



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Οκτώβριος 2020

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΟΛΙΤΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ**

ΜΑΝΤΖΑΡΕΑ ΜΑΡΙΑ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Οκτώβριος 2020

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΟΛΙΤΙΣΜΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΑΝΔΡΕΑΣ ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΠΑΥΛΟΣ ΝΟΜΙΚΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΖΕΥΓΩΛΗΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α.

Copyright ©, Μαντζαρέα Μαρία

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	σελ. 3
Περίληψη	σελ. 10
Abstract	σελ. 12
Πρόλογος	σελ. 13
1. Κίνδυνος και Αβεβαιότητα	σελ. 17
1.1. Τύποι αβεβαιότητα	σελ. 17
1.2. Πηγές προέλευσης αβεβαιότητας	σελ. 18
1.3. Επίδραση της αβεβαιότητας στη ζωή του έργου	σελ. 19
2. Η Αβεβαιότητα στα Υπόγεια Έργα	σελ. 24
2.1. Μαθηματική περιγραφή χωρικής μεταβλητότητας	σελ. 25
2.2. Επιπτώσεις αβεβαιότητας στα υπόγεια έργα	σελ. 25
2.3. Κοστολογική επίδραση αβεβαιότητας	σελ. 27
3. Περιπτώσεις Επίδρασης της Αβεβαιότητας σε Έργα στον Ελληνικό Χώρο	σελ. 32
4. Αντιμετώπιση Αβεβαιότητας με Νέα Εργαλεία και Μεθόδους	σελ. 44
4.1. DAT – Decision Aids in Tunneling	σελ. 45
4.1.1. Γεωλογικό μοντέλο DAT	σελ. 48
4.1.2. Κατασκευαστικό μοντέλο DAT	σελ. 51
4.2. Χωρική Μοντελοποίηση	σελ. 52
4.2.1. Μέθοδοι χωρικής παρεμβολής	σελ. 54
5. Η Περίπτωση του Υπόγειου Χώρου του Λαυρίου	σελ. 61
5.1. Χωρική συσχέτιση σημείων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων	σελ. 62
5.2. Γεωλογική απεικόνιση περιοχής ενδιαφέροντος	σελ. 69
5.3. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεωτρήσεων	σελ. 79
5.3.1. Γεωτεχνικοί παράμετροι αναλύσεων	σελ. 79
5.3.1.1. Μονοαξονική θλιπτική αντοχή πετρώματος	σελ. 79

5.3.1.2. Μονοαξονική εφελκυστική αντοχή πετρώματος	σελ. 80
5.3.1.3. Δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση	σελ. 80
5.3.1.4. Μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος	σελ. 81
5.3.1.5. Δείκτης RQD	σελ. 83
5.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	σελ. 84
5.4.1. Στατιστική ανάλυση	σελ. 84
5.4.2. Χωρική γεωτεχνική μοντελοποίηση	σελ. 91
5.5. Χαρακτηρισμός γεωτεχνικής χωρικής συμπεριφοράς	σελ. 94
5.6. Τυπικές αποκλίσεις τιμών πλέγματος	σελ. 95
5.7. Έλεγχος εγκυρότητας αποτελέσματος	σελ. 96
5.7.1. Διαγράμματα τύπου Krajewski	σελ. 98
5.8. Βαθμονόμηση και επίδραση τιμών παραμέτρων	σελ. 102
5.9. Επιλογή κατάλληλης θέσης	σελ. 116
5.10. Επίδραση αβεβαιότητας χωρικών μοντέλων	σελ. 118
5.10.1. Σύγκριση μοντέλων Μονοαξονικής Αντοχής	σελ. 118
5.10.2. Σύγκριση μοντέλων 7 γεωτρήσεων	σελ. 122
6. Συμπεράσματα	σελ. 126
Παράρτημα	σελ. 128
Βιβλιογραφία	σελ. 146

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μεταβλητότητα στα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας _____	σελ. 26
Πίνακας 2: Συγκριτικά στοιχεία πρόβλεψης – πραγματικά μέτρων μήκους σηράγγων κατά κατηγορία βραχώμαζας _____	σελ. 36
Πίνακας 3: Μορφές χωρικής παρεμβολής Kriging _____	σελ. 57
Πίνακας 4: Αναλυτικά στοιχεία γεωτρήσεων _____	σελ. 62
Πίνακας 5: Βαθμονόμηση με βάση την αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε Μονοαξονική Θλίψη σε _____	σελ. 79
Πίνακας 6: Ταξινόμηση πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης Is (50) _____	σελ. 81
Πίνακας 7: Χαρακτηρισμός με βάση το δείκτη RQD _____	σελ. 84
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικά στατιστικά αποτελέσματα _____	σελ. 89
Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία Ασβεστόλιθου Τεκτονικού Καλύμματος _____	σελ. 89
Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία Γραφικού Σχιστόλιθου _____	σελ. 89
Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία Πρασινοσχιστόλιθου – Φυλλίτη _____	σελ. 90
Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία εναλλαγής Ασβεστόλιθου – Σχιστόλιθου _____	σελ. 90
Πίνακας 13: Στατιστικά στοιχεία Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου _____	σελ. 90
Πίνακας 14: Βαθμονόμηση τιμών Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is50 _____	σελ. 94
Πίνακας 15: Βαθμονόμηση τιμών Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη σε _____	σελ. 94
Πίνακας 16: Βαθμονόμηση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας E _____	σελ. 95
Πίνακας 17: Βαθμονόμηση τιμών Δείκτη RQD _____	σελ. 95
Πίνακας 18: Επίδραση της αβεβαιότητας έναντι του βαθμού επικάλυψης _____	σελ. 97
Πίνακας 19: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε z = +40 m _____	σελ. 103
Πίνακας 20: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε z = +0 m _____	σελ. 104
Πίνακας 21: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε z = +40 m _____	σελ. 106
Πίνακας 22: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε z = +0 m _____	σελ. 107
Πίνακας 23: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε z = +40 m _____	σελ. 109
Πίνακας 24: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε z = +0 m _____	σελ. 110
Πίνακας 25: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε z = +40 m _____	σελ. 112
Πίνακας 26: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε z = +0 m _____	σελ. 113
Πίνακας 27: Συντεταγμένες ορίων υπόγειου έργου _____	σελ. 117

Πίνακας 28: Τιμές Μονοαξονικής Αντοχής πετρώματος σε θλίψη του πετρώματος	σελ. 117
Πίνακας Π1: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ1	σελ. 128
Πίνακας Π2: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ2	σελ. 129
Πίνακας Π3: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ3	σελ. 130
Πίνακας Π4: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ4	σελ. 132
Πίνακας Π5: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ5	σελ. 133
Πίνακας Π6: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ6	σελ. 134
Πίνακας Π7: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ7	σελ. 135
Πίνακας Π8: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ8	σελ. 136
Πίνακας Π9: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +30$ m	σελ. 138
Πίνακας Π10: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +20$ m	σελ. 139
Πίνακας Π11: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +10$ m	σελ. 139
Πίνακας Π12: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +30$ m	σελ. 140
Πίνακας Π13: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +20$ m	σελ. 140
Πίνακας Π14: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +10$ m	σελ. 141
Πίνακας Π15: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +30$ m	σελ. 141
Πίνακας Π16: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +20$ m	σελ. 142
Πίνακας Π17: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +10$ m	σελ. 142
Πίνακας Π18: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +30$ m	σελ. 143
Πίνακας Π19: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +20$ m	σελ. 144
Πίνακας Π20: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +10$ m	σελ. 144

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Παρουσίαση εύρους αβεβαιότητας _____	σελ. 19
Σχήμα 2: Κατηγορίες αβεβαιότητας εδαφικών παραμέτρων _____	σελ. 24
Σχήμα 3: Πιθανολογική κατανομή κατασκευαστικού κόστους _____	σελ. 28
Σχήμα 4: Ιστόγραμμα κατασκευαστικού κόστους _____	σελ. 28
Σχήμα 5: Αστοχία προσωρινής υποστήριξης λόγω συγκλίσεων στο Νότιο Μέτωπο _____	σελ. 33
Σχήμα 6: Αστοχία στο θόλο της σήραγγας (Νότιο μέτωπο) σε Αργιλικό σχηματισμό _____	σελ. 33
Σχήμα 7: Αυξημένες παραμορφώσεις και ρωγματώσεις προσωρινής υποστήριξης αριστερής παρειάς _____	σελ. 37
Σχήμα 8: Κατάρρευση οδοστρώματος επί της Οδού Πανεπιστημίου _____	σελ. 40
Σχήμα 9: Δεδομένα εισόδου DAT _____	σελ. 46
Σχήμα 10: Διασπορά τιμών κόστους – χρόνου _____	σελ. 46
Σχήμα 11: Διαδικασία λήψης απόφασης _____	σελ. 47
Σχήμα 12: Διαδικασία προσομοίωσης γεωλογικού μοντέλου _____	σελ. 48
Σχήμα 13: Τυπική διάταξη σήραγγας _____	σελ. 49
Σχήμα 14: Πιθανή ύπαρξη ρήγματος _____	σελ. 50
Σχήμα 15: Διερεύνηση ύπαρξης ρήγματος _____	σελ. 50
Σχήμα 16: Διαδικασία προσομοίωσης κατασκευαστικού μοντέλου _____	σελ. 51
Σχήμα 17: Κύκλος εργασιών διάτρησης – ανατίναξης _____	σελ. 51
Σχήμα 18: Καμπύλη μάθησης _____	σελ. 52
Σχήμα 19: Κατανομή δεδομένων σημείων _____	σελ. 53
Σχήμα 20: Κόμβοι πλέγματος _____	σελ. 54
Σχήμα 21: Τοποθεσία Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου _____	σελ. 61
Σχήμα 22: Τοπογραφικό ανάγλυφο περιοχής ενδιαφέροντος _____	σελ. 63
Σχήμα 23: Υπόδειγμα μοντέλου προσομοίωσης _____	σελ. 64
Σχήμα 24: Επίδραση συντελεστή βαρύτητας _____	σελ. 65
Σχήμα 25: Αναζήτηση σημείων (α) βάσει των πλησιέστερων (β) βάσει τομέα _____	σελ. 65
Σχήμα 26: Επιλογές μεθόδου παρεμβολής RockWorks _____	σελ. 66
Σχήμα 27: Χωρική συσχέτιση μεταξύ των σημείων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων _____	σελ. 67
Σχήμα 28: Προσάρτηση μοντέλου στο πραγματικό τοπογραφικό ανάγλυφο _____	σελ. 68

Σχήμα 29: Γεωλογική απεικόνιση περιοχής ενδιαφέροντος	σελ. 74
Σχήμα 30: Τρισδιάστατη γεωλογική απεικόνιση	σελ. 75
Σχήμα 31: Δισδιάστατη απεικόνιση σχεδίου οριζόντιων τομών	σελ. 76
Σχήμα 32: Τρισδιάστατο γεωλογικό μοντέλο 5 τομών	σελ. 76
Σχήμα 33: Όψη Προφίλ A1	σελ. 77
Σχήμα 34: Όψη Προφίλ A2	σελ. 77
Σχήμα 35: Όψη Προφίλ B1	σελ. 78
Σχήμα 36: Όψη Προφίλ B2	σελ. 78
Σχήμα 37: Γραφικός προσδιορισμός διαφόρων μέτρων ελαστικότητας	σελ. 81
Σχήμα 38: Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων	σελ. 82
Σχήμα 39: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πετρώματος	σελ. 83
Σχήμα 40: Ιστόγραμμα Δείκτη Is50	σελ. 85
Σχήμα 41: Ιστόγραμμα Μονοαξονικής Θλίψης (σ_c)	σελ. 86
Σχήμα 42: Ιστόγραμμα Μέτρου Ελαστικότητας (E)	σελ. 87
Σχήμα 43: Ιστόγραμμα Δείκτη RQD	σελ. 88
Σχήμα 44: Μοντέλο προσομοίωσης Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is50	σελ. 91
Σχήμα 45: Μοντέλο προσομοίωσης Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_c)	σελ. 92
Σχήμα 46: Μοντέλο προσομοίωσης Μέτρου Ελαστικότητας (E)	σελ. 92
Σχήμα 47: Μοντέλο προσομοίωσης Δείκτη RQD	σελ. 93
Σχήμα 48: Τυπικές αποκλίσεις Δείκτη RQD από τις εκτιμώμενες τιμές σε $z = +0$ m	σελ. 96
Σχήμα 49: Ακτίνα επιρροής κάθε γεώτρησης έναντι της αβεβαιότητας	σελ. 97
Σχήμα 50: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is (50)	σελ. 98
Σχήμα 51: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Μέτρου Ελαστικότητας E	σελ. 99
Σχήμα 52: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Μονοαξονικής Αντοχής σ_c	σελ. 100
Σχήμα 53: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Δείκτη Ποιότητας RQD	σελ. 101
Σχήμα 54: Σκαρίφημα τομέων	σελ. 102
Σχήμα 55: Χωρική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης Is50 σε $z = +40$ m	σελ. 103
Σχήμα 56: Χωρική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης Is50 σε $z = +0$ m	σελ. 104
Σχήμα 57: Συνολική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης Is50	σελ. 105

Σχήμα 58: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής σε $z = +40$ m _____	σελ. 106
Σχήμα 59: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής σε $z = +0$ m _____	σελ. 107
Σχήμα 60: Συνολική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής _____	σελ. 108
Σχήμα 61: Χωρική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας σε $z = +40$ m _____	σελ. 109
Σχήμα 62: Χωρική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας σε $z = +0$ m _____	σελ. 110
Σχήμα 63: Συνολική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας _____	σελ. 111
Σχήμα 64: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +40$ m _____	σελ. 112
Σχήμα 65: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +0$ m _____	σελ. 113
Σχήμα 66: Συνολική κατανομή Δείκτη RQD _____	σελ. 114
Σχήμα 67: Εσωτερικό υπόγειου χώρου _____	σελ. 116
Σχήμα 68: Θέση υπόγειου έργου _____	σελ. 117
Σχήμα 69: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής UCS σε $z = +0$ m _____	σελ. 121
Σχήμα 70: Ποσοστιαία διαφορά τομέων _____	σελ. 121
Σχήμα 71: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +0$ m _____	σελ. 122
Σχήμα 72: Ποσοστιαία διαφορά τομέων _____	σελ. 122

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η επίδραση της αβεβαιότητας κατά την χωρική ανάλυση των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων κατά την κατασκευή υπόγειων έργων. Για το σκοπό αυτό, στο πρώτο μέρος αναλύεται το συγκεκριμένο φαινόμενο καθώς και οι κύριες πηγές προέλευσης του, ο τύπο και οι επιπτώσεις του στα κατασκευαστικά έργα. Στο δεύτερο μέρος μελετάται η περίπτωση αξιολόγησης των πραγματικών γεωτεχνικών συνθηκών και η επίδραση της αβεβαιότητας στην κατασκευή του υπόγειου χώρου εναπόθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο Λαύριο. Η εργασία απαρτίζεται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Στο Κεφάλαιο 1 εισάγονται οι έννοιες *κίνδυνος* και *αβεβαιότητα*, ενώ παράλληλα εμβαθύνεται ο όρος της αβεβαιότητας δίνοντας έμφαση στους διάφορους τύπους αυτής και που οφείλεται ο καθένας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην επίδραση που έχει το κάθε καθεστώς αβεβαιότητας στην απόφαση για την υλοποίηση ενός επιχειρηματικού σχεδίου και κατά συνέπεια στον κίνδυνο που ενέχεται σε αυτό.
- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην ανάγκη πρόβλεψης της αβεβαιότητας των εδαφικών συνθηκών, καθώς αναλύονται οι διάφορες επιπτώσεις αυτής σε κατασκευαστικά και οικονομικά ζητήματα.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις αστοχιών σε υπόγεια έργα στον Ελληνικό χώρο όπου η απουσία πληροφόρησης κατά τον σχεδιασμό αυτών οδήγησε σε ελλειπείς ή ακόμα και λανθασμένες αξιολογήσεις των εδαφικών συνθηκών, με αποτέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις και οικονομικές επιβαρύνσεις.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι ενδεικνύμενοι τρόποι αντιμετώπισης της αβεβαιότητας, με τη χρήση επιστημονικών πιθανοτικών ή χωρικών μοντελοποιήσεων, όπως η μέθοδος DAT, γεωστατιστική και άλλα.
- Στο Κεφαλαίο 5 μελετάται η περίπτωση του υπόγειου χώρου απόθεσης επικίνδυνων αποβλήτων του Λαυρίου. Αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην προσπάθεια χωρικής ανάλυσης και αναφέρονται οι γεωτεχνικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται ενώ γίνεται και στατιστική επεξεργασία του συνόλου των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Σύμφωνα με τα δοθέντα στοιχεία σχεδιάζονται το γεωλογικό και γεωτεχνικό μοντέλο της

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.

περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον, εκτιμάται η εγκυρότητα των μοντέλων και εξετάζονται περιπτώσεις επίδρασης της αβεβαιότητας σε αυτά όταν μειώνεται η πληροφόρηση.

→ Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

Purpose of this postgraduate thesis is to study and analyze the effect of the uncertainty in spatial analysis of geological and geotechnical parameters in underground construction projects. To this end, the first part is dealing with that particular phenomenon and analyses its main sources and types and its effects on projects and the second is using a case study to assess the actual geotechnical conditions and incorporate uncertainty in the construction of the Lavrion Underground Hazardous Waste Repository. The study consists of the following chapters:

- Chapter 1 introduces the terms *risk* and *uncertainty*, while focuses on the latter, describing the various types of uncertainty and the sources of each type. In addition, the impact that each type has on the implementation of a business plan and as a result to the risk level involved in it, is further analyzed.
- Chapter 2 deals with the need to predict the uncertainty of geotechnical conditions and the various effects and impacts that this has in the meeting of safety standards and economic conditions.
- Chapter 3 presents indicative cases of failures in underground works in Greece where the lack of knowledge during the design project phase led to an incomplete or even incorrect assessment of the conditions that in turn resulted to delays and cost overruns.
- Chapter 4 describes some recommended ways and practices to deal with uncertainty using advanced probabilistic or spatial modelling (e.g. DAT method, geostatistics, etc.)
- Chapter 5 focuses on the case study of Lavrion Underground Hazardous Waste Repository. The geotechnical parameters are analyzed in detail followed by the presentation of the proposed methodology regarding their spatial analysis. The models used are prepared for the available parameters in the construction site using the initial borehole data and the predictions on the values attained is also given. Finally, the validity of the obtained results is given whereas the effect of the uncertainty is also examined.
- Chapter 6 presents the general conclusions of the thesis.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η περιοχή της Λαυρεωτικής έχει υπάρξει επί σειρά ετών χώρος ιδιαίτερης μεταλλευτικής δραστηριότητας, βασισμένη στις αρχές της ανάπτυξης, εξέλιξης και καινοτομίας. Στα πλαίσια αυτά, από το 2015 το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου φιλοξενεί στις εγκαταστάσεις του τον υπόγειο χώρο διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων. Το πρωτοπόρο αυτό εγχείρημα, όπως και κάθε άλλο υπόγειο έργο, αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας ζωής του κοινωνικού συνόλου προφέροντας μία βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση κρίσιμων ζητημάτων της περιοχής. Καθοριστικό παράγοντα για τη δημιουργία αυτού του υπόγειου χώρου αποτέλεσε η ανάγκη για εξυγίανση της περιοχής του Λαυρίου από την εκτεταμένη μεταλλευτική δραστηριότητα του παρελθόντος.

Ένα τέτοιο υπόγειο έργο αποτελεί εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης, τόσο κατά την κατασκευή του όσο και για την μετέπειτα πορεία του. Ο εκάστοτε μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος με ένα σύνολο προκλήσεων, με μία από τις σημαντικότερες αυτών να είναι η πρόβλεψη των εδαφικών συνθήκων. Η χωρική αβεβαιότητα που επικρατεί γύρω από το γεωλογικό μέσω δύναται να επιφέρει σημαντικές δυσκολίες με αποτελέσματα αλλαγές στη μελέτη και στον προκαθορισμένο χρονικό προγραμματισμό του έργου.

Με δεδομένο τα γεωτεχνικά πειραματικά αποτελέσματα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις έγινε η προσπάθεια κατασκευής τρισδιάστατων και δισδιάστατων γεωλογικών και γεωτεχνικών μοντέλων, με τη βοήθεια του σχεδιαστικού λογισμικού RockWorks16. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παρεμβολής έδωσε τη δυνατότητα μοντελοποίησης της ευρύτερης περιοχή του υπόγειου έργου και ανάλυσης των βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων, ώστε να ελεγχθεί η εγκυρότητα της πρόβλεψης και επίδραση της αβεβαιότητας στην μετέπειτα κατασκευή του.

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Ανδρέα Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, επιβλέποντα της εργασίας, για την πολύτιμη βοήθειά του και για την ουσιαστική καθοδήγηση του σε κρίσιμα θέματα.

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

1. ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

Ως *κίνδυνος* (risk) ορίζεται «η αρνητική ή θετική επίδραση της αβεβαιότητας στην επίτευξη των στόχων» (ISO/ Guide 73, 2009). Επιπλέον, ορίζεται «η πιθανότητα να συμβεί κάτι που θα έχει αρνητική επίδραση σε ένα επιδιωκόμενο αποτέλεσμα» (AS43660/1999) και «ο συνδυασμός της πιθανότητας ή συχνότητας εμφάνισης μιας επικίνδυνης κατάστασης και του μεγέθους των επιπτώσεων εμφάνισής της» (British Standard IEC 62198 BSI, 2001).

Ως *αβεβαιότητα* (uncertainty) ορίζεται «η απουσία πληροφοριών σχετικά με τμήματα του υπό εξέταση συστήματος» (Smallman, 2000). Πρόκειται για έναν ευρύ όρο που περιλαμβάνει πληθώρα εννοιών του επιστημονικού τομέα, δεδομένου ότι η αβεβαιότητα είναι πάντα παρούσα ακόμα ακόμα και όταν η πληροφορία θεωρείται ολοκληρωμένη.

Είναι εμφανές ότι οι έννοιες κίνδυνος και αβεβαιότητα είναι άμεσα συνδεδεμένες καθώς το μέγεθος της αβεβαιότητας καθορίζει τα χαρακτηριστικά του κινδύνου.

1.1. ΤΥΠΟΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με τους Blockley και Godfrey (2000), διακρίνονται τρεις τύποι αβεβαιότητας: τυχαία, ασαφής και ατελής, όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

i. Τυχαία Αβεβαιότητα

Ως τυχαία αβεβαιότητα ορίζεται η έλλειψη συγκεκριμένου προτύπου για μεμονωμένες παραμέτρους ή μεταβλητές. Αυτός ο τύπος αβεβαιότητας παρουσιάζεται συνήθως με κανονική κατανομή, στην οποία καθορίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου.

ii. Ασαφής Αβεβαιότητα

Η ασαφής αβεβαιότητα αναφέρεται στην ασάφεια που επικρατεί γύρω από έναν ορισμό ή μία έννοια. Συνήθως επανεξετάζεται και επαναξιολογείται στο τέλος της όλης διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, η ασαφής αβεβαιότητα δεν γίνεται εύκολα διακριτή, δε αντίθεση με τους άλλους δύο τύπους αβεβαιότητας.

iii. Ατελής Αβεβαιότητα

Η ατελής αβεβαιότητα είναι αυτή που σχετίζεται περισσότερο με την αβεβαιότητα που υπάρχει αναφορικά με τις υφιστάμενες εδαφικές συνθήκες στο γεωλογικό μέσο. Γενικά, ως ατελής αβεβαιότητα ορίζεται η έλλειψη πληροφοριών. Υπό αυτή την οπτική, αυτό το είδος αβεβαιότητας δύναται να διακριθεί σε δύο βασικούς τύπους. Ο πρώτος τύπος αφορά την απουσία προβλέψιμης πληροφορίας που αναμένεται εκ των προτέρων να προκύψει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αβεβαιότητα που υπάρχει μεταξύ δύο γειτονικών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Αν και αρχικά είναι άγνωστες οι γενικές γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ενδιάμεση περιοχή, εντούτοις μπορούν να προβλεφθούν από τις πληροφορίες που εξάγονται από τα καρότα των γεωτρήσεων. Ο δεύτερος τύπος ατελούς αβεβαιότητας αφορά το απρόβλεπτο. Πρόκειται δηλαδή για έλλειψη πληροφοριών που όμως δεν δύναται να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Στο παράδειγμα των γειτονικών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, παρότι εκτιμώνται οι γεωλογικές συνθήκες, δεν μπορούν να προβλεφθούν, τα ακριβή μηχανικά χαρακτηριστικά των ενδιάμεσων γεωλογικών σχηματισμών.

1.2. ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στον κατασκευαστικό τομέα και ειδικότερα στις υπόγειες κατασκευές, η αβεβαιότητα αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις τις γεωτεχνικής μηχανικής κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή των έργων. Η λανθασμένη ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών και η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης των μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων, δύναται να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα που διαφέρουν από τα πραγματικά.

Σύμφωνα με τους Morgan et al. (1990), οι συνήθεις περιπτώσεις αβεβαιότητας οφείλονται σε:

- i. Στατική μεταβλητότητα, η οποία είναι και η πλέον διαδεδομένη μορφή αβεβαιότητας και οφείλεται σε τυχαία σφάλματα κατά τη διαδικασία μετρήσεων είτε λόγω ατελειών στις συσκευές μέτρησης, είτε λόγω χρήσης λανθασμένης τεχνικής.
- ii. Υποκειμενική αντιμετώπιση, η οποία σχετίζεται με την υποκειμενική εκτίμηση δεδομένων για την ανάλυση και πρόβλεψη γεγονότων.
- iii. Γλωσσική ανακρίβεια, η οποία οφείλεται στην χρήση ασαφών γλωσσικών εκφράσεων για την περιγραφή και μέτρηση δεδομένων.
- iv. Μεταβλητότητα, η οποία δημιουργείται σε μία παράμετρο με τη διαφοροποίηση του χώρου – χρόνου.

- v. Εγγενής τυχαιότητα, η οποία αφορά την αδυναμία ακριβούς μέτρησης ή εκτίμησης μίας παραμέτρου, όπως αναφέρεται και από την «αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg». Αποτελεί μία από τις πιο περίπλοκες περιπτώσεις αβεβαιότητας καθώς υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της.
- vi. Προσέγγιση, η οποία αναφέρεται στη χρήση ακατάλληλων προτύπων και μοντέλων για τον προσδιορισμό μίας μεταβλητής.

1.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΖΩΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η απόφαση για την υλοποίηση ενός επιχειρηματικού σχεδίου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον κίνδυνο που ενέχεται σε αυτό. Ο βαθμός του κινδύνου είναι συνάρτηση της πιθανότητας να συμβεί ένα αρνητικό γεγονός και των συνεπειών αυτού. Συνεπώς, κύρια προϋπόθεση για τον καθορισμό του κινδύνου είναι η γνώση ή η εκτίμηση ενός εύρους παραμέτρων και πληροφοριών. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, η λήψη της απόφασης υπό καθεστώς πλήρους άγνοιας συνεπάγεται πλήρη αβεβαιότητα, ενώ αντιθέτως η πλήρης πληροφόρηση είναι αυτή που εξαλείφει κάθε αμφιβολία. Οι τάξεις της αβεβαιότητας κατά το σχεδιασμό του έργου χαρακτηρίζονται από την ποσότητα της διαθέσιμης πληροφορίας.



Σχήμα 1: Παρουσίαση εύρους αβεβαιότητας (Μπενάρδος, 2014)

Η πλήρης αβεβαιότητα εμφανίζεται λόγω της έλλειψης πληροφόρησης και οφείλεται κατά κύριο λόγο σε εκτεταμένες γεωλογικές ανωμαλίες και σημαντικούς κινδύνους. Στο άλλο άκρο, η παλαιότερη γεωτεχνική εμπειρία στην περιοχή ενδιαφέροντος, σε συνδυασμό με εύκολες γεωλογικές συνθήκες και απλή χάραξη σε επιθυμητά βάθη μεταφράζονται ως πλήρης βεβαιότητα.

Οι περιοχές του έργου που επηρεάζονται από την αβεβαιότητα μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα προβλήματα της τεχνικής /κατασκευαστικής λειτουργίας και στα

προβλήματα πάνω στην οικονομική διεκπεραίωση της κατασκευής. Αν και οι δύο αυτοί τύποι προβλημάτων είναι έντονα αλληλένδετοι μεταξύ τους, στην ανάλυση που ακολουθεί δίνεται μάλλον έμφαση στον τρόπο που επιδρά η αβεβαιότητα στην τεχνική διάσταση μιας υπόγειας κατασκευής. (Μπενάρδος, 2014)

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

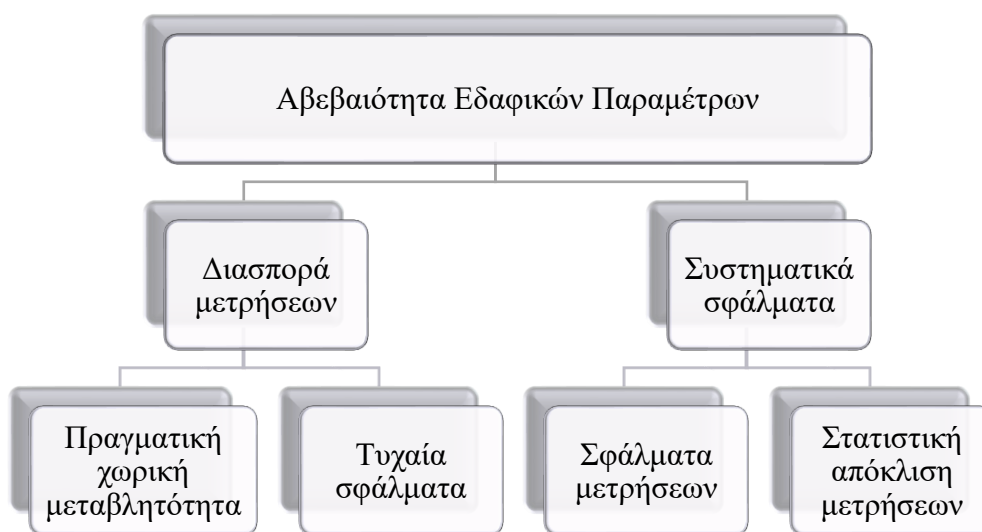
2. Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ

Κατά γενική ομολογία, ένα από τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την κατασκευή υπόγειων έργων είναι η χωρική μεταβλητότητα της συμπεριφορά του γεωλογικού μέσου και ειδικότερα πως αυτή μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Κοινώς, η αβεβαιότητα που υφίσταται γύρω από το γεωλογικό μέσο έχει αντίστοιχες επιπτώσεις στην κατασκευή, είτε αυτή γίνεται με τμηματική είτε με ολομέτωπη κοπή. Οι κύριοι γεωλογικοί παράγοντες που προκαλούν την αβεβαιότητα στα υπόγεια έργα είναι:

- i. Υπόγεια ύδατα.
- ii. Ρήγματα και οι ασυνέχειες.
- iii. Καρστικά έγκοιλα και άλλες πιθανές γεωλογικές ανωμαλίες.

Βάση αυτών, οι πηγές αβεβαιότητας στα υπόγεια έργα είναι κατά βάση η προσέγγιση χαρακτηριστικών και δεδομένων, η χωρική μεταβλητότητα και η εγγενής τυχαιότητα. Κατά τους Christian et al. (1994) δύο είναι οι βασικές παράμετροι που οδηγούν σε αβεβαιότητα κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή υπόγειων έργων (Σχήμα 2):

- i. Η διασπορά των μετρήσεων (data scatter), η οποία οφείλεται κυρίως στην πραγματική χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει και στα τυχαία σφάλματα που γίνονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- ii. Τα συστηματικά σφάλματα που δημιουργούνται διότι οι δοκιμές δεν μέτρησαν με ακρίβεια του προς ανάλυση μεγέθους, αλλά και γιατί ο αριθμός των δοκιμών είναι πολύ μικρός για να υπάρξει εξομάλυνση των τυχαίων σφαλμάτων.



Σχήμα 2: Κατηγορίες αβεβαιότητας εδαφικών παραμέτρων (Christian et al., 1994)

2.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

Η χωρική μεταβλητότητα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, με γενικό τρόπο, χρησιμοποιώντας τυχαίες μεταβλητές και συναρτήσεις. Κατά τους Chiles και Delfiner (2012) οι τυχαίες μεταβλητές z είναι ανεξάρτητες και μπορούν να πάρουν ένα εύρος πιθανών τιμών. Οι τυχαίες συναρτήσεις $Z(u)$ περιγράφουν τη χωρική κατανομή άλλων τυχαίων μεταβλητών. Ο απλούστερος τρόπος προσέγγισης της χωρικής μεταβλητότητας είναι με τη χρήση μίας σχέσης Gauss, η οποία είναι μια τυχαία διαδικασία που μπορεί να περιγραφεί με τη μέση τιμή μ , τη τυπική απόκλιση σ και τη συνάρτηση διακύμανσης C .

$$C(h) = E[(Z(u) - E[Z(u)])(Z(u+h) - E[Z(u)])]$$

Αυτή η περιγραφή της χωρικής μεταβλητότητας απαιτεί τα δεδομένα να είναι σταθερά, ικανοποιώντας τα ακόλουθα:

A) Ο μέσος όρος των τιμών να είναι σταθερός, ως συνάρτηση της θέσης.

B) Η διακύμανση των μεταβλητών να είναι επίσης σταθερή.

Περιστασιακά, η απαίτηση περί σταθερού μέσου όρου των τιμών συναρτήσει της θέσης μπορεί να παραληφθεί.

2.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ

Οι εδαφικές ταξινομήσεις με τις παραδοχές που γίνονται και οι διάφορες προβλέψεις μπορούν εύκολα να οδηγήσουν σε διαφορά ανάμεσα στις αναμενόμενες και τις πραγματικές συνθήκες. Ως συνέπεια αυτών, η γεωλογική αβεβαιότητα, ως η κύρια πηγή κινδύνου, οδηγεί σε συντηρητισμό κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή υπόγειων έργων (Ιοαννου, 1987). Αυτό συμβαίνει διότι το έδαφος λειτουργεί όχι μόνο ως ο μηχανισμός φόρτισης, αλλά επιπρόσθετα, ως ο κυριότερος παράγοντας υποστήριξης της κατασκευής (Μπενάρδος, 2018). Ο βαθμός της γεωλογικής αβεβαιότητας εξαρτάται από την ύπαρξη αξιόπιστων γεωλογικών δεδομένων. Τα γεωλογικά δεδομένα συνήθως όμως προκύπτουν από αναλύσεις που γίνονται σε εδαφικά δείγματα προερχόμενα από γεωτρήσεις. Πρόκειται για σημειακά δείγματα, η ανάλυση των οποίων δίνει προσεγγιστικές τιμές για τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής. Δηλαδή, δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως την γεωλογική εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος, παρά μόνο το σημείο από το οποίο προέρχονται. Επιπλέον, η μεταβολή των εδαφικών χαρακτηριστικών στο γεωλογικό μέσο κατά τις τρεις διαστάσεις και παράλληλα η μεταβολή τους με το χρόνο, το

μέγεθος και τη διεύθυνση των φορτίσεων, δυσχεραίνουν την προσπάθεια απόκτησης αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Η ύπαρξη αβεβαιότητας κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή υπόγειων έργων έχει επιρροή τόσο στις ιδιότητες του εδάφους, όσο και της βραχώμαζας. Χαρακτηριστικά, σημαντικό αντίκτυπο έχει στο συντελεστή εσωτερικής τριβής ($\tan\phi$), στη συνοχή (c) και στη διατμητική αντοχή του αδιατάρακτου εδάφους (c_u) από μεριάς εδαφικών ιδιοτήτων, ενώ από μεριάς βραχώμαζας η αβεβαιότητα επιδρά στην τιμή ανεμπόδιστης θλίψης (UCS), στην σταθερά του πετρώματος (m_i) και το μέτρο ελαστικότητας (E). Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα 1 ο Parker (1996) παρουσιάζει μια σειρά παραμέτρων, η μεταβλητότητα των οποίων επηρεάζει τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας. Πρόκειται τόσο για γεωτεχνικά, όσο και για υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Πίνακας 1: Μεταβλητότητα στα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας (Parker, 1996)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ
Ανισοτροπία	<p>→ Άμεση επίδραση των τιμών αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας των πετρωμάτων από τη διεύθυνση των ασυνεχειών, διακλάσεων, επιπέδων στρώσεως.</p> <p>→ Διαφοροποίηση της τιμής της διαπερατότητας στα εδάφη κατά την οριζόντια διεύθυνση, η οποία πολλές φορές εμφανίζεται έως και 10 φορές υψηλότερη σε σχέση με την κατακόρυφη</p>
Εργαστηριακές δοκιμές - Δοκιμές πεδίου	<p>→ Άμεση επίδραση στην εξέταση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων, καθώς δεν μπορεί να αναπαρασταθούν οι συνθήκες των ασυνεχειών (scale effect).</p>
Ρυθμός φόρτισης	<p>→ Διαφοροποίηση στο ρυθμό φόρτισης των πετρωμάτων στις εργαστηριακές δοκιμές και στη φόρτιση που δέχεται το πέτρωμα κατά την όρυξη.</p>
Τασικό πεδίο	<p>→ Επίδραση του τασικού πεδίου σε τιμές αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας.</p>
Χρόνος	<p>→ Χειροτέρευση των χαρακτηριστικών σε ορισμένα γαιώδη υλικά και «μαλακούς» βράχους με το χρόνο, όταν παραμένουν εκτεθειμένα στο νερό, ή ακόμη και στον αέρα.</p>

<i>Διαταραχές</i>	→ <i>Μεγάλη επίδραση εξωτερικών διαταραχών, δυναμικών φορτίσεων (στο εργαστήριο, ή στο πεδίο) σε γαιώδη υλικά που συνήθως οδηγούν σε χειροτέρευση των χαρακτηριστικών αντοχής, μέτρου παραμορφωσιμότητας, διαπερατότητας.</i>
<i>Υδροφόρος ορίζοντας</i>	→ <i>Διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, ασυνεχειών και στο βαθμό αποσάθρωσης με τις εποχικές αλλαγές στη στάθμη και παροχή του υδροφορέα.</i>

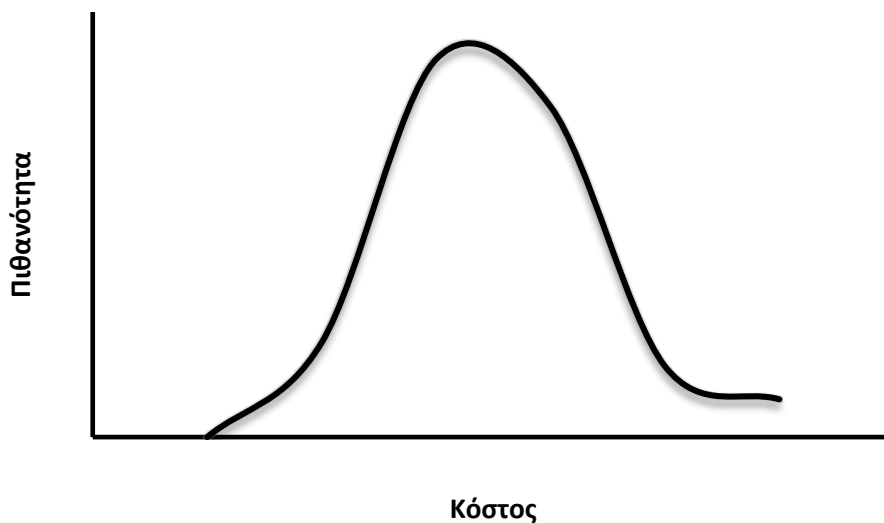
2.3. ΚΟΣΤΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η κύρια πηγή προέλευσης των επιπτώσεων της αβεβαιότητας στο κόστος κατασκευής ενός υπόγειου έργου θεωρείται η απρόβλεπτη μεταβλητότητα των δεδομένων της γεωτεχνικής έρευνας, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1. Αν κατά την προκαταρκτική μελέτη του έργου έχουν εντοπιστεί προβληματικές περιοχές με κακές γεωτεχνικές συνθήκες, τότε αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν με τον κατάλληλο σχεδιασμό. Στην περίπτωση αυτή παύουν να θεωρούνται προβληματικές. Το πρόβλημα έγκειται στην παράληψη τέτοιων περιοχών, γεγονός που αυξάνει το συνολικό προϋπολογισμό του έργου που έχει εξ' αρχής κατατεθεί.

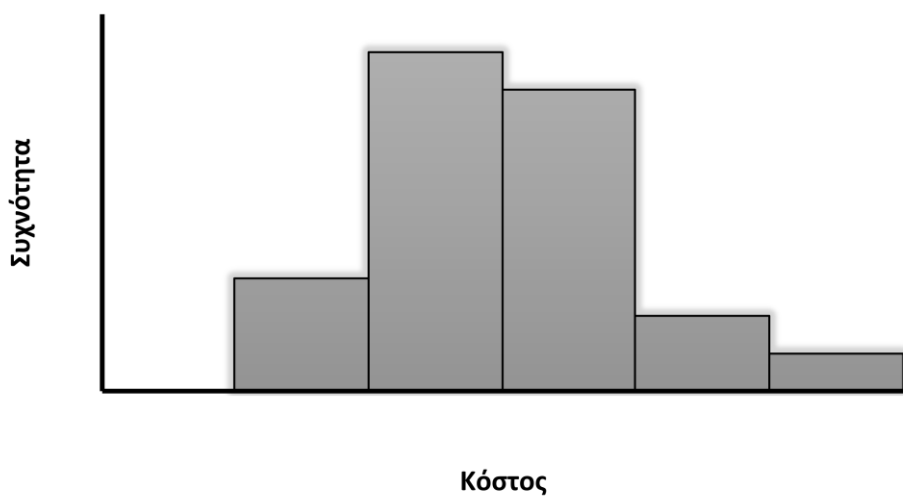
Ακόμα και αν οι γεωλογικές συνθήκες θεωρηθούν γνωστές η αβεβαιότητα εξακολουθεί να υφίσταται σχετικά με την κατασκευαστική διαδικασία. Μια ακόμη σημαντική παράμετρος κατά την εκπόνηση ενός έργου, αποτελεί ο μηχανολογικός εξοπλισμός και το προσωπικό. Η αξιοπιστία και η απόδοση τους συμπεριλαμβάνονται στον όρο αβεβαιότητα. Κατά συνέπεια, το κόστος και ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών επηρεάζονται άμεσα και από αυτούς τους παράγοντες. Καθυστερήσεις και ανεπάρκεια του μηχανολογικού εξοπλισμού και προσωπικού είναι οι κύριες αιτίες μεταβολής του προβλεπόμενου κόστους.

Όπως είναι φανερό, πρακτικά δεν δύναται να υπάρξει πλήρης βεβαιότητα στον κατασκευαστικό τομέα καθώς εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, τεχνικούς έως κοινωνικοπολιτικούς. Ακόμα όμως και αν θεωρηθεί εφικτή η εξάλειψη της αβεβαιότητας, ο σχεδιασμός σε συνθήκες μηδενικού κινδύνου δεν λογίζεται ως μια «καλή πρακτική», καθώς αυξάνεται υπέρμετρα το κόστος του έργου.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, οι κοστολογικές επιπτώσεις της αβεβαιότητας δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια. Δύναται όμως να προσδιοριστεί ένα εύρος του αναμενόμενου κόστους και αυτό αναπαρίσταται με κανονικές κατανομές ή γραφικές παραστάσεις συχνότητας (Haas, 2000). (Σχήμα 3, 4)



Σχήμα 3: Πιθανολογική κατανομή κατασκευαστικού κόστους



Σχήμα 4: Ιστόγραμμα κατασκευαστικού κόστους

Συνεπώς, θα πρέπει να καθιερωθεί μία βασική γραμμή ροής πληροφοριών και παραδοχών σχετικά με τις υφιστάμενες γεωτεχνικές συνθήκες, έτσι ώστε να γίνεται μια αξιόπιστη εκτίμηση του κόστους κατασκευής του υπόγειου έργου.

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΡΓΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΡΓΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Ελλιπείς ή ακόμα και λανθασμένες αξιολογήσεις των εδαφικών συνθηκών, δυνητικά επιφέρουν αλλαγές στον υπάρχων σχεδιασμό, καθώς εξελίσσεται το υπόγειο έργο. Αναφορικά με την κατασκευή η αβεβαιότητα μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη μελέτη και στον προκαθορισμένο χρονικό προγραμματισμό, με αποτέλεσμα μικρές καθυστερήσεις έως και ματαίωση του έργου. Ακόμα, άρρηκτα συνδεδεμένο με τις εδαφικές συνθήκες είναι και το κόστος της κατασκευής. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου η αβεβαιότητα έχει ως αντίκτυπο αναθεωρήσεις των συμφωνηθέντων τιμών των συμβάσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία από υπόγεια έργα του Ελλαδικού χώρου στα οποία υπήρχε η αρνητική επίδραση της αβεβαιότητας των γεωτεχνικών παραμέτρων. Η συγκεκριμένη αναφορά επομένως γίνεται κυρίως για να εστιάσει στο πως μπορεί να βελτιωθούν τα μελλοντικά έργα από παραδείγματα αλλά κυριότερα από τα διδάγματα και του παρελθόντος.

Σήραγγα Καλλιδρόμου

Ενδεικτικό παράδειγμα στον ελληνικό χώρο αποτελεί η περίπτωση της σιδηροδρομικής σήραγγας του Καλλιδρόμου, όπου παρά τις λεπτομερείς δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και τη γεωλογική χαρτογράφηση για τον περιορισμό της αβεβαιότητας, συναντήθηκε μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών με μη αναμενόμενα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα η σήραγγα Καλλιδρόμου αποτελείται από δύο παράλληλους κλάδους όπου ο καθένας έχει μήκος 9.025 m με απόσταση κλάδων 30 m περίπου, με κυκλική διατομή διαμέτρου 9 m. Οι σήραγγες ενώνονται μεταξύ τους κάθε 500 m με εγκάρσιες στοές. Η περιοχή αποτελείται από :

- (α) Αργίλους με εναλλαγές ιλυωδών και αμμωδών ενστρώσεων και φακών ποικίλου πάχους με μικρές κλίσεις ομόρροπες προς το πρηνές και μικρής συνοχής.
- (β) Πολύμικτα μικρο-κροκαλο-ψηφιδοπαγή (μεγέθους 1-3 cm προσανατολισμένα) μικρής έως μέτριας συνοχής, με αμμώδεις ενστρώσεις.

Οι εκσκαφές διάνοιξης της σήραγγας και από το δύο μέτωπα (Νότιο και Βόρειο), ενώ σε γενικές γραμμές επιβεβαίωσαν τους γεωλογικούς σχηματισμούς και την αλληλουχία που προβλεπόντουσαν στην προμελέτη του έργου, εντούτοις παρουσίασαν σοβαρή απόκλιση με τις γεωμηχανικές τους ιδιότητες και με τις εφαρμοσμένες κατηγορίες διατομών μέτρων άμεσης

υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάνοιξη του μετώπου της σήραγγας στις Χ.Θ. 8+500 (Νότιο Μέτωπο) και Χ.Θ. 10+900 (Βόρειο Μέτωπο) συναντήθηκε σχιστώδης σερπεντινίτης με αρκετές ζώνες διάτμησης που δεν είχαν προβλεφθεί στη μελέτη.

Ως αποτέλεσμα, παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες και χρονικά εξελισσόμενες συγκλίσεις της διατομής με συνέπεια την αστοχία του κελύφους του εκτοξευμένου σκυροδέματος και την ανάγκη διαρκούς αύξησης του πάχους του



Σχήμα 5: Αστοχία προσωρινής υποστήριξης λόγω συγκλίσεων στο Νότιο Μέτωπο (ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε., 2013)



Σχήμα 6: Αστοχία στο θόλο της σήραγγας (Νότιο μέτωπο) σε Αργιλικό σχηματισμό (ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε., 2013)

Αντίθετα, σε ορισμένες θέσεις οι σχηματισμοί παρουσίασαν υποδεέστερες γεωμηχανικές ιδιότητες, γεγονός όπου η εκτεταμένη χρήση ενισχυμένων διατομών μέτρων υποστήριξης επιβάρυνε σημαντικά την πρόοδο και το κόστος κατασκευής της Σήραγγας. Ως αποτέλεσμα, η κατασκευή του έργου καθυστέρησε σχεδόν 15 χρόνια και το κόστος αυξήθηκε 7 φορές σε σχέση με τον αρχικό προϋπολογισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω των παραπάνω συνθηκών το έργο προκηρύχθηκε για πρώτη φορά το 1997 και έκτοτε το ανέλαβαν τέσσερις διαφορετικοί ανάδοχοι, εκ των οποίων οι τρεις πρώτοι πτώχευσαν.

Σήραγγα Κακιάς Σκάλας

Το έργο της «Κακιάς Σκάλας» για λόγους γεωμορφολογικούς, σεισμοτεκτονικούς, γεωτεχνικούς, αναγκαστικής διέλευσης σε στενή λωρίδα όλων των σιδηροδρομικών και οδικών αξόνων, αλλά και περιβαλλοντικούς θεωρείται από τα πλέον δύσκολα και πλέον ενδιαφέροντα έργα στην Ελλάδα

Το έργο έχει μήκους 8.540 m., ανήκει στον άξονα Αθήνα – Κόρινθος και βρίσκεται μεταξύ Μεγάρων – Κινέττας. Αποτελείται από δύο σιδηροδρομικές σήραγγες διπλής γραμμής συνολικού μήκους 3.917 m (Σήραγγα ΣΣ (1-2) : μήκους 2.400 m και Σήραγγα ΣΣ 3N: μήκους 1.600 m), πέντε σήραγγες διαφυγής, τέσσερις γέφυρες συνολικού μήκους 218 m και χωματουργικά έργα συνολικού μήκους 4.400 m.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και αποτελείται από Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους, συχνά κερματισμένους και τοπικά καρστικοποιημένους με παρουσία πλευρικών κορημάτων συγκολλημένων σε ποικίλο βαθμό. Οι σήραγγες του έργου διέρχονται από ασβεστόλιθους που βρίσκονται στη ζώνη που επηρεάζεται από ένα κύριο σύστημα ρηγμάτων που έχει διαμορφώσει και τη μορφολογία της περιοχής. Αποτελέσματα αυτών των γεωτεκτονικών διεργασιών ήταν η βραχώδης μάζα να έχει κατά θέσεις κερματιστεί σε μεγάλα τεμάχια διαχωριζόμενα με βαθιές ασυνέχειες. Αυτό με τη σειρά του χρειάστηκε ιδιαίτερα προσεκτική διαδικασία εκσκαφής και υποστύλωσης. Επιπλέον, λόγω του σεισμοτεκτονικού καθεστώτος της ευρύτερης περιοχής που αναδιαμορφώθηκε με το σεισμό της Πάρνηθας το 1999, αλλά και της γεωλογικής δομής της περιοχής των έργων κρίθηκε απαραίτητη η παραλλαγή της αρχικής μελέτης που περιελάμβανε την απομάκρυνση της χάραξης από το σύστημα των ρηγμάτων της Κακιάς Σκάλας και κατά το δυνατόν κάθετη τμήση της νέας χάραξης με η ζώνη των ρηγμάτων. Η παραλλαγή αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ενοποίηση ορισμένων σηράγγων και σε ορισμένα σημεία διεύρυνση των διατομών τους και γενικότερα αύξηση των υπόγειων έργων σε

σχέση με τα υπαίθρια τμήματα, γεγονός που αύξησε υπέρμετρα το αρχικό προκαθορισμένο κόστος της σύμβασης.

Σήραγγες Πλαταμόνα – Λεπτοκαρυάς

Το έργο των Σηράγγων Πλαταμόνα – Λεπτοκαρυάς αποτελείται από ορύγματα μήκους 1.062 m, επιχώματα μήκους 962 m και 1.736 m και σήραγγες συνολικού μήκους 537 m (Σήραγγα Κουκουντώνη μήκους 388 m, Σήραγγα Μοσχόφ μήκους 465 m και Σήραγγα Κάστρου μήκους 68 m).

Η ευρύτερη περιοχή του έργου συνίσταται από Αλπικούς και Μεταλλικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Το γεωτεχνικό πεδίο, ιδιαίτερα στις σήραγγες, χαρακτηρίζεται από συχνές εναλλαγές σχηματισμών ποικίλης ποιότητας, μικρό σχετικά βάθος εκσκαφής, υδροφορία και μεγάλο εμβαδόν διατομής (130 - 160 m²) εκσκαφής. Οι παραπάνω κύριοι παράγοντες σε συνδυασμό με τις βασικές πέντε κατηγορίες βραχομάζας RMR (Rock Mass Rating) χρησιμοποιήθηκαν ως βάση του καθορισμού των κατηγοριών των άμεσων μέτρων υποστήριξης.

Κατά την κατασκευή των σηράγγων με τη μέθοδο NATM προκλήθηκαν φαινόμενα καταπτώσεων μικρής έκτασης, εντός του εμβαδού της διατομής λόγω κυρίως απώλειας της εδαφικής συνοχής, εκτόνωση αργιλικών σχηματισμών, ροή εδαφικής λάσπης, αποκόλληση βραχωδών υλικών ανάμεσα σε ανοιχτές ασυνέχειες με υδροφορία. Επιπλέον, προκλήθηκαν φαινόμενα κατάρρευσης τμημάτων του πυρήνα αντιστήριξης, βύθιση τμήματος σήραγγας μαζί με το ενιαίο σύστημα προσωρινής υποστήριξης φάσης λόγω κυρίως μικρής φέρουσας ικανότητας της πλευρικής θεμελίωσης (elephant foot) που επιδεινώθηκε από την υδροφορία. Τα φαινόμενα αυτό αντιμετωπίστηκαν με εφαρμογή στις επιτόπου συνθήκες των αντίστοιχων διατομών μέτρων υποστήριξης. Τα προβλήματα από την υδροφορία παρουσιάστηκαν στο τμήμα της Σήραγγας Κουκουντώνη. Το τμήμα αυτό παρουσίασε ιδιαίτερη δυσκολία λόγω των δυσμενών εδαφικών συνθηκών που συνδυάστηκαν με υδροφορία. Ο υδροφόρος ορίζοντας κατά τόπους περνούσε περίπου 10 m. πάνω από την οροφή της σήραγγας. Έτσι, παρατηρήθηκαν φαινόμενα συγκλίσεων, υπερεκσκαφών και αποκόλλησης τεμαχίων. Η κατάσταση αντιμετωπίστηκε με αυξημένα μέτρα υποστήριξης και άντλησης μέσω γεωτρήσεων που έγιναν από την επιφάνεια.

Όλα τα παραπάνω συντέλεσαν στο συμπέρασμα ότι η γεωλογία από την προμελέτη εντοπίστηκε με ακρίβεια σε ότι αφορά τους τύπους των σχηματισμών. Η γεωτεχνική όμως συμπεριφορά των σχηματισμών αυτών παρουσίασε σημαντικές αποκλίσεις όπως συνάγεται από τα αποτελέσματα των στοιχείων που βγαίνουν από την σύγκριση του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Συγκριτικά στοιχεία πρόβλεψης – πραγματικά μέτρων μήκους σηράγγων κατά κατηγορία βραχόμαζας (Γκενάκος, 2001)

Κατηγορία Βραχομάζας κατά Bieniawski	Πρόβλεψη προμελέτης	Στοιχεία εκσκαφών α΄ φάσης
II	315 m	68 m
III	772 m	342 m
IV	938 m	339 m
V	475 m	1733 m

Από την συγκριτική εικόνα των παραπάνω φαίνεται καθαρά ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν στην «καλύτερη» και στη «χειρότερη» κατηγορία βραχόμαζας όπου η τελευταία αντιμετωπίστηκε με την εφαρμογή foreroling. Τα παραπάνω ασφαλώς αποτέλεσαν ανάλογη επιβάρυνση του κόστους και επιβράδυνση υλοποίησης του χρονοδιαγράμματος κατασκευής.

Σήραγγας Σ2 (Κουμαριά – Αγ. Αναστασία) Εγνατίας Οδού

Η σήραγγα Σ2 (Κουμαριά – Αγ. Αναστασία) της Εγνατίας Οδού βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ Δωδώνης και Τύριας Ιωαννίνων. Είναι διπλή οδική σήραγγα, συνολικού μήκους 858 m ανά κλάδο, εκ των οποίων τα 473 m έγιναν με υπόγεια διάνοιξη και τα υπόλοιπα με τεχνικό εκσκαφής και επανεπίχωσης (Cut & Cover). Η διατομή της είναι πεταλοειδής, με ωφέλιμο πλάτος 10,7 m.

Η περιοχή αποτελείται από τυπικό Φλύσχη με εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, πτυχωμένο και με επιφάνειες διάτμησης κατά μήκος ασθενέστερων επιπέδων που δημιουργήθηκαν λόγω πτύχωσης, με αποτέλεσμα η σήραγγα να έχει ιδιαίτερα βεβαρημένο ιστορικό αστοχιών. Οι περισσότερες αστοχίες συνέβησαν στο νότιο στόμιο και στα πρώτα 150 m της υπόγειας διάνοιξης και των δύο κλάδων. Ειδικότερα, στα τμήματα αυτά, εμφανίζονταν βαθιές ολισθήσεις η οποίες ενεργοποιήθηκαν από την εκσκαφή των σηράγγων και δημιούργησαν υπερφορτίσεις και αστοχία της προσωρινής υποστήριξης.

Τα προβληματικά τμήματα των σηράγγων επιχώθηκαν (Φεβρουάριος 2005) και εκπονήθηκε μελέτη επιδιόρθωσης τους. Κατά την επιδιόρθωση των σηράγγων (Απρίλιος 2005), παρά την εφαρμογή βαριάς υποστήριξης, εμφανίστηκαν και πάλι ανάλογες ρωγματώσεις και παραμορφώσεις προς τα ανατολικά, ενώ μετρήσεις αποκλισημέτρων έδειξαν την ύπαρξη παραμορφώσεων πλαγιάς, πλέον κατολισθητικού τύπου. Αποφασίστηκε εκ νέου διακοπή των

εργασιών και επίχωση των σηράγγων (Μάιος 2005). Τους επόμενους μήνες, εκπονήθηκε νέα μελέτη σταθεροποίησης κατολίσθησης και επιδιόρθωσης και έγινε δημοπράτηση και ανάθεση του έργου. Κατά την εκτέλεση εκσκαφών αποφόρτισης της πλαγιάς (Δεκέμβριος 2006), εκδηλώθηκε κατολίσθηση, με αποτέλεσμα τη νέα διακοπή των εργασιών. Δώδεκα χρόνια μετά την έναρξη του έργου και μετά από τέσσερις διαδοχικές μεγάλης έκτασης αστοχίες, το έργο παρέμενε ανολοκλήρωτο. Όντας ένα από τα τρία τελευταία μη ολοκληρωθέντα τμήματα του κυρίου άξονα της Εγνατίας Οδού, είχε πλέον ασφυκτικό χρονοδιάγραμμα ολοκλήρωσης. (Καζύλης, Παπαδόπουλος, Grasso, 2010)



Σχήμα 7: Αυξημένες παραμορφώσεις και ρωγματώσεις προσωρινής υποστήριξης αριστερής παρειάς (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.)

Με πρωτοβουλία του Αναδόχου και αποδοχή από την Υπηρεσία, ανατέθηκε στο Σύμβουλο νέα μελέτη αποκατάστασης, η οποία περιλαμβάνανε:

(Παπαδάτος, 2009)

- Χωματουργικές εργασίες αποφόρτισης της ενεργής κατολίσθησης και επίχωση της μισγάγγειας
- Ενεματώσεις πλήρωσης των κενών

- Διαμόρφωση επιπέδων, ασφαλών δαπέδων εργασίας με επιχώματα και τοίχους από συρματοκιβώτια
- Ενίσχυση της περιβάλλουσας των σηράγγων βραχώμαζας με τη μέθοδο του Jet grouting
- Κατασκευή διατμητικών κλειδιών (μπαρετών)
- Αποκατάσταση των βλαφθέντων τμημάτων της σήραγγας

Το έργο παραδόθηκε στην κυκλοφορία έγκαιρα τον Ιούλιο του 2009.

Μετρό Αθηνών

Το Μετρό Αθηνών αποτέλεσε ένα μεγαλεπήβολο έργο στην καρδιά της πόλης με ζωτική σημασία και μεγάλη επιρροή στο κοινωνικό σύνολο και το περιβάλλον, λύνοντας κατά ένα μεγάλο μέρος το κυκλοφοριακό πρόβλημα των Αθηνών. Το μεγαλύτερο και πολυπλοκότερο συγκοινωνιακό έργο που κατασκευάζεται στην Ελλάδα, και ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης, ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1991 και συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.

Η διάνοιξη σηράγγων για την κατασκευή του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας κυρίως έγινε στο σχηματισμό που αποκαλείται « Αθηναϊκός Σχιστόλιθος» . Είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον γεωλογικό σχηματισμό που εμφανίζει ποικιλία χαμηλής μεταμόρφωσης και ιζηματογενών (μη μεταμορφωμένων) ασθενών πετρωμάτων, έντονα ανομοιογενής. Ο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος αποτελεί μια αλληλουχία ιζημάτων τύπου φλύσχη του Ανώτερου Κρητιδικού, πάχους περίπου 200 m, που σχηματίστηκε από υλικά που προέρχονται από τις γύρω περιοχές και συγκεντρώθηκαν στην Λεκάνη της Αθήνας. Η αλληλουχία αποτελείται από λεπτούς στρωματώδης αργιλικούς και ασβεστιτικούς ψαμμίτες, σε εναλλαγές με ιλυόλιθους, αργιλικούς σχιστόλιθους, σχιστόλιθους, μάργες και ασβεστόλιθους. (Κουκουτάς, 2001)

Για την εκσκαφή των σηράγγων εφαρμόστηκαν 3 μέθοδοι εκσκαφής:

- Μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM, ETB κτλ)
- Συμβατική μέθοδος NATM (New Australian Tunneling Method)
- Μέθοδος Ανοικτού Ορύγματος (Cut & Cover)

Παρά το γεγονός της προκαταρκτικής μελέτης του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου κατά μήκος των γραμμών του Μετρό της Αθήνας, κατά την διαδικασία της εκσκαφής των σηράγγων παρουσιάστηκαν κατά τόπους προβλήματα σχετικό με το γεωλογικό υπόβαθρο. Αρχικά, η τοπική αποσάθρωση και η εξαλλοίωση όμως έκανε το σχηματισμό να συμπεριφέρεται απρόβλεπτα. Επιπλέον, οι εδαφικές μετακινήσεις γύρω και πάνω από την κοπτική κεφαλή του TBM ήταν ένα από τα κρισιμότερα προβλήματα του έργου. Οι κύριοι λόγοι ήταν οι φτωχές εδαφικές συνθήκες πάνω από το επίπεδο της στέψης του TBM , το μικρό εύρος υπερκείμενων προς την επιφάνεια, η

ύπαρξη παλιών περιοχών διέλευσης ύδατος η παρουσία υπονόμων, αρχαίων πηγαδιών και άλλων ανθρωπογενών παραγόντων. Οι σχηματιζόμενες σπηλιές, σαν άμεσο μέτρο συνήθως υποστηρίζονταν και γεμίζονταν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μέσα από την κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ή σκυροδετούνταν από την επιφάνεια .

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά μερικά από τα σημαντικότερα κατασκευαστικά προβλήματα.

- Διάνοιξη Τμήματος Σήραγγας «Σταθμός Μεταξουργείο- Ομόνοια»

Το μικρό ύψος υπερκειμένων, μόλις 10 m, σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις εκείνης της περιόδου οδήγησαν σε μια σειρά προβλημάτων με σημαντικότερο κατάπτωση του οδοστρώματος στην πλατεία Καραϊσκάκη πάνω από το TBM και την δημιουργία μεγάλου ανοίγματος στην επιφάνεια. Τα μέτρα που ελήφθησαν για την ενίσχυση του εδάφους, ήταν η εφαρμογή ενέματος υπό πίεση, τοποθέτηση μικροπασάλων και αγκύρια από την επιφάνεια. Κατασκευάστηκε όρυγμα ώστε να αποφευχθούν συνεχείς καταρρεύσεις του εδάφους. Επιπλέον αποφασίστηκε η εκκένωση καθώς και η κατεδάφιση τριών κτιρίων επί της οδού Αγίου Κωνσταντίνου, δίπλα στην πλατεία Καραϊσκάκη. Τέλος, κατασκευάστηκε πιλοτική σήραγγα μήκους 188 m από την Ομόνοια προς το Μεταξουργείο για την έρευνα και ενίσχυση του εδάφους, μέσω διερευνητικών οπών σκυροδέτησης και προσωρινό φρέαρ πρόσβασης στην πλατεία Καραϊσκάκη για την εκσκαφή της υπόγειας σήραγγας NATM μήκους 42 m που χρησιμοποιήθηκε για την ολίσθηση και στήριξη της κεφαλής του TBM πριν την επανέναρξη εργασίας εκσκαφής.

- Διάνοιξη Τμήματος Σήραγγας «Σταθμός Ομόνοια - Πανεπιστήμιο»

Κατά την διέλευση του TBM από τη διασταύρωση της Χαριλάου Τρικούπη και Πανεπιστημίου έγινε υπερεκσκαφή με αποτέλεσμα την κατάρρευση μέρους του οδοστρώματος επί της οδού Πανεπιστημίου, του φρεατίου επίσκεψης, μέρους του αγωγού ακαθάρτων και μέρους του αγωγού όμβριων. Στην έρευνα που ακολούθησε διαπιστώθηκε η φθορά του δαπέδου του αγωγού των ομβρίων καθώς και παράνομες συνδέσεις αγωγών ακαθάρτων των παρακείμενων κτηρίων με τον Παλιό αγωγό ομβρίων καθώς και η διάχυση των λημμάτων στο έδαφος. Συνεχίστηκε η προώθηση του TBM, παρουσία συνεχών υπερεκσκαφών που είχαν σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση του οδοστρώματος επί της Οδού Πανεπιστημίου.



Σχήμα 8: Κατάρρευση οδοστρώματος επί της Οδού Πανεπιστημίου (Μαρίνος, 2008)

Έγινε πλήρωση των κενών της κατάπτωσης από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας τσιμεντένεμα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως υλικά πλήρωσης.

- Διάνοιξη Τμήματος Σήραγγας «Σταθμός Σύνταγμα - Ακρόπολη»
Η διέλευση του TBM έγινε κάτω από κτίρια και την παλαιά πόλη όπου συναντήθηκαν αρχαία πηγάδια και πολλά αρχαιολογικά ευρήματα. Για την ασφαλή προώθηση και επιτάχυνση του TBM κατασκευάστηκε πιλοτική σήραγγα μήκους 654 m από όπου έγινε η βελτίωση του εδάφους στην στέψη της σήραγγας. Επίσης έγινε ενίσχυση του εδάφους με τσιμεντενέσεις διάχυσης ενέματος, από την επιφάνεια για την προώθηση του TBM.
- Διάνοιξη Τμήματος Σήραγγας «Σταθμός Κατεχάκη - Πανόρμου»
Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετώπισε το TBM σε αυτό το μεσοδιάστημα ήταν το Αδριάνειο Υδραγωγείο δίπλα στον σταθμό Πανόρμου όπου πριν την άφιξη του Μηχανήματος έγινε η κατασκευή και εκτροπή του Ανδριάνειου αγωγού.

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΝΕΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

4. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΝΕΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Όπως έχει διαπιστωθεί κατά το παρελθόν, οι υπόγειες κατασκευές συνδέονται πάντα με εγγενείς κινδύνους λόγω της περιορισμένης γνώσης περί των υφιστάμενων γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, καθώς και άλλων αβεβαιοτήτων.

Δίνεται λοιπόν μεγάλη έμφαση στο τρόπο της επιστημονικής αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και κατ' επέκταση στη διαδικασία αξιολόγησης και ελέγχου του κινδύνου. Έχουν προταθεί κατά το παρελθόν διάφορες μέθοδοι για την αξιολόγηση του κινδύνου που προκύπτουν τόσο από γεωλογικής άποψης, όσο και από άποψη κατασκευής. Για το σκοπό αυτό η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας με τον προσδιορισμό των παραμέτρων με χρήση βάσεων δεδομένων, μέσω τιμών μεταβλητών ή του worst case scenario δεν ενδείκνυται. Αντίθετα, η αναλυτική προσέγγιση με μια σειρά πιθανοτικών κατανομών όπως Monte Carlo, FOSM (first – order second – moment method) , PEM method θεωρείται αποτελεσματική, αλλά δύσκολα εφαρμόσιμη σε πολύπλοκες περιπτώσεις. Εν συνέπεια, έχει προκύψει η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός γεωστατιστικού μοντέλου όπου οι αντίστοιχες αναλύσεις κινδύνου και ευαισθησίας να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο και το κόστος του εκάστοτε έργου.

Η μοντελοποίηση με τη χρήση γεωστατιστικής περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα βασικά στάδια: (Giles, 1993)

- i. Τον προσδιορισμό της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των σημείων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.
- ii. Τη μοντελοποίηση της χωρικής τους διακύμανσης.
- iii. Την επικύρωση αυτού του μοντέλου.
- iv. Την παρεμβολή των δεδομένων των σημείων παρατήρησης, ώστε να διαμορφωθεί η χωρική μεταβολή και η μεταξύ τους εξάρτηση στο μοντέλο.

Ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός του γεωλογικού μέσου σε συνδυασμό με την εκτιμώμενη συμπεριφορά του και τη διαρκή παρακολούθηση, αποτελούν τη βάση για τον αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής και τη συνεχή ενημέρωσή του. Η ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμού που θα αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα για τον σχεδιασμό και την κατασκευή υπόγειων έργων απαιτεί:

(Paraskevoπούλου, Diederichs, 2018)

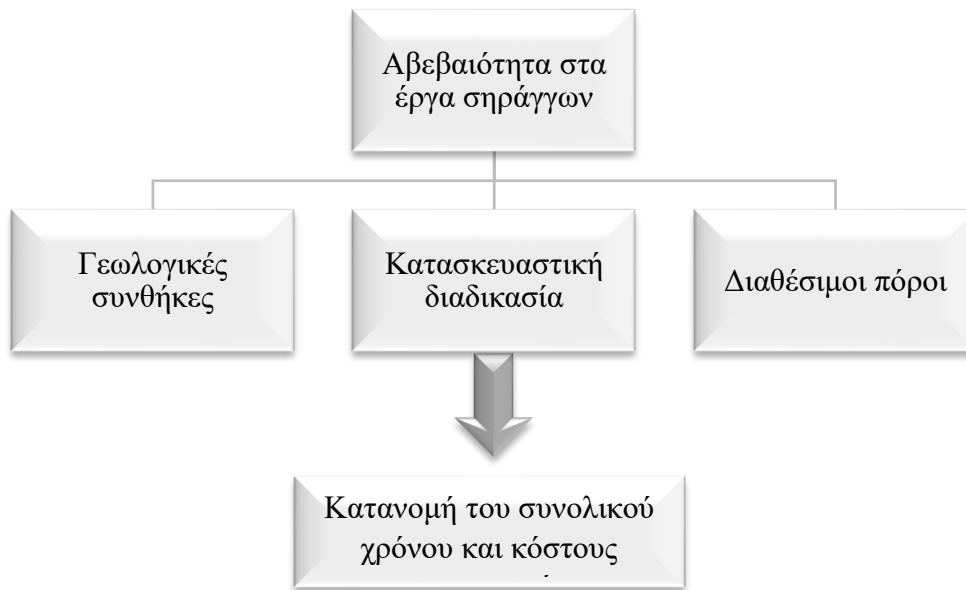
- i. Γεωτεχνικό χαρακτηρισμό του γεωλογικού μέσου.
- ii. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του.
- iii. Ανάπτυξη επαρκών μεθόδων εκσκαφής και υποστήριξης για όλο το εύρος των πιθανών συμπεριφορών.
- iv. Επαρκές σχέδιο παρακολούθησης και στρατηγικής ανταπόκρισης.
- v. Σύντομο χρόνο απόκρισης του σε περιπτώσεις πραγματικών συνθηκών που αποκλίνουν από τις αναμενόμενες.
- vi. Σχέδιο διαχείρισης κινδύνου, συμπεριλαμβανομένων των μέτρων έκτακτης ανάγκης.

Πλέον έχουν αναπτυχθεί εύχρηστα λογισμικά εργαλεία που απλοποιούν τη μοντελοποίηση με τη χρήση της γεωστατικής, όπως αυτά που αναπτύσσονται παρακάτω.

4.1. DAT – DECISION AIDS IN TUNNELLING

Ένα εύχρηστο εργαλείο για την πρόβλεψη της γεωλογικής πραγματικότητας, καθώς και του κατάλληλου κατασκευαστικού πλάνου για τη λήψη σωστών αποφάσεων κατά τον οικονομικό σχεδιασμό είναι το ευρέως διαδεδομένο είναι το εμπορικό και ερευνητικό λογισμικό ανάλυσης κινδύνου σε σήραγγες *DAT – Decision Aids in Tunneling*. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από την ομάδα του H. H. Einstein του MIT (Massachusetts Institute of Technology) σε συνεργασία με το Jean – Paul Dudt et al. Του EPEL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). Οι κώδικες που αναπτύχθηκαν ακολουθούν την πιθανολογική μέθοδο Monte Carlo και βασίστηκαν σε κατασκευαστικά δεδομένα των σιράγγων Saint Gothard και Lötscherg του ερευνητικού προγράμματος Alp Transit στην Ελβετία, όπου και εφαρμόστηκαν (Jean – Paul Dudt, 1998).

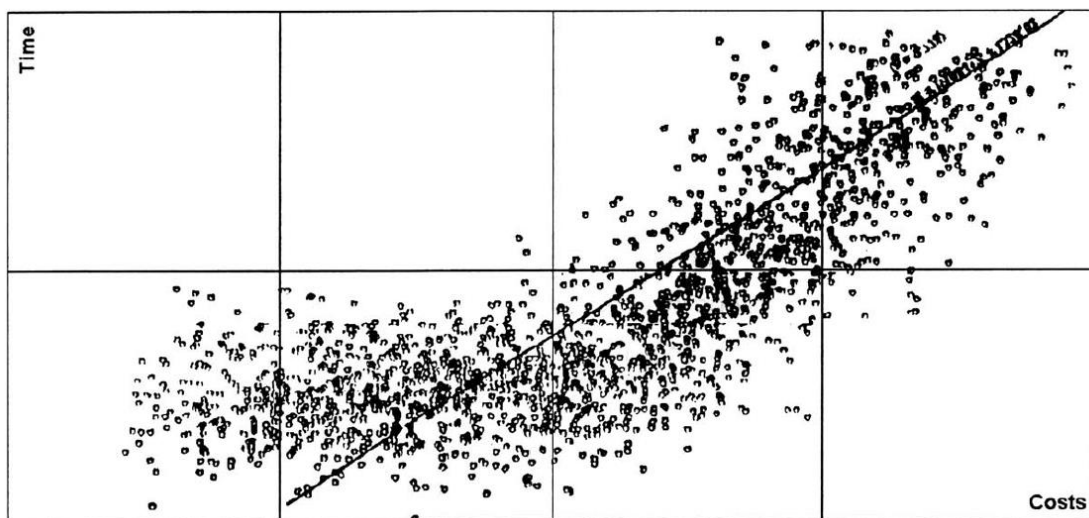
Τα δεδομένα εισόδου στο βασικό λογισμικό DAT υποδιαιρούνται σε τρεις βασικές ενότητες: γεωλογία, κατασκευή και διαχείριση των πόρων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 9:



Σχήμα 9: Δεδομένα εισόδου DAT (Maruvanchery et al., 2018)

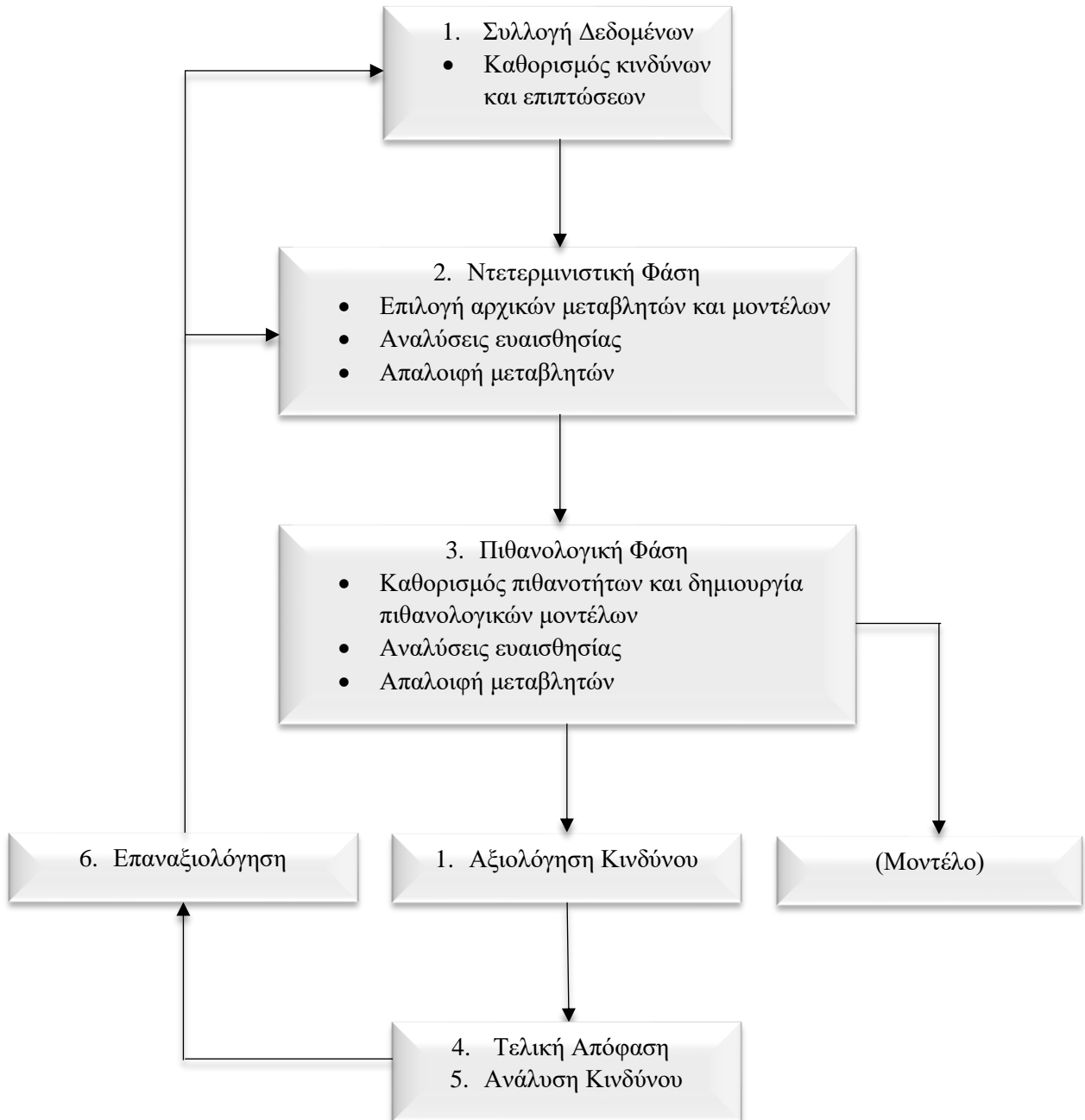
Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αναλύει την επίδραση της γεωλογικής αβεβαιότητας και υπολογίζει αντίστοιχες πιθανοτικές κατανομές οι οποίες αφορούν στο κόστος και στο χρόνο κατασκευής. Το γεωλογικό προφίλ της εξεταζόμενης περιοχής προσομοιώνεται με τη χρήση αναμενόμενης δεσμευμένης πιθανότητας (πιθανότητα υπό συνθήκη), αξιολογούνται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και αναλύεται ο εκτιμώμενος χρόνος και το κόστος κατασκευής σε σχέση με διάφορες κατασκευαστικές επιλογές και παραμέτρους του έργου. Έτσι, ο συγκερασμός αυτών των δύο στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικότερες εκτιμήσεις αναφορικά με το αναμενόμενο κόστος, χρόνο κατασκευής και αναλύσεις κινδύνου του εκάστοτε έργου.

Γεωλογικό Μοντέλο και Κατασκευαστικό Μοντέλο



Σχήμα 10: Διασπορά τιμών κόστους – χρόνου (Haas, 2000)

Η λήψη της τελικής απόφασης για την κατασκευή του έργου βασίζεται σε μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία συλλογής και αξιολόγησης πληροφοριών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Διαδικασία λήψης απόφασης (Einstein, 2002)

Η χρήση του DAT δεν περιορίζεται μόνο σε μελετητικούς σκοπούς, καθώς το λογισμικό εξελίσσεται παράλληλα και χρησιμοποιείται από την προκαταρκτική φάση του σχεδιασμού ως και τη φάση υποβολής προσφορών και τέλος της κατασκευής. Μπορούν δηλαδή να αντιμετωπιστούν αξιόλογα τα ακόλουθα θέματα:

- i. Η απόφαση για το αν θα πρέπει να πραγματοποιηθεί το έργο με βάση την αντίστοιχη ανάλυση κινδύνου.
- ii. Η σύγκριση εναλλακτικών λύσεων αναφορικά με τη χάραξη του έργου, τη μέθοδο εκσκαφής και άλλα.
- iii. Ο περιορισμός των αβεβαιοτήτων σχετικά με την κατασκευή, πριν αυτή πραγματοποιηθεί.
- iv. Οι κατανομές κόστους και χρόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για συμβάσεις ή ασφαλιστικές καλύψεις.

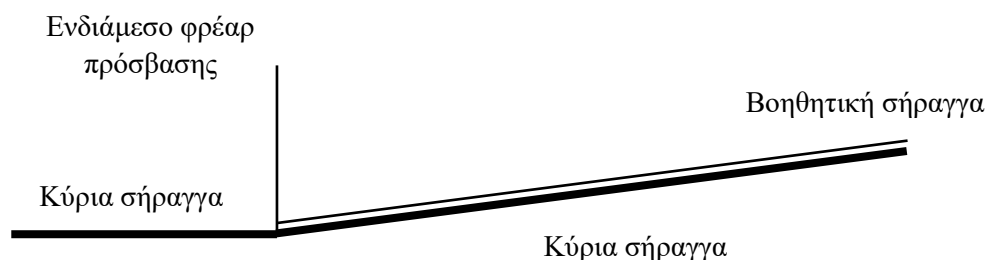
4.1.1. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ DAT

Η διαδικασία κατασκευής του γεωλογικού μοντέλου θεωρείται αρκετά περίπλοκη, γεγονός που δίνει την ευελιξία στο χρήστη να προσομοιώσει πλήρως το γεωλογικό προφίλ της περιοχής ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα το γεωλογικό μοντέλο χρησιμοποιεί μια αλυσίδα Markov για την προσομοίωση των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων, κατατάσσοντας εδαφικές ζώνες και περιοχές σε αντίστοιχες κατηγορίες εδάφους.



Σχήμα 12: Διαδικασία προσομοίωσης γεωλογικού μοντέλου

Κατά το πρώτο στάδιο προσομοίωσης του γεωλογικού μοντέλου καθορίζονται οι κύριες περιοχές ενδιαφέροντος. Σε μία τυπική κατασκευή οι περιοχές αυτές είναι η κύρια σήραγγα, συμπεριλαμβανομένης της βοηθητικής, και το ενδιάμεσο φρέαρ πρόσβασης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.

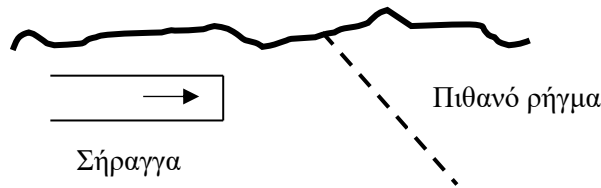


Σχήμα 13: Τυπική διάταξη σήραγγας (Haas, 2000)

Εν συνεχεία, οι περιοχές αυτές υποδιαιρούνται περαιτέρω σε ζώνες, που θεωρούνται στατιστικά ομοιογενείς. Οι γεωτεχνικές παράμετροι δηλαδή κάθε μεμονωμένης ζώνης προσδιορίζονται με μία στατιστική διαδικασία η οποία παραμένει ίδια καθ' όλο το μήκος της. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύνολο παραμέτρων, όπως ποιότητα πετρώματος, ασυνέχειες, εισροή υπόγειων υδάτων και άλλα. Κάθε παράμετρος χαρακτηρίζεται από μία κατάσταση, όπως ήπιος, ενδιάμεσος ή έντονος κατακερματισμός του πετρώματος. Οι ακριβείς θέσεις έναρξης και τερματισμού των ζωνών, καθώς και η ακολουθία τους δεν είναι πάντα ευδιάκριτη. Ομοίως, ο χαρακτηρισμός των γεωλογικών καταστάσεων παρουσιάζει δυσκολίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου η αβεβαιότητα είναι υπαρκτή, η είσοδος των δεδομένων για την δημιουργία του γεωλογικού μοντέλου γίνεται με πιθανοτικό τρόπο.

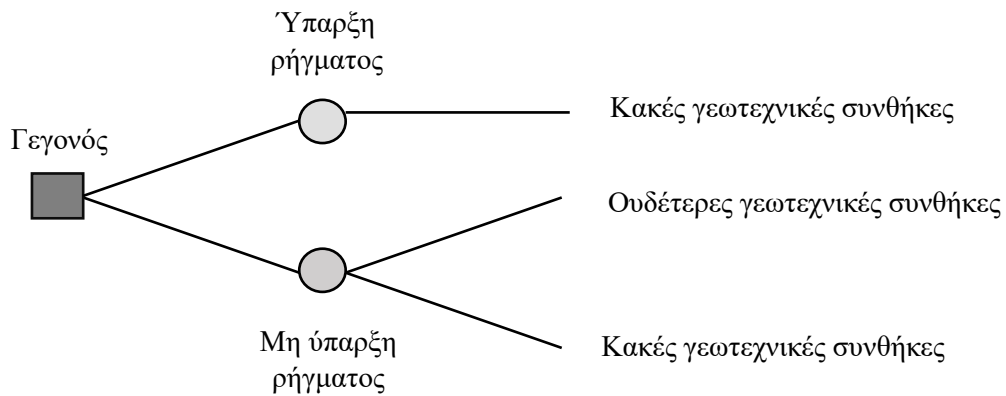
Στο επόμενο στάδιο, οι διάφορες γεωτεχνικές παράμετροι συνδυάζονται με σκοπό τη δημιουργία μιας κατηγορίας εδάφους. Με το τρόπο αυτό προκύπτει ένα προφίλ κατηγοριών εδαφών για όλο το μήκος της σήραγγας.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα ιδιότητα του λογισμικού DAT, αναφορικά με το γεωλογικό μοντέλο, είναι η εισαγωγή παραμέτρων ανεξάρτητων από τις υπάρχουσες ζώνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης αποτελούν τα ρήγματα. Η ύπαρξη ρήγματος διαταράσσει έντονα τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της ενδιαφερόμενης περιοχής.



Σχήμα 14: Πιθανή ύπαρξη ρήγματος (Μπενάρδος)

Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι βέβαιη η ύπαρξη του, η παράμετρος αυτή μπορεί να ορισθεί από τις δύο καταστάσεις που την χαρακτηρίζουν, ως «υπάρχει» ή «δεν υπάρχει», με τις αντίστοιχες συνέπειες.



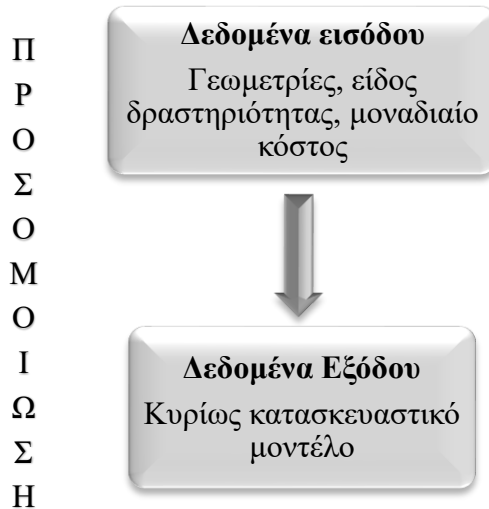
Σχήμα 15: Διερεύνηση ύπαρξης ρήγματος

Στην περίπτωση όπου υπάρχει ρήγμα στην εξεταζόμενη περιοχή, αυτή χαρακτηρίζεται αυτόματα ως περιοχή με κακές γεωτεχνικές συνθήκες. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ρήγμα, η περιοχή μένει ανεπηρέαστη από αυτή την παράμετρο και χαρακτηρίζεται μόνο από τα αυτούσια γνωρίσματα της ως περιοχή με ουδέτερες ή κακές γεωτεχνικές συνθήκες.

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω καταστάσεων οδηγεί στο τελικό γεωλογικό προφίλ, για όλο το μήκος της σήραγγας. Στο γεωλογικό προφίλ θα βασιστεί στη συνέχεια το κατασκευαστικό μοντέλο για να υπολογιστεί ο σχετικός χρόνος και κόστος του έργου.

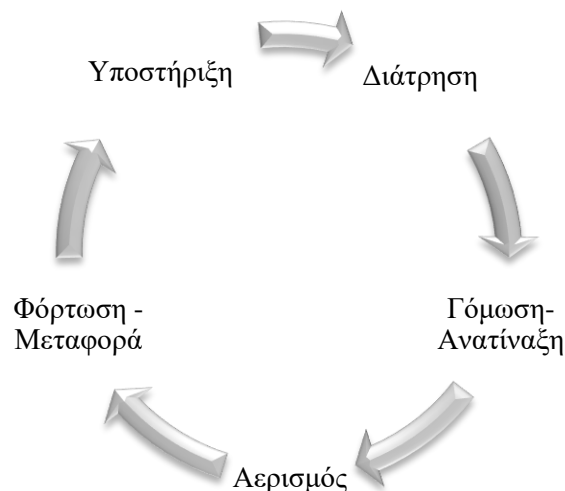
4.1.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ DAT

Το κατασκευαστικό μοντέλο που παρέχεται από το λογισμικό προσομοιώνει λεπτομερώς την πραγματική διαδικασία κατασκευή των σηράγγων, σε κάθε επίπεδο δραστηριότητας, σύμφωνα με το Σχήμα 16.



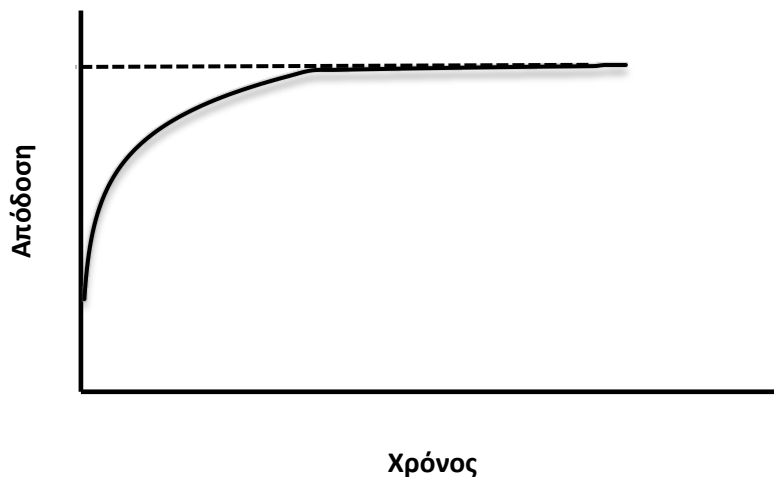
Σχήμα 16: Διαδικασία προσομοίωσης κατασκευαστικού μοντέλου

Η βασική μέθοδος αποτελείται από έναν κύκλο εργασιών, η επανάληψη του οποίου οδηγεί στην πρόοδο του έργου. Πρόκειται είτε για εργασίες διάτρησης – ανατίναξης, είτε για εργασίες με μηχανές ολομέτωπης κοπής. Κάθε εργασία δύναται να χαρακτηριστεί από την αντίστοιχη ποσοστιαία πρόοδο και το μοναδιαίο κόστος αυτής. Προκύπτει δηλαδή ζεύγος τιμών χρόνου – κόστους για κάθε μία από τις επιμέρους δραστηριότητες του κατασκευαστικού σχεδίου.



Σχήμα 17: Κύκλος εργασιών διάτρησης – ανατίναξης

Για τις διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες που προκύπτουν από το γεωλογικό μοντέλο, το λογισμικό προσαρμόζει την κατάλληλη μέθοδο διάνοιξης βάσει της επιθυμητής γεωμετρίας της σήραγγας, είτε σε μία είτε σε περισσότερες φάσεις. Για κάθε επιμέρους φάση ορίζεται το αντίστοιχο ζεύγος τιμών χρόνου – κόστους. Επιπλέον, προκειμένου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, λαμβάνεται υπόψιν η καμπύλη της κατασκευαστικής απόδοσης, γνωστή και ως «καμπύλη μάθησης». Στην αρχή του έργου η κατασκευαστική απόδοση είναι μικρή, ενώ με την εξέλιξη του αυξάνεται προοδευτικά, φθάνοντας σε ένα ανώτατο όριο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εργαζόμενοι πρέπει να συνηθίσουν τις ιδιαιτερότητες του πραγματικού έργου ή της μεθόδου εκσκαφής, να αποκτήσουν καλή συνεργασία μεταξύ τους και να βελτιωθεί η οργάνωση και η ροή των πληροφοριών.



Σχήμα 18: Καμπύλη μάθησης

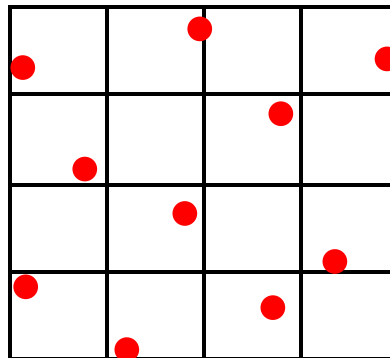
4.2. ΧΩΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Αν και το λογισμικό DAT έχει παρουσιάσει αξιόλογα αποτελέσματα κατά το παρελθόν σε έργα γραμμικών σηράγγων, προσφέρει μια πληροφορία πιο γενικής μορφής κυρίως για την εννοιολογική σχεδίαση και τις βασικές αρχικές γραμμές και στρατηγικές σχεδιασμού. Για πιο συγκεκριμένη χωρική μοντελοποίηση προσανατολισμένη στην κατασκευαστική διαδικασία, με μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ομάδα εργαλείων. Ένα από αυτά, που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, είναι το λογισμικό RockWorks16 που εκδόθηκε το 2014.

Με τον όρο χωρική παρεμβολή ορίζεται η χωρική στοχαστική διαδικασία η οποία μεταβάλλεται συνεχώς σε μία περιοχή. Η διαδικασία χωρικής παρεμβολής (interpolation) στοχεύει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τη χωρική διαφοροποίηση ενός χαρακτηριστικού σε μία περιοχή μελέτης, με βάση τις τιμές στα σταθερά σημεία - θέσεις του δείγματος. Το υπό μελέτη χαρακτηριστικό συμπεριφέρεται ως συνδυασμό δύο διαδικασιών:

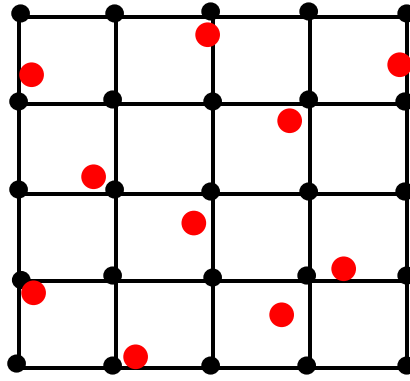
- i. Πρώτης τάξης: Οι επιπτώσεις της πρώτης τάξης σχετίζονται με τη μεταβλητότητα στη μέση τιμή της υπό εξέταση χωρικής διαδικασίας και εκπροσωπούν γενικευμένες ή μεγάλης κλίμακας τάσεις-διαφοροποιήσεις.
- ii. Δεύτερης τάξης: Οι επιπτώσεις της δεύτερης τάξης είναι αποτέλεσμα της δομής της χωρικής συσχέτισης ή της χωρικής εξάρτησης στη διαδικασία. Με άλλα λόγια, είναι η τάση για αποκλίσεις στις τιμές από τη μέση τιμή σε γειτονικές θέσεις και εκπροσωπούν τοπικές ή μικρής κλίμακας επιπτώσεις.

Η χωρική παρεμβολή τόσο των τοπογραφικών όσο και των γεωτεχνικών δεδομένων, βασίζεται στη δημιουργία ενός πλέγματος (gridding). Κατά τη διαδικασία αυτή, τα διασκορπισμένα χωριά κατανεμημένα δεδομένα μετατρέπονται σε μία συνεχή συστοιχία ή σε κάρναβο αριθμητικών τιμών. Πρόκειται για ένα πλέγμα φανταστικών γραμμών που επικαλύπτει σημεία δεδομένων, με χωρική εξάρτηση των τιμών του υπό εξέταση χαρακτηριστικού.



Σχήμα 19: Κατανομή δεδομένων σημείων

Με τη δημιουργία του πλέγματος το πρόγραμμα εκχωρεί κάθε τιμή σε έναν κόμβο του πλέγματος.



Σχήμα 20: Κόμβοι πλέγματος

4.2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

Χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης των τοπογραφικών και γεωτεχνικών δεδομένων ενδιαφέροντος, όπως παρουσιάζονται ακολούθως.

- i. Μέθοδος Πλησιέστερου Σημείου: Σε κάθε κόμβο αποδίδεται απλά η τιμή του πλησιέστερου σημείου ελέγχου. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου, πέραν της απλότητας της, συγκαταλέγεται το γεγονός ότι το εύρος του δικτύου ισούται με το εύρος των σημείων δεδομένων. Δηλαδή, ο μέγιστος και ο ελάχιστος κόμβος του δικτύου και οι τιμές των σημείων δεδομένων αντιστοιχίζονται ακριβώς. Αντίθετα, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου του πλησιέστερου σημείου είναι ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παράγει ένα ασυνεχές μοντέλο πλέγματος, με απότομες αλλαγές μεταξύ των κόμβων του δικτύου.
- ii. Αθροιστική Μέθοδος: Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των τιμών σημείου ελέγχου μέσα στην περιοχή του κόμβου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την χαρτογράφηση σταθμισμένων δεδομένων εμφάνισης.
- iii. Μέθοδος Κατευθυντικής Στάθμισης: Χρησιμοποιείται η «αντίστροφη βαρύνουσα απόσταση», δηλαδή η τιμή κάθε σημείου δεδομένων υπολογίζεται σύμφωνα με το αντίστροφο της απόστασης από τον υπολογισμένο κόμβο δικτύου. Υπάρχει η δυνατότητα, σύμφωνα με έναν επιλεγμένο συντελεστή βαρύτητας, να καθοριστεί μία γραμμική τάση και να μεταβληθεί ο συντελεστής αυτός έτσι ώστε σημεία κατά

μήκος της γραμμής τάσης να επηρεάζουν τον κόμβο του πλέγματος περισσότερο από κοντινά σημεία κάθετα προς αυτήν.

- iv. Μέθοδος Απόστασης σε Συγκεκριμένο Σημείο: Σε κάθε κόμβο του πλέγματος αποδίδεται μία τιμή ίση της απόστασης στο πλησιέστερο σημείο ελέγχου που έχει εξ αρχής οριστεί. Η απόσταση αυτή αποδίδεται σε συνταγμένες X, Y. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση ενός συνόλου δεδομένων που προέρχονται από μια δειγματοληπτική γεώτρηση, μέσω της απόστασης από οποιοδήποτε κόμβοι στην πλησιέστερη γεώτρηση.
- v. Μέθοδος Αντίστροφου Τετραγώνου: Πρόκειται για μία από τις πιο κοινές μεθόδους παρεμβολής. Η τιμή που αντιστοιχεί σε έναν κόμβο δικτύου είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος είτε όλων των σημείων δεδομένων, είτε ενός αριθμού γειτονικών σημείων. Κατά την εκχώρηση τιμών κόμβου (Z - κόμβου), η τιμή καθενός από τα σημεία δεδομένων (Z - σημείων) σταθμίζεται σύμφωνα με το αντίστροφο της απόστασης από τον κόμβο δικτύου (d), υπολογισμένη με έναν εκθετικό συντελεστή βαρύτητας (n), σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z - \text{κόμβου} = \frac{\sum \left(\frac{Z - \text{σημείων}}{d^n} \right)}{\sum \left(\frac{1}{d^n} \right)}$$

Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του εκθέτη που ορίζεται, τόσο πιο μικρή επιρροή θα έχουν τα μακρινά σημεία στην τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο. Η μέθοδος Αντίστροφης Απόστασης δημιουργεί ένα ομαλό και συνεχές πλέγμα με το εύρος των τιμών πλέγματος να είναι μικρότερο από το εύρος των τιμών δεδομένων. Η υψηλότερη τιμή του δικτύου θα είναι χαμηλότερη από το μέγιστο σημείο δεδομένων και το αντίστροφο.

- vi. Μέθοδος Kriging: Η μέθοδος Kriging αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο εκτίμησης στη γεωστατιστική και αυτό γιατί έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους παρεμβολής:

- Μπορεί να μειώσει τις περιπτώσεις ομαδοποίησης των δεδομένων, εκχωρώντας τα σημεία σε μικρότερες ομάδες.
- Εκτός από τη μεταβλητή εκτίμηση, δίνει επιπλέον ένα σφάλμα εκτίμησης (kriging variance) που αποτελεί τη βάση για τη στοχαστική προσομοίωση.

(Caers 2011, Pyrcz and Deutsch 2014)

Επιπλέον η μέθοδος Kriging διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους παρεμβολής καθώς βασίζεται τις εξής παραδοχές:

- Η τιμή για ένα άγνωστο σημείο μπορεί να εκτιμηθεί από τα γειτονικά γνωστά σημεία, αλλά το σημείο αυτό δεν εξαρτάται απαραίτητα από τις τιμές των γνωστών σημείων.
- Η μεταβλητότητα των τιμών z ενός συνόλου δεδομένων έχει διανυσματικό χαρακτήρα. Εξαρτάται δηλαδή από την απόσταση και την κατεύθυνση τους από γνωστά σημεία. Σε γενικές γραμμές, τα κοντινά σημεία τείνουν να παρουσιάζουν μικρότερη μεταβλητότητα σε σχέση με σημεία που απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Συνεπώς σε διαφορετικά σημεία στο χώρο οι αποκλίσεις των παρατηρούμενων τιμών από τη μέση τιμή συμμεταβάλλονται ή συσχετίζονται. Παραδείγματος χάριν, η απόκλιση από τη μέση μονοαξονική αντοχή πετρώματος σε μία θέση, είναι πιθανότερο να είναι παρόμοια με αυτήν που παρατηρείται σε μια κοντινή θέση απ' ότι σε μια άλλη 10 χλμ. μακριά.

Αυτή η μεταβλητότητα αναφορικά με την απόσταση μπορεί να απεικονιστεί γραφικά με τη χρήση βαριογράμματος. Πρόκειται για το βασικό διαγνωστικό εργαλείο για τον χωρικό χαρακτηρισμό μίας χωρομεταβλητής στις γεωστατιστικές εκτιμήσεις ή στις μεθόδους παρεμβολής. Άλλες συνήθεις μορφές χωρικής παρεμβολής Kriging είναι:

Πίνακας 3: Μορφές χωρικής παρεμβολής Kriging

Universal Kriging	Η εκτίμηση της παρεμβολής γίνεται κάτω από την παραδοχή ότι η μέση τιμή δεν είναι σταθερή, όπως στη συνήθη Kriging, αλλά μεταβάλλεται ως συνάρτηση της θέσης.
Block Kriging	Η εκτίμηση της παρεμβολής δεν αναφέρεται σε ένα σημείο αλλά στο μέσο όρο των τιμών που μετρούνται σε μια συγκεκριμένη περιοχή.
Μη Γραμμική Kriging	Η διαδικασία θεωρείται λογαριθμοκανονική, δηλαδή ο λογάριθμός της έχει κανονική κατανομή.
Co Kriging	Αφορά την περίπτωση όπου στο ίδιο σημείο της περιοχής μελέτης μετρούνται περισσότερες από μια μεταβλητές.
Multivariate Kriging	Αναφέρεται στην εφαρμογή της γεωστατιστικής σε μεθόδους ανάλυσης πολυμεταβλητών.

- vii. Μέθοδος Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης: Χρησιμοποιείται στην περίπτωση χωρικής παρεμβολής ισότροπων δεδομένων. Αντί για τη στάθμιση με ένα συντελεστή βαρύτητας, εφαρμόζεται απλώς στάθμιση των αποστάσεων.
- viii. Υβριδική Μέθοδος: Χρησιμοποιείται για το συνδυασμό δύο ή περισσότερων μεθόδων για τη χωρική παρεμβολή μιας επιφάνειας, με την επιλογή να δίνεται ανάλογη βαρύτητα στην επιθυμητή μέθοδο. Με τη μέθοδο αυτή δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιηθούν κατάλληλα τα πλεονεκτήματα των διαφόρων αλγορίθμων για μία επιφάνεια.

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

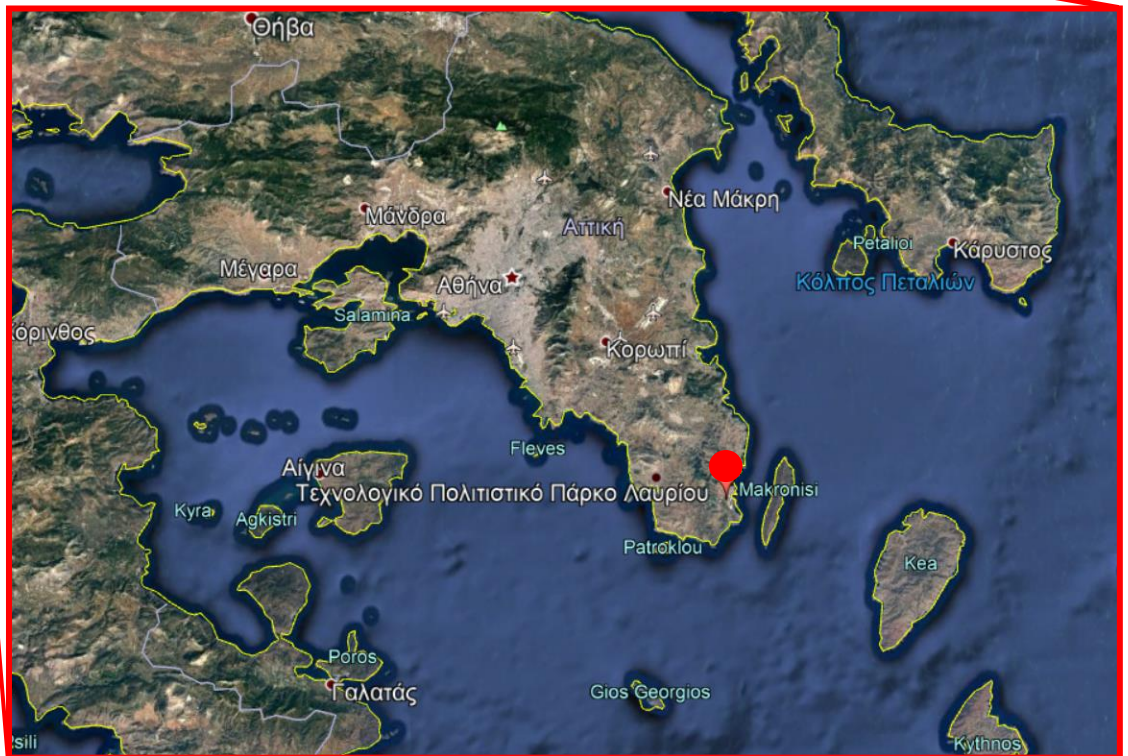
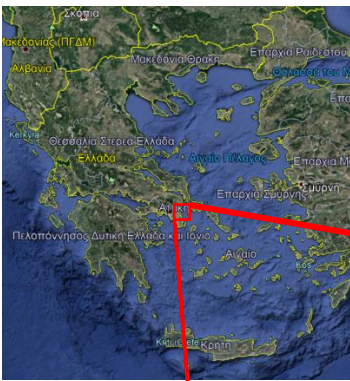
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

5. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

Το Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου ιδρύθηκε στη θέση της παλαιάς Γαλλικής Εταιρείας Λαυρίου (Compagnie Française des Mines du Laurium) το 1992, με πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στοχεύοντας στη φιλοξενία και προώθηση ερευνητικών και επιχειρηματικών δραστηριοτήτων. Σήμερα το Πάρκο διαθέτει ενιαίο χώρο 245 στρεμμάτων, ο οποίος περιλαμβάνει διατηρητέες κτηριακές μονάδες, εταιρείες οι οποίες ασχολούνται με τη παραγωγή, την ανάπτυξη και την εφαρμογή καινοτόμων ιδεών, προϊόντων και υπηρεσιών στο χώρο των σύγχρονων τεχνολογιών, εργαστήρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εκπαιδευτικούς φορείς, όπως το Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Λαυρεωτικής και το Βιομηχανικό Βιοτεχνικό Εκπαιδευτικό Μουσείο.



Σχήμα 21: Τοποθεσία Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου

Στα πλαίσια αυτά, το 2010 μπήκε σε εφαρμογή ένα μεγαλεπήβολο και πρωτοποριακό έργο του Ε.Μ.Π. που είχε ως στόχο την κατασκευή ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης επικίνδυνων αποβλήτων της περιοχής του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου, προκειμένου να συγκεντρωθούν και να μεταφερθούν σε αυτό υλικά υψηλής επικινδυνότητας που προέκυψαν από την απορρύπανση του χώρου που λειτούργησε επί ένα και πλέον αιώνα ως μεταλλουργικό εργοστάσιο.

5.1. ΧΩΡΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

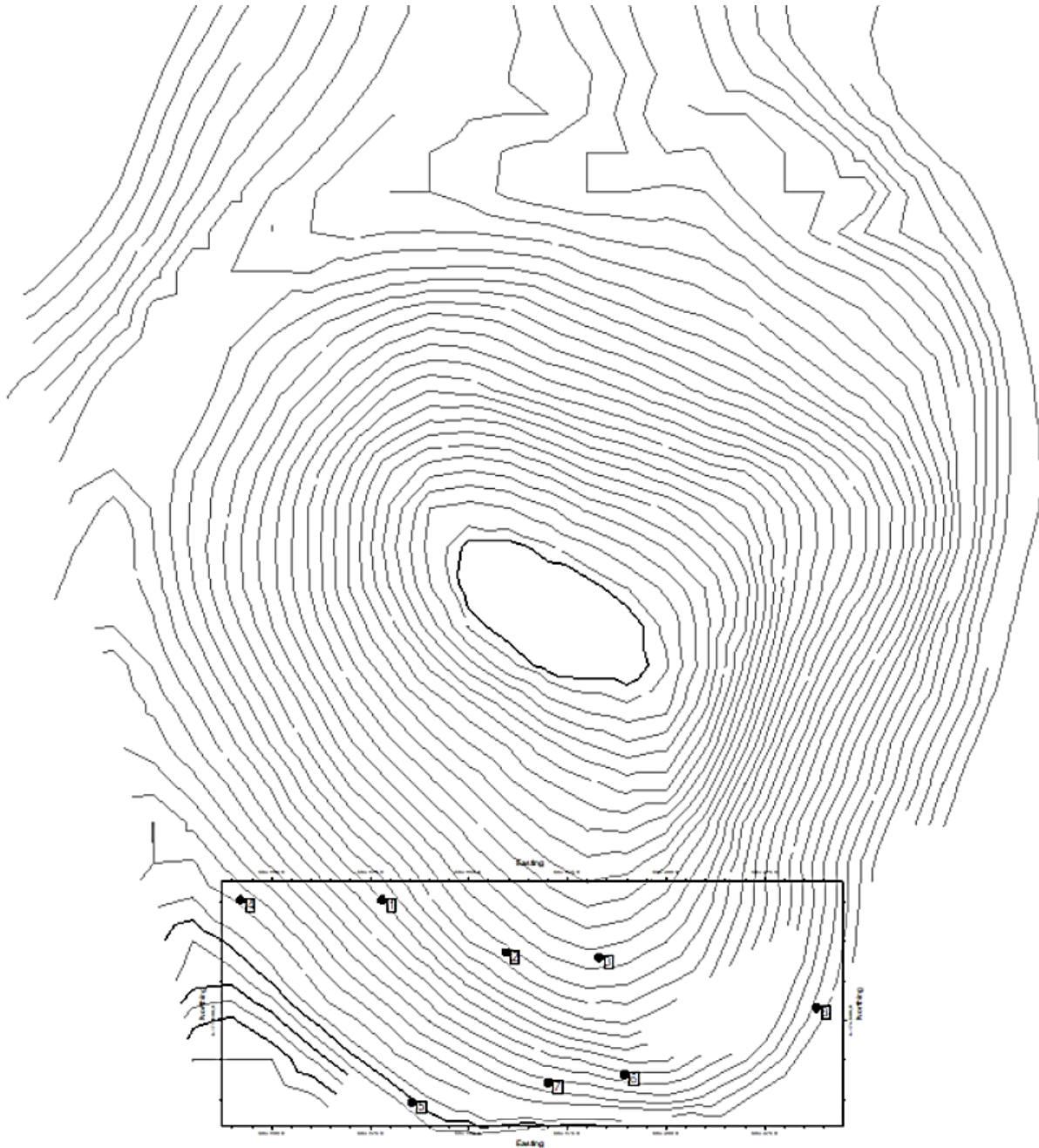
Κατά το σχεδιασμό του εν λόγω υπόγειου έργου πραγματοποιήθηκαν 8 ερευνητικές γεωτρήσεις στην περιοχή της προτεινόμενης θέσης κατασκευής του υπόγειου χώρου. Στον Πίνακα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία χωροθέτησής τους, όπως δόθηκαν στην επίσημη μελέτη, σε UTM συντεταγμένες του συστήματος WGS-84 και ζώνης 34 του Νοτίου ημισφαιρίου.

Πίνακας 4: Αναλυτικά στοιχεία γεωτρήσεων

Γεώτρηση	X	Y	Υψόμετρο φυσικού (m)
Γ1	503.828,0	4.174.830,5	46,2
Γ2	503.859,3	4.174.817,3	49,8
Γ3	503.882,9	4.174.816,0	50,5
Γ4	503.792,1	4.174.830,5	39,8
Γ5	503.835,5	4.174.779,3	36,5
Γ6	503.889,4	4.174.786,4	43,8
Γ7	503.870,1	4.174.784,3	41,4
Γ8	503.938,0	4.174.803,2	41,2

Επιπλέον δόθηκε το τοπογραφικό ανάγλυφο σε μορφή αρχείου AutoCAD (*.dxf) όπου φαίνονται οι 8 ερευνητικές γεωτρήσεις και τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος (Σχήμα 22). Ο συνδυασμός των γεωτρητικών δεδομένων με το τοπογραφικό ανάγλυφο οδήγησαν στη δημιουργία ενός βελτιστοποιημένου δισδιάστατου και τρισδιάστατου μοντέλου απεικόνισης της

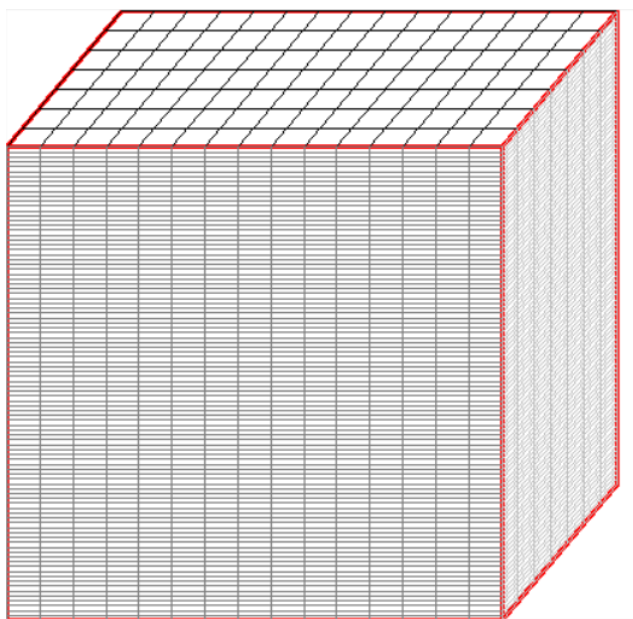
εδαφικής πραγματικότητας, μέσω του λογισμικού RockWorks16. Πρόκειται για ένα εκτεταμένο λογισμικό για τη δημιουργία 2D και 3D χαρτών, την οπτικοποίηση επιφανειών αλλά και υπόγειων δεδομένων, αναφορών όγκου και γενικών γεωλογικών διαγραμμάτων για τις περιβαλλοντικές, γεωτεχνικές, εξορυκτικές και πετρελαϊκές βιομηχανίες. Το RockWorks16 προσφέρει πολλές επιλογές για την ανάλυση των δεδομένων καθώς δέχεται πολλούς διαφορετικούς τύπους δεδομένων, όπως για τη στρωματογραφία, τη λιθολογία, τη γεωχημεία και γεωφυσική, και τα δεδομένα υδροφόρου ορίζοντα.



Σχήμα 22: Τοπογραφικό ανάγλυφο περιοχής ενδιαφέροντος

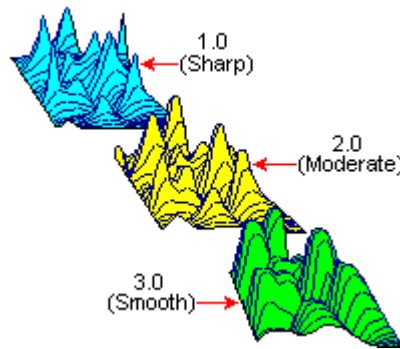
Το μοντέλο που κατασκευάστηκε βασίζεται στη μέθοδο παρεμβολής Αντίστροφης Απόστασης. Επιλέχθηκαν οι διαστάσεις του μοντέλου $x_{min}: 503.790,0$, $x_{max}: 503.940,0$, $y_{min}: 4.174.770,0$, $y_{max}: 4.174.840,0$, $z_{min}: 0,0$ και $z_{max}: 50,5$. Ο κάρναβος σχεδίασης είναι τετραγωνικός κανονικός με διαστήματα αντίστοιχα με την ακτίνα επιρροής των γεωτρήσεων, δηλαδή ίσα με το μισή μέση απόσταση των 8 γεωτρήσεων, ως συνήθης καλή πρακτική. Συνολικά, στο επίπεδο x σχηματίζονται 16 κόμβοι, στο επίπεδο y 8 κόμβοι και στο επίπεδο z 102 κόμβοι. Πρόκειται δηλαδή μοντέλο με 13.056 κόμβους. Με βάση τα παραπάνω οι διαστάσεις του μοναδιαίου κελιού ανάλυσης (block) είναι $10m \times 10m \times 0,5m$ (X x Y x Z).

Επιπλέον, επιλέχθηκε οι διαστάσεις του μοντέλου $x_{min}: 503.790,0$, $x_{max}: 503.940,0$, $y_{min}: 4.174.770,0$, $y_{max}: 4.174.840,0$, $z_{min}: 0,0$ και $z_{max}: 50,5$. Ο κάρναβος σχεδίασης είναι τετραγωνικός κανονικός με διαστήματα αντίστοιχα με την ακτίνα επιρροής των γεωτρήσεων, δηλαδή ίσα με το μισή μέση απόσταση των 8 γεωτρήσεων, ως συνήθης καλή πρακτική. Αναπτύσσεται δηλαδή ανά 10 m κατά τους άξονες x και y και ανά $0,5\text{ m}$ κατά τον άξονα z . Συνολικά, στο επίπεδο x σχηματίζονται 16 κόμβοι, στο επίπεδο y 8 κόμβοι και στο επίπεδο z 102 κόμβοι. Πρόκειται δηλαδή μοντέλο με 13.056 κόμβους.



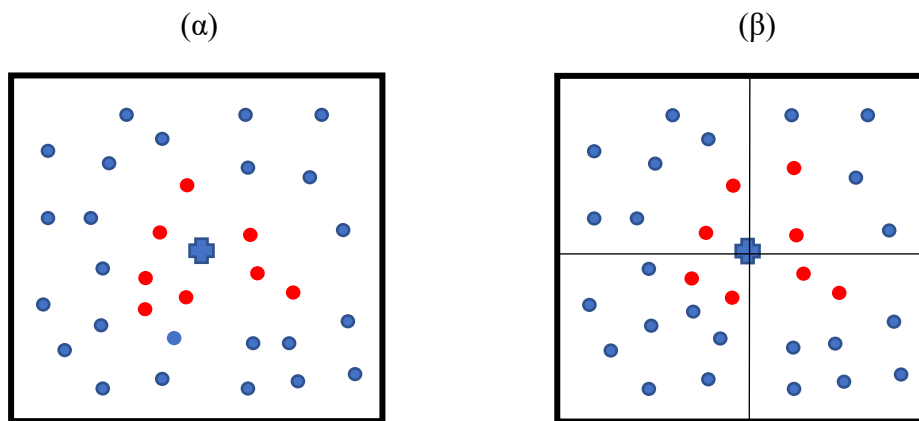
Σχήμα 23: Υπόδειγμα μοντέλου προσομοίωσης

Επιπλέον, επιλέχθηκε συντελεστής στάθμισης 2, μια τιμή με σχετική επιρροή στα μακρινά σημεία του δικτύου, καθώς προτείνεται η τιμή αυτή να μην υπερβαίνει το 5 αλλά να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 και 3.



Σχήμα 24: Επίδραση συντελεστή βαρύτητας

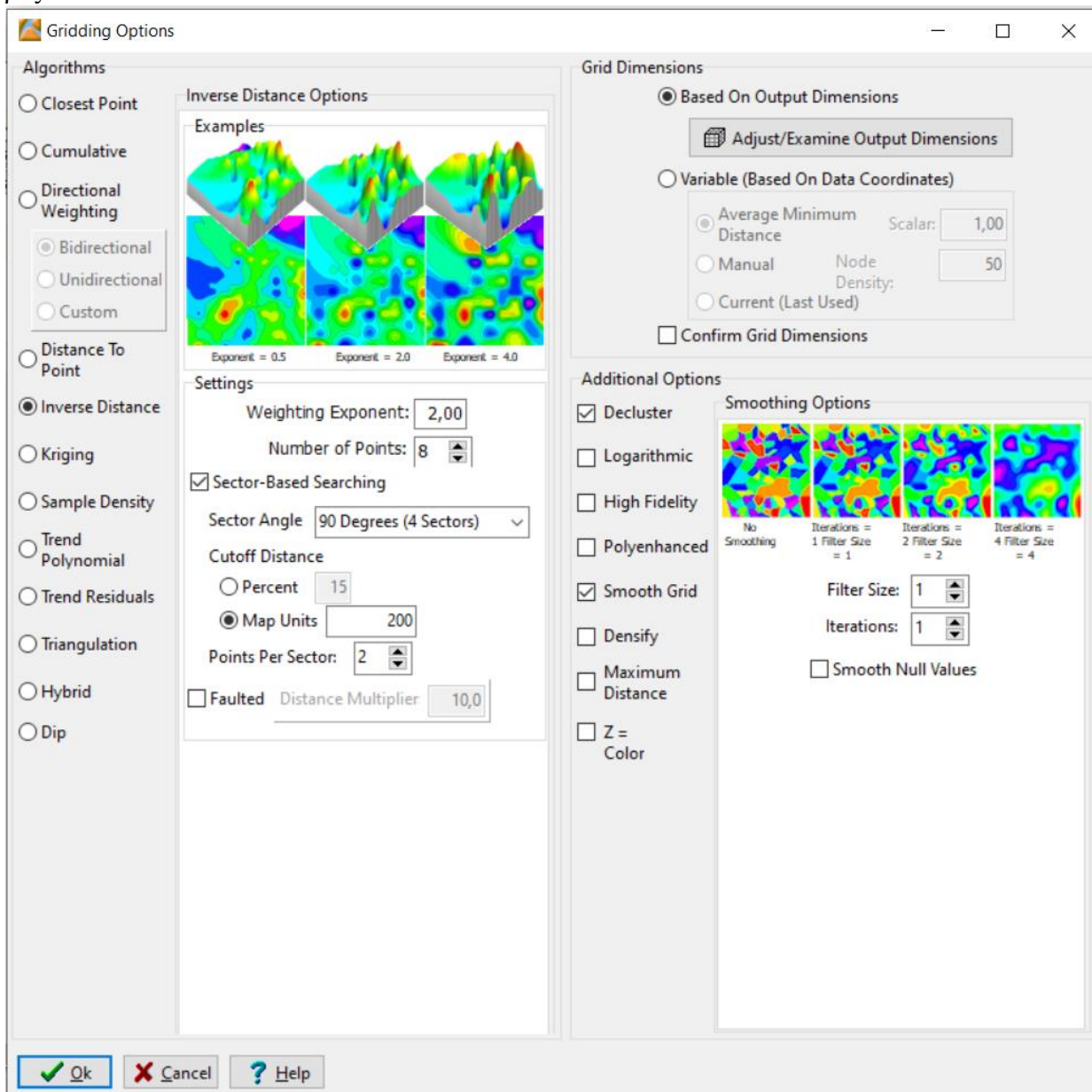
Για το μέγιστο αριθμό σημείων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό της τιμής του κόμβου πλέγματος, επιλέχθηκε η προεπιλεγμένη προτεινόμενη τιμή 8. Αναφορικά με το πλήθος των σημείων ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα για τον υπολογισμό κάθε κόμβου του πλέγματος, αντί να χρησιμοποιηθούν απλά τα πλησιέστερα σημεία ανεξάρτητα από την κατευθυντική θέση τους από τον κόμβο, αναζητήθηκε ένας συγκεκριμένος αριθμός σημείων σε κάθε τομέα χ-βαθμού τον κόμβο. Η γωνία του τομέα ορίστηκε στις 90°, δηλαδή η αναζήτηση χωρίστηκε σε 4 τομείς και αναζητήθηκαν 2 σημεία ανά τομέα και έως 200 m στο πραγματικό επίπεδο.



Σχήμα 25: Αναζήτηση σημείων (α) βάσει των πλησιέστερων (β) βάσει τομέα

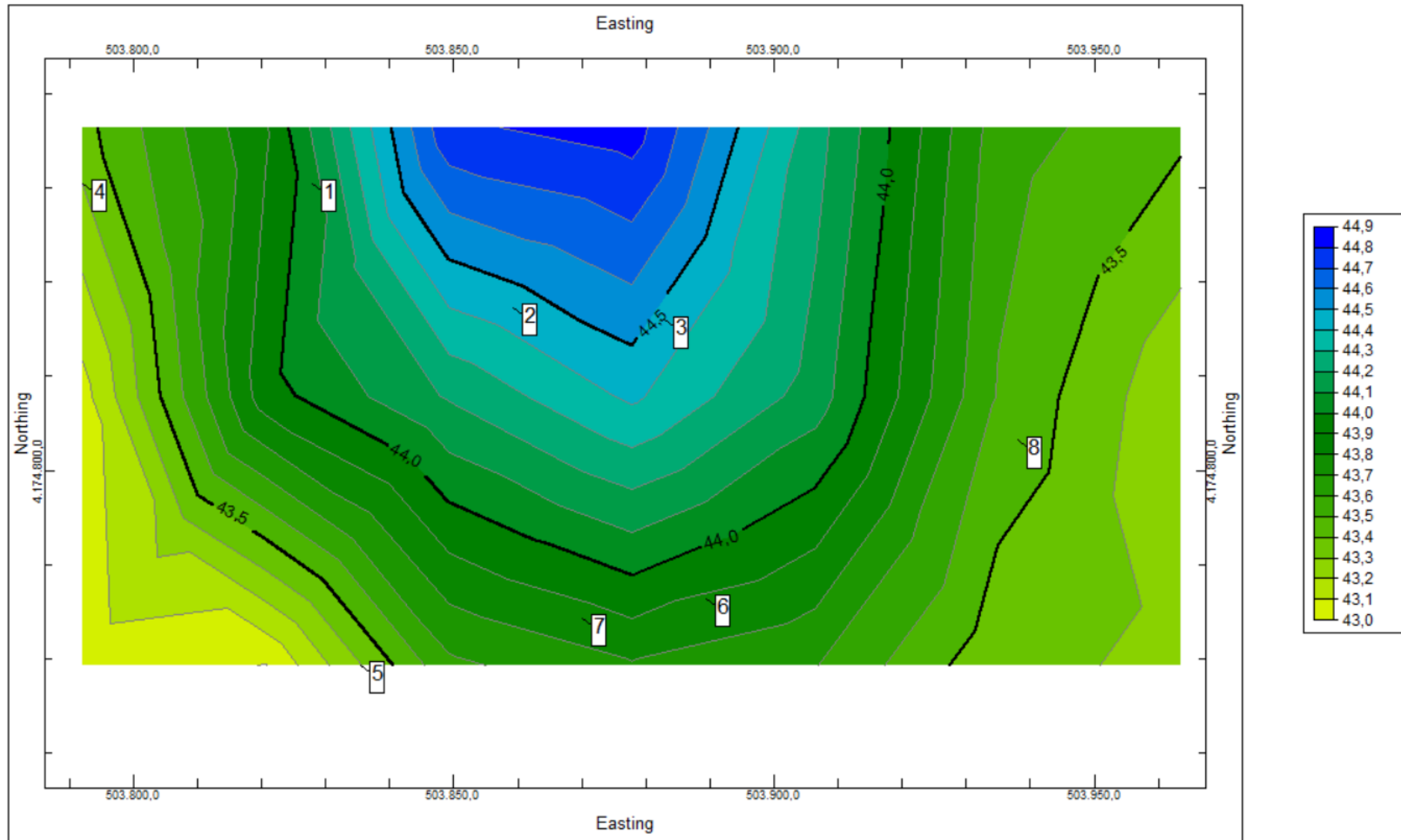
Αυτό το είδος κατευθυντικής αναζήτησης βελτιώνει την παρεμβολή τιμών πλέγματος που βρίσκονται μεταξύ των συμπλεγμάτων σημείων δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι επιλογές της από-ομαδοποίησης και της ομαλοποίησης των σημείων. Με την από-ομαδοποίηση, σε περιπτώσεις συμπλεγμάτων ή διπλών σημείων, το λογισμικό εκχωρούσε στο αντίστοιχο κελί

το μέσο όρο αυτών των σημείων. Με την ομαλοποίηση, το λογισμικό «τρέχει» επιπλέον φορές το μοντέλο ώστε να απαλλαγεί από ψευδείς «θορύβους» και να αναδειχθούν όλα τα σημεία εξίσου, μέσω ενός φίλτρου που ορίζεται. Στην προκειμένη περίπτωση το μοντέλο «έτρεξε» 3 φορές.



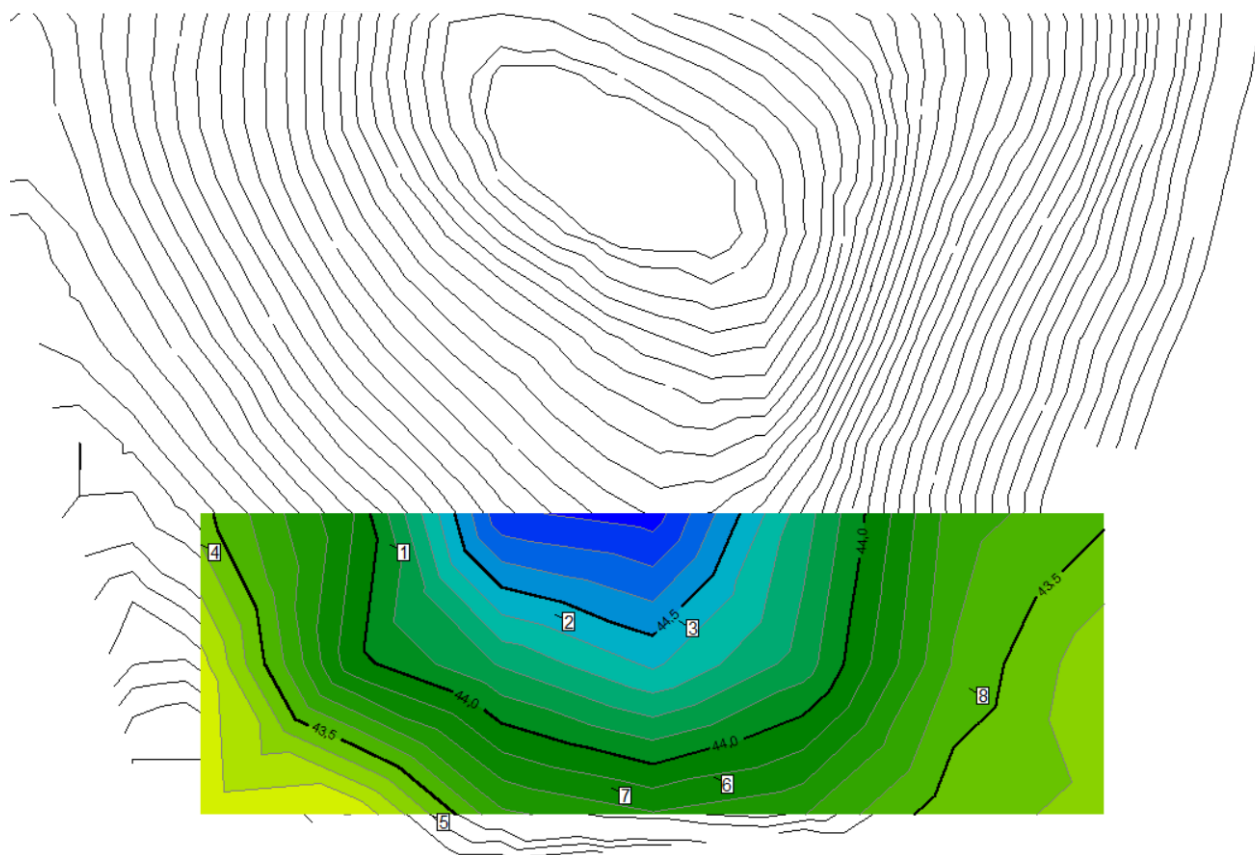
Σχήμα 26: Επιλογές μεθόδου παρεμβολής RockWorks

Όλα τα παραπάνω συνέβαλαν στην δημιουργία του βελτιστοποιημένου μοντέλου απεικόνισης της εδαφικής πραγματικότητας, μέσω του λογισμικού RockWorks16. Στο δισδιάστατο χάρτη που ακολουθεί (Σχήμα 27) αναπαρίσταται το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής ενδιαφέροντος γύρω από τις γεωτρήσεις με τις αντίστοιχες ισοϋψείς καμπύλες. Με σκούρο μπλε χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές υψηλού υψομέτρου, ενώ με κίτρινο χρώμα οι υψομετρικά χαμηλότερες περιοχές.



Σχήμα 27: Χωρική συσχέτιση μεταξύ των σημείων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων

Προσαρτώντας το δισδιάστατο μοντέλο που πρόκυψε στο πραγματικό τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (Σχήμα 28), γίνεται έλεγχος της αξιοπιστίας των χωρικών μοντελοποιήσεων μέσω της αντιπαραβολής των στοιχείων της ανάλυσης με αυτά που πραγματικά συναντήθηκαν. Όπως είναι εμφανές, υπάρχει σχετική ταύτιση του μοντέλου με τις ισοϋψείς τοπογραφικές καμπύλες, γεγονός που το κάνει αποδεκτό.



Σχήμα 28: Προσάρτηση μοντέλου στο πραγματικό τοπογραφικό ανάγλυφο

5.2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου, όπως και όλη η Νοτιοανατολική Αττική αποτελεί τμήμα της μεταμορφωμένης Αττικοκυκλαδικής Μάζας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι μεταμορφωμένοι ή ημιμεταμορφωμένοι, αποτελούμενοι από μάρμαρα, δολομιτικά μάρμαρα ή δολομίτες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και φυλλίτες. Περιορισμένης έκτασης τριτογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί εμφανίζονται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο. Στην περιοχή της Λαυρεωτικής υπάρχουν δύο συστήματα στρωμάτων. Το αυτόχθονα μεταμορφωμένο σύστημα, που αποτελεί τη σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής, και οι σχηματισμοί που παλαιότερα είχαν θεωρηθεί επικλυσιογενείς και αποτελούν το Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα. (Σωτηρόπουλος, 2013) Στην περιοχή του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου φαίνεται ότι εμφανίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί και των δύο λιθοστρωματογραφικών τεκτονικών ενοτήτων της ΝΑ Αττικής:

- Σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής (αυτόχθονο σύστημα): Κατώτερο μάρμαρο, Σχιστόλιθοι Καισαριανής (Καμάριζας), Ανώτερο μάρμαρο
- Νεοελληνικό τεκτονικό κάλυμμα
- Προσχωματικές αποθέσεις
- Τεχνητά μπάζα από υλικά της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας

Ακολουθούν τα αναλυτικά γεωλογικά στοιχεία των γεωτρήσεων όπως προέκυψαν από την εργαστηριακή μελέτη των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Γεώτρηση Γ1

Αρχικά απαντάται άργιλος καστανού χρώματος με χάλικες, μέχρι βάθους 3,50 m. Στη συνέχεια συναντάται ο σχηματισμός του κερματισμένου και αποσαθρωμένου, κατά θέσεις αργιλοποιημένου, καστανοπράσινου φυλλίτη, με χαλαζία κατά θέσεις, του τεκτονικού καλύμματος, μέχρι βάθους 11,45 m. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του κυμαίνεται από IV έως V.

Ο επόμενος σχηματισμός είναι ο κερματισμένος και αργιλοποιημένος, σκούρος τεφρός γραφιτικός σχιστόλιθος με χαλαζία, του τεκτονικού καλύμματος, μέχρι βάθους 13,50 m. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του κυμαίνεται από IV έως V.

Ακολουθεί στρώμα πρασινοσχιστόλιθου – φυλλίτη με ενδιαστρώσεις οξειδωμένου ασβεστόλιθου, κατά θέσεις με μικροκάρστ, του νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος, μέχρι βάθους 22,30 m. Ο σχηματισμός εμφανίζεται με κλίσεις ασυνεχειών από 10° έως 70°, μέτρια

τραχείες ως λείες, ανοικτές ή κλειστές και κατά θέσεις αργιλοποιημένες. Η πυκνότητά τους κυμαίνεται από $3 \div 10$ ασυνέχειες ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού κυμαίνεται από II έως IV και αποσάθρωσής του από IV έως V.

Τέλος, από το βάθος των 22,30 m μέχρι το βάθος των 42,20 m (πέρας της γεώτρησης) συναντάται ο ασβεστόλιθος του ανώτερου μαρμάρου, ανοικτότεφρου χρώματος, κατά θέσεις με οξειδία και μικροκάρστ. Ο σχηματισμός εμφανίζεται με κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 45° , λείες, ανοικτές ή κλειστές. Η πυκνότητά τους κυμαίνεται από $2 \div 10$ ασυνέχειες ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του κυμαίνεται από II έως III.

Γεώτρηση Γ2

Αρχικά απαντάται άργιλος καστανού χρώματος με χάλικες, μέχρι βάθους 2,00 m. Στη συνέχεια εμφανίζεται σχηματισμός πρασινοσχιστόλιθου – φυλλίτη του του τεκτονικού καλύμματος, με ενδιαστρώσεις αγκεριτωμένου ασβεστόλιθου, μέχρι το βάθος των 16,20 m. Ο σχηματισμός εμφανίζεται με κλίσεις ασυνεχειών από 20° έως 70° , μέτρια τραχείες, κατά θέσεις αργιλοποιημένες, με πυκνότητα από $4 \div 10$ ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού δίνεται από II - IV, ενώ της αποσάθρωσης κυμαίνεται από III - IV.

Ακολουθεί ο σχηματισμός του γραφιτικού σχιστόλιθου του τεκτονικού καλύμματος, με χαλαζία, ο οποίος είναι κατά θέσεις αργιλοποιημένος, με ενδιαστρώσεις ασβεστολίθου, μέχρι βάθους 27,00 m. Οι ασυνέχειες εμφανίζονται τραχείες, με κλίσεις από $0^\circ - 50^\circ$, ενώ η πυκνότητά τους από $4 \div 10$ ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης κυμαίνεται από III - IV.

Τέλος από το βάθος των 27,00 m μέχρι το πέρας της γεώτρησης (βάθος 45,80 m) εμφανίζεται ο σχηματισμός του ανοικτότεφρου ασβεστόλιθου του ανώτερου μαρμάρου, κατά θέσεις οξειδωμένος και με μικροκάρστ. Οι ασυνέχειες εμφανίζονται μέτρια τραχείες έως λείες και κατά θέσεις πληρωμένες με άργιλο, με κλίσεις από $0^\circ - 70^\circ$, και με πυκνότητα από $2 \div 7$ ανά μέτρο. Ο κερματισμός τους είναι II – III ενώ ο βαθμός αποσάθρωσής τους είναι επίσης II - III.

Γεώτρηση Γ3

Στη γεώτρηση Γ3 συναντάται πρώτα αγκεριτωμένος ασβεστόλιθος του τεκτονικού καλύμματος, μέχρι το βάθος των 4,2 m. Οι ασυνέχειες του σχηματισμού εμφανίζονται μέτρια τραχείες με κλίσεις από 0° έως 45° και πυκνότητα που κυμαίνεται από $3 \div 10$ ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού του είναι II – III και η αποσάθρωσή του είναι III - IV.

Στη συνέχεια ακολουθεί στρώμα πρασινοσχιστόλιθου – φυλλίτη με ενδιαστρώσεις αγκεριτωμένου ασβεστόλιθου, κατά θέσεις με ασβεστίτη και μικροκάρστ, μέχρι το βάθος των

18,60 m. Οι ασυνέχειές του εμφανίζουν κλίσεις από 0° έως 90°, μέτρια τραχείες ως λείες, με πυκνότητα από 4 ÷ 8 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού κυμαίνεται από II έως IV και αποσάθρωσής του επίσης από II έως IV.

Από το βάθος των 18,60 m έως αυτό των 26,30 m εμφανίζεται ο σχηματισμός του γραφιτικού σχιστόλιθου του τεκτονικού καλύμματος, με χαλαζία κατά θέσεις αργιλοποιημένο. Οι ασυνέχειες του σχηματισμού είναι μέτρια τραχείες, με κλίσεις από 0° έως 90° και πυκνότητα από 4 έως 7 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού του σχηματισμού είναι II – IV, ενώ ο βαθμός αποσάθρωσής του είναι IV. Ακολουθεί ο σχηματισμός μικρού πάχους της τεκτονικής επαφής ασβεστολίθου - σχιστόλιθου σε εναλλαγές με τη μορφή ημισυνεκτικού ψηφιδολατυποπαγούς, μέχρι το βάθος των 28,20 m.

Στη συνέχεια συναντάται ο σχηματισμός του ασβεστολίθου του «Ανωτέρου μαρμάρου», ανοικτότεφρου χρώματος, κατά θέσεις οξειδωμένος και με μικροκάρστ, μέχρι το βάθος των 46,2 m. Οι ασυνέχειες είναι ως επί το πλείστον λείες, πληρωμένες κατά θέσεις με ασβεστίτη και βρίσκονται με κλίση από 0° έως 90°, με πυκνότητα που κυμαίνεται από 3 ÷ 6 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού του σχηματισμού είναι II – III, ενώ ο βαθμός αποσάθρωσής του είναι I -II.

Τέλος, μέχρι το πέρας της γεώτρησης στο βάθος των 48,30 m εμφανίζεται ο σχηματισμός του μαρμάρου του «Ανωτέρου μαρμάρου», λευκού χρώματος, με βαθμό κερματισμού II και αποσάθρωσης I.

Γεώτρηση Γ4

Στα αρχικά στάδια της γεώτρησης μέχρι το βάθος των 1,80 m συναντάται καστανή άργιλος με χάλικες. Ακολουθεί σχηματισμός του ασβεστολίθου του τεκτονικού καλύμματος, ανοικτότεφρου χρώματος, κατά θέσεις οξειδωμένος και με μικροκάρστ, μέχρι το βάθος των 26,90 m. Εμφανίζεται πτυχωμένος από το βάθος των 6,90 έως 23,00 m, καθώς και καρστικό έγκοιλο από το βάθος των 26,00 έως 26,20 m. Οι ασυνέχειες είναι μέτρια τραχείες έως τραχείες, κατά θέσεις πληρωμένες με άργιλο με κλίσεις που κυμαίνονται από 0° έως 70° και πυκνότητα από 3 ÷ 8 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης του σχηματισμού κυμαίνεται από II – IV.

Στη συνέχεια, μέχρι το βάθος των 34,00 m συναντάται ο σχηματισμός του ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» ανοικτότεφρου χρώματος. Οι ασυνέχειές του είναι λείες με κλίσεις από 0° – 30° και με πυκνότητα που κυμαίνεται από 2 έως 5 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού του σχηματισμού είναι II ενώ της αποσάθρωσής του κυμαίνεται από I – II. Ακολουθεί μέχρι το βάθος των 35,20 m ο σχηματισμός του μαρμάρου του «Ανωτέρου μαρμάρου», λευκού χρώματος με βαθμού κερματισμού II και αποσάθρωσης I.

Γεώτρηση Γ6

Στα αρχικά στάδια της γεώτρησης μέχρι το βάθος των 2,00 m συναντάται καστανή άργιλος με εμφάνιση άμμων και χαλίκων. Ακολουθεί σχηματισμός πρασινοσχιστόλιθου - φυλλίτη του τεκτονικού καλύμματος, με ενδιαστρώσεις ασβεστόλιθου, και κατά θέσεις με εμφάνιση οξειδίων και μικροκάρστ, μέχρι το βάθος των 19,40 m. Οι ασυνέχειες εμφανίζονται τραχείες έως μέτρια τραχείες, με κλίσεις που κυμαίνονται από 0° έως 80° και πυκνότητα 3 έως 10 ασυνεχειών ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης κυμαίνονται από II - IV.

Στη συνέχεια εμφανίζεται ο γραφιτικός σχιστόλιθος, του τεκτονικού καλύμματος, με χαλαζία και κατά θέσεις αργιλοποιημένος, μέχρι βάθους 24,50 m. Οι ασυνέχειες του σχηματισμού εμφανίζονται τραχείες, με κλίσεις που κυμαίνεται από 0° - 60°, ενώ η πυκνότητά τους είναι από 10 ÷ 15 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης του σχηματισμού κυμαίνονται από III - IV.

Ο επόμενος σχηματισμός είναι η τεκτονική επαφή ασβεστόλιθου – σχιστόλιθου μέχρι το βάθος των 28,40 m. Στο τμήμα από 26,30 έως 28,40 ο ασβεστόλιθος εμφανίζεται οξειδωμένος, ενώ ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του είναι III – V. Ακολουθεί ο ανοικτότεφρος ασβεστόλιθος του «Ανωτέρου μαρμάρου», μέχρι το βάθος των 39,20 m, ο οποίος κατά θέσεις συναντάται με οξείδια και ασβεσίτη. Οι ασυνέχειές του εμφανίζονται λείες με κλίσεις από 0° έως 60° και πυκνότητα από 2 έως 6 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού του σχηματισμού κυμαίνεται από II - III, ενώ της αποσάθρωσης από I - II.

Γεώτρηση Γ7

Μέχρι το βάθος των 3,00 m συναντάται άργιλος, στιφρή με εμφάνιση χαλίκων. Στη συνέχεια μέχρι το βάθος των 9,00 m εμφανίζεται ο σχηματισμός πρασινοσχιστόλιθου - φυλλίτη του τεκτονικού καλύμματος, με ενδιαστρώσεις αγκεριτωμένου ασβεστόλιθου. Οι ασυνέχειές του έχουν κλίσεις από 0° – 45° και είναι μέτρια τραχείες με πυκνότητα 8 έως 10 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του είναι IV.

Ακολουθεί σχηματισμός γραφιτικού σχιστόλιθου του τεκτονικού καλύμματος, με χαλαζία, αργιλοποιημένος, μέχρι το βάθος των 18,30 m, ο οποίος είναι πολύ έντονα κερματισμένος. Στη συνέχεια με πολύ μικρό πάχος (0,50 m) και μέχρι το βάθος των 18,80 m συναντάται υλικό τεκτονικής επαφής ασβεστολίθου – σχιστολίθου.

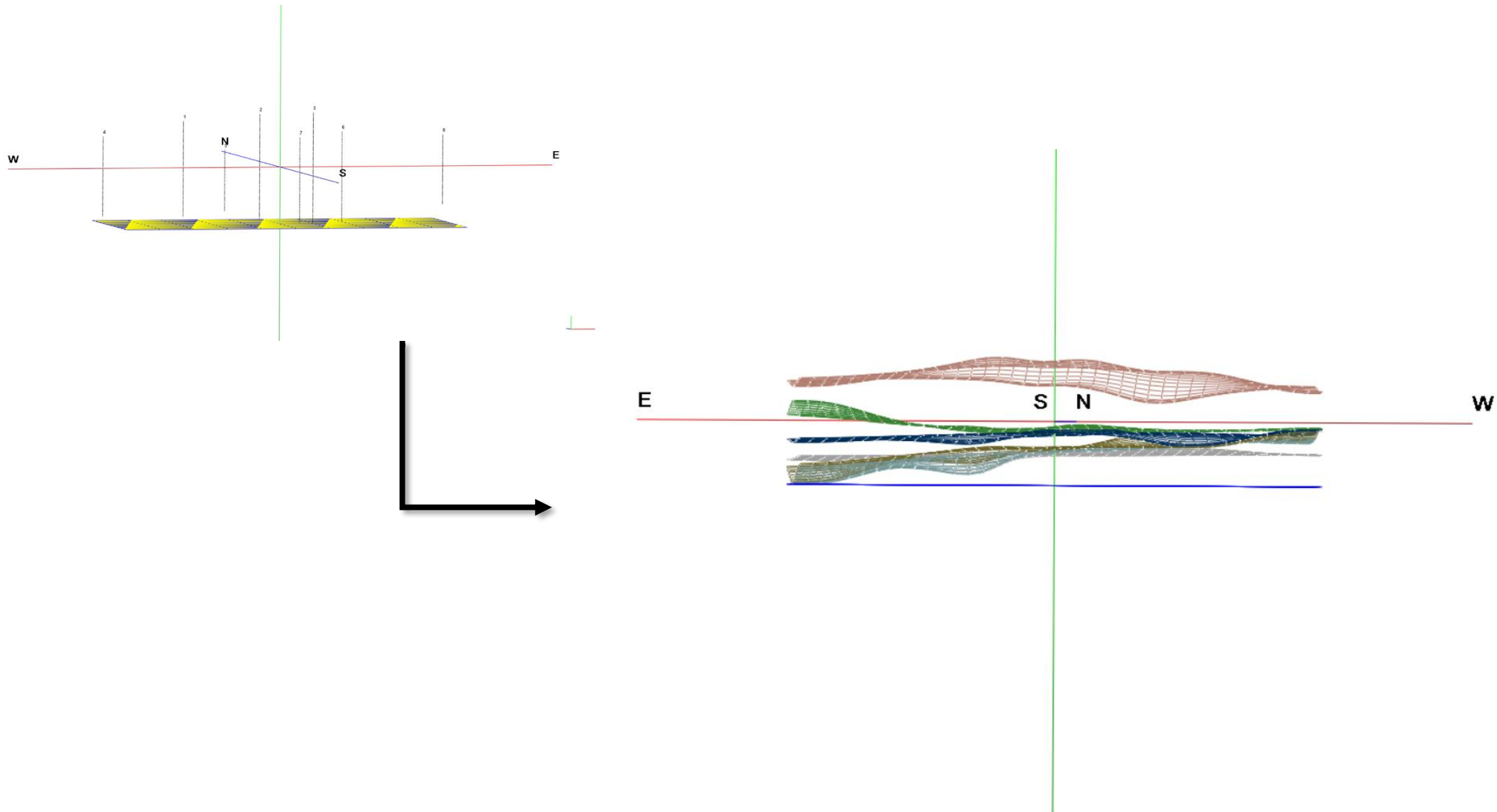
Ο σχηματισμός του ανοικτότεφρου ασβεστολίθου του «Ανώτερου μαρμάρου» με ασβεσίτη και μικροκάρστ κατά θέσεις, συναντάται μέχρι το βάθος των 37,50 m. Οι ασυνέχειές του είναι μέτρια τραχείες έως λείες και κατά θέσεις είναι πληρωμένες με άργιλο. Οι κλίσεις τους

κυμαίνονται από 0° έως 70° και η πυκνότητά τους από 3 έως 8 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του κυμαίνεται από II – III.

Τα γεωτρητικά δεδομένα που αναλύθηκαν παραπάνω, εμπεριέχουν πολλές πληροφορίες για μεμονωμένα σημεία πάνω στην περιοχή και όχι για τη συνολική έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος κατασκευής του υπόγειου χώρου Λαυρίου. Κατά το στάδιο αυτό, χρησιμοποιούνται τα γνωστά ερευνητικά δεδομένα για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου απεικόνισης της λιθολογίας της περιοχής, ώστε να αποδοθεί με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το γεωλογικό υπόβαθρο.







Βάσει όλων των παραπάνω γεωλογικών στοιχείων και του μοντέλου παρεμβολής που αναπτύχθηκε παραπάνω, σχεδιάστηκε το μοντέλο απεικόνισης της γεωλογίας του υπεδάφους της περιοχής του Λαυρίου. Ακολούθως παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα μοντέλα της περιοχής ενδιαφέροντος όπως προέκυψαν από την ανάλυση του λογισμικού προγράμματος RockWorks16, σύμφωνα με τα δεδομένα που δόθηκαν (Σχήμα 29, 30). Αρχικά παρουσιάζονται οι πυρήνες των γεωτρήσεων όπως εντοπίζονται στον χώρο. Στη συνέχεια, με άξονα αυτό το ημι-μοντέλο, κατασκευάστηκαν οι τρισδιάστατες επιφάνειες των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που απαρτίζουν το γεωλογικό μέσο της περιοχής. Τέλος, «γεμίστηκαν» τα υπόλοιπα σημεία ώστε να δημιουργηθεί το τρισδιάστο μοντέλο γεωλογικής απεικόνισης της περιοχής ενδιαφέροντος. Στο ανώτερο στρώμα, με ροζ χρώμα αποτυπώνονται οι τεταρτογενείς αποθέσεις αργιλικής φύσεως. Με πράσινο χρώμα αποτυπώνεται ο σχηματισμός Πρασινοσχιστόλιθου – Φυλλίτη, με μπλε χρώμα αποτυπώνεται ο σχηματισμός του Γραφιτικού Σχιστόλιθου, με καφέ χρώμα αποτυπώνονται οι εναλλαγές Σχίστη - Ασβεστόλιθου, με γαλάζιο χρώμα αποτυπώνεται ο Ασβεστόλιθος του Τεκτονικού Καλύμματος και τέλος με γκρι χρώμα αποτυπώνεται ο Ασβεστόλιθος του Ανώτερου Μαρμάρου.

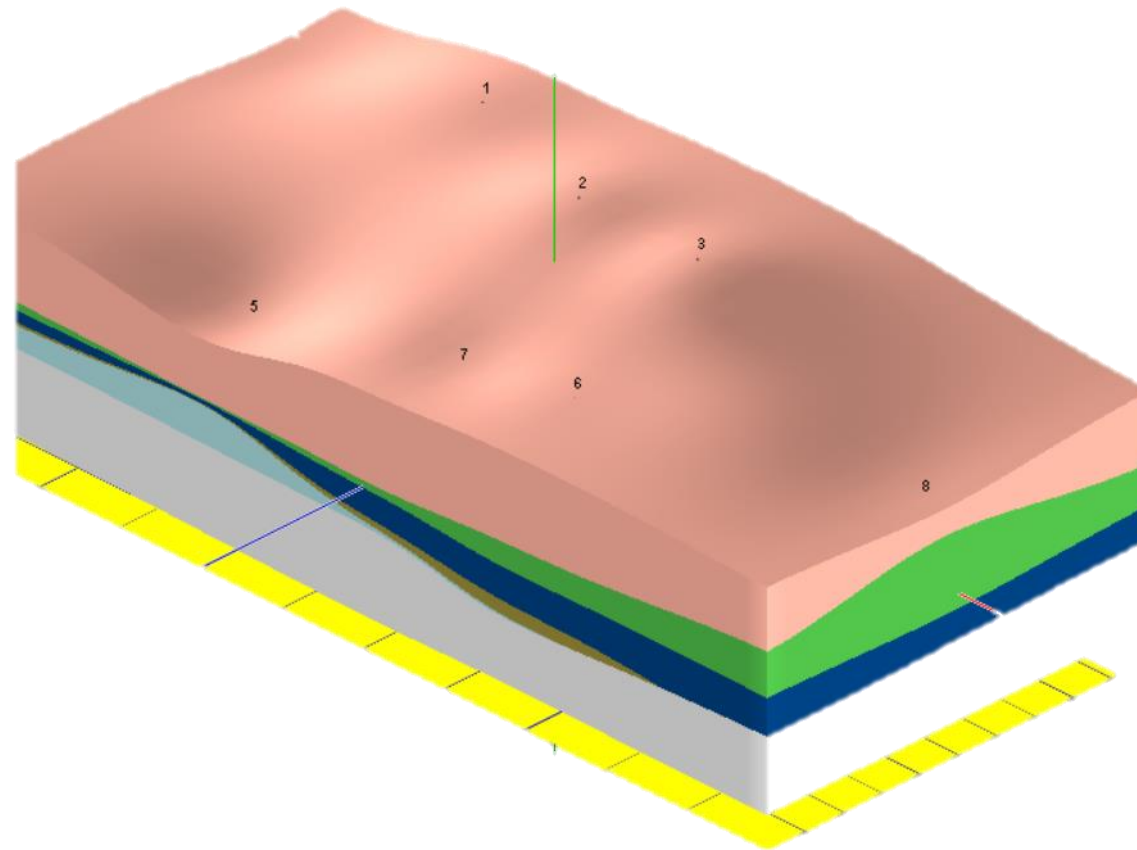
Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.



Σχήμα 29: Γεωλογική απεικόνιση περιοχής ενδιαφέροντος

Stratigraphy

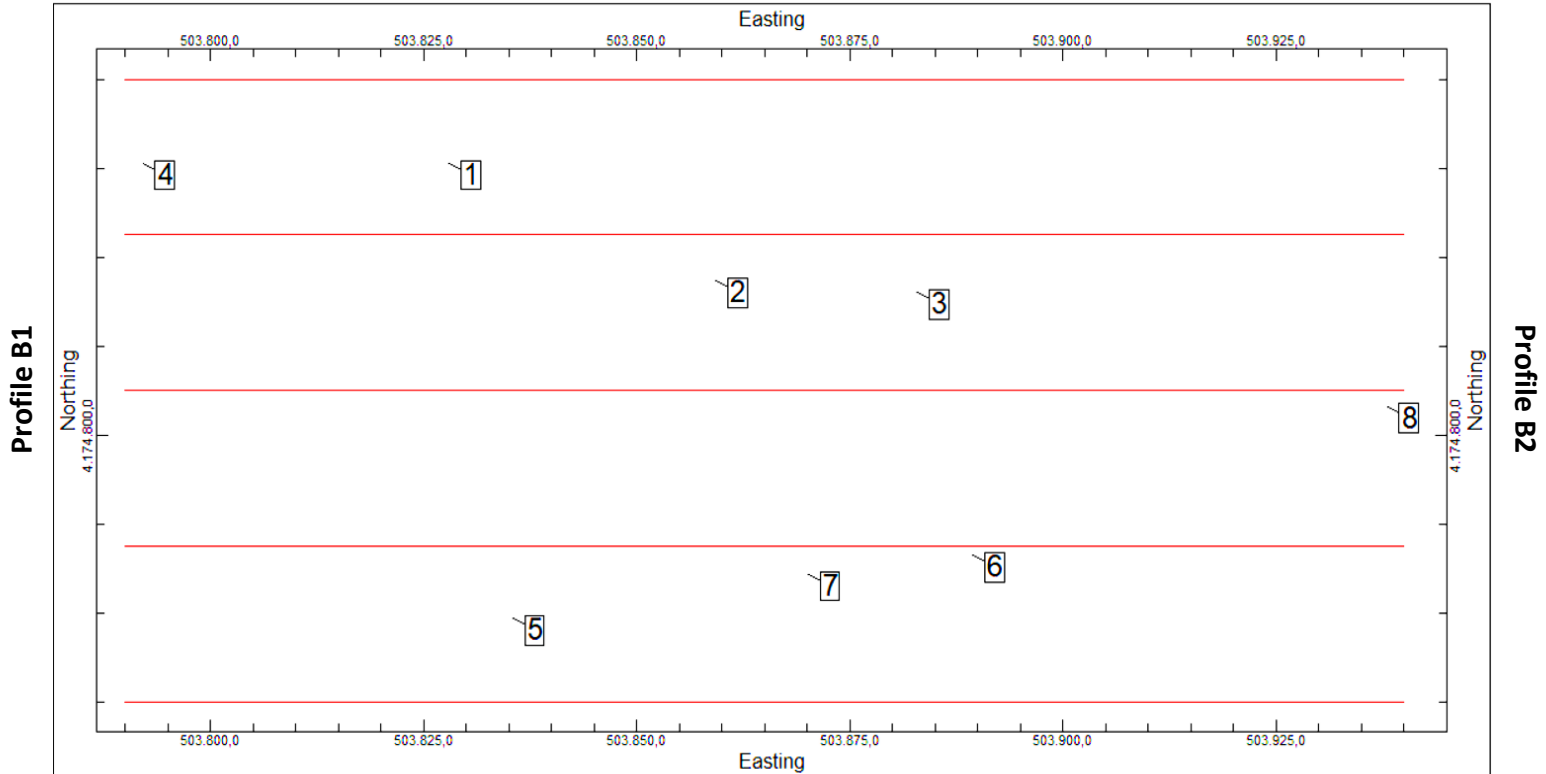
-  Clay
-  Greenschist - Phyllite
-  Graphic Schist
-  Alternation of Schist - Limestone
-  Limestone of tectonic cover
-  Limestone's Marble



Σχήμα 30: Τρισδιάστατη γεωλογική απεικόνιση

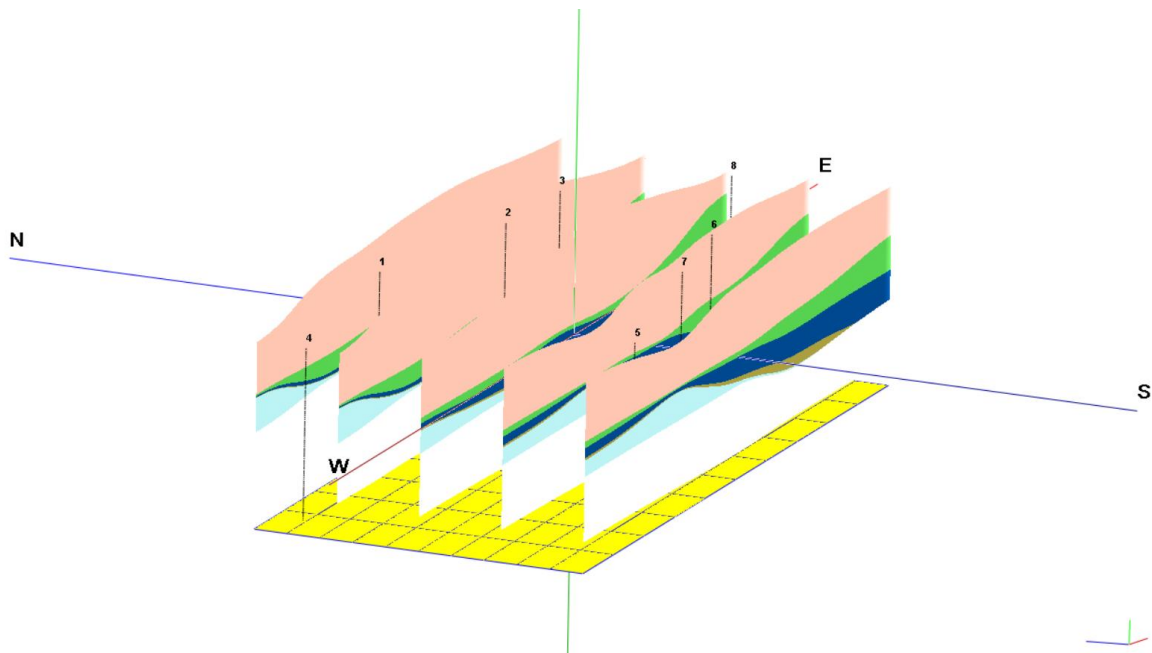
Μία διαφορετική οπτική των υφιστάμενων εδαφικών συνθηκών της περιοχής του Τεχνολογικού Πάρκου του Λαυρίου απεικονίζεται με 5 παράλληλες οριζόντιες τομές (Σχήμα 31 και 32), ανά 17,5 m, για την καλύτερη παρουσίαση των γεωλογικών δεδομένων.

Profile A1

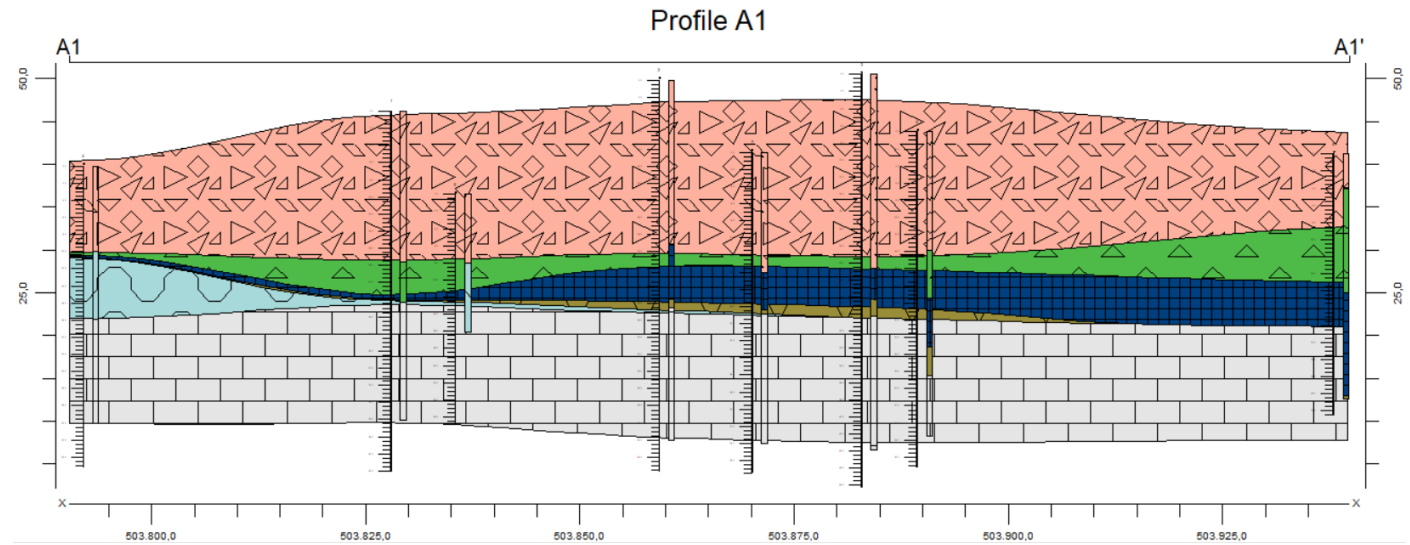
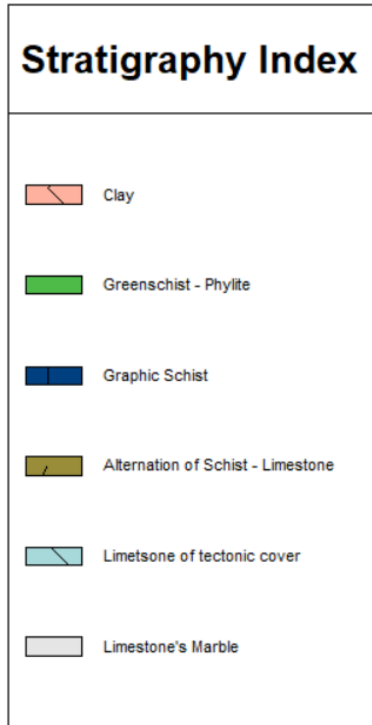


Profile A2

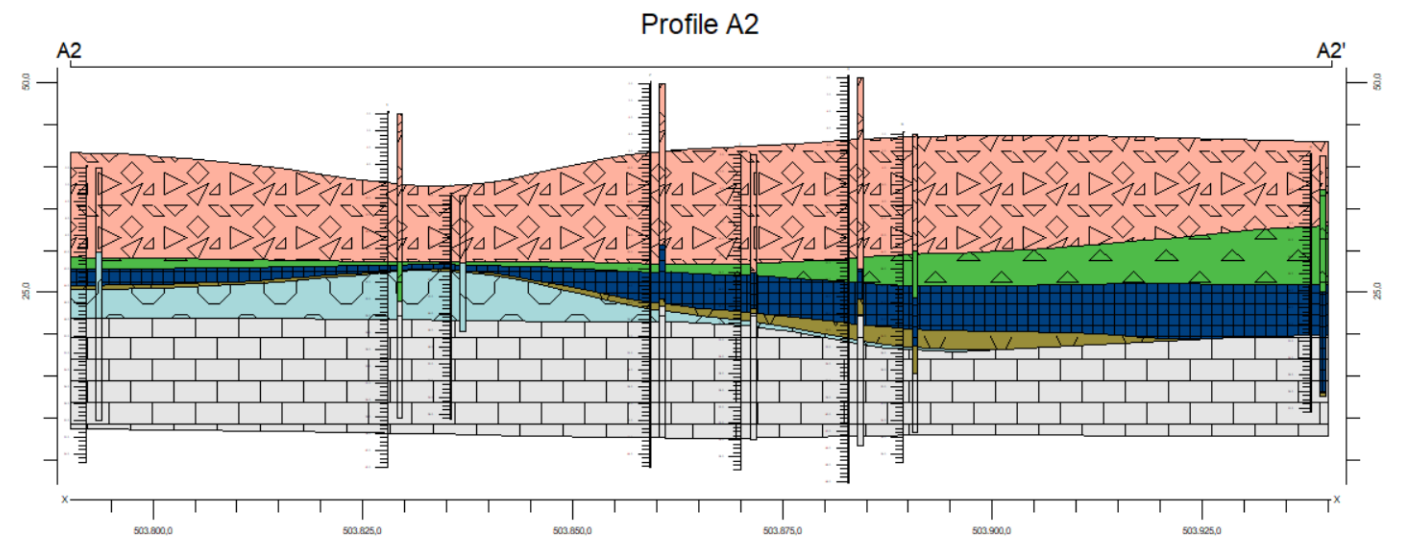
Σχήμα 31: Δισδιάστατη απεικόνιση σχεδίου οριζόντιων τομών



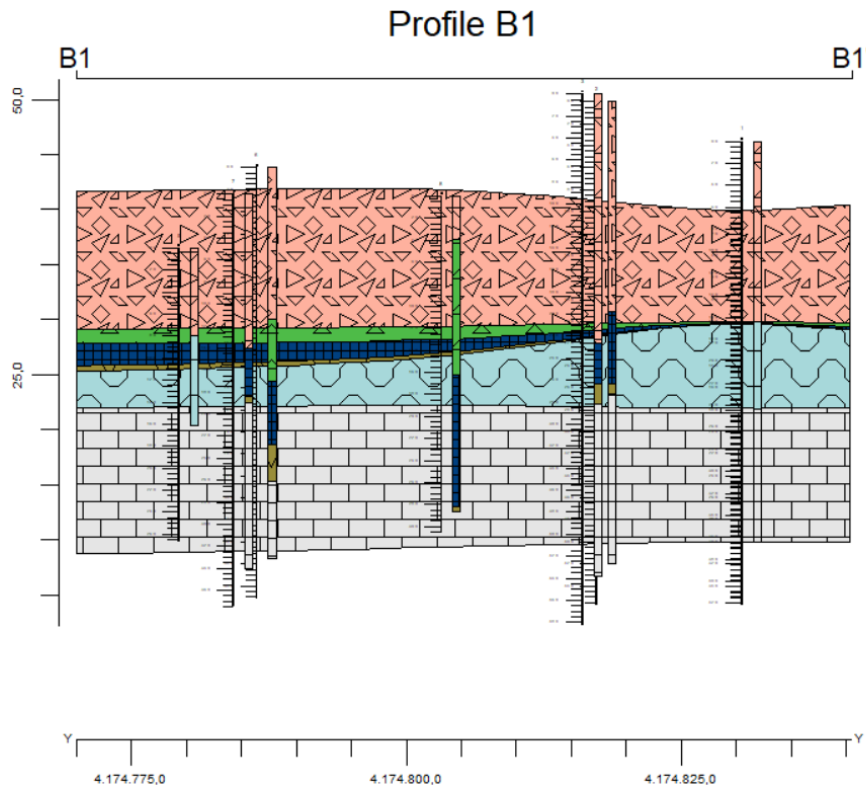
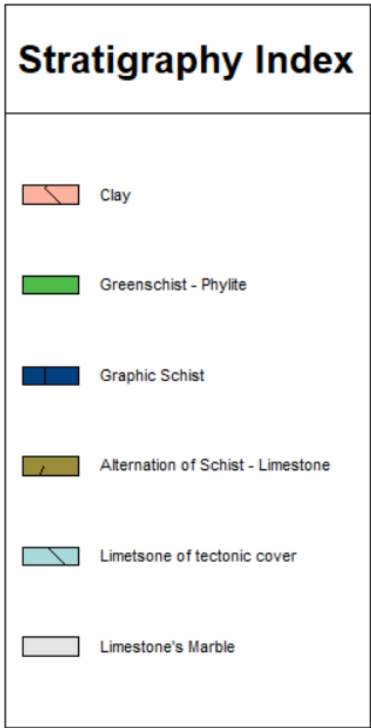
Σχήμα 32: Τρισδιάστατο γεωλογικό μοντέλο 5 τομών



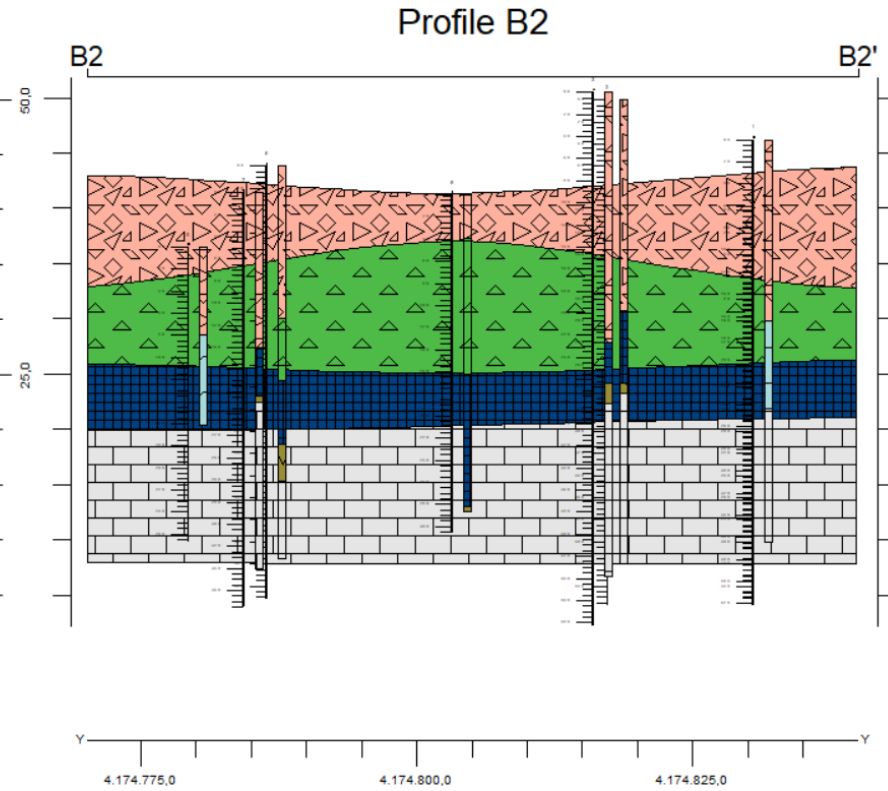
Σχήμα 33: Όψη Προφίλ A1



Σχήμα 34: Όψη Προφίλ A2



Σχήμα 35: Όψη Προφίλ B1



Σχήμα 36: Όψη Προφίλ B2

5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στους πυρήνες των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3, Γ4, Γ6 και Γ7 παρουσιάζονται στους Πίνακες Π1 έως Π8 του Παραρτήματος. Πέραν των γεωλογικών σχηματισμών, εξετάζεται η Μονοαξονική Θλιπτική Αντοχή (σ_c), η Μονοαξονική Εφελκυστική Αντοχή (σ_t), ο Δείκτης Ανισοτροπίας της Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση (I_s50), το Μέτρο Ελαστικότητας (E) και το Δείκτη Γεωτεχνική Ταξινόμηση Βραχομάζας RQD.

5.3.1. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γεωτεχνικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την χωρική ανάλυση του υπόγειου χώρου στο Λαύριο.

5.3.1.1. ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η τιμή της μονοαξονική θλιπτικής αντοχής του πετρώματος σ_c (MPa) είναι η μέγιστη τιμή τάσης που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες θλιπτικές συνθήκες και προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων, τη συνηθέστερη εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή. Στον Πίνακα 5 παρατίθεται ο χαρακτηρισμός του πετρώματος ανάλογα με τιμές της μονοαξονική θλιπτικής αντοχής.

Πίνακας 5: Βαθμονόμηση με βάση την αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c

Αντοχή σ_c (MPa)	Χαρακτηρισμός
>250	Εξαιρετικά υψηλή
100-250	Πολύ υψηλή
50-100	Υψηλή
25-50	Μέση
5-25	Χαμηλή
1-5	Πολύ χαμηλή
<1	Εξαιρετικά χαμηλή

5.3.1.2. ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΕΦΕΛΚΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Ομοίως, η τιμή της μονοαξονική εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος σ_t (MPa) είναι η μέγιστη τιμή τάσης που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες εφελκυστικές συνθήκες και προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων.

5.3.1.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η Δοκιμή Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμίων πετρωμάτων τόσο στο ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο. Από τη δοκιμή λαμβάνεται ο Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση I_s (50), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων από πλευράς αντοχής αλλά και για την έμμεση εκτίμηση χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διαφόρων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος μπορεί επίσης να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του.

Η Δοκιμή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής δοκιμίων πετρωμάτων τόσο στο ύπαιθρο όσο και στο εργαστήριο. Από τη δοκιμή λαμβάνεται ο Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση I_s (50), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατάταξη των πετρωμάτων από πλευράς αντοχής αλλά και για την έμμεση εκτίμηση χονδρικά της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διαφόρων διαστάσεων δοκίμια πετρώματος μπορεί επίσης να μελετηθεί και η επίδραση του όγκου του δοκιμίου στην αντοχή του.

Ο Δείκτης Ανισοτροπίας της Αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_s (50) (Strength Anisotropy Index) ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη I_s (50) για φόρτιση κάθετα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος ως προς τον δείκτη I_s (50) για φόρτιση παράλληλα προς το επίπεδο αδυναμίας του πετρώματος. Ο δείκτης I_s (50) λαμβάνει τιμές κοντά στο 1.0 για την περίπτωση σχετικά ισότροπου πετρώματος και μεγαλύτερες τιμές όταν το πέτρωμα είναι ανισότροπο. (Σοφιανός, Νομικός, 2008)

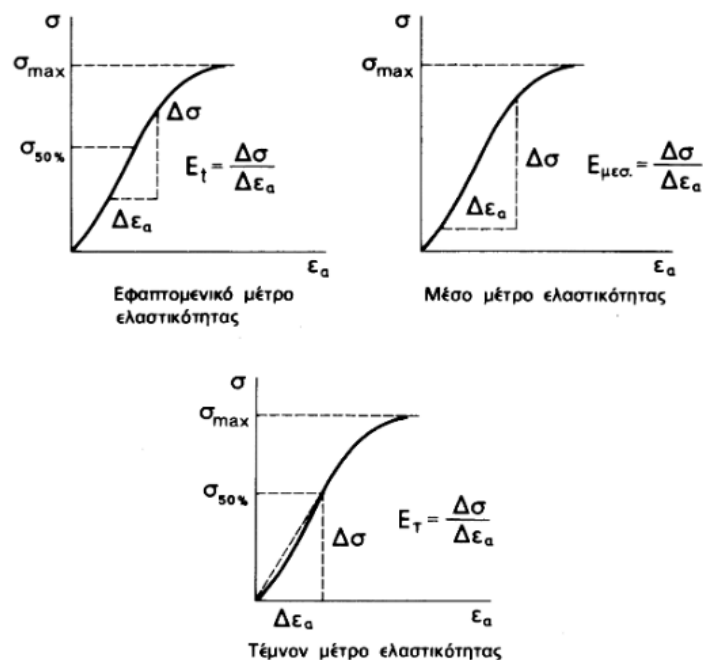
Στον Πίνακα 6 δίνονται ο χαρακτηρισμός της αντοχής του πετρώματος με βάση το Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση.

Πίνακας 6: Ταξινόμηση πετρώματος με βάση το δείκτη σημειακής φόρτισης $I_s (50)$ (Bieniawski, 1975)

Περιγραφή	Δείκτης Σημειακής Φόρτισης $I_s (50)$ (MPa)
Πολύ υψηλής αντοχής	> 8
Υψηλής αντοχής	4 – 8
Μέσης αντοχής	2 – 4
Χαμηλής αντοχής	1 – 2
Πολύ χαμηλής αντοχής	Δεν συνιστάται η δοκιμή (<1)

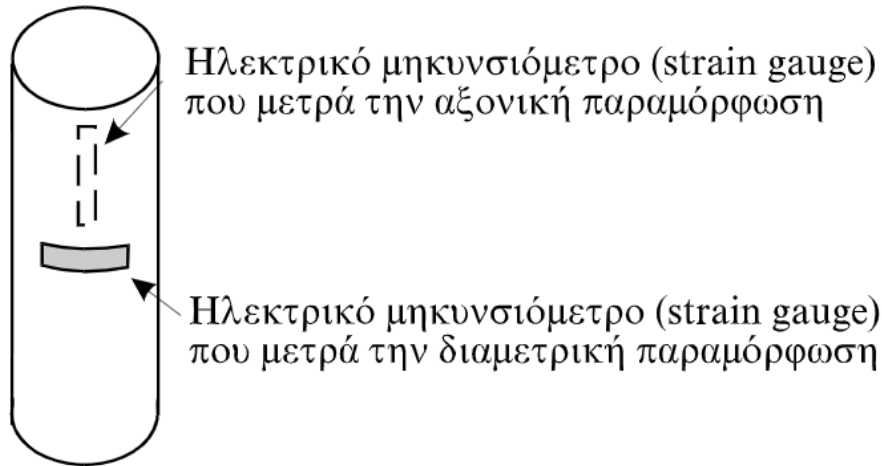
5.3.1.4. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη. Με βάση το διάγραμμα (Σχήμα 36) ενεργών τάσεων-τροπών (ανηγμένων παραμορφώσεων), που σχεδιάζεται από τη δοκιμή αυτή, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα μέτρα ελαστικότητας E (Young's Modulus) του πετρώματος καθώς και ο λόγος του Poisson ν . Στη συνήθη περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση νερού των πόρων, η ενεργή τάση ταυτίζεται με την δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου.



Σχήμα 37: Γραφικός προσδιορισμός διαφόρων μέτρων ελαστικότητας (Σοφιανός, Νομικός, 2008)

Η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με τη χρήση ειδικής κόλλας, σύμφωνα με το Σχήμα 38. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, και ο οριζόντιος την διαμετρική παραμόρφωση.



Σχήμα 38: Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων (Τσουτρέλης *et al.*, 2000)

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό. Η θραύση του δοκιμίου, ανάλογα με την αντοχή του, επιτυγχάνεται συνήθως μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής καταγράφονται οι ενδείξεις φορτίου της θλιπτικής μηχανής και οι ενδείξεις παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος. Η αξονική και η διαμετρική παραμόρφωση, ε_x , ε_y , δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x}, \varepsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad (1)$$

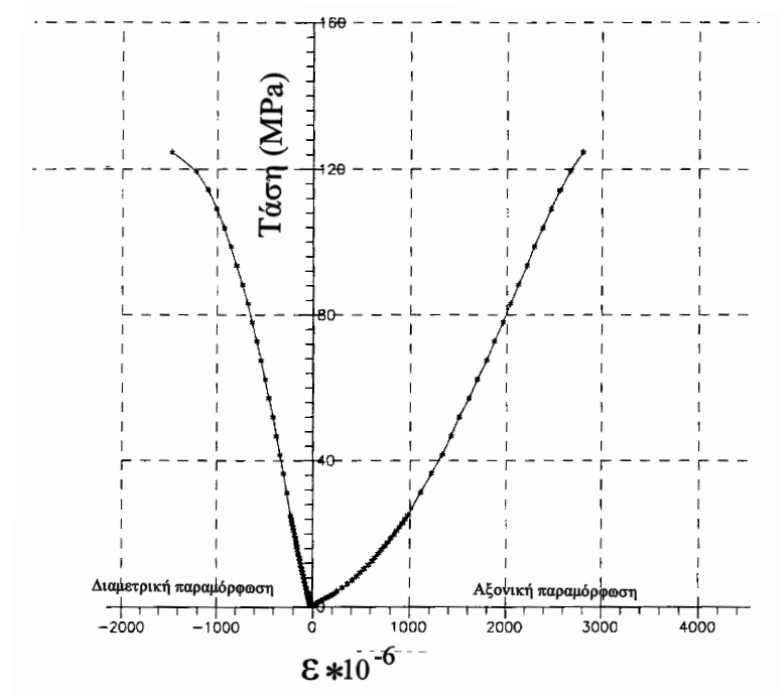
όπου η μεταβολή του μήκους που μετράει ο μετρητής και το μήκος στο οποίο γίνεται αυτή η μέτρηση (3 cm). Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηκυσιομέτρων, τα μεγέθη ε_x , ε_y δίνονται από τις ενδείξεις των ενισχυτών του, πολλαπλασιαζόμενες με κατάλληλο συντελεστή. Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται το δοκίμιο, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

όπου P το θλιπτικό φορτίο σε kN, και A_0 το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή.

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης - αξονικής τροπής ως εξής. Σε σημείο που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό της μέγιστης τάσεως (συνήθως το 50%) φέρεται η εφαπτομένη.

Η κλίση της ευθείας αυτής είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας ($E_{\text{μεσ}}$) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης (Σχήμα 39).



Σχήμα 39: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πετρώματος (Τσουτρέλης et al., 2000)

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_t) υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσεως μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσεως. Τα μέτρα ελαστικότητας εκφράζονται συνήθως σε GPa. (Σοφιανός, Νομικός, 2008)

5.3.1.5. ΔΕΙΚΤΗΣ RQD

Ο δείκτης RQD προκύπτει από το συνολικό μήκος των τεμαχών του πυρήνα γεώτρησης που το μήκος του καθενός από αυτά είναι ίσο ή μεγαλύτερο από 10 cm, διά του συνολικού μήκους της πυρηνοληψίας (Deere, 1963). Στον Πίνακα 7 φαίνεται η βαθμονόμηση με βάση το δείκτη RQD.

Πίνακας 7: Χαρακτηρισμός με βάση το δείκτη RQD

Δείκτης RQD (%)	Χαρακτηρισμός
90-100	Εξαιρετική
75-90	Καλή
50-75	Μέτρια
25-50	Πτωχή
<25	Πολύ πτωχή

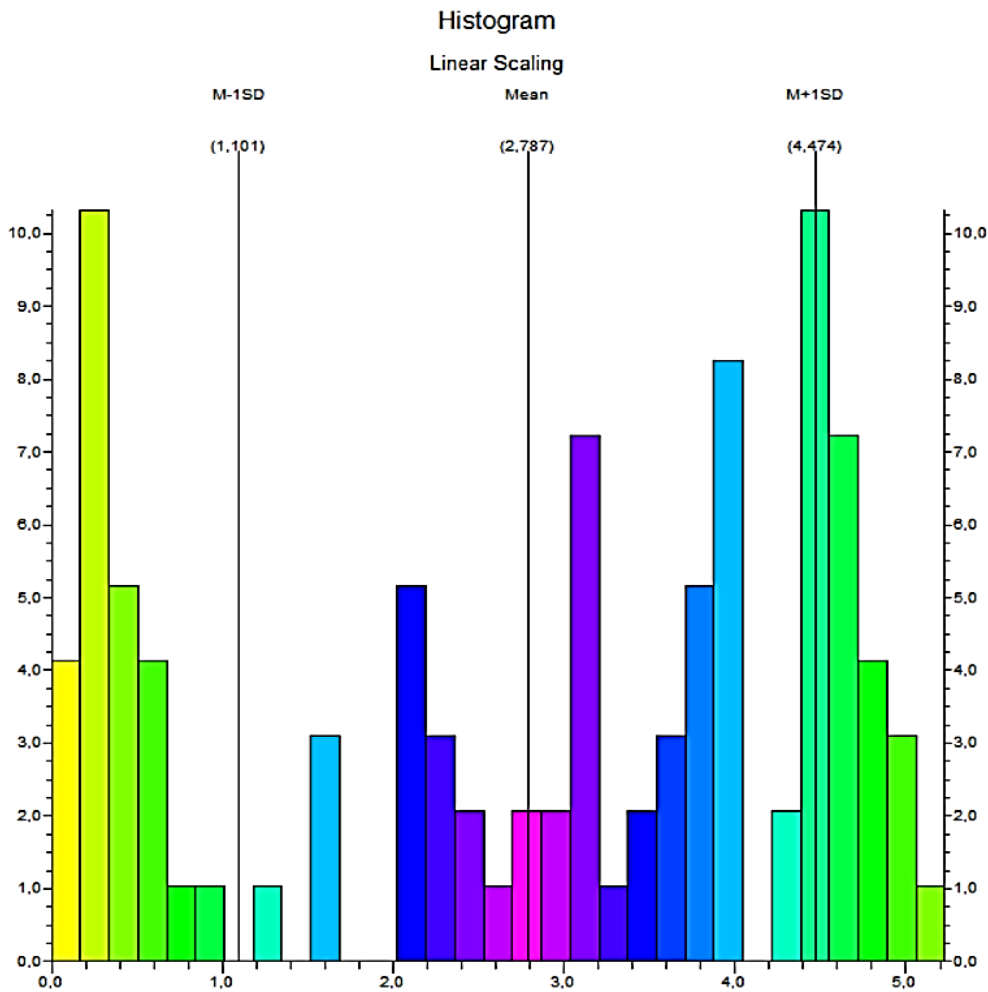
5.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η αβεβαιότητα των γεωλογικών σχηματισμών και οι επιπτώσεις που αυτή μπορεί να επιφέρει σε ένα υπόγειο έργο, είναι εξίσου σημαντική με την αβεβαιότητα των γεωτεχνικών συνθηκών. Συνεπώς, για τον εντοπισμό πιθανών προβληματικών περιοχών του έργου κρίνεται σκόπιμη η ενδεδειγμένη χαρτογράφηση των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν και η αξιολόγηση τους.

5.4.1. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για κάθε γεωτεχνικό χαρακτηριστικό που μελετήθηκε, αναλύθηκαν κρίσιμα στατιστικά μεγέθη όπως η μέση, η διάμεση τιμή και η τυπική απόκλιση αυτών.

Στο Σχήμα 40 που ακολουθεί παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση του συνόλου των τιμών του Δείκτη Σημειακής Φόρτισης (I_{s50}) που προέρχονται από τα δείγματα που αναλύθηκαν.

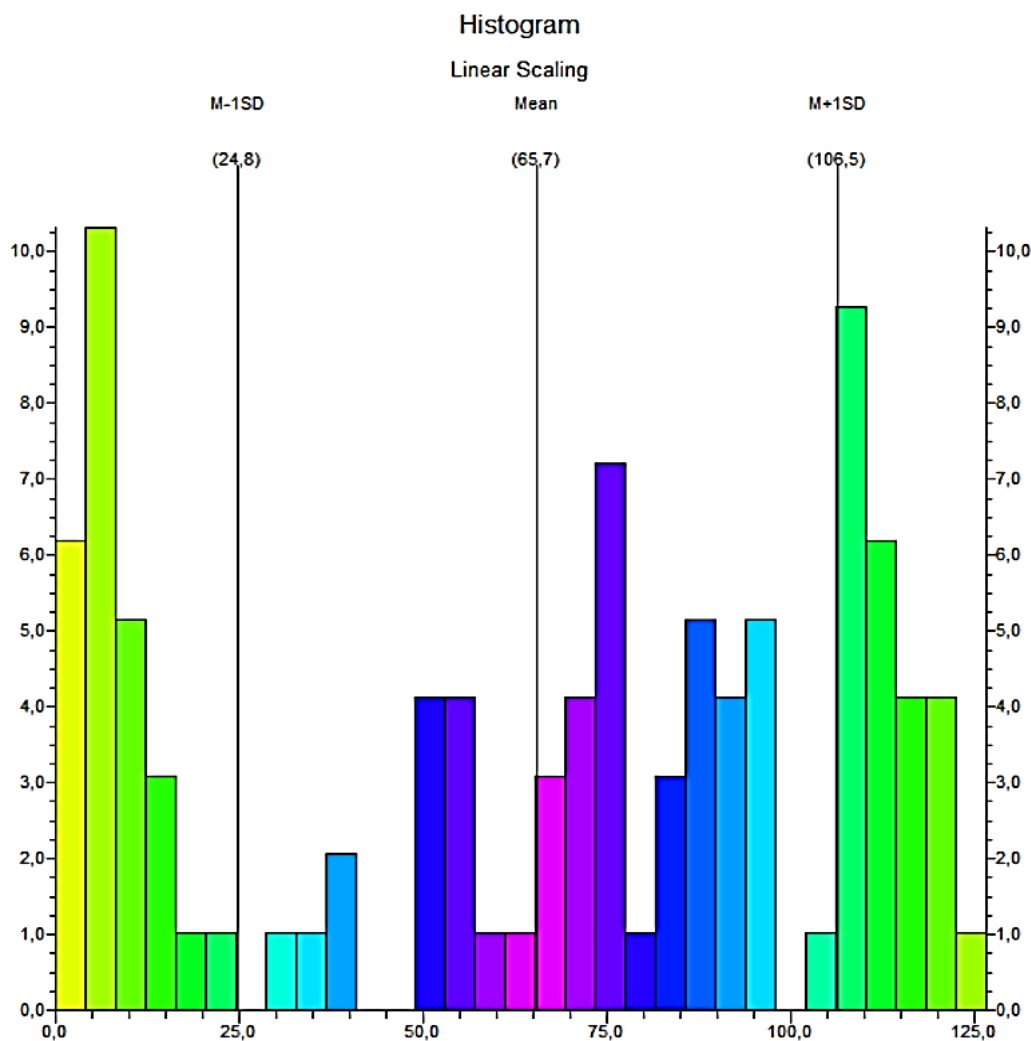


Σχήμα 40: Ιστόγραμμα Δείκτη Is50

Πρόκειται για 97 σημειακά δείγματα με ελάχιστη τιμή τα 0,103 MPa που εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ8 σε βάθος 5,40 m έως 5,60 m στην περιοχή Πρασινοσχιστόλιθου και Φυλλίτη. Η μέγιστη τιμή είναι τα 5,127 MPa και εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ3 σε βάθος 39,00 m έως 39,20 m στην περιοχή του Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μάρμαρου.

Η μέση τιμή (mean) είναι 2,792 MPa, η διάμεση (median) 3,083 MPa και η τυπική απόκλιση (standard deviation) 1,680 MPa.

Ακολούθως παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση του σύνολο των τιμών μονοαξονικής θλίψης σ_c που προέρχονται από τα δείγματα που αναλύθηκαν.

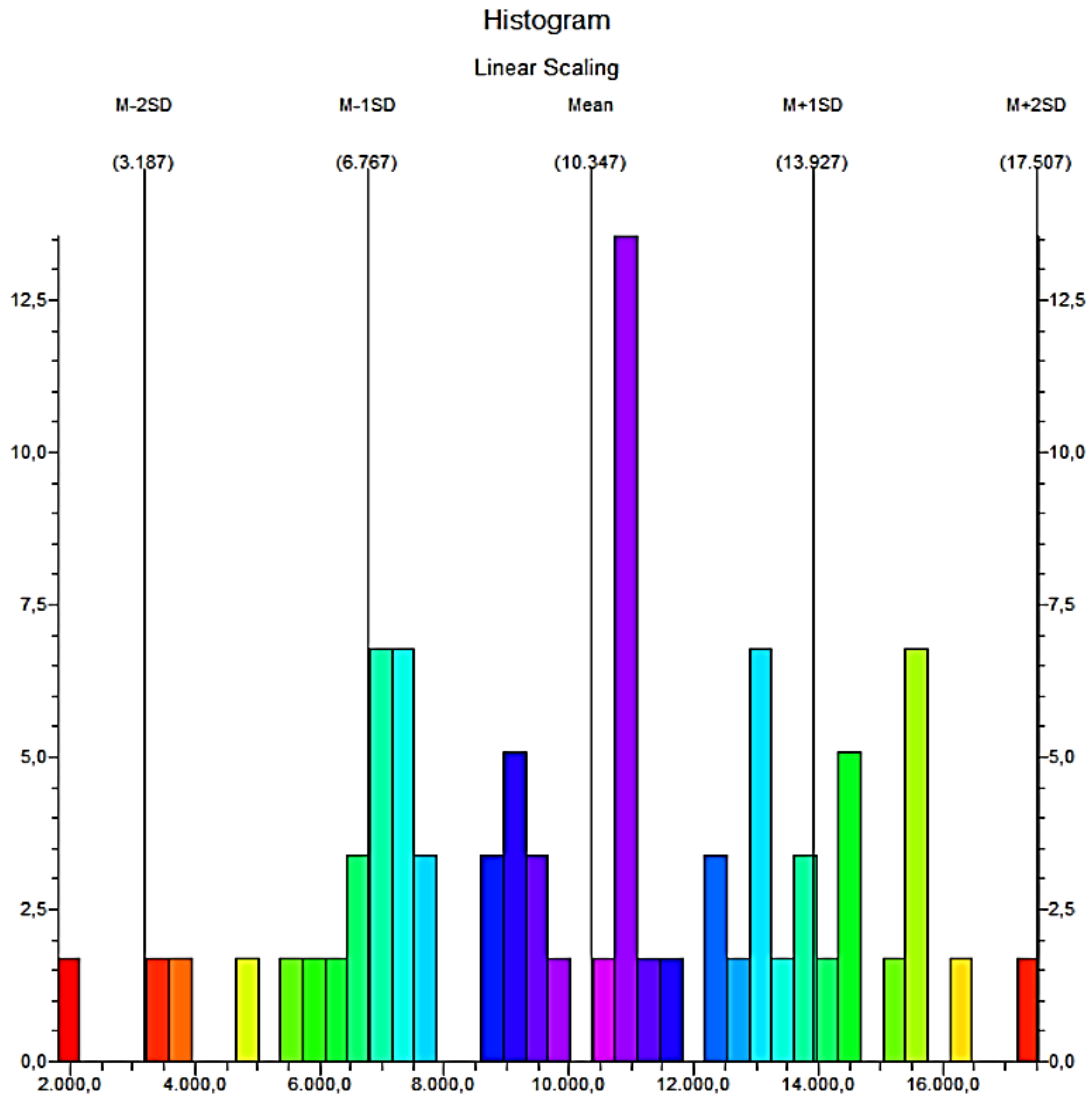


Σχήμα 41: Ιστόγραμμα Μονοαξονικής Θλίψης (σ_c)

Ομοίως, πρόκειται για 97 σημειακά δείγματα με ελάχιστη τιμή τα 2,472 MPa που εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ8 σε βάθος 5,40 m έως 5,60 m στην περιοχή Πρασινοσχιστόλιθου και Φυλλίτη. Η μέγιστη τιμή είναι τα 123,048 MPa και εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ3 σε βάθος 39,00 m έως 39,20 m στην περιοχή του Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μάρμαρου. Η μέση τιμή (mean) είναι 65,656 MPa, η διάμεση (median) 73,824 MPa και η τυπική απόκλιση (standard deviation) 40,890 MPa.

Η στατιστική ανάλυση των δειγμάτων του Μέτρου Ελαστικότητας (E) πραγματοποιήθηκε σε 59 σημειακά δείγματα. Η ελάχιστη τιμή είναι τα 1.964 GPa και εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ8 σε βάθος 7,90 m έως 8,20 m, στην περιοχή Πρασινοσχιστόλιθου - Φυλλίτη. Η μέγιστη τιμή είναι τα 17.340 GPa και εμφανίζεται επίσης στη γεώτρηση Γ7 σε βάθος 25,80 m έως 27,00 m,

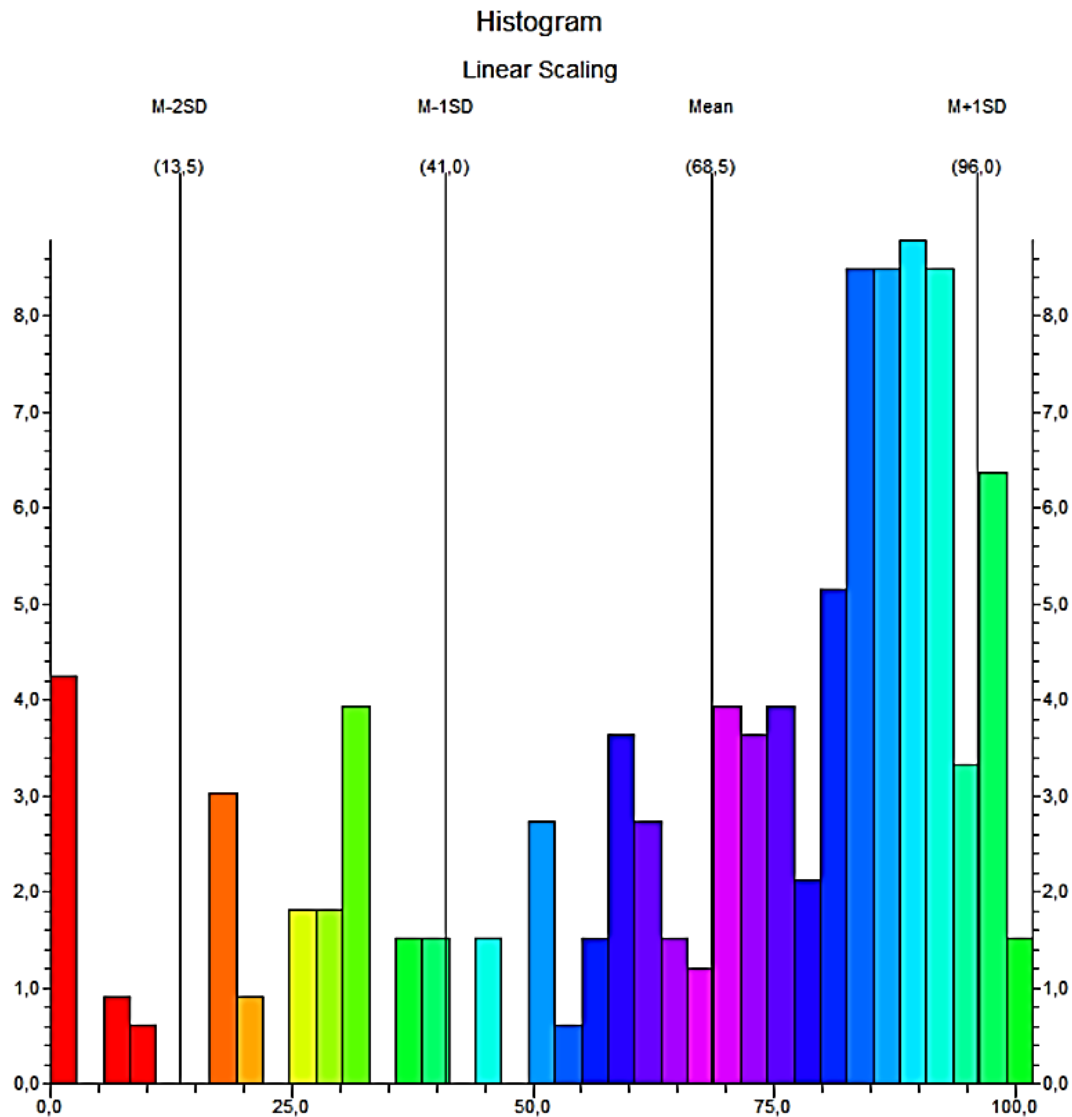
στην περιοχή του Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου. Η μέση τιμή (mean) είναι 10.346 GPa, η διάμεση (median) 10.815 GPa και η τυπική απόκλιση (standard deviation) 3.580 GPa.



Σχήμα 42: Ιστόγραμμα Μέτρων Ελαστικότητας (E)

Στην περίπτωση εργαστηριακής ανάλυσης του Δείκτη Γεωτεχνική Ταξινόμηση Βραχομάζας RQD μελετήθηκαν συνολικά 330 δείγματα. Η ελάχιστη τιμή είναι 0 % και εμφανίζεται στις γεωτρήσεις Γ1 σε βάθος 24,90 m έως 25,10 m, στην περιοχή Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου, Γ3 σε βάθος 27,30 m έως 27,60 m, στην εναλλαγή Σχιστόλιθου – Ασβεστόλιθου, Γ5 σε βάθος 10,30 m έως 11,30 m στην περιοχή Ασβεστόλιθου του Τεκτονικού Καλύμματος και σε βάθος 26,00 m έως 27,70 m στην περιοχή Ασβεστολίθου Ανώτερου Μαρμάρου. Επιπλέον η τιμή RQD = 0 % εμφανίζεται στη γεώτρηση Γ7 σε βάθος 14,00 m έως 18,40 m στην περιοχή Γραφιτικού Σχιστόλιθου και στη γεώτρηση Γ8 σε βάθος 3,90 m έως

4,50 m στην περιοχή Πρασινοσχιστόλιθου – Φυλλίτη. Η μέγιστη τιμή RQD = 100 % εμφανίζεται στις γεωτρήσεις Γ1 σε βάθος 22,30 m έως 23,50 m και Γ5 σε βάθος 18,80 m έως 19,75 m στην περιοχή του Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου. Η μέση τιμή (mean) είναι 68,5 %, η διάμεση (median) 80 % και η τυπική απόκλιση (standard deviation) 27,85 %.



Σχήμα 43: Ιστόγραμμα Δείκτη RQD

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των γεωτεχνικών δεδομένων που προήλθαν από τις αναλύσεις των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρητικών ερευνών στην περιοχή του Λαυρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικά στατιστικά αποτελέσματα

	Is50 (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	0,103	2,472	1.964	0
Max	5,127	123,048	17.340	100
Mean	2,792	65,656	10.346	68,5
Median	3,083	73,824	10.815	80,0
Stdev	1,686	40,890	3.580	27,5

Στη συνέχεια ακολουθούν τα στατιστικά στοιχεία για κάθε κατηγορία λιθολογίας ξεχωριστά.

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία Ασβεστόλιθου Τεκτονικού Καλύμματος

Ασβεστόλιθος Τεκτονικού Καλύμματος				
	Is50 (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	1,584	38,02	7.258	0
Max	4,688	81,73	14.489	98
Mean	2,952	61,73	11.270	74,3
Median	0,835	61,41	11.333	87
Stdev	2,866	12,27	2.164	24,9

Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία Γραφιτικού Σχιστόλιθου

Γραφικός Σχιστόλιθος				
	Is50 (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	0,146	22,31	5.649	0
Max	2,937	70,49	7.626	93
Mean	1,001	42,54	6.792	45,6
Median	0,721	37,79	6.923	45
Stdev	0,890	18,57	571,4	27,4

Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία Πρασινοσχιστόλιθου - Φυλλίτη

Πρασινοσχιστόλιθος - Φυλλίτης				
	Is50 (MPa)	σc (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	0,103	8,04	1.964	0
Max	3,342	80,20	13.031	93
Mean	1,201	42,68	7.467	52,2
Median	0,562	47,51	7.816	54
Stdev	1,130	27,80	3850	27,9

Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία εναλλαγής Ασβεστόλιθου - Σχιστόλιθου

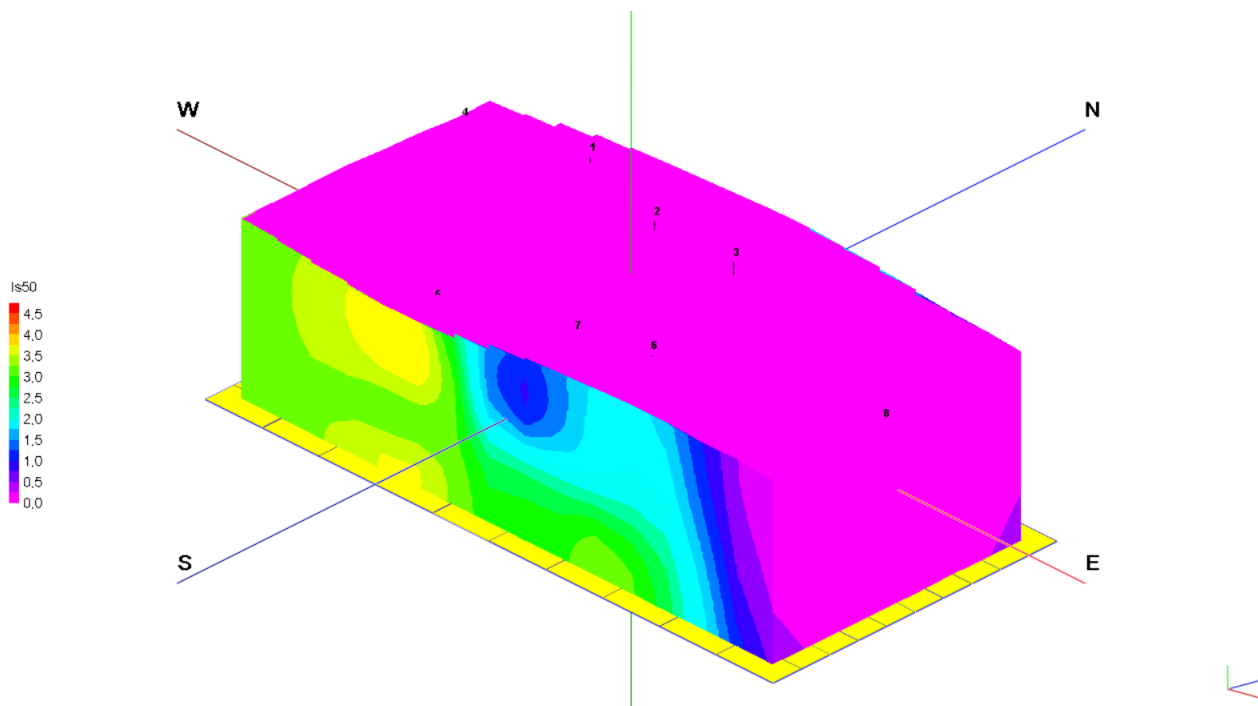
Εναλλαγή Ασβεστόλιθου - Σχιστόλιθου				
	Is50 (MPa)	σc (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	0,696	16,71	4.712	0
Max	4,834	67,68	13.634	77
Mean	2,268	39,94	8.126	45,5
Median	1,531	35,43	6.031	53
Stdev	1,622	25,78	4.815,7	24,2

Πίνακας 13: Στατιστικά στοιχεία Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου

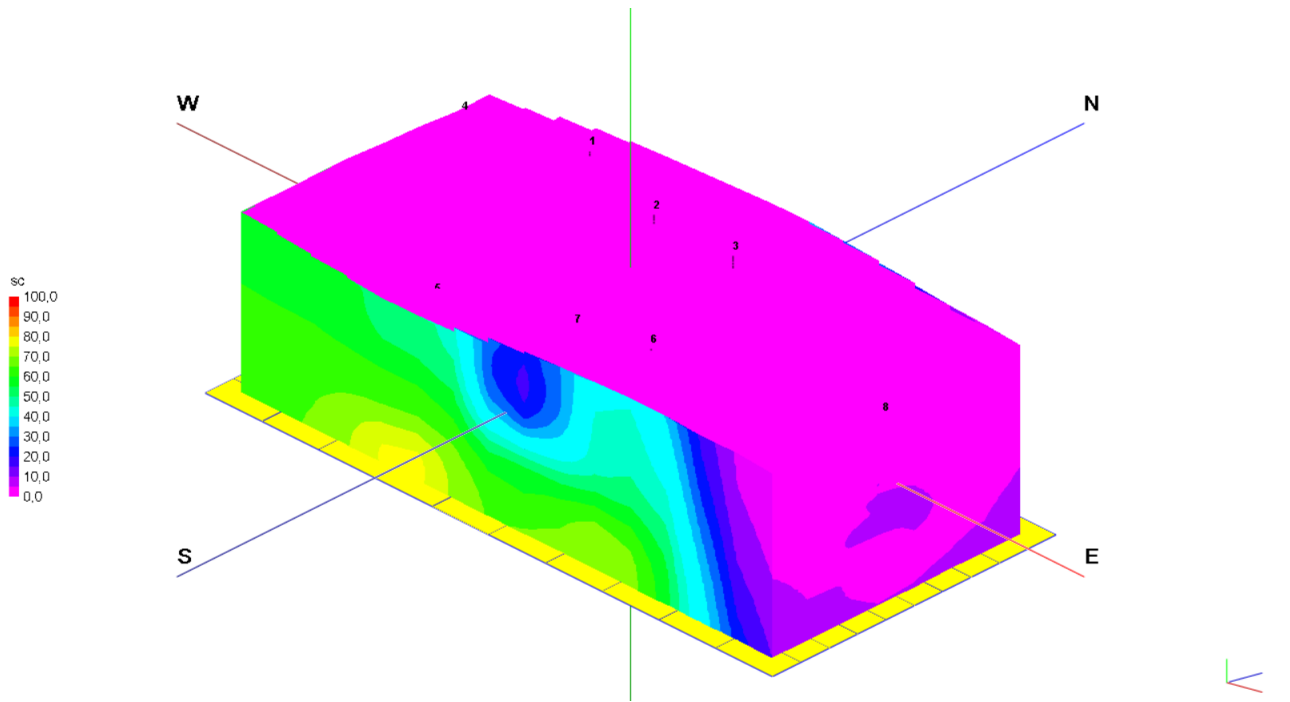
Ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου				
	Is50 (MPa)	σc (MPa)	E (GPa)	RQD (%)
Min	1,541	39,2	6804	0
Max	5,127	116,63	17.340	100
Mean	3,403	71,38	12.403	82,1
Median	3,328	74,73	12.003	86
Stdev	0,949	17,98	2.834	17,4

5.4.2. ΧΩΡΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

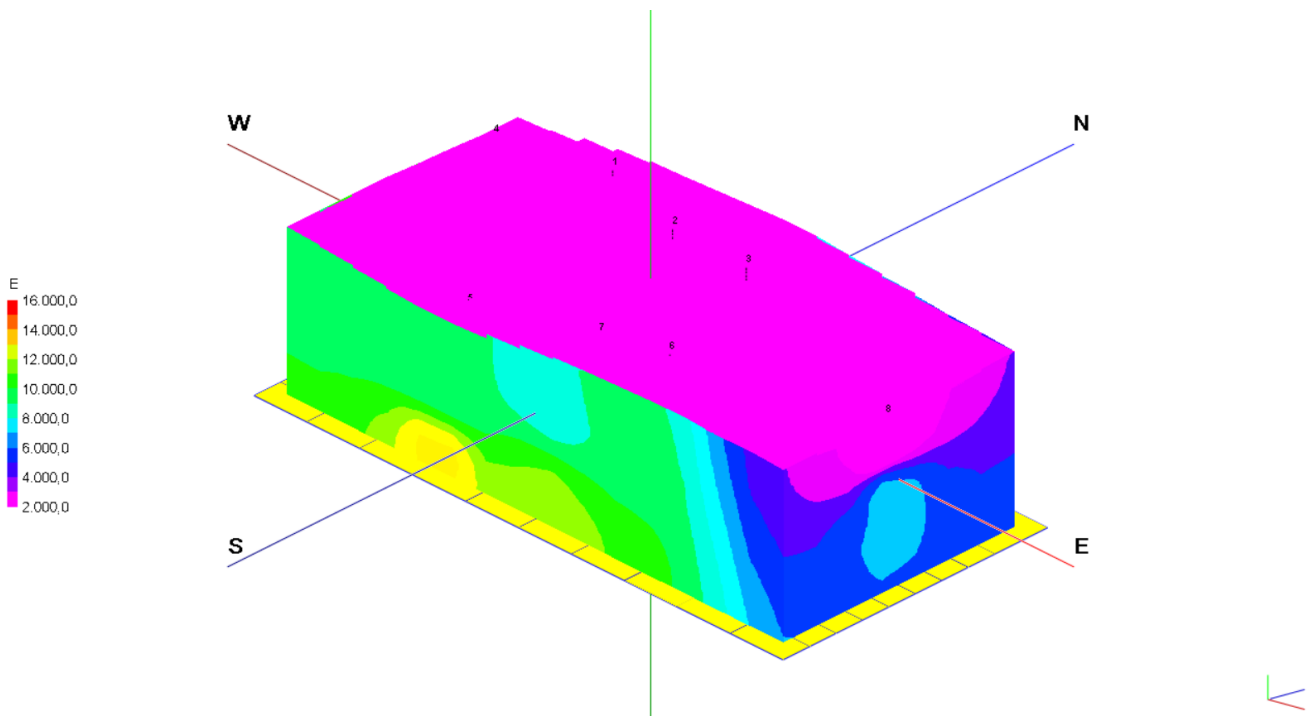
Ακολουθώς παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα χωρικά μοντέλα για τις γεωτεχνικές παραμέτρους: Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση I_s (50), Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_c), Μέτρο Ελαστικότητας (E) και Δείκτης Ποιότητας της Βραχώμαζας RQD, της περιοχής ενδιαφέροντος όπως προέκυψαν από την ανάλυση του λογισμικού προγράμματος RockWorks16, με τη χρήση της μεθόδου παρεμβολής Αντίστροφου Τετράγωνου σύμφωνα με τα δεδομένα που δόθηκαν (Σχήμα 44 έως 47).



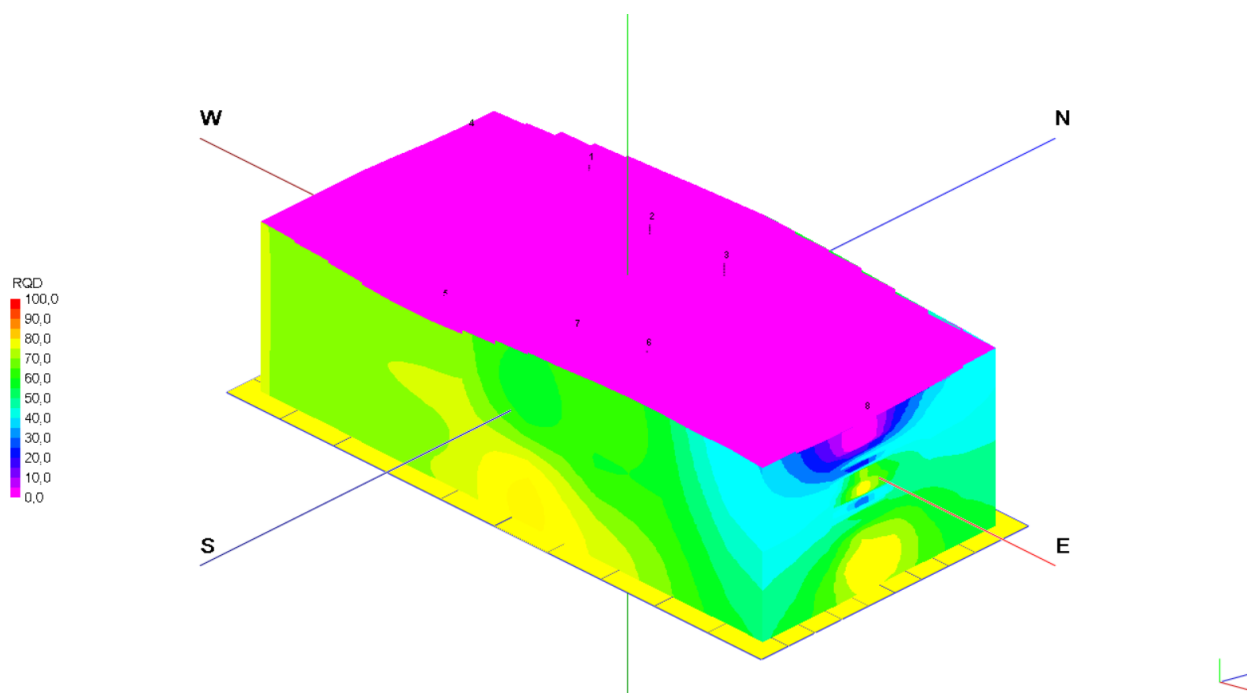
Σχήμα 44: Μοντέλο προσομοίωσης Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση I_s50



Σχήμα 45: Μοντέλο προσομοίωσης Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη (σ_c)



Σχήμα 46: Μοντέλο προσομοίωσης Μέτρου Ελαστικότητας (E)



Σχήμα 47: Μοντέλο προσομοίωσης Δείκτη RQD

Σε κάθε περίπτωση, με μοβ χρώμα αποτυπώνονται οι ελάχιστες τιμές των τεσσάρων υπό εξέταση κρίσιμων γεωτεχνικών παραμέτρων. Με την αντίστοιχη διακύμανση των χρωμάτων, με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι μέγιστες τιμές. Όπως είναι αναμενόμενο στην επιφάνεια του εδάφους όπου το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης του Τ. Π. Π. Λ. καλύπτεται από τεχνητά επιχώματα τα οποία προέρχονται από υλικά της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας και προσχωματικές αποθέσεις που χαρακτηρίζονται από ποικίλη λιθολογική και κοκκομετρική σύσταση, η μηχανική του σύσταση είναι μειωμένη. Καθώς αυξάνεται το βάθος και απαντώνται πιο συμπαγείς γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως το Ανώτερο Μάρμαρο, τα κρίσιμα μηχανικά χαρακτηριστικά βελτιώνονται.

5.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Η γεωτεχνική χωρική μεταβλητότητα είναι αποτέλεσμα διαφόρων γεωφυσικών διαδικασιών που υπόκεινται στο τρόπο με τον οποίο τα εδάφη και τα πετρώματα αποτέθηκαν. Οι μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής ενδιαφέροντος ποικίλουν στο χώρο ανάλογα με τη θέση σε συνταγμένες x και y , και το βάθος z . Επιπλέον, εμφανίζονται πολλαπλές κλίμακες που απορρέουν από τα ελάχιστες και μέγιστες τιμές που λαμβάνουν, καθώς και τη μεταξύ τους διακύμανση. Για το λόγο αυτό έχει επιλεγεί μία κοινή κλίμακα βαθμονόμησης για την καλύτερη αποτύπωση και πρόβλεψη της γεωτεχνικής συμπεριφοράς της περιοχής, με βαθμούς επιρροής Α, Β, Γ, Δ και Ε. Η αντιστοίχιση των βαθμών με το εύρος των τιμών για κάθε γεωτεχνικό χαρακτηριστικό δίνεται στους Πίνακες 14 – 17.

Πίνακας 14: Βαθμονόμηση τιμών Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is50

Βαθμός	Δείκτης Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is50 (MPa)
A	> 8
B	4 – 8
Γ	2 – 4
Δ	1 – 2
E	< 1

Πίνακας 15: Βαθμονόμηση τιμών Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη σ_c

Βαθμός	Μονοαξονική Θλίψη σ_c (MPa)
A	> 200
B	100 – 200
Γ	50 – 100
Δ	25 – 50
E	< 25

Πίνακας 16: Βαθμονόμηση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας E

Βαθμός	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
A	> 15
B	10 – 15
Γ	5 – 10
Δ	0,1 – 5
E	< 0,1

Πίνακας 17: Βαθμονόμηση τιμών Δείκτη RQD

Βαθμός	Δείκτης RQD (%)
A	90 – 100
B	75 – 90
Γ	55 – 75
Δ	25 – 55
E	<25

Όπως φαίνεται και στους πίνακες που παρατέθηκαν ανωτέρως, η βαθμολογία A αντιστοιχεί στη βέλτιστη γεωτεχνική συμπεριφορά της υπό εξέταση περιοχής, ενώ καθώς οι τιμές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών μειώνονται, μειώνεται και η βαθμολογία που δίνεται.

5.6. ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΤΙΜΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Όπως είναι αναμενόμενο οι τιμές του πλέγματος δεν θεωρούνται απόλυτα αντιπροσωπευτικές για όλη την έκταση του τομέα αλλά υπόκεινται σε αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή κάθε τομέα προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών της περιοχής που αντιπροσωπεύει. Οι αποκλίσεις αυτές παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα, όπου οι τιμές μεταξύ 0 και 1 θεωρούνται αμελητέες, οι τιμές μεταξύ 1 και 2 μπορούν να θεωρηθούν ελαφρώς ανώμαλες, οι τιμές μεταξύ 2 και 3 μέτρια ανώμαλες, ενώ οι τιμές μεταξύ 3 και 4 είναι έντονα ανώμαλες. Τιμές άνω του 4 αντιπροσωπεύουν εξαιρετικά ανώμαλες αποκλίσεις.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται η περίπτωση εκτίμησης του Δείκτη RQD σε απόλυτο υψόμετρο $z = +0$ m, στην περιοχή του ανώτερου Μαρμάρου.

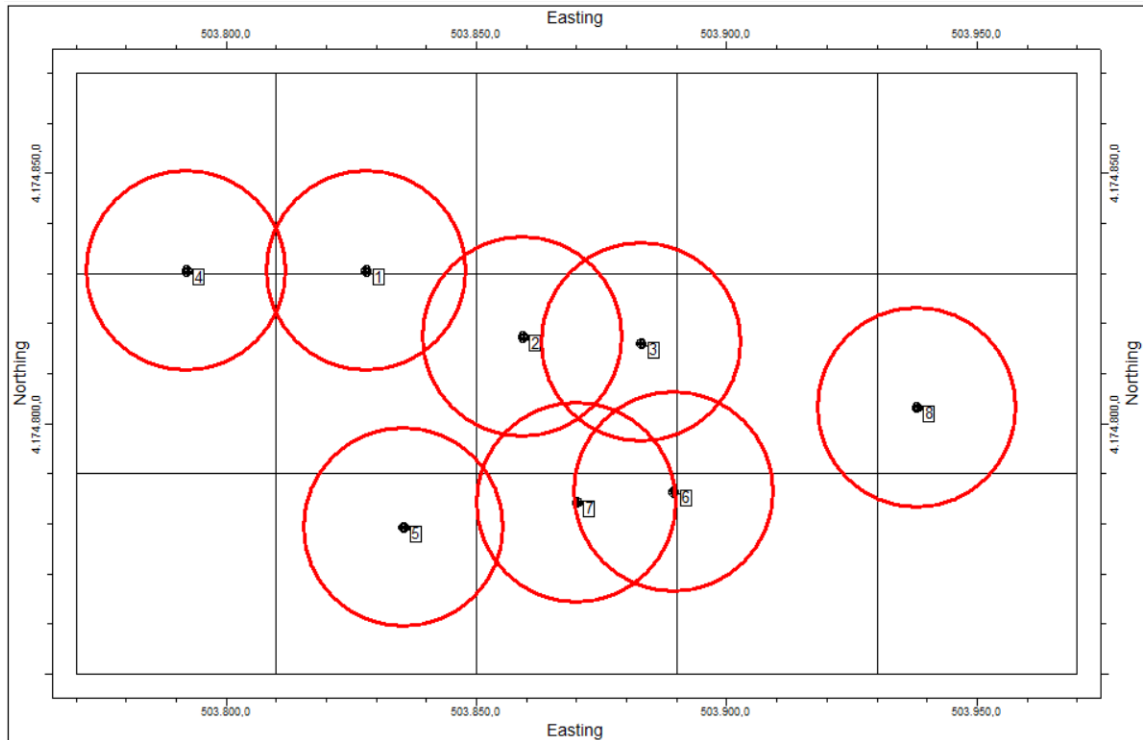


Σχήμα 48: Τοπικές αποκλίσεις Δείκτη RQD από τις εκτιμώμενες τιμές σε $z = +0 \text{ m}$

Στους περισσότερους τομείς οι αποκλίσεις θεωρούνται αμελητέες, ενώ στους τομείς 2, 8 και 11 δείχνουν μια ελαφρά ανωμαλία. Αντίστοιχα και για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη, στις επικρατούσες περιπτώσεις δεν διακρίνονται σοβαρές αποκλίσεις, με ελάχιστες εξαιρέσεις όπου ανέρχονται έως το 2,5.

5.7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ

Η εγκυρότητα του αποτελέσματος των χωρικών γεωτεχνικών μοντέλων υπόκειται κατά κύριο λόγο στο εύρος της αβεβαιότητας του γεωλογικού μέσου. Πλήρη πληροφόρηση άρα και πλήρη βεβαιότητα παρέχουν μόνο τα σημειακά δείγματα των 8 γεωτρήσεων. Όλα τα υπόλοιπα σημεία εμπεριέχουν, ανάλογα με τη θέση τους στο χώρο, ένα βαθμό αβεβαιότητας. Σημεία κοντινά στις 8 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις υπολογίζονται με μεγαλύτερη εγκυρότητα, σε αντίθεση με τα μακρινά σημεία. Η κάθε γεώτρηση δηλαδή, δρα σε μια ακτίνα επιρροής έναντι της αβεβαιότητας. Η ακτίνα επιρροής κάθε γεώτρησης ορίζεται στα 20 m. Όπως προκύπτει από το ακόλουθο Σχήμα, υπάρχουν περιοχές όπου επικαλύπτονται οι αντίστοιχες ακτίνες επιρροής, γεγονός που αυξάνει την εγκυρότητα των υπολογισμών.



Σχήμα 49: Ακτίνα επιρροής κάθε γεώτρησης έναντι της αβεβαιότητας

Στον Πίνακα 18 δίνεται η επίδραση της αβεβαιότητας στα μοντέλα, με βάση την επικάλυψη των ακτινών επιρροής των γεωτρήσεων. Ως πλήρης αβεβαιότητα ορίζεται η 4^η τάξη, ενώ η 1^η τάξη αντιστοιχεί σε περιοχές με τη μέγιστη πληροφορία.

Πίνακας 18: Επίδραση της αβεβαιότητας έναντι του βαθμού επικάλυψης

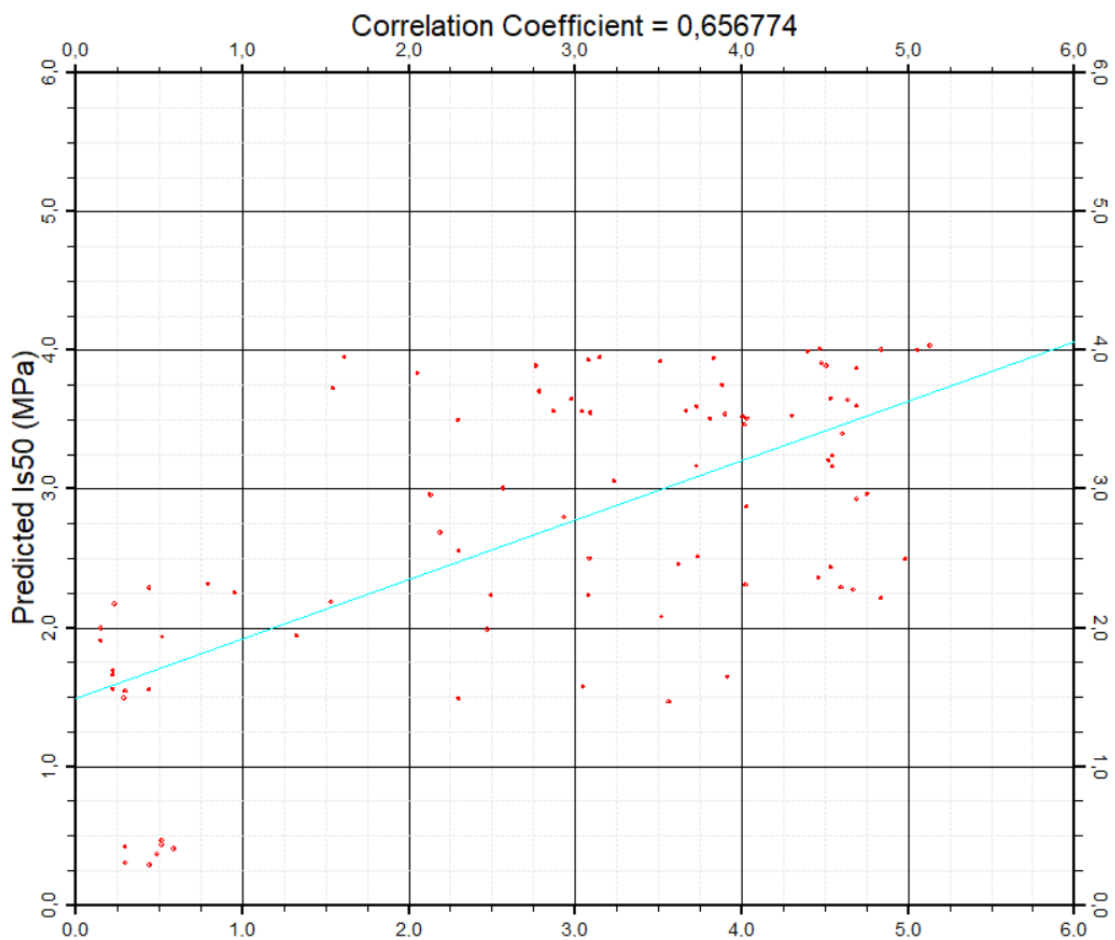
Βαθμός επικάλυψης	Επίδραση αβεβαιότητας
0	4 ^{ης} τάξης
1	3 ^{ης} τάξης
2	2 ^{ης} τάξης
3	1 ^{ης} τάξης

Ο τομέας 8 θεωρείται ο πιο έγκυρος αναφορικά με τα αποτελέσματα που δίνει, καθώς εντάσσεται στην κατηγορία 1^{ης} τάξης. Αντίθετα οι τομείς 5 και 11 δεν έχουν καμία επιρροή από τις κοντινές σε αυτούς γεωτρήσεις για αυτό και χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη αβεβαιότητα 4^{ης} τάξης.

5.7.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΥΠΟΥ KRAJEWSKI

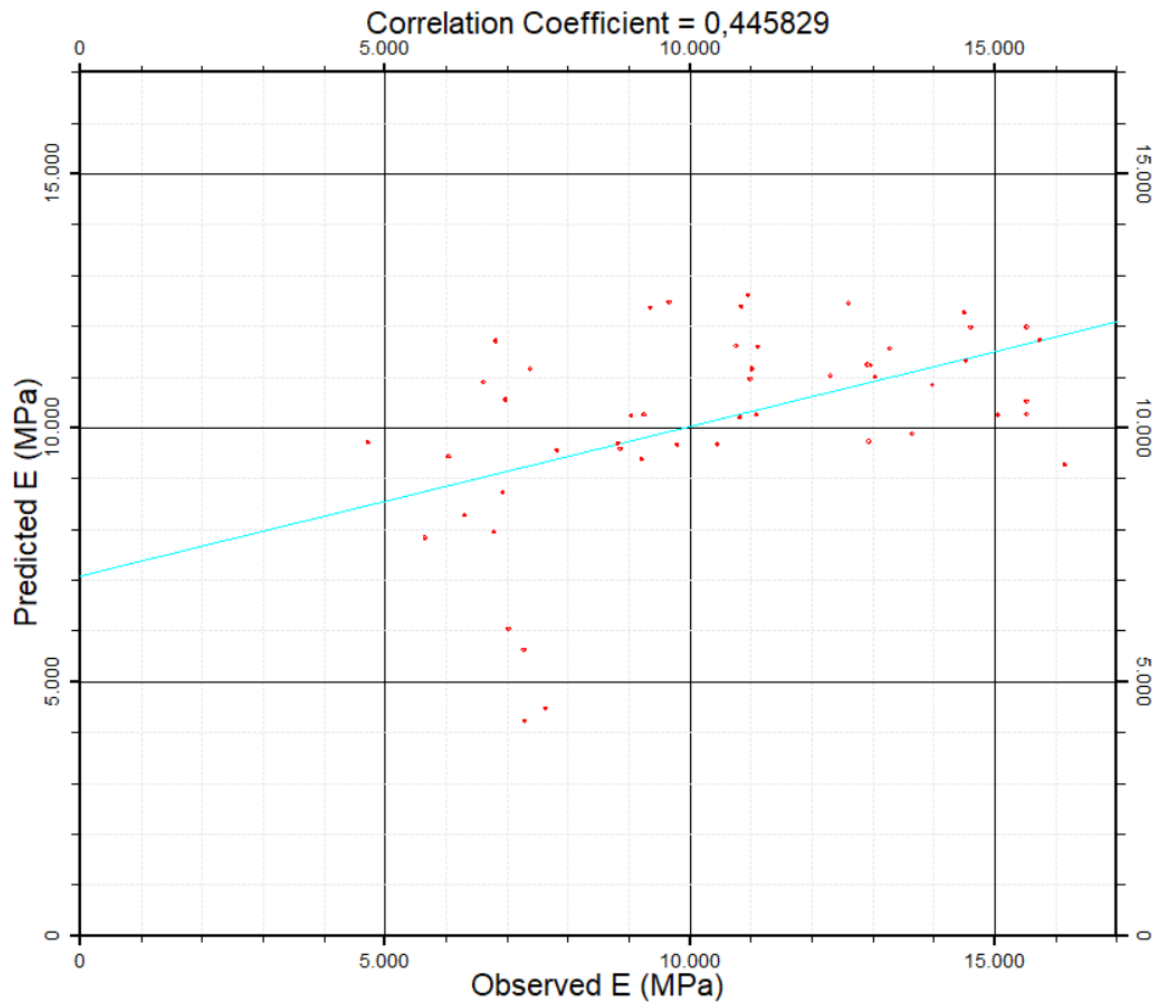
Προκειμένου να δοθεί ένα μέτρο ακρίβειας των μοντελοποιήσεων (validation), ώστε να ελεγχθεί η εγκυρότητα του αποτελέσματος της μελέτης, σχεδιάστηκαν γραφήματα τύπου Krajewski για κάθε γεωτεχνικό χαρακτηριστικό. Τα διαγράμματα τύπου Krajewski είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο όπου μέσω της κλίσης τους υπολογίζεται ο βαθμός συσχέτισης των παρατηρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών για τα εξεταζόμενα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Παρέχεται δηλαδή μια ποσοτική σύγκριση μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και του μοντέλου που κατασκευάστηκε. Ο βαθμός συσχέτισης λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 όπου η τιμή 0 αντιπροσωπεύει την ελάχιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, ενώ η τιμή 1 αντιπροσωπεύει τη τέλεια συσχέτιση που είναι και το ζητούμενο.

Σύμφωνα με γράφημα τύπου Krajewski για το Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is (50) (Σχήμα 50) το τρισδιάστατο μοντέλο απεικόνισης που κατασκευάστηκε, συσχετίζεται σε βαθμό 0,66 με τις πραγματικές δοθείσες τιμές. Όπως παρατηρείται, οι περισσότερες τιμές του τρισδιάστατου μοντέλου εναρμονίζονται σε αποδεκτό βαθμό με τις πραγματικές τιμές.



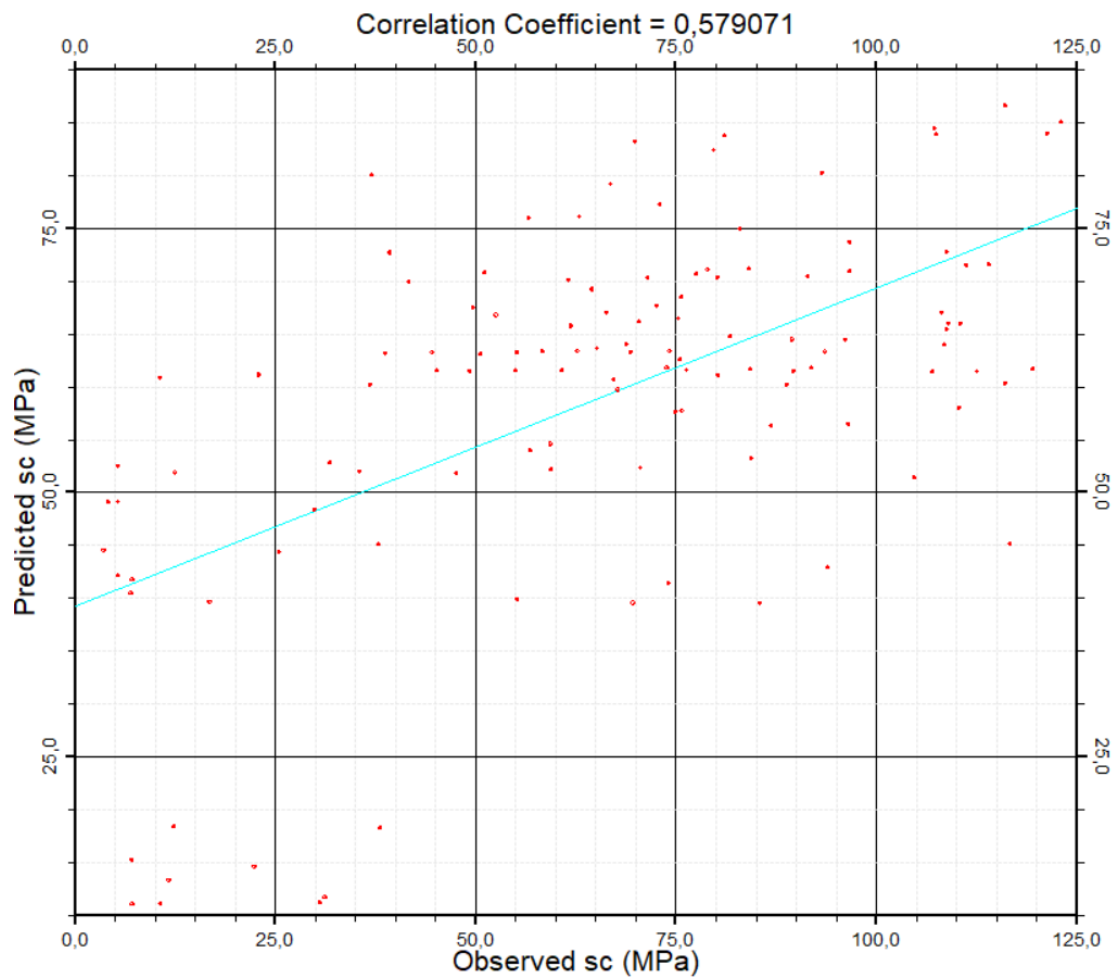
Σχήμα 50: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Δείκτη Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση Is (50)

Για το Μέτρο Ελαστικότητας E η αντίστοιχη ανάλυση με διάγραμμα τύπου Krajewski, έδωσε βαθμό συσχέτισης 0,44 μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών.



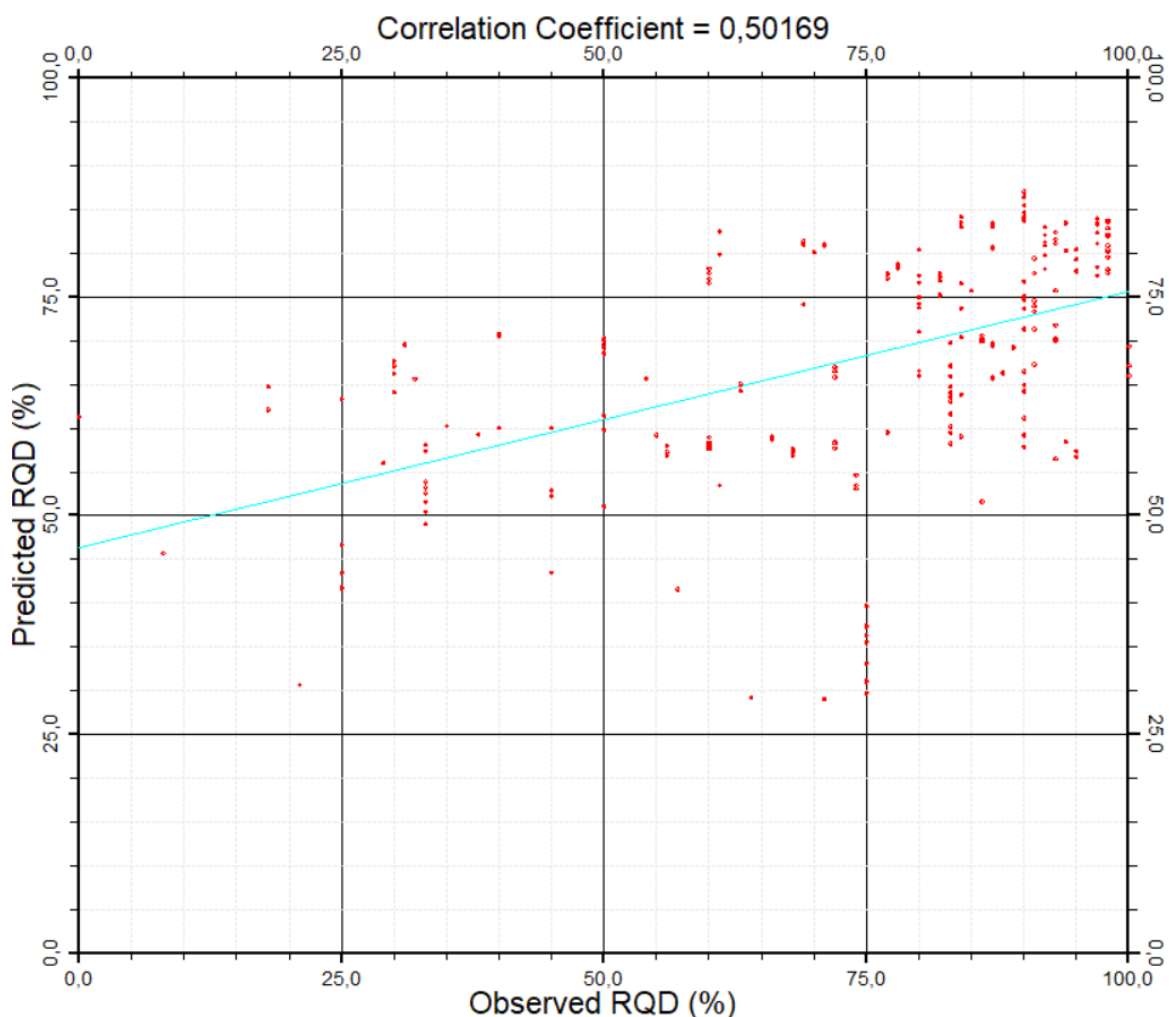
Σχήμα 51: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Μέτρου Ελαστικότητας E

Για τη Μονοαξονική Αντοχή σ_c η αντίστοιχη ανάλυση με διάγραμμα τύπου Krajewski, έδωσε βαθμό συσχέτισης 0,58 μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών.



Σχήμα 52: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Μονοαξονικής Αντοχής σ_c

Για το Δείκτη Ποιότητας της Βραχώμαζας RQD η αντίστοιχη ανάλυση με διάγραμμα τύπου Krajewski, έδωσε βαθμό συσχέτισης 0,50 μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών.



Σχήμα 53: Συσχέτιση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών Δείκτη Ποιότητας RQD

Επομένως, για όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις γίνεται μια καλή και αποδεκτή συναρμογή των μοντέλων που κατασκευάστηκαν σε σχέση με τις πραγματικές υφιστάμενες συνθήκες. Επιπλέον, σχετικά με μελλοντικούς ελέγχους φαίνεται ότι υπάρχει ένα μοντέλο που μπορεί να περιγράψει επαρκώς την πραγματικότητα.

5.8. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Για την καλύτερη επεξεργασία του προβλήματος, υιοθετήθηκαν οι διαφορετικές κλίμακες – κλάσεις τιμών όπως δόθηκαν παραπάνω. Ακολούθως, με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος RockWorks16, σχεδιάστηκαν δισδιάστατα χωρικά γεωτεχνικά μοντέλα ανά 10 m για κάθε υπό εξέταση χαρακτηριστικό. Η επιφάνεια χωρίστηκε σε 15 ισομεγέθεις τομείς όπως στο παρακάτω σκαρίφημα. Σε κάθε τομέα δόθηκε η αντίστοιχη τιμή σύμφωνα με τη μέθοδο παρεμβολής που έχει επιλεγθεί.

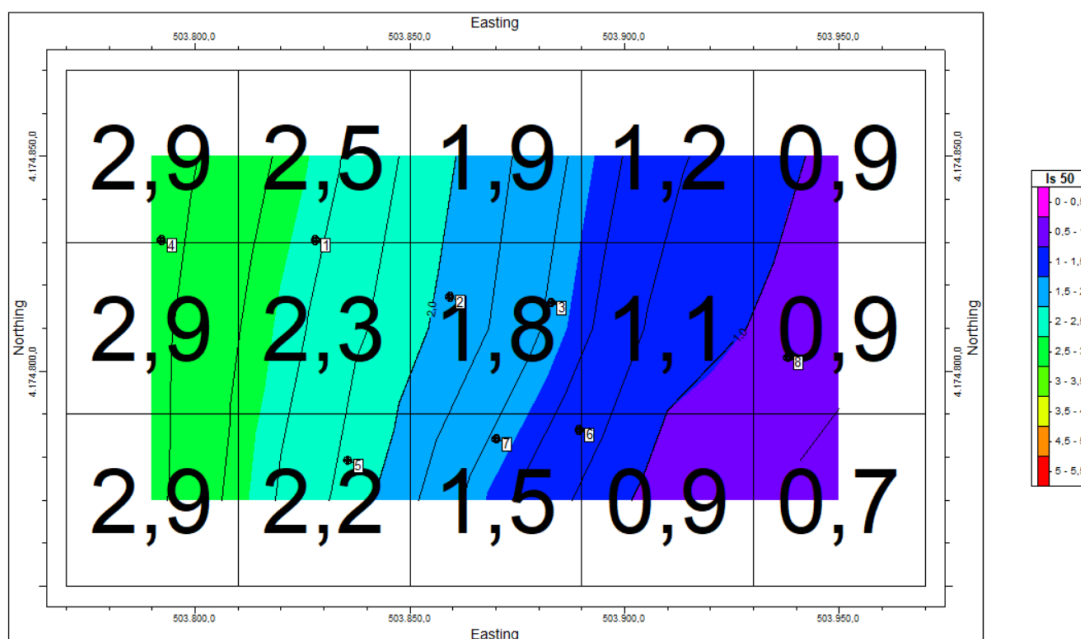
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Σχήμα 54: Σκαρίφημα τομέων

Στη συνέχεια έγινε η αντιστοίχιση των τιμών κάθε χαρακτηριστικού με τους βαθμούς Α έως Ε, όπως δόθηκαν. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρικής κατανομής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για τα απόλυτα υψόμετρα $z = + 40 \text{ m}$ και $z = + 0 \text{ m}$ και οι ανάλογες τιμές αυτών. Στους πίνακες Π9 έως Π16 του Παραρτήματος παρατίθενται οι αναλυτικές βαθμολογίες για κάθε απόλυτο υψόμετρο.

Δείκτης Σημειακής Φόρτισης Is50

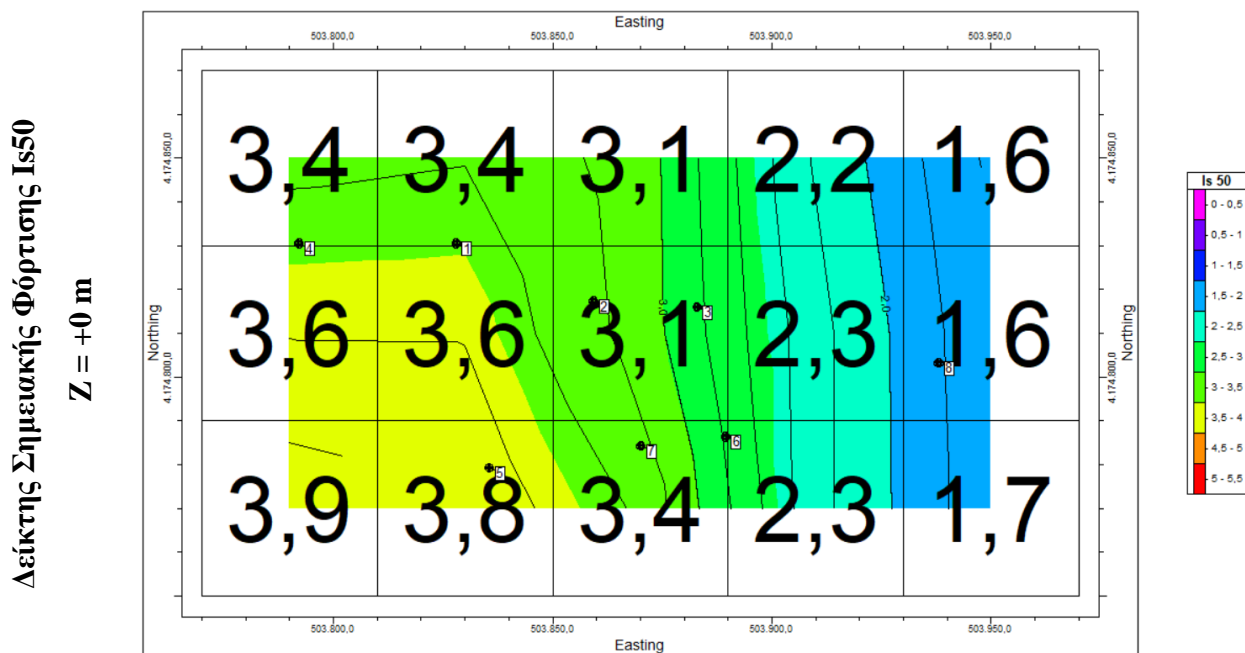
Z = +40 m



Σχήμα 55: Χωρική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης Is50 σε z = +40 m

Πίνακας 19: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε z = +40 m

Τομέας	Τιμή Δείκτη Is50 (MPa)	Βαθμός
1	2,9	Γ
2	2,5	Γ
3	1,9	Δ
4	1,2	Δ
5	0,9	Ε
6	2,9	Γ
7	2,3	Γ
8	1,8	Δ
9	1,1	Δ
10	0,9	Ε
11	2,9	Γ
12	2,2	Δ
13	1,5	Δ
14	0,9	Ε
15	0,7	Ε

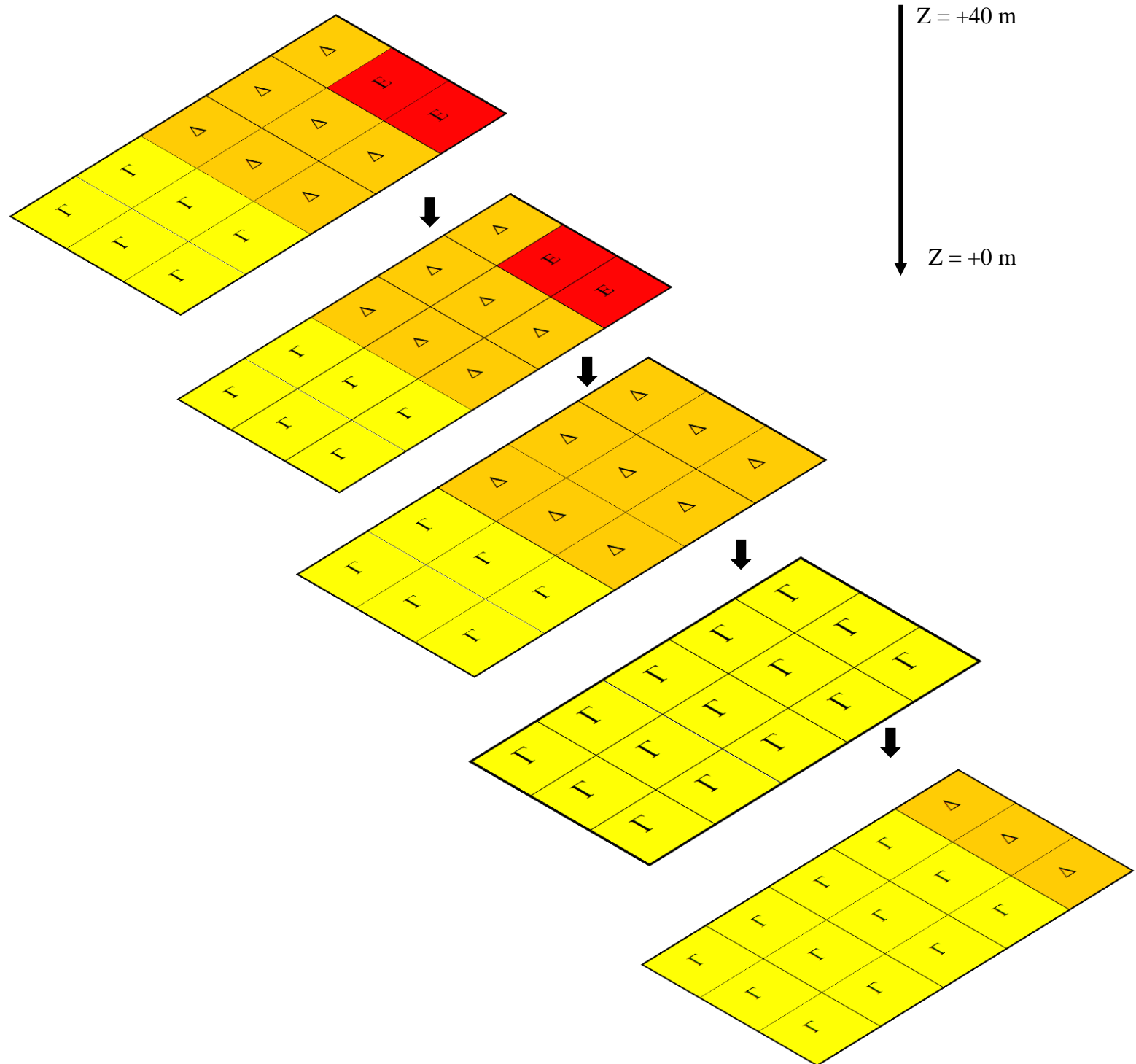


Σχήμα 56: Χωρική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης Is50 σε $z = +0 \text{ m}$

Πίνακας 20: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +0 \text{ m}$

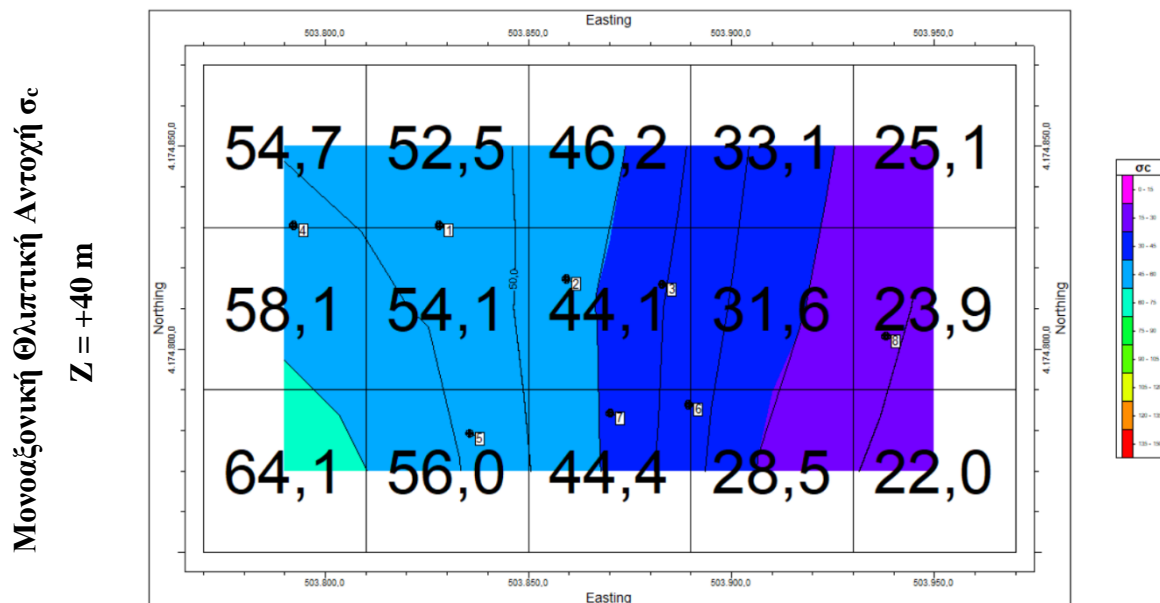
Τομέας	Τιμή Δείκτη Is50 (MPa)	Βαθμός
1	3,4	Γ
2	3,4	Γ
3	3,1	Γ
4	2,2	Γ
5	1,6	Γ
6	3,6	Γ
7	3,6	Γ
8	3,1	Γ
9	2,3	Γ
10	1,6	Δ
11	3,9	Γ
12	3,8	Γ
13	3,4	Γ
14	2,3	Γ
15	1,7	Δ

Στο Σχήμα 57 αποτυπώνεται η συνολική κατανομή του Δείκτη Ανισοτροπίας της Αντοχής σε σημειακή φόρτιση I_s (50) σε διαγράμματα ανά 10 m από το απόλυτο υψόμετρο +40 m έως +10 m. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές με δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες κλάσης E, ενώ καθώς βελτιώνεται η χρωματική αναλογία, βελτιώνονται και οι τιμές που λαμβάνουν οι αντίστοιχες περιοχές σε κλάσεις Δ και Γ.



Σχήμα 57: Συνολική κατανομή Δείκτη Σημειακής Φόρτισης I_s 50

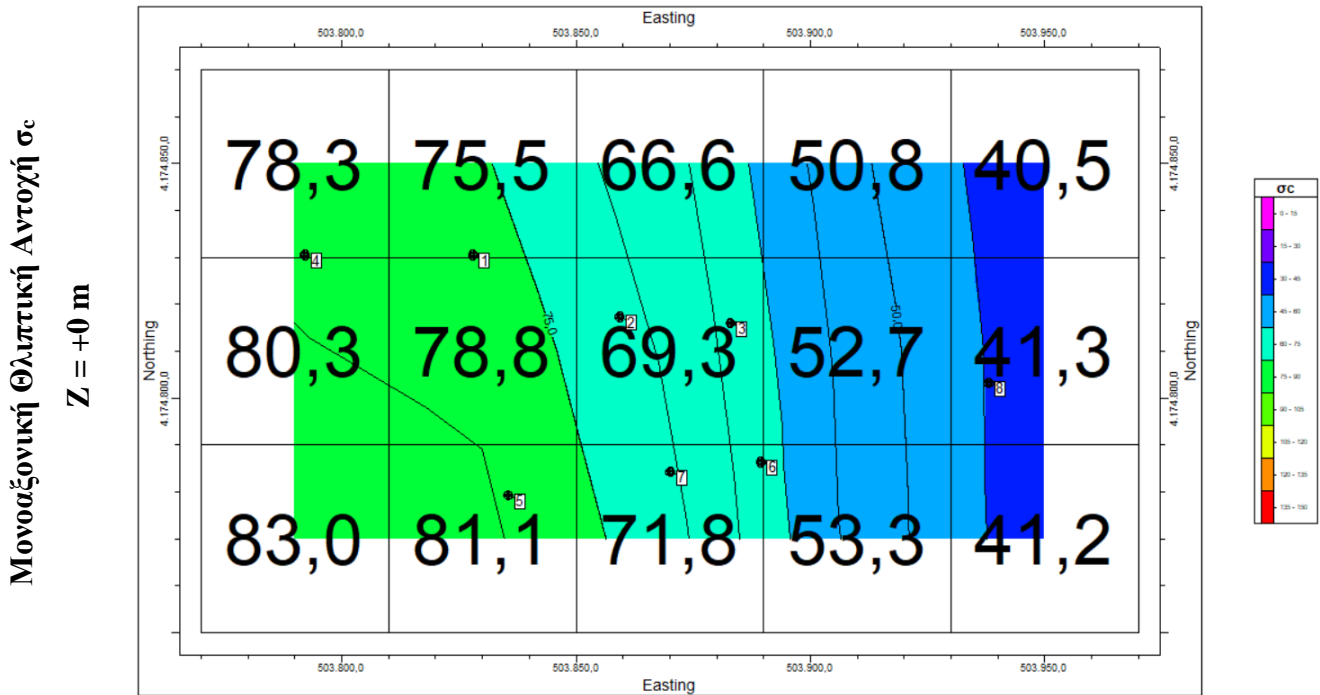
Ακολουθεί η αντιστοίχιση των τιμών της Μονοαξονικής Αντοχής σε Θλίψη με τους βαθμούς Α έως Ε. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρικής κατανομής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για τα απόλυτα υψόμετρα $z = +40\text{ m}$ και $z = +0\text{ m}$ και οι ανάλογες τιμές αυτών.



Σχήμα 58: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής σε $z = +40\text{ m}$

Πίνακας 21: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +40\text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μονοαξονικής Αντοχής σ_c (MPa)	Βαθμός
1	54,7	Γ
2	52,5	Γ
3	46,2	Δ
4	33,1	Δ
5	25,1	Δ
6	58,1	Γ
7	54,1	Γ
8	44,1	Δ
9	31,6	Δ
10	23,9	Ε
11	64,1	Γ
12	56,0	Γ
13	44,4	Δ
14	28,5	Δ
15	22,0	Ε

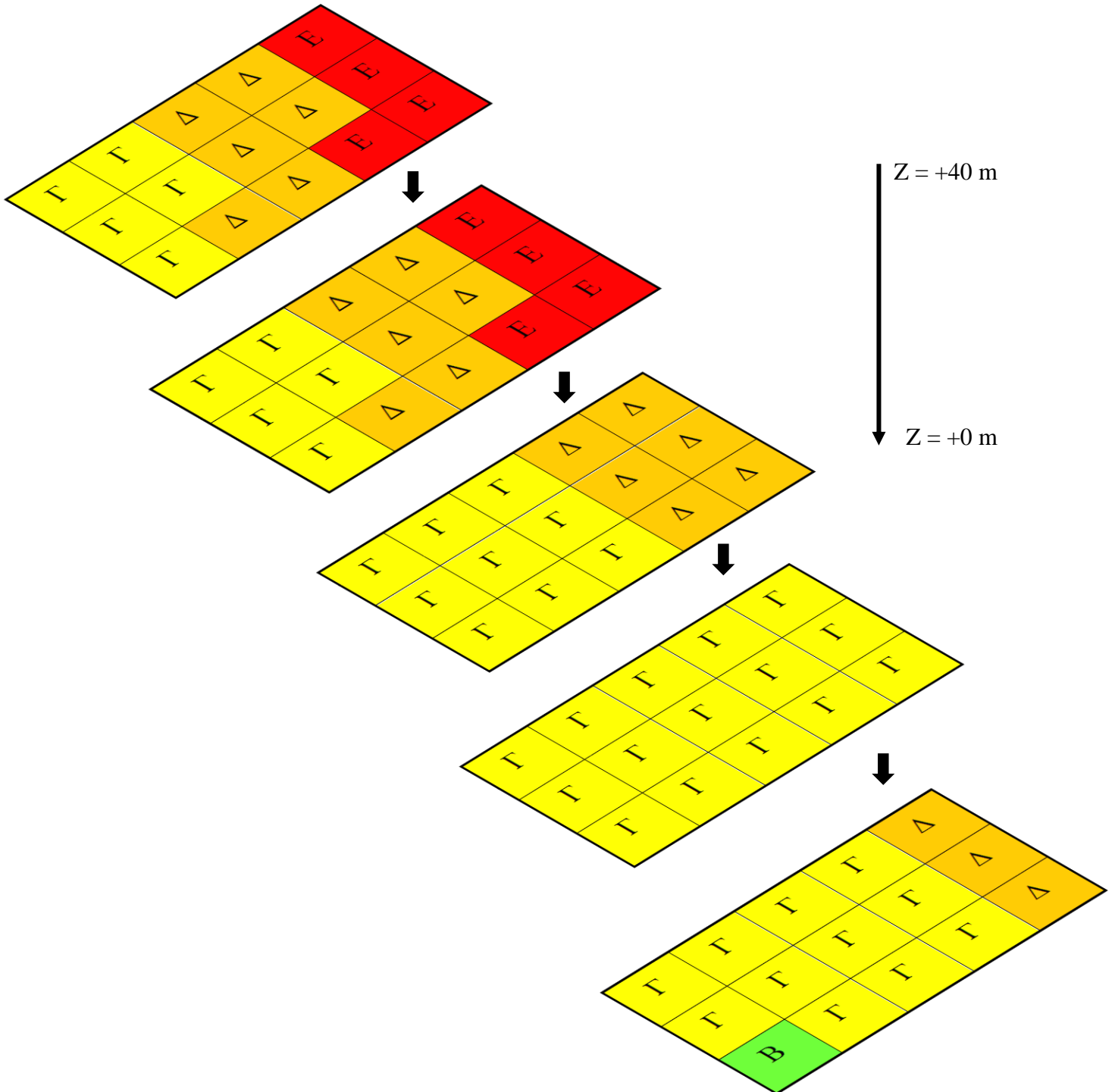


Σχήμα 59: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής σε $z = +0$ m

Πίνακας 22: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +0$ m

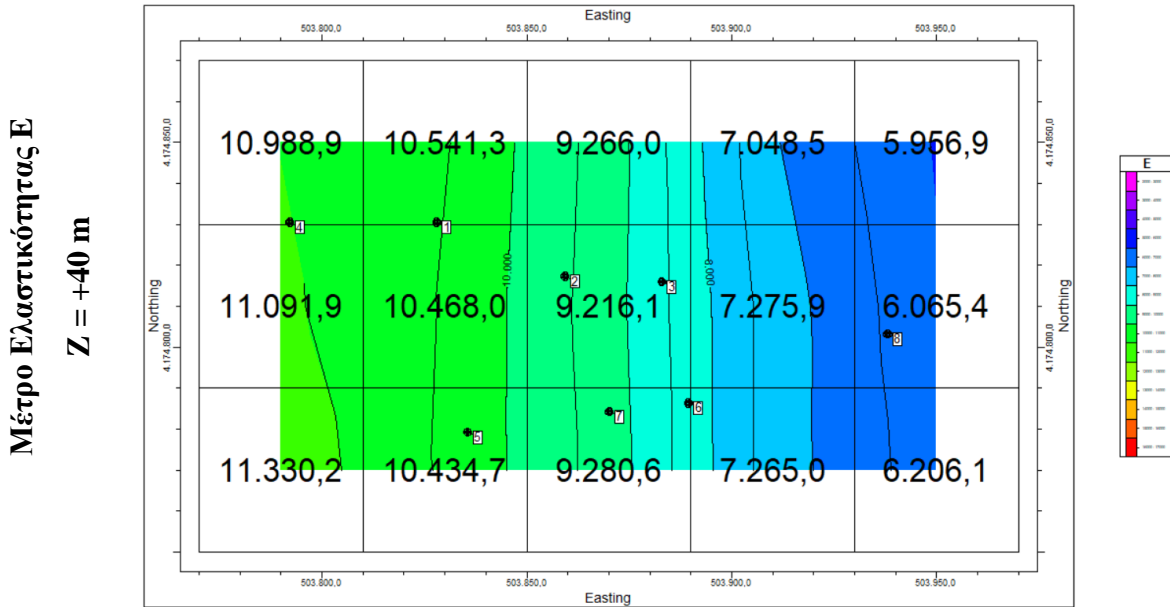
Τομέας	Τιμή Μονοαξονικής Αντοχής σ_c (MPa)	Βαθμός
1	78,3	Γ
2	75,5	Γ
3	66,6	Γ
4	50,8	Γ
5	40,5	Δ
6	80,3	Γ
7	78,8	Γ
8	69,3	Γ
9	52,7	Γ
10	41,3	Δ
11	83,0	Γ
12	81,1	Γ
13	71,8	Γ
14	53,3	Γ
15	41,2	Δ

Στο Σχήμα 60 αποτυπώνεται η συνολική κατανομή της Μονοαξονικής Αντοχής σ_c σε διαγράμματα ανά 10 m από το απόλυτο υψόμετρο +40 m έως + 10 m. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές με δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες κλάσης E, ενώ καθώς βελτιώνεται η χρωματική αναλογία, βελτιώνονται και οι τιμές που λαμβάνουν οι αντίστοιχες περιοχές σε κλάσεις Δ και Γ.



Σχήμα 60: Συνολική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής

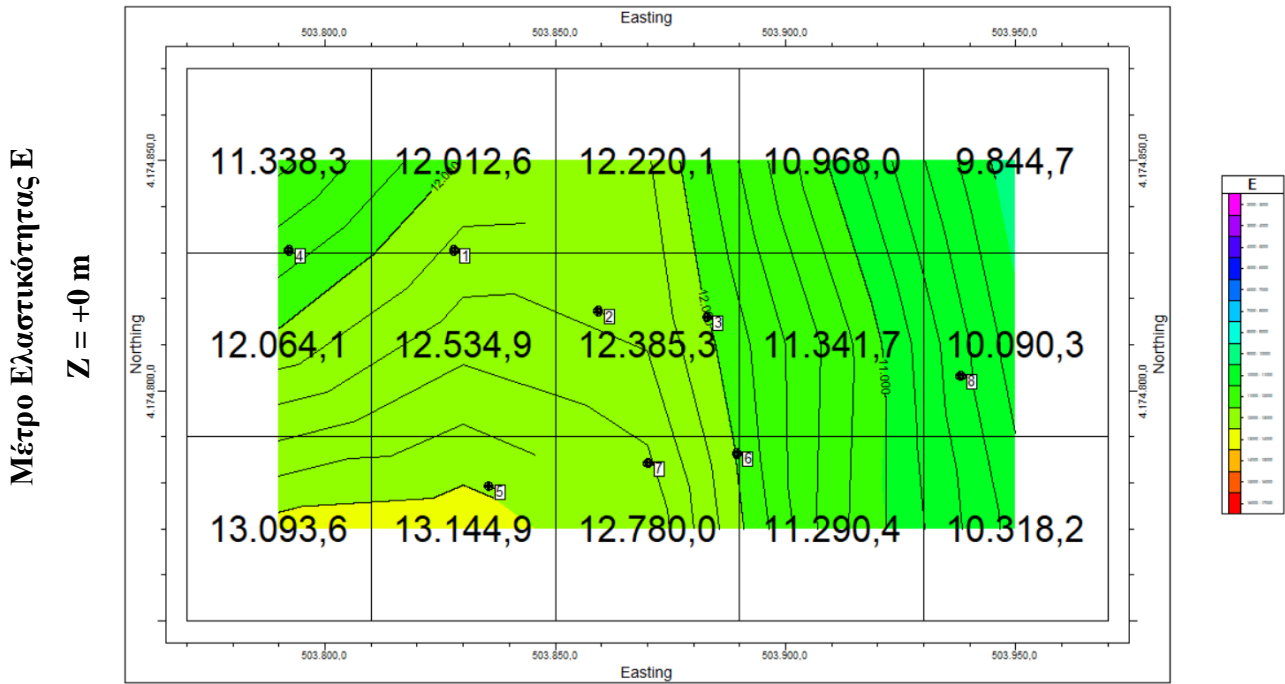
Ακολουθεί η αντιστοίχιση των τιμών του Μέτρου Ελαστικότητας E με τους βαθμούς Α έως Ε. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρικής κατανομής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για τα απόλυτα υψόμετρα $z = +40 \text{ m}$ και $z = +0 \text{ m}$ και οι ανάλογες τιμές αυτών.



Σχήμα 61: Χωρική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας σε $z = +40 \text{ m}$

Πίνακας 23: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +40 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας E (MPa)	Βαθμός
1	10.988,9	Β
2	10.541,3	Β
3	9.266,0	Γ
4	7.048,5	Γ
5	5.956,9	Γ
6	11.091,9	Β
7	10.468,0	Β
8	9.216,1	Γ
9	7.275,9	Γ
10	6.065,4	Γ
11	11.330,2	Β
12	10.434,7	Β
13	9.280,6	Γ
14	7.265,0	Γ
15	6.206,1	Γ

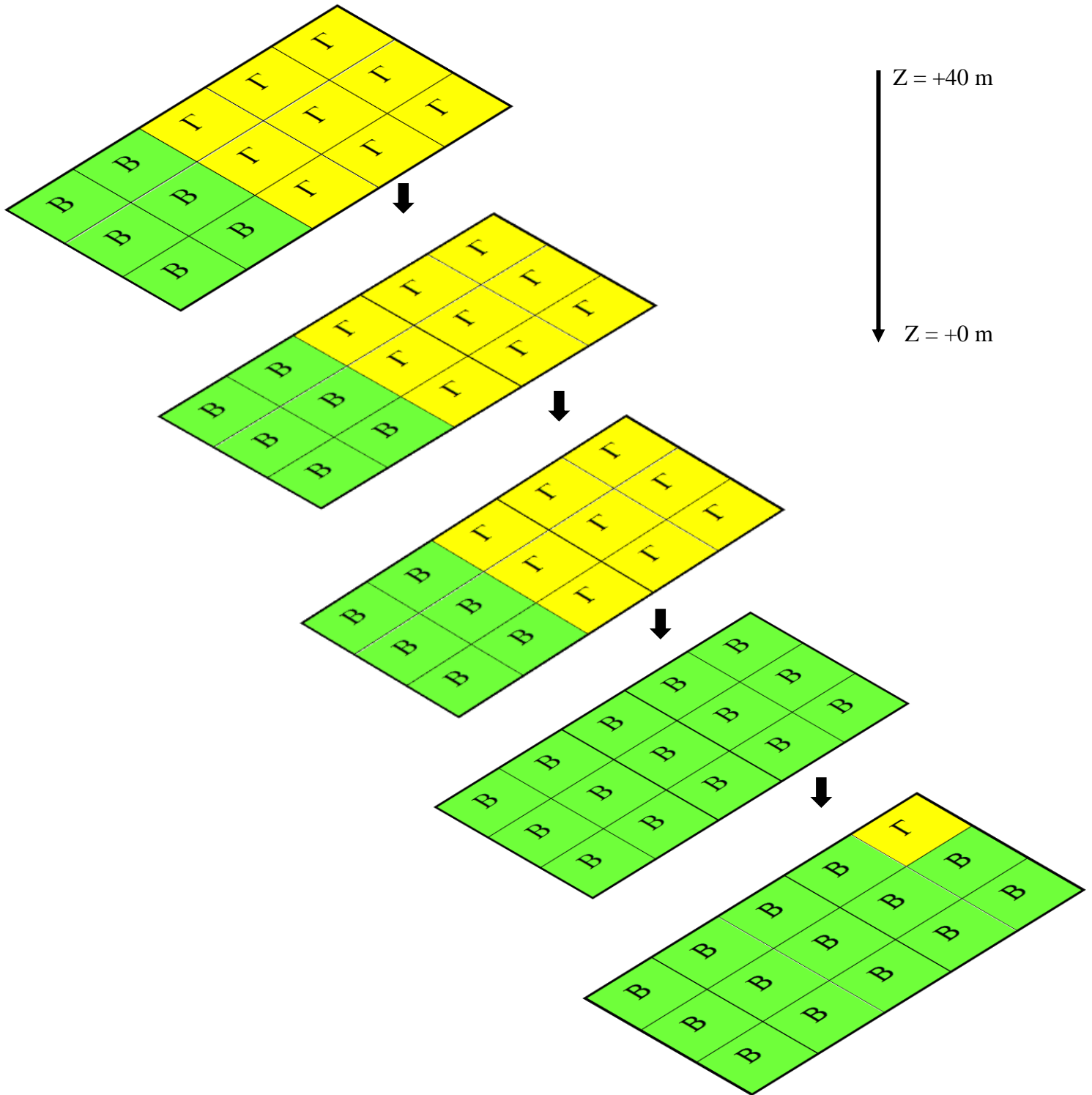


Σχήμα 62: Χωρική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας σε $z = +0 \text{ m}$

Πίνακας 24: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +0 \text{ m}$

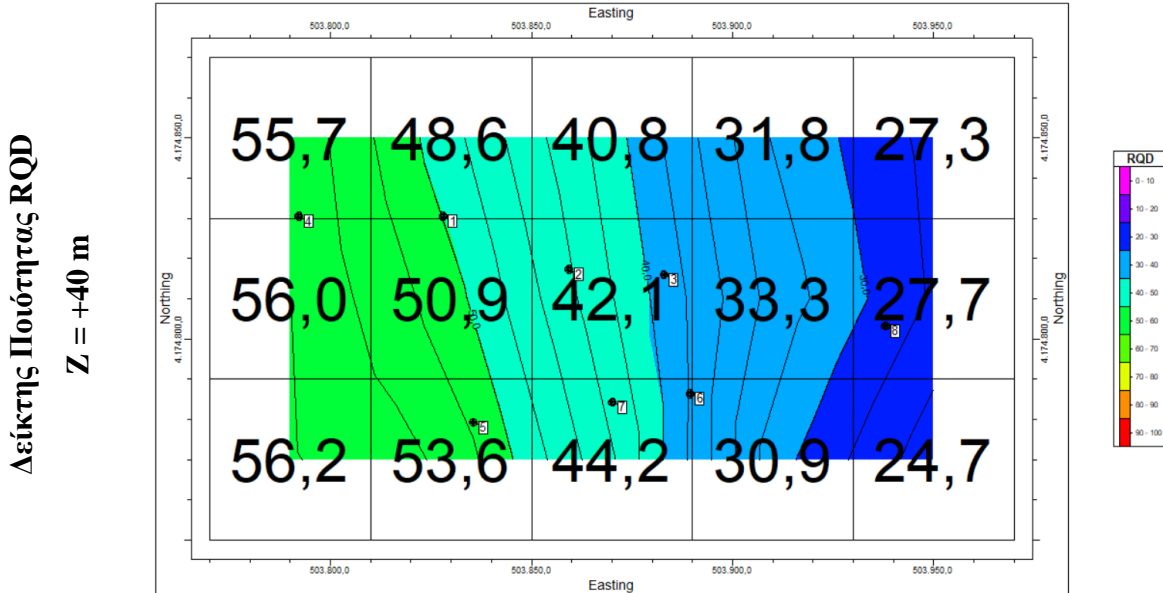
Τομέας	Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας E (MPa)	Βαθμός
1	11.383,3	B
2	12.012,6	B
3	12.220,1	B
4	10.968,0	B
5	9.844,7	Γ
6	12.064,1	B
7	12.534,9	B
8	12.385,3	B
9	11.341,7	B
10	10.090,3	B
11	13.093,6	B
12	13.144,9	B
13	12.780,0	B
14	11.290,4	B
15	10.318,2	B

Στο Σχήμα 63 αποτυπώνεται η συνολική κατανομή του Μέτρου Ελαστικότητας E σε διαγράμματα ανά 10 m από το απόλυτο υψόμετρο +40 m έως + 10 m. Με κίτρινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές με τις υποδεέστερες γεωτεχνικές συνθήκες κλάσης Γ, ενώ καθώς βελτιώνεται η χρωματική αναλογία σε πράσινο, βελτιώνονται και οι τιμές που λαμβάνουν οι αντίστοιχες περιοχές σε κλάση Β.



Σχήμα 63: Συνολική κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας

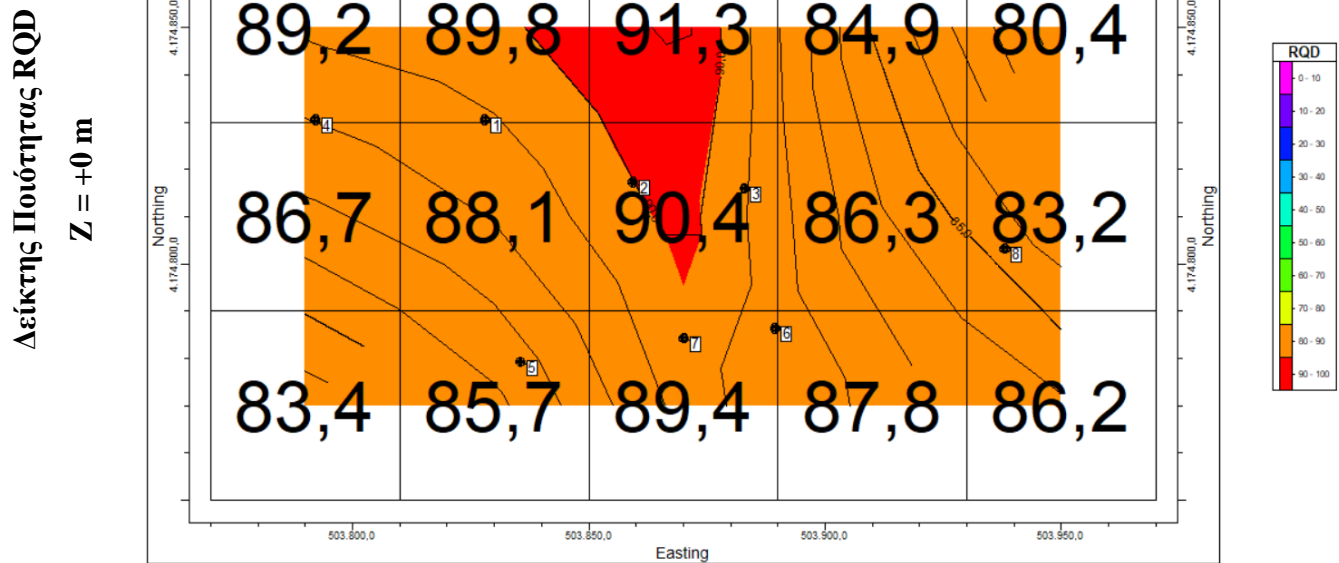
Ακολουθεί η αντιστοίχιση των τιμών του Δείκτη Ποιότητας RQD με τους βαθμούς Α έως Ε. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα χωρικής κατανομής των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για τα απόλυτα υψόμετρα $z = +40 \text{ m}$ και $z = +0 \text{ m}$ και οι ανάλογες τιμές αυτών



Σχήμα 64: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +40 \text{ m}$

Πίνακας 25: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +40 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Δείκτη RQD (MPa)	Βαθμός
1	55,7	Γ
2	48,6	Δ
3	40,8	Δ
4	31,8	Δ
5	27,3	Δ
6	56,0	Γ
7	50,9	Δ
8	42,1	Δ
9	33,3	Δ
10	27,7	Δ
11	56,2	Γ
12	53,6	Δ
13	44,2	Δ
14	30,9	Δ
15	24,7	Ε

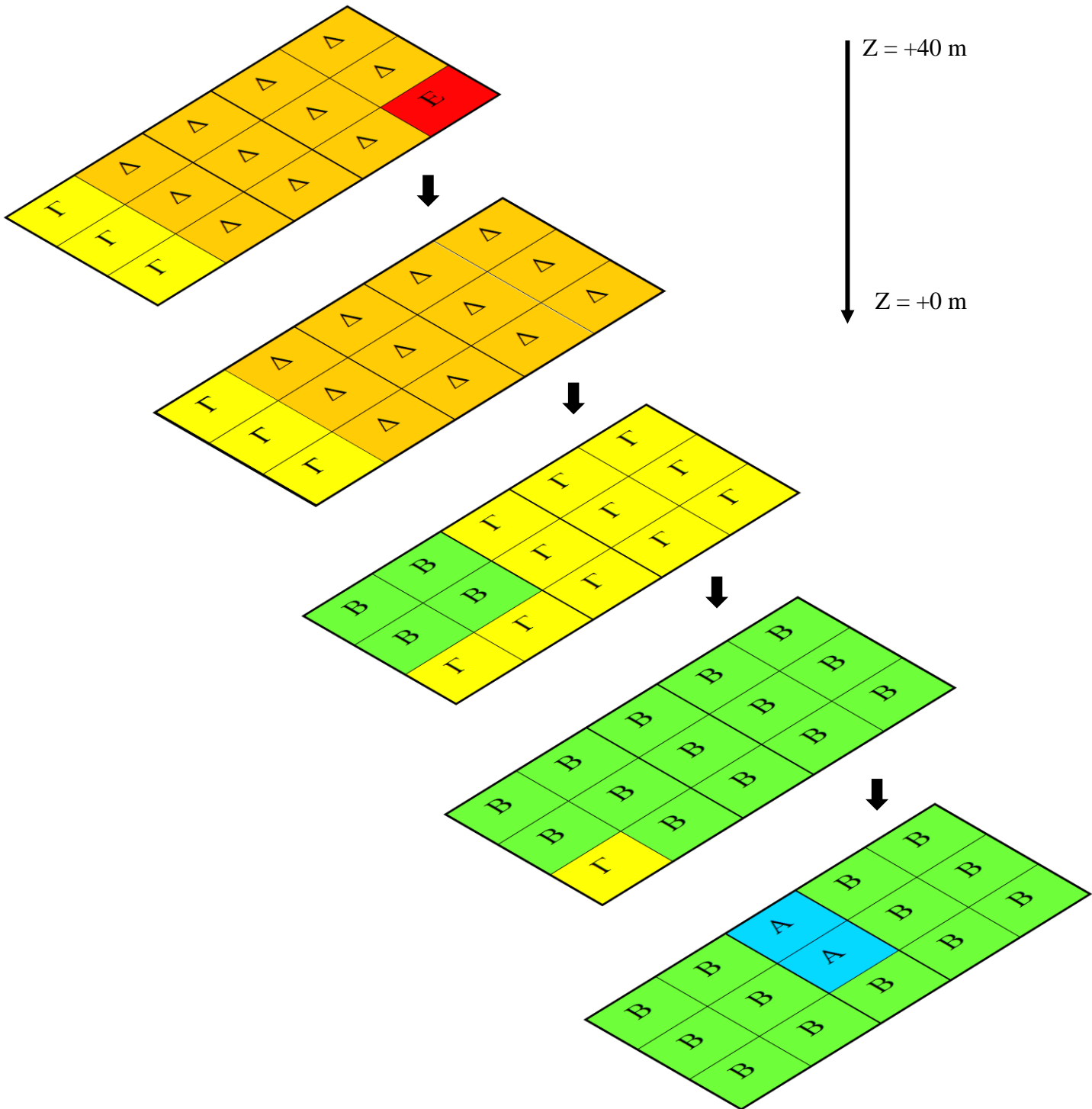


Σχήμα 65: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +0 m$

Πίνακας 26: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +0 m$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Δείκτη RQD (MPa)	Βαθμός
1	89,2	B
2	89,8	B
3	91,3	A
4	84,9	B
5	80,4	B
6	86,7	B
7	88,1	B
8	90,4	A
9	86,3	B
10	83,2	B
11	83,4	B
12	85,7	B
13	89,4	B
14	87,8	B
15	86,2	B

Στο Σχήμα 66 αποτυπώνεται η συνολική κατανομή του Δείκτη Ποιότητας Βραχώμαζας RQD σε διαγράμματα ανά 10 m από το απόλυτο υψόμετρο +40 m έως + 10 m. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές με τις υποδεέστερες γεωτεχνικές συνθήκες κλάσης E, ενώ καθώς βελτιώνεται η χρωματική αναλογία σε πράσινο, βελτιώνονται και οι τιμές που λαμβάνουν οι αντίστοιχες περιοχές σε κλάση B



Σχήμα 66: Συνολική κατανομή Δείκτη RQD

Η χωρική ανάλυση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου έργου έδωσε σημαντικές πληροφορίες για τα γεωτεχνικά χαρακτήρισα και πως αυτά μεταβάλλονται μεταξύ των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Όπως είναι και αναμενόμενο, από την κατανομή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σ_c , I_s50 , E και RQD στο αντίστοιχο βάθος, διακρίνεται σταδιακή βελτίωση τους καθώς αυξάνεται το βάθος. Πιο συγκεκριμένα, οι καλύτερες γεωτεχνικές συνθήκες εντοπίζονται στην περιοχή του Ανώτερου Μαρμάρου, ενώ οι «κακές» γεωτεχνικές συνθήκες εντοπίζονται στα μικρά βάθη της περιοχής των Αργιλικών σχηματισμών. Επιπλέον, οι τομείς 1, 2, 6, 7, 11 και 12, δηλαδή οι τομείς του αριστερού τμήματος του μοντέλου εμφανίζονται με σχετικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά, σε αντίθεση με τους τομείς 5, 10 και 15 του δεξιού τμήματος.

5.9. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΘΕΣΗΣ

Το υπόγειο έργο έχει κατασκευαστεί στο βορειοδυτικό τμήμα του πάρκου, εντός της λοφώδους δομής που αναπτύσσεται εκεί με μέγιστο απόλυτο υψόμετρο που φτάνει τα +54 m, στο σχηματισμό του Ανώτερου Μαρμάρου.

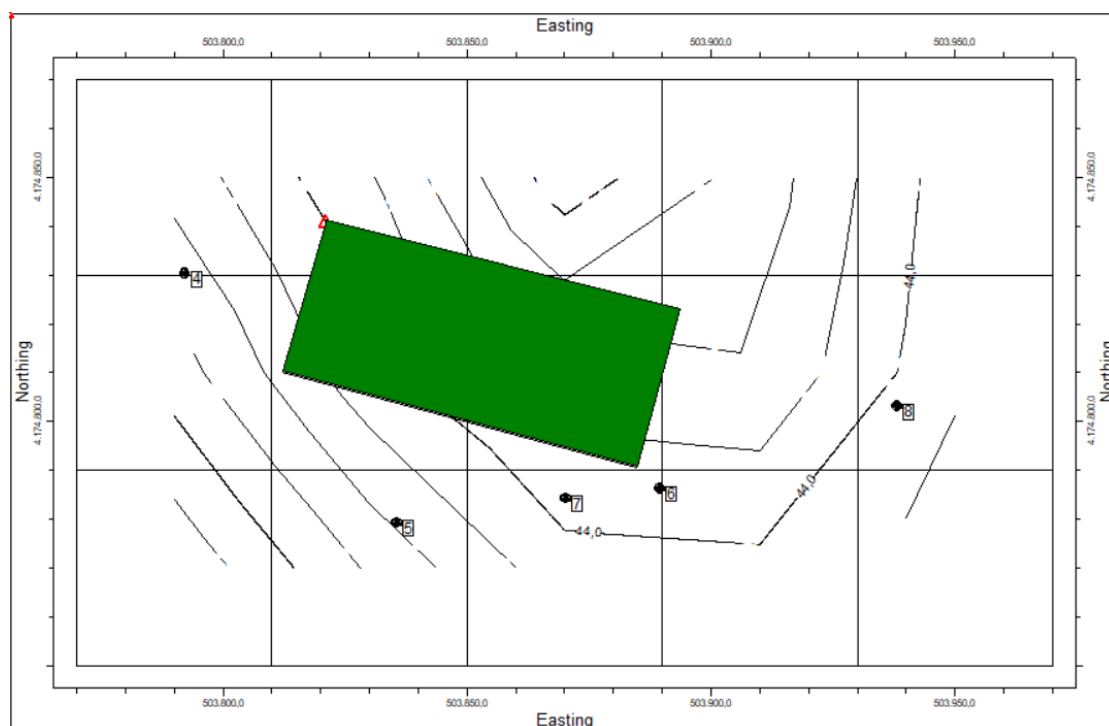


Σχήμα 67: Εσωτερικό υπόγειου χώρου

Το δάπεδο του υπόγειου έργου αναπτύσσεται στο επίπεδο των +12 m και μέγιστο ύψος φτάνει τα 5,5 m. Το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 20 m έως 35 m περίπου. Ο υπόγειος χώρος έχει διαστάσεις 75 m x 33 m, καταλαμβάνοντας μια συνολική έκταση 2.475 m² (Benardos et al, 2009). Σύμφωνα με τις δοθείσες συντεταγμένες των ορίων του χώρου (Πίνακας 23), το έργο αναπτύσσεται κυρίως στους τομείς 2, 7 και 8 (Σχήμα 68).

Πίνακας 27: Συντεταγμένες ορίων υπόγειου έργου

Σημείο	X	Y
Y1	503821,23	4174841,99
Y2	503893,55	4174822,13
Y3	503884,81	4174790,31
Y4	503812,49	4174810,17



Σχήμα 68: Θέση υπόγειου έργου

Οι τομείς 2, 7 και 8 όπως προκύπτει τη χωρική γεωτεχνική μοντελοποίηση που προηγήθηκε, αποδεικνύονται από τους πιο κατάλληλους για την κατασκευή ενός τέτοιου εγχειρήματος, καθώς διαθέτουν βελτιωμένη γεωτεχνική συμπεριφορά, συγκριτικά με τους υπόλοιπους 12 τομείς, ιδιαίτερα σύμφωνα με το Δείκτη Ποιότητας της Βραχώμαζας RQD.

5.10. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Προκειμένου να δοθεί ένα μέτρο επίδρασης της αβεβαιότητας στη διαδικασία των μοντελοποιήσεων, κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις ανάλυσης της γεωτεχνικής συμπεριφοράς. Σε κάθε περίπτωση αυξάνεται η αβεβαιότητα του μοντέλου, λόγω έλλειψης γνώσης για τη διαδικασία που μελετάται, εκφρασμένη υπό τη μορφή σχετικού σφάλματος, στην περιοχή του Ανώτερου Μαρμάρου, όπου και έχει κατασκευαστεί το υπόγειο έργο, σε απόλυτο υψόμετρο +0 m.

Ορίζοντας την προηγούμενη ολοκληρωμένη ανάλυση ως «αποδεκτή», η σχετική αβεβαιότητα (σφάλμα) των ακόλουθων μοντέλων εκτιμάται ως η εκατοστιαία διαφορά:

$$X = \frac{|X_{\text{πειραματικό}} - X_{\text{αποδεκτό}}|}{X_{\text{αποδεκτό}}} \times 100$$

5.10.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Κατά την πρώτη περίπτωση η εν δυνάμει ανεπάρκεια του μοντέλου ελέγχθηκε με το γεωτεχνικό μοντέλο Μονοαξονικής Αντοχής σε Θλίψη. Το μοντέλο UCS κατασκευάστηκε βάσει της συσχέτισης των τιμών του Δείκτη Ανισορροπίας της Αντοχής σε Σημειακή Φόρτιση.

Σύμφωνα με τους Broch και Franklin (1972) ο μέσος όρος του δείκτη $I_s(50)$, που έχει προκύψει ύστερα από την εκτέλεση σημαντικού αριθμού δοκιμών, σε κυλινδρικής μορφής δοκίμια σε διαμετρική δοκιμή, μπορεί να συσχετισθεί με τη μονοαξονική αντοχή πετρώματος σε θλίψη του πετρώματος. Για δοκίμια με $D = 50 \text{ mm}$, βρέθηκε ότι:

$$UCS \approx 24 \cdot I_s$$

Επομένως για περισσότερα αποτελέσματα περί Μονοαξονικής Αντοχής, τα πειραματικά δεδομένα από την ανάλυση των πυρήνων των 8 δειγματοληπτικών γεωτρήσεων του Δείκτη Σημειακής Φόρτισης I_s50 διαφοροποιούνται ως ακολούθως.

Πίνακας 83: Τιμές Μονοαξονικής Αντοχής πετρώματος σε θλίψη του πετρώματος UCS (MPa)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ1	18,50	18,70	0,516	12,384
Γ1	20,20	20,50	1,323	31,752
Γ1	21,80	22,00	2,469	59,256
Γ1	23,50	23,70	3,516	84,384
Γ1	24,90	25,10	4,020	96,480
Γ1	26,00	26,60	3,083	73,992
Γ1	27,30	27,90	2,930	70,320
Γ1	29,50	30,55	3,230	77,520
Γ1	31,40	32,00	2,129	51,096
Γ1	32,40	32,90	2,124	50,976
Γ1	33,30	33,50	2,564	61,536
Γ1	35,10	35,80	4,688	112,512

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ2	21,80	22,30	0,439	10,536
Γ2	23,40	23,60	0,220	5,280
Γ2	25,40	25,60	0,220	5,280
Γ2	26,50	27,00	0,146	3,504
Γ2	27,70	27,90	4,981	119,544
Γ2	30,50	31,60	4,541	108,984
Γ2	34,00	34,60	4,028	96,672
Γ2	34,60	35,60	3,662	87,888
Γ2	36,30	37,25	3,727	89,448
Γ2	37,90	38,10	4,531	108,744
Γ2	39,50	39,70	3,882	93,168
Γ2	40,00	40,20	2,783	66,792

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ3	24,00	24,20	0,146	3,504
Γ3	25,60	26,00	0,230	5,520
Γ3	29,00	29,20	4,541	108,984
Γ3	31,40	31,60	3,809	91,416
Γ3	31,90	33,10	4,688	112,512
Γ3	36,00	36,60	5,054	121,296
Γ3	37,00	37,20	4,468	107,232
Γ3	37,70	38,60	4,395	105,480
Γ3	39,00	39,20	5,127	123,048
Γ3	40,10	40,50	4,834	116,016
Γ3	41,40	41,60	1,541	36,984
Γ3	42,20	42,40	4,478	107,472

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ4	12,20	12,50	4,012	96,288
Γ4	15,50	15,80	2,293	55,032
Γ4	17,60	17,90	4,299	103,176
Γ4	18,80	19,60	3,898	93,552
Γ4	20,00	20,70	3,090	74,160
Γ4	21,30	22,00	2,866	68,784
Γ4	24,50	25,30	4,005	96,120
Γ4	25,60	26,25	3,726	89,424
Γ4	26,60	26,80	4,520	108,480
Γ4	28,10	28,50	2,975	71,400
Γ4	28,90	29,10	4,634	111,216
Γ4	29,80	30,00	3,038	72,912

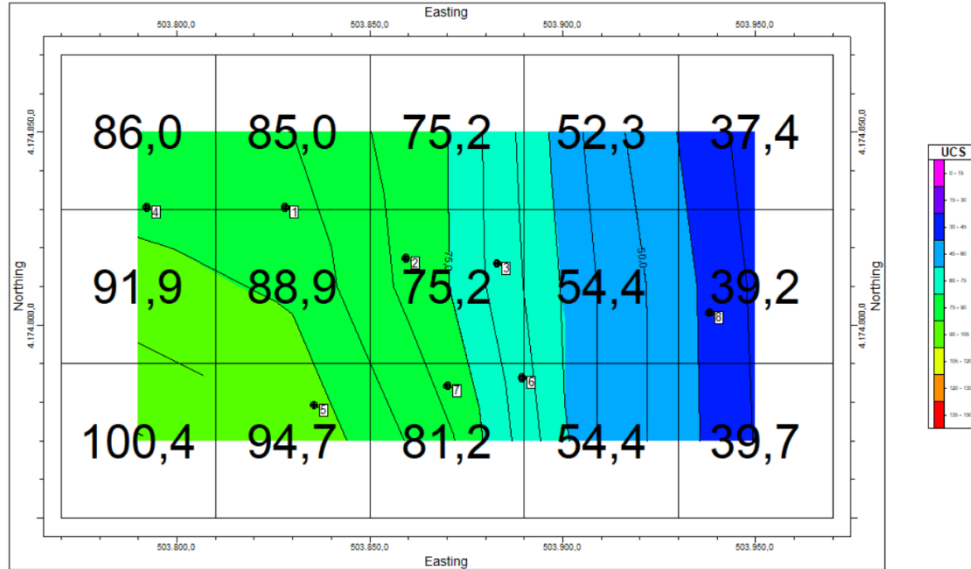
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ6	14,80	15,60	2,490	59,760
Γ6	17,40	17,80	3,076	73,824
Γ6	22,70	22,90	0,952	22,848
Γ6	23,10	24,00	0,439	10,536
Γ6	24,10	25,10	0,792	19,008
Γ6	27,60	28,30	1,531	36,744
Γ6	28,30	28,50	4,834	116,016
Γ6	29,10	29,95	4,667	112,008
Γ6	30,00	30,20	4,594	110,556
Γ6	30,70	30,90	4,458	106,992
Γ6	31,50	32,10	4,531	108,744
Γ6	34,10	34,30	4,750	114,000

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ5	11,30	11,70	4,834	116,016
Γ5	12,50	12,90	5,054	121,296
Γ5	14,10	14,60	2,051	49,224
Γ5	15,90	16,10	4,688	112,512
Γ5	18,10	18,40	3,510	84,240
Γ5	19,00	19,75	3,076	73,824
Γ5	20,90	21,50	3,146	75,504
Γ5	22,10	22,90	1,611	38,664
Γ5	23,20	23,90	3,828	91,872
Γ5	25,60	26,00	2,762	66,288
Γ5	26,00	26,20	4,506	108,144
Γ5	28,40	28,60	4,603	96,648

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ7	14,00	14,20	0,220	5,280
Γ7	14,40	14,60	0,294	7,056
Γ7	16,50	16,70	0,287	6,888
Γ7	19,70	19,90	3,560	85,440
Γ7	21,30	21,60	2,297	55,128
Γ7	23,20	24,00	3,044	73,056
Γ7	24,25	25,10	3,912	93,888
Γ7	28,40	28,60	3,618	86,832
Γ7	28,80	29,10	3,733	89,592
Γ7	29,50	29,70	2,297	55,128
Γ7	31,70	31,90	2,186	52,464
Γ7	33,00	33,30	4,027	96,648

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	Is50 (MPa)	UCS (MPa)
Γ8	5,40	5,60	0,103	2,472
Γ8	6,30	6,50	0,117	2,808
Γ8	6,70	6,90	0,132	3,168
Γ8	7,40	7,90	0,190	4,560
Γ8	9,50	9,70	0,220	5,280
Γ8	11,40	11,60	0,440	10,560
Γ8	15,20	16,00	0,294	7,056
Γ8	19,30	19,50	0,485	11,640
Γ8	20,10	20,70	0,586	11,064
Γ8	20,90	21,00	0,293	7,032
Γ8	21,70	22,20	0,513	12,312
Γ8	25,50	25,80	0,512	12,288

Με την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν 97 σημειακά αποτελέσματα Αντοχής σε Μονοαξονικής Θλίψη, εν αντιθέσει με τα 133 δείγματα που μελετήθηκαν εξ αρχής. Ακολουθώντας όμοια τη διαδικασία μοντελοποίησης, η χωρική κατανομή της Μονοαξονικής Αντοχής που προέκυψε είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 69: Χωρική κατανομή Μονοαξονικής Αντοχής UCS σε $z = +0 \text{ m}$

Η εκατοστιαία διαφορά κάθε τομέα από την ανάλυση με τα 133 σημειακά δείγματα αποτυπώνεται στο Σχήμα 70.

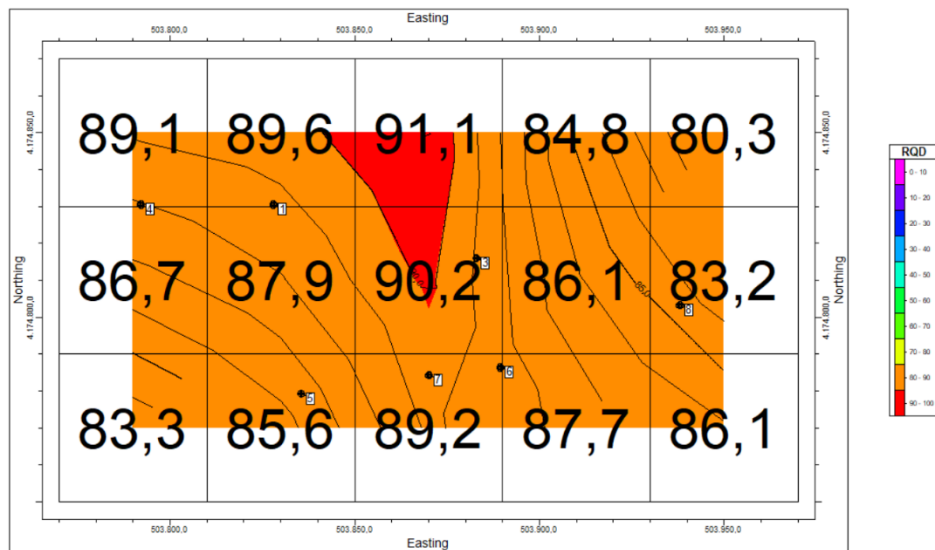
9,8%	12,6%	12,9%	3,0%	7,7%
14,4%	12,8%	8,5%	3,2%	5,1%
21,0%	16,8%	13,1%	2,1%	3,6%

Σχήμα 70: Ποσοστιαία διαφορά τομέων

Η μεγαλύτερη διαφορά (+ 21 %) εμφανίζεται στον τομέα 11, όπου διαφοροποιείται και η αντίστοιχη βαθμολογία του από Γ σε Β. Κατά μέσο όρο τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα διαφέρουν σε ποσοστό 7,6 %.

5.10.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ 7 ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Κατά τη δεύτερη περίπτωση, ελέγχθηκε η επάρκεια του μοντέλου εν απουσία των δεδομένων της κεντρικής γεώτρησης Γ2. Πιο συγκεκριμένα, αυξήθηκε η αβεβαιότητα του γεωτεχνικού μοντέλου RQD σε απόλυτο υψόμετρο +0 m. Το αρχικό αποδεκτό μοντέλο αποτελούταν από 330 σημειακά εργαστηριακά αποτελέσματα, ενώ πλέον αξιολογούνται 289 αποτελέσματα. Ακολουθώντας όμοια τη διαδικασία μοντελοποίησης, η χωρική κατανομή του Δείκτη RQD που προέκυψε είναι η ακόλουθη.



Σχήμα 71: Χωρική κατανομή Δείκτη RQD σε $z = +0 \text{ m}$

Η εκατοστιαία διαφορά κάθε τομέα από την ανάλυση με τα 289 σημειακά δείγματα αποτυπώνεται στο Σχήμα 72.

0,1%	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%
0%	0,2%	0,2%	0,2%	0%
0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%

Σχήμα 72: Ποσοστιαία διαφορά τομέων

Οι διαφορές των δύο μοντέλων που προκύπτουν θεωρούνται αμελητέες καθώς κατά μέσο όρο διαφέρουν σε ποσοστό 0,14 %.

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο παράγοντας της αβεβαιότητας σε υπόγειες κατασκευές παίζει σημαντικό ρόλο καθώς ενέχονται κίνδυνοι που δεν είναι εύκολα εντοπίσιμοι άρα και αντιμετώπισιμοι. Πέραν όμως του γεγονότος αυτού, ο μηχανικός, με εργαλείο του την χωρική ανάλυση μπορεί να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά σε αυτές τις προκλήσεις. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι ο τρόπος που επιδρά η αβεβαιότητα του γεωλογικού μέσου κατά την κατασκευή ενός υπόγειου έργου, με εφαρμογή στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α..

Οι τρεις βασικοί πυλώνες της εργασίας στους οποίους βασίστηκε η εξαγωγή των συμπερασμάτων είναι:

- Η σχολαστική γεωλογική και γεωτεχνική χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου έργου με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος RockWorks.
- Η αξιολόγηση τους και ο εντοπισμός πιθανών αβέβαιων περιοχών, ώστε να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας των χωρικών μοντελοποιήσεων.
- Η επίδραση της αβεβαιότητας στο τελικό συμπέρασμα.

Από γεωτεχνικής άποψης, δόθηκε λοιπόν ιδιαίτερη σημασία σε τέσσερα μεγέθη, μέσω των όποιων κρίθηκε το συνολικό συμπέρασμα. Επιλέχθηκε η Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη, ο Δείκτης Σημειακής Φόρτισης, το Μέτρο Ελαστικότητας και ο Δείκτης Ποιότητας Βραχώμαζας RQD. Πέραν το ότι για τα συγκεκριμένα μεγέθη υπήρχαν περισσότερα δεδομένα από τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, αποτελούν θεμέλια μεγέθη για την αξιολόγηση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς της περιοχής.

Μετά από πλήθος δοκιμών επιλέχθηκε η μέθοδος Αντίστροφου Τετραγώνου ως η καταλληλότερη μέθοδος παρεμβολής για τη χωρική μοντελοποίηση. Η επιλογή βασίστηκε αρχικά στη γενική γνώση της περιοχής και στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε με τον έλεγχο των διαγραμμάτων Krajewski. Σε κάθε περίπτωση, τα διάγραμμα αυτού του τύπου έδωσαν μια ποσοτική συσχέτιση άνω του 50% μεταξύ των παρατηρούμενων δεδομένων και του μοντέλου που κατασκευάστηκε για κάθε μέγεθος.

Μεγαλύτερη συνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων φαίνεται να εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από τη γεώτρηση Γ2 (τομέας 8), όπου υπάρχει η μεγαλύτερη επικάλυψη των ακτινών επιρροής των υπόλοιπων γεωτρήσεων. Επιπλέον, από τα διάφορα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, το μοντέλο του Δείκτη Ποιότητας της Βραχώμαζας (RQD) παρέχει την

μεγαλύτερη συνέπεια καθώς υπήρχε ο μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις (325 δείγματα), σε σχέση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη.

Αναφορικά με την επιλογή της κατάλληλης θέσης του υπόγειου έργου, η χωρική ανάλυση έδειξε ότι ορθά επιλέχθηκε το βάθος και οι συντεταγμένες των ορίων αυτού, καθώς στο σημείο αυτό εντοπίζονται οι βέλτιστες γεωτεχνικές συνθήκες.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την επικρατούσα κατάσταση της περιοχής μελέτης, επομένως θεωρείται μια αξιόλογη τεχνική διαχείρισης της αβεβαιότητας του γεωλογικού μέσου. Ειδικότερα θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη στις περιπτώσεις χάραξης σηράγγων, όπου ο εντοπισμός προβληματικών περιοχών με κακά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά δύναται να επιφέρει καθυστερήσεις και οικονομικές επιβαρύνσεις στις συμφωνημένες συμβάσεις των έργων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ1

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ1	17,60	18,10	47,51	1,905		7816	54	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	18,10	18,30					54	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	18,30	18,50					32	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	18,50	18,70	12,38		0,516		32	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	18,70	19,50					32	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	19,50	19,70	59,38			8852	87	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	19,70	20,20					87	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	20,20	20,50	31,75		1,323		87	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	20,50	21,30					72	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	21,30	21,50	56,73			8807	72	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	21,50	21,80					72	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	21,80	22,00	59,26		2,469		72	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	22,00	22,30					72	Πρασινοσχιστ.- Φυλλίτης
Γ1	22,30	22,80					100	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	22,80	22,90		4,475			100	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	22,90	23,50					100	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	23,50	23,70	84,38		3,516		80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	23,70	24,40					80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	24,40	24,60	74,86			15042	80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	24,60	24,90					80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	24,90	25,10	96,48		4,020		0	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	25,10	26,00					80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	26,00	26,60	88,77	5,205	3,083	15513	80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	26,60	27,30					80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	27,30	27,90	70,32		2,930		95	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	27,90	28,50					95	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	28,50	29,50					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ1	29,50	30,60	77,52		3,230		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	30,60	31,40					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	31,40	32,00	51,10		2,129		98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	32,00	32,40					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	32,40	32,90	64,45	5,738	2,124	10947	98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	32,90	33,30					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	33,30	33,50	61,54		2,564		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	33,50	34,40					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	34,40	34,60	80,10			15513	90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	34,60	35,10					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	35,10	35,80	49,61		4,688	6804	90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	35,80	36,00					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ1	36,00	36,10		5,514			90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π2: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ2

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ2	19,10	19,30					8	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	19,30	20,30					8	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	20,30	21,40					25	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	21,40	21,80					33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	21,80	22,30	70,49		0,439	6923	33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	22,30	22,60					33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	22,60	22,70		2,011			33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	22,70	23,40					33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	23,40	23,60	5,28		0,220		33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	23,60	25,60	5,28		0,220		33	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ2	25,60	26,50					33	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ2	26,50	27,00	35,43		0,146	6031	33	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	27,00	27,70					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	27,70	27,90	119,54		4,981		84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	27,90	28,70					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	28,70	28,90	75,67			13966	84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	28,90	30,50					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ2	30,50	31,60	72,53	5,159	4,541	14515	84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	31,60	32,10					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	32,10	32,60					97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	32,60	33,80	84,05	6,505		15725	97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	33,80	34,60	96,67		4,028		97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	34,60	35,60	56,55	5,866	3,662	10752	97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	35,60	36,30					97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	36,30	37,25	39,20		3,727	7373	97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	37,25	37,90					97	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	37,90	38,10	108,74		4,531		84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	38,10	38,80					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	38,80	38,90		4,708			84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	38,90	39,50					84	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	39,50	39,70	93,17		3,882		87	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	39,70	40,00					87	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	40,00	40,20	66,79		2,783		87	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	40,20	40,70					87	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	40,70	40,90	62,90			11009	87	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ2	40,90	42,00					94	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π3: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ3

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ3	22,70	22,90	25,40			5649	88	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	22,90	23,20					88	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	23,20	23,40	37,79			6780	88	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	23,40	23,70					88	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	23,70	24,00					63	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	24,00	24,20	3,50		0,146		63	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	24,20	25,20					63	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	25,20	25,60					80	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	25,60	26,00	29,81		0,230	6296	80	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	26,00	26,30					80	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ3	26,30	26,70					18	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.

Γ3	26,70	26,90		4,018			18	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ3	26,90	27,30					18	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ3	27,30	27,60					0	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ3	27,60	28,20					25	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ3	28,20	29,00					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	29,00	29,20	108,98		4,541		91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	29,20	29,60					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	29,60	29,80	61,81			9782	91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	29,80	30,40					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	30,40	30,50		5,116			91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	30,50	31,10					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	31,10	31,40					82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	31,40	31,60	91,42		3,809		82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	31,60	31,90					82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	31,90	33,10	41,57	4,869	4,688	10815	82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	33,10	33,60					82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	33,60	34,10					82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	34,10	34,50					82	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	34,50	35,60					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	35,60	36,00					91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	36,00	36,60	121,30		5,054		91	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	36,60	37,00					78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	37,00	37,20	107,23		4,468		78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	37,20	37,70					78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	37,70	38,60	81,03	4,334	4,395	10978	78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	38,60	39,00					78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	39,00	39,20	123,05		5,127		78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	39,20	39,50					78	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	39,50	40,10					60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	40,10	40,50	116,02	4,726	4,834		60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	40,50	41,40					60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	41,40	41,60	36,98		1,541		60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	41,60	42,00					60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	42,00	42,20					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	42,20	42,40	107,47		4,478		98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	42,40	42,60					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ3	42,60	42,80	69,83			11103	98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	42,80	43,60					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ3	43,60	43,80	79,64			14599	98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π4: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ4

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ4	10,00	10,20	60,19			13903	95	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	10,20	11,00					70	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	11,00	11,20	65,08			14489	70	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	11,20	12,20					94	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	12,20	12,50	62,63		4,012	9340	94	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	12,50	13,30					94	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	13,30	13,50	58,26			10839	95	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	13,50	14,50					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	14,50	14,70		4,303			87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	14,70	15,50					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	15,50	15,80	55,03		2,293		87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	15,80	16,00					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	16,00	16,20	44,51			12592	87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	16,20	17,00					71	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	17,00	17,10		3,534			71	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	17,10	17,60					71	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	17,60	17,90	69,29		4,299	9651	71	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ4	17,90	18,80					93	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	18,80	19,60	93,55	4,436	3,898		93	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	19,60	20,00					93	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	20,00	20,70	74,16	4,496	3,090		61	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	20,70	21,30					61	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	21,30	22,00	68,78		2,866		61	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	22,00	22,45					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	22,45	23,30					98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	23,30	24,20	81,73			12960	98	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	24,20	24,50					69	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ4	24,50	25,30	96,12	4,005	4,005		69	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	25,30	25,60					69	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	25,60	26,25	89,42		3,726		69	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	26,25	26,60					92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	26,60	26,90	108,48		4,520		92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	26,90	28,10					92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	28,10	28,50	71,40		2,975		92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	28,50	28,90					92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	28,90	29,10	111,22		4,634		92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	29,10	29,80					92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ4	29,80	30,00	72,91		3,038		92	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π5: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ5

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ5	8,00	8,20	60,06			10869	61	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	8,20	9,40					61	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	9,40	10,00	38,02	1,003		7258	52	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	10,00	10,30					52	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	10,30	11,00					50	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	11,00	11,30					60	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	11,30	11,70	71,13		4,834	12514	87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	11,70	12,50					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	12,50	12,90	74,99		5,054	11797	87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	12,90	13,60					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	13,60	13,80	54,91			9030	87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	13,80	14,10					87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	14,10	14,60	49,22	4,565	2,051		87	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	14,60	15,90					50	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	15,90	16,10	112,51		4,688		50	Ασβ. Τεκτονικού καλύμματος
Γ5	16,10	17,20					89	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	17,20	18,10	45,10			9237	89	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	18,10	18,40	84,24	5,193	3,510		89	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	18,40	18,80					89	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	18,80	19,00					100	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ5	19,00	19,75	73,82		3,076		100	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	19,75	20,90					31	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	20,90	21,50	75,50		3,146		86	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	21,50	22,10					86	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	22,10	22,90	38,66	3,921	1,611		86	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	22,90	23,20					40	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	23,20	23,90	91,87		3,828		40	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	23,90	24,50					40	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	24,50	24,70		4,047			40	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	24,70	25,60					93	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	25,60	26,00	66,29		2,762		93	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	26,00	26,20	108,14		4,506		85	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	26,20	27,00					80	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	27,00	27,70					77	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	27,70	27,90	75,25			15513	77	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	27,90	28,40					77	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ5	28,40	28,60	110,47		4,603		77	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π6: Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών γεώτρησης Γ6

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ6	13.80	13.90		5,097			93	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	13.90	14.80					93	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	14.80	15.60	80.20		2.490	13031	93	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	15.60	16.60					93	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	16.60	17.40					50	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	17.40	17.80	76.27		3.076	12294	50	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	17.80	19.40					50	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ6	19.40	21.00					50	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	21.00	21.60	60.74	2.548		6603	50	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	21.60	22.10					30	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	22.10	22.70					30	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	22.70	22.90	22.85		0.952		30	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	22.90	23.10					30	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	23.10	24.00	10.54		0.439		30	Γραφ. Σχιστόλιθος

Γ6	24.00	25.10	67.19	6.132	0.792	6967	50	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ6	25.10	25.50					77	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	25.50	25.70					77	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	25.70	26.40					38	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	26.40	27.20	67.68			13634	66	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	27.20	27.60					66	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	27.60	28.30	36.74		1.531		66	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	28.30	28.50	116.02		4.834		56	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ6	28.50	29.10					56	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	29.10	30.00	75.68	7.104	4.667	12928	56	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	30.00	30.20	110.26		4.594		56	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	30.20	30.70					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	30.70	30.90	106.99		4.458		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	30.90	31.50					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	31.50	32.10	108.74	6.555	4.531		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	32.10	33.30					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	33.30	33.50	78.90			12902	90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	33.50	34.10					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	34.10	34.30	114.00		4.750		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ6	34,30	35,50					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π7: Αποτελέσματα εργασιακών δοκιμών γεώτρησης Γ7

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ7	14,00	14,20	5,28		0,220		0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	14,20	14,40					0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	14,40	14,60	7,06		0,294		0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	14,60	16,50					0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	16,50	16,70	6,89		0,287		0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	16,70	18,40					0	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ7	18,40	18,60	16,71			4712	60	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ7	18,60	18,90					60	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ7	18,90	19,10	69,59			10442	60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	19,10	19,70					60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	19,70	19,90	85,44		3,560		60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Γ7	19,90	20,20					60	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	20,20	20,40		5,023			68	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	20,40	21,30					68	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	21,30	21,60	55,13	5,522	2,297		68	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	21,60	22,60					68	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	22,60	23,20					68	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	23,20	24,00	74,00		3,044	9197	95	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	24,00	24,25					95	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	24,25	25,10	93,89		3,912		83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	25,10	25,80					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	25,80	27,00	116,63			17340	83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	27,00	27,90		4,849			83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	27,90	28,10	104,71			16140	83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	28,10	28,40					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	28,40	28,60	86,83		3,618		83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	28,60	28,80					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	28,80	29,10	89,59	6,350	3,733		83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	29,10	29,50					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	29,50	29,80	55,13		2,297		83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	29,80	30,00					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	30,00	30,20	50,56			11083	83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	30,20	31,70					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	31,70	31,90	52,46		2,186		83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	31,90	32,20					83	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	32,20	33,00					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	33,00	33,30	96,65		4,027		90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	33,30	33,70					90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ7	33,70	34,00	82,94	6,082		13267	90	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π8: Αποτελέσματα εργασιακών δοκιμών γεώτρησης Γ8

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΑΠΟ (m)	ΒΑΘΟΣ ΕΩΣ (m)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	Is50 (MPa)	E (MPa)	RQD (%)	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ
Γ8	3,90	4,10	8,04			3577	0	Πρασινοςχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	4,10	4,50					0	Πρασινοςχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	4,50	5,40					18	Πρασινοςχιστ. - Φυλλίτης

Γ8	5,40	5,60	2,47		0,103		18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	5,60	6,30					18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	6,30	6,50	2,81		0,117		18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	6,50	6,70					18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	6,70	6,90	3,17		0,132		18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	6,90	7,20					18	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	7,20	7,40					37	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	7,40	7,90	14,71		0,190	3582	37	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	7,90	8,20	10,82			1964	37	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	8,20	8,70					37	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	8,70	9,50					21	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	9,50	9,70	5,28		0,220		21	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	9,70	10,10					21	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	10,10	11,10					71	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	11,10	11,40					71	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	11,40	11,60	10,56		0,440		71	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	11,60	12,00					64	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	12,00	13,00	30,50	1.310		7279	64	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	13,00	13,80					75	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	13,80	14,40					75	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	14,40	15,20					75	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	15,20	16,00	7,06		0,294		75	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	16,00	16,20					75	Πρασινοσχιστ. - Φυλλίτης
Γ8	16,20	16,70	31,12	2,531		7626	75	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	16,70	17,40					75	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	17,40	18,10					57	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	18,10	18,80					25	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	18,80	18,90		2,437			25	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	18,90	19,30					25	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	19,30	19,50	11,64		0,485		25	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	19,50	20,10					45	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	20,10	20,70	22,31	2,338	0,586	7272	45	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	20,70	20,90					45	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	20,90	21,00	7,03		0,293		45	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	21,00	21,20					45	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	21,20	21,70					74	Γραφ. Σχιστόλιθος

Γ8	21,70	22,20	38,03		0,513	7016	74	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	22,20	22,40					74	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	22,40	22,90					74	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	22,90	24,30					29	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	24,30	25,50					72	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	25,50	25,80	12,29	2,430	0,512		72	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	25,80	26,80					72	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	26,80	28,20					93	Γραφ. Σχιστόλιθος
Γ8	28,20	28,60					50	Εναλλαγή Σχιστ. - Ασβεστ.
Γ8	28,60	29,30					86	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ8	29,30	30,70					61	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου
Γ8	30,70	32,00					94	Ασβ. Ανώτερου Μαρμάρου

Πίνακας Π9: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +30 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Δείκτη Is50 (MPa)	Βαθμός
1	3,0	Γ
2	2,5	Γ
3	1,8	Δ
4	1,2	Δ
5	0,9	Ε
6	3,0	Γ
7	2,4	Γ
8	1,8	Δ
9	1,1	Δ
10	0,8	Ε
11	3,1	Γ
12	2,4	Γ
13	1,5	Δ
14	0,8	Ε
15	0,7	Ε

Πίνακας Π10: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +20 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Δείκτη Is50 (MPa)	Βαθμός
1	3,3	Γ
2	3,4	Γ
3	3,2	Γ
4	2,6	Γ
5	2,1	Γ
6	3,5	Γ
7	3,5	Γ
8	3,2	Γ
9	2,6	Γ
10	2,1	Γ
11	3,7	Γ
12	3,7	Γ
13	3,4	Γ
14	2,6	Γ
15	2,1	Γ

Πίνακας Π11: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη Is50 και βαθμών σε $z = +10 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Δείκτη Is50 (MPa)	Βαθμός
1	3,4	Γ
2	3,3	Γ
3	2,8	Γ
4	2,0	Δ
5	1,4	Δ
6	3,5	Γ
7	3,3	Γ
8	2,8	Γ
9	1,9	Δ
10	1,4	Δ
11	3,5	Γ
12	3,3	Γ
13	2,7	Γ

14	2,0	Δ
15	2,1	Γ

Πίνακας Π12: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +30 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μονοαξονικής Αντοχής σ_c (MPa)	Βαθμός
1	54,7	Γ
2	51,9	Γ
3	44,2	Δ
4	32,2	Δ
5	25,2	Δ
6	58,6	Γ
7	54,5	Γ
8	43,0	Δ
9	30,8	Δ
10	23,2	Ε
11	64,4	Γ
12	57,5	Γ
13	44,5	Δ
14	27,8	Δ
15	20,6	Ε

Πίνακας Π13: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +20 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μονοαξονικής Αντοχής σ_c (MPa)	Βαθμός
1	75,8	Γ
2	75,1	Γ
3	66,2	Γ
4	49,4	Δ
5	37,3	Δ
6	73,5	Γ
7	72,8	Γ
8	63,4	Γ
9	48,0	Δ

10	37,0	Δ
11	70,6	Γ
12	69,5	Γ
13	60,6	Γ
14	47,3	Δ
15	36,2	Δ

Πίνακας Π14: Αντιστοίχιση τιμών Μονοαξονικής Αντοχής και βαθμών σε $z = +10 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μονοαξονικής Αντοχής σ_c (MPa)	Βαθμός
1	80,0	Γ
2	80,2	Γ
3	73,8	Γ
4	60,9	Γ
5	50,7	Γ
6	80,1	Γ
7	81,0	Γ
8	74,4	Γ
9	61,1	Γ
10	51,0	Γ
11	80,4	Γ
12	81,5	Γ
13	75,3	Γ
14	61,4	Γ
15	50,1	Γ

Πίνακας Π15: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +30 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας E (MPa)	Βαθμός
1	10.680,0	Β
2	10.377,3	Β
3	9.309,6	Γ
4	7.639,1	Γ
5	6.737,7	Γ

6	10.868,9	B
7	10.243,2	B
8	9.114,9	Γ
9	7.705,8	Γ
10	6.757,2	Γ
11	11.224,8	B
12	10.101,7	B
13	8.943,0	Γ
14	7.324,1	Γ
15	6.770,4	Γ

Πίνακας Π16: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +20 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας E (MPa)	Βαθμός
1	12.176,4	B
2	11.786,2	B
3	10.651,7	B
4	9.043,9	Γ
5	8.224,6	Γ
6	12.014,9	B
7	11.591,0	B
8	10.676,5	B
9	9.088,1	Γ
10	8.365,0	Γ
11	11.717,3	B
12	11.132,3	B
13	10.453,5	B
14	9.239,8	Γ
15	8.718,2	Γ

Πίνακας Π17: Αντιστοίχιση τιμών Μέτρου Ελαστικότητας και βαθμών σε $z = +10 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Ελαστικότητας E (MPa)	Βαθμός
1	12.041,2	B

2	11.971,0	B
3	11.888,7	B
4	10.796,8	B
5	10.290,7	B
6	12.158,9	B
7	12.155,9	B
8	11.939,3	B
9	11.064,5	B
10	10.393,4	B
11	12.435,5	B
12	12.446,6	B
13	12.226,1	B
14	11.029,9	B
15	10.415,2	B

Πίνακας Π18: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +30 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Δείκτη RQD (MPa)	Βαθμός
1	57,9	Γ
2	51,0	Δ
3	47,3	Δ
4	45,3	Δ
5	45,9	Δ
6	57,4	Γ
7	53,0	Δ
8	48,9	Δ
9	48,3	Δ
10	47,8	Δ
11	56,5	Γ
12	54,9	Δ
13	51,7	Δ
14	46,5	Δ
15	46,9	Δ

Πίνακας Π19: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +20 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Δείκτη RQD (MPa)	Βαθμός
1	76,7	B
2	76,1	B
3	73,8	Γ
4	66,1	Γ
5	61,0	Γ
6	75,3	B
7	75,0	B
8	72,1	Γ
9	64,7	Γ
10	60,6	Γ
11	71,9	Γ
12	71,5	Γ
13	68,9	Γ
14	63,1	Γ
15	58,5	Γ

Πίνακας Π20: Αντιστοίχιση τιμών Δείκτη RQD και βαθμών σε $z = +10 \text{ m}$

Τομέας	Τιμή Μέτρου Δείκτη RQD (MPa)	Βαθμός
1	85,1	B
2	83,9	B
3	83,5	B
4	81,0	B
5	79,4	B
6	79,9	B
7	80,6	B
8	81,2	B
9	80,4	B
10	79,4	B
11	71,6	Γ
12	75,9	B

| Επίδραση της αβεβαιότητας κατά τη χωρική ανάλυση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.

13	78,7	B
14	79,2	B
15	78,2	B

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. J. Caers. Modeling Uncertainty in the Earth Sciences. John Wiley & Sons. 2011.
2. J.G. Grasmick. Modeling Spatial Geotechnical Parameters Uncertainty and Quantitative Tunneling Risks. Colorado 2019.
3. J.P. Chiles, P. Delfiner. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. 2nd Edition. Wiley, 2012.
4. J.T. Christian, C.C. Ladd, and G.B. Baecher. Reliability applied to slope stability analysis, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg. ASCE. 120(12) (1994) 2180-2207.
2. M.G. Morgan, and M. Henrion. Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis, Cambridge University Press, New York 1990.
3. M.J. Pyrcz and C.V. Deutsch. Geostatistical Reservoir Modeling, 2nd Edition. Oxford University Press. New York 2014.
4. P.G. Ioannou. Geologic Prediction Model for Tunneling, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 113, No. 4, 569-590, 1987.
5. C. Smallman. Crisis and Risk Management. Lecture Presentation, NIMBAS-Bradford, MBA Programme, NIMBAS University, Utrecht 2000.
6. C. Haas. Updating in the "Decision Aids for Tunneling", Massachusetts Institute of Technology, 2000.
7. H.W. Parker. Geotechnical Site Investigations, Tunnelling Engineering Handbook, Ed. by Bickel J., Kuesel T., King E., Chapman and Hall, pp. 46-79, 1996.
8. H. Einstein. Risk assessment and management in geotechnical engineering. 8th Portuguese Geotechnical Congress, Lisbon 2002.
9. D. Blockley and P. Godfrey. Doing It Differently: Systems for Rethinking Construction, Thomas Telford Ltd, London 2000.
10. D. U. Deere and D.W. Deere. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, 1963.
11. M. Th. van Staveren. Uncertainty and Ground Conditions: A Risk Management Approach, Butterworth-Heinemann, 2006.

12. V. Maruvanchery et al. Early construction cost and time risk assessment and evaluation of large-scale underground cavern construction projects in Singapore, *Underground Space* 5 (2020) 53–70.
13. U.S. National Committee on Tunneling Technology Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. *Geotechnical Site Investigations for Underground Projects*, National Academy Press, Washington 1984.
14. BS IEC 62198, Project risk management. Application guidelines - (Withdrawn Standard), British Standards Institute, 2002.
15. ISO Guide 73, Risk management — Vocabulary, International Organization for Standardization (ISO), 2009.
16. AS/NZS 4360, Risk Management, Australian/New Zealand Standard, 1999.
17. N. Sotiropoulos, A. Benardos and A. Mavrikos. Spatial Modelling for the Assessment of Geotechnical Parameters, *Procedia Engineering*, 165 (2016) 334 – 342.
18. C. Paraskevopoulou, M. Diederichs. *Geo – Risk, Rock Behavior and Underground Space*, University of Leeds & Queen’s University, Leeds 2018.
19. ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε. 2013. Κατασκευή Ν.Δ.Σ.Γ.Υ.Τ. Τιθορέα – Λιανοκλάδι, έργο σήραγγας Καλλιδρόμου. Διεύθυνση Κατασκευών, Έργα ΙΙ, Κλιμάκιο επίβλεψης.
20. Ι. Γκενάκος. Προβλήματα Γεωτεχνικής Μηχανικής σε Μεγάλα Έργα. 4ο Πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, 2001.
21. Ν. Καζίλης, Χ. Παπαδόπουλος, Ρ. Grasso. Ιστορικό Τελικής Φάσης Αποκατάστασης Σήραγγας Σ2, Τμήματος 1.2.3 (Κουμαριά – Αγ. Αναστασία) της Εγνατίας Οδού. 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος.
22. Σ. Κουκουτάς. ΜΕΤΡΟ της ΑΘΗΝΑΣ - Μέθοδοι κατασκευής και τα σχετικά τεχνικά προβλήματα. 4ο Πανελλήνιο συνέδριο γεωτεχνικής και γεωπεριβαλλοντικής μηχανικής, 2001.
23. Π. Μαρίνος. «Μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων», Ε.Μ.Π., 2008
24. Α. Μπενάρδος, Β. Βαντόλας, Χ. Τσατσανίφος, Π. Ψαρόπουλος. Προβλήματα κατά την Κατασκευή του Πρώτου Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Επικινδύνων Αποβλήτων στην Ελλάδα.
25. Α. Μπενάρδος. Η Αβεβαιότητα στην Κατασκευή Υπογείων Έργων, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Διαχείριση Κινδύνου σε Θέματα Υγείας και Ασφάλειας Υπόγειων Έργων».

26. Ι. Παπαδάτος. Επαναδιάνοιξη και Αποκατάσταση του προβληματικού τμήματος της Σήραγγας Σ2 της Εγνατίας Οδού. 2009.
27. Α. Σοφιανός. Π. Νομικός. Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων, Ε.Μ.Π., 2008.
28. Ν. Σωτηρόπουλος. Χωρική Ανάλυση Γεωτεχνικών Παραμέτρων στον Υπόγειο Χώρο του Λαυρίου, 2013.