	7,11		
17	GL-5BR	54,64	30,49	26,06	169	9,96	7,28	1,34
18	GL-6BR	54,51	31,36	10,29	65	3,83		
19	GL-7BR	54,53	30,54	17,49	113	6,69		
20	GL-8BR	54,47	31,28	18,56	120	6,93		
21	GL-9BR	54,54	31,66	26,31	163	9,70		
22	GL-10BR	54,59	33,52	17,13	106	5,96		
23	Gp-1BR	54,60	31,52	6,57	57	2,43		
24	Gp-2BR	54,51	29,62	25,87	189	10,20		
25	Gp-3BR	54,55	30,43	13,74	114	5,27		
26	Gp-4BR	54,32	31,06	7,36	67	2,78		
27	Gp-5BR	54,65	30,35	8,36	82	3,21	6,13	3,80
28	Gp-6BR	54,58	25,71	25,43	208	11,54		
29	Gp-7BR	54,44	27,11	11,08	104	4,78		
30	Gp-8BR	54,57	34,33	21,40	181	7,27		
31	Gp-9BR	54,78	29,52	5,44	48	2,14		
32	Gp-10BR	54,83	31,11	31,36	195	11,70		
33	SST-1BR	54,17	28,38	1,49		0,62		
34	SST-2BR	54,32	28,70	2,21		0,90		
35	SST-3BR	54,58	29,33	6,26		2,49		
36	SST-4BR	54,29	29,13	4,13		1,66		
37	SST-5BR	54,18	29,44	6,34		2,53		
38	SST-6BR	54,34	28,66	3,11		1,27	1,53	0,86
39	SST-7BR	54,32	29,43	2,09		0,83		
40	SST-8BR	54,41	29,47	4,83		1,92		
41	SST-9BR	53,71	28,75	0,82		0,34		
42	SST-10BR	54,34	29,36	6,77		2,70		

Παράρτημα

Πίνακας Π.4
 εφελκυσμού

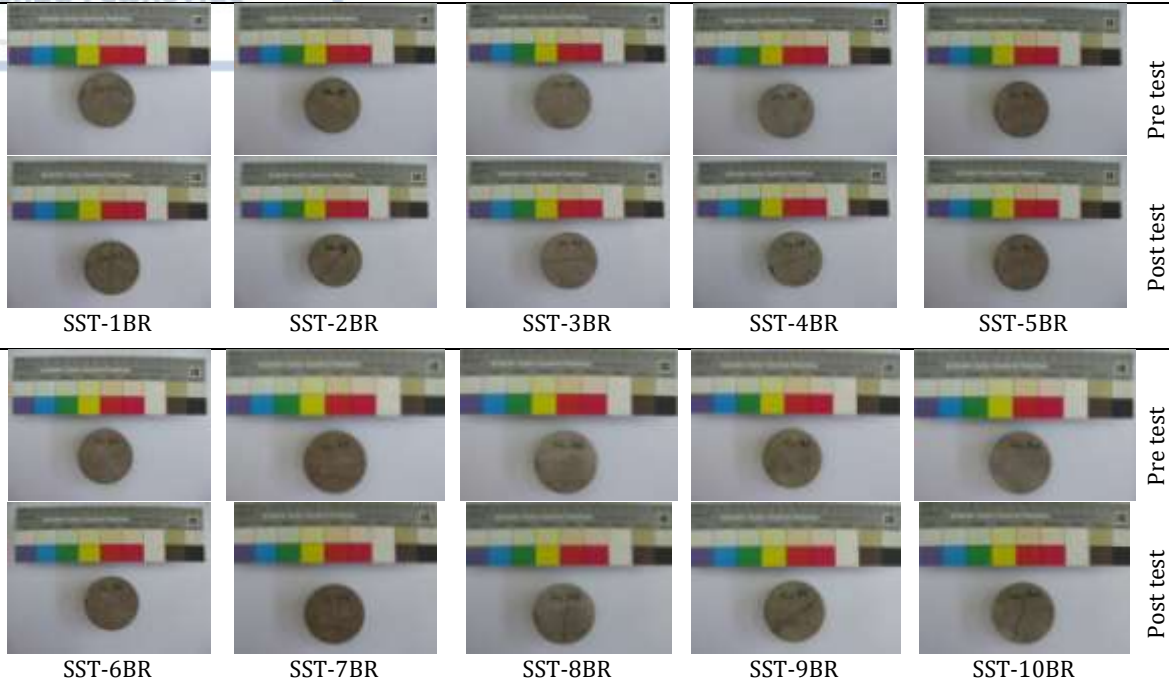
Φωτογραφίες δειγμάτων πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή έμμεσου

Τύπος πετρώματος	Pre-test	Post-test
Τεφρός ψαμίτιης GS		
Ασβεστόλιθος GL		
Σερπεντινίτης GP		

























Τύπος
πετρώματος

























Δείγματα





Ερυθρός
ψαμμίτης
SST
























Πίνακας Π.5 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη (GS) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης









Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GS1	60	296					Pre test
							Post test
GS2	30	203					Pre test
							Post test
GS3	50	264					Pre test
							Post test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GS4	20	160					Pre test
							Post test
GS5	40	202					Pre test
							Post test
GS6	65	320					Pre test
							Post test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GS7	10	120					Pre test
							Post test
GS8	45	264					Pre test
							Post test
GS9	70	310					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GS10	35	216					Pre test
							Post test
GS11	5	108					Pre test
							Post test
GS17	70	346					Pre test
							Post test




















Παράρτημα

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GS19	0	49					Pre test
							Post test

Πίνακας Π.6 Φωτογραφίες δειγμάτων Ασβεστόλιθου (GL) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση				
			1	2	3	4	
GL2	30	204					Pre test
							Post test
GL3	40	228					Pre test
							Post test
GL5	15	117					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL6	60	445					Pre test
							Post test
GL7	10	122					Pre test
							Post test
GL8	50	338					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Άξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL9	35	346					Pre test
							Post test
GL10	25	315					Pre test
							Post test
GL11	45	390					Pre test
							Post test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL14	20	256					Pre test
							Post test
GL15	52	427					Pre test
							Post test
GL20	5	94					Pre test
							Post test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
-------------------	---------------------------------	---------------------------------	--------	--------	--------	--------



























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL24	40	312					Pre test
							Post test
GL25	30	243					Pre test
							Post test
GL26	50	412					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL27	32	246					Pre test
							Post test
GL28	30	266					Pre test
							Post test
GL29	25	281					Pre test
							Post test

























Παράρτημα

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GL30	70	443					Pre test
							Post test
GL31	65	398					Pre test
							Post test
GL32	55	362					Pre test
							Post test

























Πίνακας Π.7 Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη (GP) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης






















Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP1	65	283					Pre test
							Post test
GP2	55	284					Pre test
							Post test
GP3	70	284					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP4	50	339					Pre test
							Post test
GP6	30	212					Pre test
							Post test
GP7	45	289					Pre test
							Post test


















Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP8	20	230					Pre test
							Post test
GP9	40	306					Pre test
							Post test
GP10	10	166					Pre test
							Post test

























Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP11	70	407					Pre test
							Post test
GP12	25	216					Pre test
							Post test
GP13	15	201					Pre test
							Post test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP14	58	352					Pre test
							Post test
GP15	25	170					Pre test
							Post test
GP16	35	311					Pre test
							Post test






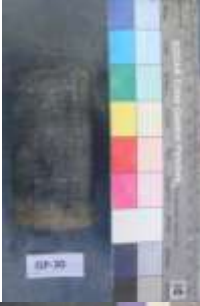






Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP17	0	108					Pre test
							
GP18	32	241					Pre test
							
GP19	70	347					Pre test
							

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP20	60	319					Pre test
							Post test
GP21	5	113					Pre test
							Post test
GP22	20	237					Pre test
							Post test









Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP23	55	323					Pre test
							
GP24	70	325					Pre test
							
GP25	0	89					Pre test

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP26	30	255					Pre test
							Post test
GP27	0	75					Pre test
							Post test
GP28	35	281					Pre test
							Post test


Παράρτημα

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	
GP29	30	225					Pre test
			-	-	-	-	Post test
GP30	25	247					Pre test
							Post test













Πίνακας Π.8 Φωτογραφίες δειγμάτων Λεπτόκοκκου ψαμμίτη (SLST) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SLST1	30	171		
SLST2	70	356		
SLST3	70	296		
SLST4	0	60		










Παράρτημα

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SLST5	70	232		
SLST6	70	248		
SLST7	50	170		
SLST8	20	130		

Πίνακας Π.9 Φωτογραφίες δειγμάτων Ερυθρού ψαμμίτη (SST) πριν (Pre-test) και μετά (Post-test) τη δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης






Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST1	60	180		
SST2	25	125		
SST3	5	40		
SST4	25	135		
SST5	20	102		
SST6	15	90		






Παράρτημα

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST7	35	183		
SST8	0	18		
SST9	40	150		
SST10	40	170		
SST11	10	70		

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST12	50	229		
SST13	0	20		
SST14	0	30		
SST15	70	268		
SST16	65	265		

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST17	55	238		
SST18	70	238	-	
SST19	45	169	-	
SST20	15	68	-	
SST21	70	248	-	

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST22	0	15	-	
SST23	30	169	-	
SST24	60	236	-	
SST25	50	213	-	
SST26	25	144	-	

Κωδικός Δείγματος	Πλευρική πίεση σ_3 (MPa)	Αξονική αντοχή σ_1 (MPa)	Pre-test	Post test
SST27	20	115	-	
SST28	40	161	-	
SST29	10	71	-	
SST30	45	192	-	-
SST31	0	21	-	
SST32	45	189	-	

Πίνακας Π.10 Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS

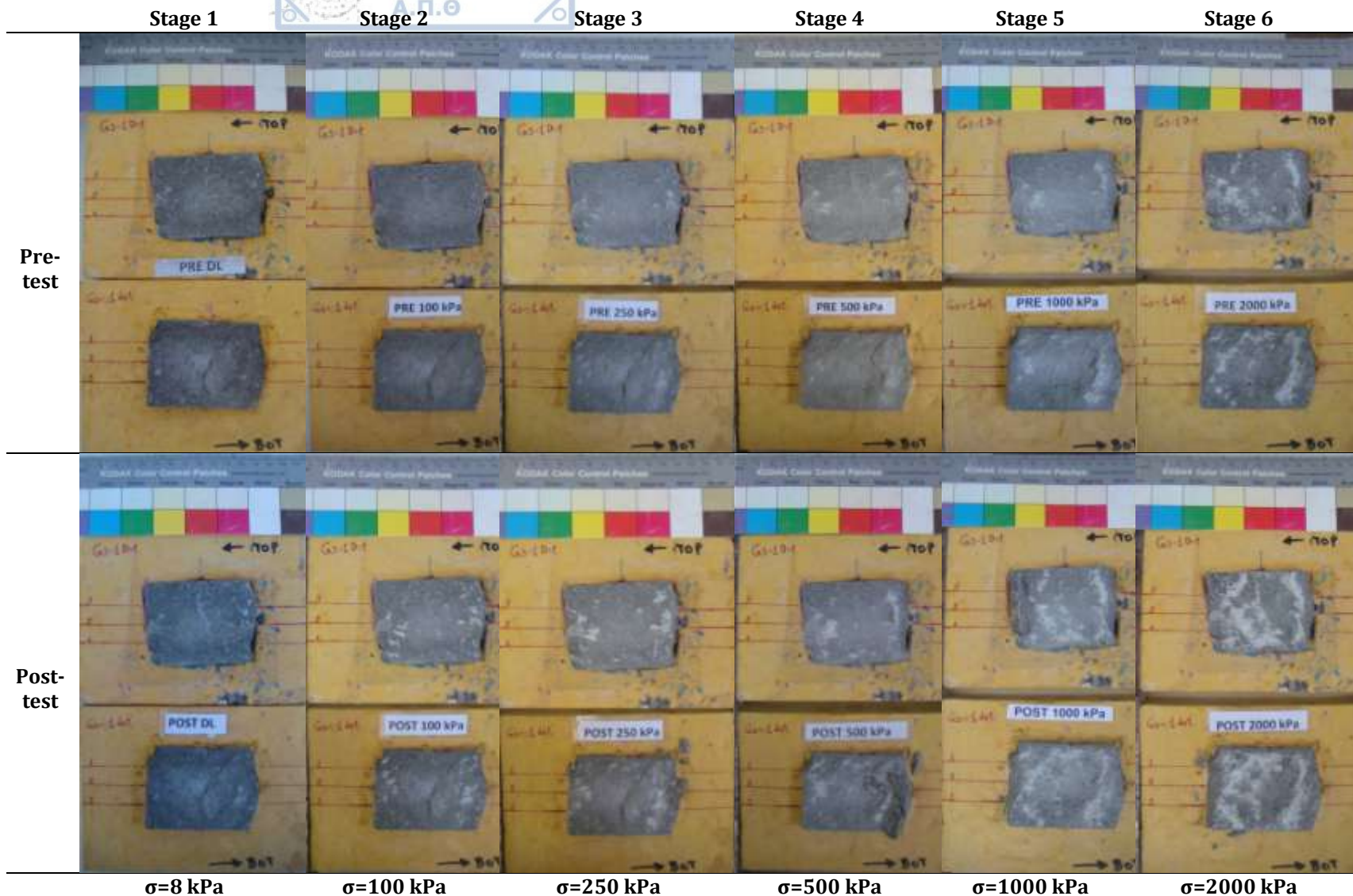
α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος <i>b</i> mm	Πλάτος <i>h</i> mm	Ορθή τάση σ_n kPa	Μέγιστη διατμητική τάση τ_{peak} kPa	Γωνία διαστολής ψ (°)	Μέγιστη γωνία διαστολής ψ_{max} (°)	Γωνία διαστολής ψ_0 (°)	Ρυθμός διαστολής $\tan\psi$	Ορθή τάση σ_i MPa	Διατμητική αντοχή τ_i MPa	Μη διαστολική Γωνία τριβής φ_m (°)	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση $\Delta H/L_0$ (%)	Διατμητική δυσκαμψία k_{s50} MPa/mm	Παραμένουσα διατμητική αντοχή kPa
1	GS1	73,8	57,4	7,5	11	27,6	27,6	27,6	0,523	0,010	0,005	27,7	0,7		9
2				100	132	17,0	22,6	17,0	0,305	0,128	0,093	36,0	1,8	0,094	100
3				250	264	13,9	20,6	13,9	0,247	0,297	0,191	32,7	4,5	0,124	250
4				500	510	8,6	13,2	8,6	0,151	0,564	0,424	36,9	4,0	0,262	450
5				1000	862	8,4	14,0	8,4	0,148	1,104	0,699	32,3	5,0	0,196	850
6				2000	1.581	6,4	10,3	6,4	0,113	2,151	1,339	31,9	6,0	0,551	1.450
7	GS2	87,6	71,5	5	14	39,0	39,0	39,0	0,811	0,010	0,006	31,6	0,1		3
8				25	50	33,9	33,9	33,9	0,671	0,040	0,023	29,5	0,3	0,257	20
9				50	109	28,9	31,5	28,9	0,553	0,084	0,062	36,4	0,7	0,235	45
10				100	129	26,6	26,6	26,6	0,500	0,132	0,064	25,7	0,8	0,234	70
11				250	165	12,5	14,8	12,5	0,221	0,273	0,105	20,9	2,6	0,126	150
12				500	574	19,5	22,1	19,5	0,354	0,625	0,353	29,5	3,7	0,338	370
13				1000	1.065	16,2	19,8	16,2	0,291	1,208	0,715	30,6	3,5	0,485	730
14				2000	1.771	10,6	11,8	10,6	0,187	2,253	1,349	30,9	3,0	1,110	1.500
15	GS3	95,0	68,0	750	837	13,8	14,7	14,7	0,263	0,907	0,598	33,4	3,6	0,427	800
16				13	4	14,1	19,2	14,1	0,251	0,013	0,001	3,5			2
17				1350	1.356	10,8	12,1	10,8	0,191	1,552	1,060	34,3	3,0	0,808	1.070
18				2000	1.929	8,2	10,0	8,2	0,145	2,233	1,606	35,7	3,7	0,755	1.630
19				100	69	9,7	13,0	9,7	0,171	0,109	0,050	24,9	1,5	0,051	85
20				250	126	10,0	11,7	10,0	0,175	0,264	0,079	16,7	3,8	0,082	120
21	GS4	97,0	79,0	7	12	27,8	37,9	37,9	0,778	0,010	0,004	22,3	0,1		7
22				500	799	22,7	31,1	22,7	0,418	0,710	0,503	35,3	2,8	0,387	500
23				1000	1.235	17,6	19,1	17,6	0,318	1,265	0,833	33,4	2,5	0,907	1.000
24				1500	1.647	11,8	13,2	11,8	0,210	1,768	1,276	35,8	3,4	0,922	1.500
25				2000	1.942	10,0	11,5	10,0	0,177	2,272	1,541	34,1	2,9	1,478	1.900
26				100	92	7,4	11,1	7,4	0,130	0,110	0,078	35,2	3,8	0,108	85
27				250	222	8,8	10,4	8,8	0,154	0,278	0,179	32,8	3,1	0,095	210

Παράρτημα



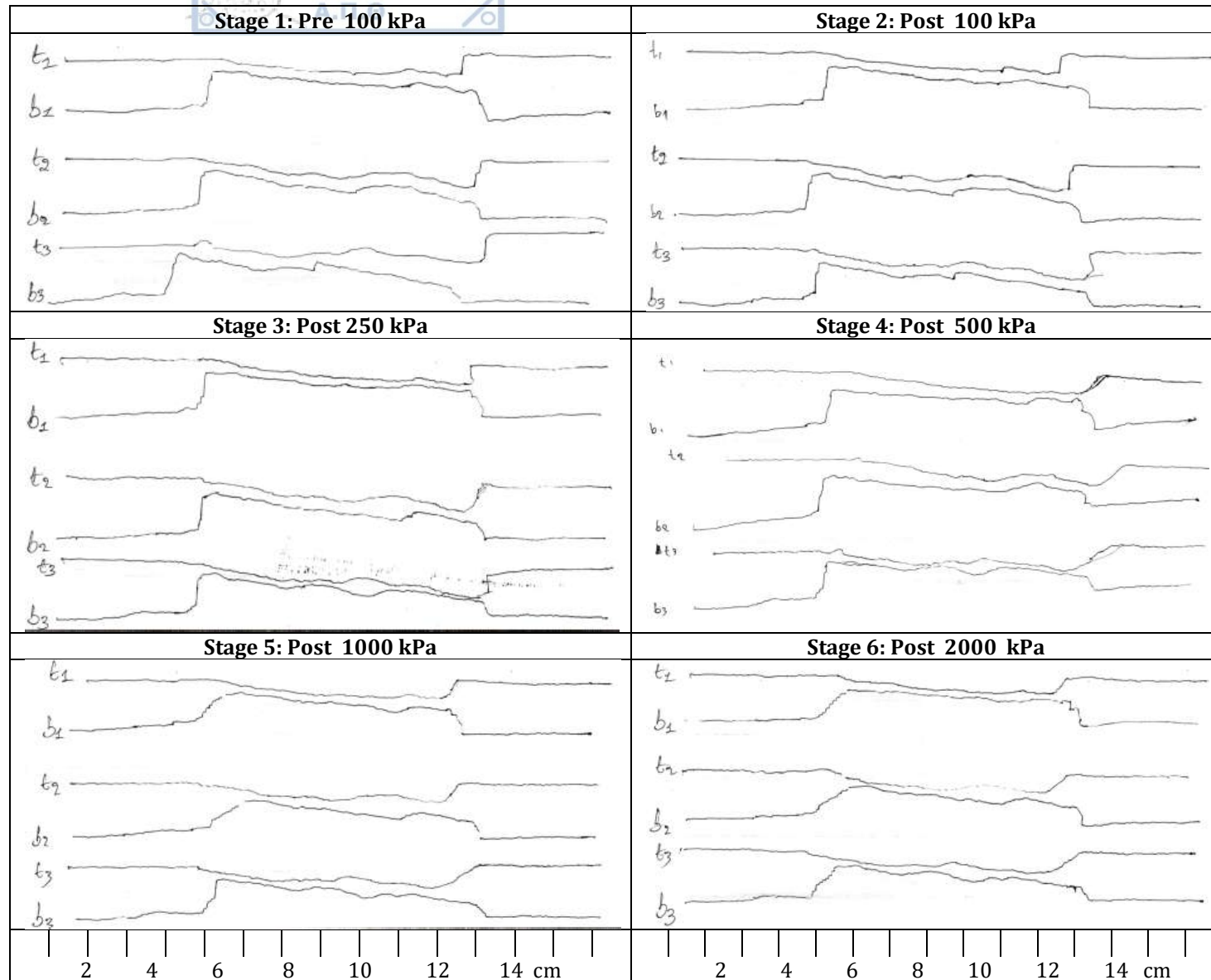
α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος	Πλάτος	Ορθή τάση	Μέγιστη διατμητική τάση	Γωνία διαστολής	Μέγιστη γωνία διαστολής	Γωνία διαστολής	Ρυθμός διαστολής	Ορθή τάση	Διατμητική αντοχή	Μη διαστολική Γωνία τριβής	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση	Διατμητική δυσκαμψία	Παραμένουσα διατμητική αντοχή
		<i>b</i>	<i>h</i>	σ_n	τ_{peak}	ψ	ψ_{max}	ψ_0	$\tan\psi$	σ_i	τ_i	φ_m	$\Delta H/L_0$	k_{s50}	
		mm	mm	kPa	kPa	(°)	(°)	(°)		MPa	MPa	(°)	(%)	MPa/mm	kPa
28				16	19	19,1	27,6	27,6	0,522	0,021	0,009	23,0	0,4		15
29				1000	1.609	2,5	54,2	28,3	0,540	1,447	0,828	29,8	2,8	1,244	1.000
30	GS5	73,0	67,0	2080	1.782	13,2	13,2	13,2	0,234	2,367	1,228	27,4	3,5	1,101	1.400
31				2500	1.553	5,5	7,7	5,5	0,096	2,625		0,0	4,9	0,800	1.500
32				100	30	16,8	17,4	16,8	0,301	0,100	0,000	0,0	1,3	0,084	12
33				500	561	13,5	14,5	13,5	0,240	0,600	0,417	34,8	2,7	0,329	500
34				11	10	-3,0	9,8	9,8		0,012	0,008	32,7	0,8		12
35				100	125	14,8	15,9	14,8	0,263	0,124	0,092	36,6	1,6	0,161	110
36	GS7	94,0	80,0	250	272	12,7	13,0	12,7	0,225	0,296	0,205	34,7	2,6	0,114	230
37				500	513	8,5	11,2	8,5	0,150	0,564	0,428	37,2	3,5	0,178	450
38				1000	876	6,5	11,5	6,5	0,115	1,086	0,751	34,7	4,8	0,304	840
39				10	9	-2,6	2,0	2,0	0,034	0,010	0,009	40,1	1,8		9
40				100	49	-0,2	1,3	-0,2	-0,004	0,100	0,049	26,2	0,2		46
41	GS_flat	108,5	77,5	250	147	0,0	1,3	0,0	0,000	0,250	0,147	30,4	1,8		143
42				500	316	0,0	0,1	0,0	0,000	0,500	0,316	32,3	1,8		310
43				1000	575	-1,3	0,0	-1,3	-0,023	0,986	0,598	31,2	2,2		575

Πίνακας Π.11 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών

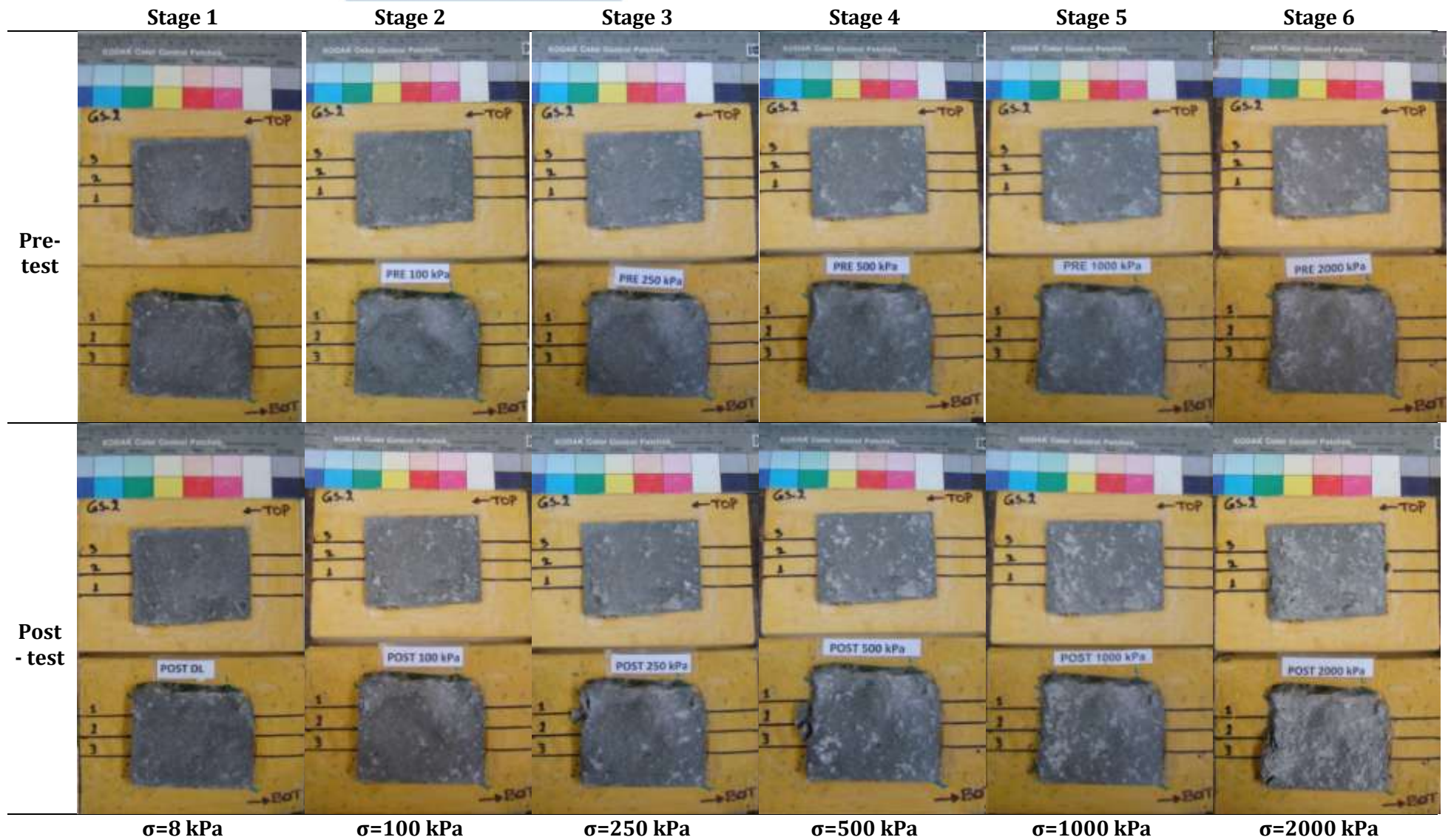




Πίνακας Π.12 Προφίλ τραχύτητας: GS1

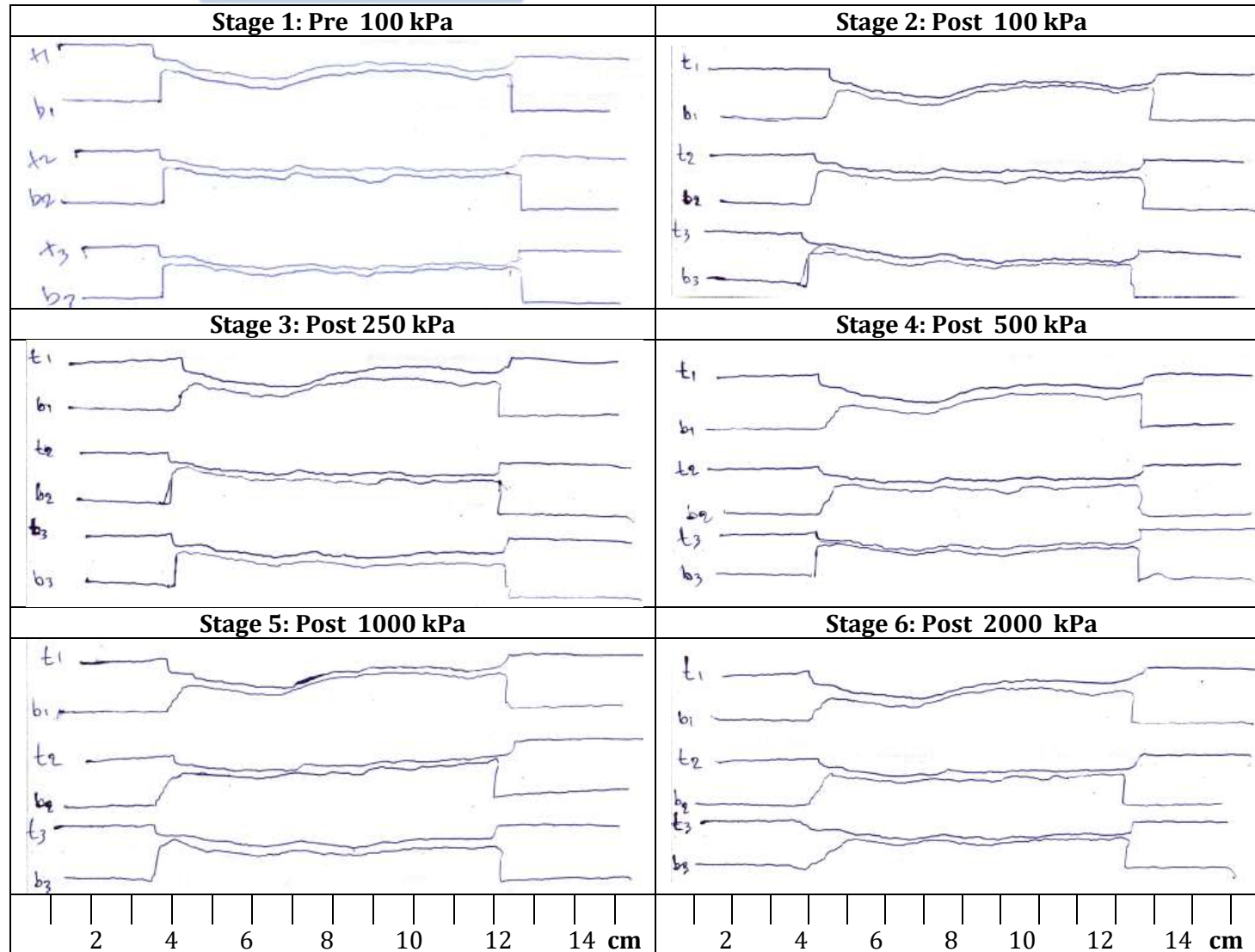


Πίνακας Π.13 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

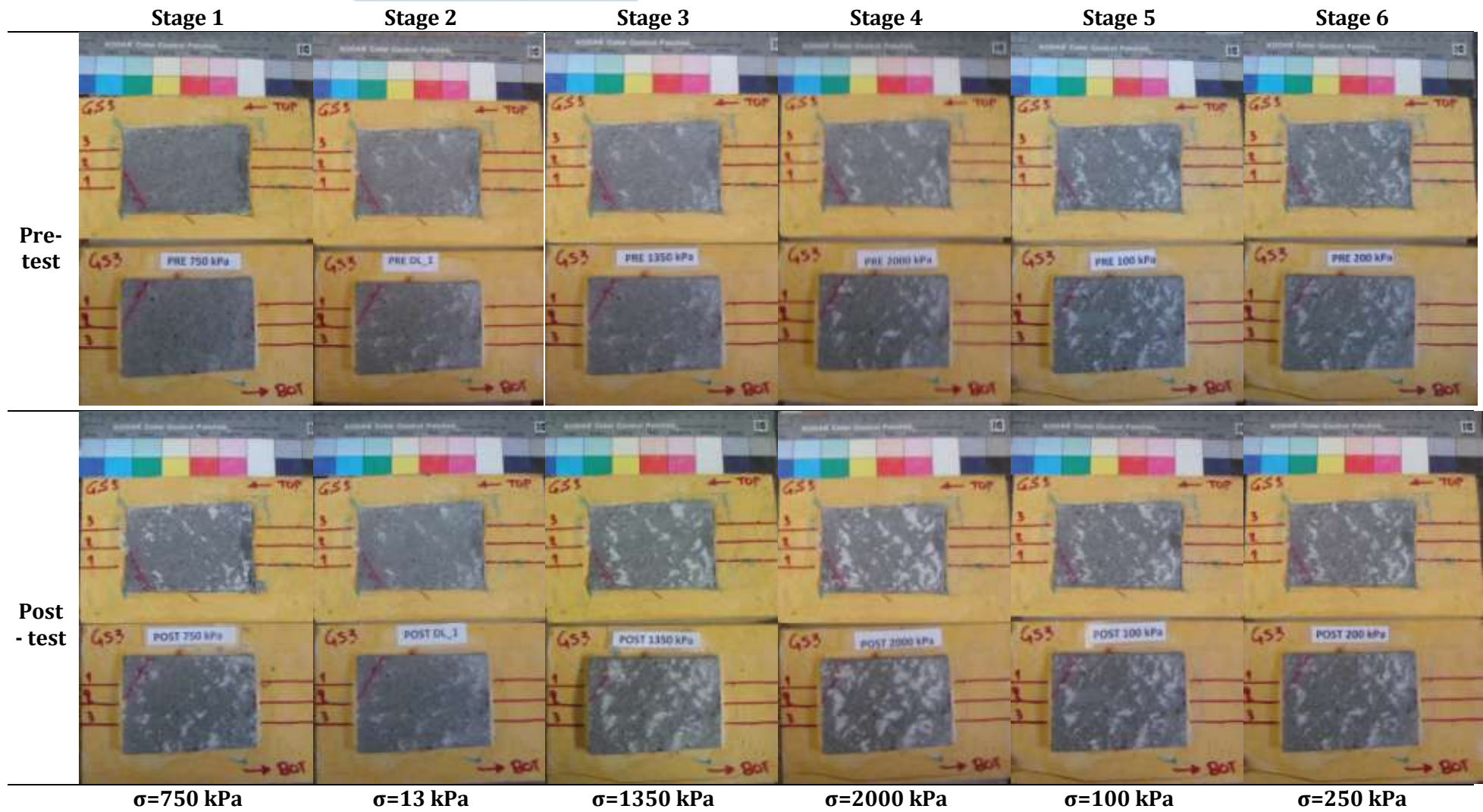




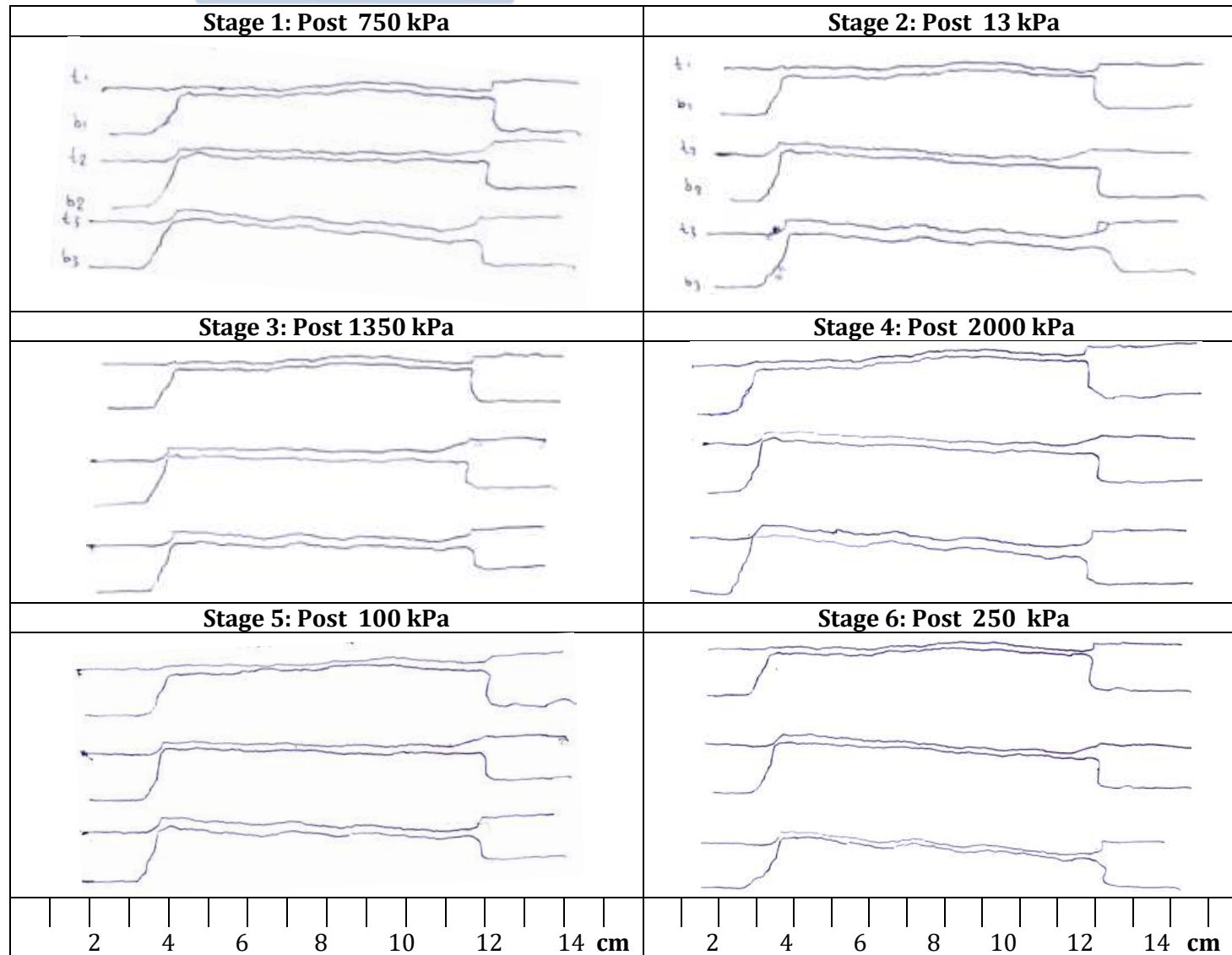
Πίνακας Π.14 Προφίλ τραχύτητας: GS2



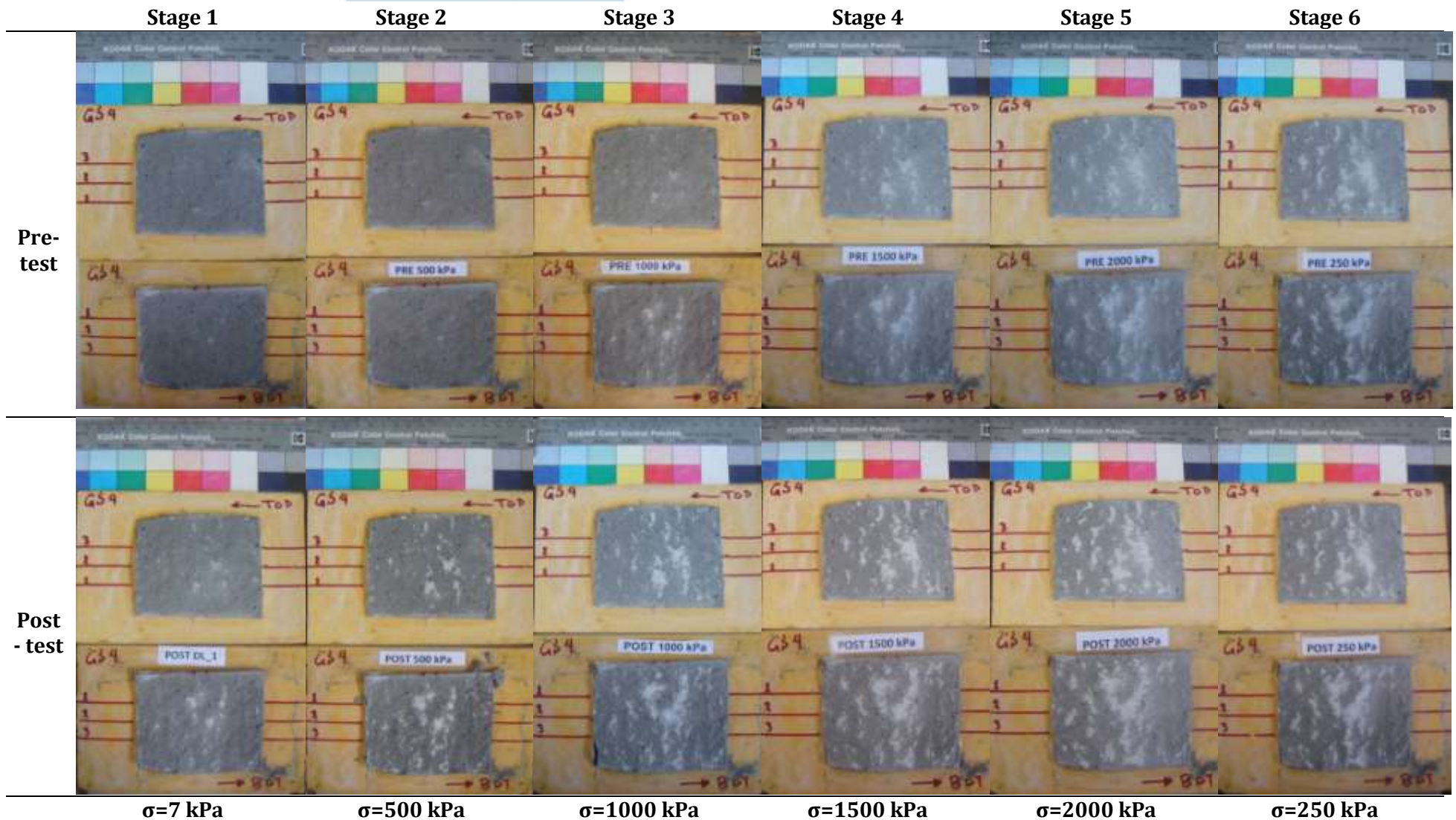
Πίνακας Π.15 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών



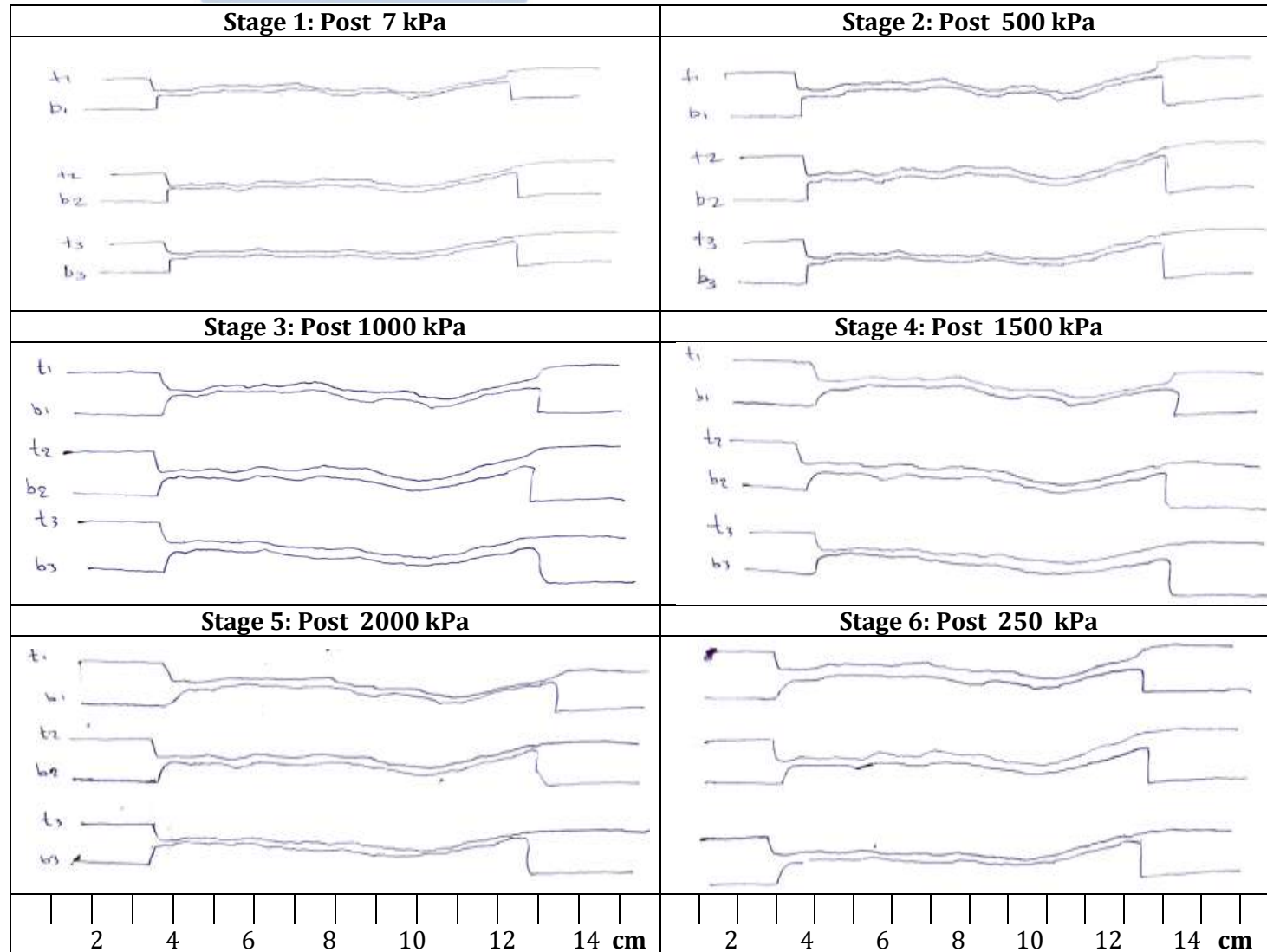
Πίνακας Π.16 Προφίλ τραχύτητας: GS3



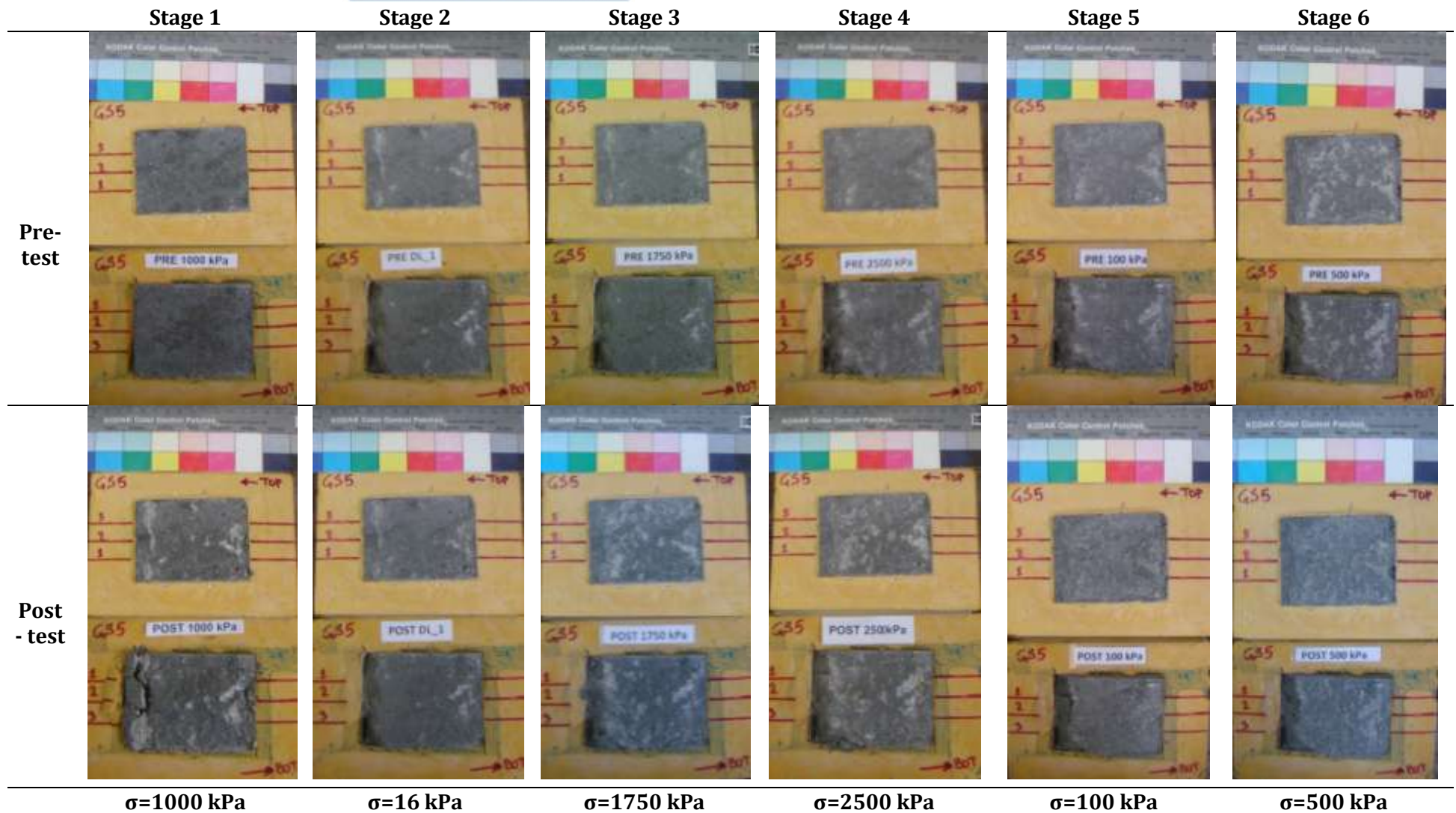
Πίνακας Π.17 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών



Πίνακας Π.18 Προφίλ τραχύτητας: GS4

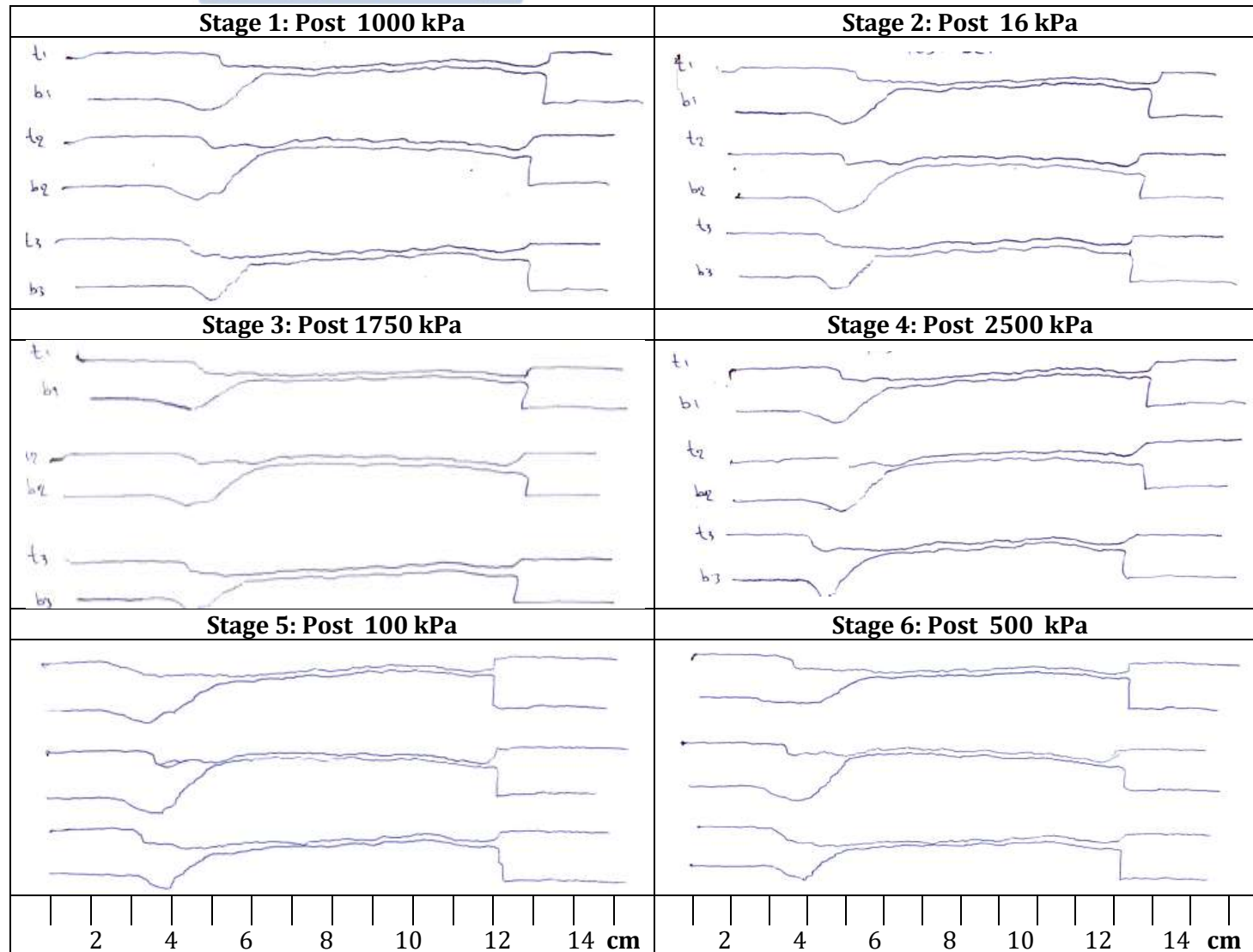


Πίνακας Π.19 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS5 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών

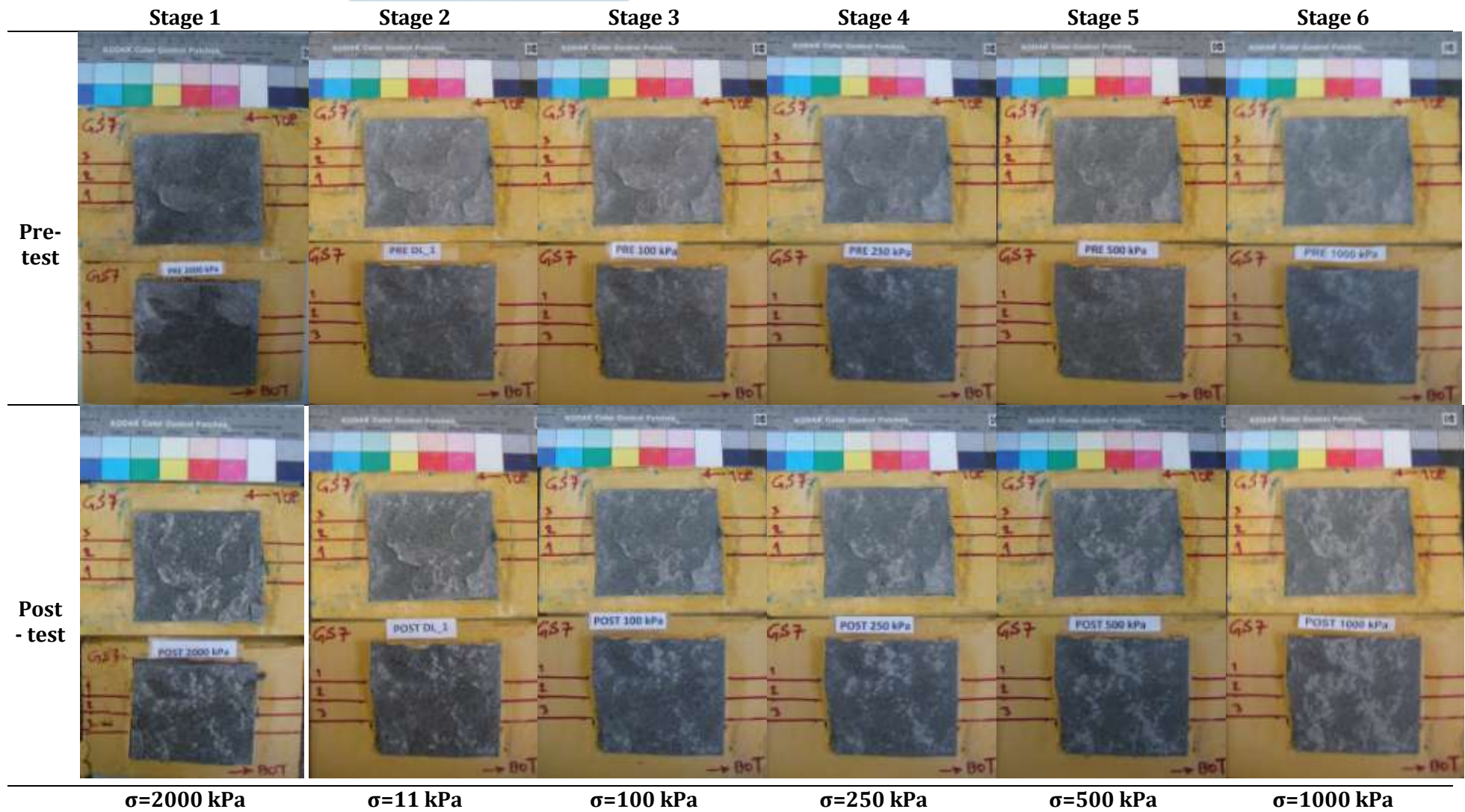




Πίνακας Π.20 Προφίλ τραχύτητας: GS5

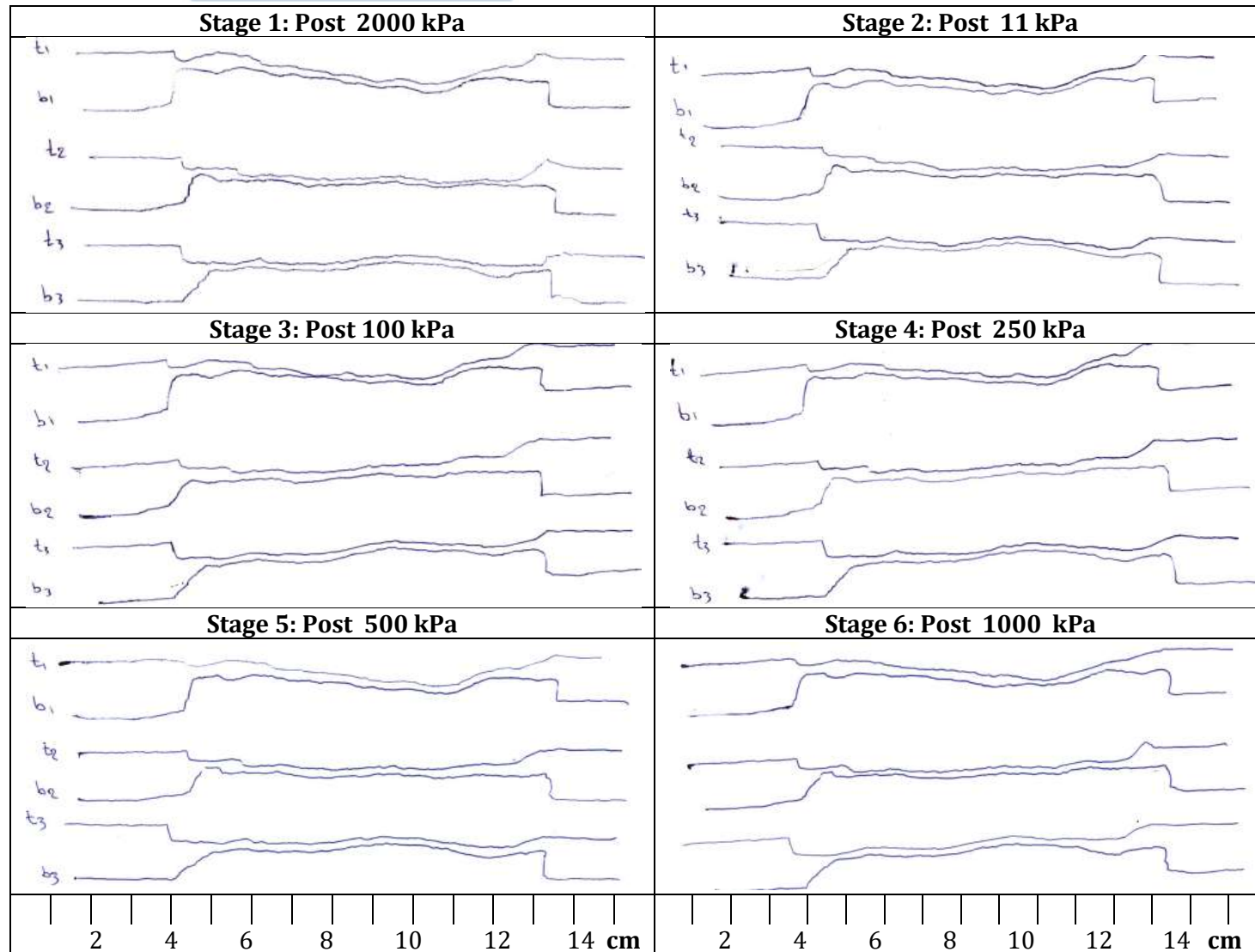


Πίνακας Π.21 Φωτογραφίες δειγμάτων Τεφρού ψαμμίτη GS7 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών





Πίνακας Π.22 Προφίλ τραχύτητας: GS7

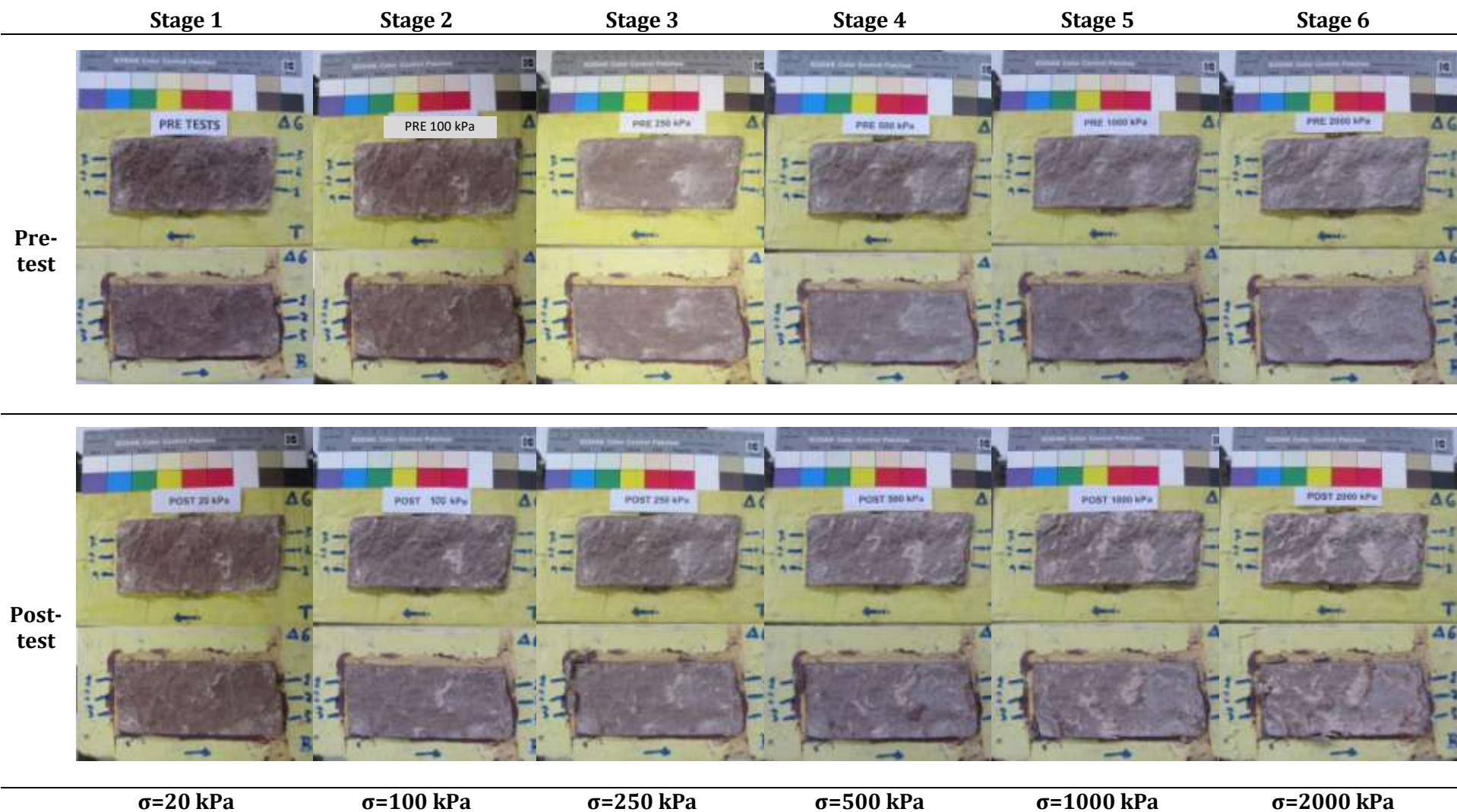


Πίνακας Π.23 Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Ερυθρού ψαμμίτη SST

α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος <i>b</i> mm	Πλάτος <i>h</i> mm	Ορθή τάση σ_n kPa	Μέγιστη διατμητική τάση τ_{peak} kPa	Γωνία διαστολής ψ (°)	Μέγιστη γωνία διαστολής ψ_{max} (°)	Γωνία διαστολής ψ_0 (°)	Ρυθμός διαστολής $\tan\psi$	Ορθή τάση σ_i MPa	Διατμητική αντοχή τ_i MPa	Μη διαστολική Γωνία τριβής φ_m (°)	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση $\Delta H/L_0$ (%)	Διατμητική δυσκαμψία k_{s50} MPa/mm	Παραμένουσα διατμητική αντοχή kPa
1	SST1-D6	140	62	20	40	28,2	34,6	34,6	0,69	0,03	0,02	29,0		0,04	17,5
2				50	94	29,0	35,2	29,0	0,55	0,08	0,05	33,1	1,8%	0,05	45
3				100	169	32,4	32,7	32,4	0,63	0,15	0,08	27,0	2,0%	0,05	75
4				250	373	20,3	23,2	20,3	0,37	0,34	0,25	35,9	1,9%	0,16	200
5				500	635	16,3	20,6	16,3	0,29	0,63	0,45	35,5	1,7%	0,41	500
6				1000	1110	12,1	15,5	12,1	0,21	1,18	0,86	35,9	3,3%	0,54	800
7				2000	1869	7,4	10,1	7,4	0,13	2,21	1,58	35,7	3,2%	0,64	1600
8	SST2-D8	110	55	7	2	9,0	10,3	10,3	0,18	0,01	0,00	7,7		0,00	0,5
9				500	386	-0,3	5,2	-0,3	-0,01	0,50	0,39	38,0	1,5%	0,27	260
10				1000	617	0,0	2,6	0,0	0,00	1,00	0,62	31,7	2,0%	0,40	420
11				2000	1159	-3,9	2,6	-3,9	-0,07	1,91	1,29	34,0	2,9%	0,50	915
12				25	12	-2,6	1,0	-2,6	-0,05	0,02	0,01	29,0			11,5
13				50	30	-2,6	2,6	-2,6	-0,05	0,05	0,03	33,3	0,2%	0,24	22,5
14				100	55	-1,3	2,6	-1,3	-0,02	0,10	0,06	30,1	0,6%	0,10	45
15	250	174	-1,3	3,9	-1,3	-0,02	0,25	0,18	36,2	2,4%	0,08	145			
16	SST3-D11	64	65	9	12	20,9	24,7	20,9	0,38	0,01	0,01	33,3		0,00	9,5
17				1000	1004	5,4	13,1	5,4	0,09	1,08	0,90	39,7	5,3%	0,51	820
18				2000	1699	2,2	8,8	2,2	0,04	2,06	1,62	38,1	7,0%	0,70	1650
19				25	11	11,1	14,0	11,1	0,20	0,03	0,01	12,4			10
20				50	38	8,9	15,2	8,9	0,16	0,05	0,03	28,2	9,4%	0,15	35
21				100	82	6,7	13,0	6,7	0,12	0,11	0,07	32,5	8,4%	0,14	80
22				250	240	10,8	12,8	10,8	0,19	0,29	0,19	33,0	9,7%	0,09	235
23	500	407	8,7	11,1	8,7	0,15	0,55	0,32	30,5	7,6%	0,29	390			

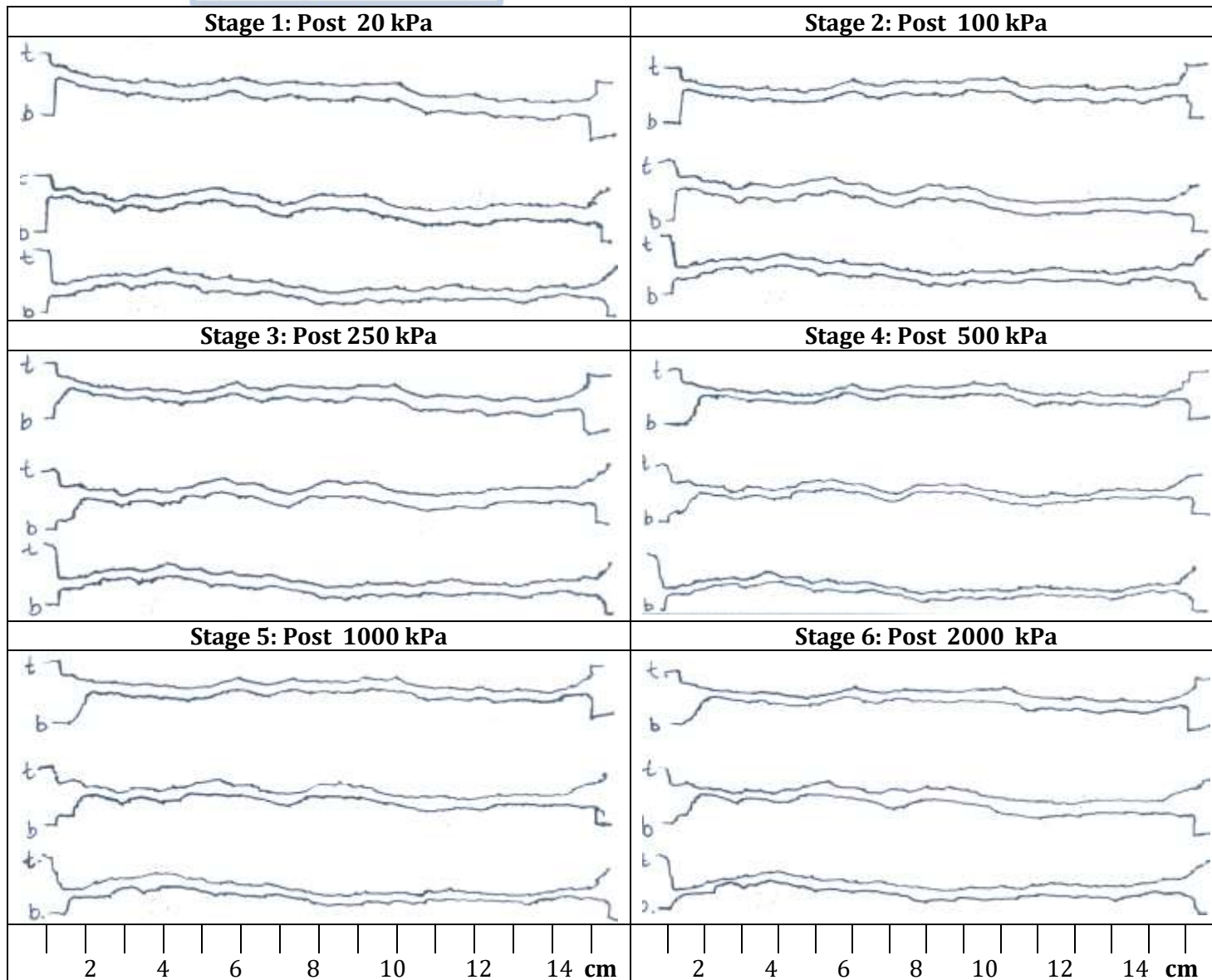
α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος <i>b</i> mm	Πλάτος <i>h</i> mm	Ορθή τάση σ_n kPa	Μέγιστη διατμητική τάση τ_{peak} kPa	Γωνία διαστολής ψ (°)	Μέγιστη γωνία διαστολής ψ_{max} (°)	Γωνία διαστολής ψ_0 (°)	Ρυθμός διαστολής $\tan\psi$	Ορθή τάση σ_i MPa	Διατμητική αντοχή τ_i MPa	Μη διαστολική Γωνία τριβής φ_m (°)	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση $\Delta H/L_0$ (%)	Διατμητική δυσκαμψία k_{s50} MPa/mm	Παραμένουσα διατμητική αντοχή kPa		
24	SST4-D13	59	55	11	20	27,7	29,6	29,6	0,57	0,02	0,01	32,2		0,04	14		
25				25	44	23,8	27,7	23,8	0,44	0,04	0,03	36,8	1,9%	0,10	34		
26				50	81	23,8	25,2	23,8	0,44	0,07	0,05	34,4	2,2%	0,18	64		
27				100	134	17,4	23,2	17,4	0,31	0,13	0,09	35,9	2,6%	0,18	120		
28				250	329	24,4	26,6	24,4	0,45	0,33	0,18	28,4	5,7%	0,13	300		
29				500	618	13,3	18,1	13,3	0,24	0,61	0,47	37,7	3,4%	0,33	550		
30				1000	1004	10,6	14,0	10,6	0,19	1,15	0,79	34,5	7,2%	0,54	1000		
31				2000	1854	8,7	9,6	8,7	0,15	2,23	1,51	34,2	7,9%	0,79	1800		
32						10	8	0,0	1,2	1,2	0,02	0,01	0,01	38,6			6
33						100	57	2,4	2,6	2,4	0,04	0,10	0,05	27,2			54
34				SST_flat	119,0	76,5	250	178	0,0	3,1	0,0	0,00	0,25	0,18	35,5		
35				500	361	0,0	1,2	0,0	0,00	0,50	0,36	35,8			357		
36				1000	652	-1,7	2,4	-1,7	-0,03	0,98	0,68	34,8			642		

Πίνακας Π.24 Φωτογραφίες δειγμάτων ερυθρού ψαμίτη SST1(Δ6) από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

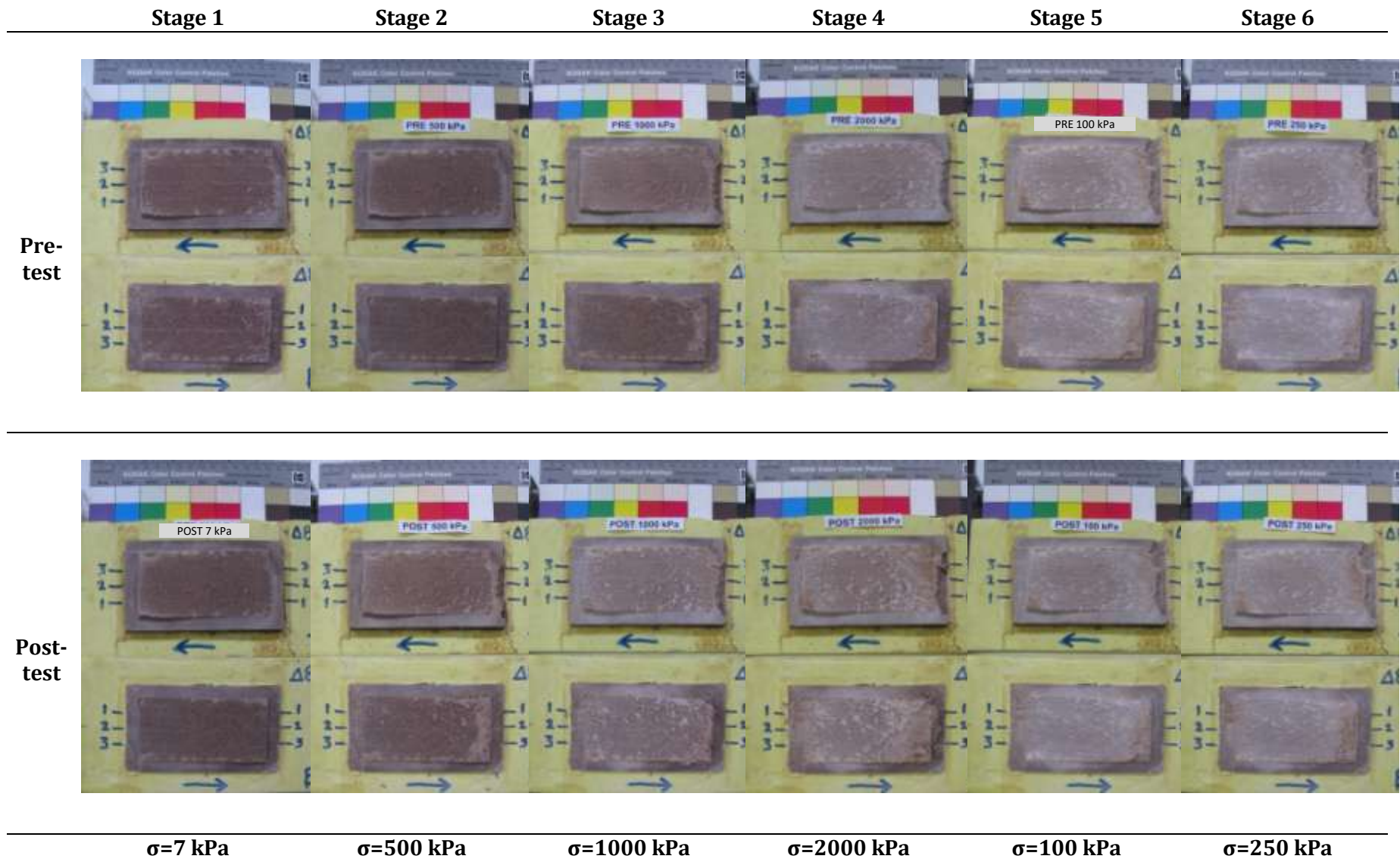




Πίνακας Π.25 Προφίλ τραχύτητας: SST1 (Δ6)

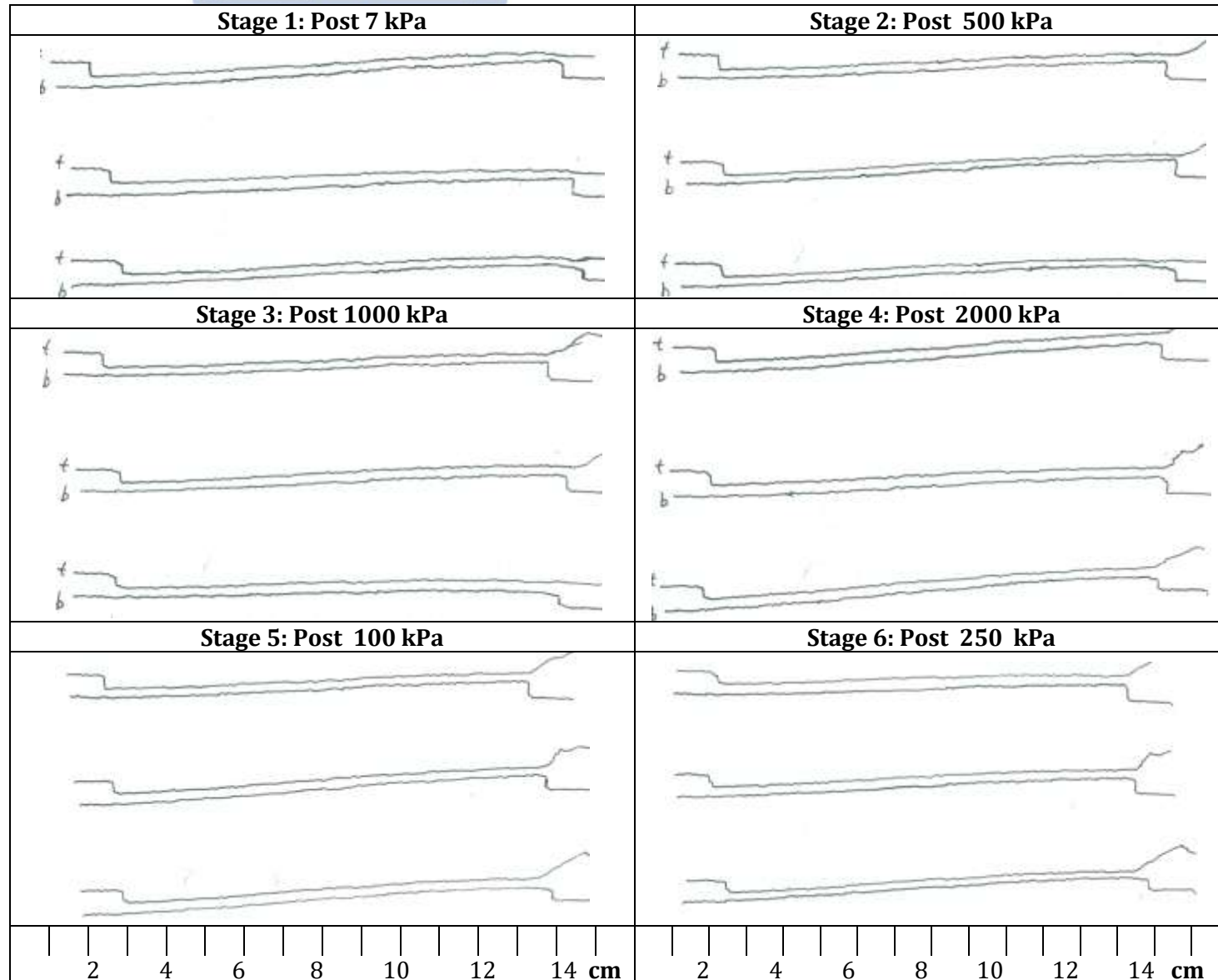


Πίνακας Π.26 Φωτογραφίες δειγμάτων ερυθρού ψαμίτη SST2(Δ8) από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

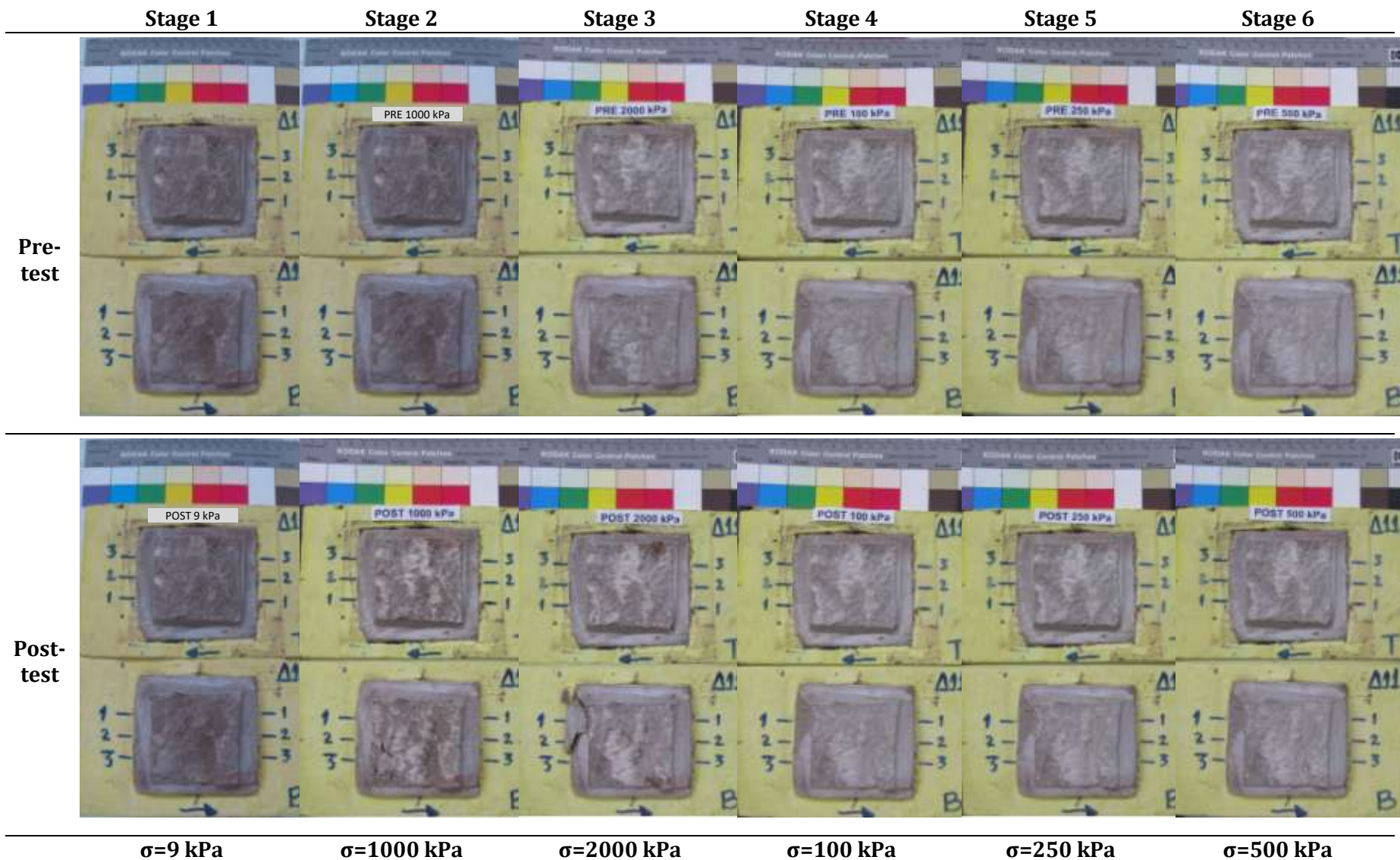




Πίνακας Π.27 Προφίλ τραχύτητας: SST2 (Δ8)

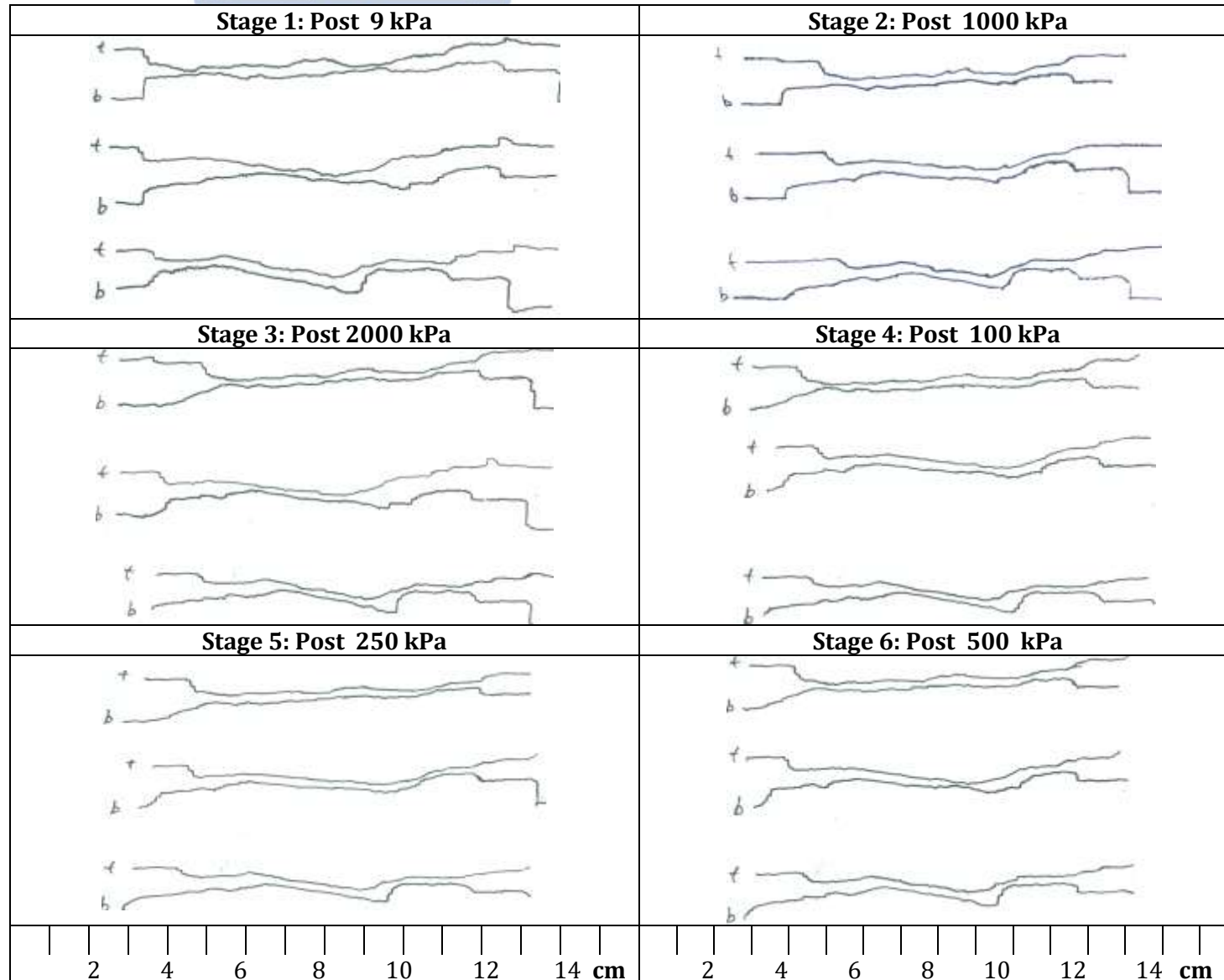


Πίνακας Π.28 Φωτογραφίες δειγμάτων ερυθρού ψαμίτη SST3(Δ11) από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών

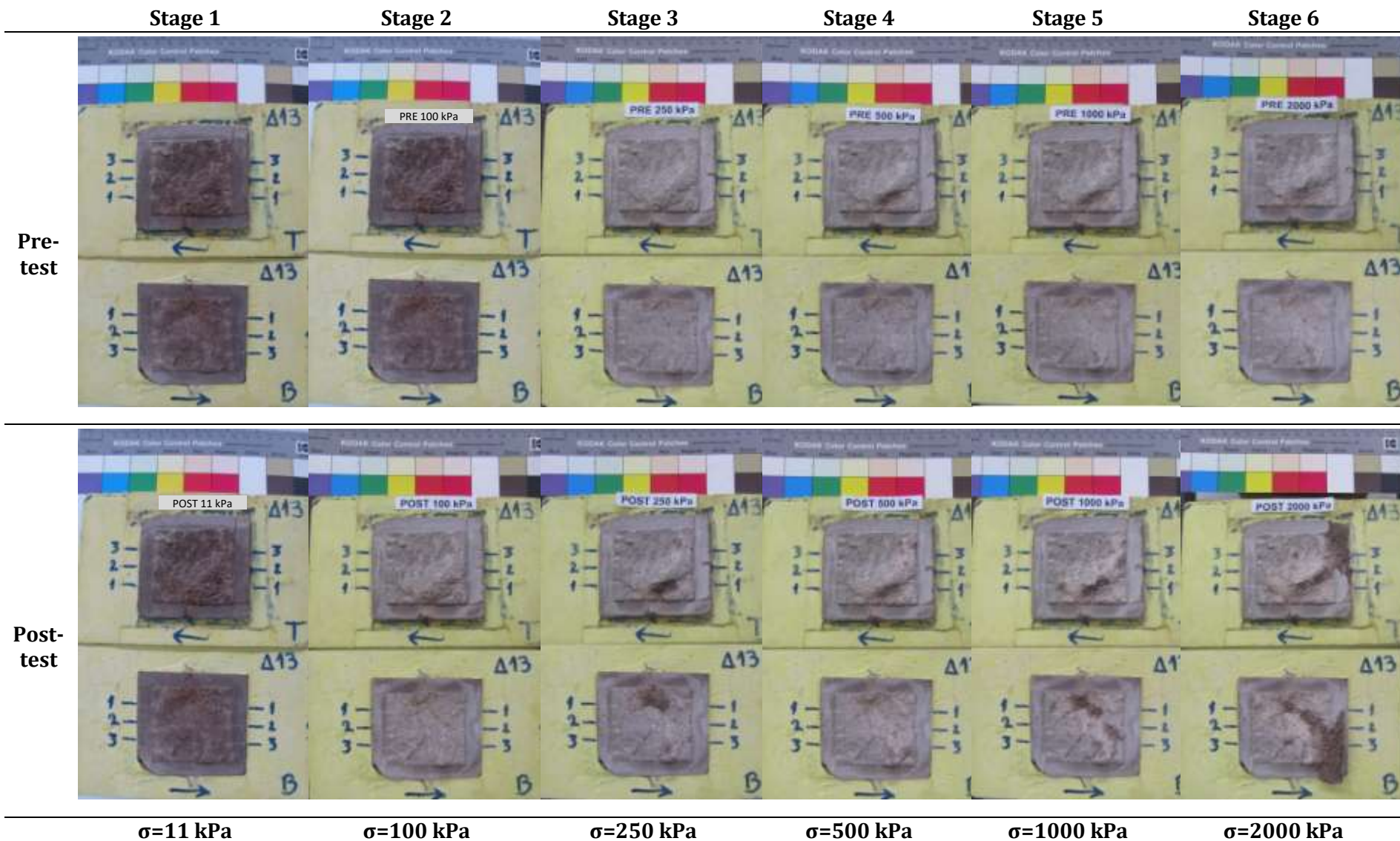




Πίνακας Π.29 Προφίλ τραχύτητας: SST3 (Δ11)

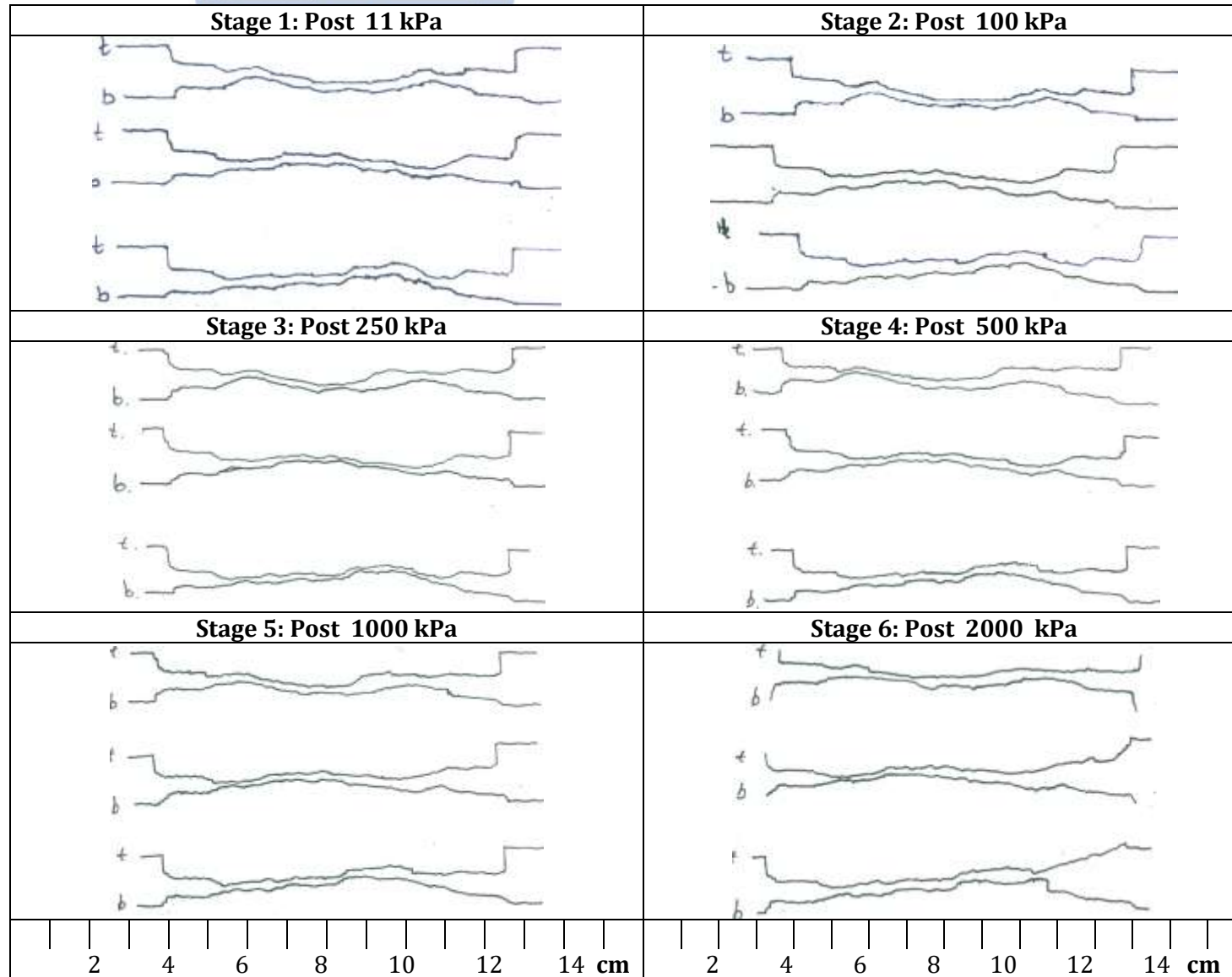


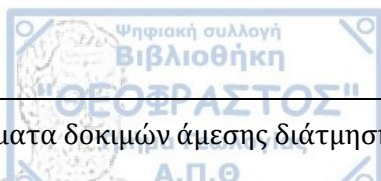
Πίνακας Π.30 Φωτογραφίες δειγμάτων ερυθρού ψαμμίτη SST4(Δ13) από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχιών





Πίνακας Π.31 Προφίλ τραχύτητας: SST4 (Δ13)

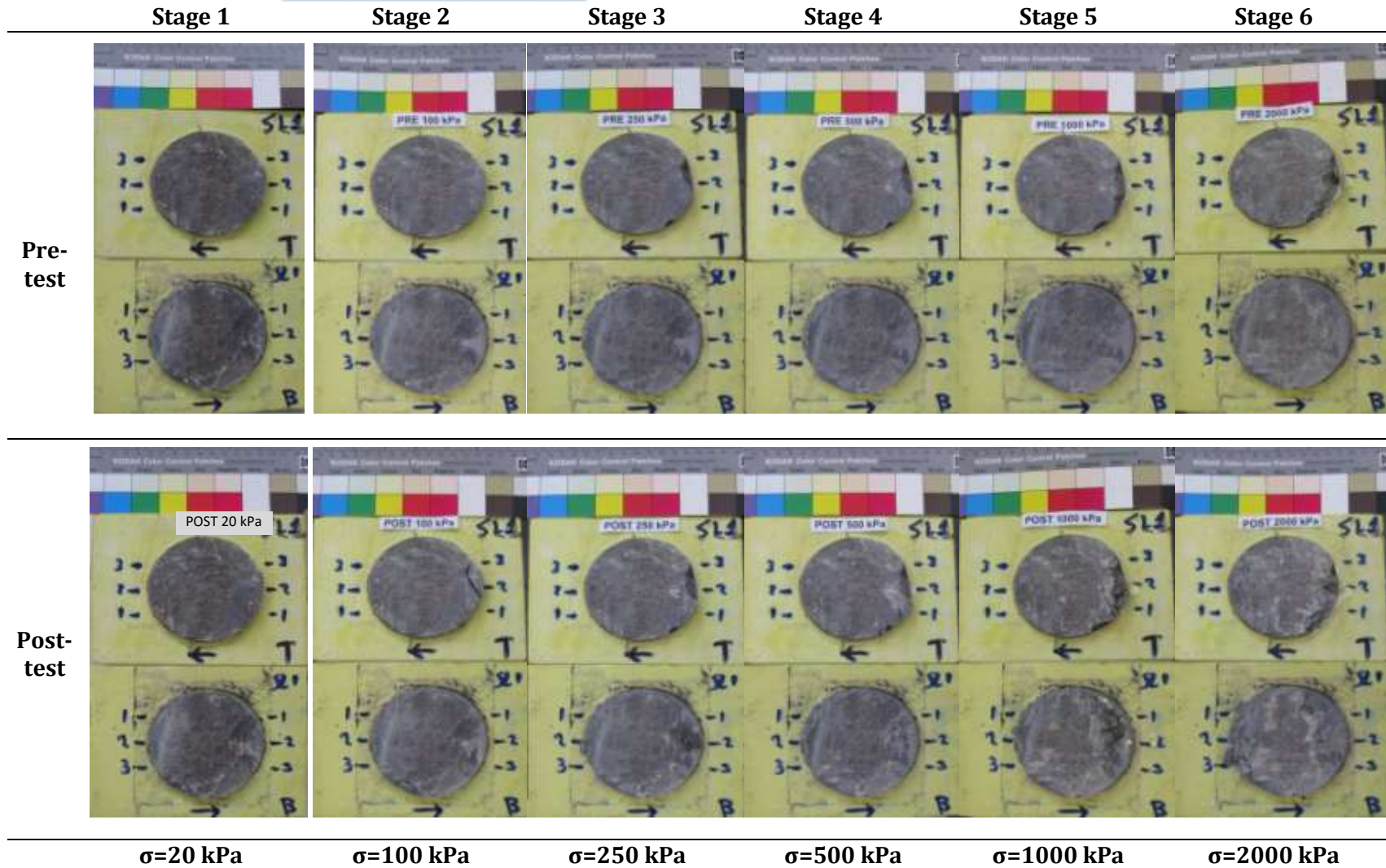




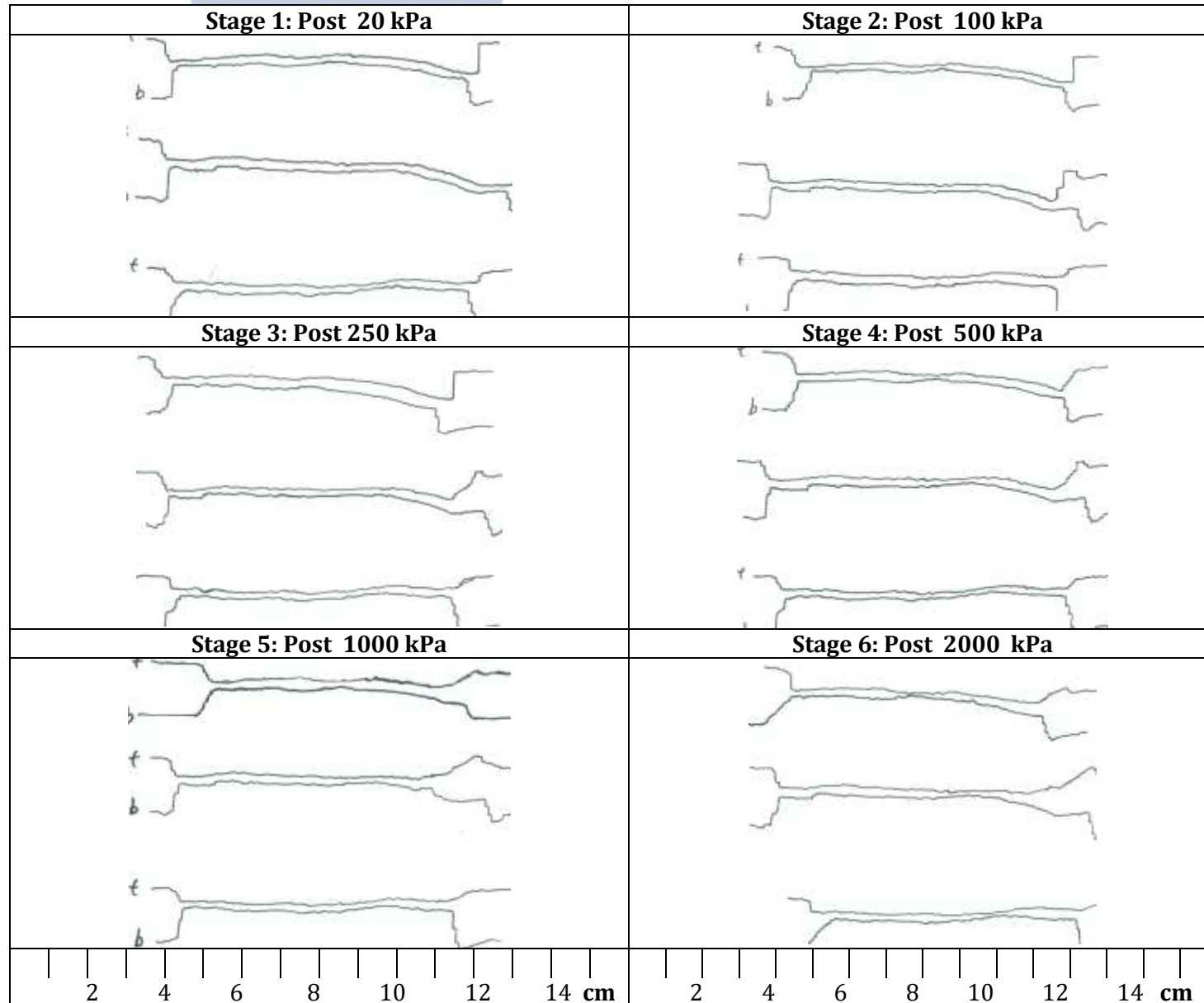
Πίνακας Π.32 Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST

α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος	Πλάτος	Ορθή τάση	Μέγιστη διατμητική τάση	Γωνία διαστολής	Μέγιστη γωνία διαστολής	Γωνία διαστολής	Ρυθμός διαστολής	Ορθή τάση	Διατμητική αντοχή	Μη διαστολική Γωνία τριβής	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση	Διατμητική δυσκαμψία	Παραμένουσα διατμητική αντοχή
		<i>b</i>	<i>h</i>	σ_n	τ_{peak}	ψ	ψ_{max}	ψ_0	$\tan\psi$	σ_i	τ_i	φ_m	$\Delta H/L_0$	k_{s50}	
		mm	mm	kPa	kPa	(°)	(°)	(°)		MPa	MPa	(°)	(%)	MPa/m	kPa
1				9	13	7,1	34,1	34,1	0,68	0,01	0,00	21,2	0,8%		7,5
2				32	64	23,2	34,8	23,2	0,43	0,05	0,04	40,5	1,7%	0,08	35
3				64	67	14,1	22,4	14,1	0,25	0,08	0,05	32,3	2,3%	0,02	45
4	SLST1	69,3	66,3	127	142	18,5	18,8	18,5	0,34	0,16	0,09	29,6	2,8%	0,07	80
5				321	372	10,8	25,9	10,8	0,19	0,38	0,30	38,4	2,0%	0,20	300
6				640	601	6,8	14,7	6,8	0,12	0,70	0,52	36,5	3,7%	0,48	570
7				1280	1045	8,5	12,2	8,5	0,15	1,40	0,83	30,7	3,2%	0,67	825
8				2550	1810	2,1	8,2	2,1	0,04	2,61	1,72	33,3	4,7%	1,24	1690
9				6	1	22,9	25,1	25,1	0,47	0,01	0,00	-13,8	0,0%		0
10				31	41	20,3	24,8	20,3	0,37	0,04	0,03	32,8	0,5%	0,12	30
11				63	71	18,1	19,3	18,1	0,33	0,08	0,05	30,5	0,9%	0,13	65
12	SLST2	105,4	66,9	127	129	23,7	24,9	23,7	0,44	0,15	0,06	21,7	1,3%	0,10	95
13				320	415	20,2	23,1	20,2	0,37	0,42	0,26	32,1	1,5%	0,22	300
14				630	698	13,0	15,1	13,0	0,23	0,75	0,52	34,9	9,1%	0,35	650
15				1270	1169	9,0	12,7	9,0	0,16	1,42	0,94	33,6	4,4%	0,48	1130
16				2550	2000	6,4	9,9	6,4	0,11	2,74	1,70	31,8	6,8%	0,85	2000
17				9	13	20,2	26,6	26,6	0,50	0,01	0,01	28,7	0,4%		7
18				640	601	1,9	21,3	1,9	0,03	0,66	0,58	41,3	10,5%	0,33	590
19				1275	1144	1,9	23,7	1,9	0,03	1,31	1,10	40,0	4,5%	0,51	1200
20	SLST4	74,1	67,2	2550	2423	6,9	11,8	6,9	0,12	2,80	2,08	36,6	9,5%	0,80	2320
21				32	23	8,2	14,3	8,2	0,14	0,03	0,02	27,2	1,5%	0,09	22
22				64	53	11,3	14,1	11,3	0,20	0,07	0,04	28,3	1,9%	0,18	50
23				127	105	10,3	18,6	10,3	0,18	0,14	0,08	29,2	1,8%	0,19	100
24				320	311	13,2	18,5	13,2	0,23	0,37	0,22	31,0	6,3%	0,09	300
25				50	37	2,9	2,9	2,9	0,05	0,05	0,03	33,5			37
26				100	74	0,0	1,4	0,0	0,00	0,10	0,07	36,4			74
27	SLST_flat	100,0	77,0	250	128	0,0	1,4	0,0	0,00	0,25	0,13	27,2			128
28				500	317	0,0	2,9	0,0	0,00	0,50	0,32	32,4			317
29				1000	616	0,0	1,4	0,0	0,00	1,00	0,62	31,6			616

Πίνακας Π.33 Φωτογραφίες δειγμάτων λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών

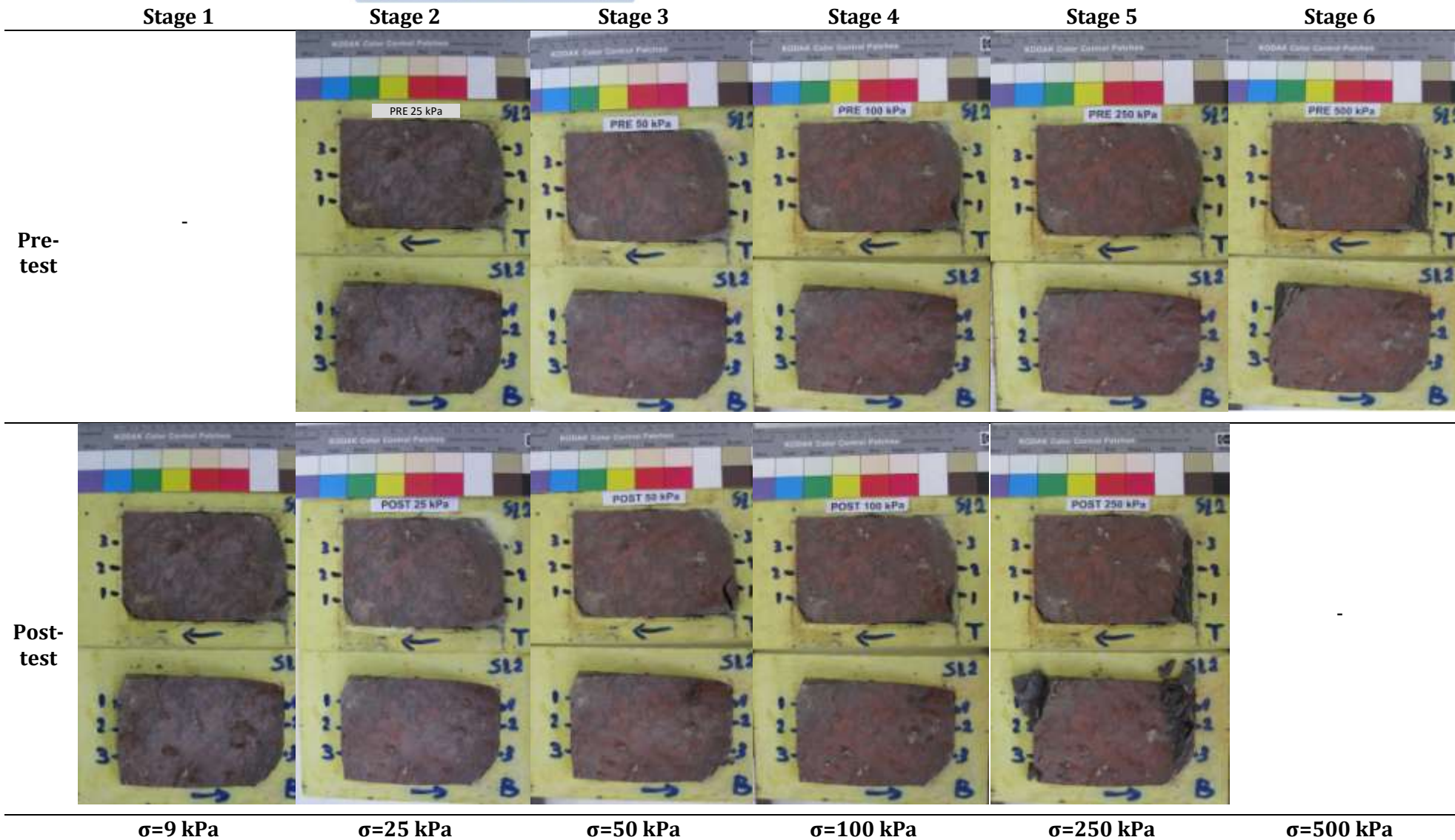


Πίνακας Π.34 Προφίλ τραχύτητας: SLST1

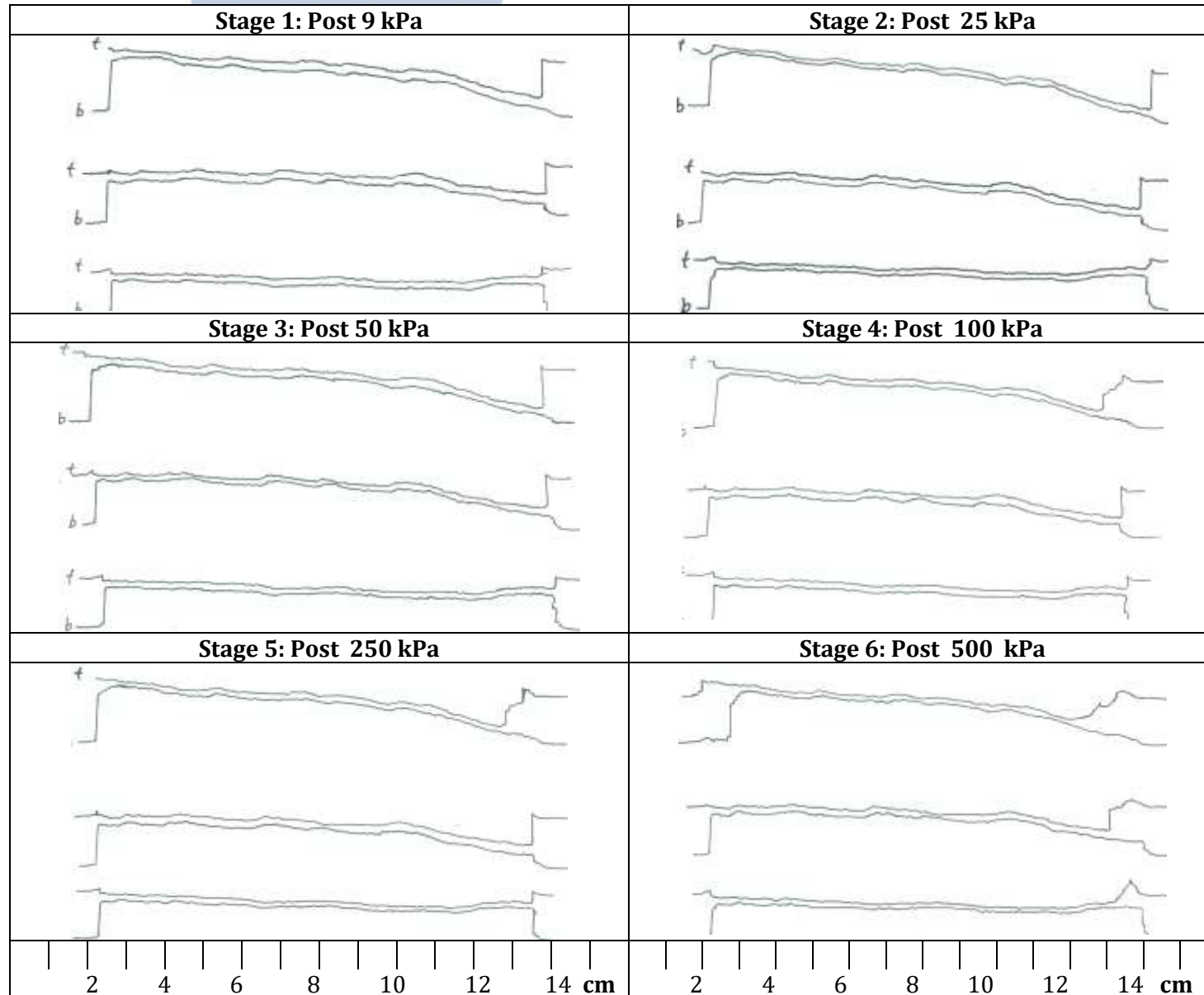




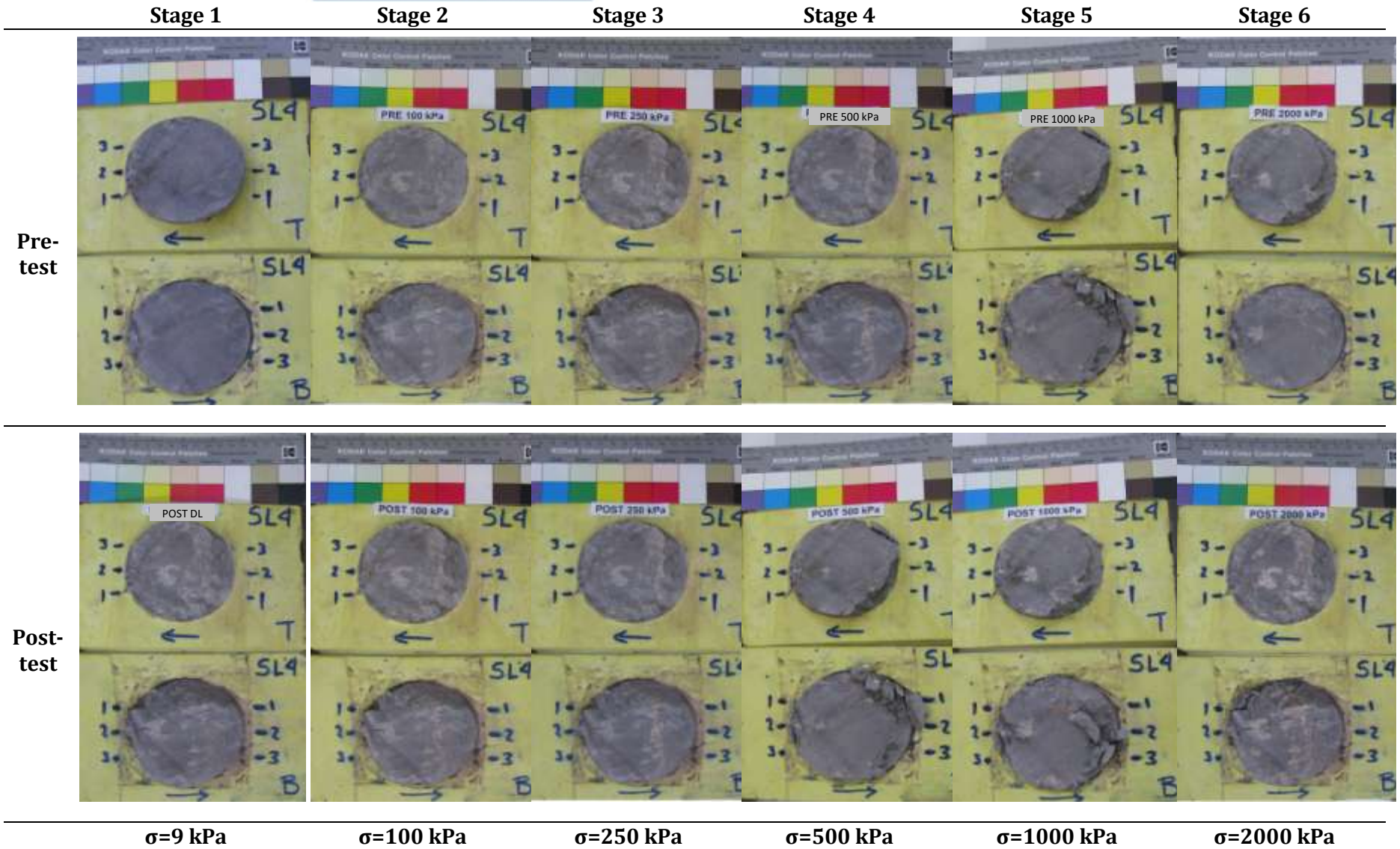
Πίνακας Π.35 Φωτογραφίες δειγμάτων λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



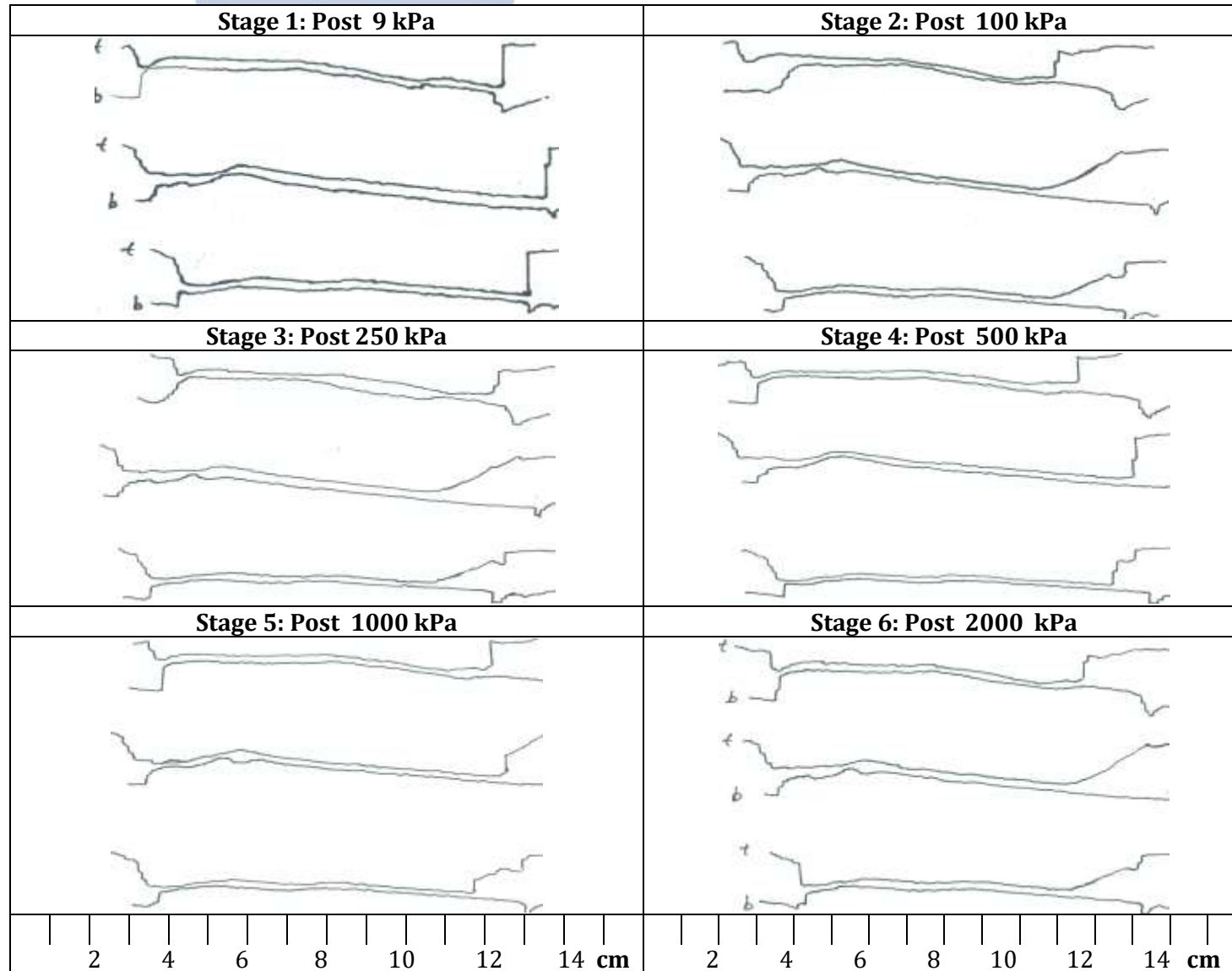
Πίνακας Π.36 Προφίλ τραχύτητας: SLST2



Πίνακας Π.37 Φωτογραφίες δειγμάτων λεπτόκοκκου ψαμμίτη SLST4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



Πίνακας Π.38 Προφίλ τραχύτητας: SLST4



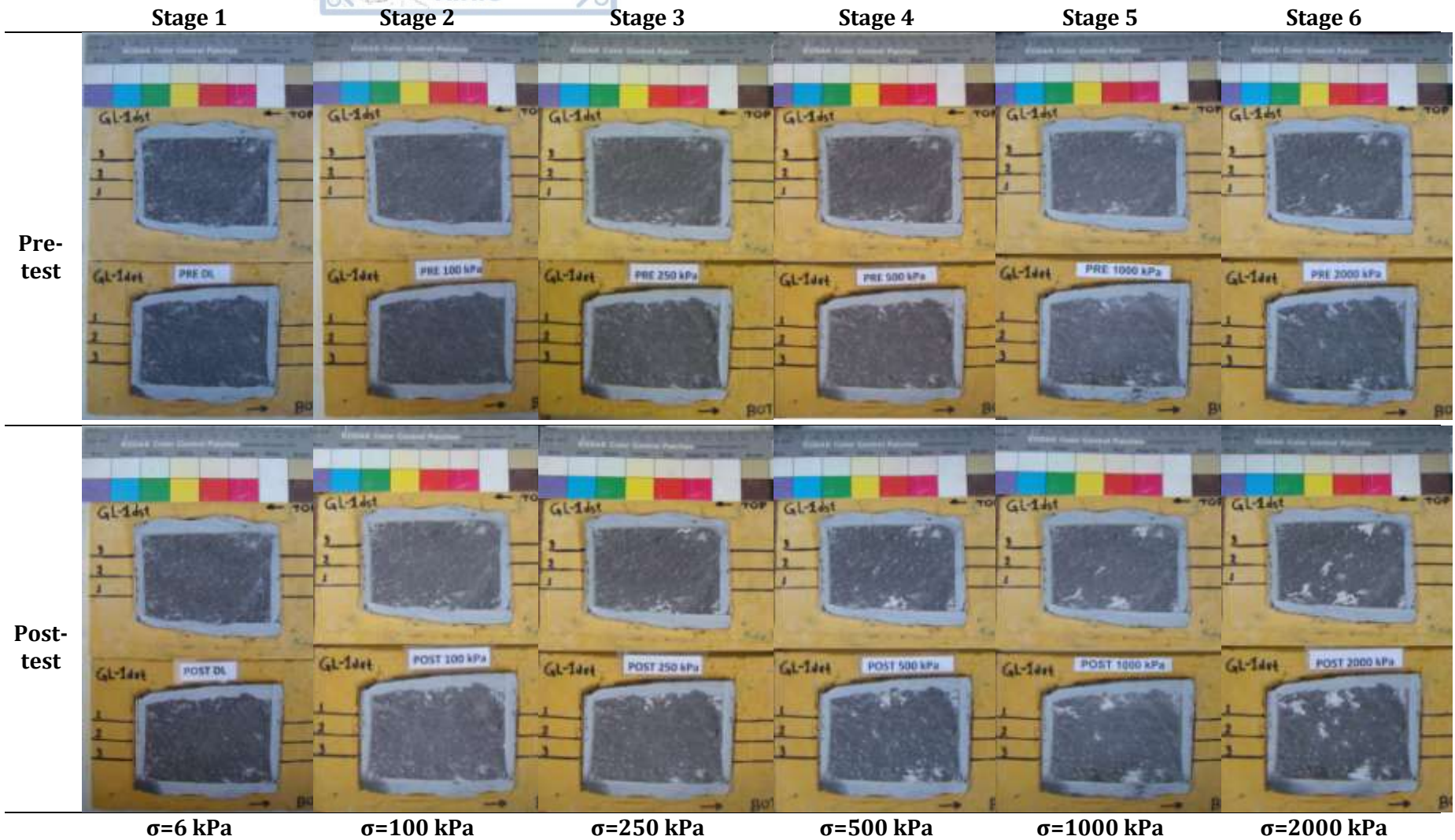


Πίνακας Π.39 Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Ασβεστόλιθου GL

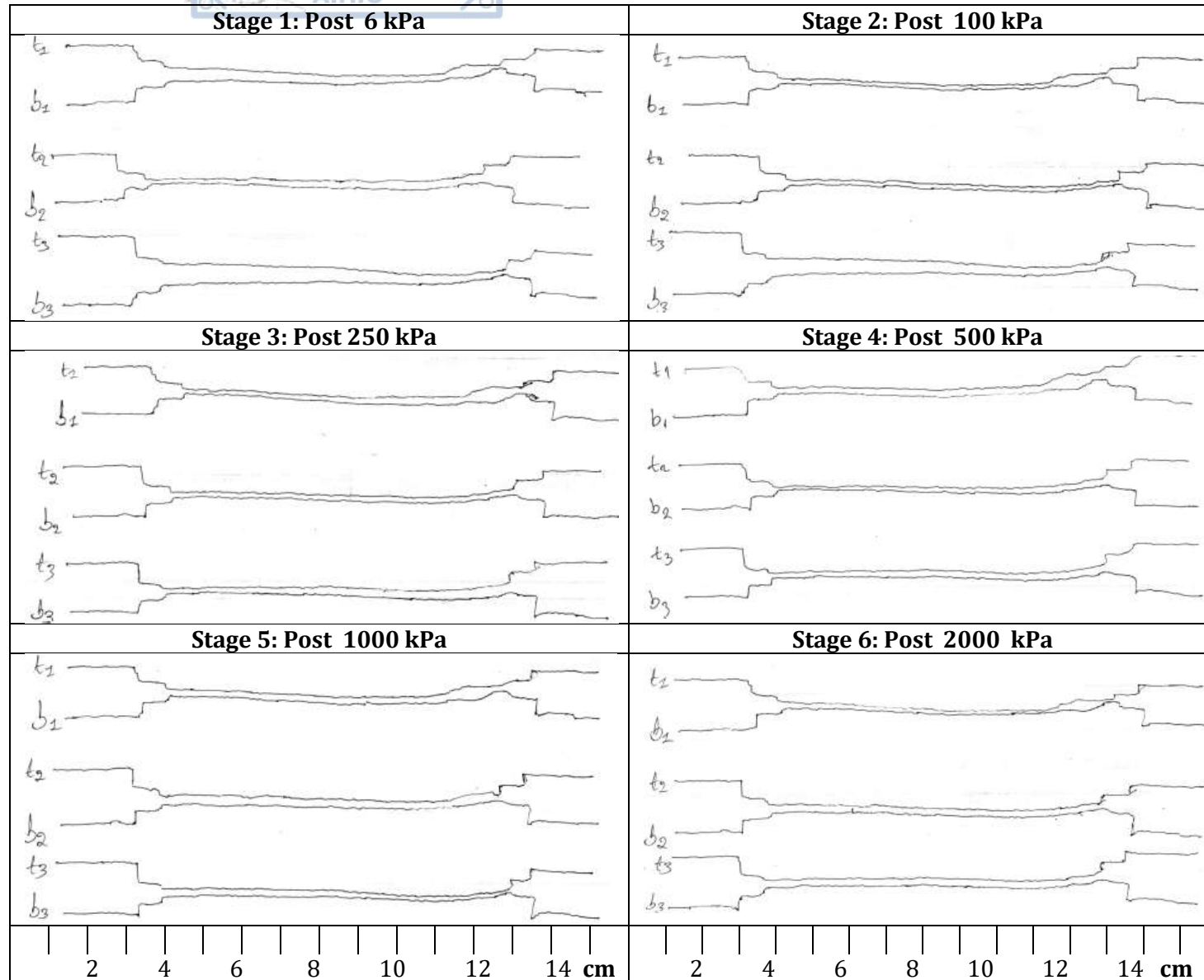
α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος	Πλάτος	Ορθή τάση	Μέγιστη διατμητική τάση	Γωνία διαστολής	Μέγιστη γωνία διαστολής	Γωνία διαστολής	Ρυθμός διαστολής	Ορθή τάση	Διατμητική αντοχή	Μη διαστολική Γωνία τριβής	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση	Διατμητική δυσκαμψία	Παραμένουσα διατμητική αντοχή
		<i>b</i>	<i>h</i>	σ_n	τ_{peak}	ψ	ψ_{max}	ψ_0	$\tan\psi$	σ_i	τ_i	φ_m	$\Delta H/L_0$	k_{s50}	
		mm	mm	kPa	kPa	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)		MPa	MPa	($^\circ$)	(%)	MPa/mm	kPa
1				6	12	33,4	33,4	33,4	0,66	0,01	0,01	30,3	0,4%		6
2				100	121	21,6	21,6	21,6	0,40	0,13	0,07	28,9	0,4%	0,30	50
3	GL1	94,22	66,28	250	215	9,7	13,7	9,7	0,17	0,28	0,17	31,1	0,6%	0,34	160
4	τεχνητή			500	446	14,6	23,6	14,6	0,26	0,58	0,30	27,1	2,2%	0,29	330
5				1000	490	2,0	7,9	2,0	0,03	1,02	0,45	24,1	1,4%	0,44	400
6				2000	773	5,2	7,3	5,2	0,09	2,05	0,58	15,9	3,1%	0,44	750
7				8	8	27,3	42,1	42,1	0,90	0,01	0,00	4,0	0,1%		2,5
8				2000	1982	15,8	34,3	15,8	0,28	2,37	1,31	28,9	3,5%	0,86	1400
9	GL2	85,62	50,00	1000	737	5,0	12,4	5,0	0,09	1,06	0,64	31,4	4,2%	0,37	700
10	τεχνητή			500	387	3,3	6,7	3,3	0,06	0,52	0,36	34,4	5,3%	0,16	350
11				250	111	4,1	6,7	4,1	0,07	0,26	0,09	19,9	2,7%	0,06	100
12				100	51	0,0	5,0	0,0	0,00	0,10	0,05	27,0	2,0%	0,01	35
13				8	4	20,2	24,3	24,3	0,45	0,01	0,00	1,2	0,1%		0,5
14				18	24	23,9	42,5	23,9	0,44	0,02	0,01	29,1	0,3%		5
15	GL3	83,26	56,00	200	202	6,7	14,1	6,7	0,12	0,22	0,18	38,5	3,6%	0,21	150
16	τεχνητή			500	483	6,6	13,5	6,6	0,12	0,55	0,42	37,4	2,5%	0,21	420
17				1000	961	10,0	23,3	10,0	0,18	1,13	0,76	33,9	2,0%	0,45	700
18				2000	1638	0,0	11,6	0,0	0,00	2,00	1,64	39,3	6,4%	0,68	1200
19				6	7	22,2	23,4	23,4	0,43	0,01	0,00	26,8	0,1%		3
20				14	14	9,9	11,7	9,9	0,17	0,02	0,01	34,2	0,6%		7,2
21	GL4	82,00	68,00	1000	592	23,1	24,2	23,1	0,43	1,06	0,14	7,5	2,3%	0,29	290
22	φυ+τεχ			2500	986	11,1	11,1	11,1	0,20	2,59	0,48	10,5	2,7%	0,60	600
23				250	133	10,0	10,0	10,0	0,18	0,27	0,09	18,0	0,6%	0,32	55
24				500	116	1,7	5,2	1,7	0,03	0,50	0,10	11,3	0,8%	0,45	100

α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος	Πλάτος	Ορθή τάση	Μέγιστη διατμητική τάση	Γωνία διαστολής	Μέγιστη γωνία διαστολής	Γωνία διαστολής	Ρυθμός διαστολής	Ορθή τάση	Διατμητική αντοχή	Μη διαστολική Γωνία τριβής	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση	Διατμητική δυσκαμψία	Παραμένουσα διατμητική αντοχή
		<i>b</i>	<i>h</i>	σ_n	τ_{peak}	ψ	ψ_{max}	ψ_0	$\tan\psi$	σ_i	τ_i	φ_m	$\Delta H/L_0$	k_{s50}	
		mm	mm	kPa	kPa	(°)	(°)	(°)		MPa	MPa	(°)	(%)	MPa/mm	kPa
25				14	15	30,3	30,7	30,7	0,59	0,02	0,01	16,8	0,6%		6,5
26				500	364	10,0	10,4	10,0	0,18	0,55	0,27	26,1	2,6%	0,34	300
27	GL5	94,35	65,00	1000	529	4,0	7,9	4,0	0,07	1,03	0,46	23,9	1,8%	0,35	410
28	φυσική			2000	894	3,4	7,9	3,4	0,06	2,05	0,77	20,7	2,5%	0,55	700
29				100	36	7,2	9,6	7,2	0,13	0,10	0,02	12,8	1,0%	0,05	33
30				250	217	16,9	16,9	16,9	0,30	0,29	0,13	24,0	0,8%	0,35	70
31				13	3	11,6	15,6	15,6	0,28	0,01	0,00	-0,3	0,4%		1
32				750	562	26,2	26,2	26,2	0,49	0,83	0,16	10,7	1,9%	0,38	350
33	GL6	86,00	76,00	1000	677	20,9	20,9	20,9	0,38	1,10	0,26	13,2	2,6%	0,54	400
34	φυσική			2000	1394	24,6	24,6	24,6	0,46	2,18	0,40	10,3	3,6%	0,62	750
35				100	48	10,0	10,1	10,0	0,18	0,11	0,03	15,5	1,1%	0,11	30
36				250	79	5,0	6,9	5,0	0,09	0,25	0,06	12,5	0,4%	0,25	70
37				500	183	6,9	8,0	6,9	0,12	0,51	0,12	13,2	1,0%	0,28	155
38				15	3	14,3	20,0	20,0	0,36	0,01	0,00	-8,0	0,1%		1,5
39				2500	1970	-3,2	0,0	0,0	0,00	2,50	1,97	38,2	2,2%	1,45	1900
40	GL7	100,9	55,78	100	79	23,2	23,2	23,2	0,43	0,11	0,03	15,1	0,2%	0,33	40
41	τεχνητή	5		250	135	14,8	17,1	14,8	0,26	0,27	0,06	13,5	0,3%	0,48	95
42				500	245	7,3	16,1	7,3	0,13	0,52	0,18	18,8	0,5%	0,50	230
43				1000	586	14,9	19,6	14,9	0,27	1,08	0,30	15,5	1,9%	0,58	440
44				6	12	8,8	33,4	8,8	0,16	0,01	0,01	54,9			3,9
45				100	121	15,2	21,5	15,2	0,27	0,12	0,09	35,3			58
46	GL_flat			250	215	10,6	13,7	10,6	0,19	0,28	0,16	30,1			200
47	τεχνητή			500	579	8,1	39,5	8,1	0,14	0,57	0,50	41,1			370
48				1000	547	6,0	8,1	6,0	0,11	1,05	0,44	22,7			500
49				2000	1019	7,5	7,6	7,5	0,13	2,10	0,74	19,5			700

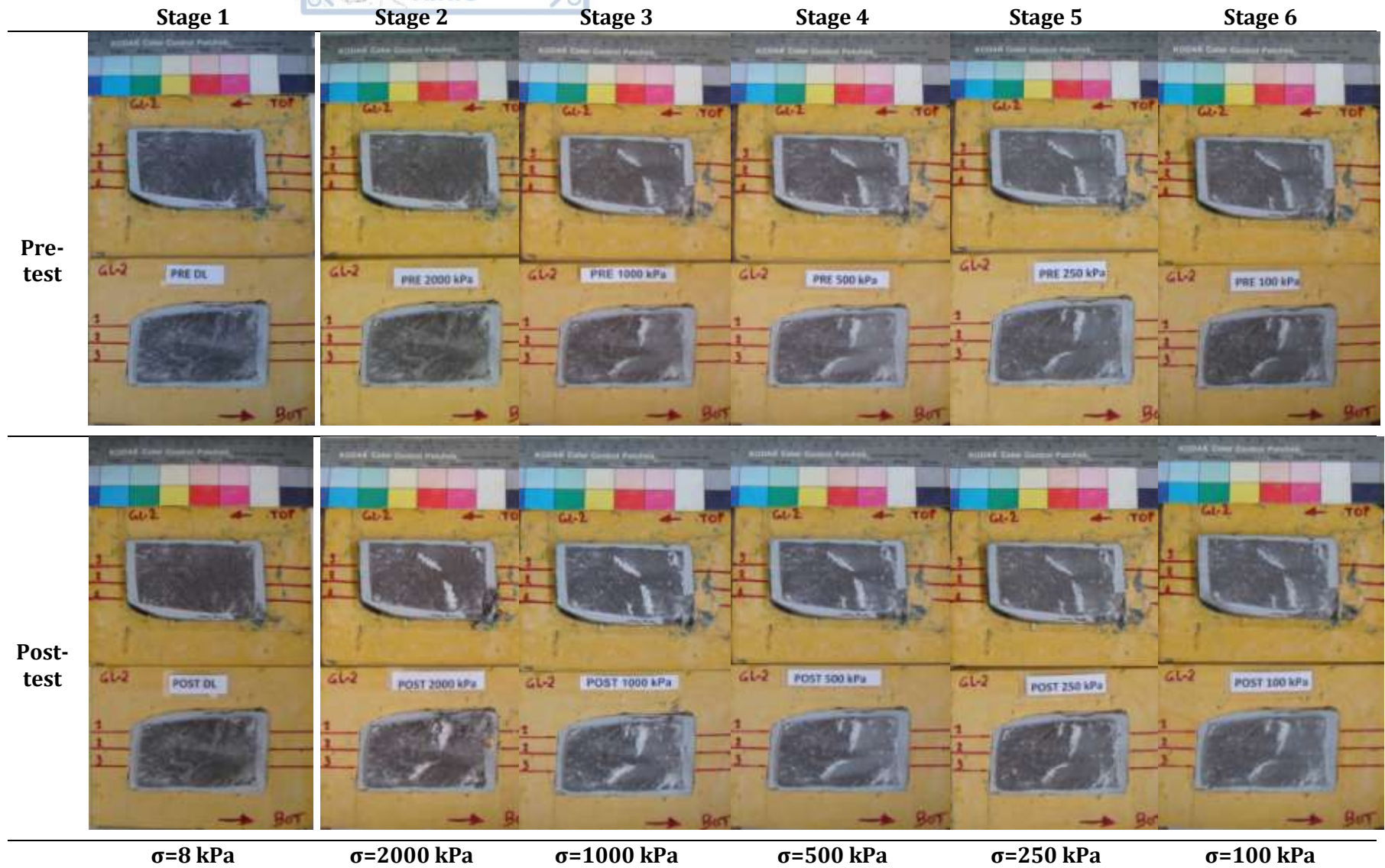
Πίνακας Π.40 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



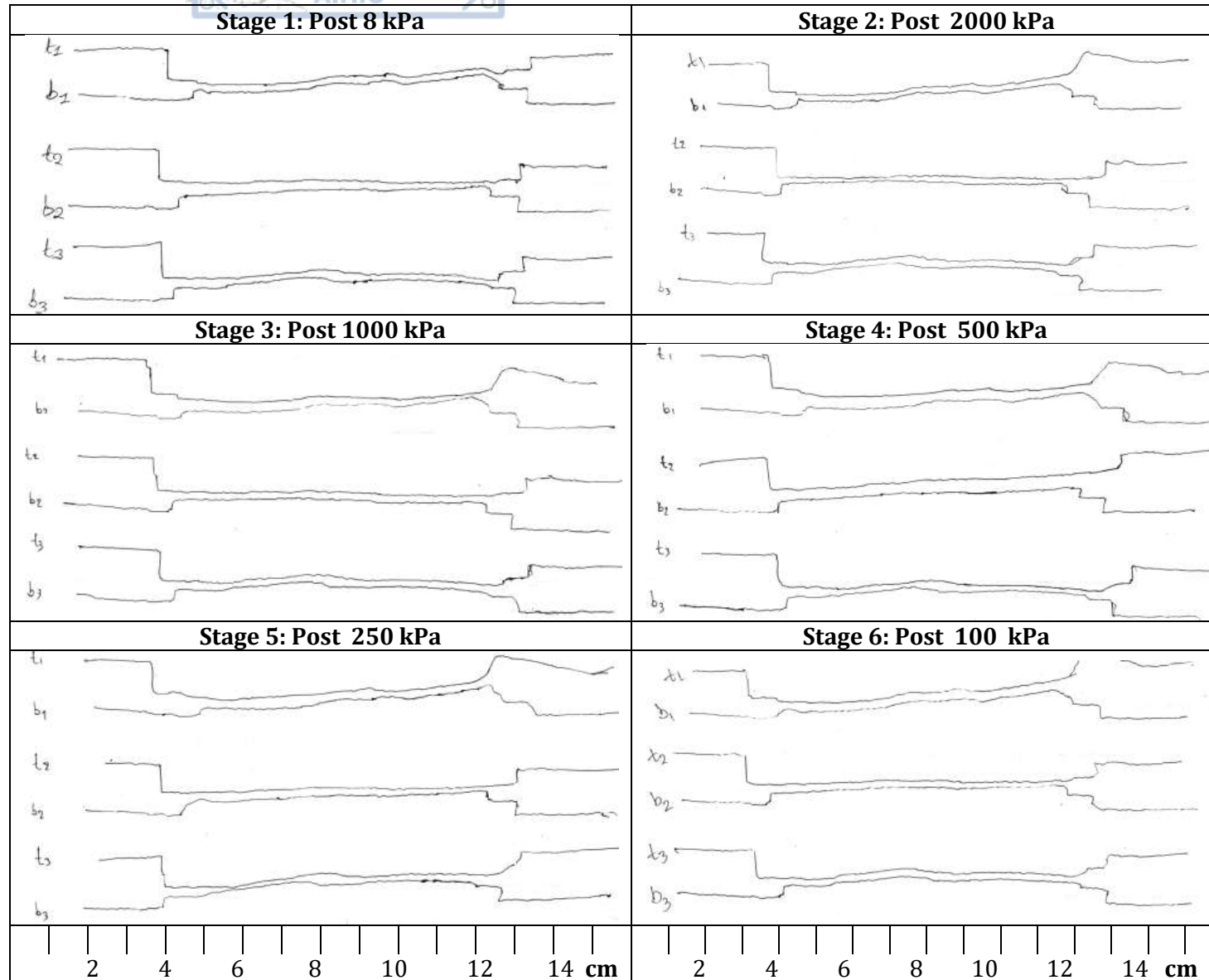
Πίνακας Π.41 Προφίλ τραχύτητας: GL1



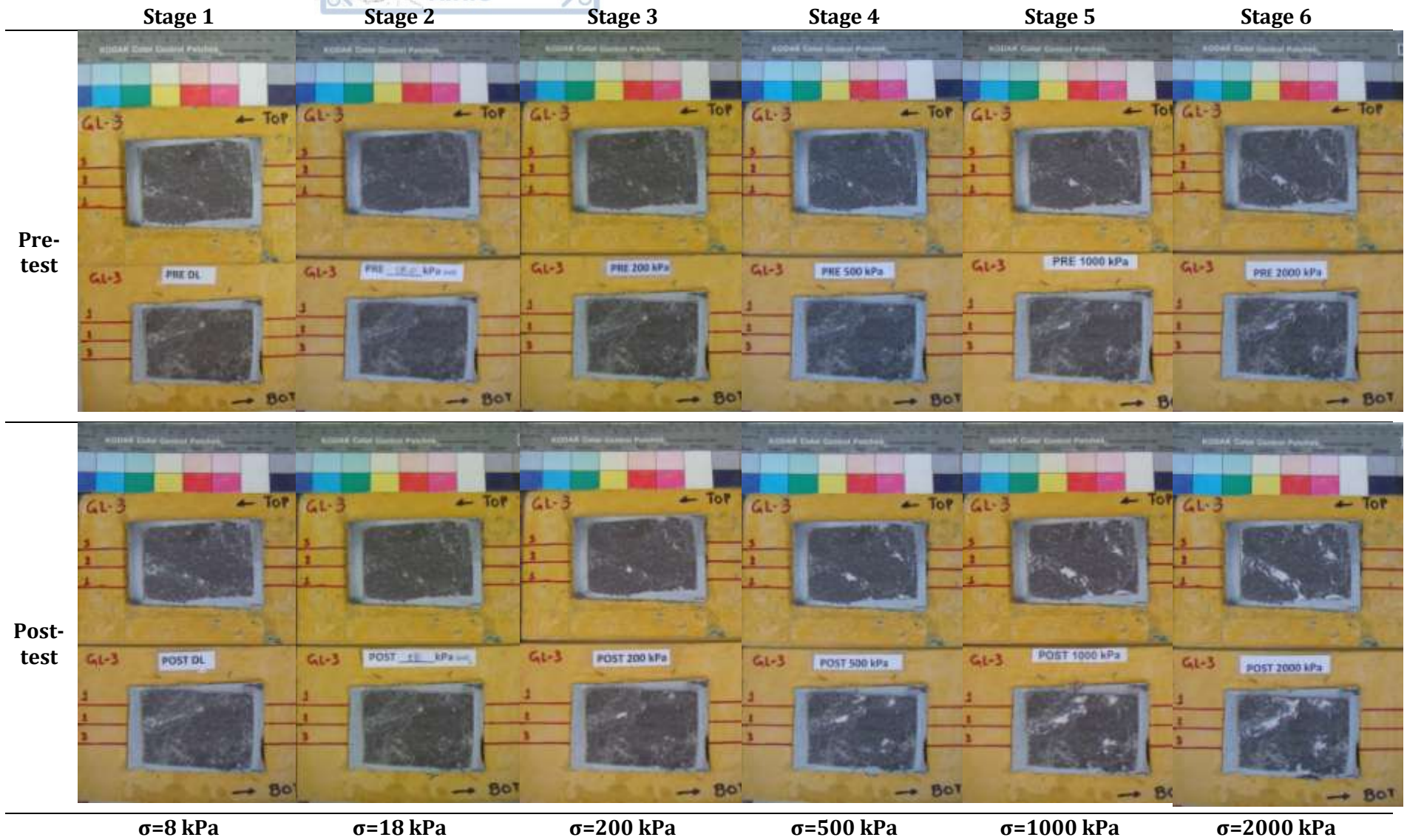
Πίνακας Π.42 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



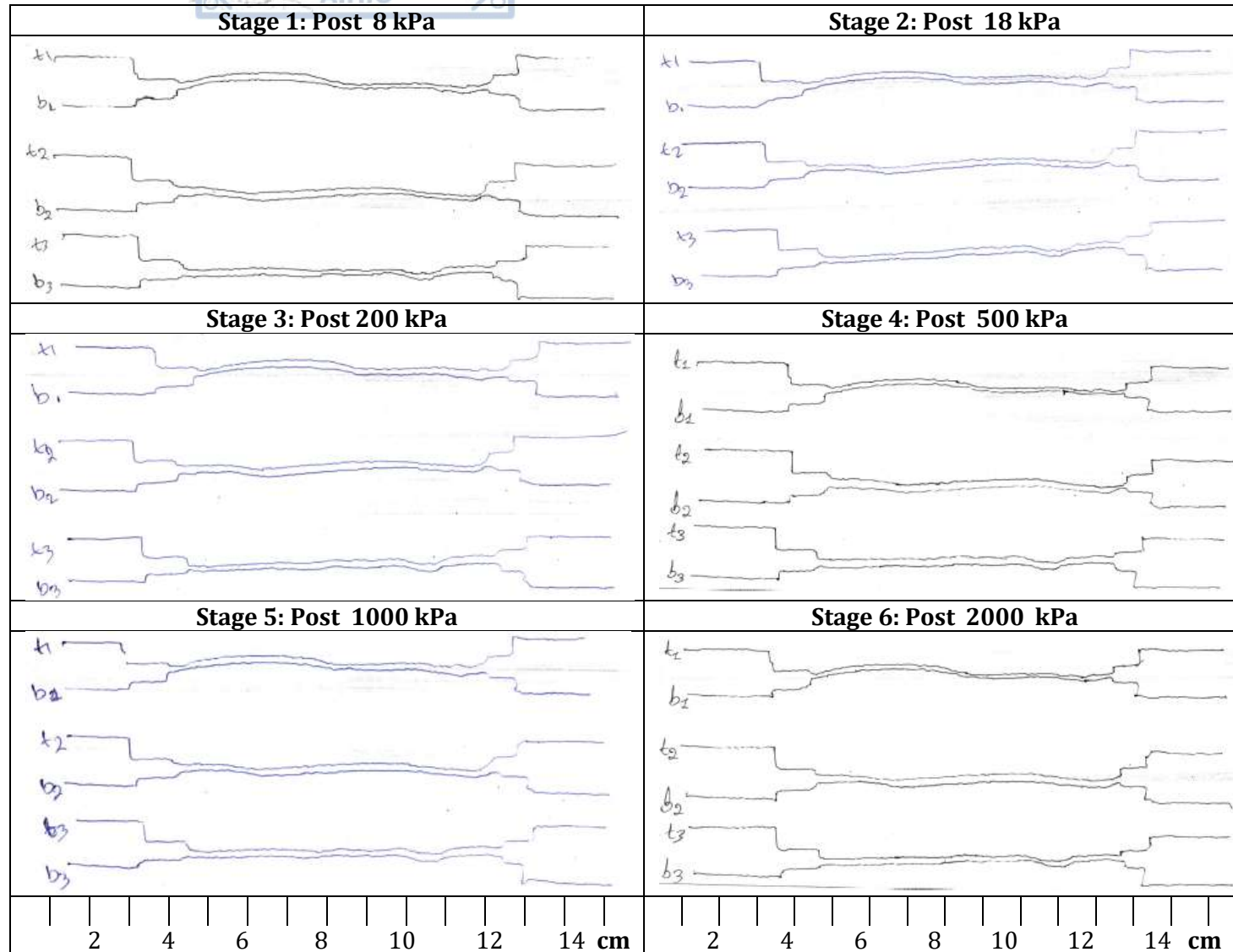
Πίνακας Π.43 Προφίλ τραχύτητας: GL2



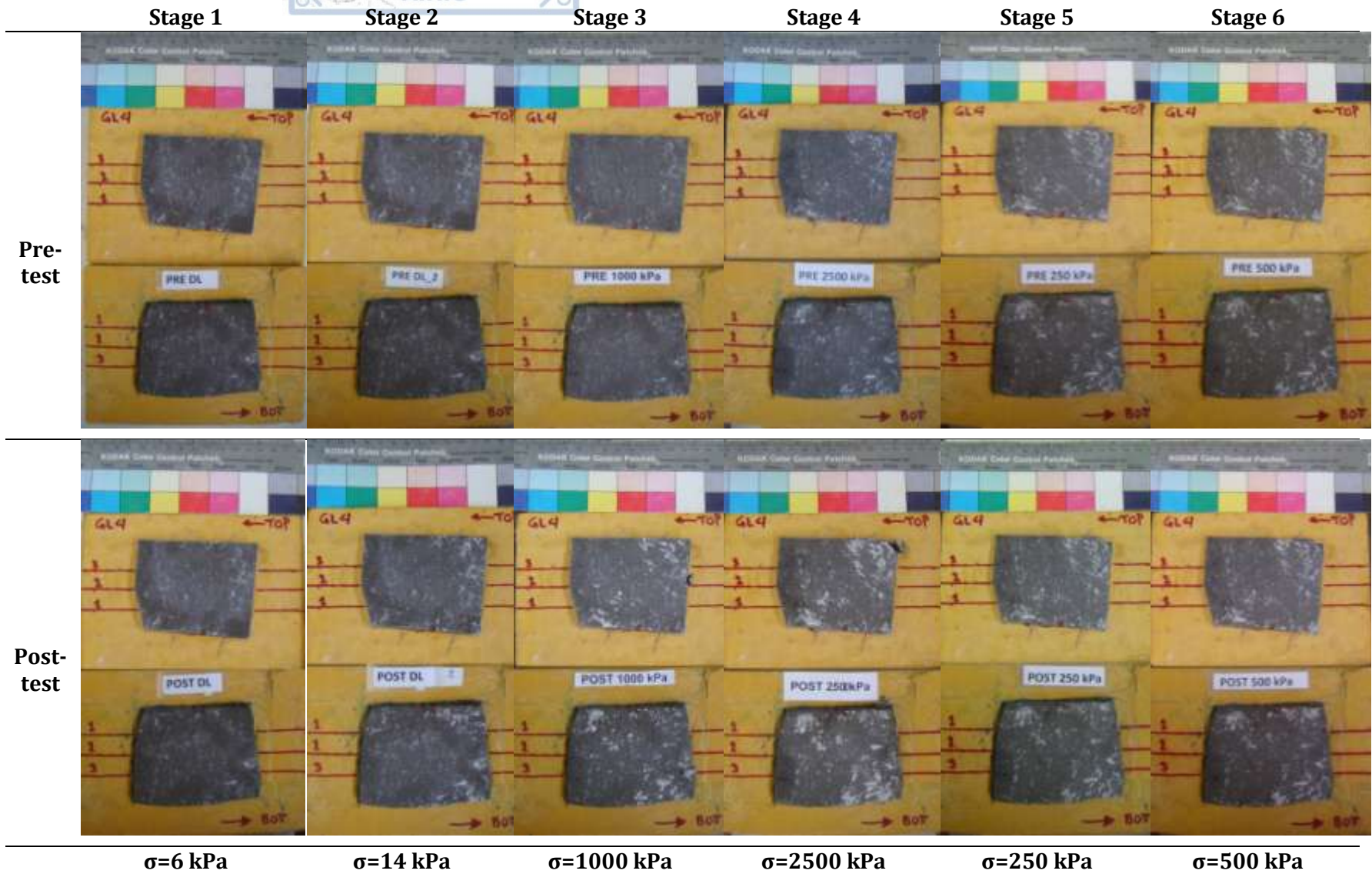
Πίνακας Π.44 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



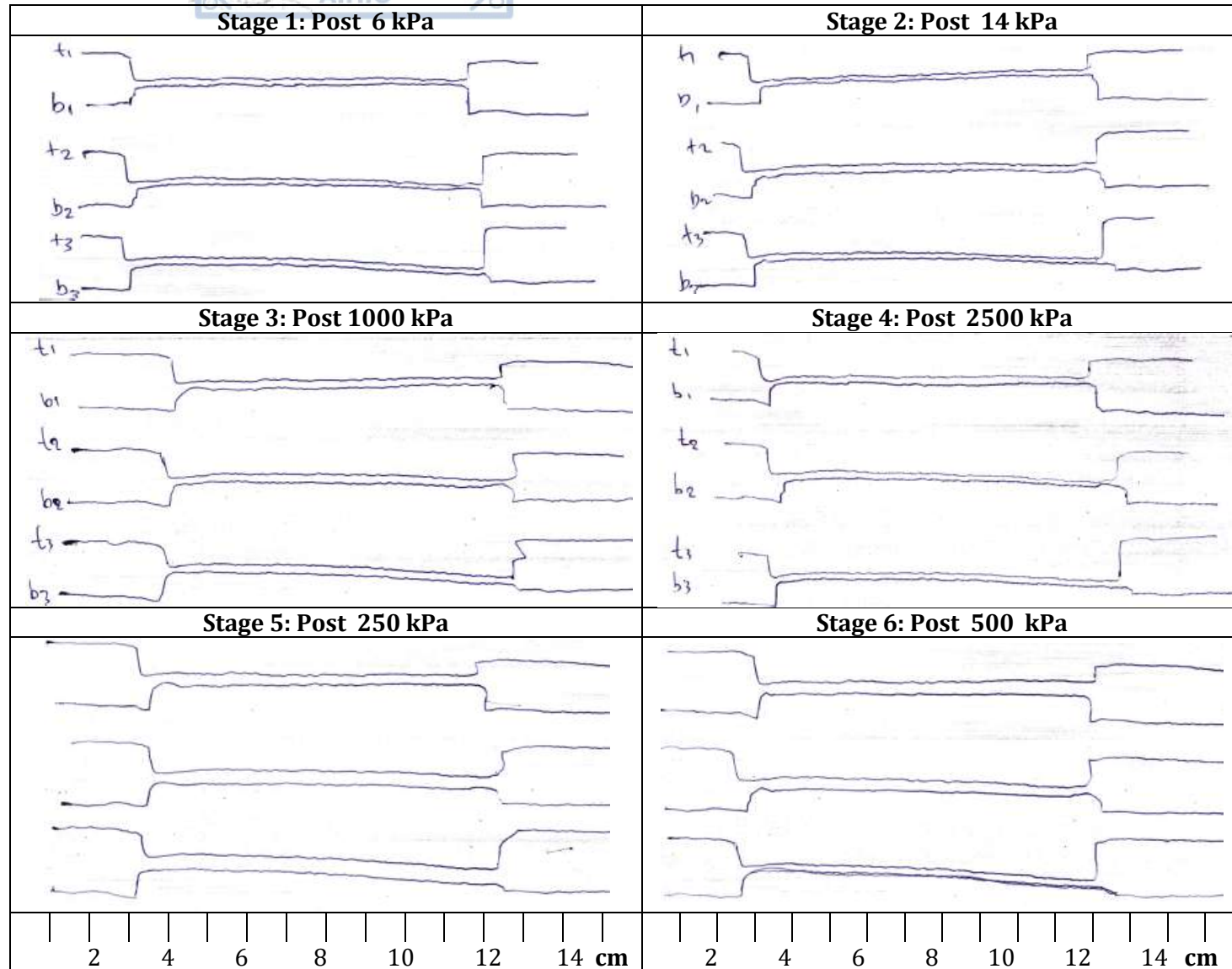
Πίνακας Π.45 Προφίλ τραχύτητας: GL3



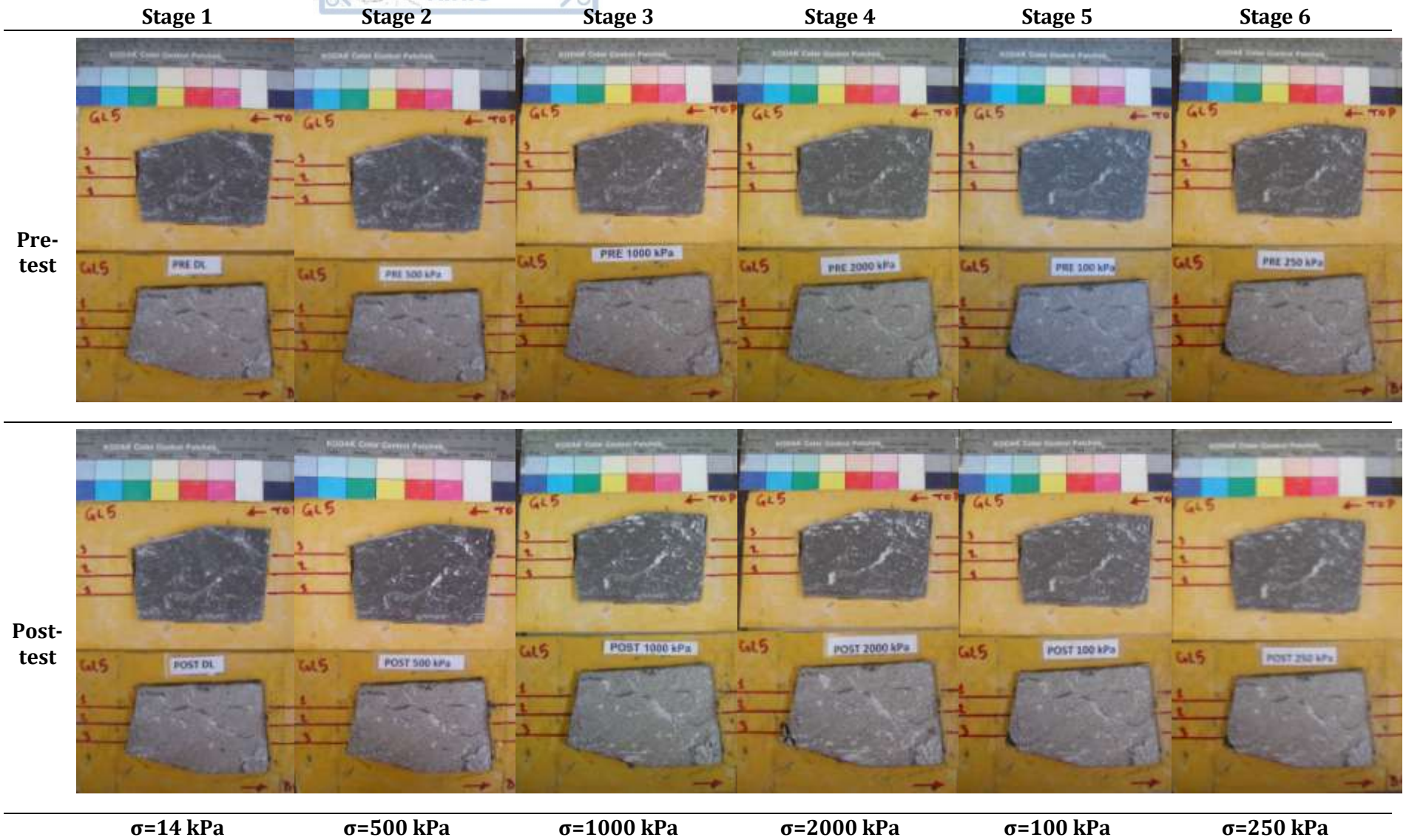
Πίνακας Π.46 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



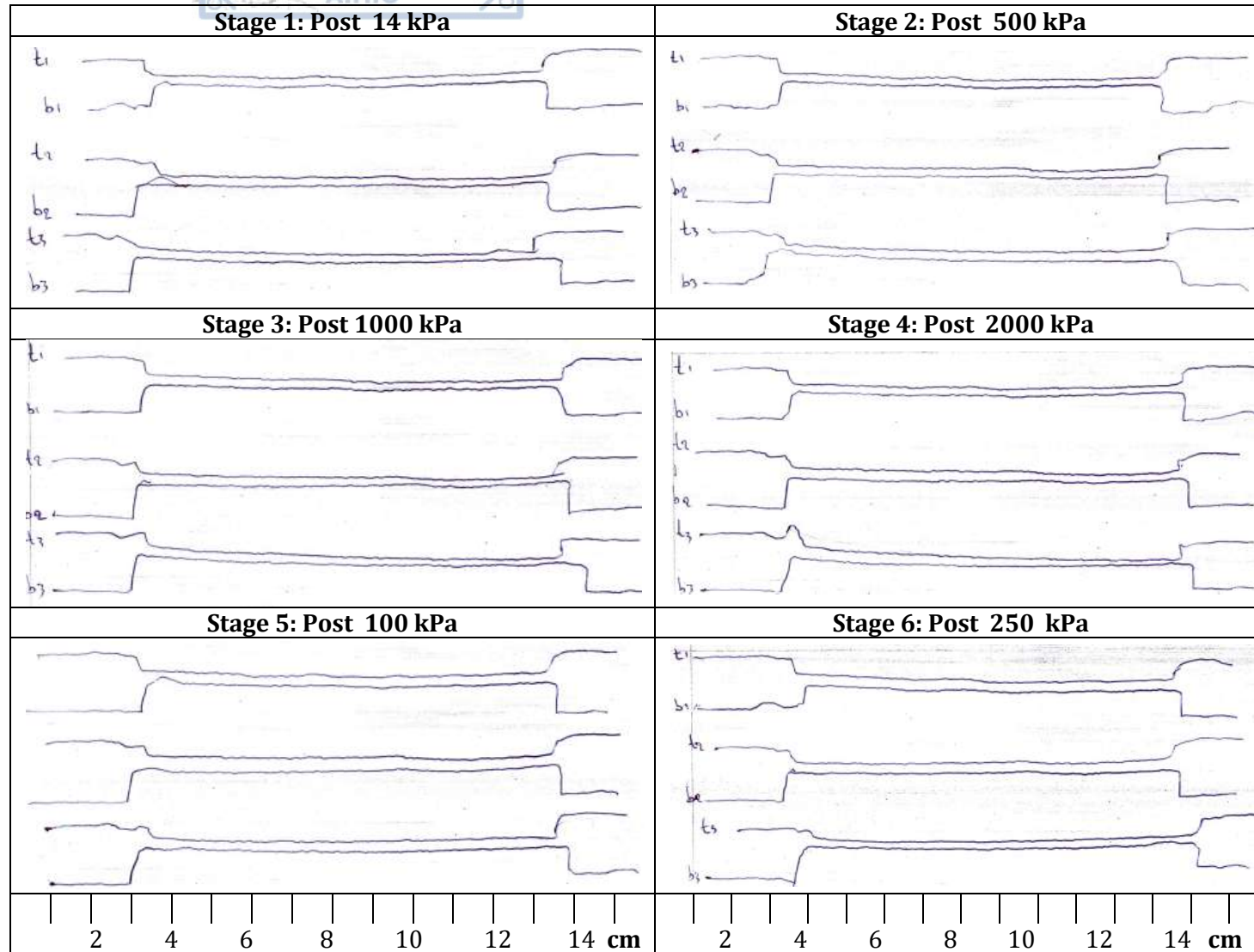
Πίνακας Π.47 Προφίλ τραχύτητας: GL4



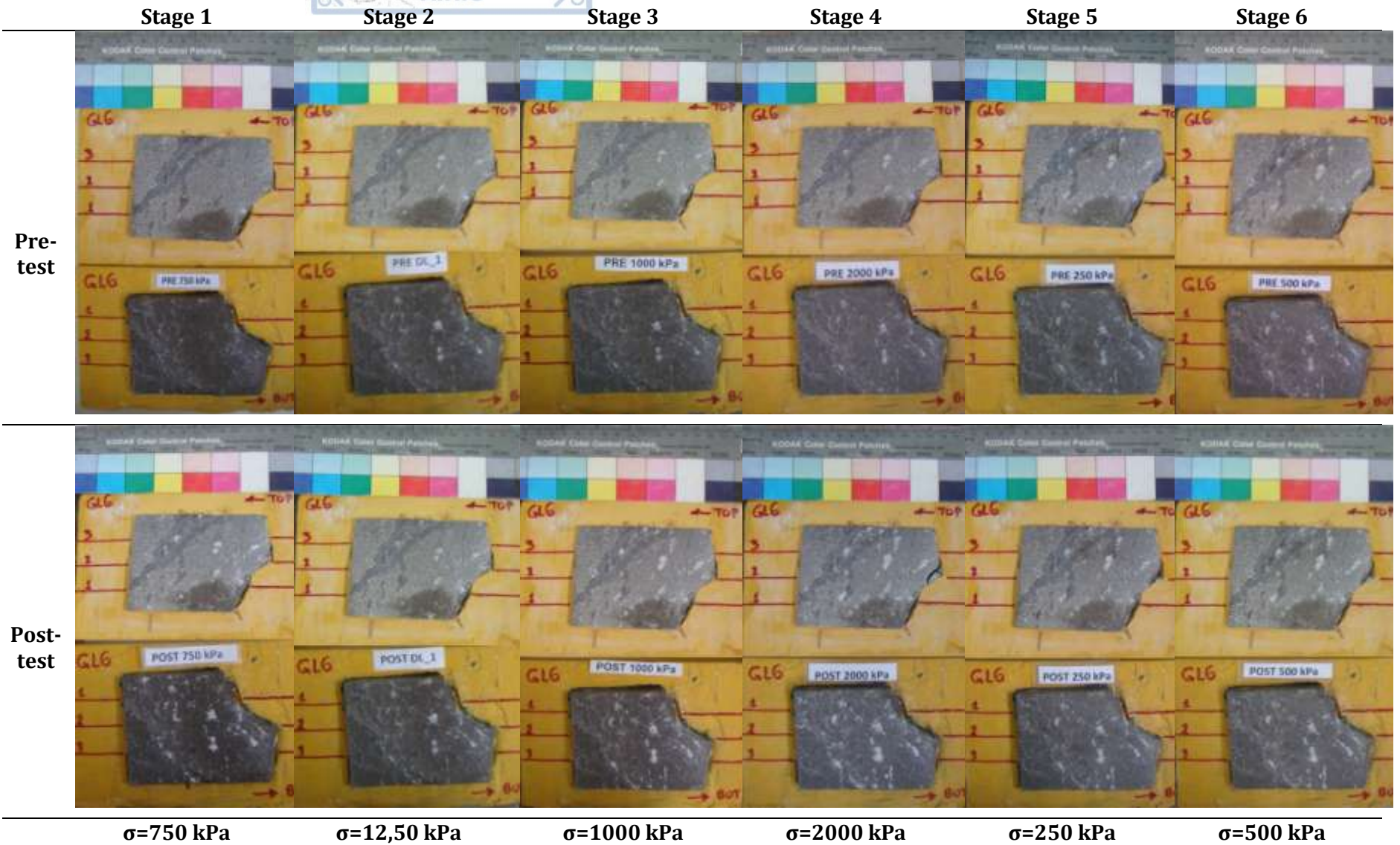
Πίνακας Π.48 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL5 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



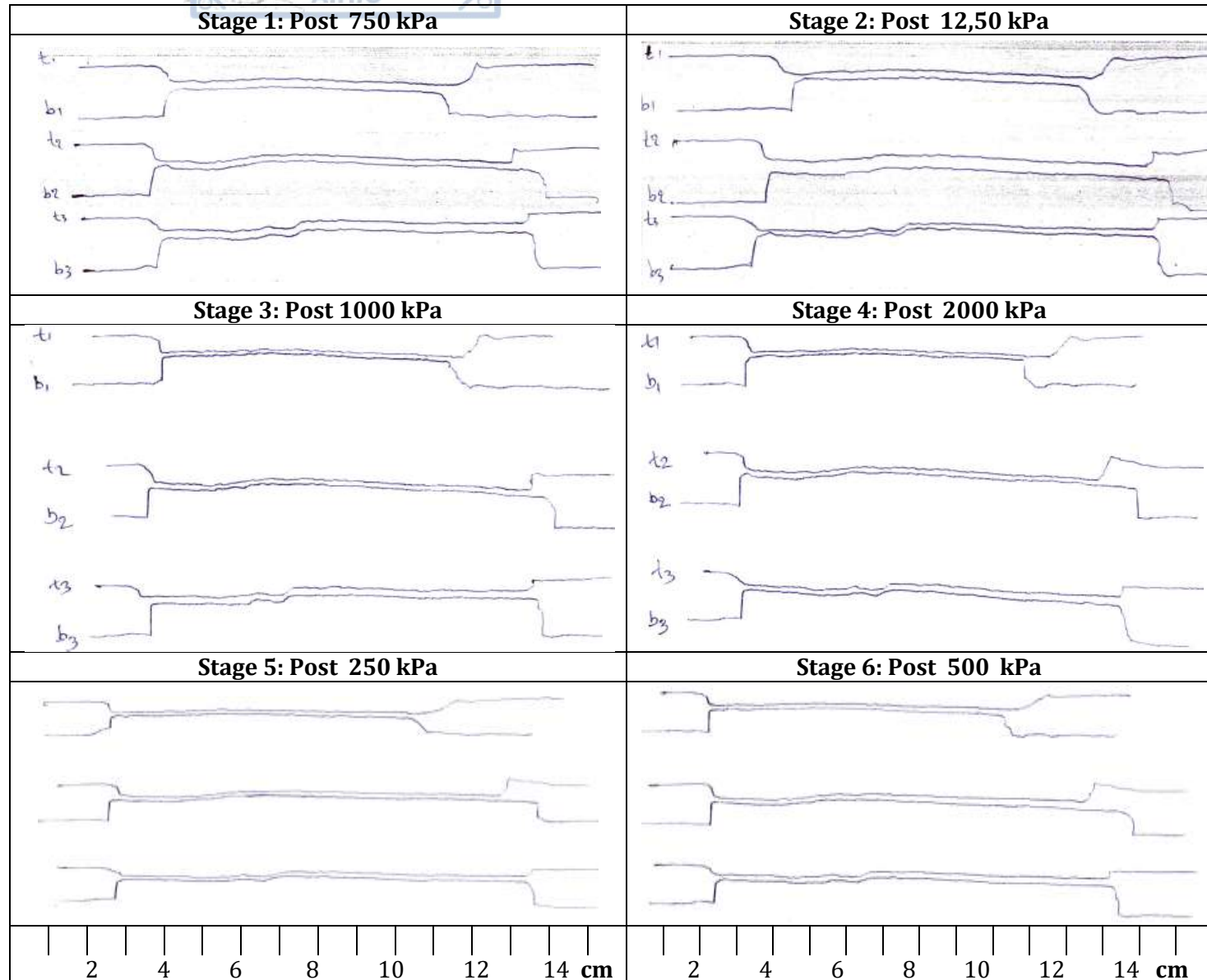
Πίνακας Π.49 Προφίλ τραχύτητας: GL5



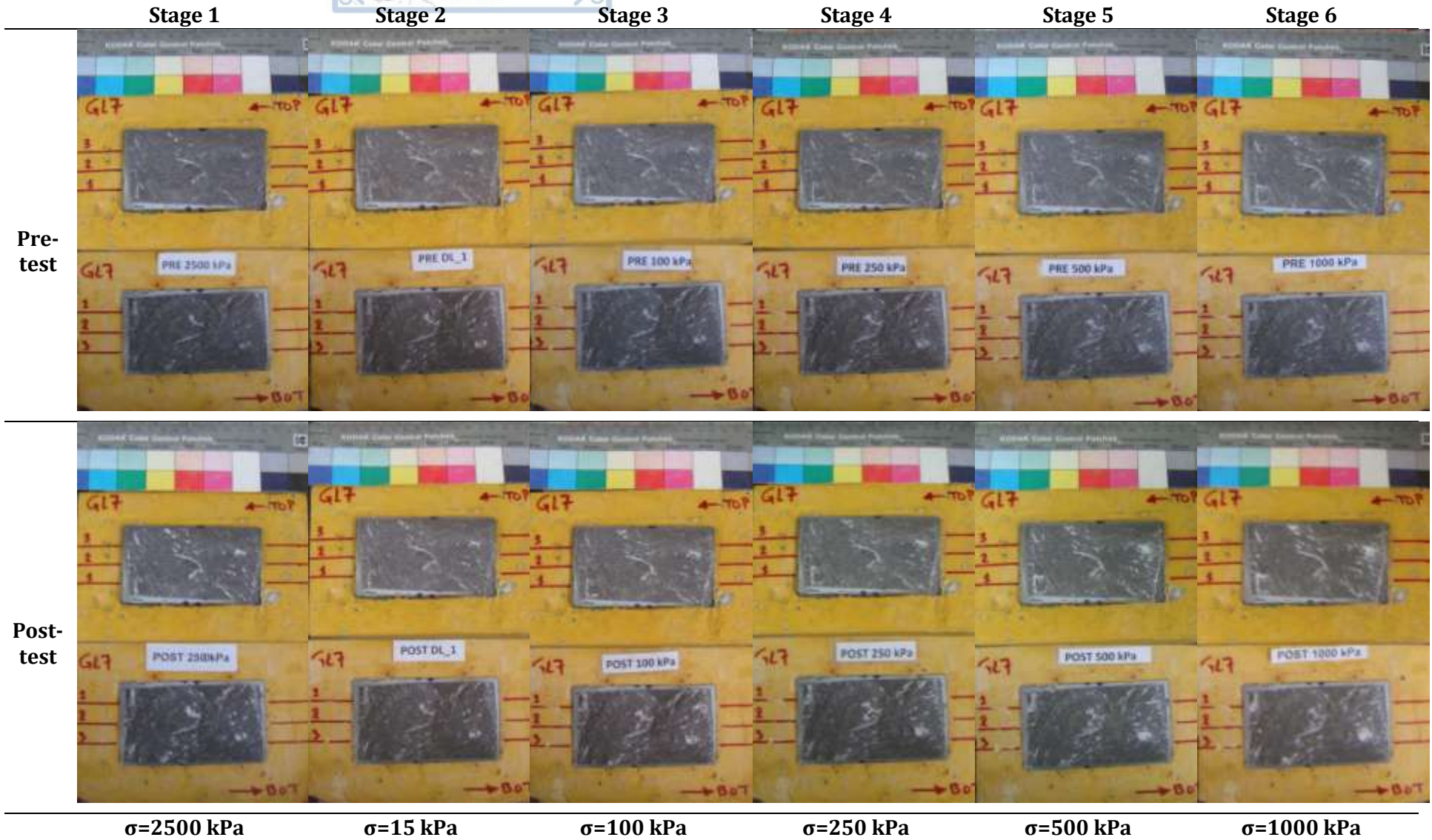
Πίνακας Π.50 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL6 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



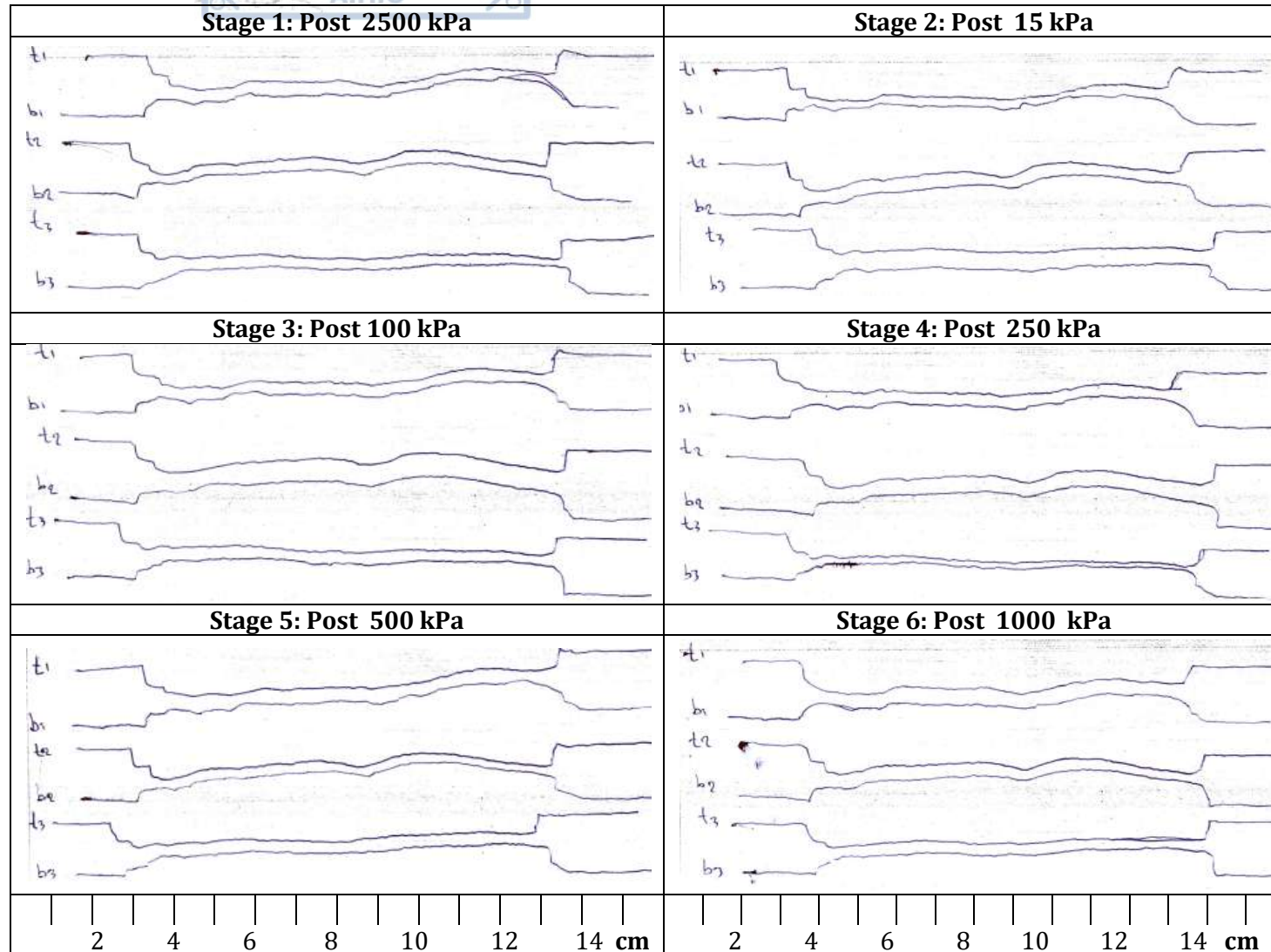
Πίνακας Π.51 Προφίλ τραχύτητας: GL6



Πίνακας Π.52 Φωτογραφίες δειγμάτων ασβεστόλιθου GL7 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



Πίνακας Π.53 Προφίλ τραχύτητας: GL7





Πίνακας Π.54

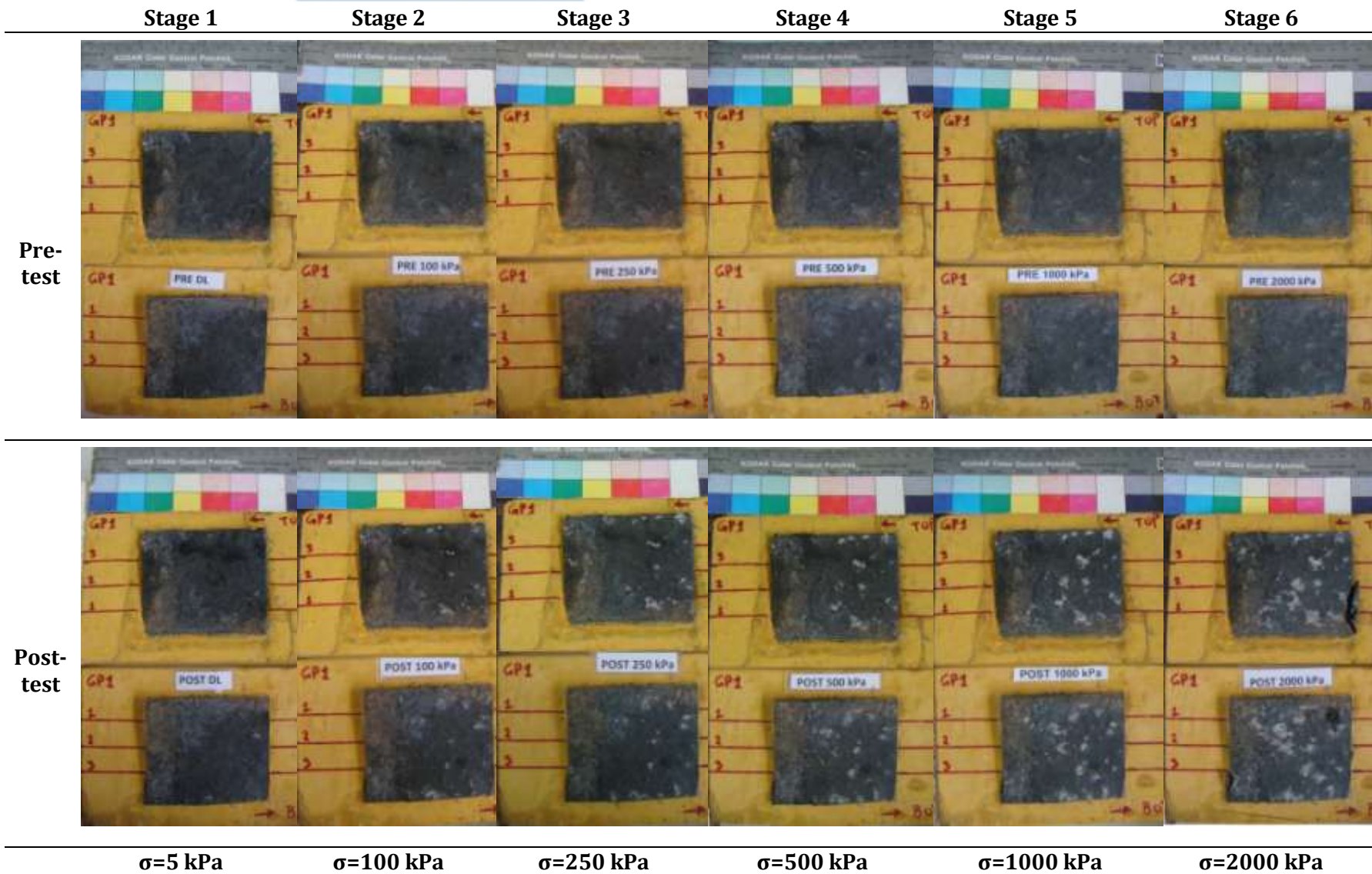
Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης ασυνεχειών δειγμάτων Σερπεντινίτη GP

α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος <i>b</i> mm	Πλάτος <i>h</i> mm	Ορθή τάση σ_n kPa	Μέγιστη διατμητική τάση τ_{peak} kPa	Γωνία διαστολής ψ (°)	Μέγιστη γωνία διαστολής ψ_{max} (°)	Γωνία διαστολής ψ_0 (°)	Ρυθμός διαστολής $\tan\psi$	Ορθή τάση σ_i MPa	Διατμητική αντοχή τ_i MPa	Μη διαστολική Γωνία τριβής ϕ_m (°)	Ανηγγμένη διατμητική μετατόπιση $\Delta H/L_0$ (%)	Διατμητική δυσκαμψία k_{50} MPa/mm	Παραμένουσα διατμητική αντοχή kPa	
1	GP1	91,74	80,17	5	12	38,7	36,0	36,0	0,73	0,01	0,01	31,6	0,1%		3,5	
2				28	42	33,6	33,6	33,6	0,66	0,04	0,02	23,5	0,2%			17,5
3				50	93	29,1	31,3	29,1	0,56	0,08	0,05	32,6	0,6%		0,19	37,5
4				100	110	26,5	26,5	26,5	0,50	0,12	0,05	21,3	0,8%		0,20	60
5				250	141	12,6	14,8	12,6	0,22	0,27	0,08	16,8	2,5%		0,11	130
6				500	489	19,5	21,6	19,5	0,35	0,60	0,28	24,8	3,5%		0,29	320
7				1000	908	16,4	19,8	16,4	0,30	1,17	0,56	25,8	4,1%		0,46	600
8				2000	1509	10,4	11,6	10,4	0,18	2,20	1,10	26,6	2,8%		0,86	1270
9	GP2	103,80	61,20	13	8	7,8	13,0	13,0	0,23	0,01	0,01	19,9	0,3%		7	
10				500	331	4,1	7,6	4,1	0,07	0,52	0,29	29,5	4,0%		0,18	310
11				1000	612	2,1	6,1	2,1	0,04	1,02	0,57	29,4	5,0%		0,22	570
12				2000	1162	3,7	4,9	3,7	0,06	2,07	1,03	26,4	8,3%		0,42	1130
13				100	43	3,6	7,5	3,6	0,06	0,10	0,04	19,9	4,3%		0,31	43,5
14				250	151	3,4	5,1	3,4	0,06	0,26	0,14	27,7	8,9%		0,15	145
15	GP3	110,00	85,00	9	16	22,6	23,1	23,1	0,43	0,01	0,01	37,1	0,3%		3	
16				100	99	13,9	32,0	13,9	0,25	0,12	0,07	30,7	4,1%		0,30	95
17				250	278	19,2	19,3	19,2	0,35	0,31	0,17	28,8	1,4%		0,21	220
18				500	404	14,0	16,3	14,0	0,25	0,57	0,26	24,9	3,4%		0,25	350
19				1000	753	9,7	13,0	9,7	0,17	1,10	0,57	27,3	2,8%		0,35	680
20				2000	1165	7,1	9,0	7,1	0,12	2,11	0,90	23,1	3,1%		0,79	1000
21	GP4	106,00	86,00	10	0	4,4	7,5	7,5	0,13	0,01	0,00	-7,5	1,0%		3	
22				1000	718	8,8	9,8	8,8	0,16	1,09	0,55	26,9	4,0%		0,71	600
23				1500	833	4,1	5,5	4,1	0,07	1,55	0,72	24,9	4,7%		0,52	800
24				2000	1016	4,7	6,1	4,7	0,08	2,07	0,85	22,3	7,7%		0,76	950
25				250	136	1,4	7,0	1,4	0,02	0,25	0,13	27,2	2,0%		0,30	110
26				750	389	1,4	6,3	1,4	0,02	0,76	0,37	26,0	3,0%		0,14	330

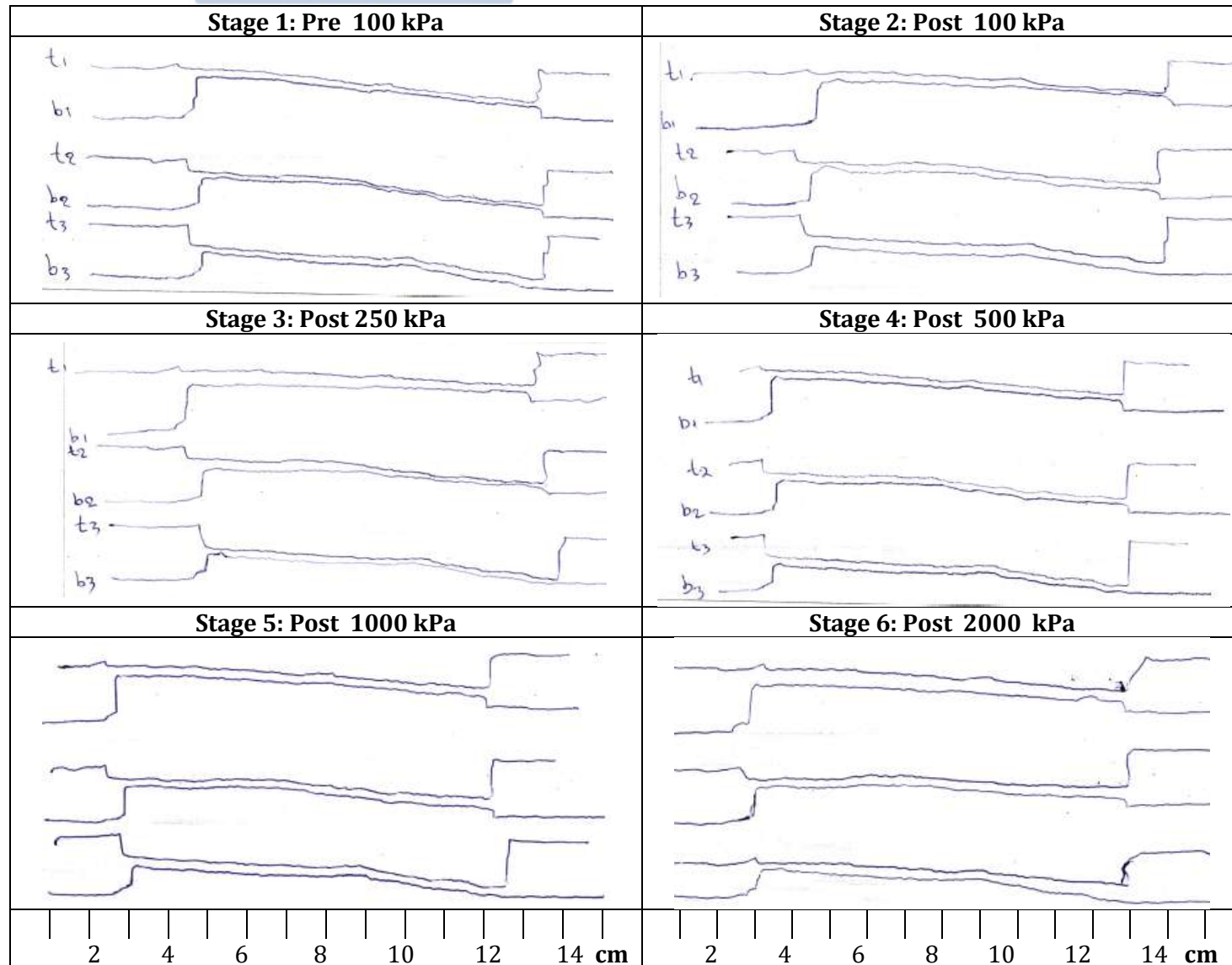
α/α	Κωδικός Δείγματος	Μήκος <i>b</i> mm	Πλάτος <i>h</i> mm	Ορθή τάση <i>σ_n</i> kPa	Μέγιστη διατμητική τάση <i>τ_{peak}</i> kPa	Γωνία διαστολής <i>ψ</i> (°)	Μέγιστη γωνία διαστολής <i>ψ_{max}</i> (°)	Γωνία διαστολής <i>ψ₀</i> (°)	Ρυθμός διαστολής <i>tanψ</i>	Ορθή τάση <i>σ_i</i> MPa	Διατμητική αντοχή <i>τ_i</i> MPa	Μη διαστολική Γωνία τριβής <i>φ_m</i> (°)	Ανηγμένη διατμητική μετατόπιση <i>ΔH/L₀</i> (%)	Διατμητική δυσκαμψία <i>k_{s50}</i> MPa/mm	Παραμένουσα διατμητική αντοχή kPa
27				11	7	-1,3	1,3	1,3	0,02	0,01	0,01	31,5			5,5
28				100	42	0,0	2,6	0,0	0,00	0,10	0,04	22,9			40
29	GP_flat	110,63	71,57	250	144	-1,3	1,3	-1,3	-0,02	0,25	0,15	31,2			140
30				500	298	-2,4	0,0	-2,4	-0,04	0,49	0,32	33,2			290
31				1000	568	-0,9	1,3	-0,9	-0,02	0,99	0,58	30,5			560

Πίνακας Π.55

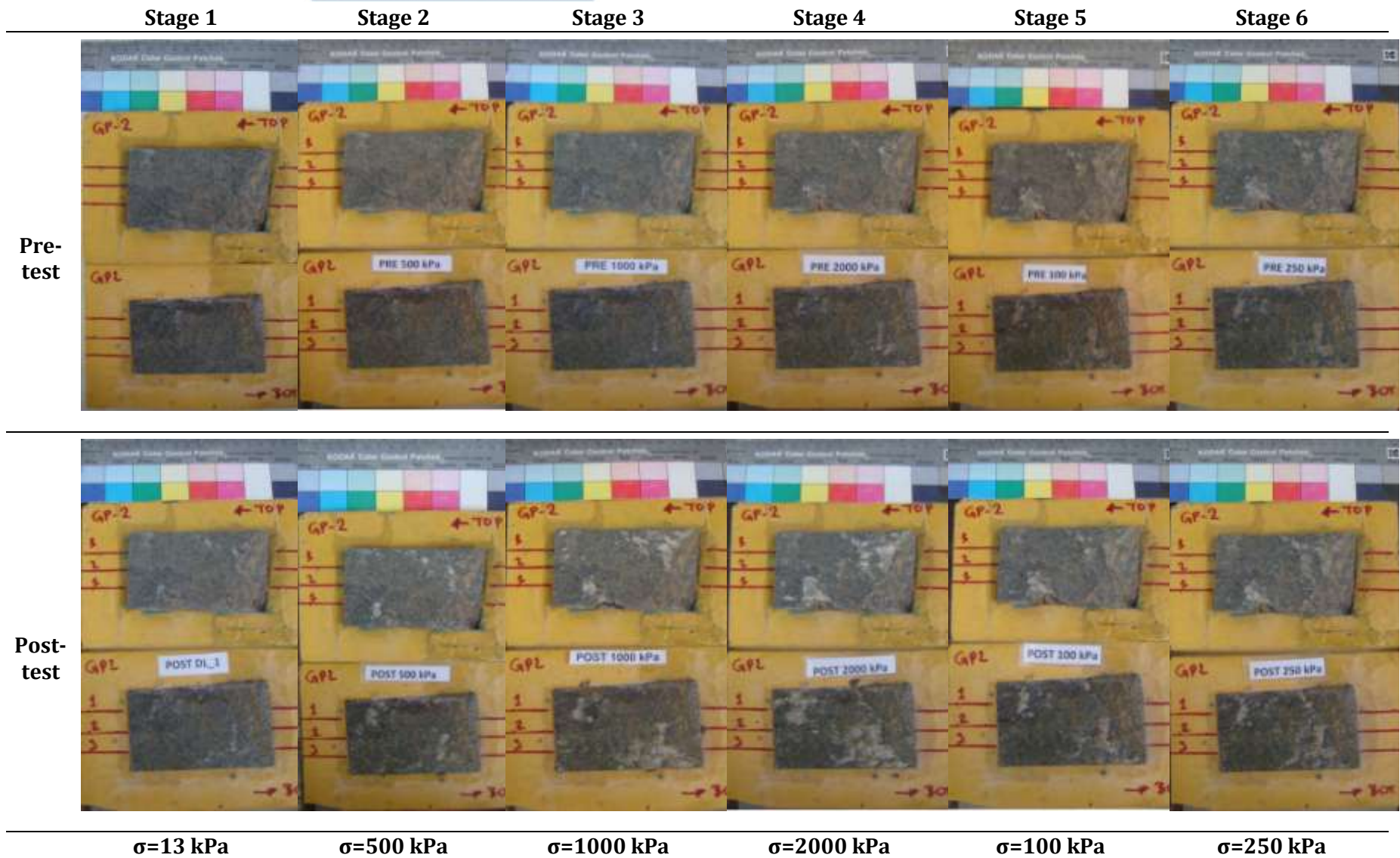
Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP1 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



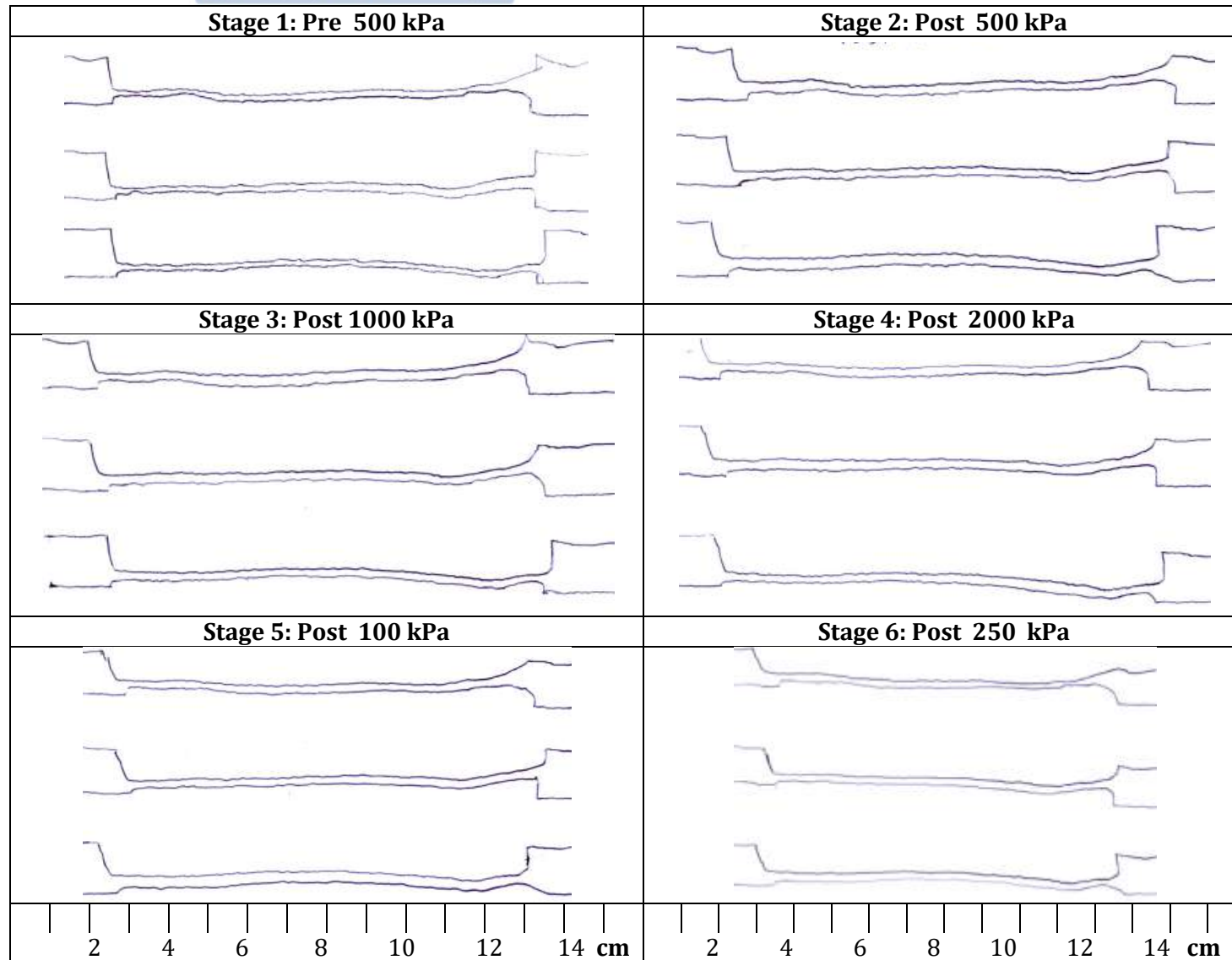
Πίνακας Π.56 Προφίλ τραχύτητας: GP1



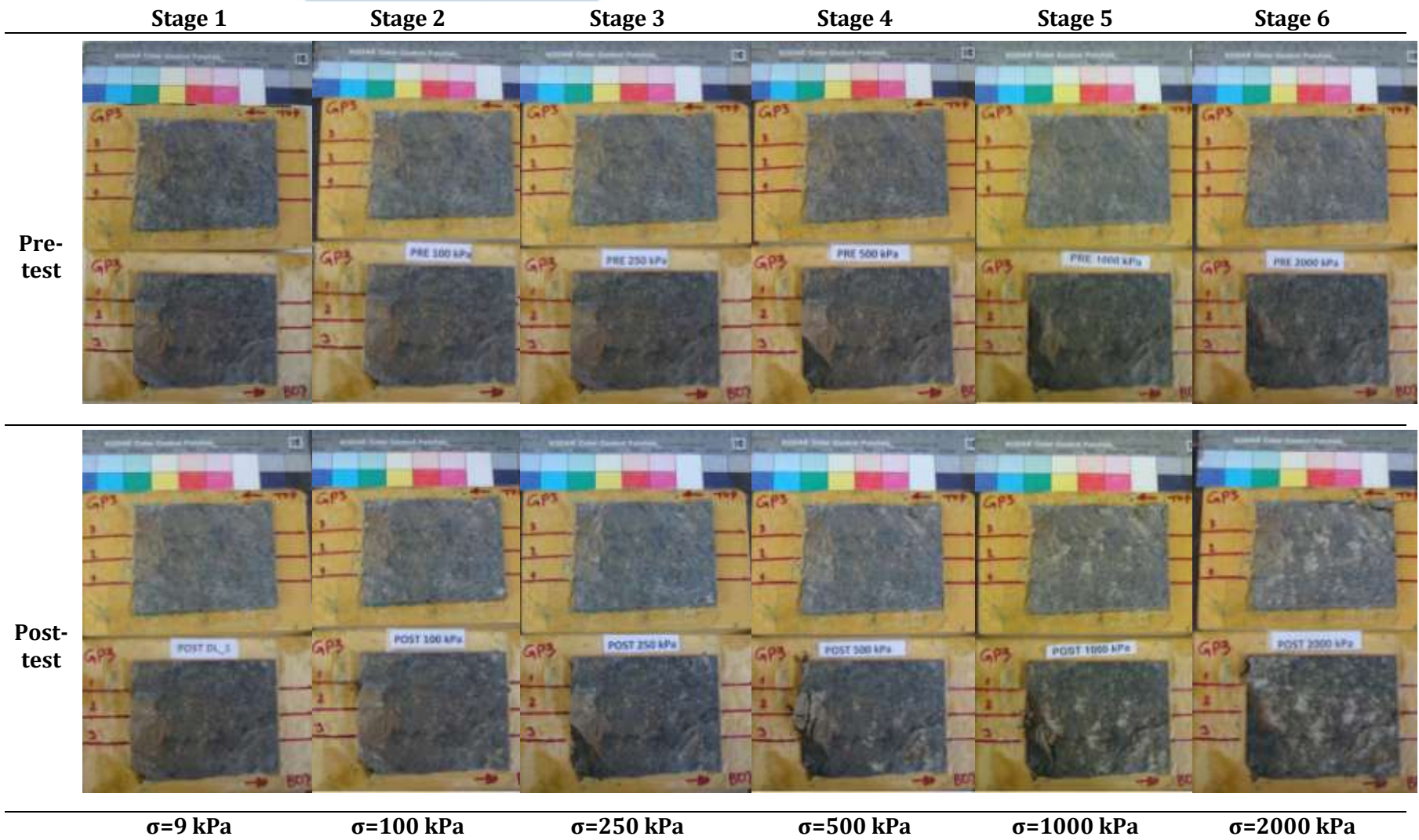
Πίνακας Π.57 Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP2 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



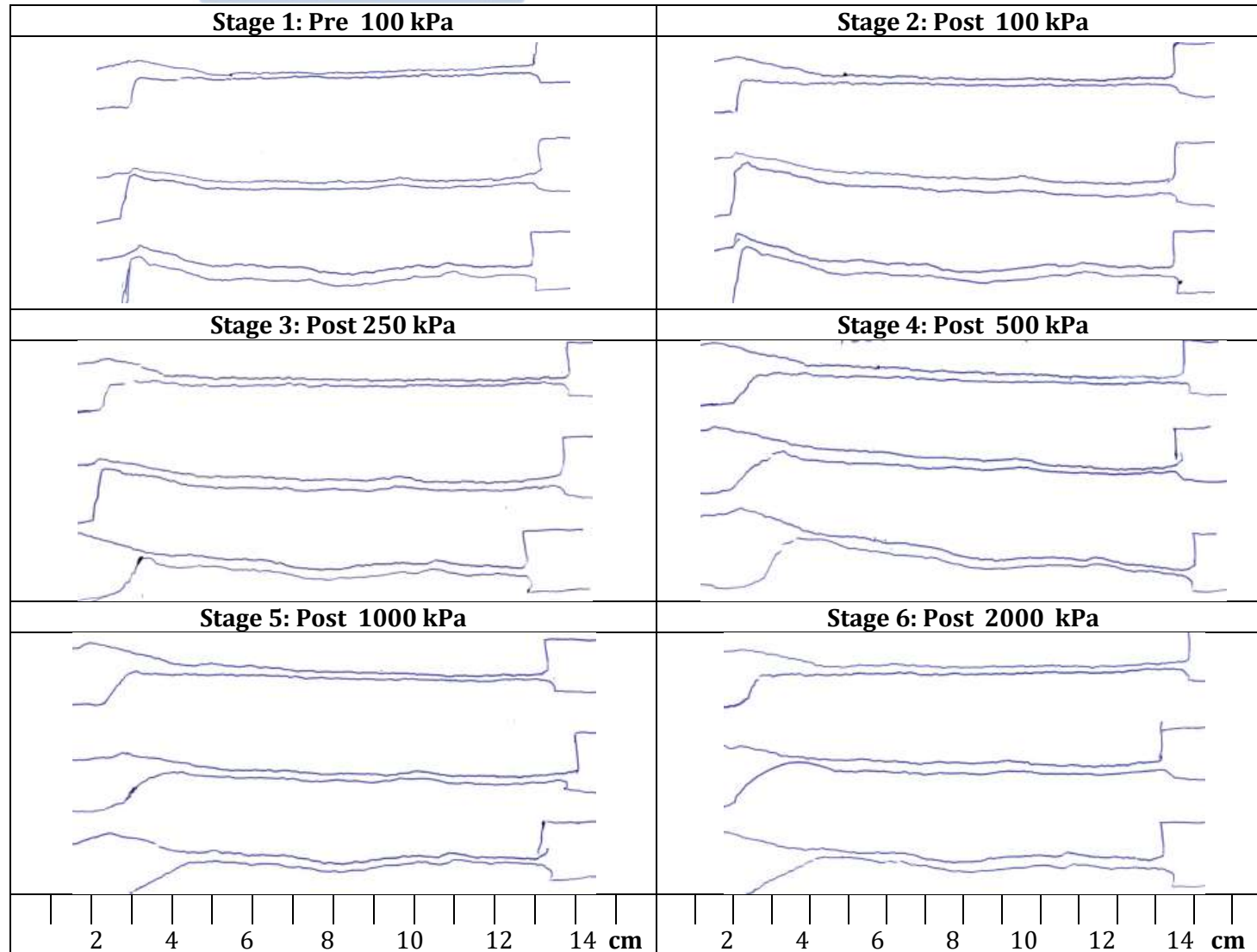
Πίνακας Π.58 Προφίλ τραχύτητας: GP21.θ



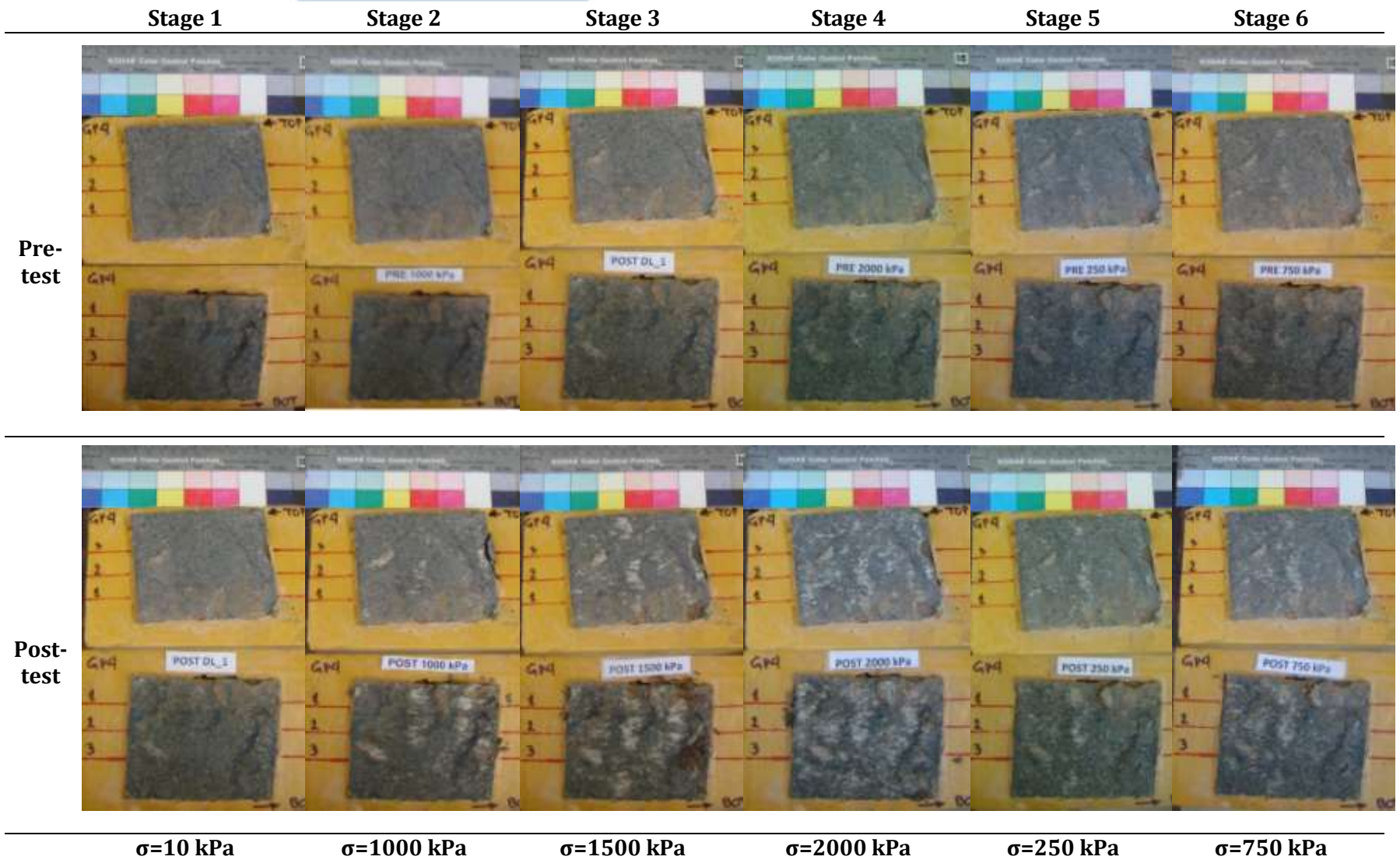
Πίνακας Π.59 Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP3 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



Πίνακας Π.60 Προφίλ τραχύτητας: GP3Θ



Πίνακας Π.61 Φωτογραφίες δειγμάτων Σερπεντινίτη GP4 από δοκιμές άμεσης διάτμησης ασυνεχειών



Πίνακας Π.62 Προφίλ τραχύτητας: GP4

