

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

« Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ »



Προπτυχιακός Φοιτητής: Αιμήλ Αμπντουλμάνοβ

Επιβλέπων Καθηγητής: Νομικός Π. Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

« Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ »

Προπτυχιακός Φοιτητής: Αιμήλ Αμπντουλμάνοβ

Επιβλέπων Καθηγητής: Νομικός Π. Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις Νομικός, Π.Π., Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. Σοφιανός Α.Ι., Καθηγητής Ε.Μ.Π..... Λουπασάκης Κ., Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.....

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Οφείλω να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Παύλο Νομικό για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων. Παρά τις αυξημένες υποχρεώσεις του, υπήρξε πάντα πρόθυμος να μου προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του για τη βαθύτερη κατανόηση της περιοχής των εργαστηριακών δοκιμών στη Μηχανική των Πετρωμάτων.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, κ. Κοτσάνη Δημήτριο για την παραχώρηση των δοκιμίων πετρωμάτων από την Ανατολική Αττική, για την αδιάλειπτη συνεισφορά του στη διεξαγωγή των δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Ο κ. Κοτσάνης ήταν πάντα διαθέσιμος να ασχοληθεί με κάθε απορία μου σχετική με ακαδημαϊκά ζητήματα.. Τον ευχαριστώ θερμά για τις ιδέες και τη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Χωρίς την καταλυτική συμβολή του τόσο σε προσωπικό όσο και σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η ολοκλήρωσή της θα ήταν αδύνατη. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαρίστω τους καθηγητές της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ιδιαίτερα τον κ. Μπενάρδο Ανδρέα και κ. Σοφιανό Αλέξανδρο για την διέγερση του ενδιαφέροντος και τη δημιουργία κινήτρων για την αφοσίωση στο πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο των Υπογείων Έργων.

Σε αυτό το σημείο θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους ανθρώπους, εντός και εκτός του ακαδημαϊκού περιβάλλοντος, που υπήρξαν σημαντικοί πόλοι στη ζωή μου, προσδίδοντας την απαιτούμενη ισορροπία σε προσωπικό επίπεδο. Θέλω ακόμη να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την Καθηγήτρια Φυσικοθεραπείας στο Τ.Ε.Ι. Αθήνας, κ. Παλίνα Καρακασίδου, που με βοήθησαν να ανακάμψω από προβλήματα υγείας. Βέβαια, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, των οποίων η υποστήριξη και η πίστη στις δυνατότητες μου αποτέλεσε αρωγός σε όλους τους στόχους μου, και οι οποίοι με ανέθρεψαν σε ένα ειδυλλιακό περιβάλλον χωρίς καμία στέρηση. Την παρούσα εργασία την αφιερώνω στο πρότυπό μου, τη μητέρα μου Ρόζα.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής εργασίας, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραματικών εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής - ανεμπόδιστης θλίψης και τριαξονικής θλίψης.

Η πρώτη σειρά πειραματικών δοκιμών περιλαμβάνει δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου, έλεγχο παραμόρφωσης και με έλεγχο αξονικής βράχυνσης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με παράλληλη καταγραφή των αξονικών και διαμετρικών μετατοπίσεων – βραχύνσεων, των τροπών αλλά και της δραστηριότητας ακουστικής εκπομπής με αισθητήρες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν διαφορετικοί ρυθμοί φόρτισης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αξιοποιήθηκαν στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων. Οι δοκιμές αυτές είχαν ως αντικείμενο τη διερεύνηση των μηχανικών παραμέτρων (κορυφαία αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) και της επίδρασης της διαδρομής, του τρόπου και του ρυθμού φόρτισης στην αντοχή των δοκιμίων πετρωμάτων και συνεπώς και της περιβάλλουσας αστοχίας που προκύπτει στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Από την αξιολόγηση των διαγραμμάτων της τάσης συναρτήσει του χρόνου και των γεγονότων ακουστικής εκπομπής μελετήσαμε την εξέλιξη της αστοχίας ενός δοκιμίου που υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη. Ακόμη εξετάστηκαν οι τρόποι αστοχίας και επιχειρήθηκε μία μεθοδολογία διόρθωσης για τον υπολογισμό της πραγματικής βράχυνσης δοκιμίου με αναγωγή από τη βράχυνση που καταγράφουν οι μορφοτροπείς αξονικής βράχυνσης μεταξύ των πλακών φόρτισης της συσκευής και τη βράχυνση των πλακών και εμβόλων σφαιρικής έδρασης της τριαξονικής θλίψης.

Η δεύτερη σειρά πειραματικών δοκιμών περιλαμβάνει δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και εξέταση των μηχανικών παραμέτρων των δοκιμίων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πολλαπλής αστοχίας με δύο εναλλακτικές διαδρομές φόρτισης και μεμονωμένες δοκιμές και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκε στη εκτίμηση της εγκυρότητας και της συσχέτισης της περιβάλλουσας αστοχίας που προκύπτει από δοκιμές πολλαπλής αστοχίας σε σχέση με αυτή που προκύπτει από μεμονωμένες δοκιμές. Επιχειρήθηκε εκ νέου μεθοδολογία διόρθωσης της βράχυνσης που καταγράφουν οι μορφοτροπείς αξονικής βράχυνσης για την εύρεση της πραγματικής βράχυνσης των δοκιμίων. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης για την αξιολόγηση της επίδρασης των δοκιμών τριαξονικής θλίψης στις μηχανικές παραμέτρους των δοκιμίων όπως το μέτρο ελαστικότητας και η κορυφαία αντοχή.

Η τρίτη σειρά πειραματικών δοκιμών περιλαμβάνει δοκιμές πολλαπλής αστοχίας σε δοκίμια Πετρωμάτων από την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Αττικής με παράλληλη καταγραφή της δραστηριότητας ακουστικής εκπομπής ενώ επιχειρήθηκε επιπλέον η καταγραφή των ακτινικών, διαμετρικών μετατοπίσεων με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψαν συμπεράσματα για τις μηχανικές παραμέτρους των πετρωμάτων, όπως λόγος Poisson, γωνία εσωτερικής τριβής και συνοχή. Εκτελώντας αρκετά στάδια – διαδοχικούς κύκλους φόρτισης με διαδοχική αύξηση της πλευρικής πίεσης παρατηρήθηκε η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση και η επίδραση της πλευρικής πίεσης στη μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ακουστικής δραστηριότητας αποτυπώθηκε η διακύμανση της παραμέτρου b – value καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής πολλαπλής αστοχίας και σε συνδυασμό με τα διαγράμματα τάσης συναρτήσει χρόνου και γεγονότων ακουστικής δραστηριότητας εξάγαμε συμπεράσματα για την εξέλιξη της αστοχίας ενός πετρώματος με την πρόοδο μιας δοκιμής.

ABSTRACT

During this diploma thesis, which was carried out in the Tunnelling Laboratory of the School of Mining and Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens, three experimental series of uniaxial and triaxial compression tests were conducted.

The first experimental series includes load control, displacement control and axial deformation control uniaxial tests on samples of cement clay with the simultaneous recording of the axial and lateral - radial displacements and strains, as well as the implementation of the method of acoustic emission using transducers of piezoelectric elements. Additionally, different loading rates were implied and the results of the analysis of the experimental data lead to crucial conclusions. These tests were conducted in aim of the investigation of the mechanical properties of samples (failure strength, Young modulus, Poisson ratio) and of the effect of the loading path and rate on the strength of rocks and eventually on the failure envelope which is formed from triaxial testing. From the evaluation of the graphs of stress versus time and acoustic emission Vectors (Hits), we studied the evolution of the failure procedure of a uniaxial compression sample. Moreover, failure modes were investigated under different loading paths and rates and a correction method for the reducted calculation of the displacement of the specimen from the displacement that is recorded by the Linear Variable Differential Transducers between the loading platens of the apparatus and the displacement of the upper and lower loading platen and conrod of the triaxial instrumentation.

The second series of experimental tests include traxial compression tests on cement clay specimens and evaluation of the mechanical properties of the specimens. Multiple failure state tests of two different loading paths and individual ones were conducted and the results induced by the comparison between the two type of tests lead to the validation of the multiple failure state tests as concerned with the failure envelopes of the specimens. A new correction method was attempted in the same direction as above. Eventually, uniaxial compression tests were conducted to evaluate the effect of the triaxial testing on the mechanical properties of the specimens, that is the Young modulus and the failure strength.

The third series of experimental test include triaxial compression tests of multiple failure states on marble, sandstone and limestone specimens of East Attica. During these tests, acoustic emission method was implemented and axial, radial deformation recording by strain gauges inside the triaxial cell and on the surface of the specimen was attempted. The evaluation of the analysis of these tests lead to the acknowledgement of the mechanical properties of rocks (poisson ratio, cohesion and internal friction angle). Conducting multiple failure states, with sequential rises in the confining pressure, the transition from brittle to ductile state of mechanical behavior was observed while the influence of the confining pressure on the mechanical behavior of the specimen was better understood. The evaluation of analysis of the acoustic emission data lead to the calculation of the fluctuation of the b – value parameter throughout the whole triaxial testing while the analysis of stress versus time and acoustic emission Vectors (Hits) lead to substantial conclusions on the multiple triaxial failure state progress of a specimen.

Περιεχόμενα

Μέρος Α΄: Θεωρητικά στοιχεία τριαξονικής δοκιμής

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή ... σελ.1
 - 1.1. Συμβατική τριαξονική δοκιμή ... σελ.3
 - 1.2. Τριαξονική δοκιμή Γενικά στοιχεία ... σελ.3
- Κεφάλαιο 2: Γενικός εργαστηριακός εξοπλισμός των δοκιμών τριαξονικής θλίψης ...σελ.7
 2.1. Τριαξονικό κελί ...σελ.7

2.2. Σύστημα - Συσκευή φόρτισης για την επιβολή του αξονικού φορτίου (L) με δυνατότητα ελέγχου του ρυθμού φόρτισης ...σελ.11

- 2.3. Συσκευή εφαρμογής της πλευρικής πίεσης ... σελ.13
- 2.4. Συστήματα πίεσης του υγρού των πόρων ...σελ.15
- 2.5. Συστήματα επιβολής και διατήρησης θερμοκρασιών ... σελ.18
- 2.6. Εξοπλισμός μέτρησης και καταγραφής φορτίων, πιέσεων και μετατοπίσεων ...σελ.20
 - 2.6.1. Μέτρηση και καταγραφή του αξονικού φορτίου ...σελ.20
 - 2.6.2. Αξονική τροπή (ανηγμένη παραμόρφωση) και μετατόπιση βράχυνση . ..σελ.21
 - 2.6.3. Ακτινική τροπή και μετατόπιση ...σελ.23
 - 2.6.4. Μετρήσεις της τροπής ... σελ.24
 - 2.6.5. Ογκομετρική τροπή και μετατόπιση ...σελ.25
 - 2.6.6. Θερμοκρασία ... σε
λ.26
 - 2.6.7. Καταγραφή και αναπαράσταση δεδομένων ...σελ.26
- Κεφάλαιο 3: Προτεινόμενες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της αντοχής των πετρωμάτων σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης ...σελ.28
 - 3.1. Προετοιμασία του δοκιμίου Προτεινόμενη μέθοδος κατά ISRM (1983) ... σελ.28
 - 3.2. Γενικές οδηγίες για την εκτέλεση της τριαξονικής δοκιμής ... σελ.29
 - 3.3. Διαδικασία δοκιμής τύπου Ι (ανεξάρτητη δοκιμή) ... σελ.30
 - 3.4. Διαδικασία δοκιμής τύπου ΙΙ (δοκιμή πολλαπλής αστοχίας) ... σελ.31
 - 3.5. Διαδικασία δοκιμής τύπου ΙΙΙ δοκιμή συνεχούς αστοχίας ... σελ.32
 - 3.6. Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών ... σελ.33
 - 3.7. Σημειώσεις Παρατηρήσεις επί των διαδικασιών δοκιμών τριαξονικής θλίψης ... σελ.34
- Κεφάλαιο 4: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη τριαξονική δοκιμή ...σελ. 36
 - 4.1. Επίδραση της πλευρικής πίεσης στη αντοχή των πετρωμάτων...σελ.36
 - 4.1.1. Μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά κατά τη φόρτιση των δοκιμίων ... σελ. 41
 - 4.1.2. Μεταβατικές διεργασίες στα πετρώματα τύπου Α ... σελ.43
 - 4.1.3. Μεταβατικές διεργασίες στα πετρώματα τύπου Β ... σελ.43
 - 4.1.4. Μετάβαση από την ψαθυρή στην κατακλαστική κατάσταση ...σελ.43
 - 4.2. Επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο (h/d) στην αντοχή σε τριαξονική θλίψη ...σελ.44
 - 4.3. Η επίδραση του τρόπου φόρτισης στην αντοχή σε τριαξονική θλίψη ... σε
λ.44

- 4.3.1. Έλεγχος των παραμορφώσεων (deformation-controlled test) ... σελ. 45
- 4.3.2. Έλεγχος των τάσεων ή έλεγχος του φορτίου (load-controlled test) ... σελ. 45
- 4.4. Επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων στην αντοχή των πετρωμάτων ... σελ. 46
- 4.5. Επίδραση της χημικής σύστασης του υγρού των πόρων στην αντοχή των πετρωμάτων ...σελ.47
- Κεφάλαιο 5: Μηχανικές παράμετροι κατά την καταπόνηση σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη ...σελ. 48
 - 5.1. Παράμετροι αντοχής ... σελ. 48
 - 5.2. Εσωτερική Τριβή και Συνοχή ...σελ. 48
 - 5.3. Παράμετροι Ελαστικότητας ... σελ. 48
 - 5.4. Αντοχή του Πετρώματος σε Θλίψη ...σελ.48
 - 5.5. Μονοαξονική Θλιπτική Καταπόνηση σε Εργαστηριακά Δοκίμια ...σελ.49
 - 5.6. Απλοποιημένη Θεώρηση της Εργαστηριακής Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης ...σελ.50
 - 5.7. Πραγματική Θεώρηση της Εργαστηριακής Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης και της Πολυαξονικής Θλιπτικής καταπόνησης σε Εργαστηριακά Δοκίμια ...σελ. 50
 - 5.8. Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης ...σελ.52
 - 5.9. Το Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης σε Εργαστηριακά Δοκίμια ... σελ.53
 - 5.10. Συμπεριφορά του πετρώματος σε θλίψη ... σελ.56
 - 5.11. Επίδραση των Συσκευών Μέτρησης σε Θλιπτικές Δοκιμές ... σελ.59
 - 5.12. Ρυθμός Φόρτισης σε Θλιπτικές Δοκιμές ... σελ.61
- Κεφάλαιο 6: Τύποι και κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος ... σελ.62
 - 6.1. Αντοχή και αστοχία του πετρώματος ...σελ.62
 - 6.2. Τρόποι Αστοχίας των Πετρωμάτων ... σελ.63
 - 6.3. Τύποι αστοχίας των πετρωμάτων που υποβάλλονται σε τριαξονική καταπόνησησελ.64
 - 6.4. Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb \ldots σελ.67
 - 6.4.1. Συστάσεις για τη χρήση του κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb …σελ.69
 - 6.5. Το κριτήριο αστοχίας Hoek Brown…σελ.69
 - 6.5.1. Συστάσεις για τη χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek Brown ... σελ.71
- Κεφάλαιο 7: Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής ... σελ.72
 - 7.1. Ορισμός και προέλευση της Ακουστικής Εκπομπής ... σελ.72
 - 7.2 Σήματα ΑΕ ... σελ.73
 - 7.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη σημάτων ΑΕ ... σελ.75
 - 7.4. Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ ... σελ76
 - 7.4.1. Αισθητήρες και προενισχυτές ... σελ.76
 - 7.4.2. Μονάδα επεξεργασίας ... σελ.77
 - 7.5.Εφαρμογές της ΑΕ ...σελ.79
 - 7.6. Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ ... σελ.79
 - 7.7. Η παράμετρος b value ...σελ.81
 - 7.8. Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής AE ... σελ.82
 - 7.9. Φαινόμενο Kaiser ... σελ.82
 - 7.10. Εφαρμογές ΑΕ επί τόπου ...σελ.83

- 7.11. Εγκατάσταση μορφοτροπέων ... σελ.84
 - 7.11.1. Εγκατάσταση των μορφοτροπέων στις μονοαξονικές δοκιμές ... σελ.84
 - 7.11.2. Εγκατάσταση των μορφοτροπέων στις τριαξονικές δοκιμές ... σελ. 85
- 7.12. Έλεγχος λειτουργίας και καταγραφής των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής ...σελ.87

Μέρος Β΄: Εργαστηριακές δοκιμές

- Κεφάλαιο 8: 1^η σειρά πειραματικών δοκιμών Προκαταρκτικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης...σελ. 88
 - 8.1. Προετοιμασία δοκιμίων ...σελ.88
 - 8.2. Μέτρηση διαστάσεων γεωμετρικών χαρακτηριστικών δοκιμίων ...σελ.90
 - 8.3. Προσαρμογή διάταξης περιφερειακού επιμηκυνσιόμετρου με αλυσίδα πάνω στο δοκίμιο για τη μέτρηση των ακτινικών μετατοπίσεων ...σελ.91
 - 8.4. Προσαρμογή των βελόμετρων μορφοτροπέων και του αισθητήρα ακουστικής εκπομπής πάνω στο δοκίμιο ...σελ.92
 - 8.5. Δοκιμές με έλεγχο φορτίου ... σελ.94
 - 8.6. Δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης ... σελ.100
 - 8.7. Δοκιμές με έλεγχο αξονικής βράχυνσης ... σελ.109
 - 8.8. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σχολιασμός / συμπεράσματα επί των δοκιμών ...σελ.119
 - 8.8.1. Στάδια της διαδρομής φόρτισης και αστοχίας των δοκιμίων σκυροδέματος ...σελ.120
 - 8.8.2. Σχολιασμός επί των διαγραμμάτων ακουστικής εκπομπής ... σελ. 121
- Κεφάλαιο 9: Υπολογισμός της βράχυνσης των δοκιμίων που υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη από τις μετρήσεις των μορφοτροπέων – LVDTs πάνω στις πλάκες ...σελ.122
 - 9.1. Έλεγχος της καταγραφής σημάτων ακουστικής εκπομπής σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με προσαρμογή δύο αισθητήρων στο πάνω και κάτω έμβολο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής ...σελ.125
- Κεφάλαιο 10: 2^η σειρά πειραματικών δοκιμών δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ...σελ.127
 - 10.1. Πειραματική διαδικασία ... σελ. 127
 - 10.2. Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης ...σελ.132
- Κεφάλαιο 11: 3^η σειρά πειραματικών δοκιμών δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια πετρωμάτων ...σελ.149
 - 11.1. Δοκιμές με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) και με εφαρμογή της μεθόδου ακουστικής εκπομπής ...σελ.153
- Κεφάλαιο 12: Συμπεράματα ... σελ.185
- Βιβλιογραφικές αναφορές ... σελ. 192

ΜΕΡΟΣ Α΄: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι δοκιμές τριαζονικής θλίψης έχουν αποτελέσει για αρκετά χρόνια αντικείμενο έρευνας από πολλούς για την εκτίμηση και κατανόηση της συμπεριφοράς των πετρωμάτων κατά τη φόρτισή τους υπό συνθήκες τριαζονικής θλίψης, δηλαδή υπό τρισδιάστατες εντατικές καταστάσεις, αλλά και για την επαλήθευση μαθηματικών εξισώσεων που έχουν προκύψει από αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσδιορισμού της συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Τα αποτελέσματα τριαζονικών δοκιμών έχουν συντελέσει στην εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών διαφόρων πετρωμάτων και στην κατεύθυνση της διαμόρφωσης των κριτηρίων αστοχίας. Επιπλέον, μέσω των αποτελεσμάτων των τριαζονικών δοκιμών, ερευνητές έχουν αναγνωρίσει πως ο μηχανισμός της ψαθυρής θραύσης δεν είναι ο μόνος που καθορίζει την αντοχή των πετρωμάτων έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζουν όλκιμη - πλαστική συμπεριφορά σε υψηλές τιμές μέσης τάσης.

Τα τελευταία χρόνια, αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης έχει αποτελέσει η χρήση των τριαζονικών δοκιμών για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ερπυσμού, της επίδρασης της θερμότητας στην αντοχή των πετρωμάτων, αλλά και τον προσδιορισμό της επιρροής του φυσικού εντατικού πεδίου στην αποτόνωση και σύγκλιση των τοιχωμάτων που παρουσιάζεται γύρω από γεωτρήσεις και υπόγεια ανοίγματα μεγάλου βάθους. Τα πετρώματα υφίστανται in situ την επίδραση συνθηκών τριαξονικής φόρτισης και η αντοχή τους υπό αυτές τις συνθήκες αξιοποιείται στο σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης στα μεταλλεία και στη μελέτη του μηχανισμού θλίψης και διάτμησης και δημιουργίας ασυνεχειών αλλά και στη διάτρηση βαθιών γεωτρήσεων. Οι έρευνες αυτές επομένως έχουν συντελέσει στην ενίσχυση της κατανόησης των φυσικών μηχανισμών που καθορίζουν την αντοχή και τη συμπεριφορά των πετρωμάτων.

Δοκιμές τριαξονικής θλίψης μπορούν να πραγματοποιηθούν υπό στατικές ή δυναμικές συνθήκες φόρτισης για τη διερεύνηση της αντοχής ή της δυστροπίας, είτε ενός άρρηκτου δοκιμίου πετρώματος, είτε μιας μεμονωμένης ασυνέχειας, είτε ενός συστήματος ασυνεχειών, υπό συγκεκριμένες τιμές θλιπτικών φορτίων, ρυθμών φόρτισης, ενεργού πορώδους και θερμοκρασίας. Συνεπώς, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός πιθανών διαφοροποιήσεων δοκιμών τριαξονικής θλίψης που μπορούν να διεξαχθούν, με επακόλουθες μεταβολές στη διαδικασία, τις πειραματικές διατάξεις και τα συστήματα μέτρησης. Η πιο ευρέως γνωστή και χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή μέθοδος για την επίτευξη συνθηκών τριαξονικής εντατικής κατάστασης περιλαμβάνει την υπέρθεση μιας υδροστατικής πλευρικής πίεσης και μιας μονοαξονικής φόρτισης σε κυλινδρικά δοκίμια που περιβάλλονται από εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη. Δοκιμές τέτοιου είδους αναφέρονται απλά ως «τριαξονικές δοκιμές». Τα βασικά πλεονεκτήματα της εν λόγω διαδεδομένης τεχνικής περιλαμβάνουν : α) ευκολία άσκησης φορτίων και μέτρησης μετατοπίσεων με εργαστηριακές διατάξεις, β) οικονομία προετοιμασίας δοκιμίων πυρηνοληψίας, γ) αξονική συμμετρία, δ) πλευρικός περιορισμός και στεγανότητα δοκιμίων έναντι υδραυλικού περιβάλλοντος με τη χρήση μεμβρανών που περιέχουν τα δοκίμια, ε) δυνατότητα άσκησης υψηλών φορτίων που προσδιορίζονται από τις ακραίες τιμές κύριων τάσεων.



Σχήμα 1: Διάφορες μέθοδοι για τριαξονική θλίψη. Το παχύ βέλος υποδηλώνει τη θλίψη ή στρέψη διαμέσου συμπαγών βάσεων δοκιμίων. Τα λεπτά βέλη υποδηλώνουν τη θλίψη από την υδροστατική πίεση: α) αξονική θλίψη υπό πλευρική πίεση (συμβατική τριαξονική δοκιμή), b) τριαξονική θλίψη από τρία συμπαγή δύσκαμπτα έμβολα, c) θλίψη και στρέψη κοίλου κυλινδρικού δοκιμίου υπό πλευρική υδροστατική πίεση, d) τριαξονική θλίψη από διαξονικά συμπαγή έμβολα και πλευρική υδροαστατική πίεση (κατά Mogi, 1971 a)

Οι κοινώς χρησιμοποιούμενες διατάξεις απεικονίζονται στο σχήμα 2 και περιλαμβάνουν:

- 1. Αξονική διαμήκης θλίψη και πλευρική πίεση
- 2. Αξονική θλίψη με πλευρική πίεση και επίδραση της πίεσης των πόρων
- Αξονικός εφελκυσμός και πλευρική πίεση.



Σχήμα 2: Διάταξη βάσεων δοκιμίων για θλίψη σε ξηρά δοκίμια, θλίψη με πίεση πόρων και για εφελκυσμό (κατά Heard, 1960)

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, τα δοκίμια έχουν σχήμα κυλινδρικό. Στη διάταξη του σχήματος 2 (Vutukuri, 1989) τα δοκίμια των πετρωμάτων και οι χαλύβδινες πλάκες φόρτισης προστατεύονται έναντι του υγρού της πλευρικής πίεσης μέσω των στεγανωτικών καλυμάτων από χαλκό ή ορείχαλκο (πάχους 0.10 - 0.15 mm ή 0.004 - 0.006 in για δοκιμές θλίψης και 0.15 - 0.25 mm ή 0.006 - 0.010 in για δοκιμές εφελκυσμού). Τα καλύματα αυτά είναι στεγανωτικά έναντι των κωνικών επιφανειών του ανώτερου και του κατώτερου εμβόλου με τη χρήση χαλύβδινων στεγανωτικών δακτυλίων. Αρκετά συχνά, εύκαμπτες ελαστικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται αντί των στεγανωτικών καλυμάτων από χαλκό ή ορείχαλκο. Κατά τις δοκιμές με πλευρική πίεση και ενδιάμεση πίεση, τα άκρα των εμβόλων έχουν αρκετά ανοίγματα (3 - 5) διαμέτρου 0,76 mm ή 0.03 in. Στις δοκιμές εφελκυσμού, χρησιμοποιούνται δακτύλιοι για την ευθυγράμμιση των δοκιμίων εντός των κελιών υψηλής πίεσης.

1.1. Συμβατική τριαξονική δοκιμή

Οι δοκιμές χαρακτηρίζονται ως συμβατικές τριαξονικές δοκιμές στην περίπτωση όπου η ενδιάμεση κύρια τάση είναι πάντα ίση με μία εκ των ακραίων κυρίων τάσεων (π.χ. την ελάχιστη κύρια τάση). Ωστόσο, η φόρτιση ενδέχεται να πραγματοποιείται με ανεξάρτητη διαφοροποίηση μεταξύ και των τριών κύριων τάσεων, δηλαδή η ενδιάμεση κύρια τάση να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τη μέγιστη και την ελάχιστη κύρια τάση, οπότε η δοκιμή χαρακτηρίζεται ως πραγματική τριαξονική δοκιμή. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών, ερευνητές έχουν καταλήξει στο ότι αυξάνοντας την ενδιάμεση κύρια τάση, αυξάνεται και η κορυφαία αντοχή των πετρωμάτων. Ωστόσο, η επίπτωση δεν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους συγκριτικά με εκείνη που οφείλεται σε ισοδύναμη αύξηση της ελάχιστης κύριας τάσης (Vutukuri, 1989).

1.2. Τριαξονική δοκιμή – Γενικά στοιχεία

Προτού αναλυθεί διεξοδικά η τριαξονική δοκιμή, σκόπιμο κρίνεται να προσδιοριστούν ορισμένοι όροι σχετικά με τις πειραματικές διατάξεις. Στην τριαξονική δοκιμή, κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε καθεστώς τριαξονικής θλίψης όπου μονοαξονικά θλιπτικά φορτία συνδυάζονται με την άσκηση πλευρικού περιορισμού από την υδροστατική πίεση που περιβάλλει το δοκίμιο. Θεωρητικά, το καθεστώς φόρτισης σε οποιοδήποτε σημείο εντός του δοκιμίου, αποτελείται από μία κύρια τάση προσανατολισμένη παράλληλα στον άξονα αυτό. Οι δύο ισοδύναμες κύριες τάσεις είναι

της ίδιας τάξης μεγέθους με την ασκούμενη πλευρική υδραυλική πίεση, ενώ η τρίτη κύρια τάση αποκλίνει από την τιμή αυτή. Η πίεση που ασκεί το υδραυλικό περιβάλλον καλείται πίεση πλευρικού περιορισμού ή πλευρική πίεση. Η μέση τάση που ασκείται έναντι του δοκιμίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad (1)$$

Η πίεση φορτίου που εφαρμόζεται στα άκρα του δοκιμίου (επίπεδες βάσεις) αναφέρεται ως αξονική τάση. Το μέγεθος κατά το οποίο, το αξονικό φορτίο αποκλίνει από την πλευρική πίεση αναφέρεται ως διαφορική ή αποκλίνουσα τάση και υπολογίζεται ως η διαφορά της αξονικής τάσης με την πλευρική πίεση σύμφωνα με τον τύπο: $(\sigma_1 - \sigma_3)$. Η ακόλουθη σύμβαση χρησιμοποιείται κοινώς στη διεθνή βιβλιογραφία της Μηχανικής των Πετρωμάτων:

- (i) Η πίεση πλευρικού περιορισμού θεωρείται θετική.
- (ii) Η μέγιστη κύρια τάση (παράλληλα στον άξονα του δοκιμίου) εφαρμόζει το μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο.
- (iii) Η μέγιστη, ενδιάμεση και ελάχιστη κύρια τάση συμβολίζονται ως σ_1, σ_2 και σ_3 αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην πράξη, οι κύριες τάσεις ενδέχεται να μη ταυτίζονται με τους άξονες του δοκιμίου λόγω των ανομοιογενειών εντός του δοκιμίου ή άλλων παραμέτρων όπως η επίδραση των συνοριακών συνθηκών.

Τα ουσιώδη επιμέρους τμήματα των εργαστηριακών πειραματικών διατάξεων τριαξονικών δοκιμών περιλαμβάνουν ένα δοχείο πίεσης (γνωστό ως τριαξονικό κελί), το σύστημα αξονικού φορτίου, και τη συσκευή εφαρμογής της πλευρικής πίεσης όπως αποτυπώνονται στο **σχήμα 3** (κατά Elliott M.G., 1989). Ανάλογα με το σχεδιασμό του τριαξονικού κελιού, το φορτίο που ασκείται από το σύστημα αξονικού φορτίου, είναι ίσο είτε με τη μέγιστη κύρια τάση είτε με την αποκλίνουσα τάση. Κατά τον Elliott M.G. (1989) σχεδόν όλη η διάταξη του οργάνου τριαξονικής δοκιμής για εφαρμογές βραχομηχανικής λειτουργεί σε πλευρικές πιέσεις έως 300 – 500 MPa . Δύο εναλλακτικά επιμέρους τμήματα, το σύστημα πίεσης πόρων και το σύστημα θερμοκρασιών μπορούν να προστεθούν αν η πίεση των πόρων ή/και η θερμοκρασία πρόκειται να συμπεριληφθούν στην τριαξονική δοκιμή. Δοκιμές αυτού του είδους πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες κατώτερες των 500 °C.



Σχήμα 3: Βασικά συστατικά – επιμέρους τμήματα του συστήματος διάταξης δοκιμών τριαξονικής θλίψης (κατά Elliott M.G., 1989)

Η περισσότερο διαδεδομένη εργαστηριακή διαδικασία απαιτεί σταθερές τιμές θερμοκρασίας και πλευρικής πίεσης, διαφοροποιώντας το αξονικό φορτίο για τη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού μετατόπισης. Μετρήσεις πλευρικής πίεσης, θερμοκρασίας, αξονικού φορτίου, μετατοπίσεων και αλλαγών της πίεσης πόρων ή του όγκου των πόρων καταγράφονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Διαφοροποιήσεις της δοκιμής περιλαμβάνουν : (i) τη ταυτόχρονη μεταβολή της πλευρικής πίεσης και του αξονικού φορτίου, εξετάζοντας παράλληλα τις επιδράσεις των διαδρομών τάσεων, (ii) τη διατήρηση σταθερού αξονικού φορτίου με ταυτόχρονη μείωση της πλευρικής πίεσης, (iii) τη διατήρηση σταθερός πλευρικής πίεσης και εφαρμογή δυνάμεων εφελκυσμού στις βάσεις του δοκιμίου, κάτι που απαιτεί δοκίμια κατάλληλου σχήματος.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πετρωμάτων σε τριαξονική θλίψη είναι ο ρυθμός φόρτισης, ή ρυθμός παραμόρφωσης, το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμίων, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η επίδραση των συνοριακών συνθηκών. Η επίδραση των παραγόντων αυτών εκτιμάται αρχικά με δοκιμές μονοαξονικής θλίψης καθώς τυγχάνουν εφαρμογής και στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης.

Η αντοχή των πετρωμάτων επηρεάζεται από τους ρυθμούς και τη διαδρομή φόρτισης. Σύμφωνα με τον Elliott M.G. (1992) οι ρυθμοί μετατόπισης επιλέγονται κατάλληλα ώστε η δοκιμή να διαρκεί 45 λεπτά έως 1 ώρα. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται προτυποποίηση των διαφορετικών συνόλων αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (1983), τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι κυλινδρικά διαμέτρου NX, με λόγο μήκους προς διάμετρο 2:1 έως 3:1. Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες και κάθετες στον άξονα του κυλίνδρου, με ανοχή επιπεδότητας \pm 0.01 mm και ανοχή καθετότητας με τον άξονα του δοκιμίου < 0.001 ακτίνια. Επιπλέον, τα δοκίμια πρέπει να έχουν λείες πλευρές, η μέτρηση της διαμέτρου να γίνεται με ακρίβεια 0.1 mm σε τρεις θέσεις: στο μέσο και κοντά στις βάσεις του κυλίνδρου, ενώ η μέτρηση του ύψους να γίνεται με ακρίβεια 0.1 mm.

Βασικός σκοπός της χρήσης πλακών φόρτισης με σφαιρική υποδοχή είναι η διόρθωση τυχόν αποκλίσεων των βάσεων από την παραλληλία και η αποφυγή εκδήλωσης φαινομένων λυγισμού στο δοκίμιο και των επιδράσεων των βάσεων και των συνοριακών συνθηκών. Ωστόσο, οι πλάκες με σφαιρική υποδοχή ενδέχεται να επιφέρουν διατμητικές τάσεις στις βάσεις των δοκιμίων, που είναι πιθανό να ποικίλουν κατά τη πρόοδο της δοκιμής, λόγω μεταβολών του προσανατολισμού των πλακών στις θέσεις σφαιρικής υποδοχής των εμβόλων φόρτισης. Με βελτίωση της παραλληλίας των βάσεων του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας των εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό ο Elliot M. Gordon (1989) προτείνει τη κατεργασία της επιφάνειας των δοκιμίων με χρήση λειαντήρα ακριβείας, για την επίτευξη παραλληλίας ±8 μm σε εργαστηριακές δοκιμές.

Πολυμερή - ελαστικά από λάτεξ - καουτσούκ, καουτσούκ από νεοπρένιο, θερμό – συστελλόμενο πολυαιθυλένιο αποτελούν τα συνήθη υλικά της στεγανωτικής μεμβράνης. Η εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη απομονώνει το δοκίμιο από το υδραυλικό λάδι που ασκεί την πλευρική υδροστατική πίεση. Συνεπώς, η μεμβράνη πρέπει: α) να προσφέρει πλήρη στεγανότητα του δοκιμίου, β) να μην αντιδρά με το υγρό που ασκεί την υδροστατική πίεση αλλά και το νερό του πορώδους του δοκιμίου, γ) να μην επηρεάζεται από την παραμόρφωση, πίεση, ή τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πολυμερή είναι σε θέση να ασκούν ισχυρά φορτία πλευρικής πίεσης – πλευρικού περιορισμού σε περίπτωση που ασκηθούν πιέσεις της τάξεως των 200 - 500 MPa. Επομένως, κατά την επιλογή του πλέον κατάλληλου υλικού των μεμβρανών πρέπει να εξετάζονται οι παράμετροι των συνθηκών δοκιμής και η οικονομικότητα του χρησιμοποιούμενου υλικού. Στα δύο άκρα η μεμβράνη καταλήγει σε ειδικά διαμορφωμένα προστατευτικά για την αποφυγή διαρροών του υγρού, που αποκαλούνται ελαστικοί δακτύλιοι στεγανότητας.

Κεφάλαιο 2: Γενικός εργαστηριακός εξοπλισμός των δοκιμών τριαξονικής θλίψης

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός των δοκιμών είναι με ορισμένες εξαιρέσεις ο ίδιος για όλους τους τύπους δοκιμών και αποτελείται από τα ακόλουθα επιμέρους τμήματα:



Σχήμα 4: Εξοπλισμός δοκιμής τριαξονικής θλίψης (L = αξονικό φορτίο, LT = κελί φορτίου ή μορφοτροπέας πίεσης υψηλής ακρίβειας, C = τριαξονικό κελί, DT = αισθητήρας μέτρησης της παραμόρφωσης, CPT = μορφοτροπέας πίεσης υψηλής ακρίβειας για τη μέτρηση της πλευρικής πίεσης, HP = υδραυλική αντλία εφαρμογής της πλευρικής πίεσης) (ISRM Suggested Method, 1983)

- Τριαξονικό κελί
- Συσκευή αξονικού φορτίου Συσκευή φόρτισης για την επιβολή του αξονικού φορτίου (L) με δυνατότητα ελέγχου του ρυθμού φόρτισης
- Συσκευή εφαρμογής πλευρικής πίεσης
- Εξοπλισμός μέτρησης και καταγραφής φορτίων, πιέσεων και μετατοπίσεων

2.1. Τριαξονικό κελί

Παρά το γεγονός ότι απλοί και οικονομικοί σχεδιασμοί όπως το τριαξονικό κελί του Hoek που απεικονίζεται στο σχήμα 5, είναι χρήσιμοι για την πραγματοποίηση δοκιμών, ωστόσο δεν είναι επαρκείς για την πραγματοποίηση μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας υπό συγκεκριμένο συνδυασμό τάσεων, πίεσης πορώδους και θερμοκρασιακών συνθηκών. Ο πιο διαδεδομένος σχεδιασμός διάταξης τριαζονικών κελιών απεικονίζεται στο σχήμα 5β. Οι εσωτερικές διαστάσεις του κελιού διέπονται από τις διαστάσεις του δοκιμίου και των άλλων επιμέρους τμημάτων τα οποία εισάγονται εντός του τριαξονικού κελιού. Μια τυπικά πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει το δοκίμιο, τη μεμβράνη και τα επιμέρους τμήματα τα οποία προσαρμόζονται εντός του τριαζονικού κελιού για δοκιμές υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων πορώδους απεικονίζεται στο σχήμα 13. Το πάχος των τοιχωμάτων του τριαξονικού κελιού καθορίζεται από το μέγεθος των τιμών των ασκούμενων πλευρικών πιέσεων και απο το εάν τα τοιχώματα θα συμπεριλάβουν αγωγούς ψύξης στις εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών.

Ο σχεδιασμός του τριαξονικού κελιού καθορίζεται περαιτέρω από τον εάν προσαρμόζεται μόνιμα στο πλαίσιο του αξονικού φορτίου καθώς και εάν θα ενσωματωθεί πιστόνι εξισορρόπησης. Η εγκατάσταση του τριαξονικού κελιού εντός του πλαισίου του αξονικού φορτίου παρουσιάζει πλεονεκτήματα από την άποψη της αποδοτικότητας της εφαρμογής της δοκιμής, αλλά θα τείνει να καθιερώσει την αποκλειστική χρήση ενός πλαισίου δοκιμής που απαιτείται για την πραγματοποίηση άλλου είδους δοκιμών. Αντίθετα, ένα κινητό τριαξονικό κελί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά πλαίσια δοκιμών, αλλά το βάρος και το μέγεθος ενδέχεται να επιφέρουν πρακτικές δυσκολίες. Τα πιστόνια - έμβολα εξισορρόπησης αποτελούνται από δακτυλοειδείς θαλάμους συγκράτησης ισοδύναμων διατομών με αυτές των εμβόλων φόρτισης του τριαξονικού κελιού. Τα έμβολα φόρτισης, τα οποία διαπερνούν το θύλακα συγκράτησης, έχουν μία φλάντζα επαρκούς πλάτους για την πλήρη κάλυψη της διατομής του θύλακα συγκράτησης. Καθώς το έμβολο φόρτισης εισέρχεται και εκτοπίζει μία μονάδα όγκου εντός του τριαξονικού κελιού, αυξάνει επίσης τον όγκο του θύλακα συγκράτησης κατά μία ισοδύναμη ποσότητα. Αγωγοί που διογετεύουν το υδροστατικό υγρό και συνδέουν το θύλακα συγκράτησης με το τριαξονικό κελί παρέχουν τη δυνατότητα στο υγρό που ασκεί την πλευρική πίεση να κινείται ελεύθερα ανάμεσα στα δύο επιμέρους τμήματα της πειραματικής διάταξης (Elliott M.G., 1989).

Ο σκοπός ενός πιστονιού - εμβόλου εξισορρόπησης είναι να διατηρεί σταθερό όγκο υγρού (ανεξάρτητο από την επίδραση μιας μικρής ελαστικής παραμόρφωσης που οφείλεται στο αξονικό φορτίο που ασκείται) και επιπλέον να προλαμβάνει αλλαγές στην πλευρική πίεση εξαιτίας των μετατοπίσεων του εμβόλου κατά τη διάρκεια της τροπής ανηγμένης παραμόρφωσης αλλά και να εξισορροπεί το φορτίο του πιστονιού εξαιτίας της πλευρικής πίεσης περιορισμού, έτσι ώστε το σύστημα του αξονικού φορτίου να απαιτεί μόνο την υπέρθεση της αποκλίνουσας τάσης και της τριβής στις τσιμούχες των εμβόλου. Ένα έμβολο εξισορρόπησης αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή ως πρόσθετο επιμέρους τμήμα.



Σχήμα 5: Εναλλακτικοί σχεδιασμοί τριαξονικών κελιών: α) τριαξονικό κελί του Hoek , b) τριαξονικό κελί που χρησιμοποιείται από τους Elliot και Brown (1989).

Ο σχεδιασμός της βάσης του κελιού καθορίζεται από τον αριθμό των διαφορετικών διεργασιών που διεκπεραιώνονται εντός και εκτός του κελιού (π.χ. εισροή υγρού και άσκηση πλευρικής πίεσης, εισροή πίεσης πόρων, είσοδο ηλεκτρικών κυκλωμάτων για συστήματα εντός του κελιού και θερμαντικά στοιχεία.) Εντός του τριαξονικού κελιού, οι διεργασίες αυτές τερματίζουν σε μια διάταξη υποδοχών ή σωληνοειδείς υποδοχές που φέρουν σπείρωμα. Εκτός του τριαξονικού κελιού, οι διεργασίες και ηλεκτρικές συνδέσεις που είναι ανθεκτικές σε μακροπρόθεσμες εφαρμογές και προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα κατά τη χρήση.

Τέλος, στο σχεδιασμό ενός νέου τριαξονικού κελιού, ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δίνεται στο σχεδιασμό των μονώσεων, οι οποίες απαιτούνται ανάμεσα στο έμβολο φόρτισης και τη βάση του δοχείου πίεσης.

Η διάταξη του τριαξονικού κελιού περιλαμβάνει:

A) Τριαξονικό κελί για την άσκηση της πλευρικής πίεσης στο δοκίμιο, με τον τύπο του να συμβαδίζει με τους δυνατούς σχεδιασμούς που απεικονίζονται στο σχήμα 6. Το σώμα του κελιού πρέπει να είναι σχεδιασμένο για τις υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Επίσης πρέπει να φέρει κατάλληλη είσοδο για την πλήρωσή του με το υδραυλικό ρευστό, καθώς και βαλβίδα διαφυγής του αέρα.

B) Χαλύβδινες πλάκες με σφαιρική υποδοχή – έδραση για την ευθυγράμμιση της φόρτισης, σκληρότητας κατά Rockwell C30 που τοποθετούνται και στις δύο βάσεις του δοκιμίου. Η διάμετρος των πλακών πρέπει να είναι μεταξύ 1D – 1.02D όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος των πλακών πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 mm ή D/3.

Οι επιφάνειες των πλακών πρέπει να είναι λείες και επίπεδες με ανοχή επιπεδότητας ± 0.005 mm.

Γ) Η κάθε πλάκα πρέπει να φέρει σφαιρικές υποδοχές - εδράσεις. Το κέντρο της κοίλης επιφάνειας πρέπει να συμπίπτει με το κέντρο της βάσης του δοκιμίου. Οι σφαιρικές υποδοχές πρέπει να είναι ελαφρώς λιπασμένες με ορυκτέλαιο. Το δοκίμιο, οι πλάκες και οι σφαιρικές υποδοχές - εδράσεις πρέπει να βρίσκονται τοποθετημένες σε παραλληλία εναλλάξ του δοκιμίου.

Δ) Μία εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη από κατάλληλο υλικό πρέπει να χρησιμοποιείται για την αποτροπή της εισροής του υγρού πλευρικής πίεσης εντός του δοκιμίου. Η μεμβράνη δε πρέπει να διεισδύει εντός επιφανειακών πόρων του δοκιμίου και πρέπει να είναι επαρκώς επιμήκης για να έρχεται σε επαφή με τις πλάκες. Η διάμετρός της πρέπει να είναι ίση με τη διάμετρο του δοκιμίου και το μήκος της τέτοιο ώστε να καλύπτει μέρος των χαλύβδινων πλακών.



Σχήμα 6: Τρεις δυνατοί σχεδιασμοί για το τριαξονικό κελί (L = αξονικό φορτίο, 1 = έμβολο φόρτισης, 2 = στεγανωτικό παρέμβυσμα / τσιμούχα, 3 = χαλύβδινες πλάκες με σφαιρική έδραση, 4α = είσοδος του υδραυλικού ρευστού, 4β = βαλβίδα διαφυγής του αέρα, 5 = εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη, 6 = ελαστικοί δακτύλιοι σταγανότητας) (ISRM Suggested Method, 1983)



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση του τριαξονικού κελιού (Vutukuri. 1989)

Σχήμα 8: Τομή της διάταξης δοκιμίου πετρώματος, κυψέλης υψηλών πιέσεων και πλάκας φόρτισης



Για την άσκηση και μέτρηση του αξονικού φορτίου στο δοκίμιο του πετρώματος πρέπει να χρησιμοποιείται ένα δύσκαμπτο μηχάνημα φόρτισης. Πρέπει να είναι επαρκούς δυναμικότητας για να προκαλέσει την αστοχία του δοκιμίου υπό τη δεδομένη τιμή πλευρικής πίεσης και να ασκεί τροπές με τους προκαθορισμένους ρυθμούς. Για το σκοπό αυτό πρέπει να ρυθμίζεται κατά διαστήματα. Ακόμη πρέπει να έχει τη δυνατότητα μέτρησης του αξονικού φορτίου με κατάλληλο αισθητήρα (LT).

Το σύστημα αξονικού φορτίου χρησιμοποιείται για την υπέρθεση τάσης παράλληλα προς τον άξονα του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα, η μηχανολογική διάταξη φορτίου αντικαταστάθηκε από ένα υδραυλικό έμβολο το οποίο περιέβαλε πλαίσιο αντίδρασης δύο, τριών ή τεσσάρων στηλών. Καθώς τα μηχανήματα εξελίσσονται για να ανταποκρίνονται στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των ερευνών, είναι πλέον εφικτή η διερεύνηση της συνολικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων παρά αποκλειστικά η εξέταση της κορυφαίας αντοχής τους τη στιγμή της αστοχίας. Συστήματα φόρτισης τα οποία χρησιμοποιούν απλά υδραυλικά έμβολα απαιτούν αρκετή χειρωνακτική εργασία και απαίτηση διατήρησης σταθερών ρυθμών βράχυνσης. Για την αντιμετώπιση της εν λόγω δυσκολίας, διαφορετικά μηχανήματα έχουν εξελιζη των υδραυλικών αντλιών, ηλεκτρικών εξαρτημάτων τους. Με την εξέλιξη των υδραυλικών αντλιών,

αποκτήσει ολοένα αυξανόμενα διαδεδομένη χρήση τα συστήματα όλων των διαστάσεων τα οποία περιλαμβάνουν ευαίσθητα κυκλώματα ελέγχου συνεχούς λειτουργίας συνδυασμένα με υδραυλικά συστήματα φόρτισης (διατάξεις δοκιμών σέρβο - ελέγχου).

Στις μέρες μας, μηχανήματα δοκιμών ποικίλης δυσκαμψίας είναι ακόμα διαθέσιμα για εργαστηριακές δοκιμές με στόχο να συμπεριλάβουν εγκάρσια κινούμενα μέρη ή υδραυλικά έμβολα διαφόρων τύπων. Εύκαμπτα πλαίσια φόρτισης παραμορφώνουν τα δοκίμια περισσότερο για δεδομένο φορτίο και συνεπώς αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια τροπής από τα πλαίσια μεγάλης δυσκαμψίας. Η ποσότητα της αποθηκευμένης τροπής περιορίζει την ικανότητα των μηχανημάτων να ελέγχουν την αποσύνθεση της δομής του δοκιμίου μετά το σημείο κορυφαίας αντοχής τους (Elliott M. G., 1989).

Οι διατάξεις δοκιμών σέρβο - ελέγχου, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 9, περιλαμβάνουν μία υδραυλική αντλία (αναφέρεται ως υδραυλική παροχή ενέργειας), υδραυλικό έμβολο διπλού κυλίνδρου, μία σέρβο - βαλβίδα εισροής και εκροής και μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου. Η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου παραλαμβάνει με τρόπο



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος τριαξονικής δοκιμής (κατά Elliott M. Gordon, 1989)

συνεχή τα ηλεκτρονικά σήματα μετρήσεων από το δοκίμιο και τα συγκρίνει με πρότυπα σήματα αναφοράς από μία γεννήτρια ηλεκτρικών σημάτων (π.χ. ένα χειρωνακτικά ρυθμισμένο ποτενσιόμετρο, μία γεννήτρια ράμπας ή μικροκυμάτων, ή ακόμη και ένα ψηφιακό - αναλογικό μετατροπέα σε ένα υπολογιστή). Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο ηλεκτρονικών σημάτων παρέχει ένα σήμα το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της σέρβο - βαλβίδας ασφαλείας. Η βαλβίδα αυτή ανταποκρίνεται στο σήμα αυτό τροποποιώντας τη ροή του ελαίου εντός του υδραυλικού εμβόλου. Ο βρόχος ελέγχου φράσσεται σε περίπτωση που η οποιαδήποτε κίνηση του εμβόλου προκαλεί μια μεταβολή στο σήμα μέτρησης. Ο βρόχος ελέγχου ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε το έμβολο να κινείται επιστρέφοντας το σήμα μέτρησης σε ισοδυναμία με το σήμα αναφοράς. Κατά αυτό το τρόπο, το σήμα μέτρησης μεταβάλλεται ώστε να συμβαδίζει με μεταβολές στο σήμα αναφοράς. Η ταχύτητα με την οποία ο βρόχος ελέγχου ολοκληρώνεται, περιορίζεται από τη συχνότητα της σέρβο - βαλβίδας και το ρυθμό κατά τον οποίο το υδραυλικό λάδι μπορεί να αντλείται διαμέσου της βαλβίδας κατά την περίοδο παλινδρόμησης του λαδιού.

Τα συστήματα σέρβο - ελέγχου προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως α) ομαλότητα (η βελτιωμένη ακρίβεια οδηγεί σε ομαλές εφαρμογές του φορτίου και καλύτερη επαναληψιμότητα μετρήσεων), β) αυτοματισμός (ανεξάρτητα συστήματα ελέγχου μπορούν να συνδυαστούν για δοκιμές τάσης), γ) λιγότερη εξάρτηση από δύσκαμπτα πλαίσια φόρτισης), δ) ευελιξία (μεγάλη ποικιλία παραμέτρων μπορεί να επιλεγεί ως το σήμα αναφοράς εντός του βρόχου ελέγχου).

2.3. Συσκευή εφαρμογής της πλευρικής πίεσης

Περιλαμβάνει μια υδραυλική αντλία, έναν ενισχυτή πίεσης ή άλλο σύστημα παρόμοιας δυναμικότητας με δυνατότητα επιβολής σταθερής πλευρικής πίεσης σ₃ για τη διατήρηση συνεχούς επιθυμητής πλευρικής πίεσης σ₃ και τη διατήρηση αυτής με απόκλιση της τάξεως του $\pm 1\%$ της επιθυμητής τιμής.

Το πιο απλό και οικονομικό σύστημα εφαρμογής πλευρικής πίεσης επιτυγχάνεται με τη σύνδεση μίας χειροκίνητης αντλίας με το τριαξονικό κελί, παρεμβάλλοντας ενδιάμεσα τμήματα διατομής Τ προκειμένου να συμπεριληφθεί ένας αισθητήρας πίεσης και να είναι εφικτή η παροχή και αποστράγγιση του υγρού που ασκεί την πλευρική υδροστατική πίεση. Εναλλακτικοί σχεδιασμοί περιλαμβάνουν συσσωρευτές αδρανούς αερίου έναντι ελαίου, αντλίες κινούμενες με συμπιεσμένο αέριο, βαλβίδες που ρυθμίζουν την πίεση, συστήματα μέτρησης με μετατροπείς πίεσης, ακόμα και κυκλώματα ελέγχου κλειστού βρόγχου. Αρκετοί τύποι εμπορικά διαθέσιμων αντλιών είναι κατάλληλοι για την παραγωγή πιέσεων μέχρι και της τάξεως των 100 MPa. Αντλίες κινούμενες με συμπιεσμένο αέρα μπορεί να αποτελέσουν ικανοποιητικές λύσεις για την επίτευξη υψηλότερων πιέσεων. Ωστόσο, ο έλεγχος της πίεσης από συστήματα αυτού του είδους είναι συνήθως ανακριβής εξαιτίας της ανακρίβειας της μέτρησης της πίεσης και της αδυναμίας μιας χειροκίνητης αντλίας ή μιας αντλίας κινούμενης από συμπιεσμένο αέρα να ρυθμίζει την πίεση σε επίπεδο αντιληπτών μεταβολών. Συσσωρευτές αδρανούς αερίου έναντι ελαίου μπορούν να παρέχουν σχετικά σταθερή πλευρική πίεση με τον περιορισμό το αέριο να διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Η ικανότητα να ρυθμίζουμε την πλευρική πίεση ακριβώς μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση αυτής της μεθόδου καθώς απαιτούνται αρκετές απαιτητικές ρυθμίσεις. Επιπλέον, η μέθοδος κρίνεται ασύμφορη οικονομικά για την εφαρμογή της (Elliott M. G., 1989).

Μία προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση αντλιών κινούμενες μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα. Η τροποποίηση αυτή καθιστά εφικτό τον έλεγχο με κλειστούς βρόγχους, αφού και η πίεση του υγρού μπορεί να μετρηθεί μέσω ενός μετατροπέα πίεσης. Το σήμα της ηλεκτρονικής μέτρησης μπορεί να συγκριθεί με ένα σήμα αναφοράς και το σήμα σφάλματος μπορεί να ενισχυθεί για να ενεργοποιήσει τον ηλεκτροκινητήρα. Ο βρόχος είναι κλειστός καθώς οποιαδήποτε κίνηση του κινητήρα μπορεί να αλλάξει την πλευρική πίεση. Μία βελτίωση της αρχής αυτής είναι οι ενισχυτές πίεσης σέρβο - ελέγχου, στους οποίους ο ηλεκτροκινητήρας αντικαθίσταται από υδραυλικά κινούμενους προωθητές - έμβολα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 9. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο είναι εσκεμμένα υψηλός στον κύλινδρο υψηλής πίεσης για να ενισχυθεί ο έλεγχος ομαλών πιέσεων με πολύ χαμηλές διακυμάνσεις του εύρους της πίεση της τάξεως των ± 15 kPa. Επιπροσθέτως, ενισχυτές πίεσης σέρβο - ελέγχου μπορούν να αλληλεπιδρούν με κάθε είδους γεννήτριες σημάτων αναφοράς, με άμεση και ελεγχόμενη απόκριση (Elliott M. Gordon, 1989).

Πολλά διαφορετικά είδη υγρών έχουν χρησιμοποιηθεί ως υγρά που θα ασκήσουν την πλευρική πίεση συμπεριλαμβανομένων του νερού, της κηροζίνης, σιλικονούχων ελαίων ακόμη και αδρανών αερίων για δοκιμές υψηλών θερμοκρασιών. Ζητήματα διάβρωσης καθιστούν το νερό ακατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση, ενώ οι σοβαροί κίνδυνοι λόγω συμπιεσμένων αερίων καθιστούν τα αδρανή αέρια αποφευκτά όπου είναι δυνατόν. Παράμετροι που πρέπει να εξετάζονται πριν την επιλογή του πλέον κατάλληλου υγρού υδροστατικής πίεσης είναι το ιξώδες, η συμπιεστότητα, η πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας καθώς και η συμβατότητα του υλικού της μεμβράνης με το υγρό για να αποφεύγονται προβλήματα αλληλεπίδρασης. Χαμηλού ιξώδους έλαια προτιμώνται για το γρήγορο γέμισμα του τριαξονικού κελιού. Προφανώς, για λόγους ασφάλειας και οικονομικότητας, απαιτούνται έλαια τα οποία δεν διασπώνται κατά τη δεδομένη θερμοκρασία της δοκιμής. Σε συστήματα πίεσης σταθερού όγκου, απαιτείται χαμηλή συμπιεστότητα προκειμένου να μπορεί να παραχθεί υψηλή πίεση με μικρές απώλειες της χωρητικότητας της αντλίας. Πριν από την κάθε χρήση απαιτούνται υγρά απαέρωσης για τη διατήρηση της στιφρότητας του υγρού, ενώ με την ενσωμάτωση ενός λεπτού φίλτρου στη γραμμή τροφοδοσίας ανάμεσα στον ταμιευτήρα του υγρού και το τριαξονικό κελί, επιτυγχάνεται η καθαρότητα του υγρού πλευρικής πίεσης.



Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση του υδραυλικού συστήματος της διάταξης U.S.B.M. (Vutukuri, 1989)



Σχήμα 11: Τομή του ρυθμιστή – ενισχυτή του υδραυλικού συστήματος (Vutukuri, 1989)

2.4. Συστήματα πίεσης του υγρού των πόρων

Λόγω της επίδρασης της πίεσης του πορώδους είναι προτιμότερο να εξετάζονται κορεσμένα δοκίμια με ελεγχόμενη πίεση πορώδους. Δοκιμές αυτού του είδους επιτυγχάνονται με την εισπίεση κατάλληλου υγρού εντός του δοκιμίου ανεξάρτητα και σε οποιαδήποτε τιμή πίεσης. Το σύστημα πίεσης πόρων περιλαμβάνει μία δεξαμενή παροχής νερού με χωρητικότητα 7200 cm³ (2 gal). Πρέπει να είναι κατάλληλης αντοχής ώστε να υφίσταται πιέσεις αερίου 1.2 MPa (200 lbf/in²). Επιπλέον, απαιτούνται ένας ενισχυτής και ένας ρυθμιστής πίεσης, ένα δοχείο αζώτου, μετατροπείς πίεσης που λειτουργούν εντός του εύρους 0 – 70 MPa (0 – 10000 lbf/in²) ανιχνευτές τροπής ή καταγραφείς σε άξονες x – y, βαλβίδες, αγωγούς και εξαρτήματα επαρκούς δυναμικότητας για την άσκηση της επιθυμητής πίεσης. Μετρητές χαμηλής πίεσης (0-10 MPa) (0-1500 lbf/in²) μπορούν

να χρησιμοποιηθούν αντί των μετατροπέων όταν η πίεση πόρων δεν είναι μεγαλύτερη από 10 MPa (1500 lbf/in²). Πριν τη χρήση των μετατροπέων, απαιτείται η κατάλληλη ρύθμισή τους (Vutukuri, 1989).

Η πίεση του υγρού που εισπιέζεται στους πόρους του πετρώματος, ασκείται στο δοκίμιο και από τις δύο βάσεις μέσω πέντε ακτινικά διατρημένων οπών στις πλάκες. Καθώς το δοκίμιο φορτίζεται αξονικά, με κλειστό σύστημα πίεσης πορώδους η πίεση του πορώδους μετριέται με κατάλληλους μετρητές ή μορφοτροπείς πίεσης. Τα δοκίμια δοκιμάζονται σε κορεσμένες συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται με απλή βύθιση σε δεξαμενή νερού ατμοσφαιρικής πίεσης, υπό κενό ή πίεση, ή υπό συνδυασμό αυτών ανάλογα με το πορώδες και τη διαπερατότητα του πετρώματος (Elliott M. G., 1989).

Πριν την έναρξη της δοκιμής, το δοκίμιο συμπιέζεται εκ νέου εντός του τριαξονικού κελιού ώστε τυχών φυσαλίδες αερίου να οδηγηθούν στο διάλυμα για να επιτύχουμε πλήρη κορεσμό. Αυτό επιτυγχάνεται με τη παρακολούθηση της αύξηση της πίεσης του πορώδους που είναι απόρροια της πίεσης του κελιού. Όταν οι δύο πιέσεις εξισωθούν, το δοκίμιο του πετρώματος είναι πλήρως κορεσμένο (Elliott M. Gordon, 1989).

Η πίεση των πόρων αποτελεί ορισμένες φορές σημαντική μεταβλητή στη μηχανική των πετρωμάτων και ένα μηχάνημα τριαξονικής δοκιμής πρέπει να είναι σε θέση να αλληλεπιδρά με συστήματα πίεσης πόρων. Η υπέρθεση της πίεσης των πόρων στη διάταξη του τριαξονικού κελιού πραγματοποιείται μέσω ενός αγωγού, οποίος συνδέεται με το δοκίμιο μέσω της βάσης του τριαξονικού κελιού. Εντός του κελιού, ο αγωγός αυτός συνδέεται με έναν παρόμοιο αγωγό στις πλάκες σφαιρικής υποδοχής μέσω ενός κοντού χαλύβδινου σωλήνα. Κατά αυτό τον τρόπο, το σύστημα του υγρού των πόρων μπορεί να απομονωθεί από το σύστημα πλευρικής πίεσης (Elliott M. G., 1989).

Εξαιτίας του μεγάλου χρονικού διαστήματος το οποίο απαιτείται για την επίτευξη ισορροπίας εντός του ενεργού πορώδους ενός πετρώματος πολύ χαμηλής διαπερατότητας, είναι περισσότερο συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται μεμονωμένα συστήματα για την εισροή του υγρού των πόρων και τον έλεγχο της πίεσης σε κάθε άκρο του δοκιμίου. Αν το υγρό των πόρων εισέλθει υπό πίεση στη μία άκρη του δοκιμίου, και εάν ο όγκος του ταμιευτήρα που συνδέεται με το άλλο άκρο του δοκιμίου διατηρείται σταθερός, οι τιμές πίεσης και στα δύο άκρα του δοκιμίου θα έρθουν σε ισορροπία όταν ο όγκος των πόρων κορεστεί πλήρως. Ένας μετατροπέας διαφορικής πίεσης ο οποίος ευρίσκεται ανάμεσα στα δύο συστήματα πίεσης πόρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση πιθανής ισορροπίας. Το πλεονέκτημα της ύπαρξης ανεξάρτητων συστημάτων πίεσης πόρων συνδεόμενα στα άκρα του δοκιμίου είναι το γεγονός ότι η διάταξη της τριαξονικής δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον για δοκιμές διαπερατότητας.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πιέσεων πόρων είναι σε γενικές γραμμές παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για να παράγει πλευρικές πιέσεις. Συχνά, οι τιμές πιέσεων πόρων εκτιμώνται χαμηλότερες από τις τιμές πλευρικών πιέσεων, γεγονός που επιβάλλει τη χρήση συσσωρευτών και παροχών συμπιεσμένου αέρα για την παραγωγή των απαιτούμενων πιέσεων υγρού πόρων. Μία τέτοια διάταξη απεικονίζεται στο **σχήμα 12**. Εάν ένας μετατροπέας βραχύνσεων συνδεθεί με τη βαλβίδα εντός του συσσωρευτή, μετρήσεις της ροής του υγρού διαμέσου του δοκιμίου μπορούν να καταγραφούν και να δώσουν μια εκτίμηση της υδραυλικής διαπερατότητας. Σε περιπτώσεις πολύπλοκων δοκιμών απαιτούνται μεταβολές της πίεσης των πόρων και ένας ενισχυτής πίεσης παρόμοιος με αυτόν που περιγράφηκε στις πλευρικές πιέσεις, προκειμένου να παραχθούν πιέσεις πόρων, έναντι του συσσωρευτή που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος πίεσης πόρων

Είναι συνήθως επιθυμητή η υπέρθεση ενός πορώδους μέσου ανάμεσα στο δοκίμιο και στην πλάκα σφαιρικής υποδοχής ώστε να υπάρχει καλύτερη πρόσβαση του υγρού των πόρων προς το δοκίμιο αποτρέποντας παράλληλα την εξώθηση του δοκιμίου. Ωστόσο, στην περίπτωση ισχυρών πετρωμάτων είναι δύσκολο να βρεθεί υλικό του πορώδους μέσου το οποίο να έχει παράλληλα επαρκή αντοχή και διαπερατότητα. Σκόνη από καρβίδια ζιρκονίου έχει χρησιμοποιηθεί για αυτή τη χρήση. Μία εναλλακτική επιλογή είναι η εισαγωγή ειδικά κατασκευασμένου δίσκου από χάλυβα μεταξύ της πλάκας σφαιρικής υποδοχής και του δοκιμίου, ο οποίος αποτονώνει την πίεση του υγρού και το διασκορπίζει σε σταγονίδια τα οποία εισάγονται εντός του δοκιμίου υπό πίεση (Elliott M. G., 1989).

2.5. Συστήματα επιβολής και διατήρησης θερμοκρασιών

Η υιοθέτηση ενός μηχανήματος τριαξονικής δοκιμής για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες εφαρμόζεται σε αρκετά προβλήματα βραχομηχανικής. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων και ανάκτηση πετρελαίου από ταμιευτήρες μεγάλου βάθους. Για θερμοκρασίες έως και 500 °C δύο επιλογές είναι διαθέσιμες: i) εξωτερικός κλίβανος ή θερμαντικό στοιχείο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να θερμάνουν ολόκληρο το τριαξονικό κελί καθώς και το περιεχόμενό του ή ii) ένας εσωτερικός κλίβανος ή θερμαντικό στοιχείο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση μόνο του δοκιμίου και του υγρού πλευρικής πίεσης που περιβάλλει τη μεμβράνη (Elliott M. G., 1989).

Στην περίπτωση της πρώτης επιλογής ολόκληρο το τριαξονικό κελί δύναται να θερμανθεί προσαρτώντας στοιχεία ηλεκτρικής θέρμανσης στο εξωτερικό του κελιού, ή ενσωματώνοντας αγωγούς στα τοιχώματα του κελιού και κυκλοφορώντας θερμά υγρά. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται στεγανότητα γύρω από το κελί για τον περιορισμό πιθανών κινδύνων από απότομες εκτονώσεις.



Σχήμα 13: Σκαρίφημα της διάταξης για τριαξονικές δοκιμές υπό υψηλές θερμοκρασίες (κατά Elliot και Brown, 1985)

Η πρώτη επιλογή απαιτεί αρκετό χρόνο για την πραγματοποίηση της τριαξονικής δοκιμής λόγω της μεγάλης ποσότητας θερμότητας της που απαιτείται για τη θέρμανση όλων των επιμέρους τμημάτων της διάταξης. Παρομοίως, η επιλογή αυτή απαιτεί σημαντικό χρονικό διάστημα μετά το πέρας της δοκιμής προτού το δοκίμιο αποληφθεί προκειμένου να επιτευχθεί η διάχυση της θερμότητας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη εάν απαιτείται αρκετά ακριβής έλεγχος θερμοκρασιών, καθώς το ποσοστό της θερμότητας είναι μεγάλο.

Στην περίπτωση της δεύτερης επιλογής, η θερμότητα παράγεται μέσω ενός μικρού πηνίου θέρμανσης το οποίο εντοπίζεται κοντά στο δοκίμιο και εντός μιας σειράς από μονωτικά καλύμματα τα οποία ενσωματώνονται εντός του τριαξονικού κελιού (Σχήμα 13). Τόσο το δείγμα - δοκίμιο όσο και το μονωτικό κάλυμμα βυθίζονται εντός του υγρού πλευρικής πίεσης και ως εκ τούτου το υλικό του καλύμματος πρέπει να είναι ανθεκτικό σε υψηλές πιέσεις. Η γεωμετρία των μονωτικών καλυμμάτων είναι σχεδιασμένη κατάλληλα ώστε να αποτρέπει την είσοδο του υγρού πλευρικής πίεσης. Τα τοιχώματα του κελιού παρέχουν μία ψύκτρα για οποιαδήποτε ποσότητα θερμότητας η οποία διαπερνά το μονωτικό κάλυμμα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής. Προκειμένου να διατηρείται μία σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων, ο σχεδιασμός των τοιχωμάτων του κελιού περιλαμβάνει αγωγούς που μεταφέρουν το υγρό ψύξης. Τα μονωτικά καλύμματα κατασκευάζονται από πολυτετρα - φθοριοαιθυλένιο (PTFE) και κεραμικό υλικό. Το PTFE είναι ανθεκτικό και έχει καλές στεγανωτικές ιδιότητες. Ωστόσο, το υλικό αυτό αρχίζει να αποδομείται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 200°C (Elliott M. G., 1989).

Η δεύτερη επιλογή απαιτεί μικρό χρονικό διάστημα τόσο για την απόκτηση της επιθυμητής θερμοκρασίας της δοκιμής όσο και για την απαγωγή της μετά το πέρας της δοκιμής. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα της δυσκολίας απόκτησης του ίδιου επιπέδου ακρίβειας στη θερμοκρασία του δοκιμίου λόγω της συνεχούς αλλαγής των θερμοκρασιακών συνθηκών. Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο σύστημα, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του ελαίου περιμετρικά του δοκιμίου σε ένα εύρος 5°C πρέπει να είναι αναμενόμενες. Παρ' όλα αυτά, το εύρος αυτών των διακυμάνσεων είναι μάλλον απίθανο να επιφέρει κάποια επίπτωση στη συμπεριφορά του πετρώματος κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής, ειδικότερα δε σε υψηλές θερμοκρασίες (Elliott M. G., 1989).

Ένα περαιτέρω θέμα συζήτησης σχετικά με τη δεύτερη εναλλακτική επιλογή αποτελεί η ευαισθησία του δοκιμίου του πετρώματος σε ρωγμές λόγω της θερμότητας. Ορισμένες ρωγμές λόγω θερμότητας είναι αναμενόμενες σε δοκιμές με πολύ υψηλές θερμοκρασίες εξαιτίας της διαφορικής θερμικής διαστολής των επιμέρους συστατικών του πυρήνα του δοκιμίου. Ωστόσο, ταχείες επιφανειακές μεταβολές θερμοκρασίας σε πετρώματα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας ενδέχεται να επάγουν θερμικές ρωγμές, οι οποίες στη συνέχεια θα επηρεάσουν την επακόλουθη μηχανική συμπεριφορά. Συνεπώς, η ταχύτητα της διακύμανσης της επιφανειακής θερμοκρασίας πρέπει να διατηρείται επαρκώς αργή για τη συγκράτηση της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο εντός του δοκιμίου εντός του εύρους των 3°C - 5°C της ελάχιστης τιμής (Elliott M. G., 1989).

2.6. Εξοπλισμός μέτρησης και καταγραφής φορτίων, πιέσεων και μετατοπίσεων

Η μελέτη της συμπεριφοράς των πετρωμάτων κατά τη διάρκεια μίας τριαξονικής δοκιμής βασίζεται σε συγκεκριμένα όργανα μέτρησης ανάλογα με το μέγεθος που εξετάζεται κάθε φορά. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει :

Α) Συνεχής μέτρηση του αξονικού φορτίου

B) Συσκευές ένδειξης πίεσης (μανόμετρα ή μορφοτροπείς πίεσης) για τη μέτρηση της πλευρικής πίεσης. Είναι προτεινόμενη η χρήση τουλάχιστον δύο τέτοιων συσκευών ένδειξης με εύρος καταγραφής περίπου 0 – 15 και 0 – 70 MPa. Για τις δοκιμές τύπου Ι, οι πλευρικές πιέσεις πρέπει να παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για τις δοκιμές τύπου ΙΙ και ΙΙΙ απαραίτητη θεωρείται η συνεχής καταγραφή των τιμών της πλευρικής πίεσης , η οποία υπαγορεύει την απαίτηση για ύπαρξη μορφοτροπέων πίεσης για τις μετρήσεις.

Γ) Για τις συνεχείς μετρήσεις και καταγραφές των αξονικών μετατοπίσεων του δοκιμίου, απαιτείται ένας μορφοτροπέας μετατόπισης.

Δ) Το αξονικό φορτίο, η αξονική μετατόπιση - βράχυνση) και η πλευρική πίεση μπορούν είτε να διαβάζονται περιοδικά ή να καταγράφονται με τρόπο συνεχή. Στις δοκιμές τύπου Ι, μόνο το αξονικό φορτίο και η μετατόπιση μεταβάλλονται και μια συσκευή συνεχούς καταγραφής ή συσκευές περιοδικής απεικόνισης είναι επαρκείς. Οι δοκιμές τύπου ΙΙ και τύπου ΙΙΙ απαιτούν συνεχή καταγραφή και έλεγχο των δεδομένων με καταγραφείς αξονικού φορτίου έναντι αξονικής μετατόπισης και με καταγραφείς αξονικού φορτίου έναντι πλευρικής πίεσης περιορισμού. (Elliott M. G., 1989).

2.6.1. Μέτρηση και καταγραφή του αξονικού φορτίου

Τα φορτία που ασκούνται στις βάσεις των δοκιμίων παράλληλα προς τον άξονά τους μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας ειδικές δακτυλοειδείς διατάξεις πιεζομέτρησης. Τα ευαίσθητα αυτά όργανα χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση ηλεκτρονικών κελιών φορτίου (load cell).

Οι μετρήσεις αξονικών φορτίων μπορούν να πραγματοποιηθούν εξωτερικά του τριαξονικού κελιού προσαρμόζοντας ένα ηλεκτρονικό κελί φορτίου στο έμβολο φόρτισης. Ωστόσο, οι μετρήσεις που γίνονται εξωτερικά του κελιού φόρτισης πρέπει να διορθώνονται για τη δεδομένη τιμή της τριβής του εμβόλου, η οποία είναι μικρότερη από το φορτίο που ασκείται. Ωστόσο, η τριβή ενδέχεται να μεταβάλλεται απότομα και

συνεπώς οι διορθώσεις γίνονται ανακριβείς. Ως εκ τούτου, είναι προτιμότερο οι μετρήσεις των φορτίων να γίνονται από εσωτερικό κελί φορτίου (Elliott M. G., 1989).

Ένα κατάλληλο εσωτερικό κελί φορτίου μπορεί να διαμορφωθεί από ένα ελαστικό στοιχείο στο οποίο προσαρτώνται τροπόμετρα (strain gauges). Το κελί φορτίου τοποθετείται ακριβώς δίπλα σε μία εκ των δύο πλακών φόρτισης σφαιρικής υποδοχής των βάσεων του δοκιμίου και συνιστά ένα διάκενο στη στήλη φόρτισης. Ερευνητές έχουν αντιληφθεί ότι η προσαρμογή τροπόμετρων με εποξική ρητίνη τείνει να έχει μικρή διάρκεια ζωής σε υψηλές πιέσεις λόγω της διαφοράς συμπιεστότητας της ρητίνης και του μεταλλικού υποστρώματος.

Το κύριο πρόβλημα κατά τη χρήση εσωτερικών κελιών φορτίου είναι η αδυναμία ρύθμισης απευθείας υπό πίεση. Η ακρίβεια της ρύθμισης ενός κελιού φόρτισης, η οποία δύναται να επιτευχθεί σε ασυμπίεστες συνθήκες, είναι της τάξεως των ± 1.5 kN σε εύρος 2000 kN. Μετρήσεις που πραγματοποιούνται από εσωτερικά κελιά φορτίου υπό πίεση μπορούν να επιβεβαιωθούν με τη χρήση εξωτερικών κελιών φορτίου. Ωστόσο, ένα μικρό ποσοστό ανακρίβειας στις μετρήσεις του φορτίου είναι αναμενόμενο σε υψηλές πιέσεις σε σύγκριση με τις ασυμπίεστες συνθήκες.

2.6.2. Αξονική τροπή (ανηγμένη παραμόρφωση) και μετατόπιση - βράχυνση

Οι αξονικές τροπές μπορούν να μετρηθούν είτε άμεσα είτε με αναγωγή από τις μετρήσεις των αξονικών μετατοπίσεων – βραχύνσεων. Οι αξονικές τροπές μπορούν να μετρηθούν άμεσα με τη χρήση τροπόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges) προσαρμοσμένων πάνω στο δοκίμιο. Ωστόσο, το μήκος των αισθητήρων πρέπει να



Εικόνα 1: Προσαρμογή των μορφοτροπέων – LVDTs πάνω στις πλάκες

επιλέγεται με μεγάλη προσοχή καθώς οι τοπικοί ρυθμοί τροπής ενδέχεται να ποικίλουν από τους συνολικούς ρυθμούς τροπής ως αποτέλεσμα μίας μικρής ανομοιογένειας και τοπικών διακυμάνσεων της τροπής εντός του δοκιμίου, συγκεκριμένα μετά την επίτευξη της κορυφαίας αντοχής του δοκιμίου. Επιπλέον, τα τροπόμετρα είναι αναλώσιμα και συνεπώς η χρήση τους δεν είναι πάντοτε αποδοτική οικονομικά.

Αξιοποιώντας τη σύμβαση της βραχομηχανικής, οι τροπές μπορούν να προσδιοριστούν από τις μετρήσεις μετατοπίσεων διαιρώντας τη μετατόπιση προς το αρχικό μήκος του δοκιμίου. Μετρήσεις μετατοπίσεων μπορούν να πραγματοποιούνται είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά του τριαξονικού κελιού. Εξωτερικές μετρήσεις των μετακινήσεων του εμβόλου φόρτισης μπορούν να πραγματοποιούνται είτε με χρήση ψηφιακών αισθητήρων είτε με ηλεκτρονικές συσκευές μέτρησης όπως είναι οι μορφοτροπείς – βελόμετρα (LVDTs). Και στις δύο μεθόδους πρέπει να ρυθμίζεται η συμπίεση του συστήματος φόρτισης (πλάκες φόρτισης, κελί φόρτισης, πλάκες πορώδους) μεταξύ των σημείων αναφοράς. Οι μετρήσεις αυτές ενδέχεται να είναι ανακριβείς καθιστώντας περισσότερο αξιόπιστη τη χρήση εσωτερικών συσκευών μέτρησης

Εσωτερικές μετρήσεις της αξονικής μετατόπισης παρακολουθούνται μέσω των μορφοτροπέων – βελόμετρων απευθείας από την οθόνη του υπολογιστή. Το σώμα των μορφοτροπέων αυτών στηρίζεται με σύσφιξη από μία συσκευή συγκράτησης η οποία προσαρμόζεται σε μία εκ των πλακών φόρτισης – συνήθως στην κάτω με χρήση μαγνήτη.

Το σώμα των μορφοτροπέων προσαρμόζεται σε μια ράβδο επέκτασης και συγκρατείται από συσκευή που συνδέεται με την άλλη πλάκα φόρτισης. Η ράβδος επέκτασης είναι απαραίτητη επειδή η απόσταση μεταξύ των σημείων αναφοράς είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη του μήκους του σώματος. Σε δοκιμές σε θερμοκρασία δωματίου, η ράβδος επέκτασης κατασκευάζεται από ελαφρύ χάλυβα ή αλουμίνιο, ωστόσο το υλικό αυτό είναι ακατάλληλο για δοκιμές υψηλών θερμοκρασιών εξαιτίας της μεγάλης θερμικής του διαστολής. Για δοκιμές υψηλών θερμοκρασιών, ράβδοι από ανθρακόνημα συνδεδεμένες με ρητίνη είναι εξαιρετικά ανθεκτικές σε θερμοκρασίες έως 200°C. Ράβδοι από κρύσταλλο χαλαζία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες έως 500°C, αλλά είναι εξαιρετικά εύθραυστες και καθιστούν απαραίτητη την προσοχή κατά το χειρισμό τους κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Και τα δύο υλικά έχουν αμελητέες θερμικές διαστολές.

Η επιλογή των μορφοτροπέων για χρήση εντός του τριαξονικού κελιού πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις υφιστάμενες πιέσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εάν χρησιμοποιείται ένα μη αγώγιμο υγρό πλευρικής πίεσης, οι θήκες των μορφοτροπέων μπορούν να φέρουν οπή προκειμένου να επιτρέπουν στις τιμές πίεσης εσωτερικά και εξωτερικά του μορφοτροπέα να εξισωθούν. Φυσικά, υπό αυτές τις συνθήκες, η κατάλληλη ρύθμιση των μορφοτροπέων πραγματοποιείται με την προσάρτηση τροπόμετρων ηλεκτρκής αντίστασης σε ένα κατάλληλο δοκίμιο από χάλυβα ή αλουμίνιο και να συγκρίνονται τα αποτελέσματα για αξονικές φορτίσεις υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες ή υπό πίεση.

2.6.3. Ακτινική τροπή και μετατόπιση

Οι ακτινικές τροπές δεν μπορούν να δοθούν με απευθείας μέτρηση αλλά μπορούν να αναχθούν από μετρήσεις ακτινικής μετατόπισης, ογκομετρικής μετατόπισης και περιφερειακής τροπής (Elliott M. G., 1989).

Οι μετρήσεις ακτινικής μετατόπισης πραγματοποιούνται εντός του τριαξονικού κελιού χρησιμοποιώντας μία ενσωματωμένη συσκευή προβόλου. Τα ελεύθερα άκρα ενός ζεύγους επιμηκών προβόλων προσαρμόζονται σε σημεία αναφοράς στην περιφέρεια του δοκιμίου. Τα ενσωματωμένα άκρα των προβόλων είναι τμήμα ενός δύσκαμπτου δακτυλίου το οποίο κρέμεται κάτω από το ελεύθερο άκρο. Αισθητήρες βράχυνσης, προσαρμοσμένοι σε κάθε πλευρά του κάθε προβόλου πλησίον του ενσωματωμένου άκρου, μετρούν τις τροπές που προκαλούνται από την κάμψη των προβόλων καθώς η ακτινική μετατόπιση του δοκιμίου μεταβάλλεται. Μία τέτοια συσκευή μπορεί να ρυθμιστεί με παρόμοιο τρόπο με αυτό που περιγράφηκε για τους μορφοτροπείς. Ακρίβεια ρύθμισης της τάξεως ± 0,053 mm εντός ενός εύρους μέτρησης 2,4 mm μπορεί να επιτευχθεί. Μία εναλλακτική μέθοδος περιλαμβάνει ακτινικά τοποθετημένους μορφοτροπείς. Ωστόσο, η μέθοδος απαιτεί αρκετό χώρο εντός του τριαξονικού κελιού συγκριτικά με τη μέθοδο ενσωματωμένων προβόλων, κάτι το οποίο μπορεί να αποτελεί έναν περιορισμό ειδικότερα δε σε υψηλές θερμοκρασίες.

Και με τις δύο μεθόδους, υπάρχει μία ανησυχία για το εάν η ακτινική παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια διαμέσω της μεμβράνης του δοκιμίου. Μία λύση στο εν λόγω πρόβλημα αποτελεί η προσαρμογή δύσκαμπτου κουμπιού πάνω στο δοκίμιο, το οποίο τρυπά τη μεμβράνη όπως απεικονίζεται στο **σχήμα 5.** Κατά αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται το ζήτημα της μέτρησης των τροπών εντός της μεμβράνης. Η μεμβράνη μπορεί να σφραγιστεί έναντι του κουμπιού με τη χρήση κατάλληλης κόλλας, διατηρώντας τη στεγανότητα του δοκιμίου έναντι του υγρού πλευρικής πίεσης.

Περιφερειακές μετατοπίσεις σε τριαξονικές δοκιμές δε δύναται να πραγματοποιηθούν με την ίδια ευκολία συγκριτικά με τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, λόγω της επίδρασης της μεμβράνης και του υγρού πλευρικής πίεσης, ενώ η μέτρηση των μετατοπίσεων αυτών γίνεται με τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης προσαρμοσμένα στις πλευρές του δοκιμίου. Εάν σε ένα ανομοιογενές δοκίμιο, υπάρχει ένα ομοιογενές πεδίο τάσεων, η περιφερειακή τροπή είναι ισοδύναμη με την ακτινική τροπή.

23

Μετρήσεις της ακτινικής τροπής αναγόμενες από τις μετρήσεις της ογκομετρικής τροπής είναι επιρρεπείς σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα συγκριτικά με οποιαδήποτε από τις πρώτες δύο μεθόδους εξαιτίας περισσότερων απαιτούμενων υποθέσεων. Η ακτινική τροπή, ε_r , μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της ογκομετρικής τροπής σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon_{\rm r} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\rm v} + \varepsilon_{\rm a})$$
 (2)

Με την προϋπόθεση : α) το δοκίμιο παραμορφώνεται ως ομοιόμορφος κύλινδρος, β) ένα ομοιογενές πεδίο τάσεων υφίσταται εντός του δοκιμίου, γ) η ογκομετρική τροπή ε_ν προσδιορίζεται από μετρήσεις ογκομετρικών μετατοπίσεων διαιρεμένων δια του αρχικού όγκου του δοκιμίου, δ) η αξονική τροπή ε_a έχει προσδιοριστεί.

Λόγω του σημαντικού βαθμού αβεβαιότητας που μπορεί να ανακύψει, η τελευταία μέθοδος δε συνίσταται για την εκτίμηση ακτινικών τροπών.

2.6.4. Μετρήσεις της τροπής

Οι μετρήσεις της τροπής συνήθως πραγματοποιούνται με αισθητήρες τροπής ηλεκτρικής αντίστασης – ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges). Για ακριβείς προσδιορισμούς, είναι σημαντικό οι μετρήσεις της τροπής να πραγματοποιούνται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο τουλάχιστον με δύο.





Σχήμα 14: θαλάμους υψηλής πίεσης (κατά Baidyuk, 1967)



Διάταξη δοκιμίου για δοκιμές σε Σχήμα 15: Διάταξη δοκιμίου για δοκιμές εντός θαλάμων υψηλών πιέσεων με περιορισμό της τριβής στις βάσεις του δοκιμίου (κατά Baidvuk, 1967)

Μία διάταξη δοκιμής περιλαμβάνει ειδικά διαμορφωμένα έμβολα φόρτισης (Σχήμα 14) εντός των οποίων ενσωματώνονται οι βάσεις των δοκιμίων με τη διεπιφάνεια ανάμεσα στις βάσεις και τα έμβολα να πληρώνεται από επίστρωση εποξικού τσιμέντου ή τσιμέντο ειδικής πυριτικής σύστασης, ενώ η επιφάνεια του δοκιμίου επικαλύπτεται επίσης από λεπτό εποξικό τσιμέντο και περιορίζεται εντός ενός λεπτού σωλήνα από χαλκό (πάχους 0.10 mm ή 0.004 in), ή πολυαιθυλένιο ή καουτσούκ, που αποτελεί την ελαστική μεμβράνη. Τα stain gauges τοποθετούνται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου με το μήκος τους να μη ξεπερνά την τιμή 0.8 d (όπου d η διάμετρος του δοκιμίου) (Baidyuk, 1967).

Στο Σχήμα 15 απεικονίζεται η διάταξη κατά Baidyuk για τη μείωση του ύψους του δοκιμίου μέσω περιορισμού της τριβής στις βάσεις – συνοριακές καταστάσεις διεπιφανειών. Στη διάταξη αυτή, η επιφάνεια φόρτισης αποτελείται από δύο λεπτούς δίσκους από χαλκό πάχους 0.15 mm ή 0.006 in, συγκολλημένους με φθοριοαιθυλένιο πάχους 0.20 – 0.30 mm ή 0.008 – 0.012 in. Οι πλάκες φόρτισης είναι συγκολλημένες στο παρέμβυσμα χαλκού με σκοπό την προστασία του δοκιμίου από το υγρό που ασκεί την υδροστατική πίεση. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται μείωση της διόγκωσης του δοκιμίου σε σχήμα βαρελιού, ενώ το απαραίτητο ύψος μπορεί να περιοριστεί στη τιμή 1.2 d με αισθητήρες τροπής μήκους 0.8 d (Vutukuri, 1989).

2.6.5. Ογκομετρική τροπή και μετατόπιση

Μετρήσεις της συνολικής μεταβολής όγκου του δοκιμίου δύνανται να πραγματοποιηθούν με διάφορους τρόπους οι οποίοι περιλαμβάνουν: i) μετρήσεις αξονικής και ακτινικής ή περιφερειακής μετατόπισης, ii) μετρήσεις μεταβολών του όγκου των πόρων, iii) μετρήσεις μεταβολών της πίεσης του υγρού πλευρικής πίεσης.

Εκτιμήσεις της συνολικής μεταβολής του όγκου, μέσω των σημειακών μετρήσεων αξονικής και ακτινικής ή περιφερειακής μετατόπισης, βασίζονται σε υποθέσεις με γνωστές σχέσεις μεταξύ αυτών των μεταβλητών. Στην ελαστική περιοχή, η υπόθεση αυτή μπορεί να είναι ανεκτή, αν και οι αβεβαιότητες είναι αναμενόμενες. Ωστόσο, καθώς το υλικό υφίσταται παραμόρφωση, μετά την τιμή της κορυφαίας αντοχής, οι υποθέσεις αυτών των σχέσεων είναι λιγότερο εφαρμόσιμες και ως εκ τούτου οι μετρήσεις της καθολικής μεταβολής όγκου χάνουν τη σημασία τους (Elliott M. G., 1989).

Οι εκτιμήσεις της συνολικής μεταβολής του όγκου μέσω μετρήσεων των μεταβολών του όγκου των πόρων βασίζονται στην υπόθεση ότι το ενεργό πορώδες του πετρώματος είναι ισοδύναμο προς το συνολικό πορώδες και ότι οι πόροι υφίστανται αποστράγγιση. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν είναι εφικτή σε ξηρά στραγγισμένα δοκίμια (Elliott M. G., 1989).

Η προτιμότερη και πιο απλή μέθοδος καταγραφής των μεταβολών όγκου περιλαμβάνει τη χρήση αντλίας η οποία κινείται μέσω ενός ατέρμονα κοχλία ή υδραυλικά, για τη διατήρηση συνεχούς πίεσης. Το αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων σε συνδυασμό με την επιφάνεια διατομής των αντλιών παρέχει μία άμεση μέτρηση της συνολικής
μεταβολής όγκου του δοκιμίου. Η μετατόπιση του εμβόλου εντός της αντλίας, μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα μορφοτροπέα – LVDT (Elliott M. G., 1989).

Μία περισσότερο επισφαλής λύση για την καταγραφή αξονικών και διαμετρικών τροπών, οι οποίες στη συνέχεια θα δώσουν τις ογκομετρικές τροπές είναι τα τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης που προσαρμόζονται κατά την αξονική και διαμετρική διεύθυνση των δοκιμίων επιτρέποντας τη μέτρηση του λόγου Poisson.

2.6.6. Θερμοκρασία

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται ηλεκτρονικά με διάφορες τεχνικές: θερμοζεύγη, θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης. Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται για τις περιπτώσεις που απαιτείται η αλληλεπίδραση με τον εξοπλισμό αυτόματης ανάκτησης δεδομένων. Το κάθε θερμοζεύγος, μπορεί να προσαρμοστεί εντός ενός παραμορφώσιμου σωλήνα. Τα όργανα μέτρησης θερμοκρασιών ρυθμίζονται με τη βύθιση των αισθητήρων σε δύο ή περισσότερους ταμιευτήρες γνωστής θερμοκρασίας (θερμοκρασία βρασμού, πάγου). Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από το τύπο του οργάνου και την εξίσωση ρύθμισης που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη θερμοκρασιακή απόκριση του αισθητήρα (Elliott M. G., 1989).

2.6.7. Καταγραφή και αναπαράσταση δεδομένων

Οποιοδήποτε είδος ηλεκτρονικών οργάνων περιλαμβάνει δύο επιμέρους τμήματα: τον αισθητήρα και τον ενισχυτή / ρυθμιστή του σήματος. Ο αισθητήρας είναι το τμήμα της διάταξης το οποίο βρίσκεται εντός του μορφοτροπέα που ανιχνεύει μεταβολές στην παράμετρο που μετράται. Ένας ενισχυτής σήματος απαιτείται να παρέχει ενέργεια στον αισθητήρα, να επεξεργάζεται και να ενισχύει το σήμα απόκρισης. Η ρύθμιση των οργάνων εντός ενός επιθυμητού εύρους επιτυγχάνεται με την προδιαγραμμένη ενίσχυση του σήματος απόκρισης. Ο ενισχυτής σήματος δεν απεικονίζει το ενισχυμένο σήμα αλλά το κατευθύνει σε μία ή περισσότερες θύρες εξόδου που με τη σειρά τους μπορούν να συνδεθούν με μια συσκευής ηλεκτρονικής απεικόνισης. Είναι προτιμότερο ο ενισχυτής σήματος να ρυθμίζεται ώστε να παρέχει ψηφιακά σήματα παρά αναλογικά. Ωστόσο, αποτυπώνεται θόρυβος σήματος αυξάνοντας το βαθμό αβεβαιότητας των δεδομένων που καταγράφονται. Ένα ψηφιακό σήμα παρέχει καλύτερες δυνατότητες χειρισμού των δεδομένων που μεταδίδονται μεταξύ των συσκευών καθώς έχει μικρότερο πλάτος του θορύβου του σήματος. Μεμονωμένοι θόρυβοι σημάτων οι οποίοι συγκεντρώνονται μεταξύ του αισθητήρα και του εξοπλισμού ενίσχυσης δε δύναται να αποφεύγονται πάντα (Elliott M. G., 1989).

Στην τριαξονική δοκιμή, στις διατάξεις σέρβο - ελέγχου, επιτακτική κρίνεται η παρουσία συσκευών αναπαράστασης και επαλήθευσης των δεδομένων, για την υποβοήθηση του χειριστή Η πιο απλή μορφή απεικόνισης ενός ψηφιακού ηλεκτρικού σήματος είναι ένα ψηφιακό πάνελ μέτρησης. Σε οποιαδήποτε συσκευή απεικόνισης, η διάταξη πρέπει να είναι σαφής προς το χειριστή της δοκιμής. Η επαλήθευση των δεδομένων είναι σημαντική σε ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης, καθώς ένα σφάλμα σε ένα σύστημα μέτρησης μπορεί να μην είναι άμεσα διακριτό από τα δεδομένα που απεικονίζονται. Για παράδειγμα, παράλληλα με τη χρήση μορφοτροπέων πίεσης απαιτείται η χρήση μανόμετρων για τη διερεύνηση της απόδοσης των μορφοτροπέων - LVDTs, ενώ επιπλέον συνδυασμοί οργάνων απαιτούνται για τη μέτρηση αξονικών και ακτινικών μετατοπίσεων εντός του τριαξονικού κελιού. Ακόμη, ένα εξωτερικό κελί φορτίου πρέπει να χρησιμοποιείται για τον έλεγχο εσωτερικών κελιών φορτίου (Elliott M. G., 1989).

Τα σήματα που προέρχονται από ενισχυτές σημάτων μπορούν να συνδεθούν με μια συσκευή καταγραφής δεδομένων με τον ίδιο τρόπο όπως αυτός εφαρμόζεται σε ηλεκτρονικές συσκευές απεικόνισης. Η συσκευή καταγραφής δεδομένων μπορεί να είναι είτε ένας καταγραφέας δεδομένων είτε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιλέγεται ένας αριθμός δεδομένων ενώ δεν καταγράφονται όλα καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε μεγάλο όγκο δεδομένων που θα έπρεπε να διαχειριστούν και να αποθηκευτούν. Για το σκοπό αυτό οι συσκευές καταγραφής ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να καταγράφουν δεδομένα σε προκαθορισμένα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα. Τα διαστήματα αυτά καθορίζονται από το χειριστή στην αρχή της κάθε δοκιμής και μπορούν να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ενώ ο υπολογισμός τους πραγματοποιείται με αναγωγή από την αναμενόμενη μέγιστη μετατόπιση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, και το καθορισμένο ρυθμό μετατόπισης (Elliott M. G., 1989).

Οι υπολογιστές έχουν ψηφιακές εισόδους σήματος πολλών καναλιών, οι οποίες συνδέονται με εξοπλισμό ενίσχυσης σήματος. Κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, ένα σύστημα καταγραφής που συνδέεται με έναν υπολογιστή, χρησιμοποιείται όχι μόνο για την απεικόνιση δεδομένων από ενισχυτές σήματος σε ψηφιακή μορφή αλλά και για την παροχή γραφικών απεικονίσεων οποιουδήποτε συνδυασμού μεταβλητών μέσω της κίνησης ενός κλειδιού για την εκτίμηση της προόδου μίας δοκιμής.

Κεφάλαιο 3: Προτεινόμενες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της αντοχής των πετρωμάτων σε συνθήκες τριαζονικής θλίψης

Τρεις διαφορετικοί τύποι δοκιμής τριαξονικής θλίψης περιγράφονται από την ISRM (1983), που διακρίνονται από τον τρόπο που παράγεται η περιβάλλουσα αντοχής του πετρώματος (Σχήμα 16). Με τις δοκιμές τύπου Ι (ανεξάρτητες δοκιμές) μεμονωμένα σημεία της περιβάλλουσας μέγιστης αντοχής (peak strength) - αστοχίας επιλέγονται από ανεξάρτητες δοκιμές σε διαφορετικές πλευρικές πιέσεις, ενώ με τις δοκιμές τύπου ΙΙ (δοκιμές πολλαπλής αστοχίας) και τις δοκιμές τύπου ΙΙΙ (δοκιμές συνεχούς αστοχίας) η περιβάλλουσα αστοχίας παράγεται με μια μεμονωμένη δοκιμή με φόρτιση του δοκιμίου με σταδιακή ή συνεχή αύξηση της πλευρικής πίεσης. Με τους τύπους ΙΙ και ΙΙΙ, λαμβάνονται εκτελώντας τον τύπο Ι. Παράλληλα οι απαιτούμενες δυνατότητες του εξοπλισμού είναι μεγαλύτερες. Τόσο στις προδιαγραφές Ε 103 – 84 όσο και στην προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (1983) δεν προβλέπεται η μέτρηση της πίεσης των πόρων.

Οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό δοκιμών είναι μεγαλύτερες στη δοκιμή τύπου ΙΙ και τύπου ΙΙΙ απ' ότι στη δοκιμή τύπου Ι. Οι προτεινόμενες διαδικασίες δε περιλαμβάνουν εφαρμογές μετρήσεων πίεσης πόρων ούτε και αποστράγγισης δοκιμίων. Η επίδραση της πίεσης των πόρων ανιχνεύεται με πολλαπλές δοκιμές και αν διαπιστωθεί αυτή, τότε λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα (τροποποιήσεις της διάταξης).



Σχήμα 16: Διαφορετικοί τύποι τριαξονικής δοκιμής: α) τύπος Ι – ανεξάρτητες δοκιμές, b) τύπος ΙΙ – δοκιμή πολλαπλής αστοχίας, c) τύπος ΙΙΙ – δοκιμή συνεχούς αστοχίας (ISRM Suggested Method, 1983)

3.1. Προετοιμασία του δοκιμίου – Προτεινόμενη μέθοδος κατά ISRM (1983)

A) Τα δοκίμια πρέπει να είναι κυλινδρικά με λόγο ύψους προς διάμετρο της τάξεως 2:1 και διάμετρο NX (περίπου 54 mm). Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να είναι δεκαπλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος.

B) Οι βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου πρέπει να είναι επίπεδες, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες προς τον άξονα του δοκιμίου.

Γ) Οι βάσεις το δοκιμίου πρέπει να έχουν ανοχή επιπεδότητας ±0.01 mm και δε θα πρέπει να αποκλίνουν από την κάθετο προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου παραπάνω από 0.001 ακτίνια, ή 0.05 mm σε απόσταση 50 mm.

Δ) Οι πλευρές του δοκιμίου πρέπει να είναι ομαλές και λείες με ανοχή 0.03 mm.

Ε) Η χρήση υλικών επικαλύψεων ή η κατεργασία των επιφανειών δεν επιτρέπεται.

ΣΤ) Η διάμετρος του δοκιμίου προκύπτει από το μέσο όρο των τιμών διαμέτρου σε τρία σημεία κατά μήκος του δοκιμίου, τα οποία είναι κοντά στις δύο βάσεις και στη μέση του δοκιμίου. Η τιμή της διαμέτρου που προκύπτει από το μέσο όρο χρησιμοποιοείται για τον υπολογισμό της κυκλικής διατομής του δοκιμίου για την ανάλυση των ακτινικών μετατοπίσεων. Η μέτρηση του ύψους του δοκιμίου καθορίζεται με ακρίβεια 1 mm.

Ζ) Τα δοκίμια δε πρέπει να αποθηκεύονται για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 30 ημερών, για τη διατήρηση της φυσικής υγρασίας του δοκιμίου. Η περιεκτικότητα σε υγρασία των δοκιμίων τη στιγμή της δοκιμής ενδέχεται να έχει μεγάλη επίδραση στην αντοχή του δοκιμίου του πετρώματος. Για το λόγο αυτό πρέπει οι συνθήκες των δοκιμίων να αντιπροσωπεύουν τη φυσική κατάσταση των πετρωμάτων στην ύπαιθρο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διατήρηση της φυσικής υγρασίας των δοκιμίων μέχρι τη στιγμή της δοκιμής. Στην αναφορά, πρέπει να περιλαμβάνονται τόσο η περιεκτικότητα σε υγρασία όσο και ο βαθμός κορεσμού κατά τη στιγμή της δοκιμής.

H) ο αριθμός των δοκιμίων πρέπει να είναι επαρκής, και σύμφωνος με τον απαιτούμενο ανά τύπο δοκιμής, για τον ακριβή προσδιορισμό της περιβάλλουσας αστοχίας υπό το εύρος τιμών της πλευρικής πίεσης.

3.2. Γενικές οδηγίες για την εκτέλεση της τριαζονικής δοκιμής

Α) Προετοιμασία του εξοπλισμού καταγραφής

B) Συναρμολόγηση δοκιμίου, πλακών, μεμβράνης, τριαξονικού κελιού και συσκευών μέτρησης πίεσης, φορτίου και μετατόπισης. Η ακριβής διαδικασία βασίζεται στο σχεδιασμό του τριαξονικού κελιού και στο τύπο και τη διευθέτηση των συσκευών μέτρησης. Γ) Σύνδεση των υδραυλικών αγωγών και πλήρωση του τριαξονικού κελιού με υδραυλικό λάδι, επιτρέποντας στον αέρα να εξέλθει διαμέσου μίας κατάλληλης οπής, επιτρέποντας έτσι την εξαέρωση του τριαξονικού κελιού. Η οπή φράσσεται μετά την εξαέρωση με κατάλληλη βαλβίδα.

Δ) Τοποθέτηση του τριαξονικού κελιού στη συσκευή αξονικού φορτίου.

Ε) Επιλογή της αρχικής πλευρικής πίεσης.

ΣΤ) Έπειτα, εφαρμόζουμε ελαφρύ αξονικό φορτίο μέσω της συσκευής άσκησης αξονικού φορτίου για τη σωστή εφαρμογή των εμβόλων φόρτισης. Λαμβάνουμε μια αρχική μέτρηση στη συσκευή μέτρησης της παραμόρφωσης. Σταδιακά αυξάνουμε την πλευρική πίεση σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο και ταυτόχρονα εφαρμόζουμε επαρκές αξονικό φορτίο για την αποτροπή της απόκλισης από την αρχική μέτρηση των συσκευών μέτρησης της παραμόρφωσης. Όταν επιτευχθεί το προκαθορισμένο επίπεδο της πλευρικής πίεσης, καταγράφουμε τη τιμή του αξονικού φορτίου. Το φορτίο αυτό αντιστοιχεί στο φορτίο έναρξης της δοκιμής. Εφαρμόζουμε το αξονικό φορτίο με τρόπο συνεχή, χωρίς διακοπές μέχρι το φορτίο να γίνει συνεχές ή μέχρι να επιτευχθεί το προκαθορισμένο επίπεδο τροπής. Εφαρμόζουμε το φορτίο με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής ρυθμός τροπής, με τον τελευταίο να μην αποκλίνει περισσότερο από το 10 % του προκαθορισμένου επιπέδου. Η πλευρική πίεση πρέπει να διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής με ταυτόχρονη καταγραφή των παραμορφώσεων.

3.3. Διαδικασία δοκιμής τύπου Ι (ανεξάρτητη δοκιμή)

 A) Το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση πρέπει να αυξάνονται ταυτόχρονα μέχρι την επίτευξη του προκαθορισμένου ορίου της πλευρικής πίεσης.

B) Το αξονικό φορτίο στο δοκίμιο πρέπει να ανταποκρίνεται σε ένα ρυθμό τροπής τέτοιο ώστε η μέγιστη αντοχή να επιτευχθεί μέσα σε 5 – 15 λεπτά φόρτισης από την αρχή επιβολής της αποκλίνουσας φόρτισης. Εναλλακτικά, ο ρυθμός τάσης πρέπει να είναι εντός του εύρους 0.5 – 1 MPa / sec. Στο διάστημα αυτό η πλευρική πίεση πρέπει να παραμένει σταθερή με ακρίβεια 2 %.

Γ) Το μέγιστο αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση πρέπει να καταγράφονται. Προτείνεται η καταγραφή του αξονικού φορτίου και των μετατοπίσεων με τρόπο συνεχή.

3.4. Διαδικασία δοκιμής τύπου ΙΙ (δοκιμή πολλαπλής αστοχίας)

Α) εφαρμογή της αρχικής πλευρικής πίεσης p_o. Το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση πρέπει να αυξάνονται ταυτόχρονα.

B) Το αξονικό φορτίο αυξάνεται τότε διατηρώντας σταθερή την πλευρική πίεση p_0 μέχρι την κορυφαία αντοχή στο διάγραμμα τάσης – αξονικής τροπής (σημείο A, σχήμα 17). Ο ρυθμός φόρτισης στο στάδιο αυτό πρέπει να αντιστοιχεί σε σταθερό ρυθμό παραμορφωσης μεταξύ 10^{-2} sec⁻¹ και 10^{-5} sec⁻¹.

Γ) Η πλευρική πίεση αυξάνεται έπειτα χειρωνακτικά σε ένα βήμα στην επόμενη βαθμίδα, π.χ. από το σημείο A στο σημείο A' του σχήματος 17b, και ακολουθεί η βαθμιαία αύξηση του αξονικού φορτίου μέχρι το σημείο B.

Δ) Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να ληφθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός σημείων της περιβάλλουσας μέγιστης αντοχής. Όταν επιτευχθεί το σημείο **C** (σχήμα 17), η πλευρική πίεση θα διατηρηθεί τότε συνεχής, ενώ το αξονικό φορτίο συνεχίζει την αυξητική πορεία. Αυτό θα προκαλέσει την αστοχία του δοκιμίου, ενώ η αξονική τάση θα πέσει στην τιμή της παραμένουσας του (σημείο **D**, σχήμα 17).

E) Η πλευρική πίεση μειώνεται με τρόπο συνεχή μέχρις ότου αποφορτιστεί πλήρως. Η καμπύλη αξονικής τάσης – πλευρικής πίεσης θα ακολουθήσει της περιβάλλουσα της παραμένουσας αντοχής. Τόσο η δοκιμή τύπου ΙΙ όσο και η δοκιμή τύπου ΙΙΙ επιτρέπουν την απόκτηση της κορυφαίας αντοχής με μεμονωμένες δοκιμές. Ωστόσο, οι παράμετροι ελέγχου και η εμπειρία που απαιτούνται για τις δοκιμές τύπου ΙΙΙ υπερβαίνουν αυτές των δοκιμών τύπου ΙΙ.



Σχήμα 17 : Τριαξονική δοκιμή πολλαπλής αστοχίας : α) Καμπύλη αξονικής τάσης – αξονικής τροπής, b) Καμπύλη αξονικής τάσης – πλευρικής πίεσης (ISRM Suggested Method, 1983)

3.5. Διαδικασία δοκιμής τύπου ΙΙΙ – δοκιμή συνεχούς αστοχίας

Α) Εφαρμογή της αρχικής πλευρικής πίεσης p_o. Το αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση πρέπει κανονικά να αυξάνονται ταυτόχρονα.

B) Το πραγματικό φορτίο αυξάνεται τότε διατηρώντας σταθερή την πλευρική πίεση p_0 , μέχρι το σημείο της κορυφαίας αντοχής (Σημείο A, **σχήμα 18**) στην καμπύλη αξονικής τάσης – αξονικής τροπής . Το αξονικό φορτίο στο δοκίμιο μπορεί να αυξηθεί με τρόπο συνεχή υπό σταθερό ρυθμό τροπής εντός των ορίων 10^{-2} sec⁻¹ έως 10^{-5} sec⁻¹, τέτοιο ώστε το σημείο A να αποκτηθεί εντός 5-15 λεπτών φόρτισης.

Γ) Μία ευθεία γραμμή AB παράλληλη στη γραμμική περιοχή του αρχικού αξονικού φορτίου – καμπύλη παραμόρφωσης χαράσσεται με σημείο έναρξης το σημείο A. Η κλίση V της ευθείας γραμμής θα είναι V = E όπου E είναι η κλίση της γραμμικής περιοχής της αρχικής καμπύλης αξονικού φορτίου – παραμόρφωσης.

Δ) Καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται κατά το προκαθορισμένο ρυθμό, η πλευρική πίεση αυξάνεται παράλληλα. Το μεταβλητό αξονικό φορτίο και η πλευρική πίεση καταγράφονται παράλληλα.

E) Σε ένα επιλεγμένο σημείο B (Σχήμα 18α) η πλευρική πίεση θα διατηρηθεί σταθερή, ενώ το αξονικό φορτίο αυξάνεται. Ως εκ τούτου, μία απόκλιση από τη γραμμική ευθεία AB θα πραγματοποιηθεί οδηγώντας σε αστοχία στο σημείο C. Εάν πραγματοποιηθεί περαιτέρω θλίψη του δοκιμίου, τότε η αξονική τάση πέφτει σε μια παραμένουσα τιμή (σημείο D, σχήμα 18α).

Η πλευρική πίεση ελαττώνεται συνεχώς μέχρι το δοκίμιο να αποφορτιστεί πλήρως. Η καμπύλη αξονικής τάσης – πλευρικής πίεσης θα ακολουθήσει την περιβάλλουσα παραμένουσας αντοχής.



Σχήμα 18: Τριαξονική δοκιμή τύπου ΙΙΙ- δοκιμή συνεχούς αστοχίας (ISRM Suggested Method, 1983)

3.6.Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των τριαξονικών δοκιμών

A) Η αξονική τάση υπολογίζεται με διαίρεση του αξονικού φορτίου που εφαρμόζεται στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής προς την αρχική διατομή του δοκιμίου.

B) Στις δοκιμές τύπου ΙΙΙ, η κορυφαία αντοχή και η περιβάλλουσα παραμένουσας αντοχής παράγονται αυτομάτως. Ανάλογες περιβάλλουσες αστοχίας μπορούν να αποκτηθούν στις δοκιμές τύπου Ι και ΙΙ με προσαρμοσμένες καμπύλες μεμονωμένων σημειακών δεδομένων.

Οι περιβάλλουσες κορυφαίας και παραμένουσας αντοχής μπορούν να εκτιμηθούν μαθηματικά με γραμμικές ή δι - γραμμικές εξισώσεις σύμφωνα με τη σχέση σ = m_ip + b_i. Η θέση των γραμμικών περιοχών προσαρμόζεται από την αποτέμνουσα b_i, την κλίση της καμπύλης m_i και το εύρος της πλευρικής πίεσης για την οποία εφαρμόζονται. Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους m και b, η ενδιάμεση γωνία τριβής φ και η τιμή της φαινόμενης συνοχής c υπολογίζονται από το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\label{eq:phi} \phi = arc\,\sin\frac{m_i-1}{m_i+1} \quad \mbox{kat} \ c = b_i \frac{1-sin\phi_i}{2\cdot cos\phi_i} \ \ \mbox{(3)}$$

Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων αναφέρονται τα ακόλουθα:

A) Προέλευση του δοκιμίου, συμπεριλαμβανομένου της γεωγραφικής του τοποθεσίας, του βάθους και του προσανατολισμού, της ημερομηνίας και της μεθόδου δειγματοληψίας, διάμετρος και ύψος του δοκιμίου.

B) Λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου προετοιμασίας των δοκιμίων, το ιστορικό και το περιβάλλον αποθήκευσης του δοκιμίου.

Γ) Λιθολογική περιγραφή του πετρώματος η οποία να περιλαμβάνει το μέγεθος των κόκκων.

Δ) Περιεκτικότητα σε νερό και βαθμός κορεσμού τη στιγμή της δοκιμής.

E) Περιγραφή του εξοπλισμού δοκιμής (συσκευή φόρτισης, τριαξονικό κελί, συσκευή για την εφαρμογή και μέτρηση της πλευρικής πίεσης).

Ζ) Ημερομηνία της δοκιμής.

Η) Διάρκεια της δοκιμής και ρυθμοί τάσης και μετατόπισης.

 Για τις μεμονωμένες δοκιμές (τύπου Ι) καθορισμός των τιμών πλευρικής πίεσης και αξονικής αντοχής για κάθε δοκίμιο.

Κ) Τρόπος – μηχανισμός αστοχίας.

Λ) Εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής (για την κορυφαία και παραμένουσα αντοχή) μαζί με το εύρος των τιμών πλευρικής πίεσης.

Μ) Πυκνότητα, πορώδες.

3.7. Σημειώσεις – Παρατηρήσεις επί των διαδικασιών δοκιμών τριαξονικής θλίψης

- Η κορυφαία αντοχή προσδιορίζεται από τη μέγιστη αξονική τάση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ένα αδιατάρακτο δοκίμιο σε μια δεδομένη πλευρική πίεση.
- Η επίδραση της πίεσης των πόρων βασίζεται στον τύπο του πετρώματος, την περιεκτικότητα σε υγρασία και το ρυθμό φόρτισης.
- 3. Δύσκαμπτες μηχανές φόρτισης έχουν μέτρο δυσκαμψίας άνω των 0.2 MN/mm, συνήθως μεταξύ 1 και 2 MN/mm. Οι μηχανές φόρτισης θεωρούνται εύκαμπτες αν το μέτρο δυσκαμψίας τους είναι κάτω των 0.1 MN/mm. Προτείνεται η χρήση μηχανημάτων φόρτισης σέρβο – ελέγχου.
- Η μεμβράνη σκληρότητας κατά Shore 60 70 είναι αρκετά ευλύγιστη για την αντιμετώπιση της αντίστασης που οφείλεται στην πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου.
- 5. Η διαδικασία για την αύξηση της πλευρικής πίεσης από το σημείο μηδέν μέχρι την επιθυμητή τιμή εξαρτάται από τον εξοπλισμό της δοκιμής. Στην ιδανική περίπτωση, η αρχική φόρτιση πρέπει να είναι τέτοια ώστε το δοκίμιο να υφίσταται την επίδραση της υδροστατικής ενατατικής κατάστασης. Αν ωστόσο, κατά τη διάρκεια της υδροστατικής φόρτισης η πλευρική πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αξονική τάση, το έμβολο φόρτισης μπορεί να χάσει την επαφή με το δοκίμιο και το δοκίμιο να χάσει την ευθυγράμμισή του. Η τριβή στη διάταξη μπορεί να αποτρέπει την επαναφορά του δοκιμίου στην ιδανική θέση. Συνεπώς, τόσο η πλευρική πίεση όσο και το αξονικό φορτίο αυξάνονται με τέτοιο τρόπο ώστε η αξονική τάση στο δοκίμιο να είναι πάντα μεγαλύτερη της πλευρικής πίεσης, με τη διαφορά τους να μην υπερβαίνει το ένα δέκατο της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής μέχρι την προκαθορισμένη τιμή της πλευρικής πίεσης.
- Η καταγραφή και απεικόνιση γίνεται σε διαγράμματα αξονικού φορτίου αξονικών παραμορφώσεων ή αξονικής τάσης - αξονικής τροπής.

- Ο όρος παραμένουσα αντοχής χρησιμοποιείται για την περιγραφή της αντοχής μετά την αστοχία
- Η διαφορά στην αξονική τάση Δσ_n δηλαδή η αύξηση της τάσης από το σημείο B στο σημείο C (Σχήμα 20), αντιπροσωπεύει το απόθεμα της αντοχής.
- Στις περιπτώσεις ισχυρά ψαθυρών πετρωμάτων ή σχετικά χαμηλής δυσκαμψίας της μηχανής φόρτισης, ενδέχεται να πραγματοποιηθεί απότομη αστοχία στην κορυφαία αντοχή.
- Οι πραγματικές αξονικές τάσεις μπορούν να αποκτηθούν μόνο εάν μετρηθούν πλευρικές παραμορφώσεις και η αρχική διατομή διορθωθεί ακολούθως.
- Η συνοχή δεν έχει εδώ τη συνήθη φυσική σημασία της, αλλά απλά εξυπηρετεί την περιγραφή της περιβάλλουσας αστοχίας.



Σχήμα 19: Οι περιβάλλουσες αντοχής για την κορυφαία και παραμένουσα αντοχή και η περιγραφή τους μέσω δύο γραμμικών τμημάτων με τις παραμέτρους m_i , b_i και m_{iR} , b_{iR} αντίστοιχα (ISRM Suggested Method, 1983)



Σχήμα 20: Δοκιμή τύπου ΙΙΙ με μια επιλεγμένη κλίση V = E που οδηγεί σε μια κατάσταση με απόθεμα αντοχής πριν την κορυφαία αντοχή – αστοχία (ISRM Suggested Method, 1983)

Κεφάλαιο 4: Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη τριαξονική δοκιμή

4.1. Επίδραση της πλευρικής πίεσης στη αντοχή των πετρωμάτων

Τα περισσότερα πετρώματα ενισχύονται όταν υφίστανται πλευρικό περιορισμό. Στη συμβατική τριαξονική δοκιμή ο πλευρικός περιορισμός επιτυγχάνεται με την πλευρική πίεση, δηλαδή την πίεση του ρευστού στο τριαξονικό κελί. Η επίδραση της πλευρικής πίεσης στη συμπεριφορά του πετρώματος κατά τη φόρτιση υπό αποκλίνουσα τάση μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του διαγράμματος ($\sigma_1 - \sigma_3$) - ε_a ή σ_{1dev} - ε_a . Στο **σχήμα 21** δίνονται τα διαγράμματα ($\sigma_1 - \sigma_3$) - ε_a δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε μάρμαρο Wombey (Paterson and Wong, 2005) σε διάφορες πλευρικές πιέσεις σ_3 και η εικόνα των δοκιμών μετά το τέλος των δοκιμών. Από το **σχήμα 21α** παρατηρείται ότι ακόμη και σε μικρές πλευρικές πιέσεις η μείωση της φέρουσας ικανότητας του πετρώματος ύστερα από τη μέγιστη αντοχή μετριάζεται. Η τροπή πριν από τη μακροσκοπική θραύση αυξάνεται σημαντικά για πλευρική πίεση μεγαλύτερη από 20 MPa (Νομικός & Σοφιανός, 2011).



Σχήμα 21: (α) Διαγράμματα $(σ_1 - σ_3) - αξονικής$ τροπής από δοκιμές τριαξονικής θλίψης δοκιμίων μαρμάρου. (β) Φωτογραφίες των δοκιμίων μετά το τέλος των δοκιμών σε πλευρικές πιέσεις 0, 3,5, 35 και 100 MPa (Paterson and Wong, 2005).

Σε μικρές τιμές της πλευρικής πίεσης η μακροσκοπική θραύση επέρχεται σε αξονική τροπή μικρότερη απο 0.5 %. Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης πέραν των 20 MPa, το δοκίμιο αποκτά ικανότητα παραμόρφωσης μεγαλύτερη κατά μία τάξη μεγέθους. Διαπιστώνεται συνεπώς οτι καθώς η πλευρική πίεση αυξάνεται, το πέτρωμα αλλάζει συμπεριφορά και από ψαθυρό γίνεται όλκιμο, αποκτά δηλαδή ικανότητα σημαντικής παραμόρφωσης χωρίς μακροσκοπική θραύση στην κλίμακα του δοκιμίου. Κατά τους Paterson and Wong (2005), η πλευρική πίεση μετάβασης απο την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά μπορεί να θεωρηθεί ως εκείνη η πλευρική πίεση για την οποία η αξονική τροπή είναι της τάξης του 3 - 5 % πριν απο τη μακροσκοπική θραύση του δοκιμίου.

Σε λίγο μεγαλύτερη πλευρική πίεση το πέτρωμα συμπεριφέρεται πλαστικά, δηλαδή δεν απαιτείται μείωση της φόρτισης ώστε να παραμορφωθεί το πέτρωμα ύστερα από την επίτευξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας. Σε περαιτέρω αύξηση της πλευρικής πίεσης είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σημαντική κράτυνση, δηλαδή αύξηση της φέρουσας ικανότητας του πετρώματος με την αύξηση της παραμόρφωσης χωρίς κάποιο εμφανές μέγιστο. Στο **σχήμα 22** δίνονται τυπικά διαγράμματα (σ₁ - σ₃) - ε_α για ψαθυρή, μεταβατική και όλκιμη συμπεριφορά (Νομικός & Σοφιανός, 2011).



Σχήμα 22: Τυπικά διαγράμματα διαφοράς κυρίων τάσεων ως προς την αξονική τροπή για ψαθυρή, μεταβατική και όλκιμη συμπεριφορά.

Σε πολλά πετρώματα, η μετάβαση από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά συμβαίνει σε εύρος πλευρικών πιέσεων που δεν απαντάται στα συνήθη μεταλλευτικά και τεχνικά έργα. Σε μαλακά όμως πετρώματα (όπως π.χ. εβαπορίτες, αργιλικοί σχιστόλιθοι κλπ.) πλαστική συμπεριφορά παρατηρείται ακόμη και σε χαμηλές πιέσεις. Ο πίνακας 1 περιλαμβάνει τιμές της πίεσης μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά για ορισμένα πετρώματα.

Σχετικά με την επίδραση της πλευρικής πίεσης στον τρόπο αστοχίας του πετρώματος, ο Goodman (1989) σημειώνει ότι χωρίς πλευρική πίεση τα περισσότερα πετρώματα θραύονται με μία ή περισσότερες θραύσεις παράλληλα με τον άξονα της φόρτισης. Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, το δοκίμιο θραύεται σε επιφάνεια υπό κλίση ως προς τον άξονα της φόρτισης. Σε μαλακά πετρώματα αυτός ο τρόπος αστοχίας μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε μηδενική πλευρική πίεση. Σε πλευρική πίεση μεγαλύτερη απο την πίεση μετάβασης στην όλκιμη συμπεριφορά δεν εμφανίζεται μία διακριτή επιφάνεια θραύσης, αλλά το παραμορφωμένο δοκίμιο εμφανίζει πολλαπλές μικροθραύσεις που δίνει την εικόνα διαρροής. Μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου δείχνει ολισθήσεις πλεγματικών επιπέδων και θραύση των κρυστάλλων των ορυκτών του πετρώματος.

Πέτρωμα	Πίεση μετάβασης (MPa)	Αναφορά
Ασβεστόλιθος (πορώδες 0.16)	10 - 20	Vajdova, Baud and Wong (2004)
Ασβεστόλιθος	20 - 100	Goodnam (1989)
Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα	30 - 100	Paterson and Wong (2005)
Κρητίδα (πορώδες 0.43)	< 10	Homand and Shao (2000)
Δολομίτης	> 100	Handin and Hager (1957), Mogi (1971)
Ορυκτό αλάτι	0	Goodnam (1989)
Ορυκτό αλάτι	< 20	Handin (1953)
Χαλαζίτης (πορώδες 0.07)	600	Hadizadech and Rutter (1983), Hirth and Tullis (1989)
Ψαμμίτης (πορώδες 0.10)	< 100	Wong, David and Zhu (1997)3), Bergues et al. (1974)
Ψαμμίτης	> 100	Goodnam (1989)
Ψαμμίτης (πορώδες 0.10)	200 – 300	Edmond and Paterson (1972), Hoshino et al. (1972), Schock, Heard and Stephens (1973), Bergues et al. (1974)
Γρανίτης	>> 100	Goodnam (1989)

Πίνακας 1: Πίεση μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά για ορισμένα πετρώματα από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η πλευρική πίεση επιδρά επίσης στην ογκομετρική παραμόρφωση. Σε διαδοχικά αυξανόμενες πλευρικές πιέσεις, οι καμπύλες ογκομετρικής τροπής μετατοπίζονται προς τα πάνω και προς τα δεξιά. Αυτές οι καμπύλες μπορούν να θεωρηθούν ως το αποτέλεσμα μίας υδροστατικής θλίψης με αυξανόμενη αποκλίνουσα τάση. Η συμπεριφορά που παρατηρείται στο σχήμα 24β ισχύει για μικρούς λόγους σ₃ / σ₁. Όταν ο λόγος σ₃ / σ₁ αυξάνεται (π.χ. περισσότερο απο 0.2) η διασταλτικότητα περιορίζεται. Στη συμβατική τριαξονική δοκιμή ο λόγος των κυρίων τάσεων μειώνεται σταδιακά κατά την εφαρμογή



Σχήμα 23: Επίδραση της πλευρικής πίεσης στο τρόπο αστοχίας και στη διασταλτικότητα του πετρώματος (Paterson and Wong, 2005)

της αποκλίνουσας τάσης μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Στη πράξη, η φόρτιση μπορεί να ακολουθεί τέτοια διαδρομή ώστε ο λόγος κυρίων τάσεων να παραμένει σταθερός ή ακόμη και να αυξάνεται.



Σχήμα 24: Επίδραση της πλευρικής πίεσης στον τρόπο αστοχίας και στη διασταλτικότητα του πετρώματος (κατά Mogi, 1966)

Σύμφωνα με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά το παρελθόν σε δοκίμια μαρμάρου, άνθρακα, γρανίτη, φλύσχη, ασβεστόλιθο από τους Von Karman (1911), Murrell (1958), Hobbs (1964), Schwartz (1964), Evans and Pomeroy (1966), διαπιστώθηκε πως η αντοχή των πετρωμάτων σε θλίψη αυξάνεται με αύξηση της τιμής της πλευρικής πίεσης. Η εξάρτηση της αντοχής του πετρώματος από την πλευρική πίεση κατά το μηχανισμό της ψαθυρής θραύσης έχει κατηγοριοποιηθεί κατά τον Mogi (1966) στις ακόλουθες ζώνες:

- i) B_i Η καμπύλη της αντοχής ως προς την πλευρική πίεση είναι μη γραμμική και κοίλη προς τα κάτω. Η αντοχή θραύσης αυξάνει, ενώ ο ρυθμός της αύξησης μειώνεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης.
- ii) $B_o H$ αντοχή αυξάνεται γραμμικά ως προς την πίεση
- iii) B_t Η κλίση της καμπύλης της αντοχής ως προς την πλευρική πίεση μειώνεται σταδιακά. Η ζώνη αυτή αντιπροσωπεύει τη μετάβαση από την ψαθυρή στην πλαστική συμπεριφορά.



Σχήμα 25: Μία τυπική καμπύλη αντοχής – πίεσης ξηρών πετρωμάτων σε θερμοκρασία δωματίου (κατά Mogi, 1966)

Ενώ οι ζώνες αυτές είναι τυπικές των ψαθυρών πετρωμάτων, ορισμένα είδη πετρωμάτων περιλαμβάνουν μόνο τη ζώνη B_o και στερούνται της ζώνης B_i . Άλλα είδη πετρωμάτων όπως ο γρανίτης τείνουν να μεταβάλλονται με τρόπο συνεχή από τη ζώνη B_i στη ζώνη B_o . Ωστόσο, για μικρές τιμές της πλευρικής πίεσης, ανθρακούχα πετρώματα παρουσιάζουν μια γραμμική σχέση μεταξύ της αντοχής και της πίεσης (Vutukuri, 1989).

Η εξάρτηση της τάσης διαρροής (τάση θραύσης) από την πλευρική πίεση είναι διαφορετική στην ψαθυρή θραύση και την πλαστική – όλκιμη συμπεριφορά (Mogi, 1970). Στη ψαθυρή θραύση, η τιμή της κορυφαίας αντοχής τη στιγμή της θραύσης αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, αλλά η αντοχή μετά το σημείο θραύσης – παραμένουσα αντοχή στη πλαστική – όλκιμη συμπεριφορά, προσεγγίζει σταθερές τιμές.

Η σχέση μεταξύ της πλευρικής πίεσης (σ₃) και της αξονικής τάσης (σ₁) τη στιγμή της αστοχίας είναι γραμμική για αρκετά πετρώματα και μπορεί να αναπαρασταθεί από την εξίσωση:

$$\sigma_1 = \sigma_c + m \cdot \sigma_3$$
 (4)

όπου σ_c = αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη για δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2 και m μια σταθερά.

Οι Ryabinin, Beresnev και Martinov (1971) μετά την εκτέλεση αρκετών πειραμάτων σχετικά με την επίδραση της πλευρικής πίεσης στην πλαστική – όλκιμη συμπεριφορά και αντοχή αρκετών τύπων πετρωμάτων κατέληξαν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ψαθυρή θραύση επέρχεται μόνο υπό καθορισμένη τιμή πλευρικής πίεσης, η οποία ονομάζεται κατώφλι πίεσης. Σε πιέσεις υψηλότερες αυτής της τιμής το υλικό μεταβαίνει από τη ψαθυρή στην όλκιμη πλαστική συμπεριφορά. Περαιτέρω αύξηση της πλευρικής πίεσης αυξάνει το βαθμό πλαστικότητας.
- Μία από τις αιτίες της αυξημένης πλαστικότητας είναι ότι η επιπρόσθετη πλευρική πίεση τείνει να μεταβάλει την εντατική κατάσταση. Ο περαιτέρω πιθανός σχηματισμός και η ανάπτυξη των μικρορωγματώσεων αναστέλλονται και προωθείται η διεργασία της πλαστικής παραμόρφωσης.
- Η δεύτερη αιτία της αυξανόμενης πλαστικότητας είναι το ότι η παραμόρφωση υπό υψηλή πίεση «επουλώνει» τις μικρορωγμές που προυπήρχαν.
- Η τρίτη αιτία είναι το ότι υπό την επίδραση της πίεσης, συμβαίνουν μεταβολές στη φύση των διεργασιών που αποτελούν τη βάση των πλαστικών παραμορφώσεων.

Ο Brady (1971) ανέφερε τα αποτελέσματα διερεύνησης της επίδρασης της πλευρικής πίεσης στην κατανομή των τάσεων εντός ενός ελαστικού κυλινδρικού δοκιμίου που υφίσταται αξονική φόρτιση ανάμεσα στις δύσκαμπτες πλάκες ίδιας διαμέτρου με αυτής του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η επίδραση της κακής εφαρμογής μεταξύ του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης - επίδραση των συνοριακών συνθηκών μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης για τιμές του λόγου σ_3 / σ_1 μικρότερες του 0.3 , όπου σ_3 είναι η πλευρική πίεση και σ_1 είναι η ασκούμενη αξονική τάση. Για τιμές του λόγου σ_3 / σ_1 της τάξεως του 0.1 η επίδραση των συνοριακών συνθηκών είναι αμελητέα, για λόγους ύψους προς διάμετρο του δοκιμίου, υψηλότερους από 1. Η επίδραση των συνοριακών καταστάσεων στο μέτρο ελαστικότητας και το λόγου Poisson είναι ασήμαντη για τιμές του λόγου ύψους προς διάμετρο ίσους τουλάχιστον με δύο, δεδομένου οτι μετρήσεις διαμέτρου πραγματοποιούνται στο κέντρο του δοκιμίου (Vutukuri, 1989).

4.1.1. Μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά κατά τη φόρτιση των δοκιμίων

Με την αύξηση της πλευρικής πίεσης, η ολκιμότητα, η οποία προσδιορίζεται ως η ικανότητα του δοκιμίου να υφίσταται μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις χωρίς την εκδήλωση θραύσης, αυξάνεται σημαντικά και λαμβάνει χώρα μία μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση, η οποία συνδέεται με διάφορους μηχανισμούς. Οι διεργασίες και οι μηχανισμοί που εκδηλώνονται κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες με βάση:

- Το εάν η παραμόρφωση των μεμονωμένων κόκκων είναι προσεγγιστικά η ίδια με αυτή
 που εκδηλώνεται μακροσκοπικά, δηλαδή εάν είναι ομοιόμορφη μεταξύ των κόκκων, ή
- Το εάν η μακροσκοπική παραμόρφωση προκύπτει από την αναδιάταξη της θέσης των κόκκων με την παραμόρφωση αυτών να είναι διαφορετική από την πρώτη.

Στην πρώτη κατηγορία μηχανισμών παραμόρφωσης, διακρίνονται η κρυσταλλική πλαστικότητα, δηλαδή η μόνιμη παραμόρφωση λόγω ολίσθησης και περιστροφής σε κλίμακα κόκκων και η ροή «διάλυτοποίησης», δηλαδή η μεταβολή της μορφής των κόκκων λόγω της σχετικής κίνησης του υλικού μεταξύ δύο επιπέδων. Στην δεύτερη κατηγορία μηχανισμών παραμόρφωσης ανήκει η κατακλαστική ροή ή μικρο – ψαθυρή ροή κόκκων και η μικροπλαστική ροή κόκκων (σε υψηλές θερμοκρασίες).

Σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης, μετά το μεταβατικό όριο μεταξύ των δύο καταστάσεων, δεν παρουσιάζεται πτώση της τάσης καθώς η αντίσταση τριβής πάνω στο επίπεδο των ασυνεχειών γίνεται μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή των πετρωμάτων. Κατά τον Mogi (1970), η παραπάνω εξήγηση για τη μετάβαση από τη ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση εφαρμόζεται μόνο στις μεταβατικές διεργασίες πετρωμάτων τύπου B, στις οποίες η μόνιμη παραμόρφωση μετά τη γραμμική περιοχή λαμβάνει χώρα δια κατακλαστικής ροής ή διά ολίσθησης τριβής, και όχι στις τύπου A, στις οποίες μεγάλες μόνιμες τροπές πριν τη θραύση λαμβάνουν χώρα διά ομοιογενών πλαστικών παραμορφώσεων. Οι τυπικές καμπύλες μεταβατικών διεργασιών πετρωμάτων τύπου A και τύπου B αποτυπώνονται στ**α σχήματα 26, 27** (Peterson M.S. &Wong T.F., 2004).

Βασικό χαρακτηριστικό της ψαθυρής κατάστασης είναι η αστοχία σε διάτμηση. Σε πλευρικές πιέσεις κοντά στα όρια της ψαθυρής συμπεριφοράς σχηματίζονται πολλές φορές συζυγή ζεύγη διατμητικών θραύσεων, ενώ κατά κύριο λόγο εκδηλώνεται διεύρυνση της ζώνης διάτμησης και εμφάνιση σημαντικής παραμόρφωσης εκτός της ζώνης διάτμησης μέσω της πλευρικής διόγκωσης του δοκιμίου σε σχήμα βαρελιού. Οι μεταβολές όγκου κατά τη διάρκεια των παραμορφώσεων οφείλονται σε δύο παράγοντες. Από τη μία πλευρά, ο σχηματισμός και η διάδοση των μικρορωγματώσεων οδηγούν στην αύξηση του όγκου, δηλαδή στη διασταλτικότητα. Από την άλλη μεριά, η κατάρρευση των πόρων υπό τη συνδυασμένη επίδραση της υψηλής πλευρικής πίεσης και της αποκλίνουσας τάσης οδηγεί στη μείωση του όγκου λόγω της δράσης της διάτμησης.



Σχήμα 26: (a) Τυπικές καμπύλες τάσης – τροπής για πετρώματα τύπου Α για διαφορετικές πλευρικές πιέσεις, (b) Καμπύλη τάσης – πλευρικής πίεσης και η συμπεριφορά αστοχίας στα πετρώματα τύπου Α (Peterson M.S. &Wong T.F., 2004) Σχήμα 27: (a) Τυπικές καμπύλες τάσης – τροπής για πετρώματα τύπου Β για διαφορετικές πλευρικές πιέσεις, (b) Καμπύλη τάσης – πλευρικής πίεσης και η συμπεριφορά αστοχίας στα πετρώματα τύπου Β (Peterson M.S. &Wong T.F., 2004)

4.1.2. Μεταβατικές διεργασίες στα πετρώματα τύπου Α

Στην περίπτωση αυτή, η ρωγμάτωση πραγματοποιείται μετά από ένα ποσοστό μόνιμης παραμόρφωσης, η οποία αυξάνει με την πλευρική πίεση. Οι μεγάλες μόνιμες τροπές μετά τη γραμμική περιοχή και πριν την θραύση του πετρώματος, πραγματοποιούνται διά ομοιογενών πλαστικών παραμορφώσεων. Η μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση μπορεί να λάβει χώρα τη στιγμή που η αντοχή θραύσης γίνει ίση με την τάση διαρροής. Στο σχήμα 26, η αντοχή του πετρώματος στην περιοχή της ψαθυρής κατάστασης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης και έπειτα η καμπύλη προσεγγίζει το μεταβατικό όριο ψαθυρής - όλκιμης κατάστασης ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση της κλίσης της καμπύλης, Η μείωση της κλίσης της καμπύλης κοντά στην πλευρική πίεση μετάβασης μπορεί να αποδοθεί στη σταδιακή αύξηση της τοπικής διαρροής λόγω ανομοιογένειας υλικού. Σε υψηλότερες πλευρικές πίεσεις, η τάση διαρροής προσεγγίζει μία σταθερή τιμή (Peterson M.S.& Wong T., 2004).

4.1.3. Μεταβατικές διεργασίες στα πετρώματα τύπου Β

Στην περίπτωση αυτή, η πτώση τάσης πραγματοποιείται μετά το σημείο διαρροής, και η μόνιμη παραμόρφωση μετά τη γραμμική περιοχή του διαγράμματος εκδηλώνεται διά κατακλαστικής ροής ή διά ολίσθησης τριβής. Η πλευρική πίεση μετάβασης μεταξύ των δύο καταστάσεων είναι η πίεση κατά την οποία η αντοχή των πετρωμάτων κατά τη ρωγμάτωση είναι ισοδύναμη με την αντοχή λόγω αντίστασης τριβής μετά τη ρωγμάτωση. Το **σχήμα 27β** δείχνει την τυπική καμπύλη τάσης - πλευρικής πίεσης. Η καμπύλη αυτή είναι σχεδόν παράλληλη με την καμπύλη ολίσθησης τριβής πάνω στο επίπεδο της ασυνέχειας, εκτός από την περιοχή χαμηλών τιμών πλευρικής πίεσης. Η κλίση της καμπύλης μειώνεται σταδιακά κοντά στην τιμή πλευρικής πίεσης μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση. Η σταδιακή αυτή μείωση της κλίσης της καμπύλης αποδίδεται στην αύξηση των τοπικών θραύσεων πριν τη ρωγμάτωση λόγω ανομοιογένειας υλικού. Για τιμές πλευρικής πίεσης μεγαλύτερες από την πίεση μετάβασης, η καμπύλη τάσης – πλευρικής πίεσης συμβαδίζει με την καμπύλη ολίσθησης τριβής, στην οποία η αντοχή αυξάνεται γραμμικά με την πλευρική πίεση. Τα περισσότερα είδη πετρωμάτων εκδηλώνουν μία συμπεριφορά ενδιάμεση μεταξύ των δύο ανωτέρω διεργασιών.

4.1.4. Μετάβαση από την ψαθυρή στην κατακλαστική κατάσταση

Στην περίπτωση αυτή η τάση αστοχίας είναι λιγότερο εξαρτόμενη από την πλευρική πίεση. Η αύξηση της πλευρικής πίεσης συντελεί στην αναχαίτιση της ανάπτυξης των μικρορωγματώσεων με την αύξηση της αξονικής τάσης, οι οποίες τείνουν έτσι να σταθεροποιηθούν οδηγώντας σε επαρκή αποσύνθεση ή κατακερματισμό του δοκιμίου πετρώματος με την ενίσχυση των ευσταθών μικρορωγματώσεων και εκδήλωση του κατακλαστικού μοντέλου παραμόρφωσης. Λόγω του γεγονότος ότι η πλευρική πίεση είναι μικρή συγκριτικά με τις τοπικές τάσεις στους πυρήνες των μετατοπίσεων, η τάση για την έναρξη των μικρορωγματώσεων είναι σχεδόν μη εξαρτόμενη από αυτή, σε αντίθεση με τη διάδοση των μικρορωγματώσεων κατά μήκος των ορίων των κόκκων του πετρώματος η οποία εξαρτάται από τη πλευρική πίεση (Peterson M.S. &Wong T.F., 2004).

Σε συμπαγή πορώδη πετρώματα, η σταθεροποίηση της διάδοσης των μικρορωγματώσεων επιτρέπει την εκκίνηση περαιτέρω μικρορωγμάτωσης με την αύξηση της αξονικής φόρτισης. Ακολουθεί συνάντηση και εκ νέου αλληλεπίδραση μεταξύ των ρωγμών, και τελικώς την πλήρη κατάρρευση – κατάκλαση της δομής του πετρώματος στην κλίμακα των κόκκων. Καθώς η κατάκλαση εξελίσσεται, οι μηχανισμοί τροπής μπορούν να μεταβληθούν από μονομερή ελαστική στρέψη, με ελάχιστη συνεισφορά της διεύρυνσης των μικρορωγματώσεων και της ολίσθησης στο επίπεδο των ρωγμών, σε μονομερή κατακλαστική ροή κόκκων από τη σχετική κίνηση των θραυσμάτων που παράγονται από την κατάκλαση (Peterson M.S. &Wong T.F., 2004).

4.2. Επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο (h/d) στην αντοχή σε τριαξονική θλίψη

Σε μια μελέτη της επίδρασης της επαφής των πλακών φόρτισης με τις βάσεις του δοκιμίου (επίδραση των συνοριακών συνθηκών) στη συμβατική τριαξονική δοκιμή, ο Mogi (1966) έδειξε ότι η επίδραση αυτή εξαφανίζεται με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Η κορυφαία αντοχή τη στιγμή της αστοχίας σε ατμοσφαιρική πίεση (0.1 MPa) (14.71 lbf / in²) επηρεάζεται σημαντικά από το λόγο h / d ενός κυλινδρικού δοκιμίου, αλλά υπό υψηλή πλευρική πίεση η αντοχή δεν επηρεάζεται από την τιμή του λόγου αυτού. Αξίζει να σημειωθεί πως οι δοκιμές που πραγματοποίησε ο Byerlee (1967) σε δοκίμια γρανίτη κυλινδρικού σχήματος με διαφοροποίηση ως προς τη διατομή στο μεσαίο τμήμα δεν παρατηρήθηκε σημαντική επίδραση του σχήματος του δοκιμίου του πετρώματος στην αντοχή σε τριαξονική θλίψη (Vutukuri, 1989).

4.3. Η επίδραση του τρόπου φόρτισης στην αντοχή σε τριαξονική θλίψη

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης από τους Donath and Fruth (1971) σε δοκίμια μαρμάρου, λιθογραφικού ασβεστόλιθου, ψαμμίτη καλής διαβάθμισης κόκκων σε θερμοκρασία δωματίου, ξηρές συνθήκες, πλευρικές πιέσεις 100 –

200 MPa και ρυθμούς τροπής 10⁻³ έως 10⁻⁷ /s, μπορεί να ειπωθεί πως η αντοχή συνήθως αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης. Επιπλέον, ο ρυθμός της αύξησης καθορίζεται από την πλευρική πίεση ανάλογα με το τύπο του πετρώματος.

Τα πειράματα τριαξονικής θλίψης μπορούν να πραγματοποιηθούν επιβάλλοντας τάσεις με ελεγχόμενο και σταθερό ρυθμό. Οι συσκευές τριαξονικής δοκιμής είναι εξοπλισμένες με ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι προγραμματισμένο να επιβάλλει αξονική φόρτιση στο δοκίμιο, οδηγώντας το στην αστοχία, είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την παραμόρφωση, είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την επιβαλλόμενη τάση. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για δοκιμές με έλεγχο των παραμορφώσεων (deformation– controlled test) και στη δεύτερη περίπτωση για δοκιμές με έλεγχο των τάσεων ή έλεγχο φορτίου (load–controlled test).

4.3.1. Έλεγχος των παραμορφώσεων (deformation-controlled test)

Όταν διεξάγεται μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης με έλεγχο των παραμορφώσεων (DC), παρατηρείται το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου (strain softening). Η διατμητική αντοχή του συνθετικού πετρώματος – δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος, αφού φτάσει στη μέγιστη τιμή της και με τη διαδικασία της διάτμησης να συνεχίζεται, παρουσιάζει μια σταδιακή μείωση με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Ανάλογα με την πυκνότητα του δοκιμίου, το φαινόμενο μπορεί να διαφοροποιείται.

4.3.2. Έλεγχος των τάσεων ή έλεγχος του φορτίου (load-controlled test)

Αντίθετα όταν το πείραμα διεξάγεται με έλεγχο φορτίου (LC), το φαινόμενο που λαμβάνει τη θέση της σταδιακής απομείωσης της αντοχής, είναι η αστάθεια του συνθετικού πετρώματος (instability). Με τον όρο αστάθεια ορίζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την οποία είτε προκαλούνται ακαριαία μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, είτε ψαθυρή θραύση εξαιτίας της αδυναμίας των δοκιμίων να παραλάβουν το επιβαλλόμενο φορτίο ή τάση. Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με έλεγχο των τάσεων, η τάση αυξάνεται είτε με μικρές αυξήσεις φορτίων (load increments) είτε με σταθερό ρυθμό (constant rate).

Από προηγούμενες μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι, κάτω από αξονοσυμμετρικές συνθήκες, ο τρόπος φόρτισης που υιοθετείται κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, μπορεί να επηρεάσει τις σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων και πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την αστοχία προσδιορίζοντας συνεπώς και την

παραμένουσα αντοχή των δοκιμίων (Hird and Hassona, 1990; Yamamuro and Lade, 1998; Chu and Leong, 2001; J. Chu and D. Wanatowski, 2009).

4.4. Επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων στην αντοχή των πετρωμάτων

Από τα αποτελέσματα δοκιμών των Handin and Griggs δαπιστώθηκε ότι η αντοχή των πετρωμάτων και ο τρόπος της αστοχίας εξαρτώνται από την πλευρική πίεση και πως η εφαρμογή της πίεσης του νερού των πόρων μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Ο Robinson (1959) με δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ασβεστολίθου και ψαμμίτη έδειξε ότι η μείωση της πίεσης του νερού των πόρων οδηγεί σε αύξηση της αντοχής μετά τη θραύση των δοκιμίων και πως όταν η πλευρική πίεση γίνει ίση με την πίεση του νερού των πόρων, μία μικρή μείωση της πίεσης του νερού των πόρων οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της παραμένουσας αντοχής των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι η αντοχή των πορωδών πετρωμάτων είναι συνάρτηση της ενεργής πίεσης περιορισμού (πλευρική πίεση – πίεση του νερού των πόρων) (Vutukuri, 1989).

Σύμφωνα με τις δοκιμές των Serdengecti and Boozer (1961), η παραμένουσα αντοχής των πετρωμάτων στη τριαξονική θλίψη είναι συνάρτηση της ενεργής πίεσης περιορισμού παρά μεμονωμένα των απολύτων τιμών της πλευρικής και της ενδιάμεσης πίεσης. Να σημειωθεί πως το συμπέρασμα ισχύει για δοκίμια κορεσμένα τόσο σε νερό όσο και πετρέλαιο. Η κορυφαία αντοχή των πορωδών πετρωμάτων έχει βρεθεί πως εξαρτάται από την ενεργή πίεση περιορισμού, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πίεσης όταν το υγρό των πόρων είναι χημικά αδρανές, η διαπερατότητα είναι επαρκής για τη διασφάλιση της διάχυσης και την ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης και η διάταξη των πόρων είναι τέτοια ώστε η ενδιάμεση υδροστατική πίεση να μεταδίδεται πλήρως διαμέσου του σταθερού πλαισίου (Vutukuri, 1989).

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του Schwartz (1964) σε δοκίμια ασβεστολίθου, ψαμμίτη, γρανίτη και μαρμάρου, προκύπτει ότι η αντοχή των πορωδών πετρωμάτων είναι ουσιωδώς η ίδια, είτε το δοκίμιο είναι κορεσμένο είτε ξηρό, όταν συγκριθούν με βάση την ενεργή πίεση περιορισμού. Αντίθετα, η αντοχή των αδιαπέρατων πετρωμάτων δε φαίνεται να έχει κάποια συσχέτιση με την ενεργή πίεση περιορισμού.

Οι Brace and Martin (1968) έδειξαν ότι ο νόμος της ενεργούς τάσης εφαρμόζεται σε πυριτικά πετρώματα χαμηλού πορώδους μόνο όταν ο ρυθμός φόρτισης είναι χαμηλότερος μιας κρίσιμης τιμής η οποία εξαρτάται από τη διαπερατότητα του πετρώματος, το ιξώδες του νερού των πόρων και από τη γεωμετρία του δοκιμίου, επιφέροντας αύξηση της αντοχής (Vutukuri, 1989).

Η κορυφαία αντοχή, σύμφωνα με τις δοκιμές του Aldrich (1969) σε δοκίμια ψαμμίτη, ενός αστράγγιστου δοκιμίου καθορίζεται από την ενεργή πλευρική πίεση περιορισμού τη στιγμή της αστοχίας, και το μέγεθος της αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων καθορίζεται από την αρχική ενεργή πλευρική πίεση περιορισμού (Vutukuri, 1989).

Η επίδραση της πίεσης του νερού των πόρων εξαρτάται από το πορώδες του πετρώματος. Το ιξώδες του υγρού, το μέγεθος του δοκιμίου και το ρυθμό της αποστράγγισης. Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων επιφέρει μείωση της αντοχής του πετρώματος. Η θεωρίας της ενεργής πλευρικής πίεσης είναι έγκυρη στις περιπτώσεις που ο ρυθμός φόρτισης είναι μικρότερος από μία κρίσιμη τιμή η οποία εξαρτάται πο τη διαπερατότητα του πετρώματος, το ιξώδες του υγρού των πόρων και το μέγεθος του δοκιμίου (Vutukuri, 1989).

4.5. Επίδραση της χημικής σύστασης του υγρού των πόρων στην αντοχή των πετρωμάτων

Σύμφωνα με μελέτες του Boozer (1962) βρέθηκε ότι τα χημικώς ενεργά υγρά περιορίζουν την αντοχή των πετρωμάτων συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές αντοχής που έδωσαν δοκίμια κορεσμένα σε ανενεργά υγρά υπό τις ίδιες συνθήκες τριαξονικής δοκιμής. Επιπλέον, κατά τον Robinson (1967), χημικά πρόσθετα στα υγρά των πόρων δύνανται να αυξήσουν ή να μειώσουν την παραμένουσα αντοχής στις πλαστικές και όχι ψαθυρές αστοχίες (Vutukuri, 1989).

Κεφάλαιο 5: Μηχανικές παράμετροι κατά την καταπόνηση σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη

5.1. Παράμετροι αντοχής

Η αντοχή ενός υλικού κατά την καταπόνηση σε θλίψη είναι η ικανότητά του να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις (τάσεις) και εκφράζεται σε μονάδες τάσης. Η βασική διαφορά ανάμεσα στη μελέτη των ιδιοτήτων των στερεών σωμάτων και στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων είναι η ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών ασυνεχειών στα πετρώματα, οι οποίες τις περισσότερες φορές προσδιορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων (Αγιουτάντης, 2010).

5.2. Εσωτερική Τριβή και Συνοχή

Η συνοχή (cohesion) είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα των υλικών, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής ενός υλικού και ουσιαστικά εκφράζει την ικανότητα του υλικού να ανθίσταται σε διατμητικές δυνάμεις (βλέπε νόμο Coulomb). Σε ένα πέτρωμα, η συνοχή εξαρτάται επίσης από την υγρασία του πετρώματος και την πυκνότητά του. Στα πετρώματα, η έννοια της συνοχής εκφράζεται έμμεσα και όταν η συμπεριφορά ενός υλικού σε διάτμηση προσομοιάζεται με το νόμο Coulomb. Στην πράξη, τις έννοιες της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής εκφράζει η τριβή μεταξύ των παρειών μίας ασυνέχειας, όταν το υλικό ναι διατμητική αστοχία (Αγιουτάντης, 2010).

5.3. Παράμετροι Ελαστικότητας

Οι πλέον γνωστές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν την ελαστική συμπεριφορά ενός σώματος είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, καθώς και ο λόγος του Poisson. Η πρώτη εκφράζει την ακαμψία ενός υλικού, παρόμοια με την ακαμψία ενός ελατηρίου, όταν αυτό συμπιέζεται ή εκτείνεται, ενώ η δεύτερη εκφράζει την πλευρική παραμόρφωση ενός υλικού, λόγω καταπόνησης σε μία διεύθυνση. Ανάλογα με τη θεώρηση του σώματος (ισότροπο ή ανισότροπο, ομογενές ή μη, ελαστικό ή μη) υπάρχει και πληθώρα άλλων παραμέτρων, οι οποίες υπεισέρχονται στην περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού (Αγιουτάντης, 2010).

5.4. Αντοχή του Πετρώματος σε Θλίψη

Ένα τμήμα πετρώματος στη φυσική του θέση βρίσκεται σε ισορροπία κάτω από ένα σύνολο θλιπτικών (κυρίως) τάσεων, τις οποίες δέχεται από τα παρακείμενα τμήματα

ή / και κατασκευές. Σε μεγάλο βάθος, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι τάσεις που οφείλονται στο βάρος των υπερκείμενων ή / και σε τεκτονικά φαινόμενα είναι δυνατόν να λάβουν μεγάλες τιμές. Για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος κάτω από θλιπτικά εντατικά πεδία, καθώς και για την εκτίμηση της αντοχής του πετρώματος, χρησιμοποιούνται συχνά τα αποτελέσματα εργαστηριακών θλιπτικών δοκιμών σε ακέραιο πέτρωμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως προκύπτει από τη μελέτη του δισδιάστατου εντατικού πεδίου, ένα θλιπτικό σύστημα δυνάμεων είναι δυνατόν να δημιουργήσει διατμητικές ή / και εφελκυστικές τάσεις σε διάφορα επίπεδα κεκλιμένα ως προς τους άζονες επιβολής των φορτίων. Επομένως, οι μηχανισμοί αστοχίας ενός υλικού σε θλιπτική καταπόνηση είναι δυνατόν να αντιστοιχηθούν με άλλους κινηματικούς μηχανισμούς αστοχίας (Αγιουτάντης, 2010).

Η μονοαξονική θλιπτική καταπόνηση αναφέρεται στην περίπτωση όπου ασκείται μία μόνο ορθή τάση σε μία μόνο πλευρά ενός όγκου πετρώματος. Στη βραχόμαζα, οι συνθήκες αυτές απαντώνται συνήθως σε στύλους πετρωμάτων που υποστηρίζουν την οροφή υπογείων εκμεταλλεύσεων, στις παρειές υπογείων ανοιγμάτων, κλπ. Αντίστοιχα, μία από τις βασικές παραμέτρους για την εκτίμηση της αντοχής ενός πετρώματος στο εργαστήριο είναι η μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια. Στο **Σχήμα 28** αριστερά παρουσιάζεται μία τυπική φόρτιση δοκιμίου σε μονοαξονική καταπόνηση (Αγιουτάντης, 2010).



5.5. Μονοαξονική Θλιπτική Καταπόνηση σε Εργαστηριακά Δοκίμια

Για τη μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS, uniaxial compressive strength) του ακέραιου πετρώματος στο εργαστήριο, κατασκευάζονται δοκίμια σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές. Τα εργαστηριακά δοκίμια είναι συνήθως κυλινδρικά με μήκος διπλάσιο έως τριπλάσιο της διαμέτρου τους και τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες σε κατάλληλη μηχανή φόρτισης. Στη συνέχεια φορτίζονται είτε με έλεγχο του

φορτίου (load control) είτε με έλεγχο της μετατόπισης (displacement control) κατά το διαμήκη άξονά τους και συγχρόνως καταγράφεται η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση που υφίστανται. Οι παραμορφώσεις αυτές μετρούνται είτε με ηλεκτρικά τροπόμετρα (strain gauges) κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου, είτε μετρώντας την αξονική βράχυνση και την πλευρική έκταση σε τμήμα του δοκιμίου, είτε μετρώντας τη σύγκλιση των πλακών φόρτισης με χρήση μορφοτροπέων μετατόπισης.

5.6. Απλοποιημένη Θεώρηση της Εργαστηριακής Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης

Η αντοχή του δοκιμίου θεωρείται ότι υπολογίζεται σε σημεία μακριά από τα σημεία επιβολής του φορτίου, ώστε (σύμφωνα με την αρχή του Saint Venant) να θεωρείται ότι εφαρμόζεται ομοιόμορφο εντατικό πεδίο στο υλικό. Οι πλευρές του κυλινδρικού δοκιμίου είναι ελεύθερες να παραμορφωθούν (δεν ασκούνται δηλαδή πλευρικές τάσεις που να εμποδίζουν την παραμόρφωση), κι έτσι οι συνιστώσες τάσης κατά τις εγκάρσιες διευθύνσεις (x, y) είναι ίσες με μηδέν. Επιπλέον, θεωρείται ότι η αξονική τάση, έτσι όπως εφαρμόζεται από τη μηχανή θλίψης, δεν έχει διατμητικές συνιστώσες και επομένως ταυτίζεται με μία κύρια τάση ($\sigma_1 = \sigma_z$). Οι δύο άλλες κύριες τάσεις είναι από τον ορισμό τους ορθογώνιες μ' αυτή, και επομένως ισούνται με μηδέν ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).

Είναι φανερό ότι στις περιπτώσεις αυτές η εντατική κατάσταση του δοκιμίου προσδιορίζεται από μία μόνο κύρια τάση και ο κύκλος του Mohr διέρχεται πάντοτε από τη συμβολή των αξόνων σ,τ.



Σχήμα 29: Τυπικοί τρόποι παραμόρφωσης δοκιμίων που υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη (Αγιουτάντης Ζ.Γ. , 2010)

5.7. Πραγματική Θεώρηση της Εργαστηριακής Δοκιμής Μονοαξονικής Θλίψης και της Πολυαξονικής Θλιπτικής καταπόνησης σε Εργαστηριακά Δοκίμια

Η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής τάσης σε ένα δοκίμιο συχνά δεν περιγράφει αξιόπιστα την πραγματική εντατική κατάσταση του δοκιμίου, λόγω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στα επίπεδα επαφής του με τις πλάκες φόρτισης. Οι ίδιες παραδοχές ισχύουν τόσο για εργαστηριακά δοκίμια όσο και για την εξέταση της ευστάθειας στύλων (pillars) άνθρακα (π.χ. σε εξορύξεις υπογείων ανθρακωρυχείων) ή άλλων στύλων , των οποίων οι διαστάσεις είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές των δοκιμίων.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω της τριβής, μεταβάλλεται η εντατική κατάσταση του δοκιμίου στις περιοχές των πλακών φόρτισης. Στο σχήμα 29 φαίνονται διάφορες περιπτώσεις παραμόρφωσης δοκιμίων ανάλογα με τις συνοριακές καταστάσεις στα σημεία επαφής. Όταν ο συντελεστής τριβής είναι μεγάλος, τότε οι πλευρές του δοκιμίου παρουσιάζουν μία κυρτότητα, ενώ σε περιπτώσεις πολύ χαμηλού συντελεστή τριβής (που επιτυγχάνεται με προσθήκες πλαστικών υλικών ανάμεσα από τις πλάκες και το δοκίμιο), οι πλευρές του δοκιμίου μπορεί να πάρουν ένα κοίλο σχήμα. Οι συνθήκες ομοιόμορφης φόρτισης επιτυγχάνονται μόνο με ειδικές διατάξεις των πλακών φόρτισης (π.χ. πλάκες με ακίδες, βλ. Σοφιανός και Νομικός, 2008) ώστε να παρακολουθούν την παραμόρφωση του δοκιμίου.

Οι εντατικές καταστάσεις του δοκιμίου σε μονοαξονική (ή τριαξονική) καταπόνηση έχουν μελετηθεί από πολλούς μελετητές με διάφορα αποτελέσματα. Στο σχήμα 30 φαίνονται τυπικές κατανομές τάσεων σε δοκίμια που υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).



Σχήμα 30: Καμπύλες τάσεων σε δοκίμια που υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη

Η καταπόνηση των διαφόρων υλικών στο φυσικό τους χώρο (in situ) σε πολύ λίγες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί μονοαξονική. Πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι, όταν εφαρμοστούν πλευρικές τάσεις (confining pressure) σε ένα δοκίμιο υπό αξονική καταπόνηση, τότε το δοκίμιο αστοχεί κάτω από υψηλότερες αξονικές τάσεις και συγχρόνως εμφανίζει μια ευρύτερη πλαστική περιοχή (Jaeger and Cook, 1979). Η συμπεριφορά των διαφόρων υλικών κάτω από την επίδραση πλευρικών τάσεων ή ισοδύναμα τα χαρακτηριστικά της αντίστοιχης καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης εξαρτώνται από τον τύπο του υλικού και το μέγεθος της τάσης. Δοκιμές αυτού του τύπου στο εργαστήριο χαρακτηρίζονται ως τριαξονικές δοκιμές (triaxial tests). Σημειώνεται , ότι όταν χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια, η εφαρμογή των πλευρικών τάσεων γίνεται με υδραυλικό τρόπο και θεωρείται ότι οι πλευρικές τάσεις παραμένουν σταθερές στο επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα της φόρτισης ($\sigma_x = \sigma_y$).

5.8. Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ($C_o = \sigma_c$) υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση σ_c = F_{max} / A, όπου F_{max} είναι το μέγιστο φορτίο (δύναμη) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και A είναι η επιφάνεια που υπολογίζεται από τη μέση διάμετρο του δοκιμίου. Συνήθως τα δοκίμια που προέρχονται από ένα δείγμα έχουν την ίδια διάμετρο (NX), αλλά δεν έχουν το ίδιο ύψος, δηλαδή δεν έχουν τον ίδιο λόγο ύψους προς διάμετρο. Επομένως, είναι απαραίτητο, για τη σωστή σύγκριση των τιμών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μεταξύ των διαφόρων δοκιμίων, να γίνει αναγωγή των τιμών αυτών σε κάποιο σταθερό λόγο h / D. Oι Obert et al. (1946) προτείνουν την ακόλουθη εξίσωση αναγωγής : $C_1 = \frac{C_0}{0,778 + \frac{0,222}{h/D}}$ (5)

όπου $C_0 = \eta$ αντοχή που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο h / d > 1, και $C_1 = \eta$ ανηγμένη τιμή για λόγο h / d = 1. O Protodyakonov (1969) προτείνει την ακόλουθη σχέση αναγωγής:

$$C_2 = \frac{C_0}{\frac{7}{8} + \frac{2}{8h/D}} \quad (6)$$

όπου $C_0 = \eta$ αντοχή που υπολογίζεται για δοκίμιο με λόγο h / d > 1, και $C_2 = \eta$ ανηγμένη τιμή για λόγο h / d = 2. Γενικώς, πάντως, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η αντοχή ενός δοκιμίου μειώνεται καθώς αυξάνει το μέγεθός του.

Ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών του πετρώματος πραγματοποιείται από τα διαγράμματα σ – ε_{a} και σ – ε_{d} της αξονικής τάσης προς την αξονική και διαμετρική τροπή. Για τη μέτρηση των τροπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (electrical resistance strain gauges) ή μηκυνσιόμετρα LVDT (ή άλλοι κατάλληλοι αισθητήρες). Η διακριτική ικανότητα πρέπει να είναι της τάξης του 5 × 10⁻⁶.

Από τις παραμέτρους που μετρούνται είναι δυνατόν να υπολογιστούν :

- 1. Η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση για κάθε στάδιο φόρτισης από τη σχέση $ε_{\alpha} = \Delta l / l_{o}$, όπου Δl η βράχυνση σε κάθε στάθμη φορτίου και l_{o} το αρχικό μήκος του δοκιμίου.
- Η πλευρική (διαμετρική) ανηγμένη παραμόρφωση για κάθε στάδιο φόρτισης από τη σχέση ε_d = Δd / d_o, όπου Δd η μεταβολή της διαμέτρου σε κάθε στάθμη φορτίου και d_o η αρχική διάμετρος του δοκιμίου. Η διαμετρική τροπή μπορεί να υπολογιστεί και από

τη μέτρηση της μεταβολής ΔC της περιμέτρου του δοκιμίου σύμφωνα με τη σχέση: ε_c = $\Delta C / C_o = \pi \Delta d / \pi d_o = \Delta d / d_o = \varepsilon_d$. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε μορφοτροπέα επιμηκυνσιόμετρο περιφέρειας με αλυσίδα.

- Η αξονική τάση που εξασκείται στο δοκίμιο για κάθε στάδιο φόρτισης από τη σχέση σ
 = F / A₀, όπου F είναι το μετρούμενο φορτίο (δύναμη) και A₀ είναι η αρχική επιφάνεια της διατομής του κυλίνδρου.
- 4. Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης από την καμπύλη φορτίου αξονικής μετατόπισης
 (ή από τις τιμές που έχουν καταγραφεί).
- Το εφαπτομενικό, μέσο και τέμνον μέτρο ελαστικότητας από την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης.
- 6. Ο λόγος του Poisson από την αξονική και διαμετρική ανηγμένη παραμόρφωση σύμφωνα με τη σχέση :

$$v = -\frac{E}{\kappa \lambda i \sigma \eta \tau \eta \varsigma \kappa \alpha \mu \pi \upsilon \lambda \eta \varsigma \sigma - \varepsilon_d} \quad (7)$$

όπου η κλίση της καμπύλης σ – ε_d υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται και το μέτρο ελαστικότητας.

5.9. Το Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σε Εργαστηριακά Δοκίμια

Η καμπύλη που προκύπτει από την αποτύπωση των τιμών τάσης – παραμόρφωσης σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων αποτελεί τη συνάρτηση ή την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (stress – strain curve) για το δεδομένο δοκίμιο (και κατ' επέκταση για το πέτρωμα από το οποίο προέρχεται το δοκίμιο). Η καμπύλη αυτή αποτελείται συνήθως από δύο κλάδους (τμήματα). Τον κλάδο μέχρι τη διαρροή ή θραύση και τον φθίνοντα κλάδο (μετά τη διαρροή ή θραύση). Έτσι, διακρίνονται καμπύλες που περιγράφουν είτε ελαστική συμπεριφορά (γραμμική ή μη γραμμική), είτε συνδυασμό των παραπάνω. **Το σχήμα 32** παρουσιάζει τυπικές μορφές τέτοιων συναρτήσεων που προκύπτουν από πειράματα σε διάφορα πετρώματα (Αγιουτάντης, 2010).

Όταν ένα υλικό δεν υφίσταται μόνιμες παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση εξωτερικών τάσεων και είναι δυνατόν να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, όταν σταματήσει η επιβολή του εξωτερικού φορτίου, τότε το υλικό θεωρείται ελαστικό. Σ' αυτή τη περίπτωση η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων είναι δυνατόν να χαρακτηρίζεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους (Σχήμα 31): Ένα υλικό χαρακτηρίζεται γραμμικά ελαστικό (linearly elastic), όταν η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι της μορφής:

$$\sigma = \mathrm{E}\epsilon \ (8)$$

 Ένα υλικό χαρακτηρίζεται τέλεια ελαστικό (perfectly elastic), όταν η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι της μορφής:

$$\sigma = \mathrm{Ef}(\varepsilon) \ (9)$$

Ένα τέλεια ελαστικό υλικό θεωρείται ότι παρουσιάζει υστέρηση (hysteresis), όταν κατά την αποφόρτισή του ακολουθείται διαφορετική τροχιά στο διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.

Όταν ένα υλικό μπορεί να υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις διατηρώντας την ικανότητά του να παραλαμβάνει φορτία, τότε χαρακτηρίζεται πλαστικό (yielding). Ο όρος όλκιμο (ductile) υλικό αναφέρεται κυρίως σε μέταλλα. Τα περισσότερα πετρώματα επιδεικνύουν μία ελαστική συμπεριφορά σε χαμηλές περιοχές τάσεων. Η πλαστική περιοχή ακολουθεί την ελαστική περιοχή στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης και το εύρος της ποικίλει ανάλογα με το υλικό.

Ένα υλικό χαρακτηρίζεται από ψαθυρή (brittle) συμπεριφορά, όταν χαρακτηρίζεται από μικρές παραμορφώσεις με αύξηση της τάσης στην πλαστική περιοχή. Κατ' άλλους (Jaeger and Cook, 1979), η ψαθυρότητα (brittleness) ενός υλικού εξαρτάται από την κλίση του μετά την αστοχία τμήματος της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Η ψαθυρή περιοχή ακολουθεί την πλαστική περιοχή και χαρακτηρίζεται από την έναρξη των φαινομένων της αστοχίας του υλικού. Το μέγιστο της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης, που αποτελεί το όριο ανάμεσα στην πλαστική και ψαθυρή περιοχή, είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος του υλικού που ονομάζεται αντοχή σε θλίψη για ορισμένο πλευρικό περιορισμό. Στις περιπτώσεις μονοαξονικών δοκιμών, η παράμετρος αυτή ονομάζεται αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και συνήθως συμβολίζεται με C₀. Πολλές φορές, και ιδιαίτερα στην Εδαφομηχανική, η δοκιμή αυτή είναι γνωστή και ως ανεμπόδιστη θλίψη (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).



Σχήμα 31: Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για εξιδανικευμένα υλικά (Αγιουτάντης, 2010).



Σχήμα 32: Χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για πετρώματα (Roberts, 1977)

Από τις τυπικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης φαίνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, που υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης, δεν παραμένει σταθερό κατά τη διαδικασία φόρτισης του υλικού. Έτσι, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού ενός αντιπροσωπευτικού μέτρου ελαστικότητας (Σχήμα 33), οι οποίοι έχουν ως εξής:

- Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t (tangent modulus), που στη γενική περίπτωση υπολογίζεται από τη σχέση dσ / dε, αποτελεί την κλίση της καμπύλης σε κάποιο σημείο, το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό (π.χ. 50 %).
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{av} (average modulus), που προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$\Delta\sigma/\Delta\epsilon.$ (10)

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας E_s (secant modulus), που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει τη συμβολή των αξόνων με κάποιο σημείο της καμπύλης, το οποίο δίνεται ως

ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το υλικό (π.χ. 50 %). Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση Δσ / Δε.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό σε όλη την ελαστική περιοχή.



Σχήμα 33: Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας του Young από διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010)

Το σχήμα 36 παρουσιάζει ένα πλήρες διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων ενός δοκιμίου που υφίσταται μονοαξονική καταπόνηση, ενώ συγχρόνως παρουσιάζονται οι μεταβολές στη δομή του δοκιμίου, ανάλογα με την εντατική του κατάσταση.

5.10. Συμπεριφορά του πετρώματος σε θλίψη

Υπό υδροστατική εντατική κατάσταση, ο όγκος του πετρώματος μειώνεται, όπως φαίνεται από το διάγραμμα μέσης τάσης – ογκομετρικής τροπής (σ_{mean} – Δ V/V), στο οποίο διακρίνονται τέσσερις φάσεις (**Σχήμα 34**). Αρχικά (περιοχή I) οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος κλείνουν ενώ τα ορυκτά του συμπιέζονται ελαφρώς. Με την απομάκρυνση της φόρτισης μέρος των μικρορωγμών παραμένουν κλειστές και συνεπώς μέρος της παραμόρφωσης του πετρώματος είναι μη αναστρέψιμο (παραμένουσα παραμόρφωση). Όταν οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος έχουν κλείσει, περαιτέρω φόρτιση προκαλεί ελαστική συμπίεση των κόκκων και κρυστάλλων του πετρώματος καθώς και παραμόρφωση των πόρων του (περιοχή II). Η ογκομετρική τροπή αυξάνεται γραμμικά με την υδροστατική πίεση. Η κλίση της καμπύλης σ_{mean} – Δ V/V στην περιοχή αυτή ισούται με το μέτρο συμπίεση Κ του πετρώματος. Σε πορώδη πετρώματα

(περιοχή III). Μετά την κατάρρευση των πόρων, το μόνο στοιχείο που μπορεί να συμπιεστεί είναι οι κόκκοι του πετρώματος και ως αποτέλεσμα το μέτρο συμπίεσης αυξάνεται. Σε μη πορώδη πετρώματα η περιοχή ΙΙΙ δεν παρατηρείται (Νομικός, 2011).



Σχήμα 34: Συμπεριφορά το πετρώματος σε υδροστατική θλίψη (Νομικός & Σοφιανός, 2011)



Σχήμα 35: Συμπεριφορά του πετρώματος σε αποκλίνουσα θλίψη (κατά Goodman, 1989)

Χαρακτηριστικό του διαγράμματος μέσης τάσης – ογκομετρικής τροπής είναι ότι δεν εμφανίζει κάποιο μέγιστο πέραν του οποίου δεν μπορεί να φορτιστεί το πέτρωμα. Η

απόκριση του πετρώματος στη φόρτιση αποκλίνουσας τάσης προκαλεί διαφορετικά αποτελέσματα όπως φαίνεται από τα τυπικά διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής τροπής, διαμετρικής τροπής και ογκομετρικής τροπής, που δίνονται στο **σχήμα 51.**

Στο αρχικό τμήμα του διαγράμματος, η καμπύλη σ – ε έχει στραμμένα τα κοίλα προς τα πάνω, μέχρι το σημείο Α. Στην περιοχή αυτή (περιοχή Ι), η οποία είναι περισσότερο εμφανής κατά τη φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη, ορισμένοι πόροι και προϋπάρχουσες μικρορωγμές του πετρώματος αρχίζουν να κλείνουν. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι αναστρέψιμη και συνεπώς η συμπεριφορά να είναι μη – γραμμικά ελαστική, ή μερικώς ανελαστική. Σε ορισμένες περιπτώσεις ατέλειες της γεωμετρίας του δοκιμίου, όπως π.χ. μη παραλληλότητα των επίπεδων εδρών του κυλινδρικού δοκιμίου, συμβάλλουν στη μορφή της καμπύλης. Σε φόρτιση τριαξονικής θλίψης, η αρχική εφαρμογή υδροστατικής πίεσης περιορίζει αυτό το τμήμα του διαγράμματος, αφού οι περισσότερες προϋπάρχουσες μικρορωγμές κλείνουν πριν από την εφαρμογή αποκλίνουσας τάσης (Σχήμα 34). Στα περισσότερα πετρώματα, η φάση αυτή ακολουθείται από γραμμική σχέση τάσης – τροπής (περιοχή ΙΙ), όπου συμβαίνει κυρίως συμπίεση των κρυστάλλων και των κόκκων του πετρώματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται ελαστική υστέρηση, που μπορεί να αποδοθεί σε απώλειες λόγω τριβής μεταξύ των επιφανειών προϋπαρχόντων μικρορωγμών (Νομικός και Σοφιανός, 2011).

Πέραν του σημείου Β παρατηρείται απόκλιση της καμπύλης σ – ε από την ελαστική συμπεριφορά. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι ο ρυθμός αύξησης της διαμετρικής τροπής γίνεται μεγαλύτερος εκείνου της αξονικής καθώς επεκτείνονται οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές (παράλληλα με τη διεύθυνση της φόρτισης) και σχηματίζονται νέες στις πιο κρίσιμα φορτισμένες περιοχές του πετρώματος (περιοχή ΙΙΙ). Στην καμπύλη αξονική τάσης – ογκομετρικής τροπής το σημείο Β αντιστοιχεί στην έναρξη αύξησης του όγκου του δοκιμίου ενώ αυξάνεται και ο λόγος Poisson. Στην περιοχή ΙΙΙ η διάδοση των ρωγμών θεωρείται ευσταθής εφόσον για την επέκταση μίας μικρορωγμής κατά πεπερασμένο μήκος απαιτείται μία πεπερασμένη αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης.

Πέραν του σημείου C (περιοχή IV) οι σχηματιζόμενες ρωγμές επεκτείνονται αναπτύσσοντας ένα σύστημα τεμνόμενων και συνεννοούμενων ρωγμών που τελικά σχηματίζουν μία συνεχή (ημί – συνεχή) διάρρηξη στο πέτρωμα (περιοχή V). Στο σημείο C το δοκίμιο μπορεί να έχει όγκο μεγαλύτερο από τον αρχικό. Αυτή η αύξηση του όγκου λόγω της ρωγμάτωσης αναφέρεται ως διασταλτικότητα (dilatancy). Το μέγιστο φορτίο επιτυγχάνεται στο σημείο D. Αυτό το φορτίο είναι το αντικείμενο εξέτασης των κριτηρίων αστοχίας του πετρώματος. Προκειμένου για άκαμπτο σύστημα φόρτισης, το δοκίμιο είναι δυνατόν να εξακολουθήσει να βραχύνεται αξονικά πέραν του σημείου D με ταυτόχρονη όμως μείωση της εφαρμοζόμενης τάσης (Νομικός και Σοφιανός, 2011).

Στις τριαξονικές δοκιμές παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε θλίψη, με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, ότι η μη - γραμμική περιοχή στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης δεν είναι ευαίσθητη στις μεταβολές της πλευρικής πίεσης. Γενικά, οι καμπύλες μετά την αστοχία, μπορούν να χαρακτηριστούν από ζώνες απότομης πτώσης του φορτίου συνοδευόμενες από περισσότερο ομαλές κλίσεις όταν η δοκιμή πραγματοποιείται σε χαμηλές πλευρικές πιέσεις. Σε υψηλότερες πλευρικές πιέσεις, λαμβάνει χώρα η μετάβαση από τη ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά και η απότομη πτώση σταδιακά εξαφανίζεται. Η συμπεριφορά των πετρωμάτων μετά την αστοχία είναι ευαίσθητη σε μεταβολές της εντατικής κατάστασης και εξαρτάται από τη διαδρομή της τάσης (Νομικός και Σοφιανός, 2011).

5.11. Επίδραση των Συσκευών Μέτρησης σε Θλιπτικές Δοκιμές

Τα φορτία που ασκούνται στα δοκίμια πετρωμάτων κατά τη διάρκεια μοναξονικών ή τριαξονικών δοκιμών είναι δυνατόν να φθάσουν και τα 1000 kN για διατομές δοκιμίων με διάμετρο NX (54 mm). Επειδή η συσκευή δοκιμής παραμορφώνεται συγχρόνως με το δοκίμιο, είναι δυνατόν σε πολλές περιπτώσεις να επιδράσει στη διαμόρφωση του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Συνήθως διακρίνονται δύο κατηγορίες συσκευών δοκιμών σε πετρώματα: η άκαμπτη συσκευή (stiff testing machine) και η συνήθης (παραμορφούμενη) συσκευή. Η διαφορά μεταξύ τους οφείλεται στο γεγονός ότι οι συσκευές που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία παραμορφώνονται κατά τη φόρτιση ενός δοκιμίου και αποθηκεύουν στα φέροντα στοιχεία τους μία ενέργεια παραμόρφωσης. Το ελαστικό σύστημα δοκιμίου – συσκευής μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με δύο γραμμικά (ή μη γραμμικά) ελατήρια συνδεδεμένα παράλληλα (Σχήμα 37) και αποθηκεύει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση (Brady and Brown, 1985) :

$$U = \frac{1}{2} P^2 (K_{\Delta} + K_M)$$
 (11)

όπου: $K_{\Delta} = \eta$ σταθερά ελαστικότητας του δοκιμίου, $K_{M} = \eta$ σταθερά ελαστικότητας της μηχανής θλίψης και P = η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την αστοχία του υλικού και που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση.



Σχήμα 36: Πλήρες διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Τσουτρέλης, 1985)

Η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται τη στιγμή έναρξης της αστοχίας του δοκιμίου, με συνέπεια να προκαλεί άμεση (και πολλές φορές εκρηκτική) θραύση του δοκιμίου. Οι άκαμπτες συσκευές (για τις οποίες ισχύει $K_M \gg K_\Delta$) παραμορφώνονται πολύ λιγότερο και συνήθως δεν προκαλείται απότομη θραύση του δοκιμίου. Κάτω από τις συνθήκες ομαλής αστοχίας του δοκιμίου, είναι δυνατόν να μελετηθεί η συμπεριφορά του πετρώματος και μετά την αστοχία (post failure analysis). **Στο σχήμα 38** παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για δοκιμές με συσκευές που έχουν ελαστικές σταθερές α) μικρότερες και β) μεγαλύτερες από εκείνες του δοκιμίου. Στην πρώτη περίπτωση, η δυναμική ενέργεια που απελευθερώνεται από τη μηχανή (που ισούται με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη σ – ε) είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη από το δοκίμιο, με συνέπεια την απότομη θραύση του. Ο τύπος της συσκευής δεν επηρεάζει την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, πριν την αστοχία (Brady and Brown, 1985).



Σχήμα 37 : Ελαστικό ισοδύναμο συστήματος δυνάμεων κατά τη δοκιμή σε θλίψη

Σημειώνεται ότι ορισμένα πολύ ψαθυρά υλικά χάνουν απότομα την ικανότητα παραλαβής τάσεων μετά τη φάση της αστοχίας. Σ' αυτή την περίπτωση, το τμήμα της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης που ακολουθεί το σημείο αστοχίας έχει μεγάλη κλίση, με συνέπεια να είναι δύσκολη η σωστή καταγραφή της παραμόρφωσης ακόμη και με τις πιο άκαμπτες μηχανές. Για τη σωστή παρακολούθηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου, χρησιμοποιούνται μηχανές με ανατροφοδότηση (feedback) του υδραυλικού κυκλώματος ή / και οι δοκιμές γίνονται με έλεγχο της μετατόπισης αντί για έλεγχο του φορτίου (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).

5.12. Ρυθμός Φόρτισης σε Θλιπτικές Δοκιμές

Ο ρυθμός φόρτισης ενός δοκιμίου σε δοκιμές μονοαξονικής ή τριαξονικής θλίψης είναι συνήθως γραμμικός και στις περισσότερες περιπτώσεις ελέγχεται αυτόματα από τη μηχανή δοκιμής. Ένας τυπικός ρυθμός για ψαθυρά πετρώματα που συνιστάται από τη Διεθνή Ένωση για τη Μηχανική Πετρωμάτων (ISRM, International Society for Rock Mechanics) είναι 0.5 - 1 MPa /s ή 72.5 - 145 psi/s. Για ένα δοκίμιο διαμέτρου NX (περίπου 54 mm) ο ρυθμός φόρτισης αντιστοιχεί περίπου σε 1145 έως 2290 N / s ή 257 έως 514 lbf / s. Ο Obert και οι συνεργάτες του (1946) προτείνουν τη χρήση ρυθμού φόρτισης της τάξης των 100 psi / s ή 0.67 MPa / s (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010). Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση του ρυθμού φόρτισης επιφέρει αύξηση όχι μόνο τη αντοχής σε μονοαξονική θλίψη αλλά και του μέτρου ελαστικότητας (Αγιουτάντης, 2010).



Σχήμα 38: Σύγκριση συμπεριφοράς παραμορφούμενης και μη παραμορφούμενης συσκευής φόρτισης (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).
Κεφάλαιο 6: Τύποι και κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος

6.1. Αντοχή και αστοχία του πετρώματος

Με τον όρο αστοχία (failure) υποδηλώνεται η ολοσχερής απώλεια της ακεραιότητας ενός δοκιμίου πετρώματος με επακόλουθη μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς του (και ενδεχομένως της δομής του) κατά τέτοιο τρόπο έτσι, ώστε να μη μπορεί να αναλάβει τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε ή επιλέχθηκε. Επομένως η αστοχία ενός υλικού μπορεί να μη συνεπάγεται και τη θραύση του, αλλά απλά την πλαστική ή μόνιμη παραμόρφωσή του σε μη επιτρεπτά επίπεδα. Προκειμένου για κατασκευές στα πετρώματα, ο όρος αστοχία σχετίζεται με την απώλεια της ικανότητας της κατασκευής να εξυπηρετήσει το στόχο της. Συνεπώς, τα φαινόμενα που συνιστούν αστοχία σχετίζονται με το σκοπό λειτουργίας. Σε ένα δοκίμιο πετρώματος, η έννοια της αστοχίας είναι συγκεχυμένη καθώς η ολοσχερής απώλεια της συνοχής του πετρώματος εξαρτάται από το τρόπο της φόρτισης και ειδικότερα από το σύστημα φόρτισης.



Σχήμα 39 : Αστοχία ενός υλικού (Αγιουτάντης Ζ.Γ., 2010).

Αντοχή (strength) του πετρώματος είναι η ικανότητα αντίστασης του πετρώματος σε εξωτερικές δυνάμεις, η οποία όμως εξαρτάται από τον τρόπο φόρτισης. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού κατασκευών σε πετρώματα είναι χρήσιμη η εύρεση της τάσης που μπορεί να αντέξει το πέτρωμα υπό δεδομένες συνθήκες φόρτισης (Αγιουτάντης,2010).

Ως θραύση ορίζεται ο σχηματισμός επιπέδων διαχωρισμού σε ένα δοκίμιο πετρώματος. Η θραύση περιλαμβάνει θραύση δεσμών και δημιουργία νέων επιφανειών. Ψαθυρή θραύση (brittle fracture) είναι η απότομη απώλεια της αντοχής λόγω θραύσης χωρίς πλαστική παραμόρφωση. Η έναρξη θραύσης δεν είναι συνώνυμη με την αστοχία ή με την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Οι δοκιμές θλίψης που εκτελούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής του πετρώματος μπορεί να μην καταλήγουν σε θραύση του πετρώματος κατά τη μέγιστη τάση υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα φόρτισης είναι αρκετά δύσκαμπτο. Τότε είναι δυνατόν να λαμβάνεται το πλήρες διάγραμμα τάσης – τροπής του πετρώματος. Η αντοχή του πετρώματος αντιστοιχεί στο

σημείο B της τυπικής καμπύλης σ – ε που δίνεται στο ακόλουθο σχήμα 40. Το σημείο A στο ίδιο διάγραμμα αντιστοιχεί στην έναρξη της απόκλισης από την ελαστική συμπεριφορά, που χαρακτηρίζεται γενικά ως διαρροή του πετρώματος. Στο δε σημείο C, το πέτρωμα έχει φθάσει στην παραμένουσα αντοχή του.



Σχήμα 40: Τυπικό διάγραμμα σ
 – ε σε θλίψη

Η εντατική κατάσταση που απαιτείται ώστε να προκληθεί αστοχία ενός στοιχείου πετρώματος, μπορεί να περιγραφεί από τις τρεις κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 , σ_3 , όπου σύμφωνα με όσα ισχύουν για τα πρόσημα στη Μηχανική των Πετρωμάτων $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Σε σύστημα συντεταγμένων κυρίων τάσεων, τα σημεία (σ_1 , σ_2 , σ_3) που αντιπροσωπεύουν εντατικές καταστάσεις αστοχίας μπορούν να σχηματίζουν μία επιφάνεια με εξίσωση :

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (12)$$

Ένα από τα θεμελειώδη αντικείμενα της Μηχανικής των Πετρωμάτων είναι η μελέτη της μορφής αυτής της επιφάνειας για διάφορα πετρώματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιφάνεια αστοχίας μελετάται με την εκτέλεση συμβατικών τριαξονικών δοκιμών, στις οποίες δύο κύριες τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$.

6.2. Τρόποι Αστοχίας των Πετρωμάτων

Στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής πολυαξονικού εντατικού πεδίου, θεωρείται οτι επέρχεται αστοχία του υλικού, όταν πληρούται μία σχέση (που αποτελεί και το κριτήριο αστοχίας) της γενικής μορφής:

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (13)$$

Από την πλευρά της σχεδίασης ενός τεχνικού έργου, η σωστή επιλογή του κριτηρίου αστοχίας είναι σημαντική, διότι η επιτρεπτή εντατική κατάσταση που προκύπτει απο την επιλογή αυτή καθορίζει και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου. Στην πράξη. είναι επίση σημαντικός και ο ρόλος των δυναμικών φορτίων τα οποία δέχεται ένα μέσο και που μπορούν να υπερβούν κατά τάξη μεγέθους τα τελικά στατικά φορτία ισορροπίας.

Οι τρόποι αστοχίας των πετρωμάτων, είτε κατά την εξέτασή τους στο φυσικό τους χώρο, είτε κατά τη διάρκεια εργαστηριακών δοκιμών, είναι κυρίως δύο:

- Αστοχία σε διάτμηση (shear failure)
- Αστοχία σε εφελκυσμό (tensile failure)

Η αστοχία σε διάτμηση ή εφελκυσμό μπορεί να είναι είτε αποτέλεσμα μεγάλων διατμητικών ή εφελκυστικών τάσεων, οι οποίες άμεσα δημιουργούν τις συνθήκες αστοχίας, είτε αποτέλεσμα μεγάλων θλιπτικών τάσεων, οι οποίες έμμεσα δημιουργούν τις συνθήκες αστοχίας. Για παράδειγμα στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, το πέτρωμα συνήθως αστοχεί σε διάτμηση κατά ένα ή περισσότερα επίπεδα κεκλιμένα ως προς τον άξονα φόρτισης. Ο τύπος / μηχανισμός αστοχίας σε εφελκυσμό είναι εντελώς διαφορετικός από το μηχανισμό αστοχίας σε διάτμηση που πραγματοποιείται με θλιπτικές ορθές τάσεις, αν και η αστοχία υπό μονοαξονική θλίψη είναι επίσης διαφορετική, και εκδηλώνεται με αξονικό διαχωρισμό/ απόσχιση (Vardoulakis et al, 1998).

Σε περιπτώσεις που το δοκίμιο (ή ο σχηματισμός επί τόπου) χαρακτηρίζεται απο επίπεδα χαμηλής συνοχής (σχιστότητα, διακλάσεις κλπ) είναι δυνατόν είτε να αστοχήσει σε διάτμηση κατά μήκος των επιπέδων αδυναμίας, είτε σε εφελκυσμό, όταν τα φορτία εφαρμόζονται παράλληλα προς τα επίπεδα αυτά. Σημειώνεται ότι σε περιπτώσεις τριαξονικών δοκιμών θλίψης, όπου αυξάνεται το πλάτος της πλαστικής περιοχής, το δοκίμιο είναι δυνατόν να αστοχήσει λόγω υπερβολικών πλαστικών παραμορφώσεων (αστοχία λόγω διαρροής). Το **σχήμα 41** παρουσιάζει διάφορους τρόπους αστοχίας πετρωμάτων σε θλιπτικές συνθήκες.



Σχήμα 41: Διάφοροι τρόποι αστοχίας των πετρωμάτων σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη

6.3. Τύποι αστοχίας των πετρωμάτων που υποβάλλονται σε τριαξονική καταπόνηση

Υπάρχουν δύο τύποι αστοχίας που παρουσιάζονται σε πετρώματα ανάλογα με το μέγεθος της παραμόρφωσης πριν την αστοχία. Τα πετρώματα χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά όταν αστοχούν χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις, και ως πλαστικά – όλκιμα όταν παραμορφώνονται αρκετά πριν την αστοχία (πλαστική παραμόρφωση). Η ψαθυρή θραύση είναι μία διαδικασία κατά την οποία δεν προκύπτουν μόνιμες μεταβολές στο υλικό παρά

μόνο ο διαχωρισμός του σε δύο τμήματα. Στην ψαθυρή μικροσκοπική συμπεριφορά συνδυάζονται δύο βασικές κατηγορίες διεργασιών: διεργασίες αποδόμησης όπως η ολίσθηση και τυρβώδης ροή και διεργασίες όπως η ολίσθηση τριβής ή η περιστροφή των κόκκων (Vutukuri, 1989).

Τα πετρώματα χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά υλικά, αλλά ενδέχεται να είναι πλαστικά – όλκιμα και μερικές φορές να παρουσιάζουν μεταβατική συμπεριφορά από ψαθυρή σε όλκιμη λόγω μεταβολών του φυσικού περιβάλλοντος. Η απόκριση των πετρωμάτων στην παραμόρφωση εξαρτάται από τη δομή τους και το μέγεθος της πλευρικής πίεσης, αλλά και από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός φόρτισης και η παρουσία και φύση των ενδιάμεσων διαλυμάτων (Vutukuri, 1989).

Ο Terzaghi (1945) ταξινόμησε τις αστοχίες των πετρωμάτων σε διαχωρισμό – απόσχιση, διάτμηση και ψεύδο – διάτμηση ανάλογα με τη διεύθυνση των επιπέδων αστοχίας. Η απόσχιση – διαχωρισμός μπορεί να ανιχνευτεί από ρωγμές που εμφανίζονται παράλληλα προς τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης , κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι οι δεσμοί μεταξύ των κόκκων αστοχούν υπό την εντατική κατάσταση. Η εντατική αυτή κατάσταση μεταξύ γειτονικών κόκκων προκαλείται από τη δράση της ενσφήνωσης των ενδιάμεσων κόκκων. Αντίθετα, η αστοχία διάτμησης, μπορεί να προκληθεί όταν συνδεδεμένοι κόκκοι αντικαθίστανται κατά μήκος ενός επιπέδου ολίσθησης (επίπεδο διάτμησης). Η ψευδο – διατμητική αστοχία αντιπροσωπεύει το συνδυασμό της εντατικής κατάστασης και της αστοχίας διάτμησης για τη δημιουργία μίας αστοχίας σε σχήμα «ζίγκ – ζάγκ» (Vutukuri, 1989).

Οι Griggs and Handin (1960) περιέγραψαν τη μακροσκοπική παραμόρφωση των πετρωμάτων και ορυκτών σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης στο εργαστήριο με βάση τρεις κύριες κατηγορίες συμπεριφοράς, τις αστοχίες διάτασης, τις συμπεριφορές μορφής ρήγματος και την ομοιόμορφη δομή. Προσδιόρισαν τις αστοχίες διάτασης ως το διαχωρισμό ενός κορμού κατά μήκος μίας επιφάνειας κανονικά διατεταγμένης ως προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Στις αστοχίες «ρηγμάτων», το επίπεδο διάτμησης μπορεί να έχει κλίση 45° ως προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να μη προκαλείται πλήρης απώλεια της συνοχής ή διαχωρισμός, απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας και απώλεια αντίστασης σε διαφορικές τάσεις. Η ομοιόμορφη δομή υποδηλώνει μακροσκοπικά ομοιογενή παραμόρφωση. Ο Robinson (1959) ύστερα από σειρά δοκιμών, πρότεινε ότι όταν η πλευρική πίεση γίνει ίση με τη πίεση του νερού των πόρων, οι κόκκοι αρχίζουν να αποδομούνται και να αστοχούν με αστοχία διάτμησης. Επιπλέον, κατέληξε στο ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα κατά μήκος ενός επιπέδου διάτμησης το οποίο διατρέχει τη μάζα του δοκιμίου. Ωστόσο, όταν η διαφορική πίεση είναι ίση με 3.4 MPa (500 lbf/in²) και η πλευρική πίεση είναι ίση με 69 MPa (10000 lbf / in²), δύο ή τρία επίπεδα διάτμησης δατρέχουν το δοκίμιο και παράγουν δύο ή περισσότερους τομείς αστοχίας. Όταν η πίεση του νερού των πόρων γίνει μηδέν και η πλευρική πίεση 69 MPa, τότε τα επίπεδα διάτμησης είναι μικρότερου μήκους και η επιφάνεια του δοκιμίου παρουσιάζει μία διάστικτη μορφή εξαιτίας του μεγάλου αριθμού επιπέδων διάτμησης. Επιπλέον, ο αριθμός των επιφανειών διάτμησης αυξάνεται με την αύξηση της διαφορικής πίεσης και με υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης.

Οι Serdengecti and Boozer (1961) βρήκαν ότι ο τύπος της αστοχίας των πετρωμάτων στη τριαξονική θλίψη εξαρτάται από τη πλευρική πίεση, τη θερμοκρασία και το ρυθμό παραμόρφωσης. Η ψαθυρή αστοχία των πετρωμάτων πραγματοποιείται σε χαμηλές τιμές πλευρικής πίεσης, χαμηλές τιμές θερμοκρασίας και υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Αντίθετα, η όλκιμη συμπεριφορά εκδηλώνεται σε υψηλές πλευρικές πιέσεις, υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης... Η κλίση του επιπέδου της αστοχίας μεταβάλλεται με την πλευρική πίεση. Μία αύξηση της γωνίας κλίσης της αστοχίας με αύξηση της πλευρικής πίεσης έχει παρατηρηθεί από τους Evans and Pomeroy, 1966.



Σχήμα 42: Σχηματική απεικόνιση αστοχιών, από την ψαθυρή θραύση έως την όλκιμη συμπεριφορά, με τυπικές τροπές πριν την αστοχία και καμπύλες τάσης – τροπής όπου σ₁ η μέγιστη κύρια τάση, σ₃ η ελάγιστη κύρια τάση και σ₂ η ενδιάμεση κύρια τάση (Vutukuri, 1989)

6.4. Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Το απλούστερο και περισσότερο γνωστό κριτήριο αστοχίας των πετρωμάτων είναι το κριτήριο Mohr – Coulomb. Σύμφωνα με αυτό, το πέτρωμα σε φόρτιση αποκλίνουσας τάσης, αστοχεί με θραύση σε ένα επίπεδο, στο οποίο η κάθετος σχηματίζει γωνία β με τη διεύθυνση της σ₁. Το κριτήριο αστοχίας MC μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει 1) της μέγιστης κύριας τάσης σ₁ και της ελάχιστης κύριας τάσης σ₃, ή 2) της ορθής τάσης σ ως προς τη διατμητική τάση τ στο επίπεδο αστοχίας (Jaeger and Cook, 1979). Κατά την αστοχία, η διαφορά της διατμητικής τάσης και της αντίστασης τριβής στο επίπεδο της θραύσης ισούται με μία σταθερά c του πετρώματος, που καλείται συνοχή. Εξάλλου, η αντίσταση τριβής είναι το γινόμενο της ορθής τάσης στο επίπεδο της θραύσης επί το συντελεστή τριβής, που ισούται με την εφαπτομένη της γωνίας εσωτερικής τριβής φ του πετρώματος (κατ' αντιστοιχία με τη γωνία τριβής δύο επιφανειών που ολισθαίνουν μεταξύ τους). Η μαθηματική σχέση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb δίνεται από την εξίσωση:

$$|\tau| = c + \sigma_n \tan \phi$$
 (14)

όπου c είναι η συνοχή του πετρώματος, φ η γωνία εσωτερικής τριβής, σ_n η ορθή τάση στο επίπεδο της θραύσης κατά την αστοχία, $|\tau|$ η απόλυτη τιμή της διατμητικής τάσης στο επίπεδο της θραύσης κατά την αστοχία. Η απόλυτη τιμή έχει την έννοια ότι δεν ενδιαφέρει η φορά της διατμητικήε τάσης παρά μόνο το μέγεθός της (Νομικός και Σοφιανός, 2011)

Η γραφική απεικόνιση του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb σε άξονες σ – τ (ορθής και διατμητικής τάσης) είναι ευθεία με κλίση tanφ, όπως φαίνεται στο σχήμα 43. Για ορθή τάση $\sigma_n = 0$, η τετμημένη ισούται με τη συνοχή c του πετρώματος. Η γραφική παράσταση του κριτηρίου αποκόπτεται όταν $\sigma_n < \sigma_t$, όπως φαίνεται στο σχήμα 43.

Η γωνία β του επιπέδου θραύσης δίνεται από τη σχέση:

$$2\beta = \frac{\pi}{2} + \varphi \quad (15)$$

Ο τανυστής της τάσης για τη φόρτιση του πετρώματος είναι:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} (16)$$

Η ορθή και η διατμητική τάση στο επίπεδο της θραύσης υπολογίζονται με στροφή του τανυστή της τάσης:

$$\sigma' = \mathbf{R} \, \sigma \, \mathbf{R}^{\mathrm{T}} \quad (17)$$

όπου R είναι το μητρώο στροφής στο επίπεδο για στροφή του συστήματος των κυρίων διευθύνσεων κατά γωνία β:



Σχήμα 43: (α) εντατική κατάσταση στο επίπεδο θραύσης, (β) γραφική απεικόνιση του κριτηρίου Mohr – Coulomb σε άξονες ορθής και διατμητικής τάσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos \phi \quad (19)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin \phi \quad (20)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στη μαθηματική εξίσωση του κριτηρίου MC προκύπτει:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos\varphi = c + \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi\right]\tan\varphi (21)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η εξίσωση του κριτηρίου Mohr – Coulomb σε άξονες κυρίων τάσεων:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 = \sigma_c + k \sigma_3 (22)$$

Η γραφική απεικόνιση του κριτηρίου Mohr – Coulomb σε διάγραμμα αξόνων κυρίων τάσεων είναι ευθεία με κλίση $k = tan \psi$, όπως φαίνεται στο **σχήμα 44**. Για σ₁ = 0 η τετμημένη ισούται με την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σ_c.



Σχήμα 44: Γραφική απεικόνιση του κριτηρίου Mohr – Coulomb σε διάγραμμα αξόνων κυρίων τάσεων

6.4.1 Συστάσεις για τη χρήση του κριτηρίου αστοχίας Mohr - Coulomb

Τόσο οι γραμμικές όσο και οι μη – γραμμικές εξισώσεις, οι οποίες εξαρτώνται από από τη μέγιστη σ₁ και την ελάχιστη σ_{III} κύρια τάση είναι χρήσιμες λόγω του ότι η γεωμετρική αναπαράσταση των εργαστηριακών δεδομένων μπορεί να είναι είτε στο επίπεδο των κύριων τάσεων είτε στο διάγραμμα Mohr. Οι δοκιμές τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού προτείνονται ως πρότυπες διαδικασίες για την αξιολόγηση της επίδρασης της ενδιάμεσης τάσης. Ωστόσο, για την αρχική προσέγγιση της συμπεριφοράς των πετρωμάτων, το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb προτείνεται στις περιπτώσεις που οι τρείς κύριες τάσεις είναι θλιπτικές και υπάρχει μικρό εύρος ελάχιστων τάσεων (ISRM, 2012).

6.5.Το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown

Οι Hoek και Brown (1980), ύστερα από μεγάλο αριθμό τριαξονικών δοκιμών σε πετρώματα, διαπίστωσαν οτι η τριαξονική αντοχή του πετρώματος μπορεί να περιγραφεί από μία καμπύλη, που εξαρτάται από το τύπο του πετρώματος. Διατύπωσαν έτσι ένα μη – γραμμικό εμπειρικό κριτήριο αστοχίας με βέλτιστη προσαρμογή καμπύλης σε πειραματικά δεδομένα πολλών πετρωμάτων που παρουσιάζουν μακροσκοπικά ισότροπη συμπεριφορά. Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown είναι μία εμπειρική σχέση, η οποία περιγράφει τη μη – γραμμική αύξηση της κορυφαίας αντοχής ισότροπων πετρωμάτων με την αύξηση της πλευρικής πίεσης. Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown βασίζεται στην υπόθεση της ανεξαρτησίας της ενδιάμεσης κύριας τάσης. Πραγματικές τριαξονικές δοκιμές (βλ. Mogi, 1971) έδειξαν ότι η επίδραση της σ₂ μειώνεται κατά τη μετάβαση από την ψαθυρή στην πλαστική συμπεριφορά του πετρώματος (ISRM, 2012). Η γενική μορφή του κριτηρίου δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + 1)^{0.5} (25)$$

όπου σ_1 και σ_3 είναι η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία, σ_{ci} η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, m_i σταθερά του πετρώματος που εκφράζει το «αλληλοκλείδωμα» της δομής και εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των κρυστάλλων ή των κόκκων του πετρώματος (Hoek, 1983). Το διάγραμμα του κριτηρίου Hoek – Brown είναι μη – γραμμικό.

Η σχέση μεταξύ της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος υπολογίζεται θέτοντας $\sigma_1 = 0$ και $\sigma_3 = \sigma_t$ στην εξίσωση (25):

$$\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{t}} = \frac{2}{\sqrt{(m^2 + 4 - m)}} (26)$$

Θέτοντας στην εξίσωση (1) $\sigma_1 = \sigma_3 = -\sigma_t$ τότε η σ_t εκφράζει την αντοχή του πετρώματος σε τριαξονικό εφελκυσμό και ο λόγος σε θλίψη προς την αντοχή σε εφελκυσμό γίνεται $\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_t} = m$ (27)

Ο Zhao (2000) σύγκρινε τις προσαρμογές Mohr – Coulomb και Hoek – Brown σε πειραματικά δεδομένα από μία σειρά δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης, μονοαξονικού εφελκυσμού και ανεμπόδιστης διάτμησης σε δοκίμια γρανίτη. Από τη σύγκριση προέκυψε πως η αντοχή του άθικτου πετρώματος υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης, αποτυπώνεται σαφέστερα με το μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και ο Ghazvinian (2008) σε δοκίμια μάργας, ο Parisseau (2007) σε δοκίμια ψαμμίτη, νορίτη, ασβεστόλιθου και δολομίτη και οι Benz και Schwab (2008).

Αξιοσημείωτη πρόοδος έχει επιτευχθεί όσον αφορά την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown για την εκτίμηση και πρόβλεψη της ψαθυρής αστοχίας θραύσης σε συμπαγή πετρώματα που υφίστανται την επίδραση υπερβολικής τάσης. Οι Martin et al. (1999) παρέχουν μία εμπειρική σχέση για την εκτίμηση του βάθους της αποφλοίωσης, με χρήση του κριτηρίου Hoek – Brown. Ο Diederichs (2007) χρησιμοποιεί το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown για τη μοντελοποίηση του βάθους και της έκτασης της ψαθυρής αστοχίας αποφλοίωσης για σήρεγγες μεγάλου βάθους σε ογκοτεμαχισμένα έως συμπαγή πετρώματα με δείκτη GSI > 65. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της διεργασίας

αποφλοίωσης, το κριτήριο αυτό αποτυπώνει τη εξάρτηση της διάδοσης της θραύσης από το πλευρικό περιορισμό βραχόμαζας.

Ένας σημαντικός περιορισμός του κριτηρίου αστοχίας αφορά την ανεξαρτησία του κριτηρίου αστοχίας από την ενδιάμεση κύρια τάση, σ₂. Οι Hoek and Brown (1980) τεκμηρίωσαν τον περιορισμό αυτό βασιζόμενοι στα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού κατά Brace (1964) που έδειξαν ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις γι $\sigma_2 = \sigma_3$ και $\sigma_2 = \sigma_1$. Πραγματικές τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν από άλλους (π.χ. Mogi, 1971) έδειξαν ότι η επίδραση της σ₂ μειωνόταν κατά την εξέλιξη της μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά κατά τη διεργασία της αστοχίας.

6.5.1. Συστάσεις για τη χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown παρουσιάζει το πλεονέκτημα της περιγραφής μη – γραμμικών αυξητικών μεταβολών αντοχής με την αύξηση του πλευρικού περιορισμού, κάτι το οποίο συμβαδίζει με δεδομένα εκτενών τριαξονικών δοκιμών για μεγάλο εύρος τύπων πετρωμάτων. Η χρήση του κριτηρίου ενδείκνυνται στους περισσότερους τύπους πετρωμάτων (εκρηξιγενή, ιζηματογενή, μεταμορφωμένα) υπό χαμηλές και υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης. Παρομοίως, προτείνεται για την επίλυση προβλημάτων με μεγάλα εύρη τιμών πλευρικής πίεσης. Όπου η αντοχή της βραχομάζας είναι περισσότερο κατάλληλη, παρέχονται από το κριτήριο εμπειρικές μεθοδολογίες για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας (ISRM, 2012).

Κεφάλαιο 7: Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής

7.1. Ορισμός και προέλευση της Ακουστικής Εκπομπής

Σύμφωνα με ορισμό της ISRM (2002), ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό εντατική κατάσταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Είναι αποδεκτό ότι κατά τη φόρτιση επέρχεται σπάσιμο των δεσμών, δημιουργία νέων επιφανειών από την επέκταση υπαρχόντων μικρο-ρωγμών ή δημιουργία νέων, έως ότου η διάδοση τους στο πέτρωμα να οδηγήσει σε αποσάθρωση και θραύση. Μια μικρό ρωγμή θα αναπτυχθεί όταν η ενέργεια που απελευθερώνεται από το σπάσιμο των δεσμών κατά μήκος της θα ισούται με το καθαρό ποσοστό μείωσης της ενέργειας φόρτισης.

Όταν το πέτρωμα βρίσκεται υπό εντατική κατάσταση και οι υπάρχουσες ασυνέχειες εντός αυτού δρούν σαν συγκεντρωτές τάσεων, κατά τη παραμόρφωση η συγκεντρωμένη εκεί ενέργεια αλλάζει μορφές. Κάποιο μέρος της καταναλώνεται για τη δημιουργία νέων ασυνεχειών, μετατρέπεται σε θερμότητα γύρω από τις ασυνέχειες, ή μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Η αναπτυσσόμενη ασυνέχεια απορροφά μέρος της κινητικής ενέργειας για να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες. Η Ακουστική Εκπομπή (AE) σε συμπαγή σώματα είναι αποτέλεσμα τοπικών παραμορφώσεων που εκδηλώνονται σε στιγμιαίο χρόνο ικανές να παράζουν ηχητικό σήμα. Η Ακουστική Εκπομπή από πέτρωμα που φορτίζεται κοντά στο σημείο αντοχής μπορεί να γίνει αντιληπτή με την ακοή από τον άνθρωπο, όπως σε γρανίτες, αλλά με τη βοήθεια ενισχυτών το πεδίο συχνοτήτων της εκπομπής είναι ευρύτερο. Το γενικότερο πεδίο μελέτης έγκειται στην "μικροσεισμική δραστηριότητα" των πετρωμάτων (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Τα κύματα της ΑΕ διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες ΑΕ (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, ΑΕΤ). Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομα της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλαδή σε συχνότητες υπερήχων.

Ιστορικά, οι μελέτες των Obert και Duvall (1942) για την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930, μπορούν να θεωρηθούν ως η αρχή της εφαρμογής της ΑΕΤ στη μηχανική πετρωμάτων. Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε από την έρευνα και σε άλλα υλικά πλην του πετρώματος. Από τις πιο σημαντικές μελέτες, θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950), ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν «μνήμη» των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Lavrov, 2003).

Στη μηχανική πετρωμάτων η ΑΕΤ έχει εφαρμοσθεί σε δύο κυρίως πεδία: α) στη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των ψαθυρών πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της ΑΕ και συνεπώς την ανίχνευση πιθανής αστοχίας σε πρακτικές εφαρμογές, και β) στη μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με χρήση του φαινομένου Kaiser (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

7.2 Σήματα ΑΕ

Στο Σχήμα 45 εικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.



Σχήμα 45 : Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ

Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μερικά MHz. Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος, τα σήματά τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Για μια αρχική εξάλειψη του θορύβου, αλλά και τον χαρακτηρισμό ενός σήματος ως κρουστικού χρειάζεται η λήψη ενός ορίου, κατωφλιού (threshold) , μιας τιμής τάσεως άνω της οποίας θα λαμβάνονται τα σήματα ως κρουστικά. Ο ορισμός του κατωφλιού είναι καθαρά θέμα της επιθυμητής καταγραφής. Όταν ένα σήμα υπερβεί το κατώφλι σημειώνεται ένα κτύπος και καταγράφεται ως γεγονός ΑΕ. Στο **Σχήμα 46** δείχνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων ΑΕ (Νομικός & Σοφιανός, 2011).



Σχήμα 46: α) Τυπική μορφή κρουστικού κύματος ΑΕ, β) Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ

Οι κύριες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου (Σχήμα 46), είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration). Η παράμετρος "απαριθμήσεις" (counts) προσδιορίζει

πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time).



Σχήμα 47: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας

7.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη σημάτων ΑΕ

Η κυματομορφή των σημάτων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που ακολουθεί μέχρι την ανίχνευσή του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα. Εκτός των ιδιοτήτων του υλικού που επηρεάζουν τη μορφή του λαμβανόμενου σήματος, και άλλοι παράγοντες επιδρούν στη λήψη των σημάτων:

- Εξασθένιση: αναφέρεται στη μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοσή του. Σχετίζεται με τη γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο (το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης), την απόσβεση του υλικού διάδοσης, τυχόν απώλειες ενέργειας. Σε δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών, η εξασθένιση λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης και απόσβεσης περιορίζεται σημαντικά από τις μικρές διαστάσεις του δοκιμίου.
- Θόρυβος: Οι πηγές θορύβου εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτρικές και μηχανικές. Σημαντική πηγή θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον

ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές ΕΜΙ είναι οι μετασχηματιστές, ισχυρές λάμπες, ηλεκτρικές μηχανές κλπ. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου σήματα. Κάθε κίνηση ενός μηχανικού μέρους σε επαφή με το δοκίμιο αποτελεί μία πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100 kHz. Όλα τα εξαρτήματα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ θωρακίζονται έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

- Επίδραση συνοριακών συνθηκών: αναφέρεται στην επίδραση που παρουσιάζει στα σήματα ακουστικής εκπομπής η κακή εφαρμογή στη διεπιφάνεια των πλακών φόρτισης με το δοκίμιο, στην ανομοιογενή φόρτιση των δοκιμίων λόγω απόκλισης των βάσεων από τις απαιτήσεις και προδιαγραφές επιπεδότητας και καθετότητας ως προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου, που έχει σαν αποτέλεσμα να καταγράφονται σήματα ΑΕ που ανταποκρίνονται στο αρχικό «πάτημα» των πλακών κατά την έναρξη της δοκιμής.

7.4. Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ

7.4.1. Αισθητήρες και προενισχυτές

Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead – zirconate - titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας δίνεται στο Σχήμα 48.

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Για τη μείωση παρεμβολών ΕΜΙ συνίσταται να τοποθετείται κοντά ή μέσα στο περίβλημα του αισθητήρα. Παράγουν και αυτοί θόρυβο όπως και ο αισθητήρας, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση φίλτρου για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιήθηκαν προ - ενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος ΑΕ κατά20/40/60 dB $\pm 0.5\%$ dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται

μέσω διακόπτη (Gain Select). Όπως έχει προαναφερθεί το πλάτος του σήματος ΑΕ που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά σύμφωνα με τη σχέση :

 $dB = 20 \log (Vmax/1 \mu volt) - (Ενίσχυση προ-ενισχυτή σε dB) (28)$

Όταν η ενίσχυση του σήματος ΑΕ ρυθμίζεται στα 20 dB τότε το συχνοτικό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται από 10 kHz έως 2.5 MHz, όταν ρυθμίζεται στα 40 dB (συνήθης επιλογή) κυμαίνεται από 10 kHz - 2.0 MHz και όταν ρυθμίζεται στα 60 dB κυμαίνεται στα 10 kHz - 900 kHz. Το ρεύμα λειτουργίας είναι 30 mA και η σύνθετη αντίσταση 10 kΩ. Αυτός ο τύπος προ - ενισχυτών συνδέεται με αισθητήρες μονής εξόδου (απλοί αισθητήρες, single-ended) ή με διαφορικούς αισθητήρες (differential). Η σύνδεση φίλτρου δίδει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος (φιλτράρισμα) καθώς και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων θορύβων. Γενικά υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) και ανοιχτού τύπου (Band Pass) (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

7.4.2. Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργάζεται από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος. Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στο **Σχήμα 49**. Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



(α)

Σχήμα 48: α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC διαθέσιμος στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Hardy, 2003)



Σχήμα 49: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ. (Νομικός & Σοφιανός, 2011)

Στο Σχήμα 50 παρουσιάζεται μία κάρτα οχτώ (8) καναλιών PCI - 8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων AE της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό - παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια AE είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 MegaBytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια AE το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές είσοδοι) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές είσοδοι, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ.



Σχήμα 50: Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων

7.5.Εφαρμογές της ΑΕ

Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συνδέοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής τους κλπ. Παράλληλα, η μέθοδος ολοένα και περισσότερο αποδεικνύεται χρήσιμη για επιτόπιες έρευνες, όπως π.χ. για τον εντοπισμό ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών και στη μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

7.6. Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα διαπιστώθηκε ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο σχήμα 51 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



Σχήμα 51: ΜΕταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου P (ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας p_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη. (Obert και Duvall, 1945)

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το Mogi (1962), ο οποίος δίνει σε διάγραμμα (σχήμα 51) τη γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός, 2005). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων ΑΕ με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο σχήμα 53, έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε



Σχήμα 52: Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ και β) συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Boyce et al, 1981)

λογαριθμικούς άξονες πλάτους AE - συχνότητας εμφάνισης. Γεγονότα AE ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή. Επιπλέον, για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά β, που εκφράζει την κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα AE έχουν μεγαλύτερο πλάτος.



Στο στάδιο κλεισίματος των μικρορωγμών παρατηρείται υψηλή έκλυση ακουστικών σημάτων, εξαιτίας, μεταξύ άλλων, και του θρυμματισμού της μικροτραχύτητας των τοιχωμάτων των μικρορωγμών (Ohnaka & Mogi 1982). Στο ελαστικό τμήμα η ακουστική δραστηριότητα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, διότι οι ασκούμενες τάσεις δεν είναι τόσο υψηλές ώστε να προκαλέσουν μικρορωγμάτωση. Στο στάδιο έναρξης της μικρορωγμάτωσης παρατηρείται εκθετική αύξηση του ρυθμού έκλυσης ακουστικής ενέργειας και η έναρξη του τέταρτου σταδίου συνοδεύεται από την ραγδαία αύξηση εκπομπής ακουστικών σημάτων. Η ακουστική δραστηριότητα συνεχώς αυξάνεται έως το πέρας της δοκιμής, ενώ ο ρυθμός της μεταβάλλεται σε δύο επίπεδα τάσης τα οποία καθορίζουν την έναρξη των σταδίων συνένωσης μικρορωγμών, όπως προτάθηκε από τους Eberhardt et al. (1998), και ασταθούς κατακλαστικής φάσης.

7.7. Η παράμετρος b - value

Η γνωστή από τη σεισμολογία παράμετρος *b* της κατανομής συχνότητας – πλάτους των σημάτων, χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση της ακουστικής εκπομπής πειραμάτων βραχομηχανικής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Aki (1965), σύμφωνα με την οποία η παράμετρος *b* υπολογίζεται από την σχέση:

$$b = \log e / (m_{av} - m_o)$$
 (29)

m_{av} είναι το μέσο μέγεθος των σεισμικών γεγονότων και *m_o* το ελάχιστο μέγεθος που έχει καταγραφεί σε μια περιοχή και για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η παραπάνω σχέση μπορεί να εφαρμοσθεί και σε δεδομένα ΑΕ χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή διόρθωσης για τα πλάτη των σημάτων ΑΕ. Σε αυτή την περίπτωση η σεισμική παράμετρος *b* για ΑΕ δίνεται από την σχέση:

$$b = 20 \log e / (a_{av} - a_o)$$
 (30)

a_{av} είναι το μέσο πλάτος (σε dB) των σημάτων AE και *a_o* το πλάτος κατωφλίου (σε dB). Η αποτύπωση της μεταβολής της συναρτήσει της αξονικής τάσης μπορεί να παράσχει πολύτιμες πληροφορίες όσον αφορά στη διάκριση των επί μέρους σταδίων της διαδικασίας καταστροφής. Η γενική τάση της καμπύλης της σεισμικής παραμέτρου *b* είναι να μειώνεται κατά την διάρκεια της δοκιμής, λόγω της προοδευτικής αποδόμησης του πετρώματος και να προσεγγίζει την τιμή 1 όπως παρατηρείται και στην επιστήμη της Σεισμολογίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αύξηση της έως την έναρξη της ασταθούς κατακλαστικής φάσης. Σύμφωνα με τους Hall et al. (2006) μία τέτοια μεταβολή μπορεί να αποδοθεί στη διάδοση διατμητικών μικρορωγμών, άποψη που ενισχύει και την

πρόταση των Eberhardt (1998) για την ύπαρξη ενός σταδίου διάδοσης μικρορωγμών διατμητικού χαρακτήρα, πριν την έναρξη του σταδίου ασταθούς κατακλαστικής φάσης.

7.8. Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ

Με τη χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων προσαρμοσμένων σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων ΑΕ. Επειδή η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα, παρέχει μία ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Ο ρυθμός της ΑΕ στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων ΑΕ. Για την παρακολούθηση της αστοχίας στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση (Lockner, 1993). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner έδωσαν τα αποτελέσματα που δείχνονται στο σχήμα 54 (Νομικός & Σοφιανός, 2011).



Σχήμα 54: Αποτελέσματαεντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76,2 mm υπό τριαζονική θλίψη με πλευρική πίεση σ₃ = 50 MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής AE (Lockner, 1993).

7.9. Φαινόμενο Kaiser

Στο Σχήμα 55β ένα δοκίμιο πετρώματος υποβάλλεται σε δύο κύκλους φόρτισης. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης η τάση εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μια τιμή σ_{max} και στη συνέχεια μηδενίζεται. Στον δεύτερο κύκλο, η τάση αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό μέχρι μία τιμή σ'_{max} > σ_{max}. Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου, παρακολουθείται η δραστηριότητα ΑΕ και καταγράφονται οι υπερβάσεις (ή τα γεγονότα) συναρτήσει της εφαρμοσμένης τάσης. Στο **Σχήμα 55β** παρουσιάζονται οι συνολικές υπερβάσεις κατά τη διάρκεια των δύο κύκλων φόρτισης. Είναι εμφανές, ότι καταγράφεται δραστηριότητα ΑΕ καθ' όλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης δεν παρατηρείται καμία δραστηριότητα έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη τάση (σ_{max}) του πρώτου κύκλου φόρτισης.



Σχήμα 55: Απλοποιημένη εργαστηριακή διάταξη α) και χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φιανομένου Kaiser β) (Hardy, 2003)

Κατά συνέπεια, το φαινόμενο Kaiser μπορεί να οριστεί ως η απουσία ανιχνεύσιμης ΑΕ μέχρι την υπέρβαση του μέγιστου εντατικού επιπέδου της προηγούμενης διαδρομής φόρτισης του υλικού.

7.10. Εφαρμογές ΑΕ επί τόπου

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υφίσταται ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Σε αυτό το πρόβλημα εστιάσθηκαν και οι πρώτες έρευνες των Obert και Duvall, όπως προαναφέρθηκε (Νομικός & Σοφιανός, 2011).

Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη της πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του

εξοπλισμού στον κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Για το σκοπό αυτό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής. Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπογείων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι Iannacchione et al. (2000, 2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας (προοδευτική ή επεισοδιακή) και τον εάν δίνει πρόδρομα φαινόμενα ή όχι. Οι Choudhury et al (2004) αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο Mukhopadhay (2001) συσχέτισε την ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης. Άλλες αναφορές επί του θέματος δίνονται από το Hardy (2003).

Άλλες εφαρμογές της AE in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρανή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser.

7.11. Εγκατάσταση μορφοτροπέων

Στο εργαστήριο, οι μέθοδοι εγκαττάστασης των μορφοτροπέων ΑΕ ποικίλουν ανάλογα με το τύπο του μορφοτροπέα και το είδος της δοκιμής. Στο σχήμα 56 παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές εγκατάστασης.

7.11.1. Εγκατάσταση των μορφοτροπέων στις μονοαξονικές δοκιμές

Οι τεχνικές εγκατάστασης που απεικονίζονται στα σχήματα 56α και 56β εφαρμόζονται συνήθως για τα συμβατικά επιταχυνσιόμετρα και για τους μορφοτροπείς ΑΕ με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η στερέωση των μορφοτροπέων με κονίαμα (σχήμα 56α) ή με αγώγιμη εποξική ρητίνη, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του μορφοτροπέα. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι οτι, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του δείγματος μπορεί να προκληθούν μηχανικές αστοχίες (π.χ. αστοχά στερέωσης, μικρορωγμές, κλπ) στο τσιμέντο, οι οποίες μπορεί να καραγραφούν ως ακουστική δραστηριότητα. Με τη χρήση ενός μέσου σύζευξης (ειδικό ρευστό υψηλού ιξώδους με μικρή ακουστική εξασθένιση) και μιας διάταξης σύνδεσης (π.χ. ελαστική ταινία, σχήμα 56β), ωστόσο, μπορεί να αντιμετωπιστεί ο θόρυβος βάθους (Κυπριωτάκη, 2012).

Σε μερικές πειριπτώσεις οι μορφοτροπείς ΑΕ τοποθετούνται πάνω σε ειδική κεφαλή φόρτισης . Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη στην πείπτωση διενέργειας δοκιμών σε μεγάλο πλήθος δειγμάτων και παρέχει προστασία στο μορφοτροπέα στην περίπτωση που το δοκίμιο φορτιστεί μέχρι την αστοχία. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αφενός, εάν ο αισθητήρας δεν τοποθετηθεί άμεσα πάνω στο δοκίμιο μπορεί να εκδηλωθούν σημαντικές ακουστικές απώλειες στη διεπιφάνεια μεταξύ δοκιμίου και πλάκας φόρτισης, αφετέρου, μπορεί να καταγραφεί υψηλή ακουστική δραστηριότητα λόγω μηχανικών ασταθειών που συνδέονται με τη μη ευθυγράμμιση των δοκιμίων, τις ανωμαλίες της επιφάνειάς τους, τη τριβή λόγω κακής συνάφειας μεταξύ του δοκιμίου και της κεφαλής φόρτισης. Δεδομένου οτι ο μορφοτροπέαςβρίσκεται πολύ κοντά σε αυτή την ασταθή περιοχή, τα γεγονότα χαμηλής ισχύος που δεν προέρχονται από ακουστική δραστηριότητα του γεωυλικού, μπορεί να επισκιάσουν σημαντικότερα γεγονότα που παράγονται εντός του δοκιμίου (Κυπριωτάκη, 2012).

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 56 στ και 56ζ, οι μορφοτροπείς με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τα ημιαγώγιμα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στις μονοαξονικές δοκιμές. Οι μορφοτροπείς με PZT έχουν υιοθετηθεί εκτενώς στις μελέτες ΑΕ στα γεωυλικά και το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι οτι λόγω των μικρών σχετικά διαστάσεών τους μπορούν να τοποθετηθούν σε σχετικά μικρά δοκίμια.

7.11.2. Εγκατάσταση των μορφοτροπέων στις τριαξονικές δοκιμές

Η εφαρμογή των μορφοτροπέων ΑΕ σε τριαξονικές δοκιμές με πλευρικό περιορισμό μέσω ρευστού υπό πίεση, παρουσιάζει ειδικά προβλήματα δεδομένου οτι το δείγμα περιβάλλεται από ένα ελαστικό ή πλαστικό περίβλημα και βρίσκεται εντός του χαλύβδινου τριαξονικού κελιού. Τέτοιες δοκιμές αποκλείουν την άμεση εφαρμογή των επιταχυνσιομέτρων ή των μορφοτροπέων ΑΕ. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο **σχήμα 56ε**, είναι εφικτή η έμμεση τοποθέτησή τους στην κεφαλή ή στο έμβολο φόρτισης.

Στις έμμεσες τεχνικές εγκατάστασης, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ του μορφοτροπέα και του δοκιμίου και της πιο σύνθετης διάταξης φόρτισης, παράγεται

μια σειρά δευτερογενών γεγονότων ΑΕ λόγω της ανάκλασης του αρχικού γεγονότος στα όρια της πειραματικής διάταξης. Με βάση τα ανωτέρω, είναι σαφές οτι στις τριαξονικές δοκιμές, όπου είναι δυνατόν, οι μορφοτροπείς πρέπει να τοποθετούνται άμεσα στο δοκίμιο. Στο σχήμα 57 παρουσιάζεται μία εναλλακτική τεχνική εγκατάστασης των μορφοτροπέων ΑΕ με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο χρησιμοποιώντας εποξειδικό κονίαμα.



Σχήμα 56: Εργαστηριακές τεχνικές εγκατάστασης μορφοτροπέων, α. Στερέωση με κονίαμα, β. Σύζευξη με ελαστική ταινία, γ. Τοποθέτηση στην κεφαλή φόρτισης, δ. Χρήση κυματοδηγού, ε. Χρήση τριαξονικού δοχείου, στ. Λεπτομέρειες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, ζ. Λεπτομέρειες ημιαγώγιμου ηλεκτρικού μηκυνσιόμετρου (Hardy, 2003)



Σχήμα 57: Λεπτομέρειες εναλλακτικής μεθόδου εγκατάστασης των μορφοτροπέων ΑΕ σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, α. Διάταξη φόρτισης και β. Λεπρομέρειες εγκατάστασης μορφοτροπέων (Κατσικογιάννη, 2004)

7.12. Έλεγχος λειτουργίας και καταγραφής των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής

Πριν την έναρξη των δοκιμών πραγματοποιείται έλεγχος των αισθητήρων ώστε να διαπιστωθεί αν όλοι οι αισθητήρες εντοπίζουν τα εκπεμπόμενα σημάτων ΑΕ. Ο έλεγχος αυτός γίνεται κατά το πρότυπο ASTM – E976 σύμφωνα με το οποίο προσομοιώνονται πηγές ΑΕ από σπασίματα μύτης μηχανικού μολυβιού, 0,5 mm , 2H, στην επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμίων. Η μέθοδος αυτή παραγωγής τεχνητών πηγών ΑΕ είναι γνωστή ως μέθοδος PLB (Pencil Lead Break Technique) ή αλλιώς μέθοδος Hsu – Nielsen (Hsu, 1975, Nielsen, 1981). Οι μύτες του μηχανικού μολυβιού πρέπει να είναι διαμέτρου 0,5 mm και να προεξέχουν κατά 3 mm. Για τη διασφάλιση σταθερής γωνίας σπασίματος της μύτης και για την αποφυγή επαφής της μεταλλικής άκρης του μηχανικού μολυβιού με την επιφάνεια του δοκιμίου, στη μύτη του μολυβιού προσαρμόζεται ειδικά διαμορφωμένο ελαστικό κάλυμμα ονομαζόμενο Nielsen shoe. Γενικά η τεχνική PLB είναι βολική, ανέξοδη και σχετικά ακριβής για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων στις πειραματικές διατάξεις εργαστηριακών δοκιμών (Κυπριωτάκη, 2012).



Σχήμα 58: Ειδικό προστατευτικό κάλυμμα Hsu – Nielsen προσαρμοσμένο στην άκρη πρότυπου μηχανικού μολυβιού – διαστάσεις σε mm (Hardy, 2003)

Τα σπασίματα της μύτης του μολυβιού εφαρμόζονται σε κοντινή απόσταση απο τους αισθητήρες. Ως μέσο σύζευξης του αισθητήρα με το σκυρόδεμα στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και του αισθητήρα με το σώμα του τριαξονικού κελιού ή με τα έμβολα φόρτισης στις τριαξονικές δοκιμές χρησιμοποιείται παχύρευστη γέλη, ενώ η συνεχής επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου εξασφαλίζεται μέσω ελαστικής ταινίας. Η αναμενόμενη ένταση των εισερχόμενων σημάτων πρέπει να είναι της τάξεως των 90 – 100 dB. Εάν οι τιμές dB είναι μικρότερες απο 85 dB τότε πρέπει να πιέσουμε ή να μετακινήσουμε ελαφρά τον αισθητήρα ώστε να εξασφαλιστεί καλυτερη επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου.

ΜΕΡΟΣ Β΄: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Κεφάλαιο 8: 1^η σειρά πειραματικών δοκιμών – Προκαταρκτικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

Για τη διερεύνηση της της επίδρασης του τρόπου φόρτισης στην αντοχή και συμπεριφορά των δοκιμίων πετρωμάτων και την επίδραση της πλευρικής πίεσης κατά τη δοκιμή τριαξονικής καταπόνησης, την εξοικείωση με την πειραματική διαδικασία και τη μελέτη των χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης για την αναγόμενη εύρεση της βράχυνσης των δοκιμίων από τη συνολική βράχυνση που καταγράφουν τα βελόμετρα – μορφοτροπείς πάνω στις πλάκες, αλλά και τη μελέτη της επίδρασης του τρόπου φόρτισης – με έλεγχο φορτίου ή με έλεγχο παραμόρφωσης - στην αντοχή των πετρωμάτων, πραγματοποιούμε προκαταρκτικές δοκιμές, αρχικά μονοαξονικής θλίψης.

8.1. Προετοιμασία δοκιμίων

Για το σκοπό αυτό διαμορφώνουμε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο τουλάχιστον με 2:1, όπως καθορίζεται από τις προδιαγραφές της Βραχομηχανικής. Το μίγμα του τσιμεντοειδούς κονιάματος διαμορφώνεται με ανάμιξη σκόνης τσιμέντου που περιέχει ποσότητα κόκκων αδρανών της Sika, με νερό, σε αναλογία 28 kg σκόνης με 3.7 – 4.4 lt νερό, μέχρι την επιθυμητή εργασιμότητα, δηλαδή τη δυνατότητα έγχυσης εντός των καλουπιών σε ομοιόμορφη σύσταση και αποφυγή φαινομένων καθίζησης κόκκων αδρανών, λόγω ανομοιόμορφης κατανομής – στρωμάτωσης νερού και αδρανών. Για τη δημιουργία της κατάλληλης αναλογίας νερού – τσιμέντου με αδρανή, χρησιμοποιείται για το ζύγισμα εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας για το τσιμέντο και βαθμονομημένη ογκομετρική φιάλη για το νερό.



Εικόνα 2: Ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 3: Ηλεκτρικό δράπανο με προσαρμοσμένο αναμειχτήρα για την πλήρη ανάμειξη του τσιμεντοκονιάματος

Η πλήρης ανάμιξη της σκόνης και του νερού, πραγματοποιείται με ηλεκτρικό δράπανο στο οποίο προσαρμόζουμε μεταλλικό αναμειχτήρα, για τουλάχιστον 3 λεπτά, σε χαμηλές στροφές (< 500 rpm), ενώ με τη χρήση μυστριού επιβοηθούμε τη λειτουργία του δράπανου για την αποφυγή εκδήλωσης καθίζησης και εγκλωβισμού μη διαλυμένης σκόνης περιμετρικά στον πυθμένα του δοχείου, εντός του οποίου πραγματοποιείται η ανάμειξη. Μετά την ανάμειξη, αφήνουμε το κονίαμα για περίπου 2 – 3 λεπτά σε ηρεμία, και έπειτα, ανακατεύουμε ομαλά με ένα μυστρί και αδειάζουμε αμέσως σε καλούπια κατάλληλης διαμέτρου, τα οποία εδράζονται σε οριζόντια αλφαδιασμένη επιφάνεια.



Εικόνα 4: Εύκαμπτες ελαστικές μεμβράνες διαμέτρου ΝΧ, που χρησιμοποιούνται ως καλούπια για τη διαμόρφωση δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος

Ως καλούπια χρησιμοποιούμε τις εύκαμπτες ελαστικές μεμβράνες της τριαξονικής δοκιμής διαμέτρου NX (περίπου 54 mm), τις οποίες εδράζουμε με τη χρήση λάστιχων πάνω σε λείες επιφάνειες, όπως φαίνεται **στην εικόνα 4**. Για τη δημιουργία δοκιμίων με λεία τοιχώματα, απαλλαγμένα από επιφανειακές κοιλότητες και κενά εσωτερικά λόγω φυσαλίδων αέρα και ανομοιόμορφη κατανομή των κόκκων των αδρανών, επιφέρουμε μικρή δόνηση με τη μορφή χτύπων, στα εδραζόμενα δοκίμια, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκαλέσουμε την εκροή του τσιμεντοκονιάματος από τις βάσεις των μεμβρανών – καλουπιών. Αμέσως μετά από τη διαδικασία αυτή, αφήνουμε τα δοκίμια για μία ημέρα σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου έως ότου στερεοποιηθεί πλήρως το μίγμα.

Μετά την παρέλευση μίας μέρας από την έγχυση του τσιμεντοκονιάματος εντός των μεμβρανών, τα δοκίμια βυθίζονται εντός δεξαμενής συντήρησης όπου διατηρούνται για τουλάχιστον 28 μέρες για την ωρίμανσή τους μέχρι την απόκτηση ικανοποιητικής αντοχής των δοκιμίων. Κατά σύμβαση, και σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, θεωρείται ότι μετά τις 28 μέρες το τσιμέντο αποκτά την πλήρη αντοχή του, η οποία σταθεροποιείται κατά το επόμενο χρονικό διάστημα του κορεσμού του.





Εικόνα 5: Εργαστηριακό δισκοπρίονο δοκιμίων Εικόνα 6: Εργαστηριακός λειαντής δοκιμίων

Την ημέρα της δοκιμής, απομακρύνουμε τον απαιτούμενο αριθμό δοκιμίων από τη δεξαμενή συντήρησης – ωρίμανσης, και ακολουθεί η κατεργασία των βάσεων με μηχανικό εξοπλισμό, ο οποίος περιλαμβάνει εργαστηριακό δισκοπρίονο δοκιμίων με αδαμαντοτροχό (diamond saw) για τη διαμόρφωση του επιθυμητού ύψους των δοκιμίων, και εργαστηριακό λειαντή δοκιμίων (grinding machine). Η κατεργασία των βάσεων των κυλινδρικών δοκιμίων πραγματοποιείται σε συμμόρφωση με τις προδιαγραφές και απαιτήσεις για επιπεδότητα και λείες βάσεις, παραλληλία μεταξύ των βάσεων και καθετότητα αυτών ως προς τον άξονα των δοκιμίων.

8.2. Μέτρηση διαστάσεων – γεωμετρικών χαρακτηριστικών δοκιμίων



Εικόνες 7,8: Μέτρηση του ύψους και της διαμέτρου με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας

Για τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων συνθετικού πετρώματος τσιμεντοκονιάματος, χρησιμοποιείται ειδικό παγύμετρο ακριβείας. Η μέτρηση του ύψους πραγματοποιείται σε τέσσερις θέσεις σταυρωτά (κατά 90°) κατά την περιφέρεια των δοκιμίων και επιλέγεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Η μέτρηση των τιμών διαμέτρου των δοκιμίων πραγματοποιείται σε συνολικά έξι θέσεις, τέσσερις στις δύο βάσεις και δύο στη μέση του δοκιμίου. Οι θέσεις μέτρησης πρέπει να σχηματίζουν γωνία 90° μεταξύ τους. Επιλέγουμε το μέσο όρο των δύο τιμών διαμέτρου της μέσης καθώς εκεί θα τοποθετήσουμε την αλυσίδα και τους δακτυλίους πάνω στους οποίους θα προσαρμόσουμε τα βελόμετρα - μορφοτροπείς μέτρησης των βραχύνσεων.

8.3. Προσαρμογή διάταξης περιφερειακού επιμηκυνσιόμετρου με αλυσίδα πάνω στο δοκίμιο για τη μέτρηση των ακτινικών μετατοπίσεων



Εικόνες 9,10,11: Διάταξη του περιφερειακού επιμηκυνσιόμετρου με την αλυσίδα και τον αισθητήρα μετατοπίσεων δύο βραχίονων



Για τη μέτρηση των ακτινικών μετατοπίσεων προσαρμόζουμε στη μέση του δοκιμίου, έναν αισθητήρα – περιφερειακό επιμηκυνσιόμετρο με αλυσίδα, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Μετράμε με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας το πίσω κενό της αλυσίδας, δηλαδή την απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο κοχλιών σύσφιξης της αλυσίδας. Η σύσφιξη της διάταξης – τάση της αλυσίδας ελέγχεται και πρέπει να είναι τέτοια ώστε να το πίσω κενό της αλυσίδας να είναι τουλάχιστον 10 mm. Ο αισθητήρας δύο βραχίονων φέρει δύο κωνικές ακμές οι οποίες προσαρμόζονται σε ειδικές υποδοχές που φέρει η διάταξη της αλυσίδας, για την ανίχνευση μετατοπίσεων μεταξύ δύο σταθερών σημείων. Σχήμα 59: Σκαρίφημα διάταξης περιφερειακού επιμηκυνσιόμετρου

8.4. Προσαρμογή των βελόμετρων – μορφοτροπέων και του αισθητήρα ακουστικής εκπομπής πάνω στο δοκίμιο



Εικόνα 12: Δακτύλιοι για την προσαρμογή των μορφοτροπέων καταγραφής των βραχύνσεων του δοκιμίου

Για την καταγραφή των αξονικών βραχύνσεων του δοκιμίου, προσαρμόζουμε με τρόπο συμμετρικό ως προς τις αποστάσεις από τα άκρα του δοκιμίου (βάσεις και περιφέρεια), με τη χρήση ενός αλφαδιού, τους δύο δακτυλίους από αλουμίνιο στη μέση του δοκιμίου και πάνω τους ενσωματώνουμε με χρήση κοχλιών σύσφιζης, τρία βελόμετρα – μορφοτροπείς που καλύπτουν σε ισαπέχουσες αποστάσεις την περιφέρεια του δοκιμίου. Μετράμε με χρήση παχύμετρου τις αποστάσεις μεταξύ των δύο δακτυλίων στις θέσεις που βρίσκονται τα βελόμετρα. Οι τιμές των αποστάσεων αυτών αποτελούν το αρχικό μήκος και θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων – τροπών. Ο λόγος για τον υπολογισμό των αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων – τροπών. Ο λόγος για τον οποίο προσαρμόζουμε τρία βελόμετρα από τις ενδείξεις των οποίων προκύπτει η αξονική τροπή – ανηγμένη παραμόρφωση ως η μέση τιμή των τριών ενδείξεων είναι για να καλύψουμε πιθανά ενδεχόμενα ανισομερούς βράχυνσης προσανατολισμένης προς μία διεύθυνση λόγω ανομοιογένειας του υλικού του δοκιμίου που εξετάζεται αλλά και τυχόν σφάλματα παραλληλίας των πλακών φόρτισης λόγω κακής κατάστασης των βάσεων του δοκιμίου και απόκλιση από την καθετότητα ως προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου, που οδηγούν σε επιδράσεις συνοριακών συνθηκών. Κατά την τοποθέτηση των μορφοτροπέων παρακολουθούμε την οθόνη του υπολογιστή καταγραφής βραχύνσεων και ώστε η αρχική ένδειξη στην οποία θα πραγματοποιήσουμε τον μηδενισμό των μορφοτροπέων να είναι λίγο μεγαλύτερη από 5000 μm, καθώς από τη τιμή αυτή και μετά η λειτουργία των μορφοτροπέων είναι πιο αποδοτική σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Έπειτα ακολουθεί η προσαρμογή του αισθητήρα ακουστικής εκπομπής πάνω στο δοκίμιο και κοντά στην αλυσίδα με τη χρήση ενός λάστιχου, και της διάταξης του περιφερειακού επιμηκυνσιόμετρου στις κωνικές υποδοχές της αλυσίδας.



Εικόνα 14: Προενισχυτής τύπου 2/4/6 της εταιρίας PAC.



Εικόνα 15: Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της εταιρίας PAC



Εικόνα 16: Ολοκληρωμένη πειραματική διάταξη μονοαξονικής θλίψης με το δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος πάνω στο οποίο έχουμε προσαρμόσει τους μορφοτροπείς – LVDTs, το περιφερειακό επιμηκυνσιόμετρο με αλυσίδα και τον αισθητήρα ακουστικής εκπομπής.

8.5. Δοκιμές με έλεγχο φορτίου

Πραγματοποιούμε τρεις δοκιμές με έλεγχο φορτίου, στις οποίες ο ρυθμός ορίζεται στα 450 N/s και το κατώφλι – threshold στα 45 dB με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας - καταγραφής των σημάτων ακουστικής εκπομπής ίσο με 20 kHz – 1 MHz. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων καθώς και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμών αποτυπώνονται στον ακόλουθο **πίνακα 2.** Να σημειωθεί ότι οι τιμές ύψους και διαμέτρου προκύπτουν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, ο όγκος των κυλινδρικών δοκιμίων υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση $V_{κυλυδ}$ = π r² h, όπου r η ακτίνα του δοκιμίου και h το ύψος του. Υπολογίζουμε το τέμνον μέτρο ελαστικότητας, ως την κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων με το επίπεδο τάσης που αντιστοιχεί στο 40 % της μέγιστης τάσης – αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Ο λόγος Poisson v υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (7) με Ε το τέμνον μέτρο ελαστικότητας και κλίση της καμπύλης σ – ε_d στο επίπεδο τάσης που αντιστοιχεί στο 40 % της μέγιστης τάσης που ει μέσης που αντιστοιχεί στο 40 % της μέγιστης τάσης που αντιστοιχεί στο 40 % της μέγιστης τάσης που αντιστοιχεί στο 40 % της μέγιστης τάσης που αντιστοιχεί στο 40 %

	14JAN1 (LC)	15JAN4 (LC)	15JAN5 (LC)
Ύψος (mm)	120.91	118.38	123.22
Διάμετρος (mm)	55.24	55.31	55.51
Μάζα (g)	658.90	639.80	672.30
Όγκος (cm ³)	289.77	284.43	298.20
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.27	2.25	2.25
Μέγιστο φορτίο, Ρ (kN)	191.64	165.69	179.20
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ _c (MPa)	80.00	69.00	74.08
Διάρκεια δοκιμής (s)	389.40	328.20	354.40
Τέμνον μέτρο ελαστικότητας, Ε _s (GPa)	30.21	27.92	27.35
Λόγος Poisson	0.18	0.13	0.12

Πίνακας 2: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής των τριών δοκιμίων καθώς και τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή και εξέλιξη καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής των ελαστικών σταθερών – παραμέτρων ελαστικότητας των δοκιμίων. Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Excel. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας

των δοκιμίων μέχρι τη στιγμή της μέγιστης τάσης - αντοχής, υπολογίζουμε αρχικά τιμές μέσης τάσης (average stress) σε διαστήματα που αντιστοιχούν στο 10% της κορυφαίας αντοχής για κάθε επίπεδο φόρτισης. Έπειτα, κάνοντας χρήση της εντολής LINEST, υπολογίζουμε τιμές μέσης αξονικής, διαμετρικής, ογκομετρικής τροπής για τα διαστήματα αυτά και αποτυπώνουμε τις τιμές αυτές σε διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή των τιμών μέτρου ελαστικότητας, λόγου Poisson, διαμετρικής και ογκομετρικής δυσκαμψίας / δυστροπίας. Στο διάγραμμα μέσης τάσης ως προς την μέση αξονικής τροπής αποτυπώνεται το εφαπτομενικό και μέσο μέτρο ελαστικότητας. Από τα διαγράμματα αυτά και σε συνδυασμό με την αξιολόγηση των σημάτων ακουστικής εκπομπής μπορούμε να ανιχνεύσουμε την περιοχή έναρξης μικρορωγμάτωσης και αστοχίας των δοκιμίων.

Αφού παρουσιαστούν τα παραπάνω αποτελέσματα, αποτυπώνουμε τα καταγραφούμενα σήματα ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο στο ίδιο διάγραμμα με τις τιμές των μετρήσεων τάσης και μετρούμενης μετατόπισης / βράχυνσης αντίστοιχα. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συμβάλει στην εκτίμηση της περιοχής πιθανής αστοχίας των δοκιμίων αλλά και της επίδρασης του τρόπου φόρτισης.





Εικόνα 17,18: Ολοκληρωμένη εγκατασταση της διάταξης μέτρησης αξονικών και διαμετρικών μετατοπίσεων του δοκιμίου και του αισθητήρα ακουστικής εκπομπής



Σχήμα 60: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 61: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 63: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 62: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 64: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 65: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 66: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 15JAN4 (LC)



Σχήμα 67: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN4 (LC)







Σχήμα 68: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN4 (LC)



Σχήμα 70: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN4 (LC)



Σχήμα 71: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 15JAN4 (LC)


Σχήμα 72: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Σχήμα 73: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Σχήμα 75: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Σχήμα 74: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Σχήμα 76: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Σχήμα 77: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 15JAN5 (LC)



Εικόνα 19: Φωτογραφία του δοκιμίου14JAN1 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου



Εικόνα 20: Φωτογραφία του δοκιμίου15JAN4 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου



Εικόνα 21: Φωτογραφία του δοκιμίου 15JAN5 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου

8.6. Δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης

Στο πλαίσιο της πρώτης σειράς πειραματικών δοκιμών και παράλληλα με τις δοκιμές με έλεγχο φορτίου πραγματοποιούμε εφτά δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης, και συγκεκριμένα τρείς δοκιμές με ρυθμό παραμόρφωσης 20 μm / min, δύο δοκιμές με ρυθμό παραμόρφωσης 10 μm / min, και δύο δοκιμές με ρυθμό παραμόρφωσης 50 μm / min. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **πίνακα 3**. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρούμε σε γενικές γραμμές ότι οι δοκιμές με ρυθμό παραμόρφωσης 20 μm / min δίνουν συγκριτικά τις μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Ωστόσο τα συμπεράσματά μας είναι επισφαλή καθώς ενέχεται μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας λόγω ανομοιογένειας των δοκιμίων. Αυτή οφείλεται σε μικρότερο ποσοστό αδρανών και μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας σε κάποια δοκίμια έναντι κάποιων άλλων καθώς κατά τη διεργασία της έγχυσης του τσιμεντοκονιάματος εντός των καλουπιών, η ροή αδρανών και το συνολικό μίγμα είναι ανομοιόμορφα και ως εκ τούτου μεταβάλλεται η σύσταση των δοκιμίων.

Λόγω του γεγονότος ότι η αστοχία επέρχεται σε μεγαλύτερο χρόνο συγκριτικά με τις δοκιμές με έλεγχο φορτίου και επειδή επιθυμούμε την ανίχνευση περισσότερων σημάτων ακουστικής εκπομπής ορίζουμε νέα τιμή κατωφλιού / threshold ίση με 35 dB για τα δοκίμια 20JAN7 (DC) έως και 20JAN11 (DC), ενώ για τα δοκίμια 20JAN2 (DC) και 20JAN6 (DC) το κατώφλι παρέμεινε στα 45 dB.

	14JAN2 (DC	15JAN6 (DC	15JAN7 (DC	20JAN8 (DC	20JAN9 (DC	20JAN10 (DC	20JAN11 (DC
	RATE 20	RATE 20	RATE 20	RATE 10	RATE 10	RATE 50	RATE 50
	μm/min)	μm/min)	µm/min)	µm/min)	μm/min)	μm/min)	μm/min)
Ύψος (mm)	122.42	117.46	120.95	123.63	123.18	122.67	122.13
Διάμετρος (mm)	55.37	55.30	55.37	55.47	55.43	55.45	55.51
Μάζα (g)	669.90	634.10	656.50	665.20	662.70	650.20	654.10
Όγκος (cm^3)	294.78	282.12	291.24	298.77	297.24	296.23	295.57
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.27	2.25	2.25	2.23	2.23	2.19	2.21
Μέγιστο φορτίο, Ρ (kN)	164.15	153.07	156.56	124.97	144.50	159.62	144.79
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαζονική θλίψη, σ _c (MPa)	68.53	63.76	65.05	51.71	59.88	66.10	59.83
Διάρκεια δοκιμής (s)	310.00	317.20	391.20	2922.40	663.40	187.60	137.20
Τέμνον μέτρο ελαστικότητας, Ε _s (GPa)	30.32	27.33	31.49	35.69	26.38	28.98	27.49
Λόγος Poisson	0.13	0.11	0.14	0.09	0.12	0.14	0.11

Πίνακας 3: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Σχήμα 78: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 14JAN2(DC)



Σχήμα 79: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN2 (DC)



Σχήμα 81: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN2 (DC)



Σχήμα 80: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN2 (DC)



Σχήμα 82: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 14JAN2 (DC)



Σχήμα 83: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 14JAN2 (DC)



Σχήμα 84: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 85: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 87: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 86: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 88: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 89: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 15JAN6 (DC)



Σχήμα 90: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 91: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 93: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 92: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 94: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 95: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 15JAN7 (DC)



Σχήμα 96: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 20JAN8 (DC)



Σχήμα 97: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN8 (DC)



Σχήμα 99: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN8 (DC)



Σχήμα 98: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN8 (DC)



Σχήμα 100: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN8 (DC)



Σχήμα 101: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN8 (DC)







Σχήμα 103: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN9 (DC)



Radial stiffness 0 60 1020 30 4050 70 -50 Average radial -100 -150-200 -250 Average stress

Σχήμα 104: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN9 (DC)



Σχήμα 105: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN9 (DC)

Σχήμα 106: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN9 (DC)



Σχήμα 107: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN9 (DC)



Σχήμα 108: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 20JAN10 (DC)



Σχήμα 109: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN10 (DC)



Σχήμα 111: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN10(DC)



Σχήμα 110: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN10 (DC)



Σχήμα 112: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN10



Σχήμα 113: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN10 (DC)



Σχήμα 114: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 20JAN11 (DC)



Σχήμα 115: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN11 (DC)



Σχήμα 117: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN11(DC)



Σχήμα 116: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN11 (DC)



Σχήμα 118: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN11 (DC)



Σχήμα 119: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN11(DC)



Εικόνα 22: Φωτογραφία του δοκιμίου 14JAN2 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Εικόνα 23: Φωτογραφία του δοκιμίου 15JAN6 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Εικόνα 25: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN8 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Εικόνα 26: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN9 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Εικόνα 24: Φωτογραφία του δοκιμίου 15JAN7 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



Εικόνα 27: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN10 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης



108

Εικόνα 28: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN11 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης

8.7. Δοκιμές με έλεγχο αξονικής βράχυνσης

Στο πλαίσιο της ίδιας σειράς πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιούμε δύο δοκιμές με έλεγχο αξονικής βράχυνσης στο κανάλι καταγραφής 5. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε τον ρυθμό της παραμόρφωσης από το λόγο της αξονικής βράχυνσης προς τη διάρκεια των δοκιμών με έλεγχο φορτίου (επιλογή μέσης τιμής), οι οποίες έδωσαν τις υψηλότερες τιμές κορυφαίας αντοχής των δοκιμίων. Έτσι καταλήγουμε στο ρυθμό των 20 μm / min. Ωστόσο, κατά την εκτέλεση των δοκιμών παρατηρούμε ότι η έναρξη της φόρτισης των δοκιμών καθυστερεί οπότε αποφασίζουμε αυθαίρετα να αυξάνουμε σταδιακά το ρυθμό μέχρι έναρξης της δοκιμής, η οποία γίνεται εμφανής από τη εμφάνιση καταγραφούμενων μετρήσεων αξονικής βράχυνσης. Έτσι στο δοκίμιο 20JAN12 φθάσαμε στο ρυθμό 25 μm / min σε χρόνο 135 sec, ενώ στο δοκίμιο 20JAN13 φθάσαμε στο ρυθμό των 37 μm / min σε χρόνο 140 sec. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων αποτυπώνονται στο **πίνακα 4**. Το κατώφλι ορίστηκε στα 45 dB για το δοκίμιο 20JAN12 και στα 35 dB για το δοκίμιο 20JAN13.

	20JAN12 (DC	20JAN13 (DC
	RATE 25 µm/min)	RATE 37 µm/min)
Ύψος (mm)	123.12	109.25
Διάμετρος (mm)	55.50	55.42
Μάζα (g)	662.80	586.60
Όγκος (cm ³)	297.85	263.54
Πυκνότητα (g/cm^3)	2.23	2.23
Μέγιστο φορτίο, Ρ (kN)	166.87	171.01
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ _c (MPa)	69.01	70.93
Διάρκεια δοκιμής (s)	466.40	380.20
Τέμνον μέτρο ελαστικότητας, Ε _s (GPa)	30.37	28.14
Λόγος Poisson	0.15	0.12

Πίνακας 4: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο αξονικής βράχυνσης / παραμόρφωσης στο κανάλι 5



Σχήμα 120: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 20JAN12 (DC)



Σχήμα 121: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN12 (DC)



Σχήμα 123: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN12(DC)



Σχήμα 122: Μεταβολή της διαμετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN12 (DC)



Σχήμα 124: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN12 (DC)



Σχήμα 125: Διάγραμμα τάσης – αξονικής, διαμετρικής και ογκομετρικής τροπής του δοκιμίου 20JAN13 (DC)



Σχήμα 126: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Young με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN13 (DC)



Σχήμα 128: Μεταβολή του λόγου Poisson με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN13 (DC)







Σχήμα 129: Μεταβολή της ογκομετρικής δυσκαμψίας με τη φόρτιση του δοκιμίου 20JAN13 (DC)



Σχήμα 130: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN13(DC)



Εικόνα 29: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN12 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο αξονικής βράχυνσης.



Εικόνα 30: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN13 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο αξονικής βράχυνσης.



Σχήμα 131: Διάγραμμα τάσης – μέσης αξονικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή



Σχήμα 132: Διάγραμμα τάσης – διαμετρικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή



Σχήμα 133: Διάγραμμα τάσης – ογκομετρικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή







Σχήμα 135: Διάγραμμα τάσης – διαμετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 20μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 136: Διάγραμμα τάσης – ογκομετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 20μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 137: Διάγραμμα τάσης – μέσης αξονικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 10 μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 138: Διάγραμμα τάσης – διαμετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 10μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 139: Διάγραμμα τάσης – ογκομετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 10μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 140: Διάγραμμα τάσης – μέσης αξονικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 50μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 141: Διάγραμμα τάσης – διαμετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 50μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 142: Διάγραμμα τάσης – ογκομετρικής τροπής των δοκιμίων με ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης 50μm/min με απεικόνιση έως το 70% της αντοχής



Σχήμα 143: Διάγραμμα τάσης – μέσης αξονικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου και έλεγχο παραμόρφωσης με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή για τις πρώτες και έως το 70% της αντοχής για τις δεύτερες



Σχήμα 144: Διάγραμμα τάσης – διαμετρικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου και έλεγχο παραμόρφωσης με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή για τις πρώτες και έως το 70% της αντοχής για τις δεύτερες



Σχήμα 145: Διάγραμμα τάσης – ογκομετρικής τροπής των δοκιμίων με έλεγχο φορτίου και έλεγχο παραμόρφωσης με απεικόνιση έως την κορυφαία αντοχή για τις πρώτες και έως το 70% της αντοχής για τις δεύτερες



Σχήμα 146: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 14JAN1 (LC)



Σχήμα 148: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 15JAN5(LC)



Σχήμα 150: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 15JAN6(DC)



Σχήμα 152: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 20JAN8(DC)



Σχήμα 154: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 20JAN10(DC)



Σχήμα 147: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 15JAN4 (LC)



Σχήμα 149: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 14JAN2(DC)











Σχήμα 155: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 20JAN11 (DC) 118



Σχήμα 156: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 20JAN12 (ADC)



Σχήμα 157: Διάγραμμα τάσης - σημάτων ακουστικής εκπομπής του δοκιμίου 20JAN13 (ADC)

8.8. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σχολιασμός / συμπεράσματα επί των δοκιμών

LOAD CONTROL		DC WITH RATE 20 µm/min		DC WITH RATE 10 µm/min		DC WITH RATE 50 µm/min			
14JAN1	15JAN4	15JAN5	14JAN2	15JAN6	15JAN7	20JAN8	20JAN9	20JAN10	20JAN11
КОРУФАІА ANTOXH - PEAK STRENGTH (MPa)									
80.00	69.00	74.08	68.53	63.76	65.05	51.71	59.88	66.10	59.83
	AVERAGE AVERAGE		AVERAGE		AVERAGE				
	74.36 65.78			55.80		62.97			
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (kN)									
191.642	165.689	179.198	164.148	153.068	156.563	124.97	144.499	159.619	144.787
	AVERAGE	AGE AVERAGE		AVE	AVERAGE		AVERAGE		
	178.84		157.93		134.73		152.20		
Es(GPa)									
30.21	27.92	27.35	30.32	27.33	31.49	35.69	26.38	28.98	27.49

Πίνακας 5: Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων όλων των δοκιμών

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα του πίνακα οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου έδωσαν μεγαλύτερες τιμές μέγιστης αντοχής των δοκιμίων, συγκριτικά με τις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης. Από τις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης τις μεγαλύτερες τιμές κορυφαίας αντοχής έδωσαν οι δοκιμές με ρυθμό παραμόρφωσης 20 μm/min. Το συμπέρασμα αυτό αξιοποιείται στην επιλογή του τρόπου φόρτισης κατά την καταπόνηση δοκιμίων σε τριαξονική θλίψη, καθώς ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης παρουσιάζονται διαφορετικές τιμές αντοχής των δοκιμίων. Ωστόσο, από τα διαγράμματα τάσης – αξονικής, διαμετρικής, ογκομετρικής τροπής (σχήματα 143,144,145) προκύπτει ότι οι γραμμικές περιοχές των διαγραμμάτων όλων των δοκιμών (με έλεγχο φορτίου και παραμόρφωσης) βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών επιβαλλόμενης τάσης.

Στα διαγράμματα τάσης – τροπής, η συμπεριφορά των δοκιμίων σκυροδέματος περιγράφεται μόνο από το ανοδικό κλάδο της καμπύλης που καταλήγει σε ψαθυρή απώλεια της φέρουσας ικανότητας. Ο φθιτός κλάδος της καμπύλης σ - ε ουσιαστικά περιγράφει την αλληλεπίδραση του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης, καθώς λόγω της διαφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα είναι αναπόφευκτη η ανάπτυξη δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Οι δυνάμεις αυτές εμποδίζουν την εγκάρσια παραμόρφωση του σκυροδέματος στα άκρα του δοκιμίου και συνεπώς αλλοιώνουν την επιδιωκομένη εντατική κατάσταση, τουλάχιστον στην περιοχή αυτή (βλ. Κωτσοβός, 2009).

8.8.1. Στάδια της διαδρομής φόρτισης και αστοχίας των δοκιμίων σκυροδέματος

Στάδιο 1: Με την άσκηση του φορτίου και το πάτημα της πλάκας, οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές αρχικά ενδέχεται να πολλαπλασιαστούν με νέες να ξεκινούν από μεμονωμένα σημεία, λόγω της αύξησης της εντατικής κατάστασης. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, οι μικρορωγμές δε προεκτείονται αλλά παραμένουν σταθερές.

Στάδιο 2: Με την αύξηση του φορτίου, υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων διαμορφώνονται κοντά στις κορυφές των μικρορωγμών. Οι αρχικές μικρορωγμές αρχίζουν να προεκτείνονται όπως παρατηρούμε, παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου και οι συγκεντρώσεις τάσεων σταδιακά αποτονώνονται. Ταυτόχρονα με την προέκτασή τους, οι ρωγμές ανοίγουν κάθετα στο επίπεδο της προέκτασής τους και συνεπώς δημιουργούν κενά στο σώμα του υλικού, τα οποία οδηγούν στη μη – γραμμική συμπεριφορά του δοκιμίου επηρεάζοντας την εγκάρσια παραμόρφωσή του. Με την αύξηση της ασκούμενης τάσης, η ανακατανομή των βραχύνσεων καθ' όλη τη μάζα του δοκιμίου προκαλεί σταθεροποίηση των μεμονωμένων μικρορωγμών και συστολή του δοκιμίου σε μεμονωμένες ζώνες κοντά στις κορυφές των μικρορωγμών. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται ως έναρξη της τοπικής αστοχίας (local fracture initiation – LFI) (Kotsovos M.D. & Pavlovic M.N., 1995).

Στάδιο 3: Με την αύξηση του φορτίου σε υψηλότερο επίπεδο, ξεκινά η διάδοση των διακλαδωμένων μικρορωγμών με τρόπο σταθερό με αποτέλεσμα εκ νέου αποτόνωση των συγκεντρωμένων σε μεμονωμένα σημεία. Το στάδιο αυτό σηματοδοτεί την έναρξη της διεργασίας σταθερής προέκτασης των μικρορωγμών και διάδοσης της αστοχίας (onset of stable fracture propagation – OSFP). Η προέκταση των ρωγμών, παρά τα κενά που δημιουργεί, αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας μέσω της κατανάλωσης ενός τμήματος του έργου του εξωτερικού φορτίου για τη συντήρηση αυτής (Kotsovos & Pavlovic, 1995).

Στάδιο 4: Με την πρόοδο της φόρτισης, αυξάνεται το ποσοστό μικρορωγμάτωσης, και ακολουθεί η μετάβαση στην ασταθή κατάσταση αστοχίας όπου η αστοχία επέρχεται ακόμη και με σταθερή τιμή φορτίου. Στο σημείο αυτό πρακτικά εξαντούνται τα περιθώρια αποθήκευσης ενε ργειας, ακθώς ένας αριθμός μικρορωγμών ενώνεται σχηματίζοντας ένα πεπερασμένο αριθμό μικρορωγμών που προεκτείονται προκαλώντας της αστοχία του υλικού. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται ως έναρξη της ασταθούς διάδοσης αστοχίας (onset of unstable fracture propagation – OUFP) (Κωτσοβός Μ.Δ., 2009).

8.8.2. Σχολιασμός επί των διαγραμμάτων ακουστικής εκπομπής

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρατίθενται για κάθε δοκίμιο χωριστά, προκύπτει ότι ανάλογα με το κατώφλι που επιλέγουμε αλλάζει και η πυκνότητα καταγραφής γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Στις δοκιμές με έλεγχο φορτίου όπου το κατώφλι επιλέγεται ίσο με 45 dB, η δραστηριότητα ΑΕ ξεκινά από γαμηλές τιμές τάσης οι οποίες αντιστοιχούν στη χρονική διάρκεια του πατήματος της πλάκας φόρτισης πάνω στις βάσεις του δοκιμίου, στην οποία συντελεί δυσμενώς η ανομοιογένεια της επιπεδότητας και της ομαλότητας της επιφάνειας των βάσεων. Έπειτα, ο ρυθμός έκλυσης ακουστικής δραστηριότητας αυξάνεται σχεδόν γραμμικά έως το 90 % του φορτίου αστοχίας ενώ τη στιγμή που επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή, παρατηρούμε απότομη αύξηση των γεγονότων ακουστικής δραστηριότητας (μετά το 95 % του μέγιστου φορτίου). Η καταγραφή της δραστηριότητας ΑΕ βοήθησε στην πρόγνωση σχετικά με την επερχόμενη αστοχία. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε τεμάχια με τα επίπεδα διαχωρισμού τους παράλληλα προς την διεύθυνση φόρτισης (axial split). Τα δοκίμια περιείχαν μια κατακόρυφη ρωγμή. Στο διάγραμμα του συντελεστή πλάτους συγνοτήτων b μπορούμε να διακρίνουμε λίγο πριν την αστοχία μια αύξηση της τιμής που ακολουθείται από μια ραγδαία μείωση. Άρα μια τέτοια ένδειξη στο διάγραμμα θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη της επερχόμενης αστοχίας του δοκιμίου.

Στις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης που ορίσαμε μικρότερη τιμή κατωφλιού (35 dB), παρατηρούμε παρόμοια αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής τη στιγμή του πατήματος της πλάκας. Στη συνέχεια παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής η οποία δείχνει να συμβαδίζει με τη γραμμική περιοχή του διαγράμματος τάσης – χρόνου και παρουσιάζει κατά τόπους διαδοχικές αυξήσεις. Σε τρεις δοκιμές προέκυψαν προβλήματα λόγω μη λειτουργίας ενός συγκεκριμένου καναλιού αξονικής βράχυνσης που καταγράφει ο μορφοτροπέας – LVDT. Οι δοκιμές αυτές σταμάτησαν και επαναλήφθηκαν με όλα τα κανάλια σε λειτουργία. Στην επαναφόρτιση ο ρυθμός έκλυσης γεγονότων ΑΕ δεν παρουσιάζει καμία προειδοποίηση, ξεκινά μεν από χαμηλές τιμές τάσεις και αλλάζει διαρκώς εντός της γραμμικής περιοχής που αναφέρουμε παραπάνω και λίγο πριν την αστοχία παρουσιάζει μία μικρή αύξηση συγκριτικά με τις δοκιμές με έλεγχο φορτίου. Η μικρή αύξηση της έκλυσης γεγονότων ΑΕ υποδεικνύει την ολίσθηση, ρωγμάτωση κάποιου επιπέδου ασυνέχειας εντός του δοκιμίου.

Κεφάλαιο 9: Υπολογισμός της βράχυνσης των δοκιμίων που υποβάλλονται σε τριαξονική θλίψη από τις μετρήσεις των μορφοτροπέων – LVDTs πάνω στις πλάκες

Για την εκτίμηση της πραγματικής βράχυνσης των δοκιμίων και τη διόρθωση των μετρήσεων πραμόρφωσης χωρίς επιπλέον ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα επιχειρούμε μία μέθοδος διόρθωσης, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η δυσκαμψία και η παραμορφωσιμότητα των πλακών φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιούμε αρχικά κυλινδρικό δοκίμιο αλουμινίου γνωστού μέτρου ελαστικότητας, ίσου με 73 GPa, και στη συνέχεια κυλινδρικό δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος, τα οποία υποβάλλουμε σε μονοαξονική θλίψη, αλλά με τη διάταξη των πλακών σφαιρικών εδράσεων της τριαξονικής θλίψης.

Η καταγραφή των βραχύνσεων αφορά τη συνολική βράχυνση του συστήματος εμβόλων φόρτισης τριξονικής δοκιμής - δοκιμίου μεταξύ των δύο πλακών φόρτισης και πραγματοποιείται με μορφοτροπείς - LVDTs, τους οποίους εγκαθιστούμε πάνω σε στηρίγματα που φέρουν βραχίονα και στερεώνονται πάνω στην κάτω πλάκα με μαγνήτη που φέρουν εσωτερικά στη βάση τους. Η θέση εγκατάστασης των μορφοτροπέων καθορίζεται απο την απαίτηση να βρίσκονται όσο γίνεται πιο κοντά στο δοκίμιο και να καλύπτουν ομοιόμορφα την περιφέρεια του δοκιμίου, οπότε τοποθετούνται κατά 120°. Στερεώνουμε τους μορφοτροπείς πάνω στους βραχίονες με τέτοιο τρόπο ώστε όταν ξεκινήσει η φόρτιση και το πάνω έμβολο φόρτισης έρθει σε επαφή με την πάνω πλάκα φόρτισης, οι μορφοτροπείς να είναι ελαφρώς συμπιεσμένοι.



Εικόνα 31: Εγκατάσταση μορφοτροπέων για καταγραφή βραχύνσεων μεταξύ των πλακών. Διακρίνεται το δοκίμιο αλουμινίου και τα έμβολα φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής



Εικόνα 32: Διάταξη μορφοτροπέων, πλακών φόρτισης, δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος και εμβόλων φόρτισης τριαξονικής δοκιμής.

122

Η δοκιμή πραγματοποιείται με έλεγχο φορτίου και το φορτίο επιβάλλεται με ρυθμό 500 N/s. Εφαρμόζουμε ένα αρχικό κατακόρυφο φορτίο ίσο με 20 kN, όπου και μηδενίζουμε τις ενδείξεις των μορφοτροπέων – LVDTs. Έπειτα, πραγματοποιούμε φόρτιση έως τα 80 kN και ακολουθεί αποφόρτιση έως τα 25 kN. Η διαδικασία φόρτισης – αποφόρτισης επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές (τέσσερις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης).

Η μετατόπιση (βράχυνση) σε μικρόμετρα που καταγράφουν τα βελόμετρα – μορφοτροπείς μεταξύ των δύο πλακών φόρτισης αντιπροσωπεύει τη συνολική βράχυνση του συστήματος του δοκιμίου και δύο πλακών φόρτισης (άνω και κάτω πλάκα - έμβολο φόρτισης) και δίνεται απο τη σχέση: $\Delta I = \Delta I_s + \Delta I_m$ (31) , όπου ΔI_s η βράχυνση του δοκιμίου και ΔI_m η βράχυνση των δύο πλακών - εμβόλων φόρτισης , με $\Delta I_m = k \cdot F$ (32) όπου k ένας μεταβλητός συντελεστής που εκπροσωπεί τη δυσκαμψία των δύο πλακών φόρτισης και F το επιβαλλόμενο φορτίο. Η ονομαστική τροπή – παραμόρφωση του δοκιμίου δίνεται από τη σχέση: $\varepsilon = (\Delta I - \Delta I_m) / h = (\Delta I - k \cdot F) / h$ (33), όπου h είναι το ύψος του δοκιμίου. Για ιδανικά άκαμπτες πλάκες - έμβολα φόρτισης, k = 0, οπότε $\Delta I_m = 0$, οπότε η παραμόρφωση του δοκιμίου δίνεται από τη σχέση του δίνεται από τη σχέση σύντει από τη σχέση ε = $\Delta I / h$.

Η ασκούμενη τάση για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενου φορτίου, όπως έχει προαναφερθεί δίνεται από τη σχέση: $\sigma = \frac{F}{A}$, όπου η διατομή του δοκιμίου ($A = \pi \cdot r^2$) του αλουμινίου είναι $A = \pi \cdot (25 \text{ mm})^2 = 1963,495 \text{ mm}^2$ και του τσιμεντοκονιάματος είναι $A = \pi \cdot (27,755 \text{ mm})^2 = 2420.094563 \text{ mm}^2$. Σύμφωνα όμως με το νόμο του Hooke, η επιβαλλόμενη τάση εκφράζεται από τη σχέση: $\sigma = \epsilon \cdot E$, οπότε: $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ (34) που είναι ο τύπος χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης του δοκιμίου του αλουμινίου (με μέτρο ελαστικότητας E=73 GPa). Έχοντας υπολογίσει την παραμόρφωση, υπολογίσουμε την πραγματική τιμή της βράχυνσης του δοκιμίου του αλουμινίου, για κάθε επίπεδο του επιβαλλόμενου φορτίου, σύμφωνα με τη σχέση: $\Delta I_s = \epsilon \cdot h$ (35). Έπειτα, υπολογίζουμε την τιμή της βράχυνσης των δύο εμβόλων - πλακών φόρτισης για κάθε βήμα φόρτισης, από τη διαφορά $\Delta I_m = \Delta I - \Delta I_s$ και από την τιμή αυτή προκύπτει η τιμή του συντελεστή ακαμψίας k για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενου φορτίου.



Σχήμα 158: Διάγραμμα με τις τρεις καμπύλες επιβαλλόμενου φορτίου - βράχυνσης (συνολική, μόνο του δοκιμίου και μόνο των εμβόλων φόρτισης)

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω τιμές για το δοκίμιο αλουμινίου, απεικονίζουμε τις τιμές αξονικής βράχυνσης των πλακών και εμβόλων φόρτισης Δl_m (mm) ως προς τις τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου F (kN), η εξίσωση της γραμμής τάσης της οποίας θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τιμών αξονικής βράχυνσης των πλακών και εμβόλων φόρτισης Δl_m (mm) για το δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος 20JAN14.



Σχήμα 159: Διάγραμμα με την καμπύλη βράχυνσης πλακών – εμβόλων φόρτισης ως προς το επιβαλλόμενο φορτίο.

Κατά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος, υπολογίζουμε αρχικά τις τιμές μέσης αξονικής βράχυνσης Δl (mm) και τις τιμές Δl_m , όπως περιγράφηκε παραπάνω, οπότε οι τιμές της πραγματικής βράχυνσης του δοκιμίου Δl_s (mm) για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενου φορτίου προκύπτουν απο τη διαφορά $\Delta l_s = \Delta l - \Delta l_m$, ενώ οι τιμές ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης απο τη σχέση: ε = Δl_s / h. Από το διάγραμμα τάσης σ (MPa) - τροπής ε και συγκεκριμένα από τη κλίση της καμπύλης για τον πρώτο κύκλο φόρτισης, προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος.



Σχήμα 160: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος 20JAN14 για τον πρώτο κύκλο φόρτισης, από το οποίο η γραμμή τάσης δίνει το μέτρο ελαστικότητας.

Ωστόσο, όπως παρατηρούμε από το σχήμα 160, η γραμμή τάσης δίνει μέτρο ελαστικότητας ίσο με 48.5 GPa, το οποίο αποκλίνει από το εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψε από τις δοκιμές με έλεγχο φορτίου και παραμόρφωσης (26 – 35 GPa). Έτσι, συμπεραίνουμε οτι η μέθοδος διόρθωσης που επιχειρήσαμε δε δύναται να εφαρμοστεί για τη διόρθωση των τιμών αξονικής βράχυνσης που καταγράφουν τα βελόμετρα – μορφοτροπείς, μεταξύ των πλακών.

9.1. Έλεγχος της καταγραφής σημάτων ακουστικής εκπομπής σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με προσαρμογή δύο αισθητήρων στο πάνω και κάτω έμβολο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής

Για τον έλεγχο της καταγραφής σημάτων ακουστικής εκπομπής στην περίπτωση της τριαξονικής δοκιμής με αισθητήρες προσαρμοσμένους πάνω στα έμβολα φόρτισης, επιχειρούμε μία δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο παραμόρφωσης στο κανάλι 5 και ρυθμό 25 μm/min στο δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος 20JAN15 με τη διάταξη των πλακών και εμβόλων φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής. Τα βελόμετρα – μορφοτροπείς (LVDTs) προσαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε παραπάνω πάνω σε μεταλλικούς βραχίονες και κατά 120°. Ακολούθως προσαρμόζουμε τους δύο αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με ελαστικές ταινίες και γέλη υπερήχων ως υλικό σύζευξης πάνω στο άνω και κάτω έμβολο της τριαξονικής δοκιμής. Το κατώφλι (threshold) ορίζεται στα 40 dB.

	20JAN15 (ADC 25 µm/min)
Ύψος (mm)	107.44
Διάμετρος (mm)	55.75
Μάζα (g)	584.20
Όγκος (cm ³)	262.27
Πυκνότητα (g/cm^3)	2.23
Μέγιστο φορτίο, Ρ (kN)	159.13
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ _c (MPa)	65.19
Διάρκεια δοκιμής (s)	746.80

Πίνακας 6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κορυφαία αντοχή του δοκιμίου 20JAN15 (ADC 25µm/min)



Εικόνα 33: Έμβολα και πλάκες φόρτισης που χρησιμοποιούμε στην τριαξονική δοκιμή



Εικόνα 34: Διάταξη μεταλλικού βραχίονα για τη συγκράτηση του μορφοτροπέα (LVDT) για τη μέτρηση της σύγκλισης μεταξύ των πλακών φόρτισης του μηχανήματος



Εικόνα 35: Διάταξη του δοκιμίου 20JAN15, των μορφοτροπέων, των εμβόλων φόρτισης και των δύο αισθητήρων καταγραφής ακουστικής εκπομπής



Εικόνα 36: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN15 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.



Σχήμα 161: Διάγραμμα τάσης / σημάτων ακουστικής εκπομπής ως προς το χρόνο του δοκιμίου 20JAN15 (ADC)

διαδρομής φόρτισης.

προσαρμοσμένους πάνω στα έμβολα

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 161, για κατωφλιού 40 dB, αποτυπώνεται τιμή σχεδόν αύξηση γραμμική των καταγραφούμενων σημάτων ακουστικής εκπομπής με το χρόνο και την αύξηση της αξονικής τάσης. Με την τοποθέτηση των αισθητήρων ακουστικής εκπομπής πάνω στα

έμβολα φόρτισης, καταγραφούμενα τα σήματα είναι αντιπροσωπευτικά της

Κεφάλαιο 10: 2^η σειρά πειραματικών δοκιμών – δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

Στις δοκιμές βραχομηχανικής είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθούν δοκίμια αντιπροσωπευτικά της βραχομάζας και με συγκρίσιμες ιδιότητες, ειδικότερα δε για ανομοιογενείς και ανισότροπες βραχομάζες. Με τις δοκιμές πολλαπλής αστοχίας, ελέγχουμε τη μηχανική - εντατική συμπεριφορά και αποκτούμε την περιβάλλουσα αστοχίας εκτελώντας δοκιμή σε ένα μόνο δοκίμιο παρά σε πολλά δοκίμια που απαιτούν οι μεμονωμένες δοκιμές.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του τρόπου, της διαδρομής φόρτισης και του τύπου δοκιμής (δοκιμή πολλαπλής αστοχίας ή μεμονωμένη δοκιμή) στην αντοχή των πετρωμάτων σε τριαξονική θλίψη και την αποκτηθείσα περιβάλλουσα αστοχίας, πραγματοποιούμε τη δεύτερη σειρά τριαζονικών δοκιμών σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος. Ωστόσο, λόγω στενότητας χρόνου επιλέξαμε δοκίμια με μικρότερο χρόνο ωρίμανσης από τις απαιτούμενες 28 ημέρες, και η επίδραση της παραμέτρου αυτής ήταν καθοριστική στις τιμές κορυφαίας αντοχής που πήραμε σε κάθε στάδιο επιβαλλόμενης πλευρικής πίεσης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο παραμόρφωσης με ρυθμό 50 μm/min για το δοκίμιο 20JAN16 και με έλεγχο παραμόρφωσης με ρυθμό 100 μm/min αντίστοιχα για τα δοκίμια MART1, MART2, MART3, MART4, MART9, MART10, MART11. Τα δοκίμια MART1, MART2, MART3, MART4 υποβλήθηκαν σε τριαξονική θλίψη υπό πολλαπλή αστογία, επιλέγοντας ως τιμές των βημάτων της πλευρικής πίεσης ίσες με 2, 4, 6, 8 MPa. Τα δοκίμια MART9, MART10, MART11 υποβλήθηκαν σε μεμονωμένη δοκιμή τριαξονική θλίψης υπό πλευρική πίεση 2, 4, 6 MPa αντίστοιχα. Για την εκμηδένιση της επίδρασης της ποιότητας των δοκιμίων και της μεταβλητότητας αντοχής, επιλέξαμε δοκίμια που παρασκευάσαμε από το ίδιο τσιμεντοκονίαμα, με την ίδια ημερομηνία καλουπώματος και τον ίδιο χρόνο ωρίμανσης.

10.1. Πειραματική διαδικασία

Πριν την έναρξη της κάθε δοκιμής προηγείται η εξής ακολουθία βημάτων:

 Προσαρμογή της εύκαμπτης ελαστικής μεμβράνης εντός του τριαξονικού κελιού και των εμβόλων με ελαφριά σύσφιξη για την αποτροπή της διαφυγής του υδροστατικού ελαίου απο τη διεπιφάνεια μεταξύ μεμβράνης και κελιού. Προς την κατεύθυνση αυτή συντελούν και τα ελαστικά παρεμβύσματα – οχετοειδείς προεξοχές στις οποίες καταλήγει η μεμβράνη.



Εικόνα 37: Διακρίνεται το τριαζονικό κελί, τα δύο έμβολα και οι δύο πλάκες φόρτισης με σφαιρική έδραση καθώς και η εύκαμπτη ελαστική μεμβράνη. Το τριαζονικό κελί φέρει δύο αγωγούς με βαλβίδες για την είσοδο του υδραυλικού ελαίου και την εκροή του αέρα από το κελί αντίστοιχα.

- Είσοδος του δοκιμίου και συμμετρική εγκατάσταση του εντός της μεμβράνης και του τριαξονικού κελιού με τις δύο βάσεις του να έχουν ισαπέχουσες αποστάσεις από τα άκρα της μεμβράνης.
- 3. Σύνδεση του αγωγού υδραυλικού λαδιού και τοποθέτηση του τριαξονικού κελιού σε ένα επίπεδο υψηλότερο από αυτό της αντλίας και κατάλληλος προσανατολισμός του έτσι ώστε η οπή εκροής αέρα να βρίσκεται πάνω, για την εξαέρωση του τριαξονικού κελιού. Ακολουθεί η έναρξη της λειτουργίας της αντλίας και της βρύσης του λαδιού για την εισπίεση του λαδιού εντός του τριαξονικού κελιού για την πλήρωση του κενού χώρου μεταξύ τοιχωμάτων κελιού και μεμβράνης, ενώ παράλληλα κρατάμε αδιάλλειπτα πατημένη τη βαλβίδα εκροής του αέρα. Η εισπίεση του λαδιού σταματά όταν από τη βαλβίδα εκροής του αέρα βγεί λάδι, που σημαίνει οτι απελευθερώθηκε όλη η ποσότητα του εγκλωβισμένου αέρα. Να σημειωθεί πως σε περίπτωση που δεν πιέζουμε αδιάλλειπτα τη βαλβίδα εκροής αέρα υπάρχει ο κίνδυνος της υπερβολικής διόγκωσης της μεμβράνης εντός του κελιού με αποτέλεσμα τη διαφυγή του λαδιού από την επαφή των παρεμβυσμάτων με το κελί. Η παραπάνω διαδικασία εξαέρωσης πραγματοποιείται μόνο μία φορά καθώς δεν απαιτείται κάθε φορά η έξοδος της μεμβράνης.

4. Εφαρμογή και συγκράτηση των εμβόλων φόρτισης πάνω στις βάσεις του δοκιμίου και άσκηση αρχικής πλευρικής πίεσης ίσης περίπου με 1 MPa, μέχρι να διαπιστωθεί πως τα έμβολα φόρτισης έχουν συγκρατηθεί σε σταθερή θέση από τη μεμβράνη.



Εικόνα 38: Συγκράτηση των εμβόλων φόρτισης πάνω στις βάσεις του δοκιμίου έως την ενσφήνωσή τους σε σταθερή θέση από τη μεμβράνη που διογκώνεται ελαφρώς λόγω της εισπίεσης του λαδιού.

- 5. Εγκατάσταση των μορφοτροπέων LVDTs πάνω σε βραχίονες, οι οποίοι εδράζονται στην κάτω πλάκα φόρτισης του μηχανήματος της πρέσας με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τη διόρθωση της ακαμψίας των εμβόλων της τριαξονικής δοκιμής έτσι ώστε να καλύπτουν όλη τη περιφέρεια του δοκιμίου, δηλαδή τοποθετούνται κατά 120°.
- 6. Εγκατάσταση του τριαξονικού κελιού μεταξύ των μεγάλων πλακών φόρτισης της πρέσσας με τα έμβολα φόρτισης να πατάνε πάνω στις μικρές πλάκες φόρτισης σφαιρικών εδράσεων. Προσέχουμε το τριαξονικό κελί να βρίσκεται σε θέση ισορροπίας προς όλες τις διευθύνσεις, οπότε για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε αλφάδι. Αφού εγκαταστήσουμε το κελί, ρυθμίζουμε εκ νέου τη θέση και ύψος των



βελόμετρων με γνώμονα το ανώτερο επίπεδο της πάνω πλάκας φόρτισης σφαιρικής υποδοχής έτσι ώστε όταν πατήσει αυτή στην πάνω πλάκα του μηχανήματος και ξεκινήσει η δοκιμή, τα βελόμετρα να είναι ελαφρώς συμπιεσμένα.

Εικόνα 39: Εγκατάσταση του τριαξονικού κελιού μεταξύ των πλακών φόρτισης του μηχανήματος. Διακρίνονται και οι μορφοτροπείς - LVDTs για την καταγραφή των αξονικών τροπών του συστήματος πλακών – δοκιμίου.

7. Άσκηση αρχικού αξονικού φορτίου για να αρχίσει η δοκιμή. Τη στιγμή της επαφής της πάνω πλάκας σφαιρικής έδρασης με την πάνω πλάκα του μηχανήματος, μηδενίζουμε την ένδειξη των τριών μορφοτροπέων, ενώ τη στιγμή που ξεκινά η δοκιμή αυξάνουμε την πλευρική πίεση στο αρχικό της επίπεδο το οποίο διατηρείται σταθερό μέχρι τη στιγμή της πρώτης κορυφαίας αντοχής, όπου αυξάνουμε την πλευρική πίεση στο επόμενο επίπεδο. Η αξονική τάση αυξάνεται μέχρι την κορυφαία αντοχή, όπου ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης μπορούμε είτε να τη ρίξουμε έως ένα καθορισμένο επίπεδο είτε να την αφήσουμε αναλλοίωτη.

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης πολλαπλής αστοχίας στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε με δύο διαδρομές φόρτισης. Ο πρώτος τρόπος ξεκινά με το αρχικό επίπεδο πλευρικής πίεσης, το οποίο διατηρείται σταθερό για ολόκληρο το πρώτο βήμα. Για την αποφυγή απότομων αστοχιών τη στιγμή της κορυφαίας αντοχής, ορίζουμε ένα ρυθμό ελέγχου παραμόρφωσης (50, 100 μm/min). Η αστοχία ανιχνεύεται απο τη μείωση της διαφορικής τάσης και εκδηλώνεται απο την επιπεδότητα στο διάγραμμα τάσης – τροπής (επίπεδη καμπύλη μετά το yield point , δηλαδή το σημείο που η καμπύλη τάσης – τροπής αποκλίνει απο τη γραμμική περιοχή. Η ανίχνευση αυτής της περιοχής επαφίεται σε υποκειμενικά κριτήρια.

Τη στιγμή της κορυφαίας αντοχής, αυξάνουμε την πλευρική πίεση στο επόμενο επίπεδο ενώ ταυτόχρονα ελαττώνουμε την αξονική τάση. Το βήμα αυτό διαφέρει απο τη συμβατική πειραματική διαδικασία της τριαξονικής δοκιμής και είναι κορυφαίας σημασίας για ψαθυρά πετρώματα, καθώς έτσι αποφεύγουμε ή μειώνουμε στο ελάχιστο τη διατάραξη της μικροδομής του δοκιμίου. Η στιγμιαία αύξηση της πλευρικής πίεσης τη στιγμή της κορυφαίας αντοχής και η ταυτόχρονη μείωση της αξονικής τάσης αποτρέπει την καθολική αστοχία σε αυτή τη κρίσιμη κατάσταση. Η συνέχιση της φόρτισης του δοκιμίου στην περιοχή πέρα απο την αστοχία χωρίς παράλληλη αύξηση της πλευρικής πίεσης, θα είχε μη ανεστρεπτά αποτελέσματα στις επακόλουθες καταστάσεις αστοχίας (επόμενα βήματα της δοκιμής).

Ο δεύτερος τρόπος – δεύτερη διαδρομή φόρτισης τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας υποβάλλει παρόμοια το δοκίμιο σε διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας με σταδιακή αύξηση της πλευρικής πίεσης και διαφέρει από τον προηγούμενο ως προς τον τρόπο επιβολής της αξονικής τάσης. Η δοκιμή αποτελείται από αρκετά στάδια. Στο αρχικό στάδιο, η εντατική κατάσταση στην οποία υποβάλλεται το δοκίμιο προσομοιάζει την υδροστατική εντατική κατάσταση, όπως περιγράφηκε στα παραπάνω βήματα της

πειραματικής διαδικασίας. Έπειτα, το αξονικό φορτίο αυξάνεται γραμμικά, μέχρι το yield point, δηλαδή το σημείο μετά τη γραμμική περιοχή, στο οποίο η καμπύλη τάσης – τροπής αποκλίνει από τη γραμμικότητα και τείνει προς σημείο καμπής. Μετά τον εντοπισμό του αρχικού σημείου διαρροής και πριν την αστοχία του δοκιμίου, η δοκιμή συνεχίζει με την αύξηση της πλευρικής πίεσης στο επόμενο προκαθορισμένο επίπεδο, με ταυτόχρονη αύξηση της αξονικής φόρτισης. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται σταδιακά σε ανώτερα επίπεδα πλευρικού περιορισμού, μέχρι τη λήξη της δοκιμής σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο μέγιστης πλευρικής πίεσης. Η ολοκλήρωση της δοκιμής πραγματοποιείται με την αποφόρτιση του δοκιμίου και με σταδιακή μείωση της πλευρικής πίεσης με τρόπο ανάλογο με αυτό της διεργασίας φόρτισης.

Την ολοκλήρωση της δοκιμής ακολουθεί η αποσύνδεση του αγωγού λαδιού και η εξαγωγή του δοκιμίου από το τριαξονικό κελί. Η εξαγωγή του δοκιμίου πραγματοποιείται με ειδικό εξολκέα δοκιμίων, καθώς λόγω της επίδρασης της εντατικής κατάστασης προκαλείται ελαφριά πλευρική διόγκωση και ενσφήνωση του δοκιμίου εντός του τριαξονικού κελιού.



Εικόνα 40: Εξολκέας δοκιμίων που χρησιμοποιούμε για την εξαγωγή του δοκιμίου από το τριαξονικό κελί μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών.

Η ανίχνευση της αστοχίας στη τριαξονική δοκιμή πολλαπλής αστοχίας είναι καθαρά υποκειμενική, πραγματοποιείται χειρωνακτικά και η τάση αστοχίας καθορίζεται ως η μέγιστη αξονική τάση σε κάθε στάδιο της διαδρομής φόρτισης. Αυτός ο τύπος δοκιμής ενέχει ορισμένους περιορισμούς: εάν το δοκίμιο αστοχήσει μόνιμα και μη αναστρεπτά σε ένα από τα αρχικά στάδια - καταστάσεις αστοχίας, η τιμή αντοχής που καταγράφεται σε υψηλότερα εντατικά επίπεδα μπορεί να υπο – εκτιμάται. Με άλλα λόγια, για να χαρακτηριστούν αξιόπιστα τα αποτελέσματα αυτού του τύπου δοκιμής, οι μικρορωγμές που ανοίγονται κατά τη διάρκεια της αρχικής κατάστασης διαρροής πρέπει είτε να

κλείσουν κατά τη διάρκεια της περαιτέρω φόρτισης, είτε να μην είναι κρίσιμες όσον αφορά την αστοχία σε υψηλότερες τάσεις.

Υπό καθεστώς πλευρικού περιορισμού, η μακροσκοπική αστοχία εκδηλώνεται μέσω της «γεφύρωσης» των αξονικών μικρορωγματώσεων κατά μήκος μίας διεύθυνσης, η οποία ορίζεται από τη γωνία εσωτερικής τριβής. Η συνολική πυκνότητα μικρορωγματώσεων μειώνεται καθώς προχωρά η δοκιμή πολλαπλής αστοχίας, εκτός από το πρώτο στάδιο. Για κάθε στάδιο αστοχίας, η πυκνότητα μικρορωγματώσεων αυξάνεται όταν το αξονικό φορτίο προσεσσίζει το σημείο αστοχίας. Μετά την ανίχνευση της αστοχίας και την αύξηση της πλευρικής πίεσης, οι μικρορωγματώσεις κλείνουν, οπότε το δοκίμιο συμπεριφέρεται σαν να ανακτά την ακεραιότητα της δομής του πριν την επόμενη κατάσταση αστοχίας της δοκιμής πολλαπλής αστοχίας.

10.2. Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης

Για τον υπολογισμό των πραγματικών βραχύνσεων των δοκιμίων που ανάγονται από τις καταγραφούμενες τιμές βραχυνσης του συστήματος δοκιμίου και πλακών – εμβόλων φόρτισης τριαξονικής δοκιμής, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη μεθοδολογία διόρθωσης:

- Αρχικά υπολογίζουμε τις τιμές μετρούμενης βράχυνσης ΔH_{measured} (μm) ως το μέσο όρο των τιμών των τριών μορφοτροπέων. Η βράχυνση αυτή αντιστοιχεί στο σύστημα του δοκιμίου και των πλακών – εμβόλων φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής.
- Έπειτα, υπολογίζουμε τις τιμές τάσης για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενης φόρτισης σύμφωνα με τη σχέση σ = F /A όπου F το επιβαλλόμενο φορτίο σε N και A = $\pi \cdot d^2 / 4$ η διατομή του δοκιμίου.
- Η βράχυνση του δοκιμίου ΔΗ υπολογίζεται από τη σχέση ΔΗ_{measured} [(σ/210000) · 2 · 86 · 1000] (36) όπου Ε = 210 GPa = 210000 MPa το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και 2· 86 · 1000 το συνολικό ύψος των δύο ζευγών εμβόλων και πλακών φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής.
- Έχοντας υπολογολίσει τη βράχυνση του δοκιμίου ΔΗ, υπολογίζουμε τις τιμές της πραγματικής τροπής του δοκιμίου για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενης φόρτισης σύμφωνα με τη σχέση ε = ΔΗ / h, όπου h το ύψος του δοκιμίου σε μm.

Αφού ολοκληρώσουμε τις παραπάνω αναλύσεις, σχηματίζουμε τα διαγράμματα τάσης - τροπής και φορτίου - πραγματικής βράχυνσης για κάθε δοκίμιο χωριστά. Από το διάγραμμα τάσης – τροπής, υπολογίζουμε το μέσο μέτρο ελαστικότητας Eav ως την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος – γραμμικής περιοχής, όπως περιγράψαμε παραπάνω. Επιπλέον, με χρήση του προγράμματος RocData της RocScience σχηματίζουμε τις περιβάλλουσες αστοχίας και υπολογίζουμε τις παραμέτρους αστοχίας κατά Mohr -Coulomb και Hoek - Brown.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων καθώς και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμών αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα 7.

	20JAN16	MART1	MART2	MART3	MART4
Ύψος (mm)	109.14	97.49	95.71	101.28	96.24
Διάμετρος (mm)	55.54	55.63	55.64	55.52	55.75
Μάζα (g)	587.50	523.10	522.80	523.60	522.40
Όγκος (cm ³)	264.41	236.96	232.71	245.20	234.93
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.22	2.21	2.25	2.14	2.22
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Eav (GPa)	16.18	12.25	10.47	11.97	12.35
Συνοχή c (MPa)	18.23	12.40	9.57	10.99	10.77
Γωνία εσωτερικής τριβής φ (°)	32.77	26.45	31.21	32.00	29.86

Πίνακας 7: Αποτελέσματα επεξεργασίας των μετρήσεων των προκαταρκτικών τριαξονικών δοκιμών πολλαπλής αστοχίας σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος



Analysis of Rock Strength using RocLab

Hoek-Brown Classification intact uniaxial comp. strength (sigci) = 71.093 MPa GSI = 100 mi = 4.233 Disturbance factor (D) = 0 intact modulus (Ei) = 12000 MPa

Hoek-Brown Criterion mb = 4.233 s = 1.0000 a = 0.500

Mohr-Coulomb Fit cohesion = 18.231 MPa friction angle = 32.77 deg

Rock Mass Parameters tensile strength = -16.795 MPa uniaxial compressive strength = 71.093 MPa global strength = 66.842 MPa deformation modulus = 11931.94 MPa



Σχήμα 162: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα 133 αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο 20JAN16)


Σχήμα 163: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου 20JAN16



Σχήμα 164: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου 20JAN16



Σχήμα 165: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο MART1)



Σχήμα 166: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART1



Σχήμα 168: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο MART2)



Σχήμα 169: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART2



Σχήμα 170: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART2



Σχήμα 171: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο MART3)



Σχήμα 172: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART3



Σχήμα 173: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART3



Σχήμα 174: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο MART4)

139



Σχήμα 175: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART4



Σχήμα 176: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART4

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω δοκιμών, υποβάλλουμε τα δοκίμια 20JAN16, MART1, MART2, MART3, MART4 τσιμεντοκονιάματος σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης για τον έλεγχο των τιμών κορυφαίας αντοχής τους μετά την καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη. Συγκεκριμένα τα δοκίμια 20JAN16, MART1,MART2, MART3 υποβάλλονται σε αξονική φόρτιση με έλεγχο φορτίου και ρυθμό 500 N/s, ενώ το δοκίμιο MAPT4 υποβάλλεται σε αξονική φόρτιση με έλεγχο παραμόρφωσης και ρυθμό 100 μm/min ενώ επιπλέον προσαρμόσαμε πάνω στο δοκίμιο αυτό τους δακτυλίους αλουμινίου με τα τρία βελόμετρα - μορφοτροπείς για τον έλεγχο της πτώσης του μέτρου ελαστικότητας. Οι δοκιμές αυτές έδωσαν τα αποτελέσματα που αποτυπώνονται στον πίνακα 8.

	20JAN16	MART1	MART2	MART3	MART4
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ _c (MPa)	49.69	39.78	33.72	33.45	40.57
Διάρκεια δοκιμής (s)	237.20	188.60	159.40	158.20	95.40
Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Ε _t (GPa)	-	-	-	-	8.75
Τέμνον μέτρο ελαστικότητας Ε _s (GPa)	-	-	-	-	11.24
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Ε _{av} (GPa)	-	_	-	-	8.97

Πίνακας 8: Αποτελέσματα επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη μετά από καταπόνηση σε τριαξονική δοκιμή πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 177: Διάγραμμα τάσης – χρόνου του δοκιμίου 20JAN16. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο φορτίου 500 N/s μετά από καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 178: Διάγραμμα τάσης – χρόνου του δοκιμίου MART1. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο φορτίου 500 N/s μετά από καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 180: Διάγραμμα τάσης – χρόνου του δοκιμίου MART3. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο φορτίου 500 N/s μετά από καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 179: Διάγραμμα τάσης – χρόνου του δοκιμίου MART2. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο φορτίου 500 N/s μετά από καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 181: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART4. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο παραμόρφωσης 100 μm/min μετά από καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας.



Σχήμα 182: Καμπύλη του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου MART4.

Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω δοκιμές πραγματοποιούμε ακόμη μία σειρά δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται σε δοκίμια του ίδιου μίγματος τσιμεντοκονιάματος, με την ίδια ημερομηνία παρασκευής και τον ίδιο χρόνο ωρίμανσης στο νερό και συνεπώς παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες (κατά σύμβαση). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών θα αξιοποιηθεί στην αξιολόγηση της απώλειας της αντοχής αλλά και του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων που καταπονούνται σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων αλλά και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα.



Σχήμα 183: Διάγραμμα τάσης – χρόνου του δοκιμίου MART5. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο φορτίου 500 N/s



Σχήμα 185: Καμπύλη του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου MART7.



Σχήμα 184: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART7. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο παραμόρφωσης 50 μm/min.



Σχήμα 186: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART8. Μονοαξονική δοκιμή με έλεγχο παραμόρφωσης 100 μm/min.



Σχήμα 187: Καμπύλη του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου MART8.

	MART5 (LC)	MART6 (DC 20 µm/min)	MART7 (DC 50 µm/min)	MART8 (DC 100 µm/min)
Ύψος (mm)	100.84	103.42	95.06	102.10
Διάμετρος (mm)	55.74	55.54	55.62	55.63
Μάζα (g)	536.50	540.50	491.90	543.20
Όγκος (cm ³)	246.07	250.56	230.97	248.16
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.18	2.16	2.13	2.19
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαζονική θλίψη, σ _c (MPa)	43.70	43.14	42.79	37.17
Διάρκεια δοκιμής (s)	208.40	655.40	358.00	71.80
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Ε _{av} (GPa)	-	24.39	21.13	23.26

Πίνακας 9: Αποτελέσματα επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη με έλεγχο φορτίου και με έλεγχο παραμόρφωσης.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πινάκων 7, 8 και 9 προκύπτει ότι τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος που καταπονούνται σε δοκιμή τριαξονικής θλίψης παρουσιάζουν σημαντική απώλεια του μέτρου ελαστικότητάς τους. Επιπλέον παρουσιάζουν μία λιγότερο αισθητή απώλεια της μέγιστης αντοχής τους σε μονοαξονική θλίψη (περίπου 5 - 10 MPa).

Μετά τις παραπάνω δοκιμές εκτελούμε τρεις μεμονωμένες δοκιμές τριαξονικής θλίψης στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος MART9, MART10, MART11 σε πλευρικές πιέσεις 2, 4 και 6 MPa αντίστοιχα μέχρι την κορυφαία αντοχή, όπου και ολοκληρώνεται η δοκιμή με την αποφόρτιση του δοκιμίου.

	MART9	MART10	MART11
Ύψος (mm)	96.81	98.53	100.12
Διάμετρος (mm)	55.62	55.53	55.58
Μάζα (g)	519.70	514.00	516.90
Όγκος (cm ³)	235.22	238.62	242.91
Πυκνότητα (g/cm^3)	2.21	2.15	2.13
Μέγιστο φορτίο, Ρ (kN)	119.17	126.13	125.73
Μέγιστη τάση, σ - Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ _c (MPa)	49.05	52.08	51.82
Διάρκεια δοκιμής (s)	345.00	400.60	376.20
Μέσο μέτρο ελαστικότητας, Ε _{av} (GPa)	12.66	11.92	19.67

Πίνακας 10: Αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μεμονωμένη τριαξονική δοκιμή με πλευρικές πιέσεις 2,4 και 6 MPa αντίστοιχα.



Σχήμα 188: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART9. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 2 MPa.



Σχήμα 190: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART10. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 4 MPa.



Σχήμα 192: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου MART11. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 6 MPa.



Σχήμα 189: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART9. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 2 MPa.



Σχήμα 191: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART10. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 4 MPa.



Σχήμα 193: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου MART11. Μεμονωμένη Τριαξονική δοκιμή με πλευρική πίεση 6 MPa.



Σχήμα 194: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμια MART9, MAPT10, MAPT11)

Οι παραπάνω περιβάλλουσες αστοχίες σχηματίστηκαν με το πρόγραμμα RocData σύμφωνα με τα κριτήρια αστοχίας. Ωστόσο, μπορούμε να αποτυπώσουμε τις περιβάλλουσες αστοχίας και με γραμμική παρεμβολή μέσω των μεμονωμέων δεδομένων ζευγών κυρίων τάσεων (σ3, σ1) των δοκιμών πολλαπλής αστοχίας και μέσω του συνδυασμού των δεδομέων ζευγών κυρίων τάσεων (σ3, σ1) των μεμονωμέων δοκιμών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών πολλαπλής αστογίας και των μεμονωμένων δοκιμών έδειξαν πολύ καλή συσχέτιση και αμελητέες διαφορές μεταξύ των περιβαλλουσών αστοχίας που προκύπτουν από τις διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν από μεμονωμένες δοκιμές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης R^2 . Επιπλέον, οι δοκιμές πολλαπλής αστοχίας επιδεικνύουν πολύ καλή αξιοπιστία ως προς την περιβάλλουσα αστοχίας από ένα μόνο δοκίμιο. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των μεμονωμένων δοκιμών, ενδέχεται να παρουσιαστούν μεταβλητότητες αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή μεμονωμένων δοκιμών, οι οποίες οφείλονται στην ανομοιογένεια και την ανομοιομορφία των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού των δοκιμίων, η οποία αποτυπώνεται στις τιμές της κορυφαίας αντοχής τους. Επομένως, μέσω των τριαξονικών δοκιμών πολλαπλής αστοχίας ήταν δυνατό να αποδείξουμε ότι η πειραματική διαδικασία τριαξονικής δοκιμής με διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της κορυφαίας αντοχής των πετρωμάτων σε διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας αλλά και τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων αστοχίας.

	Ελάχιστη κύρια τάση σ ₃ (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση σ ₁ (MPa)
20JAN16	2	77,2
	4	83,25
	6	88,55
	8	94,52
	2	45,5284
MART1	4	51,069
MARTI	6	54,31
	8	58,593
	2	41,34
ΜΔΡΤ2	4	46,95
MIT IN 12	6	51,846
	8	56,509
	2	47,932
MART3	4	53,112
WILKI'S	6	58,791
	8	63,689
	2	44,654
MART4	4	49,199
	6	53,25
	8	59,458
MART9	2	49,0485
MART10	4	52,079
MART11	6	51,82

Δοκίμιο	Είδος - Τύπος δοκιμής	Συντελεστής Συσχέτισης, R ²
20JAN16	Δοκιμή πολλαπλής αστοχίας	0,999
MART1	Δοκιμή πολλαπλής αστοχίας	0,989
MART2	Δοκιμή πολλαπλής αστοχίας	0,998
MART3	Δοκιμή πολλαπλής αστοχίας	0,999
MART4	Δοκιμή πολλαπλής αστοχίας	0,991
MART9,		
MART10,	Μεμονωμένες δοκιμές	0,68
MART11		

Πίνακας 12: Τιμές του συντελεστή συσχέτισης για τη γραμμική προσαρμογή της περιβάλλουσας αστοχίας πάνω στα πειραματικά δεδομένα των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων.

Πίνακας 11: Διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας των δοκιμών πολλαπλής αστοχίας και τιμές κορυφαίας αντοχής των μεμονωμένων δοκιμών



Σχήμα 195: Περιβάλλουσες αστοχίας των τριαξονικών δοκιμών πολλαπλής αστοχίας και των τριών μεμονωμένων δοκιμών



Εικόνα 41: Φωτογραφία του δοκιμίου 20JAN16 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριαξονικής και μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 42: Φωτογραφία του δοκιμίου MART1 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριαξονικής και μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 43: Φωτογραφία του δοκιμίου MART2 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριαξονικής και μονοαζονικής θλίψης



Εικόνα 44: Φωτογραφία του δοκιμίου MART3 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριαξονικής και μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 45: Φωτογραφία του δοκιμίου MART4 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τριαξονικής και μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 46: Φωτογραφία του δοκιμίου MART5 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 47: Φωτογραφία του δοκιμίου MART6 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 48: Φωτογραφία του δοκιμίου MART7 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 49: Φωτογραφία του δοκιμίου MART8 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Κεφάλαιο 11: 3^η σειρά πειραματικών δοκιμών – δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια πετρωμάτων

Η τρίτη σειρά πειραματικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε δοκίμια διαφόρων τύπων πετρωμάτων της ευρύτερης περιοχής της Ανατολικής Αττικής. Η δειγματοληψία και η προετοιμασία των δοκιμίων σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Βραχομηχανικής πραγματοποιήθηκε από τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών – Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Κοτσάνη Δημήτριο. Συγκεκριμένα πραγματοποιήσαμε δοκιμές τριαξονικής θλίψης πολλαπλής αστοχίας σε δοκίμια μαρμάρου από τη Ραπεντώσα, σε δοκίμια Ασβεστολίθου από την Παιανία, σε δοκίμιο Ψαμμίτη από τα Σπάτα, κλπ.

Στα δοκίμια μαρμάρου από την Ραπεντώσα, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο παραμόρφωσης και με ρυθμό 100 μm/min, ενώ τα βήματα αύξησης της πλευρικής πίεσης ήταν 2.5, 5, 10, 15, 20, 25 MPa για το δοκίμιο ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ1 και 3, 6.5, 10, 15.6, 20.3, 25.15, 30 και 36.6 για το δοκίμιο ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ2.



Σχήμα 196: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ1)



Σχήμα 197: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ1



Σχήμα 198: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ1



Analysis of Rock Strength using RocLab

deformation modulus = 11931.94 MPa



Σχήμα 199: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ2)



Σχήμα 200: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ2



Σχήμα 201: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ2

Δοκίμιο	ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ 1	ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ 2
Ύψος (mm)	79.92	107.44
Διάμετρος (mm)	54.47	55.75
Μάζα (g)	492.30	584.20
Όγκος (cm ³)	186.20	262.27
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.64	2.23
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Eav (GPa)	47.62	29.58
Συνοχή c (MPa)	14.10	15.22
Γωνία εσωτερικής τριβής φ (°)	39.54	37.95

Πίνακας 13: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των δύο δοκιμίων μαομάρου



Εικόνα 50: Φωτογραφία του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ1 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής τριαξονικής θλίψης



Εικόνα 51: Φωτογραφία του δοκιμίου ΡΑΠΕΝΤΩΣΑ2 και του τρόπου αστοχίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής τριαξονικής θλίψης

11.1. Δοκιμές με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) και με εφαρμογή της μεθόδου ακουστικής εκπομπής

Ο προσδιορισμός του παραμορφωσιακού πεδίου σε ένα δοκίμιο μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός ή περισσοτέρων μηκυνσιόμετρων καθώς και διατάξεων ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να αναχθούν ώστε να βρεθούν οι παραμορφώσεις σε συγκεκριμένους άξονες ή ακόμα και οι κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις. Μία διάταξη από ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα αποτελείται από δύο ή περισσότερα μηκυνσιόμετρα διατεταγμένα κατά ορισμένο τρόπο πάνω στο δοκίμιο. Διακρίνονται τα ορθογώνια συμπλέγματα, τα οποία είναι δυνατόν να απαρτίζονται από α) δύο μηκυνσιόμετρα κάθετα μεταξύ τους και β) τρία μηκυνσιόμετρα ανά 45° αλλά και τρία μηκυνσιόμετρα ανά 120°. Σημειώνεται ότι το ορθογώνιο σύμπλεγμα αποδεικνύεται χρήσιμο στην περίπτωση φόρτισης ενός κυλινδρικού δοκιμίου σε τριαξονική θλίψη καθώς είναι εκ των προτέρων γνωστό ότι αναμένονται δύο επίπεδα – διευθύνσεις κυρίων παραμορφώσεων, μία αξονική και μία διαμετρική παραμόρφωση.

Πραγματοποιούμε πέντε δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια ασβεστόλιθου, ,ψαμμίτη και μαρμάρου από την Ανατολική Αττική και συγκεκριμένα από την Παιανία, την Παλλήνη και τα Σπάτα αντίστοιχα (δοκίμια s4paians2_5 με ρυθμό 100 μm/min , s3pals1_3 με ρυθμό 100 μm/min, s5spats1_2 με ρυθμό 30 μm/min, s5rafs2_1 με ρυθμό 50 μm/min, s6paians3_2 με ρυθμό 70 μm/min). Χρησιμοποιούμε ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα του οίκου Tokyo Sokki, τα οποία προσαρμόζουμε με κόλλα και κατακόρυφη και διαμετρική διάταξη στο κέντρο του δοκιμίου ανά 120° καλύπτοντας ομοιόμορφα όλη την περιφέρεια του δοκιμίου. Η διάταξη του δοκιμίου με τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα εσωκλείεται εντός του τριαξονικού κελικού, τα καλώδια περνούν απ' έξω και διαμέσω της διεπιφάνειας εμόλων και σώματος κελιού, ενώ παράλληλα προσαρμόζουμε μεταξύ των μεγάλων πλακών φόρτισης του μηχανήματος βραχίονες με προσαρμοσμένους μορφοτροπείς για την καταγραφή των βραχύνσεων μεταξύ των πλακών φόρτισης, όπου με αναγωγή διόρθωσης παίρνουμε τις τιμές βράχυνσης του δοκιμίου. Ωστόσο λόγω τεχνικών περιορισμών που συνδέονται με τη φύση της κόλλησης των μηκυνσιόμετρων, την κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου πάνω στην οποία είναι συγκολλημένα τα strain gauges, και άλλες παραμέτρους όπως η επίδραση της πλευρικής πίεσης, η λειτουργία των μηκυνσιόμετρων δεν είναι πάντοτε η αναμενόμενη από άποψη αποτελεσμάτων καταγραφόμενων τροπών. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των τριών δοκιμίων αποτυπώνονται στο ακόλουθο πίνακα.

Δοκίμιο	s4paians2_5	s3pals1_3	s5spats1_2	s5rafs2_1	s6paians3_2
Ύψος (mm)	114.10	79.30	103.51	115.41	108.72
Διάμετρος (mm)	54.52	54.48	54.46	54.47	54.50
Μάζα (g)	680.10	474.50	606.40	650.10	677.40
Όγκος (cm ³)	266.37	184.85	241.12	268.89	253.58
Πυκνότητα (g/cm^3)	2.55	2.57	2.51	2.42	2.67
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Eav από LVDTs (GPa)	27.90	31.47	15.24	3.66	34.47
Μέσο μέτρο ελαστικότητας Eav από strain gauges (GPa)	-	-	23.40	6.14 (ch6), 8.27 (ch8)	49.15(ch6)
Λόγος Poisson από strain gauges	-	-	-	-	0.13
Συνοχή c (MPa)	18.45	24.80	11.32	3.93	22.69
Γωνία εσωτερικής τριβής φ (°)	32.73	39.64	36.57	40.34	38.57

Πίνακας 14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων των δοκιμίων πετρωμάτων



Σχήμα 202: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο s4paians2_5)



Σχήμα 203: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 204: Διάγραμμα τάσης - τροπής του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 205: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο s4paians2_5



Σχήμα 206: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πρώτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 207: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 208: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 209: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 210: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πέμπτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 211: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έκτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 212: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έβδομο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Σχήμα 213: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το όγδοο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s4paians2_5



Εικόνα 52: Φωτογραφία του δοκιμίου s4paians2_5 μετά τη τριαξονική δοκιμή. Είναι εμφανής η πλευρική διόγκωση σε σχήμα βαρελιού και οι συζυγείς διατμήσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου.



Analysis of Rock Strength using RocLab

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (sigci) = 114.165 MPa GSI = 100 mi = 7.457 Disturbance factor (D) = 0 intact modulus (Ei) = 12000 MPa

Hoek-Brown Criterion

mb = 7.457 s = 1.0000 a = 0.500

Mohr-Coulomb Fit cohesion = 24.796 MPa friction angle = 39.64 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = .15.310 MPa uniaxial compressive strength = 114.165 MPa global strength = 105.489 MPa deformation modulus = 11931.94 MPa



Σχήμα 214: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο s3pals1_3)



Σχήμα 215: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 216: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου s3pals1_3







Σχήμα 218: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 219: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 220: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 221: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πέμπτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 222: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έκτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 223: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έβδομο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 224: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το όγδοο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 225: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το ένατο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s3pals1_3



Σχήμα 226: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο s5spats1_2)



Σχήμα 227: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο s3pals1_3



Εικόνα 53: Φωτογραφία του δοκιμίου *s3pals1_3* πριν τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης.



Εικόνα 54: Διάταξη των ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων πάνω στο δοκίμιο *s3pals1_3* για καταγραφή αξονικών και διαμετρικών τροπών και εξοπλισμός εγκατάστασής τους πάνω στο δοκίμιο.



Εικόνα 55: Εισαγωγή του δοκιμίου s3pals1_3 με τα εγκατεστημένα ηλκετρικά μηκυνσιόμετρα εντός του τριαξονικού κελιού.



Εικόνα 56: Εξαγωγή του δοκιμίου s3pals1_3 Εικόνα 57: Ολοκληρωμένη εγκατάσταση της από το τριαξονικό κελί με τη βοήθεια του τριαξονικής πειραματικής διάταξη του δοκιμίου μηχανικού εξολκέα. s3pals1_3 εντός του τριαξονικού κελιού με



Εικόνα 57: Ολοκληρωμένη εγκατάσταση της τριαξονικής πειραματικής διάταξη του δοκιμίου s3pals1_3 εντός του τριαζονικού κελιού με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα, μορφοτροπείς βράχυνσης και αισθητήρες ακουστικής εκπομπής εγκατεστημένους πάνω στο δοκίμιο.







Σχήμα 229: Διάγραμμα τάσης – τροπής του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 230: Διάγραμμα τάσης – τροπής που καταγράφει το μηκυνσιόμετρο του καναλιού 8 του δοκιμίου *s5spats1_2*. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπήρξε παύση και επαναλειτουργία του λόγω τοπικής ρωγμάτωσης.



Σχήμα 231: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο s5spats1_2



Σχήμα 232: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πρώτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 233: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 234: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2


Σχήμα 235: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 236: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πέμπτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 237: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έκτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 238: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έβδομο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 239: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το όγδοο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Σχήμα 240: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το ένατο στάδιο φόρτισης 171 της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5spats1_2



Εικόνα 58: Φωτογραφία του δοκιμίου s5spats1_2 πριν τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης.



Εικόνα 60: Ολοκληρωμένη εγκατάσταση τριαξονικής της πειραματικής διάταξη του δοκιμίου s5spats1_2 εντός του τριαξονικού κελιού με 3 ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα, 3 μορφοτροπείς βράχυνσης και 8 αισθητήρες ακουστικής εκπομπής εγκατεστημένους πάνω στο δοκίμιο.



Εικόνα 59: Διάταξη αξονικών και διαμετρικών ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων πάνω στο δοκίμιο s5spats1_2



Εικόνα 61: Φωτογραφία του δοκιμίου s5spats1_2 μετά τη τριαξονική δοκιμή όπου αποτυπώνεται το επίπεδο και η κλίση της διατμητικής αστοχίας. Η ακτινική ρωγμάτωση είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της αποφόρτισης και της εξόλκευσης του δοκιμίου από το τριαξονικό κελί.



Σχήμα 241: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο *s5rafs2_1*)



Σχήμα 242: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 243: Διάγραμμα τάσης - τροπής του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 244: Διάγραμμα τάσης - τροπής που καταγράφουν τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα των καναλιών 6,8 πάνω στο δοκίμιο s5rafs2_1



Σχήμα 245: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο s5rafs2_1



Σχήμα 246: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πρώτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 247: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 248: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της 176 κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 249: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Εικόνα 62,63: Φωτογραφία του δοκιμίου s5rafs2_1 και της διάταξης των ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων πριν τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης



Εικόνα 64: Φωτογραφία του δοκιμίου s5rafs2_1 εντός της ελαστικής μεμβράνης μετά τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης. Η κλασική περίπτωση της κατάκλασης.



Σχήμα 250: Διάγραμμα κυρίων τάσεων και διάγραμμα διατμητικών – ορθών τάσεων με την περιβάλλουσα αστοχίας κατά Mohr – Coulomb (μπλέ γραμμή) και κατά Hoek & Brown (κόκκινη γραμμή). Αποτυπώνονται και οι παράμετροι αστοχίας σύμφωνα με τα δύο κριτήρια. (Δοκίμιο s6paians3_2)



Σχήμα 251: Διάγραμμα φορτίου – βράχυνσης του δοκιμίου s6paians3_2



Σχήμα 252: Διάγραμμα τάσης - τροπής του δοκιμίου s6paians3_2



Σχήμα 253: Διάγραμμα τάσης – τροπής (από όπου υπολογίζεται ο λόγος Poisson) που καταγράφουν τα αξονικά και διαμετρικά μηκυνσιόμετρα έως τη στιγμή της αστοχίας τους (δοκίμιο *s6paians3_2*)



Σχήμα 254: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δοκίμιο s6paians3_2



Σχήμα 255: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πρώτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 256: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 257: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 258: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 259: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το πέμπτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 260: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έκτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 261: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το 'εβδομο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1







Σχήμα 263: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το έννατο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 264: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δέκατο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 265: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το ενδέκατο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 266: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δωδέκατο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Σχήμα 267: Διάγραμμα παραμετρικής εισόδου (τάσης), σημάτων ακουστικής εκπομπής και της κυματομορφής της παραμέτρου b – value συναρτήσει του χρόνου για το δέκατο -τρίτο στάδιο φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής πολλαπλής αστοχίας του δοκιμίου s5rafs2_1



Εικόνα 65: Φωτογραφία του δοκιμίου s6paians3_2 με τα προσαρμοσμένα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα



Εικόνα 66: Φωτογραφία του δοκιμίου s6paians3_2 και του τρόπου και επιπέδου της αστοχίας σε διάτμηση. Η ακτινική ρωγμάτωση οφείλεται ενδεχομένως σε μηχανισμούς αστοχίας κατά την αποφόρτιση, λόγω της επίδρασης της πλευρικής πίεσης αλλά και στην εξόλκευση του δοκιμίου

Κεφάλαιο 12: Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τη θεωρητική και πειραματική προσέγγιση των εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης με εφαρμογή της τεχνικής της Ακουστικής Εκπομπής προκύπτουν τα ακόλουθα χρήσιμα συμπεράσματα:

- Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου δίνουν μεγαλύτερες τιμές μέγιστης αντοχής των δοκιμίων, συγκριτικά με τις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης. Από τις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης τις μεγαλύτερες τιμές κορυφαίας αντοχής έδωσαν οι δοκιμές με το μεγαλύτερο ρυθμό φόρτισης.
- Στα διαγράμματα τάσης τροπής, η συμπεριφορά των δοκιμίων σκυροδέματος περιγράφεται μόνο από τον ανοδικό κλάδο της καμπύλης που καταλήγει σε ψαθυρή απώλεια της φέρουσας ικανότητας. Οι γραμμικές-ελαστικές περιοχές των διαγραμμάτων όλων των δοκιμών (με έλεγχο φορτίου και με έλεγχο παραμόρφωσης) βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών επιβαλλόμενης τάσης.
- Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος που καταπονήθηκαν σε τριαξονική θλίψη, προκύπτει ότι η καταπόνηση σε τριαξονική θλίψη πολλαπλής αστοχίας επιφέρει σημαντική απώλεια του μέτρου ελαστικότητάς των δοκιμίων. Επιπλέον επιφέρει μία λιγότερο αισθητή απώλεια της αντοχής τους.
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών πολλαπλής αστοχίας και των μεμονωμένων δοκιμών έδειξαν πολύ καλή αξιοπιστία και συσχέτιση μεταξύ των περιβαλλουσών αστοχίας που προκύπτουν από τις διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας σε ένα δοκίμιο σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν από μεμονωμένες δοκιμές. Από τα αποτελέσματα των μεμονωμένων δοκιμών, προκύπτει πως ενδέχεται να παρουσιαστούν μεταβλητότητες αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή μεμονωμένων δοκιμών, οι οποίες οφείλονται στην ανομοιογένεια των δοκιμίων, η οποία αποτυπώνεται στις τιμές της κορυφαίας αντοχής τους. Επομένως, μέσω των τριαξονικών δοκιμών πολλαπλής αστοχίας ήταν δυνατό να αποδείξουμε ότι η πειραματική διαδικασία τριαξονικής δοκιμής με διαδοχικές καταστάσεις αστοχίας αλλά και τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων αστοχίας (φ,c).
- Με τη βοήθεια της δοκιμής τριαξονικής θλίψης πολλαπλής αστοχίας και των διαγραμμάτων αξονικής τάσης συναρτήσει χρόνου και των γεγονότων ακουστικής εκπομπής είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε τη μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη

κατάσταση και να υπολογίσουμε την τιμή της πλευρικής πίεσης στην οποία λαμβάνει χώρα η μετάβαση αυτή (όριο μετάβασης ψαθυρής - όλκιμης κατάστασης).

- Καθ' όλη τη διάρκεια των τριαξονικών δοκιμών παρατηρήθηκε η επίδραση της πλευρικής πίεσης στη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων πετρωμάτων και σε παραμέτρους όπως στην κορυφαία αντοχή των πετρωμάτων, στην ογκομετρική τροπή, στη διασταλτικότητα και στη μετάβαση από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση.
- Καθώς η συνολική παραμόρφωση καταγράφεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, απαιτούνται κατάλληλες ρυθμίσεις της παραμόρφωσης του οργάνου, που περιλαμβάνει τη βράχυνση των πλακών και εμβόλων φόρτισης της τριαξονικής δοκιμής. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή εντός του οργάνου ενός κυλίνδρου από χάλυβα ή αλουμίνιο με αποδεδειγμένες ελαστικές ιδιότητες και με τη παρακολούθηση των διαφορών παραμόρφωσης μεταξύ της συναρμολόγησης και του κυλίνδρου από χάλύβα ή αλουμίνιο κατά τη διάρκεια του εύρους φόρτισης. Η παραμόρφωση του οργάνου αφαιρείται στη συνέχεια από τη συνολική παραμόρφωση σε κάθε αύξηση του φορτίου προκειμένου να αναχθεί από τη παραμόρφωση του δοκιμίου από την οποία υπολογίζεται η αξονική τροπή του δοκιμίου.
- Στις τριαξονικές δοκιμές πετρωμάτων λόγω τεχνικών περιορισμών που συνδέονται με τη φύση της κόλλησης των ηλεκτρικών μηκυνσιόμετρων, την κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου πάνω στην οποία είναι συγκολλημένα τα strain gauges, και άλλες παραμέτρους όπως η επίδραση της πλευρικής πίεσης, η λειτουργία των μηκυνσιόμετρων δεν είναι η αναμενόμενη από άποψη αποτελεσμάτων καταγραφόμενων τροπών.

Συμπεράσματα επί της μεθόδου ακουστικής εκπομπής στις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης

 Απο την καταγραφή της ακουστικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης αλλά και τριαξονικής θλίψης παρατηρήθηκε ότι η ΑΕ αυξάνεται με το επιβαλλόμενο φορτίο και μάλιστα καθώς επέρχεται η μακροσκοπική ρωγμάτωση τη στιγμή λίγο πριν την απόκτηση της κορυφαίας αντοχής, η αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας είναι ραγδαία. Επιπλέον η ακουστική δραστηριότητα συνεχίζει να αυξάνεται και μετά την εκδήλωση της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης, εξαιτίας της διάδοσης των ρωγμών και της κατάρρευσης της μικροσκοπικής δομής του δοκιμίου. Άρχικά παρατηρείται μικρός και ομαλός ρυθμός ακουστικής δραστηριότητας που εν συνεχεία όσο αυξάνεται το φορτίο παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας. Όταν η κορυφαία αντοχή του υλικού επιτευχθεί, μια μακροσκοπική ρωγμή σχηματίζεται και μια σχετικά μεγάλη κάθετη μετακίνηση παρατηρείται. Εκείνη τη στιγμή ένας πολύ μεγάλος αριθμός γεγονότων ΑΕ καταγράφεται. Η ραγδαία αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας υποδηλώνεται από την απότομη αλλαγή κλίσης της αντίστοιχης καμπύλης. Στη συνέχεια καθώς η φόρτιση συνεχίζεται, η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου. Στο στάδιο αυτό, ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι γενικά μικρότερος του προηγούμενου σταδίου με φθίνουσα τάση, κυρίως επειδή το μεγαλύτερο μέρος της διατομής έχει διαρρηχθεί.

- Η ακουστική δραστηριότητα που καταγράφεται σε διαφορετικά στάδια φόρτισης και άρα ρωγμάτωσης, παρουσιάζει και διακριτά χαρακτηριστικά. Πριν από τη κύρια ρωγμή κάθε χτύπος ΑΕ προέρχεται από μικρά γεγονότα αρχικών μικρορωγμών. Οι μικρορωγμές αυτές συμβαίνουν λόγω των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται παράλληλα με τον άξονα του δοκιμίου.
- Κατά το στάδιο σχηματισμού της κύριας ρωγμής, που είναι μικρότερο σε διάρκεια, ένα αρκετά υψηλό ποσοστό εισερχόμενων σημάτων καταγράφεται. Εκείνη τη στιγμή, τα γεγονότα ΑΕ είναι πιο συχνά και πολύ πιο ισχυρά, η ρωγμή πλέον είναι ορατή και συνοδεύεται από αρκετές γειτονικές ρωγμές. Αυτά τα γεγονότα παραπέμπουν και σε διατμητικό τρόπο θραύσης ενδεχομένως εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των θραυσμένων τμημάτων του δοκιμίου και των κόκκων.
- Από τα διάγραμμα των τιμών της παραμέτρου b-value συναρτήσει του χρόνου και της επιβαλλόμενης αξονικής τάσης στις δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης παρατηρείται αυξανόμενη τάση των τιμών b-value. Στη συνέχεια παρατηρείται μία εμφανής πτώση της τιμής b-value, η οποία αντιστοιχεί στην εμφάνιση επιταχυνόμενης ακουστικής δραστηριότητας και την εκδήλωση της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης. Συνεπώς είναι φανερό το πώς συνδέεται η πτώση της παραμέτρου «b value» συναρτήσει του φορτίου που επιβάλλεται, με την εκδήλωση σημαντικού ποσοστού ακουστικής δραστηριότητας και εκδήλωσης της μακροσκοπικής αστοχίας.
- Η μείωση της παραμέτρου b-value μπορεί να ερμηνευτεί ως μια διαδοχική συσσώρευση ακουστικών γεγονότων που οφείλεται στην έναρξη και αξονική διάδοση της ρωγμής. Συγκεκριμένα στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης από τη χρονική εξέλιξη της παραμέτρου «b value» παρατηρείται μια απότομη μείωση της τιμής b-value για όλα τα δοκίμια πετρωμάτων, η οποία συμβαίνει νωρίτερα από το μέγιστο φορτίο δίνοντας μια προειδοποίηση πριν την έναρξη της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης. Αυτή η πτώση αποδίδεται σε μικρορωγμές που δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το καθολικό ποσοστό

γεγονότων αλλά έχουν επιρροή στην κατανομή του πλάτους των γεγονότων. Συνεπώς η παράμετρος «b value» ενεργεί ως μια έγκαιρη προειδοποίηση για την εκδήλωση μακροσκοπικής αστοχίας. Όμως εκτός της ανωτέρω διαπίστωσης παρατηρείται ότι η μικρότερη τιμή της καμπύλης b-value παρατηρείται τη στιγμή της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης. Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι η ξαφνική πτώση της τιμής b-value θα ήταν δυνατό να υποδείξει την επερχόμενη αστοχία, με την μικρότερη τιμή της να μπορεί να συσχετισθεί με την σοβαρότητα της κατάστασης του υλικού που βρίσκεται κοντά στους αισθητήρες.

Συμπεράσματα επί των διαγραμμάτων ακουστικής εκπομπής στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

- Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρατίθενται για κάθε δοκίμιο χωριστά, προκύπτει ότι ανάλογα με το κατώφλι που επιλέγουμε αλλάζει και η πυκνότητα καταγραφής γεγονότων ακουστικής εκπομπής.
- Στις δοκιμές με έλεγχο φορτίου όπου το κατώφλι επιλέγεται ίσο με 45 dB, η δραστηριότητα ΑΕ ξεκινά από χαμηλές τιμές τάσης οι οποίες αντιστοιχούν στη χρονική διάρκεια του πατήματος της πλάκας φόρτισης πάνω στις βάσεις του δοκιμίου, στην οποία συντελεί δυσμενώς η ανομοιογένεια της επιπεδότητας και της ομαλότητας της επιφάνειας των βάσεων. Έπειτα, ο ρυθμός έκλυσης ακουστικής δραστηριότητας αυξάνεται σχεδόν γραμμικά έως το 90 % του φορτίου αστοχίας ενώ τη στιγμή που επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή, παρατηρούμε απότομη αύξηση των γεγονότων ακουστικής δραστηριότητας (μετά το 95 % του μέγιστου φορτίου). Η καταγραφή της δραστηριότητας ΑΕ βοήθησε στην πρόγνωση σχετικά με την επερχόμενη αστοχία. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε τεμάχια με τα επίπεδα διαχωρισμού τους παράλληλα προς την διεύθυνση φόρτισης (axial split). Στο διάγραμμα του b-value μπορούμε να διακρίνουμε λίγο πριν την αστοχία μια αύξηση της τιμής που ακολουθείται από μια ραγδαία μείωση. Άρα μια τέτοια ένδειξη στο διάγραμμα θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη της επερχόμενης αστοχίας του δοκιμίου.
- Στις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης που ορίσαμε μικρότερη τιμή κατωφλιού (35 dB), παρατηρούμε παρόμοια αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής τη στιγμή του πατήματος της πλάκας. Στη συνέχεια παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής η οποία δείχνει να συμβαδίζει με τη γραμμική περιοχή του διαγράμματος τάσης χρόνου και παρουσιάζει κατά τόπους διαδοχικές

αυξήσεις. Σε τρεις δοκιμές προέκυψαν προβλήματα λόγω μη λειτουργίας ενός συγκεκριμένου καναλιού αξονικής βράχυνσης που καταγράφει ο μορφοτροπέας – LVDT. Οι δοκιμές αυτές σταμάτησαν και επαναλήφθηκαν με όλα τα κανάλια σε λειτουργία. Στην επαναφόρτιση ο ρυθμός έκλυσης γεγονότων ΑΕ δεν παρουσιάζει καμία προειδοποίηση, ξεκινά μεν από χαμηλές τιμές τάσεις και αλλάζει διαρκώς εντός της γραμμικής περιοχής που αναφέρουμε παραπάνω και λίγο πριν την αστοχία παρουσιάζει μία μικρή αύξηση συγκριτικά με τις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης. Η μικρή αύξηση της έκλυσης γεγονότων ΑΕ υποδεικνύει την ολίσθηση, ρωγμάτωση κάποιου επιπέδου ασυνέχειας εντός του δοκιμίου.

 Συνεπώς, από τα διαγράμματα της τάσης συναρτήσει του χρόνου και των γεγονότων ακουστικής εκπομπής μπορούμε να διακρίνουμε τα διάφορα στάδια της διαδρομής φόρτισης κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με έλεγχο φορτίου και με έλεγχο παραμόρφωσης.

Συμπεράσματα επί των διαγραμμάτων ακουστικής εκπομπής στις δοκιμές τριαξονικής θλίψης

- Κατά το στάδιο Ι της διαδρομής φόρτισης, παρατηρούμε ραγδαία έκλυση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής, η οποία οφείλεται στο κλείσιμο των πόρων και των μικρορωγμών αλλά και στη θραύση τυχόν μικρών ανωμαλιών της επιφάνειας των δοκιμίων πετρωμάτων. Ακολουθεί το στάδιο ΙΙ, όπου η μη ελαστική παραμόρφωση εντός του δοκιμίου σχεδόν απουσιάζει. Η συχνότητα των ακουστικών γεγονότων είναι μικρή καθώς αυτά συμβαίνουν σποραδικά, όπως αποτυπώνεται από τις διαδοχικές κατά τόπους αυξήσεις στο διάγραμμα γεγονότων ΑΕ χρόνου. Το στάδιο της ελαστικής συμπεριφοράς απόκρισης του δοκιμίου διαρκεί έως το 65% του επιβαλλόμενου φορτίου και συνοδεύεται από περιορισμένο αριθμό γεγονότων ακουστικής εκπομπής. Συνεπώς τα στάδια Ι και ΙΙ, που ανταποκρίνονται στην άρρηκτη φάση του δοκιμίου, καταλαμβάνουν έως το 65% της διαδρομής φόρτισης.
- Η έναρξη του σταδίου της ευσταθούς κατακλαστικής φάσης (Στάδιο ΙΙΙ) συνοδεύεται από αύξηση του ρυθμού έκλυσης ΑΕ, καθώς η ΑΕ του δοκιμίου αυξάνεται αξιοσημείωτα με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Το στάδιο αυτό διαρκεί περίπου έως το 95 % του φορτίου αστοχίας. Στο στάδιο της κατακλαστικής ασταθούς φάσης πριν τη θραύση του δοκιμίου (Στάδιο ΙV) σημειώνεται μία ραγδαία αύξηση της εκλυόμενης ακουστικής δραστηριότητας. Το στάδιο αυτό καταλαμβάνει μόλις το 5

% της συνολικής διαδρομής φόρτισης και αποτυπώνεται στο διάγραμμα από την απότομη αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής στις δοκιμές με έλεγχο φορτίου και την μικρότερη αύξηση στις δοκιμές με έλεγχο παραμόρφωσης.

Επιπλέον όπως παρατηρούμε από τα σχετικά διαγράμματα των δοκιμίων πετρωμάτων, σε κάθε στάδιο φόρτισης (κύκλος φόρτισης με αύξηση της πλευρικής πίεσης) εκδηλώνεται απότομη αύξηση των γεγονότων ακουστικής εκπομπής τη στιγμή της κορυφαίας αντοχής με ταυτόχρονη μείωση της παραμέτρου b-value. Ωστόσο στην ψαθυρή περιοχή των διαγραμμάτων (πριν το όριο μετάβασης), η απότομη αύξηση του ρυθμού ακουστικής εκπομπής παρατηρείται λίγο μετά την αύξηση της πλευρικής πίεσης της τιμής της πλευρικής πίεσης.

Ακόμη, όπως αποτυπώνεται από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα τάσης, γεγονότων ακουστικής εκπομπής και διακύμανσης της παραμέτρου b-value συναρτήσει του χρόνου, η παράμετρος b-value εκδηλώνει μία αρχική αυξητική τάση με την έναρξη της δοκιμής τριαξονικής θλίψης, η οποία αντιστρέφεται και αποκτά πτωτική τάση στους πρώτους κύκλους φόρτισης και έως το όριο της μετάβασης από στην ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση ενώ αμέσως μετά το όριο αυτό η τάση της διακύμανσης της παραμέτρου αντιστρέφεται δηλαδή παρουσιάζει αυξητική τάση έως την ολοκλήρωση της δοκιμής με την αποφόρτιση του δοκιμίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αγιουτάντης Ζ.Γ, « Στοιχεία Γεωμηχανικής Μηχανική Πετρωμάτων », Εκδόσεις Ιων, 2010
- Κατσικογιάννη Π., Νομικός Π.Π., Σοφιανός Α.Ι., « Η Τεχνική της Ακουστικής Εκπομπής στην Μηχανική Πετρωμάτων », Φεβρουάριος 2007.
- Κυπριωτάκη Α., « Εργαστηριακές Εφαρμογές Ακουστικής Εκπομπής σε δοκίμια Άοπλου και Ινοπλισμένου Σκυροδέματος », Οκτώβριος 2012
- Κωτσοβός Μ.Δ., « Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με τη μέθοδο της τροχιάς της θλιπτικής δύναμης », Εκδοσεις Συμεών, Αθήνα 2009
- Νομικός Π.Π, Σοφιανός Α.Ι., « Μηχανική των Πετρωμάτων Σημειώσεις Διαλέξεων », Αθήνα 2011
- Νομικός Π.Π, Σοφιανός Α.Ι., « Σημειώσεις Προχωρημένης Μηχανικής Πετρωμάτων»,
 Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων, Αθήνα Οκτώβριος 2008
- Berlee James D., « Brittle Ductile Transition in Rocks», Journal of Geophysical Research, July 1968
- Blumel M., «Comparison of single and multiple failure triaxial tests», Graz University of Technology, Austria 2010
- Eberhardt Erik, «The Hoek Brown Failure Criterion», ISRM Suggested Method, Springer, July 2012
- Elliott Gordon M., « Triaxial Testing for Rock Strength», Golder Associates Inc. Atlanta, USA
- Holt R.M., Jaer E.F., «Validity of Multiple Failure State triaxial tests in sandstones», Continental Shelf and Petroleum Technology Research Institute, Trondheim, Norway
- Kotsovos M.D. & Pavlovic M.N. « Structural Concrete Finite element analysis for limit-state design », London, 1995
- Labuz Joseph F., Zang Arno, «Mohr Coulomb Failure Criterion», ISRM Suggested Method, Springer, July 2012
- Mogi Kiyoo, « Experimental Rock Mechanics », Geomechanics Research Series 3,2007
- Nomikos P.P., Katsikogianni P., Sakkas K.M. & Sofianos A.I., 2010. «Acoustic emission during flexural loading of two Greek marbles», Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering, EUROCK 2010, EPFL, Lausanne, Switzerland, June 15-18, CRC Press, pp 95-98.

- Nomikos P.P., Sakkas K.M. & Sofianos A.I., 2011. «Acoustic emission of Dionysos marble specimens in uniaxial compression», SINOROCK 2011.
- Ohtsu Masayasu, Grosse Christian U., « Acoustic Emission Testing Basics for Research – Applications in Civil Engineering », Springer, April 2008
- Parry R.H.G., « Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics», 2004
- Peng R.D., Ju Y., Mao L.T., Liu H.B. & Wang P., « Damage detection of rocks under conventional triaxial compression», 2014
- Peterson Mervyn S., Teng fong Wong, « Experimental Rock Deformation The Brittle Field », Springer, 2004
- Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version, ISRM Suggested Methods for Triaxial compression Testing, May 1983
- Vutukuri V.S., Lama R.D., Saluja S.S., «Handbook on Mechanical Properties of Rocks Volume I», Trans Tech Publications
- Wawersik Wolfgang R., « Indirect Deformation (Strain) Measurements and Calibrations in Sandia Triaxial Apparatus for Rock Testing to 250°C»
- http://tunnelling.metal.ntua.gr