



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΟΡΩΠΙΟΥ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΚΟΦΙΝΑ ΚΑΛΛΙΟΠΗ
ΜΟΝΙΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2023

© 2023 Κοφινά Καλλιόπη, Μονιά Αναστασία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
 Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης αισθανόμαστε την ανάγκη και την υποχρέωση να εκφράσουμε τις θερμές ευχαριστίες μας στους ανθρώπους όπου καθένας από αυτούς έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της εργασίας μας. Έτσι λοιπόν θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε αρχικά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Γ.Τσινίδη και τον συνεπιβλέποντα Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Α.Σαββίδη για την πολύτιμη βοήθεια και τη συνεχή καθοδήγηση κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Α.Αντωνίου μέλος του Ειδικού Διδακτικού Προσωπικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την βοήθεια που μας παρείχε και για τις ουσιώδεις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη θα επιθυμούσαμε να ευχαριστήσουμε τον υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Α.Παπαδόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του, με τις διευκρινήσεις που μας έδωσε για την δημιουργία των νευρωνικών δικτύων.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μας εργασίας τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Γεωτεχνικού Τομέα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Γ.Εφραιμίδη και την Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κα. Π.Καλλιόγλου.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ορισμένα αγαπητά πρόσωπα τα οποία μας συμπαράσταθηκαν με την υπομονή τους και την θετική τους σκέψη και συνέβαλαν στην εκπλήρωση των στόχων μας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλουμε στους γονείς μας που όλα αυτά τα χρόνια μας στηρίζουν σε κάθε μας βήμα και για αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΟΡΩΠΙΟΥ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Καλλιόπη Κοφινά, Αναστασία Μονιά
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την εξέταση του υπεδάφους στην περιοχή Κορωπίου Αττικής μέσω γεωτρήσεων, την ανάλυση των δειγμάτων λήψης στο εργαστήριο και την δημιουργία δύο νευρωνικών μοντέλων που προβλέπουν το μέτρο ελαστικότητας E και την συνοχή c της βραχώμαζας στην περιοχή μελέτης.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιήθηκαν επτά γεωτρήσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος και λήφθηκαν δείγματα, ώστε να εξαχθούν οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχώμαζας. Οι εδαφικές στρώσεις που εντοπίστηκαν ήταν οι εξής δύο, Κροκαλο-λατυποπαγές με αμμώδες-αργιλικό και ασβεστιτικό συνδετικό υλικό, και αργιλικός σχιστόλιθος. Τα τελικά δεδομένα περιελάμβαναν αποτελέσματα επί τόπου αλλά και εργαστηριακών δοκιμών όπως κοκκομετρική ανάλυση, και μονοαξονική θλίψη. Για κάθε δείγμα, ανάλογα με τον εδαφικό σχηματισμό, επιλέχθηκε η κατάλληλη δοκιμή, και εξήχθησαν τιμές για το ειδικό βάρος, την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, το δείκτη σημειακής φόρτισης και τα όρια Atterberg. Με τις τιμές αυτές για την βραχώμαζα υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας και η συνοχή μέσω του προγράμματος Rocklab.

Αφού συγκεντρώθηκαν τα παραπάνω δεδομένα, δημιουργήθηκαν δύο νευρωνικά δίκτυα μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ανοικτού κώδικα MSolve του εργαστηρίου Στατικής και Αντισεισμικών ερευνών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών (ΕΜΠ), τα οποία εξάγουν τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και την συνοχή της βραχώμαζας.

Το αποτέλεσμα της διπλωματικής αυτής είναι το μοντέλο των νευρωνικών δικτύων με τα οποία μπορούν να υπολογιστούν το μέτρο ελαστικότητας και η συνοχή για περιοχές με όμοιους βραχώδεις σχηματισμούς.

Investigation of the Spatial Variability of Soil Mechanical Properties in Koropi Region of Attica

Kalliopi Kofina, Anastasia Monia

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Grigorios Tsinides, Assistant Professor

Abstract

The current diploma thesis aims at investigating the subsoil in Koropi Region of Attica through drilling, by analyzing the collected samples in the laboratory, and creating a neural network model that predicts the soil's elastic modulus (E) and cohesion (c).

Specifically, seven drillings were conducted in the area of interest, and samples were collected to extract the geotechnical parameters of the subsoil/rock. Two soil layers were identified, namely clayey-oriented, fully disintegrated cobblestone rock with substantial clayey- and calcium-oriented connecting substances. The final dataset included insitu measurements as well as laboratory tests such as grain size analysis and uniaxial compression tests. For each sample, suitable tests were selected based on the soil formation and the results were the specific gravity, uniaxial compressive strength, Atterberg limits, and point load index. With these values for rock mass, the elastic modulus and cohesion were calculated using the Rocklab program.

After the dataset was gathered, a neural network was created by using the open-source computational program MSolve from the Laboratory of Structural Analysis of the School of Civil Engineering National Technical University of Athens. This program provides values for the Elasticity Index and the cohesion of rock masses.

The outcome of this thesis is the model of the neural network, which can be used to calculate the elasticity index and cohesion for areas with rocky formations, along with relevant commentary.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	13
1.1	Σκοπός και Διάρθρωση Διπλωματικής	13
Κεφάλαιο 2	: Είδη και Ιδιότητες Εδαφών	14
2.1	ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	14
2.1.1	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ	15
2.2	ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΔΑΦΗ	18
2.3	ΑΜΜΩΔΗ ΕΔΑΦΗ	20
2.4	ΒΡΑΧΩΔΗ ΕΔΑΦΗ	20
2.5	ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	21
2.5.1	ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΡΩΝ- ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ	22
2.5.2	ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	22
2.5.3	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ	22
2.5.4	ΠΟΡΩΔΕΣ	23
2.5.5	ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	23
2.5.6	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	24
2.6	ΟΡΙΑ ATTERBERG	24
2.6.1	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΟΡΙΑ ATTERBERG	26
2.7	ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΩΝ	27
2.7.1	ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ	27
2.8	ΣΥΝΟΧΗ	28
2.9	ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	28
2.10	ΟΡΘΕΣ, ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	29

2.11	MOHR COULOMB	30
2.12	Κριτήριο Hoek Brown για Βραχώμαζες	32
2.13	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΆΦΗ	33
2.14	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΆΦΗ	34
2.15	Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΜΜΟΥΣ	36
Κεφάλαιο 3 : ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ		37
3.1	Εισαγωγή	37
3.2	Κατηγορίες γεωτρήσεων	37
3.2.1	Ως προς το βάθος τους	37
3.2.2	Ως προς την μέθοδο διάτρησης	38
3.2.3	Ως προς τον τρόπο εξαγωγής του δείγματος	38
3.3	Περιστροφικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις	38
3.4	Γεωτρητικός εξοπλισμός	39
3.4.1	Γεωτρύπανα	39
3.4.2	Στελέχη διάτρησης	40
3.4.3	δειγματοληπτες	40
3.5	Επί τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής	42
3.5.1	Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης, SPT (Standard Penetration Test)	43
3.5.2	Δοκιμή διείσδυσης Κώνου CPT	46
3.6	Δοκιμές εδαφοδυναμικής : Δοκιμή cross-hole και down-hole	47
3.6.1	Cross-hole	48
3.6.2	Down-hole	49
Κεφάλαιο 4 Μελέτη και επεξεργασία δεδομένων		50
4.1	Εισαγωγή	50
4.2	Δειγματοληψία και επί τόπου δοκιμές – στάθμη υπόγειων υδάτων	50
4.3	Γεωλογία περιοχής	51
4.4	Διαδικασία και επεξεργασία εργαστηριακών αποτελεσμάτων	54

4.5	Θεώρηση βραχύδους σχηματισμού	59
Κεφάλαιο 5	Υπολογισμός εδαφικών παραμέτρων μέσω των Νευρωνικών δικτύων	65
5.1	Νευρωνικά Δίκτυα	65
5.2	Επεξεργασία Δεδομένων	67
5.3	Αποτελέσματα του Νευρωνικού Δικτύου	73
5.4	Άλλες εφαρμογές του Νευρωνικού Δικτύου	76
Κεφάλαιο 6	Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής εργασίας	77
6.1	Συμπεράσματα	77
6.2	Προτάσεις μελλοντικής εργασίας	77
Βιβλιογραφία 79		
6.2.1	Βιβλιογραφική αναφορά: Βιβλίο	79
6.2.2	Διαδικτυακές αναφορές	79
6.2.3	Διπλωματικές εργασίες	79
6.2.4	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ	80
Παράρτημα Α 81		

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τους Βρετανικούς κανονισμούς (Καββαδάς, 2016)	16
Πίνακας 2. Είδη κοσκίνων (Καββαδάς, 2016)	17
Πίνακας 3. Σχετική πυκνότητα αμμωδών εδαφών (Καββαδάς, 2016)	24
Πίνακας 4. Χαρακτηρισμός κοκκωδών εδαφών για την γωνία τριβής ϕ	45
Πίνακας 5. Χαρακτηρισμός συνεκτικών εδαφών για την γωνία τριβής ϕ	45
Πίνακας 6. Βάθη γεωτεχνικής στρώσης I	53
Πίνακας 7. Βάθη γεωτεχνικής στρώσης II	54
Πίνακας 8. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης I, βραχώδης σχηματισμός	55
Πίνακας 9. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης II, βραχώδης σχηματισμός	55
Πίνακας 10. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης I, εδαφικός σχηματισμός	56
Πίνακας 11. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης II, εδαφικός σχηματισμός	57
Πίνακας 12: Πίνακας δεδομένων εισόδου (σ_c , Is_{50} , GSI) και τιμές εξόδου (E και c)	68
Πίνακας 13. Μέγιστο εκτιμώμενο σφάλμα του μοντέλου	75

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών (Καββαδάς, 2016).....	17
Σχήμα 2. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών (Καββαδάς, 2016)	18
Σχήμα 3. Ηλεκτρική φόρτιση των αργιλικών πλακιδίων (Καββαδάς,2016).....	19
Σχήμα 4. Στάδια των εδαφικών υλικών (Καββαδάς, 2016)	21
Σχήμα 5. Διάγραμμα πλαστιμότητας Casagrande (Καββαδάς, 2016).....	27
Σχήμα 6. Ορθές και διατμητικές τάσεις στην επίπεδη εντατική κατάσταση	30
Σχήμα 7. Κύκλος του Mohr	32
Σχήμα 8. Πρότυπος δειγματολήπτης Terzaghi	43
Σχήμα 10. Γεωλογικός χάρτης περιοχής Κορωπίου.....	52
Σχήμα 9: Θέση Γεωτρήσεων Κορωπίου.....	52
Σχήμα 11. Δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη Γεώτρησης Γ1 (βάθους 2,00-2,25).....	58
Σχήμα 12. Γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) (Από Hoek and Marinos, 2000)	60
Σχήμα 13. Τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο	61
Σχήμα 14. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab.....	62
Σχήμα 15. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab.....	63
Σχήμα 16. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab.....	64
Σχήμα 17. Μορφή Νευρωνικού Δικτύου	66
Σχήμα 18. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψης.....	69
Σχήμα 19. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψης.....	70
Σχήμα 20. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και του δείκτη σημειακής φόρτισης	70
Σχήμα 21. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και του δείκτη σημειακής φόρτισης.....	71
Σχήμα 22. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και του ειδικού βάρους.....	71
Σχήμα 23. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και του ειδικού βάρους.....	72
Σχήμα 24. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων εισόδου και του μέτρου ελαστικότητας	72
Σχήμα 25. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων εισόδου και της συνοχής	73

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Διάρθρωση Διπλωματικής

Η έρευνα του εδάφους αποτελεί ένα ζήτημα που απασχολεί τους εδαφομηχανικούς εδώ και δεκάδες χρόνια. Η γνώση των ιδιοτήτων κάθε είδους εδαφών είναι αναγκαία για την σωστή μελέτη και την αποφυγή αστοχιών σε μελλοντικές κατασκευές. Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συλλογή δεδομένων που προέρχονται από την πραγματοποίηση επτά γεωτρήσεων στην περιοχή του Κορωπίου, Αττικής και στη συνέχεια η δημιουργία δύο νευρωνικών δικτύων που θα υπολογίζουν το μέτρο Ελαστικότητας και τη συνοχή σε βραχώδη εδάφη, όμοια με αυτά που απαντώνται στην περιοχή αυτή.

Αρχικά στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά για τα κύρια είδη εδαφών και παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητες τους.

Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 παραθέτονται τα είδη των γεωτρήσεων και ο απαραίτητος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε μια γεώτρηση ανάλογα με τις ανάγκες. Επίσης αναφέρονται κάποιες κατηγορίες επί τόπου δοκιμών για την έρευνα του εδάφους.

Στο Κεφάλαιο 4 δίνεται η περιγραφή και το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής που εξετάζεται. Βάση των δοκιμών που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις εξάγονται τα δεδομένα από τις εργαστηριακές δοκιμές.

Στο Κεφάλαιο 5 εξηγείται τι είναι το νευρωνικό δίκτυο και πως λειτουργεί. Επίσης αναπτύσσονται τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Τέλος το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας και προτάσεις για μελλοντικές εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων.

Κεφάλαιο 2 : Είδη και Ιδιότητες Εδαφών

2.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως ένα μη συμπαγές πολυφασικό υλικό με ή χωρίς οργανική ύλη όπου τα κενά μεταξύ των κόκκων καταλαμβάνονται από υγρά ή και αέρια. Τα εδαφικά υλικά προέρχονται από τη μηχανική ή χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Η μηχανική αποσάθρωση δημιουργείται από τον παγετό, τις θερμοκρασιακές μεταβολές, την διάβρωση από το νερό και τον αέρα, καθώς και από την ενέργεια των φυτών, των ζώων και των ανθρώπων. Η αποσάθρωση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών, οφείλεται στην χημική αποσάθρωση. Τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι αποτέλεσμα κυρίως μηχανικής αποσάθρωσης ενώ τα λεπτόκοκκα της χημικής αποσάθρωσης. (Savvides, 2021), (Τριανταφύλλου, 2017)

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού κατηγοριοποιούνται τρεις τύποι εδαφών:

- Αυτόχθονα: προέρχονται από επιτόπου σχηματισμό χωρίς μεταφορά.
- Αλλόχθονα: προέρχονται από μεταφορά.
- Οργανικά: προέρχονται από προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων με προσμίξεις φυτικών υλικών σε αποσύνθεση. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

Οι πρώτες δύο κατηγορίες εδαφών προέρχονται από φυσική και χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων ενώ η τρίτη κατηγορία είναι οργανικής προέλευσης.

Στα εδαφικά υλικά, από μηχανικής πλευράς, το όριο της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη είναι μέχρι 1 Μpa περίπου ενώ υλικά μεγαλύτερης αντοχής καλούνται βράχοι ή βραχώδη υλικά.

Το πιο ευρέως γνωστό υλικό κατασκευής τεχνικών έργων είναι το έδαφος όπου πολλές φορές είναι το μόνο άμεσα διαθέσιμο υλικό. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για την κατασκευή κατοικιών, μνημείων, οδικών και σιδηροδρομικών δικτύων και αναχωμάτων για αντιπλημμυρικά έργα. Όμως λόγω της ανομοιογένειας του εδάφους, στα τεχνικά έργα είναι απαραίτητη η μελέτη των ιδιοτήτων του μέσω της γεωτεχνικής έρευνας, δηλαδή με δοκιμές και μετρήσεις σε εδαφικά δείγματα που συλλέγονται από την περιοχή ενδιαφέροντος.

Οι δοκιμές αυτές ωστόσο μπορεί να περιέχουν σφάλματα αφού η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους είναι σύνθετη και εξαρτάται από το είδος της φόρτισης και από την προϊστορία του σχηματισμού του. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας διεξάγονται συνεχείς έρευνες για τις ιδιότητες του εδάφους και τον τρόπο αντιμετώπισης των προβλημάτων. (Καββαδάς, 2016)

2.1.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ

Με τις διεργασίες και μεταβολές που συμβαίνουν στο έδαφος δημιουργούνται εδαφικοί σχηματισμοί σύμφωνα με την κοκκομετρική διαβάθμιση, τους βαθμούς ομοιομορφίας, τον βαθμό συγκόλλησης και το σχήμα των κόκκων. Διακρίνονται συνήθως σε ογκόλιθους, κροκάλες, χάλικες, άμμους, ιλύες και αργίλους. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

Πιο συγκεκριμένα οι κροκάλες, οι χάλικες και οι άμμοι ονομάζονται κοκκώδεις και μη συνεκτικοί σχηματισμοί. Οι άργιλοι συντελούνται από πολύ λεπτά φυλλόμορφα πλακίδια, έχουν συνεκτικότητα και ανήκουν στους λεπτόκοκκους σχηματισμούς. Τέλος οι ιλύες είναι μια ενδιάμεση κατάσταση των προηγούμενων δύο ομάδων, δεν διαθέτουν ή έχουν πολύ μικρή πλαστικότητα και συνεκτικότητα. Ανήκουν, επίσης, στους λεπτόκοκκους σχηματισμούς. Πιο αναλυτικά οι διαβαθμίσεις των κόκκων του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τους Βρετανικούς κανονισμούς (Καββαδάς, 2016)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΩΝ(mm)	
		Από	Έως
Χάλικες	Χονδρόκοκκοι	60	20
	Μεσόκοκκοι	20	6
	Λεπτόκοκκοι	6	2
Άμμοι	Χονδρόκοκκες	2	0.6
	Μεσόκοκκες	0.6	0.2
	Λεπτόκοκκες	0.2	0.06
Ιλύες	Χονδρόκοκκες	0.06	0.02
	Μεσόκοκκες	0.02	0.006
	Λεπτόκοκκες	0.006	0.002
Αργίλοι	-	<0.002	-

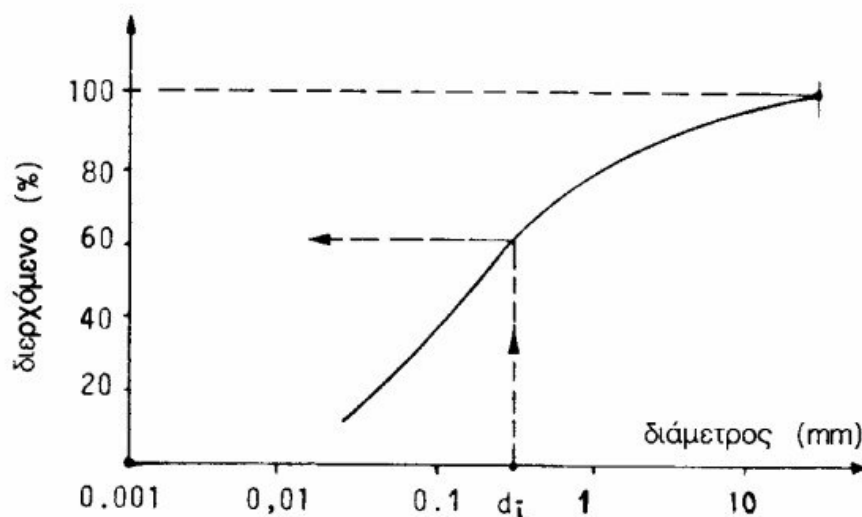
Η ταξινόμηση των μεγεθών των κόκκων των εδαφικών υλικών διεξάγεται για τους χάλικες και τις άμμους με την «Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα» ενώ για ιλύες και αργίλους με την « Κοκκομετρική ανάλυση με την μέθοδο του αραιομέτρου». (Καββαδάς, 2016)

Η μέθοδος του αραιομέτρου για την διάκριση των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών βασίζεται στον Νόμο Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η πυκνότητα του μείγματος νερού και εδάφους για διαφορετικές χρονικές στιγμές και υπολογίζεται η ταχύτητα καταβύθισης των κόκκων του εδαφικού υλικού. (Καββαδάς, 2016), (Λουπασάκης, 2015)

Όσον αφορά την ανάλυση με κόσκινα γίνεται με την μηχανική δόνηση εδαφικού δείγματος μέσω μιας σειράς κοσκίων που βαθμιαία αλλάζει η διάσταση της οπής τους (Πίνακας 2). Μετά την δόνηση και από τις μετρήσεις που διεξάγονται σχηματίζεται το διάγραμμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχήμα 1) που αποτυπώνει το μέγεθος των διάφορων κοσκίων σε σχέση με το ποσοστό του υλικού που διέρχεται από το συγκεκριμένο κόσκινο.

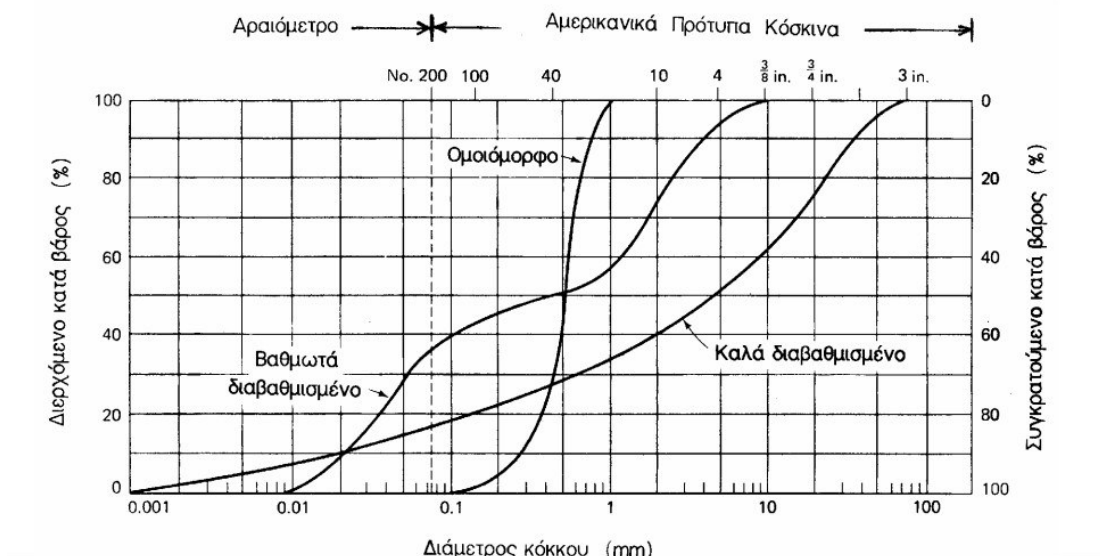
Πίνακας 2. Είδη κοσκίνων (Καββαδάς, 2016)

ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ(Nº)	ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΟΠΗΣ(mm)
4	4.75
10	2
20	0.85
40	0.425
60	0.25
100	0.15
140	0.106
200	0.075



Σχήμα 1. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών (Καββαδάς, 2016)

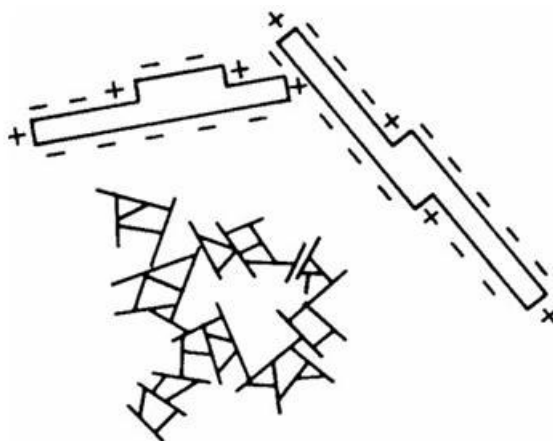
Η κλίση της κοκκομετρικής καμπύλης ορίζει αν ένα έδαφος είναι ομοιόμορφο ή κακώς διαβαθμισμένο (Σχήμα 2). Όταν εντοπίζεται μεγάλη κλίση το έδαφος χαρακτηρίζεται ομοιόμορφο, δηλαδή οι κόκκοι είναι στην ίδια τάξη μεγέθους. Η καμπύλη με ομαλή κλίση αντιπροσωπεύει το καλό διαβαθμισμένο έδαφος, δηλαδή εκείνο που διαθέτει ποικιλία μεγέθους κόκκων. Η καμπύλη με αλλαγές κλίσεων αντιπροσωπεύει ένα μείγμα εδαφους δυο η περισσότερων ομοιόμορφων υλικών. Ωστόσο κακώς διαβαθμισμένο μπορεί να οριστεί ένα ομοιόμορφο αλλά και ένα μείγμα εδαφους, διότι δεν διαθέτουν όλα τα μεγέθη των κόκκων. Επομένως ένα ομοιόμορφο έδαφος δεν ταυτίζεται με ένα καλώς διαβαθμισμένο. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)



Σχήμα 2. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών (Καββαδάς, 2016)

2.2 ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Η άργιλος είναι ένα μείγμα πεπλατυσμένων πλακιδίων, διαφόρων ορυκτών, που το μέγεθός τους δεν ξεπερνά τα 2 mm. Εμφανίζει πλαστικότητα και συνεκτικότητα που οφείλονται στα αργιλικά ορυκτά τα οποία αποτελούν τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά της. Τα αργιλικά εδάφη προέρχονται από την χημική αποσάθρωση και την μεταφορά σωματιδίων κολλοειδών διαστάσεων. Τα σωματίδια αυτά διαφοροποιούνται από το μητρικό πέτρωμα, η μία (πάχος) από τις τρεις διαστάσεις τους είναι μηδενική, γι' αυτό ονομάζονται «πλακοειδούς μορφής», και οι επιφάνειές τους είναι ηλεκτρικά φορτισμένες. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλακιδίων αργίλου οφείλεται, εκτός από τις δυνάμεις βαρύτητας και τριβής, στις ηλεκτροστατικές δυνάμεις των πλακιδίων. Η επιφάνεια των πλακιδίων είναι ηλεκτρικά φορτισμένη, με τις μεγάλες επιφάνειες να είναι αρνητικά φορτισμένες ενώ η περιφέρεια (το πάχος) είναι ίση και αντίθετα θετικά φορτισμένη (Σχήμα 3). Λόγω έλξης και άπωσης διαμορφώνεται και η σύνδεση των πλακιδίων με διάφορες μορφές. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Λουπασάκης, 2015), (Τριανταφύλλου, 2017)



Σχήμα 3. Ηλεκτρική φόρτιση των αργιλικών πλακιδίων (Καββαδάς, 2016)

Η μηχανική συμπεριφορά των λεπτόκοκκων εδαφών επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία του νερού στους πόρους. Το μόριο του νερού παρόλο που είναι ηλεκτρικά ουδέτερο έχει ιδιότητες ηλεκτρικού δίπολου. Δηλαδή έλκονται προς την ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και συνδέονται ισχυρά δημιουργώντας ένα ενιαίο σώμα. Λόγω της σύνδεσης των αργιλικών πλακιδίων με το μόριο του νερού δημιουργείται μια ζώνη γύρω από αυτό, η οποία καλείται «διπλή στρώση» διότι αναπτύσσεται στις δύο επιφάνειες του πλακιδίου. Η έλξη μεταξύ τους είναι πιο ισχυρή στην επιφάνεια ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση εξασθενεί. Οι μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών καθορίζονται από το μέγεθος της διπλής στρώσης. Εάν αυξηθεί η ποσότητα του νερού στους πόρους των αργιλικών εδαφών, αυξάνεται και το πάχος της διπλής στρώσης και επομένως οι συνδέσεις των πλακιδίων γίνονται ασθενέστερες και κατ'επέκταση μειώνεται η διατμητική αντοχή.

Οι κυριότερες ομάδες αργιλικών ορυκτών είναι οι καολινίτες, οι μοντμοριλλονίτες, οι ιλλίτες, οι χλωρίτες και οι βερμικουλίτες.

Γενικότερα η άργιλος χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή πλίνθων και προϊόντων κεραμευτικής. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Καββαδάς, 2016)

2.3 ΑΜΜΩΔΗ ΕΔΑΦΗ

Τα αμμώδη εδάφη αποτελούνται κυρίως από άμμο, η οποία αποτελεί το κυρίαρχο κομμάτι της σύστασης τους. Αυτά τα εδάφη είναι γνωστά για την διαπερατότητα τους στο νερό και στον αέρα, και συνήθως έχουν περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης υδάτων και θρεπτικών συστατικών.

Στα χονδρόκοκκα εδάφη, όπως η άμμος, η παρουσία νερού (σε ηρεμία) δεν αλλοιώνει την μηχανική τους συμπεριφορά, έτσι η γωνία διατμητικής τριβής παραμένει σταθερή σε ξηρή και κορεσμένη άμμο. Δεν υφίστανται συνδέσεις ανάμεσα στους κόκκους της ξηρής άμμου και θεωρείται μη συνεκτικό υλικό. Οι δυνάμεις που εμφανίζονται είναι οι δυνάμεις τριβής και αλληλοσύνδεσής τους. Η πιθανότητα να παρουσιαστεί μικρή συνοχή αποδίδεται στην χημική αλλοίωση της επιφάνειας των κόκκων. Τα μη συνεκτικά εδάφη καλούνται ψαθυρά με το πιο σύνηθες στοιχείο να είναι η άμμος. (Γκαζέτας, 2007)

2.4 ΒΡΑΧΩΔΗ ΕΔΑΦΗ

Τα βραχώδη εδάφη αποτελούνται κυρίως από πολύ υψηλά ποσοστά πετρωμάτων. Καταλαμβάνουν το επιφανειακό μέρος του φλοιού της γης και σχηματίζονται από φυσικές και χημικές τροποποιήσεις των βράχων. Η όψη τους είναι συνήθως γκριζωπή ή ανοιχτό καφέ λόγω της παρουσίας των λίθων. Περιέχουν θραύσματα άμμου, ασβέστη και πηλού που μερικές φορές ξεπερνούν τα 2mm. Έχουν περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης νερού και χαρακτηρίζονται ως ημιδιαπερατά. Όταν η πυκνότητα του πετρώματος είναι σημαντική, η γεώτρηση καθίσταται σχεδόν αδύνατη και το πέτρωμα αυτό χρησιμεύει ως υλικό πλήρωσης για την δημιουργία δρόμων κ.α.

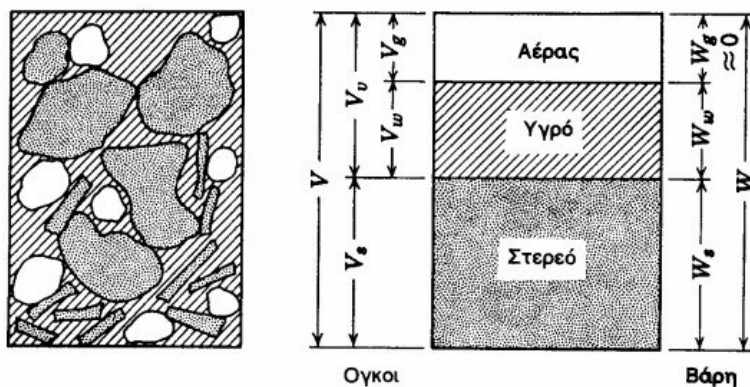
Τα πετρώματα διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο προέλευσης τους, σε τρεις κατηγορίες:

- Τα πυριγενή
- Τα ιζηματογενή
- Και τα μεταμορφωμένα

2.5 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό που συγκροτείται από τους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ τους και το νερό ή και αέρα. Στο Σχήμα 4 φαίνονται οι τρεις φάσεις του εδαφικού στοιχείου.

- V : ο συνολικός όγκος
- V_s : ο όγκος των στερεών κόκκων
- V_v : ο όγκος των πόρων
- V_w : ο όγκος του νερού
- V_g : ο όγκος του αέρα
- W : το συνολικό βάρος
- W_s : βάρος στερεών κόκκων
- W_w : βάρος νερού
- W_g : βάρος αέρα



Σχήμα 4. Στάδια των εδαφικών υλικών (Καββαδάς, 2016)

Ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους μέσω εργαστηριακών δοκιμών είναι αναγκαίος για την αναγνώριση και την ταξινόμησή του, ειδικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό υλικό.

2.5.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΡΩΝ- ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ

Ο λόγος κενών ή δείκτης πόρων, εκφράζει την υδροπερατότητα του εδάφους και την παραμόρφωση που ίσως υποστεί από επιβαλλόμενα φορτία. Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών κόκκων:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.1)$$

Ενδεικτικά το εύρος τιμών του δείκτη πόρων για τα αμμώδη εδάφη είναι από 0,4 έως 1,0 και για τα αργιλικά εδάφη από 0,3 έως 1,5.

2.5.2 ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Το ποσοστό υγρασίας είναι ο λόγος της μάζας του νερού των πόρων προς την μάζα των στερεών κόκκων.

$$W = \frac{M_w}{M_s} \quad (1.2)$$

Σε ένα ξηρό έδαφος η τιμή του ποσοστού υγρασίας θα είναι 0% ενώ σε ένα κορεσμένο έδαφος ζυγίζεται το εδαφικό δείγμα στην φάση κορεσμού του (μάζα M_1) και μετά από ξήρανση (μάζα M_2) υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \quad (1.3)$$

Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 100%, όπου 0% αντιστοιχεί σε ξηρό ενώ το 100% σε κορεσμένο έδαφος.

2.5.3 ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Ο βαθμός κορεσμού εκφράζει το ποσοστό του όγκου των πόρων που πληρούται με νερό και είναι ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον όγκο των κενών.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (1.4)$$

Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 100%, όπου 0% αντιστοιχεί σε ξηρό ενώ το 100% σε κορεσμένο έδαφος.

2.5.4 ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες είναι ο λόγος όγκου των κενών των πόρων προς τον ολικό όγκο του εδάφους:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1.5)$$

Τυπικές τιμές για το πορώδες στα αργιλικά εδάφη είναι μεταξύ των τιμών 0,2 και 0,6 και στα αμμώδη εδάφη μεταξύ 0,3 και 0,5.

2.5.5 ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Ο δείκτης πόρων ενός μη συνεκτικού εδαφικού υλικού εξαρτάται από την διάταξη των κόκκων του. Όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό των κενών των κόκκων τόσο μικρότερη είναι η τιμή της πυκνότητας. Για τον χαρακτηρισμό μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και μέγιστη πυκνότητα χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής πυκνότητας D_r .

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (1.6)$$

όπου e : πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου

$e_{\min}$: δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην μέγιστη συμβατική πυκνότητα

$e_{\max}$: δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα

Η τιμή της σχετικής πυκνότητας μιας άμμου εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων της. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι χαρακτηρισμοί των εδαφών ανάλογα με την σχετική τους πυκνότητα. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Καββαδάς, 2016)

Πίνακας 3. Σχετική πυκνότητα αμμοδών εδαφών (Καββαδάς, 2016)

ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ(%)	ΠΕΡΙΓΑΦΗ ΜΗ - ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
0-15	Πολύ χαλαρό
15-35	Χαλαρό
35-65	Μέσης πυκνότητας
65-85	Πυκνό
85-100	Πολύ πυκνό

2.5.6 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Πυκνότητα του εδαφικού υλικού είναι ο λόγος της μάζας του εδαφικού δείγματος προς τον όγκο του. (Καββαδάς, 2016)

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.7)$$

Οι τυπικές τιμές της πυκνότητας για τα αμμώδη εδάφη είναι 1,70-2,40 g/cm³. Για τα αργιλικά εδάφη οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1,40g/cm³ και 2,10g/cm³ ενώ στις ευαίσθητες αργίλους από 1,00g/cm³ έως 1,60g/cm³

2.6 ΟΡΙΑ ATTERBERG

Τα όρια Atterberg ανήκουν στα κύρια χαρακτηριστικά των συνεκτικών εδαφών, που εμφανίζουν πλαστιμότητα και συνοχή. Με βάση το ποσοστό υγρασίας το έδαφος κατηγοριοποιείται σε τέσσερις ομάδες:

- Την ρευστή: το έδαφος δεν μπορεί να παραλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχιζόμενη παραμόρφωση.
- Την πλαστική: το έδαφος θεωρείται πλάστιμο, δηλαδή μπορεί να υπόκειται σε πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς ρηγματώσεις και θρυμματισμό.
- Την ημιστερεή: είναι μια ενδιάμεση κατάσταση του εδάφους ανάμεσα στην στερεή και την πλαστική κατάσταση.

- Την στερεή: το έδαφος είναι αρκετά δύσκαμπτο και η θραύση γίνεται απότομα και ψαθυρά.

Τα ποσοστά υγρασίας που κατατάσσουν το έδαφος στις παραπάνω τέσσερις ομάδες καλούνται :

- Όριο συρρίκνωσης W_s ή SL που αποτελεί όριο μεταξύ της στερεάς και ημιστερεάς κατάστασης. Είναι το ποσοστό υγρασίας στο οποίο μειώνεται το μήκος του εδαφικού υλικού κατά την ξήρανση.
- Όριο πλαστιμότητας W_p ή PL που αποτελεί όριο μεταξύ της ημιστερεάς και πλαστικής κατάστασης. Είναι το ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος δεν είναι πλάστιμο και παρουσιάζει ρηγματώσεις χωρίς σημαντική πλαστική παραμόρφωση.
- Όριο υδαρότητας W_l ή LL που αποτελεί όριο μεταξύ της πλάστιμης και ρευστής κατάστασης. Είναι το ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος δεν συμπεριφέρεται πια σαν ρευστό και μεταβαίνει στην πλάστιμη κατάσταση.

Με βάση τα ανωτέρω όρια εκφράζονται οι δείκτες συνεκτικότητας:

- Ο δείκτης πλαστιμότητας ή πλαστικότητα PI ή I_p ο οποίος ορίζει το εύρος της πλάστιμης περιοχής όπου το εδαφικό υλικό συμπεριφέρεται ως πλάστιμο.

$$PI = LL - PL \quad (1.8)$$

Όσο η αύξηση του νερού δεν επηρεάζει ηλεκτροχημικά την διπλή στρώση τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστιμότητας.

- Ο δείκτης υδαρότητας ή σχετικής υδαρότητας LI ή I_l ο οποίος ορίζει το ποσοστό υγρασίας του εδάφους ως προς το όριο υδαρότητας. Εκτιμά εάν το έδαφος συμπεριφέρεται ως πλαστικό, ψαθυρό ή ρευστό. (Bowles, 1997), (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Καββαδάς, 2016)

$$LI = \frac{w - PL}{PI} \quad (1.9)$$

Για $LI=1$ το ποσοστό υγρασίας είναι ίσο με το ποσοστό υδαρότητας.

Για $LI=0$ το ποσοστό υγρασίας είναι ίσο με το όριο πλαστικότητας.

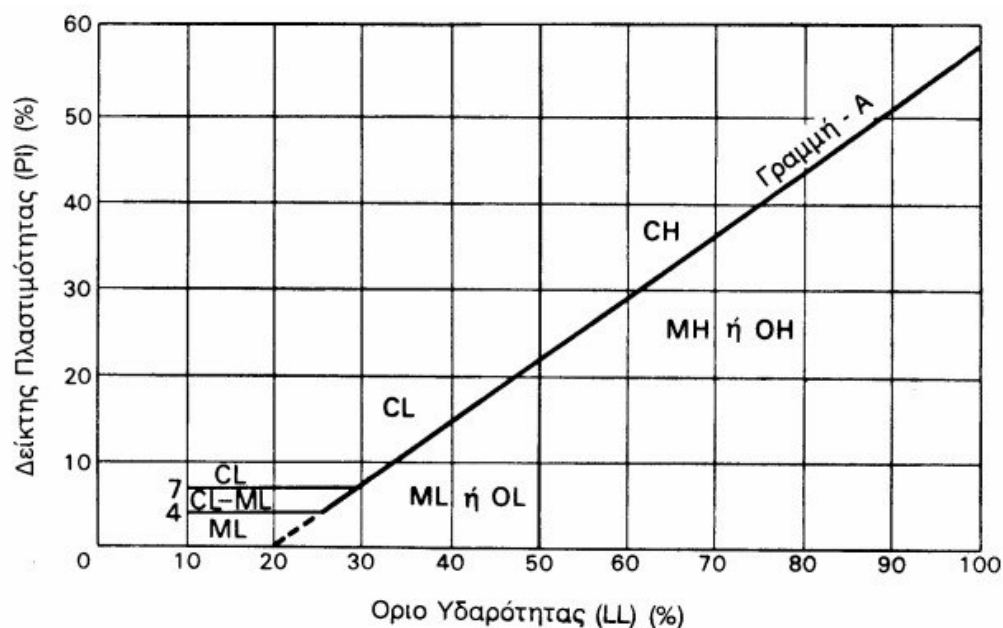
Για $0 < LI < 1$ ανήκει στην πλάστιμη περιοχή.

Για $LI < 0$ ανήκει στην ημιστερεή και στερεή κατάσταση.

Για $LI > 1$ ανήκει στην ρευστή κατάσταση.

2.6.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΟΡΙΑ ATTERBERG

Έχοντας ως άξονες το όριο υδαρότητας και τον δείκτη πλαστιμότητας διαμορφώνεται το διάγραμμα πλαστιμότητας του Casagrande στο Σχήμα 5, με την βοήθεια των ορίων Atterberg και του ποσοστού του εδάφους που διέρχεται από το κόσκινο νούμερο 200 και νούμερο 4. Γίνεται διαχωρισμός τεσσάρων περιοχών σε σχέση με την γραμμή A και την γραμμή του ορίου υδαρότητας για τιμή 50%. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται πάνω από την γραμμή A με όριο υδαρότητας $LL > 50\%$ και χαρακτηρίζεται από αργίλους υψηλής πλαστιμότητας. Η δεύτερη περιοχή βρίσκεται κάτω από την γραμμή A με $LL > 50\%$ και χαρακτηρίζεται από ιλύες υψηλής πλαστιμότητας. Η τρίτη περιοχή βρίσκεται πάνω από την γραμμή A με $LL < 50\%$ και χαρακτηρίζεται από αργίλους χαμηλής πλαστιμότητας. Η τέταρτη περιοχή βρίσκεται κάτω από την γραμμή A με $LL < 50\%$ και χαρακτηρίζεται από ιλύες χαμηλής πλαστιμότητας (Σχήμα 5). (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Bowles, 1997), (Λουπασάκης, 2015), (Καββαδάς, 2016)



Σχήμα 5. Διάγραμμα πλαστιμότητας Casagrande (Καββαδάς, 2016)

2.7 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΔΑΦΩΝ

2.7.1 ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ

Η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ δημιουργείται λόγω της επαφής των κόκκων του εδάφους. Αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς κοκκωδών εδαφών. Καθώς ασκούνται φορτία στο έδαφος αναπτύσσονται ορθές και διατμητικές τάσεις μεταξύ των κόκκων ακόμα και αν ασκείται μόνο ορθή δύναμη. Η θεωρητική γωνία τριβής διαφέρει από την γωνία τριβής που υπολογίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα η θεωρητική γωνία τριβής είναι μικρότερη από την εργαστηριακή και αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση των κόκκων. Αναπτύσσεται αντίσταση που επιτρέπει την διόγκωση του εδαφικού υλικού και αντίσταση για επαναπροσδιορισμό των κόκκων λόγω θραύσης.

Ανάλογα με το αν η άμμος χαρακτηρίζεται χαλαρή ή πυκνή, η γωνία τριβής είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη αντίστοιχα. Όταν δεν υπάρχει ροή, το νερό δεν επηρεάζει την γωνία τριβής της άμμου και παραμένει σχεδόν σταθερή. Αντίθετα στην άργιλο η παρουσία νερού

επηρεάζει την τιμή της γωνίας τριβής. Σε καθαρά συνεκτικά εδάφη η γωνία τριβής είναι μηδενική ενώ στα κοκκώδη εδάφη ορίζεται. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

2.8 ΣΥΝΟΧΗ

Η συνοχή αναπτύσσεται από την έλξη των ηλεκτροστατικών δυνάμεων και την διπλή στρώση μόνο στα αργιλικά εδάφη. Αντιστέκεται σε διάτμηση χωρίς την επιβολή ορθών τάσεων. Λόγω της απουσίας δεσμών ανάμεσα στους κόκκους της άμμου, δεν υφίσταται συνοχή. Η συνοχή εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού. Σε ένα καθαρά συνεκτικό έδαφος συναντάται συνοχή ενώ σε κοκκώδη εδάφη είναι μηδενική. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Γκαζέτας, 2007)

2.9 ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η διατμητική αντοχή εκφράζει την αντοχή σε αστοχία από επιβαλλόμενα φορτία. Εξαρτάται από ενδογενείς παράγοντες, δηλαδή από τη σύσταση και τη γεωλογική ιστορία του εδάφους (φορτίσεις), καθώς και από εξωγενείς παράγοντες, όπως τις συνθήκες αποστράγγισης (πίεση του νερού των πόρων και ενεργές τάσεις), την εντατική κατάσταση (τάσεις) και την ταχύτητα μεταβολής της.

Όταν στο έδαφος επιβάλλονται τάσεις χωρίς να υπάρχει μεταβολή του όγκου του, οι συνθήκες ονομάζονται αστράγγιστες και η διατμητική αντοχή υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\tau = c + \sigma_n \times \varepsilon\varphi(\varphi) \quad (1.10)$$

Οι παράμετροι φ και c υπολογίζονται μέσω αστράγγιστων εργαστηριακών δοκιμών. Η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής υπολογίζεται στο εργαστήριο και έχει εφαρμογή μόνο σε αργιλικά εδάφη.

2.10 ΟΡΘΕΣ, ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Σε μια κατασκευή ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις. Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η κατάσταση της επίπεδης παραμόρφωσης με τις ορθές και διατμητικές τάσεις. Οι ορθές τάσεις είναι κάθετες στο επίπεδο (σ_{xx} και σ_{zz}), ενώ οι διατμητικές είναι παράλληλες (τ_{xz} και τ_{zx}). Θετικές ορθές τάσεις ορίζονται οι θλιπτικές και θετικές διατμητικές τάσεις αυτές με αντισωρολογική φορά. Οι σχέσεις που τις συνδέουν είναι οι εξής:

$$\sigma = \sigma_{xx} \times \cos^2\theta + \sigma_{zz} \times \sin^2\theta + 2 \times \sigma_{xz} \times \sin\theta \times \cos\theta \quad (1.11)$$

$$\tau = (\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) \times \sin\theta \times \cos\theta + \sigma_{xz} \times (\sin^2\theta - \cos^2\theta) \quad (1.12)$$

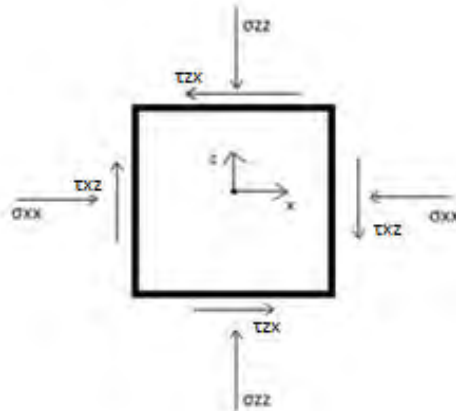
Στην περίπτωση που οι άξονες χ και ψ ταυτίζονται με τους κύριους άξονες οι ορθές τάσεις είναι οι κύριες τάσεις και συμβολίζονται με σ_1 και σ_3 . (Καβαδάς, 2016) Επομένως οι σχέσεις 1.11 και 1.12 μετασχηματίζονται :

$$\sigma = \sigma_1 \times \cos^2\theta + \sigma_3 \times \sin^2\theta \quad (1.13)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \times \sin\theta \times \cos\theta \quad (1.14)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \cos 2\theta \quad (1.15)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \sin 2\theta \quad (1.16)$$



Σχήμα 6. Ορθές και διατμητικές τάσεις στην επίπεδη εντατική κατάσταση

2.11 MOHR COULOMB

Η μέθοδος Mohr Coulomb μπορεί να απεικονίσει την εντατική κατάσταση για τις ολικές καθώς και για τις ενεργές τάσεις, με κύκλους που έχουν την ίδια διάμετρο αλλά διαχωρίζονται οριζόντια από την τιμή της πίεσης του νερού των πόρων u_w . Η επιβολή τάσεων σε ένα εδαφικό στοιχείο μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του. Το βασικότερο κριτήριο αστοχίας που συνδέει την διατμητική αντοχή των υλικών είναι το κριτήριο Mohr Coulomb.

Ο νόμος Mohr Coulomb εκφράζει την αναγκαία και ικανή συνθήκη το υλικό να αστοχεί ανεξάρτητα από τις οποιεσδήποτε τάσεις και παραμορφώσεις που επιβάλλονται. Με εργαστηριακά δεδομένα από εδαφικά υλικά που βρίσκονται σε ποικίλες εντατικές καταστάσεις ο νόμος Mohr Coulomb επαληθεύεται προσεγγιστικά. Με την βοήθεια του κύκλου Mohr (Σχήμα 7) παριστάνεται γραφικά η εντατική κατάσταση την στιγμή της αστοχίας, με άξονες αναφοράς τις συνισταμένες των τάσεων στο επίπεδο θραύσης. Προσδιορίζονται με αυτόν τον τρόπο οι τιμές της διατμητικής και της ορθής τάσης, οι οποίες σχηματίζουν γωνία θ με ένα από τα κύρια επίπεδα, έχοντας δεδομένη την τιμή των κύριων τάσεων.

Οι κρίσιμες ορθές τάσεις που οδηγούν στην αστοχία συμβολίζονται με σ_1 και σ_3 . Για την κατασκευή του κύκλου Mohr ορίζεται κέντρο M στον άξονα των ορθών τάσεων και

λαμβάνει τιμή $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ και έχει ακτίνα $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Η εφαπτόμενη στο σημείο του κύκλου Mohr που αντιστοιχεί στον κρίσιμο συνδυασμό των τάσεων σε επίπεδο γωνίας $\theta_{\text{κρίσιμ}}$ στην εντατική κατάσταση αστοχίας ονομάζεται περιβάλλουσα Mohr. Η κρίσιμη γωνία υπολογίζεται από την γεωμετρία και λαμβάνει τιμή: $\theta_{\text{κρίσιμ}} = 45^\circ + \phi/2$. Κάθε κύκλος που βρίσκεται κάτω από την περιβάλλουσα σημαίνει ότι είναι πριν την αστοχία, δηλαδή σε ευσταθή εντατική κατάσταση. Δεν μπορεί να κατασκευαστεί κύκλος του Mohr που τέμνει την περιβάλλουσα, αφού έχει επέλθει ήδη η αστοχία.

Η περιβάλλουσα είναι κατά προσέγγιση μια ευθεία γραμμή και ορίζεται γενικά:

$$\tau_A = c + \sigma_A \times \epsilon\phi\phi \quad (1.17)$$

Για τα καθαρά κοκκώδη εδάφη περνάει από την αρχή των αξόνων και λαμβάνει την μορφή:

$$\tau_A = \sigma_A \sigma_A \times \epsilon\phi\phi \quad (1.18)$$

Με βάση την αρχή των ενεργών τάσεων γίνεται:

$$\tau_A = c + \sigma'_A \times \epsilon\phi\phi \quad (1.19)$$

,όπου σ'_A η ενεργή ορθή τάση μεταξύ των κόκκων. Η ενεργός τάση αντιπροσωπεύει το μέρος της τάσης το οποίο διαβιβάζεται μέσω του εδαφικού ιστού. Δεν είναι εύκολο να μετρηθεί απευθείας γι' αυτό υπολογίζεται μέσω της ορθής τάσης και του νερού των πόρων. Η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ ονομάζεται αλλιώς γωνία τριβής και διαφέρει από την γωνία τριβής μεταξύ των κόκκων ϕ_μ με την σχέση $\phi > \phi_\mu$. (Γεωργιάδης, 2009), (Καββαδάς, 2016), (Savvides, 2021)



Σχήμα 7. Κύκλος του Mohr

Η εξίσωση Mohr Coulomb συνδέει τις κύριες ορθές τάσεις σ_1 , σ_3 και είναι η εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \times \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \times c \times \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.20)$$

2.12 Κριτήριο Hoek Brown για Βραχώμαζες

Το κριτήριο Hoek-Brown βασίζεται στις θεωρίες θραύσης του Griffith και των McClintock, Walsh και είναι ένα εμπειρικό κριτήριο αστοχίας. Σε αντίθεση με το κριτήριο Mohr Coulomb, που υπολογίζει την διατμητική τάση, υπολογίζεται η τιμή της κύριας τάσης σ_1 για την οποία επέρχεται θραύση. Το κριτήριο αναφέρεται σε βράχο καλής ποιότητας και κυρίως σε βράχους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από γωνιώδη στοιχεία κατάτμησης τα οποία βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. (Μαραγκός Χ., 2020)

Η εξίσωση η οποία δίνει την κατακόρυφη κύρια τάση είναι η εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \times \left(m_b \times \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1.21)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)} \quad (1.22)$$

$$a = \frac{a_0}{6} + 0.5 \quad (1.23)$$

$$a_0 = e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \quad (1.24)$$

όπου σ_1 : η μέγιστη κύρια ενεργός τάση κατά τη θραύση

σ_3 : η ελάχιστη κύρια ενεργός τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο

σ_c : η αντοχή σε απλή θλίψη του πετρώματος το οποίο συνθέτει το δοκίμιο

D=1: βαθμός διαταραχής

mb, s: σταθερές

2.13 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Στα κοκκώδη εδάφη η διατμητική αντοχή καθορίζεται από τη γωνία τριβής των κόκκων και παράλληλα οι εξωτερικές φορτίσεις παραλαμβάνονται άμεσα από το έδαφος λόγω της αυξημένης υδατοπερατότητας. Η διατμητική αντοχή είναι παράγοντας δυο συνιστωσών, αυτής της τριβής μεταξύ των κόκκων, η οποία καθορίζεται από τη γωνία ϕ , και αυτής της αλληλεμπλοκής των κόκκων.

Μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε διάτμηση σε δείγμα αμμόδους εδάφους είναι δυνατόν να βρεθεί προσεγγιστικά η τιμή της διατμητικής αντοχής. Η τιμή της διατμητικής αντοχής διαφέρει ανάλογα με το αν η άμμος είναι πυκνή ή χαλαρή σε ξηρή κατάσταση ή σε κορεσμένη.

Στη χαλαρή άμμο η διατμητική αντίσταση είναι ανάλογη με τη διατμητική μετατόπιση και αυξάνεται έως την μέγιστη τιμή t_f (failure). Όταν φτάσει αυτή την τιμή μετά παραμένει σταθερή υπό αυξανόμενη διατμητική μετατόπιση ενώ είναι αισθητή η συστολή και η συμπίκνωση του δείγματος/ δοκιμίου. Αυτό δημιουργεί μια πιο πυκνή διάταξη των κόκκων και μειώνει την ελευθερία κίνησης τους.

Στην πυκνή άμμο η διατμητική αντίσταση σε αναλογία με τη διατμητική μετατόπιση αυξάνεται μέχρι την τιμή της μέγιστης διατμητικής αντοχής t_f . Μετά την τιμή αυτή, η διατμητική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατμητικής μετατόπισης και μειώνεται μέχρι να φτάσει στην σταθερή τιμή t_u (ultimate shear strength). Σε αντίθεση με τη χαλαρή άμμο, στην περίπτωση της ξηρής παρατηρείται αύξηση της διασταλτικότητας και

αύξηση του ύψους του δοκιμίου. Η γωνία τριβής ϕ της χαλαρής άμμου είναι μικρότερη από της πυκνής ενώ ο λόγος κενών είναι μεγαλύτερος.

Οι περιβάλλουσες Mohr των μη συνεκτικών εδαφών είναι ευθύγραμμες ή καμπυλωμένες για χαλαρές και πυκνές άμμους αντίστοιχα και καμία τους δεν εμφανίζει συνοχή. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Γκαζέτας, 2007)

2.14 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ

Στα συνεκτικά εδάφη, η διατμητική αντοχή αναφέρεται στη συνοχή και στη γωνία τριβής τους, που επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού.

Η διατμητική αντοχή εκτιμάται τις περισσότερες φορές μικρότερη σε αστράγγιστες συνθήκες μιας αργίλου σε σχέση με πλήρως στραγγιζόμενες. Γενικά η διατμητική αντοχή της αργίλου εξαρτάται από το αν βρίσκεται σε στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες και με τα φορτία που έχουν ασκηθεί προηγουμένως (στερεοποιημένες- υποστερεοποιημένες- υπερστερεοποιημένες).

Μία προστερεοποιημένη άργιλος σε συνθήκες πλήρους στράγγισης αυξάνει την τιμή της διατμητικής αντοχής μέχρι τη μέγιστη S_p , η οποία είναι σταθερή κάτω από το ίδιο ενεργό φορτίο και ονομάζεται μέγιστη διατμητική αντοχή. Μετά την μέγιστη τιμή, μειώνεται μέχρι την τιμή πλήρως χαλαρωμένης αντοχής. Επίσης μετά από αυξημένες μετατοπίσεις, η διατμητική αντοχή κλίνει προς μια σταθερή τιμή, την παραμένουσα διατμητική αντοχή S_r .

Η μέγιστη και η παραμένουσα διατμητική αντοχή μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τον νόμο Mohr-Coulomb από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_p = c p' + \sigma' \times \epsilon \phi \phi' p \quad (1.25)$$

και

$$S_r = c r' + \sigma' \times \epsilon \phi \phi' r \quad (1.26)$$

όπου η συνοχή $c r'$ είναι περίπου μηδέν οπότε :

$$S_r = \sigma' \times \epsilon \phi \phi' r \quad (1.27)$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραμένουσα διατμητική αντοχή Sr είναι:

- Το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος που περιέχεται στο εδαφικό υλικό.
- Οι ορθές τάσεις σε σχέση με τη γωνία φρ'.

Η παραμένουσα διατμητική αντοχή εκπροσωπεί την διατμητική αντοχή κάποιου εδάφους που έχει ολισθήσει και μετακινηθεί.

Η τιμή της Sr σε μαλακές αργίλους υπό αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι μικρότερη των 50 kPa.

Οι πιο σημαντικές κατηγορίες για τον σχηματισμό των μαλακών αργίλων είναι:

- Η αποξήρανση: είναι η διαδικασία που απομακρύνεται το νερό από το έδαφος όταν αυτό εκτεθεί στον αέρα και δημιουργείται σκληρός επιφανειακός φλοιός πάχους 1 έως 8m.
- Η χημική αποσάρθρωση: είναι η διαδικασία μετατροπής των ανθρακικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου σε όξινα ανθρακικά άλατα κατά την επαφή με το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα.
- Η απόπλυση: είναι η διαδικασία που απομακρύνονται τα άλατα από το έδαφος με την βοήθεια γλυκού νερού.
- Η τσιμέντωση/συγκόλληση: είναι σαν την απόπλυση με την διαφορά ότι απομακρύνονται συστατικά που συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρές δυνάμεις.

Με την τσιμέντωση και την αποξήρανση επιτυγχάνεται η αύξηση διατμητικής αντοχής ενώ με την απόπλυση η αύξηση της ευαισθησίας τους. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Γκαζέτας, 2007)

2.15 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΛΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΜΜΟΥΣ

Η διασταλτικότητα της άμμου είναι η ιδιότητα διαστολής των σωματιδίων της όταν έρχεται σε επαφή με το νερό. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο σε εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα άμμου. Με την προσθήκη νερού στην άμμο τα σωματίδια της απορροφούν το νερό αυξάνοντας τον όγκο τους, που έχει ως αποτέλεσμα την διαστολή του ιζηματικού υλικού. Η διασταλτικότητα είναι μια σημαντική παράμετρος διότι επηρεάζει την συμπεριφορά της θεμελίωσης μια κατασκευής και πρέπει να λαμβάνεται συχνά υπόψη για την διασφάλιση του σωστού σχεδιασμού και της υποδομής των έργων. Οι παράγοντες οι οποίοι εξαρτάται είναι η γεωλογική σύσταση της άμμου, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η περιεκτικότητα σε νερό.

Είναι ένα φαινόμενο που δεν εξηγείται με την θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας. Η θεωρία αυτή δηλώνει ότι με την επιβολή διατμητικής τάσης σε ένα δοκίμιο προκαλούνται μόνο διατμητικές παραμορφώσεις λόγω της αλληλεπίδρασης των ασύνδετων κόκκων του εδαφικού υλικού μέσω δυνάμεων τριβής. Οι παραμορφώσεις δημιουργούνται από ολισθήσεις μεταξύ των κόκκων και αν είναι χαλαρή η δομή του υλικού η ογκομετρική παραμόρφωση είναι θετική, δηλαδή μειώνεται ο όγκος, ενώ εάν είναι πυκνή η ογκομετρική παραμόρφωση είναι αρνητική. (Καββαδας, 2016)

Κεφάλαιο 3 : ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή

Για την έρευνα του υπεδάφους είναι σημαντική η γνώση της χωρικής κατανομής στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της μελετώμενης περιοχής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δειγματοληψίας η οποία πραγματοποιείται:

- Με χρήση απλών μηχανικών μέσων. Το βάθος διάτρησης είναι περιορισμένο και πραγματοποιείται με εκσκαφέα. Ο βραχίονας του εκσκαφέα δημιουργεί φρέατα με συγκεκριμένες διαστάσεις και βάθος έως 6 μέτρα περίπου. Με αυτήν τη διαδικασία μπορεί να γίνει λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων.
- Με χρήση ειδικών μηχανικών μέσων. Το βάθος εξόρυξης δειγμάτων είναι πολύ μεγαλύτερο και πραγματοποιείται με γεωτρύπανο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται γεώτρηση και το διάτρημα έχει συγκεκριμένη διάμετρο και διεύθυνση. Γίνεται ή με κρούση ή με περιστροφή με την βοήθεια νερού ή αέρα.

3.2 Κατηγορίες γεωτρήσεων

3.2.1 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥΣ

Οι γεωτρήσεις ως προς το βάθος τους διακρίνονται σε αβαθείς, βαθιές και πολύ βαθιές. Οι αβαθείς γεωτρήσεις έχουν μέγιστο βάθος τα 500 μέτρα και η ισχύς του γεωτρύπανου κυμαίνεται από 50 έως 150HP. Στις βαθιές το μέγιστο βάθος ανέρχεται στα 4000 μέτρα και η ισχύς του γεωτρύπανου κυμαίνεται από 1000 έως 2000 HP. Τέλος στις πολύ βαθιές το βάθος μπορεί να ξεπεράσει τα 7000 μέτρα και η ισχύς του γεωτρύπανου υπερβαίνει τους 2000HP.

3.2.2 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Διακρίνονται σε:

- Κρουστικές: η προχώρηση πραγματοποιείται κρουστικά χωρίς την λήψη πυρήνων.
- Περιστροφικές: η προχώρηση πραγματοποιείται με υδραυλική πίεση και περιστροφής της δειγματοληπτικής στήλης, με λήψη πυρήνων.

3.2.3 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Η εξαγωγή του δείγματος γίνεται:

- Με κανονική έκπλυση: διοχετεύεται συνήθως νερό υπό πίεση μέσω των κοίλων στελεχών της διατρητικής στήλης
- Με ανάποδη έκπλυση: διοχετεύεται συνήθως νερό μέσα από τα σωληνωμένα τοιχώματα της γεώτρησης και το οποίο επιστρέφει μέσα από τα κοίλα στελέχη της διατρητικής στήλης
- Χωρίς έκπλυση: διακόπτεται η κυκλοφορία υγρών κατά τη διάτρηση (*φραγμός*).

3.3 Περιστροφικές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις

Στόχος της δειγματοληψίας είναι το δείγμα που θα έρθει στη επιφάνεια να βρίσκεται όσο το δυνατόν σε καλύτερη κατάσταση χωρίς να αλλοιώνεται ο εδαφικός του σχηματισμός. Αυτό επιτυγχάνεται με την περιστροφική δειγματοληψία όπου με κοίλες κοπτικές κεφαλές γίνεται περιστροφή της διατρητικής στήλης και απομακρύνεται το δείγμα. Στην συνέχεια γίνεται σωλήνωση της γεώτρησης ώστε να αποφευχθούν καταπτώσεις των τοιχωμάτων. Η διάτρηση μπορεί να γίνει με μονή καροταρία και κοπτική κεφαλή από σκληρά μέταλλα (καρβίδια) για εδαφικούς σχηματισμούς ή είτε με διπλή καροταρία και κοπτική κεφαλή με κόκκους ή σκόνη διαμαντιών (αδαμαντοκορώνα) ανάλογα της σκληρότητας των πετρωμάτων.

3.4 Γεωτρητικός εξοπλισμός

Ο γεωτρητικός εξοπλισμός που απαιτείται για δειγματοληπτικές περιστροφικές γεωτρήσεις υδραυλικής προώθησης, διακρίνεται σε:

- Εξοπλισμό επιφανείας : υδραυλικό περιστροφικό αυτοκινούμενο ή πάνω σε έλκηθρα γεωτρύπανο, αντλίες, πύργοι ανύψωσης.
- Διατρητικά εξαρτήματα: στελέχη διάτρησης, δειγματολήπτες, σωλήνες επένδυσης, κοπτικά άκρα, αντλίες νερού.
- Όργανα επί τόπου δοκιμών: συσκευές, εξαρτήματα και όργανα ελέγχου για επιτόπου δοκιμές μέσα στη γεώτρηση (πχ. αντίβαρο 62.5kg και δειγματολήπτη Terzaghi για την εκτέλεση της πρότυπης δοκιμής).

3.4.1 ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΑ

Τα γεωτρύπανα χρησιμοποιούνται για την διάτρηση και την λήψη δειγμάτων εδαφικών υλικών. Η διάτρηση της στήλης πραγματοποιείται με μηχανή εσωτερικής καύσης μέσω συστήματος μετάδοσης κίνησης. Ανάλογα με το έδαφος που ερευνάται και την μέθοδο δειγματοληψίας, χρησιμοποιείται και το κατάλληλο γεωτρύπανο.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες γεωτρυπάνων και είναι οι εξής:

- Περιστροφικά γεωτρύπανα: η διάτρηση επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη πίεση και περιστροφή του κοπτικού άκρου. Το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό των εδαφικών στρώσεων της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Κρουστικά γεωτρύπανα: το δείγμα λαμβάνεται, μετά από συνεχόμενες κρούσεις, σε θρυμματισμένη μορφή. Για τον λόγο αυτό δεν αντιστοιχεί στην ακριβή μορφολογία του εδάφους.
- Γεωτρύπανα θερμικής διάτρησης: δεν λαμβάνεται δείγμα αφού η διάτρηση πραγματοποιείται μέσω τήξης του πετρώματος. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

3.4.2 ΣΤΕΛΕΧΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Τα στελέχη διάτρησης είναι από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα και θέλουν συγκεκριμένο χειρισμό. Πρέπει δηλαδή να συντηρούνται, να παραμένουν ευθύγραμμα, το σπείρωμά τους να μην παρουσιάζει παραμορφώσεις, να λιπαίνεται συχνά και γενικά να βρίσκονται σε καλή κατάσταση.

3.4.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΕΣ

Οι δειγματολήπτες χρησιμεύουν στην εξαγωγή του δείγματος κατά την διάρκεια της διάτρησης.

3.4.3.1 Εδαφικά δείγματα

Στην διάτρηση εδαφικών σχηματισμών, για να ληφθούν πιο ακριβή χαρακτηριστικά του εδάφους, θα πρέπει κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας να μην διαταραχθεί, όσο το δυνατόν γίνεται, η δομή του. Δεν είναι εφικτό πάντα να λαμβάνεται αδιατάρακτο δείγμα.

Για τα εδαφικά δείγματα οι κατηγορίες δειγματοληψίας είναι:

- Δειγματοληψία αδιατάρακτων δειγμάτων. Λαμβάνονται από μαλακούς αργιλικούς σχηματισμούς με δειγματολήπτες που λειτουργούν με υδραυλική πίεση και με γεωτρύπανο. Για να είναι αδιατάρακτο το δείγμα θα πρέπει, αρχικά, να έχει καθαριστεί καλά η γεώτρηση. Ο δειγματολήπτης πρέπει να έχει λεπτό τοίχωμα και σφαιρική βαλβίδα η οποία θα εκτονώνει πίεση κατά την εισχώρησης του δείγματος και θα κλείνει κατά την εξαγωγή του δειγματολήπτη ώστε να συγκρατηθεί του δείγμα εντός του. Η προχώρηση του δειγματολήπτη θα πρέπει να γίνεται μόνο με πίεση χωρίς περιστροφή. Τέλος θα πρέπει να γίνονται μετρήσεις καθ'όλη την διάρκεια της εισχώρησης στο έδαφος ώστε να μην συμβεί υπέρβαση στο μήκος του δειγματολήπτη.
- Δειγματοληψία διαταραγμένων δειγμάτων. Λαμβάνονται από πυκνότερους εδαφικούς σχηματισμούς και η διάτρηση γίνεται μέσω υδραυλικής πίεσης με ταυτόχρονη περιστροφή. Η δειγματοληψία πραγματοποιείται πιο συχνά με μονή καροταρία με κοπτική κεφαλή που αποτελείται από σκληρά μέταλλα.

3.4.3.2 Βραχώδη δείγματα

Η λήψη βραχώδων δειγμάτων πραγματοποιείται με δειγματολήπτες οι οποίοι σύμφωνα με προδιαγραφές δίνουν συγκεκριμένων διαστάσεων δείγματα και χρησιμοποιούνται σε δειγματοληψία βραχωδών δοκιμίων. Για την σωστή εκτέλεση της δειγματοληψίας θα πρέπει η απόληψη του βραχώδους πυρήνα να πλησιάζει το μήκος της διάτρησης (βουτιά). Το ποσοστό αυτό επί τοις εκατό ονομάζεται βαθμός πυρηνοληψίας.

Για τα βραχώδη δείγματα οι κατηγορίες δειγματοληψίας είναι:

- Δειγματοληψία με μονούς δειγματολήπτες. Χρησιμοποιούνται σε συμπαγείς σχηματισμούς και ο βαθμός πυρηνοληψίας είναι μεγάλος. Στους αποσαθρωμένους σχηματισμούς ο βαθμός πυρηνοληψίας είναι μικρός διότι μέρος του σχηματισμού ξεπλένεται από υγρό διάτρησης. Η δειγματοληψία, σε αυτές τις περιπτώσεις, πραγματοποιείται με κορώνα από σκληρά μέταλλα με μερική παροχή υγρού έκπλυσης η οποία σταματά πριν το τέλος της διάτρησης. Στην συνέχεια γίνεται ταχεία περιστροφή ώστε να παραμείνει το δείγμα εντός του δειγματολήπτη. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις για κοπτική κεφαλή εφαρμόζεται αδαμαντοκορώνα και για την παραμονή του δείγματος εντός δειγματολήπτη υπάρχει εξολκέας.
- Δειγματοληψία με διπλούς δειγματολήπτες. Ο διπλός δειγματολήπτης αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες όπου μεταξύ τους διέρχεται νερό, έναν εξωτερικό δειγματολήπτη και εσωτερικό δειγματολήπτη με προσαρμοσμένη την αδαμαντοκορώνα για τη θραύση του βραχώδους σχηματισμού. Η αδαμαντοκορώνα μπορεί να είναι κόκκου διαμαντιού ή σκόνης διαμαντιού. Σε μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς προτιμάται αδαμαντοκορώνα με κόκκους διαμαντιού ενώ σε σκληρούς λεπτόκοκκους βραχώδεις σχηματισμούς αδαμαντοκορώνα με σκόνη διαμαντιού. Ο εσωτερικός δειγματολήπτης δεν περιστρέφεται και έχει ως αποτέλεσμα το δείγμα να μην καταστρέφεται και να προστατεύεται η κυκλοφορία των υγρών κατά την διάρκεια της διάτρησης. Η δειγματοληψία αυτή δίνει μεγάλα ποσοστά πυρηνοληψίας και μετράται ο δείκτης ποιότητας πετρώματος.

3.5 Επί τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής

Όπως παρουσιάστηκε, το έδαφος είναι ένα πολύπλοκο και ποικιλόμορφο υλικό. Για να προσδιοριστούν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του, πραγματοποιείται δειγματοληψία και μέσω της εργαστηριακής έρευνας διεξάγονται τα αποτελέσματα. Πολλές φορές όμως η αδιατάρακτη δειγματοληψία είναι αδύνατη ή τα δείγματα όπως έχουν συλλεχθεί δεν είναι κατάλληλα για την εργαστηριακή έρευνα και καταλήγουν σε εσφαλμένες παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαία η επί τόπου δοκιμές του εδάφους.

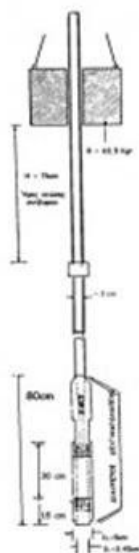
Στις επί τόπου δοκιμές γίνεται άμεση μέτρηση και καταγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους με την επιβολή φορτίσεων. Σε σχέση με την δειγματοληψία και την εργαστηριακή έρευνα με τις επί τόπου δοκιμές παρατηρείται στην πραγματικότητα η κατάσταση του εδάφους και εκτιμούνται καλύτερα οι παράμετροι. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι εμπειρική και μέσω της συνεχούς διερεύνησης προκύπτουν οι σχέσεις για τις μεθόδους αυτές. Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στο πεδίο εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της σε σχέση με το είδος του εδάφους. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002),

Κάποιες από τις κύριες επί τόπου δοκιμές που εκτελούνται για την μελέτη τεχνικών έργων και τον σχεδιασμό θεμελιώσεων είναι οι εξής:

- Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης, SPT (Standard Penetration Test)
- Δοκιμή Στατικής Διείσδυσης, CPT (Cone Penetration Test)
- Δοκιμή Cross-Hole
- Δοκιμή Down-Hole

3.5.1 ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ, SPT (STANDARD PENETRATION TEST)

Η δοκιμή της πρότυπης διείσδυσης ή αλλιώς κρουστικής διείσδυσης γίνεται σε προεπιλεγμένα βάθη που ορίζει ο γεωτεχνικός μηχανικός ή σε βάθος αλλαγής σχηματισμών του εδάφους. Πριν την διαδικασία της δειγματοληψίας χρειάζεται να καθαρισθεί ο πυθμένας της γεώτρησης από τυχόν υπολείμματα της διάτρησης. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια κυλινδρικού δειγματολήπτη κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων. Ο δειγματολήπτης ή δειγματολήπτης Terzaghi (Σχήμα 8) εισάγεται μέσω της δειγματοληπτικής στήλης με πτώση αντίβαρου 63,5kg από ύψος 76,2 cm στον πυθμένα της γεώτρησης και με επαναλαμβανόμενες κρούσεις, N σε αριθμό, διεισδύει κατά 45 cm. Η διείσδυση αυτή γίνεται σε τρία διαδοχικά στάδια των 15 cm. Ο αριθμός των κρούσεων μέχρι τα πρώτα 15 cm απορρίπτεται διότι το υλικό πιθανό να είναι διαταραγμένο ή να έχουν καταπέσει υλικά από την εκτέλεση της γεώτρησης. Ο υπολογισμός των παραμέτρων γίνεται από τον αριθμό των κρούσεων στα άλλα δύο στάδια δηλαδή συνολικά στα 30 cm.



Σχήμα 8. Πρότυπος δειγματολήπτης Terzaghi

Τα αποτελέσματα είναι συνάρτηση της μεταβολής του N σε σχέση με το βάθος. Οι τιμές του N που ξεπερνάνε το 60 σε αριθμό θεωρούνται ότι δεν μπορεί ο δειγματολήπτης να εισχωρήσει άλλο και το έδαφος εκεί είναι σκληρό. Οι παράμετροι που υπολογίζονται από τις δοκιμές παρουσιάζονται χωρίς διορθωτικούς συντελεστές και εκτιμάται σε ποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητοι.

Στην περίπτωση παρουσίας υδροφόρου ορίζοντα στο ύψος της δοκιμής, οι τιμές πρέπει να διορθωθούν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του νερού κατά την εκτέλεση. Η διόρθωση για την εκτέλεση της δοκιμής κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα για τον αριθμό κρούσεων γίνεται με την σχέση:

$$N' = 15 + \frac{1}{2} \times (N - 15) \quad (1.28)$$

Στα μη συνεκτικά εδάφη γίνεται διόρθωση της δοκιμής σε σχέση με την ενεργή γεωστατική τάση. Έτσι ορίζεται ο συντελεστής διόρθωσης C_N , που είναι ο λόγος των κρούσεων για δεδομένη ενεργή γεωστατική τάση προς την αντίσταση αιχμής για σταθερή ενεργή γεωστατική τάση ($=100\text{kPa}$). Η διορθωτική τιμή του αριθμού των κρούσεων δίνεται με την σχέση:

$$N' = C_N \times N \quad (1.29)$$

Η δοκιμή SPT εξάγει, επίσης, δεδομένα σχετικά με την πυκνότητα και την συνεκτικότητα όλων των τύπων εδάφους, όμως είναι πιο αξιόπιστη σε αμμώδη εδάφη. Η ύπαρξη χαλίκων ή κροκάλων στο έδαφος δημιουργεί μεγάλο αριθμό κρούσεων, επομένως δεν θα πρέπει να προσμετρείται στο συνολικό αριθμό N και τα αποτελέσματα προσδιορίζονται πιο συντηρητικά.

Μέσω της δοκιμής SPT έγινε η παρακάτω ταξινόμηση για κοκκώδη εδάφη, σε σχέση με την πυκνότητα D_r και με την γωνία τριβής, ανάλογα με τον αριθμό των κρούσεων. (Πίνακας 4)

Πίνακας 4. Χαρακτηρισμός κοκκωδών εδαφών για την γωνία τριβής ϕ

N	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	D _r (%)	ϕ
0-4	Πολύ χαλαρή	0-15	27-32
4-10	Χαλαρή	15-35	30-35
10-30	Μέση	35-65	35-40
30-50	Πυκνή	65-85	38-43
>50	Πολύ πυκνή	85-100	>40

Τα συνεκτικά εδάφη χαρακτηρίζονται με τον αριθμό των κρούσεων και την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη αργιλικών εδαφών και κατ'έκταση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή. (Πίνακας 5)

Πίνακας 5. Χαρακτηρισμός συνεκτικών εδαφών για την γωνία τριβής ϕ

N	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	q _u (kPa)
<2	Πολύ μαλακό	<25
2-4	Μαλακό	25-50
4-8	Μέτριο	50-100
8-15	Στιφρό	100-200
15-30	Πολύ στιφρό	200-400
>30	Σκληρό	>400

3.5.1.1 Βελτίωση δοκιμής SPT

Με την αυξημένη χρήση της δοκιμής διεύθυνσης και την μελέτη των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι εμφανίζονται αρκετοί παράγοντες λάθους. Η δοκιμή εξαρτάται από υποκειμενικούς παράγοντες μελέτης του επιβλέποντα ή και με την σωστή χρήση και συντήρηση του εξοπλισμού. Οι αβεβαιότητες αυτές βελτιώνονται με τους διορθωτικούς συντελεστές, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ανάλογα με τρόπο πτώσης του αντίβαρου (αυτόματη ή μη αυτόματη) διαφέρει το ποσοστό της απομείωσης της ενέργειας πρόσκρουσης με την θεωρητική. Η αυτόματη πρόσκρουση είναι πιο ακριβής ως

προς το ύψος πτώσης του αντίβαρου και οι απώλειες ενέργειας αποδίδονται μόνο στις τριβές. Οι προηγμένες δοκιμές SPT που χρησιμοποιούν αεροσυμπιεστές για την κρούση, εκμηδενίζουν τις απώλειες ενέργειας. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002), (Joseph E. Bowles, 1997), (Σταματάκη, 2003), (Λουπασάκης, 2015), (Καβουσάνος, 2003)

Ο Ευρωκώδικας 7 καθορίζει τους συντελεστές με την εξής εξίσωση:

$$N_{60} = \frac{E_{RT}}{60} \lambda C_N N \quad (1.30)$$

Όπου :

E_{RT} : η ενέργεια πρόσκρουσης ανάλογα με τον εξοπλισμό της δοκιμής

λ : διορθωτικός συντελεστής του μήκους των στελεχών της δοκιμής (0,75-1)

C_N : ο συντελεστής διόρθωσης από το βάρος των υπερκειμένων

N : ο αριθμός κρούσεων N που μετράται στην ύπαιθρο.

3.5.2 ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΩΝΟΥ CPT

Η δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT ή αλλιώς δοκιμή του Ολλανδικού Πενεμέτρου εφαρμόζεται για την μέτρηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μαλακών έως στιφρών αργίλων και της σχετικής πυκνότητας των άμμων. Αποσκοπεί στον προσδιορισμό της μεταβολής των πιέσεων του νερού των πόρων. Πραγματοποιείται με την συνεχή διείσδυση ενός κώνου που έχει αιχμή 60 μοίρες και εμβαδό βάσης 100 cm^2 . Στις μέρες μας ο κώνος είναι ηλεκτρικός και οι αντίστοιχες τιμές λαμβάνονται ψηφιακά.

Στην περιοχή της αιχμής τοποθετείται επίσης πιεζόμετρο για την μέτρηση της πίεσης των πόρων που αναπτύσσεται κατά της διείσδυση του κώνου. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί δειγματοληψία και μέσω των μετρήσεων της αντοχής αιχμής, της πλευρικής τριβής και της αναπτυσσόμενης πίεσης των πόρων συντάσσεται η στρωματογραφία και υπολογίζεται η σχετική πυκνότητα του εδαφικού υλικού. Είναι μια γρήγορη μέθοδος που καταγράφει συνεχώς τα χαρακτηριστικά του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος. Όμως υστερεί στην δειγματοληψία και δεν αποδίδει σε εδάφη με χάλικες ή σκληρές αργίλους διότι δεν είναι δυνατή η προσχώρηση του κώνου.

Όπως στη μέθοδο SPT και στην CPT εμφανίζονται σφάλματα στα αποτελέσματα και αβεβαιότητες. Ο τρόπος χρήσης και συντήρησης του εξοπλισμού επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Καθώς επίσης και το ίδιο το έδαφος και η κατάσταση που βρίσκεται, αφού η παρουσία γεώτρησης σε κοντινή απόσταση από το σημείο δοκιμής επιφέρει πολύ χαμηλές τιμές ενώ η παρουσία κροκαλοπαγούς εδάφους επιφέρει μεγαλύτερες τιμές από τις πραγματικές. (Joseph E. Bowles, 1997), (Σταματάκη, 2003), (Λουπασάκης, 2015)

3.6 Δοκιμές εδαφοδυναμικής : Δοκιμή cross-hole και down-hole

Η ανάγκη για προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους υπό σεισμικές φορτίσεις ανέπτυξε τις δοκιμές cross-hole και down-hole. Λόγω του σεισμού, χρειάζεται η γνώση της ταχύτητας διάδοσης V_s των διατμητικών κυμάτων S και η ταχύτητα V_p των διαμήκων κυμάτων P. Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σχετίζεται με την τιμή του μέτρου διάτμησης του εδάφους G, σε μικρές παραμορφώσεις. Παράλληλα μέσω της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων υπολογίζεται ο λόγος Poisson ν και το μέτρο ελαστικότητας E.

Ταχύτητα διάδοσης:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.31)$$

,όπου E μέτρο ελαστικότητας και ρ πυκνότητα.

Λόγος Poisson:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad (1.32)$$

,όπου ε_x εγκάρσια καταπόνηση και ε_z αξονική καταπόνηση

3.6.1 CROSS-HOLE

Η cross-hole είναι μια βελτιωμένη μέθοδος για την εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων (μέτρο διάτμησης, μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) και βασίζεται στο χρόνο που χρειάζεται να διανύσουν τα κύματα S και P, σε καθορισμένα σημεία. Κατά την εφαρμογή της διανοίγονται μια ή δυο γεωτρήσεις λήψης, οι οποίες επενδύονται κατά μήκος τους με PVC σωλήνες των 6atm και διαμέτρου 75mm (Φ75). Το κενό μεταξύ εδάφους και σωλήνα πληρούται με ένεμα μπετονίτη σε κατάλληλες αναλογίες. Επίσης διανοίγεται και μια άλλη γεώτρηση εκπομπής, σε ευθυγραμμία με τις προηγούμενες, στην οποία εκτελείται η δοκιμή πρότυπης διείδυσης SPT που παράγει τα σεισμικά κύματα. Οι γεωτρήσεις μεταξύ τους έχουν απόσταση από 3m έως 6m. Στα διαδοχικά βάθη της SPT, καταγράφονται τα σεισμικά κύματα και προσδιορίζονται οι χρόνοι άφιξης t_s , t_p , έπειτα οι ταχύτητες V_s , V_p και κατ' επέκταση το μέτρο διάτμησης G και ελαστικότητας E . Τα μεγέθη αυτά δίνονται από τις σχέσεις :

$$V_s = \frac{D}{t_s} \quad (1.33)$$

$$V_p = \frac{D}{t_p} \quad (1.34)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (1.35)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2} \quad (1.36)$$

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (1.37)$$

Ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την δοκιμή είναι:

- Μια πηγή παραγωγής κυμάτων διατμητικών και διαμηκών. Επιτυγχάνεται συνήθως με την SPT δοκιμή, που προκαλεί κατακόρυφα διατμητικά κύματα μικρού πλάτους και διαμήκη λόγω της μικρής εκτόπισης του εδάφους κατά την διείσδυση.
- Ένα σύστημα δέκτης των κυμάτων. Τοποθετούνται γεώφωνα στις γεωτρήσεις λήψης.
- Ένας παλμογράφος για την καταγραφή της κίνησης του εδάφους στο χρόνο.
- Ένα σύστημα ενεργοποίησης της καταγραφής για την αυτόματη έναρξη των μετρήσεων των κυμάτων.

3.6.2 DOWN-HOLE

Η μέθοδος Down-hole είναι η απλοποιημένη μέθοδος της Cross-hole χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξοπλισμό, εκτός από την πηγή σεισμικών κυμάτων. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι με την Down-hole πραγματοποιείται μόνο μία γεώτρηση και είναι λιγότερο δαπανηρή. Η δημιουργία σεισμικών κυμάτων πραγματοποιείται από πηγή στην επιφάνεια του εδάφους. (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

Κεφάλαιο 4 Μελέτη και επεξεργασία δεδομένων

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από επτά ερευνητικές γεωτρήσεις σε δύο θέσεις στην περιοχή του Κορωπίου Αττικής. Οι θέσεις αυτές επισημαίνονται στα Σχήματα 9 και 10. Ο σκοπός της έρευνας ήταν η ανάλυση και μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Για την διάνοιξη των γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό γεωτρύπανο με τον κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να εξασφαλιστεί το μέγιστο ποσοστό πυρηνοληψίας και ο ελάχιστος θρυμματισμός των δειγμάτων.

4.2 Δειγματοληψία και επί τόπου δοκιμές – στάθμη υπόγειων υδάτων

Στόχος των γεωτρήσεων ήταν η συνεχής συλλογή των δειγμάτων για ακριβέστερη εικόνα της στρωματογραφίας του εδάφους.

Τα δείγματα που ελήφθησαν ήταν:

- Αντιπροσωπευτικά δείγματα με δειγματολήπτες απλού τοιχώματος με την μέθοδο του φραγμού (διακοπής της παροχής νερού προς την κοπτική κεφαλή).
- Αντιπροσωπευτικά δείγματα με δειγματολήπτες διπλού τοιχώματος και παροχή νερού στην κοπτική κεφαλή).

Κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων δε βρέθηκε στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, όμως ενδέχεται να διακυμαίνεται στη διάρκεια του υδρολογικού έτους.

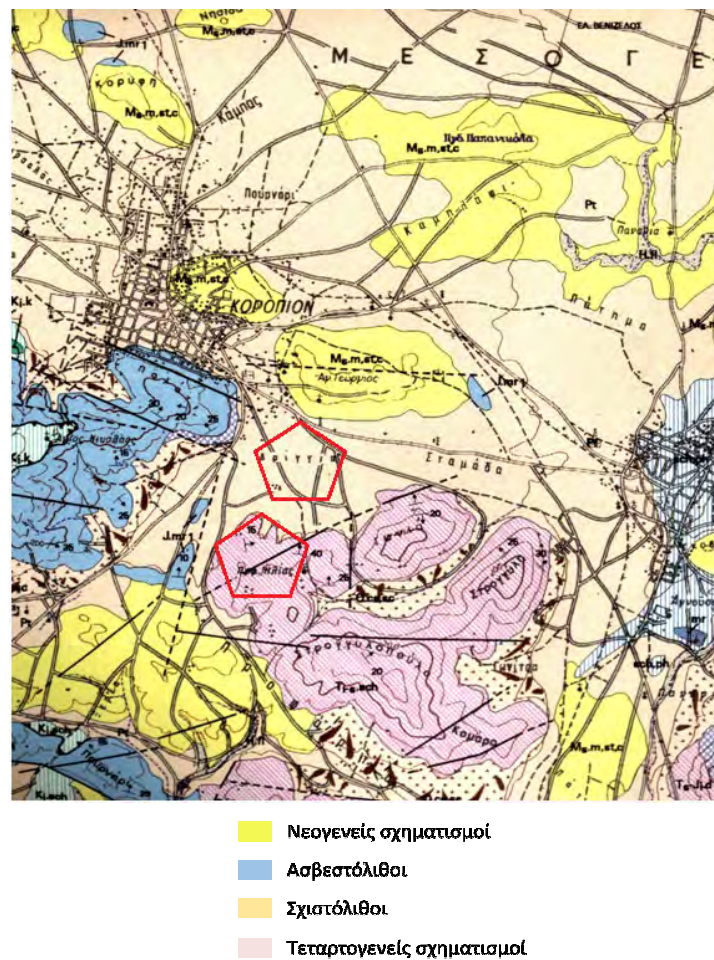
4.3 Γεωλογία περιοχής

Στην ευρύτερη περιοχή σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, φύλλο Κορωπί – Πλάκα, κλίμακας 1:50.000 (Σχήμα 9) εμφανίζονται οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί:

- **Ασβεστόλιθοι – Σχιστόλιθοι** ($T_{i-a.sch}$) ηλικίας Κατώτερου Τριαδικού - Κάρνιου που παρουσιάζονται πολύχρωμοι, πλακώδεις, ανακρυσταλλωμένοι και εν μέρει δολομιτωμένοι. Εναλλάσσονται με μαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους. Κατά θέσεις και σε διάφορους στρωματογραφικούς ορίζοντες απαντώνται μικρές παρεμβολές πρασινόχρωμων πυροκλαστικών υλικών. Μέγιστο ορατό πάχος 250m περίπου.
- **Κατώτερο Μάρμαρο** ($J.mr_1$) ηλικίας Ιουρασικού που είναι λευκό έως τεφρόλευκο, υποκίτρινο έως ερυθρωπό με μικρές ενστρώσεις σχιστολίθων ($J.sch_1$). Το μάρμαρο παρουσιάζεται άστρωτο και καρστικοποιημένο, ενώ προς την κορυφή του γίνεται λεπτο- έως μέσοπλακώδες. Πάχος περίπου 400m.
- **Σχιστόλιθοι** ($K_i.sch$) ηλικίας Κατώτερου Τριαδικού, τεφροί έως φαιόμαυροι, μαρμαρυγιακοί και ασβεστιτικοί μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται πλακώδεις έντονα ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι ($K_i.k$) πάχους 1 – 15m. Ορατό πάχος 50m.
- **Μάργες, πηλοί, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή** ($M_s.m,st,c$) ηλικίας Ανώτερου Μειόκαινου, λιμναίας φάσης κατά κανόνα στρωμένες, μέτριας συνεκτικότητας με παρεμβολές από ερυθροχώματα και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθους ($M_s.tv.k$). Στις παρυφές των λιμναίων αυτών αποθέσεων απαντούν σημαντικού πάχους, πολύμεικτα κροκαλοπαγή.
- **Καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις**, ηλικίας Πλειστοκαίνου (Pt) που αποτελούνται από συνεκτικούς αργιλοπηλούς, ποικίλης λιθολογικής σύστασης, με διάσπαρτες κροκάλες και λατύπες, προερχόμενες από των αποσάθρωση των Νεογενών σχηματισμών και συνεκτικά κροκαλο-λατυποπαγή από αλπικά πετρώματα. Το πάχος τους είναι μεταξύ 20 και 25m.



Σχήμα 9: Θέση Γεωτρήσεων Κορωπίου



Σχήμα 10. Γεωλογικός χάρτης περιοχής Κορωπίου

Από την επισκόπηση των πυρήνων των γεωτρήσεων και με βάση τη γεωλογική περιγραφή συναντήθηκαν οι ακόλουθες γεωτεχνικές στρώσεις:

- **ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ Ι:** Κροκαλο-λατυποπαγές με αμμώδες-αργιλικό και ασβεστίτικο συνδετικό υλικό. Σε όλες τις γεωτρήσεις στα πρώτα επιφανειακά μέτρα παρουσιάζεται πλήρως αποσαθρωμένο, υπό μορφή κροκαλών και λατυπών μέσα σε αργιλοαμμώδες υλικό. Οι κροκάλες και λατύπες είναι ασβεστολιθικής σύστασης. Τα βάθη όπου εμφανίζεται η Στρώση Ι παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.
- **ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΙΙ:** Αργιλικός σχιστόλιθος καστανού χρώματος, με τέμαχος ψαμμίτη μέσα στη μάζα του. Δειγματοληψία υπό μορφή αμμώδους αργίλου με ελάχιστα έως καθόλου χαλίκια, μέσης έως υψηλής πλαστικότητας (CL, CH). Η στρώση συναντήθηκε μόνο στις γεωτρήσεις Γ3 και Γ4 σε βάθη 12.20 – 15.00 και 13.00 – 20.00m αντίστοιχα, όπως φαίνεται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7.

Πίνακας 6. Βάθη γεωτεχνικής στρώσης Ι

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Γ ₁	0.00 – 10.00m (τέλος γεώτρησης)
Γ ₂	0.00 – 15.00m (τέλος γεώτρησης)
Γ ₃	0.00 – 12.20m
Γ ₄	0.00 – 13.00m
Γ ₅	0.00 – 10.00m (τέλος γεώτρησης)
Γ ₆	0.00 – 10.00m (τέλος γεώτρησης)
Γ ₇	0.00 – 10.00m (τέλος γεώτρησης)

Πίνακας 7. Βάθη γεωτεχνικής στρώσης II

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Γ ₃	12.20 – 15.00m (τέλος γεώτρησης)
Γ ₄	13.00 – 20.00m (τέλος γεώτρησης)

4.4 Διαδικασία και επεξεργασία εργαστηριακών αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα, στην περιοχή μελέτης εντοπίστηκαν δύο γεωλογικές στρώσεις σε διαφορετικά βάθη. Τα δείγματα των γεωτρήσεων που είναι αποδεκτά και επιλέχθηκαν για την εργαστηριακή επεξεργασία είναι εκείνα που ο λόγος ύψους προς τη διάμετρο τους είναι της τάξης περίπου 2. Στη στρώση I του κροκαλοπαγούς εδάφους, τα δοκίμια που ήταν σε βραχώδη σχηματισμό υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη και σημειακή φόρτιση στο εργαστήριο. Ενώ τα δείγματα που ήταν απολελημένα μελετήθηκαν με τη βοήθεια της κοκκομετρικής ανάλυσης. Τα δοκίμια των γεωτρήσεων, τα αποτελέσματα της μονοαξονικής θλίψης, σημειακής φόρτισης καθώς και η κοκκομετρική ανάλυση βρίσκονται στο παράρτημα.

Η στατιστική ανάλυση από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, των δειγμάτων που συλλέχθηκαν, έδωσε στους Πίνακες 8, 9 τη διακύμανση και την μέση τιμή των χαρακτηριστικών των γεωτεχνικών στρώσεων I και II (βραχώδης σχηματισμός), ενώ στους Πίνακες 10, 11 παρουσιάζεται η διακύμανση και η μέση τιμή των χαρακτηριστικών των γεωτεχνικών στρώσεων I και II (εδαφικός σχηματισμός).

Πίνακας 8. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης Ι, βραχώδης σχηματισμός

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ Ι				ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	Μ. Ο.
Βαθμός αποσάθρωσης				SW-CW	
Δείκτης ποιότητας	RQD	%		0 - 90	
Ειδικό βάρος	γ	KN/m ³		24.17 - 25.55	24.53
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_c	MPa		10.47 – 55.46	27.23
Δείκτης σημειακής φόρτισης	I_s	MPa		0.26-2.31	1.24

Πίνακας 9. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης ΙΙ, βραχώδης σχηματισμός

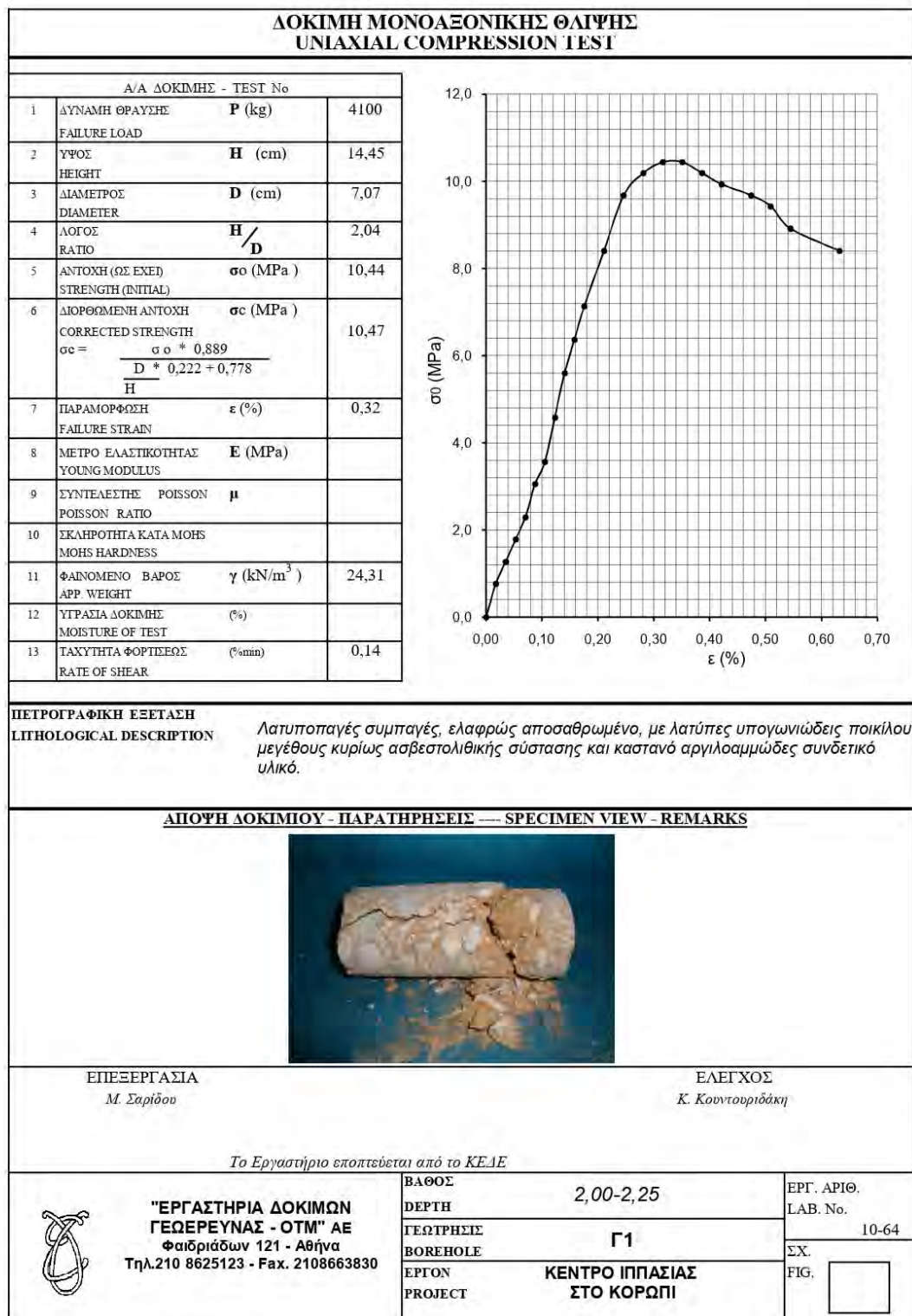
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΙΙ				ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	Μ. Ο.
Ειδικό βάρος	γ	KN/m ³		19,5	19.50
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	σ_c	MPa		1.36	1.36

Πίνακας 10. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης Ι, εδαφικός σχηματισμός

ΣΤΡΩΣΗ Ι				
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	Γ5,Δ1	Μ.Ο.	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
ΒΑΘΟΣ (m)	3,70-4,00			
Ποσοστό χαλικιών%	49,00	49,00	49,00	49,00
Ποσοστό άμμου%	13,00	13,00	13,00	13,00
Ποσοστό λεπτόκοκκων%	38,00	38,00	38,00	38,00
Οριο υδαρότητας LL	28,60	28,60	28,60	28,60
Οριο πλαστικότητας PL	16,70	16,70	16,70	16,70
Δείκτης πλαστικότητας PI	11,90	11,90	11,90	11,90
Ξηρό φαινόμενο βάρος γ_d (KN/m ³)			0,00	0,00
Κορεσμένο φαινόμενο βάρος γ (KN/m ³)			0,00	0,00
Ειδικό βάρος στερεών γ_s (KN/m ³)			0,00	0,00
Λόγος κενών e			0,00	0,00
Φυσική υγρασία w%			0,00	0,00
Βαθμός κορεσμού S%			0,00	0,00
Αριθμός κτύπων πρότυπης δοκιμής διεύθυνσης N				
Παράμετροι αντοχής από τριαξονική δοκιμή (UU) c (KPa/φ ⁰)				
Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u (KPa)			0,00	0,00
Δείκτης συμπίεσεως Cc			0,00	0,00
Συντελεστής συμπιεστότητας $C_v \cdot 10^{-4}$ cm/sec				
Μέτρο συμπίεσης Es (MPa) (50/100/200/400/800)				

Πίνακας 11. Εργαστηριακά αποτελέσματα Γεωτεχνικής Στρώσης ΙΙ, εδαφικός σχηματισμός

ΣΤΡΩΣΗ ΙΙ					
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	Γ3,Δ2	Γ4,Δ4	Μ.Ο.	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή
ΒΑΘΟΣ (m)	14,40-14,70	17,50-17,90			
Ποσοστό χαλικιών%	12,00	0,00	6,00	12,00	0,00
Ποσοστό άμμου%	17,00	1,00	9,00	17,00	1,00
Ποσοστό λεπτόκοκκων%	71,00	99,00	85,00	99,00	71,00
Οριο υδαρότητας LL	27,40	62,00	44,70	62,00	27,40
Οριο πλαστικότητας PL	16,00	27,10	21,55	27,10	16,00
Δείκτης πλαστικότητας PI	11,40	34,90	23,15	34,90	11,40
Ξηρό φαινόμενο βάρος γ_d (KN/m ³)		16,78	16,78	16,78	16,78
Υγρό φαινόμενο βάρος γ (KN/m ³)				0,00	0,00
Φαινόμενο βάρος στερεών γ_s (KN/m ³)				0,00	0,00
Λόγος κενών e		0,55	0,55	0,55	0,55
Φυσική υγρασία w%		22,20	22,20	22,20	22,20
Βαθμός κορεσμού S%		100,00	100,00	100,00	100,00
Αριθμός κτύπων πρότυπης δοκιμής διείδυσης N					
Παράμετροι αντοχής από δοκιμή διάτμησης (CU) c (KPa/φ ⁰)					
Παράμετροι αντοχής από τριαξονική δοκιμή (UU) c (KPa/φ ⁰)					
Εκτίμηση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u (KPa)				0,00	0,00
Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη q_u (KPa)		289,00	289,00	289,00	289,00
Δείκτης συμπίεσεως Cc				0,00	0,00
Συντελεστής συμπιεστότητας C_v *10 ⁻⁴ cm ² /sec					
Μέτρο συμπίεσης E_s (MPa) (50/100/200/400/800)					



Σχήμα 11. Δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη Γεώτρησης Γ1 (βάθους 2,00-2,25)

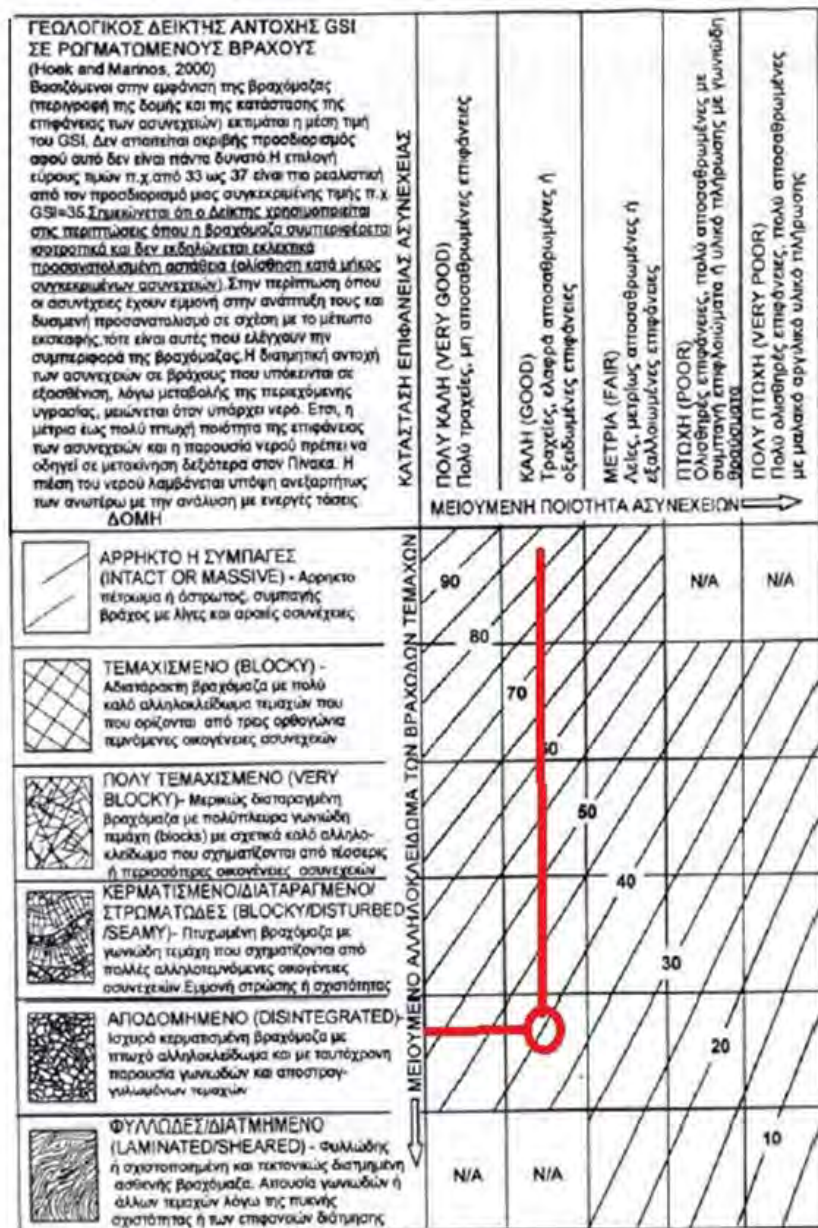
Από τα φύλλα των δοκιμών προκύπτει το διάγραμμα που δείχνει τον ρυθμό αύξησης του φορτίου σε σχέση με την παραμόρφωση. Στο Σχήμα 11 διακρίνεται ότι το δοκίμιο αστοχεί στο φορτίο των 4.100 KN, οπότε διαιρώντας με την επιφάνεια διεξάγεται και η τάση αστοχίας η οποία είναι 10,44MPa.

4.5 Θεώρηση βραχώδους σχηματισμού

Ο γεωλογικός δείκτης αντοχής υπολογίστηκε σύμφωνα με τον πίνακα Hoek and Marinos (Σχήμα 12). Θεωρούμε τα εδαφικά δείγματα ως αποδομημένα και με καλή ποιότητα ασυνεχειών. Επομένως ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI λήφθηκε ίσος με 40. Η σταθερά m_i λήφθηκε προσεγγιστικά για το βραχώδη σχηματισμό ίση με 20 (Σχήμα 13).

Με δεδομένα το GSI, την σταθερά m_i και την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} , υπολογίστηκαν η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ του βραχώδους σχηματισμού. Από τις εργαστηριακές δοκιμές προέκυψε ένα εύρος τιμών για το ειδικό βάρος γ , το δείκτη σειμιακής φόρτισης I_s50 , την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c από 11 εδαφικά δείγματα. Θεωρείτε ένα επαρκές, αντιπροσωπευτικό και αξιόπιστο δείγμα ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά ένα ευρύτερο φάσμα πιθανών δειγμάτων. Σύμφωνα με τους Hoek and Brown και έχοντας δεδομένα τα GSI, m_i και το φάσμα τιμών σ_{ci} , υπολογίστηκαν η ϕ και η c για όλες τις τιμές αντίστοιχα, μέσω του προγράμματος Rocklab. Για τις τιμές αυτές υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας E με την παρακάτω εξίσωση:

$$Em = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (1.38)$$



Σχήμα 12. Γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) (Από Hoek and Marinos, 2000)

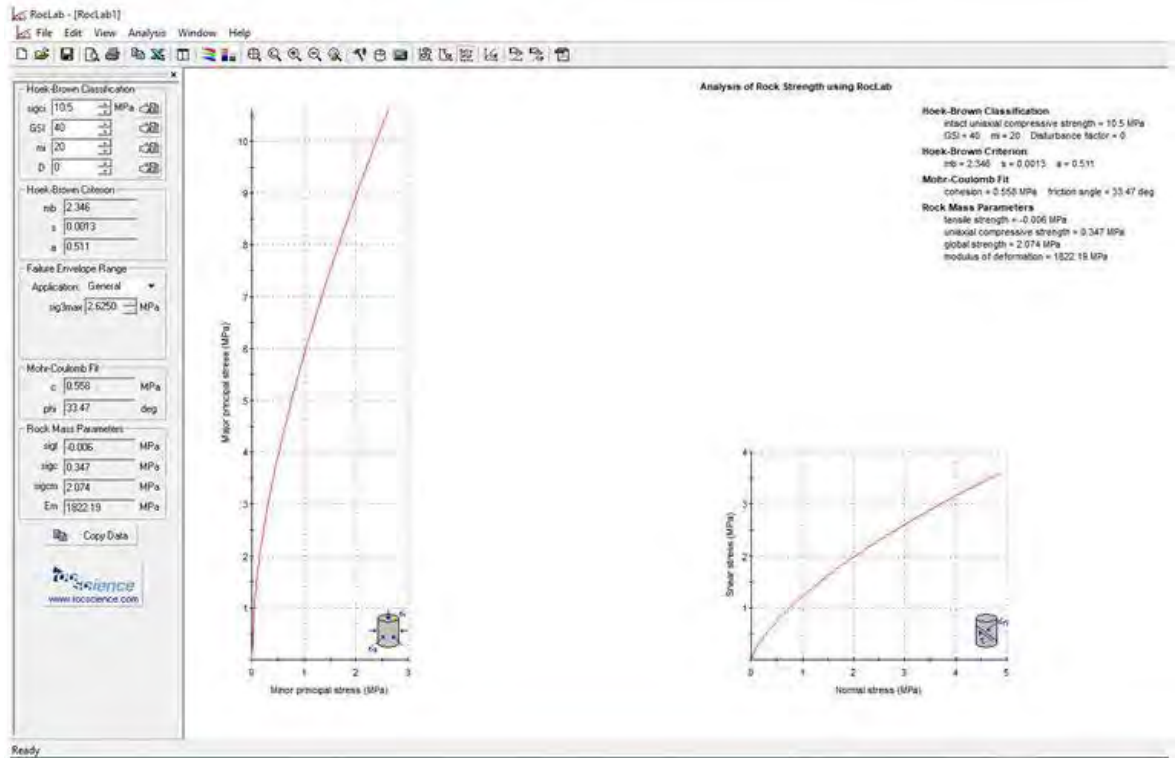
Τύπος	Ομάδα		Υφή			
			Αδρή	Μεση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΣΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή * Λατυποπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιωαλίθοι 7 ± 2 Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργιλόλιθοι 4 ± 2 Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μαργες (7 ± 2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
		Οργανικά				Κρητίς 7 ± 2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 9 ± 3	Χαλαζίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Κερατόλιθοι (19 ± 4)	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχιστές 7 ± 4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλαυτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5 Γρανодиόριτης (29 ± 3)		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υπσoβυσσικά		Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 26 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Ηφ.Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

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

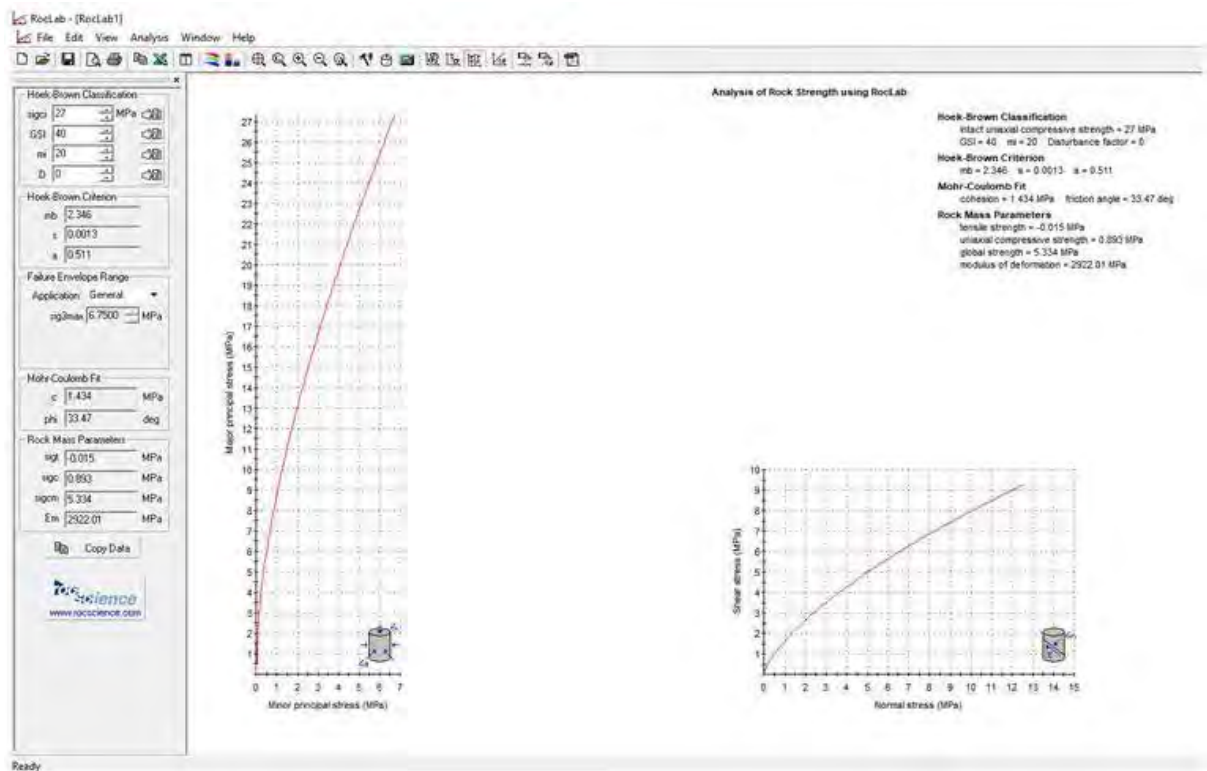
** Οι τιμές του τι αναφέρονται για δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάστηκαν κάθετα στη στρώση ή σχιστότητα. Τα τι μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές αν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

Σχήμα 13. Τιμές της σταθεράς m_i για άρρηκτο βράχο

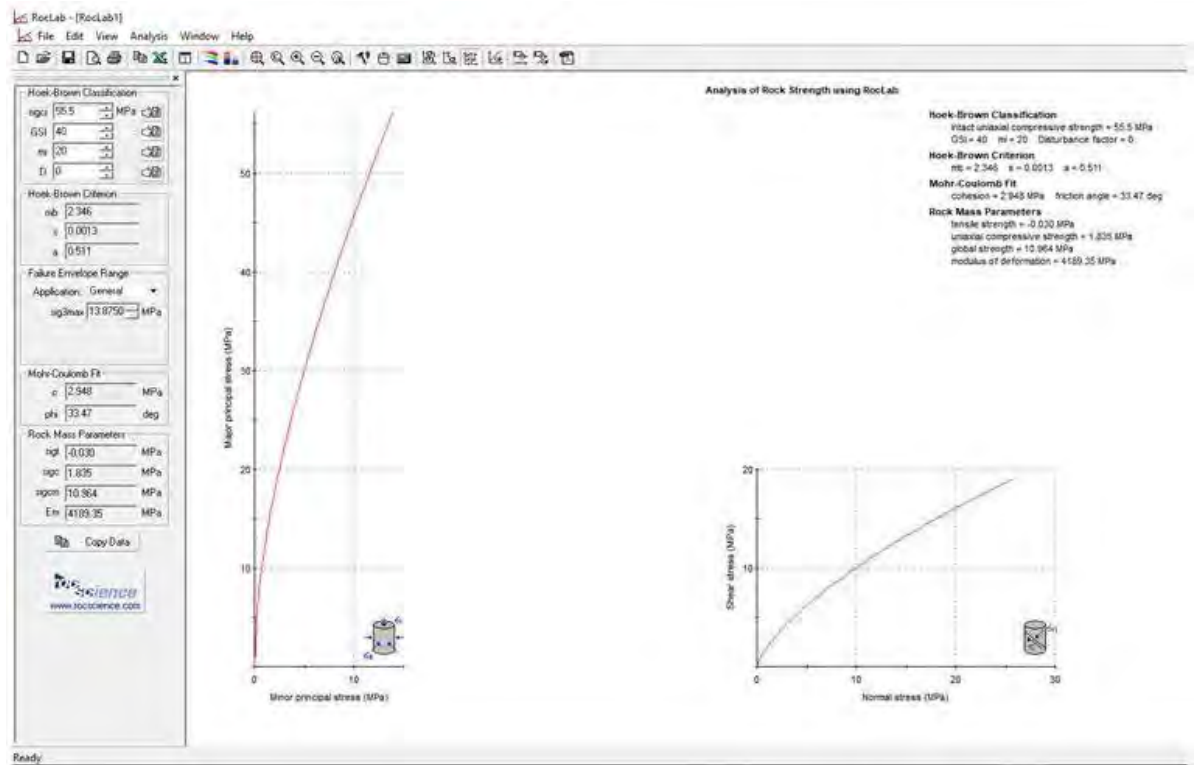
Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι αναλύσεις και οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c και ϕ) και παραμορφωσιμότητας E_m για τρεις τιμές μονοαξονικής θλίψης, Σχήμα 14, 15, 16:



Σχήμα 14. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab



Σχήμα 15. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab



Σχήμα 16. Αποτέλεσμα τιμών διατμητικής αντοχής στο πρόγραμμα Rocklab

Κεφάλαιο 5 Υπολογισμός εδαφικών παραμέτρων μέσω των Νευρωνικών δικτύων

5.1 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα προέκυψαν ως απόρροια της ανάγκης για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων και εξαγωγής αξιόπιστων συμπερασμάτων. Αποτελούν αντικείμενο της Τεχνητής Νοημοσύνης προσομοιώνοντας την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Γενικά τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από επίπεδα διασυνδεδεμένων κόμβων ή νευρώνων, επεξεργάζονται μια πληθώρα πληροφοριών και εξάγουν ένα ή περισσότερα αποτελέσματα (outputs), με βάση ένα σύνολο δεδομένων που εισάγονται (inputs).

Κάθε δεδομένο είναι ένας κόμβος που συνδέεται με άλλους κόμβους μέσω σχέσεων-αλγορίθμων, οι οποίοι έχουν διαφορετική ισχύ επιρροής στο αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνοντας την βαρύτητα των παραμέτρων σε συνδυασμό με τα δεδομένα εισόδου (inputs), τα νευρωνικά δίκτυα βρίσκουν την καλύτερη αξία δίνοντας τα αποτελέσματα (output).

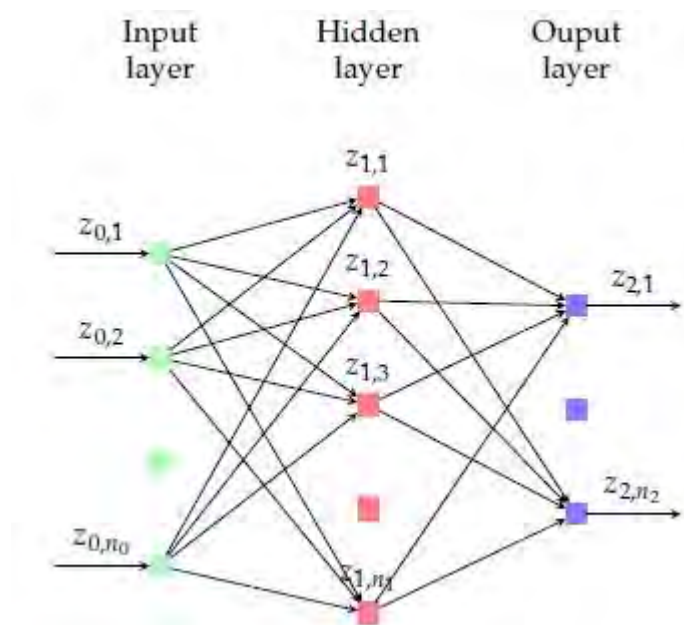
Η σωστή λειτουργία του δικτύου επιτυγχάνεται με την εκπαίδευση, δηλαδή την προσαρμογή του δικτύου για να χειριστεί με τον καλύτερο τρόπο μια εργασία λαμβάνοντας υπόψη υπάρχοντα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα ο αναλυτής συγκεντρώνει ένα μεγάλο όγκο υπαρχόντων δεδομένων και μέσω της εκμάθησης σχεδιάζει το δίκτυο να αντιλαμβάνεται την βαρύτητα των δεδομένων και να δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Η εκπαίδευση τελειώνει όταν εξετάζονται επιπρόσθετα δεδομένα και δεν υπάρχει μεταβολή στο σφάλμα.

Ανάλογα με την περίπτωση του προβλήματος που εξετάζεται υπάρχουν διαφορετικοί τύποι νευρωνικών δικτύων. Τα απλούστερα είναι τα νευρωνικά δίκτυα άμεσης

Τροφοδότησης τα οποία αποτελούνται από τα 3 βασικά επίπεδα και κατευθύνονται από την είσοδο στην έξοδο. Για αναγνώριση και κατηγοριοποίηση εικόνων χρησιμοποιούνται τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα, που λειτουργούν με την βοήθεια γραμμικής άλγεβρας. Παράλληλα υπάρχουν και τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία εξυπηρετούν την ανάγκη πρόβλεψης αποτελεσμάτων.

Τα νευρωνικά δίκτυα άμεσης τροφοδότησης που αναφέρονται σε ένα σύνολο αλληλένδετων επεξεργαστών –νευρώνες, διανέμονται σε δεδομένα εισόδου input, κρυμμένα επίπεδα και σε δεδομένα εξόδου output.

Ένα νευρωνικό δίκτυο ορίζεται ως μια απεικόνιση N^k από την διάσταση της εισόδου R^{d_0} προς την διάσταση εξόδου $R^{d_{k+1}}$, δηλαδή τον αριθμό των στοιχείων inputs και outputs αντίστοιχα. Ένα δίκτυο άμεσης τροφοδότησης έχει k κρυμμένα επίπεδα, με τους αντίστοιχους νευρώνες για $j=1,2,\dots,k$. Σε όλες τις ενδιαμέσες στρώσεις εκτός από της εισόδου, δίνονται οι συντελεστές βάρους ως μητρώο (weightmatrix) και προκατειλημμένους συντελεστές (biasvector), W_j και b_j , οι οποίοι αποτελούν τις παραμέτρους του δικτύου. Το διάνυσμα εισόδου συμβολίζεται με $z_0 \in R^{d_0}$, και το διάνυσμα εξόδου με $z_j \in R^{d_j}$, για $j=1,2,\dots,k+1$. Μία τυπική απεικόνιση του Νευρωνικού Δικτύου Άμεσης Τροφοδότησης δίνεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17. Μορφή Νευρωνικού Δικτύου

Κάθε ενδιάμεση στρώση έχει την εξής εξίσωση:

$$z_j = \delta j(W_j \times z_{j-1} + b_j), \forall j \in \{1, 2, \dots, k+1\} \quad (1.39)$$

,όπου $\delta j()$ είναι μια μη γραμμική συνάρτηση.

Για την αξιοπιστία ενός νευρωνικού δικτύου ορίζεται μια συνάρτηση κόστους η οποία θα συγκρίνει τα αποτελέσματα εξόδου με τα υπάρχοντα δεδομένα που έχουν διεξαχθεί εμπειρικά ή εργαστηριακά.

Το σφάλμα εκτιμάται μέσω μια συνάρτησης απώλειας όπως η μέση τετραγωνική νόρμα.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (output_{true} - output_{pred})^2 \quad (1.40)$$

Όπου:

- n είναι το πλήθος των παρατηρήσεων
- $output_{true}$ αναφέρεται στην επιθυμητή τιμή του αποτελέσματος, είναι δηλαδή η σωστή απάντηση.
- $output_{pred}$ αναφέρεται στην έξοδο (εκτίμηση, πρόβλεψη) του νευρωνικού δικτύου

Όσο καλύτερα θα είναι τα αποτελέσματα του δικτύου τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή του σφάλματος.

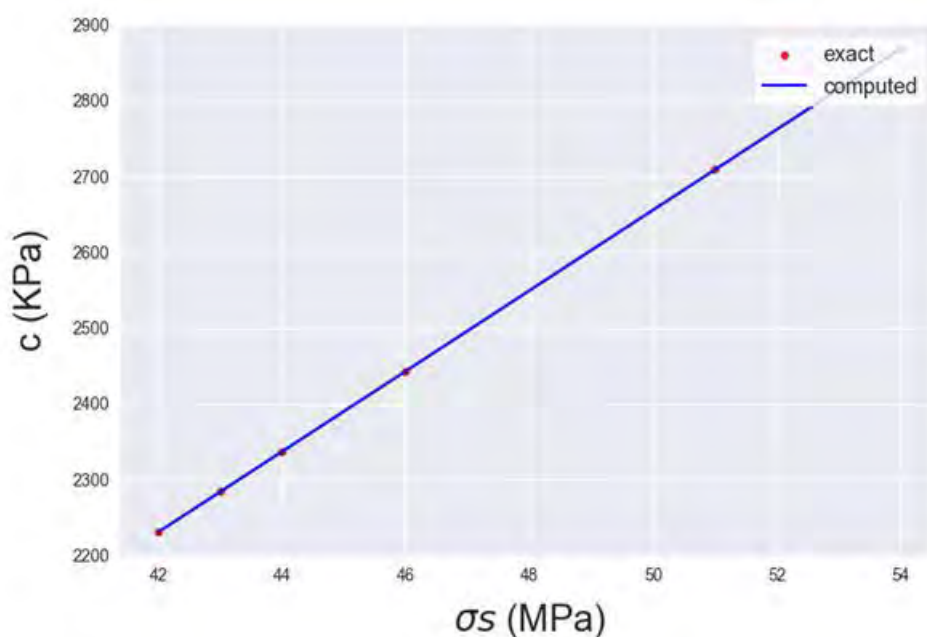
5.2 Επεξεργασία Δεδομένων

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν δύο νευρωνικά δίκτυα μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ανοιχτού κώδικα MSolve του εργαστηρίου Στατικής και Αντισεισμικών ερευνών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών (ΕΜΠ) (mgroun.ntua.gr) (<https://github.com/mgrounntua>). Σκοπός του πρώτου νευρωνικού δικτύου ήταν η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E και του δεύτερου η συνοχής c του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Ως δεδομένα εισόδου λήφθηκαν τα πειραματικά δεδομένα του Κεφαλαίου 3, λαμβάνοντας 50 τιμές για κάθε δεδομένου εισόδου εντός του εύρους των εργαστηριακών δοκιμών (Πίνακας 12). Συγκεκριμένα οι τιμές εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές του δείκτη σημειακής φόρτισης $Is50$, της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σ_c και του ειδικού βάρους γ .

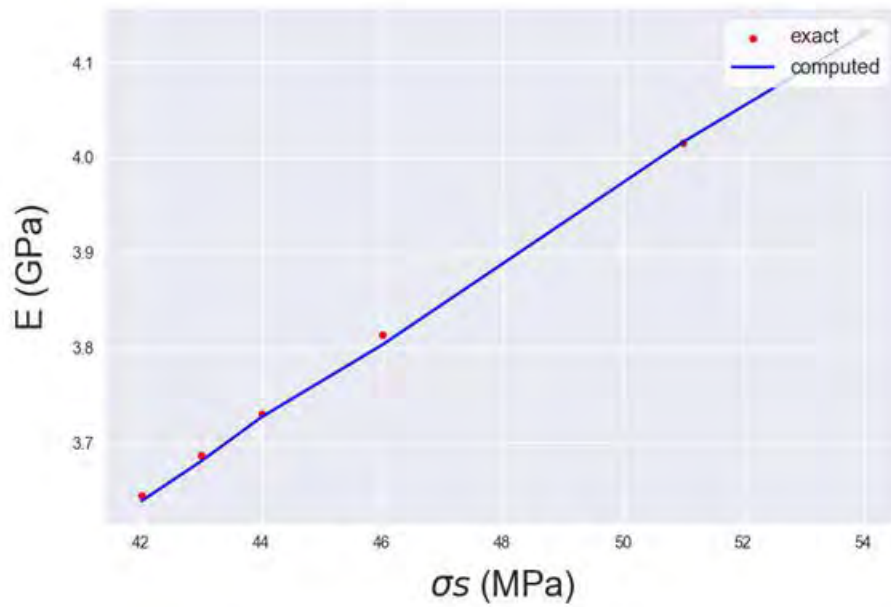
Πίνακας 12: Πίνακας δεδομένων εισόδου (σ_c , I_{ss0} , GSI) και τιμές εξόδου (E και ν)

INPUTS			OUTPUT	
σ_c (MPa)	I_{ss0} (MPa)	γ (KN/m ³)	ν (Kpa)	E (GPa)
24,16	2,31	24,40	1285	2,764215
10,47	1,00	24,31	558	1,819589
2,72	0,26	24,20	144	0,927369
55,46	5,30	25,55	2946	4,187839
16,67	1,59	25,36	885	2,295721
2,77	0,27	24,20	147	0,936243
31,41	3,00	24,36	1668	3,151621
1,36	0,13	19,50	72	0,655797
17,80	1,70	24,25	945	2,372521
21,00	2,01	24,17	145	2,576972
18,48	1,77	24,34	983	2,41737
15,00	1,43	24,18	797	2,177939
20,00	1,91	24,20	1062	2,514867
10,00	0,96	24,21	531	1,778279
35,00	3,35	25,30	1859	3,326856
55,00	5,26	25,20	2921	4,170435
50,00	4,78	25,50	2656	3,976354
45,00	4,30	25,13	2390	3,7723
22,00	2,10	24,19	1168	2,637615
12,00	1,15	24,17	637	1,948007
34,00	3,25	24,80	1806	3,278985
37,00	3,54	25,00	1965	3,420589
49,00	4,68	24,70	2602	3,936389
53,00	5,07	24,65	2815	4,093907
17,00	1,63	24,55	903	2,318593
21,00	2,01	25,40	1115	2,576972
23,00	2,20	25,11	1222	2,696894
31,00	2,96	25,00	1646	3,130984
41,00	3,92	24,89	2178	3,600741
39,00	3,73	24,98	2071	3,51182
14,00	1,34	24,85	744	2,104089
52,00	4,97	24,75	2762	4,055101
25,00	2,39	24,57	1328	2,811707
16,00	1,53	25,50	850	2,249365
18,00	1,72	25,53	956	2,385812
19,00	1,82	24,90	1009	2,451189
24,00	2,29	24,12	1275	2,754899
27,00	2,58	24,38	1434	2,922011
30,00	2,87	24,42	1593	3,08007
29,00	2,77	24,45	1540	3,028301
48,00	4,59	25,54	2549	3,896015
47,00	4,49	25,27	2496	3,855218
13,00	1,24	25,29	690	2,02755
26,00	2,49	24,29	1381	2,867389
28,00	2,68	24,92	1487	2,975631
32,00	3,06	25,38	1700	3,181083
33,00	3,15	24,53	1753	3,230405

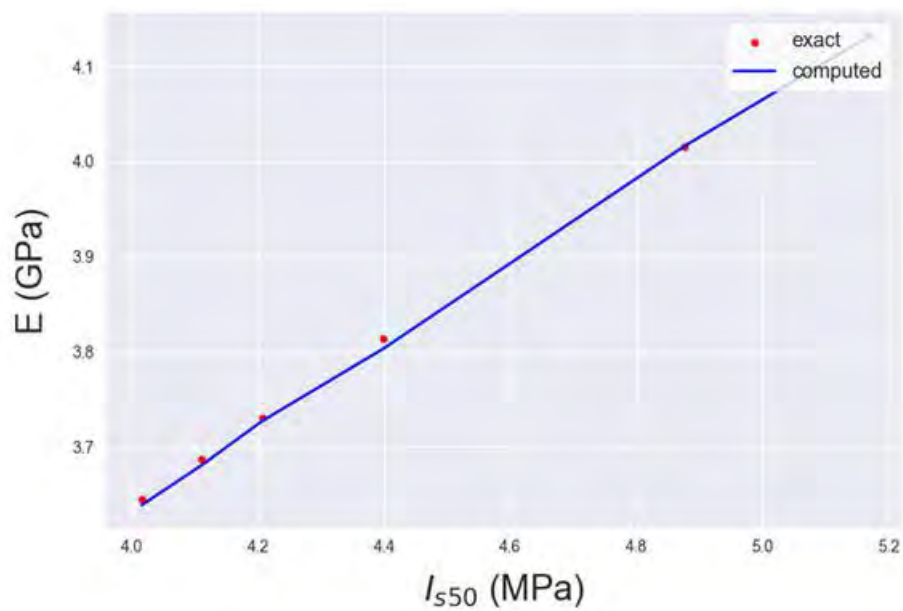
Τα γραφικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 18-25. Σε αυτά τα στοιχεία παρατίθεται το μεγαλύτερο σχετικό τετραγωνικό σφάλμα των εκτιμήσεων του νευρωνικού δικτύου και του συνόλου δεδομένων, μαζί με τον αριθμό των εποχών (epochs) που απαιτήθηκαν για την επίτευξη σύγκλισης του μοντέλου, οι οποίες ανέρχονται στις 2.000 επαναλήψεις. Επιπλέον, παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση των δύο μοντέλων νευρωνικών δικτύων σε τρισδιάστατη γραφική παράσταση, καθώς και η προβολή του μοντέλου σε κάθε άξονα εισόδου X , Y , Z , που αντιστοιχούν στις μεταβλητές $Is50$, σ_s και γ . Τέλος, τα σημεία του συνόλου δεδομένων απεικονίζονται επίσης στα προαναφερθέντα Σχήματα για να δείξουν την ουσιαστική προσαρμογή του μοντέλου στα παρεχόμενα δεδομένα.



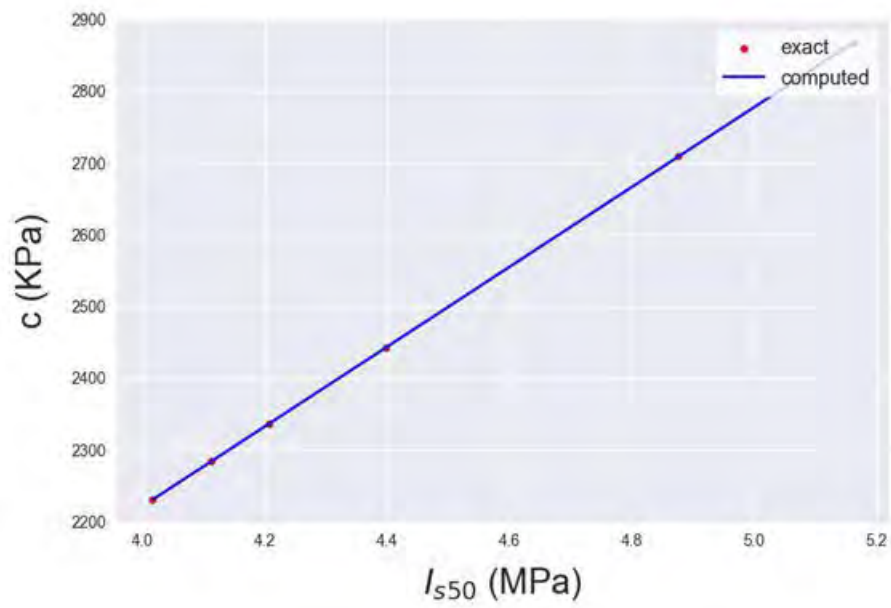
Σχήμα 18. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψης



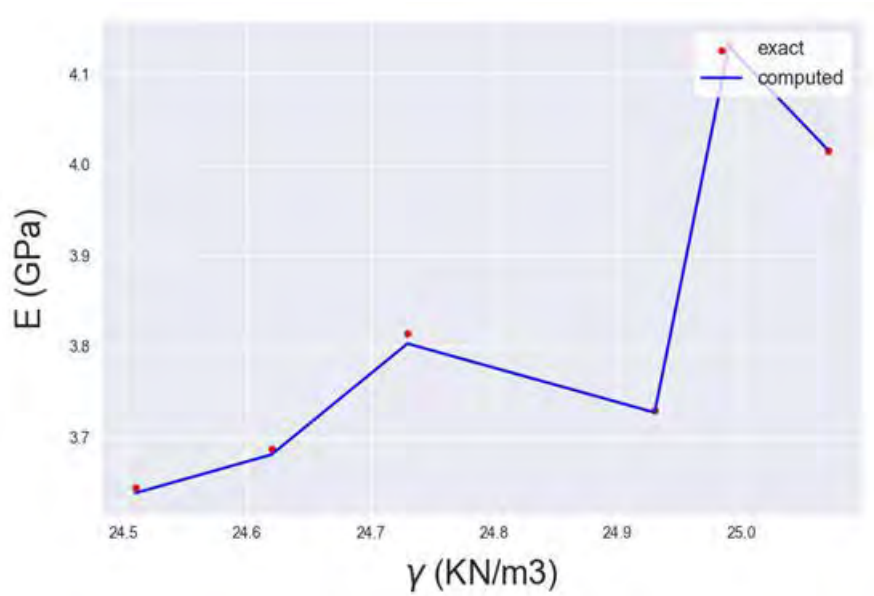
Σχήμα 19. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε μονοαξονικής θλίψης



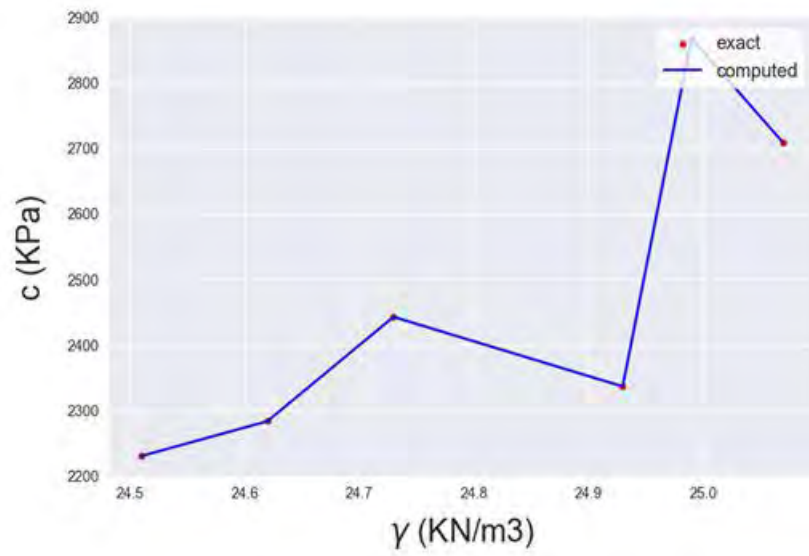
Σχήμα 20. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και του δείκτη σημειακής φόρτισης



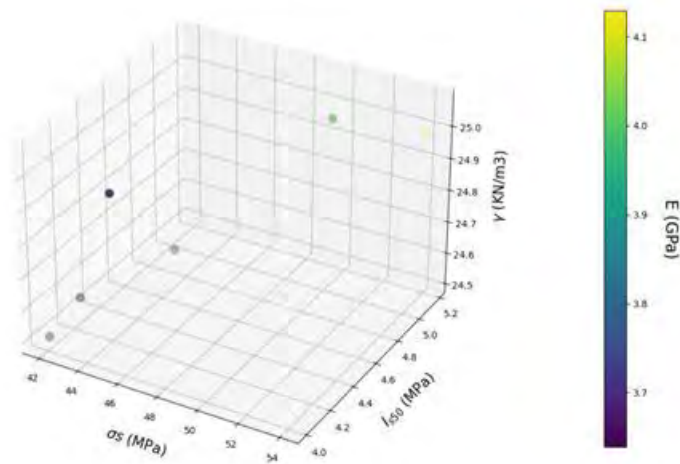
Σχήμα 21. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και του δείκτη σημειακής φόρτισης



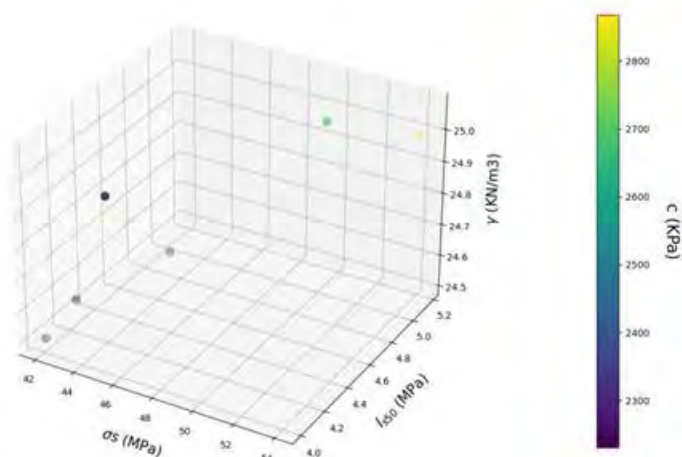
Σχήμα 22. Απεικόνιση σχέσης του μέτρου ελαστικότητας και του ειδικού βάρους



Σχήμα 23. Απεικόνιση σχέσης της συνοχής και του ειδικού βάρους



Σχήμα 24. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων εισόδου και του μέτρου ελαστικότητας



Σχήμα 25. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων εισόδου και της συνοχής

5.3 Αποτελέσματα του Νευρωνικού Δικτύου

Η ανάλυση σύγκλισης του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου παρουσιάζει την ποιότητα του διανύσματος των δεδομένων και την ακρίβεια των εκτιμήσεων του μοντέλου. Η μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στα δύο νευρωνικά δίκτυα, βάσει του σχετικού τετραγωνικού μέσου σφάλματος L2 (Πίνακας 13), βρίσκεται εντός του εύρους του 0,08 για το μέτρο Ελαστικότητας και του 10^{-5} για τη συνοχή. Και οι δύο αυτές τιμές για τους μέσους εκτιμητές είναι σχετικά μικρές, υποδεικνύοντας σημαντική ακρίβεια του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη το παρεχόμενο σύνολο δεδομένων. Αυτή η ακρίβεια κρίνεται ικανοποιητική για εφαρμογές στη Γεωτεχνική και Γεωλογική Μηχανική.

Είναι εμφανές ότι με την αύξηση του μήκους του διανύσματος του συνόλου δεδομένων, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αριθμός των επαναλήψεων για σύγκλιση βρίσκεται γύρω στις 2.000, μπορεί να συμπεραθεί ότι το

μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα για περισσότερα υπολογιστικά και πειραματικά δεδομένα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των παραμέτρων του υλικού.

Συνολικά, οι εκτιμήσεις που παρέχονται από τα προτεινόμενα μοντέλα είναι αξιόπιστες ως μεταβλητές εισόδου για ένα μοντέλο Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Ειδικά, στη διαδικασία σχεδίασης, λαμβάνεται υπόψη η τυπική απόκλιση των παραμέτρων εισόδου του υλικού, με σημαντικά αυξημένες τιμές (50% ή περισσότερο). Αυτό επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των εκτιμήσεων των μοντέλων για πρακτικές εφαρμογές.

Οι παρατηρήσεις στο μοντέλο που εκτιμά το μέτρο ελαστικότητας δείχνουν την επίδραση κάθε εισαγόμενης παραμέτρου στην πραγματική τιμή. Το εύρος των προβλέψεων του μοντέλου είναι στο υποσύνολο [3.5-4.2] σε GPa. Επιπλέον, όταν το Is_{50} και το σ_s αυξάνονται, το E αυξάνεται επίσης, ενώ για το γ υπάρχουν τμήματα αύξησεων και τμήματα μειώσεων της τιμής εξόδου. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αύξηση του E που προκύπτει από το εύρος των τιμών εξόδου είναι μικρότερη του 20%. Το υποσύνολο του εύρους των εκτιμήσεων ισχύει για τιμές E που είναι συνυφασμένες για πετρώματα με αργιλικό αποσαθρωμένο βράχο. Οι τιμές εισόδου για τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι $Is_{50}=5.1$, $\sigma_s=54$ MPa και $\gamma=24.9$ kNm³. Θεωρούνται μεγάλες τιμές για το ειδικό βάρος και μέτριες τιμές για τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου, οι οποίες ανταποκρίνονται σε πετρώματα που έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση, αλλά διατηρούν ακόμα χαρακτηριστικά πετρώματος. Επομένως, οι εκτιμήσεις του μοντέλου αντιπροσωπεύουν ένα αξιόπιστο και ρεαλιστικό εύρος εκτιμήσεων.

Οι αποτυπώσεις στο μοντέλο που προσεγγίζει τη συνοχή απεικονίζουν το αντίκτυπο κάθε εισαγόμενης μεταβλητής στην πραγματική τιμή. Οι εκτιμήσεις του μοντέλου βρίσκονται στο υποσύνολο [2250-2850] σε KPa. Επιπλέον, όταν το Is_{50} και το σ_s αυξάνονται, η συνοχή αυξάνεται επίσης με μεταβαλλόμενη κλίση, ενώ για το γ υπάρχουν υποσύνολα αυξησεων και υποσύνολα μειώσεων της εκτίμησης της τιμής εξόδου. Παρ' όλα αυτά, η μεγαλύτερη αύξηση της συνοχής που προκύπτει από το υποσύνολο των τιμών εξόδου δεν ξεπερνά το 26%. Το υποσύνολο των προβλέψεων αντιστοιχεί σε συνήθεις τιμές συνοχής για πετρώματα με αργιλική δομή και σύσταση. Οι παράμετροι εισόδου για τη μεγαλύτερη τιμή του c είναι $Is_{50}=5.1$, $\sigma_s=54$ MPa και $\gamma=24.9$ kN·m³. Θεωρούνται μεγάλες τιμές για το ειδικό βάρος και μέτριες τιμές για τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου, οι οποίες ανταποκρίνονται σε πετρώματα που έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση, αλλά διατηρούν ακόμα χαρακτηριστικά

πετρώματος. Συνεπώς, οι εκτιμήσεις του μοντέλου αντιπροσωπεύουν ένα αξιόπιστο και ρεαλιστικό εύρος εκτιμήσεων.

Από τα σχήματα των προβολών των τιμών εισόδου στην τρισδιάστατη απεικόνιση προκύπτει, για τις τιμές των I_{s50} και σ_s , ότι το μοντέλο είναι συνδυασμός επιπέδων. Δηλαδή απεικονίζει ένα ευθιεογενές μοντέλο. Για τις τιμές του ειδικού βάρους παρατηρούνται αυξομειώσεις των τιμών και με περισσότερα δεδομένα εισόδου θα προέκυπτε, ενδεχομένως, καμπυλόγραμμο μοντέλο. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας και η συνοχή δεν είναι γραμμική συνάρτηση του ειδικού βάρους.

Συνοψίζοντας τα κύρια γενικά συμπεράσματα είναι δύο. Τα προτεινόμενα νευρωνικά δίκτυα είναι αξιόπιστα, ρεαλιστικά με σημαντική ακρίβεια για την Γεωτεχνική Μηχανική. Επιπλέον, η σύγκλιση είναι γρήγορη και επιτυγχάνεται εύκολα. Οι παράμετροι εισαγωγής που παρέχουν βελτιστοποίηση για την ακαμψία και την αντοχή του βράχου είναι κοντά με αυτές που αναμένονται από τη θεωρία, και αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διατύπωση του μοντέλου είναι καλά θεμελιωμένη. Τέλος, η προσαρμοστικότητα σε περισσότερα δεδομένα είναι ένα πρόσθετο πλεονέκτημα που παρέχεται στα προτεινόμενα μοντέλα, το οποίο υποδηλώνει ότι με ελαφρυμένο υπολογιστικό κόστος είναι διαθέσιμη μια πιο ακριβής εκτίμηση.

Πίνακας 13. Μέγιστο εκτιμώμενο σφάλμα του μοντέλου

L2 error	
E	0,08
c	10^{-5}

5.4 Άλλες εφαρμογές του Νευρωνικού Δικτύου

Για την βελτίωση του μοντέλου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία, λαμβάνοντας δεδομένα από γεωτρήσεις της ίδιας περιοχής ή περιοχών με παρόμοιο εδαφικό υλικό και ιδιότητες, το μοντέλο εκτιμά με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Επίσης όσο περισσότερα δεδομένα εισάγονται τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η μορφολογία της περιοχής. Οι τιμές που θα μπορούσαν να εμπλουτίσουν το συγκεκριμένο μοντέλο είναι για κροκαλοπαγές σχηματισμούς είναι για GSI από 10 έως 50 (Σχήμα 12), και για m_i από 15 έως 25 (Σχήμα 13).

Το μοντέλο αυτό λειτουργεί ως εκτιμητής εδαφικού υλικού. Δηλαδή εισάγοντας τιμές δεδομένων από ένα βραχώδες έδαφος και εξάγοντας τη συνοχή και το μέτρο Ελαστικότητας μπορεί να επαληθευτεί εάν το δείγμα του εδάφους ανήκει στην κατηγορία των Κροκαλο-λατυποπαγών με προσμίξεις αμμώδους ή αργιλικού υλικού.

Αφού το δίκτυο βελτιώνεται με περισσότερα δεδομένα και λειτουργεί ως εκτιμητής δίνει την δυνατότητα απευθείας χρήσης σε παρόμοια περιοχή χωρίς να είναι απαραίτητη η λήψη δειγμάτων και εργαστηριακής επεξεργασίας. Αυτό οδηγεί στην ταχύτερη εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους και στην εκμείνιση του κόστους, αφού δεν χρειάζεται να γίνει επί τόπου έρευνα στην περιοχή (γεωτρήσεις, λήψη δειγμάτων, επίβλεψη κ.α.).

Έχοντας υπολογίσει τη συνοχή και το μέτρο ελαστικότητας μέσω του νευρωνικού δικτύου, μπορούν να μελετηθούν κι άλλες ιδιότητες του εδάφους που συνδέονται με τις δύο αυτές παραμέτρους. Αρχικά μπορεί να εκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα και κατ' επέκταση η μέγιστη φόρτιση που μπορεί να δεχθεί ο φέροντας οργανισμός. Επιπλέον μέσω της συνοχής υπολογίζεται η ευστάθεια πρανών. Τα δύο αυτά μεγέθη, δηλαδή η φέρουσα ικανότητα και η ευστάθεια των πρανών, είναι παράμετροι που καθορίζουν την μελλοντική θεμελίωση μιας κατασκευής. Η συνοχή υπολογίζει την υδατική ροή με την βοήθεια του νόμου του Darcy, περιγράφοντας την υδραυλική συνοχή του εδάφους. Οι μετακινήσεις και οι χρονική εξέλιξη των μετακινήσεων είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας που εκτιμάται από το μοντέλο. Τέλος αν πραγματοποιείται θεμελίωση με πασσάλους, η παραμορφωσιμότητα τους εντός του εδάφους επηρεάζεται από το μέτρο ελαστικότητας.

Κεφάλαιο 6 Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής εργασίας

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης των νευρωνικών δικτύων άμεσης τροφοδοσίας στην πρόβλεψη της συνοχής και του μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αφού συλλέχθηκαν τα εργαστηριακά δεδομένα, μέσω των δειγμάτων των γεωτρήσεων για μια εξεταζόμενη περιοχή (Κορωπί, Αττικής), δημιουργήθηκαν νευρωνικά δίκτυα. Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων που εξήχθησαν από τα νευρωνικά δίκτυα κρίθηκαν αποδεκτές λόγω σύγκλισης με αυτές των εργαστηριακών δοκιμών. Ο στόχος πραγματοποιήθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό αφού το σφάλμα για τις δύο παραμέτρους ήταν πολύ μικρό. Είναι σημαντικό να υπάρχει άριστη γνώση των συνθηκών που επικρατούν στο έδαφος στην περιοχή μελέτης ώστε να μην αυξάνεται το σφάλμα πρόβλεψης και να χρησιμοποιείται ένα αποδεκτό πλήθος δεδομένων. Δεδομένου των ανωτέρω, η χρήση των νευρικών δικτύων υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια και συμβάλλει στην μείωση του κόστους και του χρόνου υπολογισμού των εδαφικών παραμέτρων.

6.2 Προτάσεις μελλοντικής εργασίας

Το αντικείμενο και το μοντέλο των νευρωνικών δικτύων που μελετήθηκε, μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο σε μελέτες με παρόμοια χαρακτηριστικά του εδάφους τόσο για την εφαρμογή, όσο και για την περαιτέρω βελτίωση της μεθόδου. Ενδιαφέρον θα ήταν να αυξανόταν ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι πέρα από τις μεταβλητές εισόδου του δείκτη σημειακής φόρτισης Is_{50} , της αντοχής σε μονοαξονική

θλίψη σ_s και του ειδικού βάρους γ , για βραχώδεις σχηματισμούς θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη επιμέρους παράμετροι, όπως το GSI, το m_i και ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας RQD. Επίσης θα μπορούσε το μοντέλο να εξάγει (output) την αστράγγιστη διατμητική αντοχή και τον λόγο Poisson.

Βιβλιογραφία

6.2.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ: ΒΙΒΛΙΟ

- Καββαδάς Μ.(2016), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, 2^η έκδοση, Αθήνα.
- Καββαδάς Μ.(2007), Σημειώσεις Θεμελιώσεων Τεχνικών Έργων, Έκδοση Ε.Μ.Π.
- Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν.(2002), Τεχνική Γεωλογία, Αθήνα.
- Τριανταφύλλου Α.(2017), Δομικά Υλικά.
- Γκαζέτας Γ.(2007), Σημειώσεις εδαφοδυναμικής, Αθήνα.
- Γεωργιάδης Κ., Γεωργιάδης Μ.(2009), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Θεσσαλονίκη.
- A. A. Antoniou ,Estimation of UCS from PLT for sedimentary rocks, with emphasis to conglomerate and breccias.
- Savvides A.A.(2021), Uncertainty quantification in Geotechnical Engineering.
- Joseph E. Bowles(1997), FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN, Fifth Edition.
- Graham Barnes(2014), Εδαφομηχανική αρχές και εφαρμογές, 3^η Αγγλική έκδοση.
- Λουπασάκης Κ. (2015), Τεχνική Γεωλογία (Σημειώσεις Διαλέξεων), Αθήνα
- Μαραγκός Χ.(2020), Τεχνικά Έργα Υποδομής

6.2.2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- <https://descubrir.online/el/suelos-arenosos/>
- <https://el.thpanorama.com/articles/medio-ambiente/suelos-arenosos-caractersticas-propiedades-composicin-localizacin.html>

6.2.3 ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- Γιάχου Ο., Τσινόπουλος Α(2009), Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και της διατμητικής αντοχής καθώς και της φέρουσας ικανότητας των εδαφών/ Πτυχιακή εργασία, Αιγάλεω: Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα δομικών έργων, ΤΕΙ Πειραιά.

Καβουσάνος Ε.,(2003), Αξιολόγηση γεωτρητικών δεδομένων και εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων για την αριθμητική προσομοίωση ευστάθειας πρανών/ Πτυχιακή εργασία, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα ορυκτών πόρων.

6.2.4 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

Ambrosios-Antonios Savvides , Leonidas Papadopoulos, (2022), A Neural Network Model for Estimation of Failure Stresses and Strains in Cohesive Soils, Geotechnics MDPI

Ambrosios-Antonios Savvides, Andreas A. Antoniou, Leonidas Papadopoulos, Anastasia Monia, Kalliopi Kofina, (2023), An estimation of clayey oriented rock mass material properties through feed forward neural networks, Geotechnics MDPI

Παράρτημα Α



Εικόνα 1: Δείγματα γεώτρησης Γ1 (βάθους 0-5 μέτρων)



Εικόνα 2: Δείγματα γεώτρησης Γ1 (βάθους 5-10 μέτρων)



Εικόνα 1: Δείγματα γεώτρησης Γ2 (βάθους 0-5 μέτρων)



Εικόνα 2: Δείγματα γεώτρησης Γ2 (βάθους 5-10 μέτρων)



Εικόνα 3: Δείγματα γεώτρησης Γ2 (βάθους 10-15 μέτρων)



Εικόνα 4: Δείγματα γεώτρησης Γ3(βάθους 0-5 μέτρων)



Εικόνα 5: Δείγματα γεώτρησης Γ3 (βάθους 5-10 μέτρων)



Εικόνα 6: Δείγματα γεώτρησης Γ3 (βάθους 10-15 μέτρων)



Εικόνα 7: Δείγματα γεώτρησης Γ4 (βάθους 0-4 μέτρων)



Εικόνα 8: Δείγματα γεώτρησης Γ4 (βάθους 4-8 μέτρων)



Εικόνα 9: Δείγματα γεώτρησης Γ4 (βάθους 8-12 μέτρων)



Εικόνα 10: Δείγματα γεώτρησης Γ4 (βάθους 12-16 μέτρων)



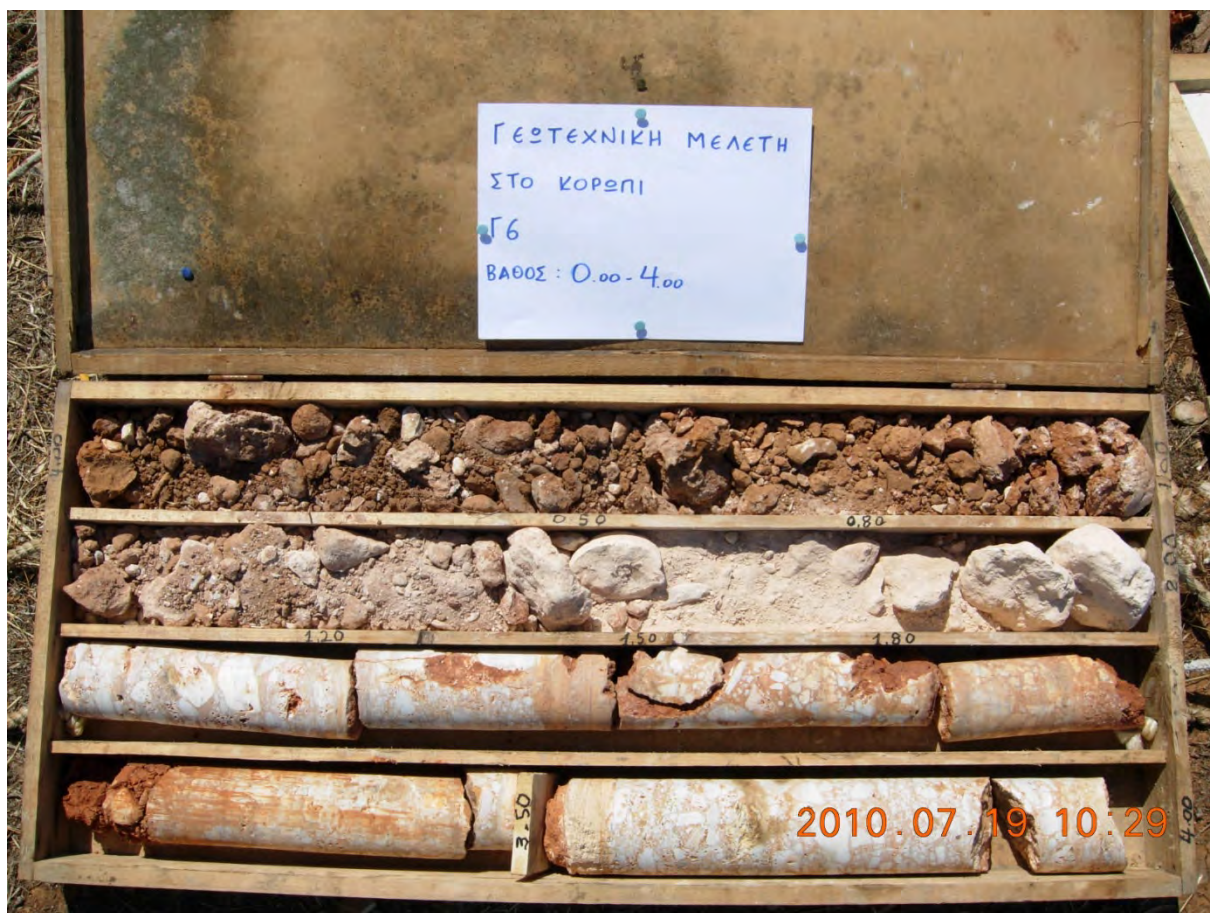
Εικόνα 11: Δείγματα γεώτρησης Γ4 (βάθους 16-20 μέτρων)



Εικόνα 12: Δείγματα γεώτρησης Γ5 (βάθους 0-5 μέτρων)



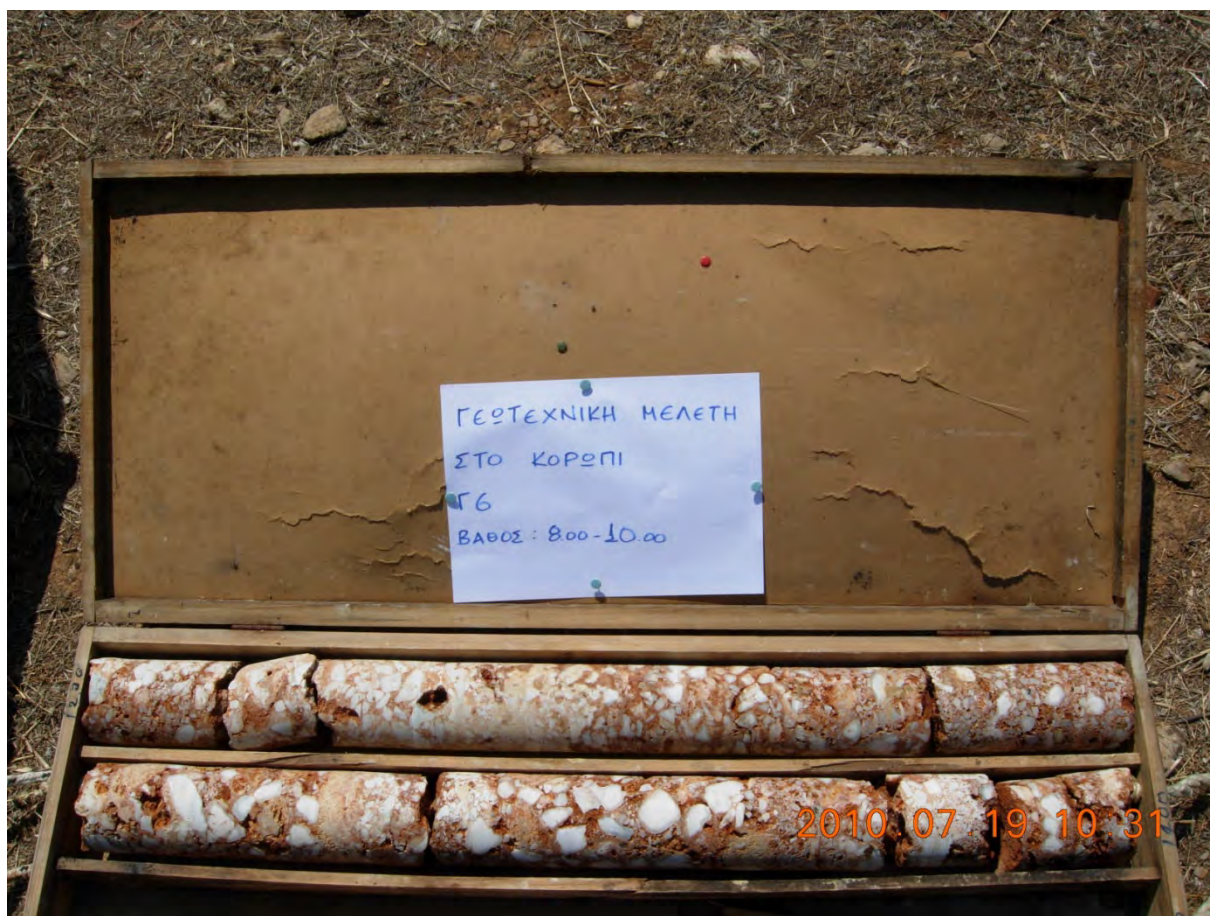
Εικόνα 13: Δείγματα γεώτρησης Γ5 (βάθους 5-10 μέτρων)



Εικόνα 14: Δείγματα γεώτρησης Γ6 (βάθους 0-4 μέτρων)



Εικόνα 15: Δείγματα γεώτρησης Γ6 (βάθους 4-8 μέτρων)



Εικόνα 16: Δείγματα γεώτρησης Γ6 (βάθους 8-10 μέτρων)



Εικόνα 17: Δείγματα γεώτρησης Γ7 (βάθους 0-4 μέτρων)



Εικόνα 18: Δείγματα γεώτρησης Γ7 (βάθους 4-8 μέτρων)



Εικόνα 19: Δείγματα γεώτρησης Γ7(βάθους 8-10 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ UNIAXIAL COMPRESSION TEST			
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ - TEST No			
1	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD	P (kg)	29500
2	ΥΨΟΣ HEIGHT	H (cm)	16,82
3	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER	D (cm)	8,24
4	ΛΟΓΟΣ RATIO	H/D	2,04
5	ΑΝΤΟΧΗ (ΩΣ ΕΧΕΙ) STRENGTH (INITIAL)	σ₀ (MPa)	55,32
6	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ CORRECTED STRENGTH $\sigma_c = \frac{\sigma_0 * 0,889}{\frac{D}{H} * 0,222 + 0,778}$	σ_c (MPa)	55,46
7	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ FAILURE STRAIN	ε (%)	0,32
8	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG MODULUS	E (MPa)	
9	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ POISSON POISSON RATIO	μ	
10	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ MOHS MOHS HARDNESS		
11	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ APP WEIGHT	γ (kN/m³)	25,55
12	ΥΓΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ MOISTURE OF TEST	(%)	
13	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ RATE OF SHEAR	(%/min)	0,08

ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION	Λατυποπαγές συμπαγές, υγιές έως ελαφρά αποσασθρωμένο, με λατίπτες υπογωνιώδεις ποικίλου μεγέθους κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης και καστανέρυθρου χρώματος αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό.
--	---

ΑΠΟΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ --- SPECIMEN VIEW - REMARKS	

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ <i>M. Σαρίδου</i>	ΕΛΕΓΧΟΣ <i>K. Κουντουριδάκη</i>
---	---

Το Εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ

	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΕΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 210 8625123 - Fax. 2108663830	ΒΑΘΟΣ DEPTH	5,80-6,00	ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No.	10-64
		ΓΕΩΤΡΗΣΙΣ BOREHOLE	Γ2		
		ΕΡΓΟΝ PROJECT	ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ		
					ΣΧ. FIG.

Εικόνα 20: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψη Γεώτρησης Γ2 (βάθους 5,80-6 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ UNIAXIAL COMPRESSION TEST			
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ - TEST No			
1	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD	P (kg)	17100
2	ΥΨΟΣ HEIGHT	H (cm)	16,48
3	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER	D (cm)	8,32
4	ΛΟΓΟΣ RATIO	H/D	1,98
5	ΑΝΤΟΧΗ (ΩΣ ΕΧΕΙ) STRENGTH (INITIAL)	σ₀ (MPa)	31,45
6	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ CORRECTED STRENGTH $\sigma_c = \frac{\sigma_0 * 0,889}{\frac{D}{H} * 0,222 + 0,778}$	σ_c (MPa)	31,41
7	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ FAILURE STRAIN	ε (%)	0,18
8	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG MODULUS	E (MPa)	
9	ΕΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ POISSON RATIO	μ	
10	ΕΚΔΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΟΗΣ MOHS HARDNESS		
11	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ APP. WEIGHT	γ (kN/m³)	24,36
12	ΥΓΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ MOISTURE OF TEST	(%)	
13	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ RATE OF SHEAR	(%/min)	0,05

σ₀ (MPa)

ε (%)

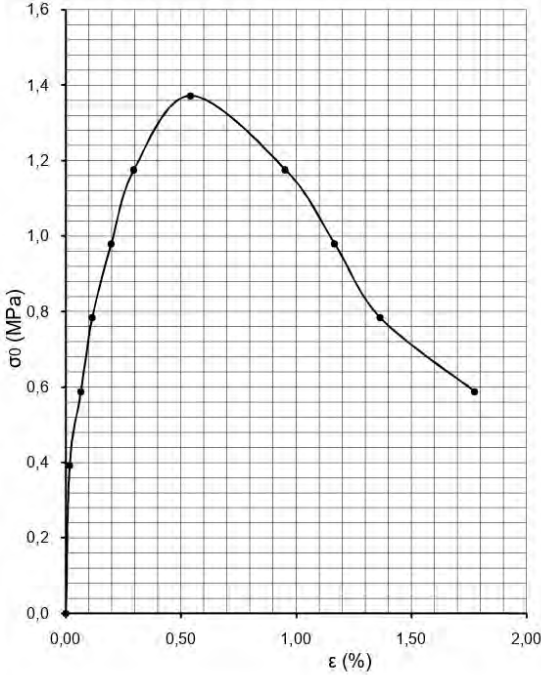
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION	Λατυποπαγές συμπαγές, υγιές έως ελαφρά αποσασθρωμένο, με λατύπες υπογωνιώδεις ποικίλου μεγέθους κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης και καστανέρυθρο αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό. Παρατηρούνται ίχνη μικροκαρστικής διάβρωσης.
---	---

ΑΠΟΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ — SPECIMEN VIEW - REMARKS	
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ <i>Μ. Σαρίδου</i>	ΕΛΕΓΧΟΣ <i>Κ. Κουντουριδάκη</i>
<i>Το Εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ</i>	

	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 210 8625123 - Fax. 2108663830	ΒΑΘΟΣ DEPTH	3,10-3,40	ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No.	10-64
	ΓΕΩΤΡΗΣΗ BOREHOLE	Γ4	ΣΧ.	FIG.	
	ΕΡΓΟΝ PROJECT	ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ	ΣΧ.		

Εικόνα 21: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψη Γεώτρησης Γ4 (βάθους 3,10-3,40 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ UNIAXIAL COMPRESSION TEST			
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ - TEST No			
1	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD	P (kg)	700
2	ΥΨΟΣ HEIGHT	H (cm)	15,46
3	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER	D (cm)	8,06
4	ΛΟΓΟΣ RATIO	H/D	1,92
5	ΑΝΤΟΧΗ (ΩΣ ΕΧΕΙ) STRENGTH (INITIAL)	σ₀ (MPa)	1,37
6	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ CORRECTED STRENGTH $\sigma_c = \frac{\sigma_0 * 0,889}{\frac{D}{H} * 0,222 + 0,778}$	σ_c (MPa)	1,36
7	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ FAILURE STRAIN	ε (%)	0,54
8	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG MODULUS	E (MPa)	
9	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ POISSON POISSON RATIO	μ	
10	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΟΗΣ MOHS HARDNESS		
11	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ APP. WEIGHT	γ (kN/m³)	19,50
12	ΥΓΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ MOISTURE OF TEST	(%)	
13	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ RATE OF SHEAR	(%/min)	0,55



ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION	Ψηφιδωπαγές έως χονδρόκοκκος ψαμμίτης, φαιοκίτρινου χρώματος, εύθριπτο, μέτρια αποσαθρωμένο, με αμμώδεις συνδετικό υλικό. Παρατηρείται κλειστή έως μερικώς ανοικτή ασυνέχεια σε γωνία 80-90° ως προς τον άξονα.
---	---

ΑΠΟΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ — SPECIMEN VIEW - REMARKS	
	

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ Μ. Σαρίδου	ΕΛΕΓΧΟΣ Κ. Κουντουριδάκη
----------------------------------	------------------------------------

Το Εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΛΕ

	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΕΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ.210 8625123 - Fax. 2108663830	ΒΑΘΟΣ DEPTH 12,70-13,00 ΓΕΩΤΡΗΣΗ BOREHOLE Γ4 ΕΡΓΟΝ PROJECT ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ	ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No. 10-64 ΣΧ. FIG. 
---	--	--	--

Εικόνα 22: Μονοαξονική θλίψη Γεώτρησης Γ4 (βάθους 12,70-13,00 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ UNIAXIAL COMPRESSION TEST			
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ - TEST No			
1	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD	P (kg)	9700
2	ΥΨΟΣ HEIGHT	H (cm)	16,34
3	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER	D (cm)	8,32
4	ΛΟΓΟΣ RATIO	H/D	1,96
5	ΑΝΤΟΧΗ (ΩΣ ΕΧΕΙ) STRENGTH (INITIAL)	σ₀ (MPa)	17,84
6	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ CORRECTED STRENGTH $\sigma_c = \frac{\sigma_0 * 0,889}{\frac{D}{H} * 0,222 + 0,778}$	σ_c (MPa)	17,80
7	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ FAILURE STRAIN	ε (%)	0,16
8	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG MODULUS	E (MPa)	
9	ΕΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ POISSON POISSON RATIO	μ	
10	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΟΗΣ MOHS HARDNESS		
11	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ APP WEIGHT	γ (kN/m³)	24,25
12	ΥΓΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ MOISTURE OF TEST	(%)	
13	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ RATE OF SHEAR	(%/min)	0,08

ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION	Λατυποπαγές συμπαγές, ελαφρά αποσαθρωμένο, με λατίπτες υπογωνιώδεις ποικίλου μεγέθους κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης και καστανέρυθρο αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό. Παρατηρείται κλειστή ασυνέχεια σε γωνία ~30-40° ως προς τον άξονα.
--	---

ΑΠΟΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ --- SPECIMEN VIEW - REMARKS

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ Μ. Σαρίδου	ΕΛΕΓΧΟΣ Κ. Κουντουριδάκη
----------------------------------	------------------------------------

Το Εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ

	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 210 8625123 - Fax. 2108663830	ΒΑΘΟΣ DEPTH 7,00-7,25	ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No. 10-64
	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ BOREHOLE Γ5	ΣΧ. FIG.	
	ΕΡΓΟΝ PROJECT ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ		

Εικόνα 23: Μονοαξονική θλίψη Γεώτρησης Γ5 (βάθους 7,00-7,25 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ UNIAXIAL COMPRESSION TEST			
Α/Α ΔΟΚΙΜΗΣ - TEST No			
1	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΨΗΣ FAILURE LOAD	P (kg)	11500
2	ΥΨΟΣ HEIGHT	H (cm)	15,73
3	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER	D (cm)	8,32
4	ΛΟΓΟΣ RATIO	$\frac{H}{D}$	1,89
5	ΑΝΤΟΧΗ (ΩΣ ΕΚΕΙ) STRENGTH (INITIAL)	σ_0 (MPa)	21,15
6	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ CORRECTED STRENGTH $\sigma_c = \frac{\sigma_0 * 0,889}{\frac{D}{H} * 0,222 + 0,778}$	σ_c (MPa)	21,00
7	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ FAILURE STRAIN	ε (%)	0,23
8	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ YOUNG MODULUS	E (MPa)	
9	ΕΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΟΙΣΟΝ POISSON RATIO	μ	
10	ΕΚΔΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΟΗΣ MOHS HARDNESS		
11	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ APP. WEIGHT	γ (kN/m ³)	24,17
12	ΥΓΡΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ MOISTURE OF TEST	(%)	
13	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ RATE OF SHEAR	(%/min)	0,05

ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION	Λατυποπαγές συμπαγές, ελαφρά αποσθαρμμένο, με λατύπες υπογωνιώδεις και αποστρογγυλεμένες, ποικίλου μεγέθους, κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης και καστανέρυθρο αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό. Παρατηρούνται ίχνη μικροκαρστικής διάβρωσης.
--	--

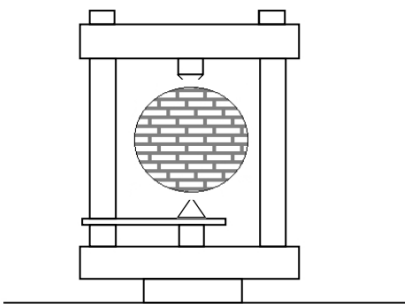
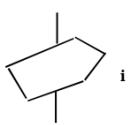
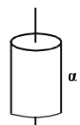
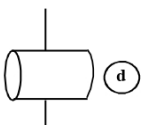
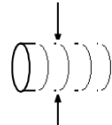
ΑΠΟΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ — SPECIMEN VIEW - REMARKS	

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ <i>M. Σαρίδου</i>	ΕΛΕΓΧΟΣ <i>K. Κουντουριδάκη</i>
---	---

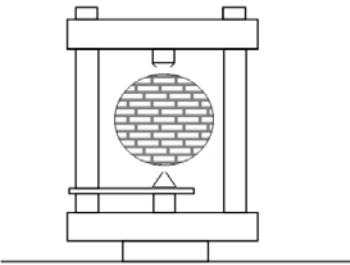
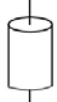
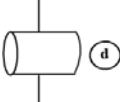
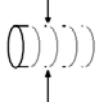
Το Εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ

	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 210 8625123 - Fax. 2108663830	ΒΑΘΟΣ DEPTH	4,60-4,80	ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No.	10-64
	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ BOREHOLE	Γ6	ΣΧ. FIG.		
	ΕΡΓΟΝ PROJECT	ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ			

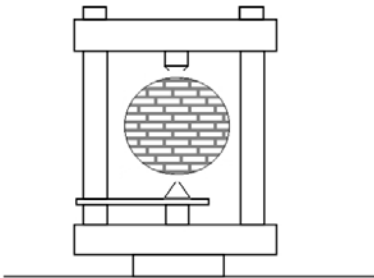
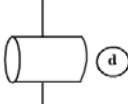
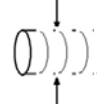
Εικόνα 24: Μονοαξονική θλίψη Γεώτρησης Γ6 (βάθους 4,60-4,80 μέτρων)

ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΔΙΧΜΗΣ POINT LOAD TEST							
							
A/A	ΔΟΚΙΜΗΣ	TEST No					
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΙΩΝ			I	II	III	IV	V
LOADING POINTS DISTANCE							
d (mm)			83	83	83		
ΛΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤ. ΑΚΙΩΝ							
LENGTH - LOADING POINTS DIST. RATIO							
L/d			1,95	1,00	0,89		
ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ							
FAILURE LOAD							
P (kN)			13,0	12,0	13,0		
ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΧΜΗΣ							
POINT LOAD STRENGTH							
Is (MPa)			1,89	1,75	1,89		
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΧΜΗΣ							
SIZE CORRECTED POINT LOAD STRENGTH							
Is₅₀ (MPa)			2,37	2,19	2,37		
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ							
LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS							
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ - AVERAGE			Is₅₀ (MPa)				
			2,31				
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ							
MOISTURE CONDITIONS							
1. ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ IN SITU 2. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΟΡΕΣΜΟ AFTER SATURATION 3. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΞΥΡΑΝΗ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ AIR DRIED							
ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%)							
MOISTURE CONTENT (%)							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ			LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS				
 i			 α	 δ	 ⊥	 //	
i ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΗ i IRREGULAR			α. ΑΞΟΝΙΚΗ α. AXIAL	δ. ΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ δ. DIAMETRIC	⊥ ΚΑΘΕΤΗ ⊥ PERPENDICULAR	// ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ // PARALLEL	
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ			Ψηφιοδοκροκαλοπαγές, με ασβεστολιθικά αδρομερή και αργιλοσαμμώδη συνδετική ύλη.				
LITHOLOGICAL DESCRIPTION							
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ			ΕΛΕΓΧΟΣ				
Μ. Σαρίδου			Κ. Κουντουριόκη				
			<i>Το Εργαστήριο αποκλείεται από το ΚΕΔΕ</i>				
 "ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 2108625123 - Fax.210			ΒΑΘΟΣ			ΕΡΓ. ΑΡΙΘ.	
			DEPTH			LAB. No	
			8,80-9,00			10-64	
			ΓΕΩΤΡΗΣΗ			ΣΧ. FIG.	
			BOREHOLE				
			Γ 1				
			ΕΡΓΟ				
			PROJECT				
			ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ				

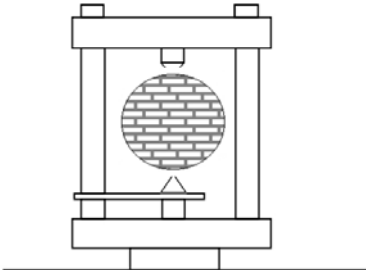
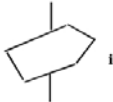
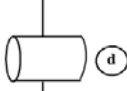
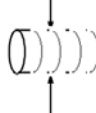
Εικόνα 25: Σημειακή φόρτιση γεώτρησης Γ1(βάθους 8,80-9)

ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD TEST							
							
Α/Α	ΔΟΚΙΜΗΣ	TEST No	I	II	III	IV	V
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΙΩΝ LOADING POINTS DISTANCE			d (mm)	83	83		
ΛΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤ. ΑΚΙΩΝ LENGTH - LOADING POINTS DIST. RATIO			L/d	1,29	0,82		
ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD			P (kN)	1,5	1,3		
ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD STRENGTH			Is (MPa)	0,22	0,19		
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ SIZE CORRECTED POINT LOAD STRENGTH			Is ₅₀ (MPa)	0,28	0,24		
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS							
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ - AVERAGE			Is ₅₀ (MPa)	0,26			
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ MOISTURE CONDITIONS			1. ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ IN SITU 2. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΑΣΦΕΓΜΑ AFTER SATURATION 3. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΞΥΡΑΝΗ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ AIR DRIED				
ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%) MOISTURE CONTENT (%)							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS			 i ΑΚΑΝΟΝΙΕΤΗ i IRREGULAR  α ΑΞΟΝΙΚΗ α AXIAL  δ ΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ δ DIAMETRIC  ⊥ ΚΑΘΕΤΗ PERPENDICULAR  // ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ PARALLEL				
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION			Ασβεστόλιθος μαργαϊκός, ροδόχρους - λευκοροδόχρους, κατακερματισμένος, με ασβεστομαργαϊκό υλικό πλήρωσης.				
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ M. Σαρίδης			ΕΛΕΓΧΟΣ K. Κωνσταντίνου				
 "ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΕΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 2108625123 - Fax.210			ΒΑΘΟΣ DEPTH		10,25-10,50		
			ΓΕΩΤΡΗΣΗ BOREHOLE		Γ2		
			ΕΡΓΟ PROJECT		ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ		
			ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No		10-64		
			ΣΧ. FIG.				

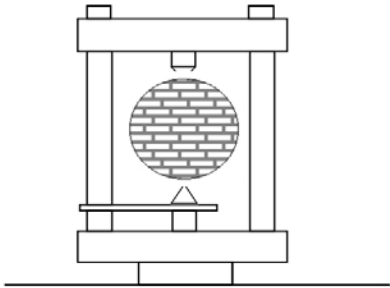
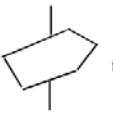
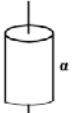
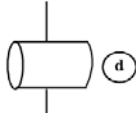
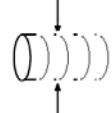
Εικόνα 26: Σημειακή φόρτιση γεώτρησης Γ2(βάθους 10,25-10,50)

ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD TEST							
							
Α/Α	ΔΟΚΙΜΗΣ	TEST No	I	II	III	IV	V
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΙΩΝ LOADING POINTS DISTANCE			d (mm)	83	83	83	
ΔΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤ. ΑΚΙΩΝ LENGTH - LOADING POINTS DIST. RATIO			L/d	2,43	1,14	1,25	
ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD			P (kN)	10,0	8,0	8,0	
ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD STRENGTH			Is (MPa)	1,47	1,17	1,17	
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ SIZE CORRECTED POINT LOAD STRENGTH			Is ₅₀ (MPa)	1,84	1,47	1,47	
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΔΕΥΝΕΧΕΙΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS							
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ - AVERAGE			Is ₅₀ (MPa)	1,59			
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ MOISTURE CONDITIONS			1. ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ IN SITU 2. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΟΡΕΣΜΟ AFTER SATURATION 3. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ AIR DRIED				
ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%) MOISTURE CONTENT (%)							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΔΕΥΝΕΧΕΙΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS			 ι ΑΚΑΝΟΝΕΤΗ ι IRREGULAR  α ΑΞΟΝΙΚΗ α AXIAL  δ ΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ δ DIAMETRIC  ⊥ ΚΑΘΕΤΗ PERPENDICULAR  // ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ PARALLEL				
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION			Ψηφιδοκρακαλοπαγές, με ασβεστολιθικά αδρομερή και καστανέρυθρη αργιλοαμμώδη συνδετική ύλη.				
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ Μ. Σαρίδου			ΕΛΕΓΧΟΣ Κ. Κουντουριώδη				
 "ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 2108625123 - Fax. 210			ΒΑΘΟΣ DEPTH			4,30-4,50	
			ΓΕΩΤΡΗΣΗ BOREHOLE			Γ3	
			ΕΡΓΟ PROJECT			ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ	
			ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No			10-64	
			ΣΧ. FIG.				

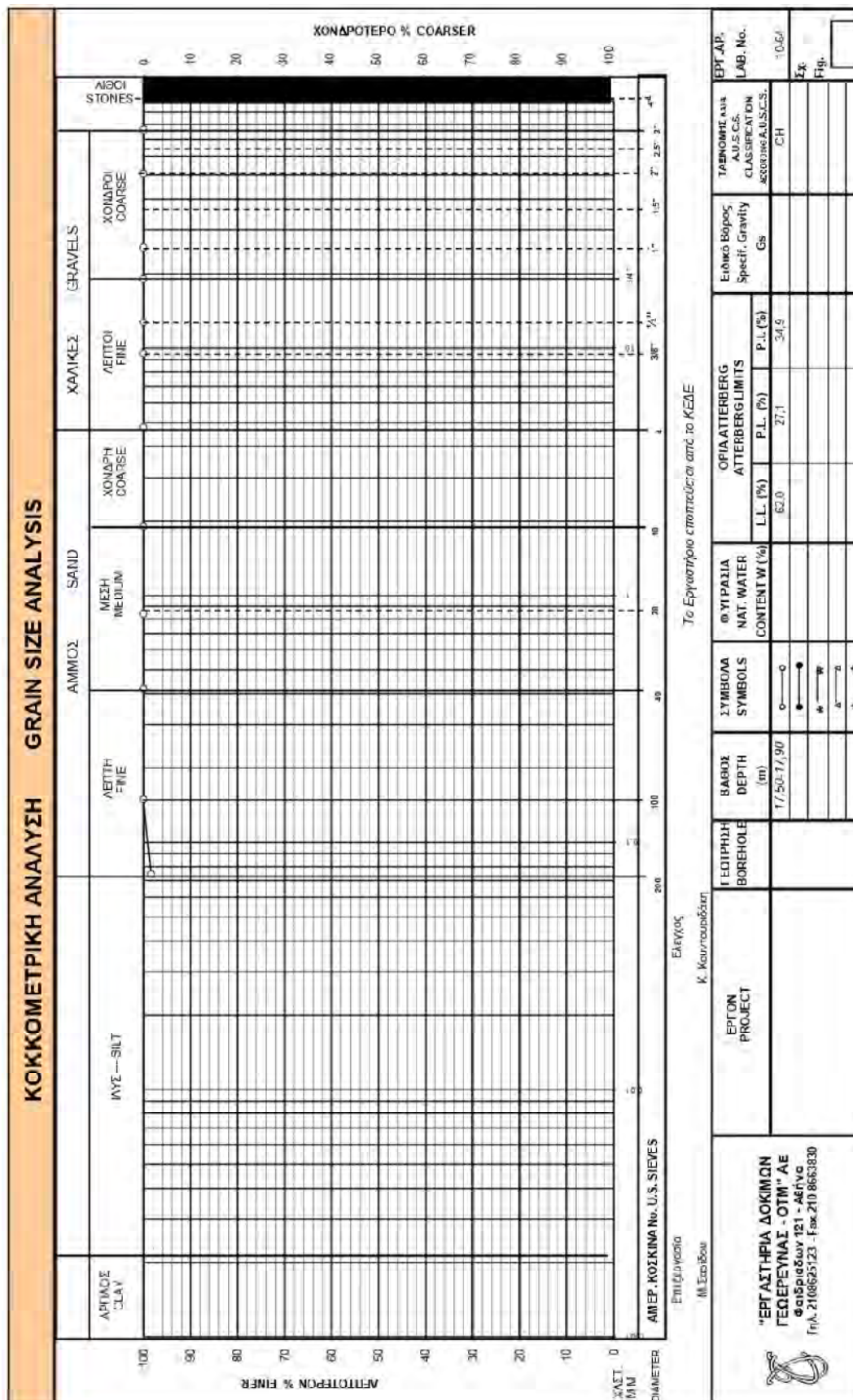
Εικόνα 27: Σημειακή φόρτιση γεώτρησης Γ3(βάθους 4,30-4,50)

ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD TEST								
								
Α/Α	ΔΟΚΙΜΗΣ	TEST No	I	II	III	IV	V	VI
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΙΣΩΝ LOADING POINTS DISTANCE			d (mm)	83	83			
ΔΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤ. ΑΚΙΣΩΝ LENGTH - LOADING POINTS DIST. RATIO			L/d	2,16	1,23			
ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ FAILURE LOAD			P (kN)	1,0	1,9			
ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD STRENGTH			Is (MPa)	0,15	0,28			
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ SIZE CORRECTED POINT LOAD STRENGTH			Is ₅₀ (MPa)	0,18	0,35			
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΔΕΣΥΝΕΥΣΕΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS								
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ - AVERAGE			Is ₅₀ (MPa)	0,27				
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ MOISTURE CONDITIONS			1. ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ IN SITU 2. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΟΡΕΣΜΟ AFTER SATURATION 3. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ AIR DRIED					
ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%) MOISTURE CONTENT (%)								
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΔΕΣΥΝΕΥΣΕΩΝ LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS			 ι ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΗ i IRREGULAR  α ΑΞΩΝΙΚΗ a AXIAL  δ ΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ d DIAMETRIC  ⊥ ΚΑΘΕΤΗ PERPENDICULAR  // ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ PARALLEL					
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ LITHOLOGICAL DESCRIPTION			Ασβεστολιθικό Λατυποπαγές, διαβρωμένο, με καστανέρυθρο αργιλοσαμμιτικό υλικό πλήρωσης.					
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ M. Σαβίθε			ΕΛΕΓΧΟΣ Κ. Κωνσταντίνος					
 "ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 2108625123 - Fax.210			ΒΑΘΟΣ DEPTH		9,75-10,00		ΕΡΓ. ΑΡΙΘ. LAB. No 10-64	
			ΓΕΩΤΡΗΣΗ BOREHOLE		Γ4			
			ΕΡΓΟ PROJECT		ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ			

Εικόνα 28: Σημειακή φόρτιση γεώτρησης Γ4(βάθους 9,75-10)

ΔΟΚΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΙΧΜΗΣ POINT LOAD TEST							
							
Α/Α	ΔΟΚΙΜΗΣ	TEST No	I	II	III	IV	V
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΚΙΩΝ							
LOADING POINTS DISTANCE							
d (mm)			83	83	83		
ΛΟΓΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΣΤ. ΑΚΙΩΝ							
LENGTH - LOADING POINTS DIST. RATIO							
L/d			2,12	1,06	0,88		
ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ							
FAILURE LOAD							
P (kN)			9,0	10,0	10,0		
ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ							
POINT LOAD STRENGTH							
Is (MPa)			1,31	1,46	1,46		
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ							
SIZE CORRECTED POINT LOAD STRENGTH							
Is50 (MPa)			1,64	1,83	1,83		
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΕΥΝΕΧΕΙΩΝ							
LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS							
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ - AVERAGE			Is50 (MPa)				
			1,77				
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ							
MOISTURE CONDITIONS							
1. ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ IN SITU 2. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΟΡΕΣΜΟ AFTER SATURATION 3. ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΞΗΡΑΝΣΗ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ AIR DRIED							
ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%)							
MOISTURE CONTENT (%)							
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΑΕΥΝΕΧΕΙΩΝ			LOADING - DISCONTINUITIES CONDITIONS				
    							
i. ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΗ i. IRREGULAR			α. ΑΞΟΝΙΚΗ α. AXIAL				
			δ. ΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ δ. DIAMETRIC				
			⊥ ΚΑΘΕΤΗ PERPENDICULAR				
			// ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ PARALLEL				
ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ			Ψηφιοδοπαγές με ασβεστολιθικές κυρίως κροκάλες και καστανέριυθρο αργίλοαμμώδες				
LITHOLOGICAL DESCRIPTION			συνδετικό υλικό.				
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ			ΕΛΕΓΧΟΣ				
M. Σοφίδου			K. Κωνσταντίνου				
			<i>Το Εργαστήριο εσπντεύεται από το ΚΕΔΕ</i>				
	"ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΡΕΥΝΑΣ - ΟΤΜ" ΑΕ Φαιδριάδων 121 - Αθήνα Τηλ. 2108625123 - Fax.210		ΒΑΘΟΣ			ΕΡΓ. ΑΡΙΘ.	
			DEPTH			LAB. No	
			4,80-5,00			10-64	
			ΓΕΩΤΡΗΣΗ				
			BOREHOLE			ΣΧ.	
			Γ7			FIG.	
			ΕΡΓΟ				
			PROJECT				
			ΚΕΝΤΡΟ ΙΠΠΑΣΙΑΣ				
			ΣΤΟ ΚΟΡΩΠΙ				

Εικόνα 29: Σημειακή φόρτιση γεώτρησης Γ7(βάθους 4,80-5,00)



Εικόνα 31: Κοκκομετρική ανάλυση Γεώτρησης Γ4 βάθους (17,50-17,90 μέτρων)

