Εθνικό Μετσοβιο Πολυτεχνείο
Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Μηχανικα Χαρακτηριστικα & Γεωτεχνικη Συμπεριφορα Ετερογενους Βραχομαζας

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΤΖΙΑΛΛΑΣ
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ
Αν. Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π

Αθήνα, 2010.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ	Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Γεωτεχνική Συμπεριφορά Ετερογενούς Βραχόμαζας
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Γεώργιος Π. Τζιάλλας Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Γεώργιος Κ. Τσιαμπάος Αν. Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ:	2009 - 2010

Φωτογραφία εξωφύλλου:

Michael Anderson

Antelope Canyon #1

Αθήνα, 2010

Η εργασία αυτή αφιερώνεται

πρώτα στην οικογένεια μου
στους οποίους δηλωσταίω ότι έχω καταφέρει μέχρι τώρα
αλλά δεν πρόκειται ποτέ να το παραδεχθούν...

αλλά και σε όλους αυτούς
που με ανέχτηκαν την περίοδο
που το άγχος και η κούραση
με έκαναν απόβλητο...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Γεώργιο Τσιαμπάο, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και επέλεξε να συνεχίσουμε τη συνεργασία μας και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Χωρίς την καθοδήγηση και την βοήθεια του, η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε σε καμία περίπτωση να πραγματοποιηθεί. Ευχαριστώ τον Δρ. Γ. Τσιαμπάο για τη φροντίδα που έδειξε κατά την διενέργεια των εργαστηριακών δοκιμών, τη συνεχή παρουσία του στο εργαστήριο και τη υπόδειξη μεθόδων και λύσεων από τη μακρά εμπειρία του στο τομέα αυτό. Τέλος θέλω να τον ευχαριστήσω για το γεγονός ότι ήταν πάντα παρόντας και διαθέσιμος.

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Χάρη Σαρόγλου, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθειά του στη παροχή του υλικού των δοκιμών, στην διάτρηση των δοκιμίων, στη χρήση των συσκευών και οργάνων και τη γενική οργάνωση της εργασίας στο εργαστήριο. Επίσης τον ευχαριστώ θερμά για τις υποδείξεις και τις ιδέες του πάνω στο αναλυτικό τμήμα της παρούσας εργασίας, τις διορθώσεις του και πάνω απ' όλα την προθυμία και τη στήριξή του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ τους εργαζόμενους στο εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας, για τη βοήθεια τους στη συλλογή και επιλογή των δειγμάτων του πετρώματος, την προθυμία τους και τον χρόνο που αφιέρωσαν παρά το πιεστικό τους πρόγραμμα.

Ευχαριστώ θερμά, τον κ. Αργύρη Τζούμα, Μεταλλειολόγο Μηχανικό, υπεύθυνο κατασκευής της σήραγγας Δερβενίου, που όχι μόνο με βοήθησε να συλλέξω και να μεταφέρω δοκίμια μάργας αλλά αφιέρωσε και χρόνο από την εργασία του στο να μου προσφέρει πολύτιμη εμπειρία σε κατασκευαστικά και εργοταξιακά θέματα σηράγγων.

Ευχαριστώ τον κ. Κώστα Σκουρλή, Γεωλόγο στη σήραγγα Μελισσίων, για την βοήθεια του στη συλλογή δοκιμίων μάργας από την ευρύτερη περιοχή του έργου.

Ευχαριστώ τέλος το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) για την οικονομική ενίσχυση μέσω της υποτροφίας που μου δόθηκε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....13

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....14

ABSTRACT.....15

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 17

1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....17

1.2. ΨΑΜΜΙΤΗΣ – ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ – ΦΛΥΣΧΗΣ 22

1.3. ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ – ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....26

1.4. ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK & BROWN ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ GSI ΓΙΑ ΤΟΝ ΦΛΥΣΧΗ 28

1.4.1. Κριτήριο Hoek & Brown.....28

1.4.2. Δείκτης GSI 31

1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....34

ΜΕΡΟΣ 1^{Ο} – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ 37

2. ΓΕΩΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....39

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ.....39

2.1.1. Η περιοχή της Καλυδώνας 39

2.1.1.1. Η αρχαία Καλυδώνα 39

2.1.1.2. Γενικά Γεωμορφολογικά και Γεωλογικά Στοιχεία της περιοχής 41

2.1.2. Σήραγγα Καλυδώνας.....45

2.1.3. Φωτογραφικό υλικό από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας και της ευρύτερης περιοχής.....48

2.2. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....51

2.2.1. Ψαμμίτης 51

2.2.2. Ιλυόλιθος 53

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ 55

3.1. ΓΕΝΙΚΑ - ΣΚΟΠΟΣ 55

3.2. ΠΕΡΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ 58

3.2.1. Δειγματοληψία-Προετοιμασία Δοκιμίων 58
3.2.2. Προετοιμασία – Επεξεργασία δοκιμίων 60
3.2.3. Απαιτούμενος Αριθμός Δοκιμίων 62
3.2.1. Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής.....64
3.2.1.1. Γενικά.....64
3.2.1.2. Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας δειγμάτων πετρώματος 64
3.2.1.3. Προσδιορισμός των δυναμικών παραμέτρων – Δοκιμή διάδοσης υπέρηχων κυμάτων.....66
3.2.1.4. Προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη 68
3.2.1.5. Προσδιορισμός Μέτρου ελαστικότητας Young 73

3.3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ 82

3.4. ΜΕΤΑΦΟΡΑ, ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 87

3.4.1. Επιλογή και μεταφορά δειγμάτων πετρώματος στο εργαστήριο 87
3.4.2. Διάτρηση πυρήνων ψαμμίτη και ιλυολίθου 87
3.4.2.1. Διάτρηση Ψαμμίτη.....88
3.4.2.2. Διάτρηση Ιλυολίθου.....89
3.4.3. Κοπή των εδρών των δοκιμίων ψαμμίτη και ιλυολίθου.....89
3.4.4. Λείανση των δοκιμίων ψαμμίτη και ιλυολίθου.....92
3.4.5. Μόρφωση σύνθετου δοκιμίου 94
3.4.6. Χρήση συγκολλητικής ύλης 94

3.5. ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ 96

3.5.1. Δοκιμές βραχομηχανικής που πραγματοποιήθηκαν.....96
3.5.2. Περιγραφή διαδικασίας εκτέλεσης των δοκιμών 96
3.5.2.1. Προσδιορισμός ειδικού βάρους - πυκνότητας 96
3.5.2.2. Δοκιμή προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων 97
3.5.2.3. Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη - Μέτρηση μέτρου ελαστικότητας Young – Καταγραφή της θραύσης με κάμερα υψηλής ταχύτητας 98

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ 103

4.1. ΠΛΗΘΟΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 103

4.1.1. Πλήθος δοκιμίων 103
4.1.2. Κωδικοποίηση δοκιμίων.....104

4.2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ 105

4.2.1. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων.....105
4.2.2. Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίων 108

4.2.3. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young. 114

4.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ 119

4.3.1. Συσχέτιση δυναμικών παραμέτρων 119

4.3.2. Συσχέτιση δυναμικών παραμέτρων με το ποσοστό ιλυολίθου 120

4.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ 123

4.4.1. Συσχέτιση Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη με το Ποσοστό Ιλυολίθου 123

4.4.2. Παρατηρήσεις – Σχολιασμός 125

4.4.3. Διερεύνηση τρόπου και διάδοσης της θραύσης στα σύνθετα δοκίμια 129

4.4.3.1. Επιρροή Mag;aloδιεπιφανειών των δίσκων διαφορετικών πετρωμάτων των δοκιμίων 130

4.4.3.2. Επιρροή πάχους ιλυολιθικής στρώσης 131

4.4.3.3. Επιρροή του λόγου Poisson 132

4.4.4. Σύγκριση με προηγούμενες έρευνες 133

4.4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων με τις συστάσεις του δείκτη GSI για τον φλύσχη 134

4.4.5.1. Συγκριτική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής της βραχόμαζας σ_{cm} 136

4.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG 140

4.5.1. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με το ποσοστό ιλυολίθου 140

4.5.2. Παρατηρήσεις – Σχολιασμός 142

ΜΕΡΟΣ 2^{O} – ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 145

5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΕΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 147

5.1. ΓΕΝΙΚΑ - ΣΚΟΠΟΣ 147

5.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΑΡΧΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ 149

5.2.1. Ετερογενές Προσομοίωμα 150

5.2.2. Ομοιογενές Προσομοίωμα 153

5.3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG 155

5.3.1. Αναλύσεις για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου διατηρώντας σταθερό τον δείκτη GSi 157

5.3.1.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων....157
5.3.1.2. Αποτελέσματα αναλύσεων....162
5.3.1.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα....164
5.3.1.3.1. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής....166
5.3.1.3.2. Κατανομή οριζόντιων και κατακόρυφων παραμορφώσεων....166
5.3.1.3.3. Κατανομές κυρίων τάσεων....168
5.3.1.3.4. Μορφή πλαστικής ζώνης....171
5.3.2. Μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας....174
5.3.2.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων....177
5.3.2.2. Αποτελέσματα αναλύσεων....178
5.3.2.3. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα....180
5.3.3. Αναλύσεις για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου με μεταβλητό τον δείκτη GSi....183
5.3.3.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων....184
5.3.3.2. Αποτελέσματα Αναλύσεων....186
5.3.3.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα....188
5.3.4. Σύγκριση κατανομής μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της βιβλιογραφίας....190
5.3.4.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων....192
5.3.4.2. Αποτελέσματα Αναλύσεων....193
5.3.4.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα....195
5.3.4.3.1. Σύγκριση εύρους πλαστικής ζώνης....196

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ....199

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ....207

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ....213

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ....218

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ....221

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Βραχομηχανικής

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Φύλλα Εργαστηριακών Δοκιμών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ– Ενδεικτική Παρουσίαση Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων για ποσοστό ιλυολίθου 30%

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Γεωτεχνική Συμπεριφορά Ετερογενούς Βραχόμαζας» μου ανατέθηκε τον Σεπτέμβριο του 2009 και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2010. Η εργασία διενεργήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές με τεχνητά ετερογενή δοκίμια που αποτελούνταν από ψαμμίτη και ιλυόλιθο της περιοχής της σήραγγας Καλυδώνας. Σκοπός των δοκιμών ήταν η διερεύνηση των μηχανικών παραμέτρων και της συμπεριφοράς των ετερογενών βραχομαζών και κυρίως του φλύσχη καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων με προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο των πεπερασμένων στοιχείων όπου με ένα πλήθος αναλύσεων επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ετερογενούς βραχόμαζας κατά τη κατασκευή υπογείων έργων καθώς και να επαληθευτούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.

Η εργασία αυτή προσέφερε στον γράφοντα πολύτιμη εμπειρία στη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής, στην ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και γενικά, μια συνολική και ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των γεωυλικών κατά τον σχεδιασμό υπογείων έργων. Η εμπειρία αυτή σε συνδυασμό με τις υψηλού επιπέδου γνώσεις που αποκτήθηκαν από το διδακτικό μέρος του μεταπτυχιακού προγράμματος, θεωρείται από τον γράφοντα ότι του παρείχαν τα απαραίτητα εφόδια για τη μετέπειτα σταδιοδρομία του ως Μηχανικού.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: **Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Γεωτεχνική Συμπεριφορά Ετερογενούς Βραχόμαζας**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: **Γεώργιος Π. Τζιάλλας**
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Γεώργιος Κ. Τσιαμπάος**
Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ: **2009 - 2010**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η διερεύνηση των μηχανικών και δυναμικών παραμέτρων της ετερογενούς βραχόμαζας με εργαστηριακές μεθόδους αλλά και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ξεκινώντας παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία της εργασίας, δηλαδή οι βασικές έννοιες, τα υλικά, τα κριτήρια αστοχίας καθώς και οι πηγές από τη βιβλιογραφία που αναφέρονται στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Στο πρώτο μέρος του τεύχους, γίνεται παρουσίαση των εργαστηριακών δοκιμών. Πιο αναλυτικά, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των υλικών και της τοποθεσίας απ' όπου επιλέχθηκαν μαζί με φωτογραφικό υλικό από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας και της ευρύτερης περιοχής. Παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την διενέργεια των εργαστηριακών δοκιμών η οποία συνίσταται από τη σύνθεση τεχνητών ετερογενών δοκιμίων ψαμμίτη-ιλυολίθου, σε διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής για την προσομοίωση του σχηματισμού του φλύσχη. Περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι επεξεργασίας και μόρφωσης των δοκιμίων, η εργαστηριακή διαδικασία και ο εξοπλισμός.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 32 δοκιμές για τον προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων, 26 δοκιμές προσδιορισμού αντοχής σε μονοαξονική θλίψη καθώς και 14 δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, η στατιστική τους επεξεργασία και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση τους καθώς και σχολιασμός της ορθότητας τους. Ακόμα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες προτάσεις από τη βιβλιογραφία.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται μια πρώτη διερεύνηση για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της ετερογενούς βραχόμαζας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για ανυποστήρικτη κυκλική σήραγγα και σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν σε δύο διαφορετικά προσομοιώματα, ένα ετερογενές με οριζόντιες διαδοχικές στρώσεις ψαμμίτη-ιλυολίθου και σε ένα αντίστοιχο ομοιογενές με ιδιότητες που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες τιμές των πρωτογενών υλικών. Έγιναν αναλύσεις για διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών στη βραχομάζα, για διαφορετικές κατανομές του μέτρου ελαστικότητας και διαφορετικές τιμές του δείκτη GSI. Τέλος πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με προτεινόμενες μεθόδους από τη βιβλιογραφία.

ABSTRACT

POST-GRADUATE THESIS: **Mechanical Properties and Geotechnical Behaviour of Heterogeneous Rock Masses**

STUDENT: **George P. Tziallas**
Civil Engineer, N.T.U.A.

SUPERVISOR: **George K. Tsiambaos**
Associate Professor, School of Civil Engineering, N.T.U.A

ACADEMIC YEAR: **2009 - 2010**

The present post-graduate thesis concerns the investigation of the mechanical and dynamic properties as well as the geotechnical behavior of heterogeneous rock masses with the use of laboratory and finite element methods.

First of all, the general concepts of the thesis are presented, i.e. the fundamental principles, the materials, the failure criteria and the bibliographic references which concern the present study.

The first part of the thesis refers to the execution and results of the laboratory tests. The materials that were used are thoroughly described in chapter 2 as well as the location from where they were collected together with photos from the construction site of Kalydona tunnel. Thereafter, the laboratory method is presented which comprises the preparation and testing of composite specimens. The specimens were made up of superimposed disks of sandstone and siltstone material in different thickness ratios so as to simulate the flysch formation. The process of the formation of the specimens, the testing techniques and the laboratory equipment are presented in chapter 3.

32 tests for the determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants, 26 uniaxial compressive tests and 14 tests for determining the elasticity modulus were carried out in total.

The results of the laboratory tests and the statistical processing in addition to the conclusions and remarks that accrue from their analysis are presented in the following. Furthermore, a comparison was made with relative bibliographic references.

At the second part of the thesis, an approach is made for the determination of the deformation properties of the heterogeneous rock mass with the use of finite element method. Analyses were made for unsupported circular tunnel with comparative investigation of the convergences that occur in two different models, a heterogeneous model with successive horizontal sandstone-siltstone layers and a homogenous one with assigned properties that range between the ones of the primary materials. Analyses were carried out for different thickness ratios of the two materials, different Young modulus-siltstone percentage distributions as well as different GSI values. Finally, a contradistinction was made for the results of the present study and proposed methods from literature.

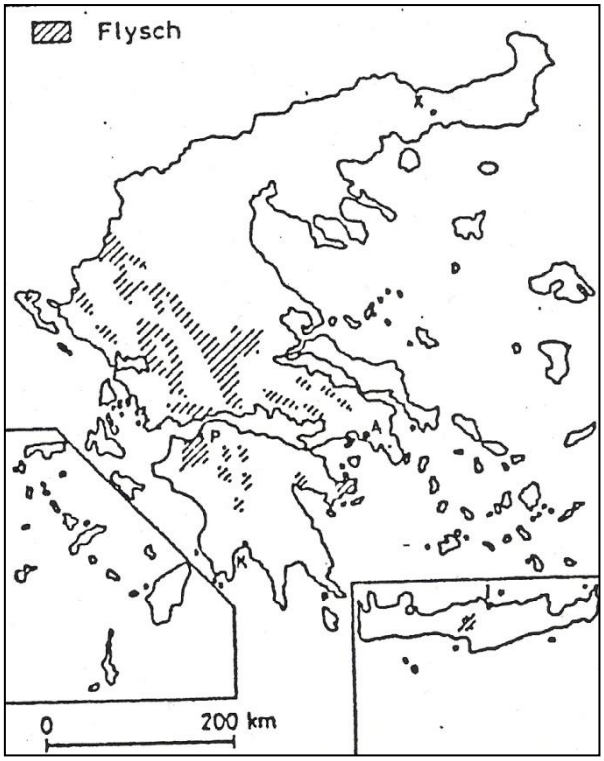
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ετερογενείς μπορούν να χαρακτηριστούν οι βραχόμαζες οι οποίες αποτελούνται από τουλάχιστον δύο υλικά με διαφορετικό πετρογραφικό τύπο.

Τέτοιες βραχόμαζες είναι συνήθως ιζηματογενούς προέλευσης και μπορεί να είναι ο φλύσχης και η μολάσσα που απαντώνται σε πολλά μέρη της Ελλάδος, ασβεστόλιθος με λεπτές ενδιαστρώσεις μάργας που εμφανίζεται κυρίως στην οροσειρά της Πίνδου, ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος κ.α.

Στη παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τον φλύσχη και πιο συγκεκριμένα με τις εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου.



Εικονα 1.1. Χάρτης Ελλάδος με αναφορά στις περιοχές που συναντάται ο σχηματισμός του φλύσχη

Πολλά έργα μηχανικού κατασκευάζονται σε ετερογενές περιβάλλον σε χώρες που ο φλύσχης αποτελεί έναν συνήθη γεωλογικό σχηματισμό. Ο σχεδιασμός των έργων όπως διάνοιξη σηράγγων ή εκσκαφή πρανών σε περιβάλλον φλύσχη απαιτεί επιπρόσθετη εμπειρία και πολύ καλή γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών από την πλευρά του μηχανικού.

Για τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας και το σωστό τελικό σχεδιασμό του τεχνικού έργου, απαιτείται ο προσδιορισμός των μηχανικών παραμέτρων αυτής. Από τις σημαντικότερες παραμέτρους που αφορούν το γεωτεχνικό μηχανικό είναι:

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) και
- Οι ελαστικές σταθερές του άρρηκτου πετρώματος όπως το μέτρο ελαστικότητας (E_i) και ο λόγος Poisson (v).
- Η κατάσταση της δομής της βραχόμαζας και των ασυνεχει΄ων αυτής μέσω του GSI

Όσον αφορά τις ετερογενείς βραχόμαζες, είναι πολύ δύσκολο να μορφωθούν δοκίμια άρρηκτου πετρώματος για τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων στο εργαστήριο. Συνήθως, το δείγμα θα περιέχει ασυνέχειες ή ατέλειες, καθώς και η ίδια η εγγενής ετερογένεια προκαλεί προβλήματα κατά την διενέργεια των δοκιμών.

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι, τελικά, να υποβαθμίζεται η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, εισάγοντας έτσι ασάφειες στο τελικό σχεδιασμό του τεχνικού έργου.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μια μέθοδος εργαστηριακών δοκιμών με την κατασκευή σύνθετων δοκιμίων έτσι ώστε να προσομοιωθεί η γενική συμπεριφορά ενός ετερογενούς άρρηκτου πετρώματος και να προσδιοριστούν οι μηχανικές και δυναμικές παράμετροι αυτού.

Η μέθοδος συνίσταται στην δημιουργία δοκιμίων άρρηκτου πετρώματος που αποτελούνται από εναλλασσόμενους δίσκους ψαμμίτη και ιλυολίθου, σε διαφορετικά πάχη, έτσι ώστε να προσομοιωθούν τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών στη βραχόμαζα (Εικονα 1.2Εικόνες 1.2, 1.3, 1.4). Αφού κατασκευαστεί το σύνθετο δοκίμιο, υποβάλλεται στις συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής για να προσδιορισθούν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και οι ταχύτητες διάδοσης των υπέρηχων κυμάτων.

Εικονα 1.2. Δοκίμιο Ε7 με ποσοστό ιλυολίθου 10%

Εικονα 1.3. Δοκίμιο Ε2 με ποσοστό ιλυολίθου 35%

Εικονα 1.4. Δοκίμιο Ε10 με ποσοστό ιλυολίθου 47%

Επιλέχθηκαν υλικά από την περιοχή του εργοταξίου της σήραγγας Καλυδώνας, τα οποία ανήκουν στη ενότητα του φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης.

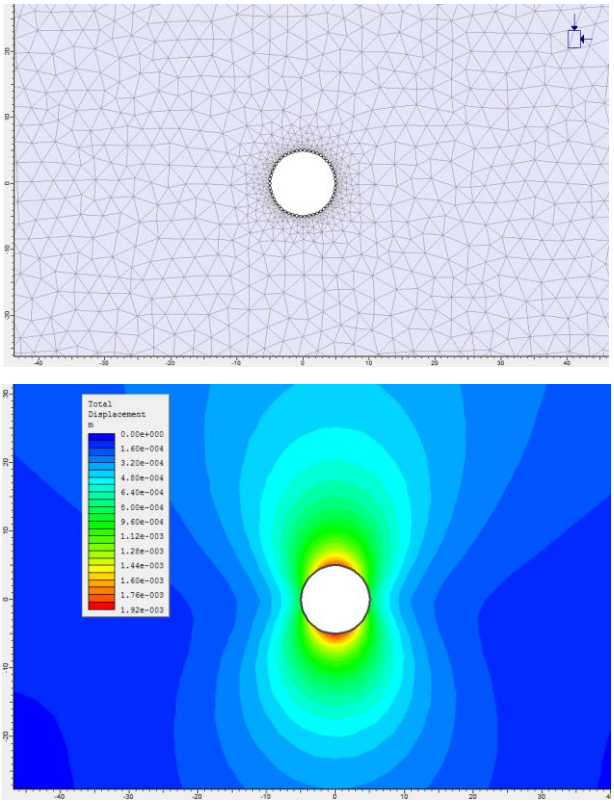
Η επεξεργασία, μόρφωση των δοκιμίων και οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής» του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου

Πολυτεχνείου. Οι εργαστηριακές μέθοδοι παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

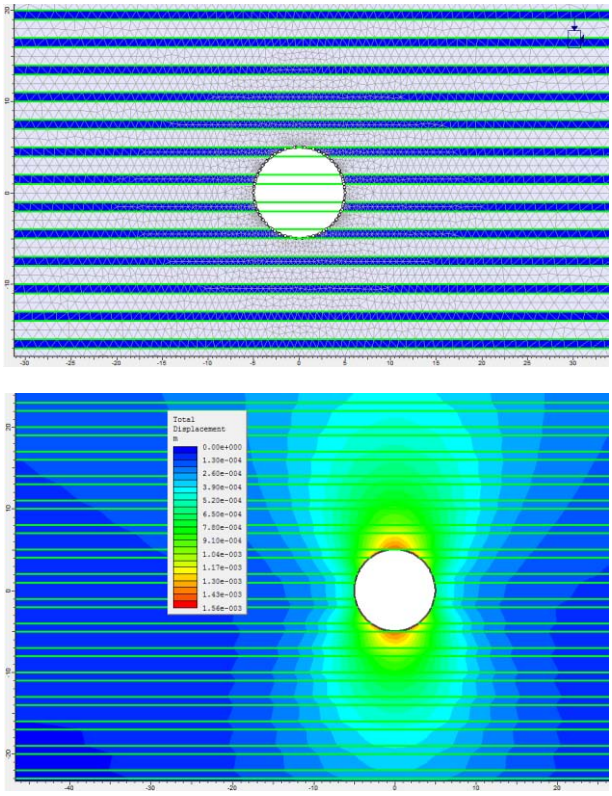
Από τις παραμέτρους του άρρηκτου πετρώματος θα πρέπει να γίνει αναγωγή σε αυτές της βραχομάζας χρησιμοποιώντας το κατάλληλο κριτήριο. Έτσι λοιπόν, εάν η βραχομάζα παρουσιάζει εξάρτηση της συμπεριφοράς της από συγκεκριμένη οικογένεια ασυνεχειών ή από τη στρωσιγένεια, όπου και αναμένονται ολισθήσεις σε συγκεκριμένες επιφάνειες αστοχίας, θα χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες των ασθενών αυτών επιφανειών για την περιγραφή της συνολικής βραχόμαζας. Εάν όμως η βραχόμαζα παρουσιάζει μια ομοιογένεια, λόγω πχ. ακανόνιστων διευθύνσεων ασυνεχειών ή έντονη ρωγμάτωση (τεμαχισμός βραχόμαζας), το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο αστοχίας είναι αυτό που προτείνεται από τους Hoek & Brown (1997) (Παράγραφος 1.4).

Στη παρούσα εργασία έγινε η υπόθεση ότι η βραχόμαζα είναι επαρκώς ομοιογενής, χωρίς προκαθορισμένες επιφάνειες αστοχίας, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown. Έγινε επίσης η χρήση του διαγράμματος GSI γι τον φλύσχη που έχει προταθεί από τον *Marinos V. (2007)*. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και έγινε σύγκριση των συγκλίσεων σήραγγας κυκλικής διατομής για δύο διαφορετικά προσομοιώματα βραχόμαζας:

- Ομοιογενής βραχόμαζα με τις παραμέτρους που προέκυψαν από τις δοκιμές της παρούσας εργασίας
- Ετερογενής βραχόμαζα, όπου στη γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων τέθηκαν τα δύο διαφορετικά υλικά σε οριζόντια στρώματα με διαφορετικές αναλογίες αλλά το κάθε ένα με τις ξεχωριστές του ιδιότητες.



Εικονα 1.5. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Phase2 για ομοιογενές υλικό με ποσοστό ιλυολίθου 30%



Εικονα 1.6. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Phase2 για ετερογενές υλικό σε οριζόντιες στρώσεις με ποσοστό ιλυολίθου 30%

Οι αναλύσεις που αναφέρονται παραπάνω αλλά και άλλες παραμετρικές διερευνήσεις καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας.

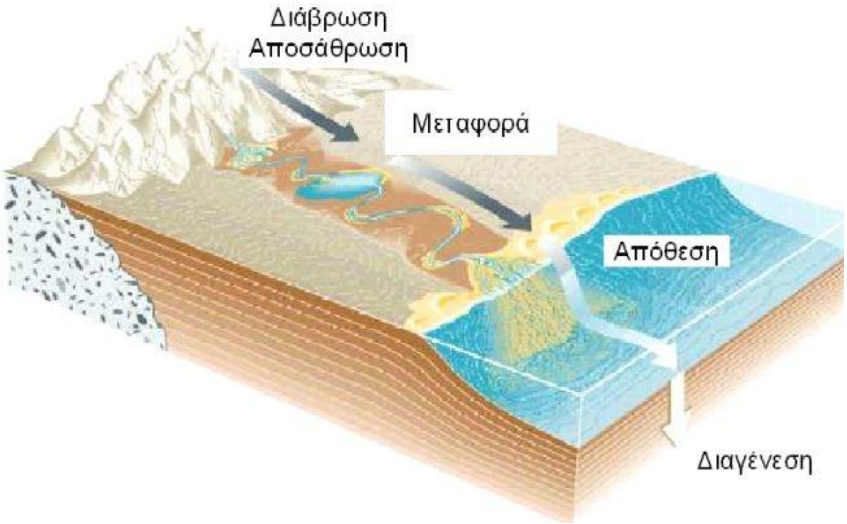
1.2. ΨΑΜΜΙΤΗΣ – ΙΛΥΟΛΙΘΟΣ – ΦΛΥΣΧΗΣ

Ιζηματογενή πετρώματα

Ιζηματογενή χαρακτηρίζονται τα πετρώματα τα οποία σχηματίζονται από απόθεση ή καταβύθιση υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο (νερό ή αέρας) και τη μετέπειτα συγκόλληση των υλικών που αποτέθηκαν. Χαρακτηρίζονται από τη στρώση των υλικών τους σε διαδοχικά επίπεδα.

Για το σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων λαμβάνουν χώρα οι εξής διεργασίες:

1) Αποσάθρωση, που είναι οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που υφίστανται τα προϋπάρχοντα πετρώματα με αποτέλεσμα την διάβρωση τους, που είναι αλλοίωση των ορυκτών τους και που οδηγεί στην υποβάθμιση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας
2) Μεταφορά των υλικών που προέκυψαν από την αποσάθρωση, με τον άνεμο και το νερό των ποταμών και των θαλασσών.
3) Απόθεση των υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση. Η απόθεση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα.
3) Διαγένεση που είναι το σύνολο των μεταβολών που υπέστη το αρχικό ίζημα στη διάρκεια των γεωλογικών αιώνων, λόγω διαφόρων παραγόντων (πίεση, υψηλές θερμοκρασίες, χημικές δράσεις κ.λπ.) με αποτέλεσμα, τελικά, να μεταβληθεί σε συμπαγές πέτρωμα. Κατά τη διαγένεση ο ιζηματογενής γεωλογικός σχηματισμός έγινε συμπαγής είτε λόγω της μεγάλης πίεσης που εξασκούσαν τα υπερκείμενα στρώματα στα υποκείμενα, είτε λόγω της συγκόλλησης των υλικών μεταξύ τους με φυσικές συγκολλητικές ουσίες (π.χ. όξινο ανθρακικό ασβέστιο, διοξείδιο πυριτίου, άργιλος), είτε, τέλος, με μεταλλαγές των ορυκτολογικών δομικών μονάδων του αρχικού ιζήματος.



Εικονα 1.7. Διαδικασία σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων

Διακρίνονται σε 3 κατηγορίες ιζηματογενών πετρωμάτων ανάλογα με τον τρόπο που συντελείται η όλη διαδικασία.

1) Τα κλαστικά που είναι ιζήματα που προκύπτουν από απόθεση υλικών αποσάθρωσης, που αιωρούνται στο νερό ή στον αέρα.
2) Τα χημικά τα οποία σχηματίστηκαν από συγκέντρωση ορυκτών που αποτέθηκαν κατευθείαν από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διεργασίες.
3) Τα βιογενή όταν γίνεται συσσώρευση ή απόθεση ύλης προερχόμενης από ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς.

Από τα κυριότερα ιζηματογενή πετρώματα είναι τα Κροκαλοπαγή και Λατυποπαγή, Ψαμμίτης, Ιλυόλιθος, Αργιλικός σχιστόλιθος, Μάργα, Γύψος, Ανυδρίτης, , Ασβεστόλιθος, Τραβερτίνης, Δολομίτης, Κερατόλιθοι, Ορυκτοί Άνθρακες, κ.α. ενώ ιζηματογενές σχηματισμούς αποτελούν ο Φλύσχης και η Μολάσσα.

Ψαμμίτης

Ο ψαμμίτης είναι συμπαγές πέτρωμα που προκύπτει από διαγένεση της άμμου. Το συνδετικό υλικό ποικίλει, και χαρακτηρίζει το πέτρωμα (χαλαζιακό, ασβεστιτικό, αργιλικό). Το μέγεθος των κλαστικών κόκκων κυμαίνεται από 2mm έως 1/16mm. Ο χαλαζίας κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής και ακολουθούν οι άστριοι, ο μοσχοβίτης, ο γλαυκονίτης, ο ασβεστίτης και άλλα σε μικρές ποσότητες. Οι ψαμμίτες που είναι πλούσιοι σε αστρίους ονομάζονται αρκόζες.

Όταν είναι συμπαγής είναι καλής συμπεριφοράς πέτρωμα με υψηλές αντοχές, χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στα τεχνικά έργα. Οι ρωγμές που μπορεί να παρουσιάζει στο επιφανειακό του τμήμα είναι λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς που είναι χαρακτηριστικό των πετρωμάτων με υψηλές αντοχές.

Το συνδετικό υλικό μπορεί να είναι πυριτικό, ασβεστιτικό, αργιλικό ή, πιο σπάνια, γυψούχο. Στην περίπτωση του αργιλικού συνδετικού υλικού, μπορούν να παρουσιαστούν προβλήματα απομείωσης της συνεκτικότητας του υλικού όταν αυτό έρθει σε επαφή με το νερό, καταλήγοντας έτσι σε μια βραχόμαζα μειωμένων αντοχών. Διάλυση και απομάκρυνση της συγκολλητικής ύλης, μπορεί να προκύψει και στην περίπτωση του ασβεστιτικού συνδετικού υλικού υπό την επιρροή υδατικής ροής, φαινόμενο όμως το οποίο εξελίσσεται σχετικά αργά, χωρίς να προκαλεί προβλήματα στα συνήθη τεχνικά έργα του μηχανικού.

Οι ψαμμίτες δεν συναντόνται , πολλές φορές, μόνοι τους αλλά σε εναλλαγές στρωμάτων με μάργες, ιλυολίθους ή αργιλικούς σχιστολίθους, με πετρώματα δηλαδή μικρότερων αντοχών. Συνεπώς, η ετερογένεια που παρουσιάζουν μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διαφορικών καθιζήσεων σε θεμελιώσεις, ανομοιομορφία συγκλίσεων σε υπόγειες εκσκαφές κτλ.

Ιλυόλιθος

Ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου (0,002 – 0,063mm σύμφωνα με το ISO 14688) και την συμμετοχή αργιλικού υλικού, η συμπεριφορά του ιλυόλιθου πλησιάζει αυτή του ψαμμίτη ή του αργιλικού σχιστόλιθου. Είναι γενικότερα πέτρωμα μετρίων έως χαμηλών αντοχών και αδιαπέρατο. Είναι ψαθυρό και εάν διαβραχεί χάνει την αντοχή του και θρυμματίζεται. Χαρακτηριστικό του είναι ότι στην Ελλάδα συναντάται μαζί με εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων, ψαμμιτών, μαργών. Η συμπεριφορά του λοιπόν ελέγχεται από την λιθογραφική αυτή ετερογένεια.

Φλύσχης

Με τον όρο αυτό εννοείται ένα σύστημα πετρωμάτων που συνδέεται με την τεκτονική εξέλιξη ενός γεωσυγκλίνου. Κλείνει δηλαδή τον κύκλο ιζηματογέννεσης πριν την κύρια πτύχωση και ορογένεση κάποιας περιοχής του, αφού είχε προηγηθεί ήδη χέρσευση σε γειτονική περιοχή. Έτσι είναι έντονα τεκτονισμένος σχηματισμός που

έχει υποστεί μεγάλες παραμορφώσεις, συνήθως με την μορφή πτυχώσεων ή κατακερματισμό.

Πετρογραφικά αποτελείται από συνεχείς εναλλαγές στρωμάτων από ψαμμίτες, ιλυολίθους, μάργες, αργιλικούς σχιστολίθους. Τα κροκαλοπαγή δεν είναι ασυνήθιστα αλλά εντοπίζονται σε ορίζοντες πιο περιορισμένους. Συναντώνται σπανιότερα και στρώματα ασβεστολίθου. Τα πάχη των κύριων πετρογραφικών τύπων που εναλλάσσονται, κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα.

Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς του φλύσχη είναι η πετρογραφική ετερογένεια που παρουσιάζει. Αυτό μπορεί να επηρεάσει κυρίως μεγάλου εύρους θεμελιώσεις προκαλώντας ενδεχόμενες διαφορικές καθιζήσεις.

Από πλευράς περατότητας είναι στεγανός σχηματισμός ώστε να μη παρουσιάζει προβλήματα διαφυγών από λίμνες φραγμάτων. Μόνο στην περίπτωση χαλαρών ψαμμιτών η διαπερατότητά τους είναι υψηλή. Το δευτερογενές πορώδες, από τις τεκτονικές ασυνέχειες που είναι μοιραίο να εμφανίζονται στη βραχόμαζα, μειώνεται λόγω της παρουσίας του ιλυολίθου. Μόνο στις περιπτώσεις που επικρατεί ο ψαμμίτης υπάρχει τάση ψαθυρής θραύσης και εμφάνισης διαπερατότητας η οποία όμως και πάλι δεν δύναται να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στα τεχνικά έργα.

Όσον αφορά τη διάνοιξη σηράγγων, ο φλύσχης αποτελεί έναν ασταθή σχηματισμό λόγω του λεπτοστρωματόδους χαρακτήρα του και την αργιλική του σύσταση.

Μεγαλύτερα προβλήματα όμως παρουσιάζονται στις φυσικές κλιτείς ή στα πρανή εκσκαφών όπου παρουσιάζονται κατολισθήσεις που αφορούν είτε την ίδια την μάζα του είτε το χαλαρωμένο ή αποσαθρωμένο επιφανειακό τμήμα του φλύσχη.

1.3. ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ – ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από τους Hudson και Harrison (1997) αναφέρεται ότι:

- **Ανισότροπο** ορίζεται ένα πέτρωμα το οποίο παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις, ενώ
- **Ετερογενές** ορίζεται ένα πέτρωμα που παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικά τμήματα του.

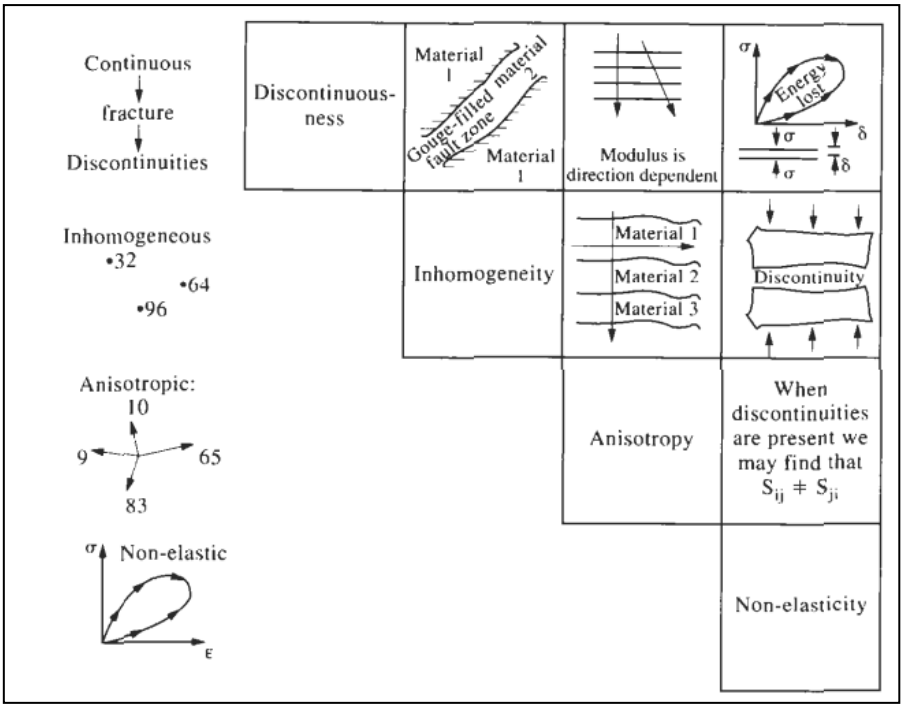
Οι ιδιότητες που αναφέρονται παραπάνω, μπορεί να είναι οποιαδήποτε γεωτεχνική παράμετρος ή ιδιότητα του υλικού που μπορεί να μετρηθεί, όπως το μέτρο ελαστικότητας, η θλιπτική αντοχή, η περατότητα, το πορώδες, η συχνότητα των ασυνεχειών κ.α.

Μια βασική διαφορά των δύο παραπάνω εννοιών είναι το γεγονός ότι η ανισοτροπία είναι μέγεθος το οποίο μπορεί να μετρηθεί (π.χ. ως ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του υλικού σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις) ενώ η ετερογένεια είναι περισσότερο ποιοτική έννοια και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μόνο χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους (πχ. μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας σε διαφορετικές θέσεις της βραχόμαζας και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Το ότι κάποιο υλικό εμπεριέχει ανισοτροπία μπορεί να είναι και ετερογενές ενώ ένα υλικό που είναι ετερογενές είναι σίγουρα ανισότροπο. Οι παραπάνω συγγραφείς ξεχωρίζουν δύο ακραίες περιπτώσεις που εκφράζονται με τα παρακάτω ακρωνύμια:

- CHILE (*Continuous, Homogeneous, Isotropic and Linearly-Elastic*) για το συνεχές, ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό υλικό.
- DIANE (*Discontinuous, Inhomogeneous, Anisotropic, Non-Elastic*) για το ασυνεχές, ετερογενές ανισότροπο και μη ελαστικό υλικό.

Ορίζουν επίσης τη συσχέτιση των παραπάνω εννοιών με το παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Εικονα 1.8. Σχέσεις μεταξύ των εννοιών ασυνέχεια, ετερογένεια, ανισοτροπία και μη-ελαστικότητα.

Γενικά για την μοντελοποίηση των συνθηκών της βραχόμαζας χρησιμοποιείται από τον μηχανικό το υλικό τύπου CHILE το οποίο είναι απλούστερο στην κατανόηση και μπορεί να περιγραφεί εύκολα με σχέσεις κλειστής μορφής. Το υλικό αυτό όμως απέχει πολύ από την πραγματικότητα και στη φύση το υλικό που συναντάται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι αυτό του τύπου DIANE.

1.4. ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK & BROWN ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ GSI ΓΙΑ ΤΟΝ ΦΛΥΣΧΗ

1.4.1. Κριτήριο Hoek & Brown

Για την αναγωγή των ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές στις ιδιότητες της βραχόμαζας για το σχεδιασμό του τεχνικού έργου, χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική το κριτήριο Hoek-Brown (2002).

Οι E. Hoek και E.T. Brown εισήγαγαν το κριτήριο σε μια προσπάθεια να παρέχουν τις απαραίτητες παραμέτρους για τον σχεδιασμό των υπογείων έργων σε σκληρά πετρώματα. Το κριτήριο προέκυψε από το πάντρεμα των αποτελεσμάτων της έρευνας του *Hoek (1968)* για την ψαθυρή θραύση του άρρηκτου πετρώματος και του *Brown (1970)* για την αντοχή βραχόμαζας με ασυνέχειες. Το κριτήριο ξεκίνησε από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και εισήγαγε παραμέτρους για την μείωση αυτών με βάση τις παραμέτρους των ασυνεχειών στη βραχόμαζα. Οι συγγραφείς, συνέδεσαν το εμπειρικό κριτήριο με τις γεωλογικές παρατηρήσεις μέσω των υπαρχόντων μεθόδων ταξινόμησης της βραχόμαζας. Στην αρχή χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) που είχε προταθεί από τον *Bieniawski (1976)*, αλλά στη συνέχεια, λόγω αδυναμιών της μεθόδου αυτής, εισήχθη ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI, ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στη επόμενη παράγραφο.

Προϋπόθεση χρήσης του κριτηρίου αυτού αποτελεί ότι η βραχόμαζα θα συμπεριφέρεται ομοιογενώς έτσι ώστε να μην υπάρχει κάποια προτιμητέα διεύθυνση αστοχίας όπως η στωσιγένεια ή κάποια οικογένεια ασυνεχειών.

Για την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown απαιτείται ο προσδιορισμός τεσσάρων παραμέτρων για τον υπολογισμό της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας:

1) Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}.

2) Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E_i

3) Η σταθερά m_i η οποία εξαρτάται από τα εγγενή χαρακτηριστικά τριβής των ορυκτών που απαρτίζουν το υπό μελέτη πέτρωμα. Η τιμή του m_i μπορεί να

προσδιοριστεί μέσω τριαξονικών δοκιμών ή προτείνεται να χρησιμοποιηθούν τιμές από τον παρακάτω πίνακα:

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

Πίνακας 1.1.Προτεινόμενες τιμές της παραμέτρου mi (Marinos & Hoek, 2000)

4) Η τιμή του δείκτη GSI (Geological Strength Index) που είναι στην ουσία η παράμετρος που συνδέει τα χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος με αυτά της βραχομάζας.

Οι σχέσεις του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown έχουν υποστεί διαδοχικές αλλαγές με την πάροδο των ετών (*Hoek & Brown (1988) / Hoek, Wood & Shah (1992) / Hoek (1994) / Hoek, Kaiser & Bawden (1995) / Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002) / Hoek & Diederichs (2006)*). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι προτάσεις των *Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002)* και *Hoek & Diederichs (2006)* οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Κριτήριο Hoek – Brown 2002 Edition (*Hoek, Carranza-Torres & Corkum (2002)*):

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

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)$$

Όπου D: ο βαθμός διατάραξης της βραχόμαζας που εξαρτάται από την μέθοδο εκσκαφής (D=0-1)

Προτείνεται επίσης:

- Για σήραγγες: $\frac{\sigma_{3\max}'}{\sigma_{cm}'} = 0.47\left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma H}\right)^{-0.94}$ με H το βάθος της σήραγγας από την επιφάνεια του εδάφους.
- Για πρανή: $\frac{\sigma_{3\max}'}{\sigma_{cm}'} = 0.72\left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma H}\right)^{-0.91}$ με H το ύψος του πρανούς.

Όσον αφορά τον υπολογισμό του **μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας**, κατά *Hoek & Diederichs (2006)* έχουμε:

$$E_{rm} = E_i\left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}}\right)$$

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

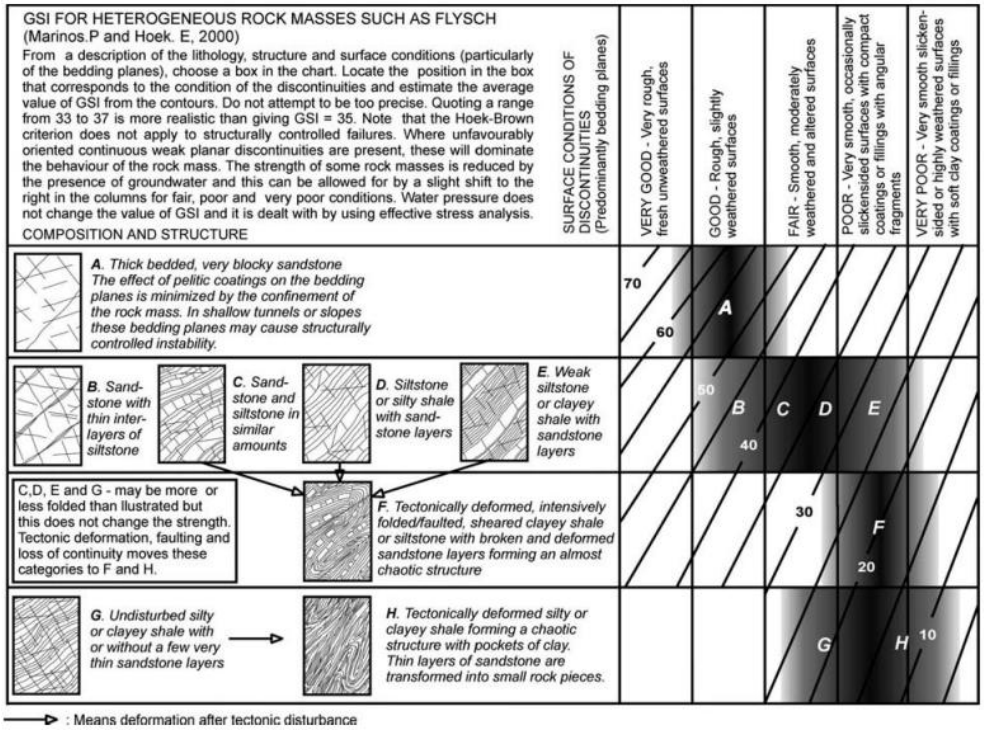
Όπου MR: σταθερά που πρώτος εισήγαγε ο Deere (1968) κατά την οποία μπορεί να γίνει υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας μέσω της θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος.

1.4.2. Δείκτης GSI

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI), που έχει διεθνώς καθιερωθεί για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας βραχόμαζας, έχει τα τελευταία χρόνια ευρύτατη χρήση και στην Ελλάδα.

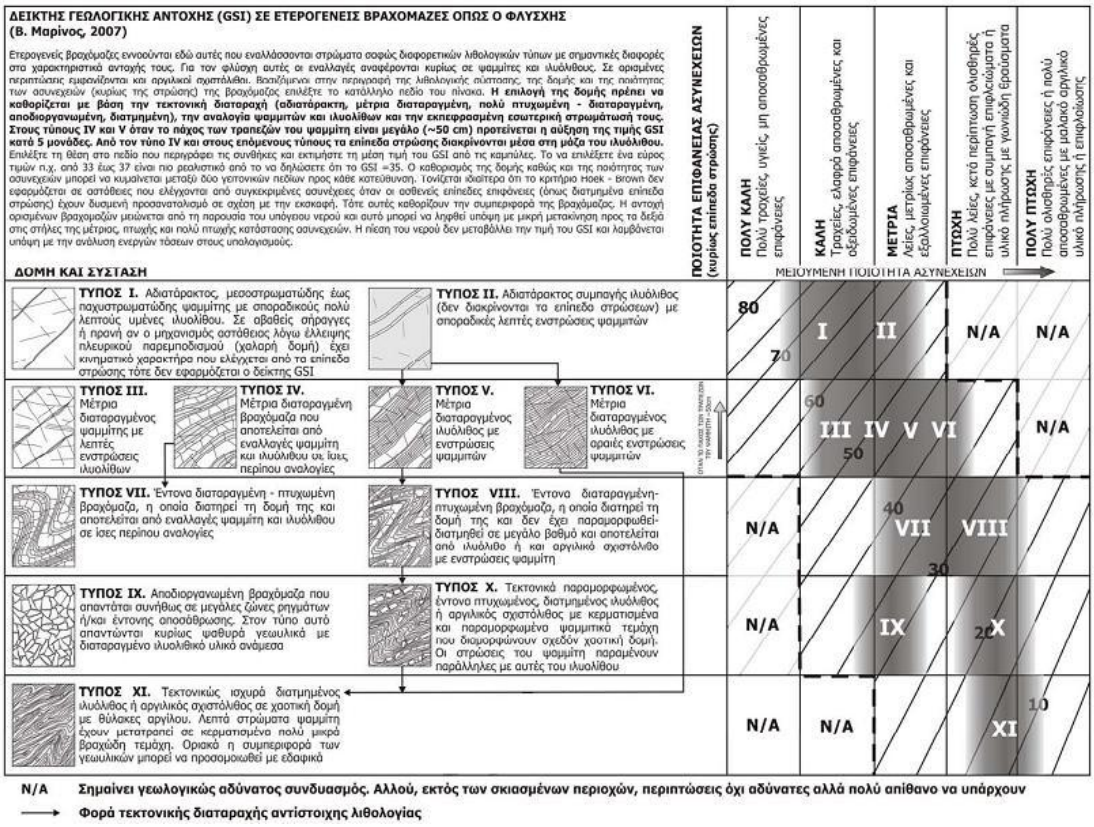
Ο δείκτης, GSI, εισήχθη από τους *Hoek, Wood & Shah (1992)* επεκτάθηκε ουσιαστικά για τις ασθενείς βραχόμαζες από τους *Hoek, Marinos & Benissi (1998), Marinos & Hoek (2000)* και για τον φλύσχη από τους *Marinos & Hoek (2000)*. Ο δείκτης, εκτός από τη γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχόμαζας. Αποτελεί λοιπόν σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek & Brown και προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα του προσδιορισμού των πλέον αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων σε περιβάλλον ρωγματωμένων βράχων. Ο δείκτης GSI βασίζεται στην εκτίμηση της δομής και της καταστάσεως των ασυνεχειών της βραχόμαζας και επομένως αποτελεί ένα φιλικό, γεωλογικά, δείκτη που μπορεί να εκτιμάται εύκολα.

Στη παρούσα διπλωματική έγινε χρήση του διαγράμματος GSI για τον φλύσχη. Το διάγραμμα GSI (*Marinos & Hoek, 2002*) έχει χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα, αλλά και διεθνώς.



Διάγραμμα 1.1. Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχόμαζες κατά Marinos and Hoek (2002)

Με βάση νέα εμπειρία που αποκτήθηκε από το τη διάνοιξη σηράγγων σε ετερογενείς σχηματισμούς στην Ελλάδα (Εγνατία), το αρχικό αυτό διάγραμμα αναθεωρήθηκε από τον *Marinos V. (2007)* και τελικά προτείνεται το επόμενο διάγραμμα ως πιο σύγχρονο:



Διάγραμμα 1.2. Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχόμαζες κατά Marinos V. (2007)

Επίσης για την επιλογή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της σταθεράς mi προτείνονται οι παρακάτω τιμές ανάλογα με τον τύπο του φλύσχη:

Τύπος φλύσχη	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σci και mi για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του φλύσχη ανάλογα με τον τύπο του
I	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
II	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
III	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
IV	Λεπτά στρώματα: Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιήστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου Παχιά στρώματα: Χρησιμοποιήστε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VI	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
VII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IX	Χρησιμοποιήσετε τις πλήρες τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 60% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
XI	Χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου ή αργιλικού σχιστολίθου

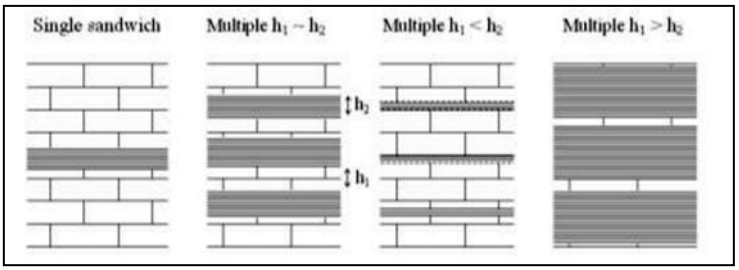
Πίνακας 1.2.Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_{ci} και m_i για κάθε κατηγορία GSI ετερογενούς βραχόμαζας κατά Marinos V. (2007).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του πιο σύγχρονου διαγράμματος του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) που έχει προταθεί από τον *Marinos V. (2007)* καθώς και του πίνακα με τις προτεινόμενες αναλογίες σ_{ci} και m_i.

1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Ελάχιστες έως μηδαμινές είναι οι αναφορές στη βιβλιογραφία της εργαστηριακής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο *Duffault (1981)* ήταν ο πρώτος που δημοσίευσε τη μελέτη του με θέμα την προσομοίωση και μοντελοποίηση των ετερογενών βραχομαζών και εισήγαγε τον όρο sandwich rock mass. Η παρακάτω εικόνα αναπαριστά τα διαφορετικά προφίλ της βραχόμαζας με μία στρώση διαφορετικού υλικού (single sandwich) ή με περισσότερες στρώσεις (multiple sandwich):

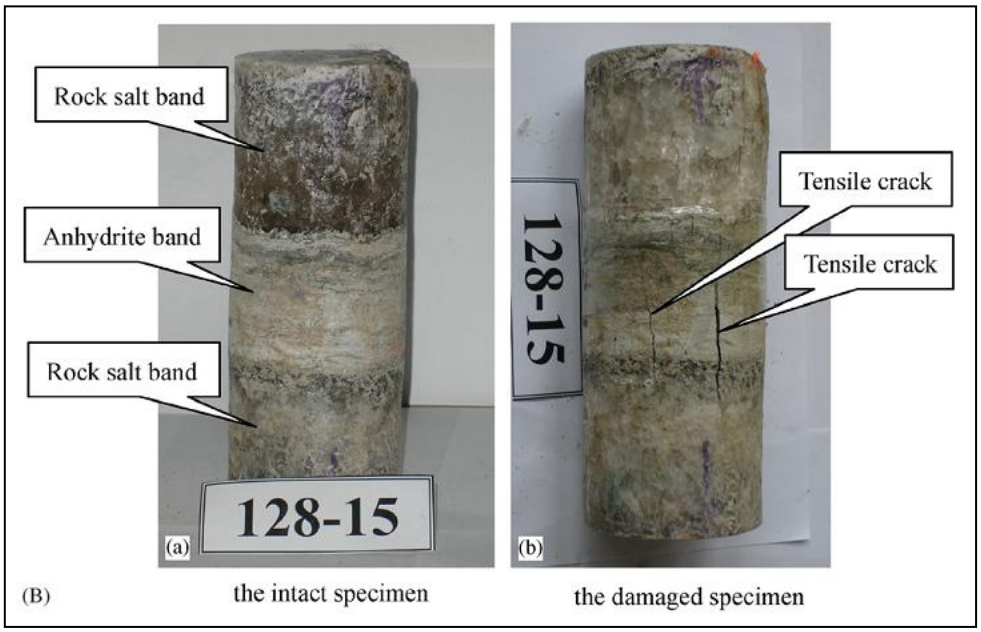


Εικονα 1.9. Ετερογένεια ιζηματογενών σχηματισμών (επανασχεδιασμός από Duffault P. (1981))

Στη συνέχεια οι *Del Greco et al. (1994)* μελέτησαν τη μορφή θραύσης τεχνητών σύνθετων δοκιμίων πετρώματος στο εργαστήριο με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς των στηλών του καθεδρικού ναού του Orvieto (κεντρική Ιταλία). Ο ναός αυτός είχε κατασκευαστεί τον 14^{ο} αιώνα και τα κυρίως τοιχεία καθώς και οι κολώνες αποτελούνται από εναλλαγές τεμαχών Τραβερτίνη και Βασάλτη. Στη μελέτη αυτή παρατηρήθηκε εμφανής διαφορά της θραύσης των σύνθετων δοκιμίων συγκριτικά με αυτά που αποτελούνταν από ένα μόνο πέτρωμα.

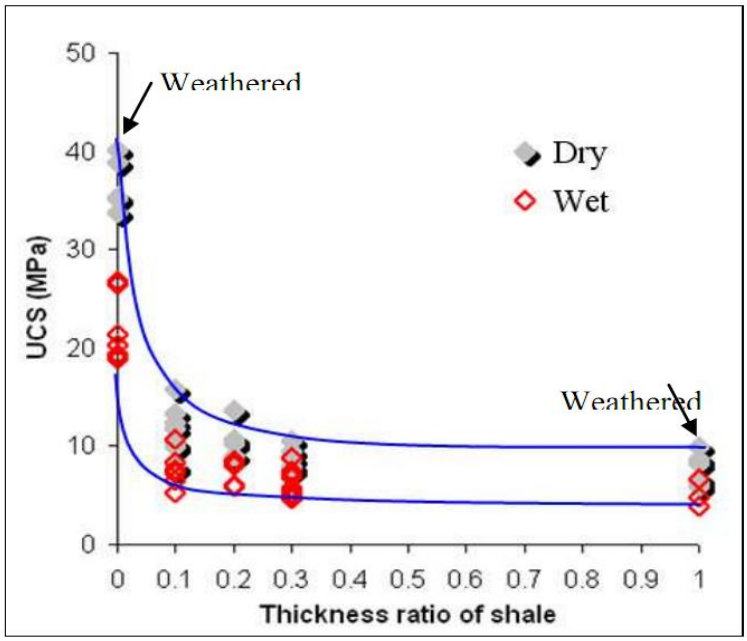
Οι *Vlasov & Merzlyakov (2004)* μελέτησαν την παραμορφωσιμότητα των σύνθετων δοκιμίων χρησιμοποιώντας την ασυμπτωτική μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων ενώ οι *Lydzba et al. (2003)* προσέγγισαν το φαινόμενο χρησιμοποιώντας μεθόδους γνωστές ως τεχνικές ομογενοποίησης για τη μελέτη ετερογενών πετρωμάτων που αποτελούνταν από ψαμμίτη και αργιλόλιθο. Τα αποτελέσματα ήταν ότι η αντοχή του δοκιμίου αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού του ψαμμίτη και με την αύξηση της περιβάλλουσας πίεσης.

Στη συνέχεια οι *Liang et al. (2007)* διερεύνησαν την θλιπτική αντοχή ετερογενών δοκιμίων ορυκτού άλατος με ανυδρίτη και συμπέραναν ότι η συνολική συμπεριφορά διέπεται από τη συμπεριφορά του ασθενέστερου πετρώματος και ότι η αντοχή του σύνθετου δοκιμίου βρίσκεται κάπου μεταξύ αυτής των ξεχωριστών πετρωμάτων από τα οποία αποτελείται. Οι παραπάνω ερευνητές πραγματοποίησαν επίσης τριαξονικές δοκιμές στα σύνθετα δοκίμια.



Εικονα 1.10. Φυσικά ετερογενή δείγματα ορυκτού άλατος από τη δουλειά των Liang et al. (2007)

Τέλος οι *Zainab M. et al. (2007)* πραγματοποίησαν δοκιμές με τεχνητά ετερογενή δοκίμια που αποτελούνταν από ψαμμίτη και ιλυόλιθο στον γεωλογικό σχηματισμό Kenny Hill που απαντάται στη Kuala Lympur και στη Μαλαισία. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε βραχώδη δείγματα που είχαν υποστεί αποσάθρωση στο τροπικό περιβάλλον των παραπάνω περιοχών και στα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό πάχος των τεμαχών ιλυολίθου και ψαμμίτη για να προσομοιωθούν τα διαφορετικά ποσοστά ετερογένειας στη φύση. Ακόμα μελετήθηκε και η επιρροή του κορεσμού του δοκιμίου στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την δημοσίευση, είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία με την εξαίρεση ότι στις διεπιφάνειες των δοκιμίων γινόταν εφαρμογή γύψου. Τα αποτελέσματα των *Zainab M. et al. (2007)* παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1.3. Εργαστηριακά αποτελέσματα των Zainab M. et al. (2007)

Μέρος 1ο

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

2. ΓΕΩΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

2.1.1. Η περιοχή της Καλυδώνας

2.1.1.1. Η αρχαία Καλυδώνα

Αρχαία ιστορική πόλη στις νοτιοανατολικές πλαγιές του όρους Ζυγού, στη δυτική όχθη του Ευήνου ποταμού και στα βόρεια του Ευηνοχωρίου, ανάμεσα στις πλαγιές δύο λόφων, η «Πετρηέσσα» Καλυδώνα σώζει στο ανώτερο στρώμα της αρχαία ρωμαϊκά κατάλοιπα, κτίσματα, μωσαϊκά δάπεδα κοντά στη κορυφή της ακρόπολης.

Εικονα 2.1. Αρχαίο θέατρο Καλυδώνας

Εικονα 2.2. Θολωτός τάφος νότια των τειχών της αρχαίας Καλυδώνας

Η ίδρυσή της πόλης χρονικά τοποθετείται στην αρχή της προϊστορίας, περίπου τον 3η χιλιετία π.Χ. και σύμφωνα με τις μαρτυρίες που έχουμε φτάνει μέχρι τους ύστερους Ελληνιστικούς χρόνους. Η Καλυδώνα έλαβε μέρος στην Αργοναυτική εκστρατεία με το Μελέαγρο, έστειλε ναυτική δύναμη στην Τροία όπου σύμφωνα με τον Όμηρο συμμετείχε στην πολιορκία της, έστειλε στρατό που νίκησε και αναχαίτισε τους επιδρομείς Γαλάτες, και είχε σπουδαίο ρόλο στην Αιτωλική Συμπολιτεία σαν κυρίαρχη πόλη.

Η Καλυδώνα ήταν η μία απ' τις 5 κυριότερες αιτωλικές πόλεις. Κατά τους χρόνους του Πελοποννησιακού πολέμου ήταν αυτόνομη, αλλά μετά την μάχη των Λεύκτρων επανήλθε στην Αιτωλική κυριαρχία. Μεγάλες καταστροφές η πολιτεία υπέστη μετά την ήττα των Αιτωλών απ' τον Φίλιππο Ε', αλλά και πάλι κατάφερε να βρει ξανά την αίγλη της...

Εικονα 2.3. Μωσαικό οικίας στην αρχαία Καλυδώνα

Εικονα 2.4. Ηρώον Λέοντος στην αρχαία πόλη της Καλυδώνας

Το 48 π.χ. αντιστάθηκε στα επεκτατικά σχέδια των Ρωμαίων. Τελικά όμως υποτάχθηκε στις λεγεώνες του Ιουλίου Καίσαρα, και το 30 π.Χ. την κατέστρεψε απ'

τα θεμέλια της και την έσβησε εντελώς από το χάρτη, μεταφέροντας τους κατοίκους της στην νεοϊδρυθείσα από αυτόν πόλη της Νικόπολης και τους θησαυρούς της στην πόλη των Πατρών. Το χρυσελεφάντινο άγαλμα της προστάτιδας θεάς Αρτέμιδας μεταφέρθηκε κι αυτό στην Πάτρα.

Έκτοτε δεν αναφέρθηκε ποτέ πια ξανά το όνομα της Καλυδώνας.

2.1.1.2. Γενικά Γεωμορφολογικά και Γεωλογικά Στοιχεία της περιοχής

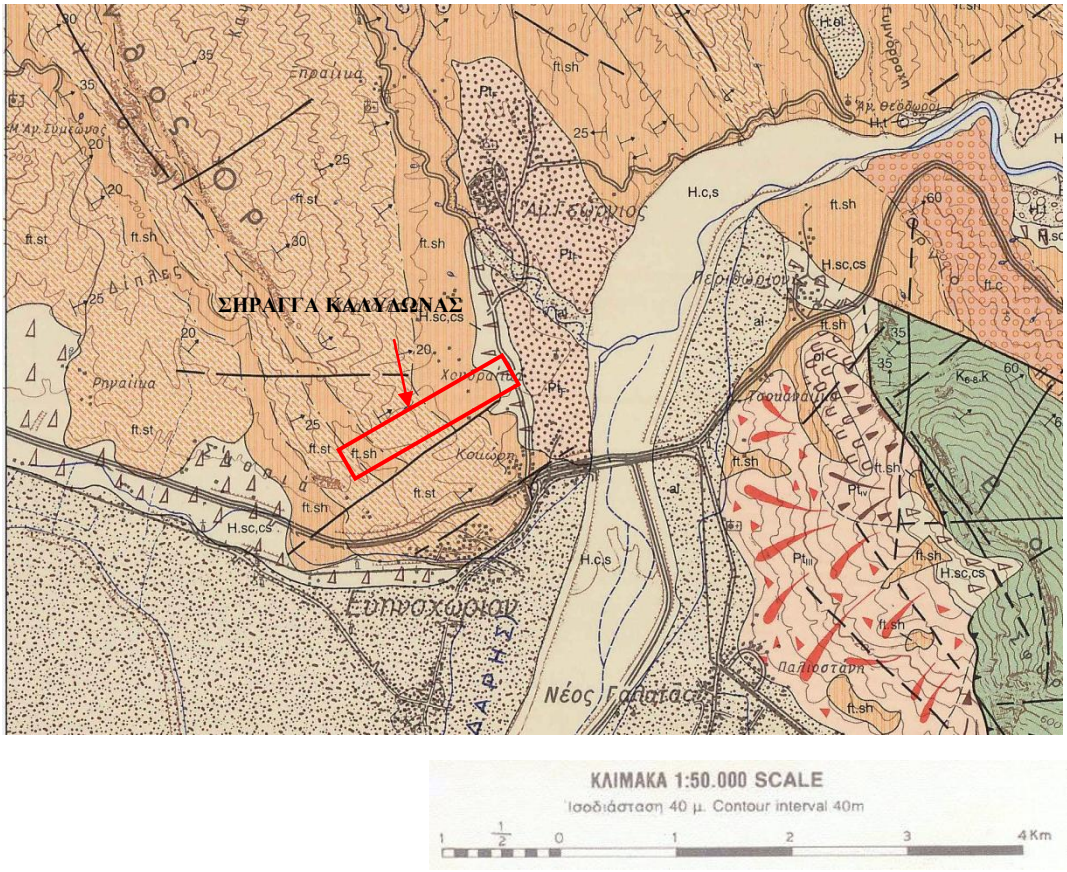
Η περιοχή της Καλυδώνας χαρακτηρίζεται από έντονο λοφώδες μορφολογικό ανάγλυφο, το οποίο καλύπτεται από αραιή (έως πυκνή κατά τόπους) θαμνώδη βλάστηση και εντοπίζεται στις νότιες απολήξεις του όρους Αράκυνθος.

Το ανάγλυφο της περιοχής επηρεάζεται από την μονοκλινική δομή των στρωμάτων του φλύσχη. Τα επιμέρους τμήματα του φλύσχη (ιλυόλιθοι, ψαμμίτες) γενικά εναλλάσσονται χωρίς να είναι έντονα τεκτονισμένα και βυθίζονται προς τα ΒΑ - Α, με μικρές κλίσεις που κυμαίνονται από 10° έως 25°. Οι εναλλαγές σχηματισμών με διαφορετική αντοχή στη διάβρωση σε συνδυασμό με τις έντονες κλίσεις των πρανών έχουν προκαλέσει κατολισθητικά φαινόμενα και εδαφικές θραύσεις επιφανειακού χαρακτήρα στον σχηματισμό των ιλυολίθων, καθώς και καταπτώσεις βράχων όπου τα ψαμμιτικά στρώματα υπέρκεινται των ιλυολιθικών, λόγω υποσκαφής.

Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από βαθείς ευθύγραμμους χειμάρρους, με νότια - νοτιοανατολική διεύθυνση ροής, με κυριότερο αυτόν που τέμνει τη χάραξη στο κεντρικό τμήμα περίπου της σήραγγας, ενώ παρατηρείται και εκδήλωση πηγαίων μικροαναβλύσεων στα σημεία εκείνα που το επιτρέπει η λιθοστρωματογραφία και η τεκτονική της περιοχής.

Οι κοίτες των ρεμάτων έχουν σχηματιστεί υπό μορφή V, δείγμα της σε βάθος διάβρωσης των σχηματισμών. Η έντονη διάβρωση που πραγματοποιείται από τους χειμμάρους στην περιοχή υποδηλώνεται και από τις μικρού εώς μηδενικού πάχους αποθέσεις κοίτης, που συναντώνται στα μεγαλύτερα ρέματα.

Η ευρύτερη περιοχή του έργου δομείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στο αλπικό υπόβαθρο της Ιόνιας γεωτεκτονικής ενότητας και από μεταλπικούς σχηματισμούς που υπέρκεινται ασύμφωνα.



Εικονα 2.5. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ (ΦΥΛΛΟ ΕΥΗΝΟΧΩΡΙ), κλίμακας 1:50.000

Αναλυτικότερα, η λιθοστρωματογραφική στήλη της ευρύτερης περιοχής του έργου, από τους νεότερους προς τους παλαιότερους σχηματισμούς έχει ως εξής:

<u>Ολόκαινο</u>

Υλικά ελουβιακού μανδύα (el): σύγχρονες αποθέσεις αποτελούμενες από λεπτομερή έως αδρομερή μη συγκολλημένα προϊόντα αποσάθρωσης των υποκείμενων φλυσχικών σχηματισμών.

Πλευρικά κορήματα φλυσχικής προέλευσης (H.sc): αποτελούμενα από ασύνδετα ψαμμιτικά τεμάχη μέσα σε αργιλώδη-αμμώδη έως αργιλώδη-ιλυώδη κύρια μάζα, τα οποία αναπτύσσονται στις επικλινείς περιοχές των λόφων όπου το υπόβαθρο είναι φλυσχικό, και στις εξόδους των χειμάρρων.

<u>Πλειόκαινο – Πλειστόκαινο</u>

Ποταμοχερσαίες, λιμναίες και ρηχής θάλασσας αποθέσεις (Pt/Pt_M): αποτελούμενες από ψαμμιτικά κροκαλοπαγή και τροχμαλοπαγή με συνεκτικά και λεπτομερή

καστανόχρωμα υλικά, που αναπτύσσονται κοντά στο φλυσχικό υπόβαθρο και το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 4m. Σε περιορισμένης έκτασης εμφανίσεις, παρουσιάζονται εναλλαγές κροκαλοπαγών/ψηφιδοπαγών και αμμούχων πηλών ή αργίλων καστανοκίτρινου-τεφροκίτρινου χρώματος. Συχνά, τα κροκαλοπαγή/ψηφιδοπαγή αποτελούν φακοειδείς ενστρώσεις. Πρόκειται για λιμναίες αποθέσεις που προέρχονται από τη μετάβαση των ποταμοχερσαίων αποθέσεων. Κάτω από τα υλικά αυτά, απαντώνται ενστρώσεις θαλάσσιων (ρηχής θάλασσας) αποθέσεων από υπόλευκες έως κυανές αμμούχες μάργες (Pt_M) μέγιστου πάχους 50m, μέσα στις οποίες υπάρχουν φακοειδείς εμφανίσεις χαλαρών ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών.

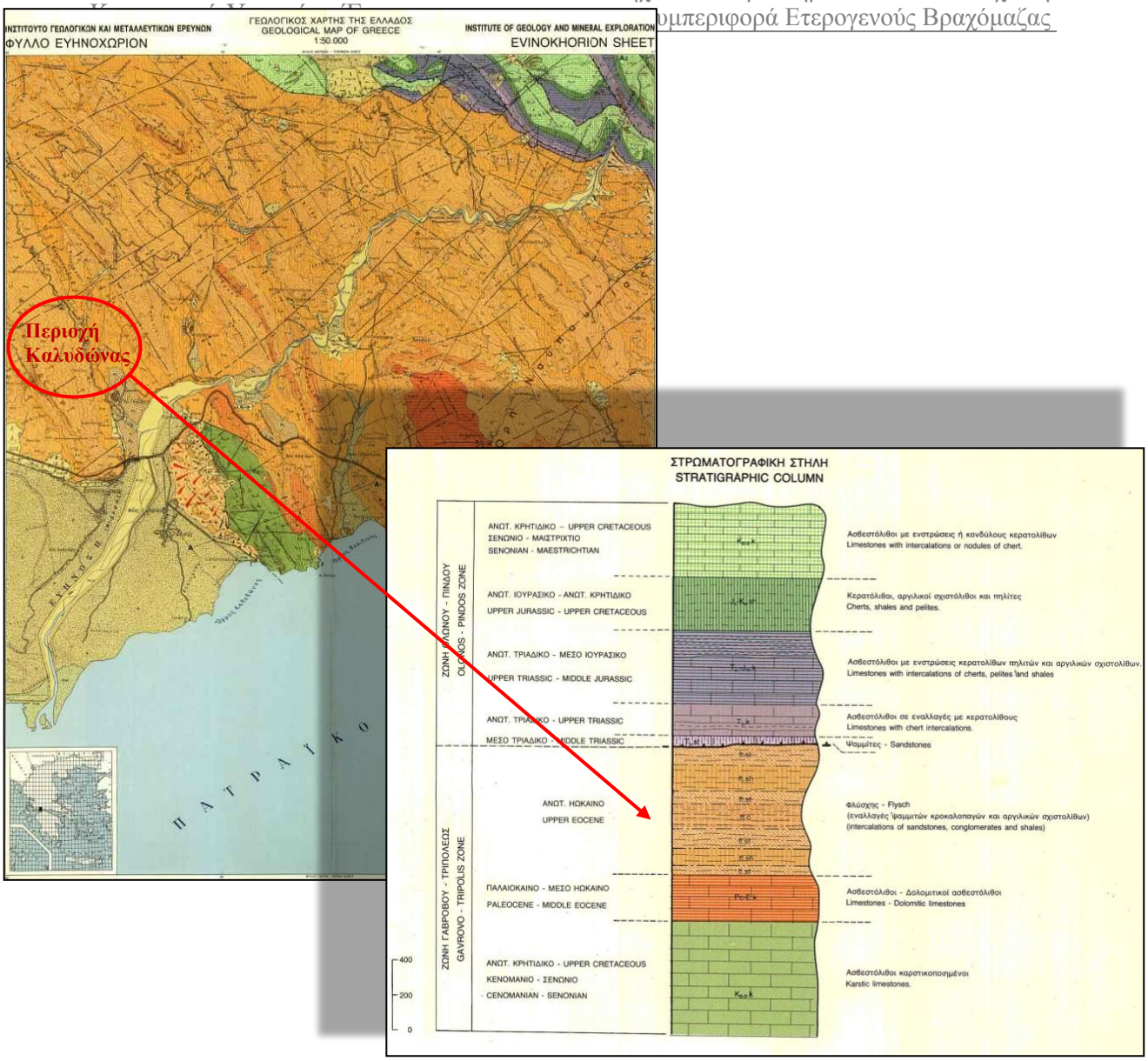
Γεωτεκτονική Ενότητα Γαβροβού-Τρίπολης

Φλύσχης: Πρόκειται για ένα σύνολο λιθολογικών ενοτήτων με εναλλαγές ψαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων χρώματος καστανού, τεφρού έως και υποπράσινου. Μέσα στον φλύσχη εμφανίζονται ποικίλες ιζηματοδομές. Η ηλικία του είναι Ανώτερο Ηώκαινο – Ολιγόκαινο και το εκτιμώμενο πάχος του είναι πάνω από 2000m.

Ο φλύσχης αποτελείται από τις ακόλουθες λιθοφασικές ενότητες:

- fi.st: μεσο-παχυστρωματώδεις, μεσόκοκκοι έως χονδρόκοκκοι ψαμμίτες, γκρίζου έως γκριζοκάστανου χρώματος (πάχος στρώσεων 40cm έως 100cm).
- $fi.st_1$: μεσοστρωματώδεις, λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι ψαμμίτες (πάχος στρώσεων 20cm έως 50cm), γκριζοκάστανου χρώματος, σε εναλλαγές με ιλυολιθικά στρώματα των οποίων το πάχος σπανίως ξεπερνά το πάχος των ψαμμιτικών στρωμάτων με τα οποία εναλλάσσονται.
- fi.sl,st: Ιλυόλιθοι γκρίζου χρώματος σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις λεπτόκοκκους ψαμμίτες (πάχος στρώσεων 2cm έως 10cm).
- $fi.sl_2$: Ιλυόλιθοι γκρίζου έως υποπράσινου χρώματος με λεπτές ενστρώσεις λεπτόκοκκων ψαμμιτών (πάχος στρώσεων 2cm έως 10cm).
- $fi.sl_1$: Λεπτοστωματώδεις ιλυόλιθοι γκρίζου έως κυανότεφρου χρώματος.

Στην περιοχή διέλευσης της σήραγγας της Καλυδώνας αναμένονται να συναντηθούν κυρίως οι σχηματισμοί των ψαμμιτών (fi.st), των εναλλαγών των ιλυολίθων και λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών (fi.sl,st) και οι σχηματισμοί των ιλυολίθων $fi.sl_2$ και $fi.sl_1$.

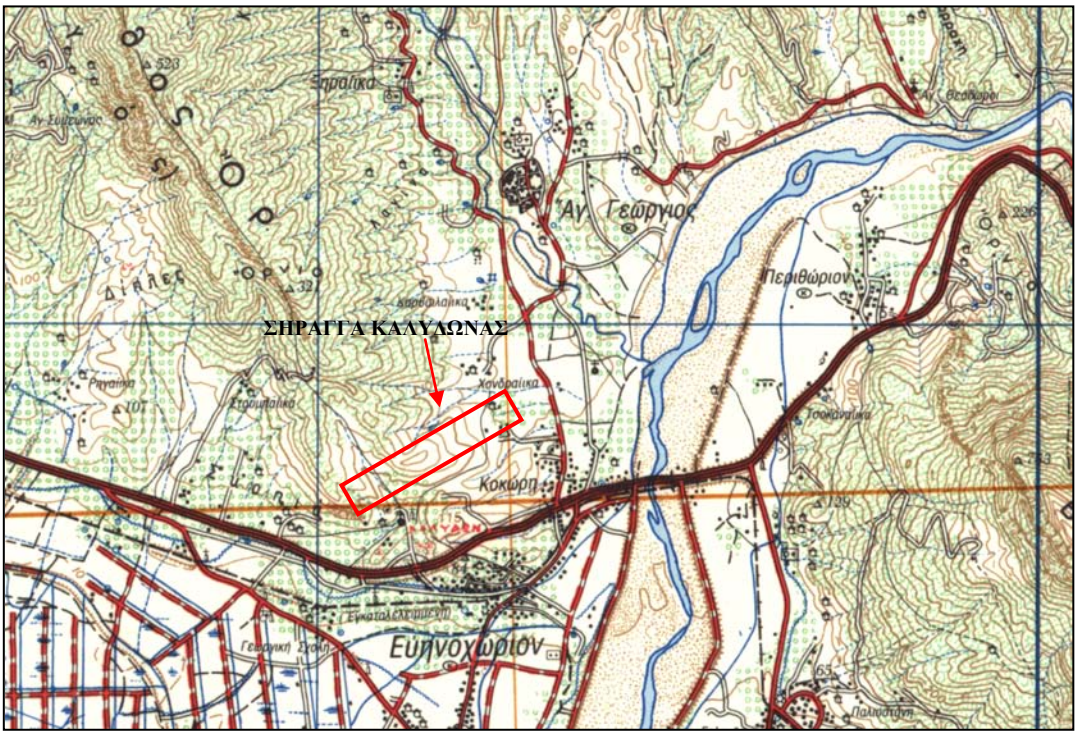


Εικονα 2.6. Στρωματογραφική στήλη και γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (1991) για την περιοχή της σήραγγας Καλυδώνας (κλ.1:50.000)

2.1.2. Σήραγγα Καλυδώνας

Το τεχνικό έργο της Σήραγγας Καλυδώνας με γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού Αιτωλοακαρνανίας και ειδικότερα βόρεια του Ευηνοχωρίου, και σε απόσταση περί τα 8Km βορειοανατολικά του Μεσολογγίου.

Η ευρύτερη περιοχή του έργου παρουσιάζεται στις παρακάτω Εικόνες 2.7, 2.8.

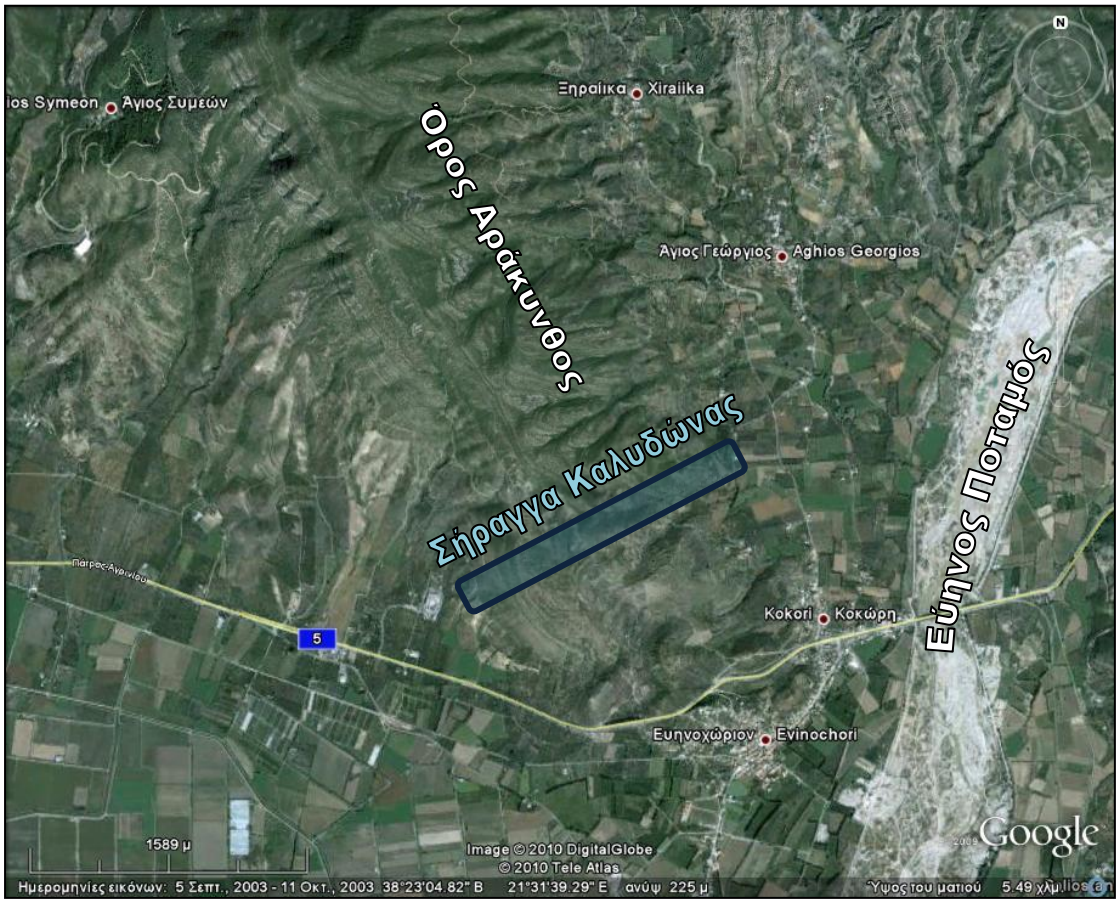


Εικονα 2.7. Απόσπασμα τοπογραφικού χάρτη ΓΥΣ (ΦΥΛΛΟ ΕΥΗΝΟΧΩΡΙ), κλίμακας 1:50.000

Η σήραγγα Καλυδώνας είναι δίδυμη και θα κατασκευαστεί στην περιοχή από χ.θ. 24+051 έως χ.θ. 25+256 του αυτοκινητοδρόμου της Ιόνιας Οδού (αριστερός κλάδος χ.θ. 24+058,05 - 25+255,56 και δεξιός κλάδος χ.θ. 24+0,51,48 - 25+241,79). Το μήκος του αριστερού κλάδου θα είναι 1178m και του δεξιού κλάδου 1167,6m. Το μέγιστο υπερκείμενο της σήραγγας θα είναι 100m περίπου.

Το απόλυτο υψόμετρο της ερυθράς της σήραγγας κυμαίνεται από 60,23m έως 49,80m για την είσοδο και την έξοδο του αριστερού κλάδου αντίστοιχα ενώ για τον δεξιό κλάδο 60,34m και 50,12m αντίστοιχα.

Για την διερεύνηση των γεωτεχνικών συνθηκών στην περιοχή, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 γεωτρήσεις με βάθη από 20m (στη περιοχή των στομίων) έως και 130m περίπου (στην περιοχή μέγιστων υπερκειμένων).



Εικονα 2.8. Δορυφορικός χάρτης της περιοχής της σήραγγας Καλυδώνας (εφαρμογή Google Earth)

Από την αξιολόγηση των γεωτεχνικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή και τη γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας προκύπτουν τα παρακάτω:

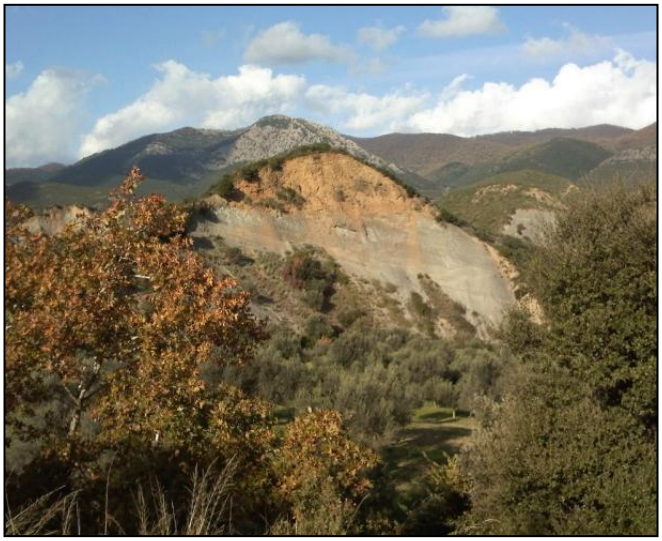
- Η περιοχή δομείται από φλύσχη, εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθου. Το ποσοστό συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στο φλύσχη διαφέρει κατά μήκος της σήραγγας. Ο σχηματισμός του φλύσχη παρουσιάζεται με διαφορετικό βαθμό κερματισμού ο οποίος όμως κυμαίνεται από μέτριο έως χαμηλό.
- Επιφανειακά συναντώνται εδαφικά υλικά (άργιλος και άμμος με χάλικες) που εμφανίζονται ως ελουβιακός μανδύας ή πλευρικά κορρήματα. Τα εδαφικά υλικά θα επηρεάσουν μόνο κατά τη διάνοιξη των στομίων όπου και δεν αναμένεται να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα λόγω του γενικότερα μικρού πάχους τους.

- Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας αναμένονται κινηματικές ασυνέχειες από την οροφή της σήραγγας λόγω της εγγενούς ετερογένειας και της ρωγμάτωσης του φλύσχη. Προβλήματα συγκλήσεων δεν αναμένονται λόγω των υψηλών μηχανικών παραμέτρων και του ψαμμίτη αλλά και του ιλυολίθου.
- Στη διεπιφάνεια του υδροπερατού ψαμμίτη με τον αδιαπέρατο ιλυόλιθο αναμένεται συγκέντρωση υδάτων στο επίπεδο της σήραγγας, η ποσότητα των οποίων δεν προβλέπεται να είναι τέτοια ώστε να χρειαστεί να παρθούν ειδικά μετρά, πέρα των συνήθων.

Σημείωση: Κάποια από τα παραπάνω στοιχεία ενδέχεται να έχουν αλλάξει μέχρι την ημερομηνία παράδοσης της παρούσας εργασίας, αφού το τεχνικό βρίσκεται ακόμα σε φάση εκσκαφής.

2.1.3. Φωτογραφικό υλικό από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας και της ευρύτερης περιοχής

Έγιναν διαδοχικές επισκέψεις στη σήραγγα Καλυδώνας για την επιλογή κατάλληλου υλικού για τις εργαστηριακές δοκιμές. Στη συνέχεια παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από το εργοτάξιο της σήραγγας καθώς και από την ευρύτερη περιοχή της Καλυδώνας:



Εικονα 2.9. Μετάβαση από τον υπερκείμενο ψαμμίτη στον σχηματισμό του ιλυολίθου σε πρανή κοντά στον οικισμό Ξυραίικα, ΒΑ του όρους Αράκινθος

Εικονα 2.10. Άποψη των ανατολικών στομίων της σήραγγας Καλυδώνας

Εικονα 2.11. Άποψη των ανατολικών στομίων της σήραγγας Καλυδώνας

Εικονα 2.12. Μετάβαση από τον αποσαθρωμένο, επιφανειακό, καστανό, ψαμμίτη στον υγιή τεφρό

Εικονα 2.13. Μεταλλότυπος για τη σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας

Εικονα 2.14. Αποθεσιοθάλοαμος παραπλεύρως του μετώπου της σήραγγας

Εικονα 2.15. Υλικά εκσκαφής της σήραγγας Καλυδώνας

Εικονα 2.16.Ιλυόλιθος με λεπτές και πυκνές εντρώσεις ψαμμίτη

Εικονα 2.17.Τεμάχη ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη και τεμάχη ψαμμίτη από τα υλικά εκσκαφής της σήραγγας

2.2. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ψαμμίτης και ιλυόλιθος από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας η οποία βρισκόταν στη φάση εκσκαφής κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η δειγματοληψία έγινε από το ανατολικό στόμιο όπου είχε ξεκινήσει η διάτρηση της σήραγγας.

Μετά από διαδοχικές επισκέψεις στο εργοτάξιο, έγινε επιλογή τεμαχών άρρηκτου ψαμμίτη και ιλυολίθου καθώς και τεμάχη λεπτοστρωματώδους άρρηκτου φλύσχη από τα πιο προσφάτως εκσκαφέντα υλικά της σήραγγας, και μεταφορά τους στο εργαστήριο για την επεξεργασία και μόρφωση δοκιμίων, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Για τον ιλυόλιθο χρησιμοποιήθηκαν επίσης πυρήνες από τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή.

Ακολουθεί η μακροσκοπική περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

2.2.1. Ψαμμίτης

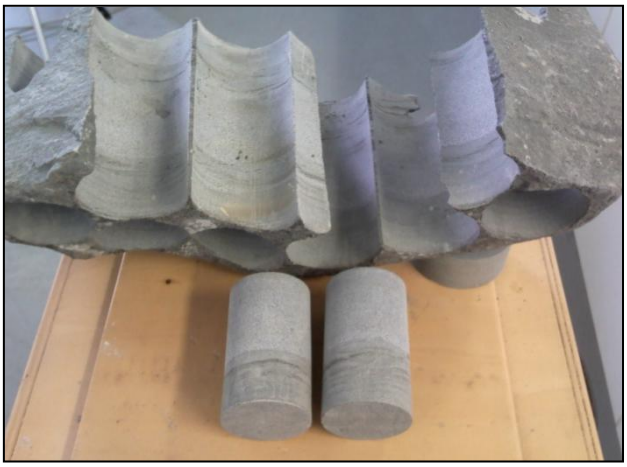
Ο ψαμμίτης που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν τεφρού χρώματος, μεσόκοκκος έως χονδρόκοκκος, υγιής και δεν παρουσιάζει ανισοτροπία.

Εικονα 2.18.Τέμαχος ψαμμίτη όπως μεταφέρθηκε από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας προς επεξεργασία

Εικονα 2.19.Τέμαχος άρρηκτου ψαμμίτη και δοκίμια μετά από διάτρηση και κοπή

Τοπικά εμφανιζόταν ίχνη ιλυολίθου στην καθ' όλα συμπαγή μάζα του πετρώματος τα οποία δεν ξεπερνούσαν σε περιεκτικότητα το 1-2% του δοκιμίου.

Στις παρειές των τεμαχών που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για δειγματοληψία, παρειές οι οποίες ήταν στην ουσία το σύνορο του ψαμμιτικού από το ιλυολιθικό πάγκο στον ευρύτερο σχηματισμό του φλύσχη, παρατηρείται μείωση του κόκκου του ψαμμίτη και αλλαγή χρώματος, από τεφρό σε σκούρο τεφρό, πράγμα που υποδήλωνε αυξημένη συμμετοχή του ιλυολιθικού υλικού και γενικότερη απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών (Εικονα 2.20).



Εικονα 2.20.Αλλαγή της μορφής του υλικού στις παρειές των τεμαχών ψαμμίτη

2.2.2. Ιλυόλιθος

Ο ιλυόλιθος είναι χρώματος τεφροπράσινου έως σκούρου τεφρού, γενικά ομογενής, συμπαγής και χωρίς κάποια ένδειξη ανισοτροπίας. Παρουσιάζει ευαισθησία στο νερό και με την αύξηση της υγρασίας εμφανίζει αυξημένη πλαστικότητα, κάποια διόγκωση και γενικότερα απώλεια βραχώδους δομής. Η ευαισθησία αυτή γνωστή ως «slaking» και αναμενόμενη στα ιλυολιθικά υλικά, δυσκόλευε πολύ στη διάτρηση και την επεξεργασία του δοκιμίου. Τοπικά εμφανίζονταν στρώσεις ψαμμίτη μέσα στο τέμαχος του ιλυολίθου, με μικρή εμμονή και συνέχεια στο χώρο. Το τμήμα του δοκιμίου με τη ψαμμιτική στρώση αποκοπτόταν και απορριπτόταν όπως θα αναφερθεί σε επόμενη παράγραφο. Εκτός από δοκίμια που προέκυπταν από διάτρηση των τεμαχών που μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, χρησιμοποιήθηκαν επίσης πυρήνες γεωτρήσεων διαμέτρου 62-63mm.

Εικονα 2.21. Τέμαχος ιλυολίθου με τις οπές διάτρησης

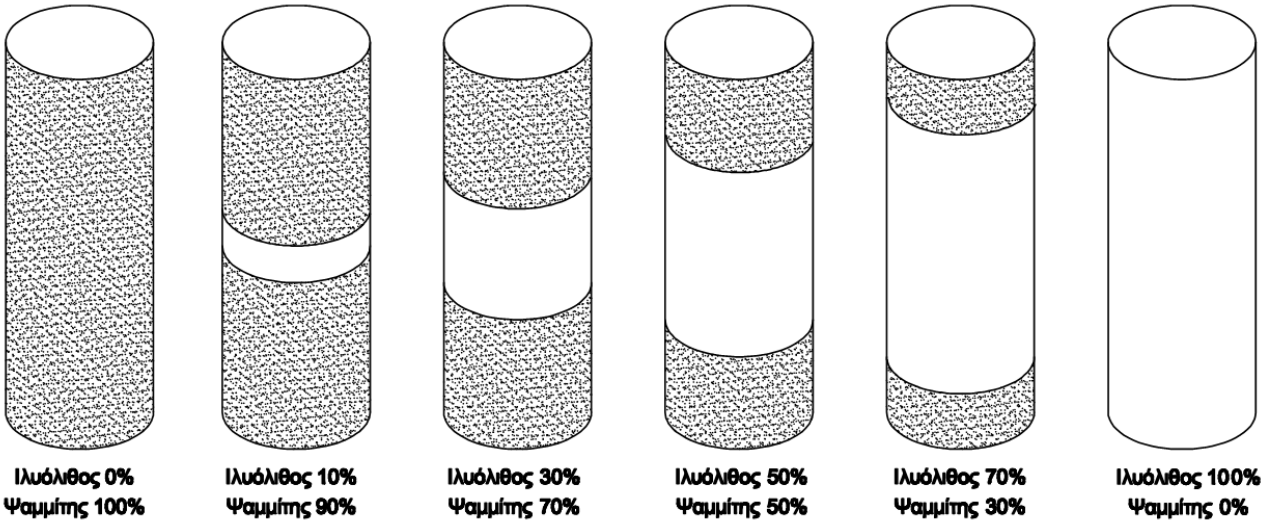
Εικονα 2.22. Δοκίμιο ιλυολίθου από γεώτρηση

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

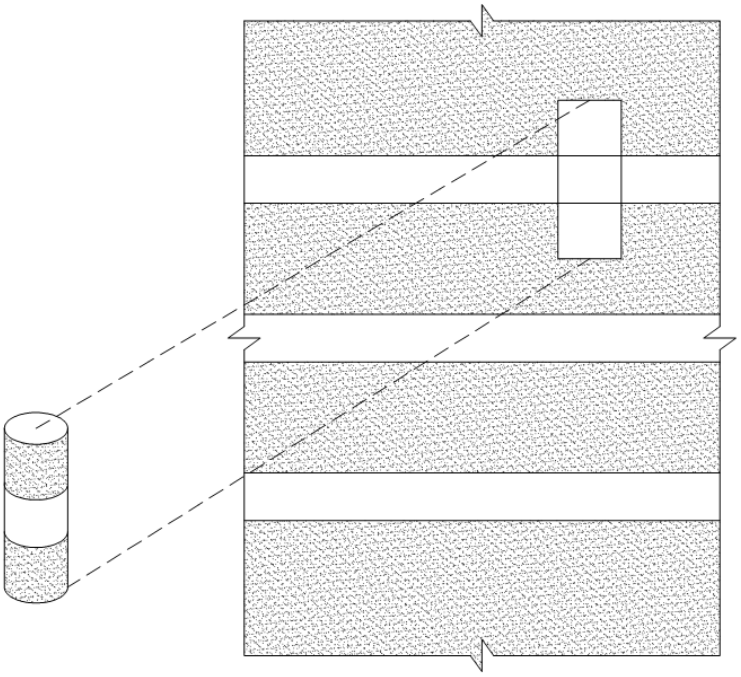
3.1. ΓΕΝΙΚΑ - ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της εργαστηριακής μεθόδου που εφαρμόσθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η διερεύνηση των μηχανικών παραμέτρων της ετερογενούς βραχόμαζας του φλύσχη στο εργαστήριο.

Για την προσομοίωση της ετερογενούς βραχόμαζας κατασκευάστηκαν τεχνητά ετερογενή δοκίμια που αποτελούνταν από διαφορετικά τμήματα ψαμμίτη και ιλυολίθου. Τα τμήματα αυτά μορφώνονταν με διαφορετικά πάχη έτσι ώστε να προσομοιαστούν τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών στη φύση (εικόνες 3.1, 3.2).



Εικονα 3.1. Ομογενή και τεχνητά ετερογενή δοκίμια με διάφορα ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών



Εικονα 3.2. Προσομοίωση του φλύσχη με το εργαστηριακό σύνθετο δοκίμιο για ποσοστό ιλυολίθου 30%

Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής και έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί λεπτομερώς η εργαστηριακή μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την διενέργεια των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γενικά μέθοδος έχει ως εξής:

- Επιλογή και μεταφορά τεμαχών άρρηκτου πετρώματος από τη περιοχή ενδιαφέροντος στο εργαστήριο
- Διάτρηση πυρήνων ψαμμίτη και ιλυολίθου
- Κοπή των εδρών των δοκιμίων ψαμμίτη και ιλυολίθου
- Λείανση των εδρών ψαμμίτη και ιλυολίθου
- Μόρφωση του σύνθετου δοκιμίου
- Εγκατάσταση της διάταξης των δοκιμών
- Εκτέλεση δοκιμών
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Όλες οι εργασίες που αναφέρονται παραπάνω και θα αναλυθούν παρακάτω πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής» του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

3.2. ΠΕΡΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

3.2.1. Δειγματοληψία-Προετοιμασία Δοκιμίων

Η δειγματοληψία αποτελεί έναν αδιαμφισβήτητα σημαντικό παράγοντα τόσο για την εγκυρότητα όσο και για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα λάβουμε από τις δοκιμές. Επιβάλλεται λοιπόν ιδιαίτερη προσοχή και εμπειρία στην αναζήτηση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τη μάζα του πετρώματος καθώς και στην επεξεργασία αυτών. Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις καθώς και η δειγματοληψία στο εργαστήριο θα πρέπει να διασφαλίζουν τη λήψη εδαφικών και βραχωδών δειγμάτων πολύ καλής ποιότητας. Τα δείγματα αυτά θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα, από πλευράς σύστασης, δομής και περιεχόμενης υγρασίας, τη φυσική κατάσταση των υπεδαφικών στρωμάτων από τα οποία προέρχονται.

Επειδή η βραχόμαζα, στην έκταση που ενδιαφέρει, είναι κατά κανόνα ανομοιογενής, τα δείγματα που θα ληφθούν από μία θέση είναι πολύ πιθανόν να διαφέρουν σημαντικά από εκείνα μιας άλλης θέσεως μέσα στην ίδια γεωλογική ενότητα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δειγματοληψία πρέπει να περιλαμβάνει δείγματα από πολλές θέσεις της ίδιας μάζας, ιδιαίτερα όταν τα χαρακτηριστικά αυτής διαφοροποιούνται σημαντικά στην συνολική της έκταση.

Οι θέσεις δειγματοληψίας πρέπει να καθορίζονται κατόπιν προσεκτικής μακροσκοπικής λιθολογικής εξετάσεως της μάζας του πετρώματος. Οι περιοχές όπου παρατηρούνται ορυκτολογικές διαφορές, διαφορές στην φύση του συνδετικού υλικού ή διαφορές στο βαθμό εξαλλοιώσεως ή του χρώματος του πετρώματος, αποτελούν τις κατάλληλες για δειγματοληψία περιοχές. Ακόμη κατά την μακροσκοπική αυτή εξέταση επισημαίνεται η παρουσία διακλάσεων, ρωγμών και άλλης μορφής ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος και αναλόγως λαμβάνονται δείγματα με ασυνέχειες ή χωρίς αυτές. Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το πέτρωμα πλησίον μεταπτώσεων και πτυχών παρουσιάζει διαφορές ως προς τις μηχανικές ιδιότητές του σε σχέση με το υπόλοιπο της μάζα του. Συνεπώς πρέπει να σημειώνεται όχι μόνον η θέση δειγματοληψίας, αλλά και η τυχόν γειτονία του δείγματος με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά του πετρώματος.

Γενικά ο τρόπος δειγματοληψίας εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα των δειγμάτων η οποία καθορίζεται και από τη δυνατότητα εκτέλεσης αξιόπιστων εργαστηριακών δοκιμών στις οποίες υποβάλλονται τα δοκίμια.

Επι τόπου δειγματοληψία

Συνήθως η δειγματοληψία των πετρωμάτων επί τόπου, γίνεται με γεωτρύπανο περιστροφικού τύπου με τη χρήση ειδικών δειγματοληπτών (διπλού ή τριπλού τοιχώματος) με κοπτικό άκρο από διαμάντια ή βίδια. Κατά την περιστροφή του δειγματολήπτη χρησιμοποιείται σαν ψυκτικό μέσο και για την απαγωγή των θραυσμάτων κυρίως νερό.

Τα δείγματα πετρωμάτων, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται γεωτρύπανο, εξορύσσονται από την μάζα του πετρώματος σε ογκόλιθους μορφής κύβου (κυβόλιθοι). Στην περίπτωση μαλακών πετρωμάτων η εξόρυξη μπορεί να γίνει εύκολα με την βοήθεια κατάλληλου κοπτήρα. Καμία φορά χρησιμοποιούνται εκρηκτικά για την εξόρυξη των ογκολίθων αυτών. Στην τελευταία όμως αυτή περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο όγκος του πετρώματος έχει ήδη υποβληθεί σε μία δυναμική εντατική κατάσταση, που ενδεχομένως να έχει προκαλέσει την δημιουργία ή την επέκταση υφιστάμενων μικρορωγμών στο πέτρωμα. Δειγματοληψία, εξ άλλου, σε βάθος μπορεί να πραγματοποιηθεί ταχύτατα με την εκτέλεση δειγματοληπτικών ερευνητικών γεωτρήσεων με αδαμαντογεωτρύπανο.

Η θέση από την οποία λαμβάνεται το δείγμα καθώς και ο ακριβής προσανατολισμός του σημειώνονται πάντοτε επάνω στο δείγμα κατά τρόπο σαφή, ούτως ώστε να μπορεί να επανατοποθετηθεί το δείγμα στην φυσική του θέση. Με αύξοντα αριθμό ή με άλλο τρόπο σημειώνονται επίσης στο δείγμα τα χαρακτηριστικά αναγνωρίσεώς του.

Κατά την μεταφορά των δειγμάτων λαμβάνονται ορισμένα μέτρα προστασίας των για να μην θραυσθούν, ενώ στο εργαστήριο προστατεύονται μέχρι να χρησιμοποιηθούν από όλους τους παράγοντες εκείνους, που μπορεί να προκαλέσουν αλλοιώσεις σε αυτά.

Δειγματοληψία στο εργαστήριο

Η δειγματοληψία στο εργαστήριο εκτελείται ακλουθώντας σε γενικές γραμμές τις αρχές που περιγράφηκαν παραπάνω με τη μόνη διαφορά ότι τα δοκίμια εξορύσσονται από κάποιο τέμαχος πετρώματος που έχει μεταφερθεί στο εργαστήριο.

Η συλλογή των τεμαχών αυτών πρέπει να γίνεται από αντιπροσωπευτικές θέσεις της βραχόμαζας και η μεταφορά τους να εκτελείται με προσοχή έτσι ώστε να μην γίνεται καταπόνηση του γεωυλικού καθώς και να αποφεύγεται και η απώλεια υγρασίας. Συνίσταται γενικά, και επιβάλλεται στα υλικά με ευαισθησία στις εναλλαγές υγρασίας πχ. ο ιλυόλιθος, να καλύπτονται με πλαστική μεμβράνη ή ακόμα καλύτερα να εμβαπτίζονται σε παραφίνη.

Η πυρηνοληψία από το βραχώδες τέμαχος πραγματοποιείται με περιστροφική εργαστηριακή καροταρία και το σύνηθες ψυκτικό μέσο είναι το νερό.

Η δειγματοληψία, η επεξεργασία των δειγμάτων καθώς και οι κατάλληλες δοκιμές, θα πρέπει να πραγματοποιείται το συντομότερο δυνατό από την παραλαβή των δειγμάτων στο εργαστήριο.

3.2.2. Προετοιμασία – Επεξεργασία δοκιμίων

Από τα βραχώδη τεμάχη ή τους πυρήνες των γεωτρήσεων πρέπει να παρασκευασθούν δοκίμια για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων. Τα δοκίμια, που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές είναι:

1. Κανονικά, που είναι κυλινδρικής και σπανιότερα κυβικής μορφής.
2. Ακανόνιστα.
3. Ειδικής μορφής.

Συνήθως οι μηχανικές ιδιότητες σε βραχώδες υλικό προσδιορίζονται σε κυλινδρικά δοκίμια. Τυπικές διάμετροι είναι μεταξύ 50 – 75mm. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται διάμετροι μέχρι 100 ή 150mm. Τα κυλινδρικά δοκίμια λαμβάνονται, όπως προαναφέρθηκε στο ύπαιθρο με συνηθισμένο αδαμαντογεωτρύπανο, στο εργαστήριο δε με εργαστηριακό αδαμαντογεωτρύπανο λεπτού τοιχώματος (καροταρία).

Τα δείγματα χωρίζονται σε διάφορα τεμάχη ανάλογα με τον τόπο προέλευσης τους. Στην συνέχεια, το κάθε τέμαχος τοποθετείται στην εργαστηριακή καροταρία και πραγματοποιείται η πυρηνοληψία. Από κάθε τέμαχος άρρηκτου βράχου γίνεται προσπάθεια να εξαχθούν όσο περισσότερα δοκίμια είναι δυνατόν με στόχο βεβαίως την καλύτερη στατιστική περιγραφή των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού.

Τα δείγματα μορφής πυρήνα, που προέκυψαν από το πέτρωμα ελέγχονται στην συνέχεια μακροσκοπικά και μετά αποκόπτονται με αδαμαντοτροχό σε κατάλληλα μήκη ανάλογα με την επιθυμητή σχέση L/D.

Για κάθε εργαστηριακή δοκιμή, το δείγμα πρέπει μορφώνεται με συγκεκριμένες διαστάσεις και αναλογίες διαστάσεων έτσι ώστε να τηρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές των πρότυπων δοκιμών βραχομηχανικής (Ε 103-84, ASTM, ISRM). Περισσότερες λεπτομέρειες για την απαιτούμενη διάσταση των δοκιμίων για τις πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές Βραχομηχανικής δίνονται στην Παράγραφο 3.2.1 καθώς και στο Παράρτημα Α.

Κατά την κοπή με τον αδαμαντοτροχό, μικρά τμήματα του δοκιμίου αρχίζουν να αποκολλούνται κατά την διεύθυνση κυρίως της σχιστότητας. Για το λόγο αυτό τα δοκίμια πρέπει να κοπούν με μικρές σχετικά ταχύτητες και να τοποθετηθούν σωστά στην μηχανή κοπής.

Την κοπή ακολουθεί προσεκτική λείανση της μεν κυλινδρικής επιφάνειας, εάν είναι αναγκαία, σε τόρνο, των δε βάσεων σε δίσκο λειάνσεως. Σ' ένα ιδανικό δοκίμιο οι βάσεις πρέπει να είναι τελείως παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες προς τον μεγάλο άξονα του δοκιμίου.

Σημειώνεται τέλος ότι, κατά την λήψη των κυλινδρικών δοκιμίων από το δείγμα με το αδαμαντογεωτρύπανο, αντί νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ψύξη του κοπτικού άκρου και την απαγωγή των θραυσμάτων πεπιεσμένος αέρας στα πετρώματα εκείνα, που επηρεάζονται από το νερό. Στην περίπτωση αυτή η διάτρηση είναι βραδύτερη και χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή.

Η αναλυτική περιγραφή της προετοιμασίας των δοκιμίων στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών

Μηχανικών Ε.Μ.Π. με τη λεπτομερή παρουσίαση των συσκευών και μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των ομοιογενών αλλά και των ετερογενών δοκιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν στις Παραγράφους 3.3 και 3.4.

3.2.3. Απαιτούμενος Αριθμός Δοκιμίων

Ανεξάρτητα από την προσοχή που δόθηκε για την ετοιμασία του δοκιμίου και την αυστηρή συμμόρφωση προς την πειραματική διαδικασία, η δοκιμή ενός ή δύο δοκιμίων από ένα δείγμα και στην πιο απλή πειραματική μέθοδο προσδιορισμού μιας μηχανικής ιδιότητας του πετρώματος δεν δίνει ικανοποιητικό αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα. Οι αποκλίσεις, που παρατηρούνται στα πετρώματα είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των τεχνιτών δομικών υλικών ή των μετάλλων, γιατί εκτός από τις συνήθεις πειραματικές αποκλίσεις ενυπάρχουν επιπρόσθετοι παράγοντες σφαλμάτων, που προκύπτουν από το γεγονός ότι:

1) Η γεωμετρία του δοκιμίου δεν μπορεί να φθάσει σε τελειότητα εκείνη των δοκιμίων των τεχνικών υλικών και
2) Από την δομή του πετρώματος, που εκτός από λίγες εξαιρέσεις, λόγω της παρουσίας μικροασυνεχειών, δεν μπορεί να πλησιάσει την ομοιογένεια των τεχνικών υλικών.

Εάν συνεπώς απαιτείται σε ένα πέτρωμα πολύ υψηλή προσέγγιση προς την πραγματική τιμή μιας μηχανικής του ιδιότητας, τότε ο αριθμός των δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να αυξηθεί τόσο ώστε ο προσδιορισμός της ζητούμενης ιδιότητας να επιτύχει την απαιτούμενη στατιστική ακρίβεια.

Για τον περιορισμό όμως του κόστους και του χρόνου των δοκιμών, χωρίς να μειωθεί η ζητούμενη αξιοπιστία των πειραματικών αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να καθορισθεί ένας ελάχιστος για κάθε περίπτωση αριθμός δοκιμίων που πρέπει να δοκιμασθούν. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από την διασπορά των πειραματικών τιμών σε σχέση προς την μέση τιμή και από την επιθυμητή ακρίβεια.

Η διασπορά εξαρτάται με την σειρά της από την ανομοιογένεια του πετρώματος και από το μέγεθος του δοκιμίου. Τα μικρά δοκίμια δίνουν την μεγαλύτερη διασπορά.

Συνεπώς, όταν χρησιμοποιούνται για δοκιμές στο εργαστήριο μικρών διαστάσεων δοκίμια, ο αριθμός τους πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος.

Ικανοποιητική μαθηματική σχέση, που να καθορίζει για κάθε περίπτωση τον απαιτούμενο αριθμό των υπό δοκιμή δειγμάτων δεν υπάρχει και εξαρτάται από την εμπειρία και την κατάρτιση του μελετητή να προσδιορίσει την επιθυμητή ακρίβεια που πρέπει να απαιτήσει.

3.2.1. Εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής

3.2.1.1. Γενικά

Οι εργαστηριακές δοκιμές στη βραχομηχανική έχουν ως σκοπό τον προσδιορισμό τόσο των φυσικών όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων του βραχώδους υλικού, η γνώση των οποίων θεωρείται απαραίτητη για την εκτέλεση ενός τεχνικού έργου. Αυτές είναι δυνατόν να χωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες:

1) Δοκιμές που έχουν σαν αντικείμενο τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του βραχώδους υλικού. Με τον όρο φυσική ιδιότητα προσδιορίζεται το χαρακτηριστικό γενικό γνώρισμα ενός σώματος στη φυσική του συμπεριφορά. Στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής έγινε προσδιορισμός της πυκνότητας και του ειδικού βάρους του πετρώματος με τη χρήση μικρομέτρου και ζυγού.

2) Δοκιμές που έχουν σαν αντικείμενο τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του βραχώδους υλικού. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής είναι η εξής:

- Προσδιορισμός ταχύτητας διάδοσης υπερήχων Vp και Vs, και μέσω αυτών εύρεση των δυναμικών παραμέτρων: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_D), λόγος Poisson (v_D), μέτρου διάτμησης (G_D).

3) Δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των μηχανικών παραμέτρων του βραχώδους υλικού. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μηχανικών παραμέτρων στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής είναι οι εξής:
   - Προσδιορισμός της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη.
   - Προσδιορισμός του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας Young.

3.2.1.2. Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας δειγμάτων πετρώματος

Πορώδες

Το πορώδες (n), είναι ο λόγος του όγκου των κενών (δηλαδή πόρων, μικρορωγμών κ.λπ.) προς το συνολικό όγκο του πετρώματος εκφρασμένος επί της εκατό (%). Το πορώδες έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται με το γράμμα "n".

$$n = \frac{V_u}{V_t} 100 \ (\%)$$

Όπου: V_t ο συνολικός όγκος του δείγματος

V_u ο όγκος των πόρων

Πυκνότητα

Η πυκνότητα (ρ), ορίζεται σαν ο λόγος της συνολικής μάζας προς το συνολικό όγκο του πετρώματος και παρουσιάζει δύο θεωρητικά ακραίες περιπτώσεις:

- την κορεσμένη πυκνότητα (ρsat) που είναι ο λόγος της μάζας του κορεσμένου πετρώματος προς το συνολικό του όγκο και εκφράζεται σε Mg/m3.

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_u \cdot \rho_w}{V_t}$$

Όπου: M_s η μάζα του στερεού

ρ_w η πυκνότητα του νερού ($\approx 10 \frac{kN}{m^3} = 1 \frac{Mg}{m^3} = 1 \frac{ton}{m^3}$)

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

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

Το φαινόμενο βάρος (γ_b) έχει πρακτικά παρόμοια σημασία, εκφράζεται σε kN/m^3 και ισχύει: $\gamma_b = \rho \cdot g$.

Το πορώδες και η πυκνότητα εξαρτώνται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων, καθώς και από τις διεργασίες που επιτελούνται μετά

τη γένεσή τους (διαγένεση, αποσάθρωση - εξαλλοίωση). Αύξηση της πυκνότητας σημαίνει γενικά μείωση του πορώδους των πετρωμάτων και η σχέση των δύο αυτών φυσικών παραμέτρων είναι γραμμική και αντίστροφη. Τόσο η πυκνότητα όσο και το πορώδες, επηρεάζουν άμεσα τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων. Παρατηρείται αύξηση των παραμέτρων αντοχής του ακέραιου πετρώματος όταν αυξάνεται η πυκνότητά του. Επίσης αύξηση του πορώδους επιφέρει μείωση της αντοχής του ακέραιου πετρώματος.

Οι πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού του πορώδους παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

3.2.1.3. Προσδιορισμός των δυναμικών παραμέτρων – Δοκιμή διάδοσης υπέρηχων κυμάτων

Όταν τα ηχητικά κύματα διέρχονται διαμέσου ενός υλικού υφίστανται ελάττωση της έντασής τους, καθόσον μέρος της ενέργειάς τους μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας. Έτσι, κύμα με ένταση J_0, διερχόμενο διαμέσου υλικού πάχους *l*, εξέρχεται με μειωμένη ένταση J που δίνεται από την σχέση: $J = J_0 e^{-\mu l}$, δηλαδή η ένταση του κύματος ελαττώνεται εκθετικά με το πάχος (*l*) του υλικού. Ο συντελεστής *μ* καλείται συντελεστής εξασθένησης και εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη συχνότητα του κύματος.

Η μέθοδοι μετάδοσης υπέρηχων κυμάτων είναι μη καταστροφικές, εύκολες στην εφαρμογή και γρήγορες δοκιμές βραχομηχανικής, κατάλληλες για το εργαστήριο αλλά και για το εργοτάξιο. Η ταχύτητα των υπερήχων είναι στενά συνδεδεμένη με τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και η μέτρηση της σε δοκίμια βραχόμαζας μας φανερώνει πολύτιμες πληροφορίες για την υφή και δομή αυτής.

Με βάση τους *Yasar & Erdogan (2004) ο*ι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων σε βραχώδη δοκίμια είναι οι παρακάτω:

1. Ο τύπος του βραχώδους υλικού
2. Η ορυκτολογική του σύσταση

3. Η υφή
4. Η δομή
5. Το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων
6. Η πυκνότητα
7. Το πορώδες
8. Η ανισοτροπία
9. Το νερό των πόρων
10. Πλευρικές και αξονικές πιέσεις
11. Θερμοκρασία
12. Ο βαθμός αποσάθρωσης
13. Οι ιδιότητες των ασυνεχειών (τραχύτητα, υλικό πλήρωσης, κτλ.)

Η παραπάνω ταξινόμηση έχει γίνει τυχαία και όχι με αύξουσα ή φθίνουσα σειρά επιρροής, και αυτό γιατί σε κάθε περίπτωση μέτρησης κυριαρχεί και κάποιο χαρακτηριστικό γνώρισμα που ορίζει τη διακύμανση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων. Π.χ. σε ένα πέτρωμα με ασυνέχειες, η ταχύτητα θα καθοριστεί σύμφωνα με τις ιδιότητες των ασυνεχειών αυτών και δευτερευόντως από τη δομή ή το μέγεθος των κόκκων. Στο ίδιο πέτρωμα όμως, υπό την επήρεια υψηλών αξονικών και πλευρικών τάσεων (όπου υπάρχει κλείσιμο των ρωγμών), ο κύριος παράγοντας μπορεί να είναι η υφή και η δομή του. Αντίθετα σε δοκίμιο ακέραιου πετρώματος μεγάλη σημασία θα έχει η ανισοτροπία ή η ορυκτολογική σύσταση συγκριτικά με την επιρροή των μικρορωγμών που μπορεί να υπάρχουν.

Η επιρροή των παραπάνω παραμέτρων είναι εν μέρει πολύπλοκη, υπάρχουν όμως κάποιες γενικές συσχετίσεις που προκύπτουν από πλήθος δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και από τις εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Η μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων δια μέσου του ακέραιου πετρώματος πραγματοποιείται με μία απλή μεθοδολογία που προβλέπει στο ένα άκρο ενός πυρήνα του ακέραιου πετρώματος την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που δημιουργεί τα κύματα υπερήχων, τα οποία λαμβάνονται από το άλλο άκρο με δέκτη και μετριέται έτσι άμεσα ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων P και S που διατρέχουν τον πυρήνα. Με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων Vs και Vp μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν

α) το μέτρο διάτμησης (G_D),

β) το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_D) και

γ) ο λόγος του Poisson (ν_D), με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_D), που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση, διαφέρει από το στατικό μέτρο ελαστικότητας (E_{ST}) του ακέραιου πετρώματος, που υπολογίζεται από τις καμπύλες τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων κατά την εκτέλεση της δοκιμής σε μοναξονική θλίψη με παράλληλη μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων (βλέπε Παραγραφο 2.5.2.1). Οι Κούκης και Σμαπατακάκης (2002) αναφέρουν ότι γενικά ισχύει:

$$E_D = K \cdot E_{ST}$$

Όπου: K, συντελεστής που συνήθως κυμαίνεται από 1 μέχρι 3.

Σημείωση: Η πρότυπη δοκιμή μετάδοσης υπερήχων στο εργαστήριο παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

3.2.1.4. Προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Η αντοχή είναι πολύ βασική μηχανική ιδιότητα του ακέραιου πετρώματος και αντιπροσωπεύει το μέγεθος της εφαρμοζόμενης σε αυτό τάσης, ώστε να σημειωθεί θραύση αυτού. Η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι θλιπτική ή εφελκυστική, οπότε σημειώνονται και οι αντίστοιχες αντοχές. Από αυτές, η θλιπτική αντοχή είναι η πλέον σημαντική και μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα ή έμμεσα με τη χρήση διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών.

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του ακέραιου πετρώματος γίνεται στο εργαστήριο, άμεσα, με τη δοκιμή σε μοναξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη και έμμεσα

στο εργαστήριο ή στο ύπαιθρο με τη δοκιμή σε σημειακή φόρτιση, όπου υπολογίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης (Is_{50}) ή με τη χρήση της σφύρας Schmidt τύπου L.

Η αντοχή σε μοναξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που κυρίως έχουν σχέση με (*Hawkes & Mellor, 1970*):

1. Το υλικό του πετρώματος δηλαδή την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, την ανισοτροπία μικρής κλίμακας (π.χ. σχιστότητα) κ.λπ.
2. Την περιεχόμενη υγρασία του
3. Τις συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής και τη διαμόρφωση των δειγμάτων (δηλαδή λόγος μήκους - διαμέτρου του δοκιμίου, ρυθμός φόρτισης, παραλληλία βάσεων δοκιμίου κ.λπ.).

Από συσχετίσεις αποτελεσμάτων αντοχής σε μοναξονική θλίψη (σ_c) με άλλες παραμέτρους του βραχώδους υλικού φαίνεται ότι:

- Αύξηση της πυκνότητας σημαίνει αύξηση της αντοχής
- Αύξηση του πορώδους σημαίνει μείωση της αντοχής
- Αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας προκαλεί μείωση της αντοχής. Δοκίμια ακέραιου πετρώματος που έχουν ξηρανθεί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτά που έχουν κάποια περιεχόμενη υγρασία.

Η εφελκυστική αντοχή (σ_t) των πετρωμάτων είναι από τις λιγότερο συχνά προσδιοριζόμενες μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων αφού στις εφαρμογές χρησιμοποιείται συνήθως η αντοχή σε μοναξονική θλίψη. Είναι γενικά μικρότερη της αντοχής σε μοναξονική θλίψη και εκτιμάται ότι η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος αποτελεί το 5-10% της αντοχής του σε μοναξονική θλίψη [Hendron, 1982].

Η μηχανική αντοχή που αναφέρεται σε μοναξονικές συνθήκες, δηλαδή επίδραση μόνο αξονικής τάσης (σ_1) χωρίς την ύπαρξη πλευρικών (σ_2 και σ_3) στο πέτρωμα, στις πραγματικές συνθήκες είναι πολύ δύσκολη περίπτωση να συμβεί. Και αυτό διότι το βραχώδες υλικό υποβάλλεται σε πλευρικές τάσεις οι οποίες βέβαια θεωρούνται συνήθως ίσες μεταξύ τους και θεωρητικά αντικαθίστανται από μία ομοιόμορφα πλευρικά εξασκούμενη (σ_3). Οι συνθήκες αυτές προσομοιάζονται με την εκτέλεση κλασσικών τριαξονικών δοκιμών στο ακέραιο πέτρωμα, όπου με την εφαρμογή του κριτηρίου θραύσης Mohr-Coulomb (όπως και στα εδάφη) εκτιμώνται οι παράμετροι

διατμητικής αντοχής του βραχώδους υλικού (δηλαδή η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής).

Γενικότερα είναι πιθανό και αναμενόμενο να παρουσιαστεί σημαντικό εύρος παραμέτρων αντοχής ακόμα και για το ίδιο πέτρωμα πράγμα που οφείλεται σε παράγοντες που έχουν σχέση με τη φυσική κατάσταση των δειγμάτων (π.χ. βαθμός αποσάθρωσης, ύπαρξη μικρορωγμών κ.λπ.), το βαθμό διαγένεσής τους, τη μεταβαλλόμενη ορυκτολογική σύσταση καθώς επίσης και την πιθανή ανισοτροπία.

Σημείωση: Η πρότυπη εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού της μονοαξονικής θλίψης περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

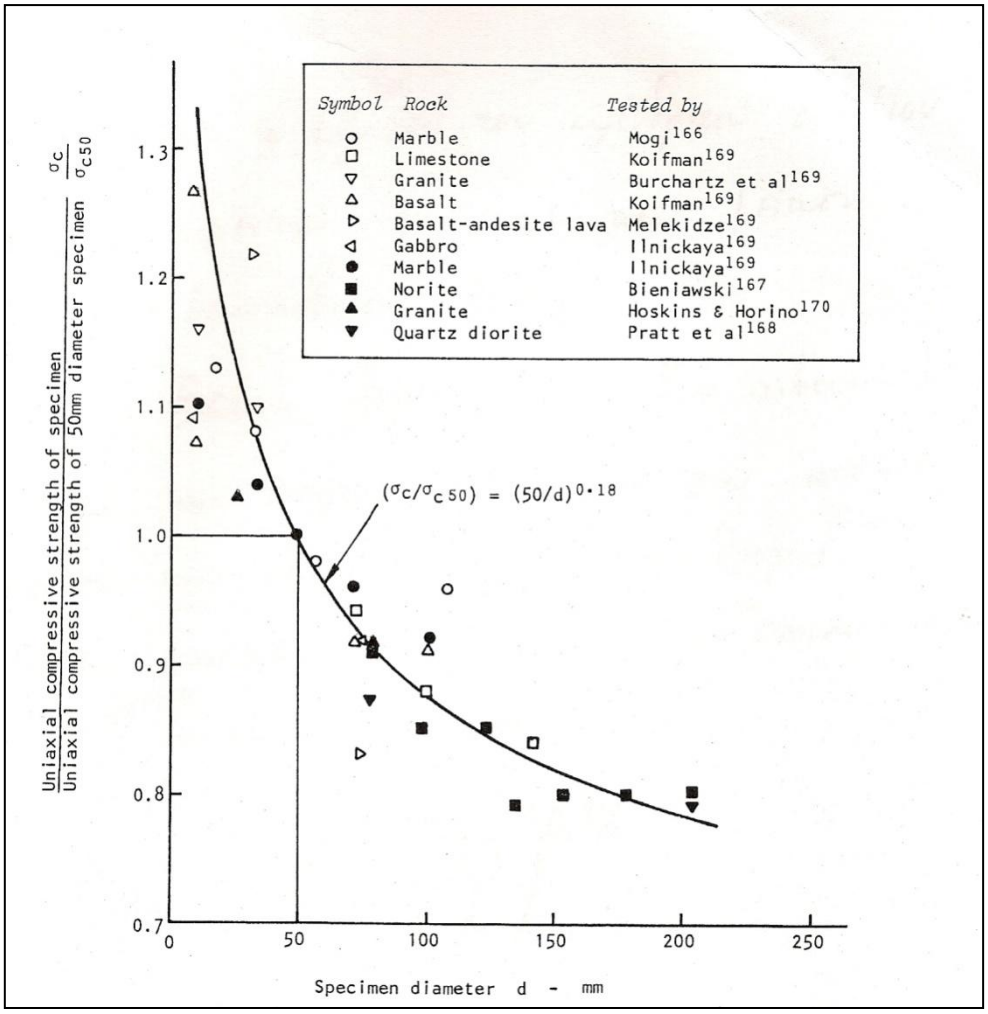
Οι *Hoek & Brown (1980)* μετά από συγκέντρωση από τη βιβλιογραφία δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων διαφόρων πετρωμάτων με διαμέτρους που κυμαίνονταν από 10 έως 200mm, παρατήρησαν μια σαφή εξάρτηση της αντοχής από την διάμετρο του δοκιμίου. Όσο λοιπόν αυξάνεται το μέγεθος του κυλινδρικού δοκιμίου, παρατηρείται μια σημαντική μείωση της αντοχής του.

Έτσι θεωρήθηκε σωστό να γίνεται αναγωγή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε μια πρότυπη διάμετρο έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των δεδομένων ανεξάρτητα των διαστάσεων του δοκιμίου. Σαν πρότυπη διάμετρος λοιπόν επιλέχθηκε αυτή των 50mm.

Οι *Hoek & Brown (1980)* προτείνουν την παρακάτω σχέση που σχετίζει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (σ_{cd}) ενός δοκιμίου διαμέτρου d με την αντίστοιχη αντοχή δοκιμίου διαμέτρου 50mm (σ_{c50}). Η σχέση είναι η εξής:

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50}\left(\frac{50}{d}\right)^{0,18}$$

όπου: d σε mm



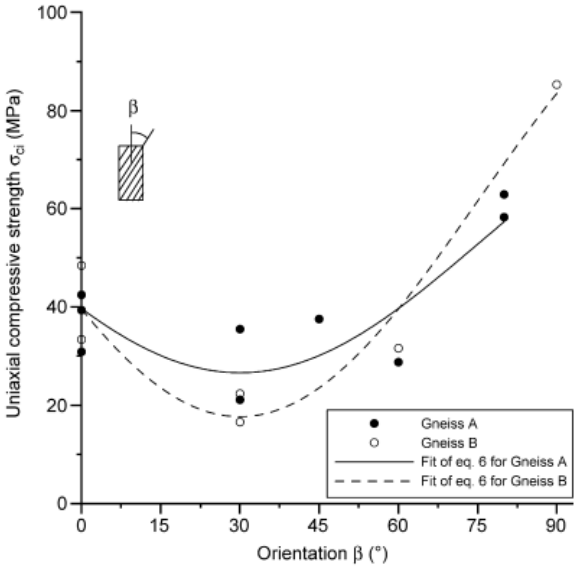
Διάγραμμα 3.1. Επιρροή του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά Hoek & Brown (1980).

Ανισοτροπία αντοχής

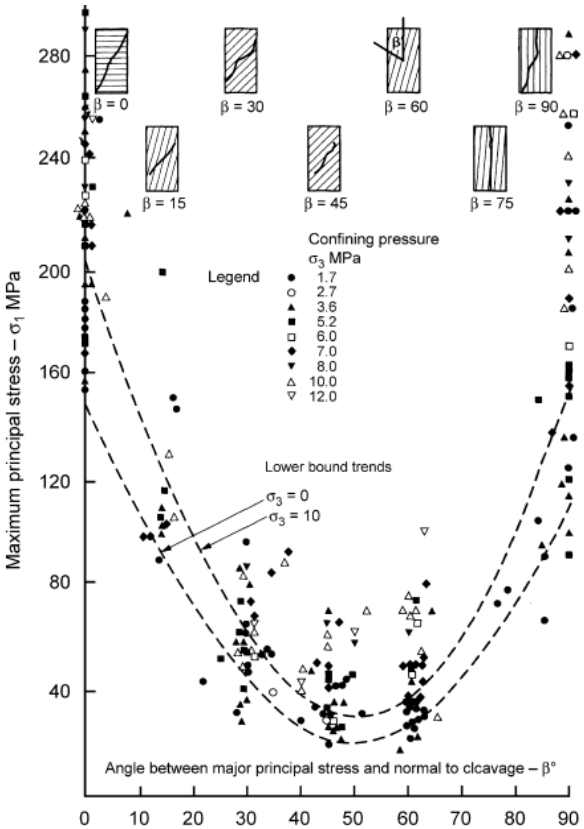
Στα ιζηματογενή και εκρηξιγενή πετρώματα η αντοχή του βραχώδους υλικού είναι πιθανό να παρουσιάζει κάποια ανισοτροπία που οφείλεται κυρίως στην παρουσία των μικροδιακλάσεων που τέμνουν τη μάζα τους. Η τιμή της αντοχής τους προς μία ορισμένη κατεύθυνση εξαρτάται από τον προσανατολισμό των μικροασυνεχειών και τη μεταξύ τους απόσταση. Στα φυλλώδη μεταμορφωμένα πετρώματα η ανισοτροπία της αντοχής τους είναι περισσότερο έντονη και οφείλεται πρωταρχικά στην ορυκτολογική σύσταση και δομή τους, καθόσον τα πετρώματα αυτά παρουσιάζουν εκλεκτικό προσανατολισμό των κρυστάλλων.

Είναι γνωστό ότι η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, λόγω της παρουσίας μακροασυνεχειών (στρώση, διακλάσεις, ζώνες ρηγμάτωσης) διαφοροποιείται από αυτή του ακέραιου πετρώματος. Στην περίπτωση αυτή εκτός των μηχανικών χαρακτηριστικών του ακέραιου πετρώματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών καθώς και η μηχανική τους συμπεριφορά. Στην περίπτωση όμως που οι ασυνέχειες είναι μικρής κλίμακας (μικροασυνέχειες) και περιέχονται στο ακέραιο πέτρωμα, όπως είναι η σχιστότητα και η φύλλωση, τότε η ανισοτροπία αντοχής του ακέραιου πετρώματος μπορεί να προσδιορισθεί άμεσα με τις κλασσικές εργαστηριακές δοκιμές (δοκιμή μοναξονικής θλίψης, δοκιμή σημειακής φόρτισης). Η συμπεριφορά της βραχομάζας τέτοιων πετρωμάτων εξαρτάται όχι μόνο βέβαια από την παρουσία των μικροασυνεχειών αλλά και από την πιθανή παρουσία μακροασυνεχειών που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Όπως έχει παρατηρηθεί εργαστηριακά, η αντοχή του ακέραιου πετρώματος που παρουσιάζει κάποια φύλλωση ή σχιστότητα κυμαίνεται ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει η φύλλωση με τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση (σ_1).



Διάγραμμα 3.2. Ανισοτροπία αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για τον γνεύσιο του Ελλαδικού χώρου σύμφωνα με Sarogloy & Tsiambaos (2008)



Διάγραμμα 3.3. Επιρροή της διεύθυνσης φόρτισης σε τριαξονικές δοκιμές σε σχιστόλιθο, σύμφωνα με Brown et al. (1977)

3.2.1.5. Προσδιορισμός Μέτρου ελαστικότητας Young

Γενικά - Ελαστική συμπεριφορά και ελαστικές σταθερές

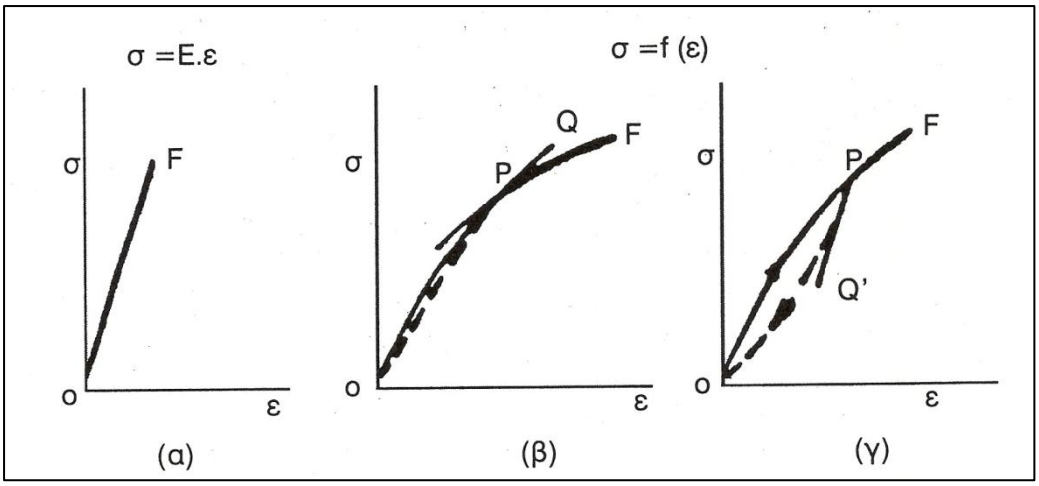
Για να περιγραφεί η ελαστική συμπεριφορά ενός στερεού υλικού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών του. Από αυτές στα πετρώματα ενδιαφέρουν περισσότερο το Ε και το ν.

Το μέτρο ελαστικότητας (Ε), ορίζεται από το νόμο του Hooke σαν ο λόγος της εξασκούμενης αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση και αντιπροσωπεύει τη δυσκαμψία (stiffness) του υλικού ενώ έχει μονάδες τάσης (MPa ή GPa). Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το Ε τόσο το βραχώδες υλικό είναι περισσότερο δύσκαμπτο.

Ο λόγος Poisson (ν), ορίζεται σαν ο λόγος της πλευρικής προς την αξονική παραμόρφωση του υλικού και είναι καθαρός αριθμός: $\nu = -\frac{\varepsilon_{\pi\lambda\varepsilon\upsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta}}}{\varepsilon_{\alpha\xi o\nu\iota\kappa\acute{\eta}}}$. Για γραμμικά ελαστικά υλικά το ν παίρνει τιμές από 0 μέχρι 0.5 και συνήθως θεωρείται ίσο με 0.25. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι με την επίδραση μιας αξονικής τάσης το υλικό διαστέλλεται πλευρικά και συγχρόνως συστέλλεται αξονικά.

Η πιο απλή μέθοδος για τη μελέτη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης ενός πετρώματος, είναι η δοκιμή μοναξονικής θλίψης ενός κυλινδρικού δοκιμίου, που το μήκος του είναι δύο μέχρι τρεις φορές τη διάμετρό του. Για κάθε εφαρμοζόμενη τάση στο δοκίμιο, μετριέται η αξονική και η πλευρική παραμόρφωσή του κυρίως με ειδικούς μετρητές παραμορφώσεων (strain gauges) που είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του δοκιμίου σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, οπότε και καταγράφεται το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων (αξονικών και πλευρικών). Εναλλακτική και σχετικά ευκολότερη μεθοδολογία μέτρησης των παραμορφώσεων αποτελεί η τοποθέτηση στο δοκίμιο ειδικού δακτυλίου που φέρει ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα.

Για τα ιδανικά ελαστικά υλικά η καμπύλη τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων μπορεί να πάρει τις μορφές που φαίνονται στο διάγραμμα 3.4 (*Jaeger and Cook, 1971*):



Διάγραμμα 3.4. Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τα ιδανικά ελαστικά υλικά α) Γραμμικά ελαστικό, β)Τελείως ελαστικό, γ) Ελαστικό με υστέρηση

- Κατά προσέγγιση γραμμική τελειώνοντας απότομα στο σημείο θραύσης F του υλικού, που εκφράζεται με τη σχέση $\sigma = E \cdot \varepsilon$ όπου η σταθερά Ε είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus) και ε η αξονική παραμόρφωση. Το υλικό αυτό περιγράφεται σαν γραμμικώς ελαστικό.

- Μη γραμμική της μορφής $\sigma = f(\varepsilon)$. Εδώ δεν υπάρχει ένα σταθερό μέτρο ελαστικότητας, αλλά για κάθε τιμή της τάσης (σ), στο αντίστοιχο σημείο P, η κλίση της εφαπτόμενης PQ της καμπύλης $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ ονομάζεται εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t. Η κλίση της χορδής OP ονομάζεται χορδικό μέτρο ελαστικότητας E_s. Το υλικό αυτό περιγράφεται σαν τελείως ελαστικό.

Στις δύο παραπάνω μορφές όλες οι παραμορφώσεις είναι ανακτήσιμες και δεν δαπανάται ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης ή αποφόρτισης του δοκιμίου.

- Μη γραμμική της μορφής σ = f(ε) με τη διαφορά ότι κατά την αποφόρτιση ακολουθείται διαφορετική πορεία, από αυτή στη φόρτιση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση (hysteresis) και στην περίπτωση αυτή οι παραμορφώσεις είναι ανακτήσιμες αλλά σπαταλάται ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης - αποφόρτισης του δοκιμίου. Η κλίση της εφαπτομένης PQ' στην καμπύλη αποφόρτισης καλείται μέτρο αποφόρτισης (unloading modulus). Ένα τέτοιο υλικό περιγράφεται απλά σαν ελαστικό.

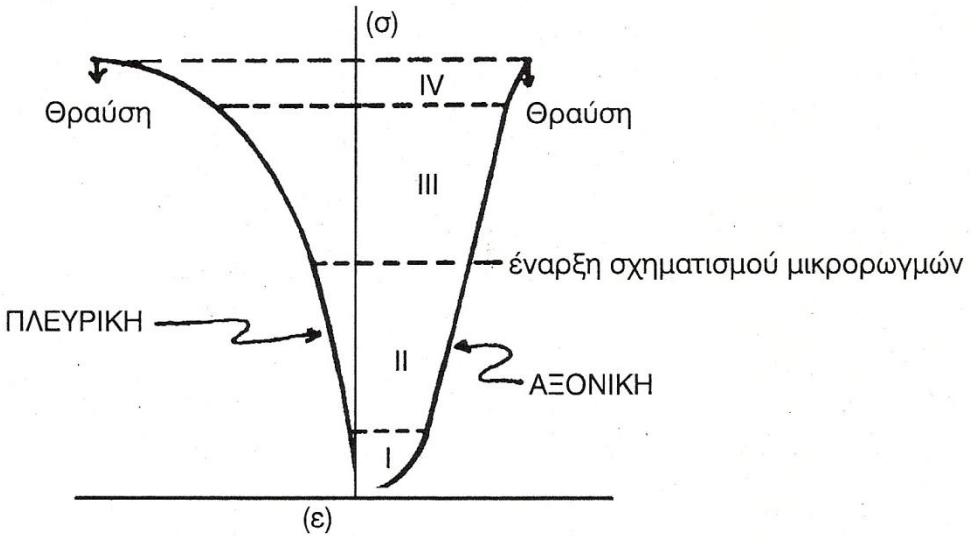
Τα πετρώματα όμως δεν συμπεριφέρονται ακριβώς όπως παραπάνω. Μερικά από αυτά, κυρίως τα λεπτοκοκκώδη υψηλής αντοχής, συμπεριφέρονται σε μοναξονική θλίψη περίπου σαν ελαστικά υλικά. Τα περισσότερα όμως και κυρίως τα χαμηλότερης αντοχής παρουσιάζουν ταυτόχρονα ανακτήσιμες ελαστικές και μη ανακτήσιμες πλαστικές παραμορφώσεις κατά την φόρτισή τους και συμπεριφέρονται σαν μη ελαστικά υλικά.

Γενικά, αφού δεν υπάρχει διεθνώς κάποιος τρόπος ταξινόμησης των πετρωμάτων σύμφωνα με την παραμορφωσιμότητά τους, ο *Heard (1960)* έχει προτείνει την παρακάτω ταξινόμηση του ακέραιου πετρώματος με βάση τη συνολική αξονική παραμόρφωση που παρατηρείται σε αυτά λίγο πριν τη θραύση τους :

Χαρακτηρισμός	Αξονική παραμόρφωση κατά τη θραύση
Πολύ ψαθυρά	<1%
Ψαθυρά	1-3%
Μεταβατικά	3-5%
Όλκιμα	>5%

Πίνακας 3.1.Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση συνολική αξονική παραμόρφωση λίγο πριν τη θραύση κατά Heard (1960).

Οι τυπικές καμπύλες τάσεων (σ) - παραμορφώσεων (ε) (αξονικών και πλευρικών) ενός ψαθυρού (brittle) πετρώματος, όπως προσδιορίζονται από εργαστηριακή δοκιμή μοναξονικής θλίψης σε συνηθισμένη συσκευή φόρτισης (πρέσα), γενικά διαιρούνται σε τέσσερες επί μέρους περιοχές, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.5:



Διάγραμμα 3.5. Τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για βραχώδες υλικό

Περιοχή I: Η καμπύλη τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων είναι κοίλη προς τα άνω και η κλίση της προοδευτικά αυξάνεται, ενώ η καμπύλη τάσεων - πλευρικών παραμορφώσεων είναι κοίλη προς τα κάτω. Στην περιοχή αυτή η συμπεριφορά του πετρώματος δεν είναι ελαστική και οφείλεται στο μερικό κλείσιμο των μικρορωγμών και των πόρων του πετρώματος με την αύξηση της ορθής τάσης. Όσο η εφαρμοζόμενη ορθή τάση αυξάνεται τόσο το μέτρο ελαστικότητας (Ε) αυξάνεται και ο ρυθμός της αύξησής του εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το πορώδες του.

Περιοχή II: Οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων (αξονικών και πλευρικών) είναι σχεδόν γραμμικές (σχεδόν ελαστική συμπεριφορά) και τα Ε και ν έχουν σταθερές τιμές. Η περιοχή αυτή τερματίζει όταν η ορθή τάση αποκτήσει μία χαρακτηριστική για το συγκεκριμένο πέτρωμα τιμή, μετά την οποία κάθε αύξησή της έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό νέων μικρορωγμών ή την επέκταση άλλων που προϋπήρχαν στο πέτρωμα. Το σημείο τερματισμού της περιοχής αυτής αντιπροσωπεύει το 35% περίπου της τελικής αντοχής του πετρώματος.

Στις περιοχές I και II παρατηρείται συνήθως υστέρηση χωρίς να προκαλούνται μόνιμες αλλαγές στον ιστό και στις ιδιότητες του πετρώματος. Η υστέρηση αποδίδεται στην ολίσθηση λόγω τριβής των παρειών των μικρορωγμών που έκλεισαν.

Περιοχή III: Η πλευρική παραμόρφωση αυξάνεται σε σχέση με την αξονική οπότε αυξάνεται ο λόγος του Poisson. Μικρορωγμές αρχίζουν να σχηματίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου με διεύθυνση παράλληλη στη φόρτιση. Επίσης παρατηρείται έναρξη της αύξησης του όγκου του δοκιμίου που είναι αποτέλεσμα κυρίως της δημιουργίας των μικρορωγμών.

Περιοχή IV: Οι μικρορωγμές πολλαπλασιάζονται ανεξέλεγκτα και συνωστίζονται σε ένα σύστημα μικρορωγμών, οπότε τελικά σχηματίζουν μία μακροσκοπική επιφάνεια θραύσης. Η πλευρική παραμόρφωση αυξάνεται γρήγορα και ο λόγος του Poisson πλησιάζει μεγάλες τιμές που στην περιοχή της θραύσης πιθανόν να είναι μεγαλύτερες του 0.5. Η περιοχή αυτή συνήθως αρχίζει όταν η εφαρμοζόμενη τάση υπερβεί τα 2/3 της αντοχής (περίπου στα 80% της τελικής αντοχής του πετρώματος) και εδώ προκαλούνται μόνιμες αλλαγές στον ιστό του πετρώματος. Το σημείο που αρχίζει η περιοχή αυτή ονομάζεται σημείο διαρροής (yield point) και η αντίστοιχη τάση, τάση διαρροής (yield stress). Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί σε όλκιμη κατάσταση (ductile state) του πετρώματος, που σημαίνει ότι αυτό μπορεί να δέχεται μεγάλες παραμορφώσεις με μικρή αύξηση της ορθής τάσης. Η μέγιστη τιμή της καμπύλης αντιστοιχεί στην αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη (μοναξονική) θλίψη (uniaxial compressive strength) και στις συνηθισμένες συσκευές φόρτισης (πρέσες), η θραύση γίνεται συνήθως έντονα και απότομα στο σημείο αυτό.

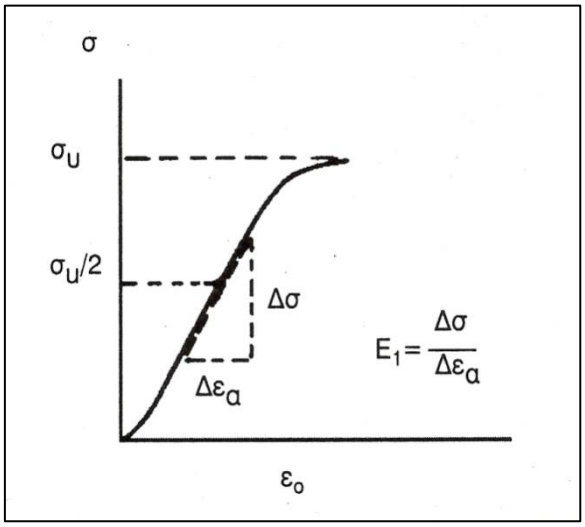
Με τη χρησιμοποίηση μιας άκαμπτης, υδραυλικά ελεγχόμενης (servo-controlled) συσκευής φόρτισης (πρέσας), παρατηρείται ότι η εξέλιξη της θραύσης είναι συνεχής μέσα σε μία περιοχή που αρχίζει μετά το σημείο που αντιστοιχεί στην αντοχή του πετρώματος και μέσα στην οποία η σταθερότητά του μειώνεται συνεχώς (περιοχή V). Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στη ψαθυρή κατάσταση (brittle state) του πετρώματος, που σημαίνει ότι η δυνατότητά του να αντέχει σε φόρτιση ελαττώνεται συνεχώς όσο αυξάνεται η παραμόρφωσή του. Η μέγιστη κλίση της καμπύλης που αντιστοιχεί στην περιοχή αυτή ονομάζεται ψαθυρότητα (brittleness).

Μέτρο ελαστικότητας Young

Για ένα γραμμικά ελαστικό υλικό η σχέση τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων θα πρέπει να είναι όπως προαναφέρθηκε γραμμική, με σταθερή κλίση που αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας Ε. Στο ακέραιο πέτρωμα όμως, η κλίση της καμπύλης ποικίλει ανάλογα με το είδος του πετρώματος, το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης και επί πλέον με το ρυθμό φόρτισης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο η κλίση της να αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή σε μία καθορισμένη περιοχή ώστε να είναι αντίστοιχα καθορισμένο το μέτρο ελαστικότητας Ε. Επειδή το Ε είναι συνάρτηση της τάσης ή της παραμόρφωσης, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητοι μερικοί ορισμοί για τον ακριβή προσδιορισμό του.

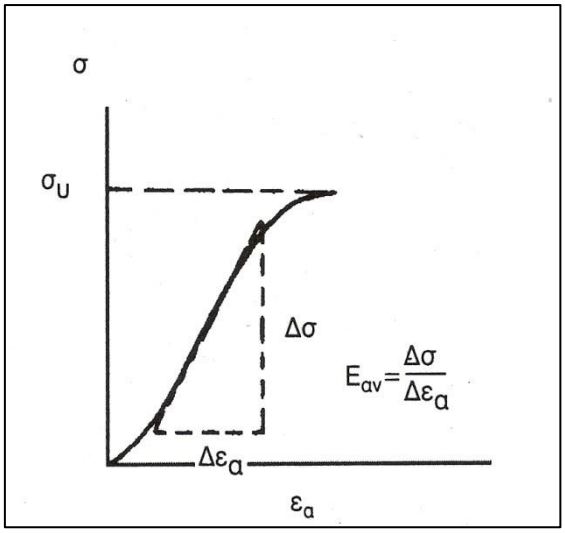
Οι πλεον εύχρηστοι ορισμοί είναι αυτοί που προτείνει η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής (*I.S.R.M., 1981*) και φαίνονται στα διαγράμματα 3.6-3.8:

1. Εφαπτομενικό μέτρο Ελαστικότητας (Tangent Young's modulus, E_t) το οποίο μετριέται σαν η κλίση της εφαπτόμενης της καμπύλης τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί σε μία δεδομένη τάση. Τέτοια τάση λαμβάνεται το 50% της αντοχής του πετρώματος σε μοναξονική θλίψη.



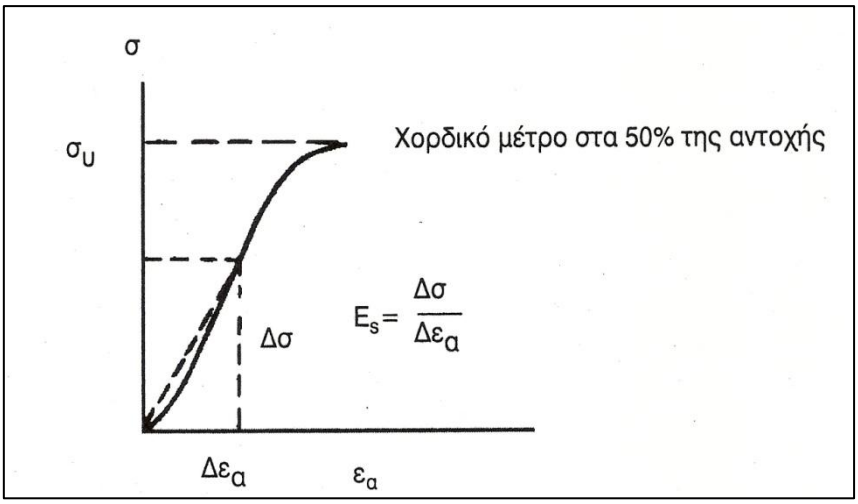
Διάγραμμα 3.6. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t)

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



Διάγραμμα 3.7. Μέσο μέτρο ελαστικότητας (E_{av})

3. Χορδικό μέτρο Ελαστικότητας (Secant Young' s modulus, E_s) που μετριέται σαν η κλίση της ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και του σημείου της καμπύλης που αντιστοιχεί στο 50% της αντοχής σε μοναξονική θλίψη.



Διάγραμμα 3.8. Χορδικό μέτρο ελαστικότητας (Es)

Στην παρούσα διπλωματική προσδιορίζεται το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 50% της αντοχής το οποίο είναι και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο.

Γενικά, η τιμή του αυξάνεται όσο αυξάνεται η δυσκαμψία του βραχώδους υλικού, δηλαδή το ακέραιο πέτρωμα γίνεται περισσότερο ψαθυρό (και παρουσιάζει συνήθως μεγαλύτερη αντοχή).

Πολλοί ερευνητές προτείνουν ότι η καμπύλη που προκύπτει από ένα κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης του δοκιμίου, σε κάποιο σημείο της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων κατά την εκτέλεση μιας μοναξονικής δοκιμής, δίνει την καλύτερη εκτίμηση του Ε. Έτσι γίνεται διάκριση του Ε που μετριέται άμεσα από την καμπύλη τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων και ορίζεται σαν μέτρο παραμόρφωσης και του Ε που μετριέται στην καμπύλη ενός κύκλου φόρτισης - αποφόρτισης και ορίζεται σαν μέτρο ελαστικότητας. Η αντικατάσταση του μέτρου ελαστικότητας από το μέτρο παραμόρφωσης κρίνεται αναγκαία, αν και δεν έχει γίνει γενικά αποδεκτή, γιατί η καμπύλη τάσεων αξονικών παραμορφώσεων περιλαμβάνει και τις ελαστικές και τις πλαστικές παραμορφώσεις.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την παραμορφωσιμότητα του βραχώδους υλικού είναι οι παρακάτω:

1) *Πλευρική πίεση*

   Γενικά αυξανόμενης της πλευρικής πίεσης (σ_3) που εξασκείται, αυξάνεται η αντοχή του πετρώματος και η συμπεριφορά του γίνεται πιο όλκιμη (δηλαδή δέχεται μεγαλύτερες παραμορφώσεις πριν την τελική του θραύση). Η πλευρική τάση δεν αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία γιατί δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης.

2) *Θερμοκρασία*

   Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι γενικά ένας σημαντικός παράγοντας στην επίτευξη της ολκιμότητας ενός πετρώματος. Σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης (σ_3=0), δηλαδή μοναξονική θλίψη, η επίδραση της θερμοκρασίας στην όλκιμη συμπεριφορά των σκληρών εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων δεν είναι σημαντική. Στην περίπτωση αυτή για να επιτευχθεί όλκιμη συμπεριφορά απαιτείται και μεγάλη πλευρική πίεση. Γενικά αυξανόμενης της θερμοκρασίας, μειώνεται η αντοχή του πετρώματος και η συμπεριφορά του γίνεται πιο όλκιμη.

3) *Ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate)*

   Γενικά φαίνεται ότι αυξανόμενης της ταχύτητας παραμόρφωσης, αυξάνεται η αντοχή του πετρώματος και η συμπεριφορά του γίνεται πιο ψαθυρή. Είναι γνωστό ότι πολλά στερεά υλικά παραμορφώνονται πολύ αργά με το χρόνο σε σταθερή θερμοκρασία, όταν υποβάλλονται σε σταθερή τάση που μπορεί να είναι

ένα μικρό κλάσμα της αντοχής τους. Η επίδραση αυτή του χρόνου στην παραμόρφωση καλείται ερπυσμός (creep). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται έστω και σε πολύ μιρό βαθμό σε όλα σχεδόν τα πετρώματα, ενώ ιδιαίτερα στους εβαπορίτες (ορυκτό αλάτι, ανυδρίτης κ.α.), στους πολύ πορώδεις ψαμμίτες, στους αργιλικούς σχιστόλιθους κ.α..

4) Νερό πόρων

Γενικά αυξανόμενου του βαθμού κορεσμού ή της πίεσης πόρων, η αντοχή του πετρώματος μειώνεται και η συμπεριφορά του γίνεται πιο ψαθυρή.

Σημείωση: Η πρότυπη εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Λόγος Poisson

Ο λόγος του Poisson, ν, υπολογίζεται από το λόγο:

$$\nu = -\frac{\textit{κλίση της καμπύλης αξονικής παραμόρφωσης}}{\textit{κλίση της καμπύλης ακτινικής παραμόρφωσης}} = -\frac{\textit{ακτινική παραμόρφωση } \varepsilon_q}{\textit{αξονική παραμόρφωση } \varepsilon}$$

Η κλίση της καμπύλης της διαμετρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με ανάλογο τρόπο όπως το Ε που χρησιμοποιείται αντίστοιχα (δηλαδή αν είναι εφαπτομενικό, μέσο ή χορδικό).

3.3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Το εργαστήριο «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής» του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. περιέχει τον κατάλληλο εξοπλισμό για την διενέργεια έρευνας υψηλού επιπέδου. Τα όργανα μέτρησης, οι εργαστηριακές συσκευές και τα εξαρτήματα που αυτές χρησιμοποιούν είναι πλήρως πιστοποιημένα για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής, τόσο των συνήθων αλλά και πιο σύνθετων.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται παρακάτω:

Παχύμετρο

Παχύμετρο με ακρίβεια αναγνώσεως 0,01mm.

Ζυγαριά ακριβείας

Ζυγός με ακρίβεια μέτρησης 0,01 gr

Εργαστηριακή καροταρία

Εργαστηριακή καροταρία Black & Decker με ταχύτητα περιστροφής 350 – 900 rpm. Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το νερό

Ο δειγματολήπτης είναι μονού τοιχώματος με αδαμαντοκορώνα κόνεος.

Εικονα 3.3. Εργαστηριακή καροταρία με δειγματολήπτη μονού τοιχώματος επί τω έργω

Συσκευή κοπής-λείανσης

Συσκευή κοπής – λείανσης για βραχώδη δοκίμια ELE CutRock με ταχύτητα περιστροφής 2810 rpm. Παρέχει τη δυνατότητα εναλλαγής των δίσκων κοπής και λείανσης και διαθέτει ειδικές βάσεις σχήματος V για τη στήριξη κυλινδρικών δοκιμίων πετρώματος.

Οι δίσκοι κοπής και λείανσης διέδεταν κοπτικά με αδαμαντοκονία.

Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε είναι το νερό.

Εικονα 3.4. Συσκευή κοπής-λείανσης

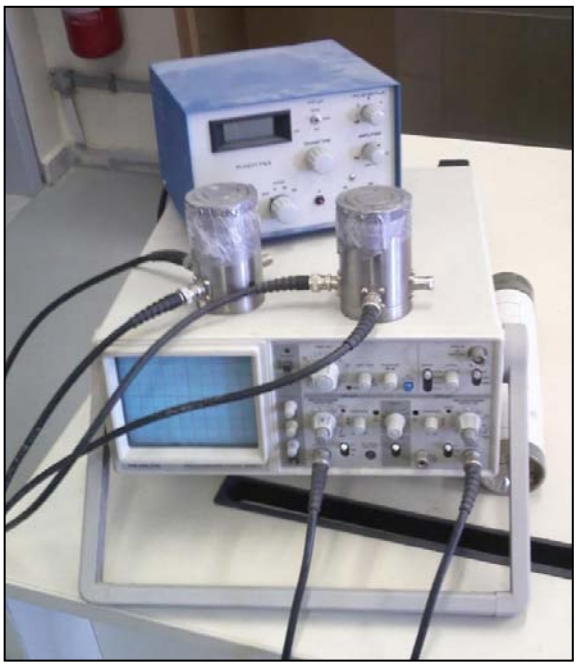
Μηχανή φορτίσεως χειροκίνητη

Πρέσα χειροκίνητη Soiltest INC, CT710 με ικανότητα φόρτισης έως 250 kPounds (=1112 kN) με αναλογικό μετρητή. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για την διενέργεια της δοκιμής διάδοσης υπέρηχων κυμάτων.

Εικονα 3.5. Χειροκίνητη μηχανή φόρτισης Soiltest INC, CT710

Συσκευή παραγωγής και μέτρησης ταχύτητας υπέρηχων κυμάτων

- Η συσκευή αυτή αποτελείται από:
- Δύο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς (πομπός και δέκτης) διαμέτρου 54mm.
- Σύστημα παραγωγής κυμάτων συχνότητας 1MHz, Pundit P&S της εταιρίας C.N.S. Electronics Ltd με μέτρηση χρόνου έως 113,5μsec και ακρίβεια 0,1μsec.
- Καταγραφέας κυματομορφής Hitachi Oscilloscope V-552.
- Μολυβδόχαρτο. Το μολυβδόχαρτο χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί πλήρης επαφή μεταξύ των πιεζοκρυσταλλικών μετατροπέων και του βραχώδους δοκιμίου.



Εικονα 3.6. Συσκευή μέτρησης ταχύτητας υπέρηχων κυμάτων

Μηχανή φορτίσεως σερβο-υδραυλική (servo-hydraulic)

Μηχανή φορτίσεως (πρέσα) MaTest Cyber – Tronic C041 με ικανότητα φόρτισης έως 1500kN. Ακρίβεια μέτρησης φορτίου 0,1kN και δυνατότητα διατήρησης σταθερού ρυθμού φόρτισης με εξειδικευμένο σερβο-υδραυλικό μηχανισμό.

Εικονα 3.7. Μηχανή φορτίσεως (πρέσα) MaTest Servo – Tronic C041

Ηλεκτρονικό μηκινσιόμετρο (L.V.D.T.)

Η συσκευή αποτελείται από:

Ηλεκτρονικό μηκινσιόμετρο τύπου L.V.D.T. (Linear Variable Dispacement Transducer) ακρίβειας 10μm (=10^{-2}mm) και πλήρη διαδρομή 5mm. Διαθέτει βραχίονες με απόληξη σε ακίδες για τη τοποθέτηση του οργάνου επάνω στο δοκίμιο, με αρχική απόσταση 50mm.

- Συσκευή καταγραφής δεδομένων (Data Logger). Μπορεί να γίνει καταγραφή με ταχύτητα από 1Hz έως 5000Hz.
- Ενισχυτή ψηφιακού σήματος Digital Signal Conditioner, *Epsilon technology corp.*
- Λογισμικό ελέγχου, καταγραφής και παρουσίασης των δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή DSC-View Lite Software, Version 2.1.1., *Epsilon technology corp.*

Εικονα 3.8. Ηλεκτρονικό μηκινσιόμετρο (L.V.D.T.) με Data Logger και ενισχυτή ψηφιακού σήματος

Στη συσκευή μπορεί να τοποθετηθεί και ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο για μέτρηση της πλευρικής παραμόρφωσης του δοκιμίου.

Κάμερα υψηλής ταχύτητας

Κάμερα υψηλής ταχύτητας TroubleShooter LE της εταιρίας Fastec Imaging corp.

Η κάμερα έχει δυνατότητα καταγραφής ασπρόμαυρης εικόνας με ανάλυση έως και 640x480 και ταχύτητα έως και 500 frames/sec. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας καταγραφής η συσκευή απαιτεί έντονο φωτισμό και γι' αυτό χρησιμοποιούνταν πάντα με επαγγελματικό προβολέα.

Εικονα 3.9. Κάμερα υψηλής ταχύτητας TroubleShooter LE

Προβολέας

Εικονα 3.10.Προβολέας 2000W

Επαγγελματικός προβολέας με λάμπα πυρακτώσεως 2000W. Χρησιμοποιούταν με την κάμερα υψηλής ταχύτητας για την ενίσχυση του φυσικού φωτός του εργαστηρίου.

3.4. ΜΕΤΑΦΟΡΑ, ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.4.1. Επιλογή και μεταφορά δειγμάτων πετρώματος στο εργαστήριο

Η επιλογή των τεμαχών των πετρωμάτων που θα χρησιμοποιούνταν για δειγματοληψία έγινε όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο από το ανατολικό μέτωπο της σήραγγας Καλυδώνας. Επιλέχθηκαν τεμάχη που μακροσκοπικά δεν παρουσίαζαν αποσάθρωση ή ανισοτροπία και δεν περιείχαν ασυνέχειες ή στρώσεις διαφορετικού υλικού.

Έγινε επιλογή από τα πιο πρόσφατα υλικά εκσκαφής και μάλιστα μόλις απορρίπτονταν στον αποθεσιοθάλαμο μετά τη ανατίναξη και μεταφορά τους εκτός της σήραγγας. Αυτό κρινόταν αναγκαίο ιδιαίτερα για τα τεμάχη του ιλυολίθου που, υπό την επήρεια του κατά τα άλλα βροχερού καιρού και της υγρασίας της περιοχής, μέσα σε λιγότερο από 48 ώρες μετατρεπόταν σε εδαφικό υλικό, χωρίς ιχνος της πρωτύτερης βραχώδους δομής.

Τα τεμάχη του ιλυολίθου επίσης, αμέσως μετά την επιλογή, καλύπτονταν με πλαστική μεμβράνη έτσι ώστε να μην υπάρξει απώλεια της φυσικής υγρασίας τους και θρυμματισμός.

Η μεταφορά γινόταν αυθημερόν και η διάτρηση το συντομότερο δυνατό μετά την απόκτηση των τεμαχών.

3.4.2. Διάτρηση πυρήνων ψαμμίτη και ιλυολίθου

Στα τεμάχη άρρηκτου πετρώματος που έφταναν στο εργαστήριο γινόταν η διάτρηση και απόκτηση πυρήνων με σκοπό την διαμόρφωση των τελικών δοκιμίων. Η διάτρηση πραγματοποιήθηκε με εργαστηριακή καροταρία μονού τοιχώματος (Εικονα 3.3).

Στην καροταρία χρησιμοποιήθηκαν δειγματολήπτες δύο διαφορετικών διαμέτρων για την διάτρηση πυρήνων διαμέτρου 52mm και 63mm αντίστοιχα. Οι δειγματολήπτες φέρουν κοπτική κεφαλή με αδαμαντοκονία για την επίτευξη του χαμηλότερου δυνατού βαθμού διατάραξης του δείγματος καθώς και την μόρφωση λείας περιμετρικής επιφάνειας του πυρήνα (εικόνες 3.11, 3.12). Ως ψυκτικό μέσο για την αποφυγή υπερθερμανσης και καταστροφής των κοπτικών άκρων καθώς και την απομάκρυνση των θραυσμάτων χρησιμοποιήθηκε το νερό.

Εικονα 3.12.Δειγματολήπτες μονού τοιχώματος για την εργαστηριακή καροταρία, διαμέτρου 63mm και 52mm αντίστοιχα

Εικονα 3.11.Κοπτική κεφαλή των δειγματολοιπτών με αδαμαντοκονία

3.4.2.1. Διάτρηση Ψαμμίτη

Η διάτρηση του ψαμμίτη δεν παρουσίασε κανένα απολύτως πρόβλημα. Το υλικό ήταν συμπαγές και δεν επηρεαζόταν από την χρήση του νερού. Για τη επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητας δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκαν χαμηλές ταχύτητες διάτρησης σε συνδυασμό με αυξημένη χρήση νερού.

Εικονα 3.13.Μέρος από τους πυρήνες και τα τεμάχη ψαμμίτη ου χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας

Γενικά η διάτρηση γινόταν στο κεντρικό τμήμα του τεμάχους του πετρώματος καθώς το περιμετρικό τμήμα ενδέχεται να έχει υποστεί διατάραξη στο εργοτάξιο κατά την εκσκαφή αλλά και κατά τη μεταφορά. Σε περίπτωση που παρατηρούνταν κάποια προυπάρχουσα ασυνέχεια ή ο πυρήνας θραυόταν κατά τη διάτρηση, το δοκίμιο απορριπτόταν ή εάν ήταν δυνατό, απορριπτόταν ένα μέρος αυτού και διατηρούταν το άρρηκτο τέμαχος.

3.4.2.2. Διάτρηση Ιλυολίθου

Η διάτρηση του ιλυολίθου ήταν σε μεγάλο βαθμό προβληματική, αφενός μεν γιατί θρυμματίζεται πολύ εύκολα, αφετέρου δε γιατί έχει μεγάλη ευαισθησία στο νερού που, όπως προαναφέρθηκε χρησημοποιείται ως ψυκτικό μέσο στην εργαστηριακή καροταρία. Για την επιτυχή διάτρηση του ιλυολίθου εφαρμόσθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα διάτρησης από αυτή του ψαμμίτη για να μην εκτίθεται ο πυρήνας για πολύ ώρα στο νερό και γιατί το υλικό, ως μαλακότερο, το επέτρεπε. Η χρήση του νερού γινόταν με πολύ μεγάλη προσοχή και χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη δυνατή ροή νερού έτσι ώστε μα μην υπερθερμανθεί ο δειγματολήπτης και το δείγμα.

3.4.3. Κοπή των εδρών των δοκιμίων ψαμμίτη και ιλυολίθου

Η επεξεργασία των δοκιμίων ξεκινά με την κοπή των πυρήνων που προέκυψαν από την διάτρηση.

Κατά τη διάτρηση προκύπτουν πυρήνες με τραχείες μη παράλληλες έδρες και σε μέγεθος που δεν είναι πάντα κατάλληλο σύμφωνα με τις πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές (Εικονα 3.14). Κατά την κοπή απομακρύνονται οι ακανόνιστες έδρες του δείγματος και τα τμήματα που μπορεί να φέρουν κάποια ασυνέχεια ή φλέβα διαφορετικού υλικού και το δοκίμιο κόβεται στο επιθυμητό μήκος.

Εικονα 3.14.Πυρήνες πετρώματος όπως προέκυψαν από τη διάτρηση

Η κοπή πραγματοποιήθηκε στην συσκευή κοπής – λείανσης του εργαστηριού «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής». Χρησιμοποιήθηκε αδαμαντοτροχός πάχους 1mm για την κοπή των πυρήνων και ως ψυκτικό μέσο το νερό (Εικονα 3.15).

Εικονα 3.15.Αδαμαντοτροχός κοπής βραχωδών δοκιμίων

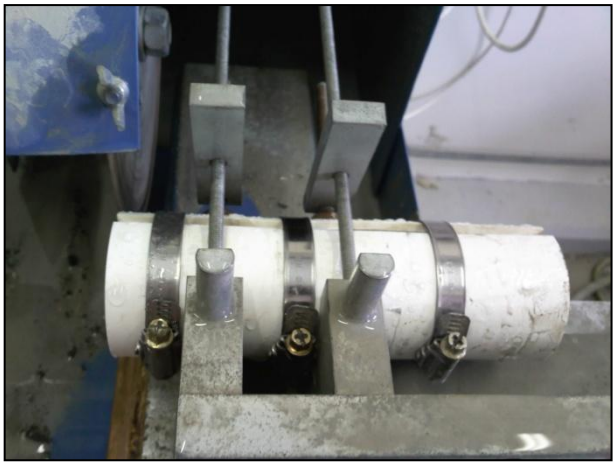
Εικονα 3.16.Βάση τοποθέτησης κυλινδρικού δοκιμίου στη συσκευή κοπής - λείανσης

Το δοκίμιο του πετρώματος τοποθετείται στις βάσεις σχήματος V και κρατείται στη θέση του με τους σφικτήρες της συσκευής (Εικονα 3.16). Σε περίπτωση δειγμάτων διαμέτρου 63mm αφαιρούνταν οι βάσεις σχήματος V και χρησιμοποιούνταν μόνο οι σφικτήρες που συγκρατούσαν το δοκίμιο στην αρχική βάση. Η σωστή τοποθέτηση του δείγματος είναι κρίσιμη για την παραλληλία των εδρών και την καθετότητα τους ως προς τον άξονα του δοκιμίου που θα προκύψει κατά την κοπή. Η απόκλιση στην παραλληλία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εγκυρότητα των εργαστηριακών δοκιμών καθώς μεταβάλλεται το τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο κατά τη φόρτιση

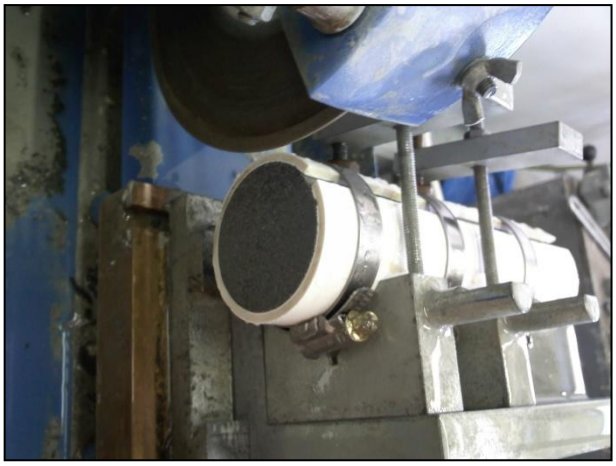
και αλλάζει τελείως η μορφή θραύσης. Στην παραλληλία των εδρών δόθηκε πολύ μεγάλη προσοχή στην παρούσα εργασία αφού το κάθε δοκίμιο αποτελούνταν από 3 διαφορετικά τεμάχη και 6 συνολικά έδρες. Συνεπώς εάν μία από τις έξη έδρες παρουσίαζε αποκλίσεις πέραν του επιτρεπτού, δημιουργούνταν πρόβλημα σε ολόκληρο το δοκίμιο.

Η φύση των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία προϋποθέτει τη μόρφωση δοκιμίων μικρού ύψους, πράγμα που δεν προβλεπόταν από την βάση στήριξης της συσκευής κοπής. Οι βάσεις και οι σφικτήρες απείχαν κάποια απόσταση μεταξύ τους και δεν επέτρεπαν τη σωστή στερέωση των δοκιμίων μήκους μικρότερου των 70mm και πόσο μάλλον για τα δοκίμια ύψους 15-30mm που διαμορφώθηκαν για την προσομοίωση των χαμηλότερων ποσοστών περιεκτικότητας σε ιλυόλιθο (δοκίμια με ποσοστό ιλυολίθου 7% έως 20%).

Για το ξεπέρασμα του προβλήματος αυτού χρησιμοποιήθηκε μια ιδιοκατασκευή ως πρόσθετη «μήτρα» που θα έδινε στο δοκίμιο επιπλέον μήκος για να επιτευχθεί η σωστή τοποθέτηση του στη συσκευή κοπής – λείανσης. Η «μήτρα» αποτελούνταν από σωλήνα PVC διαμέτρου 62mm και 72mm για τα δείγματα διαμέτρου 52mm και 63mm αντίστοιχα με μία κατά μήκος τομή και κυλινδρικούς σφικτήρες σωληνώσεων αντίστοιχης διαμέτρου. Τα δοκίμιο τοποθετούνταν στον σωλήνα, συγκρατούνταν με τους σφικτήρες σωληνώσεων και στη συνέχεια τοποθετούνταν στην συσκευή κοπής. Τρία επιπλέον πλεονεκτήματα προέκυψαν από τη μέθοδο αυτή. Πρώτον, ότι οι σφικτήρες της βάσηςς της συσκευής κοπής-λείανσης ακουμπούν στη «μήτρα» και όχι απευθείας στο δοκίμιο που μπορούν να προκαλέσουν τοπική αστοχία στη περιμετρική επιφάνεια αυτού. Δεύτερον, λόγω του εγκιβωτισμού του δοκιμίου, αποφεύγεται η δημιουργία «δοντιού» κατά την έξοδο του αδαμαντοτροχού το δείγμα στο τέλος της κοπής. Τρίτον, υπήρχε προφύλαξη του δείγματος του ιλυολίθου από το νερό που χρησιμοποιείται κατά την κοπή και την λείανση.



Εικονα 3.17.Μήτρα για την κοπή δοκιμίων μικρού ύψους, τοποθετημένη στη συσκευή κοπής



Εικονα 3.18.Δοκίμιο πετρώματος αμέσως μετά την κοπή με τη χρήση της «μήτρας»

Στα δείγματα του ιλυολίθου η κοπή γινόταν μαζί με το σωλήνα, έτσι ώστε να υπάρχει εγκιβωτισμός και του αποκοπτόμενου τμήματος (Εικονα 3.19). Μετά την κοπή και μέχρι την λείανση τα δοκίμια ιλυολίθου καλύπτονταν με πλαστική μεμβράνη για την προφύλαξη τους από την μεταβολή υγρασίας.

Εικονα 3.19.Κοπή δοκιμίου ιλυολίθου μαζί με τη «μήτρα»

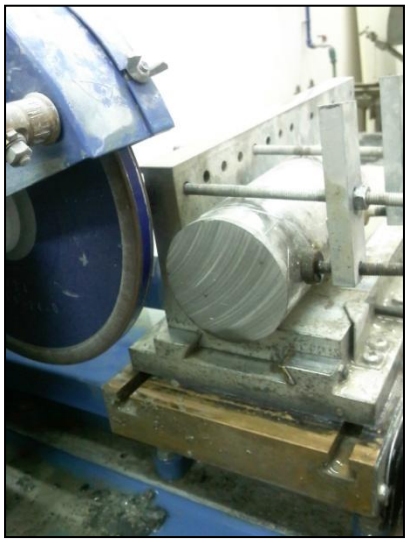
Με την παραπάνω μέθοδο επιτεύχθηκαν λείες, απολύτως παράλληλες μεταξύ τους έδρες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου ακόμα και στα μικρότερα δοκίμια. Η μήτρα αυτή χρησιμοποιήθηκε και κατά τη λείανση με ακριβώς τον ίδιο τρόπο.

3.4.4. Λείανση των δοκιμίων ψαμμίτη και ιλυολίθου

Μετά την κοπή, ακολουθεί η λείανση έτσι ώστε να αφαιρεθεί από την επιφάνεια της έδρας του δοκιμίου οποιαδήποτε τραχύτητα και ανομοιομορφία που προκαλεί ο

αδαμαντοτροχός. Η λείανση μπορεί να επηρεάσει κατά πολύ τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών λόγω συγκέντρωσης τάσεων και μικρορωγμάτωσης στις έδρες που έρχονται σε επαφή με τις λείες πλάκες φορτίσεως.

Εικονα 3.20.Τροχός λείανσης διπλής όψεως

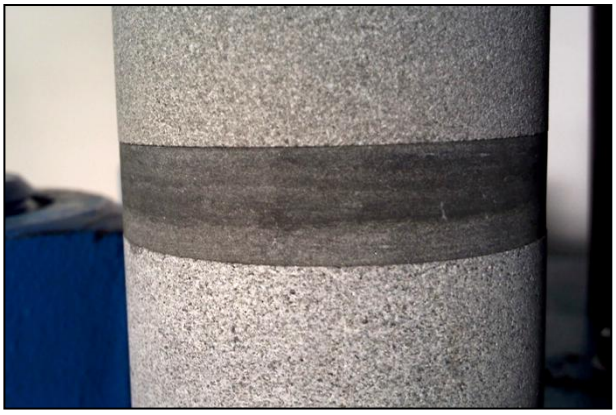


Εικονα 3.21.Λείανση δείγματος ιλυολίθου στο εργαστήριο

Για την λείανση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή κοπής-λείανσης με τροχό λειάνσεως διπλής όψης (Εικόνες 3.20, 3.21). Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε το νερό. Η μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω για την κοπή ακολουθήθηκε και για τη λείανση.

Μεγάλη προσοχή δόθηκε στη χρήση του νερού κατά την λείανση του ιλυολίθου. Μετά την λείανση και μέχρι την εκτέλεση της δοκιμής, τα δοκίμια ιλυολίθου καλύπτονταν με πλαστική μεμβράνη για την προφύλαξη τους από την μεταβολή υγρασίας.

Εικονα 3.22.Δίσκος ιλυολίθου μετά τη λείανση, πάχους μόλις 1,13cm για το δοκίμιο Ε8



Εικονα 3.23.Τελική μορφή των διεπιφανειών του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στα τεχνητά ετερογενή δοκίμια

3.4.5. Μόρφωση σύνθετου δοκιμίου

Μετά την κοπή και λείανση των δειγμάτων ψαμμίτη και ιλυολίθου στα επιθυμητά μεγέθη έτσι ώστε να τηρούνται οι απαιτούμενες αναλογίες, τα ξεχωριστά τμήματα του δοκιμίου ξεπλένονταν με νερό έτσι ώστε να αποβάλουν από τις έδρες και την περιφέρεια τους θραύσματα και σκόνη από τη διαδικασία της επεξεργασίας. Στη συνέχεια αφήνονταν στον ατμοσφαιρικό αέρα να αποκτήσουν υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαρακτηρίζονταν με έναν μοναδικό κωδικό και μετριούνταν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το βάρος τους με το μικρόμετρο και την ζυγαριά ακριβείας.

Το ετερογενές δοκίμιο ήταν έτοιμο αφού τοποθετούνταν οι ξεχωριστοί δίσκοι ο ένας πάνω στον άλλο και ελεγχόταν η επαφή των διεπιφανειών των ξεχωριστών υλικών καθώς και η συνολική καθετότητα των ακραίων εδρών σε σχέση με τον άξονα του δοκιμίου.

Εικονα 3.24.Σύνθετα δοκίμια με διαφορετικές αναλογίες ψαμμίτη - ιλυολίθου

Τα ομοιογενή δοκίμια δεν χρειάζονταν περεταίρω προετοιμασία και ήταν έτοιμα προς θραύση.

3.4.6. Χρήση συγκολλητικής ύλης

Στη βιβλιογραφία προτείνεται η χρήση ενός λεπτού στρώματος γύψου (Zainab M. et al (2007)) για τη συγκράτηση των τεμαχών του δοκιμίου έτσι ώστε να μην υπάρξει

σχετική μετακίνηση κατά την φόρτιση. Παρ' όλ' αυτά σε δοκίμια με χρήση γύψου παρατηρήθηκε ότι προκαλούνταν θραύση του γύψου πριν από την θραύση του δοκιμίου και η αντοχή του συνολικού δείγματος γενικά μειωνόταν. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η αντοχή του δομικού γυψοκονιάματος είναι γύρω στα 3-6 MPa ενώ η ελάχιστη αντοχή των δειγμάτων πετρώματος έφτανε στα 30MPa περίπου. Θεωρείται λοιπόν λογική η εικασία ότι υπάρχει θραύση της στρώσης γυψοκονιάματος λόγω της υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής της αλλά και λόγω του ότι δεν μπορεί να ακολουθήσει τις ακτινικές παραμορφώσεις των πετρωμάτων που ενώνει. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι μικρομετακινήσεις του δοκιμίου στη πρέσα και η συγκέντρωση τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών, καθιστώντας έτσι τη λείανση άχρηστη. Επίσης προκαλεί προβλήματα και στη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας δημιουργώντας «σκαλοπάτια» στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων.

Επιλέχθηκε λοιπόν στην παρούσα διπλωματική να μην χρησιμοποιηθεί κάποιου είδους συγκολλητική ύλη στη διαφάνεια ψαμμίτη και ιλυολίθου. Στα ετερογενή δοκίμια που κατασκευάστηκαν και δοκιμάσθηκαν δεν παρουσιάστηκε καμία σχετική μετακίνηση ακόμα και υπό μεγάλες αξονικές τάσεις αλλά ακόμα και μετά την πρώτη ρωγμάτωση μερικά δέκατα του δευτερολέπτου πριν τη θραύση όπως παρατηρήθηκε από τα video υψηλής ταχύτητας που καταγράφηκαν ταυτόχρονα με τη δοκιμή. Σε αυτό πιστεύεται ότι παίζει μεγάλο ρόλο η σωστή κοπή και λείανση των δοκιμίων στην οποία και δόθηκε, εδώ, μεγάλο βάρος.

Η χρήση συγκολλητικής ύλης στα ετερογενή βραχώδη δοκίμια πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο ενδελεχούς έρευνας για να διαπιστωθεί ποιο υλικό θα μπορούσε να αναπαραστήσει καλλίτερα τις συνθήκες συγκόλλησης των στρωμάτων ετερογενών περτρωμάτων στη φύση. Υλικά του εμπορίου, διαδεδομένα στο τεχνικό κόσμο, που έχουν εύκολή και χαμηλού κόστους εφαρμογή, δεν είναι πάντα κατάλληλα για χρήση σε εργαστηριακές δοκιμές υψηλού επιπέδου.

3.5. ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.5.1. Δοκιμές βραχομηχανικής που πραγματοποιήθηκαν

Το δοκίμια που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργαστηριακές δοκιμές:

- Προσδιορισμός ειδικού βάρους - πυκνότητας
- Μέτρηση ταχύτητας υπέρηχων κυμάτων
- Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη
- Μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας Young
- Καταγραφή με κάμερα υψηλής ταχύτητας τη διαδικασία της θραύσης

Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας δωματίου.

3.5.2. Περιγραφή διαδικασίας εκτέλεσης των δοκιμών

3.5.2.1. Προσδιορισμός ειδικού βάρους - πυκνότητας

Μόλις τα παρασκευαστούν και ελεγχθούν τα δοκίμια πραγματοποιείται η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους καθώς και το βάρος τους. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\left(\pi D^2 / 4\right)} \quad \text{και} \quad \gamma = \rho \cdot g$$

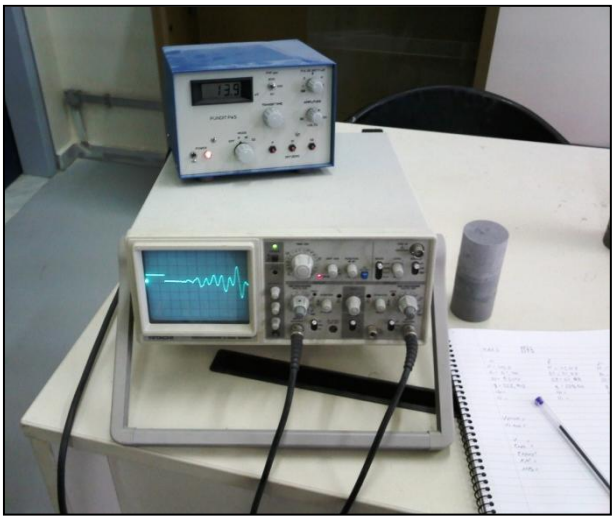
με g=9,81m/sec^2

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας και του ειδικού βάρους στα σύνθετα δοκίμια γίνεται για κάθε υλικό ξεχωριστά και όχι για το συνολικό δοκίμιο.

3.5.2.2. Δοκιμή προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων

Το δοκίμιο τοποθετείται στη χειροκίνητη πρέσα και με στην άνω και κάτω έδρα του τοποθετούνται ο πομπός και ο δέκτης των υπέρηχων κυμάτων. Στην συνέχεια ασκείται ένα χαμηλό φορτίο έτσι ώστε οι πιεζοκρύσταλλοι να έρθουν σε πλήρη επαφή με το δοκίμιο. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ευθυγράμμιση των πιεζοκρυστάλλων με τον άξονα του δοκιμίου.

Στη συνέχεια ενεργοποιείται η συσκευή Pundit και ο παλμογράφος και γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις για τη σωστή προβολή της κυματομορφής στην οθόνη. Με τη χρήση του δείκτη που διαθέτει η συσκευή Pundit προσδιορίζεται ο χρόνος πρώτης άφιξης της των επιμήκων (Vp) και εγκαρσίων (Vs) κυμάτων.



Εικονα 3.25.Συσκευή Pundit και παλμογράφος

Εικονα 3.26.Δοκίμιο με πομπο και δέκτη στην χειροκίνητη πρέσα

Έχοντας τον χρόνο άφιξης των κυμάτων και γνωρίζοντας το ύψος των δοκιμίων, μπορέι να προσδιοριστεί η ταχύτητα διάδοσης των υπέρηχων κυμάτων με τις σχέσεις:

$$Vp = \frac{H}{t_p} \text{ και } Vs = \frac{H}{t_s}$$

οπου: H το ύψος του δοκιμίου και

t_p, t_s ο αντίστοιχος χρόνος πρώτης άφιξης των υπέρηχων κυμάτων

Η δοκιμή διάδοσης υπέρηχων κυμάτων πραγματοποιούνταν στα ετερογενή δείγματα για το συνολικό δείγμα και όχι για κάθε τμήμα του ξεχωριστά.

Τέλος με τις παρακάτω σχέσεις προσδιορίζονται οι απαιτούμενες δυναμικοί παράμετροι:

$$E_D = \frac{\rho Vs^2(3Vp^2 - 4Vs^2)}{(Vp^2 - Vs^2)}$$

$$\nu_D = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)}$$

$$G_D = \rho Vs^2$$

όπου: **ρ** η πυκνότητα σε Mg/m^3

Vρ ταχύτητα επίμηκων κυμάτων σε m/sec

Vs ταχύτητα διατμητικών κυμάτων σε m/sec

$\boldsymbol{E_D}$ το μέτρο ελαστικότητας σε MPa

$\boldsymbol{\nu_D}$ *ο* λόγος Poisson

$\boldsymbol{G_D}$ το διατμητικό μέτρο ελαστικότητας σε MPa

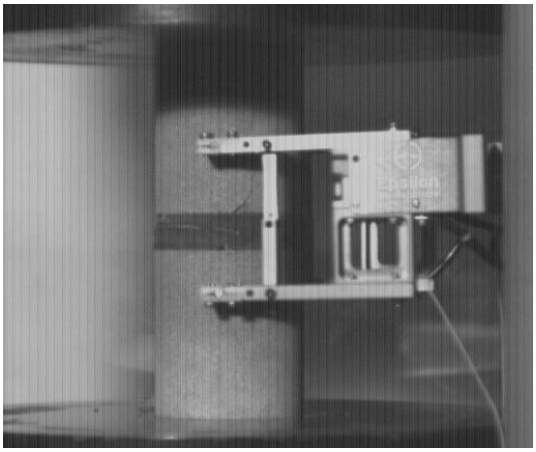
Σημείωση: Η πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού την ταχύτητας διάδοσης των υπέρηχων κυμάτων παρουσιάζεται στο παράρτημα Α ενώ οι συσκευές και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην Παράγραφο 3.3

3.5.2.3. Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη - Μέτρηση μέτρου ελαστικότητας Young – Καταγραφή της θραύσης με κάμερα υψηλής ταχύτητας

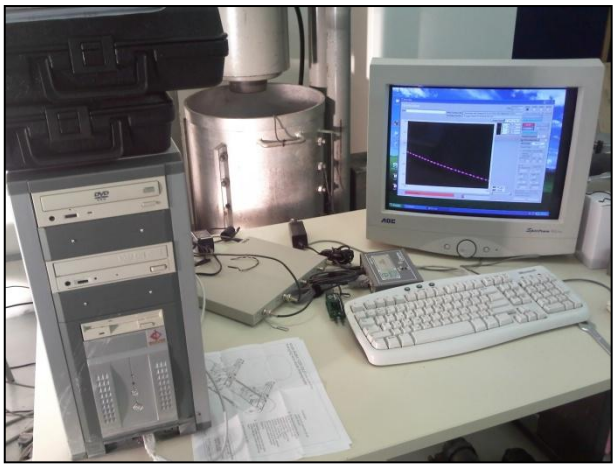
Οι τρεις δοκιμές αυτές πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα κατά την φόρτιση του δοκιμίου στην σερβο-υδραυλική (servo-hydraulic) πρέσα.

Μόλις ολοκληρωνόταν η δοκιμή διάδοσης υπέρηχων κυμάτων το δοκίμιο τοποθετούνταν στην σερβο-υδραυλική πρέσα. Επάνω στο δοκίμιο τοποθετούνταν το ηλεκτρονικό μικρόμετρο (L.V.D.T) και γινόταν η σύνδεση με τον καταγραφέα (Data Logger) και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που είχε εγκατεστημένο το πρόγραμμα

καταγραφής. Πριν την έναρξη της φόρτισης γινόταν έλεγχος λειτουργίας του μικρομέτρου με το ειδικό λογισμικό. Στην περίπτωση των σύνθετων δοκιμίων το L.V.D.T. τοποθετούταν έτσι ώστε οι αιχμές με τις οποίες στηρίζεται στο δοκίμιο να ακουμπούν στα τμήματα του ψαμμίτη. Όταν όμως το ποσοστό του ιλυολίθου μεγάλωνε και επειδή η συσκευή έχει συγκεκριμένο εύρος μέτρησης, η εφαρμογή του μικρομέτρου γινόταν στο τμήμα του ιλυολίθου. Επειδή το L.V.D.T. στηριζόταν σε διαφορετικά τμήματα πετρώματος, το δοκίμιο συγκρατούνταν με το χέρι μέχρι να ασκηθεί η πρώτη αξονική φόρτιση, έτσι ώστε να μην υπάρξει σχετική μετακίνηση των τεμαχών του δοκιμίου.

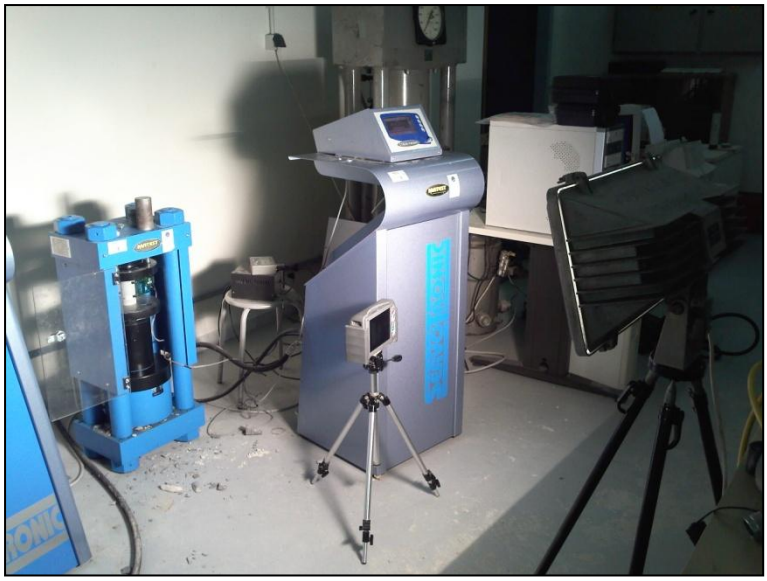


Εικονα 3.27. Το L.V.D.T. τοποθετημένο σε δοκίμιο



Εικονα 3.28. Το Data Logger, ο υπολογιστής και το πρόγραμμα καταγραφής των μετακινήσεων επί τω έργω

Στη συνέχεια γινόταν η εγκατάσταση της κάμερας υψηλής ταχύτητας και του προβολέα και πραγματοποιούνταν οι απαραίτητες ρυθμίσεις έτσι ώστε η καταγραφή να είναι όσο το δυνατόν πιο ευκρινής. Η κάμερα ρυθμιζόταν να εγγράφει video με ταχύτητα 250 frames το δευτερόλεπτο με ανάλυση 640x480 pixels.



Εικονα 3.29.Διάταξη δοκιμής με την πρέσα, το L.V.D.T., την κάμερα και τον προβολέα

Στο σημείο αυτό γινόταν η ρύθμιση της πρέσας και οριζόταν η ταχύτητα φόρτισης έτσι ώστε να υπάρχει θραύση μέσα σε διάστημα 5-15 λεπτών όπως ορίζεται από τις πρότυπες δοκιμές βραχομηχανικής.

Πραγματοποιούνταν εκκίνηση της σερβο-υδραυλικής πρέσας και μόλις οι πλάκες ερχόταν σε επαφή με το δοκίμιο εκκινούταν επίσης η καταγραφή της παραμόρφωσης με το L.V.D.T.

Κατά τη θραύση του δοκιμίου η πρέσα σταματά αυτόματα και αναγράφεται στην οθόνη η μέγιστη τιμή της αντοχής. Επίσης σταματάται και η καταγραφή της κάμερας καθώς και η καταγραφή του μικρομέτρου.

Από τη μέγιστη τιμή του φορτίου που κατέγραψε η πρέσα, προκύπτει η αντοχή από τη σχέση:

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

Όπου: $\boldsymbol{\sigma_c}$ η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του δοκιμίου σε Pa (ή kPa ή MPa).

P το μέγιστο φορτίο σε N (ή kN ή MN)

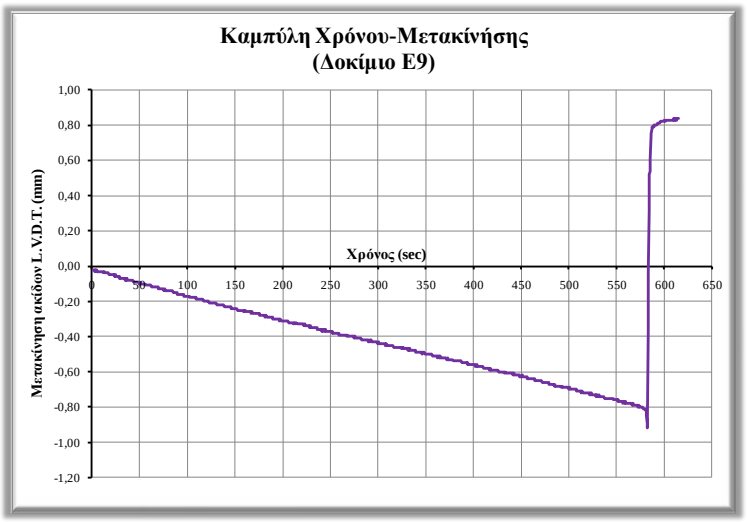
A το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε m^2.

Στη συνέχεια γίνεται αναγωγή της αντοχής σε δοκίμιο διαμέτρου 50mm από τον τύπο των Hoek & Brown 1980 που παρουσιάστηκε στη Παράγραφο 3.2.1.4:

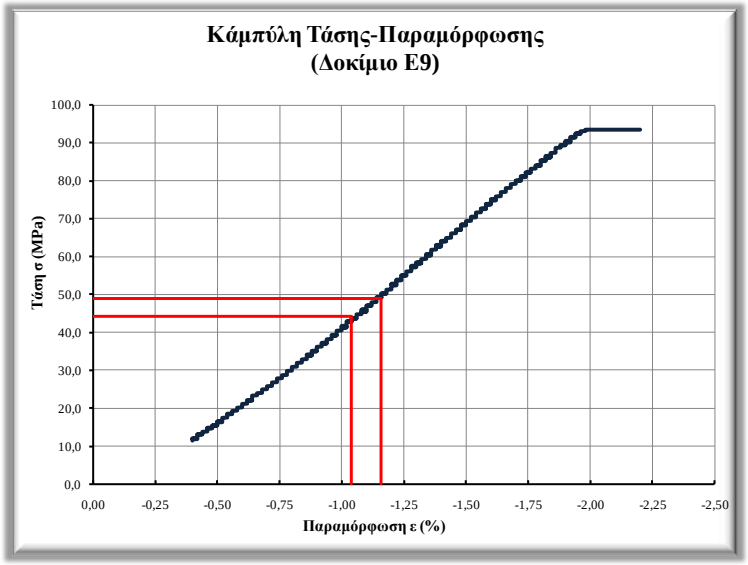
$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50}\left(\frac{50}{d}\right)^{0,18}$$

όπου: d σε mm

Από τα αποτελέσματα του λογισμικού καταγραφής του L.V.D.T. έχουμε την καταγραφή της μετακίνησης με τον χρόνο. Σε ένα φύλλο EXCEL γίνεται η αναγωγή της μετακίνησης των ακίδων του μικρομέτρου σε παραμόρφωση, διαιρώντας με την αρχική απόσταση των ακίδων που είναι σταθερή και κατασκευαστικό χαρακτηριστικό της συσκευής (50mm). Επίσης γνωρίζοντας την ταχύτητα φόρτισης που έχουμε θέσει στη σερβο-υδραυλική πρέσα, μπορεί να σχεδιαστεί την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων και να υπολογιστεί τέλος το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (διαγράμματα 3.3, 3.10).

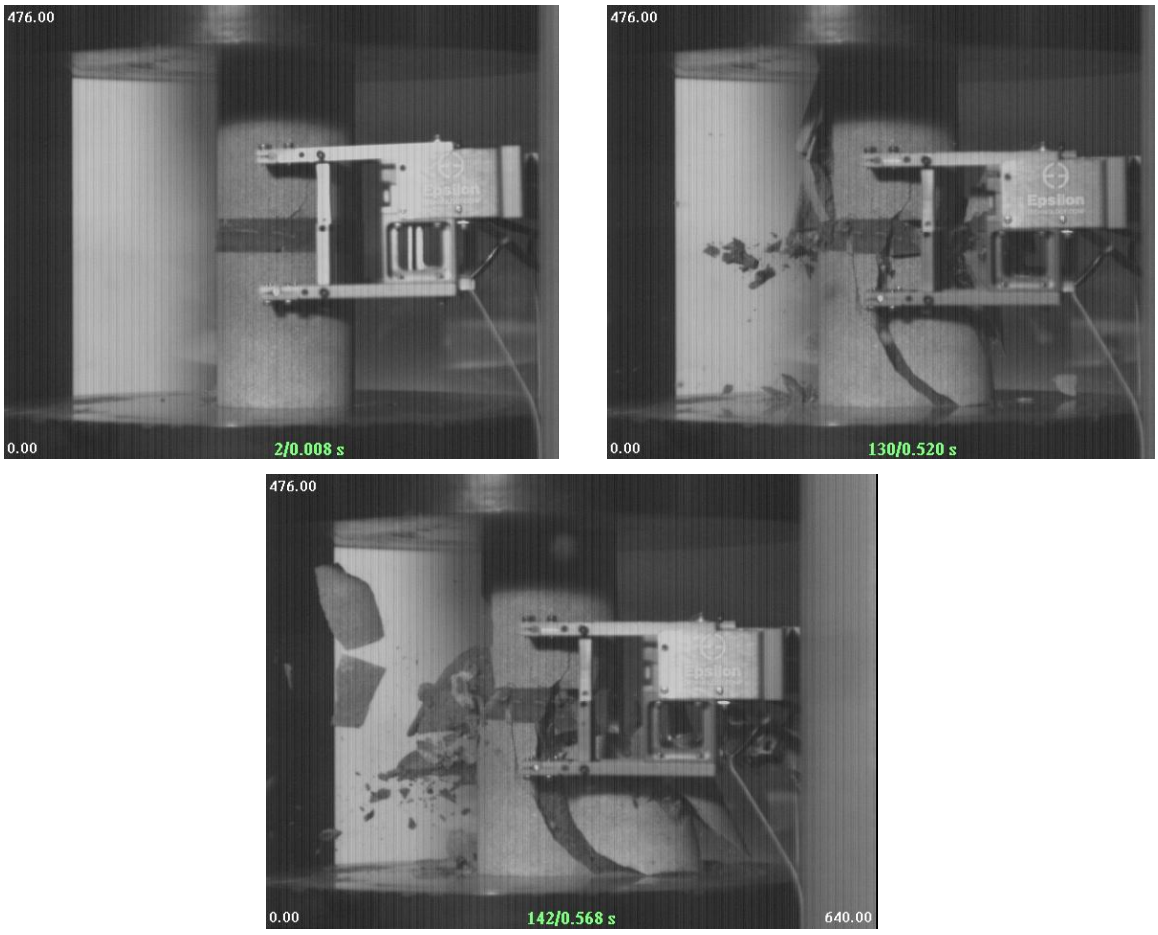


Διάγραμμα 3.9. Καμπύλη χρόνου-μετακίνησης δοκιμίου Ε9



Διάγραμμα 3.10. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου Ε9

Τέλος, όσον αφορά την καταγραφή της θραύσης με την κάμερα υψηλής ταχύτητας, γίνεται απομόνωση του τμήματος του video που μας ενδιαφέρει και αποθηκεύεται στον υπολογιστή σε μορφή επεξεργάσιμου αρχείου.



Εικονα 3.30.Στιγμιότυπα θραύσης σύνθετου δοκιμίου

Σημείωση: Η πρότυπη δοκιμή προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με ταυτόχρονο προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζεται στο παράρτημα Α ενώ οι συσκευές και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1. ΠΛΗΘΟΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1.1. Πλήθος δοκιμίων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διατηρήθηκαν, κόπηκαν, λείανθηκαν, με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, συνολικά:

- 39 δοκίμια ψαμμίτη και
- 21 δοκίμια ιλυολίθου

απ' όπου προέκυψαν

- 5 δοκίμια άρρηκτου ψαμμίτη
- 4 δοκίμια άρρηκτου ιλυολίθου

- 17 ετερογενή δοκίμια με συνδυασμό ψαμμίτη και ιλιολίθού σε διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας.

Το κάθε ετερογενές δοκίμιο είχε δύο τεμάχη ψαμμίτη και ένα ενδιάμεσο τεμαχος ιλυολίθου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ομογενών και ετερογενών δοκιμίων ακολουθούσαν τις προδιαγραφές των πρότυπων δοκιμών βραχομηχανικής (Παράρτημα Α).

4.1.2. Κωδικοποίηση δοκιμίων

Τα δοκίμια άρρηκτου ψαμμίτη φέρουν τους κωδικούς Ψ1 έως Ψ5

Τα δοκίμια του άρρηκτου ιλυολίθου φέρουν τους κωδικούς Ι1 έως Ι4

Τα ετερογενή δοκίμια φέρουν τους κωδικούς Ε1 έως Ε17. Το κάθε ετερογενές δοκίμιο αποτελείτο, όπως προαναφέρθηκε από τρία τεμάχη πετρώματος, δυο ψαμμίτη και ένα ενδιάμεσο ιλιολίθου. Το κάθε τέμαχος πήρε την ταξινόμηση α, β και γ ανάλογα με τη θέση του στο δοκίμιο:

- α το ανώτερο ψαμμιτικό τμήμα
- β το ενδιάμεσο ιλυολιθικό τμήμα
- γ το κατώτερο ψαμμιτικό τμήμα.

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελεί το **δοκίμιο Ε15** το οποίο αποτελούνταν από πέντε διαφορετικά τεμάχη, τρία ψαμμίτη και δύο ενδιάμεσα ιλυολίθου. Εδώ τα τεμάχη ταξινομήθηκαν με κωδικούς από α (ανώτερο τέμαχος) έως ε (κατώτερο τέμαχος).

Εικονα 4.1. Δοκίμιο Ε15 με τρείς στρώσεις ψαμμίτη και δύο ενδιάμεσς στρώσεις ιλυολίθου

4.2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.2.1. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η πυκνότητα και το ειδικό βάρος των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Δοκίμια Ψαμμίτη

	Γεωμετρικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά								
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Τμήματα**	**Ύψος (mm)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**$\rho_{ψαμμίτη}$ (Mg/m^3)**	**$\gamma_{ψαμμίτη}$ (kN/m^3)**
1	**Ψ1**	Δοκίμιο Ψαμμίτη		111,31	0	52,09	605,5	2,553	25,04
2	**Ψ2**	Δοκίμιο Ψαμμίτη		106,53	0	52,16	580,91	2,552	25,02
3	**Ψ3**	Δοκίμιο Ψαμμίτη		113,33	0	51,97	614,9	2,557	25,08
4	**Ψ4**	Δοκίμιο Ψαμμίτη		118,06	0	51,99	645,54	2,575	25,26
5	**Ψ5**	Δοκίμιο Ψαμμίτη		114,37	0	52,08	631,12	2,591	25,41

Πίνακας 4.1. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων ψαμμίτη

Δοκίμια Ιλυολίθου

	Γεωμετρικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά								
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Τμήματα**	**Ύψος (mm)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**$\rho_{ιλυολίθου}$ (Mg/m^3)**	**$\gamma_{ιλυολίθου}$ (kN/m^3)**
6	**Ι1**	Δοκίμιο Ιλυολίθου		126,47	100	62,73	931,48	2,383	23,37
7	**Ι2**	Δοκίμιο Ιλυολίθου		134,31	100	62,87	989,42	2,373	23,27
8	**Ι3**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ιλυολίθου		96,96	100	52,13	531,15	2,567	25,17
9	**Ι4**	Δοκίμιο Ιλυολίθου		145,355	100	67,82	1337,32	2,547	24,97

Πίνακας 4.2. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων ιλυολίθου

Σύνθετα Δοκίμια

	Γεωμετρικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά												
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Τμήματα**	**Ύψος (mm)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**$\rho_{ψαμμίτη}$ (Mg/m^3)**	**$\gamma_{ψαμμίτη}$ (kN/m^3)**	**$\rho_{ιλυολίθου}$ (Mg/m^3)**	**$\gamma_{ιλυολίθου}$ (kN/m^3)**	**$\rho_{συνολικού\ δοκιμίου}$ (kN/m3)**
10	**Ε1**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε1α	39,52	34,21	52,01	218,42	2,595	25,45			2,600
			Ε1β	41,13			225,61			2,588	25,38	
			Ε1γ	39,59			220,27	2,618	25,67			
11	**Ε2**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε2α	39,32	34,66	52,05	219,21	2,615	25,64			2,596
			Ε2β	40,87			222,27			2,554	25,05	
			Ε2γ	37,73			209,88	2,621	25,71			
12	**Ε3**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε3α	39,11	33,35	51,94	217,60	2,616	25,66			2,598
			Ε3β	38,17			208,34			2,573	25,23	
			Ε3γ	37,17			204,23	2,605	25,55			
13	**Ε4**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε4α	44,30	26,92	51,99	246,56	2,621	25,71			2,621
			Ε4β	32,51			179,29			2,598	25,48	
			Ε4γ	43,97			246,12	2,639	25,88			
14	**Ε5**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε5α	48,35	16,38	52,12	268,67	2,615	25,65			2,593
			Ε5β	19,35			101,78			2,474	24,26	
			Ε5γ	50,42			282,98	2,616	25,65			
15	**Ε6**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε6α	39,61	36,82	52,00	220,11	2,613	25,63			2,605
			Ε6β	46,17			253,24			2,584	25,34	
			Ε6γ	39,60			220,17	2,622	25,71			
16	**Ε7**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε7α	57,77	9,79	51,96	314,24	2,567	25,17			2,571
			Ε7β	12,54			70,29			2,658	26,06	
			Ε7γ	57,84			314,06	2,552	25,03			
17	**Ε8**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε8α	48,15	10,39	51,99	262,40	2,564	25,15			2,585
			Ε8β	11,26			61,66			2,591	25,41	
			Ε8γ	48,98			270,70	2,601	25,51			
18	**Ε9**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε9α	51,39	10,34	51,97	285,76	2,617	25,66			2,609
			Ε9β	11,89			63,97			2,542	24,93	
			Ε9γ	51,74			286,89	2,615	25,64			

Α/Α	Κωδικός	Χαρακτηρισμός	Τμήματα	Ύψος (mm)	Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Διάμετρος (mm)	Βάρος (gr)	$\rho_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta}$ (Mg/m^3)	$\gamma_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta}$ (kN/m^3)	$\rho_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}$ (Mg/m^3)	$\gamma_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}$ (kN/m^3)	$\rho_{\sigma\upsilon\nu o\lambda\iota\kappa o\acute{\upsilon}\ \delta o\kappa\iota\mu\acute{\iota}o\upsilon}$ (kN/m3)
19	**E10**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε10α	44,95	46,80	62,96	370,05	2,591	25,41			2,609
			Ε10β	77,07			615,63			2,566	25,17	
			Ε10γ	42,67			351,65	2,595	25,45			
20	**E11**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε11α	64,32	18,07	62,70	525,50	2,577	25,27			2,610
			Ε11β	29,21			213,57			2,368	23,22	
			Ε11γ	68,13			563,78	2,612	25,61			
21	**E12**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε12α	68,80	23,24	62,95	572,50	2,633	25,82			2,596
			Ε12β	42,05			309,26			2,363	23,17	
			Ε12γ	70,07			579,80	2,618	25,67			
22	**E13**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε13α	64,32	24,40	62,31	525,50	2,577	25,27			2,618
			Ε13β	42,76			309,04			2,371	23,25	
			Ε13γ	68,13			563,78	2,612	25,61			
23	**E14**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε14α	85,43	7,05	62,81	706,30	2,603	25,53			2,645
			Ε14β	13,16			97,87			2,400	23,54	
			Ε14γ	88,01			725,01	2,588	25,38			
24	**E15**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 3 τεμάχη ψαμμίτη και 2 ενδιάμεσα τεμάχη ιλυολίθου	Ε15α	45,49	20,65	62,58	371,43	2,565	25,15			2,603
			Ε15β	18,71			135,77			2,362	23,17	
			Ε15γ	45,64			375,49	2,581	25,31			
			Ε15δ	16,20			115,43			2,314	22,70	
			Ε15ε	43,02			355,29	2,601	25,51			
25	**E16**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε16α	28,71	65,02	62,68	228,92	2,511	24,63			2,505
			Ε16β	99,34			748,27			2,441	23,94	
			Ε16γ	24,73			203,94	2,599	25,49			
26	**E17**	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	Ε17α	24,29	73,37	71,18	249,10	2,583	25,33			2,578
			Ε17β	128,86			1322,67			2,574	25,25	
			Ε17γ	22,48			229,93	2,575	25,25			

Πίνακας 4.3. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά σύνθετων δοκιμίων

Από τις διαστάσεις των αντίστοιχων τεμαχών των δοκιμίων προκύπτει το ποσοστό ιλυολίθου εκφρασμένο επί τις 100 (%).

Ακόμα προκύπτει η μέση πυκνότητα και το ειδικό βάρος των δύο υλικών ως:

$\rho_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 2{,}59\ Mg/m^3$ και $\gamma_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 25{,}44\ Mg/m^3$

$\rho_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 2{,}49 Mg/m^3$ και $\gamma_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 24{,}42\ Mg/m^3$

4.2.2. Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

Από τη δοκιμή ταχύτητας διάδοσης υπέρηχων κυμάτων που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής» και χρησιμοποιώντας του τύπους που αναφέρθηκαν προιγουμένως προέκυψαν τα δεδομένα και η στατιστική τους επεξεργασία όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Εδώ σημειώνεται ότι εκτός από τα δοκίμια που αναφέρονται παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ταχύτητας μετάδοσης υπέρηχων κυμάτων και σε άλλα δείγματα από το ίδιο υλικό που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο, τα οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν για θραύση και δεν παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα δοκίμια αυτά κωδικοποιούνται ως Ψ για τον ψαμμίτη και Ι για τον ιλυόλιθο.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 32 δοκιμές διάδοσης υπέρηχων κυμάτων από τις οποίες:

- Οι 14 πραγματοποιήθηκαν σε ψαμμίτη
- Οι 5 πραγματοποιήθηκαν σε ιλυόλιθο
- Οι 12 πραγματοποιήθηκαν σε σύνθετα δοκίμια με κυμαινόμενο ποσοστό ιλυολίθου

Ψαμμίτης

Δοκίμιο						Δυναμικές Παράμετροι						
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Πυκνότητα (Mg/m^3)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**t_p (μs)**	**t_s (μs**	**Vp (m/s)**	**Vs (m/s)**	**E_D (GPa)**	**v_D**	**G_D (GPa)**
1	Ψ2	Δοκίμιο Ψαμμίτη	106,53	2,552	0,00	25,50	38,50	4177,6	2767,0	43,35	0,11	19,54
2	Ψ3	Δοκίμιο Ψαμμίτη	113,33	2,557	0,00	27,20	42,30	4166,5	2679,2	42,12	0,15	18,35
3	Ψ4	Δοκίμιο Ψαμμίτη	118,06	2,575	0,00	28,50	43,00	4142,5	2745,6	43,03	0,11	19,41
4	Ψ5	Δοκίμιο Ψαμμίτη	114,37	2,591	0,00	28,10	42,90	4070,1	2666,0	41,41	0,12	18,42
5	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	59,94	2,629	0,00	13,30	19,80	4506,8	3027,3	52,48	0,09	24,10
6	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	59,68	2,628	0,00	13,40	19,60	4453,7	3044,9	51,71	0,06	24,37
7	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	37,70	2,618	0,00	9,30	12,80	4053,8	2945,3	42,74	-0,06	22,71
8	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	38,14	2,633	0,00	8,30	11,90	4595,2	3205,0	55,51	0,03	27,04
9	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	40,90	2,578	0,00	8,80	12,60	4647,7	3246,0	55,62	0,02	27,16
10	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	66,14	2,574	0,00	16,20	25,20	4082,7	2624,6	40,70	0,15	17,73
11	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	72,43	2,615	0,00	17,20	26,10	4211,0	2775,1	44,96	0,12	20,14
12	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	69,55	2,623	0,00	16,20	25,10	4293,2	2770,9	46,04	0,14	20,14
13	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	71,54	2,583	0,00	16,50	26,30	4335,8	2720,2	44,93	0,18	19,11
14	Ψ	Δοκίμιο Ψαμμίτη	44,09	2,627	0,00	10,20	15,10	4322,5	2919,9	48,39	0,08	22,40

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα δοκίμια ψαμμίτη

Παράμετρος	*Μονάδα Μέτρησης*	*Αριθμός δεδομένων*	*Ελάχιστη τιμή*	*Μέγιστη Τιμή*	*Μέση Τιμή*	*Τυπική απόκλιση*
Vp	m/s	14	4054	4648	4290	196,32
Vs	m/s	14	2625	3246	2867	200,50
E_D	GPa	14	40,70	55,62	46,64	5,19
v_D	-	14	-0,06	0,18	0,09	0,06
G_D	GPa	14	17,73	27,16	21,47	3,18

Πίνακας 4.5. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων δοκιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων για τον ψαμμίτη

Ιλυόλιθος

Δοκίμιο						Δυναμικές Παράμετροι						
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Πυκνότητα (ton/m^3)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**t_p (μsec)**	**t_s (μsec)**	**Vp (m/sec)**	**Vs (m/sec)**	**E_D** (GPa)	**v_D**	**G_D** (GPa)
15	I1	Δοκίμιο Ιλυολίθου	126,47	2,38	100,00	43,20	62,10	2927,5	2036,6	20,38	0,03	9,88
16	I2	Δοκίμιο Ιλυολίθου	134,31	2,37	100,00	45,20	66,60	2971,5	2016,7	20,71	0,07	9,65
17	I4	Δοκίμιο Ιλυολίθου	145,36	2,55	100,00	44,80	65,40	3244,5	2222,6	26,62	0,06	12,58
18	I	Δοκίμιο Ιλυολίθου	128,84	2,574	100,00	48,00	61,10	2684,2	2108,7	15,89	-0,31	11,45
19	I	Δοκίμιο Ιλυολίθου	99,34	2,44	100,00	34,00	50,90	2921,8	1951,7	20,40	0,10	9,30

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα δοκίμια ιλυολίθου

Παράμετρος	*Μονάδα Μέτρησης*	*Αριθμός δεδομένων*	*Ελάχιστη τιμή*	*Μέγιστη Τιμή*	*Μέση Τιμή*	*Τυπική απόκλιση*
Vp	m/sec	5	2684	3245	2950	199,49
Vs	m/sec	5	1952	2223	2067	103,31
E_D	GPa	5	15,89	26,62	20,80	3,82
v_D	-	5	-0,31	0,10	0,01	0,17
G_D	GPa	5	9,30	12,58	10,57	1,39

Πίνακας 4.7. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων δοκιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων για τον ιλυόλιθο

Σύνθετα δοκίμια

Δοκίμιο						**Δυναμικές Παράμετροι**						
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Πυκνότητα (ton/m^3)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**t_p (μsec)**	**t_s (μsec)**	**Vp (m/sec)**	**Vs (m/sec)**	**E_D** (GPa)	**v_D**	**G_D** (GPa)
20	E2	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	117,92	2,596	34,66	30,30	47,50	3891,7	2482,5	37,02	0,16	16,00
21	E4	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	120,78	2,621	26,92	31,10	45,10	3883,6	2678,0	39,35	0,05	18,80
22	E5	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	118,12	2,593	16,38	31,40	45,70	3761,8	2584,7	36,47	0,05	17,32
23	E6	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	125,38	2,605	36,82	32,00	47,90	3918,1	2617,5	39,16	0,10	17,85
24	E8	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	108,39	2,585	10,39	27,80	40,60	3898,9	2669,7	39,01	0,06	18,42
25	E9	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	115,02	2,609	10,34	26,20	41,20	4390,1	2791,7	47,20	0,16	20,33

Δοκίμιο						Δυναμικές Παράμετροι						
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Πυκνότητα (ton/m^3)**	**Ποσοστό ιλυολίθου (%)**	**t_p (μsec)**	**t_s (μsec)**	**Vp (m/sec)**	**Vs (m/sec)**	**E_D** (GPa)	**v_D**	**G_D** (GPa)
26	E10	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	164,69	2,609	46,80	46,50	69,00	3541,7	2386,8	32,22	0,08	14,86
27	E11	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	161,66	2,610	18,07	41,60	57,70	3886,1	2801,7	39,29	-0,04	20,49
28	E12	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	180,92	2,596	23,24	46,50	59,20	3890,8	3056,1	33,68	-0,31	24,24
29	E14	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	186,60	2,645	7,05	45,40	72,10	4110,1	2588,1	41,51	0,17	17,72
30	E15	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 3 τεμάχη ψαμμίτη και 2 ενδιάμεσα τεμάχη ιλυολίθου	169,06	2,603	20,65	46,70	71,70	3620,1	2357,9	32,75	0,13	14,47
31	E16	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	152,78	2,505	65,02	47,20	69,40	3236,9	2201,4	25,98	0,07	12,14
32	E17	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	175,63	2,578	73,37	60,60	82,20	2898,2	2136,6	21,29	-0,10	11,77

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα σύνθετα δοκίμια

Για τα δεδομένα των σύνθετων δοκιμίων δεν νοείται στατιστική επεξεργασία αφού πρόκειται για δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό ιλυολίθου και δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

4.2.3. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young.

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας Young.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 26 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και 14 δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Σημειώνεται ότι τα φύλλα δοκιμών παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

Ψαμμίτης

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου							Μονοαξονική Θλίψη					Μέτρο Ελαστικότητας
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**Ποσοστό Ιλυολίθου (%)**	**Διάρκεια Δοκιμής (min)**	**Ταχύτητα Φόρτισης (kN/sec)**	**Αντοχή (kN)**	**Φορτίο Θλίψης (MPa)**	**Αναγωγή σε δοκίμιο 50mm (Hoek & Brown [1980]) (MPa)**	**E (GPa)**
1	Ψ1	Δοκίμιο Ψαμμίτη	111,31	52,09	605,50	0	20	0,20	180,6	84,76	85,38	
2	Ψ2	Δοκίμιο Ψαμμίτη	106,53	52,16	580,91	0	13	0,30	220,2	103,04	103,83	
3	Ψ3	Δοκίμιο Ψαμμίτη	113,33	51,97	614,90	0	11	0,32	197,2	92,95	93,60	39,25
4	Ψ4	Δοκίμιο Ψαμμίτη	118,06	51,99	645,54	0	11	0,35	205	96,55	97,24	42,81
5	Ψ5	Δοκίμιο Ψαμμίτη	114,37	52,08	631,12	0	13	0,35	197,7	92,82	93,50	58,86

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας Young σε δοκίμια ψαμμίτη

Παράμετρος	*Μονάδα Μέτρησης*	*Αριθμός δεδομένων*	*Ελάχιστη τιμή*	*Μέγιστη Τιμή*	*Μέση Τιμή*	*Τυπική απόκλιση*
σ_{ci}	MPa	5	85,38	103,04	94,71	6,69
E	GPa	3	39,25	58,86	46,97	10,45

Πίνακας 4.10. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων μονοαξονικής θλίψης και μέτρου ελαστικότητας ψαμμίτη

Ιλυόλιθος

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου							Μονοαξονική Θλίψη					Μέτρο Ελαστικότητας
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Διάμμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**Ποσοστό Ιλυολίθου (%)**	**Διάρκεια Δοκιμής (min)**	**Ταχύτητα Φόρτισης (kN/sec)**	**Αντοχή (kN)**	**Φορτίο Θλίψης (MPa)**	**Αναγωγή σε δοκιμιο 50mm (Hoek & Brown [1980]) (MPa)**	**E (GPa)**
6	I1	Δοκίμιο Ιλυολίθου	126,47	62,73	931,48	100	19	0,20	159,4	51,58	53,73	
7	I2	Δοκίμιο Ιλυολίθου	134,31	62,87	989,42	100	10	0,30	145,2	46,78	48,75	
8	I3	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ιλυολίθου	96,96	52,13	531,15	100	9	0,20	73,3	34,35	34,61	
9	I4	Δοκίμιο Ιλυολίθου	145,36	67,82	1337,32	100	10	0,30	127,7	35,35	37,34	

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young σε δοκίμια ιλυολίθου

Παράμετρος	*Μονάδα Μέτρησης*	*Αριθμός δεδομένων*	*Ελάχιστη τιμή*	*Μέγιστη Τιμή*	*Μέση Τιμή*	*Τυπική απόκλιση*
σ_{ci}	MPa	4	34,61	53,73	43,60	9,11
E	GPa	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.12. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων μονοαξονικής θλίψης και μέτρου ελαστικότητας ιλυολίθου

Σύνθετα δοκίμια

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου							Μονοαξονική Θλίψη					Μέτρο Ελαστικότητας
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**Ποσοστό Ιλυολίθου (%)**	**Διάρκεια Δοκιμής (min)**	**Ταχύτητα Φόρτισης (kN/sec)**	**Αντοχή (kN)**	**Φορτίο Θλίψης (MPa)**	**Αναγωγή σε δοκίμιο 50mm (Hoek & Brown [1980]) (MPa)**	**E (GPa)**
10	E1	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	159,56	52,01	664,30	34,2	13	0,17	119,2	56,10	56,50	
11	E2	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	117,92	52,05	651,36	34,7	8	0,20	77,8	36,56	36,83	
12	E3	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	114,45	51,94	630,17	33,4	9	0,25	85,5	40,35	40,63	
13	E4	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	120,78	51,99	671,97	26,9	8	0,27	117	55,12	55,51	
14	E5	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	118,12	52,12	653,43	16,4	11	0,27	164	76,87	77,44	
15	E6	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	125,38	52,00	693,52	36,8	7	0,27	88,8	41,82	42,11	19,62
16	E7	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	128,15	51,96	698,59	9,8	11	0,30	141,6	66,78	67,24	24,78
17	E8	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	108,39	51,99	594,76	10,4	11	0,30	169,7	79,94	80,51	29,43
18	E9	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	115,02	51,97	636,62	10,3	14	0,30	198,3	93,47	94,13	39,24
19	E10	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	164,69	62,96	1337,33	46,8	11	0,25	153,6	49,34	51,43	

Χαρακτηριστικά Δοκιμίου							Μονοαξονική Θλίψη					Μέτρο Ελαστικότητας
Α/Α	**Κωδικός**	**Χαρακτηρισμός**	**Ύψος (mm)**	**Διάμετρος (mm)**	**Βάρος (gr)**	**Ποσοστό Ιλυολίθου (%)**	**Διάρκεια Δοκιμής (min)**	**Ταχύτητα Φόρτισης (kN/sec)**	**Αντοχή (kN)**	**Φορτίο Θλίψης (MPa)**	**Αναγωγή σε δοκίμιο 50mm (Hoek & Brown [1980]) (MPa)**	**E (GPa)**
20	E11	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	161,66	62,70	1302,85	18,1	9	0,35	172,4	55,84	58,16	19,05
21	E12	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	180,92	62,95	1461,56	23,2	12	0,25	183,7	59,02	61,52	16,07
22	E13	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	175,21	62,31	1398,32	24,4	12	0,30	168,2	55,17	57,40	16,4
23	E14	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	186,60	62,81	1529,18	7,1	13	0,35	208,8	67,39	70,21	29,34
24	E15	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 3 τεμάχη ψαμμίτη και 2 ενδιάμεσα τεμάχη ιλυολίθου	169,06	62,58	1353,41	20,6	12	0,35	182	59,18	61,62	25,01
25	E16	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	152,78	62,68	1181,13	65,0	7	0,25	83,2	26,96	28,08	21,61
26	E17	Δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου	175,63	71,18	1801,70	73,4	12	0,35	158,5	39,83	42,45	12,36

Πίνακας 4.13. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young σε σύνθετα δοκίμια

Για τα δεδομένα των σύνθετων δοκιμίων δεν νοείται στατιστική επεξεργασία αφού πρόκειται για δοκίμια με διαφορετικό ποσοστό ιλυολίθου και δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

4.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

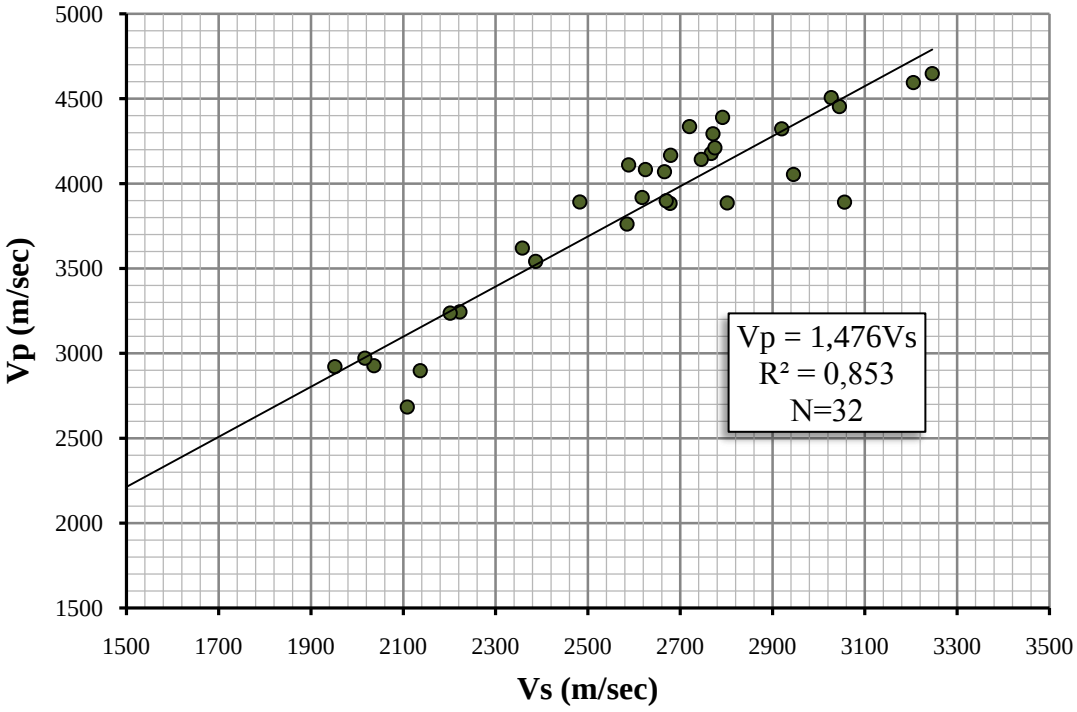
4.3.1. Συσχέτιση δυναμικών παραμέτρων

Γενικά στη βιβλιογραφία ο λόγος της ταχύτητας διάδοσης των επιμήκων κυμάτων προς αυτή των εγκάρσιων κυμάτων κυμαίνεται για τα βραχώδη υλικά γύρω από τη τιμή 1,5.

Ερευνητής	Έτος	Εξίσωση	r	r^2	Πέτρωμα
Σαμπατακάκης κ.α.	1993	Vp = 1,6Vs	0,81		Μαργες και Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι
Μαρίνος κ.α.	1994	Vp = 1,51Vs	0,70		Αθηναικός Σχιστόλιθος
Σαμπατακάκης κ.α.	2004	Vp = 1,66Vs	0,88		Κρυσταλλικός Ασβεστόλιθος, Μαργόλιθος, Ιλυόλιθος, Μαργαικός Ασβεστόλιθος, Ψαμμίτης, Μεταμορφωμένα και ηφαιστιακά πετρώματα
Κούκης κ.α.	2001	Vp = 1,68Vs	0,92		Ασβεστόλιθοι, Ψαμμίτες, Κροκαλοπαγη, Γνευσιοι, Σχιστόλιθοι
Σαρόγλου	2007	Vp = 1,75Vs		0,97	Διάφορα (βιβλιογραφία)
		Vp = 1,74Vs		0,97	Γνέυσιος, Σχιστόλιθος, Μάρμαρο
		Vp = 1,96Vs		0,96	Αθηναικό Σχιστόλιθο
		Vp = 1,71Vs		0,98	Γνέυσιο
		Vp = 1,64Vs		0,99	Μάρμαρο

Πίνακας 4.14. Σχέσεις βιβλιογραφίας για τη συσχέτιση επίμηκων και διατμητικών κυμάτων με τη ξηρή πυκνότητα

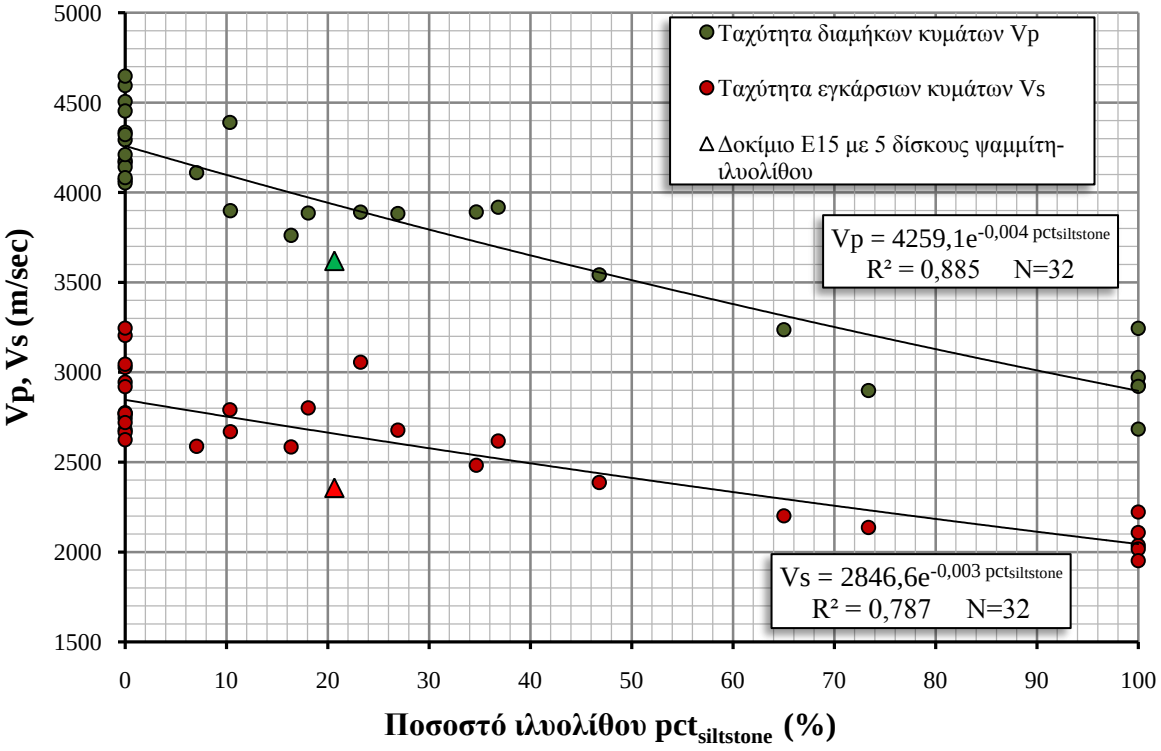
Για τα δείγματα που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, ομοιογενή και σύνθετα, παρατηρήθηκε λόγος 1,476 με πολύ καλό βαθμό συσχέτισης (R^2=0,85). Στη σχέση λοιπόν των δύο ταχυτήτων, δεν έπαιξε σημαντικό ρόλο η μετάβαση από τον ψαμμίτη στον ιλυόλιθο, ούτε η ύπαρξη των οριζόντιων διεπιφανειών.



Διάγραμμα 4.1. Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων

4.3.2. Συσχέτιση δυναμικών παραμέτρων με το ποσοστό ιλυολίθου

Γενικά αναμένεται πτώση της ταχύτητας διάδοσης των υπέρηχων κυμάτων όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο, και αυτό γιατί ο ιλυόλιθος παρουσιάζει γενικά χαμηλότερες ταχύτητες από αυτές του ψαμμίτη (4290m/sec και 2867m/sec για την μέση ταχύτητα των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων αντίστοιχα του ψαμμίτη, έναντι 2950m/sec και 2067m/sec για τον ιλυόλιθο αντίστοιχα). Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο είναι το τέμαχος του ιλυολιθικού υλικού στο δοκίμιο τόσο πιο χαμηλή θα είναι η ταχύτητα στο συνολικό δοκίμιο.

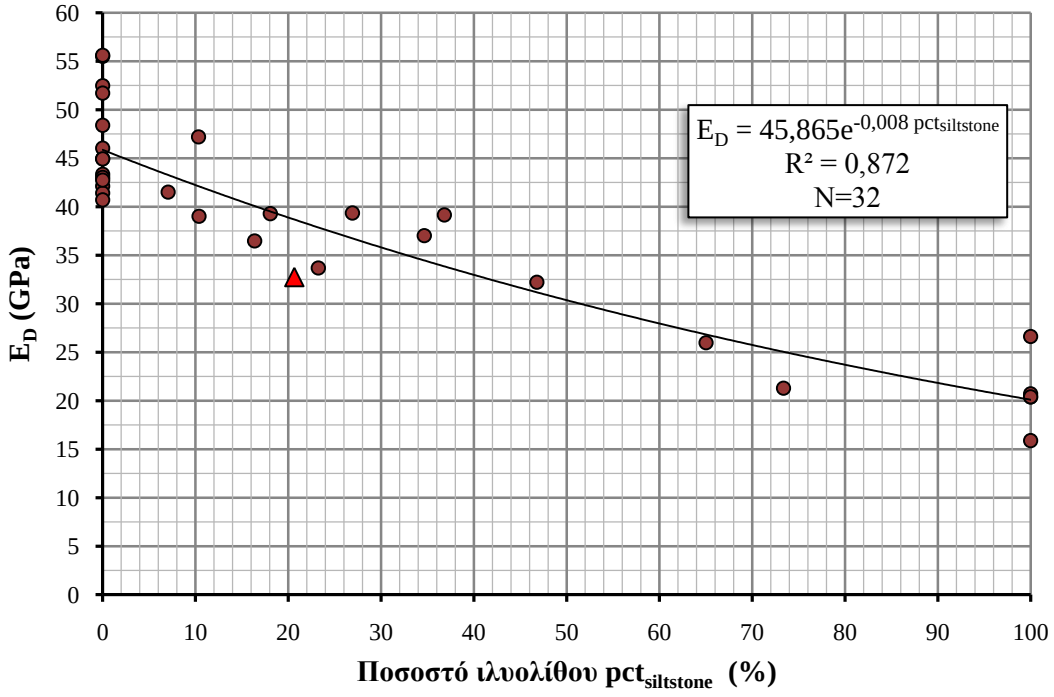


Διάγραμμα 4.2. Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο

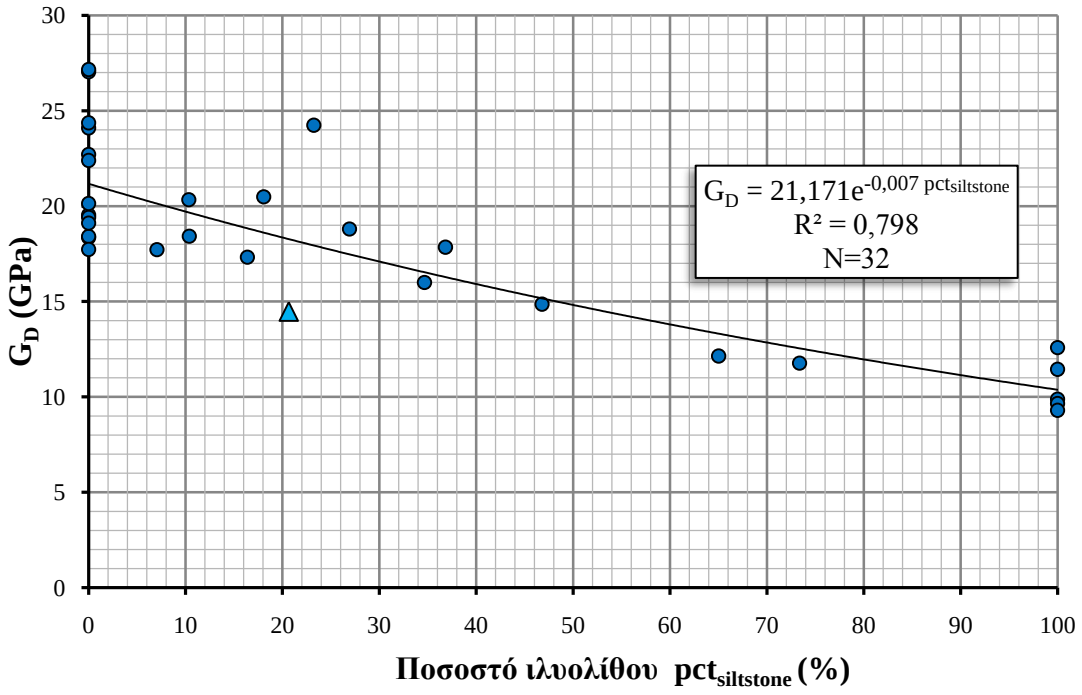
Η σχέση των παραπάνω παραμέτρων απεικονίζεται καλύτερα με εξίσωση εκθετικής μορφής με συντελεστές συσχέτισης R^2=0,88 και R^2=0,79 για τα επιμήκη και εγκάρσια κύματα αντίστοιχα.

Πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι το δοκίμιο Ε15 με ποσοστό ιλυολίθου 20% περίπου, που αποτελούνταν από 5 διαφορετικά τεμάχη ψαμμίτη-ιλυολίθου, παρουσιάζει γενικά χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας διάδοσης και των επίμηκων και των εγκάρσιων κυμάτων, πράγμα που οφείλεται στην ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού διεπιφανειών στο δοκίμιο. Το δοκίμιο αυτό παρουσιάζεται στο διάγραμμα με το τριγωνικό σχήμα. Παρ' όλη την απόκλιση στη συγκεκριμένη δοκιμή, δεν παρατηρείται πτώση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, όπως θα αναμενόταν, πράγμα που θα εξηγηθεί σε επόμενη παράγραφο.

Παρόμοια μορφή ακολουθούν και οι συσχετίσεις του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας καθώς και του δυναμικού μέτρου διάτμησης όπως παρουσιάζεται στα επόμενα διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.3. Συσχέτιση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο



Διάγραμμα 4.4. Συσχέτιση δυναμικού μέτρου διάτμησης με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο

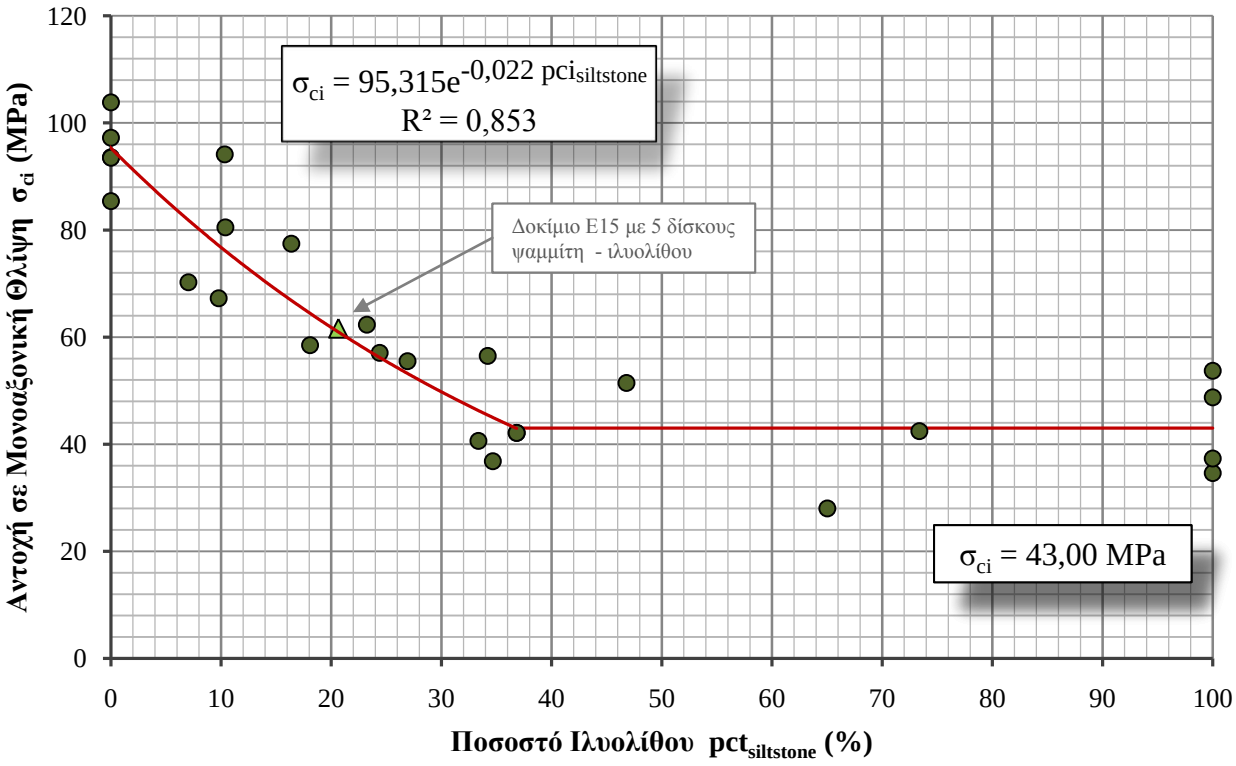
4.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

4.4.1. Συσχέτιση Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη με το Ποσοστό Ιλυολίθου

Η συσχέτιση αυτή αποτελεί την πεμπτουσία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς έγινε η προσπάθεια να διερευνηθεί η γενικότερη συμπεριφορά ενός σύνθετου βραχώδους δοκιμίου υπό συνθήκες μονοαξονικής θλίψης.

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής» του Τομέα Γεωτεχνικής, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει της περιεκτικότητας του δοκιμίου σε ιλυόλιθο. Το σημείο που σημειώνεται με πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχεί στο δοκίμιο Ε15 το οποίο απαρτίζονταν από 5 διαφορετικά τεμάχη ψαμμίτη και ιλυολίθου και όχι από τρία όπως στην περίπτωση των υπόλοιπων δοκιμίων.

Υπενθυμίζεται επίσης ότι για τις τιμές σ_{ci} έχει γίνει αναγωγή σε δοκίμιο διαμέτρου 50mm με τη σχέση Hoek & Brown [1980] όπως παρουσιάζεται στη παράγραφο 3.2.1.4.



Διάγραμμα 4.5. Συσχέτιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το ποσοστό ιλυολίθου του δοκιμίου

Η μέση αντοχή του άρρηκτου ψαμμίτη σύμφωνα με την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ομογενών δοκιμίων αγγίζει την τιμή των 95,0MPa ενώ του ιλυολίθου τα 43,0MPa.

Στο παραπάνω διάγραμμα διακρίνεται καθαρά ένα πτωτικό τμήμα που ξεκινά από την μέση αντοχή του ψαμμίτη και καταλήγει σε αυτή του ιλυολίθου. Η πτώση παρατηρείται για ποσοστό ιλυολίθου μέχρι 35% ενώ για περαιτέρω αύξηση του ποσοστού του ιλυολίθου στο δοκίμιο, η αντοχή παραμένει σταθερή και περίπου ίση με την αυτή του ιλυολίθου.

Από στατιστική ανάλυση των δεδομένων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προτείνονται οι σχέσεις:

Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 35%:

$$\sigma_{ci} = 95,315 \cdot e^{(-0,022 \cdot pct_{siltstone})} \quad , \quad R^2 = 0,853$$

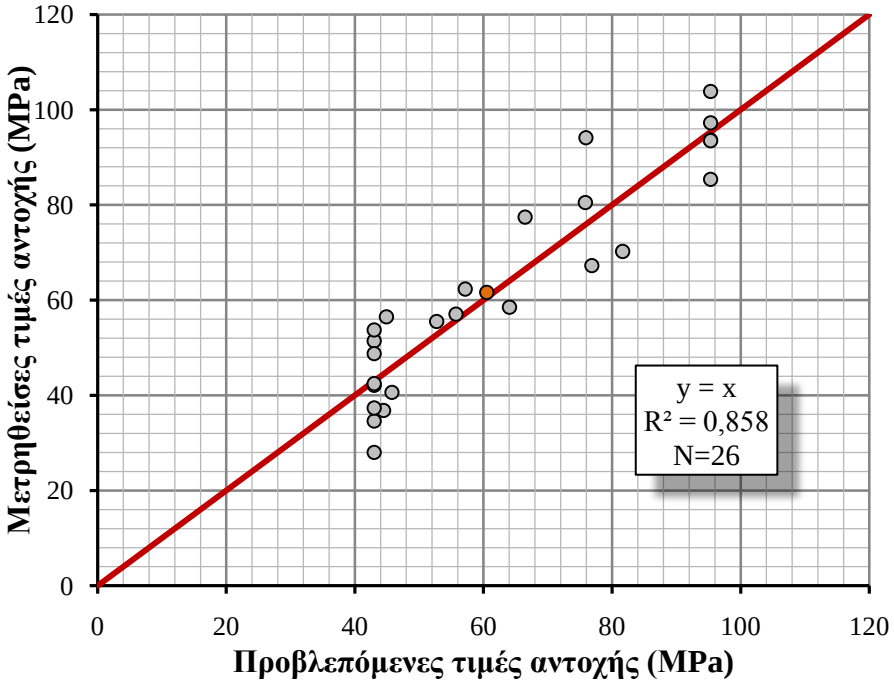
Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 35%:

$$\sigma_{ci} = \sigma_{ci}^{siltstone} = 43,00 \ \text{MPa}$$

όπου σ_{ci}: η αντοχή το δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη [MPa]

$pct_{siltstone}$: percentage siltstone, το ποσοστό ιλυολίθου στο ύψος του δοκιμίου[%]

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την σχέση των μετρημένων τιμών στο εργαστήριο με τις προβλεπόμενες τιμές της αντοχής από τις παραπάνω σχέσεις. Παρατηρούμε πολύ καλή συσχέτιση με συντελεστή R^2 που ξεπερνά το 0,85.



Διάγραμμα 4.6. Σύγκριση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις προβλεπόμενες τιμές από τις προτεινόμενες σχέσεις

4.4.2. Παρατηρήσεις – Σχολιασμός

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

Παρατήρηση 1η

Η αντοχή των σύνθετων δοκιμίων παρουσιάζουν, ανάλογα με το ποσοστό περιεκτικότητας σε ιλυόλιθο, αντοχές που κυμαίνονται μεταξύ των αντοχών των άρρηκτων ομογενών πετρωμάτων, του ψαμμίτη και του ιλυολίθου. Σε καμία

περίπτωση δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι τα σύνθετα δείγματα μπορούν να ξεπεράσουν την αντοχή του ψαμμίτη ή να πέσουν χαμηλότερα από την αντοχή του ιλυολίθου.

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα σύμπεράσματα των Del Greco et al. (1993), όπου υποστηρίζεται ότι η αντοχή των σύνθετων δοκιμίων είναι χαμηλότερη και την αντοχή του ασθενέστερου υλικού.

Παρατήρηση 2η

Η συνάρτηση που εκφράζει καλύτερα τη πτωτική τάση των αντοχών είναι η εκθετική με βάση τη νεπέρεια σταθερά (e) και η αντοχή εξαρτάται αποκλειστικά από το ποσοστό του ιλυολίθου στο δοκίμιο.

Παρατήρηση 3η

Το δοκίμιο Ε15 που παρουσιάζεται στα διαγράμματα της προηγούμενης παραγράφου, ταιριάζει τέλεια με την προβλεπόμενη καμπύλη αντοχών για τα δοκίμια με τρία τεμάχη. Αν και πρέπει να πραγματοποιηθούν περισσότερες δοκιμές για τη στατιστική επαλήθευση, φαίνεται ότι η αντοχή του σύνθετου δοκιμίου εξαρτάται κυρίως από τα συνολικά ποσοστά ιλυολίθου-ψαμμίτη και όχι από τον αριθμό των στρώσεων.

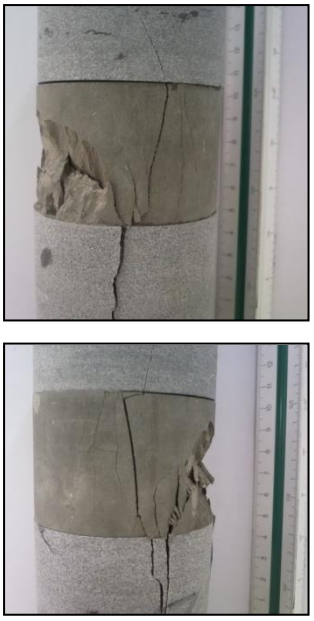
Παρατήρηση 4η

Για ποσοστά ιλυολίθου μικρότερα από το 35%, παρατηρούνται επιφάνειες θραύσεις που διέρχονται και από τα δύο διαφορετικά υλικά. Για χαμηλές περιεκτικότητες υπήρχε σαφής αποχωρισμός και ψαθυρή θραύση, του συνολικού δοκιμίου, του ψαμμίτη και του ιλυολίθου μαζί (εικόνες 4.2, 4.3) .

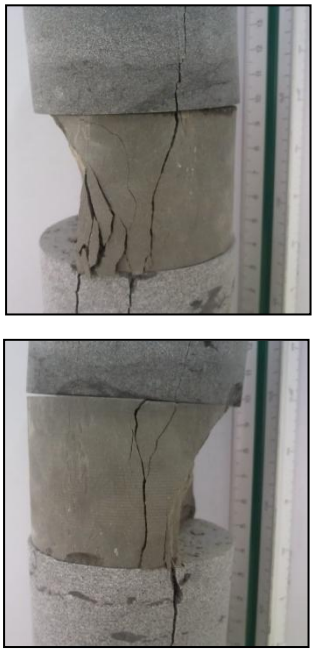
Εικονα 4.2. Δοκίμιο Ε8 με ποσοστό ιλυολίθου 10,39%

Εικονα 4.3. Δοκίμιο Ε7 με ποσοστό ιλυολίθου 9,79%

Για ποσοστά ιλυολίθου όμως από 22 έως 35% περίπου, η αστοχία του ψαμμίτη ήταν υπό μορφή ρωγμάτωσης, δηλαδή υπήρχε συνέχεια της επιφάνειας θραύσης του ιλυολίθου η οποία όμως δεν διαπερνούσε πλήρως το ψαμμιτικό τέμαχος. Αυτό μπορεί να φανεί πιο καθαρά από τη σύγκριση των φωτογραφιών 4.4 και 4.5 με τις 4.2 και 4.3.



Εικονα 4.4. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Ε12 με ποσοστό ιλυολίθου 23,24%



Εικονα 4.5. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Ε13 με ποσοστό ιλυολίθου 24,40%

Μια παραπάνω διερεύνηση του τρόπου και της διάδοσης της θραύσης παρουσιάζεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο 4.4.3.

Παρατήρηση 5η

Η συμπεριφορά του δείγματος ως σύμμικτου σταματά σε ποσοστό περιεκτικότητας ιλυολίθου 35% περίπου, και από εκεί και πέρα οι αντοχές πέφτουν στην αντοχή του ασθενέστερου πετρώματος. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και από τις φωτογραφίες

των θραύσεων όπου όταν το ποσοστό του ιλυολίθου ξεπερνούσε το 35%, η συμμετοχή του ψαμμίτη στη διαδικασία της θραύσης ήταν μηδαμινή, συνήθως με μια μικρή αποφλοίωση και όχι επιφάνεια θραύσης μέσα από το σώμα του άρρηκτου πετρώματος.

Εικονα 4.6. Θραύση σύνθετου δοκιμίου Ε10 με ποσοστό ιλυολίθου 46,8%. Παρατηρείται πλήρως διαμορφωμένη επιφάνεια θραύσης στο τέμαχος του ιλυολίθου ενώ το άνω τμήμα του ψαμμίτη απλά υπέστη αποφλοίωση

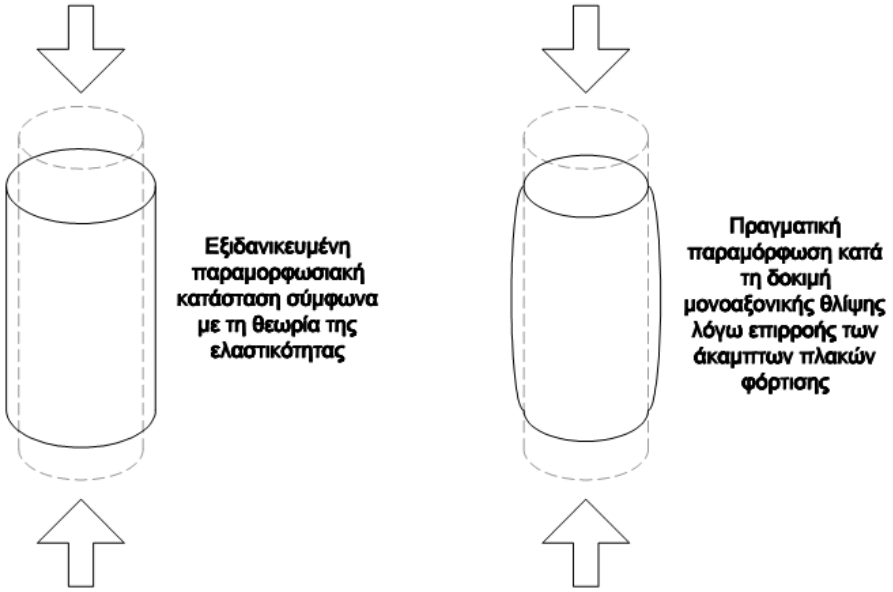
Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το τέμαχος του ιλυολίθου είναι τόσο μεγάλο ώστε να υπάρχει θραύση λόγω εφελκυσμού στη κεντρική περιοχή του τμήματος, χωρίς να υπάρχει επιρροή από την (ευνοϊκή) θλιπτική ακτινική τάση, που επιβάλλει στην άνω και κάτω παρειά του, ο πιο άκαμπτος ψαμμίτης (δες και επόμενη παράγραφο 4.4.3).

4.4.3. Διερεύνηση τρόπου και διάδοσης της θραύσης στα σύνθετα δοκίμια

Γενικά το γεγονός της πτώσης της αντοχής και της διάδοσης της θραύσης και στα δύο υλικά με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί εάν δοθεί προσοχή στην ύπαρξη των διεπιφανειών και της επιρροής αυτών καθώς και των πλακών φόρτισης κατά τη δοκιμή.

Είναι γνωστό ότι κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μεγάλο ρόλο στα αποτελέσματα παίζει η τριβή των εδρών του δοκιμίου με τις πλάκες φορτίσεως οι οποίες αλλάζουν την παραμορφωσιακή κατάσταση του δοκιμίου όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω σκαριφήματα. Δηλαδή η πιο άκαμπτη πλάκα, επιβάλει μηδενική

παραμόρφωση στις έδρες η οποία όμως εκτονώνεται καθώς φτάνουμε στη κεντρική περιοχή του δοκιμίου.

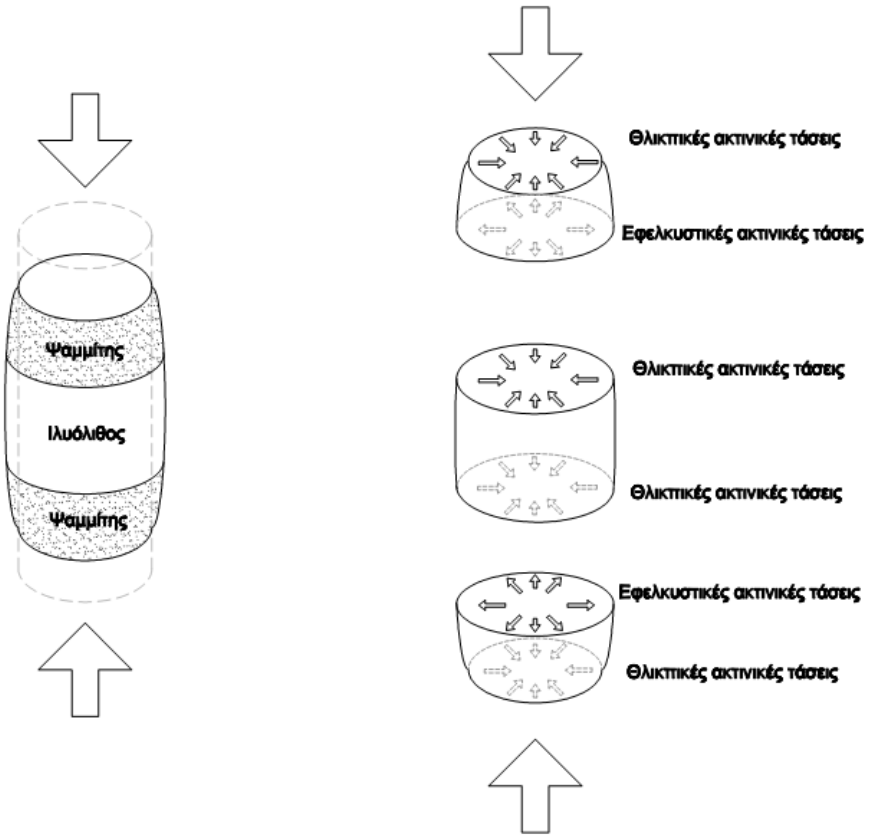


Εικονα 4.7. Επιρροή πλακών φόρτισης κατά τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης

4.4.3.1. Επιρροή Mag;aloδιεπιφανειών των δίσκων διαφορετικών πετρωμάτων των δοκιμίων

Στα σύνθετα δοκίμια εκτός από την επιρροή αυτή υπάρχει και επιρροή από την ύπαρξη των διεπιφανειών και τις διαφορετικές ελαστικές σταθερές των δύο υλικών. Ο ιλυόλιθος παρουσιάζει πολύ χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας Young ($E_t^{siltstone}$=17,0 GPa) συγκριτικά με τον ψαμμίτη ($E_t^{sandstone}$=45,0 GPa). Όσον αφορά την πλευρική διόγκωση, θεωρούμε κοινό λόγο Poisson στα δύο υλικά.

Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει σχετική μετακίνηση κατά την φόρτιση και ιδιαίτερα υπό μεγάλες τάσεις λόγω της τριβής που παρουσιάζουν οι δύο επιφάνειες. Το δοκίμιο του ιλυολίθου όμως λόγω της χαμηλότερης ακαμψίας του, τείνει να παραμορφωθεί αξονικά και συνεπώς και πλευρικά πολύ περισσότερο από τον πιο άκαμπτο ψαμμίτη. Στη διεπιφάνεια λοιπόν των δύο είναι λογικό να δημιουργηθούν αντίρροπες ακτινικές τάσεις (κάθετες στον άξονα του δοκιμίου και παράλληλες προς τη διεπιφάνεια) εφελκυστικές στον ψαμμίτη και θλιπτικές στον ιλυόλιθο.



Εικονα 4.8. Κατανομή των τάσεων στο σύνθετο δοκίμιο

Έτσι λοιπόν η συνύπαρξη των δύο υλικών αυξάνει μεν την αντοχή του ιλυολίθου αφού εισάγονται τάσεις «περισφίξεως» στις έδρες του ενώ μειώνει την αντοχή του ψαμμίτη αφού οι κύριες τάσεις του δοκιμίου στην διεπιφάνεια γίνονται εφελκυστικές (εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων = 1/8 έως 1/15 της θλιπτικής αντοχής τους).

4.4.3.2. Επιρροή πάχους ιλυολιθικής στρώσης

Το μέγεθος του τμήματος του ιλυολίθου παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτών των τάσεων στη διεπιφάνεια. Όσο μικρότερο είναι το τέμαχος του ιλυολίθου, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επιρροή του κυρίαρχου ψαμμίτη στη «περίσφιξη» του ιλυολίθου, και τόσο μικρότερη θα είναι η επιρροή του ιλυολίθου στον εφελκυσμό του ψαμμίτη. Συνέπεια αυτού είναι η γενικότερη αύξηση της αντοχής του συνολικού δείγματος με την ελάττωση του πάχους της στρώσης.

Έτσι, το συνολικό δοκίμιο μπορεί να φτάσει σε μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις προκαλώντας ψαθυρή θραύση και στον ψαμμίτη. Αντιθέτως όμως, όταν το ποσοστό του ιλυολίθου είναι μεγαλύτερο, η επιρροή του ψαμμίτη είναι μικρότερη και το

δοκίμιο φτάνει σε συνολικά χαμηλότερες αντοχές, προκαλώντας μεν ψαθυρή θραύση στον ασθενέστερο ιλυόλιθο, αλλά στον ψαμμίτη φτάνουμε μόνο σε επίπεδο ρωγμάτωσης, κάτι μεταξύ όλκιμης και ψαθυρής κατάστασης. Ακόμα, υπάρχει και η επιρροή των άκαμπτων πλακών φόρτισης που προκαλούν και αυτές με τη σειρά τους «περίσφιξη» στα τμήματα του ψαμμίτη αλλάζοντας την εντατική κατάσταση στο δοκίμιο και πιθανόν να μην επιτρέπουν σε περιπτώσεις χαμηλότερων τάσεων την εκδήλωση της ρωγμής καθ' όλο το ύψος του ψαμμιτικού τεμάχους.

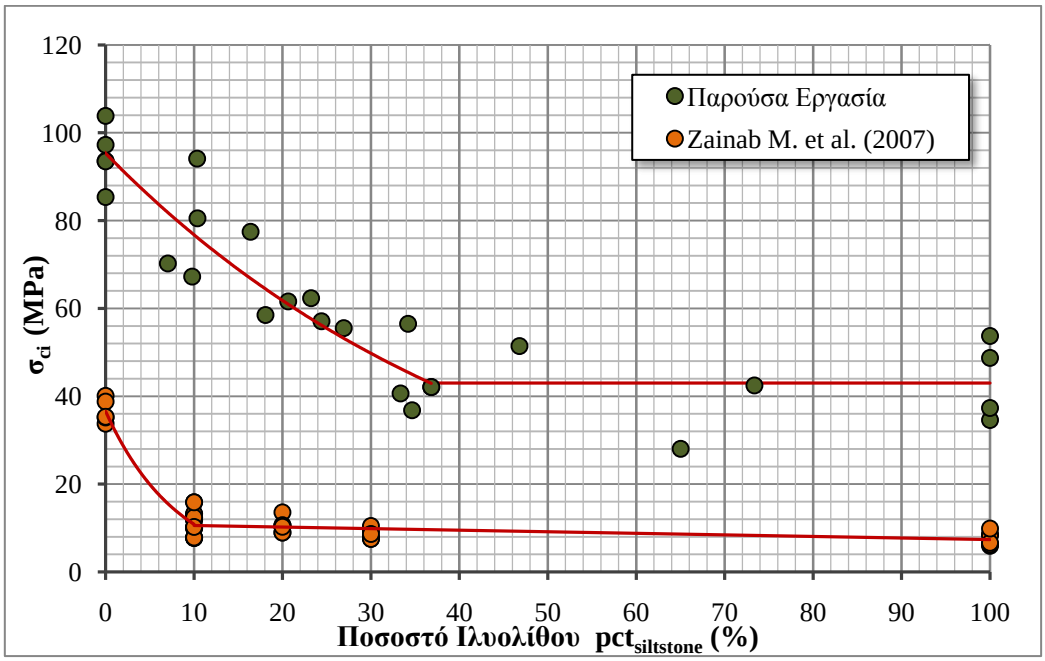
4.4.3.3. Επιρροή του λόγου Poisson

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, λόγω διαφοράς δυσκαμψίας των δύο υλικών, θα προκληθούν διαφορετικές αξονικές και ακτινικές παραμορφώσεις στα δύο υλικά. Λόγω της διαφορετικής εγκάρσιας παραμόρφωσης θα εισαχθούν ακτινικές τάσεις στις διεπιφάνειες που θα επηρεάσουν σημαντικά την θραύση. Όσο μεγαλύτερη λοιπόν η διαφορά των ακτινικών παραμορφώσεων, τόσο πιο μεγάλες οι αντίρροπες ακτινικές τάσεις στην επιφάνεια, με την απαίτηση πάντα να ικανοποιείται το συμβιβαστό των παραμορφώσεων στο δοκίμιο. Έτσι λοιπόν, εάν θεωρηθεί χαμηλότερος λόγος Poisson για τον ψαμμίτη και υψηλότερος για τον ιλυόλιθο, ήτοι μεγαλύτερη πλευρική διόγκωση του ιλυολίθου σε σχέση με αυτή του ψαμμίτη για σταθερή αξονική παραμόρφωση, αναμένονται ακόμα μεγαλύτερες ακτινικές τάσεις στο δοκίμιο και μεταβάλλεται ακόμα περισσότερο το εντατικό πεδίο.

Σημείωση:
Τα παραπάνω προϋποθέτουν ότι σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson των δύο υλικών δεν αλλάζει, πράγμα που ισχύει γενικά στα βραχώδη υλικά αλλά μόνο όταν αυτά βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Μεγάλη επιρροή στον τρόπο και στη διάδοση της θραύσης είναι σίγουρο πως θα παίζουν τα δυναμικά φαινόμενα που παρουσιάζονται σε μικροσκοπικό επίπεδο κλάσματα του δευτερολέπτου πριν τη θραύση. Η ανάλυση αυτού του θέματος αποτελεί αντικείμενο του τομέα της θραυστομηχανικής και ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.4.4. Σύγκριση με προηγούμενες έρευνες

Η αντοχή του σύνθετου δοκιμίου δεν πέφτει αυτόματα στην αντοχή του ασθενέστερου υλικού, όπως προτείνεται από τους *Zainab M. et al (2007)*, οι οποίοι βέβαια πειραματίστηκαν με υλικά που έχουν υποστεί αποσάθρωση σε τροπικό περιβάλλον. Γίνεται σύγκριση με τη συγκεκριμένη δημοσίευση γιατί χρησιμοποιήθηκε ακριβώς η ίδια εργαστηριακή μέθοδος με αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στη παρούσα διπλωματική εργασία.



Διάγραμμα 4.7. Σύγκριση δεδομένων παρούσας εργασίας με τα εργαστηριακά αποτελέσματα των Zainab M. et al. (2008)

Το αποτέλεσμα της έρευνας των παραπάνω συγγραφέων για τα ξηρά δοκίμια δείχνουν μια ραγδαία μείωση με έστω και 10% ιλυόλιθο στο δοκίμιο. Παρ' ολ' αυτά αλλά δεν παρατίθενται φωτογραφίες ούτε σχολιασμός για τον τρόπο θραύσης του δοκιμίου. Εικάζεται ότι η θραύση συνέβαινε μόνο στον πολύ ασθενή ιλυόλιθο και δεν συνεχιζόταν στο τέμαχος του ψαμμίτη.

Παρουσιάζεται όμως μια παρόμοια, εκθετική πτώση της αντοχής. Η απότομη αυτή πτώση μπορεί να οφείλεται στο ότι ο λόγος των αντοχών του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στην περίπτωση των *Zainab M. et al (2007)* ήταν της τάξης του

$$\frac{\sigma_{ci}^{sandstone}}{\sigma_{ci}^{siltstone}} = \frac{33,63MPa}{7,6MPa} = 4,43$$

ενώ στην παρούσα εργασία είχαμε

$$\frac{\sigma_{ci}^{sandstone}}{\sigma_{ci}^{siltstone}} = \frac{95,0MPa}{43,0MPa} = 2,21$$

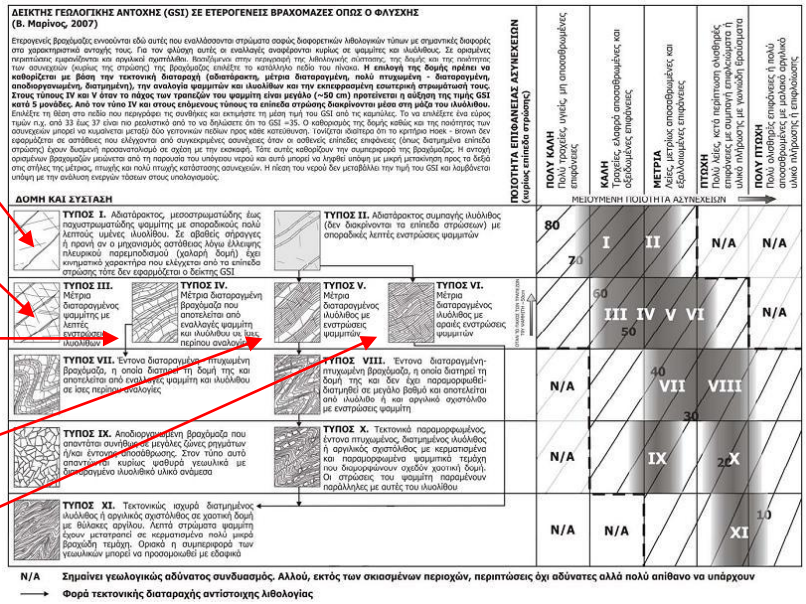
Φαίνεται λοιπόν ότι υπάρχει κάποια εξάρτηση της διαφοράς του λόγου των αντοχών των δύο υλικών με την κλίση του πτωτικού τμήματος της καμπύλης σ_{ci} – $pct_{siltstone}$.

4.4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων με τις συστάσεις του δείκτη GSI για τον φλύσχη

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για της θλιπτικής αντοχής των ετερογενών δοκιμίων συγκρίθηκαν με τις πρόσφατες συστάσεις από τη βιβλιογραφία (*Marinos V. (2007)*) για τη χρήση του δείκτη GSi του φλύσχη.

Πρωτ' απ' όλα, έγινε αντιστοίχηση των διάφορων ποσοστών ιλυολίθου στο δοκίμιο με την κατάλληλη κατηγορία GSi σύμφωνα με τις συστάσεις του διαγράμματος GSi, όπως παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 4.15):

Ποσοστό Ιλυολίθου	Ποσοστό ψαμμίτη	Κατηγορία GSi
0	100	I
10	90	III
20	80	
30	70	
40	60	IV
50	50	
60	40	
70	30	V
80	20	
90	10	VI
100	0	



Πίνακας 4.15. Αντιστοίχιση των ποσοστών συμμετοχής των δύο υλικών στο δοκίμιο στις κατηγορίες GSI για τον φλύσχη

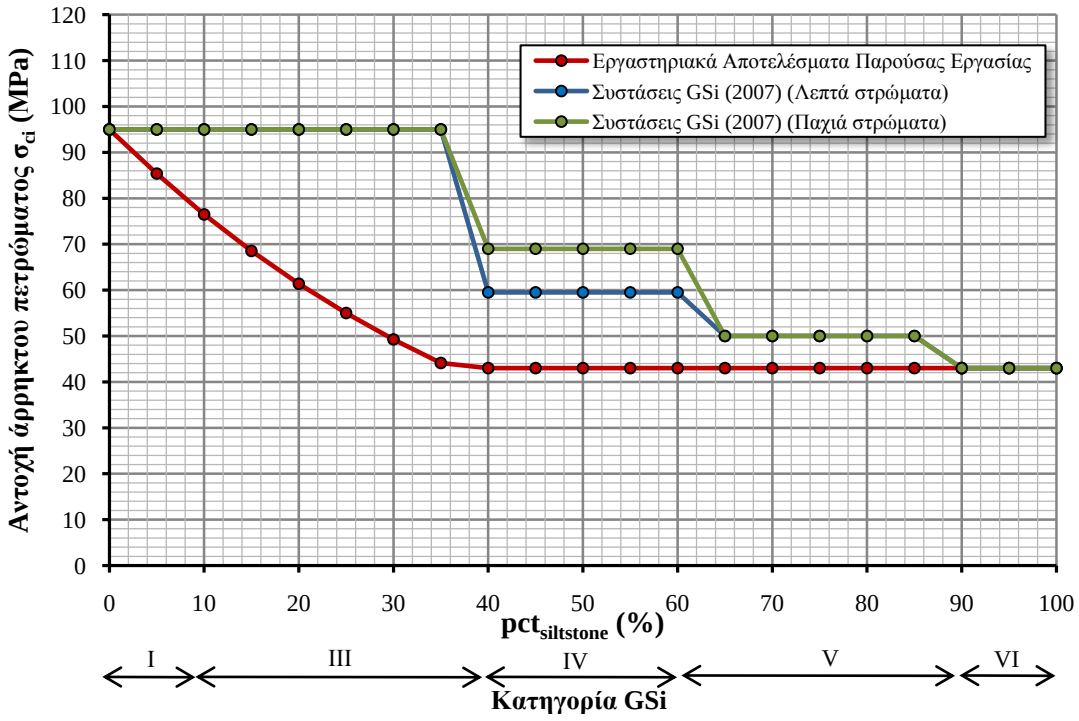
Για τις κατηγορίες αυτές προτείνεται η επιλογή των αντίστοιχων αντοχών σ_{ci} (*Marinos V. 2007*) για τη χρήση στο κριτήριο Hoek-Brown σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Τύπος φλύσχη	Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σci και mi για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων του φλύσχη ανάλογα με τον τύπο του
I	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
II	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
III	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
IV	Λεπτά στρώματα: Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποιήστε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου Παχιά στρώματα: Χρησιμοποιήστε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VI	Χρησιμοποιήστε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
VII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IX	Χρησιμοποιήσετε τις πλήρες τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 60% και χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
XI	Χρησιμοποιήσετε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου ή αργιλικού σχιστολίθου

Ποσοστό Ιλυολίθου	**Ποσοστό ψαμμίτη**	**Κατηγορία GSi**	**Προτεινόμενη τιμή σ_{ci} (*Marinos V. 2007*)**	**Υπολογισμός σ_{ci}**
0	100	I	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους	$\sigma_{ci}^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 95MPa$
10	90	III	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους	$\sigma_{ci}^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 95MPa$
20	80			
30	70			
40	60	IV	Λεπτά στρώματα: Μείωσε τη τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποίησε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου Παχιά στρώματα: Χρησιμοποίησε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου	$\frac{0,8\cdot\sigma_{ci}^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta}+\sigma_{ci}^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}}{2}=59.5MPa$ $\frac{\sigma_{ci}^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta}+\sigma_{ci}^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}}{2}=69.0MPa$
50	50			
60	40			
70	30	V	Μείωσε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποίησε τη πλήρη τιμή του ιλυολίθου	$\frac{0,6\cdot\sigma_{ci}^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta}+\sigma_{ci}^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}}{2}=50.0MPa$
80	20			
90	10	VI	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους	$\sigma_{ci}^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 43MPa$
100	0			

Πίνακας 4.16. Προτεινόμενες τιμές σ_{ci} ανάλογα με το ποσοστό του ιλυολίθου στα ετερογενή δοκίμια

Συνεπώς από τα παραπάνω προκύπτει το επόμενο συγκριτικό διάγραμμα:



Διάγραμμα 4.8. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων παρούσας εργασίας με συστάσεις χρήσης του πίνακα GSi για τον φλύσχη από τη βιβλιογραφία.

Παρατηρούμε ότι από τα εργαστηριακά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκύπτουν αρκετά πιο συντηρητικές τιμές από αυτές που προτείνονται από την βιβλιογραφία.

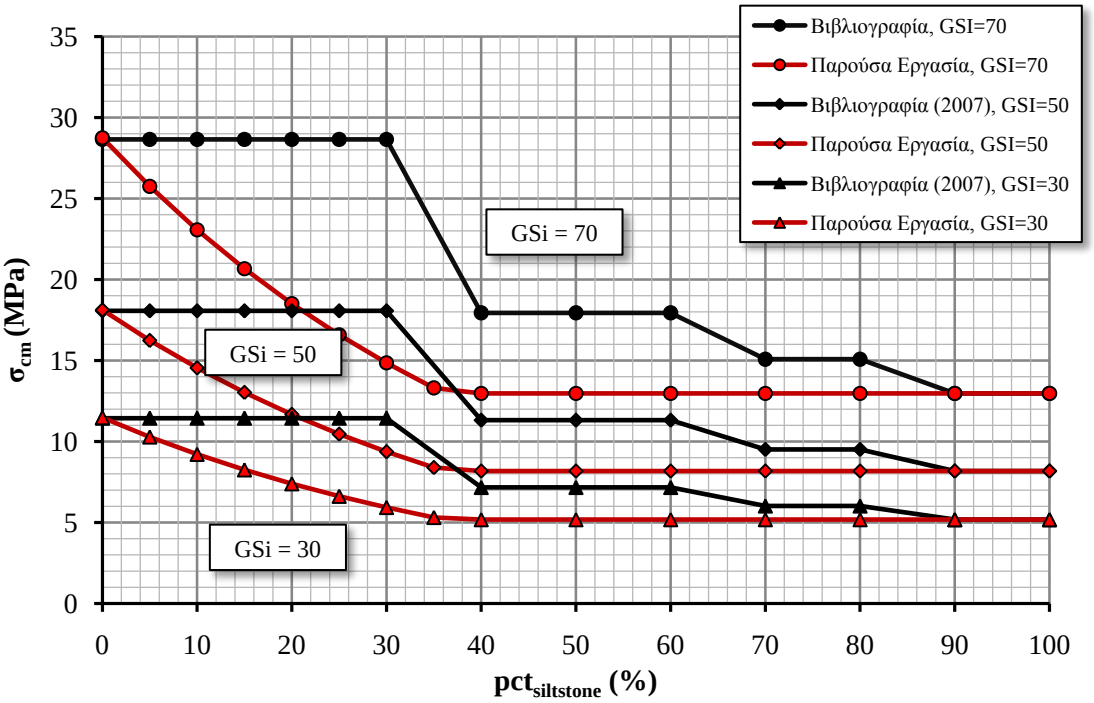
4.4.5.1. Συγκριτική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής της βραχόμαζας σ_{cm}

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος υπολογίστηκε η αντοχή της βραχόμαζας με τους τύπους του γενικευμένου κριτηρίου Hoek - Brown (2002 Edition) όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 1.4.1. Έγινε σύγκριση των τιμών του σ_{cm} που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας με τις προτεινόμενες τιμές του πίνακα GSI για διαφορετικά GSI και διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου.

Στις παρακάτω τιμές η σταθερά m_i θεωρήθηκε σταθερή και ίση με τον μέσο όρο των μέσων προτεινόμενων σταθερών των δύο υλικών δηλαδή:

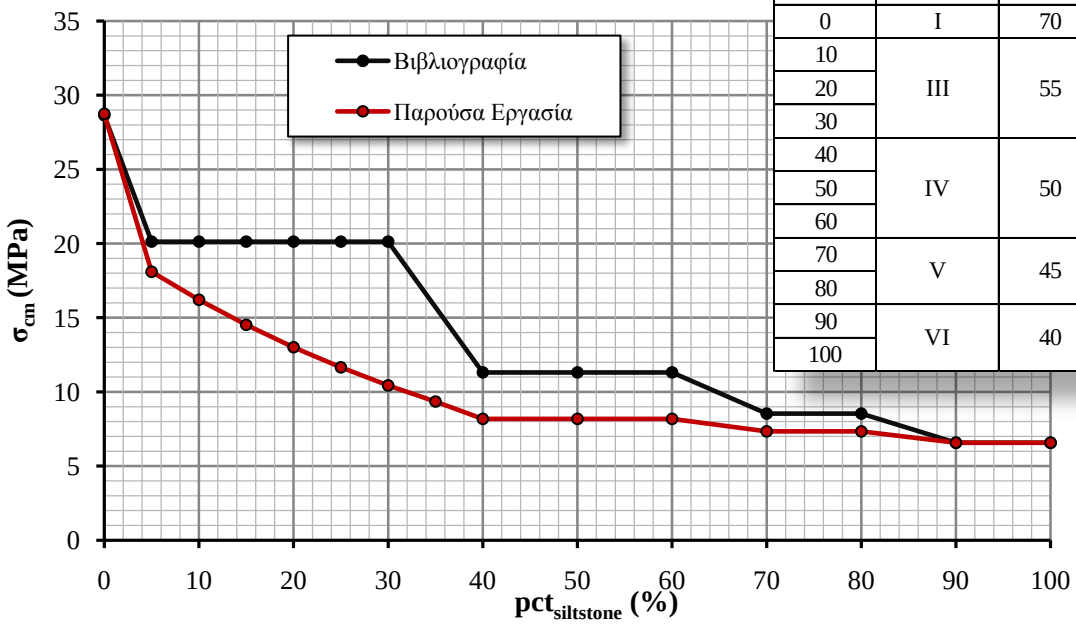
$$\left.\begin{array}{l} m_i^{\psi\alpha\mu\mu\iota\tau\eta} = 17 \\ m_i^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 7 \end{array}\right\} m_i = \frac{17+7}{2} = 12$$

Για τιμές του GSi 70, 50 και 30 και για τις συστάσεις για τα λεπτά στρώματα, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα του σ_{ci} συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου:



Διάγραμμα 4.9. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία (Marinos V. (2007)) για το σ_{cm} συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου για διαφορετικές τιμές του GSi.

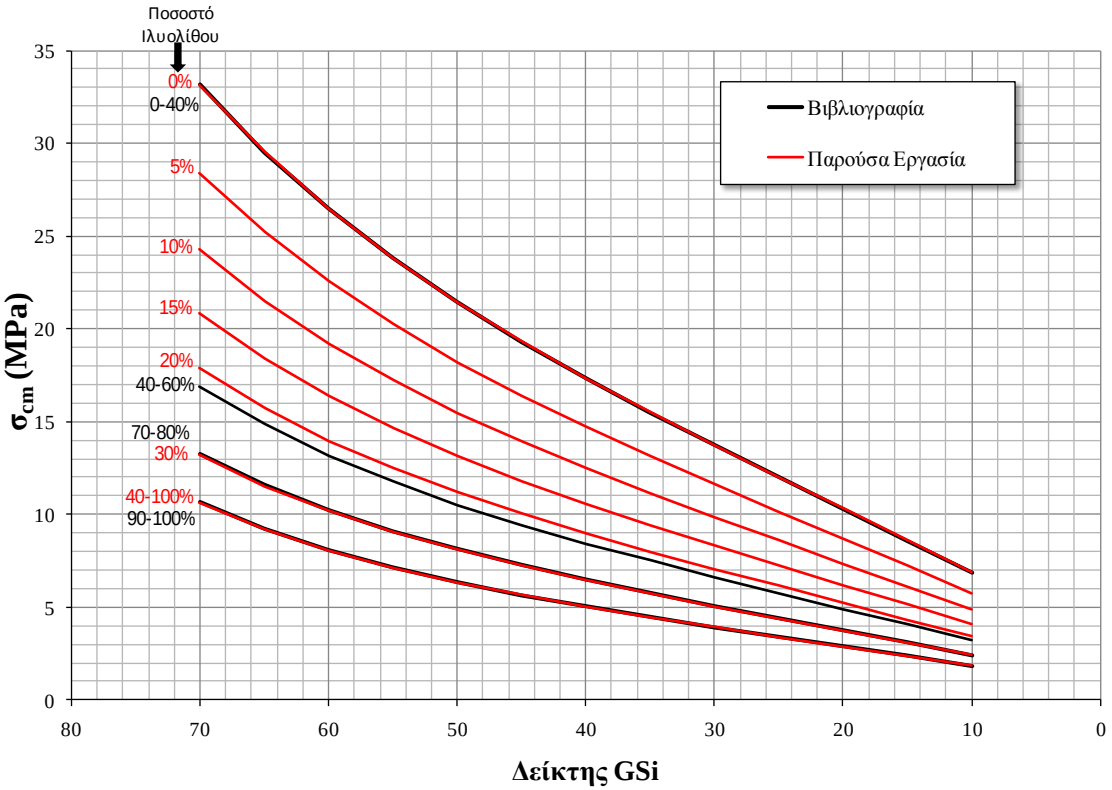
Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη σύγκριση των δύο μεθόδων αλλά με μεταβολή του GSI όπως παρουσιάστηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Για την κάθε κατηγορία GSI χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή του προτεινόμενου εύρους του δείκτη. Και εδώ οι τιμές του σ_{ci} από την βιβλιογραφία για τη κατηγορία IV είναι για τα λεπτά στρώματα.



$pct_{siltstone}$	Κατηγορία GSi	GSi
0	I	70
10	III	55
20		
30		
40	IV	50
50		
60		
70	V	45
80		
90	VI	40
100		

Διάγραμμα 4.10. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία για το σ_{cm} συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου με τη τιμή του δείκτη GSI να μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό

Οι διαφορές μπορούν να φανούν επίσης και στο παρακάτω διάγραμμα όπου έχει σχεδιαστεί η θλιπτική αντοχή της βραχόμαζας σ_{cm} συναρτήσει του GSI για διαφορετικές τιμές του ποσοστού ιλυολίθου. Και στη παλαιότερη έκδοση του GSI (*Marinos & Hoek, 2000*) αλλά και στη νεώτερη (*Marinos V, 2007*), για την κατηγορία του ψαμμίτη με λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου δεν προτείνεται μείωση του σ_{ci} αλλά διατήρηση της αντοχής του ψαμμίτη. Το γεγονός αυτό δεν επαληθεύεται από τα εργαστηριακά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



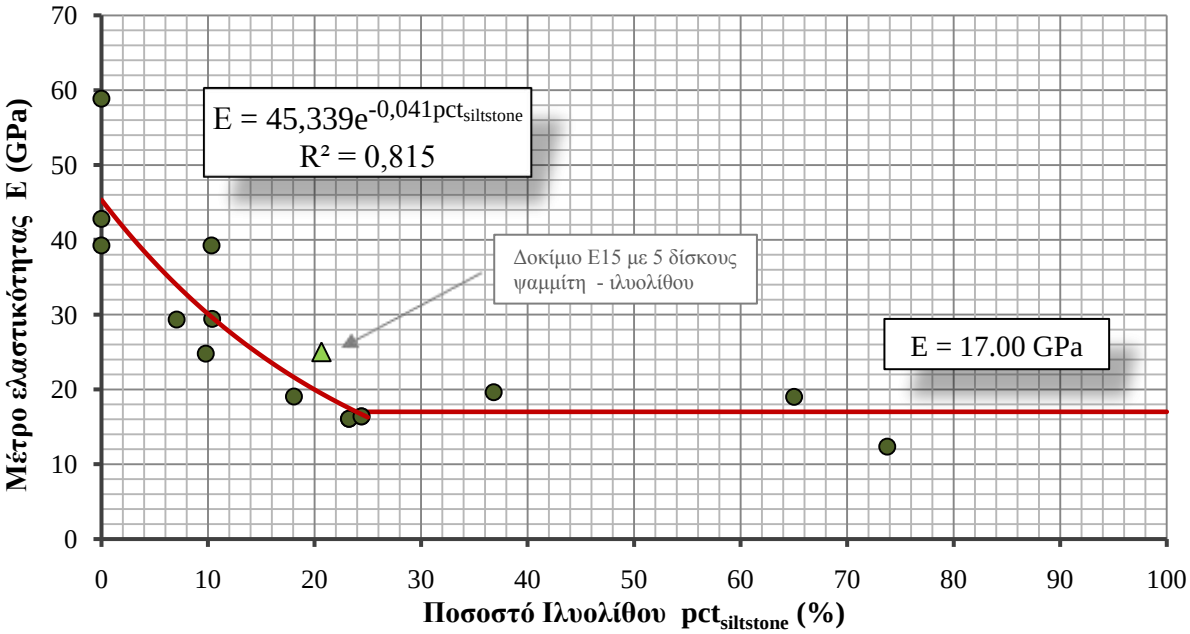
Διάγραμμα 4.11. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τι βιβλιογραφία για το σ_{cm} συναρτήσει του δείκτη GSi για διάφορα ποσοστά ιλυολίθου

Γενικά θεωρείται ότι υπερεκτιμάται η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για τις χαμηλές περιεκτικότητες σε ιλυόλιθο.

4.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG

4.5.1. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με το ποσοστό ιλυολίθου

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης με ταυτόχρονη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας Young συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου στο δοκίμιο.



Διάγραμμα 4.12. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με το ποσοστό ιλυολίθού στο δοκίμιο

Παρατηρείται μια μείωση του μέτρου ελαστικότητας από τα 45,0GPa του ψαμμίτη μέχρι το ποσοστό 25% περίπου από όπου και πέρα τα αποτελέσματα σταθεροποιούνται στο μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου ιλυολίθου (17,0GPa).

Από στατιστική επεξεργασία των δεδομένων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτουν οι παρακάτω συναρτήσεις:

Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 25%:

$$E_t = 45,339 \cdot e^{-0,041 pct_{siltstone}} \quad , \quad R^2 = 0,815$$

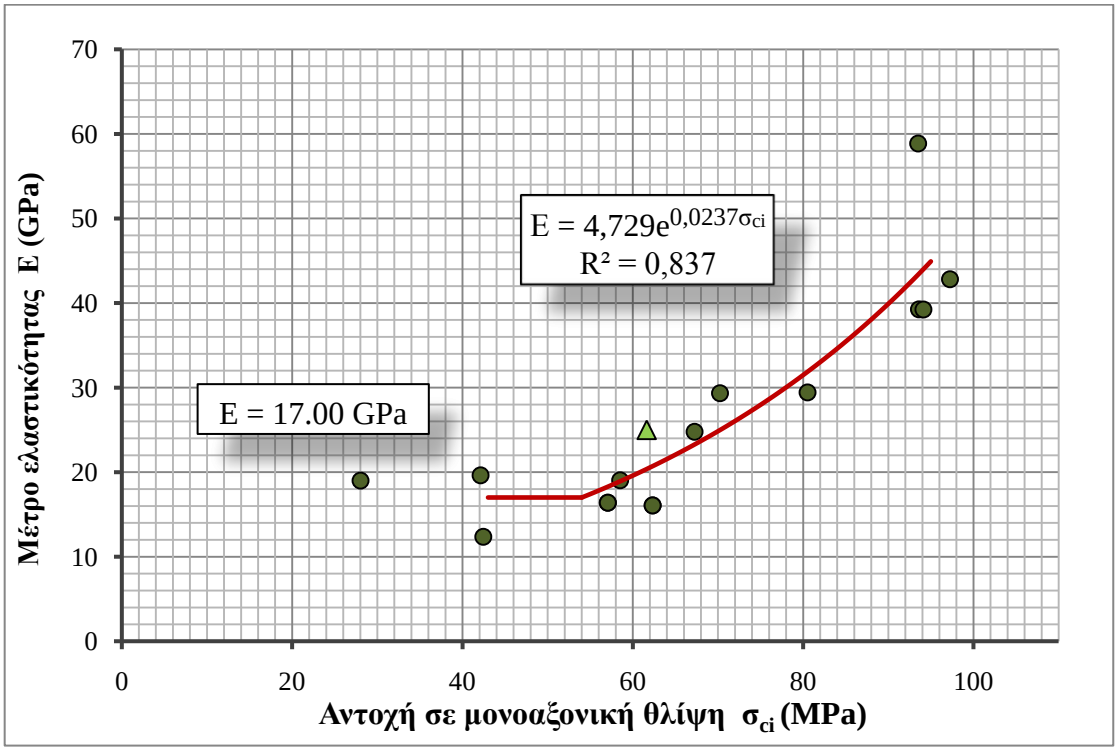
Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 25%:

$$E_t = E_t^{siltstone} = 17,00GPa$$

όπου E_t το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young [GPa]

$pct_{siltstone}$: percentage siltstone, το ποσοστό ιλυολίθου στο ύψος του δοκιμίου[%]

Μία πολύ καλή σχέση προκύπτει επίσης για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει το μέτρου ελαστικότητας Young και δίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.13. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Ορίζεται λοιπόν η σχέση:

$$E_t = 4,729 \cdot e^{0,0237 \cdot \sigma_{ci}}$$

Με τους περιορισμούς ότι:

- $E_t \geq 17GPa$ αφού δεν μπορούμε να έχουμε χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από αυτό του ιλυολίθου
- $43MPa \leq \sigma_{ci} \leq 95MPa$ αφού όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο αυτό είναι το εύρος που κυμαίνεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Παρατηρούμε εδώ ότι η σχέση του μέτρου ελαστικότητας με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, δεν διατηρεί σταθερή σχέση (σταθερο MR) όπως προτείνεται για τα ομοιογενή υλικά. Το MR είναι μεταβαλλόμενο και μειώνεται όσο μειώνεται και η αντοχή του συνολικού δοκιμίου ή αλλιώς όσο αυξάνεται το ποσοστό ιλυολίθου.

4.5.2. Παρατηρήσεις – Σχολιασμός

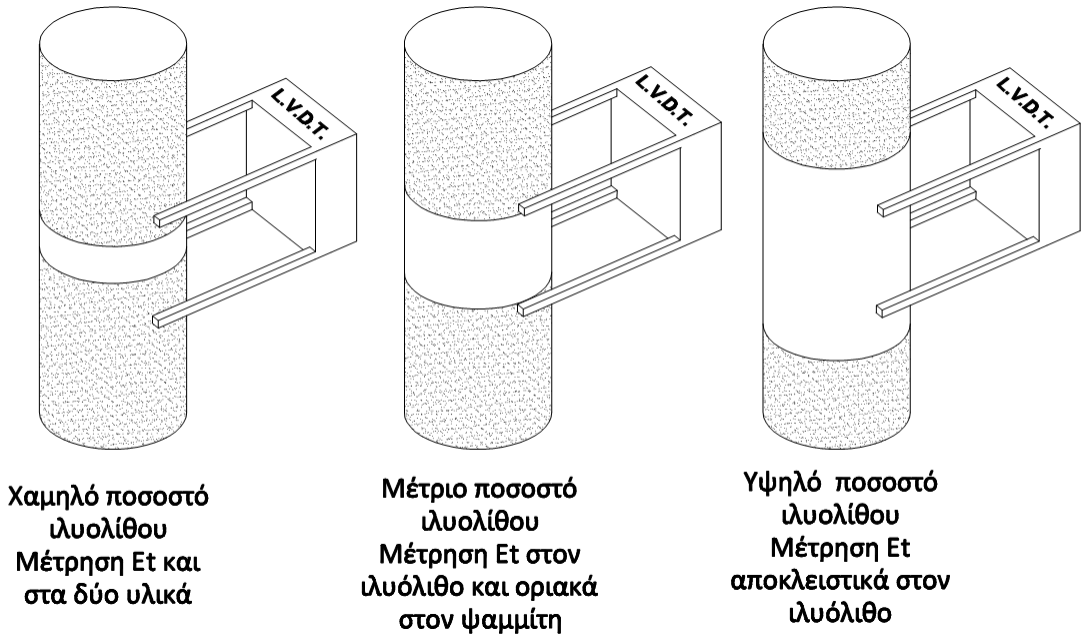
Και εδώ, η πτώση του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου, ακολουθεί εκθετική μείωση, όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής.

Παρ' όλ' αυτά εδώ τίθενται κάποιες αμφιβολίες περί της σωστής εργαστηριακής μεθόδου μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας για το συγκεκριμένο τύπο δοκιμών. Δυστυχώς στη βιβλιογραφία δεν συναντήθηκε παρόμοια αντίστοιχη μελέτη για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε σύνθετα δοκίμια οπότε δεν μπορεί να υπάρξει κάποια σύγκριση.

Θα περίμενε κανείς λοιπόν ότι για τα ετερογενή δοκίμια θα είχαμε τιμές που κυμαίνονταν μεταξύ αυτών των δύο ομοιογενών υλικών και δεν θα έπεφταν στο επίπεδο του ιλυολίθου παρά μόνο για τα ομογενή ιλυολιθικά δοκίμια. Και αυτό γιατί το μέτρο ελαστικότητας δεν εξαρτάται μόνο από την τελική θραύση, όπως η θλιπτική αντοχή, αλλά από τη συνολική διάρκεια φόρτισης και την παραμορφωσική κατάσταση του δοκιμίου η οποία συνεχώς μεταβάλλεται, ακόμα και για τα χαμηλότερα ποσοστά ψαμμίτη.

Το πρόβλημα του προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας έγκειται στην εργαστηριακή μέθοδο, κατά την οποία η συσκευή μέτρησης τοποθετείται στο μέσο του δοκιμίου και καταγράφει την μετακίνηση σε ένα σταθερό τμήμα 50 χιλιοστών. Το γεγονός αυτό δεν παρουσιάζει κανένα απολύτως πρόβλημα στα ομοιογενή δοκίμια, στα σύνθετα όμως, το κεντρικό τέμαχος του ιλυολίθου συνεχώς αλλάζει μέγεθος αφού αντιπροσωπεύει διαφορετικά ποσοστά στο δοκίμιο. Έτσι, όσο αυξάνεται το ποσοστό του ιλυολίθου, τόσο το σταθερό τμήμα που μετρά το L.V.D.T. αποτελείται περισσότερο από ιλυόλιθο. Αυτό ισχύει βέβαια μέχρι το ιλυολιθικό τμήμα να φτάσει το μέγεθος των 50mm όπου η συσκευή πια εφαρμόζεται αποκλειστικά στο κεντρικό

τέμαχος του δοκιμίου, χωρίς να περιλαμβάνει καθόλου το ψαμμιτικο υλικό (Εικονα 4.9). Μοιραία λοιπόν, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας θα πέσει στην τιμή του ιλυολίθου πολύ νωρίς, χωρίς να δίνεται μια αντιπροσωπευτική κατανομή για το συνολικό σύνθετο δοκίμιο.



Εικονα 4.9. Μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου

Συνεπώς η τυπική μέτρηση της παραμόρφωσης με ηλεκτρονικά μηκινσιόμετρα ή L.V.D.T. δεν παρέχει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Προτείνεται λοιπόν να γίνεται μέτρηση της συνολικής μετακίνησης των πλακών φόρτισης κατά τη δοκιμή ή των ακράιων εδρών του δοκιμίου και στη συνέχεια να γίνεται αναγωγή στο συνολικό ύψος του δοκιμίου. Μια δεύτερη μέθοδος θα μπορούσε να είναι η χρήση συσκευής που να μπορεί να μεταβάλλει το μήκος μέτρησης έτσι ώστε να εφαρμόζεται κατάλληλα (πχ. στο μέσο των τεμαχών του ψαμμίτη) ανάλογα με την περίπτωση.

Μέρος 2ο

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ - ΣΚΟΠΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε σκόπιμο να διενεργηθούν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία έτσι ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ετερογενούς βραχόμαζας στην κατασκευή υπογείων έργων.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πρόγραμμα Phase2 v.6.0 της εταιρίας RocScience Inc. Το λογισμικό αυτό έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη μελέτη γεωτεχνικών έργων και κυρίως για τη διάνοιξη σηράγγων.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω λογισμικό έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών προσομοιομάτων:

1) Σήραγγα που διανοίγεται σε ετερογενές υλικό με εναλλαγές οριζοντίων στρωμάτων ψαμμίτη και ιλυολίθου σε διαφορετικά πάχη για την προσομοίωση διαφορετικών ποσοστών ιλυολίθου.
2) Σήραγγα που διανοίγεται μέσα σε «ομοιογενές» γεωυλικό με ιδιότητες που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου.

Επιλέχτηκε να γίνει σύγκριση των συγκλίσεων σήραγγας κυκλικής διατομής και σταθερής διαμέτρου για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου, τιμές του δείκτη GSI, και υπερκειμένων.

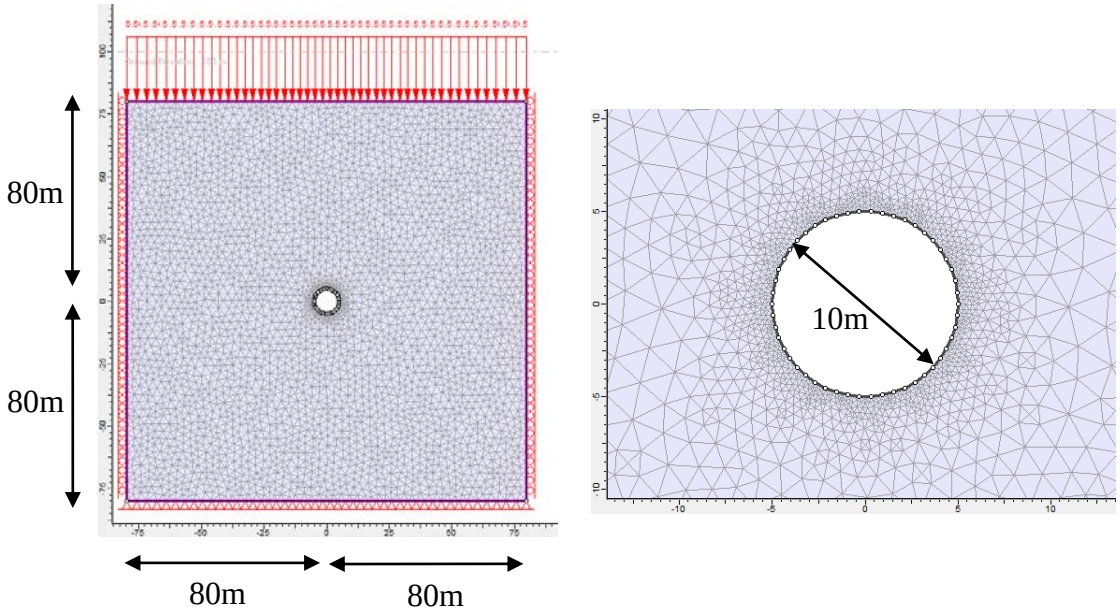
Σκοπός των παραπάνω ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπαριστά ένα ετερογενές, στρωματωμένο πέτρωμα (φλύσχης) θα μπορούσε να προσομοιωθεί από ένα αντίστοιχο μοντέλο που θα αποτελούνταν αποκλειστικά από ένα ομοιογενές γεωυλικό με ιδιότητες που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες τιμές των πρωτογενών υλικών (ψαμμίτη και ιλυολίθου).

Έγινε διερεύνηση του κατάλληλου μέτρου ελαστικότητας που θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στη βραχομάζα έτσι ώστε να ξεπεραστεί η αδυναμία της εργαστηριακής μεθόδου όπως αναλύθηκε στη Παράγραφο 4.5.2.

Τέλος γίνεται σύγκριση για κατανομή του μέτρου ελαστικότητας όμοια με αυτή του σ_{ci} που προτείνεται από τον *Marinos V. (2007)* για την ετερογενή βραχομάζα του φλύσχη.

5.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΑΡΧΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ

Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε αφορά ανυποστήρικτη σήραγγα κυκλικής διατομής διαμέτρου D=10,0m. Το συνολικό προσομοίωμα είχε μέγεθος 80x80m έτσι ώστε να μην υπάρχει επιρροή των συνόρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων:



Εικονα 5.1. Γεωμετρία του συνολικού προσομοιώματος και της σήραγγας

Επιλέχθηκε να γίνει μελέτη βαθειάς ανυποστήρικτης σήραγγας, με διάμετρο D=10m.

Ως υπερκείμενα επιλέχθηκαν τα ύψη των 100m και 300m. Για γίνει η προσομοίωση των υπερκειμένων πέραν των 80m που έθετε η γεωμετρία και για να μην αυξηθεί το μοντέλο τόσο ώστε να απαιτεί ασύμφορο χρόνο ανάλυσης, προστέθηκε εξωτερικό κατανεμημένο φορτίο. Με θεώρηση σταθερού μοναδιαίου βάρους (*unit weight*) 0,025MN/m^3 και για τα δύο υλικά, τοποθετήθηκε σταθερό κατακόρυφο γραμμικό φορτίο στο άνω σύνορο με μέγεθος 0,5MN/m για τα υπολειπόμενα 20m στη περίπτωση του υπερκειμένου των 100m και 5,5MN/m για τα υπολειπόμενα 220m του αντίστοιχου των 300m. Και στις δύο περιπτώσεις για τις αρχικές τάσεις των κόμβων (field stress) θέτονταν το κατάλληλο βαρυτικό πεδίο και το προεπιλεγμένο μοναδιαίο βάρος έτσι ώστε κατά το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης να υπάρχει γεωστατικό εντατικό πεδίο και μηδενικές μετακινήσεις.

Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων οριζόταν αυτόματα από το πρόγραμμα και γινόταν αύξηση της πυκνότητας αυτού στις περιοχές που μας ενδιέφεραν περισσότερο, δηλαδή στη περιοχή γύρω από το υπόγειο άνοιγμα. Τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέχθηκαν ήταν τριγωνικά με τρείς κόμβους (*three nodded triangles*).

Ως μέθοδος υπολογισμού επιλέχθηκε η μέθοδος περιορισμού του Gauss (*Gaussian Elimination*) και έγινε ανάλυση τύπου επίπεδης παραμόρφωσης (*Plane Strain*). Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του μητρώου των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε να είναι 500 και η επιτρεπόμενη απόκλιση, 0,001.

Δεν θεωρήθηκε ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με βήμα 10% όσον αφορά τα ποσοστά συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στη συνολική βραχόμαζα, ξεκινώντας από 0% που αναπαριστά την ψαμμιτική βραχόμαζα μέχρι το 100% που αναπαριστά την ιλυολιθική βραχόμαζα.

Ως κριτήριο αστοχίας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το γενικευμένο κριτήριο Hoek-Brown.

Το υλικό θεωρήθηκε ισότροπο όσον αφορά τις ελαστικές παραμέτρους του και ελαστικό – τέλεια πλαστικό όσον αφορά την συμπεριφορά του.

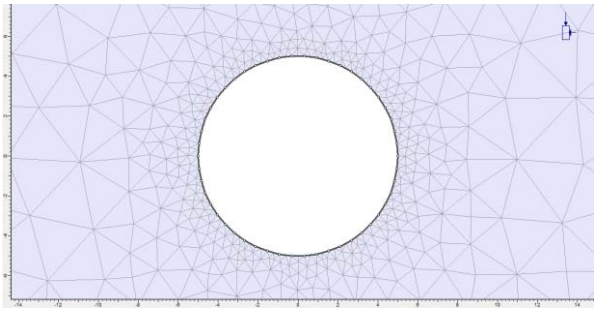
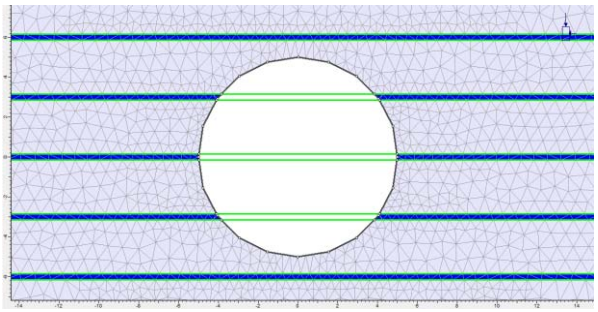
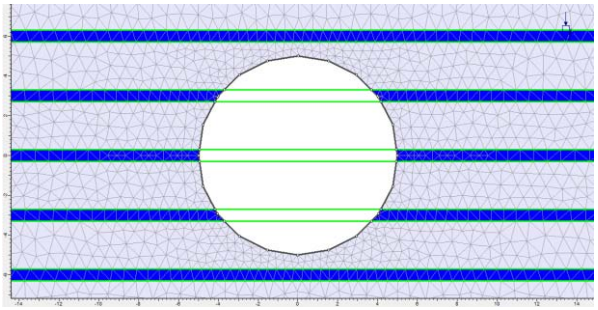
Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τον σχηματισμό του φλύσχη (εναλλαγές ιλυολίθου-ψαμμίτη) στην περιοχή της Καλυδώνας και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που προσδιορίστηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Μέρος 1^{ο}).

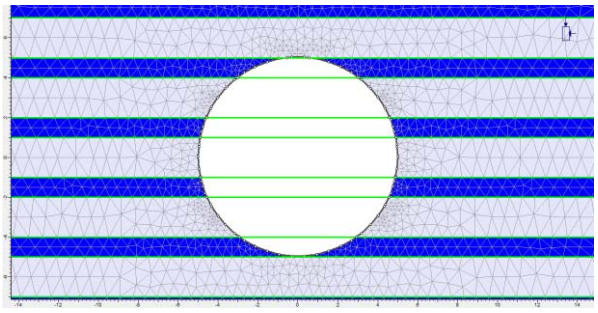
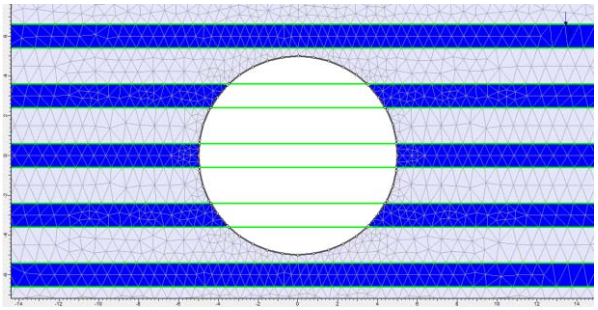
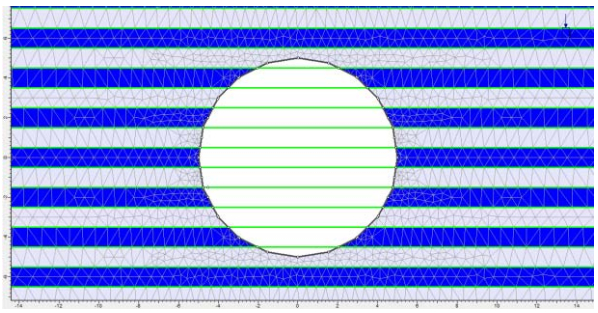
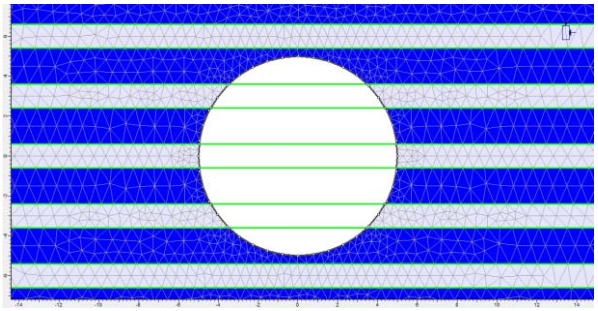
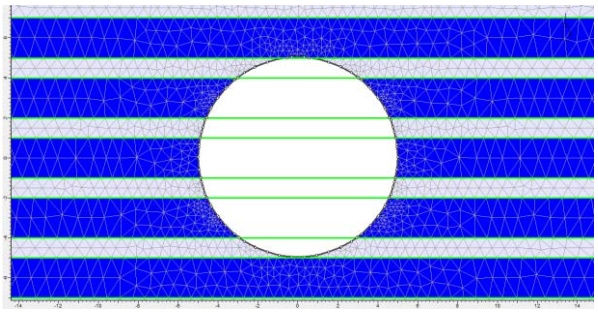
5.2.1. Ετερογενές Προσομοίωμα

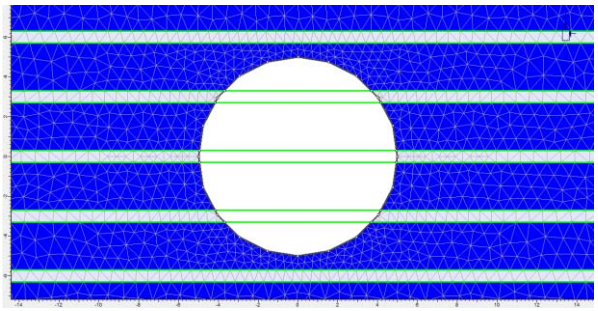
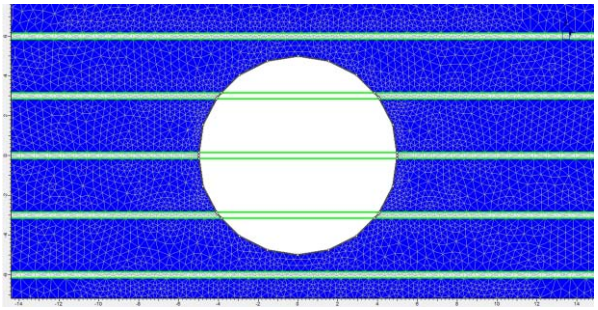
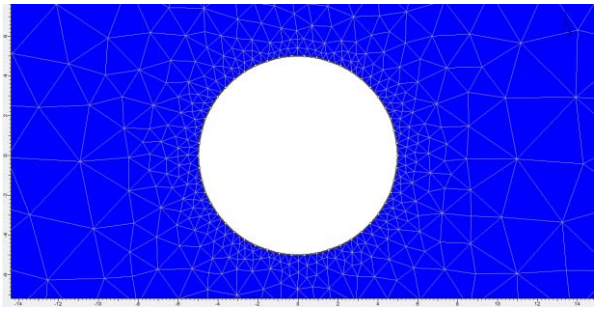
Το ετερογενές προσομοίωμα αποτελείται από διαδοχικές οριζόντιες στρώσεις ψαμμίτη και ιλυολίθου με διαφορετικά πάχη έτσι ώστε να αναπαριστούν τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών. Οι στρώσεις επιλέχθηκαν να είναι συμμετρικές ως προς τη σήραγγα έτσι ώστε να μην υπάρχει ανομοιογένεια και εκτείνονταν για απόσταση τουλάχιστον τριών διαμέτρων άνω της οροφής και κάτω

του δαπέδου της σήραγγας και για το πλήρες πλάτος του μοντέλου. Δεν ήταν δυνατό να σχεδιαστούν στρώσεις καθ' όλο το ύψος του προσομοιώματος καθώς απαιτούνταν πολύ μεγάλος σχεδιαστικός και υπολογιστικός χρόνος. Από το τέλος των στρώσεων και μέχρι το εξωτερικό σύνορο του μοντέλου, θεωρούταν μόνο το υλικό που επικρατεί στη συνολική βραχόμαζα, δηλαδή για κάτω του 50% ιλυόλιθου, ο ψαμμίτης, και για άνω του 50% ιλυολίθου, ο ιλυόλιθος.

Στον παρακάτω πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα πάχη των στρώσεων των δύο υλικών που επιλέχθηκαν για κάθε ποσοστό ιλυολίθου καθώς και οι αντίστοιχες εικόνες από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων:

Ποσοστό Ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό Ψαμμίτη (%)**	**Πάχος στρώσεων ιλυολίθου (m)**	**Πάχος στρώσεων ψαμμίτη (m)**	**Προσομοίωση στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων**
0	100	0	∞	
10	90	0,3	2,7	
20	80	0,6	2,4	

30	70	0,9	2,1	
40	60	1,2	1,8	
50	50	1,5	1,5	
60	40	1,8	1,2	
70	30	2,1	0,9	

80	20	2,4	0,6	
90	10	2,7	0,3	
100	0	∞	0	

Πίνακας 5.1. Πάχη στρώσεων και απεικόνιση του ετερογενούς προσομοιώματος για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου

Το ετερογενές προσομοίωμα θεωρείται η ανάλυση που βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Με τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων θα γίνει η σύγκριση της ακρίβειας των παραμέτρων που τίθενται στα πιο απλά ομοιογενή προσομοιώματα.

Στα υλικά των στρώσεων τέθηκαν οι παράμετροι του άρρηκτου πετρώματος (ψαμμίτη και ιλυολίθου), από τις οποίες προκύπτουν οι παράμετροι της βραχόμαζας ανάλογα με την τιμή του GSI.

5.2.2. Ομοιογενές Προσομοίωμα

Το ομοιογενές προσομοίωμα περιλαμβάνει ένα και μόνο υλικό στο οποίο τίθενται οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο από τις δοκιμές των σύνθετων

υλικών. Για τα διαφορετικά ποσοστά του ιλυολίθου λοιπόν δεν μεταβάλλεται η γεωμετρία του προσομοιώματος αλλά μόνο οι ιδιότητες του υλικού. Οι ιδιότητες που επιλέγονται εξαρτώνται από τον τύπο της ανάλυσης όπως θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

5.3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε προσπάθεια να προσδιοριστεί η πλέον κατάλληλη κατανομή του μέτρου ελαστικότητας Young της ετερογενούς βραχόμαζας ως συνόλου έτσι ώστε να ξεπεραστούν οι δυσκολίες της εργαστηριακής μεθόδου, όπως αναλύθηκε στη παράγραφο 4.5.2.

Οι αναλύσεις ξεκίνησαν επιλέγοντας μία σταθερή, μέση τιμή του δείκτη GSI και του m_i και για τα διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου θεωρούνταν μεταβλητές οι τιμές των σ_{ci} και E_i. Έγινε σύγκριση των προκυπτόντων συγκλήσεων των ετερογενών και των ομοιογενών προσομοιωμάτων για τρείς διαφορετικές κατανομές του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου και για υπερκείμενα 100m και 300m αντίστοιχα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι παραπάνω αναλύσεις με μεταβλητή και τη τιμή του δείκτη GSI σύμφωνα με το διάγραμμα που προτείνεται από τον *Marinos V. (2007)* για τον φλύσχη καθώς και σύγκριση για κατανομή του μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με την κατανομή του σ_{ci} που προτείνεται από τον ίδιο συγγραφέα.

Οι σειρές αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα:

Σειρά Αναλύσεων	Περιγραφή
A1	• Ετερογενές προσομοίωμα • Αναλύσεις για σταθερή τιμή του GSI
A2	• Ομοιογενές προσομοίωμα • Κατανομή E_i σύμφωνα με την κατανομή σ_{ci} όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας εργασίας • Αναλύσεις για σταθερή τιμή του GSI
A3	• Ομοιογενές προσομοίωμα • Γραμμική κατανομή του E_i • Αναλύσεις για σταθερή τιμή του GSI
A4	• Ομοιογενές προσομοίωμα • «Μέση» κατανομή του E_i • Αναλύσεις για σταθερή τιμή του GSI
B1	• Ετερογενές προσομοίωμα • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του GSI
B4	• Ομοιογενές προσομοίωμα • «Μέση» κατανομή του E_i • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του GSI
C1	• Ομοιογενές προσομοίωμα • Κατανομή E_i σύμφωνα με την κατανομή σ_{ci} όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του GSI

Πίνακας 5.2. Κωδικοποίηση και περιγραφή των σειρών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα συμπεράσματα αυτών παρουσιάζονται λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ, οι μορφές των προσομοιωμάτων, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Phase 2 και τα αποτελέσματα των συνολικών συγκλίσεων για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 100m για όλες τις σειρές αναλύσεων.

5.3.1. Αναλύσεις για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου διατηρώντας σταθερό τον δείκτη GSi

5.3.1.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Στη παρούσα σειρά αναλύσεων επιχειρήθηκε να γίνει μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας της ετερογενούς βραχόμαζας. Για τον λόγο αυτό διατηρήθηκαν σταθεροί ο δείκτης GSI, η σταθερά m_i και ο συντελεστής διατάραξης D. Μεταβλητές παρέμειναν το ποσοστό ιλυολίθου, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} και το μέτρο ελαστικότητας Young, E_i.

Για τον δείκτη GSI επιλέχθηκε μια μέση τιμή, GSI=55, για όλες τις αναλύσεις, δηλαδή επιλέχθηκε η κατηγορία III για κάθε ποσοστό συμμετοχής των δύο υλικών στη βραχόμαζα.

Όσον αφορά τη σταθερά m_i, χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των δύο προτεινόμενων τιμών για τον ψαμμίτη και τον ιλυόλιθο, δηλαδή $\left.\begin{matrix} m_i^{\psi\alpha\mu\mu\iota\tau\eta} = 17 \\ m_i^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 7 \end{matrix}\right\} m_i = \frac{17+7}{2} = 12$. Από αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι το m_i έχει αμελητέα επιρροή στις συγκλίσεις της σήραγγας οπότε η χρήση της μέσης τιμής του, δεν αναμένεται να επηρεάσει τα τελικά αποτελέσματα και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Ο συντελεστής διατάραξης του υλικού θεωρήθηκε μηδενικός, D=0.

Για όλες τις αναλύσεις επίσης χρησιμοποιήθηκαν:

- Λόγος Poisson: $\nu_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = \nu_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 0{,}25$
- Μοναδιαίο Βάρος: $\gamma_{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = \gamma_{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 0{,}025\ MN/m^3$

Ετερογενές προσομοίωμα

Αναλύσεις Α1

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με το ετερογενές προσομοίωμα με τις ιδιότητες του ψαμμίτη και του ιλυολίθου όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

		Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος
Δεδομένα	σ_{ci}	95,0	43,0
	GSI	55	55
	m_i	12,0	12,0
	D	0	0
	E_i	45,0	17,0
Αποτελέσματα	m_b	2,406	2,406
	s	0,00674	0,00674
	a	0,504	0,504
	σ_{cm}	20,130	9,111
	E_{rm}	18,373	6,941

Πίνακας 5.3. Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις Α1

Σημείωση:Τονισμένοι σημειώνονται οι παράμετροι που εισάγονται στο Phase 2.

Ομοιογενές προσομοίωμα

Στο ομοιογενές προσομοίωμα ως αντοχή σε μονοαξονική θλίψη θεωρήθηκε η κατανομή όπως προέκυψε από την επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων δηλαδή:

- Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 35%: $\sigma_{ci} = 95,315 \cdot e^{(-0,022 \cdot pct_{siltstone})}$
- Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 35%: $\sigma_{ci} = \sigma_{ci}^{siltstone} = 43,00$ MPa

Ή αλλιώς σε μορφή πίνακα:

Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Κατανομή σ_{ci} όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές (MPa)	Ποσοστό απομείωσης αντοχής ψαμμίτη (%)
0	95,00	0
5	85,39	10
10	76,49	19
15	68,52	28
20	61,39	35
25	54,99	42
30	49,26	48
35	44,13	54
40	43,00	55
50	43,00	55
60	43,00	55
70	43,00	55
80	43,00	55
90	43,00	55
100	43,00	55

Πίνακας 5.4. Τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, έγινε επιλογή δύο κατανομών για την αρχική διερεύνηση του προβλήματος:

1) **Αναλύσεις Α2**

Γενικά στα βραχώδη υλικά, το μέτρο ελαστικότητας συσχετίζεται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με τη σταθερά MR. Υποθέτουμε λοιπόν ότι το μέτρο ελαστικότητας για τον φλύσχη με κυμαινόμενο ποσοστό ιλυολίθου ακολουθεί ίδια κατανομή με το σ_{ci}, όπως αυτή προσδιορίστηκε στο εργαστήριο, δηλαδή $E_i = 45,00 \cdot e^{(-0,022 \cdot pct_{siltstone})}$ [GPa] με κατώτατο όριο τη τιμή 17,00 GPa που αποτελεί το μέτρο ελαστικότητας του ιλυολίθου. Στο παρακάτω πίνακα η κατανομή παρουσιάζεται πιο καθαρά:

Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Κατανομή E_i όμοια με αυτή του σ_{ci} (GPa)**	**Ποσοστό απομείωσης μέτρου ελαστικότητας ψαμμίτη (%)**
0	45,00	0
5	40,31	10
10	36,11	20
15	32,35	28
20	28,98	36
25	25,96	42
30	23,26	48
35	20,84	54
40	18,67	59
50	17,00	62
60	17,00	62
70	17,00	62
80	17,00	62
90	17,00	62
100	17,00	62

Πίνακας 5.5. Κατανομή μέτρου ελαστικότητας όμοια με αυτή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

2) **Αναλύσεις Α3**

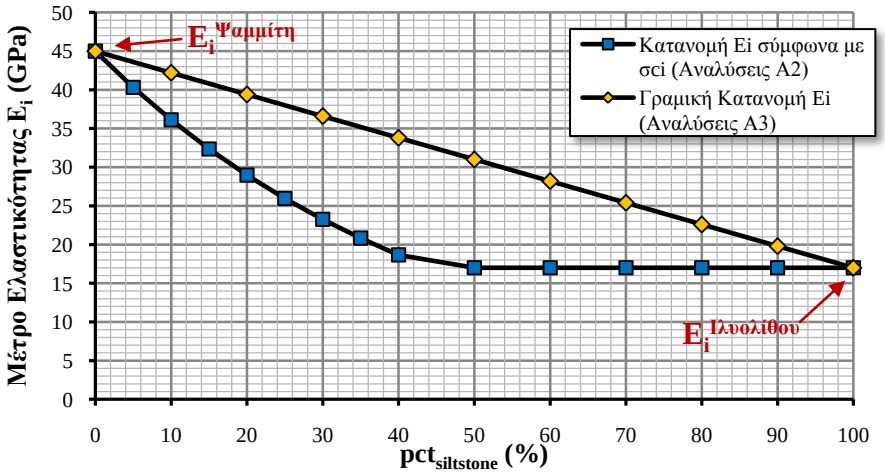
Το μέτρο ελαστικότητας ακολουθεί γραμμική κατανομή συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου σύμφωνα με τη σχέση

$$E_i = E_i^{sandstone}\left(\frac{pct_{sandstone}}{100}\right) + E_i^{siltstone}\left(\frac{pct_{siltstone}}{100}\right).$$

Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας με τη γραμμική κατανομή παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα:

Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Γραμμική κατανομή E_i (GPa)**	**Ποσοστό απομείωσης μέτρου ελαστικότητας ψαμμίτη (%)**
0	45,00	0
5	43,60	3
10	42,20	6
15	40,80	9
20	39,40	12
25	38,00	16
30	36,60	19
35	35,20	22
40	33,80	25
50	31,00	31
60	28,20	37
70	25,40	44
80	22,60	50
90	19,80	56
100	17,00	62

Πίνακας 5.6. Γραμμική κατανομή μέτρου ελαστικότητας



Διάγραμμα 5.1. Συγκριτικό διάγραμμα απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας Ei συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου για τις δύο κατανομές των αναλύσεων Α2 και Α3

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	% ιλυόλιθος	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	% ψαμμίτης	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Δεδομένα	σ_{ci}	95,00	76,95	61,75	49,40	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00
	GSI	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	45,00	36,00	28,80	23,40	18,45	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
Αποτελέσματα	m_b	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674
	a	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504
	σ_{cm}	20,130	16,305	13,084	10,467	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111
	E_{rm}	18,373	14,698	11,758	9,554	7,533	6,941	6,941	6,941	6,941	6,941	6,941

Πίνακας 5.7. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α2

	% ιλυόλιθος	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	% ψαμμίτης	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Δεδομένα	σ_{ci}	95,00	76,95	61,75	49,40	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00
	GSI	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	45,00	42,20	39,40	36,60	33,80	31,00	28,20	25,40	22,60	19,80	17,00
Αποτελέσματα	m_b	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674
	a	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504
	σ_{cm}	20,130	16,305	13,084	10,467	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111
	E_{rm}	18,373	17,229	16,086	14,943	13,800	12,657	11,514	10,370	9,227	8,084	6,941

Πίνακας 5.8. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α3

5.3.1.2. Αποτελέσματα αναλύσεων

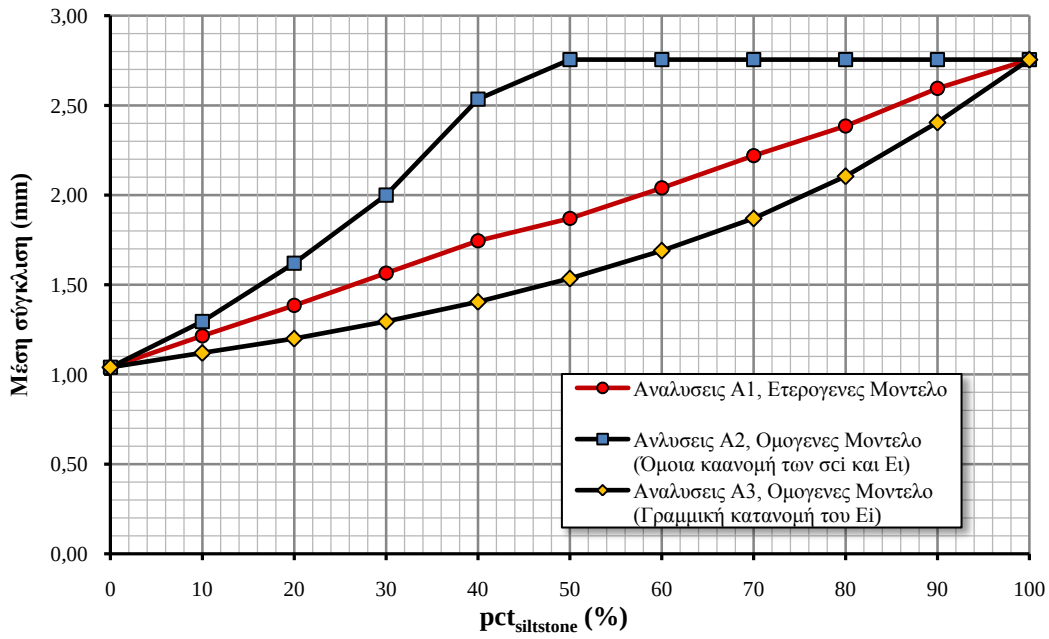
Υπερκείμενο 100m

Από τις παραπάνω αναλύσεις για υπερκείμενο 100m προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

		Αναλύσεις Α1		Αναλύσεις Α2		Αναλύσεις Α3	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
0	100	1,04	0,021	1,04	0,021	1,04	0,021
10	90	1,22	0,024	1,30	0,026	1,12	0,022
20	80	1,39	0,028	1,62	0,032	1,20	0,024
30	70	1,57	0,031	2,00	0,040	1,30	0,026
40	60	1,75	0,035	2,54	0,051	1,41	0,028
50	50	1,87	0,037	2,76	0,055	1,54	0,031
60	40	2,04	0,041	2,76	0,055	1,69	0,034
70	30	2,22	0,044	2,76	0,055	1,87	0,037
80	20	2,39	0,048	2,76	0,055	2,11	0,042
90	10	2,60	0,052	2,76	0,055	2,41	0,048
100	0	2,76	0,055	2,76	0,055	2,76	0,055

Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα αναλύσεων Α1 (ετερογενές προσομοίωμα), Α2 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i) και Α3 (ομοιογενές προσομοίωμα με γραμμική κατανομή E_i) για υπερκείμενο 100m

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.2. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2 και Α3 για φορτίο υπερκειμένων 100m

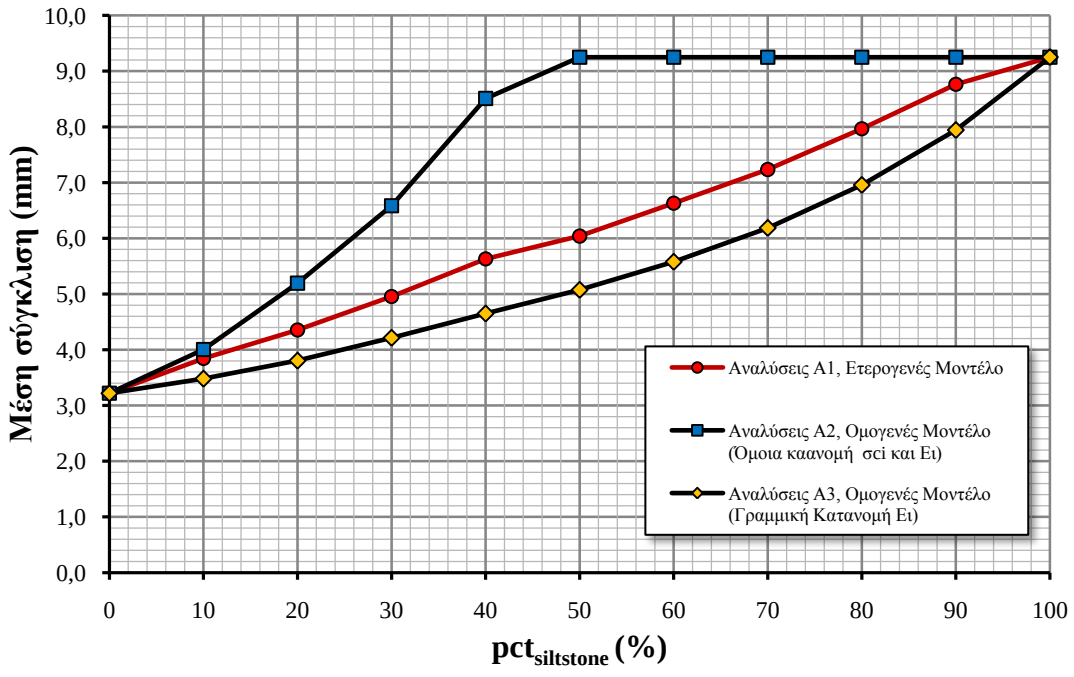
Υπερκείμενο 300m

Από τις παραπάνω αναλύσεις για υπερκείμενο 300m προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

		Αναλύσεις Α1		Αναλύσεις Α2		Αναλύσεις Α3	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
0	100	3,22	0,064	3,22	0,064	3,22	0,064
10	90	3,85	0,077	4,01	0,080	3,48	0,070
20	80	4,36	0,087	5,20	0,104	3,81	0,076
30	70	4,96	0,099	6,59	0,132	4,01	0,080
40	60	5,63	0,113	8,51	0,170	4,65	0,093
50	50	6,04	0,121	9,25	0,185	5,08	0,102
60	40	6,63	0,133	9,25	0,185	5,58	0,112
70	30	7,24	0,145	9,25	0,185	6,19	0,124
80	20	7,97	0,159	9,25	0,185	6,96	0,139
90	10	8,77	0,175	9,25	0,185	7,94	0,159
100	0	9,25	0,185	9,25	0,185	9,25	0,185

Πίνακας 5.10. Αποτελέσματα αναλύσεων Α1 (ετερογενές προσομοίωμα), Α2 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i) και Α3 (ομοιογενές προσομοίωμα με γραμμική κατανομή E_i) για υπερκείμενο 300m

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.3. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2 και Α3 για φορτίο υπερκειμένων 300m

5.3.1.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Όπως αναμενόταν, και αφού μειώνονται οι παράμετροι αντοχής και ελαστικότητας των υλικών, με την αύξηση του ποσοστού του ιλυολίθου στη συνολική βραχόμαζα, αυξάνονται και οι συγκλίσεις της ανυποστήρικτης σήραγγας.

Επίσης, όσο αυξάνεται το υπερκείμενο, τόσο αυξάνονται και οι συγκλίσεις. Για το υπερκείμενο των 100m οι συγκλίσεις παρουσιάζουν διακύμανση 1,04 – 2,76mm ενώ για το υπερκείμενο των 300m, 3,22 – 9,25mm. Εδώ υπενθυμίζεται ότι διατηρήθηκαν όλες οι παράμετροι του υλικού σταθερές και μεταβλήθηκε μόνο το εξωτερικό φορτίο στο άνω σύνορο του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, και για τα δύο φορτία υπερκειμένων, οι καμπύλες των συγκλίσεων συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου παρουσιάζουν την ίδια μορφή, πράγμα λογικό, αφού επιλέχθηκε ελαστική-τέλεια πλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών.

Οι κατανομές του μέτρου ελαστικότητας που επιλέχθηκαν στα ομοιογενή προσομοιώματα δεν παρουσίασαν πολύ καλή σύγκλιση συγκριτικά με το ετερογενές, το οποίο και θεωρήσαμε ότι βρίσκεται πιο κοντά στη πραγματικότητα. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των δύο παραπάνω αναλύσεων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

		Όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i			Γραμμική κατανομή E_i		
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)
0	1,04	1,04	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00
10	1,22	1,30	0,08	6,58	1,12	-0,09	-7,82
20	1,39	1,62	0,24	16,97	1,20	-0,19	-13,36
30	1,57	2,00	0,44	27,80	1,30	-0,27	-17,25
40	1,75	2,54	0,79	45,27	1,41	-0,34	-19,48
50	1,87	2,76	0,89	47,33	1,54	-0,34	-17,91
60	2,04	2,76	0,72	35,05	1,69	-0,35	-17,16
70	2,22	2,76	0,54	24,10	1,87	-0,35	-15,77
80	2,39	2,76	0,37	15,51	2,11	-0,28	-11,74
90	2,60	2,76	0,16	6,17	2,41	-0,19	-7,32
100	2,76	2,76	0,00	0,00	2,76	0,00	0,00

Πίνακας 5.11. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενών προσομοιωμάτων συγκριτικά με το ετερογενές για υπερκείμενο 100m

		Όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i			Γραμμική κατανομή E_i		
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)
0	3,22	3,22	0,00	0,00	3,22	0,00	0,00
10	3,85	4,01	0,16	4,16	3,48	-0,36	-9,45
20	4,36	5,20	0,84	19,29	3,81	-0,55	-12,63
30	4,96	6,59	1,63	32,90	4,01	-0,95	-19,14
40	5,63	8,51	2,88	51,15	4,65	-0,98	-17,39
50	6,04	9,25	3,21	53,15	5,08	-0,97	-15,98
60	6,63	9,25	2,62	39,52	5,58	-1,05	-15,86
70	7,24	9,25	2,02	27,85	6,19	-1,05	-14,50
80	7,97	9,25	1,29	16,13	6,96	-1,01	-12,66
90	8,77	9,25	0,48	5,53	7,94	-0,82	-9,38
100	9,25	9,25	0,00	0,00	9,25	0,00	0,00

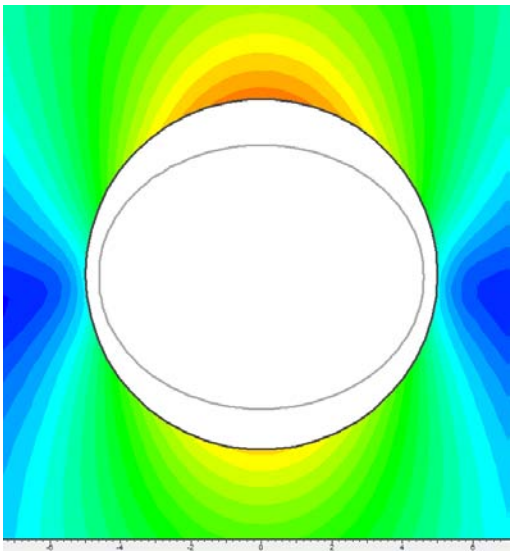
Πίνακας 5.12. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενών προσομοιωμάτων συγκριτικά με το ετερογενές για υπερκείμενο 300m

Παρατηρούμε λοιπόν ότι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας που ακολουθεί την κατανομή του σ_{ci} η οποία φτάνει το ποσοστό του 47,33 για ποσοστό ιλυολίθου 50%. Η διαφορά αυτή μεγαλώνει με την αύξηση του υπερκείμενου φορτίου έως το 53,15% για το ίδιο ποσοστό ιλυολίθου. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το μέτρο ελαστικότητας της συνολικής βραχόμαζας δεν φτάνει στη τιμή του ιλυολίθου με τον ίδιο τρόπο όπως η θλιπτική αντοχή του πετρώματος. Αναμένεται, όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 4.5.2, μια πιο αναλογική κατανομή του E_i που θα φτάνει στην κατώτατη τιμή μόνο για βραχόμαζες που πλησιάζουν τον ομοιογενή ιλυόλιθο. Οι προβλέψεις πάντως των αναλύσεων Α2 είναι συντηρητικές και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ένα κάτω όριο για την επιλογή του μέτρου ελαστικότητας.

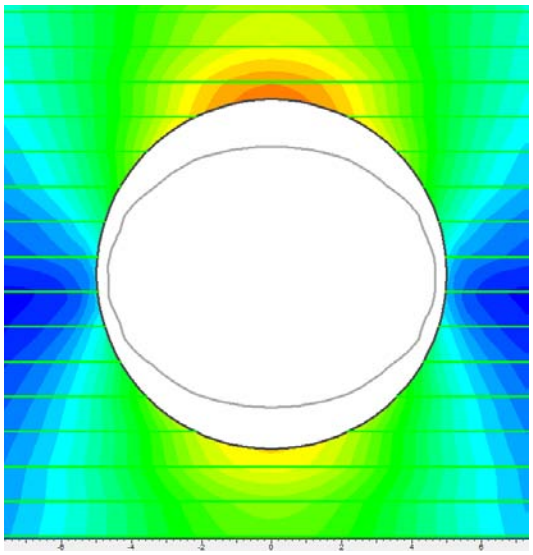
Αντιθέτως, η γραμμική κατανομή του μέτρου ελαστικότητας, παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση (-19,5% περίπου για 40% ιλυολίθου για το υπερκείμενο των 100m ενώ για το υπερκείμενο των 300m, -19,14% στο 30% ιλυολίθου) αλλά και πάλι μη ανεκτή. Τα αποτελέσματα σε αυτή τη περίπτωση είναι μη συντηρητικά αφού προβλέπονται χαμηλότερες συγκλίσεις απ' ότι στις αναλύσεις Α1. Η γραμμική κατανομή λοιπόν του μέτρου ελαστικότητας δεν συνίσταται να χρησιμοποιείται στην περίπτωση των ετερογενών βραχομαζών.

5.3.1.3.1. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής

Μικρές διαφορές γενικά παρουσιάζονται στο σχήμα της τελικής, παραμορφωμένης διατομής της σήραγγας. Οι διαφορετικές στρώσεις των δύο υλικών προκαλούν γενικά μια κύρτωση της αρχικής κυκλικής διατομής. Εάν όμως αναλογιστούμε ότι οι συγκλίσεις είναι της τάξης χιλιοστών του μέτρου, πρακτικά στο εργοτάξιο, το γεγονός αυτό δεν πρόκειται ποτέ να παρατηρηθεί ή να προκαλέσει ουσιαστικά προβλήματα.



Εικονα 5.2. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής σήραγγας ομοιογενούς προσομοιώματος

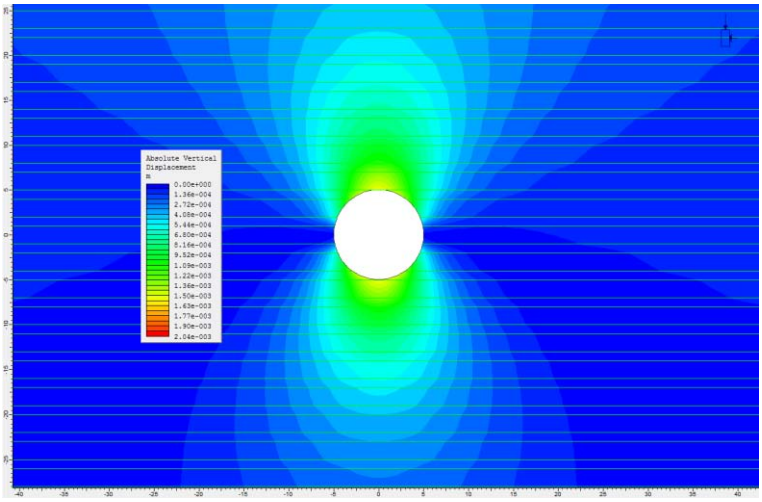


Εικονα 5.3. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής σήραγγας ετερογενούς προσομοιώματος για ποσοστό ιλυολίθου 50%

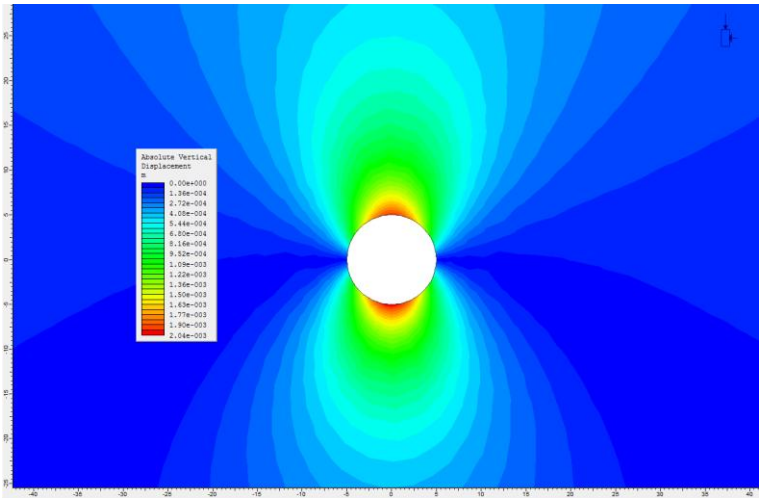
Σημειώνεται ότι στις παραπάνω εικόνες η παραμορφωμένη διατομή έχει μεγεθυνθεί αρκετές φορές έτσι ώστε να γίνουν ορατές οι διαφορές.

5.3.1.3.2. Κατανομή οριζόντιων και κατακόρυφων παραμορφώσεων

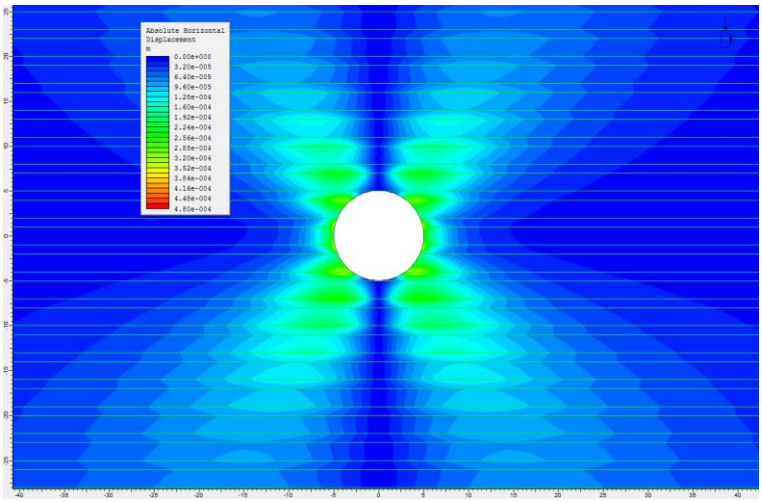
Παρατηρείται διαφορά στις κατανομές των οριζοντίων και κατακόρυφων παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα για το ομοιογενές και ετερογενές προσομοίωμα. Η γενική τάση παραμένει βέβαια η ίδια αφού υπάρχει μια συμμετρία γεωμετρίας και εξωτερικών φορτίσεων και στα δύο προσομοιώματα αλλά στο ετερογενές παρατηρείται ότι η στρωμάτωση προκαλεί στρέβλωση των ισοϋψών καμπυλών. Παρακάτω γίνεται σύγκριση των κατανομών των απόλυτων τιμών των κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων των αναλύσεων Α1 και Α2 για ποσοστό ιλυολίθου 30%.



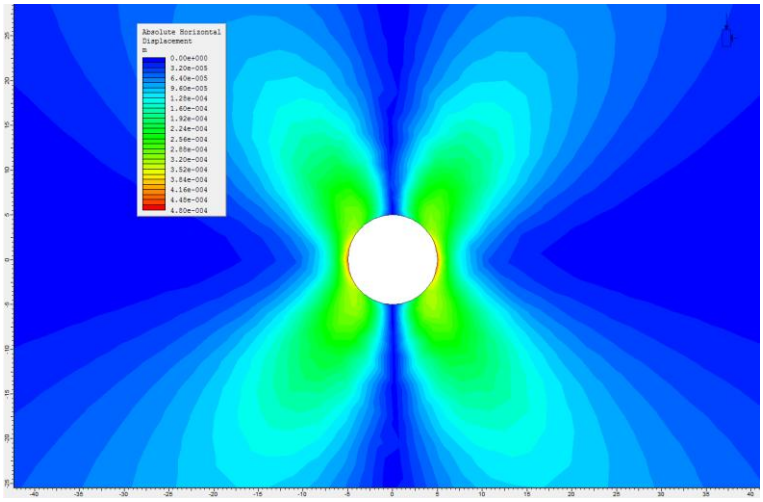
Εικονα 5.4. Ανάλυση Α1 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Κατακόρυφες μετακινήσεις



Εικονα 5.5. Ανάλυση Α2 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Κατακόρυφες μετακινήσεις



Εικονα 5.6. Ανάλυση Α1 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Οριζόντιες μετακινήσεις



Εικονα 5.7. Ανάλυση Α2 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Οριζόντιες μετακινήσεις

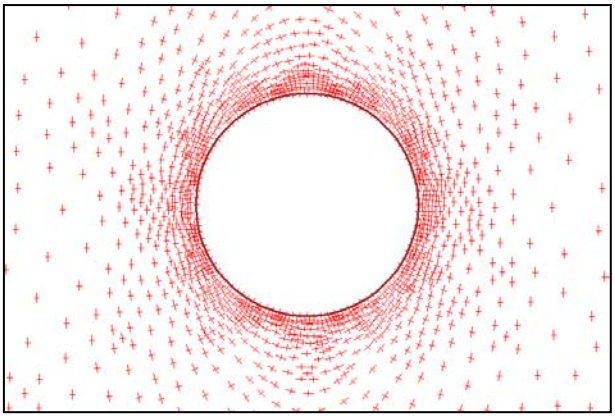
Η στρωσιγένεια του ετερογενούς προσομοιώματος επηρεάζει κυρίως τις οριζόντιες μετακινήσεις και αυτό γιατί η οριζόντια διεύθυνση είναι η διεύθυνση της ανισοτροπίας. Παρατηρούμε ότι υπάρχει αύξηση της τιμής των μετακινήσεων στις διεπιφάνειες και αυτό πιθανότατα συμβαίνει λόγω της διαφορετικής παραμορφωσιμότητας των δύο υλικών.

Στη κατακόρυφη διεύθυνση, όπου υπάρχει συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα, οι ισοϋψείς των μετακινήσεων διατηρούν την αρχική μορφή του συμμετρικού βολβού αλλά αλλάζουν κλίση όταν διέρχονται μέσω των στρωμάτων διαφορετικού υλικού. Και στις δύο διευθύνσεις πάντως υπάρχει συνεχεία των βολβών των μετακινήσεων λόγω του συμβιβαστού των παραμορφώσεων.

Στα παραπάνω, παρατηρείται επίσης και σαφής διαφορά των απόλυτων τιμών των μετακινήσεων όπως σχολιάστηκε προηγουμένως,

5.3.1.3.3. Κατανομές κυρίων τάσεων

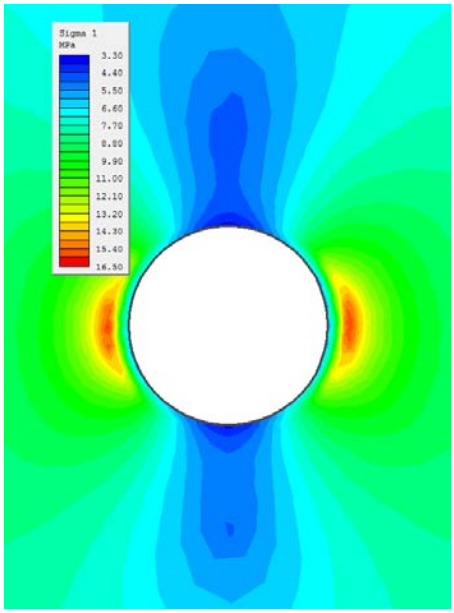
Όσον αφορά τις κατανομές των τάσεων, είναι γνωστό ότι υπάρχει παραμόρφωση του εντατικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλική διατομής σε ομοιογενές ημίχωρο.



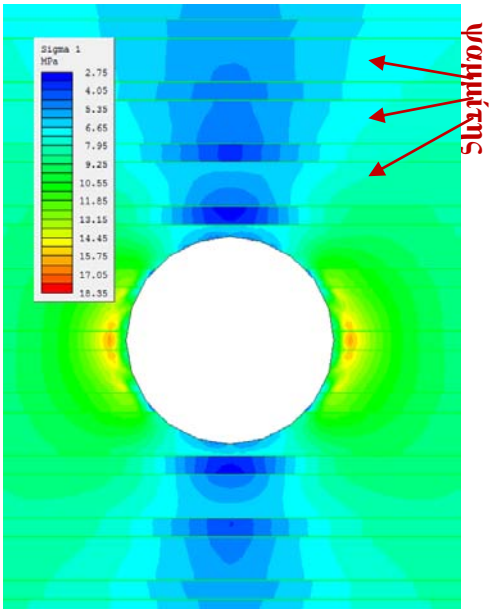
Εικονα 5.8. Στροφή του τασικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλικής διατομής

Όσον αφορά την κατανομή των κυρίων τάσεων σ_1, το ομοιογενές προσομοίωμα μας δίνει συμμετρικούς βολβούς. Στο ετερογενές προσομοίωμα όμως παρατηρείται ότι ο ψαμμίτης λαμβάνει μεγαλύτερες τάσεις συγκριτικά με τον ιλυόλιθο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη δυσκαμψία του ψαμμίτη ο οποίος για να παρουσιάσει συμβιβαστές παραμορφώσεις με τον ιλυόλιθο με τον οποίο συνορεύει, πρέπει να δεχθεί μεγαλύτερα φορτία.

Εδώ συγκρίθηκαν τα προσομοιώματα των αναλύσεων A1 και A2 με 30% ιλυόλιθο για υπερκείμενο 300m:

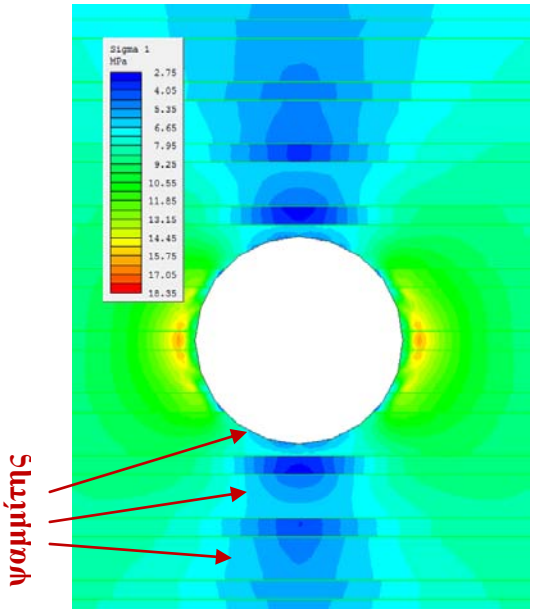


Εικονα 5.9. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ομοιογενές προσομοίωμα A2 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο

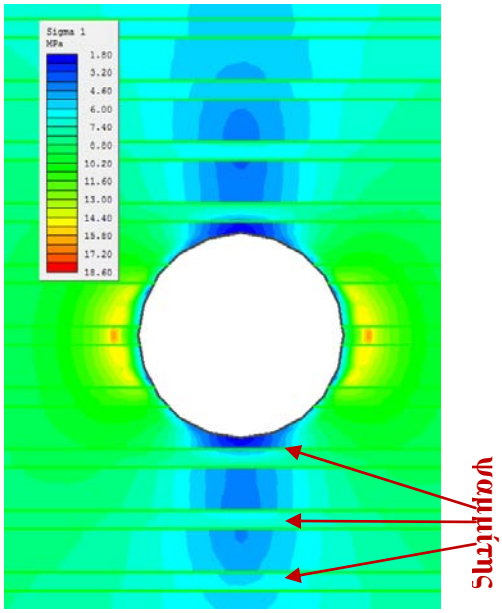


Εικονα 5.10. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα A1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο

Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον επίσης έχει και η σύγκριση των ετερογενών προσομοιωμάτων για **30% και 70% ιλυόλιθο** αντίστοιχα όπου φαίνεται πιο έντονα η συγκέντρωση τάσεων από τον ψαμμίτη και η αποφόρτιση του ιλυολίθου.

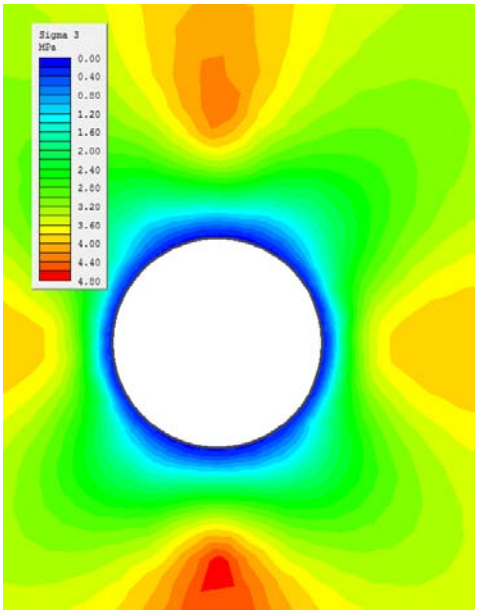


Εικονα 5.11. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο

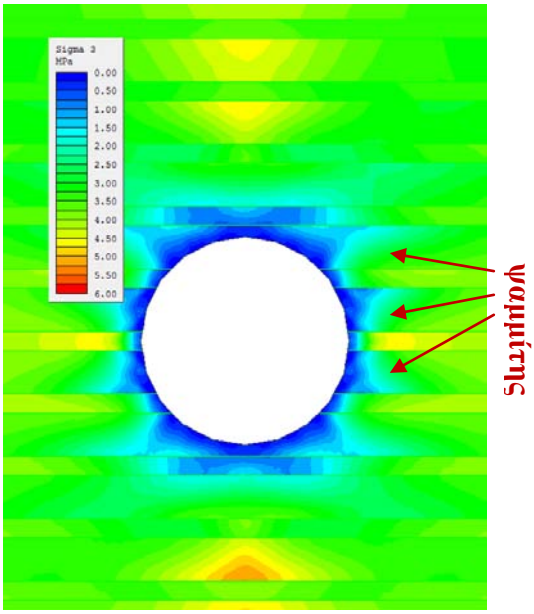


Εικονα 5.12. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 70% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο

Όσον αφορά τις ελάχιστες κύριες τάσεις σ_3, είναι γνωστό ότι στην περίμετρο της σήραγγας μηδενίζονται εφόσον δεν νοούνται ακτινικές τάσεις στο σύνορο. Η κατανομή των τάσεων σ_3 στο ομοιογενές προσομοίωμα ακολουθεί την γνωστή κατανομή, μια ζώνη δηλαδή που περιβάλλει τη σήραγγα. Αντιθέτως στο ετερογενές προσομοίωμα η μορφή τους εξαρτάται πια από τις στρώσεις της βραχόμαζας.



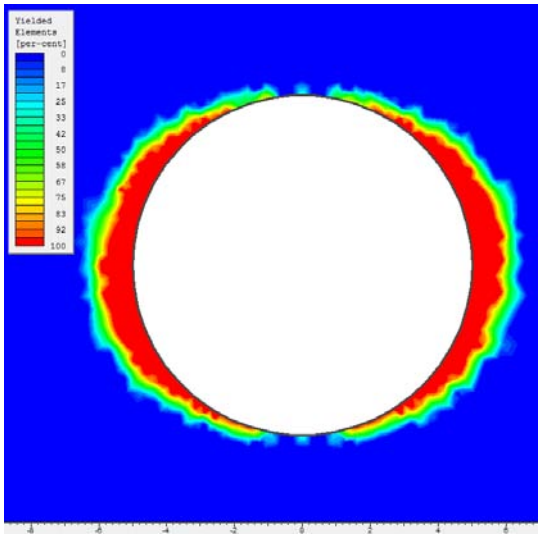
Εικονα 5.13. Ελάχιστες κύριες τάσεις σ3 για το ομοιογενές προσομοίωμα Α2 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο



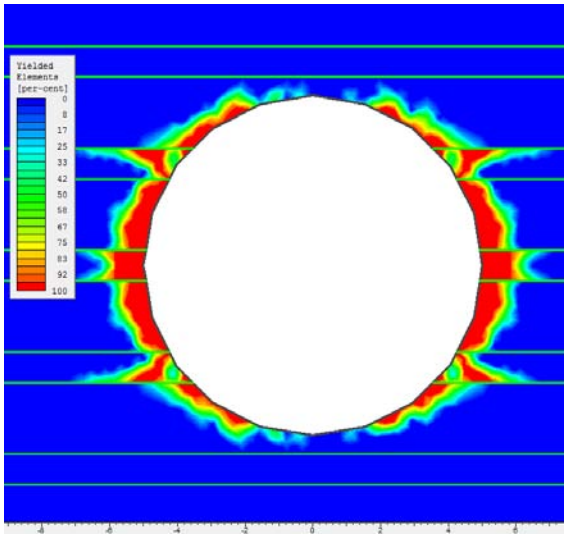
Εικονα 5.14. Ελάχιστες κύριες τάσεις σ3 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο

5.3.1.3.4. Μορφή πλαστικής ζώνης

Μια ανομοιογένεια παρατηρείται και στην διάταξη της πλαστικής ζώνης γύρω από το υπόγειο άνοιγμα στο ετερογενές προσομοίωμα.



Εικονα 5.15. Πλαστική ζώνη στο ομοιογενές προσομοίωμα (Αναλύσεις Α2, 70% ιλυόλιθος)

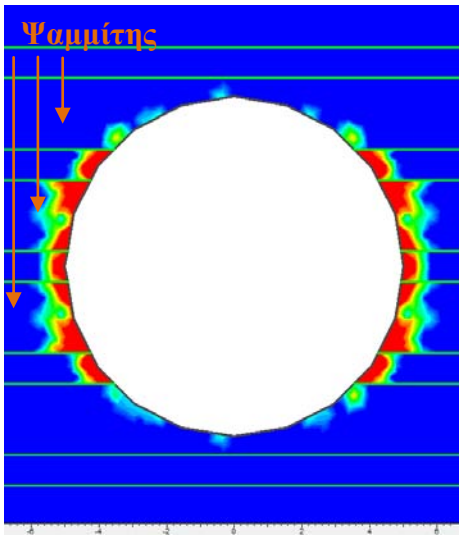


Εικονα 5.16. Πλαστική ζώνη στο ετερογενές προσομοίωμα (Αναλύσεις Α1, 70% ιλυόλιθος)

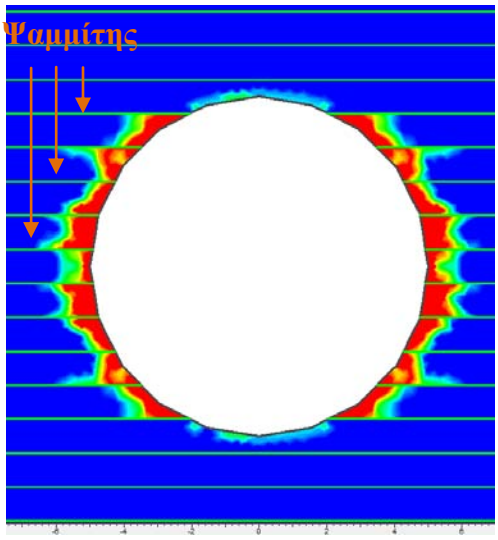
Παρατηρείται μια αύξηση της πλαστικής ζώνης στις στρώσεις του ψαμμίτη, ενώ το γεγονός αυτό θα αναμενόταν να παρατηρηθεί στον ιλυόλιθο ο οποίος παρουσιάζει και

τις χαμηλότερες αντοχές. Το «παράδοξο» αυτό γεγονός μπορεί να εξηγηθεί σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου, ότι δηλαδή γίνεται συγκέντρωση τάσεων στο υλικό του ψαμμίτη λόγω μεγαλύτερης δυσκαμψίας αυτού. Συνεπώς, μεγαλύτερες οι τάσεις στον ψαμμίτη, περισσότερα και τα σημεία που πλαστικοποιούνται.

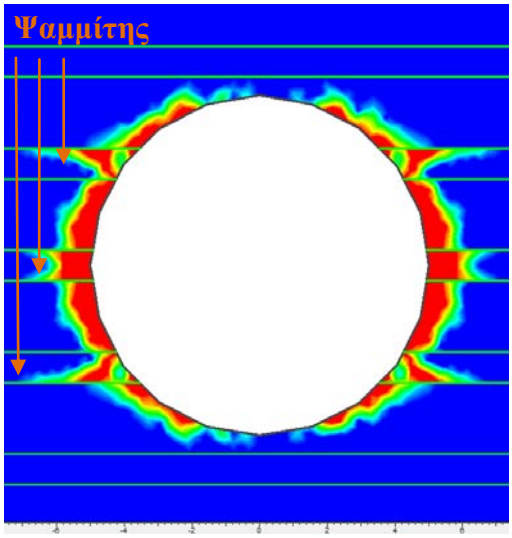
Τα παραπάνω μπορούν να φανούν πιο καθαρά στις επόμενες εικόνες όπου συγκρίνεται η πλαστική ζώνη του ετερογενούς προσομοίωματος για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου. Στα παρακάτω παρατηρείται επίσης και η αύξηση του εύρους αυτής με την αύξηση της συμμέτοχης του ιλυολίθου.



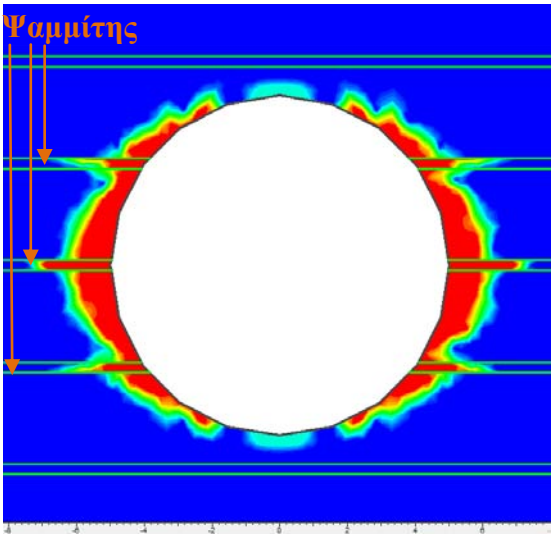
Εικονα 5.17. Αναλύσεις A1 για ποσοστό ιλυολίθου 30% και υπερκείμενο 300m



Εικονα 5.18. Αναλύσεις A1 για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 300m



Εικονα 5.19. Αναλύσεις A1 για ποσοστό ιλυολίθου 70% και υπερκείμενο 300m



Εικονα 5.20. Αναλύσεις A1 για ποσοστό ιλυολίθου 90% και υπερκείμενο 300m

Εδώ σημειώνεται ότι στις παραπάνω παρατηρήσεις δεν έγινε αξιολόγιση των απόλυτων μεγεθών των τάσεων ή των μετακινήσεων αλλά με η γενική κατανομή αυτών και τι διαφορές παρουσιάζονται μεταξύ ενός προσομοιώματος με ένα και μοναδικό υλικό και ενός, με παράλληλες οριζόντιες στρώσεις. Είναι κατανοητό λοιπόν ότι οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν και για όλες τις επόμενες αναλύσεις και έτσι δεν κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν και στις επόμενες παραγράφους.

Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά, οι μορφές των προσομοιωμάτων, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Phase 2 και τα αποτελέσματα των συνολικών μετακινήσεων για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 100m για τις σειρές αναλύσεων A1, A2 και A3.

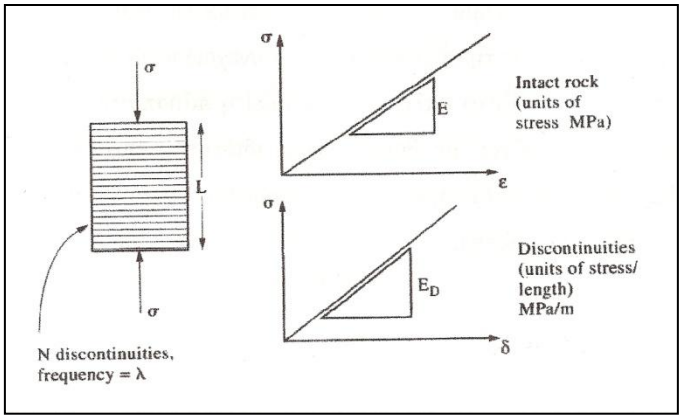
5.3.2. Μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας

Από την προηγούμενη παράγραφο παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των επιλεγμένων μέτρων ελαστικότητας για τα ομοιογενή προσομοιώματα συγκριτικά με τα αποτελέσματα του ετερογενούς. Επίσης παίρνουμε πολύ συντηρητικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις Α2 και μη συντηρητικα από τις αναλύσεις Α3.

Είναι λογικό λοιπόν να υποθέσουμε ότι η αλήθεια βρίσκεται κάπου στη μέση.

Η λύση δόθηκε από την ίδια τη θεώρηση της ανισοτροπίας της παραμόρφωσης και τον τρόπο υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας υλικού με οριζόντια ασυνέχεια σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας.

Θεωρείται δοκίμιο πετρώματος το οποίο περιέχει ένα σύνολο παράλληλων ασυνεχειών στο οποίο εφαρμόζεται μια ορθή τάση. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων υποτίθεται ότι είναι γραμμικώς ελαστική. Το ολικό μέτρο παραμορφωσιμότητας είναι ο λόγος της ορθής τάσης προς τη συνολική παραμόρφωση. Υποθέτουμε ότι το πάχος των στρώσεων είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ολικό μήκος L και ότι η συνολική παραμόρφωση είναι το άθροισμα της παραμόρφωσης που οφείλεται στη παραμόρφωση του άρρηκτου πετρώματος και αυτής των ασυνεχειών.



Εικονα 5.21. Δοκίμιο με οριζόντιες ασυνέχειες συχνότητας λ

Η συνεισφορά στην παραμόρφωση από το άρρηκτο πέτρωμα, δ_i, ισούται με $\frac{\sigma \cdot L}{E_i}$. Η συμβολή στην παραμόρφωση μιας ενιαίας ασυνέχειας, δ_D, ισούται με $\frac{\sigma}{E_D}$. Υποθέτοντας μια συχνότητα ασυνεχειών λ, θα υπάρχουν $\lambda \cdot L$ ασυνέχειες στη μάζα

του πετρώματος και η συνολική συμβολή τους στη παραμόρφωση θα είναι ίση με $\frac{\sigma \cdot \lambda \cdot L}{E_D}$.

Έτσι λοιπόν η συνολική μετατόπιση δ_{total} θα είναι: $\delta_{total} = \frac{\sigma \cdot L}{E_i} + \frac{\sigma \cdot \lambda \cdot L}{E_D}$

ενώ η συνολική παραμόρφωση: $\varepsilon = \frac{\delta_{total}}{L} = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{\sigma \cdot \lambda}{E_D}$

και τελικά το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει: $E_{total} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_i}\right) + \left(\frac{\lambda}{E_D}\right)}$

Στην περίπτωση όμως που το δοκίμιο περιέχει μόνο μια ασυνέχεια η οποία όμως διαθέτει πάχος t_f, το οποίο δεν θεωρείται αμελητέο σε σχέση με το ύψος του δοκιμίου οι παραπάνω σχέσεις μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\delta_{total} = \frac{\sigma \cdot h}{E_i} + \frac{\sigma \cdot t_f}{E_D}$$

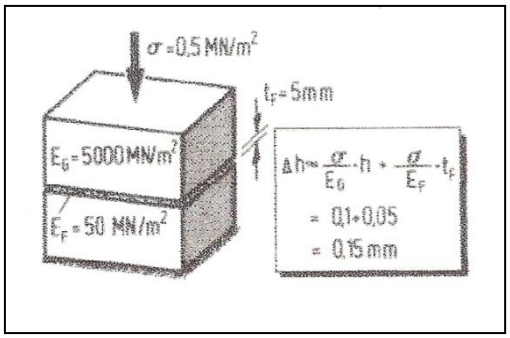
$$\varepsilon = \frac{\delta_{total}}{H} = \frac{\sigma}{E_i} \cdot \frac{h}{H} + \frac{\sigma}{E_D} \cdot \frac{t_f}{H}$$

$$E_{total} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_i} \cdot \frac{h}{H}\right) + \left(\frac{1}{E_D} \cdot \frac{t_f}{H}\right)}$$

Όπου t_f: το πάχος της ασυνέχειας

h: το πάχος του άρρηκτου πετρώματος

H: το συνολικό ύψος του δοκιμίου ή του τμήματος της βραχόμαζας



Εικονα 5.22. Δοκίμιο πετρώματος με ασυνέχεια πάχους t_f

Εάν υποθέσουμε ότι το άρρηκτο πέτρωμα είναι ο ψαμμίτης και το υλικό της ασυνέχειας είναι ο ίλυόλιθος, τότε μπορεί να υποτεθεί ότι:

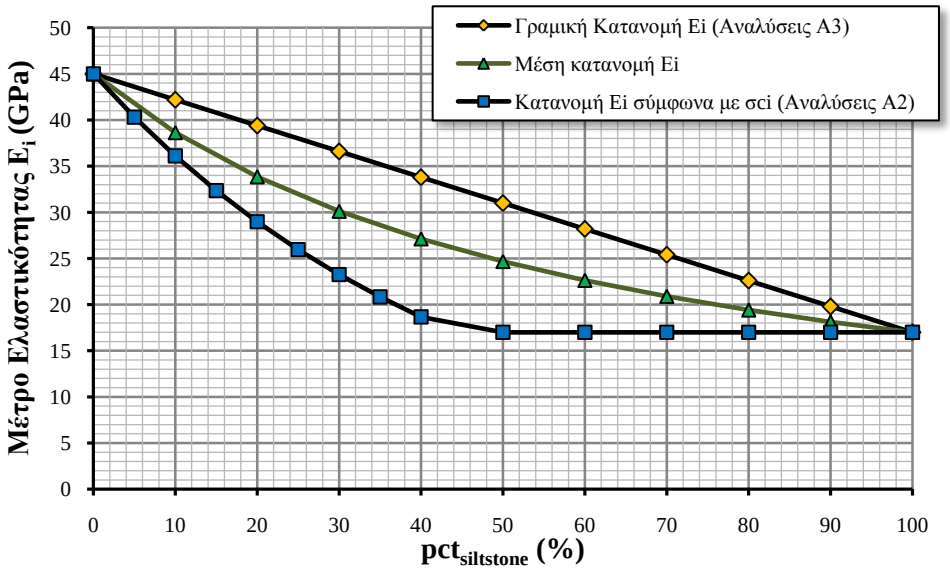
$$E_{total} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_i^{sandstone}} \cdot \frac{h_{sandstone}}{H}\right) + \left(\frac{1}{E_i^{siltstone}} \cdot \frac{h_{siltstone}}{H}\right)}$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία που εργαζόμαστε με ποσοστά συμμέτοχης των δύο πετρωμάτων η τελευταία σχέση του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να μορφοποιηθεί ως εξής:

$$E_{total} = \frac{1}{\left(\frac{pct_{sandstone}/100}{E_i^{sandstone}}\right) + \left(\frac{pct_{siltstone}/100}{E_i^{siltstone}}\right)}$$

Όπου $pct_{sandstone,\ siltstone}$: τα ποσοστά συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου επί τις εκατό (%). Ισχύει επίσης ότι $pct_{sandstone} = 100 - pct_{siltstone}$

Η παραπάνω σχέση συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου συγκριτικά με τις άλλες δύο κατανομές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (αναλύσεις Α2 και Α3) φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.4. Συγκριτική απεικόνιση της μέσης κατανομής του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει στο ποσοστού του ιλυολίθου

Από το συγκριτικό διάγραμμα παρατηρείται ότι η νέα κατανομή βρίσκεται ανάμεσα στις δύο παλαιότερες και γι' αυτό το λόγο την ονομάζουμε απλοποιητικά «**μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας E_i**».

5.3.2.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Αναλύσεις Α4

Για να γίνει σύγκριση με το προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκε να γίνουν αναλύσεις με τις ίδιες παραμέτρους όπως παραπάνω. Οι σειρά αναλύσεων αυτή ονομάστηκε Α4.

Η μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας σε μορφή πίνακα φαίνεται παρακάτω:

Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Κατανομή E_i όμοια με αυτή του σ_{ci} (GPa)	Ποσοστό απομείωσης μέτρου ελαστικότητας ψαμμίτη (%)
0	45,00	0,00
10	38,64	14,14
20	33,85	24,78
30	30,12	33,07
40	27,13	39,72
50	24,68	45,16
60	22,63	49,70
70	20,90	53,55
80	19,42	56,85
90	18,13	59,72
100	17,00	62,22

Πίνακας 5.13. Μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας Ei

Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται παρακάτω:

	% ιλυόλιθος	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	% ψαμμίτης	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Δεδομένα	σ_{ci}	95,00	76,95	61,75	49,40	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00
	GSI	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	45,00	38,64	33,85	30,12	27,13	24,68	22,63	20,90	19,42	18,13	17,00
Αποτελέσματα	m_b	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406	2,406
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674	0,00674
	a	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504
	σ_{cm}	20,130	16,305	13,084	10,467	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111	9,111
	E_{rm}	18,373	15,774	13,820	12,297	11,076	10,075	9,241	8,534	7,927	7,401	6,941

Πίνακας 5.14. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α4

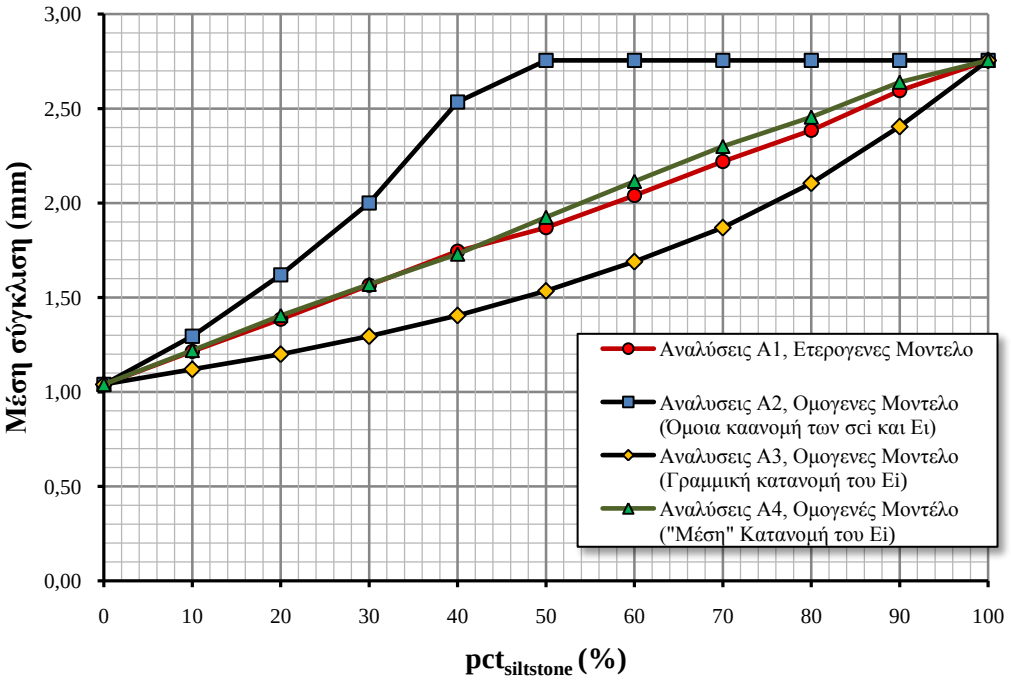
5.3.2.2. Αποτελέσματα αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων Α4 παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες για τα υπερκείμενα των 100 και 300m:

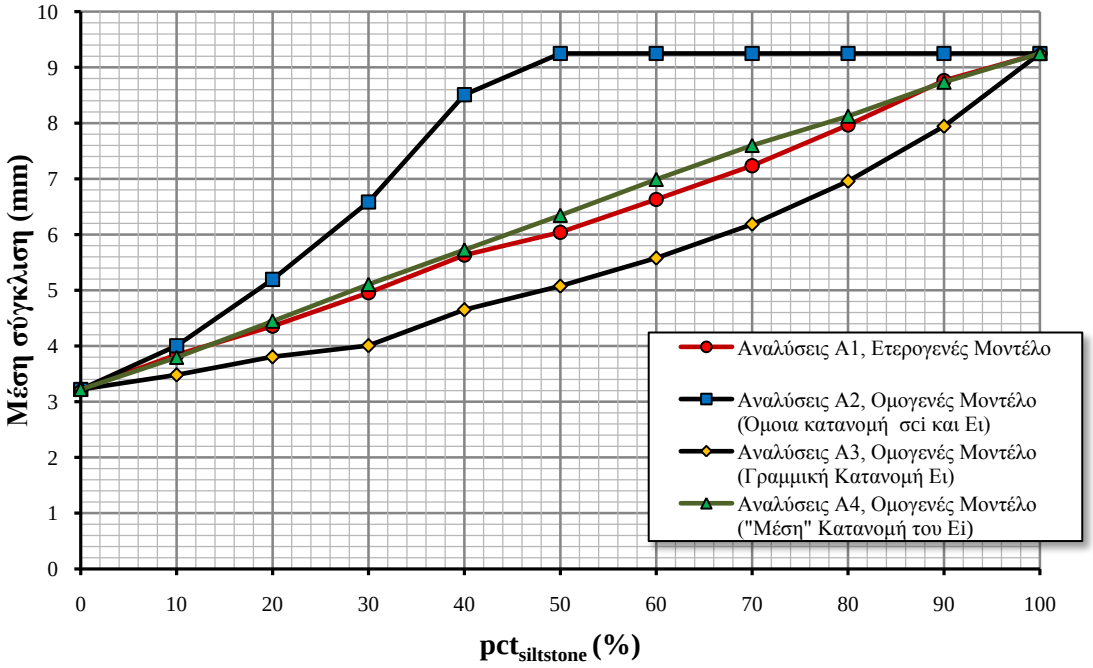
		Υπερκείμενο 100m		Υπερκείμενο 100m	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
0	100	1,04	0,021	3,22	0,064
10	90	1,22	0,024	3,80	0,076
20	80	1,41	0,028	4,45	0,089
30	70	1,57	0,031	5,11	0,102
40	60	1,73	0,035	5,73	0,115
50	50	1,93	0,039	6,35	0,127
60	40	2,12	0,042	6,99	0,140
70	30	2,30	0,046	7,60	0,152
80	20	2,46	0,049	8,13	0,163
90	10	2,64	0,053	8,74	0,175
100	0	2,76	0,055	9,25	0,185

Πίνακας 5.15. Αποτελέσματα αναλύσεων Α4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενα 100m και 300m

Τα συγκριτικά διαγράμματα των αναλύσεων Α1 – Α4 παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα για τα υπερκείμενα των 100 και 300m.



Διάγραμμα 5.5. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2, Α3 και Α4 για φορτίο υπερκειμένων 100m



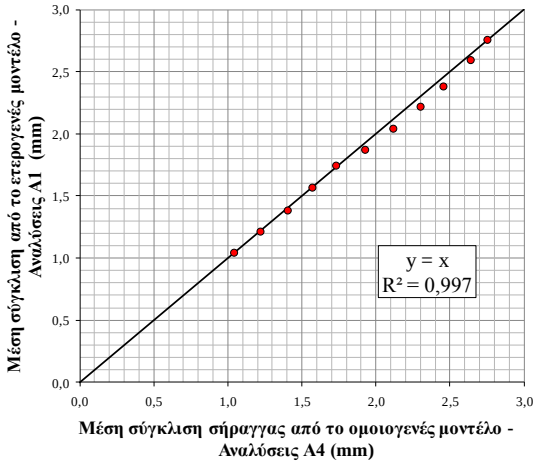
Διάγραμμα 5.6. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2, Α3 και Α4 για φορτίο υπερκειμένων 300m

5.3.2.3.Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

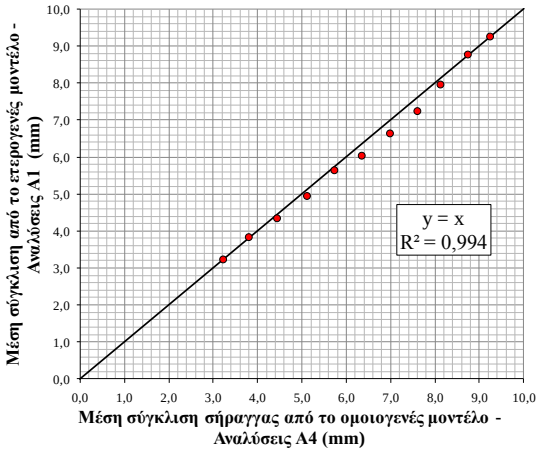
Οι συγκρίσει μεταξύ των ανωτέρω σειρών αναλύσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα:

	Υπερκείμενο 100m				Υπερκείμενο 300m			
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)
0	1,04	1,04	0,00	0,00	3,22	3,22	0,00	0,00
10	1,22	1,22	0,01	0,41	3,85	3,80	-0,05	-1,30
20	1,39	1,41	0,02	1,44	4,36	4,45	0,09	2,07
30	1,57	1,57	0,01	0,32	4,96	5,11	0,15	3,03
40	1,75	1,73	-0,02	-0,86	5,63	5,73	0,09	1,69
50	1,87	1,93	0,05	2,94	6,04	6,35	0,31	5,05
60	2,04	2,12	0,08	3,68	6,63	6,99	0,36	5,43
70	2,22	2,30	0,08	3,60	7,24	7,60	0,37	5,04
80	2,39	2,46	0,07	2,94	7,97	8,13	0,16	2,01
90	2,60	2,64	0,04	1,73	8,77	8,74	-0,03	-0,34
100	2,76	2,76	0,00	0,00	9,25	9,25	0,00	0,00

Πίνακας 5.16. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενούς προσομοιώματος Α4 συγκριτικά με το ετερογενές Α1 για υπερκείμενο 100m και 300m



Διάγραμμα 5.7. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων Α1 και Α4 για υπερκείμενο 100m

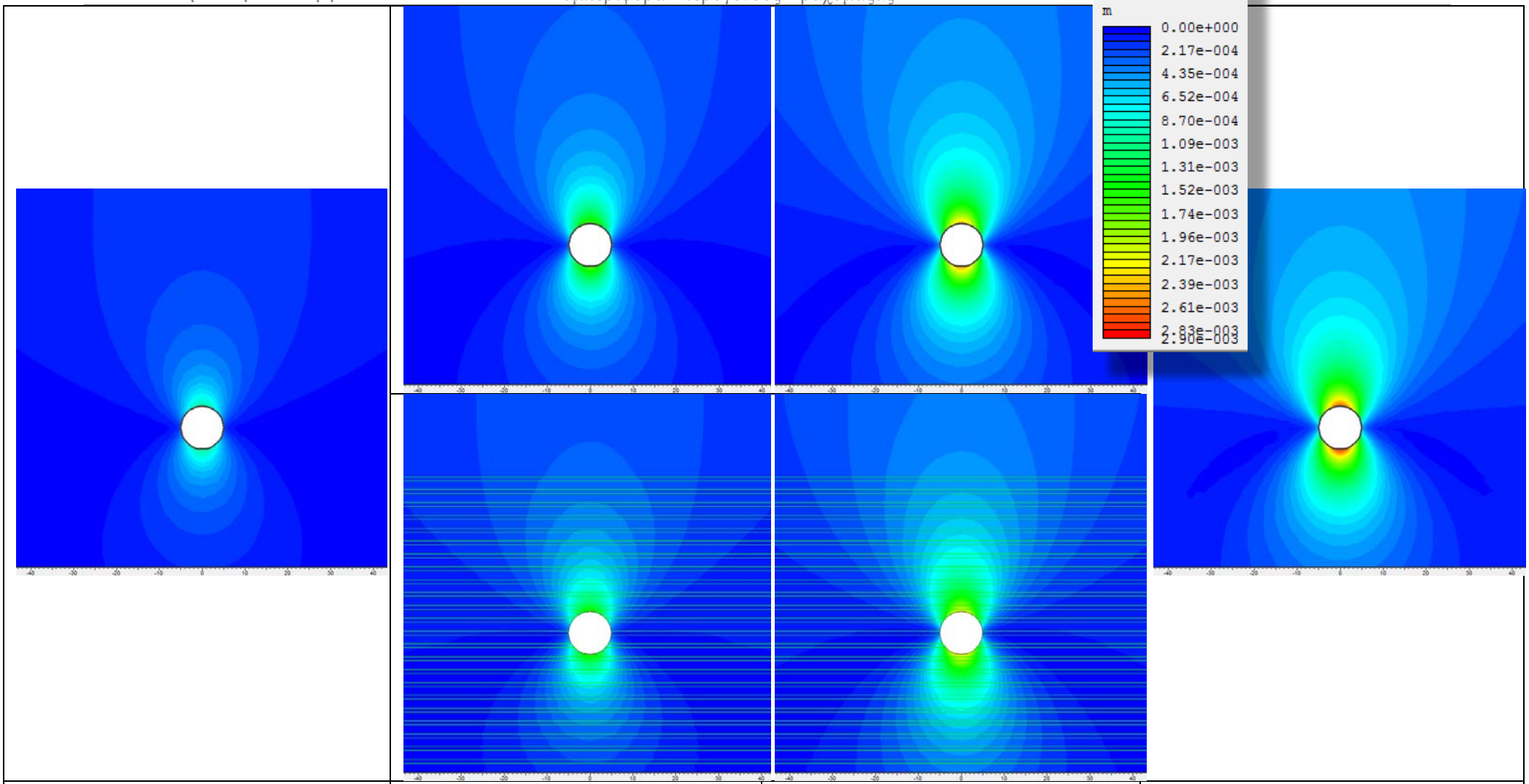


Διάγραμμα 5.8. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων Α1 και Α4 για υπερκείμενο 300m

Οι μέγιστες αποκλίσεις εδώ κυμαίνονται από 3,68% έως 5,43% για τα υπερκείμενα των 100 και 300m αντίστοιχα. Συνεπώς η «μέση» κατανομή του μέτρου ελαστικότητας κρίνεται η πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμορφωσιμότητας της ετερογενούς βραχόμαζας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέλιξη του βολβού των συνολικών μετακινήσεων της βραχόμαζας με την αύξηση του ποσοστού του ιλυολίθου σε αυτή. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται αυτή η εξέλιξη για τις αναλύσεις A1 και A4 και για 100m υπερκείμενο:

Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά, οι μορφές των προσομοιωμάτων, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Phase 2 και τα αποτελέσματα των συνολικών μετακινήσεων για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 100m για τη σειρά αναλύσεων A4.



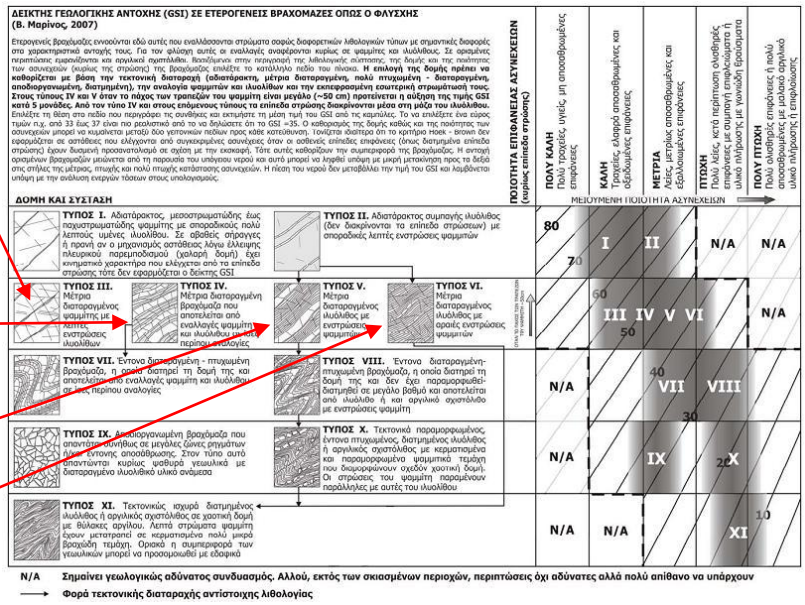
0% ιλυόλιθος 100% ψαμμίτης	30% ιλυόλιθος 70% ψαμμίτης	70% ιλυόλιθος 30% ψαμμίτης	100% ιλυόλιθος 0% ψαμμίτης

Εικονα 5.23. Σύγκριση συνολικών μετατοπίσεων για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου για τις αναλύσεις Α1 και Α4

5.3.3. Αναλύσεις για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου με μεταβλητό τον δείκτη GSi

Πιο κοντά στη πραγματικότητα βρίσκεται η θεώρηση ότι οι τιμές του δείκτη GSI μεταβάλλονται καθώς μεταβάλλεται το ποσοστό συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στη βραχόμαζα. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε να γίνουν αναλύσεις για διαφορετικές τιμές του δείκτη GSI όπως επιλέχθηκαν και στην παράγραφο 4.4.5 δηλαδή:

Ποσοστό Ιλυολίθου	Ποσοστό ψαμμίτη	GSI	Κατηγορία GSi
10	90		
20	80	**55**	**III**
30	70		
40	60		
50	50	**50**	**IV**
60	40		
70	30	**45**	**V**
80	20		
90	10	**40**	**VI**



Πίνακας 5.17. Αντιστοίχιση των ποσοστών συμμετοχής των δύο υλικών στο δοκίμιο στις κατηγορίες GSI για τον φλύσχη

Για τις αναλύσεις αυτές δεν θα εργαστούμε με την βραχόμαζα του ιλυολίθου και του ψαμμίτη αφού ξεφεύγουμε από το αντικείμενο διερεύνησης της ετερογενούς βραχόμαζας. Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για ποσοστά 10%-90% ιλυολίθου στη βραχόμαζα του φλύσχη.

Για το μεταβαλλόμενο GSI πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις του ετερογενούς προσομοιώματος σε σύγκριση με το ομοιογενές με «μέση» κατανομή του μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες παρουσίαζαν και την καλύτερη σύγκλιση.

Οι αναλύσεις αυτές κωδικοποιήθηκαν:

- Αναλύσεις B1: Ετερογενές Προσομοίωμα
- Αναλύσεις B4: Ομοιογενές Προσομοίωμα με «μέση» κατανομή του μέτρου ελαστικότητας E_i

Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τα υπερκείμενα των 100 και 300m.

5.3.3.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Οι γεωτεχνικές παράμετροι των υλικών των αναλύσεων, για μεταβαλλόμενες τιμές του δείκτη GSI και σύμφωνα με το κριτήριο Hoek-Brown, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Υπενθυμίζεται ότι για τα διαφορετικά υπερκείμενα διατηρούνται οι ίδιες τιμές των παραμέτρων και μεταβάλλονται μόνο οι εξωτερικές συνθήκες των προσομοιωμάτων.

Αναλύσεις Β1, Ετερογενές Προσομοίωμα

Για το ετερογενές προσομοίωμα, για κάθε ξεχωριστή ανάλυση με διαφορετικό ποσοστό ιλυολίθου, θα εισάγονται και διαφορετικές παράμετροι των υλικών, λόγω της αλλαγής του δείκτη GSI.

Ψαμμίτης

	% ιλυόλιθος	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	% ψαμμίτης	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Δεδομένα	**σ_{ci}**	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
	Κατηγορία GSi	III			IV			V		VI
	GSI	55	55	55	50	50	50	45	45	40
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Αποτελέσματα	**m_b**	2,406	2,406	2,406	2,012	2,012	2,012	1,683	1,683	1,408
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00387	0,00387	0,00387	0,00222	0,00222	0,00127
	a	0,504	0,504	0,504	0,506	0,506	0,506	0,508	0,508	0,511
	σ_{cm}	20,130	20,130	20,130	18,065	18,065	18,065	16,219	16,219	14,529
	E_{rm}	18,373	18,373	18,373	13,823	13,823	13,823	10,064	10,064	7,184

Ιλυόλιθος

	% ιλυόλιθος	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	% ψαμμίτης	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Δεδομένα	**σ_{ci}**	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00
	Κατηγορία GSi	III			IV			V		VI
	GSI	55	55	55	50	50	50	45	45	40
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
Αποτελέσματα	**m_b**	2,406	2,406	2,406	2,012	2,012	2,012	1,683	1,683	1,408
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00387	0,00387	0,00387	0,00222	0,00222	0,00127
	a	0,504	0,504	0,504	0,506	0,506	0,506	0,508	0,508	0,511
	σ_{cm}	9,111	9,111	9,111	8,177	8,177	8,177	7,341	7,341	6,576
	E_{rm}	6,941	6,941	6,941	5,222	5,222	5,222	3,802	3,802	2,714

Πίνακας 5.18. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Β1

Αναλύσεις B4, Ομοιογενές Προσομοίωμα

Στο ομοιογενές προσομοίωμα εκτός από το GSI μεταβάλλονται και η θλιπτική αντοχή του πετρώματος αλλά και το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τη μέση κατανομή.

	% ιλυόλιθος	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	% ψαμμίτης	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Δεδομένα	**σ_{ci}**	76,95	61,75	49,40	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00	43,00
	Κατηγορία GSi	III			IV			V		VI
	GSI	55	55	55	50	50	50	45	45	40
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	38,70	33,75	30,15	27,45	24,75	22,50	20,70	19,35	18,00
Αποτελέσματα	**m_b**	2,406	2,406	2,406	2,012	2,012	2,012	1,683	1,683	1,408
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00387	0,00387	0,00387	0,00222	0,00222	0,00127
	a	0,504	0,504	0,504	0,506	0,506	0,506	0,508	0,508	0,511
	σ_{cm}	16,305	13,084	10,467	8,177	8,177	8,177	7,341	7,341	6,576
	E_{rm}	15,800	13,779	12,310	8,432	7,603	6,912	4,630	4,328	2,874

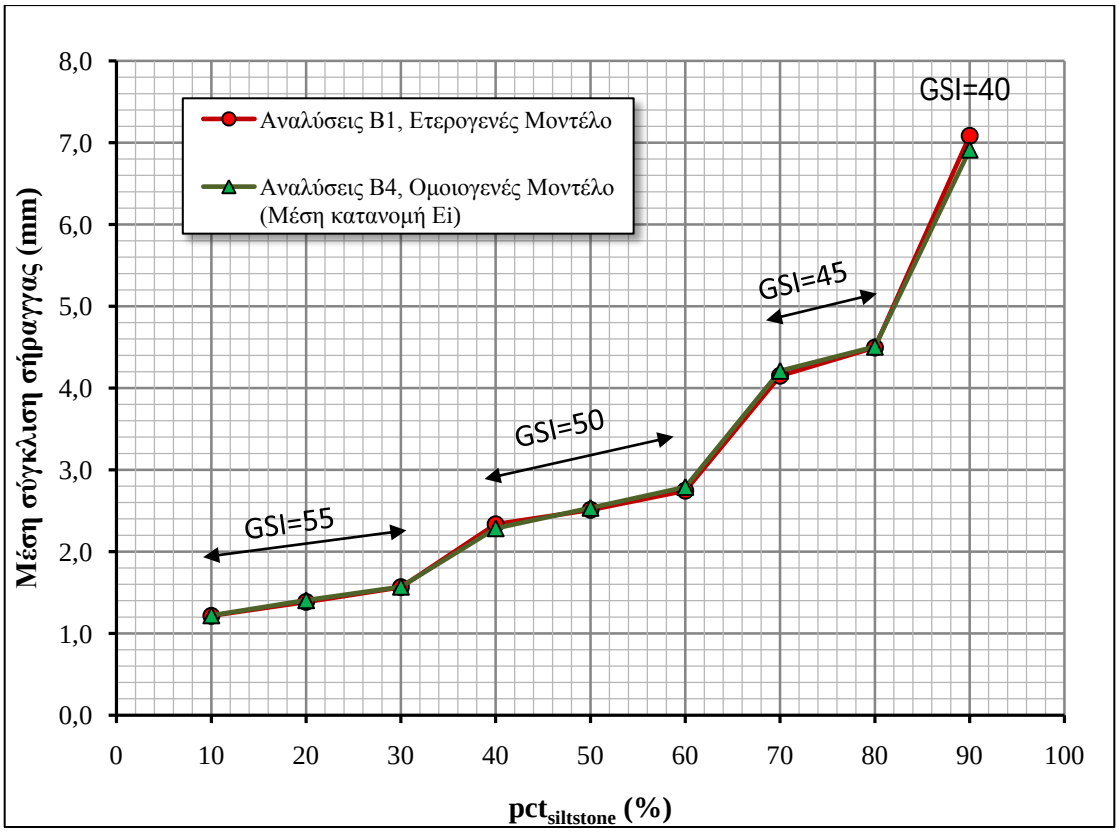
Πίνακας 5.19. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις B4

5.3.3.2. Αποτελέσματα Αναλύσεων

Υπερκείμενο 100m

		Αναλύσεις B1		Αναλύσεις B4	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
10	90	1,22	0,024	1,22	0,024
20	80	1,39	0,028	1,41	0,028
30	70	1,57	0,031	1,57	0,031
40	60	2,34	0,047	2,29	0,046
50	50	2,51	0,050	2,54	0,051
60	40	2,75	0,055	2,79	0,056
70	30	4,15	0,083	4,21	0,084
80	20	4,50	0,090	4,51	0,090
90	10	7,09	0,142	6,92	0,138

Πίνακας 5.20. Αποτελέσματα αναλύσεων B1 (ετερογενές προσομοίωμα) και B4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενο 100m

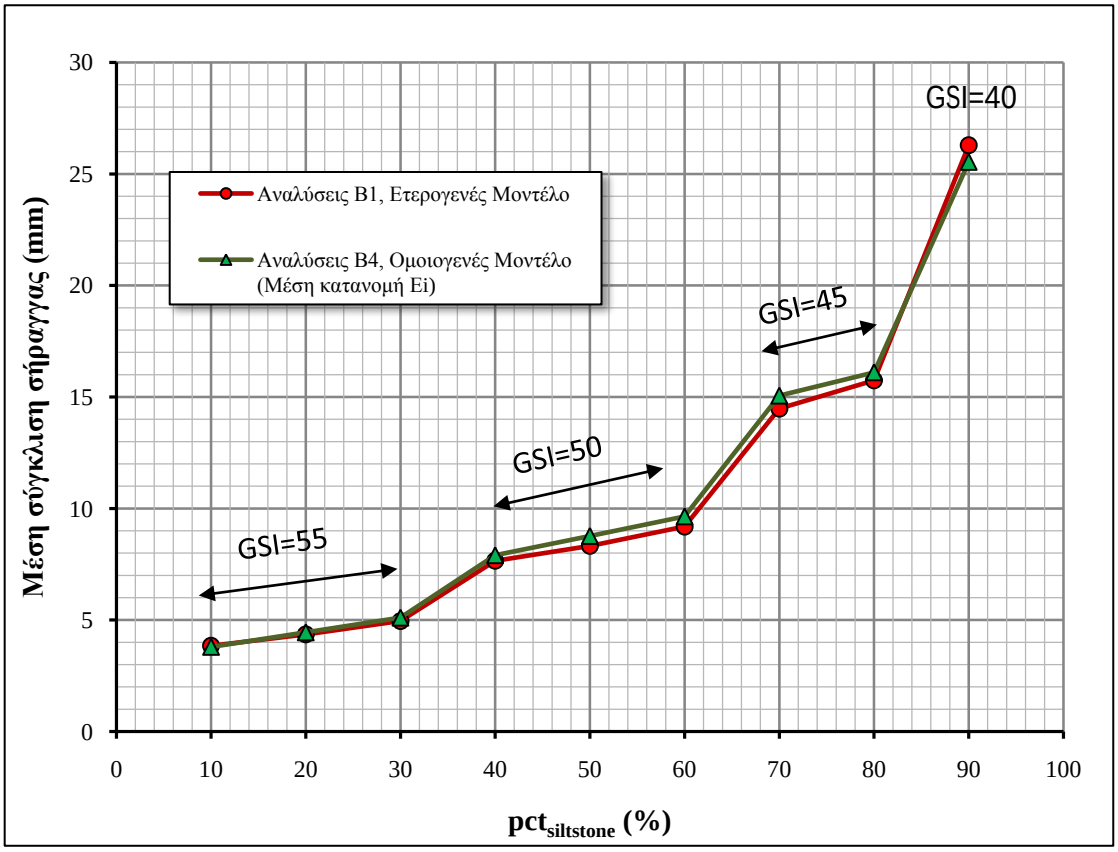


Διάγραμμα 5.9. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1 και B4 για φορτίο υπερκειμένων 100m

Υπερκείμενο 300m

		Αναλύσεις B1		Αναλύσεις B4	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
10	90	3,80	0,076	3,85	0,077
20	80	4,45	0,089	4,36	0,087
30	70	5,11	0,102	4,96	0,099
40	60	7,91	0,158	7,66	0,153
50	50	8,77	0,175	8,33	0,167
60	40	9,65	0,193	9,19	0,184
70	30	15,06	0,301	14,48	0,290
80	20	16,11	0,322	15,75	0,315
90	10	25,54	0,511	26,29	0,526

Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα αναλύσεων B1 (ετερογενές προσομοίωμα) και B4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενο 300m



Διάγραμμα 5.10. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1 και B4 για φορτίο υπερκειμένων 300m

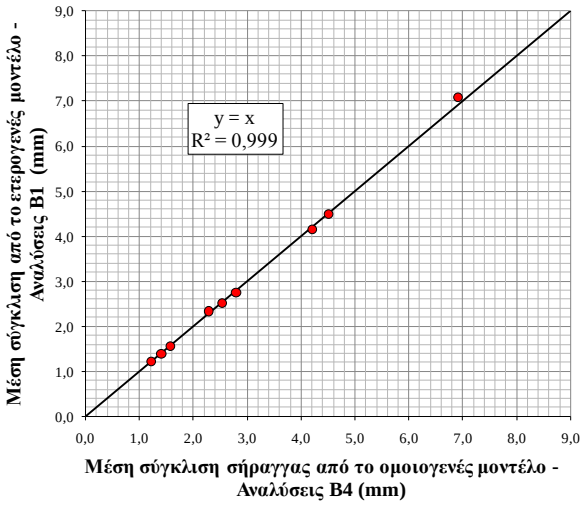
5.3.3.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Λόγω της διακύμανσης του δείκτη GSI, αλλάζει το εύρος των συγκλίσεων τα οποία πια αγγίζουν τιμές της τάξης των 0,59 – 7,49mm και 1,76 – 27,00mm για τα υπερκείμενα των 100m και 300m αντίστοιχα.

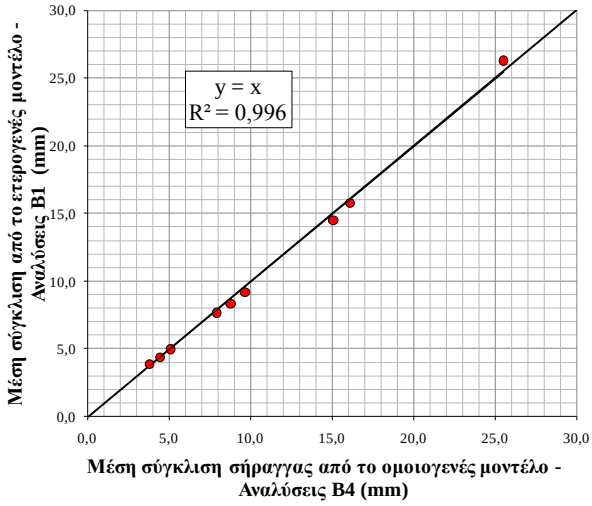
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα και πίνακες καθώς και αυτών της προηγούμενης παραγράφου, οι δύο προβλέψεις σχεδόν συμπίπτουν.

	Υπερκείμενο 100m				Υπερκείμενο 300m			
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (B1) (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (B4) (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (B1) (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (B4) (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)
10	1,22	1,22	0,01	0,41	3,85	3,80	-0,05	-1,30
20	1,39	1,41	0,02	1,44	4,36	4,45	0,09	2,07
30	1,57	1,57	0,01	0,32	4,96	5,11	0,15	3,03
40	2,34	2,29	-0,05	-2,14	7,66	7,91	0,25	3,27
50	2,51	2,54	0,03	1,00	8,33	8,77	0,45	5,35
60	2,75	2,79	0,04	1,64	9,19	9,65	0,45	4,95
70	4,15	4,21	0,06	1,45	14,48	15,06	0,58	4,01
80	4,50	4,51	0,01	0,22	15,75	16,11	0,36	2,29
90	2,60	2,64	0,04	1,73	26,29	25,54	-0,75	-2,85

Πίνακας 5.22. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενούς προσομοιώματος B4 συγκριτικά με το ετερογενές B1 για υπερκείμενο 100m και 300m



Διάγραμμα 5.11. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1 και B4 για υπερκείμενο 100m



Διάγραμμα 5.12. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1 και B4 για υπερκείμενο 300m

Οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν το 2,14% για το χαμηλό υπερκείμενο των 100m και το 5,35% για το υπερκείμενο των 300m.

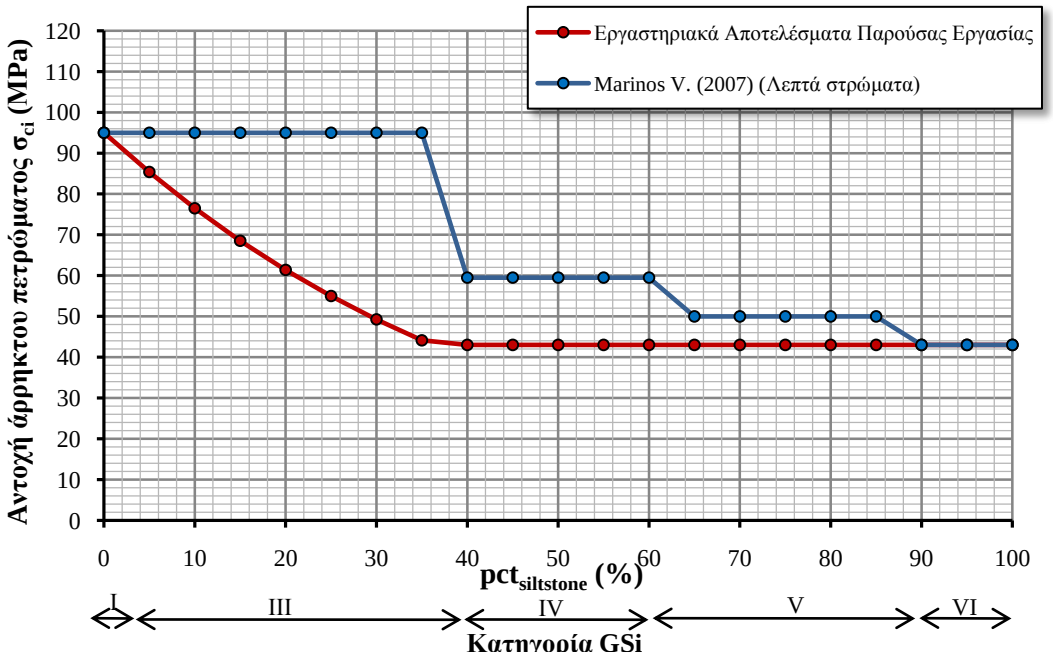
Μπορούμε λοιπόν πια με σιγουριά να πούμε ότι η πλέον κατάλληλη εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της ετερογενούς βραχόμαζας του φλύσχη, για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου και διαφορετικές ποιότητες βραχόμαζας δίνεται από τη σχέση:

$$E_{total} = \frac{1}{\left(\frac{pct_{sandstone}/100}{E_i^{sandstone}}\right) + \left(\frac{pct_{siltstone}/100}{E_i^{siltstone}}\right)}$$

Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μορφές των προσομοιωμάτων, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Phase 2 και τα αποτελέσματα των συνολικών μετακινήσεων για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 100m για τις σειρές αναλύσεων B1 και B4.

5.3.4. Σύγκριση κατανομής μέτρου ελαστικότητας σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της βιβλιογραφίας.

Στην παράγραφο αυτή επιχειρήθηκε να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων παραγράφων με τις συστάσεις του *Marinos V. (2007)* για την επιλογή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ανάλογα με την κατηγορία του δείκτη GSI. Οι προτεινόμενες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (για λεπτά στρώματα στο σχηματισμό του φλύσχη) συγκριτικά με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας εργασίας φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα:



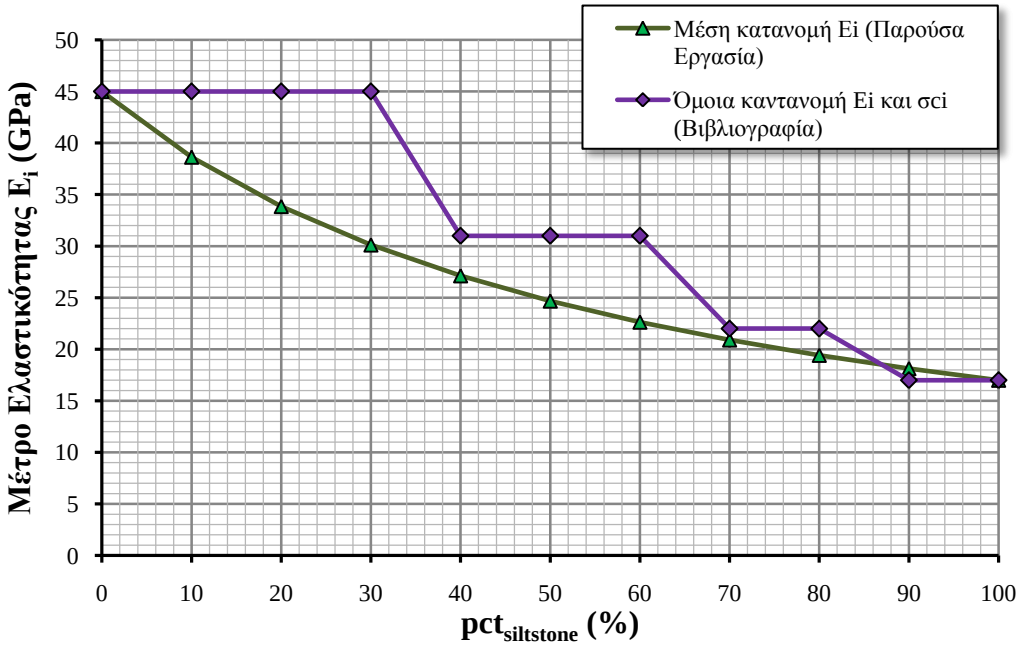
Διάγραμμα 5.13. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων παρούσας εργασίας με συστάσεις χρήσης του πίνακα GSI για τον φλύσχη από τη βιβλιογραφία.

Οι κατηγορίες GSI καθώς και οι τιμές του δείκτη που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ίδιες με αυτές της προηγούμενης παραγράφου, για να μπορεί βεβαίως να γίνει η σύγκριση.

Έγινε μια συγκριτική δοκιμή λοιπόν με το μέτρο ελαστικότητας να ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτή της αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, που είναι μια εύλογη θεώρηση στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αναλυτικά εργαστηριακά αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

Ποσοστό Ιλυολίθου	Ποσοστό ψαμμίτη	Κατηγορία GSi	Προτεινόμενη τιμή σ_{ci} (Marinos V. 2007)	σ_{ci} (MPa)	Υπολογισμός E_i (GPa)
0	100	I	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους	95	$E_i^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 45$
10	90	III	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους	95	$E_i^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} = 45$
20	80				
30	70				
40	60	IV	Λεπτά στρώματα: Μείωσε τη τιμή του ψαμμίτη κατά 20% και χρησιμοποίησε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου	59,5	$\frac{0,8 \cdot E_i^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} + E_i^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}}{2} = 31.0$
50	50				
60	40				
70	30	V	Μείωσε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 40% και χρησιμοποίησε τη πλήρη τιμή του ιλυολίθου	50	$\frac{0,6 \cdot E_i^{\psi\alpha\mu\mu\acute{\iota}\tau\eta} + E_i^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon}}{2} = 22.0$
80	20				
90	10	VI	Χρησιμοποίησε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους	43	$E_i^{\iota\lambda\upsilon o\lambda\acute{\iota}\theta o\upsilon} = 17$
100	0	II			

Πίνακας 5.23. Υπολογισμός Ei σύμφωνα με τις συστάσεις της βιβλιογραφίας



Διάγραμμα 5.14. Σύγκριση κατανομής του μέτρου ελαστικότητας E_i ομοίως με το σ_{ci} που προτείνεται από τη βιβλιογραφία με τη «μέση» κατανομή που προτείνεται στη παρούσα εργασία.

Η σειρά αυτή αναλύσεων ονομάστηκε με τον κωδικό C1.

Και εδώ πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για ποσοστά ιλυολίθου 10-90%.

5.3.4.1. Παράμετροι εισαγωγής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Αναλύσεις C1, Ομοιογενές Προσομοίωμα

Σύμφωνα με τις θεωρήσεις που έγιναν παραπάνω και με τη χρήση του κριτηρίου Hoek-Brown, προέκυψαν τα δεδομένα που εισήχθησαν στο ομοιογενές προσομοίωμα για τη σύγκριση του με το πιο ρεαλιστικό ετερογενές B4.

	% ιλυόλιθος	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
	% ψαμμίτης	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Δεδομένα	σ_{ci}	95,00	95,00	95,00	59,50	59,50	59,50	50,00	50,00	43,00
	Κατηγορία GSi	III			IV			V		VI
	GSI	55	55	55	50	50	50	45	45	40
	m_i	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E_i	45,00	45,00	45,00	31,00	31,00	31,00	22,00	22,00	17,00
Αποτελέσματα	m_b	2,406	2,406	2,406	2,012	2,012	2,012	1,683	1,683	1,408
	s	0,00674	0,00674	0,00674	0,00387	0,00387	0,00387	0,00222	0,00222	0,00127
	a	0,504	0,504	0,504	0,506	0,506	0,506	0,508	0,508	0,511
	σ_{cm}	20,130	20,130	20,130	11,315	11,315	11,315	8,536	8,536	6,576
	E_{rm}	18,373	18,373	18,373	9,523	9,523	9,523	4,920	4,920	2,714

Πίνακας 5.24. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις C1

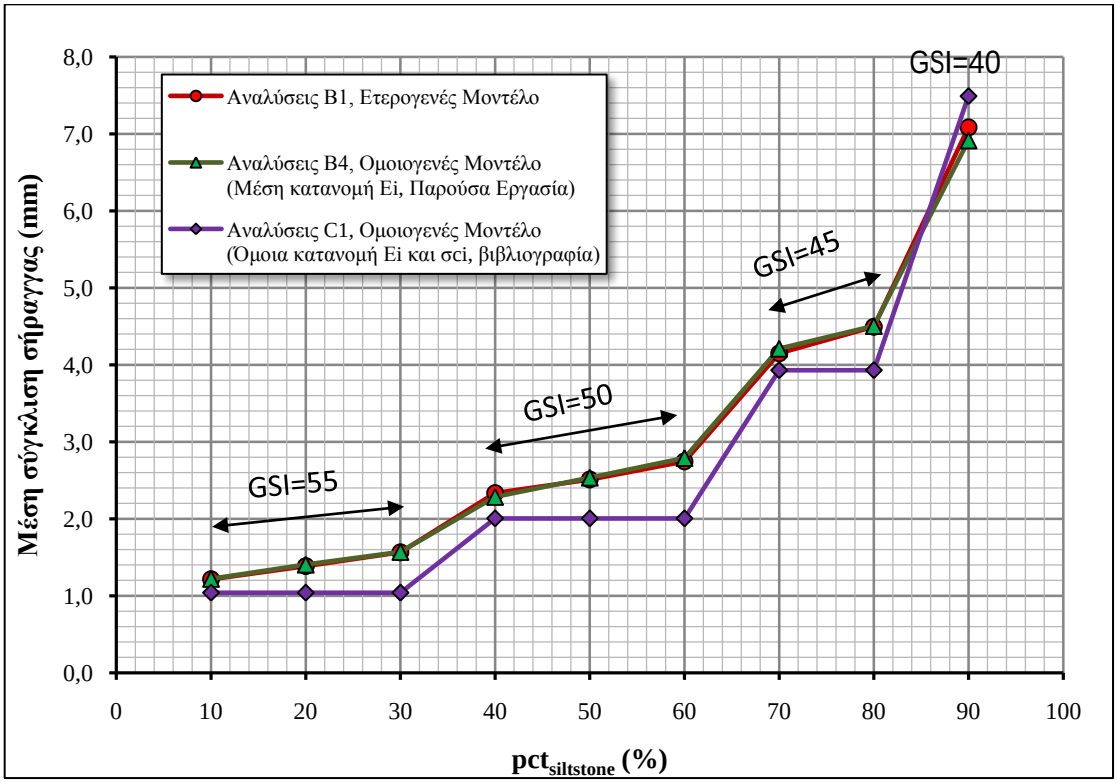
Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για υπερκείμενα 100 και 300m.

5.3.4.2. Αποτελέσματα Αναλύσεων

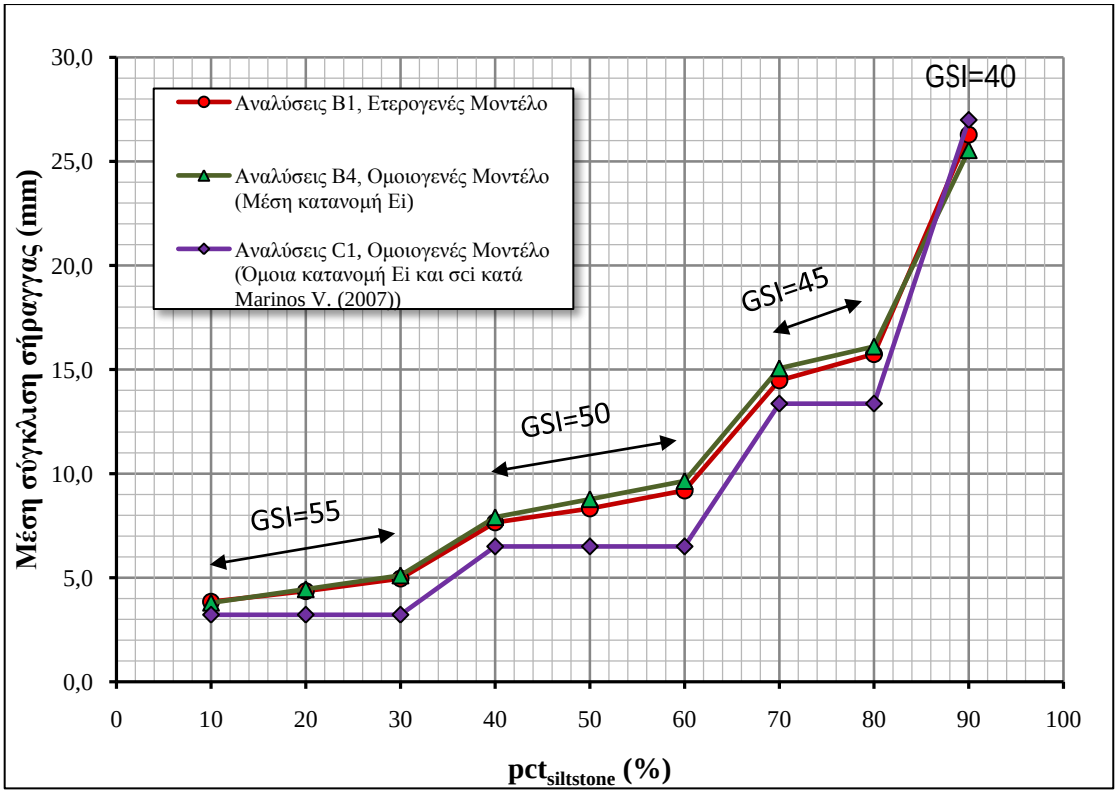
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα για τα υπερκείμενα των 100 και 300m αντίστοιχα.

		Υπερκείμενο 100m		Υπερκείμενο 300m	
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	**Ποσοστό ψαμμίτη (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**	**Μέση σύγκλιση (mm)**	**Ακτινική παραμόρφωση (%)**
10	90	1,04	0,021	3,22	0,064
20	80	1,04	0,021	3,22	0,064
30	70	1,04	0,021	3,22	0,064
40	60	2,01	0,040	6,50	0,130
50	50	2,01	0,040	6,50	0,130
60	40	2,01	0,040	6,50	0,130
70	30	3,93	0,079	13,37	0,267
80	20	3,93	0,079	13,37	0,267
90	10	7,49	0,150	27,00	0,540

Πίνακας 5.25. Αποτελέσματα αναλύσεων C1 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i από τη βιβλιογραφία) για υπερκείμενο 100m και 300m



Διάγραμμα 5.15. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1, B4 και C1 για φορτίο υπερκειμένων 100m



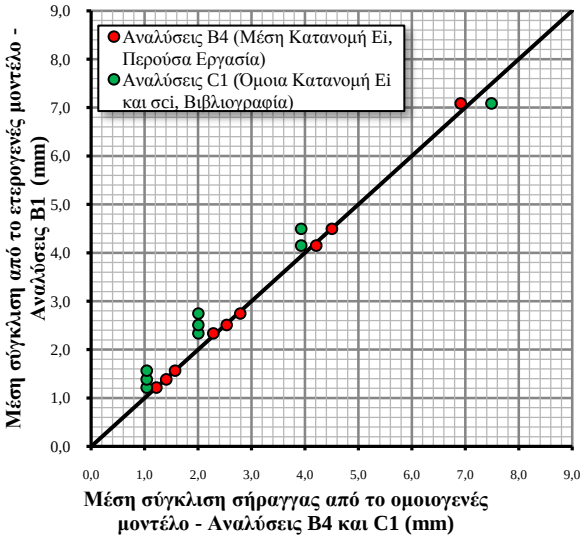
Διάγραμμα 5.16. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1, B4 και C1 για φορτίο υπερκειμένων 300m

5.3.4.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

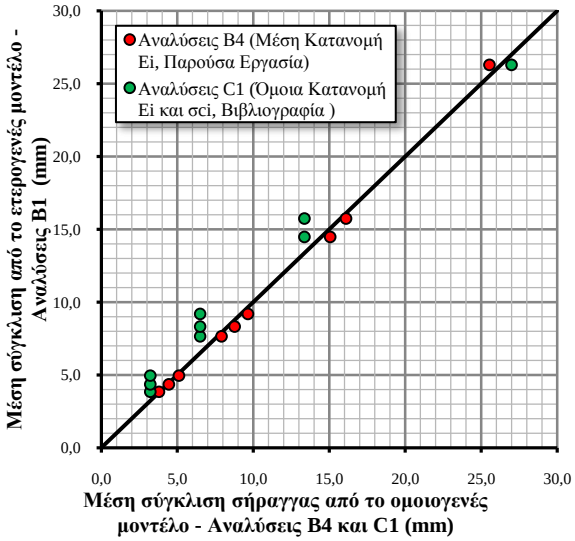
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της σειράς αναλύσεων C1 που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ότι οι αποκλίσεις μπορούν να φτάσουν στο επίπεδο του 33,5% και 35% για τα φορτία υπερκειμένων 100 και 300m αντίστοιχα.

	Υπερκείμενο 100m				Υπερκείμενο 300m			
Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (B1) (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (C1) (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)	Μέση σύγκλιση ετερογενούς προσ/τος (B1) (mm)	Μέση σύγκλιση ομοιογενούς προσ/τος (C1) (mm)	Διαφορά συγκλίσεων (mm)	Ποσοστιαία διαφορά συγκλίσεων (%)
10	1,22	1,04	-0,18	-14,40	3,85	3,22	-0,63	-16,25
20	1,39	1,04	-0,35	-24,91	4,36	3,22	-1,14	-26,06
30	1,57	1,04	-0,53	-33,55	4,96	3,22	-1,74	-35,02
40	2,34	2,01	-0,33	-14,13	7,66	6,50	-1,16	-15,09
50	2,51	2,01	-0,51	-20,12	8,33	6,50	-1,83	-21,92
60	2,75	2,01	-0,74	-26,96	9,19	6,50	-2,69	-29,27
70	4,15	3,93	-0,22	-5,30	14,48	13,37	-1,12	-7,70
80	4,50	3,93	-0,57	-12,57	15,75	13,37	-2,38	-15,12
90	7,09	7,49	0,41	5,72	26,29	27,00	0,70	2,68

Πίνακας 5.26. Διαφορές μεταξύ του ομοιογενούς προσομοιώματος C1 συγκριτικά με το ετερογενές B1 για υπερκείμενο 100m και 300m



Διάγραμμα 5.17. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1, B2 και C1 για υπερκείμενο 100m



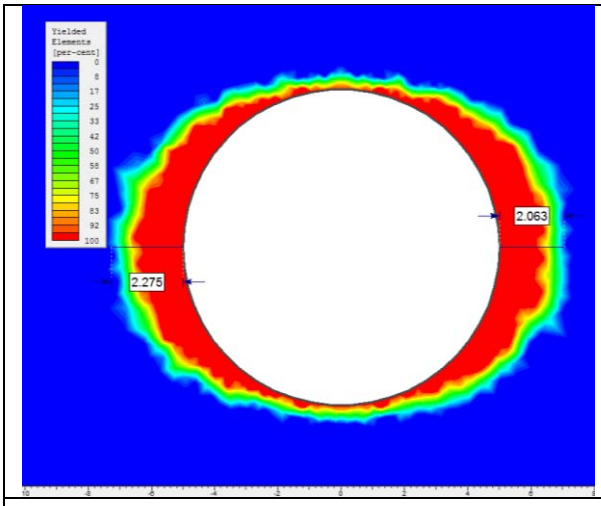
Διάγραμμα 5.18. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1, B4 και C1 για υπερκείμενο 300m

Επιπροσθέτως, λόγω της θεώρησης υψηλότερων τιμών του μέτρου ελαστικότητας αλλά και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, προκύπτουν χαμηλότερες τιμές των τελικών συγκλίσεων της σήραγγας.

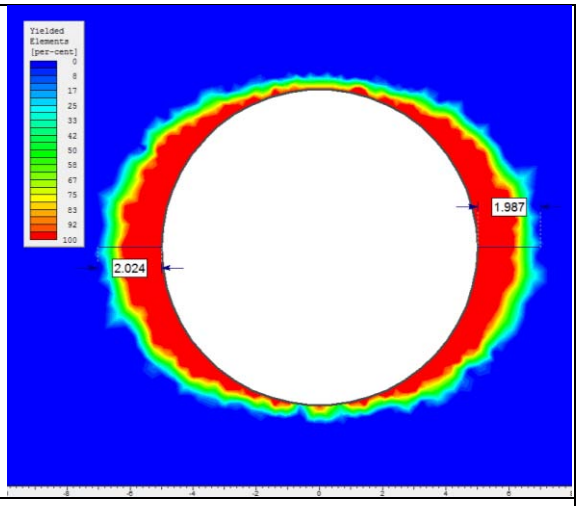
5.3.4.3.1. Σύγκριση εύρους πλαστικής ζώνης

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση της έκτασης των πλαστικών ζωνών γύρω από τη σήραγγα. Η πλαστική ζώνη εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχόμαζας οπότε είναι λογικό να ακολουθήσει τη γενικότερη τάση της παραμέτρου αυτής.

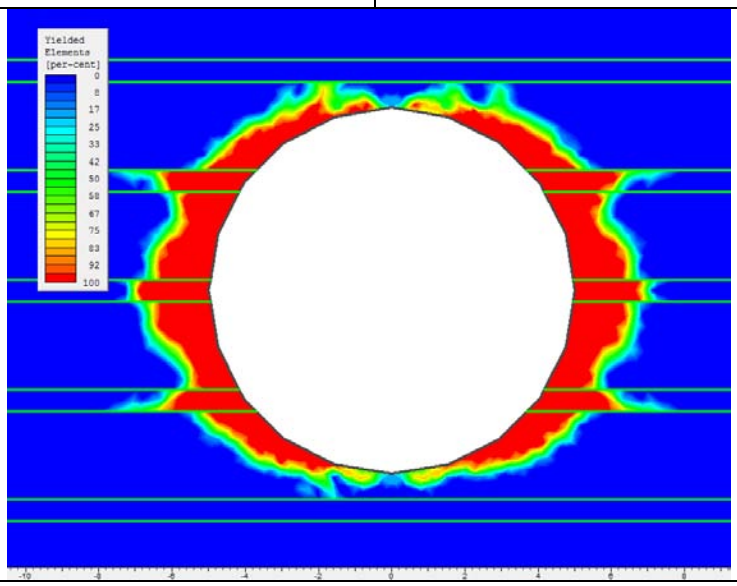
Έγινε σύγκριση των δύο ομοιογενών προσομοιωμάτων B4 (μέση κατανομή E_i, Παρούσα Εργασία) και C1(όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i, Βιβλιογραφία), μόνο για το υπερκείμενο των 300m όπου και οι πλαστικές ζώνες, λόγο μεγαλύτερου φορτίου, έχουν μεγαλύτερη έκταση. Σκοπός της σύγκρισης ήταν να διερευνηθούν οι διαφορές που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό σήραγγας ανυποστήρικτης διατομής για την επιλογή της προτεινόμενης από την παρούσα διπλωματική κατανομής του σ_{ci} για τον φλύσχη της Καλυδώνας σε σχέση με αυτή της βιβλιογραφίας. Δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατό να γίνει σύγκριση και με την προκύπτουσα πλαστική ζώνη του ετερογενούς προσομοιώματος γιατί αυτή παρουσιάζει ετερογένεια περιμετρικά της σήραγγας κατά την εναλλαγή των στρώσεων ιλυολίθου και ψαμμίτη όπως έχει προαναφερθεί.



Εικονα 5.24. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων B4 (ομοιογενές προσομοίωμα με μέση κατανομή E_i από τη παρούσα εργασία)



Εικονα 5.25. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων C1 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i από τη βιβλιογραφία)

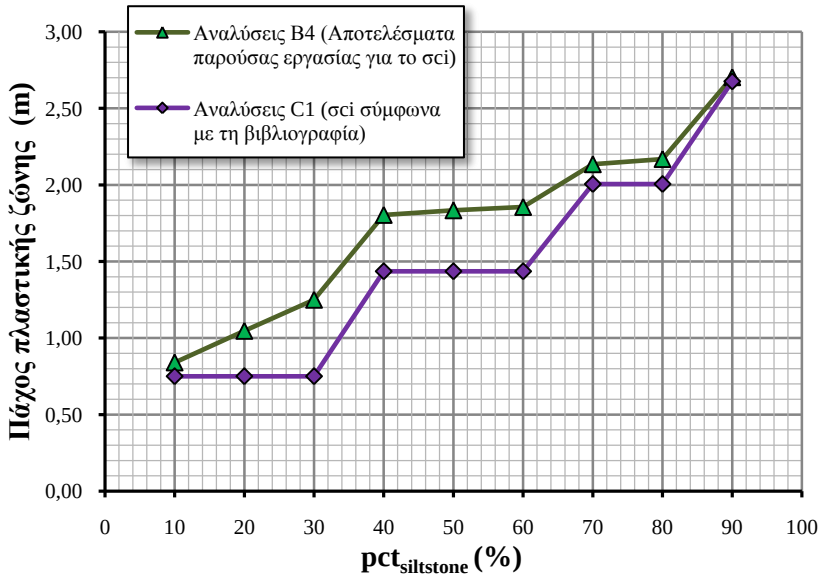


Εικονα 5.26. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων C1 (ετερογενές προσομοίωμα)

Η μέτρηση της πλαστικής ζώνης προέκυψε ως το ημιάθρισμα των μεγίστων τιμών της ζώνης εκατέρωθεν της σήραγγας. Έτσι λοιπόν προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Ποσοστό ιλυολίθου (%)	Εύρος πλαστικής ζώνης (Παρούσα Εργασία) (m)	Εύρος πλαστικής ζώνης (Βιβλιογραφία) (m)	Διαφορά (m)	Ποσοστιαία Διαφορά (%)
10	0,84	0,75	-0,09	-10,71
20	1,05	0,75	-0,30	-28,33
30	1,25	0,75	-0,50	-39,98
40	1,80	1,44	-0,37	-20,43
50	1,83	1,44	-0,40	-21,73
60	1,86	1,44	-0,42	-22,66
70	2,14	2,01	-0,13	-6,07
80	2,17	2,01	-0,16	-7,54
90	2,70	2,68	-0,03	-1,02

Πίνακας 5.27. Αποτελέσματα εύρους πλαστικής ζώνης αναλύσεων B4 και C1



Διάγραμμα 5.19. Συγκριτικό διάγραμμα εύρους πλαστικής ζώνης

Παρατηρείται ότι οι προβλέψεις της παρούσας εργασίας είναι πιο συντηρητικές, που σημαίνει πρόβλεψη μεγαλύτερης πλαστικής ζώνης. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για ποσοστό ιλυολίθου 30% και φτάνει στο 40% περίπου ή, σε απόλυτο μέγεθος, μισό μέτρο περίπου. Θα αναφερθεί και πάλι ότι οι αποκλίσεις στο εύρος της πλαστικής ζώνης οφείλονται κυρίως στην υπερεκτίμηση της τιμής της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη από τις προτάσεις της βιβλιογραφίας για τα χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας της βραχόμαζας σε ιλυόλιθο.

Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά, οι μορφές των προσομοιωμάτων, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Phase 2 και τα αποτελέσματα των συνολικών μετακινήσεων για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 100m για τη σειρά αναλύσεων C1.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια τη παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές και αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την διερεύνηση των μηχανικών και δυναμικών παραμέτρων της ετερογενούς βραχομάζας του φλύσχη.

Επιλέχθηκαν υλικά από την περιοχή της Καλυδώνας και πιο συγκεκριμένα από το ανατολικό στόμιο της σήραγγας Καλυδώνας. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- ψαμμίτης τεφρού χρώματος, μεσόκοκκος έως χονδρόκοκκος, υγιής και χωρίς κάποιο βαθμό ανισοτροπίας.
- ιλυόλιθος χρώματος τεφροπράσινου έως σκούρου τεφρού, γενικά ομογενής, συμπαγής και χωρίς κάποια ένδειξη ανισοτροπίας.

Για τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών όσων αφορά την άρρηκτη φάση του σχηματισμού του φλύσχη στο εργαστήριο κατασκευάστηκαν τεχνητά ετερογενή δοκίμια που αποτελούνταν από διαδοχικούς δίσκους ψαμμίτη και ιλυολίθου. Τα πάχη των δίσκων κυμαίνονταν ανάλογα με τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε υλικού στο συνολικό δοκίμιο.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές στα ετερογενή αλλά και σε ομογενή δοκίμια ψαμμίτη και ιλυολίθου με σκοπό την διερεύνηση της συμπεριφοράς τους για κυμαινόμενο ποσοστό συμμετοχής των δύο υλικών. Η μόρφωση και επεξεργασία των δοκιμίων καθώς και οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν εξ' ολοκλήρου στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του Τομέα Γεωτεχνικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π..

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά:

- 32 δοκιμές προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων κυμάτων
- 26 δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη
- 14 δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young

Επίσης πραγματοποιήθηκε καταγραφή των δοκιμών με κάμερα υψηλής ταχύτητας για την περαιτέρω διερεύνηση του τύπου θραύσης των δοκιμίων.

Διερεύνηση δυναμικών παραμέτρων

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της ταχύτητας υπέρηχων κυμάτων προέκυψαν τα παρακάτω:

- Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων προς εγκάρσιων κυμάτων:

$$V_p = 1,476 V_s, \quad R^2 = 0.853$$

- Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων κυμάτων συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου:

$$V_p = 4259.1 e^{-0.004\, pct_{siltstone}}, \quad R^2 = 0.885$$

- Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου:

$$V_s = 2846.6 \cdot e^{-0.003\, pct_{siltstone}}, \quad R^2 = 0.787$$

- Συσχέτιση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου:

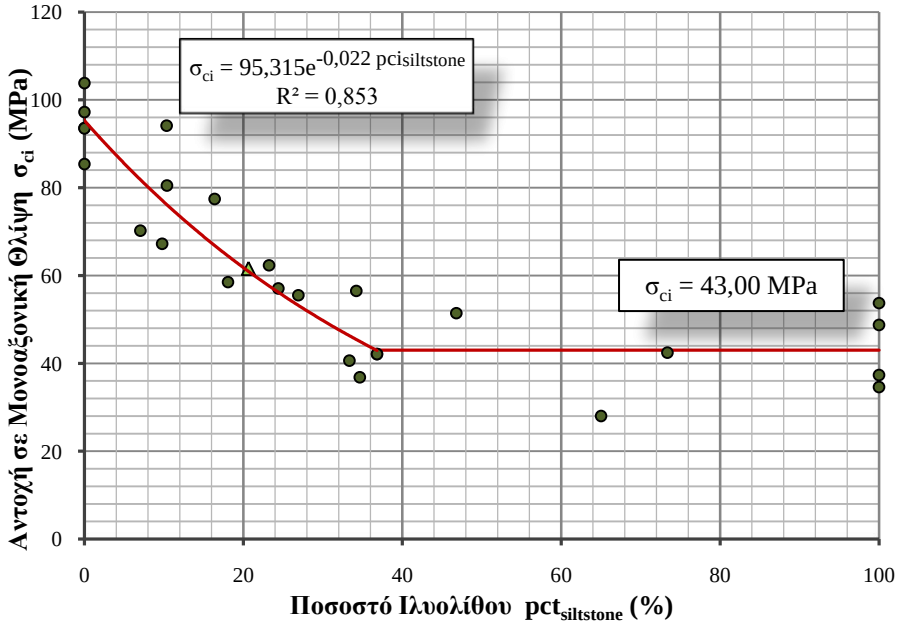
$$E_D = 45.865 \cdot e^{-0.008\, pct_{siltstone}}, \quad R^2 = 0.872$$

- Συσχέτιση δυναμικού μέτρου διάτμησης συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου:

$$G_D = 21.171 \cdot e^{-0.007\, pct_{siltstone}}, \quad R^2 = 0.798$$

Διερεύνηση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί την πεμπτουσία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προτείνεται η παρακάτω κατανομή της μεταβολής του σ_{ci}:

Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 35%:

$$\sigma_{ci} = 95,315 \cdot e^{(-0,022 \cdot pct_{siltstone})} \quad , \quad r^2 = 0,853$$

Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 35%:

$$\sigma_{ci} = \sigma_{ci}^{siltstone} = 43,00 \ \text{MPa}$$

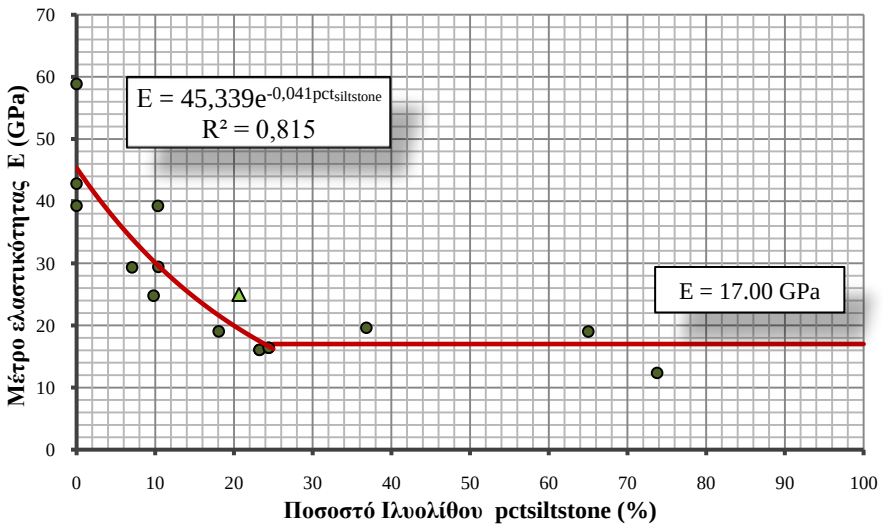
Για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η αντοχή των σύνθετων δοκιμίων παρουσιάζουν, ανάλογα με το ποσοστό περιεκτικότητας σε ιλυόλιθο, αντοχές που κυμαίνονται μεταξύ των αντοχών των άρρηκτων ομογενών πετρωμάτων, του ψαμμίτη και του ιλυολίθου.
- Η συνάρτηση που εκφράζει καλύτερα τη πτωτική τάση των αντοχών είναι η εκθετική με βάση τη νεπέρεια σταθερά (e) και η αντοχή εξαρτάται αποκλειστικά από το ποσοστό του ιλυολίθου στο δοκίμιο.

- Η συμπεριφορά του δείγματος ως σύμμικτου σταματά σε ποσοστό περιεκτικότητας ιλυολίθου 35% περίπου, και από εκεί και πέρα οι αντοχές πέφτουν στην αντοχή του ασθενέστερου πετρώματος.
- Για χαμηλές περιεκτικότητες (0-22% περίπου) υπήρχε σαφής αποχωρισμός και ψαθυρή θραύση, του συνολικού δοκιμίου, του ψαμμίτη και του ιλυολίθου μαζί. Αντιθέτως για ποσοστά ιλυολίθου από 22 έως 35% περίπου, η αστοχία του ψαμμίτη ήταν υπό μορφή ρωγμάτωσης, δηλαδή υπήρχε συνέχεια της επιφάνειας θραύσης του ιλυολίθου η οποία όμως δεν διαπερνούσε πλήρως το ψαμμιτικό τέμαχος. Στη περίπτωση που ο ιλυόλιθος ξεπερνούσε το 35%, η συμμετοχή του ψαμμίτη στη διαδικασία της θραύσης ήταν μηδαμινή και εκφραζόταν συνήθως με μια μικρή αποφλοίωση.
- Η διαδικασία της θραύσης πιστεύεται ότι προκαλείται από την εισαγωγή αντίρροπων ακτινικών τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Εάν γίνει θεώρηση μη ολίσθησης στις διεπιφάνειες, με κοινή την αξονική τάση, στο ασθενέστερο δοκίμιο προκαλείται μεγαλύτερη παραμόρφωση λόγω χαμηλότερης ακαμψίας. Η μεγαλύτερη αξονική παραμόρφωση μεταφράζεται σε μια μεγαλύτερη πλευρική παραμόρφωση με θεώρηση σταθερού του λόγου Poisson. Συνεπώς στη διεπιφάνεια το μεν ασθενέστερο υλικό τείνει να προκαλεί εφελκυσμό στο ισχυρότερο και το ισχυρότερο περίσφιξη στο ασθενέστερο. Στην περίπτωση των υψηλών ποσοστών ιλυολίθου (μεγαλύτερο από 35%), το τμήμα του ιλυολίθου μεγαλώνει τόσο ώστε να μην υπάρχει ιδιαίτερη επιρροή των εδρών και να προκαλείται θραύση στο κεντρικό τμήμα του τεμάχους. Το φαινόμενο εντείνεται ακόμα περισσότερο εάν το ασθενέστερο υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο Poisson.
- Συγκρίνοντας την παραπάνω κατανομή με τα αποτελέσματα των *Zainab M. et al (2007)* παρατηρείται παρόμοια εκθετική πτώση της αντοχής, αλλά πολύ πιο απότομη. Οι παραπάνω συγγραφείς προτείνουν πτώση στη τιμή του ιλυολίθου από μόλις το 10% της περιεκτικότητας σε σύγκριση με τη παρούσα εργασία που το ποσοστό αυτό φτάνει στο 35%.
- Συγκρίνοντας τέλος τα εργαστηριακά μας αποτελέσματα με τις συστάσεις του *Marinos V. (2007)* για τη χρήση του πίνακα GSI ετερογενών βραχομαζών, παρατηρείται υπερεκτίμηση της αντοχής ιδιαίτερα για χαμηλά ποσοστά ιλυολίθου στη βραχόμαζα.

Διερεύνηση μέτρου ελαστικότητας Young

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της μέτρου ελαστικότητας Young προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προτείνεται η παρακάτω κατανομή του E_i:

Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 25%:

$$E_t = 45,339 \cdot e^{-0,041\, pct_{siltstone}} \quad , \; r^2 = 0,815$$

Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 25%:

$$E_t = E_t^{siltstone} = 17,00 GPa$$

Και σε σχέση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη:

$$E_t = 4,729 \cdot e^{0,0237 \cdot \sigma_{ci}}$$

Παρ' όλ' αυτά εδώ τίθενται κάποιες αμφιβολίες περί της σωστής εργαστηριακής μεθόδου μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας για το συγκεκριμένο τύπο δοκιμών. Η συσκευή μέτρησης της μετακίνησης (L.V.D.T) τοποθετείται σε συγκεκριμένο μήκος επάνω στο δοκίμιο, συνεπώς, όσο αυξάνεται το ποσοστό του ιλυολίθου, τόσο το σταθερό τμήμα που μετρά το L.V.D.T. αποτελείται περισσότερο από ιλυόλιθο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πολύ γρήγορη πτώση του μέτρου ελαστικότητας στη τιμή του ιλυολίθου.

Αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ετερογενούς βραχόμαζας στην κατασκευή υπογείων έργων.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τη σύγκριση των συγκλίσεων ανυποστήρικτης κυκλικής σήραγγας για δύο διαφορετικά προσομοιώματα:

1) Σήραγγα που διανοίγεται σε ετερογενές υλικό με εναλλαγές οριζοντίων στρώσεων ψαμμίτη και ιλυολίθου σε διαφορετικά πάχη για την προσομοίωση διαφορετικών ποσοστών ιλυολίθου.
2) Σήραγγα που διανοίγεται μέσα σε «ομοιογενές» γεωυλικό με ιδιότητες που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου, φορτία υπερκειμένων και διαφορετικές τιμές του δείκτη GSI.

Έγινε διερεύνηση του κατάλληλου μέτρου ελαστικότητας που θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τα διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στη βραχομάζα έτσι ώστε να ξεπεραστεί η αδυναμία της εργαστηριακής μεθόδου. Έγιναν δοκιμές για τρείς διαφορετικές κατανομές του μέτρου ελαστικότητας:

Α) Κατανομή Ei όμοια με αυτή του σci όπως προσδιορίστηκε από τις εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τις σχέσεις:

- Για ποσοστό ιλυολίθου 0% έως και 35%: $\sigma_{ci} = 95,315 \cdot e^{(-0,022 \cdot pct_{siltstone})}$
- Για ποσοστό ιλυολίθου που ξεπερνά το 35%: $\sigma_{ci} = \sigma_{ci}^{siltstone} = 43,00$ MPa

Β) Γραμμική κατανομή Ei σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_i = E_i^{sandstone}\left(\frac{pct_{sandstone}}{100}\right) + E_i^{siltstone}\left(\frac{pct_{siltstone}}{100}\right)$$

Γ) Μέση κατανομή Ei σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{total} = \frac{1}{\left(\frac{pct_{sandstone}/100}{E_i^{sandstone}}\right) + \left(\frac{pct_{siltstone}/100}{E_i^{siltstone}}\right)}$$

Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όπως αναμενόταν, και αφού μειώνονται οι παράμετροι αντοχής και ελαστικότητας των υλικών, με την αύξηση του ποσοστού του ιλυολίθου στη συνολική βραχόμαζα, αυξάνονται και οι συγκλίσεις της ανυποστήρικτης σήραγγας.
- Η πρώτη κατανομή δίνει συντηρητικά αποτελέσματα ενώ η δεύτερη επισφαλή.
- Η καλύτερη σύγκλιση προέκυψε για τη μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας όπου οι μέγιστες αποκλίσεις με το ετερογενές μοντέλο, που θεωρείται πιο κοντά στη πραγματικότητα, μόλις που άγγιζαν το 5%. Πολύ καλή εκτίμηση έχουμε επίσης και για μεταβαλλόμενο δείκτη GSI συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου.
- Για τα διαφορετικά υπερκείμενα, παρόλο που υπάρχουν μεγάλες διαφορές τις απόλυτες τιμές των συγκλίσεων, η μορφή της κατανομής συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου δεν μεταβάλλεται.
- Παρατηρούνται διαφορές στη μορφή των βολβών των κατακόρυφων και ιδιαίτερα οριζοντίων μετακινήσεων μεταξύ του ετερογενούς και του ομογενούς μοντέλου, λόγω της ύπαρξης των στρώσεων.
- Από τα διαγράμματα με τις ισοϋψείς των κυρίων τάσεων παρατηρείται ότι υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στον πιο άκαμπτο ψαμμίτη καθώς και επέκταση της ζώνης μηδενισμού της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3.
- Στο ετερογενές προσομοίωμα παρατηρείται ανομοιομορφία της πλαστικής ζώνης γύρω από το υπόγειο άνοιγμα. Φαίνεται μια αύξηση της πλαστικής ζώνης στις στρώσεις του ψαμμίτη πράγμα που εξηγείται από το ότι υπάρχει συγκέντρωση τάσεων σε αυτόν και αποφόρτιση του ασθενέστερου ιλυολίθου.

Τέλος έγινε σύγκριση με κατανομή του μέτρου ελαστικότητας όμοια με την προτεινόμενη κατανομή του σ_{ci} κατά *Marinos V. (2007)*. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και οι αντίστοιχες προτεινόμενες κατανομές των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρήθηκε οι αποκλίσεις του ομοιογενούς

προσομοιώματος κατά *Marinos V. (2007)* συγκριτικά με το ετερογενές μπορούν να φτάσουν στο επίπεδο του 33,5% και 35% για τα φορτία υπερκειμένων 100 και 300m αντίστοιχα. Ακόμα, διαφορές παρατηρήθηκαν για το εύρος των πλαστικών ζωνών για τα ομοιογενή προσοσμοιώματα με τις προτάσεις της παρούσας εργασίας και του *Marinos V. (2007)*, που οφείλονται κυρίως στις διαφορές των κατανομών του σ_{ci}.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ – ΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΜΕΛΕΤΕΣ - ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

1. ASTM D2845-08
Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock

2. ASTM D2938-95
Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens

3. ASTM D3148-96
Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression

4. ASTM D4404-84(2004)
Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry

5. Azadeh Riahi Dehkordi
3D Finite Element Cosserat Continuum Simulation of Layered Geomaterials, PhD Thesis, Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto

6. Deere D.U.,
*Geological considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice,*1974

7. Goodman, R. E.
Engineering Geology - Rock in Engineering Construction, UK, John Wiley & Sons, Inc. 1993

8. Harrison J.P. and Hudson J.A.
Engineering rock mechanics: An introduction to the principles, London, Pergamon, 2000.

9. Hoek E.,
Practical rock engineering, http://www.rocscience.com. p 342, 2007

10. Hoek E. and Brown, E.T.
Underground Excavations in Rock , London, Instn Min. Metall., 1980.

11. Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F.
Support of underground excavations in hard rock . Rotterdam, Balkema, 1995.

12. ISRM
ISRM Suggested Methods - Rock Characterization Testing & Monitoring, Oxford: Pergamon Press, 1981

13. Jaeger J.C. and Cook N.G.W.
Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman and Hall, 1976

14. Stagg K. G. and Zienkiewicz O. C.
Rock Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York, 1968

15. Γενική Μελετών ΕΠΕ – ISTRIA
Οριστική Γεωλογική Μελέτη Σήραγγας Καλυδώνας, 2008

16. Γενική Μελετών ΕΠΕ – ISTRIA
Γεωτεχνική Έκθεση και Αξιολόγιση στη Θέση της Σήραγγας Καλυδώνας, 2008

17. Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.,
Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2002

18. Μαρινος Β.,
*Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων,*Διδακτορική διατριβή σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέα Γεωτεχνικής, Αθήνα, 2007

19. Σαρόγλου Χ.,
Γεωλογικοί παράγοντες που επιρρεάζουν τις γεωτεχνικές ιδιότητες του βράχου, Διδακτορική διατριβή σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέα Γεωτεχνικής, Αθήνα, 2007

20. Σοφιανός Α. Ι., Νομικός Π. Π.,
Μηχανική πετρωμάτων, Σημειώσεις ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έγων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008

21. Τζιάλλας Γ. Π.
Διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του άρρηκτου πετρώματος με εργαστηριακές μεθόδους, Διπλωματική εργασία της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέα Γεωτεχνικής, Αθήνα, 2007

22. Τσιαμπάος Γ. Κ.,
Μέθοδοι διερεύνησης του υπεδάφους, Σημειώσεις ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έγων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007

23. Υπουργείο Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Ερευνών Εδαφών
Προδιαγραφές επί τόπου δοκιμών βραχομηχανικής (Ε102-84) και εργαστηριακών δοκιμών βραχομηχανικής (Ε103-84), 1985

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Bieniawski Z.T. (1976), *Rock mass classification in rock engineering*. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (Edited by Bieniawski Z.T.) 1, 97-106. Cape Town, Balkema, 1976.

2. Brown E.T. (1970). *Strength of models of rock with intermittent joints*. J. Soil Mech. Foundn Div., ASCE 96, SM6, 1935-1949.

3. Brown E.T., Richards L.R., Barr M.V.. *Shear strength characteristics of Delabole slates*. In: Proceedings of the conference rock engineering, Newcastle upon Tyne, p. 33–51, 1977

4. Duffaut P. (1980). *Structural weaknesses in rocks and rock masses. Tentative classification and behaviour.* Weak rock: soft, fractured and weathered rock. Proc. symposium, Tokyo, September 1981. Volume 1 , pp. 93-97

5. Greco O. D. (1994). *Behaviour of composite rock specimens under uniaxail compressive tests.* International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 32(2), A76.

6. Hawkes I., Mellor M. *Uniaxial testing in rock mechanics laboratories*, Eng Geol (Amsterdam), Vol. 4, pp179-285, 1970.

7. Heard, H.C., *Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure*, InRock Deformation (eds. Griggs, D., and Handin, J.) (Geol. Soc. Am. Memoir79) pp. 193–226, 1960.

8. Hendron A.J. (1978). *Engineering of rock blasting on civil projects : Structural and Geotechnical Mechanics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977), P242–277*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 15, Issue 3, Page 66

9. Hoek E. (1968). *Brittle failure of rock, Rock Mechanics in Engineering Practice*. (eds K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), 99-124. London: Wiley.
10. Hoek E. (1983). *Strength of jointed rock masses*, 23rd. Rankine Lecture. *Geotechnique* 33 (3), 187-223.

11. Hoek E. and Brown E.T. (1998). *The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update*. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.C. Curran), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.

12. Hoek E. and Brown E.T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. Intnl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. **34** (8), 1165-1186.

13. Hoek E. and Brown E.T.. *Empirical strength criterion for rock masses*. J. Geotech. Engng Div., ASCE **106** (GT9), 1013-1035, 1980.

14. Hoek E. and Marinos P (2007). *A brief history of the development of the Hoek – Brown failure criterion*, Soils and rocks, No.2

15. Hoek E. and Marinos P. (2000). *Predicting Tunnel Squeezing*. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 – November 2000, Part 2 – December, 2000

16. Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada, vol. 1, p. 267–73.

17. Hoek E., Diederichs M.S. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 43, Issue 2, Pages 203-215.

18. Hoek E., Marinos P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Part 1: estimating rock mass strength and Part 2: potential squeezing problems in deep tunnels*. Tunnels and Tunnelling International.

19. Hoek E., Marinos P. and Benissi M. (1998). *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses*. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg. Geol. Env. **57**(2), 151-160.

20. Hoek E., Marinos P.G., Marinos V.P. (2005). *Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 42, Issue 2, Pages 277-285

21. Hoek E., Wood D. and Shah S. (1992). *A modified HoekBrown criterion for jointed rock masses*. Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92 , (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit. Geotech. Soc.

22. Hoek E. (2001). *Big tunnels in bad rock*, J. Geotech. Geoenviron. Eng. (ASCE) 127: 726-740

23. Lee J. S., Pande G. N., and Kralj, B. (1998) *A comparative study on the approximate analysis of masonry structures*. Journal of Materials and Structures, 31, 473-479.

24. Liang W., Yang C., Zhao Y., Dusseault M.B. and Liu J., (2007) *Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock*, Int. J. Rock Mech. Sci. Geomech. 44, pp. 400–411.

25. Marinos P and Hoek E. (2000). GSI – *A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne.

26. Marinos P., Koukis G., Sabatakakis N. , Tsiambaos G. (1994), *Laboratory testing aspects of the Athenian schist.* Proceedings of the 7th international congress association of engineering geology, Pages 975-981

27. Marinos P, Marinos V, Hoek E (2007). *Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses*. Romana, Perucho, Olalla (eds) Underground works under special conditions. *Taylor and Francis, Lisbon, pp 13–21*

28. Marinos P. and Hoek E. (2001). *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch,* Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 60, Number 2

29. Marinos P., Hoek E. and Marinos V. (2006). *Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunneling,* Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 65, Number 2

30. Marinos V., Marinos P. and Hoek E. (2005). *The geological strength index: applications and limitations,* Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 64, Number 1

31. Zainab M., Kamaruzaman M. and Haryati A. (2007) *Empirical Strength and Stiffness Models for Composite Rock of weathered sandstone and shale components*, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Volume 12

32. Zainab M., Kamaruzaman M., Cho Gye C., (2007).*Uniaxial Compressive Strength Of Composite Rock Material With Respect To Shale Thickness Ratio And Moisture Content*, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Volume 12

33. Saroglou H., Tsiambaos G. (2008). *A modified Hoek–Brown failure criterion for anisotropic intact rock*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 45, Issue 2, Pages 223-234

34. Vlasov A. N., and Merzlyakov V. P. (2004) *Analysis of test results of composite specimens modeling rock.* Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 41(6), 191-199.

35. Weng M. C., Jeng F. S., Huang T. H., and Lin M. L. (2005) *Characterizing the deformation behaviour of Tertiary sandstones*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 42, 388-401.

36. Yasar E., Erdogan Y. (2004), *Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 41, Issue 5, Pages 871-875, July 2004.

37. Κουκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., Τσιαμπάος Γ., Μπουρούνης Χ. (2001), *Συσχετίσεις φυσικών και μηχανικών παραμέτρων στον Ελλαδικό χώρο*, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τομ. XXXIV/5, 1689-1695, Πρακτικά 9^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου

38. Σαμπατακάκης Ν., Τσιαμπάος Γ., Γεροχριστοδιούλου Δ., (2004), *Εκτίμηση φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του βραχώδους υλικού, Δελτίο Κ.Ε.Δ.Ε.*

39. Σαμπατακάκης Ν., Τσιαμπάος Γ., (1984), Η επίδραση της ανισοτροπίας φυλλιτικού πετρώματος Κεντρικής Μακεδονίας στην αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη. *Δελτίο Κ.Ε.Δ.Ε., 1-2, σελ. 26-33*

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. www.wikipedia.org

2. el.wikipedia.org

3. evinohori.livepage.gr

4. www.geo.auth.gr

5. pangea.gr

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικονα 1.1. Χάρτης Ελλάδος με αναφορά στις περιοχές που συναντάται ο σχηματισμός του φλύσχη 18
Εικονα 1.2. Δοκίμιο Ε7 με ποσοστό ιλυολίθου 10% 19
Εικονα 1.3. Δοκίμιο Ε2 με ποσοστό ιλυολίθου 35% 19
Εικονα 1.4. Δοκίμιο Ε10 με ποσοστό ιλυολίθου 47% 19
Εικονα 1.5. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Phase2 για ομοιογενές υλικό με ποσοστό ιλυολίθου 30% 21
Εικονα 1.6. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Phase2 για ετερογενές υλικό σε οριζόντιες στρώσεις με ποσοστό ιλυολίθου 30% 21
Εικονα 1.7. Διαδικασία σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων 23
Εικονα 1.8. Σχέσεις μεταξύ των εννοιών ασυνέχεια, ετερογένεια, ανισοτροπία και μη-ελαστικότητα. 27
Εικονα 1.9. Ετερογένεια ιζηματογενών σχηματισμών (επανασχεδιασμός από Duffault P. (1981)) 34
Εικονα 1.10. Φυσικά ετερογενή δείγματα ορυκτού άλατος από τη δουλειά των Liang et al. (2007) 35
Εικονα 2.1. Αρχαίο θέατρο Καλυδώνας 40
Εικονα 2.2. Θολωτός τάφος νότια των τειχών της αρχαίας Καλυδώνας 40
Εικονα 2.3. Μωσαικό οικίας στην αρχαία Καλυδώνα 40
Εικονα 2.4. Ηρώον Λέοντος στην αρχαία πόλη της Καλυδώνας 40
Εικονα 2.5. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ (ΦΥΛΛΟ ΕΥΗΝΟΧΩΡΙ), κλίμακας 1:50.000 42
Εικονα 2.6. Στρωματογραφική στήλη και γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (1991) για την περιοχή της σήραγγας Καλυδώνας (κλ.1:50.000) 44
Εικονα 2.7. Απόσπασμα τοπογραφικού χάρτη ΓΥΣ (ΦΥΛΛΟ ΕΥΗΝΟΧΩΡΙ), κλίμακας 1:50.000 45
Εικονα 2.8. Δορυφορικός χάρτης της περιοχής της σήραγγας Καλυδώνας (εφαρμογή Google Earth) 46
Εικονα 2.9. Μετάβαση από τον υπερκείμενο ψαμμίτη στον σχηματισμό του ιλυολίθου σε πρανή κοντά στον οικισμό Ξυραίικα, ΒΑ του όρους Αράκινθος 48
Εικονα 2.10. Άποψη των ανατολικών στομίων της σήραγγας Καλυδώνας 48
Εικονα 2.11. Άποψη των ανατολικών στομίων της σήραγγας Καλυδώνας 48

Εικονα 2.12. Μετάβαση από τον αποσαθρωμένο, επιφανειακό, καστανό, ψαμμίτη στον υγιή τεφρό 49
Εικονα 2.13. Μεταλλότυπος για τη σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας 49
Εικονα 2.14. Αποθεσιοθάλοαμος παραπλεύρως του μετώπου της σήραγγας 49
Εικονα 2.15. Υλικά εκσκαφής της σήραγγας Καλυδώνας 49
Εικονα 2.16. Ιλυόλιθος με λεπτές και πυκνές εντρώσεις ψαμμίτη 50
Εικονα 2.17. Τεμάχη ιλυολίθου με ενστρώσεις ψαμμίτη και τεμάχη ψαμμίτη από τα υλικά εκσκαφής της σήραγγας 50
Εικονα 2.18. Τέμαχος ψαμμίτη όπως μεταφέρθηκε από το εργοτάξιο της σήραγγας Καλυδώνας προς επεξεργασία 51
Εικονα 2.19. Τέμαχος άρρηκτου ψαμμίτη και δοκίμια μετά από διάτρηση και κοπή 52
Εικονα 2.20. Αλλαγή της μορφής του υλικού στις παρειές των τεμαχών ψαμμίτη ... 52
Εικονα 2.21. Τέμαχος ιλυολίθου με τις οπές διάτρησης 53
Εικονα 2.22. Δοκίμιο ιλυολίθου από γεώτρηση 53
Εικονα 3.1. Ομογενή και τεχνητά ετερογενή δοκίμια με διάφορα ποσοστά συμμετοχής των δύο υλικών 56
Εικονα 3.2. Προσομοίωση του φλύσχη με το εργαστηριακό σύνθετο δοκίμιο για ποσοστό ιλυολίθου 30% 56
Εικονα 3.3. Εργαστηριακή καροταρία με δειγματολήπτη μονού τοιχώματος επί τω έργω 82
Εικονα 3.4. Συσκευή κοπής-λείανσης 83
Εικονα 3.5. Χειροκίνητη μηχανή φόρτισης Soiltest INC, CT710 83
Εικονα 3.6. Συσκευή μέτρησης ταχύτητας υπέρηχων κυμάτων 84
Εικονα 3.7. Μηχανή φορτίσεως (πρέσα) MaTest Servo – Tronic C041 84
Εικονα 3.8. Ηλεκτρονικό μηκινσιόμετρο (L.V.D.T.) με Data Logger και ενισχυτή ψηφιακού σήματος 85
Εικονα 3.9. Κάμερα υψηλής ταχύτητας TroubleShooter LE 86
Εικονα 3.10. Προβολέας 2000W 86
Εικονα 3.11. Κοπτική κεφαλή των δειγματολοιπτών με αδαμαντοκονία 88
Εικονα 3.12. Δειγματολήπτες μονού τοιχώματος για την εργαστηριακή καροταρία, διαμέτρου 63mm και 52mm αντίστοιχα 88
Εικονα 3.13. Μέρος από τους πυρήνες και τα τεμάχη ψαμμίτη ου χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας 89
Εικονα 3.14. Πυρήνες πετρώματος όπως προέκυψαν από τη διάτρηση 90
Εικονα 3.15. Αδαμαντοτροχός κοπής βραχωδών δοκιμίων 90
Εικονα 3.16. Βάση τοποθέτησης κυλινδρικού δοκιμίου στη συσκευή κοπής - λείανσης 90

Εικονα 3.17. Μήτρα για την κοπή δοκιμίων μικρού ύψους, τοποθετημένη στη συσκευή κοπής 92
Εικονα 3.18. Δοκίμιο πετρώματος αμέσως μετά την κοπή με τη χρήση της «μήτρας» 92
Εικονα 3.19. Κοπή δοκιμίου ιλυολίθου μαζί με τη «μήτρα» 92
Εικονα 3.20. Τροχός λείανσης διπλής όψεως 93
Εικονα 3.21. Λείανση δείγματος ιλυολίθου στο εργαστήριο 93
Εικονα 3.22. Δίσκος ιλυολίθου μετά τη λείανση, πάχους μόλις 1,13cm για το δοκίμιο Ε8 93
Εικονα 3.23. Τελική μορφή των διεπιφανειών του ψαμμίτη και του ιλυολίθου στα τεχνητά ετερογενή δοκίμια 93
Εικονα 3.24. Σύνθετα δοκίμια με διαφορετικές αναλογίες ψαμμίτη - ιλυολίθου 94
Εικονα 3.25. Συσκευή Pundit και παλμογράφος 97
Εικονα 3.26. Δοκίμιο με πομπο και δέκτη στην χειροκίνητη πρέσα 97
Εικονα 3.27. Το L.V.D.T. τοποθετημένο σε δοκίμιο 99
Εικονα 3.28. Το Data Logger, ο υπολογιστής και το πρόγραμμα καταγραφής των μετακινήσεων επί τω έργω 99
Εικονα 3.29. Διάταξη δοκιμής με την πρέσα, το L.V.D.T., την κάμερα και τον προβολέα 100
Εικονα 3.30. Στιγμιότυπα θραύσης σύνθετου δοκιμίου 102
Εικονα 4.1. Δοκίμιο Ε15 με τρείς στρώσεις ψαμμίτη και δύο ενδιάμεσς στρώσεις ιλυολίθου 104
Εικονα 4.2. Δοκίμιο Ε8 με ποσοστό ιλυολίθου 10,39% 127
Εικονα 4.3. Δοκίμιο Ε7 με ποσοστό ιλυολίθου 9,79% 127
Εικονα 4.4. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Ε12 με ποσοστό ιλυολίθου 23,24% 128
Εικονα 4.5. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου Ε13 με ποσοστό ιλυολίθου 24,40% 128
Εικονα 4.6. Θραύση σύνθετου δοκιμίου Ε10 με ποσοστό ιλυολίθου 46,8%. Παρατηρείται πλήρως διαμορφωμένη επιφάνεια θραύσης στο τέμαχος του ιλυολίθου ενώ το άνω τμήμα του ψαμμίτη απλά υπέστη αποφλοίωση 129
Εικονα 4.7. Επιρροή πλακών φόρτισης κατά τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης 130
Εικονα 4.8. Κατανομή των τάσεων στο σύνθετο δοκίμιο 131
Εικονα 4.9. Μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου 143
Εικονα 5.1. Γεωμετρία του συνολικού προσομοιώματος και της σήραγγας 149
Εικονα 5.2. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής σήραγγας ομοιογενούς προσομοιώματος 166

Εικονα 5.3. Παραμόρφωση κυκλικής διατομής σήραγγας ετερογενούς προσομοιώματος για ποσοστό ιλυολίθου 50% 166

Εικονα 5.4. Ανάλυση Α1 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Κατακόρυφες μετακινήσεις..... 167

Εικονα 5.5. Ανάλυση Α2 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Κατακόρυφες μετακινήσεις..... 167

Εικονα 5.6. Ανάλυση Α1 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Οριζόντιες μετακινήσεις..... 167

Εικονα 5.7. Ανάλυση Α2 για 30% ιλυολίθου και υπερκείμενο 100m – Οριζόντιες μετακινήσεις..... 168

Εικονα 5.8. Στροφή του τασικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλικής διατομής.. 169

Εικονα 5.9. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ομοιογενές προσομοίωμα Α2 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 169

Εικονα 5.10. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 169

Εικονα 5.11. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 170

Εικονα 5.12. Μέγιστες κύριες τάσεις σ1 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 70% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 170

Εικονα 5.13. Ελάχιστες κύριες τάσεις σ3 για το ομοιογενές προσομοίωμα Α2 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 171

Εικονα 5.14. Ελάχιστες κύριες τάσεις σ3 για το ετερογενές προσομοίωμα Α1 με περιεκτικότητα 30% ιλυολίθου και 300m υπερκείμενο..... 171

Εικονα 5.15. Πλαστική ζώνη στο ομοιογενές προσομοίωμα (Αναλύσεις Α2, 70% ιλυόλιθος) 171

Εικονα 5.16. Πλαστική ζώνη στο ετερογενές προσομοίωμα (Αναλύσεις Α1, 70% ιλυόλιθος) 171

Εικονα 5.17. Αναλύσεις Α1 για ποσοστό ιλυολίθου 30% και υπερκείμενο 300m .. 172

Εικονα 5.18. Αναλύσεις Α1 για ποσοστό ιλυολίθου 50% και υπερκείμενο 300m .. 172

Εικονα 5.19. Αναλύσεις Α1 για ποσοστό ιλυολίθου 70% και υπερκείμενο 300m .. 172

Εικονα 5.20. Αναλύσεις Α1 για ποσοστό ιλυολίθου 90% και υπερκείμενο 300m .. 172

Εικονα 5.21. Δοκίμιο με οριζόντιες ασυνέχειες συχνότητας λ..... 174

Εικονα 5.22. Δοκίμιο πετρώματος με ασυνέχεια πάχους t_f 175

Εικονα 5.23. Σύγκριση συνολικών μετατοπίσεων για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου για τις αναλύσεις Α1 και Α4 182

Εικονα 5.24. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων Β4 (ομοιογενές προσομοίωμα με μέση κατανομή E_i από τη παρούσα εργασία)..... 197

Εικονα 5.25. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων C1 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i από τη βιβλιογραφία) 197

Εικονα 5.26. Πλαστική ζώνη για ποσοστό ιλυολίθου 80% αναλύσεων C1 (ετερογενές προσομοίωμα)..... 197

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Προτεινόμενες τιμές της παραμέτρου mi (Marinos & Hoek, 2000) 29

Πίνακας 1.2. Προτεινόμενες αναλογίες των παραμέτρων σ_{ci} και m_i για κάθε κατηγορία GSI ετερογενούς βραχόμαζας κατά Marinos V. (2007). 33

Πίνακας 3.1. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση συνολική αξονική παραμόρφωση λίγο πριν τη θραύση κατά Heard (1960) 75

Πίνακας 4.1. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων ψαμμίτη 105

Πίνακας 4.2. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά δοκιμίων ιλυολίθου 105

Πίνακας 4.3. Γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά σύνθετων δοκιμίων 107

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα δοκίμια ψαμμίτη 109

Πίνακας 4.5. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων δοκιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων για τον ψαμμίτη 110

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα δοκίμια ιλυολίθου 111

Πίνακας 4.7. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων δοκιμής ταχύτητας διάδοσης υπερήχων για τον ιλυόλιθο 111

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού ταχύτητας διάδοσης υπερήχων στα σύνθετα δοκίμια 113

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας Young σε δοκίμια ψαμμίτη 115

Πίνακας 4.10. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων μονοαξονικής θλίψης και μέτρου ελαστικότητας ψαμμίτη 115

Πίνακας 4.11. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young σε δοκίμια ιλυολίθου 116

Πίνακας 4.12. Στατιστική επεξεργασία δεδομένων μονοαξονικής θλίψης και μέτρου ελαστικότητας ιλυολίθου 116

Πίνακας 4.13. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young σε σύνθετα δοκίμια 118

Πίνακας 4.14. Σχέσεις βιβλιογραφίας για τη συσχέτιση επίμηκων και διατμητικών κυμάτων με τη ξηρή πυκνότητα 119

Πίνακας 4.15. Αντιστοίχιση των ποσοστών συμμετοχής των δύο υλικών στο δοκίμιο στις κατηγορίες GSI για τον φλύσχη 134

Πίνακας 4.16. Προτεινόμενες τιμές σ_{ci} ανάλογα με το ποσοστό του ιλυολίθου στα ετερογενή δοκίμια 135

Πίνακας 5.1. Πάχη στρώσεων και απεικόνιση του ετερογενούς προσομοιώματος για διαφορετικά ποσοστά ιλυολίθου 153

Πίνακας 5.2. Κωδικοποίηση και περιγραφή των σειρών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας 156

Πίνακας 5.3. Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις Α1 158

Πίνακας 5.4. Τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει του ποσοστού ιλυολίθου 158

Πίνακας 5.5. Κατανομή μέτρου ελαστικότητας όμοια με αυτή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη 159

Πίνακας 5.6. Γραμμική κατανομή μέτρου ελαστικότητας 160

Πίνακας 5.7. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α2 161

Πίνακας 5.8. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α3 161

Πίνακας 5.9. Αποτελέσματα αναλύσεων Α1 (ετερογενές προσομοίωμα), Α2 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i) και Α3 (ομοιογενές προσομοίωμα με γραμμική κατανομή E_i) για υπερκείμενο 100m 162

Πίνακας 5.10. Αποτελέσματα αναλύσεων Α1 (ετερογενές προσομοίωμα), Α2 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i) και Α3 (ομοιογενές προσομοίωμα με γραμμική κατανομή E_i) για υπερκείμενο 300m 163

Πίνακας 5.11. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενών προσομοιωμάτων συγκριτικά με το ετερογενές για υπερκείμενο 100m 164

Πίνακας 5.12. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενών προσομοιωμάτων συγκριτικά με το ετερογενές για υπερκείμενο 300m 165

Πίνακας 5.13. Μέση κατανομή του μέτρου ελαστικότητας Ei 177

Πίνακας 5.14. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Α4 177

Πίνακας 5.15. Αποτελέσματα αναλύσεων Α4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενα 100m και 300m 178

Πίνακας 5.16. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενούς προσομοιώματος Α4 συγκριτικά με το ετερογενές Α1 για υπερκείμενο 100m και 300m 180

Πίνακας 5.17. Αντιστοίχιση των ποσοστών συμμετοχής των δύο υλικών στο δοκίμιο στις κατηγορίες GSI για τον φλύσχη 183

Πίνακας 5.18. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Β1 184

Πίνακας 5.19. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις Β4 185

Πίνακας 5.20. Αποτελέσματα αναλύσεων B1 (ετερογενές προσομοίωμα) και B4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενο 100m 186

Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα αναλύσεων B1 (ετερογενές προσομοίωμα) και B4 (ομοιογενές προσομοίωμα με «μέση» κατανομή E_i) για υπερκείμενο 300m 187

Πίνακας 5.22. Διαφορές μεταξύ των ομοιογενούς προσομοιώματος B4 συγκριτικά με το ετερογενές B1 για υπερκείμενο 100m και 300m 188

Πίνακας 5.23. Υπολογισμός Ei σύμφωνα με τις συστάσεις της βιβλιογραφίας 191

Πίνακας 5.24. Γεωτεχνικές παράμετροι του υλικού για τις αναλύσεις C1 192

Πίνακας 5.25. Αποτελέσματα αναλύσεων C1 (ομοιογενές προσομοίωμα με όμοια κατανομή σ_{ci} και E_i από τη βιβλιογραφία) για υπερκείμενο 100m και 300m 193

Πίνακας 5.26. Διαφορές μεταξύ του ομοιογενούς προσομοιώματος C1 συγκριτικά με το ετερογενές B1 για υπερκείμενο 100m και 300m 195

Πίνακας 5.27. Αποτελέσματα εύρους πλαστικής ζώνης αναλύσεων B4 και C1 198

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1. Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχόμαζες κατά Marinos and Hoek (2002) 32

Διάγραμμα 1.2. Διάγραμμα GSI για ετερογενείς βραχόμαζες κατά Marinos V. (2007) 33

Διάγραμμα 1.3. Εργαστηριακά αποτελέσματα των Zainab M. et al. (2007) 36

Διάγραμμα 3.1. Επιρροή του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά Hoek & Brown (1980). 71

Διάγραμμα 3.2. Ανισοτροπία αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για τον γνεύσιο του Ελλαδικού χώρου σύμφωνα με Sarogloy & Tsiambaos (2008) 72

Διάγραμμα 3.3. Επιρροή της διεύθυνσης φόρτισης σε τριαξονικές δοκιμές σε σχιστόλιθο, σύμφωνα με Brown et al. (1977) 72

Διάγραμμα 3.4. Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τα ιδανικά ελαστικά υλικά α) Γραμμικά ελαστικό, β)Τελείως ελαστικό, γ) Ελαστικό με υστέρηση 74

Διάγραμμα 3.5. Τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για βραχώδες υλικό 76

Διάγραμμα 3.6. Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) 78

Διάγραμμα 3.7. Μέσο μέτρο ελαστικότητας (E_{av}) 79

Διάγραμμα 3.8. Χορδικό μέτρο ελαστικότητας (Es) 79

Διάγραμμα 3.9. Καμπύλη χρόνου-μετακίνησης δοκιμίου Ε9 101

Διάγραμμα 3.10. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου Ε9 101

Διάγραμμα 4.1. Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων 120

Διάγραμμα 4.2. Συσχέτιση ταχύτητας διάδοσης επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο 121

Διάγραμμα 4.3. Συσχέτιση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο 122

Διάγραμμα 4.4. Συσχέτιση δυναμικού μέτρου διάτμησης με το ποσοστό ιλυολίθου στο δοκίμιο 122

Διάγραμμα 4.5. Συσχέτιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με το ποσοστό ιλυολίθου του δοκιμίου 124

Διάγραμμα 4.6. Σύγκριση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις προβλεπόμενες τιμές από τις προτεινόμενες σχέσεις 125

Διάγραμμα 4.7. Σύγκριση δεδομένων παρούσας εργασίας με τα εργαστηριακά αποτελέσματα των Zainab M. et al. (2008) 133

Διάγραμμα 4.8. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων παρούσας εργασίας με συστάσεις χρήσης του πίνακα GSi για τον φλύσχη από τη βιβλιογραφία. 136

Διάγραμμα 4.9. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία (Marinos V. (2007)) για το σ_{cm} συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου για διαφορετικές τιμές του GSi. 137

Διάγραμμα 4.10. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία για το σ_{cm} συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου με τη τιμή του δείκτη GSI να μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό 138

Διάγραμμα 4.11. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τις προτεινόμενες τιμές από τι βιβλιογραφία για το σ_{cm} συναρτήσει του δείκτη GSi για διάφορα ποσοστά ιλυολίθου.. 139

Διάγραμμα 4.12. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με το ποσοστό ιλυολίθού στο δοκίμιο 140

Διάγραμμα 4.13. Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας Young με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 141

Διάγραμμα 5.1. Συγκριτικό διάγραμμα απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας Ει συναρτήσει του ποσοστού του ιλυολίθου για τις δύο κατανομές των αναλύσεων Α2 και Α3 160

Διάγραμμα 5.2. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2 και Α3 για φορτίο υπερκειμένων 100m 162

Διάγραμμα 5.3. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2 και Α3 για φορτίο υπερκειμένων 300m 163

Διάγραμμα 5.4. Συγκριτική απεικόνιση της μέσης κατανομής του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει στο ποσοστού του ιλυολίθου 176

Διάγραμμα 5.5. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2, Α3 και Α4 για φορτίο υπερκειμένων 100m 178

Διάγραμμα 5.6. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων Α1, Α2, Α3 και Α4 για φορτίο υπερκειμένων 300m 179

Διάγραμμα 5.7. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων Α1 και Α4 για υπερκείμενο 100m 180

Διάγραμμα 5.8. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων Α1 και Α4 για υπερκείμενο 300m 180

Διάγραμμα 5.9. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1 και B4 για φορτίο υπερκειμένων 100m 186

Διάγραμμα 5.10. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1 και B4 για φορτίο υπερκειμένων 300m 187

Διάγραμμα 5.11. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1 και B4 για υπερκείμενο 100m 188

Διάγραμμα 5.12. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1 και B4 για υπερκείμενο 300m 188

Διάγραμμα 5.13. Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων παρούσας εργασίας με συστάσεις χρήσης του πίνακα GSI για τον φλύσχη από τη βιβλιογραφία. 190

Διάγραμμα 5.14. Σύγκριση κατανομής του μέτρου ελαστικότητας E_i ομοίως με το σ_{ci} που προτείνεται από τη βιβλιογραφία με τη «μέση» κατανομή που προτείνεται στη παρούσα εργασία. 191

Διάγραμμα 5.15. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1, B4 και C1 για φορτίο υπερκειμένων 100m 193

Διάγραμμα 5.16. Συγκριτικό διάγραμμα των αναλύσεων B1, B4 και C1 για φορτίο υπερκειμένων 300m 194

Διάγραμμα 5.17. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1, B2 και C1 για υπερκείμενο 100m 195

Διάγραμμα 5.18. Συγκριτικό διάγραμμα αναλύσεων B1, B4 και C1 για υπερκείμενο 300m 195

Διάγραμμα 5.19. Συγκριτικό διάγραμμα εύρους πλαστικής ζώνης 198

Παραρτημα

Α

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Σύμφωνα με

- Ε 103-84, Υπουργείο Δημοσίων Εργων, Διεύθυνση Ερευνών Εδαφών (ΕΚ1), Φ.Ε.Κ. υπ' αρ. 70/8-2-1985, Τεύχος Δεύτερο
- ASTM (American Society for Testing and Materials) Standards
- ISRM (International Society of Rock Mechanics) Standards

ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας δειγμάτων πετρώματος με τη χρήση μικρομέτρου και συσκευής κενού

ΒΡΑΧ. Ε 103-84 παρ. 2 ΥΠΕΧΩΔΕ

ASTM D4404-84

ISRM, 1981

Σκοπός:

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η πυκνότητα και το πορώδες δοκιμίων πετρώματος κανονικού γεωμετρικού σχήματος.

Εργαστηριακός εξοπλισμός:

α) Ένας φούρνος ικανός να διατηρεί σταθερή ,θερμοκρασία $105^o \pm 3^o$ C για περίοδο τουλάχιστον 24 ωρών.

β) Ένας κλίβανος ξηράνσεως για την διατήρηση των δοκιμίων κατά την ψύξη.

γ) Ένα μικρόμετρο με ακρίβεια αναγνώσεως 0,1mm.

δ) Μία συσκευή δημιουργίας κενού της τάξεως των 800 Pa.

ε) Ένας ζυγός επαρκούς ικανότητας για τη ζύγιση των δοκιμίων με ακρίβεια 0,01 % του βάρους τους.

Εκτέλεση δοκιμής:

Από ένα δείγμα πετρώματος μορφώνονται σε κανονικό γεωμετρικό σχήμα τρία δοκίμια που το καθένα έχει μάζα μεγαλύτερη των 50gr. Με το μικρόμετρο μετρούνται οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου, με ακρίβεια, 0,1mm και υπολογίζεται ο όγκος V. Το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή δημιουργίας κενού 800 Pa όπου και παραμένει για 1ώρα βυθισμένο στο νερό για να υποστεί κορεσμό. Η συσκευή ανακινείται περιοδικά για την απελευθέρωση των φυσαλίδων του αέρα.

Μετά την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη συσκευή κενού, η επιφάνειά του σπογγίζεται με υγρό πανί και υπολογίζεται η μάζα του M_{sat}. Τοποθετείται το δοκίμιο στο φούρνο σε θερμοκρασία 105° C μέχρι σταθερής μάζας, αφήνεται να ψυχθεί για 30 min στον κλίβανο ξηράνσεως και υπολογίζεται η μάζα του M_s.

Υπολογισμοί:

Όγκος πόρων: $$V_u = \frac{M_{sat} - M_s}{P_w}$$

Πορώδες: $$n = \frac{V_u}{V} \times 100\%$$

Ξηρά πυκνότητα: $$P_a = \frac{M_s}{V}$$

Υγρά πυκνότητα: $$P_{sat} = \frac{M_s + V_u \cdot P_w}{V}$$

Όπου: P_w είναι η πυκνότητα του νερού

Η πυκνότητα του δείγματος υπολογίζεται από τον μέσο όρο των τιμών για τα τρία δοκίμια σε Kg/m^3 και με ακρίβεια 0,1 Kg/m^3. Το πορώδες του δείγματος υπολογίζεται από τον μέσο όρο των τιμών για τα τρία δοκίμια με ακρίβεια 0,1%.

ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Προσδιορισμός ταχύτητας διάδοσης υπέρηχων κυμάτων στο εργαστήριο

ASTM 597

ASTM D 2845-83

Σκοπός:

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων σε εργαστηριακές δοκιμές μηχανικής πετρωμάτων. Δίνονται τρεις διαφορετικές παραλλαγές της μεθόδου. Αυτές είναι :

- η τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας,
- η τεχνική υπερηχητικών παλμών χαμηλής συχνότητας και η μέθοδος συντονισμού .

Εργαστηριακός εξοπλισμός:

Αν και υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι , ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να επιλέγεται, όσο αυτό είναι δυνατόν, ώστε να είναι εφαρμόσιμος και από τις τρεις μεθόδους. Το ίδιο πέτρωμα ή ακόμη και το ίδιο δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις τρεις μεθόδους. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές μεθόδους. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία πρέπει να έχουν αντίστοιχες σύνθετες ηλεκτρικές αντιστάσεις και να έχουν προστατευμένα (μονωμένα) καλώδια για να εξασφαλίζεται αποδοτική μεταφορά ενέργειας. Για να αποτραπεί η ζημία στο σύστημα δεν πρέπει να υπερβαίνονται οι επιτρεπόμενες ηλεκτρικές τάσεις.

<u>Πρώτη μέθοδος: τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας</u>

(α) Μονάδα δημιουργίας υπερηχητικού παλμού :

- μορφή παλμού: ημιτονοειδής, τετραγωνική , βαθμιδωτή

- πλάτος παλμού : 1-10s
- φάσμα συχνότητας: 100kHz-2 MHz
- συχνότητα επανάληψης: 10-103 επαναλήψεις ανά δευτερόλεπτο
- ηλεκτρική τάση παλμού: συμβατή με το χρησιμοποιούμενο μορφοτροπέα , τόσο υψηλή όσο επιτρέπουν οι μορφοτροπείς
- η γεννήτρια παλμών πρέπει να έχει ένα παλμό σκανδάλης για να προκαλέσει διέγερση σε έναν παλμογράφο (σήμα-σκανδάλης).

(β) Μορφοτροπείς:

- πομπός: μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε μηχανικούς
- δέκτης: μετατρέπει τους μηχανικούς παλμούς σε ηλεκτρικούς
- απόκριση σε διαφορετικές συχνότητες: επίπεδη απόκριση στο εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 2 MHz, εάν είναι δυνατόν.
- οι συνθήκες περιβάλλοντος, όπως θερμοκρασία, υγρασία , κλπ. πρέπει να εξετάζονται κατά την επιλογή του στοιχείου του μορφοτροπέα .
- για τη δημιουργία παλμών συχνότητας 100 kHz-2 MHz συστήνεται η χρήση κεραμικών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (π .χ . οξείδιο βαρίου-τιτανίου, PZT κλπ.) σε μορφή λεπτής πλάκας, δίσκου, ράβδου, δακτυλίου ή σφαίρας.

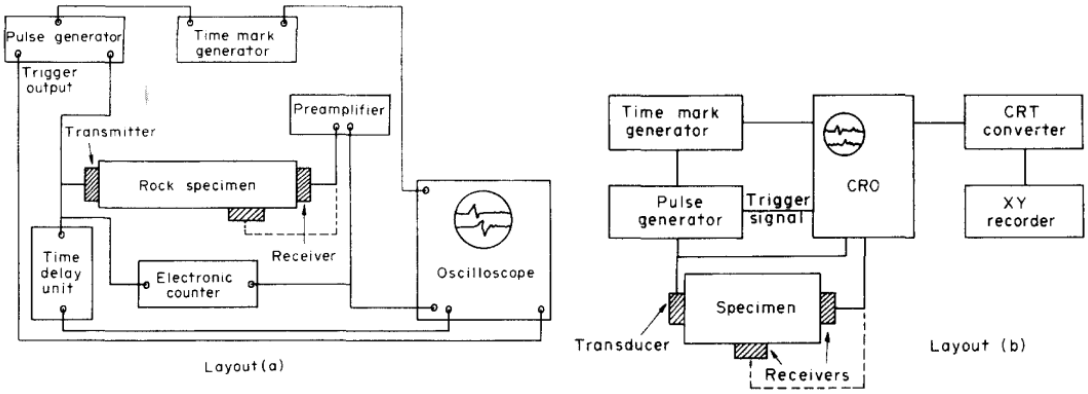
(γ) Ζωνικό ή υψιπερατό φίλτρο κατάλληλο για τις προαναφερθείσες συχνότητες.

(δ) Προενισχυτής μεγάλου εύρους συχνοτήτων και χαμηλού θορύβου.

(ε) Γεννήτρια σήματος χρόνου για τον έλεγχο της επανάληψης του παλμού και για τον καθορισμό των χρόνων στον παλμογράφο.

(στ) Παλμογράφος καθοδικού σωλήνα (CRO).

(ζ) Ηλεκτρονικός απαριθμητής. Δύο πιθανές διατάξεις του ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την πρώτη μέθοδο παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα: Πιθανές διατάξεις του ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την πρώτη μέθοδο

Εκτέλεση δοκιμής:

Ιδιαίτερη προσοχή συστήνεται κατά την προετοιμασία των δοκιμίων (απόληψη των πυρήνων, διαχείριση , λείανση κλπ.) ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές διαταραχές σε αυτό . Η επιφάνεια κάτω από κάθε μορφοτροπέα θα πρέπει να είναι αρκούντως επίπεδη ώστε να είναι δυνατή η καλή επαφή του με το πέτρωμα . Ξήρανση των δοκιμίων πρέπει να γίνεται με κατάλληλες εργαστηριακές συσκευές. Κορεσμένα δείγματα πρέπει να παραμένουν στο νερό μέχρι τη στιγμή της δοκιμής. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων σε αντίστοιχες με τις επί τόπου συνθήκες πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη φροντίδα κατά τη διαδικασία προετοιμασίας. Συστήνεται επίσης τόσο το δείγμα όσο και τα δοκίμια από αυτό να φυλάσσονται με προστασία της υγρασίας τους. Η προετοιμασία των δοκιμίων μπορεί να γίνεται με ξηρές μεθόδους (π.χ. ξηρή διάτρηση, κοπή και λείανση).

<u>Πρώτη μέθοδος: τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας</u>

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των θλιπτικών (διαμήκων, P) και διατμητικών (εγκάρσιων, S) κυμάτων σε δοκίμια πετρώματος με θεωρητικά άπειρη έκταση σε σύγκριση με το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου παλμού . Η συνθήκη άπειρης έκτασης εξασφαλίζεται πρακτικά εάν το μέσο μέγεθος του κόκκου του πετρώματος είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του παλμού, που με τη σειρά του να είναι μικρότερο από τη μικρότερη διάσταση του δοκιμίου.

(α) Κυβικά, κυλινδρικά η ακόμη και σφαιρικά δοκίμια συστήνονται ως κατάλληλα για τη δοκιμή αυτή. Η ελάχιστη πλευρική διάσταση των δοκιμίων (κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του υπερηχητικού παλμού) πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του παλμού (Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 2845 πρέπει να είναι 5 φορές μεγαλύτερη από τη διάσταση των κόκκων). Η απόσταση που διανύει ο παλμός μέσα στο πέτρωμα πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μέσο μέγεθος των κόκκων του πετρώματος.

(β) Ο πομπός πιέζεται στην επιφάνεια ενός επιπέδου κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του παλμού με τάση 10 N/cm^2 περίπου. Η μετάδοση της ενέργειας από τον πομπό στο δοκίμιο μπορεί να βελτιωθεί με:

(i) Λείανση των επιφανειών του δοκιμίου ώστε να είναι ομαλές και επίπεδες

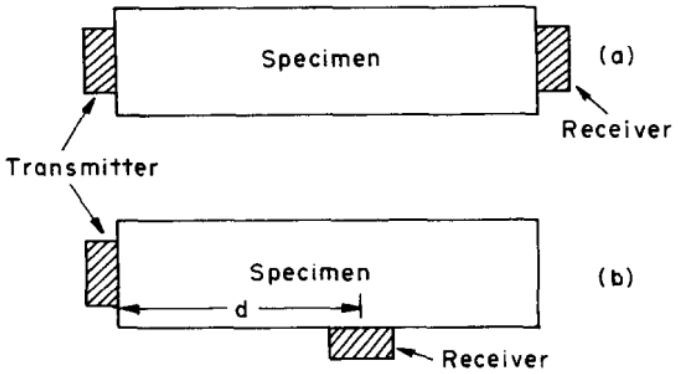
(ii) Παρεμβολή ενός λεπτού στρώματος γράσου , βαζελίνης, γλυκερίνης κλπ. μεταξύ μορφοτροπέων και δοκιμίου.

(iii) Σύζευξη δοκιμίου -μορφοτροπέα με εποξεικό υλικό

(γ) Υπάρχουν δύο δυνατότητες για την τοποθέτηση του δέκτη :

(i) τεχνική μετάδοσης παλμού : ο δέκτης τοποθετείται σε επίπεδο απέναντι από το επίπεδο του πομπού . (Σχήμα 4α). Οι ταχύτητες των διαμήκων P και διατμητικών S κυμάτων *(Vp, Vs)* υπολογίζονται από το χρόνο διάδοσης του παλμού και τη γνωστή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

(ii) τεχνική «σεισμικής» τομογραφίας: Ο δέκτης τοποθετείται στην πλευρά του δοκιμίου (Σχήμα 4β). Μεταβάλλοντας την απόσταση *d* μεταξύ δέκτη και πομπού είναι δυνατόν να ληφθούν καμπύλες του χρόνου διάδοσης με την απόσταση τόσο για τα διαμήκη όσο και για τα διατμητικά κύματα . Οι ταχύτητες υπολογίζονται από αυτές τις καμπύλες. Η μέθοδος αυτή προτείνεται εάν οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι κατάλληλες.



Θέσεις τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη .

(δ) Η αύξηση του τάσης εξόδου της γεννήτριας παλμών, της ενίσχυσης του σήματος από τον προενισχυτή , και της ευαισθησίας του παλμογράφου μέχρι ένα βέλτιστο επίπεδο, δίνουν ένα απότομο μέτωπο παλμού που επιτρέπει την ακριβέστερη μέτρηση των χρόνων. Το βέλτιστο επίπεδο εντοπίζεται στο σημείο που αρχίζει να δημιουργείται μη αποδεκτός θόρυβος από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή ο εν λόγω θόρυβος ενεργοποιεί τον απαριθμητή . Ο θόρυβος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το 1/10 του πλάτους του σήματος που φθάνει στον δέκτη . Η ακρίβεια μέτρησης του χρόνου διάδοσης του παλμού πρέπει να είναι τουλάχιστο 1/100 για τα διαμήκη κύματα και 1/50 για τα διατμητικά, με χρήση κυκλωμάτων καθυστέρησης σε συνδυασμό με τον παλμογράφο ή με τη ρύθμιση του απαριθμητή στην μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια .

(ε) Ο παλμογράφος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κύκλωμα καθυστέρησης για την προβολή του παλμού και της πρώτης άφιξης του και για τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης. Χαρακτηριστικά, το πρώτο σήμα στον παλμογράφο αποτελείται από ένα καμπύλο μεταβατικό τμήμα από τη μηδενική τάση ακολουθούμενο από ένα απότομο και περίπου γραμμικό ίχνος. Η επιλογή του σημείου άφιξης του παλμού γίνεται είτε στην αρχή του καμπύλου μεταβατικού τμήματος είτε στην τομή του γραμμικού τμήματος με το ίχνος της μηδενικής τάσης.

(στ) Ο απαριθμητής διεγείρεται από τον παλμό που εφαρμόζεται στον πομπό και σταματάει από την πρώτη άφιξη του παλμού στον δέκτη . Επειδή για τη διέγερση του απαριθμητή απαιτείται μία μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, αυτός δεν είναι δυνατόν να συλλάβει το πρώτο σήμα του παλμού. Για να είναι λοιπόν ακριβέστερη η μέτρηση του χρονικού διαστήματος, πρέπει να αυξάνεται η ευαισθησία διέγερσης του απαριθμητή σε ένα βέλτιστο επίπεδο χωρίς να προκαλείται διέγερσή του από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

(ζ) Ο προσδιορισμός του μηδενικού χρόνου του κυκλώματος συμπεριλαμβανομένων των μορφοτροπέων πρέπει να προσδιορίζεται και με βάση αυτόν να διορθώνονται οι μετρήσεις. Ο χρόνος αυτός μπορεί να υπολογισθεί με δύο τρόπους, ως εξής:

(1) Τοποθετώντας τους μορφοτροπείς σε επαφή τον ένα με τον άλλο και μετρώντας απευθείας την καθυστέρηση . Η μέθοδος αυτή δεν συστήνεται

για τους μορφοτροπείς των διατμητικών κυμάτων όπου ακόμη και μικρό σφάλμα στην ευθυγράμμισή τους μπορεί να δόση μεγάλα σφάλματα μέτρησης.

(2) Με τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης σε ένα ομοιογενές υλικό με γνωστή την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων με ακρίβεια . Η μέτρηση του χρόνου γίνεται συναρτήσει του μήκους διάδοσης κατασκευάζοντας μία αντίστοιχη καμπύλη . Το αποτεμνόμενο τμήμα στον άξονα του χρόνου δίνει τη διόρθωση που πρέπει να γίνει στους μετρούμενος χρόνους της δοκιμής. (η μέθοδος αυτή συνίσταται για τα διατμητικά κύματα).

(η) Ο παλμός που φθάνει πρώτος είναι ο διαμήκης και συνεπώς ο εντοπισμός του είναι σχετικά εύκολος. Εν τούτοις, η άφιξη του διατμητικού παλμού μπορεί να επισκιάζεται από την αντήχηση των μορφοτροπέων και από ανακλάσεις του διαμήκους κύματος. Το πλάτος του διατμητικού κύματος σε σχέση με το πλάτος του διαμήκους μπορεί να αυξάνεται και ο χρόνος άφιξης να υπολογίζεται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας κατάλληλα στοιχεία , που μπορούν να συλλαμβάνουν και τους δύο παλμούς.

(θ) Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη η άφιξη των διατμητικών κυμάτων είναι συνήθως ευδιάκριτη. Εντούτοις, ο ακριβής προσδιορισμός της πρώτης άφιξης των διατμητικών κυμάτων μπορεί να δυσχεραίνεται από μετατροπές της μορφής του κύματος στις διεπιφάνειες πλάκας φόρτισης-δοκιμίου και στην ελεύθερη επιφάνεια.

(ι) Ευκολότερη διάκριση του χρόνου άφιξης των διατμητικών κυμάτων μπορεί να γίνει με βελτιστοποίηση του μήκους των δοκιμίων, π.χ., μια αναλογία μήκους προς διάμετρο 2:1 είναι συχνά προτιμότερη από αναλογία 1:1.

Υπολογισμοί:

Οι ταχύτητες υπολογίζονται από τους χρόνους διάδοσης και την απόσταση, *d*, μεταξύ του πομπού και του δέκτη , χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$V = \frac{H}{t}$$

όπου: ***H*** το μήκος των δοκιμίων σε m

t ο χρόνος διάδοσης σε sec

Απόκλιση των τιμών αυτών από τις τυπικά αναμενόμενες για συγκεκριμένο βραχώδες υλικό αποτελεί ένδειξη είτε τοπικής ανομοιογένειας είτε ύπαρξης ασυνεχειών (μικρορηγματώσεων).

Από τις ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων που βρίσκουμε, υπολογίζονται οι ελαστικές σταθερές που αποτελούν μία πρώτη εκτίμηση του αρχικού (δυναμικού) εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας του υλικού, του λόγου Poisson, καθώς και του δυναμικού εφαπτομενικού μέτρου διάτμησης. Το μέτρο ελαστικότητας E_D, ο λόγος Poisson v_D και το μέτρο διάτμησης G_D δίνονται από τους τύπους:

$$E_D = \frac{\rho_d Vs^2 (3Vp^2 - 4Vs^2)}{(Vp^2 - Vs^2)}$$

$$v_D = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)}$$

$$G_D = \rho_d Vs^2$$

όπου: $\boldsymbol{\rho_d}$ η πυκνότητα σε KN/m^3

Vρ ταχύτητα επίμηκων κυμάτων σε m/sec

Vs ταχύτητα διατμητικών κυμάτων σε m/sec

$\boldsymbol{E_D}$ το μέτρο ελαστικότητας σε GPa

$\boldsymbol{v_D}$ *ο* λόγος Poisson

$\boldsymbol{G_D}$ το διατμητικό μέτρο ελαστικότητας σε GPa

Αν χρησιμοποιείται η μέθοδος «σεισμικής» τομογραφία ς οι ταχύτητες δίνονται από την κλίση της καμπύλης του διαγράμματος χρόνου διάδοσης-απόστασης.

Δελτίο αποτελεσμάτων:

Η έκθεση πρέπει να περιλάβει τις ακόλουθες πληροφορίες:

(α) Τύπος πετρώματος και προέλευση

(β) Γεωμετρία και διαστάσεις δοκιμίου

(γ) Τρόπος λήψης του δείγματος (π .χ . ανατίναξη σε λατομείο, διάτρηση σε υγιή ή αποσαθρωμένη επιφάνεια)

(δ) Ορυκτολογική δομή και πετρογραφική περιγραφή, κατανομή μικρογωγματώσεων στο πέτρωμα.

(ε) Προετοιμασία δείγματος (ποιότητα των πυρήνων και των άκρων τους, αριθμός πυρήνων που ελήφθησαν από ένα μεγαλύτερο δείγμα , προσανατολισμός των πυρήνων σε σχέση με σημαντικά γεωλογικά στοιχεία όπως επίπεδα διάστρωσης ή σχιστότητας, κλπ.).

(στ) Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου δοκιμής: δεδομένα της γεννήτριας παλμών, δεδομένα των μορφοτροπέων , σύζευξη των μορφοτροπέων με το δοκίμιο.

(ζ) Εντατική κατάσταση στην οποία υποβλήθηκε το δοκίμιο.

(η) Όλες οι διαθέσιμες φυσικές ιδιότητες του πετρώματος (ιδιαίτερα η πυκνότητα, η υγρασία, το πορώδες, η διαπερατότητα)

(ι) Τα δεδομένα των ταχυτήτων σε φυσιολογικές συνθήκες (θερμοκρασία δωματίου, ατμοσφαιρική πίεση)

(ια) Η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

(ιβ) Διαφοροποιήσεις της ταχύτητας στα δείγματα για σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος και δοκιμής. Μέσες ταχύτητες, μέσο σφάλμα , μέγιστη απόκλιση.

(ιγ) Στην περίπτωση σεισμικής τομογραφίας: τις καμπύλες του χρόνου διάδοσης με την απόσταση .

ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

ΒΡΑΧ. Ε 103-84, παρ . 4 ΥΠΕΧΩΔΕ

ASTM D293895

ISRM, 1981

Σκοπός:

Η μέθοδος της δοκιμής αυτής έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη δοκιμίων πετρωμάτων ορθού κυλινδρικού σχήματος.

Εργαστηριακός εξοπλισμός:

Μηχανή φορτίσεως: Πρέπει να είναι κατάλληλα εξοπλισμένη για την εφαρμογή, τον έλεγχο και τη μέτρηση του αξονικού φορτίου και επίσης να έχει επαρκή ικανότητα για την εφαρμογή του απαιτούμενου φορτίου, με ταχύτητα εφαρμογής αυτού όπως αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο.

Η μηχανή πρέπει να είναι εξοπλισμένη με δύο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος σκληρότητας κατά Rockwell όχι μικρότερης του HRC 58. Η μία από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Οι πλάκες αυτές θα πρέπει να έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15 mm και οι επιφάνειες τους δεν θα πρέπει να αποκλίνουν του επιπέδου περισσότερο από 0,005 mm. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση θα πρέπει να είναι κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φορτίσεως.

Εκτέλεση δοκιμής:

Τα δοκίμια πρέπει να είναι ορθού κυλινδρικού σχήματος με λόγο ύψους προς διάμετρο (L/D) 2,5 - 3,0 και διάμετρο όχι μικρότερη των 54 mm. Οπωσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι 10πλάσια του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου πρέπει να είναι λεία και επίπεδα με μέγιστη απόκλιση 0,02 mm και να κόπτωνται παράλληλα μεταξύ τους ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0,001 rad.

Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να μετράται με ακρίβεια 0,1 mm με τη λήψη του μέσου όρου δύο μετρήσεων της διαμέτρου σε ορθή γωνία μεταξύ τους στο μέσον του δοκιμίου, καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Ο μέσος όρος των έξι αυτών μετρήσεων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου. Το ύψος του δοκιμίου μετράται με ακρίβεια 1,0 mm.

Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες. Είναι δυνατόν όμως οι συνθήκες υγρασίας να είναι διαφορετικές ή τα δοκίμια να είναι σε ξηρά κατάσταση, οπότε οι συνθήκες αυτές της δοκιμής θα πρέπει να αναφέρονται στο δελτίο αποτελεσμάτων. Τα δοκίμια που εξετάζονται σε ξηρά κατάσταση πρέπει να τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας 105 ± 5°C για 24 ώρες.

Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται συνεχώς και βαθμιαία πάνω στο δοκίμιο με μια σταθερή ταχύτητα φορτίσεως τέτοια ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει μέσα σε 5 - 10 min από την αρχή της φορτίσεως. Η ταχύτητα αυτή θα πρέπει να κυμαίνεται από 0,5 έως 1,0 MPa/sec. Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε στο δοκίμιο πρέπει να αναγράφεται σε Newtons (ή KN ή MN) με ακρίβεια 1%.

Ο αριθμός των δοκιμίων που υποβάλλονται σε θραύση εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος και του διαθέσιμου δείγματος. Συνιστάται πάντως τα δοκίμια να είναι περισσότερα από πέντε, για κάθε δείγμα πετρώματος.

Υπολογισμοί:

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

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

Όπου: σ_c η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του δοκιμίου σε Pa (ή kPa ή MPa).

P το μέγιστο φορτίο σε N (ή kN ή MN)

A το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου σε m^2.

Δελτίο αποτελεσμάτων:

Στο δελτίο αποτελεσμάτων θα πρέπει να περιλαμβάνονται τα εξής:

α) Η πετρογραφική περιγραφή του δείγματος.

β) Η προέλευση του δείγματος (γεωγραφική θέση, το βάθος και η μέθοδος λήψεως, η ημερομηνία και οι συνθήκες διατηρήσεως). γ) Η ημερομηνία της δοκιμής και ο τύπος της μηχανής φορτίσεως.

δ) Η ταχύτητα θραύσεως του δοκιμίου και ο χρόνος δοκιμής.

ε) Η φυσική υγρασία και ο βαθμός κορεσμού του δοκιμίου.

στ) Η διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου καθώς και κάθε άλλο διαθέσιμο στοιχείο για τη φυσική κατάσταση αυτού (ειδικό βάρος, πορώδες κ.λ.π.).

ζ) Ο προσανατολισμός των επιφανειών ασυνέχειας (σχιστότητα, στρώση κ.λπ.) ως προς τον άξονα φορτίσεως.

η) Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη για κάθε δοκίμιο του δείγματος καθώς και η μέση αντοχή αυτών που εκφράζει την αντοχή του πετρώματος σε θλίψη.

θ) Κάθε απόκλιση από τη μέθοδο της δοκιμής όπως έχει περιγραφεί.

Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας Young

ASTM D3148-72

ISRM, 1981

Σκοπός:

Η μέθοδος της δοκιμής αυτής έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό των καμπυλών τάσης παραμόρφωσης, το μέτρο ελαστικότητας Young και τον λόγο Poisson σε μονοαξονική θλίψη βραχώδους δοκιμίου κανονικού σχήματος. Η δοκιμή προορίζεται κυρίως για τον χαρακτηρισμό και την κατάταξη του άρρηκτου πετρώματος

Εργαστηριακός εξοπλισμός:

Εκτός από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την διενέργεια της δοκιμής προσδιορισμού αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, απαιτούνται:

- Ηλεκτρονικά μηκινσιόμετρα (strain gauges), linear variable differential transformers (LVDTs), κυψέλες μέτρησης πίεσης, οπτικά μέσα ή άλλη κατάλληλη συσκευή μέτρησης. Η λειτουργία τους πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να μετράται, για κάθε μεταβολή φορτίου, ο μέσος όρος των δύο αξονικών και διαμετρικών παραμορφώσεων. Επίσης οι συσκευές θα πρέπει να είναι ευσταθείς και σταθερές, με ακρίβεια της τάξης των $5x10^{-6}$.

  Η αξονική και ακτινική παραμόρφωση πρέπει να μπορούν να προσδιορίζονται με ακρίβεια 2% των μετρήσεων και 0,2% στη κλίμακα του δοκιμίου.

  Εάν χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά μηκινσιόμετρα (strain gauges), το μήκος του μηκινσιομέτρου κατά το οποίο γίνεται μέτρηση της αξονικής και ακτινικής παραμόρφωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος του κόκκου του υλικού καθώς επίσης η συσκευή δεν θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μικρότερη από D/2 από τις έδρες του δοκιμίου.

Εάν χρησιμοποιούνται LVDTs για τη μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης, οι συσκευές αυτές θα πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να μετρούν ανά 0,002mm με ακρίβεια 0,002mm για εύρος 0,02mm και με ακρίβεια 0,005mm για εύρος 0,25mm. Η συσκευή δεν θα πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μικρότερη από D/2 από τις έδρες του δοκιμίου.

- Συσκευή καταγραφής του φορτίου και των παραμορφώσεων, κατά προτίμηση συσκευή καταγραφής και εκτύπωσης σε άξονες X-Y των καμπυλών τάσεων παραμορφώσεων.

Εκτέλεση δοκιμής:

Η διαδικασία της δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης που απαιτείται και για την παρούσα δοκιμή έχει περιγραφεί στη προηγούμενη παράγραφο.

Η περιεκτικότητα σε νερό του δείγματος παίζει σημαντικό ρόλο στην παραμορφωσιμότητα του δοκιμίου. Θα πρέπει γενικά να διατηρούνται οι συνθήκες υγρασίας που συναντιούνται στη φυσική κατάσταση του δείγματος και εάν αυτό δεν είναι δυνατό, θα πρέπει να γίνεται ειδική αναφορά στα φύλα δοκιμών έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί η κατάλληλη συσχέτιση μεταξύ παραμόρφωσης και περιεχόμενης υγρασίας. Υψηλά ποσοστά υγρασίας μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα εφαρμογής των strain gauges στο δοκίμιο και συνεπώς μπορεί να χρειαστεί να γίνει μείωση της υγρασίας του δοκιμίου σύμφωνα με την «Προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού της περιεχόμενης υγρασίας βραχώδους δείγματος», Μέθοδος 1, ISRM, December 1977.

Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται συνεχώς και βαθμιαία πάνω στο δοκίμιο με μια σταθερή ταχύτητα φορτίσεως τέτοια ώστε η θραύση του δοκιμίου να επέλθει μέσα σε 5 - 10 min από την αρχή της φορτίσεως. Η ταχύτητα αυτή θα πρέπει να κυμαίνεται από 0,5 έως 1,0 MPa/sec.

Το φορτίο και οι αξονικές και διαμετρικές παραμορφώσεις πρέπει να μετρούνται σε σταθερές διαφορές φορτίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, εάν δεν είναι δυνατή η συνεχής καταγραφή αυτών. Πρέπει να παρθούν τουλάχιστον 10 μετρήσεις για την σχεδίαση της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων.

Μερικές φορές συνίσταται να πραγματοποιούνται μερικοί κύκλοι φόρτισης αποφόρτισης.

Ο συνολικός αριθμός των δοκιμών που θα πραγματοποιηθούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, θα πρέπει να ρυθμίζεται από τις εκάστοτε απαιτήσεις του ερευνητή, αλλά συνίσταται να γίνονται τουλάχιστον πέντε.

Υπολογισμοί:

Η αξονική ε_α και η ακτινική ε_d παραμόρφωση θα πρέπει να καταγράφονται άμεσα από τη συσκευή μέτρησης της παραμόρφωσης ή να υπολογίζονται μέσω της μέτρησης της μετακίνησης, ανάλογα με τον τύπο των οργάνων που χρησιμοποιούνται.

Η ακτινική παραμόρφωση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{l_0}$$

Όπου: l_0 = αρχικό μήκος μέτρησης

ΔL = διαφορά του αρχικού από το τελικό μήκος μέτρησης (ορισμένο ώστε να είναι θετικό με τη μείωση του μήκους)

Η ακτινική παραμόρφωση μπορεί να προσδιοριστεί είτε με τη μέτρηση της μεταβολής της διαμέτρου του δείγματος, είτε με τη μέτρηση της περιμετρικής παραμόρφωσης. Στην περίπτωση που μετράται η μεταβολή της διαμέτρου η ακτινική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

Όπου: d_0 = αρχική απαραμόρφωτη διάμετρος

Δd = μεταβολή της διαμέτρου (ορισμένη ώστε να είναι αρνητική με τη αύξηση της διαμέτρου)

Στην περίπτωση μέτρησης της διαφοράς της περιμετρικής παραμόρφωσης, η περίμετρος ορίζεται ως $C=\pi d$, και συνεπώς η μεταβολή της ως $\Delta C=\pi\Delta d$. Η περιμετρική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = \varepsilon_d$$

Η θλιπτική τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται από τη σχέση:

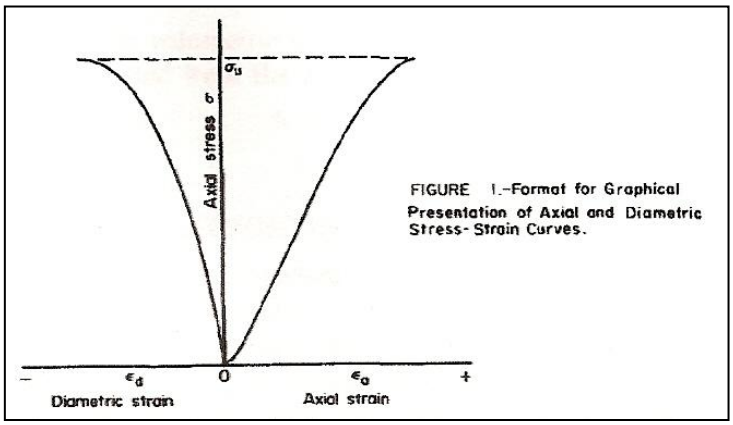
$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Όπου: P = το θλιπτικό φορτίο

A_0 = το εμβαδό της αρχικής διατομής του δοκιμίου

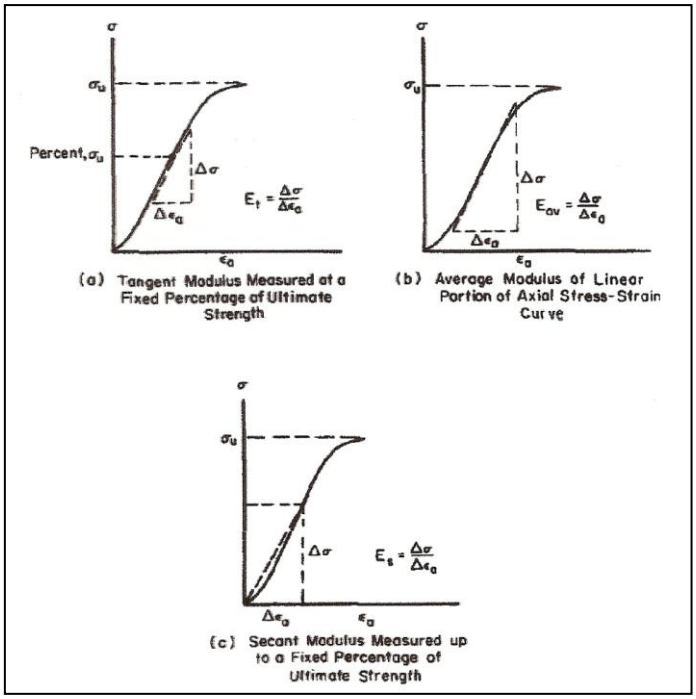
Η θλιπτική τάση και παραμόρφωση θεωρείται θετική.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη τάσης – αξονικής και ακτινικής παραμόρφωσης. Οι καμπύλες δείχνουν την αναμενόμενη συμπεριφορά του βραχώδους υλικού από την μηδενική τάση μέχρι και την τάση θραύσης. Ο σχεδιασμός των συνολικών καμπυλών δίνουν την καλύτερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς βραχωδών υλικών με μη γραμμική συμπεριφορά για χαμηλά και υψηλά επίπεδα τάσεων.



Αξονική και ακτινική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων

Το αξονικό μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου (που ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση του προκαλείται από τη μεταβολή της τάσης) μπορεί να υπολογιστεί με κάποια από τις μεθόδους που έχουν καθιερωθεί στην επιστήμη του μηχανικού. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες από αυτές παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα:



Μέθοδοι υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

1) Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young, E_t, υπολογίζεται σε κάποιο επίπεδο τάσης που ορίζεται σαν κάποιο ποσοστό της μέγιστης τάσης. Γενικά θεωρείται ένα επίπεδο τάσης που ισούται με το 50% της θλιπτικής αντοχής.

2) Το μέσο μέτρο ελαστικότητας Young, E_{av}, προσδιορίζεται από τη μέση κλίση του ευθυγράμμου τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης.

3) Το τέμνων μέτρο ελαστικότητας Young, E_s, μετράται συνήθως από την μηδενική τάση έως κάποιο προκαθορισμένο ποσοστό της τάσης θραύσης, που κατά κόρων επιλέγεται να είναι το 50%.

Ο λόγος Poisson, ν, μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

$$\nu = -\frac{\textit{κλίση της καμπύλης αξονικής παραμόρφωσης}}{\textit{κλίση της καμπύλης ακτινικής παραμόρφωσης}}$$

$$\nu = -\frac{E}{\textit{κλίση της καμπύλης ακτινικής παραμόρφωσης}}$$

Όπου η κλίση της καμπύλης ακτινικής παραμόρφωσης προσδιορίζεται με τον ίδιο τρόπο για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας Young που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σημειώνεται ότι ο λόγος Poisson είναι

θετικός αριθμός καθώς η κλίση της ακτινικής καμπύλης είναι αρνητική, σύμφωνα με τις παραδοχές της παρούσας μεθόδου.

Η ογκομετρική παραμόρφωση, ε_v, δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_\alpha + 2\varepsilon_d$$

Δελτίο αποτελεσμάτων:

Εκτός από τα μητρώα της δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, στα δελτία αποτελεσμάτων πρέπει να αναφέρονται και τα παρακάτω:

α) Τιμές των ασκούμενων φορτίων, τάσεις και παραμορφώσεις σε μορφή διαγραμμάτων ή πίνακα.

β) Το μέτρο ελαστικότητας Young και ο λόγος Poisson για κάθε δοκίμιο του δείγματος.

γ) Μέθοδος προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας και σε ποιο επίπεδο ή επίπεδα τάσης γίνεται ο υπολογισμός.

δ) Θα πρέπει να σημειωθούν δοκίμια που δεν είναι δυνατόν να ακολουθήσουν την παρούσα εργαστηριακή μέθοδο και στην περίπτωση που υπάρχουν τυχόν αποκλίσεις από τα παραπάνω.

Παραρτημα

Β

ΦΥΛΛΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **13/1/2010**

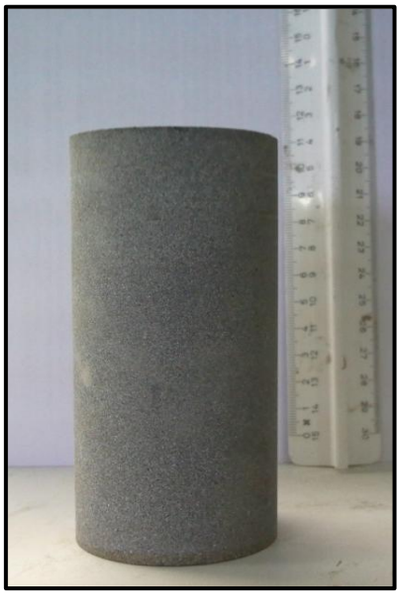
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψ1
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψαμμίτης

Διάμετρος (D)	mm:	52,09
Ύψος (L)	mm:	111,31
L/D	:	2,14
Βάρος (W)	gr:	605,50
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,03
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**180,60**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	20,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 84,75 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 85,37 MPa



Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **15/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψ2
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψαμμίτης

Διάμετρος (D)	mm:	52,16
Ύψος (L)	mm:	106,53
L/D	:	2,04
Βάρος (W)	gr:	580,91
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,03
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**220,20**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	13,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 103,05 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 103,84 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **28/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψ3**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψαμμίτης**

Διάμετρος (D)	mm:	51,97
Ύψος (L)	mm:	113,33
L/D	:	2,18
Βάρος (W)	gr:	614,90
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,08
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**197,20**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 92,96 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 93,61 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

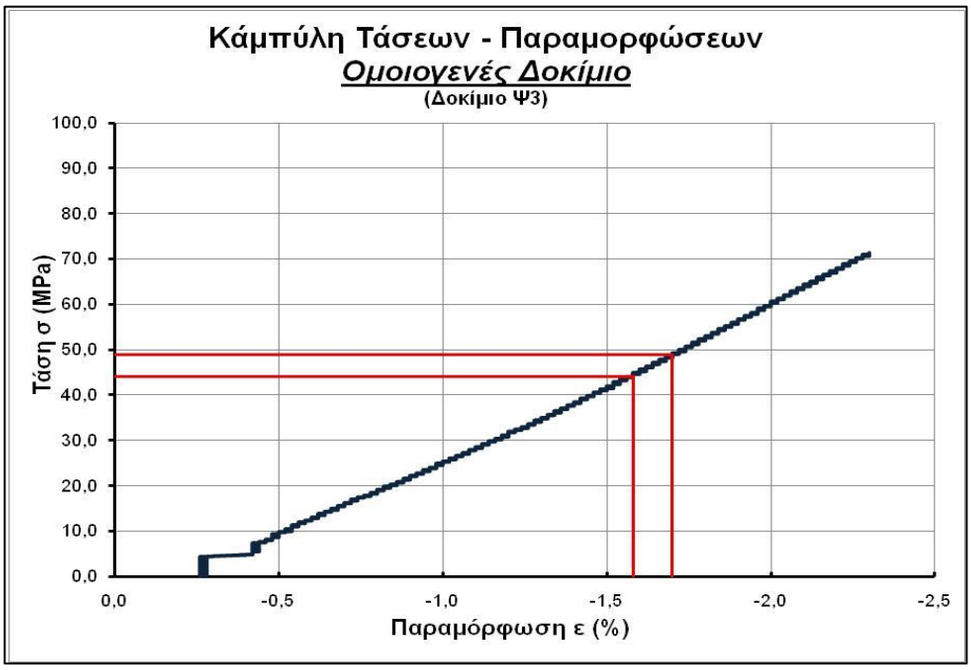
Αθήνα, **28/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψ3
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψαμμίτης

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: 93,60 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: 39,25 GPa



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **16/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψ4**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψαμμίτης**

Διάμετρος (D)	mm:	51,99
Ύψος (L)	mm:	118,06
L/D	:	2,27
Βάρος (W)	gr:	614,90
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	24,06
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**205,00**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 96,57 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 97,25 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

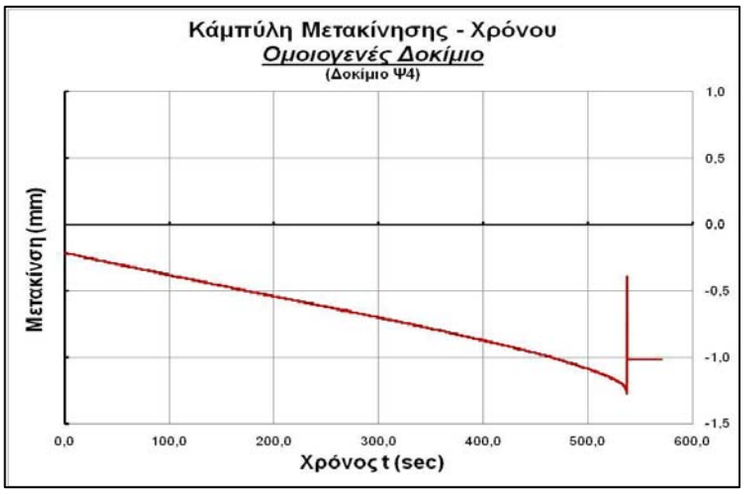
Αθήνα, **16/2/2010**

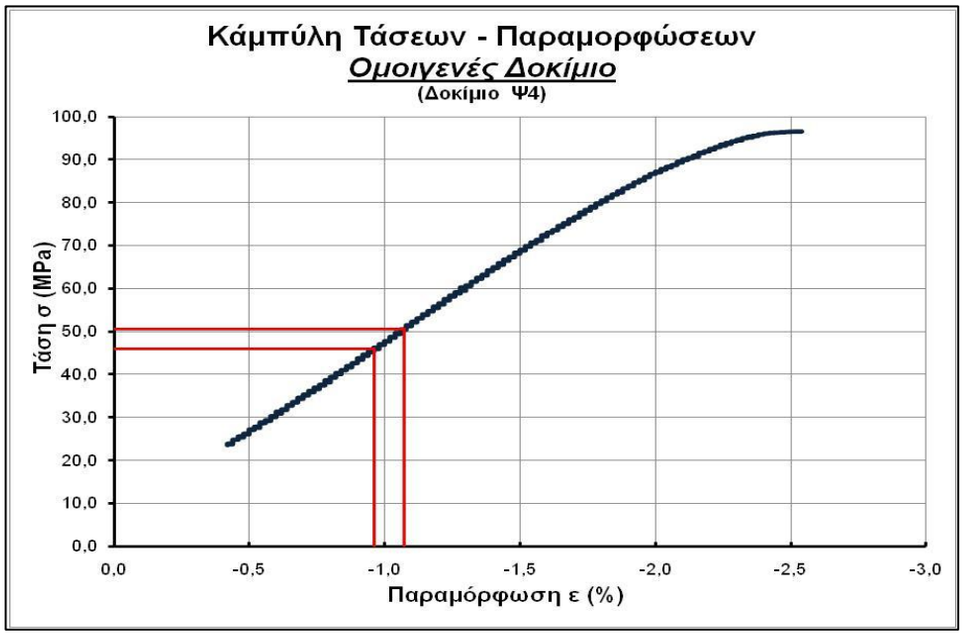
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψ4
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψαμμίτης

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: 97,24 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: 42,81 GPa





Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **19/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψ5
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : Ψαμμίτης

Διάμετρος (D)	mm:	52,08
Ύψος (L)	mm:	114,37
L/D	:	2,20
Βάρος (W)	gr:	631,12
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,40
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**197,70**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	13,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 92,81 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 93,49 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

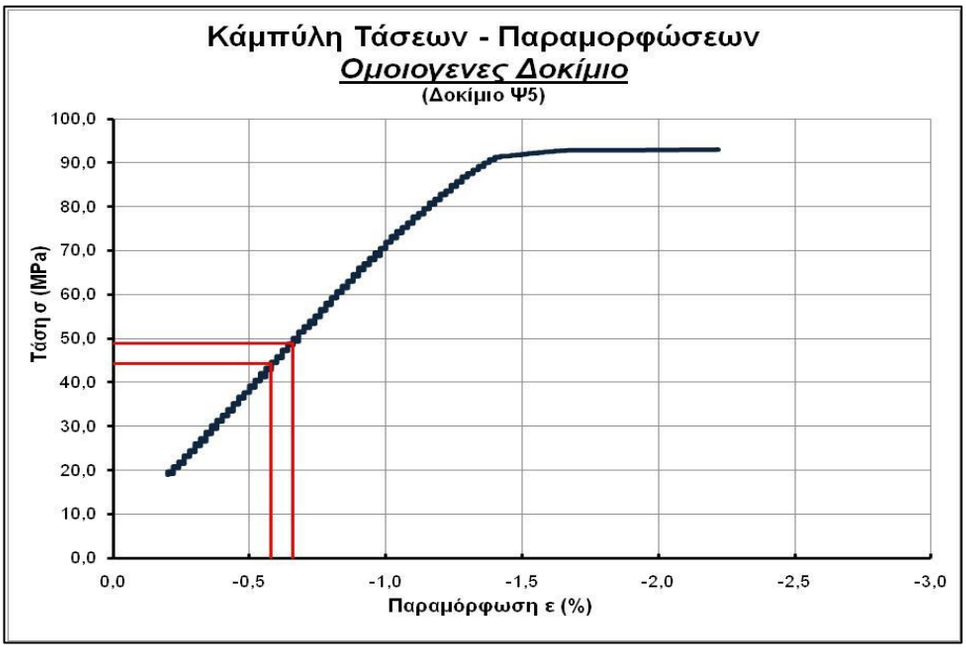
Αθήνα, **19/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψ5**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ψαμμίτης**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **93,50** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **58,86** **GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **15/1/2010**

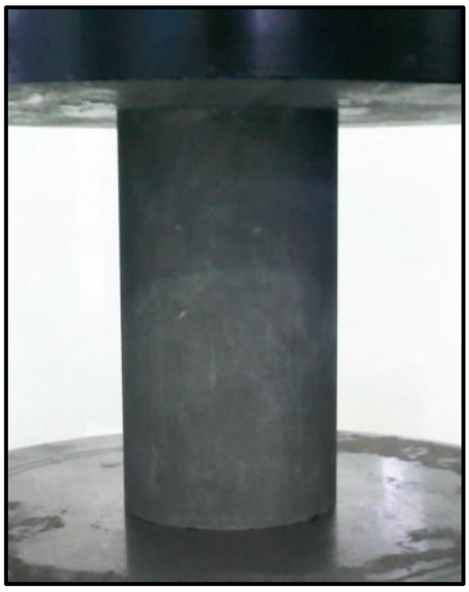
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **I1**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ιλυόλιθος**

Διάμετρος (D)	mm:	62,73
Ύψος (L)	mm:	126,47
L/D	:	2,02
Βάρος (W)	gr:	931,48
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	23,37
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**159,40**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	19,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 51,58 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 53,73 MPa



Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **15/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **I2**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ιλυόλιθος**

Διάμετρος (D)	mm:	62,87
Ύψος (L)	mm:	134,31
L/D	:	2,14
Βάρος (W)	gr:	989,42
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	23,27
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**145,20**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	10,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 46,77 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 48,74 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **22/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **I3**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ιλυόλιθος**

Διάμετρος (D)	mm:	52,13
Ύψος (L)	mm:	96,96
L/D	:	1,86
Βάρος (W)	gr:	531,15
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,17
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**73,30**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	9,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 34,34 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 34,60 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ι4**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ιλυόλιθος**

Διάμετρος (D)	mm:	67,82
Ύψος (L)	mm:	145,36
L/D	:	2,14
Βάρος (W)	gr:	1337,32
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	24,98
Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**127,70**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	10,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 35,35 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 37,34 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **13/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E1**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,07	51,95	52,02	52,01
Ύψος (L)	mm:	39,52	41,13	39,59	120,24
L/D	:				2,31
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				33,29
Βάρος (W)	gr:	218,42	225,61	220,27	664,30
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,45	25,38	25,67	25,50

Φορτίο Θραύσης **kN:** **119,20**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 20,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 56,10 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 56,50 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **15/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε2**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,11	52,07	51,98	52,05
Ύψος (L)	mm:	39,32	40,87	37,73	117,92
L/D	:				2,27
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				34,66
Βάρος (W)	gr:	219,21	222,27	209,88	651,36
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,64	25,05	25,71	25,46

Φορτίο Θραύσης **kN:** **78,80**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 8,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 37,03 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 37,30 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις : ***Στο δοκίμιο αυτό έγινε η χρήση γύψου στις διεπιφάνειες των δύο υλικών***

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **12/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε3**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,04	51,97	51,82	51,94
Ύψος (L)	mm:	39,11	38,17	37,17	114,45
L/D	:				2,20
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				33,35
Βάρος (W)	gr:	217,60	208,34	204,23	630,17
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,65	25,23	25,55	25,48

Φορτίο Θραύσης	**kN:**	**85,50**
Χρόνος Θραύσης (t)	min:	9,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 40,35 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 40,63 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε4**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,00	51,99	51,97	51,99
Ύψος (L)	mm:	44,30	32,51	43,97	120,78
L/D	:				2,32
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				26,92
Βάρος (W)	gr:	218,42	225,61	220,27	664,30
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	22,77	32,06	23,16	25,41

Φορτίο Θραύσης **kN:** **117,00**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 8,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 55,12 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 55,51 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **26/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E5**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,02	52,03	**52,27**	52,11
Ύψος (L)	mm:	48,35	19,35	50,42	118,12
L/D	:				2,27
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				16,38
Βάρος (W)	gr:	268,67	101,78	282,98	653,43
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,64	24,26	25,65	25,44

Φορτίο Θραύσης **kN:** **164,00**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 76,91 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 77,48 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **1/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε6**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,04	51,99	**51,97**	52,00
Ύψος (L)	mm:	39,61	46,17	39,6	125,38
L/D	:				2,41
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				36,82
Βάρος (W)	gr:	220,11	253,24	220,17	693,52
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,62	25,34	25,70	25,54

Φορτίο Θραύσης **kN:** **88,80**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 7,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : **41,81** **MPa**

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: **42,11** **MPa**

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **1/2/2010**

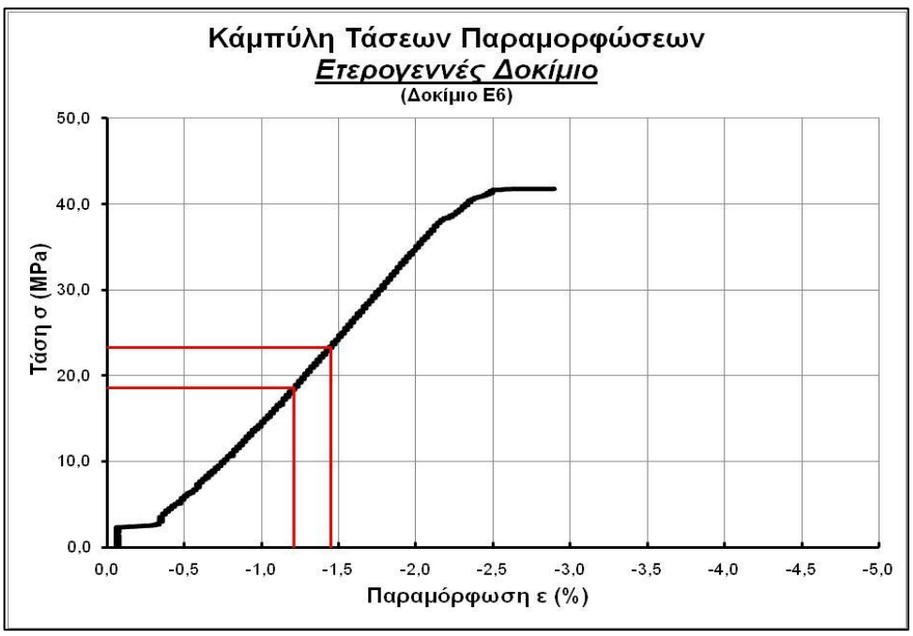
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E6**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **42,11** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **19,62** **GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **12/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε7**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	51,95	51,82	**52,05**	51,94
Ύψος (L)	mm:	57,77	12,54	57,84	128,15
L/D	:				2,47
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				9,79
Βάρος (W)	gr:	314,24	70,29	314,06	698,59
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,17	26,06	25,03	25,23

Φορτίο Θραύσης **kN:** **141,60**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 66,83 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 67,29 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **12/2/2010**

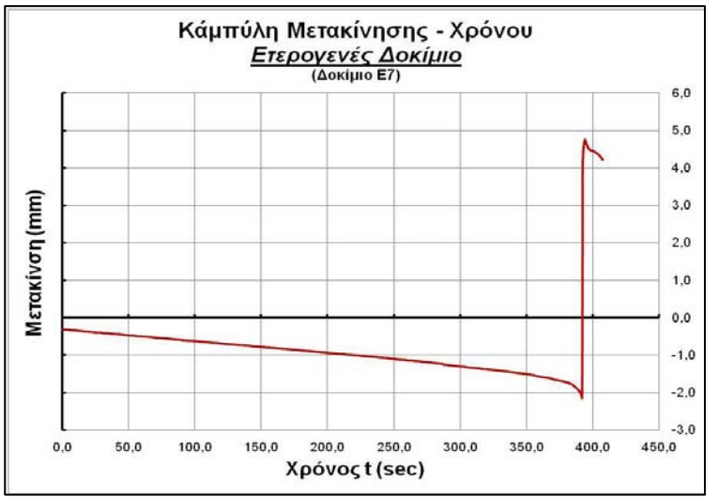
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

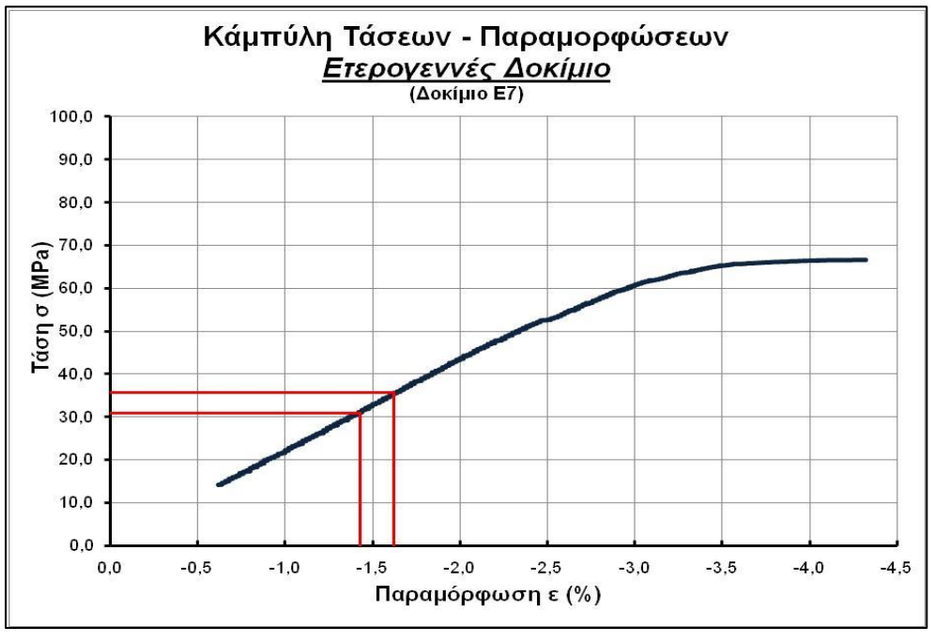
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε7**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **67,24** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **24,78** **GPa**





Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **13/1/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε8**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,02	51,87	52,02	51,97
Ύψος (L)	mm:	48,15	11,26	48,98	108,39
L/D	:				2,09
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				10,39
Βάρος (W)	gr:	262,40	61,66	270,7	594,76
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,15	25,41	25,50	25,37

Φορτίο Θραύσης **kN:** **169,70**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 80,00 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 80,56 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **13/1/2010**

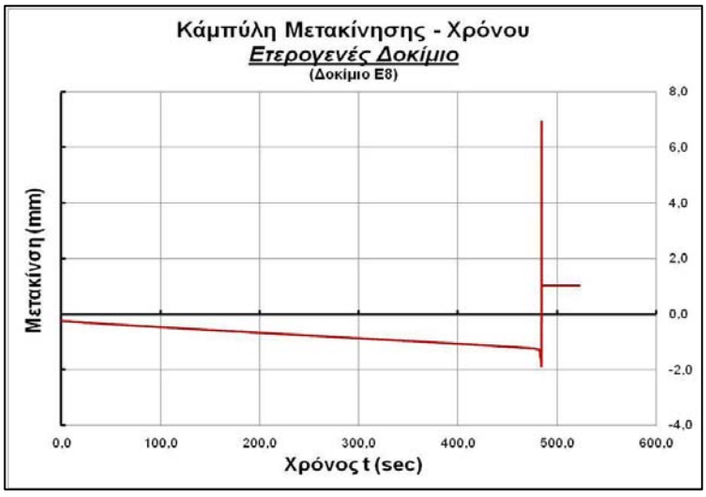
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

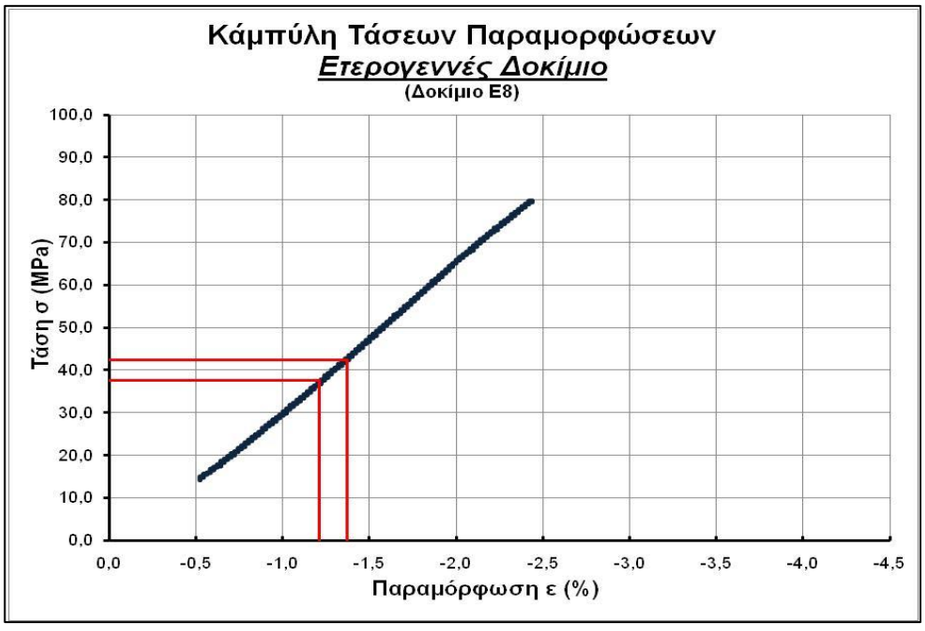
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E8**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **80,51** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **29,43** **GPa**





Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **12/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε9**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	52,02	51,91	**51,96**	51,96
Ύψος (L)	mm:	51,39	11,89	51,74	115,02
L/D	:				2,21
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				10,34
Βάρος (W)	gr:	285,76	63,97	286,89	636,62
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,66	24,93	25,64	25,60

Φορτίο Θραύσης **kN:** **198,30**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 14,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 93,51 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 94,16 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **12/2/2010**

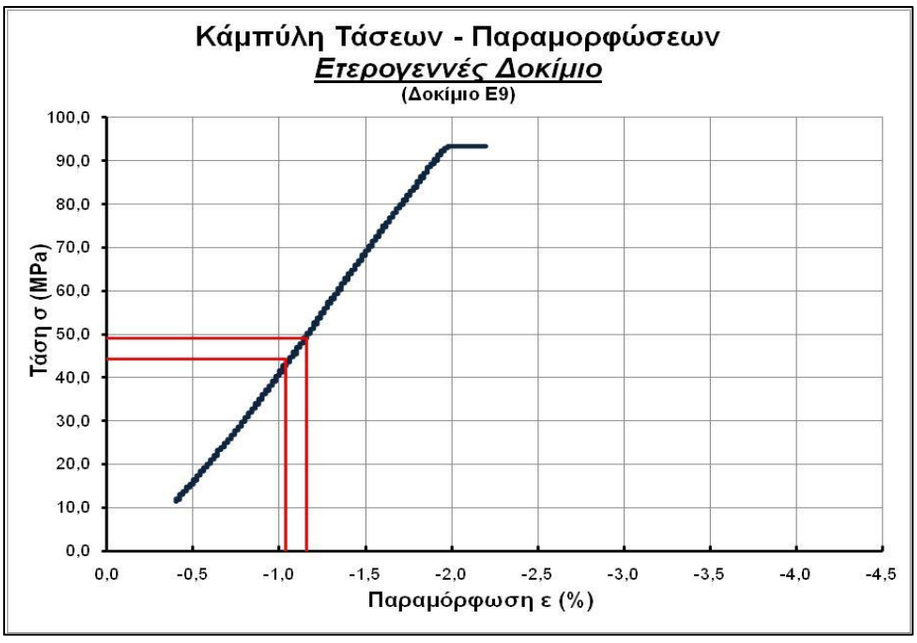
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E9**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **94,13** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **39,24** **GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **19/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E10**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,61	62,96	63,59	62,96
Ύψος (L)	mm:	44,95	77,07	42,67	164,69
L/D	:				2,62
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				46,80
Βάρος (W)	gr:	370,05	615,63	351,65	1337,33
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,41	25,16	25,45	25,58

Φορτίο Θραύσης **kN:** **153,60**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 11,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 49,34 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 51,43 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E11**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,54	62,7	63,52	62,70
Ύψος (L)	mm:	64,32	29,21	68,13	161,66
L/D	:				2,58
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				18,07
Βάρος (W)	gr:	525,50	213,57	563,78	1302,85
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,27	23,22	25,61	25,60

Φορτίο Θραύσης **kN:** **172,40**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 9,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 55,84 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 58,16 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

<u>Παρατηρήσεις :</u>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

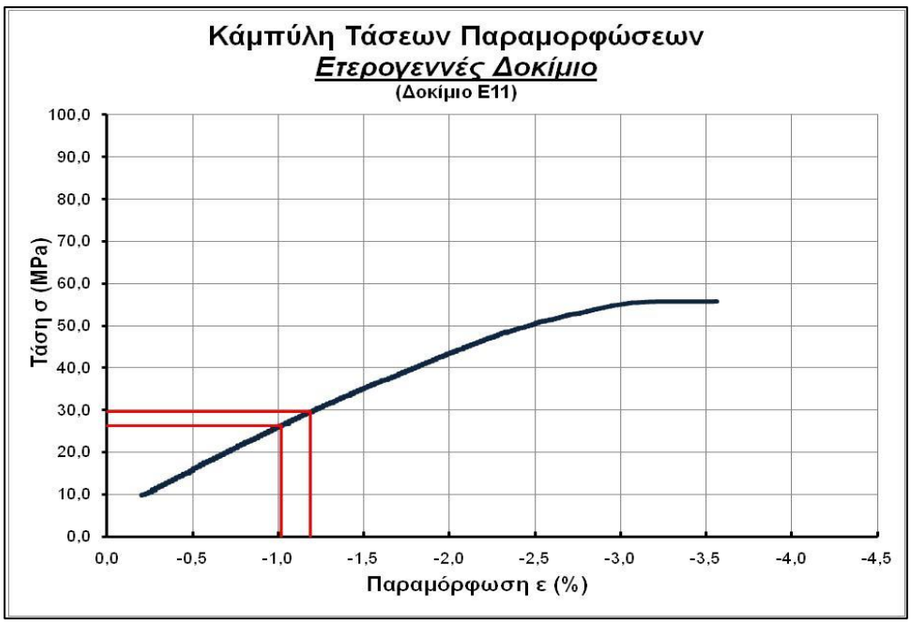
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E11**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **58,16** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei:	**19,05**	**GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E12**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,44	62,95	**63,44**	62,95
Ύψος (L)	mm:	68,80	42,05	70,07	180,92
L/D	:				2,87
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				23,24
Βάρος (W)	gr:	572,50	309,26	579,8	1461,56
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,82	23,17	25,67	25,46

Φορτίο Θραύσης **kN:** **183,70**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 12,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 59,02 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 61,52 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

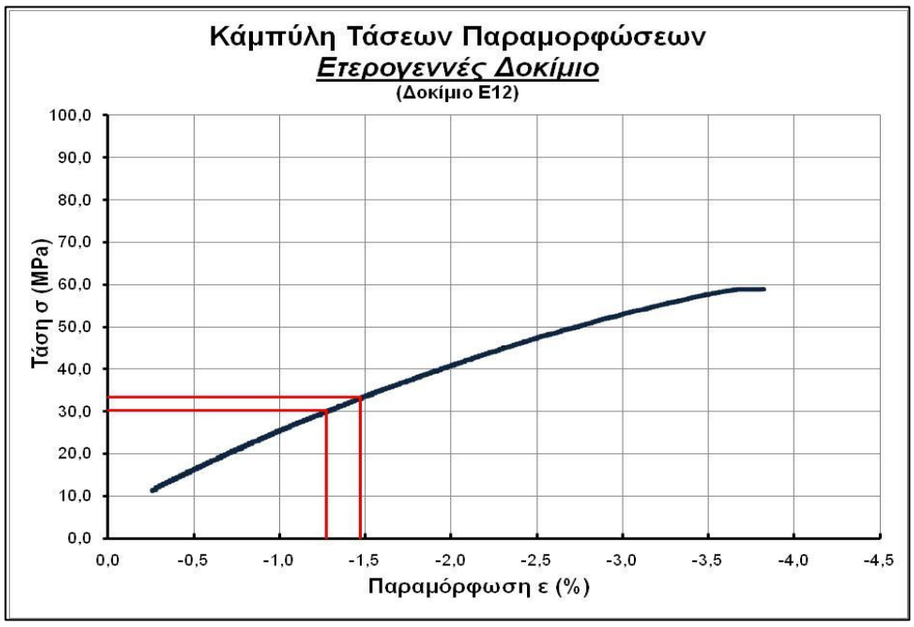
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E12**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **61,52** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei:	**16,07**	**GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E13**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,54	62,31	63,52	62,31
Ύψος (L)	mm:	64,32	42,76	68,13	175,21
L/D	:				2,81
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				24,40
Βάρος (W)	gr:	525,50	309,04	563,78	1398,32
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,27	23,24	25,61	25,67

Φορτίο Θραύσης **kN:** **168,20**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 12,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 55,16 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 57,39 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **20/2/2010**

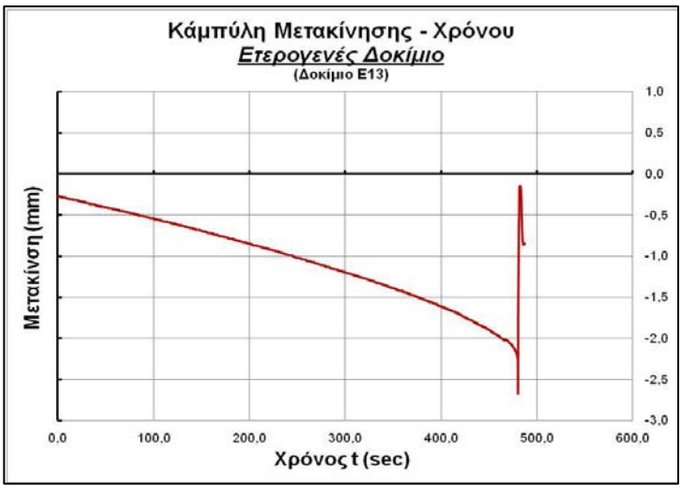
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

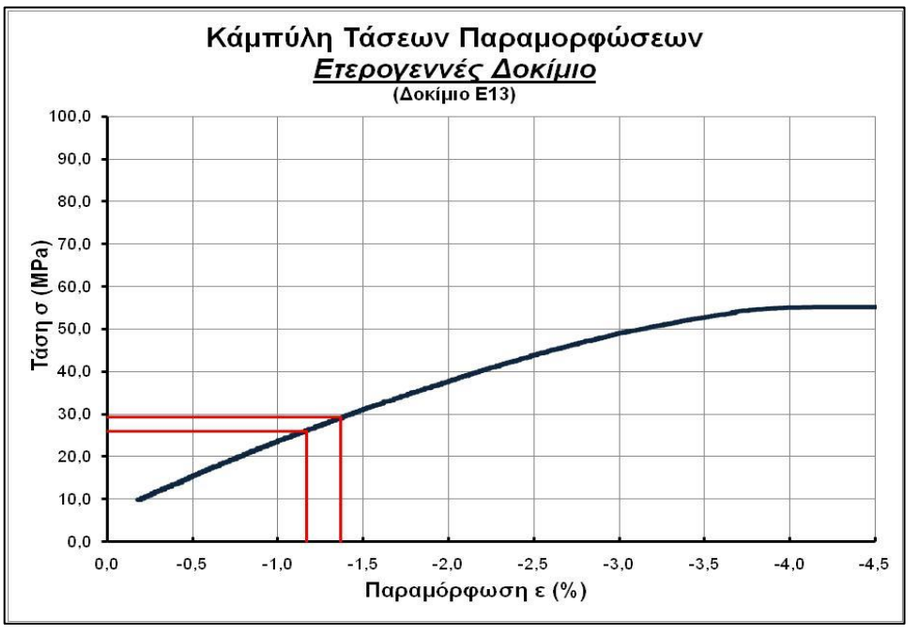
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E13**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **57,40** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei:	**16,40**	**GPa**





Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **21/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

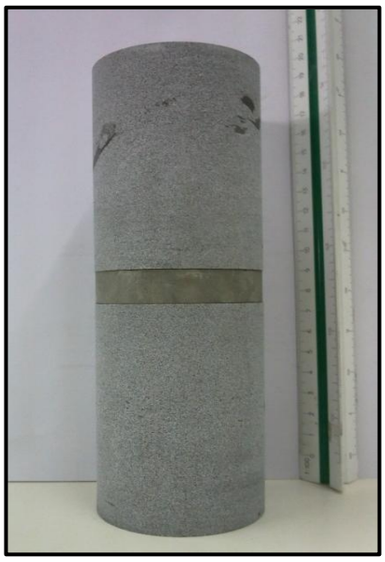
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Ε14**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**Ε1α**	**Ε1β**	**Ε1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,59	62,81	**63,66**	62,81
Ύψος (L)	mm:	85,43	13,16	88,01	186,60
L/D	:				2,97
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				7,05
Βάρος (W)	gr:	706,30	97,87	725,01	1529,18
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,53	23,54	25,38	25,94

Φορτίο Θραύσης **kN:** **208,80**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 13,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 67,39 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 70,21 MPa



Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **21/2/2010**

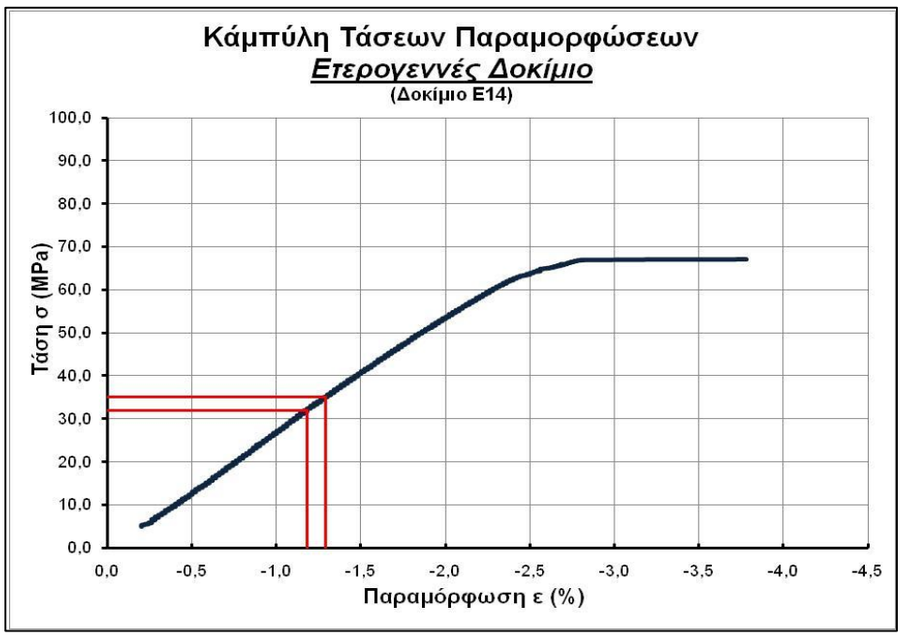
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E14**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **70,21** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **29,34** **GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **23/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E15**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 3 τεμάχη ψαμμίτη και 2 ενδιάμεσα τεμάχη ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**E1δ**	**E1ε**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,67	62,54	**63,71**	62,61	63,58	62,58
Ύψος (L)	mm:	45,49	18,71	45,64	16,20	43,02	169,06
L/D	:						2,70
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:						20,65
Βάρος (W)	gr:	371,43	135,77	375,49	115,43	355,29	882,69
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,15	23,17	25,31	22,70	25,51	16,65

Φορτίο Θραύσης **kN:** **182,00**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 12,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 59,17 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 61,61 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **23/2/2010**

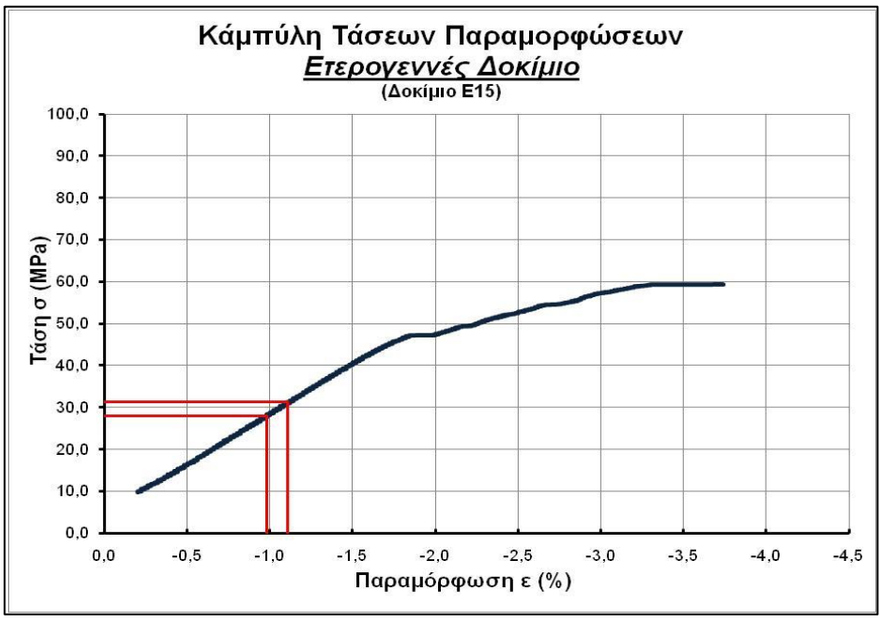
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E15**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 3 τεμάχη ψαμμίτη και 2 ενδιάμεσα τεμάχη ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **61,62** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei:	**25,01**	**GPa**



Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E16**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	63,58	62,68	63,56	62,68
Ύψος (L)	mm:	28,71	99,34	24,73	152,78
L/D	:				2,44
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				65,02
Βάρος (W)	gr:	228,92	748,27	203,94	1181,13
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	24,63	23,94	25,49	24,57

Φορτίο Θραύσης **kN:** **83,20**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 7,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 26,96 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 28,08 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/2/2010**

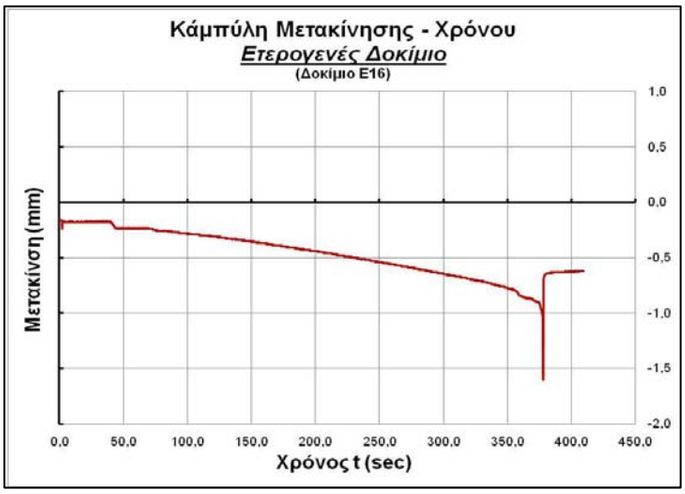
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

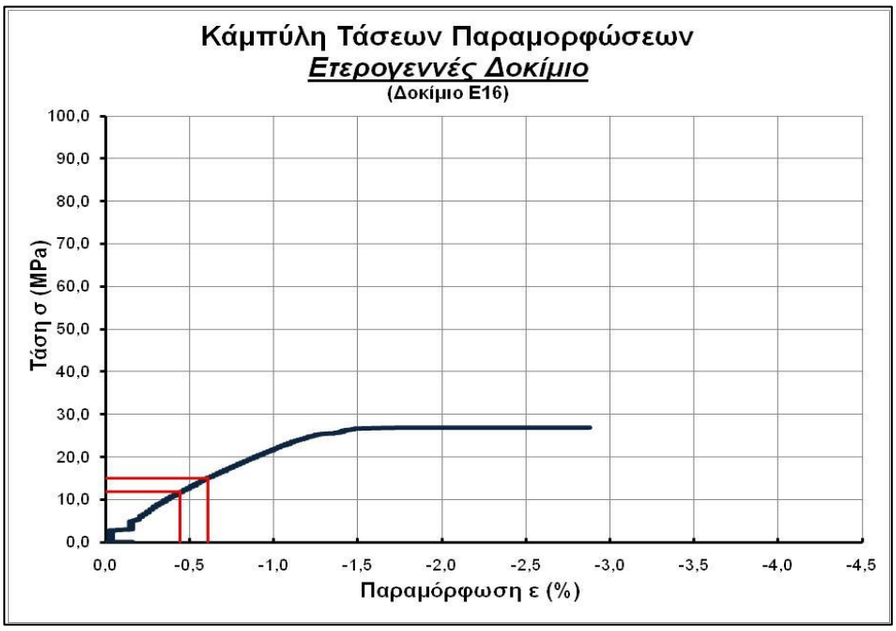
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E16**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **28,08** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei: **21,61** **GPa**





Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/2/2010**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E17**
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Δίσκος	:	**E1α**	**E1β**	**E1γ**	**Συνολικό**
Περιγραφή	:	Ψαμμίτης	Ιλυόλιθος	Ψαμμίτης	**Δοκίμιο**
Διάμετρος (D)	mm:	71,10	71,25	**71,12**	71,16
Ύψος (L)	mm:	24,29	128,86	22,48	175,63
L/D	:				2,47
Ποσοστό Ιλυολίθου	%:				73,37
Βάρος (W)	gr:	249,10	1322,67	229,93	1801,70
Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m^3:	25,33	25,25	25,25	25,30

Φορτίο Θραύσης **kN:** **158,50**
Χρόνος Θραύσης (t) min: 12,00

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c : 39,86 MPa

Αναγωγή σε διάμετρο 50mm σ_{c50}: 42,47 MPa

Δοκίμιο πρίν τη θραύση

Δοκίμιο μετά τη θραύση

Παρατηρήσεις :

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Βραχομηχανικής

Αθήνα, **25/2/2010**

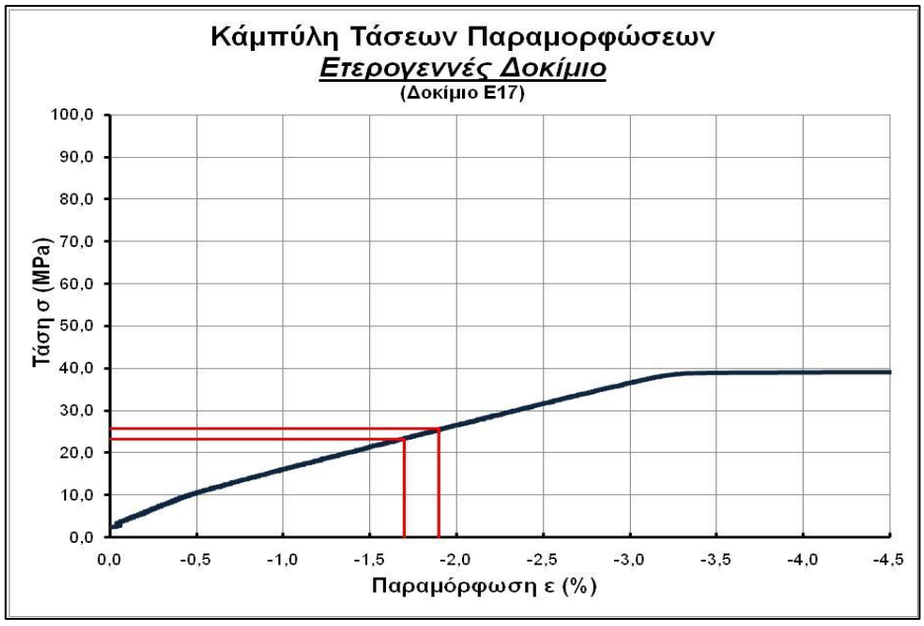
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΦΠΑΤΟΜΕΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG ΒΡΑΧΩΔΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **E17**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ : **Τεχνητό ετερογενές δοκίμιο που απαρτίζεται από 2 τεμάχη ψαμμίτη και 1 ενδιάμεσο τέμαχος ιλυολίθου**

Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη $\sigma_{c\ 50}$: **42,45** **MPa**

Μέτρο Ελαστικότητας Young Ei:	**12,36**	**GPa**



Παρατηρήσεις :

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γ

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ, ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΕΙΣΗΧΘΗΣΑΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PHASE 2 ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΛΥΟΛΙΘΟΥ 50% ΚΑΙ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΟ 100Μ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΣΕΙΡΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

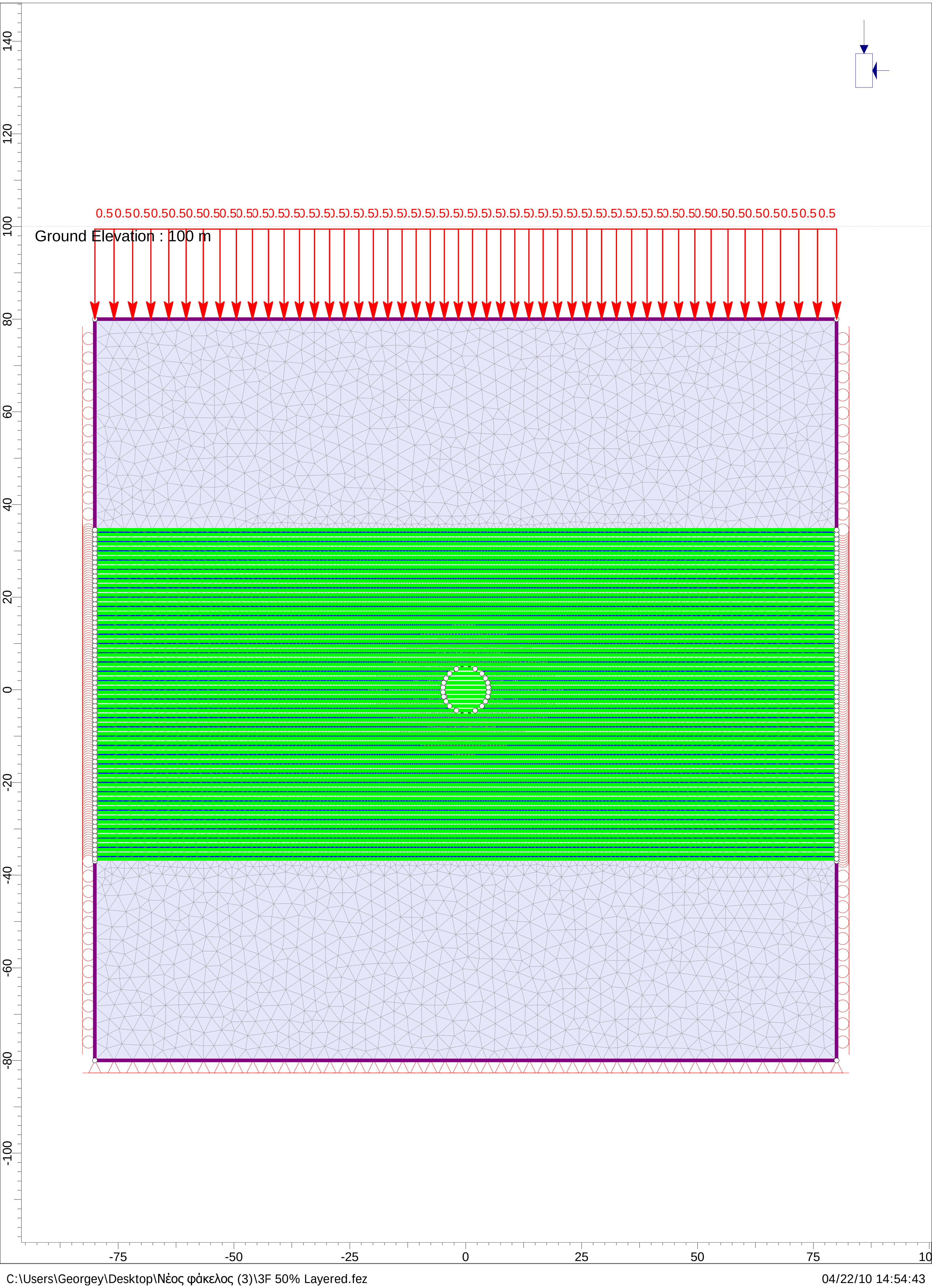
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Α1

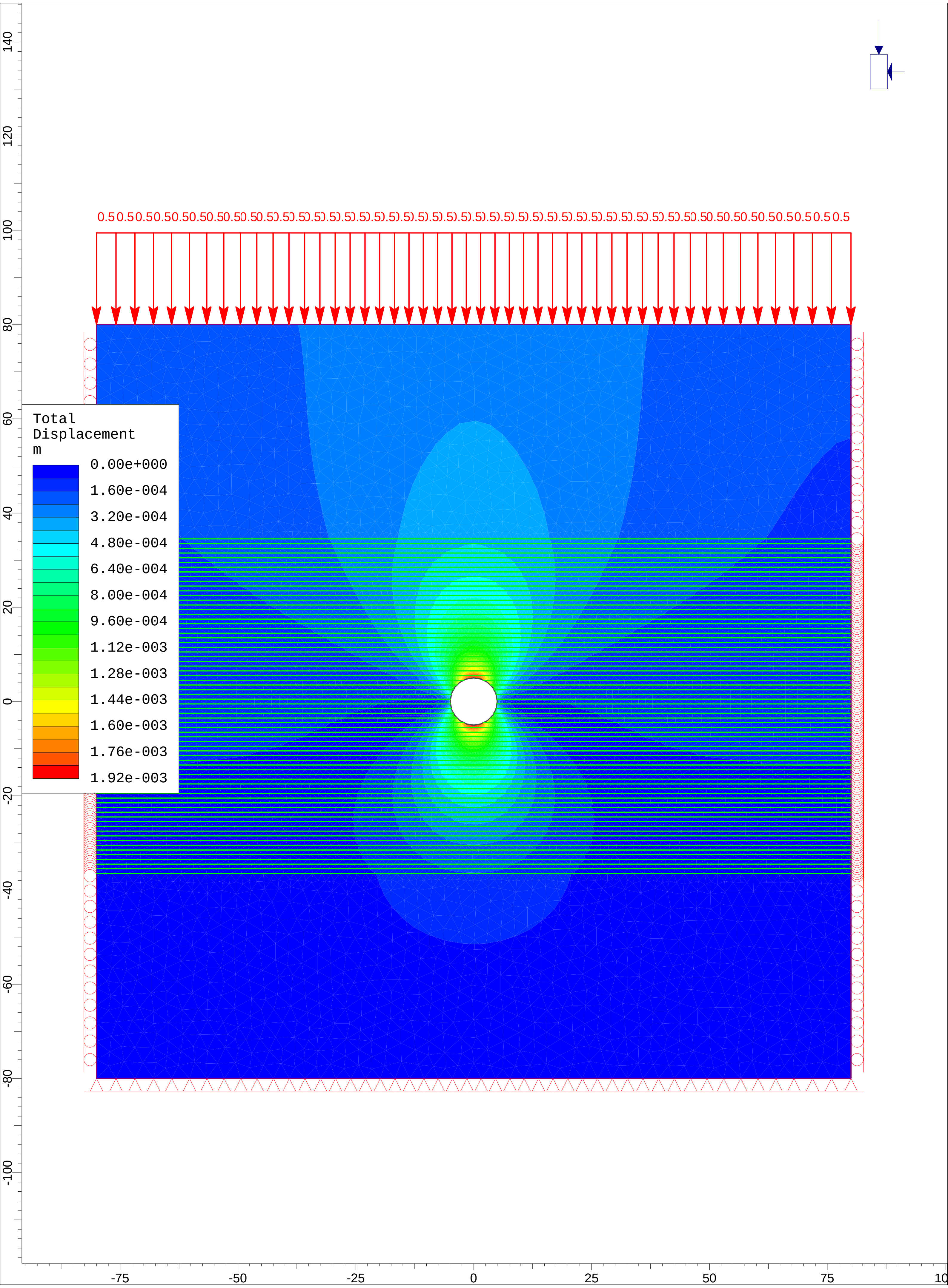
Ετερογενές προσομοίωμα

Σταθερή τιμή του GSI

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
Ground Elevation : 100 m
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total
Displacement
m
0.00e+000
1.60e-004
3.20e-004
4.80e-004
6.40e-004
8.00e-004
9.60e-004
1.12e-003
1.28e-003
1.44e-003
1.60e-003
1.76e-003
1.92e-003
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75

Phase2 Analysis Information

Document Name

3F 50% Layered

Project Settings

General
  Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
  Author: George Tziallas
  Company: NTUA
  Number of Stages: 4
  Analysis Type: Plane Strain
  Solver Type: Gaussian Elimination
  Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
  Maximum Number of Iterations: 500
  Tolerance: 0.001
  Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
  Method: Piezometric Lines
  Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 21224
  Number of nodes on Stage 1: 10827
Number of elements on Stage 2: 21224
  Number of nodes on Stage 2: 10827
Number of elements on Stage 3: 21224
  Number of nodes on Stage 3: 10827
Number of elements on Stage 4: 20208
  Number of nodes on Stage 4: 10372

Mesh Quality

1085 of 21224 Elements (5.1 % of elements) are poor quality elements
0 of 21224 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
1080 of 21224 Elements (5.1 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
13 of 21224 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
  (elements can be of poor quality for more than one reason)

Mesh Quality Statistics
The worst element has (ratio = 9.64), (min angle = 5.88) (max angle = 129.47)
10.0% of elements have: (ratios > 2.6), (min angles < 22.3) (max angles > 88.8)
20.0% of elements have: (ratios > 2.1), (min angles < 28.0) (max angles > 86.8)
30.0% of elements have: (ratios > 1.8), (min angles < 33.5) (max angles > 84.0)
40.0% of elements have: (ratios > 1.6), (min angles < 38.0) (max angles > 81.2)
50.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 41.5) (max angles > 78.4)
60.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 44.3) (max angles > 75.8)
70.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 46.7) (max angles > 73.1)
80.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 49.1) (max angles > 70.6)
90.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 51.6) (max angles > 68.2)
100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 54.5) (max angles > 65.5)

Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: Stage 1

Material Properties

Material: SANDSTONE
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 18373 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SANDSTONE LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 9186 MPa
Poisson's ratio: 0.26
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SANDSTONE LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 2297 MPa
Poisson's ratio: 0.26
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic

Young's modulus: 6941 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE L1
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 3470 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE L2
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 868 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: SANDSTONE LOOSENING B, Area Excavated: 37.703 m2
Material: SILTSTONE L2, Area Excavated: 39.551 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 77.254 m2
Excavation Perimeter: 31.287 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 77.254 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.287 m (0 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)

Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2

Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3

Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 77.220 m2 (-0.0339689 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.280 m (-0.00678603 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.963 m2 (-0.0372373 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.000354305 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.048201 %

Displacements

Displacement data is not available for Stage 1 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.001881 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 63

ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Α2

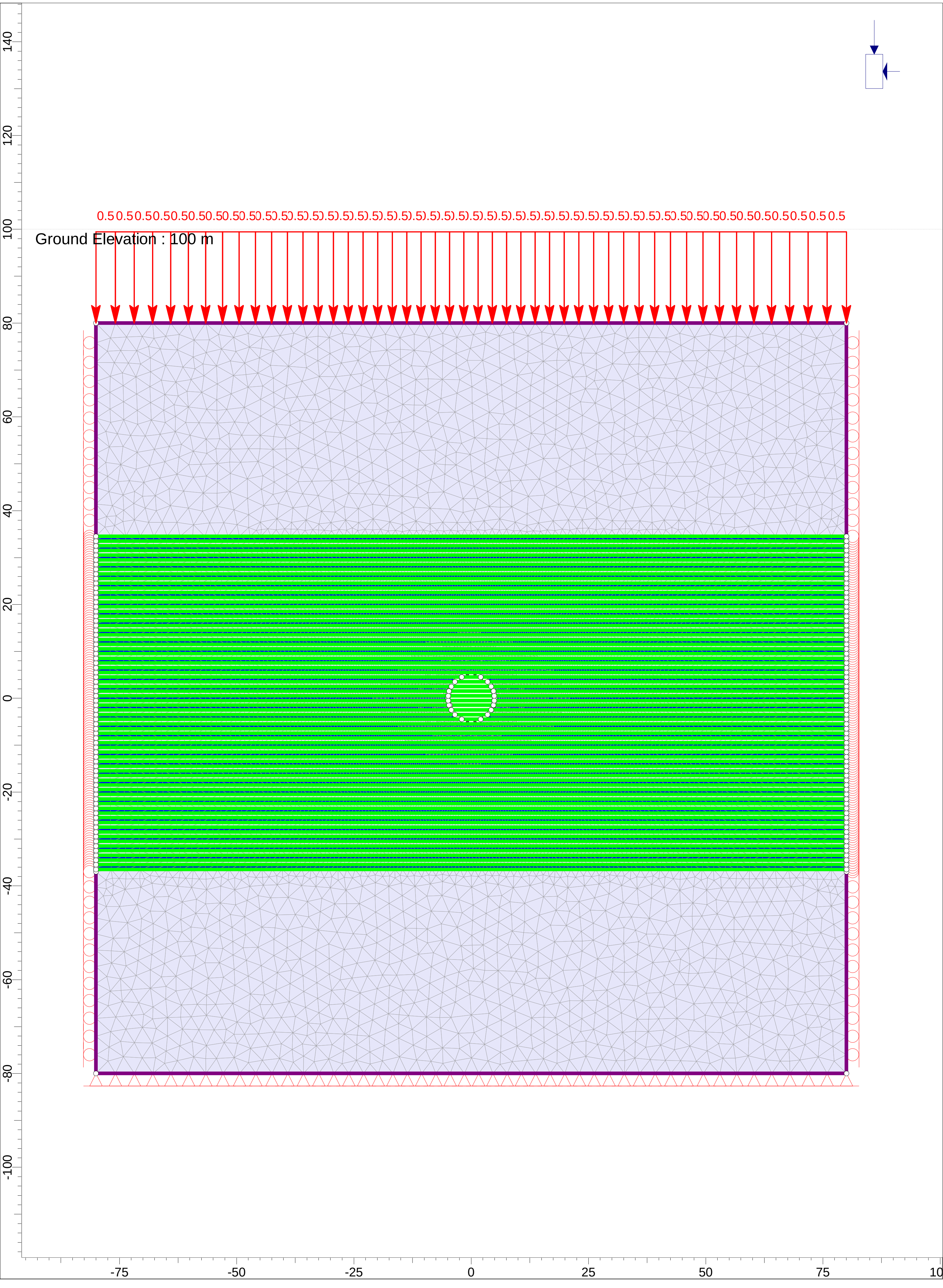
Ομοιογενές προσομοίωμα

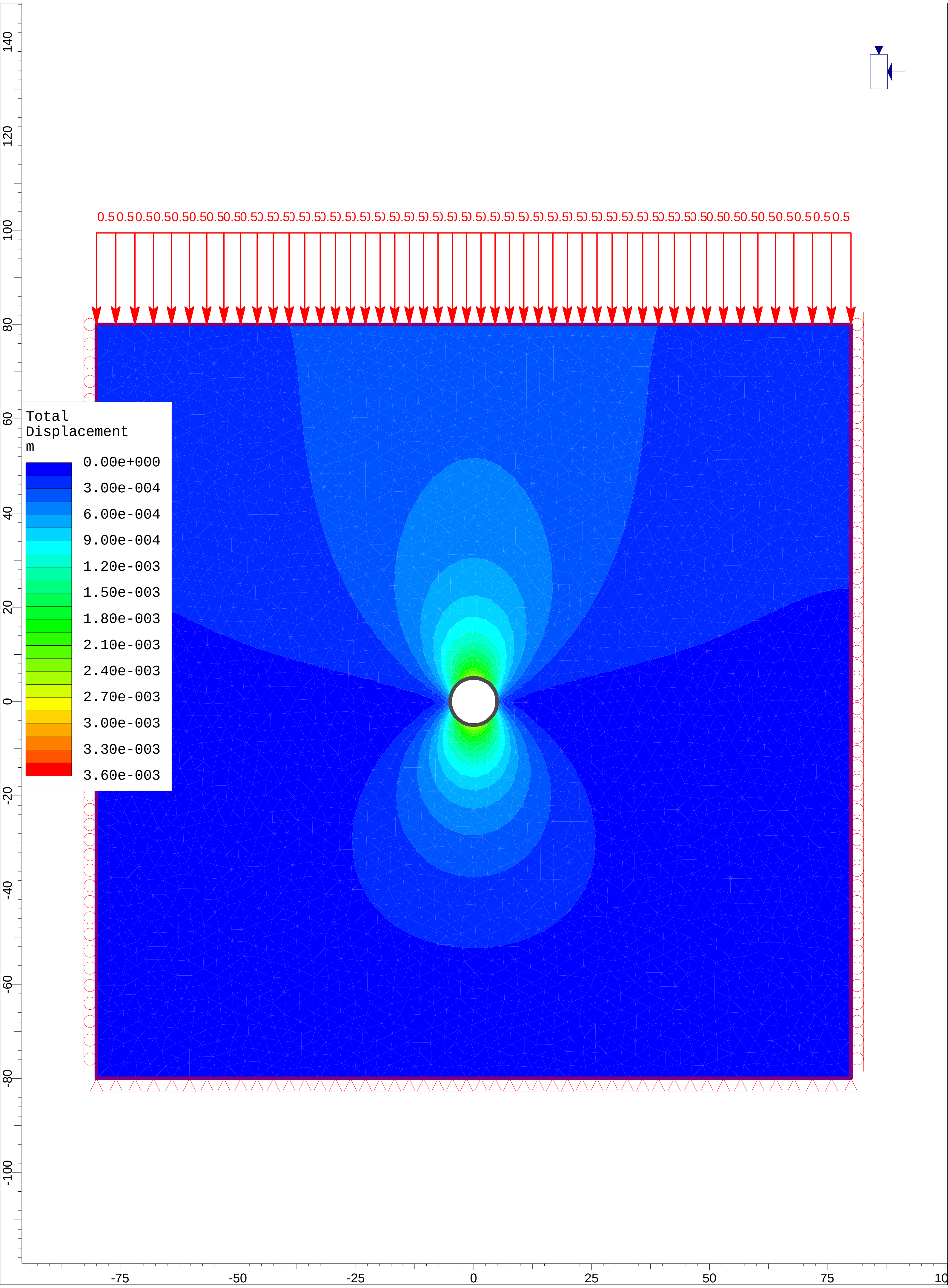
Κατανομή E_i σύμφωνα με την κατανομή σ_{ci} όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας εργασίας

Σταθερή τιμή του GSI

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


Ground Elevation : 100 m
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total
Displacement
m
0.00e+000
3.00e-004
6.00e-004
9.00e-004
1.20e-003
1.50e-003
1.80e-003
2.10e-003
2.40e-003
2.70e-003
3.00e-003
3.30e-003
3.60e-003
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75

Phase2 Analysis Information

Document Name

1E 40%

Project Settings

General
  Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
  Author: George Tziallas
  Company: NTUA
  Number of Stages: 4
  Analysis Type: Plane Strain
  Solver Type: Gaussian Elimination
  Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
  Maximum Number of Iterations: 500
  Tolerance: 0.001
  Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
  Method: Piezometric Lines
  Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 7378
  Number of nodes on Stage 1: 3784
Number of elements on Stage 2: 7378
  Number of nodes on Stage 2: 3784
Number of elements on Stage 3: 7378
  Number of nodes on Stage 3: 3784
Number of elements on Stage 4: 6863
  Number of nodes on Stage 4: 3575

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
  (maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
  Minimum interior angle < 20.0 degrees
  Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: 40%
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 7533 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406

s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 40% LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 3777 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 40% LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 944 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: 40% LOOSENING B, Area Excavated: 78.333 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 78.333 m2
Excavation Perimeter: 31.395 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 78.333 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.395 m (-3.55271e-015 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 78.285 m2 (-0.0481917 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.386 m (-0.00963208 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.953 m2 (-0.0469704 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.000400519 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0599623 %

Displacements

Displacement data is not available for Stage 1 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.0025848 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 39

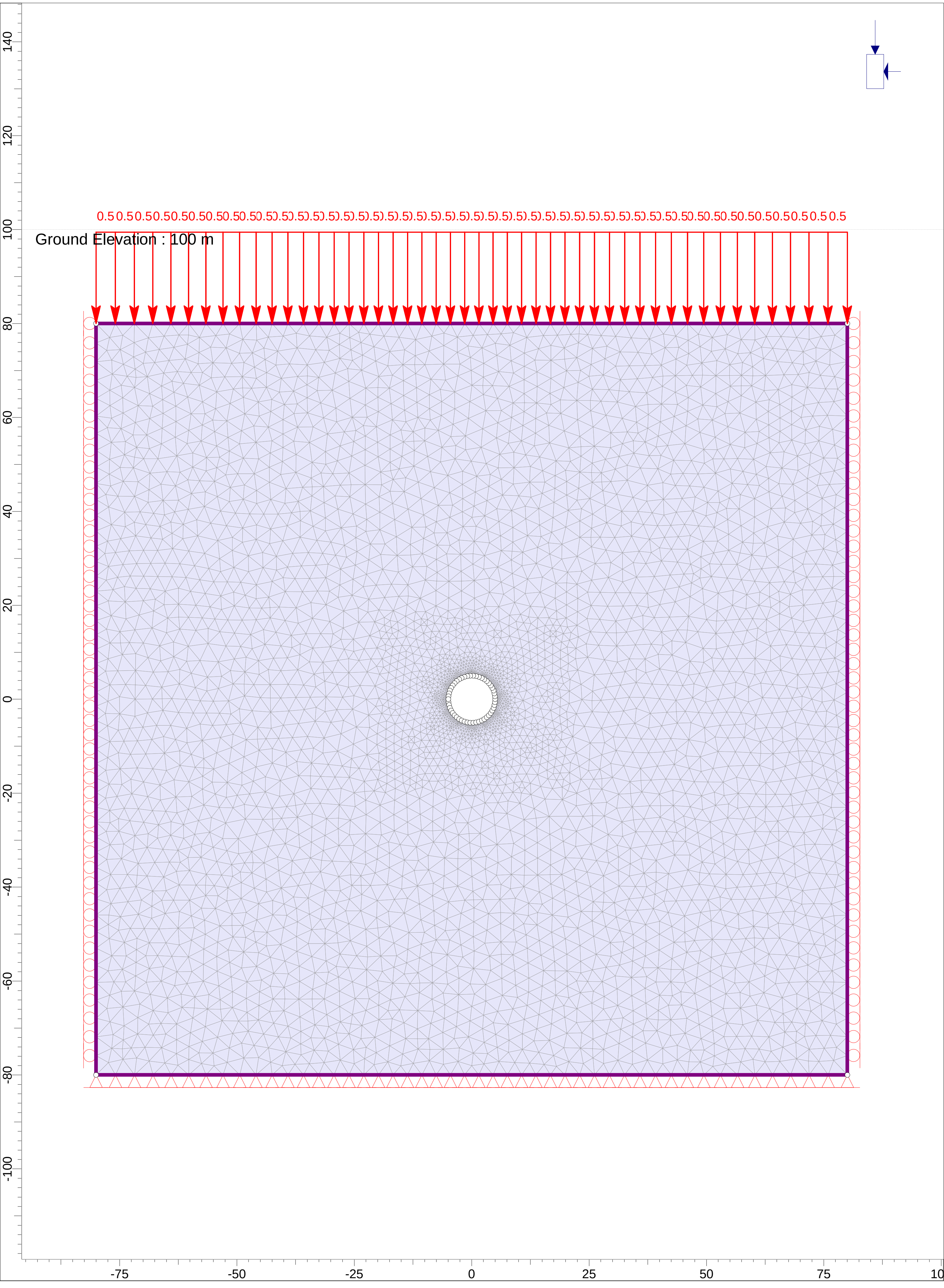
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Α3

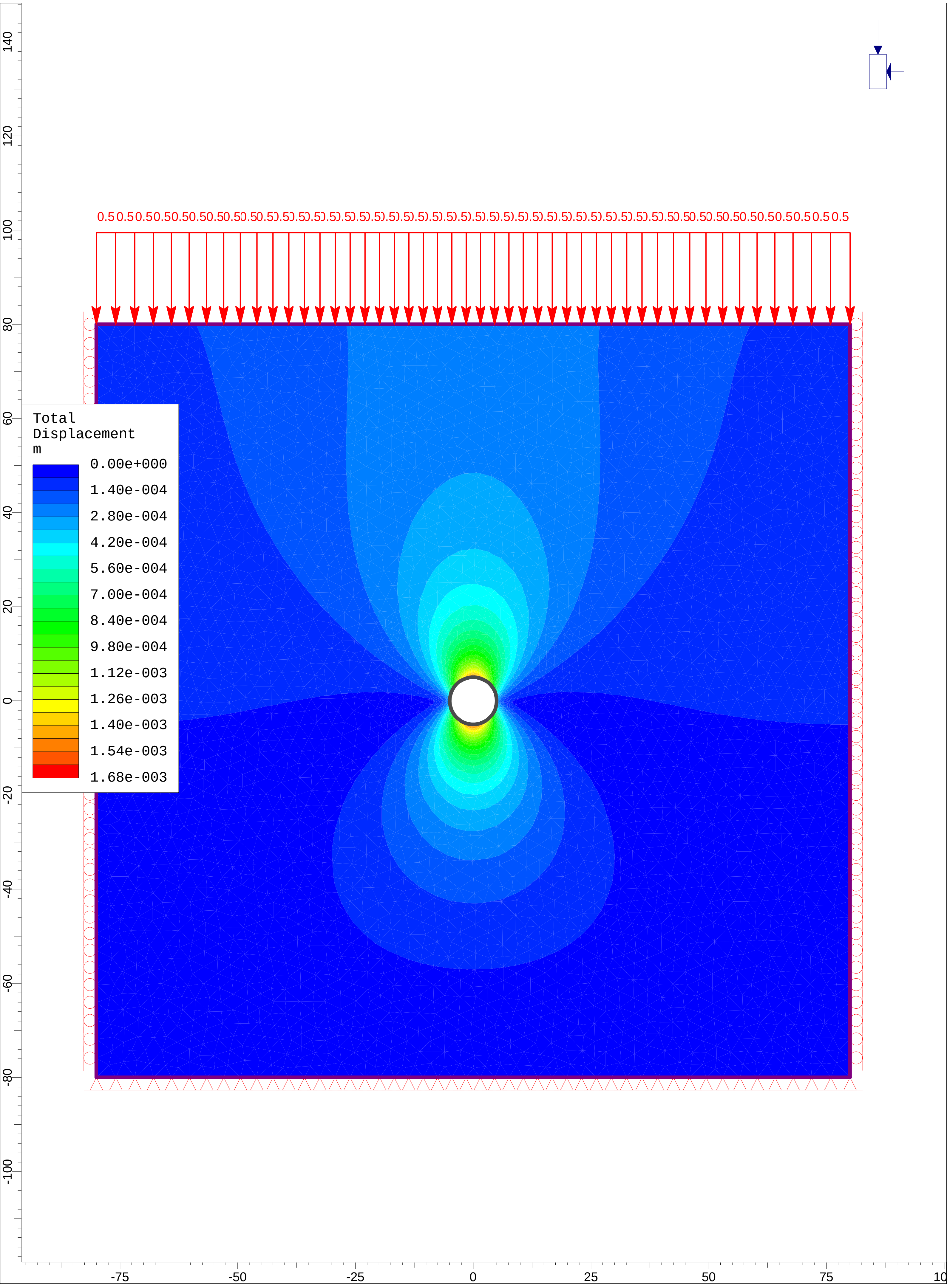
Ομοιογενές προσομοίωμα

Γραμμική κατανομή του E_i

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


Ground Elevation : 100 m
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total Displacement m
0.00e+000
1.40e-004
2.80e-004
4.20e-004
5.60e-004
7.00e-004
8.40e-004
9.80e-004
1.12e-003
1.26e-003
1.40e-003
1.54e-003
1.68e-003
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75

Phase2 Analysis Information

Document Name

4F 50%

Project Settings

General
  Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
  Author: George Tziallas
  Company: NTUA
  Number of Stages: 4
  Analysis Type: Plane Strain
  Solver Type: Gaussian Elimination
  Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
  Maximum Number of Iterations: 500
  Tolerance: 0.001
  Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
  Method: Piezometric Lines
  Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 10464
  Number of nodes on Stage 1: 5327
Number of elements on Stage 2: 10464
  Number of nodes on Stage 2: 5327
Number of elements on Stage 3: 10464
  Number of nodes on Stage 3: 5327
Number of elements on Stage 4: 8919
  Number of nodes on Stage 4: 4603

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
  (maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
  Minimum interior angle < 20.0 degrees
  Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: 50%
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 12657 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406

s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 6328 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 1582 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00647
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: 50% LOOSENING B, Area Excavated: 78.333 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 78.333 m2
Excavation Perimeter: 31.395 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 78.333 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.395 m (3.55271e-015 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 78.304 m2 (-0.0290749 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.389 m (-0.00581106 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.972 m2 (-0.0284465 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.00024206 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0363147 %

Displacements

Maximum total displacement for Stage 1: 2.00681e-015 m
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.0015624 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 102

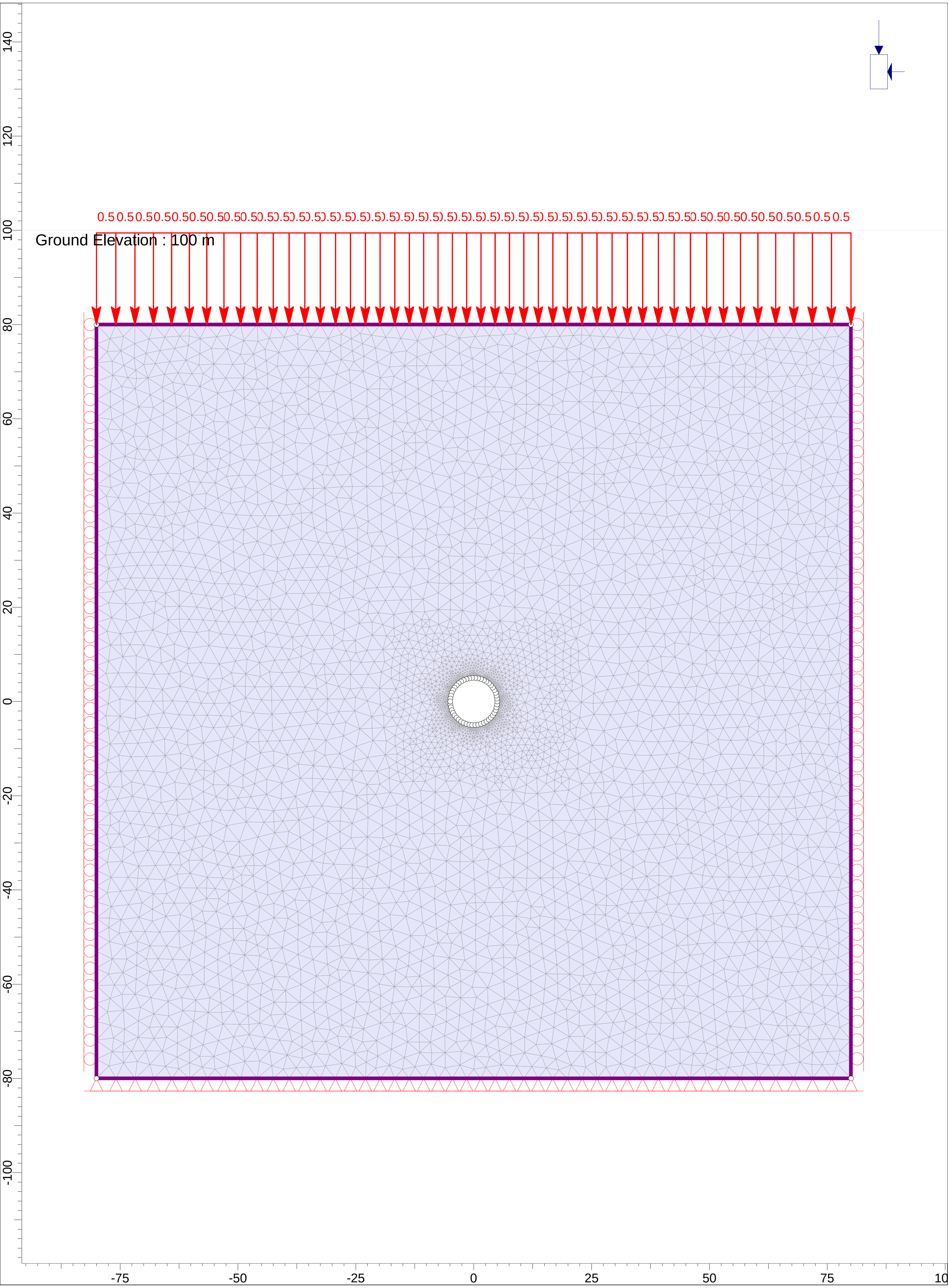
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Α4

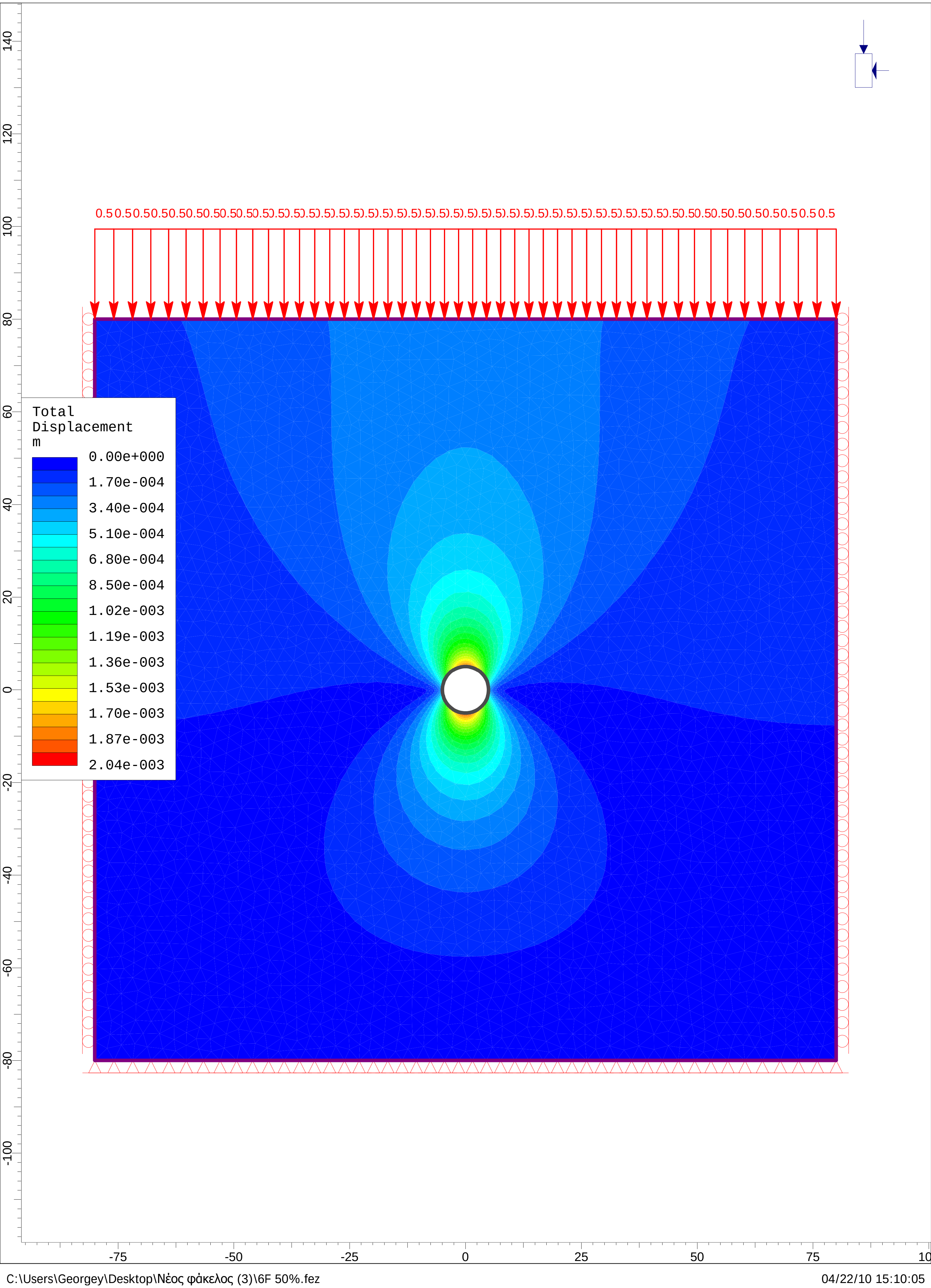
Ομοιογενές προσομοίωμα

«Μέση» κατανομή του Ei

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


Ground Elevation : 100 m
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total
Displacement
m
0.00e+000
1.70e-004
3.40e-004
5.10e-004
6.80e-004
8.50e-004
1.02e-003
1.19e-003
1.36e-003
1.53e-003
1.70e-003
1.87e-003
2.04e-003
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10

Phase2 Analysis Information

Document Name

6F 50%

Project Settings

General
Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
Author: George Tziallas
Company: NTUA
Number of Stages: 4
Analysis Type: Plane Strain
Solver Type: Gaussian Elimination
Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 10334
Number of nodes on Stage 1: 5262
Number of elements on Stage 2: 10334
Number of nodes on Stage 2: 5262
Number of elements on Stage 3: 10334
Number of nodes on Stage 3: 5262
Number of elements on Stage 4: 8789
Number of nodes on Stage 4: 4538

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: 50%
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 10105 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406

s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 5052 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 1263 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.406
s parameter: 0.00674
a parameter: 0.504
Residual mb parameter: 2.406
Residual s parameter: 0.00674
Residual a parameter: 0.504
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: 50% LOOSENING B, Area Excavated: 78.333 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 78.333 m2
Excavation Perimeter: 31.395 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 78.333 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.395 m (3.55271e-015 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 78.297 m2 (-0.0364067 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.388 m (-0.00727653 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.964 m2 (-0.0356133 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.00030307 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0454638 %

Displacements

Maximum total displacement for Stage 1: 1.75506e-015 m
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.0019557 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 101

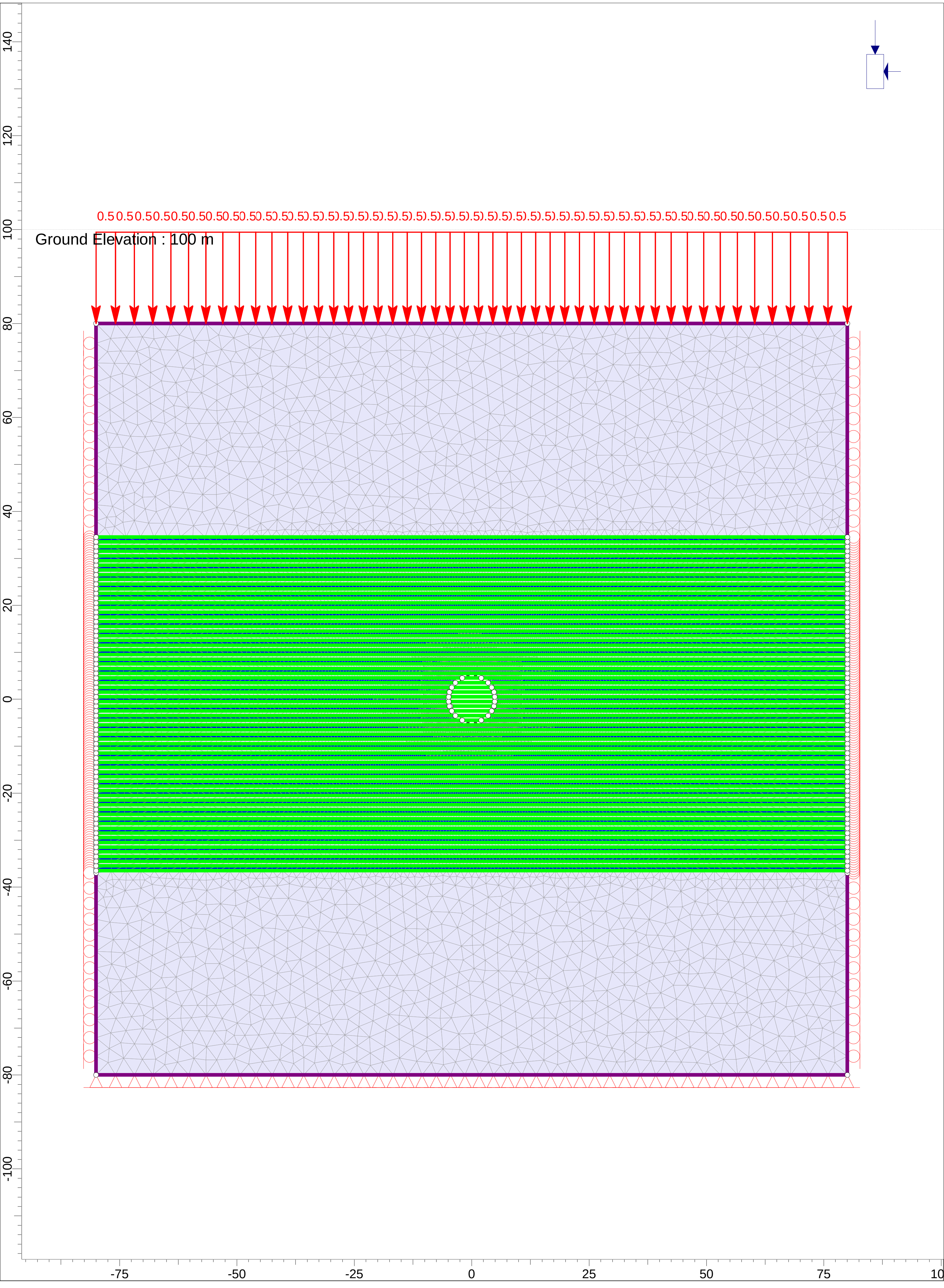
ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Β1

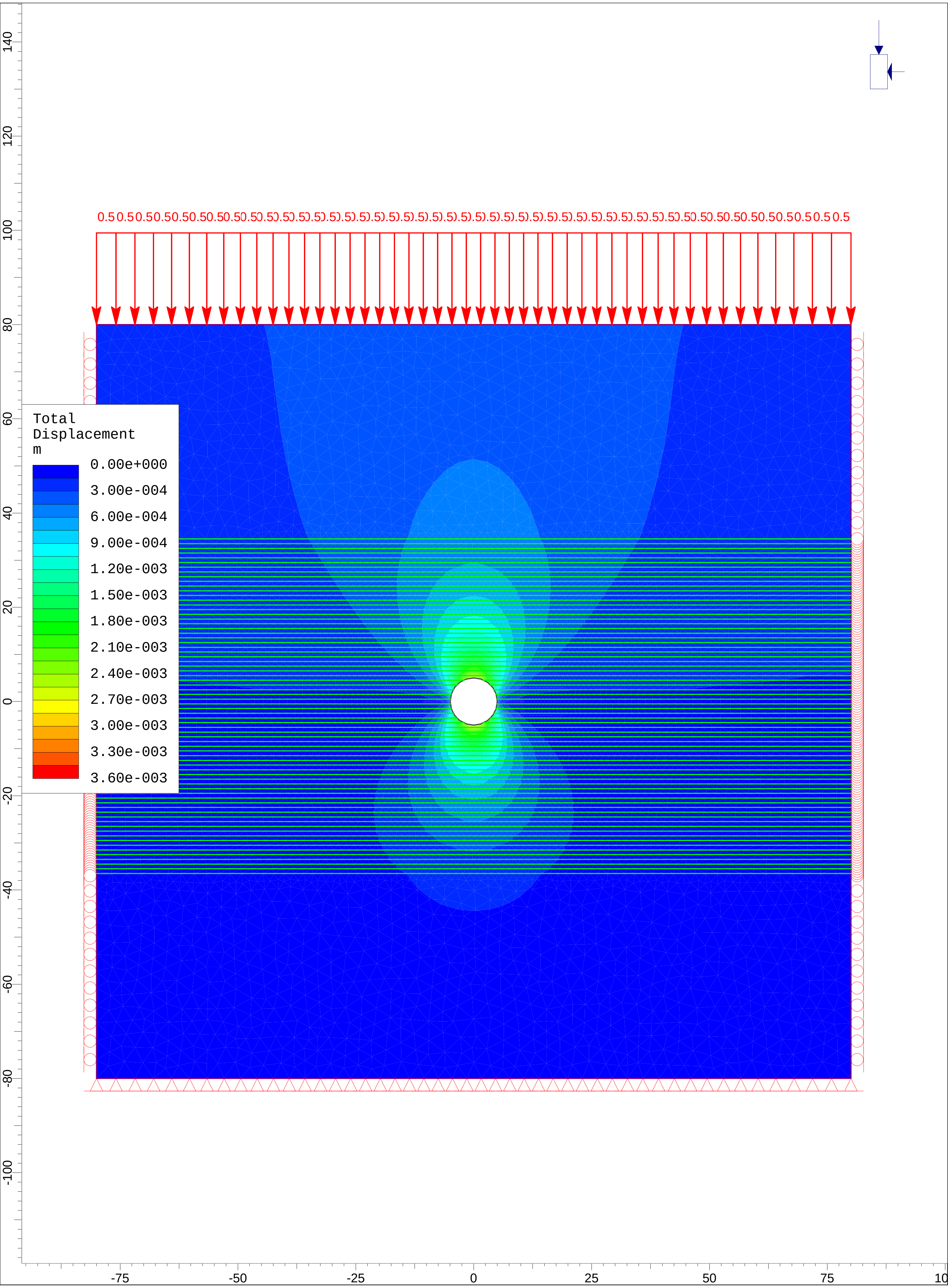
Ετερογενές προσομοίωμα

Μεταβλητή τιμή του GSI

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


0.5
Ground Elevation : 100 m
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total Displacement m
0.00e+000
3.00e-004
6.00e-004
9.00e-004
1.20e-003
1.50e-003
1.80e-003
2.10e-003
2.40e-003
2.70e-003
3.00e-003
3.30e-003
3.60e-003
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10

Phase2 Analysis Information

Document Name

9C 50% Layered

Project Settings

General
  Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
  Author: George Tziallas
  Company: NTUA
  Number of Stages: 4
  Analysis Type: Plane Strain
  Solver Type: Gaussian Elimination
  Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
  Maximum Number of Iterations: 500
  Tolerance: 0.001
  Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
  Method: Piezometric Lines
  Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 27538
  Number of nodes on Stage 1: 13984
Number of elements on Stage 2: 27538
  Number of nodes on Stage 2: 13984
Number of elements on Stage 3: 27538
  Number of nodes on Stage 3: 13984
Number of elements on Stage 4: 24490
  Number of nodes on Stage 4: 12513

Mesh Quality

1133 of 27538 Elements (4.1 % of elements) are poor quality elements
0 of 27538 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
1088 of 27538 Elements (4.0 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
68 of 27538 Elements (0.2 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
  (elements can be of poor quality for more than one reason)

Mesh Quality Statistics
The worst element has (ratio = 6.56), (min angle = 8.77) (max angle = 156.05)
10.0% of elements have: (ratios > 2.4), (min angles < 23.9) (max angles > 89.2)
20.0% of elements have: (ratios > 1.9), (min angles < 31.2) (max angles > 86.7)
30.0% of elements have: (ratios > 1.7), (min angles < 36.3) (max angles > 83.3)
40.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 40.0) (max angles > 80.3)
50.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 42.9) (max angles > 77.7)
60.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 45.4) (max angles > 74.9)
70.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 47.7) (max angles > 72.5)
80.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 49.8) (max angles > 70.3)
90.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 52.3) (max angles > 67.8)
100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 54.8) (max angles > 65.2)

Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: Stage 1

Material Properties

Material: SANDSTONE
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 13823 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SANDSTONE LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 6911 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SANDSTONE LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 1728 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 95 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic

Young's modulus: 5222 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE L1
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 2611 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: SILTSTONE L2
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 652 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: SANDSTONE LOOSENING B, Area Excavated: 37.703 m2
Material: SILTSTONE L2, Area Excavated: 39.551 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 77.254 m2
Excavation Perimeter: 31.287 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 77.254 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.287 m (0 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)

Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2

Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3

Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 77.208 m2 (-0.0459071 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.278 m (-0.00914904 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.950 m2 (-0.0503645 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.000478675 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0651932 %

Displacements

Maximum total displacement for Stage 1: 0 m
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.00252347 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 359

ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Β4

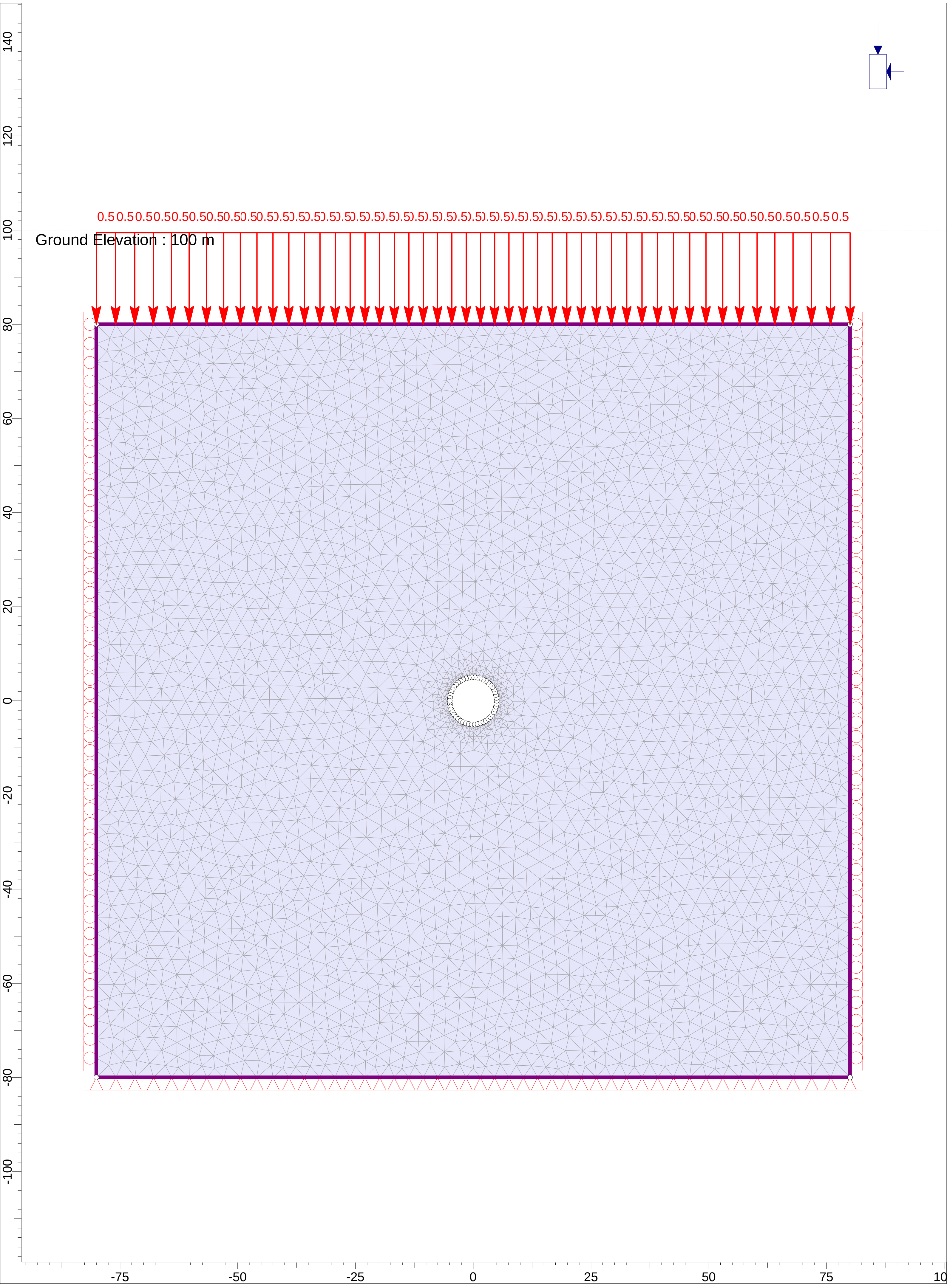
Ομοιογενές προσομοίωμα

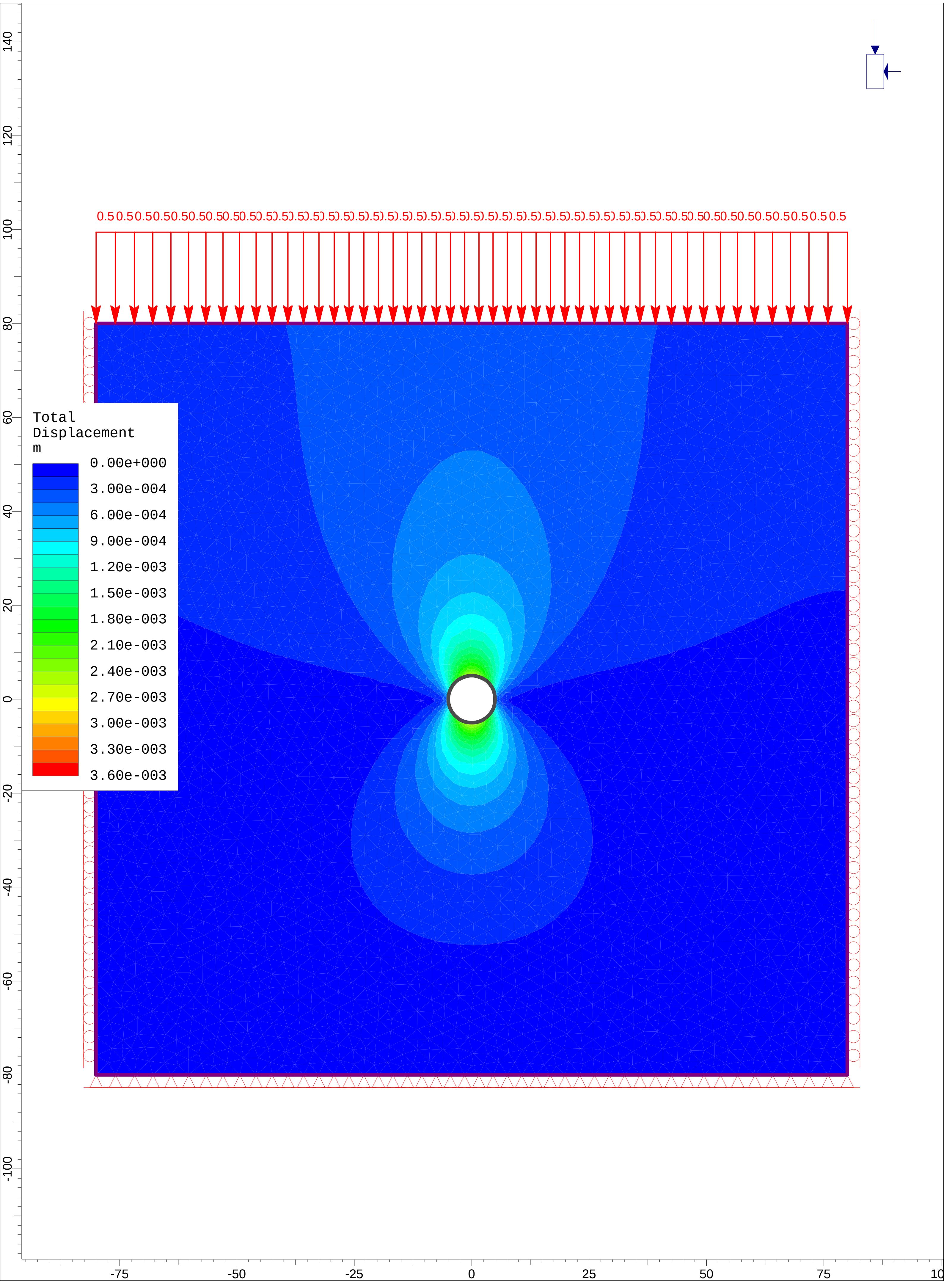
«Μέση» κατανομή του Ei

Μεταβλητή τιμή του GSI

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5
Ground Elevation : 100 m
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
10


Total
Displacement
m
0.00e+000
3.00e-004
6.00e-004
9.00e-004
1.20e-003
1.50e-003
1.80e-003
2.10e-003
2.40e-003
2.70e-003
3.00e-003
3.30e-003
3.60e-003

Phase2 Analysis Information

Document Name

8C 50%

Project Settings

General
Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
Author: George Tziallas
Company: NTUA
Number of Stages: 4
Analysis Type: Plane Strain
Solver Type: Gaussian Elimination
Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 7378
Number of nodes on Stage 1: 3784
Number of elements on Stage 2: 7378
Number of nodes on Stage 2: 3784
Number of elements on Stage 3: 7378
Number of nodes on Stage 3: 3784
Number of elements on Stage 4: 6863
Number of nodes on Stage 4: 3575

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: 50%
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 7603 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012

s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 3801 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 950 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 43 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: 50% LOOSENING B, Area Excavated: 78.333 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 78.333 m2
Excavation Perimeter: 31.395 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 78.333 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.395 m (-3.55271e-015 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 78.285 m2 (-0.0484118 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.386 m (-0.00967243 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.953 m2 (-0.0473617 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.000403109 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0604618 %

Displacements

Maximum total displacement for Stage 1: 3.9249e-015 m
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.0025804 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 62

ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C1

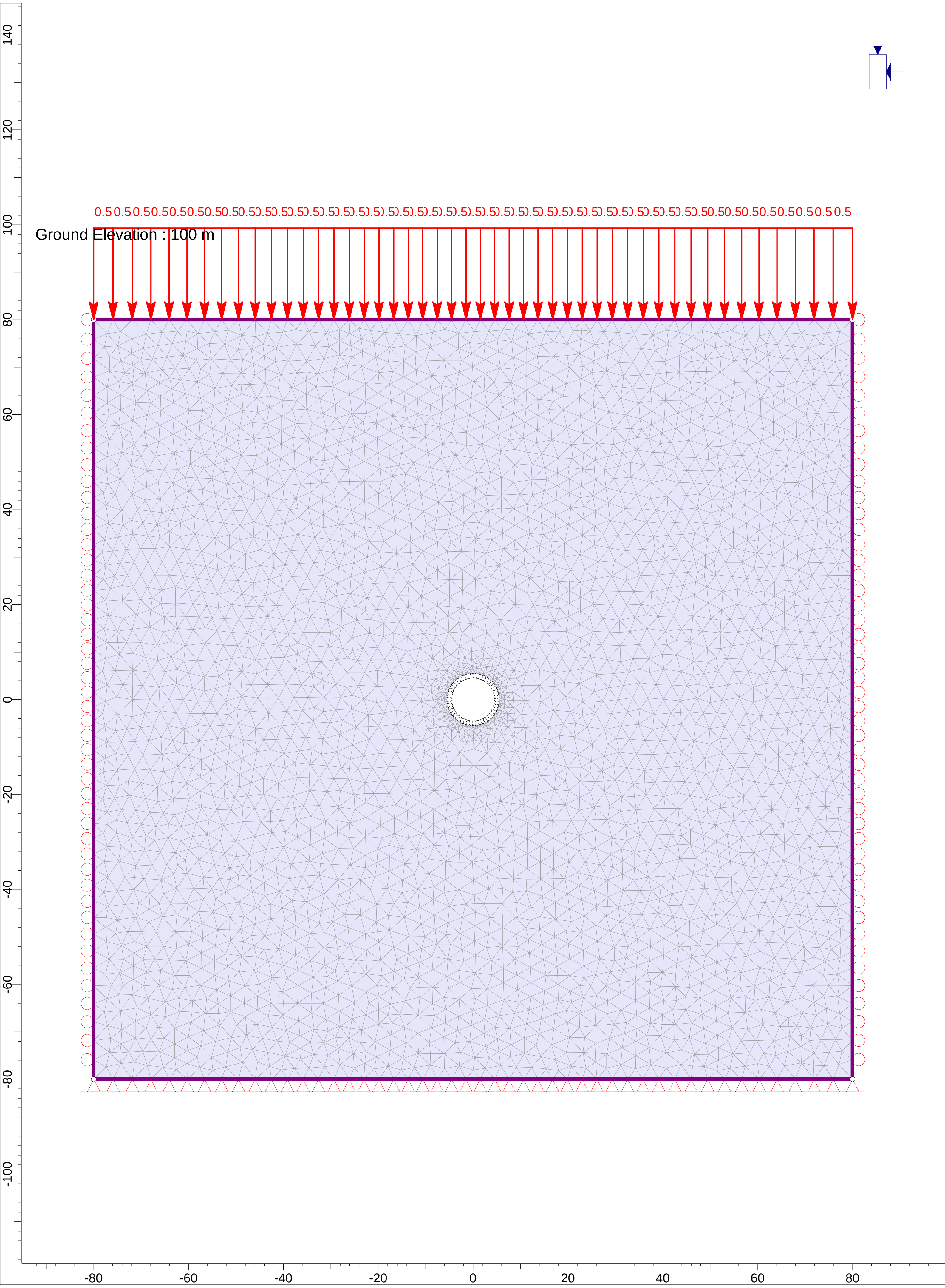
Ομοιογενές προσομοίωμα

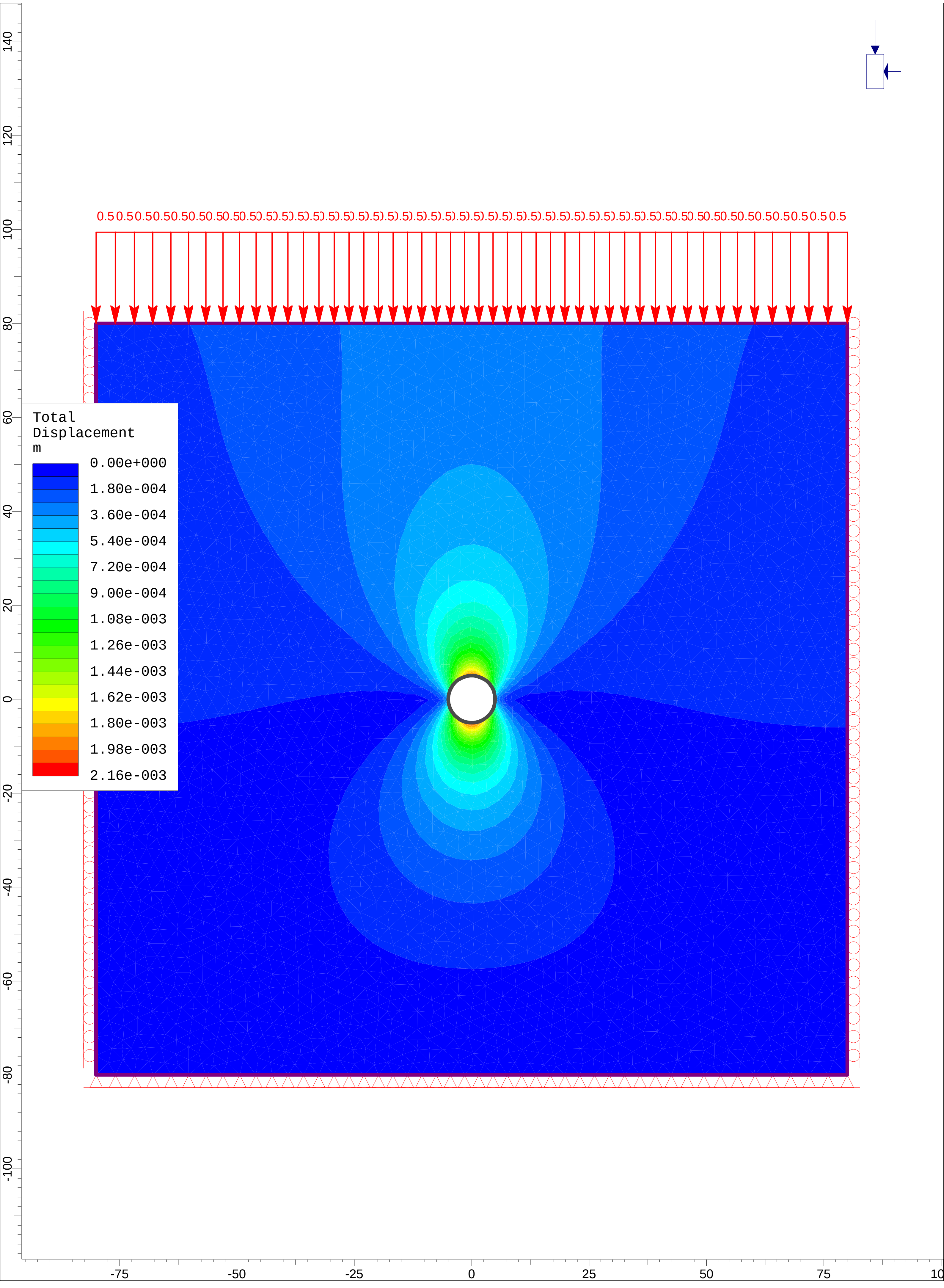
Κατανομή E_i σύμφωνα με την κατανομή σ_{ci} όπως προτείνεται από τη βιβλιογραφία (*Marinos V., 2007*)

Μεταβλητή τιμή του GSI

Ποσοστό Ιλυολίθου 50%

Υπερκείμενα 100m


Ground Elevation : 100 m
0.5
140
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80


Total
Displacement
m
0.00e+000
1.80e-004
3.60e-004
5.40e-004
7.20e-004
9.00e-004
1.08e-003
1.26e-003
1.44e-003
1.62e-003
1.80e-003
1.98e-003
2.16e-003

Phase2 Analysis Information

Document Name

11B 50%

Project Settings

General
  Project Title: Heterogenous Rock Mass TEST1
  Author: George Tziallas
  Company: NTUA
  Number of Stages: 4
  Analysis Type: Plane Strain
  Solver Type: Gaussian Elimination
  Units: Metric, stress as MPa
Stress Analysis
  Maximum Number of Iterations: 500
  Tolerance: 0.001
  Number of Load Steps: Automatic
Groundwater
  Method: Piezometric Lines
  Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m3

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 100 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m3
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.5
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on Stage 1: 7378
  Number of nodes on Stage 1: 3784
Number of elements on Stage 2: 7378
  Number of nodes on Stage 2: 3784
Number of elements on Stage 3: 7378
  Number of nodes on Stage 3: 3784
Number of elements on Stage 4: 6863
  Number of nodes on Stage 4: 3575

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
  (maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
  Minimum interior angle < 20.0 degrees
  Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: 50%
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight: 0.025 MN/m3
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 9523 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 59.5 MPa
mb parameter: 2.012

s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING A
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 4761 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 59.5 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Material: 50% LOOSENING B
No initial element loading
Elastic type: isotropic
Young's modulus: 1190 MPa
Poisson's ratio: 0.25
Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown
Material type: Plastic
Dilation Parameter 0
Compressive strength: 59.5 MPa
mb parameter: 2.012
s parameter: 0.00387
a parameter: 0.506
Residual mb parameter: 2.012
Residual s parameter: 0.00387
Residual a parameter: 0.506
Piezo to use: None
Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 4
Material: 50% LOOSENING B, Area Excavated: 78.333 m2

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas
Excavation Area: 78.333 m2
Excavation Perimeter: 31.395 m
External Boundary Area: 25600.000 m2
External Boundary Perimeter: 640.000 m

Stage 1
Excavation Area: 78.333 m2 (0 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.395 m (-3.55271e-015 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25600.000 m2 (0 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (0 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0 %

Stage 2
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 3
Values not available until this stage is viewed in a window

Stage 4

Excavation Area: 78.295 m2 (-0.0380674 m2 change from original area)
Excavation Perimeter: 31.388 m (-0.00760913 m change from original perimeter)
External Boundary Area: 25599.963 m2 (-0.0370851 m2 change from original area)
External Boundary Perimeter: 640.000 m (-0.0003163 m change from original perimeter)
Volume Loss to Excavation: 0.0473427 %

Displacements

Maximum total displacement for Stage 1: 3.1336e-015 m
Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window
Displacement data is not available for Stage 3 until total displacement is viewed in a window
Maximum total displacement for Stage 4: 0.0020429 m

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 0
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 2 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements is not available for Stage 3 until the stage is viewed in a window
Number of yielded mesh elements on Stage 4: 27