

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΠΕΡΙΟΔΟΣ : ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ



ΘΕΜΑ

**ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΧΩΡΟ
ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΑΝΔΡΕΑΣ ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ.....

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΛΙΑΜΠΑΚΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ.....

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΡΟΖΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ.....

Η κατασκευή και αξιοποίηση υπόγειων - τεχνικών έργων, αποσκοπεί στην βελτίωση της ποιότητας ζωής του κοινωνικού συνόλου και μπορεί να προσφέρει ρεαλιστικές και βιώσιμες λύσεις στην αντιμετώπιση προβλημάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση έγινε και η κατασκευή του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο Λαύριο για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ζητημάτων που σχετίζονται με την ορθή διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων που προέκυψαν από τις εργασίες απορρύπανσης/εξυγίανσης του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ).

Η μελέτη, η κατασκευή και η σωστή λειτουργία ενός υπόγειου έργου αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία και πρόκληση για έναν μηχανικό. Η γνώση της συμπεριφοράς του υπεδάφους απαιτεί τη λεπτομερή διερεύνηση του, με την μεγαλύτερη δυνατή οικονομία και ασφάλεια. Παρόλα αυτά όμως στα έργα που κατασκευάζονται εντός του γεωλογικού μέσου η επίδραση της αβεβαιότητας είναι σημαντική εξαιτίας της γεωλογικής πολυπλοκότητας που μερικές φορές δεν μπορεί να εντοπιστεί στο σύνολό της.

Η κατασκευή υπογείων έργων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον παράγοντα της αβεβαιότητας εξαιτίας του μικρού αριθμού στοιχείων που συνήθως προκύπτουν από την γεωτεχνική έρευνα κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου. Η σωστή εκτίμηση λοιπόν των γεωτεχνικών παραμέτρων αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα που πολλές φορές κρίνει την υλοποίηση αλλά και την συνολική βιωσιμότητα ενός έργου. Εκτός από γεωτεχνική έρευνα και γεωφυσικές μεθόδους, ο πρωταρχικός στόχος για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπεδάφους είναι η πρόβλεψη της χωρικής ποικιλομορφίας των γεωλογικών-γεωτεχνικών μεταβλητών που προκύπτουν μέσα από τις χωρικές αναλύσεις (**spatial analysis**).

Στην ελληνική βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένες εργασίες - μελέτες που ασχολούνται με την χωρική ανάλυση γεωτεχνικών παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν στοιχεία για την περίπτωση του μετρό της Αθήνας, καθώς επίσης και από άλλους ερευνητές που αποσκοπούν στην χωρική ανάλυση σε οδικά έργα στο εξωτερικό. Όσον αφορά στη διεθνή βιβλιογραφία, οι μελέτες που υπάρχουν αφορούν μεγαλύτερο εύρος περιπτώσεων, ωστόσο περιορισμένος αριθμός αφορά σε υπόγειες κατασκευές. Συνεπώς, φαίνεται ότι υπάρχει ανάγκη για την αναλυτική εξέταση των παραμέτρων της γεωλογικής αβεβαιότητας σε περιπτώσεις που αφορούν την κατασκευή υπογείων έργων.

Σε αυτή την κατεύθυνση στοχεύει το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ώστε να αποτελέσει υπόβαθρο για περαιτέρω αναλύσεις στο επιστημονικό αυτό πεδίο.

Εξετάζονται οι τεχνικές για την δημιουργία χωρικών αναλύσεων με σκοπό την πρόβλεψη των συνθηκών του σύνθετου γεωλογικού περιβάλλοντος, ενώ παρουσιάζονται και τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό δεδομένων γύρω από γνωστές γεωτρήσεις. Επιπλέον γίνεται προσπάθεια χωρικής ανάλυσης του υπόγειου χώρου του Λαυρίου με το πρόγραμμα SURPAC, ώστε να παρουσιαστεί ο χώρος και η κατάσταση της βραχομάζας στα ενδιάμεσα σημεία των γεωτρήσεων. Πραγματοποιείται λοιπόν μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου και ανάλυση των βασικών γεωτεχνικών παραμέτρων ώστε να χαρακτηριστεί σαφέστερα η περιοχή ανάπτυξης του έργου, να προβλεφθούν τα τρωτά σημεία του υπόγειου χώρου και οι πιθανές ασθενείς ζώνες του γεωλογικού σχηματισμού.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Ανδρέα Μπενάρδο, Λέκτορα Ε.Μ.Π. στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, επιβλέποντα της εργασίας, για την πολύτιμη βοήθειά του στην συγγραφή της παρούσας εργασίας και για την ουσιαστική καθοδήγηση του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θανάση Μαυρίκο, μέλος του εργαστηρίου, για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκμάθηση του προγράμματος Surpac, καθώς και για την συνεχή προθυμία του στην επίλυση δυσκολιών σε όλη την διάρκεια της εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Περιβαλλοντικής Μεταλλευτικής και Λατομικής Τεχνολογίας για την ευχάριστη παραμονή στο εργαστήριο και για την προθυμία τους σε ό,τι χρειάστηκε.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου για την απαιτητική αλλά ευχάριστη χρονιά κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού καθώς και τους φίλους μου για την υπομονή τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ενθάρρυνση και την κατανόηση που έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η χωρική ανάλυση γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο διάθεσης αποβλήτων στο Λαύριο. Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Στο Κεφάλαιο_1 γίνεται αναφορά στη σημασία της γνώσης της συμπεριφοράς του υπεδάφους με λεπτομερή γεωλογική-γεωτεχνική έρευνα, δίνονται στοιχεία για τη διάταξη και το βάθος των γεωτρήσεων και τι περιλαμβάνει μια γεωτεχνική έκθεση. Εξετάζεται η επίδραση της αβεβαιότητας στην κατασκευή υπογείων έργων, εξαιτίας της γεωλογικής πολυπλοκότητας και των προβλημάτων που δημιουργούνται κατά την κατασκευή. Επίσης, αναφέρονται και προσπάθειες ελέγχου που έχουν γίνει με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων.
- Στο Κεφάλαιο_2 γίνεται αναφορά στην ανάγκη για πρόβλεψη της χωρικής ποικιλομορφίας των γεωλογικών μεταβλητών, στη δημιουργία υπολογιστικών αναπαραστάσεων και χωρικών αναλύσεων με σκοπό την πρόβλεψη των γεωλογικών αβεβαιοτήτων. Επίσης, αναλύονται οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής που χρησιμοποιούν οι χωρικές αναλύσεις και αναφέρονται διάφορες εφαρμογές χωρικών αναλύσεων σε έργα γεωτεχνικής μηχανικής.
- Στο Κεφάλαιο_3 γίνεται αναφορά στα στοιχεία σχεδιασμού του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο Λαύριο, στη γεωλογία της περιοχής και της θέσης του έργου. Επίσης, αναφέρονται οι γεωτεχνικοί παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις ενώ γίνεται και στατιστική επεξεργασία του συνόλου των γεωτρήσεων σε UCS με σημειακή φόρτιση, RQD και μέτρο ελαστικότητας. Επιπλέον, αναφέρεται η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας, τα μέτρα υποστήριξης του υπόγειου χώρου και τα γεωλογικά-γεωτεχνικά προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής στο σημείο εισόδου.
- Στο Κεφάλαιο_4 αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην προσπάθεια χωρικής ανάλυσης των γεωτεχνικών δεδομένων (UCS, RQD και E) στην περιοχή του υπόγειου χώρου του Λαυρίου, ώστε να παρουσιαστεί ο χώρος και η κατάσταση της βραχομάζας στα ενδιάμεσα σημεία των γεωτρήσεων. Γίνεται λοιπόν μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου και ανάλυση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών όπως αυτά προέκυψαν μέσα από την ανάλυση. Επιχειρείται η ενδεδειγμένη χαρτογράφηση των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής του έργου, η αξιολόγηση τους και ο εντοπισμός πιθανών προβληματικών περιοχών για το έργο, ώστε να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας των χωρικών μοντελοποιήσεων (validation) μέσω της αντιπαραβολής των στοιχείων της ανάλυσης με αυτά που πραγματικά συναντήθηκαν. Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η

εξαγωγή στατιστικών δεδομένων για τον εντοπισμό των ασθενέστερων ζωνών.

- Στο Κεφάλαιο_5 παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της εργασίας.

Purpose of this study is the spatial analysis of geotechnical parameters in underground disposal of hazardous waste in Lavrion. This thesis consists of the following chapters:

- Chapter_1 presents a reference of the importance of knowledge of the behavior of subsoil according to detailed geological-geotechnical survey, for the position and depth of boreholes and what a geotechnical report includes. The effect of uncertainty in the construction of underground works is examined, because of the geological complexities and problems that arise during construction. Also, the efforts that have been done in order to control the problems are listed.
- Chapter_2 includes a reference to prediction of the spatial diversity of the geological variables as well as on computational representations and spatial analysis in order to predict geological uncertainties. Also the spatial interpolation methods that used for spatial analysis and various applications of spatial analysis in geotechnical engineering projects are reported.
- Chapter_3 refers to the design parameters of the underground disposal of hazardous waste in Lavrion, but also to the geology of the area and the location of the project. Also, the geotechnical parameters that will be used in the analysis are given and the statistical analysis of all boreholes engaged UCS, RQD and Young modulus are presented. Moreover, the rock mass classification, the support measures and the underground geological-geotechnical problems encountered during the construction of the inlet are also mentioned.
- In Chapter_4 the procedure followed in trying spatial analysis of geotechnical data (UCS, RQD and E) in the underground space of Lavrion is presented, so in order the condition of the rock mass at the spaces between the boreholes be referred. So, modeling is the underground region and analysis of geotechnical characteristics as they emerged from the analysis. Also, an attempt for a thorough mapping of the geotechnical conditions is made in the construction area of the project, as well as an assessment and identification of the potential problem areas for the project is made the reliability of spatial modeling (validation) by comparing the data of the analysis to those actually met. The final result of this process is the export of statistical data to identify the most vulnerable areas
- Finally Chapter_5 presents the general conclusions of the whole thesis.

**Κεφάλαιο_1: Γεωτεχνική έρευνα-αβεβαιότητα γεωλογικού μέσου-κίνδυνοι
κατά την κατασκευή υπογείων έργων**

1.1. Εισαγωγή

Η δυναμική που παρουσιάζει η κατασκευή υπογείων - τεχνικών έργων ολοένα και αυξάνεται, επιτυγχάνοντας την βελτίωση της ποιότητας ζωής του κοινωνικού συνόλου. Η αξιοποίηση του υπόγειου χώρου για τη δημιουργία βασικών υποδομών μπορεί να προσφέρει ρεαλιστικές και βιώσιμες λύσεις στην αντιμετώπιση προβλημάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση έγινε και η κατασκευή του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο Λαύριο, που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ωστόσο η μελέτη, η κατασκευή και η σωστή λειτουργία ενός υπόγειου έργου αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία και πρόκληση για έναν μηχανικό. Η γνώση της συμπεριφοράς του υπεδάφους απαιτεί τη λεπτομερή διερεύνηση του, με την μεγαλύτερη δυνατή οικονομία και ασφάλεια (Τσιαμπάος, 2010). Παρόλα αυτά όμως στα έργα που κατασκευάζονται εντός του γεωλογικού μέσου η επίδραση της αβεβαιότητας είναι σημαντική εξαιτίας της γεωλογικής/γεωτεχνικής πολυπλοκότητας που μερικές φορές δεν μπορεί να εντοπιστεί στο σύνολό της.

1.2. Γεωλογική – Γεωτεχνική έρευνα υπεδάφους

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής αρκετών υπογείων έργων, το κόστος είναι αρκετά συχνά, μεγαλύτερο από ότι αρχικά είχε προβλεφθεί. Αν και υπάρχουν αρκετοί λόγοι για αυτό το γεγονός, οι σημαντικότερες αιτίες είναι η αβεβαιότητα του γεωλογικού μέσου και η ελλιπής γεωτεχνική έρευνα. Όπως έχει αναφέρει και ο Vaughan, (1994) σε μια διάλεξη:

“Η κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς του γεωλογικού μέσου είναι περισσότερο σημαντική από τους ακριβείς υπολογισμούς...καλύτερη πρόβλεψη είναι δυνατή όταν το έργο έχει κατασκευαστεί”.

Για όλες τις υπόγειες κατασκευές, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει πρόβλεψη των ιδιοτήτων του υπεδάφους με ακρίβεια, επειδή λάθος εκτιμήσεις μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες για ένα έργο, όπως καθυστερήσεις και επιπλέον κόστη. Η γεωλογική έρευνα είναι ζωτικής σημασίας και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη συστημάτων για την ερμηνεία πολύπλοκων γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών.

Είναι επίσης σημαντικό να υπάρχουν πληροφορίες από ήδη κατασκευασμένα υπόγεια έργα στην ευρύτερη περιοχή ώστε να επιλεγθούν οι κατάλληλες κατασκευαστικές μέθοδοι και τα απαραίτητα μέτρα υποστήριξης (U.S. National Committee on Tunneling Technology, 1984).

Για τον καθορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων το στάδιο της γεωλογικής – γεωτεχνικής έρευνας (*geological exploration – site investigation*) είναι το βασικότερο στάδιο, από το οποίο πρέπει να δοθούν κρίσιμες απαντήσεις για το σχεδιασμό του έργου. Στη συγκεκριμένη φάση πρέπει να γίνουν κατανοητές οι ιδιότητες και συμπεριφορές των πετρωμάτων και να παρασχεθούν στοιχεία ώστε να εκτιμηθεί το κόστος, ο χρόνος και η βέλτιστη μέθοδος κατασκευής, αναγνωρίζοντας παράλληλα διάφορα προβλήματα και κινδύνους, τα οποία πιθανώς συναντηθούν (Μπενάρδος, 2002).

Είναι προφανές, ότι υπάρχει μια άμεση σύνδεση μεταξύ του μεγέθους της γεωλογικής έρευνας και της επιτυχίας της κατασκευής, επομένως οι απαιτήσεις της διερεύνησης χρειάζεται να εντάσσονται ομαλά στις γενικές ανάγκες και τα χαρακτηριστικά του έργου. Οπότε το πιο κρίσιμο ίσως ερώτημα που υπεισέρχεται κατά τη φάση της έρευνας είναι το μέγεθος της, δηλαδή ποια είναι τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρούνται ώστε να περατωθούν οι ερευνητικές εργασίες.

Παρ'όλο που για τον προγραμματισμό και την εκτέλεση των γεωλογικών και γεωτεχνικών ερευνών εφαρμόζονται συνήθως εθνικές ή διεθνείς οδηγίες, η έκταση και το κόστος των ερευνών εξαρτάται από:

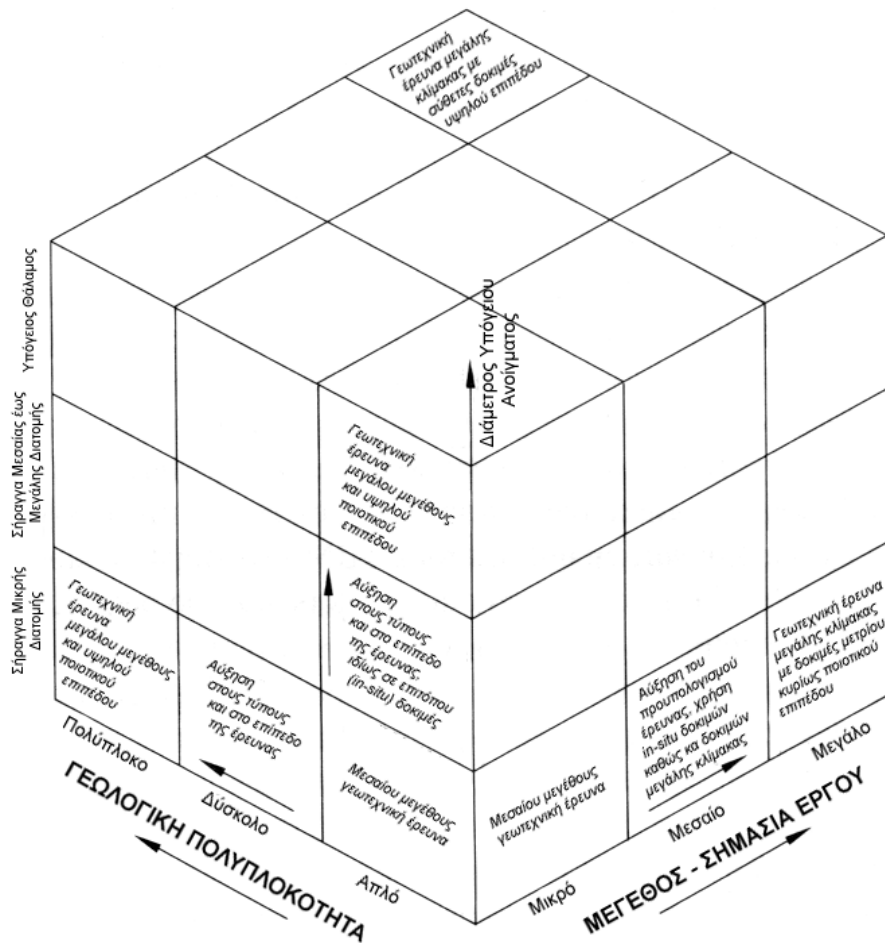
- τη φύση του έργου (είδος, μέγεθος, σπουδαιότητα)
- τις γεωλογικές συνθήκες
- τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της κάθε μεθόδου έρευνας

Το κόστος της έρευνας πρέπει να συγκρίνεται με το συνολικό κόστος του τεχνικού έργου. Ωστόσο μερικά έργα έχουν «αξία» μεγαλύτερη από το κόστος κατασκευής τους, γιατί μια αστοχία τους μπορεί να έχει μεγάλες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, μεγαλύτερες και από το κόστος κατασκευής τους.

Το κόστος της γεωλογικής - γεωτεχνικής έρευνας εκφράζεται συνήθως ως ένα ποσοστό του συνολικού κόστους του έργου και οι τιμές που λαμβάνει, κυμαίνονται από 0,3 έως 2% του προϋπολογισμού (Τσιαμπάος, 2010).

Στην περίπτωση που το υπόγειο έργο είναι μικρό και η γεωλογία της περιοχής εμφανίζεται απλή, η διερεύνηση μπορεί να είναι απλή στη γενική της μορφή και σχετικά μεσαίας κλίμακας.

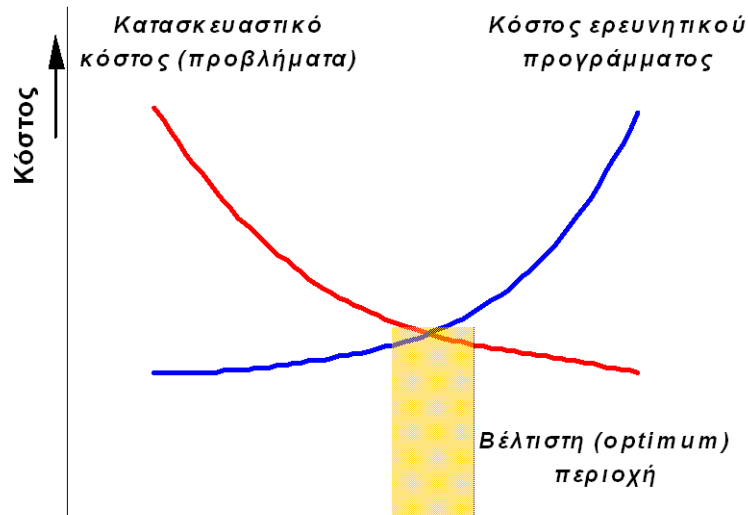
Αντίθετα, όσο το μέγεθος του έργου αυξάνει ή και η γεωλογία της περιοχής γίνεται πιο σύνθετη, η γεωλογική διερεύνηση χρειάζεται να επεκταθεί ώστε να αυξηθεί το διακριτικό της επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1, πιθανώς υιοθετώντας και πιο σύνθετες τεχνικές, για την καλύτερη αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης.



Σχήμα 1.1.: Συνάρτηση της γεωλογικής έρευνας μεταξύ της γεωλογικής δομής και του μεγέθους του έργου (Parker, 1996).

Παρ' όλα αυτά, η απάντηση συνήθως μπορεί να διατυπωθεί με ακρίβεια μόνο μετά την περάτωση του έργου καθώς μόνο τότε είναι διαθέσιμα τα στοιχεία που αναφέρονται στο κόστος της έρευνας, κυριότερα όμως στο επιπρόσθετο κόστος που δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα των απρόβλεπτων συνθηκών (penalty cost).

Η συγκεκριμένη σχέση ανταλλαγής (trade-off) του κόστους ερευνών και του κατασκευαστικού κόστους που προέκυψε από προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν μπορεί να αποδοθεί γραφικά στο σχήμα 1.2, στο οποίο φαίνεται χαρακτηριστικά ποια είναι η βέλτιστη περιοχή (optimum) που θα πρέπει κανείς να κινηθεί. Με άλλα λόγια, μέσω του σχήματος αυτού μπορεί να παρουσιαστεί, σε χρηματικές μονάδες (monetary value), η επίδραση της αβεβαιότητας στο κατασκευαστικό κόστος (Μπενάρδος, 2002).



Σχήμα 1.2: Συσχέτιση του κόστους έρευνας και του κόστους κατασκευαστικών προβλημάτων. (Μπενάρδος, 2002)

Ακόμη, η θεώρηση της φάσης της γεωλογικής – γεωτεχνικής έρευνας, ως μιας διαδικασίας λήψης απόφασης κάτω από αβεβαιότητα, μπορεί να προσφέρει τρόπους για την ποσοτικοποίηση του οφέλους από την μείωση των αβέβαιων παραμέτρων και επιπλέον να δώσει το πλαίσιο εξέτασης των βέλτιστων ερευνητικών πρακτικών.

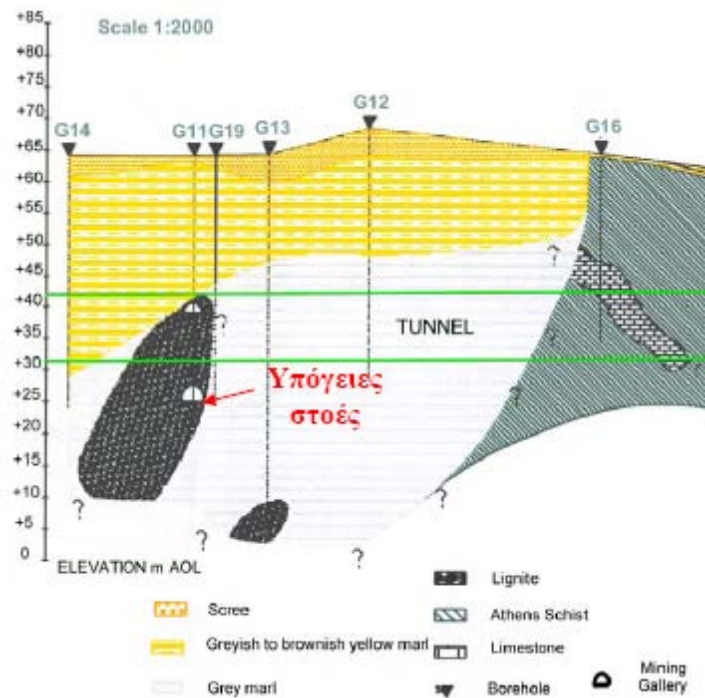
1.2.1. Διάταξη και βάθος γεωτρήσεων σε σημαντικά έργα

Μια σημαντική παράμετρος που θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την επιτυχή έρευνα του υπεδάφους είναι η διάταξη των γεωτρήσεων σε έργα όπως φράγματα και υπόγειες κατασκευές, η οποία καθορίζεται από τις προδιαγραφές του τομέα μηχανικής του ναυτικού στις Ηνωμένες Πολιτείες και των Ελληνικών Οδηγιών και εξαρτάται από :

- Ιδιομορφία του έργου
- Πολυπλοκότητα του γεωλογικού μοντέλου – Ερωτηματικά Γεωλογικής Μελέτης
- Διακύμανση των ιδιοτήτων – γεωμετρίας των στρωμάτων
- Ειδικές απαιτήσεις (π.χ. Έρευνα σε περιοχή με ύπαρξη καρστικών κενών ή εγκαταλελειμμένα μεταλλεία)

Σε ειδικά έργα (οδοί, σήραγγες, γέφυρες, φράγματα κλπ.) ο αριθμός και θέση προσδιορίζονται μετά από τεχνικογεωλογική έρευνα και χαρτογράφηση κατά το στάδιο της προμελέτης και στη συνέχεια της οριστικής μελέτης του έργου.

Σε περίπτωση διαπίστωσης βραχώδους σχηματισμού σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, διερευνάται ο βράχος σε βάθος τουλάχιστον 5m κάτω από την οροφή του για την εξασφάλιση της συνέχειάς του και τον εντοπισμό τυχόν καρστικών εγκοίλων, αν πρόκειται για διαλυτούς σχηματισμούς (ασβεστόλιθοι, μάρμαρα κλπ.). Επίσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1 μπορεί κατά μήκος της διάνοιξης μιας σήραγγας μετρώ να εντοπιστεί και κάποια φλέβα κοιτάσματος η οποία πρέπει να αντιμετωπιστεί κατάλληλα.



Εικόνα 1.1: Συνάντηση λιγνίτη κατά την διάρκεια διάνοιξης σήραγγας (Τσιαμπάος, 2011)

Σε περιπτώσεις υπογείων έργων, το βάθος των γεωτρήσεων υπαγορεύεται από την ιδιομορφία των έργων αυτών, και κυρίως από τα υπάρχοντα ερωτηματικά της γεωλογικής μελέτης που έχουν σχέση με την στρωματογραφία και την τεκτονική της περιοχής του έργου (Τσιαμπάος, 2011).

1.2.2. Γεωτεχνική έκθεση

Πέρα από τα παραπάνω, κρίσιμης σημασίας για το έργο είναι η ακριβής ενημέρωση των κατασκευαστών από προτυποποιημένες γεωτεχνικές μελέτες (π.χ. *geotechnical baseline report*) αλλά και η προετοιμασία ολοκληρωμένων μελετών και εκθέσεων μετά το πέρας κατασκευής του έργου (*as-build report*). Ιδιαίτερα το τελευταίο εμφανίζεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μεγάλα υπόγεια έργα (π.χ. υπόγειους σιδηρόδρομους), για τα οποία οι επόμενες επεκτάσεις τους μπορούν να επωφεληθούν

από τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν ενώ επίσης θα μπορούν να δοθούν πληροφορίες για την υλοποίηση άλλων κατασκευών κοντά ή πάνω από το υφιστάμενο υπόγειο έργο.

Μια γεωτεχνική έκθεση πρέπει να παράγεται πριν από την κατασκευή και ειδικότερα πρέπει να παράγεται πριν από τον σχεδιασμό του έργου και να περιλαμβάνεται στο κείμενο της σύμβασης. Ο σχεδιαστής του έργου πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιεί την έκθεση κατά την διάρκεια του σχεδιασμού και ο παραχωρησιούχος να μπορεί να το χρησιμοποιήσει κατά την φάση της δημοπρασίας.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών πρέπει να γίνουν κατ' ελάχιστον οι παρακάτω εργασίες:

- Συγκέντρωση των διαθέσιμων χαρτών, αεροφωτογραφιών και κάθε είδους γεωλογικών και γεωτεχνικών πληροφοριών από μελέτες που αφορούν στην ευρύτερη περιοχή.
- Επί τόπου μελέτη των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής σε φάση αναγνώρισης.
- Επεξεργασία και αξιολόγηση του συνόλου των επιστημονικών δεδομένων καθώς και παρουσίαση των παρατηρήσεων και προτάσεων σε έκθεση και συνοδευτικούς χάρτες.

Στην τεχνική έκθεση περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία που έχει στη διάθεσή του ο μελετητής και που έχουν σχέση με το αντικείμενο της μελέτης, αφού τύχουν κατάλληλης επεξεργασίας.

Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται να προσδιοριστούν και να οριοθετηθούν στον αντίστοιχο χάρτη, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται επιφανειακά στην περιοχή. Πρέπει να εκτιμάται με βάση τις επί τόπου παρατηρήσεις και τα άλλα υπάρχοντα στοιχεία, η λιθολογική σύσταση μέχρι το βάθος των 20m, όπου αυτό είναι δυνατόν και όπως συνάγεται από τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής.

Μέσα από μια τεχνική έκθεση πρέπει να εκτιμάται ο βαθμός διαγένεσης, αποσάθρωσης, διάρρηξης και κερματισμού των διαφόρων λιθολογικών σχηματισμών καθώς και η φυσική κατάσταση των επιφανειακών λιθολογικών σχηματισμών και η αναμενόμενη συμπεριφορά τους για το αντικείμενο της έκθεσης.

Με βάση στοιχεία από γεωτρήσεις και φρέατα της περιοχής αν υπάρχουν εκτιμάται το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και εκτίμηση των πιθανών κατευθύνσεων της υπόγειας ροής.

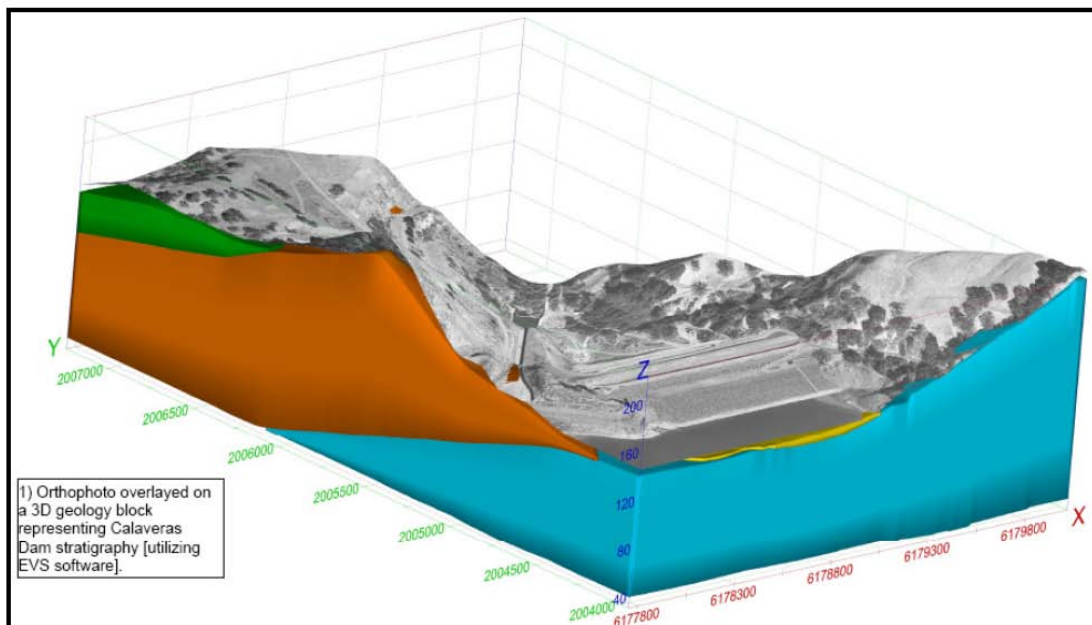
Επιπλέον πρέπει να γίνει εκτίμηση της υδροπερατότητας των λιθολογικών σχηματισμών με βάση τις επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις και τα υπάρχοντα στοιχεία και βιβλιογραφικά δεδομένα, καθώς και επισήμανση τυχόν προβλημάτων από εισροές νερού σε ορύγματα και εκσκαφές.

Εκτός όμως από γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να εκτιμηθούν, χρειάζεται να προσδιορισθούν και να οριοθετηθούν στον αντίστοιχο χάρτη, τα διάφορα πιθανά γεωτεχνικά προβλήματα της περιοχής (π.χ. καθιζήσεις, καρστικά έγκοιλα, υποσκαφές, διογκούμενα εδάφη, καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις, υψηλός υδροφόρος ορίζοντας κ.ά.).

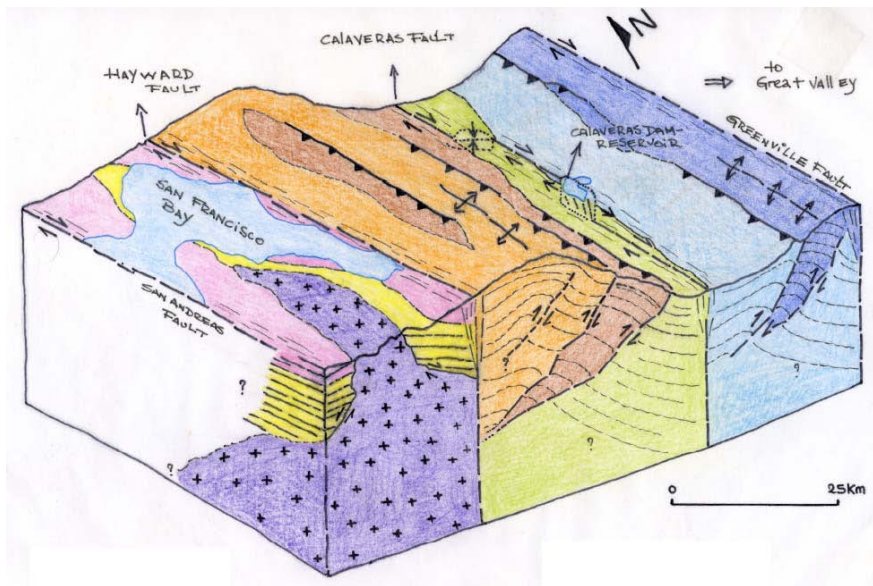
Τέλος χρειάζεται να γίνει καταγραφή και περιγραφή εκείνων των έργων, ανεξάρτητα κλίμακας, των οποίων η σημερινή κατάσταση και συμπεριφορά στο παρελθόν κρίνεται ότι είναι ενδεικτική τυχόν δυσμενών τεχνικό-γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή ή σε τμήμα της (ΥΠΕΚΑ).

1.3. Πολυπλοκότητα του γεωλογικού μοντέλου

Στην πιο γενική και απλουστευμένη έννοια, το μεγαλύτερο πρόβλημα κατά την διάρκεια της κατασκευής ενός υπογείου έργου είναι το υπέδαφος το οποίο συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά την φάση κατασκευής από ότι αρχικά αναμενόταν. Στις εικόνες 1.2 και 1.3 φαίνονται δύο γεωλογικά μοντέλα. Ένα απλό με ξεκάθαρη στρωματογραφία και ένα σύνθετο με συνεχείς εναλλαγές των στρωματογραφικών στρωμάτων.



Εικόνα 1.2: Απλό γεωλογικό μοντέλο (Τσιαμπάος, 2011)



Εικόνα 1.3: Σύνθετο γεωλογικό μοντέλο
(Τσιαμπάος, 2011)

Όπως λοιπόν αναφέρθηκε η αναγνώριση της γεωλογίας είναι καθοριστική καθώς με βάση αυτή επιλέγεται αρχικά ο τρόπος διάνοιξης ενός έργου (συμβατική μέθοδος, drill & blast, ή μηχανήμα ολομέτωπης κοπής). Ωστόσο εξίσου σημαντικό με τον αρχικό καθορισμό της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών, είναι και ο καθορισμός μιας μεταβατικής ζώνης, σε σημεία που δεν έχουν εντοπιστεί με την γεωτεχνική έρευνα, όπως:

- Περιοχές με εκτεταμένο δίκτυο ασυνεχειών και διακλάσεων
- Ζώνες μεγάλων ρηγμάτων, πτυχώσεων
- Περιοχές πετρωμάτων με ιδιαίτερα χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά
- Περιοχές υψηλού βαθμού αποσάθρωσης, διερρηγμένες ζώνες
- Περιοχές με υψηλή πιθανότητα εισροής υδάτων
- Ζώνες και φακοί πετρωμάτων πολύ υψηλής αντοχής και ικανότητας σε τριβή και απόξεση

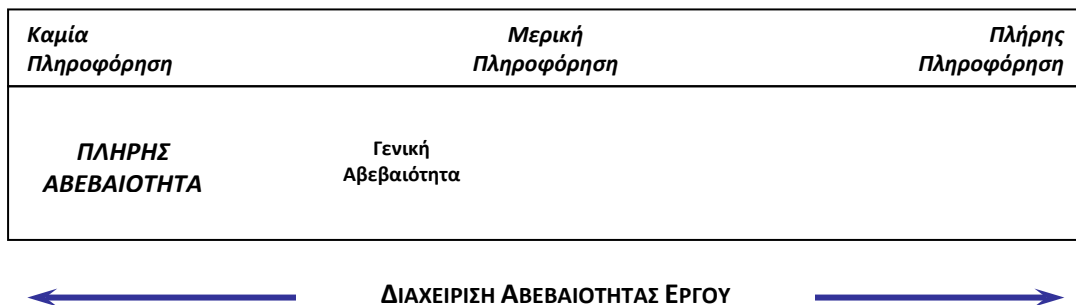
Λανθασμένη κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πετρωμάτων βασισμένη σε « ανακριβή – ελλιπή δεδομένα » μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε διαφορετικές καταστάσεις ανάμεσα στο προσδοκώμενο και σε αυτό που πραγματικά συναντήθηκε. Ειδικότερα κατά την διάρκεια της κατασκευής, η διερεύνηση του υπεδάφους θα πρέπει να παρέχει τα δεδομένα για να προβλέπεται με αξιόπιστο και συγκεκριμένο τρόπο, η συμπεριφορά του εδάφους - πετρώματος (U.S. National Committee on Tunneling Technology, 1984).

Πολλές φορές τίθεται το ερώτημα αν κάποια από τα προβλήματα που προκύπτουν κατά την κατασκευή θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί, με περισσότερο ενδελεχή γεωτεχνική έρευνα. Είναι λοιπόν πιθανό ότι μερικά από τα προβλήματα μπορούν να

μειωθούν από αναλύσεις σε δείγματα πετρώματος που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους είτε ανακτώντας πληροφορίες από γεωφυσικές μεθόδους. Ακόμα όμως χρειάζεται να σημειωθεί ότι δεν θα μπορούσαν να προβλεφθούν όλα τα προβλήματα στο σύνολό τους (Μπενάρδος, 2002).

1.3.1. Επίδραση της Αβεβαιότητας στη Ζωή του Έργου

Η απόφαση για την εμπλοκή σε ένα κατασκευαστικό εγχείρημα προϋποθέτει τη γνώση ή εκτίμηση ενός εύρους παραμέτρων και πληροφοριών, έτσι ώστε να διασφαλιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η βιωσιμότητά του. Σε μια ιδανική περίπτωση, η λήψη των αποφάσεων θα γίνονταν σε ένα καθεστώς πλήρους βεβαιότητας (total certainty), στο οποίο όλες οι αναγκαίες πληροφορίες (input data) θα ήταν διαθέσιμες και το αποτέλεσμα θα μπορούσε να προβλεφθεί με ένα σημαντικό βαθμό εμπιστοσύνης. Στην πραγματικότητα όμως, μόνο ένα ποσοστό των παραμέτρων είναι γνωστό, γεγονός που δημιουργεί ένα βαθμό αβεβαιότητας (uncertainty) στο τελικό αποτέλεσμα. Στην ακραία περίπτωση παντελούς έλλειψης των απαραίτητων πληροφοριών, δεν μπορεί να γίνει καμιά εκτίμηση για το αποτέλεσμα και τότε επικρατεί πλήρης αβεβαιότητα (total uncertainty), όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα 1.3 (Benardos, 2004).



Σχήμα 1.3: Παρουσίαση του εύρους της αβεβαιότητας.
(Benardos, 2004)

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η αβεβαιότητα γύρω από το τελικό αποτέλεσμα, ουσιαστικά περιλαμβάνει όλες τις δυνατές περιπτώσεις που μπορούν να συμβούν, είτε αυτές είναι προς όφελος (opportunities), είτε σε βάρος (risks) του έργου (Hamburger, 1990). Το γεγονός αυτό πολλές φορές διαφοροποιεί τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται η απόφαση, ανάλογα με την πολιτική που έχει ο αποφασίζων στο ζήτημα (risk profile). Βέβαια, η εκτέλεση ενεργειών που στοχεύουν προς τη μεγιστοποίηση των ωφελειών μπορούν πιθανώς να δημιουργήσουν συνθήκες κινδύνου για το έργο, γεγονός που κάνει εύκολα αντιληπτό τον βαθμό αλληλεξάρτησης των κινδύνων – ωφελειών.

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.

1.3.2. Υπόγεια έργα και αβεβαιότητα

Στην κατασκευή έργων, τα οποία πραγματοποιούνται εντός του γεωλογικού μέσου τόσο ο αριθμός όσο και η επίδραση των ασαφών ή μη πλήρως ορισμένων παραμέτρων αυξάνουν σημαντικά. Αυτό συμβαίνει διότι το έδαφος λειτουργεί όχι μόνο ως ο μηχανισμός φόρτισης, αλλά επιπρόσθετα, ως ο κυριότερος παράγοντας υποστήριξης της κατασκευής. Σε αντίθεση με τα κατασκευαστικά υλικά όπως για παράδειγμα το σκυρόδεμα ή το χάλυβα, στα οποία οι ιδιότητες είναι πλήρως ορισμένες μετά από συνεχείς δοκιμές και μετρήσεις, το γεωλογικό μέσο αποκαλύπτεται πλήρως μόνο κατά τη φάση της κατασκευής του έργου. Μέχρι τη στιγμή εκείνη, οι ιδιότητές του είναι γνωστές μόνο σε «σημειακά» δείγματα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους αρκετά δεκάδες μέτρα και ο όγκος τους, σε σχέση με τον συνολικό όγκο των εκσκαφών του έργου, σπάνια ξεπερνά το 0,0005%. Επιπλέον, η μεταβολή των χαρακτηριστικών κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, η οποία μπορεί να συμβαίνει κάθε λίγα μέτρα, αλλά και η δυνατότητα μεταβολής τους με το χρόνο, το μέγεθος και τη διεύθυνση των εξωτερικών φορτίσεων, είναι κάτι που κάνει ακόμα πιο σύνθετη την προσπάθεια ανάλυσης των δεδομένων (Μπενάρδος, 2002).

Η *χωρική μεταβλητότητα* που παρουσιάζει το γεωλογικό μέσο, όσον αφορά τόσο στους λιθολογικούς σχηματισμούς που υπάρχουν όσο και στις μετρήσεις των ιδιοτήτων τους, η *εγγενής τυχαιότητα*, που εμφανίζεται μέσω αγνώστων ή κρυφών μεταβλητών, αλλά και η *προσέγγιση* των χαρακτηριστικών και δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς για να δώσουν μια περιγραφή του τύπου και της συμπεριφοράς των πετρωμάτων, λειτουργούν ως οι κυριότερες πηγές αβεβαιότητας των υπόγειων έργων. Στο συγκεκριμένο ζήτημα, κυρίως στην επιλογή των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των εκσκαφών, ο Christian et al. (1994) διακρίνει δύο βασικές παραμέτρους που δημιουργούν αβεβαιότητα.

- τη διασπορά των μετρήσεων (data scatter), η οποία οφείλεται στην πραγματική χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει και στα τυχαία σφάλματα που γίνονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

- τα συστηματικά σφάλματα που δημιουργούνται διότι οι δοκιμές δεν μέτρησαν με ακρίβεια το προς ανάλυση μέγεθος, αλλά και γιατί ο αριθμός των δοκιμών είναι πολύ μικρός για να υπάρξει εξομάλυνση των τυχαίων σφαλμάτων.

Στον πίνακα 1.1 ο Parker (1996) παρουσιάζει μια σειρά παραμέτρων που είναι καίριας σημασίας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υπεδάφους από εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου και δείχνει την πολυσύνθετη και αβέβαιη δομή των γεωτεχνικών στοιχείων. Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζεται από την πλευρά των μηχανικών είναι η επαλήθευση και επιβεβαίωση στην πράξη των εκτιμήσεων που έγιναν αρχικά, αφού αυτές θα αντιπαραβάλλονται, σε κάθε θέση του έργου, με τα πραγματικά στοιχεία. Με δεδομένο ότι η χάραξη, το βάθος, ο σχεδιασμός καθώς και όλες οι φάσεις λειτουργίας της εκσκαφής είναι βασισμένες στα δεδομένα της αρχικής έρευνας, η επιτυχής περάτωση της κατασκευής, εξαρτάται από το πόσο συμβατές θα είναι οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν με τις συνθήκες του γεωλογικού περιβάλλοντος που υφίσταται πραγματικά. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι η γεωλογία, αλλά κυριότερα η ασάφεια που σχετίζεται με αυτή, παίζει σημαντικότερο ρόλο στην επιτυχία του έργου.

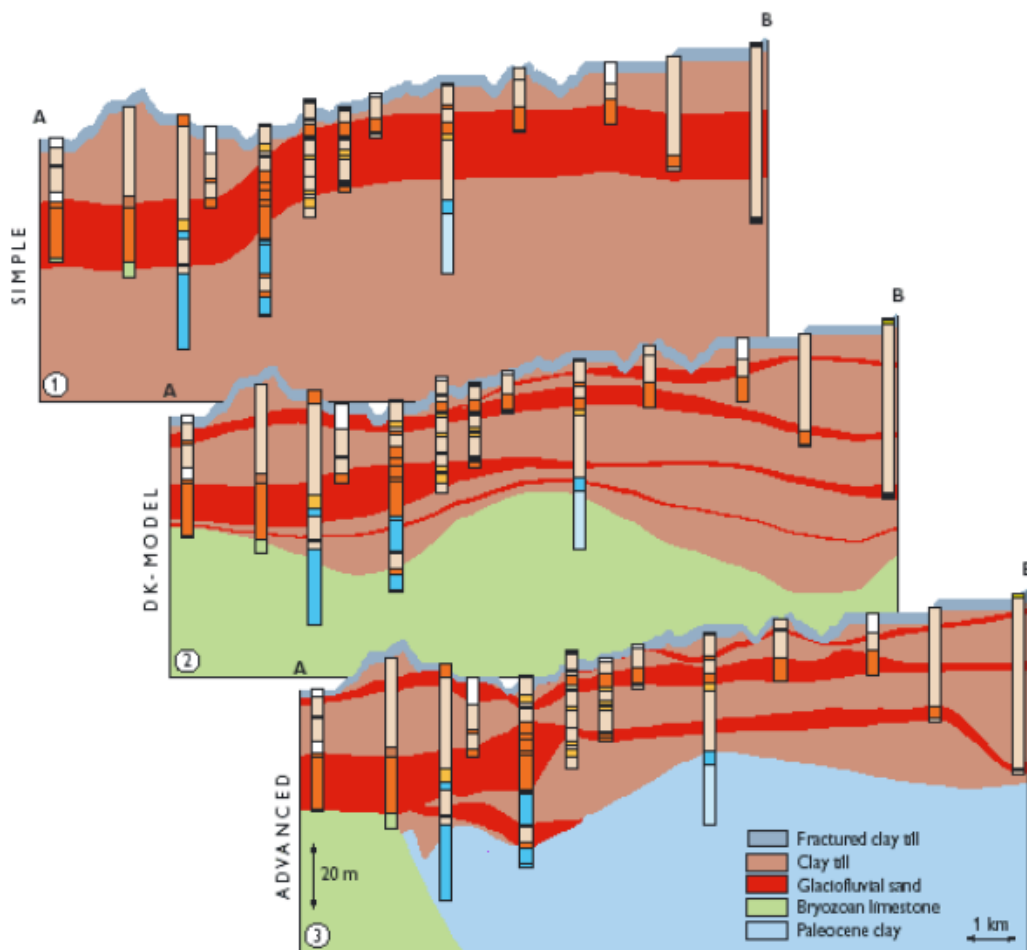
Πίνακας 1.1: Μεταβλητότητα στα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας

(Parker, 1996)

Παράμετρος	Επίδραση
<i>Ανισοτροπία</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση επίδραση των τιμών αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας των πετρωμάτων από τη διεύθυνση των ασυνεχειών, διακλάσεων, επιπέδων στρώσεως • 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
<i>Εργαστηριακές δοκιμές - Δοκιμές πεδίου</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση επίδραση στην εξέταση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων, καθώς δεν μπορεί να αναπαρασταθούν οι συνθήκες των ασυνεχειών (scale effect)
<i>Ρυθμός Φόρτισης</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Διαφοροποίηση στο ρυθμό φόρτισης των πετρωμάτων στις εργαστηριακές δοκιμές και στη φόρτιση που δέχεται το πέτρωμα κατά την όρυξη
<i>Τασικό πεδίο</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Επίδραση του τασικού πεδίου σε τιμές αντοχής και μέτρου παραμορφωσιμότητας
<i>Χρόνος</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Χειροτέρευση των χαρακτηριστικών σε ορισμένα γαιώδη υλικά και «μαλακούς» βράχους με το χρόνο, όταν παραμένουν εκτεθειμένα στο νερό, ή ακόμη και στον αέρα

Διαταραχές	<ul style="list-style-type: none"> 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
Υδροφόρος ορίζοντας	<ul style="list-style-type: none"> Διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, ασυνεχειών και στο βαθμό αποσάθρωσης με τις εποχικές αλλαγές στη στάθμη και παροχή του υδροφορέα

Εξίσου σημαντικό ρόλο παίζουν οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η υδρολιθολογική συμπεριφορά των πετρωμάτων, η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα και οι διακυμάνσεις του, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του γεωλογικού μέσου, το ποιοτικό και ποσοτικό καθεστώς των υπόγειων νερών και οι αλληλεπιδράσεις υπόγειου έργου και υπόγειων νερών.



Εικόνα 1.4: Γεωλογική πολυπλοκότητα και προσομοίωση ηλικιακή κατανομή. Σε ένα απλό (1), σε ένα ενδιάμεσο (2), και σε ένα σύνθετο υδρογεωλογικό εννοιολογικό μοντέλο (3). (Trolborg, 2000)

1.4. Εμφάνιση προβλημάτων και κλίμακα της γεωλογικής έρευνας

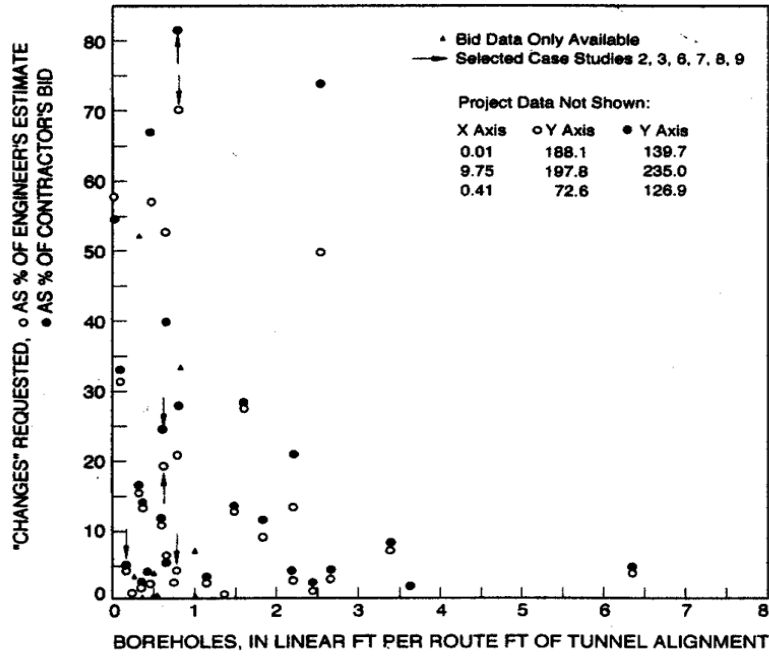
Μια από τις πιο ολοκληρωμένες μελέτες που έχει γίνει μέχρι σήμερα για την εξακρίβωση του βέλτιστου εύρους της γεωλογικής/γεωτεχνικής έρευνας είναι αυτή που πραγματοποιήθηκε από την Εθνική Επιτροπή Τεχνολογίας Σηράγγων των Η.Π.Α. (U.S. National Committee on Tunnelling Technology – USNC/TT) το 1984, στην οποία εξετάστηκαν 84 έργα σηράγγων. Η επιτροπή βρήκε ότι, ως γενικός κανόνας, η εκτέλεση μεγαλύτερης κλίμακας ερευνητικών εργασιών μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της αβεβαιότητας του γεωλογικού μέσου και επομένως σε σημαντική βελτίωση των προσφορών κατασκευής των έργων από τους αναδόχους. Παράλληλα με τις διαπιστώσεις αυτές, όμως, έγινε σαφές ότι τα τελικά κατασκευαστικά μεγέθη που προέκυψαν στο μεγαλύτερο μέρος των εξεταζόμενων έργων ήταν σημαντικά διαφοροποιημένα από αυτά που είχαν οριστεί αρχικά. Πιο συγκεκριμένα, σε 49 έργα (ποσοστό 60%) υπήρξαν προβλήματα κατά την κατασκευή, που μεταφράστηκαν σε σημαντικές απαιτήσεις (claims), από τις οποίες, ένα ποσοστό 95% αφορούσε στην πληρωμή αρκετά μεγάλων ποσών, όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται. Για 32 από τα έργα αυτά, το κόστος κατασκευής τους ήταν \$US 1.346,8 εκατομμύρια, ενώ το συνολικό ποσό των διαφόρων απαιτήσεων έφτανε τα \$US 253,7 εκατομμύρια, δηλαδή ποσοστό 18,5%. Η ανάλυση έδειξε ότι το τελικό κόστος κατασκευής συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων απαιτήσεων (as-completed cost), μπορεί να διαφέρει σε ποσοστό έως και 50% από τις αρχικές προβλέψεις, όταν τα κονδύλια και το εύρος της έρευνας κινούνται σε χαμηλά επίπεδα (Μπενάρδος, 2002).

Στα σχήματα 1.4 και 1.5 δίνονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα της σχέσης μεταξύ του κόστους κατασκευής και του βαθμού έρευνας. Στο πρώτο σχήμα (σχήμα 1.4), παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του μήκους των ερευνητικών γεωτρήσεων ανά μήκος σήραγγας και των απαιτήσεων (claims requested) που ζητήθηκαν από τον κατασκευαστή, ως ποσοστό του αρχικού κόστους.

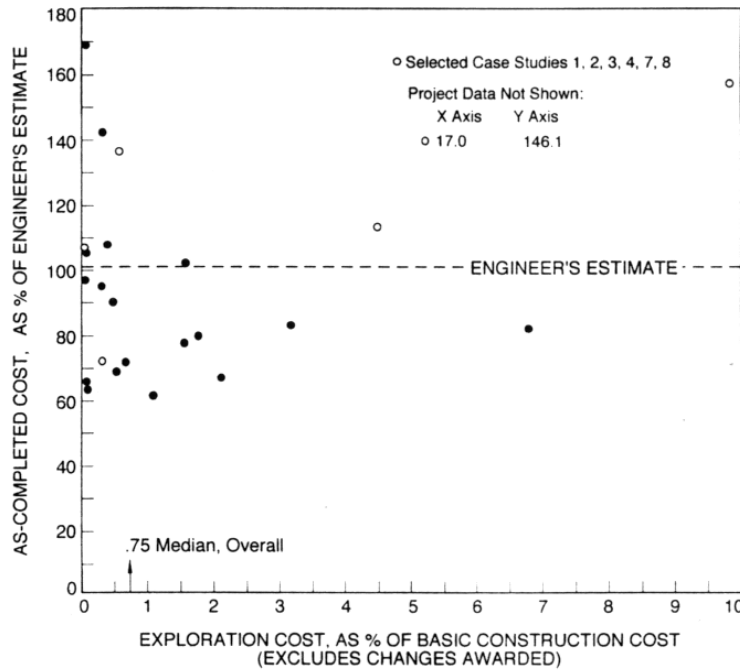
Για τα εξεταζόμενα έργα, φαίνεται ότι ο μέσος όρος του λόγου μήκος γεωτρήσεων προς μήκος σήραγγας, ήταν 0,42. Παρατηρείται ότι μέχρι την τιμή λόγου ίση με 0,6 περίπου, υπήρξαν αρκετά υψηλές απαιτήσεις, από εκεί και πέρα όμως, η αύξηση του λόγου συνδυαζόταν με μια σημαντικότερη πτώση στο ποσοστό των διεκδικήσεων, το οποίο φτάνει τελικά σε ποσοστό μικρότερο του 10% του αρχικού προϋπολογισμού, όταν η τιμή του λόγου ξεπερνούσε το 1,5 περίπου.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η σχέση κόστους μεταξύ της έρευνας, ως ποσοστό του αρχικού προϋπολογισμού του έργου, και των αποκλίσεων του τελικού από το αρχικά εκτιμώμενο κόστος.

Η διάμεσος τιμή του κόστους έρευνας ήταν 0,75% του συνολικού κόστους, ενώ φάνηκε ότι η αύξηση του κόστους πάνω από 3%, οδηγεί σε αποκλίσεις μικρότερες του 20%, μεταξύ αρχικού και τελικού κόστους.



Σχήμα 1.4: Σχέση μεταξύ κόστους απαιτήσεων και λόγου μήκους γεωτρήσεων προς το μήκος σήραγγας (USNC/TT, 1984)



Σχήμα 1.5: Σχέση μεταξύ κόστους απαιτήσεων και κόστους των εργασιών έρευνας (USNC/TT, 1984)

1.4.1. Προβλήματα στην κατασκευή υπογείων έργων

Εξαιτίας της αβεβαιότητας που διακρίνει το γεωλογικό και υδρογεωλογικό μέσο καθώς και της ελλιπούς γεωτεχνικής έρευνας υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν σημαντικές υπερβάσεις του εκτιμώμενου κόστους και της εκτιμώμενης διάρκειας του

έργου, καθώς και απρόβλεπτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή (ΙΤΑ, 2002). Εκτός όμως από υπέρβαση του κόστους και καθυστερήσεις η καταγραφή θεαματικών καταρρεύσεων υπογείων έργων στο παρελθόν έχει υποδείξει την δυνητικά μεγάλη τρωτότητα των υπογείων κατασκευών σε ατυχήματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας.

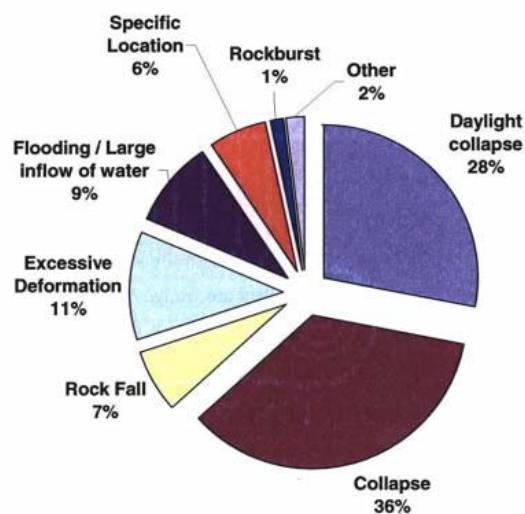
Για να γίνει περαιτέρω αντιληπτή η σημασία της εκτίμησης της επικινδυνότητας ενός υπογείου έργου όπως το εξεταζόμενο είναι απαραίτητη η αναγνώριση και κατηγοριοποίηση των συμβάντων που μπορούν να προκύψουν κατά την κατασκευή σηράγγων. Ο πίνακας 1.2 (Sousa, et al., 2010) παρουσιάζει συνοπτικά τα πιο συχνά παρατηρούμενα ατυχήματα κατά την κατασκευή. Κατά τη λειτουργία μίας υπογείου κατασκευής οι πιο συχνοί τύποι ατυχημάτων είναι η φωτιά κι οι εκρήξεις, που μπορούν να προκύψουν και κατά την κατασκευή. Οι εν λόγω κίνδυνοι δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα ανάλυση.

Πίνακας 1.2: Τύποι ατυχημάτων κατά την κατασκευή υπογείων έργων (Sousa et al, 2010)

Ανεπιθύμητο συμβάν	Περιγραφή
Πτώση τεμαχίων βράχου	Πτώση κομματιών βράχων από την οροφή και τα ανώτερα τμήματα των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας. (Σφήνες, αστοχίες επιπέδου)
Κατάρρευση / κατάπτωση μετώπου οροφής	Κατάρρευση μετώπου / αστοχία μετώπου / αστοχία υποστήριξης.
Επιφανειακές καθιζήσεις / καταπτώσεις	Κατάρρευση μετώπου / αστοχία της υποστήριξης του μετώπου που φθάνει την επιφάνεια δημιουργώντας κρατήρα.
Σύγκλιση - διόγκωση	Μπορεί να προκύψει για παράδειγμα λόγω ανεπαρκούς σχεδιασμού, κατασκευαστικές αστοχίες και/ή λόγω συγκεκριμένων τύπων εδαφών (διογκούμενων και θλιβόμενων) που δεν έχουν προβλεφθεί.
Εισροή υδάτων	Περιπτώσεις κατά τις οποίες μεγάλες ποσότητες υπογείων υδάτων εισβάλλουν στη σήραγγα.

Ακαριαία διάρρηξη (απότομη εκτόνωση τάσης) / Θρυμματισμός	Υπέρβαση της αντοχής άρρηκτου ή άρρηκτου ψαθυρού βράχου. Αποτέλεσμα ο θρυμματισμός και στις χειρότερες περιπτώσεις απότομη και σφοδρή αστοχία της βραχομάζας.
Τοπική αστοχία στην οροφή ή στα τοιχώματα της σήραγγας	Συγκεκριμένες περιοχές της σήραγγας, όπου εμφανίζεται χαμηλότερη αντίσταση της εδαφικής μάζας και/ή συγκέντρωση τάσεων.
Τοπική αστοχία φρέατος πρόσβασης	
Άλλο Συμβάν	Άλλοι τύποι αστοχιών

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται η κατανομή των ανεπιθύμητων συμβάντων για ένα σύνολο εξεταζομένων περιπτώσεων της έρευνας της Sousa et al., 2010. Είναι εμφανής η επικράτηση των καταρρεύσεων (επιφανείας και υπογείων) με αντίστοιχα ποσοστά 28% και 36% έναντι των υπολοίπων κινδύνων. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι οι καταρρεύσεις είναι τα πιο συνηθη προβλήματα που προκύπτουν κατά την κατασκευή σηράγγων. Είναι όμως οι πιο συχνά αναφερόμενες στη διεθνή βιβλιογραφία (Sousa et al., 2010), κυρίως λόγω των πιο σοβαρών επιπτώσεων στην κατασκευαστική διαδικασία και την ασφάλεια των εργαζομένων, του γενικού πληθυσμού αλλά και των επιφανειακών κατασκευών.

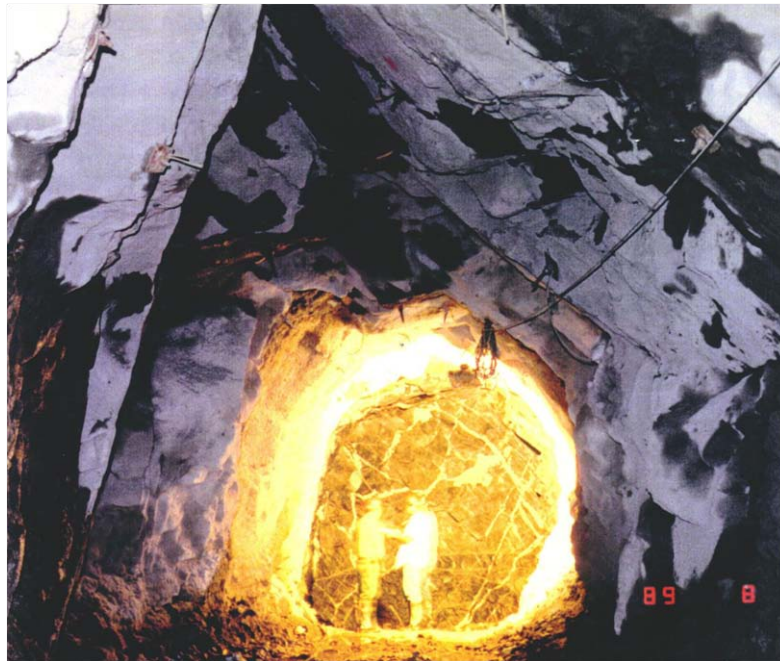


Σχήμα 1.6: Κατανομή ανεπιθύμητων συμβάντων (Sousa et al, 2010)

Παρακάτω αναλύονται εκτενέστερα οι κατηγορίες πιθανών προβλημάτων καθώς και δίνονται μερικά παραδείγματα.

1.4.1.1. Πτώση τεμαχίων βράχου

Ως πτώση βράχου ορίζεται κάθε είδους μεμονωμένη κατάπτωση κομματιού που αποκολλάται μέσω ολίσθησης ή πτώσης. Οι δύο μηχανισμοί δυνητικής αστοχίας που εμπλέκονται είναι η αστοχία σφήνας και η αστοχία επιπέδου. Οι σφήνες δημιουργούνται από αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες (διακλάσεις, ρήγματα). Κατά τη εκσκαφή μορφώνονται ελεύθερες επιφάνειες οι οποίες αναιρούν τα εμπόδια της περιβάλλουσας βραχώμαζας και επιτρέπουν την ολίσθηση των σφηνών. Στην Εικόνα 1.5 φαίνονται διακλάσεις που δημιούργησαν σφήνες κατά την διάνοιξη της σήραγγας.



Εικόνα 1.5: Αποστραγγιστική σήραγγα φράγματος Θησαυρού (Μαρίνος, 2009)

Χωρίς την απαραίτητη υποστήριξη επηρεάζεται η ευστάθεια της οροφής και των πλευρών της σήραγγας. Η ολίσθηση μιας σφήνας δύναται να οδηγήσει σε ολίσθηση νέων σφηνών και κατ' επέκταση αποδιοργάνωση του πετρώματος και αστοχία της σήραγγας εάν το επιτρέπει ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Όσον αφορά τις δομικές αστοχίες μορφής αστοχίας επιπέδου, αυτές αποτελούν ειδική περίπτωση αστοχίας σφήνας, όταν τα δύο επίπεδα ολίσθησης παραλληλίζονται ή ταυτίζονται.

1.4.1.2. Κατάρρευση/ κατάπτωση μετώπου - οροφής

Πρόκειται για καταρρεύσεις που συμβαίνουν σε υπό κατασκευή σήραγγες (φαινόμενο καμινάδας) που όμως δεν γίνονται αντιληπτές στην επιφάνεια. Η πλειοψηφία τους σημειώνεται στο μέτωπο της διάνοιξης του υπογείου έργου (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Καταρρεόν υλικό στο μέτωπο σήραγγας
(Μαρίνος, 2009)

Το πιο συχνό κομμάτι της υπό κατασκευή σήραγγας στο οποίο μπορεί να συμβεί μια κατάρρευση στο μέτωπο και την οροφή. Άλλες πιθανές τοποθεσίες περιλαμβάνουν τα τοιχώματα της σήραγγας πλησίον του μετώπου πριν ή κατά τα πρώτα στάδια υποστήριξης.

1.4.1.3. Επιφανειακές καθιζήσεις/ καταπτώσεις

Ως επιφανειακές καθιζήσεις/ καταπτώσεις ορίζουμε τις περιορισμένες ή μαζικές καταρρεύσεις που φθάνουν ως την επιφάνεια, ενίοτε δημιουργώντας κρατήρα. Συνιστά τον τύπο ανεπιθύμητου συμβάντος με τις πιο σφοδρές συνέπειες, ιδιαιτέρως όταν αφορά έργα που γίνονται εντός αστικών ορίων. Πέρα από τον προφανή κίνδυνο για το έργο και τις απώλειες σε υλικά, χρόνο και αποζημιώσεις, είναι ο τύπος συμβάντος που βλάπτει περισσότερο το έργο σε επικοινωνιακό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει γιατί συνήθως τέτοιου είδους καταρρεύσεις συμβαίνουν ακαριαία και

χωρίς σημαντικές πρότερες ενδείξεις (όπως π.χ. σημαντικές επιφανειακές καθιζήσεις). Γνωστές άλλωστε είναι και οι διάφορες επιφανειακές καταρρεύσεις που συνέβησαν κατά την κατασκευή του Αττικό μετρό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7 κατά την διάνοιξη της γραμμής 2, στην οδό Πανεπιστημίου.



Εικόνα 1.7: Περιστατικό καθίζησης στην οδό Πανεπιστημίου (Μαρίνος, 2008)

1.4.1.4. Εισροή υδάτων

Υπάρχουν καταγεγραμμένες περιπτώσεις όπου σήραγγες προσβλήθηκαν από μεγάλες ποσότητες υπογείου νερού, κυριολεκτικά πλημμυρίζοντας τις (Εικόνα 2.3). Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό συνέβη κατά την κατασκευή υποβρυχίων σηράγγων. Το έδαφος κάτω από ποτάμια, κανάλια και κόλπους είναι συνήθως ασθενές και κάτω από υψηλή πίεση υπερκειμένων υδάτων, στις οποίες περιπτώσεις απαιτούνται τόσο ιδιαίτερα μέτρα ασφαλείας όσο και ειδική μελέτη για την προστασία από την εισροή υδάτων. Πέρα από τέτοιες ιδιαίτερες περιπτώσεις, όμως, η εισροή υπογείων υδάτων αποτελεί κλασσικό τύπο κινδύνου ο οποίος μάλιστα αποτελεί και προπομπό άλλων τύπων προβλημάτων, καθώς θέτει σε κίνδυνο την κατασκευαστική διαδικασία και την σταθερότητα της υποστήριξης. Οι συνέπειες πλημμυρισμού της σήραγγας ποικίλουν από καθυστερήσεις στον κύκλο εργασιών έως καταρρεύσεις, υπόγειες και επιφανειακές. Αντιστρόφως, αρκετές καταρρεύσεις συνοδεύονται από εισροή υδάτων.

1.4.1.5. Ακαριαία διάρρηξη (απότομη εκτόνωση τάσης)

Η ακαριαία διάρρηξη παρατηρείται σε πετρώματα με πολύ υψηλή αντοχή και κάτω από πολύ υψηλές τάσεις, όπως στη Ν. Αφρική σε μεταλλείο χρυσού και μεγάλο ύψος υπερκειμένων (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8 : Αποτελέσματα ψαθυρής θραύσης σε βάθος 3000m σε ορυχείο χρυσού στην Ν. Αφρική (Hoek, 2007)

Η βραχώμαζα έχει λίγες ασυνέχειες, αντοχή μεγαλύτερη από 100 MPa και υψηλό μέτρο ελαστικότητας ενώ η θραύση είναι ιδιαίτερα βίαιη και ψαθυρή. Μέσω της υπέρβαση της αντοχής της βραχώμαζας, παρατηρούνται φαινόμενα που κυμαίνονται από θρυμματισμούς πετρώματος και υπερεκσκαφές, έως περιπτώσεις ξαφνικής και σφοδρής μαζικής αστοχίας της βραχώμαζας. Αυτού του τύπου οι διαρρήξεις είναι δυνατό να προκαλέσουν (συνήθως) θανάσιμους τραυματισμούς και μεγάλες ζημιές λόγω των δυνάμεων που ασκούνται, και ο κίνδυνος εμφάνισης τους ως φαινόμενο αυξάνει με το βάθος της κατασκευής. Παρ' όλα αυτά, η τεχνογνωσία από την μεταλλευτική δραστηριότητα σε μεγάλα βάθη και η ανάπτυξη της βραχομηχανικής έχουν συμβάλει στην κατανόηση των διαδικασιών που σχετίζονται με τη δημιουργία τέτοιων προβλημάτων και την ανάπτυξη μεθόδων πρόβλεψης πιθανών προβλημάτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη υψηλών τάσεων (Κρασσακόπουλος; Ταμβάκης, 2011)

1.4.1.6. Σύγκλιση-διόγκωση

Ως περιπτώσεις εκτενούς παραμόρφωσης κατηγοριοποιούνται περιπτώσεις στις οποίες υπήρξε έντονη παραμόρφωση μέσα στη σήραγγα ή στην επιφάνεια χωρίς όμως να υπάρξει κατάρρευση (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Σήραγγα. Τυμφορηστού. Φαινόμενα σύνθλιψης στον φλύσχη: σύγκλιση οροφής σε σήραγγα σε περιβάλλον ασθενούς διατημημένου φλύσχη (Μαρίνος, 2009)

Μπορεί να προκύψουν λόγω ανεπαρκούς σχεδιασμού, κατασκευαστικών αστοχιών και/ή λόγω συγκεκριμένων τύπων εδαφών (διογκούμενων και θλιβόμενων) που δεν έχουν προβλεφθεί. Τα προβλήματα παραμορφώσεων με φαινόμενα ισχυρής σύνθλιψης παρουσιάζονται σε βραχώμαζες πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών όταν η αντοχή της βραχώμαζας είναι μικρότερη από το 30% της επιβαλλόμενης τάσης (Καββαδάς, 2005). Η κύρια ενέργεια που απαιτείται είναι ο έλεγχος και η συγκράτηση των παραμορφώσεων. Οι παραμορφώσεις μπορεί να ολοκληρωθούν κατά την κατασκευή ή να συνεχίζονται και μετά το τέλος της. Η υπερφόρτιση που προκαλείται δεν οφείλεται στη χαλάρωση αλλά στον συνδυασμό τάσεων και ιδιοτήτων της βραχώμαζας. Η συμβολή του υπογείου νερού είναι ιδιαίτερα αρνητική ενώ το μέγεθος των φαινομένων σύνθλιψης εξαρτάται από την αλληλουχία της εκσκαφής και την τεχνική της υποστήριξης.

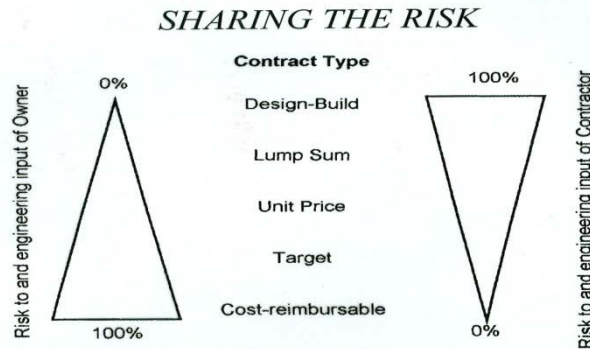
1.4.1.7.Οικονομικές συνέπειες

Ένα άλλο σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό ενός προγράμματος διερεύνησης είναι η ανάγκη να συσχετιστούν η πραγματική έρευνα για τις προβληματικές περιοχές της κατασκευής, καθώς και παραδοχή παραδοχών σχεδιασμού και οι αντίστοιχες εκτιμήσεις κόστους. Τα δεδομένα και οι ερμηνείες της έρευνας θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για τους σχεδιαστές κατά το στάδιο του σχεδιασμού, καθώς και για τους υποψήφιους κατασκευαστές που χρειάζονται απαντήσεις για τις προβληματικές περιοχές (Σχήμα 1.7).

Στην περίπτωση που δεν έχουν καθοριστεί επαρκώς οι κίνδυνοι που αναφέρθηκαν παραπάνω τότε θα υπάρχουν σημαντικές αρνητικές συνέπειες στην εκτέλεση του έργου. Αυτές αφορούν τόσο υπέρβαση του προϋπολογισμού όσο και καθυστερήσεις

στα χρονοδιαγράμματα. Υπέρβαση του κόστους σημαίνει ότι μπορεί το έργο να “παγώσει” λόγω γραφειοκρατικών διαδικασιών, αλλά και λόγω μη συμβατότητας με την γεωτεχνική έκθεση, κάτι που θα αποφέρει αρνητικές συνέπειες στην οικονομία μιας χώρας καθώς και στο κοινωνικό σύνολο.

SOME CONTRACTUAL CONSIDERATIONS



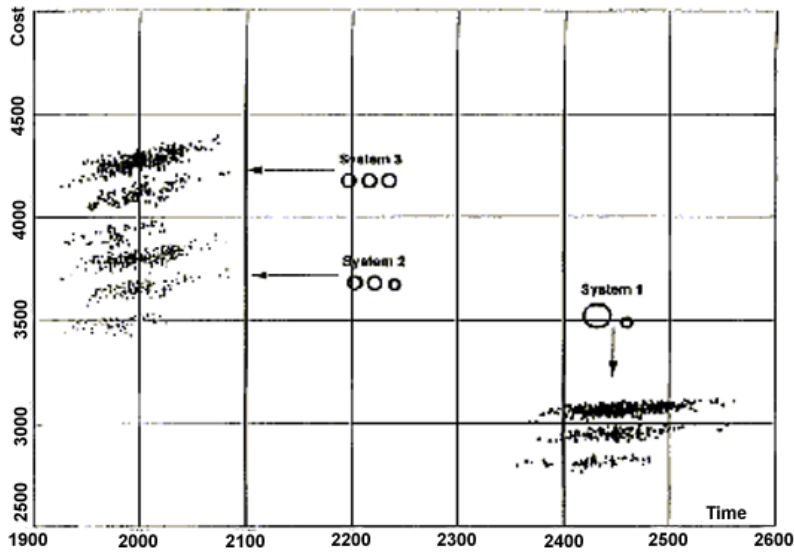
Σχήμα 1.7: Επιλογές και επιπτώσεις στη σύμβαση μιας σήραγγας (Μαρίνος, 2007)

1.5. Προσπάθειες ελέγχου και αντιμετώπισης των προβλημάτων

Οι προσπάθειες για την εκτίμηση των προβληματικών περιοχών κατά την όρυξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής είναι αρκετά σημαντικές τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με τις προσπάθειες των κατασκευαστών να δημιουργήσουν μηχανήματα (universal TBM's) τα οποία θα μπορούν πιο εύκολα να ανταπεξέλθουν στις μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες (Grandori, 2000).

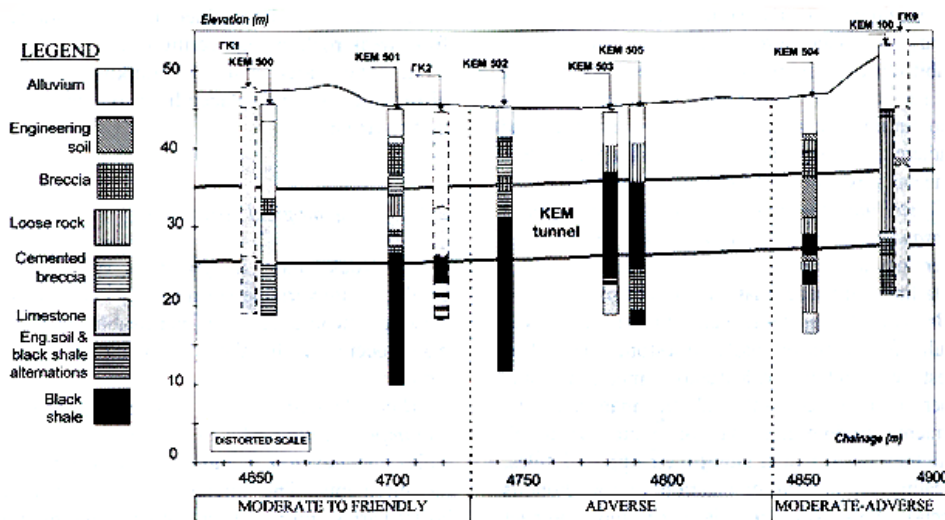
Οι ερευνητικές προσπάθειες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μεθόδων και τεχνικών, επιδιώκουν όμως το ίδιο αποτέλεσμα, να εκφράσουν, με ποσοτικά το δυνατόν κριτήρια, πού εντοπίζονται περιοχές προβλημάτων και πώς αυτές επηρεάζουν τις εργασίες όρυξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες προσπάθειες πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα. Η πρώτη από αυτές, αφορά στην έρευνα που γίνεται στο MIT, πάνω στο πρόγραμμα DAT (Decision Aids in Tunnelling) (Einstein et al., 1992; Sinfield et al., 1996). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να γίνει η προσομοίωση της όρυξης της σήραγγας και να εξεταστεί το κόστος και ο χρόνος κατασκευής σε σχέση με τη γεωλογία και τις επιλεγθείσες επιλογές κατασκευής. Βασίζεται σε μια αναλυτική μοντελοποίηση των διαφόρων φάσεων εργασίας του μηχανήματος, ενώ προσπαθεί να εισάγει τη γεωλογική δομή στο σύστημα, διακρίνοντάς την σε ομογενοποιημένα τμήματα παράλληλα με την εκτίμηση των πιθανοτήτων μετάβασης (transition probability) από τη μια μορφή γεωλογίας στην άλλη (Benardos, 2004).

Στο σχήμα 1.8 δίνεται ένα παράδειγμα εκτίμησης του χρόνου-κόστους κατασκευής της σήραγγας Gotthard, σε σχέση με διαφορετικές επιλογές κατασκευής της.



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα διασποράς χρόνου – κόστους κατασκευής της σήραγγας Gotthard.

Μια διαφορετική προσέγγιση έχει γίνει από τον Marinos et al. (1997) στην προσπάθεια επιλογής μιας διαφορετικής χάραξης σήραγγας του Μετρό Αθηνών, ώστε να παρακαμφθεί μια αρκετά προβληματική περιοχή. Τα βασικά κριτήρια εξέτασης αφορούν στα ευρήματα της γεωτρητικής έρευνας, στα οποία εξετάζονται οι ποσοστιαίες συμμετοχές των διαφόρων γεωλογικών τύπων στην εγκεκριμένη να κατασκευαστεί και την προτεινόμενη νέα χάραξη της σήραγγας (Σχήμα 1.9). Τελικά, οι διάφορες περιοχές χαρακτηρίζονται σε σχέση με την επίδρασή τους στην κατασκευή ως «φιλικές», «μέτριες» και «δυσχερείς» (friendly, moderate, adverse) και αντίστοιχα γίνεται η επιλογή της βέλτιστης δυνατής χάραξης.



Σχήμα 1.9: Μηκομή της εξεταζόμενης σήραγγας στον αρχαιολογικό χώρο του Κεραμικού (Marinos et al., 1997)

Υπάρχουν βέβαια και άλλες αναλύσεις, κυρίως με τη χρήση χωρικής μοντελοποίησης, κάποιες από τις οποίες δίνονται ενδεικτικά σε επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο_2: Εισαγωγή στην χωρική ανάλυση (Spatial analysis)

2.1. Εισαγωγή

Ο σκοπός ενός γεωτεχνικού μηχανικού ανεξάρτητα για το αν πρόκειται για χαρακτηρισμό χώρου αποβλήτων, εκτίμηση μόλυνσης, προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων, αξιολόγηση των ορυκτών πόρων, ή την σχεδίαση μιας σήραγγας, κοινός παρονομαστής είναι η ανησυχία για την διερεύνηση - χαρακτηρισμό τη γεωλογία και την γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών κάτω από την επιφάνεια.

Ο πρωταρχικός στόχος για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπεδάφους όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι η πρόβλεψη της χωρικής ποικιλομορφίας των γεωλογικών μεταβλητών σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα. Συνήθως το υπέδαφος είναι ανισότροπο, πολύπλοκο ενώ και τα ίδια τα πετρώματα είναι εσωτερικά ετερογενή.

Το συμπέρασμα από την μελέτη πολλών φυσικών συστημάτων είναι η εμφανής τυχαιότητα, η οποία συνήθως προκαλείται από έντονη ευαισθησία σε αρχικές συνθήκες. Έτσι στατιστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν αυτές τις μετρήσεις σε απουσία ενός φυσικού μοντέλου. Σχεδιασμένα όμως από στατιστικολόγους που γνωρίζουν λίγα πράγματα για τη γεωλογία και εφαρμοζόμενα από γεωλόγους / γεωτεχνικούς μηχανικούς που γνωρίζουν λίγα για στατιστικά στοιχεία, πολλά πράγματα μπορούν να οδηγήσουν σε λάθη (Overeem, 2008). Ο Houlding, (1994) έχει αναφέρει ότι: " Ανεξάρτητα τι τεχνική πρόβλεψης θα χρησιμοποιήσουμε για μια μεταβλητή, είναι απίθανο να επιτευχθεί ένα αποδεκτό αποτέλεσμα, αν δεν λάβουμε υπόψη τις γεωλογικές επιπτώσεις."

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε σε τεχνικές για την δημιουργία υπολογιστικών αναπαραστάσεων και χωρικών αναλύσεων με σκοπό την πρόβλεψη των συνθηκών του σύνθετου γεωλογικού περιβάλλοντος. Ενώ θα παρουσιαστούν και τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό δεδομένων γύρω από γνωστές γεωτρήσεις.

2.2. Πρόβλεψη των γεωλογικών μεταβλητών

Ο κύριος στόχος σχεδόν κάθε γεωλογικού χαρακτηρισμού σχετίζεται με την πρόβλεψη της χωρικής διακύμανσης ενός ή περισσότερων γεωλογικών μεταβλητών (Houlding, 1994). Μια μεταβλητή του γεωλογικού μέσου καθορίζεται σαν κάθε ιδιότητα του γεωλογικού υποβάθρου που εκθέτει την χωρική μεταβλητότητα και μπορεί να μετρηθεί σε όρους πραγματικών αριθμητικών τιμών.

Σε μια αξιολόγηση των πόρων ενός ορυκτού μεταλλεύματος μία τυπική μεταβλητή είναι ο βαθμός ενός ορυκτού, εκφραζόμενος ως αναλογία ή ποσοστό κατά βάρος του μετάλλου προς το μέταλλευμα. Μια ίση μεταβλητή για κάποιο κοίτασμα άνθρακα είναι μια μέτρηση της ποιότητας του άνθρακα, ενώ αντίστοιχα μια μελέτη της ροής

των υπογείων υδάτων ασχολείται με την κατανομή υδραυλικών παραμέτρων όπως η υδραυλική αγωγιμότητα.

Όλες αυτές οι μεταβλητές σχετίζονται με την χωρική κατανομή. Ιδανικά, χρειάζεται μια συνεχή μέτρηση της μεταβολής τους στο χώρο, όμως στην πραγματικότητα γίνεται προσπάθεια μέσα από τη διερεύνηση του υπεδάφους, με περιορισμένα οικονομικά μεγέθη να εντοπιστούν όσο περισσότερες περιοχές ενδιαφέροντος γίνεται.

Για την παρουσίαση μοντέλων με συνεχείς - μεταβαλλόμενες μετρήσεις μιας μεταβλητής γίνεται χρήση διαφόρων τεχνικών πρόβλεψης, όπως γίνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να παρουσιαστούν οι άγνωστες τιμές των ενδιάμεσων σημείων.

Η υπό διερεύνηση πηγές αυτού του τύπου των πληροφοριών του δείγματος είναι συνήθως ανάλογες με την εφαρμογή. Έτσι οι αναλύσεις των γεωτρήσεων από κοίτασμα σε κοίτασμα διαφέρουν, όπως διαφέρει και η συγκέντρωση των ρύπων στο έδαφος, σε σχέση με τα υπόγεια ύδατα. Αντίστοιχα οι υπολογισμοί της πυκνότητας των ασυνεχειών από τη χαρτογράφηση των εκτεθειμένων επιφανειών σε μια βραχομάζα ποικίλλουν, όπως και ο δείκτης ποιότητάς της (π.χ. RQD). Για να γίνει αποτελεσματική χρήση των πληροφοριών από κάθε δείγμα πρέπει να γίνεται τρισδιάστατη απεικόνιση. Σε αρκετές περιπτώσεις, όπως στη συγκέντρωση ρύπων, η ανάλυση των δειγμάτων πρέπει να τοποθετείται και χρονικά, σε αντίθεση με τα γεωλογικά στρώματα που παραμένουν σταθερά με τον χρόνο.

2.3. Ερμηνεία των γεωλογικών χαρακτηριστικών

Με μια γενική έννοια, η χωρική μεταβολή ενός χαρακτηριστικού καθορίζεται σε μαθηματικούς όρους, εξαιτίας των γεωλογικών δυσκολιών. Ειδικότερα η διακύμανση επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό από τα στρωματογραφικά - δομικά χαρακτηριστικά, καθώς και τις ασυνέχειες του υπεδάφους. Για παράδειγμα, η διακύμανση της συγκέντρωσης των ρύπων σε μια στρώση άμμου μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική σε σχέση με την διακύμανση που παρουσιάζεται σε μια στρώση αργίλου ή ιλύος. Παρόμοια οι διακυμάνσεις της ποιότητας του μεταλλεύματος σε ένα μεταλλείο, συχνά επηρεάζονται από τις ασυνέχειες της λιθολογίας και του μεταλλεύματος.

Αυτές οι ασυνέχειες ενισχύονται από την γεωλογική δομή μιας περιοχής, καθώς τα ίδια τα γεωλογικά στρώματα μπορεί να υπόκεινται σε χωρικές ασυνέχειες όπως ρήγματα και επιπεύσεις. Ανεξάρτητα ποια τεχνική πρόβλεψης χρησιμοποιείται, είναι απίθανο να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα αν δεν γίνει σωστός καθορισμός του γεωλογικού μοντέλου.

Αυτό απαιτεί η διερεύνηση του υπεδάφους να περιλαμβάνει επαρκή στοιχεία για την στρωματογραφία ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα όσον αφορά τις παραδοχές των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών.

2.4. Χωρική ανάλυση (Spatial analysis)

Με την εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων γεωλογικής και γεωτεχνικής μοντελοποίησης, εκτός από την ερμηνεία σημειακών δεδομένων, γίνεται σωστή επιλογή των τεχνικών εργαλείων ανάλυσης μέσω των οποίων εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Τόσο στα περιγραφικά εργαλεία, όσο και στα εργαλεία χωρικής ανάλυσης εντοπίζονται διάφορες μέθοδοι, με την κάθε μια να εστιάζει διαφορετικά και να δίνει πληροφορίες ανάλογα με τον κύριο στόχο της μελέτης.

Με τον όρο χωρική ανάλυση νοείται ο έλεγχος της τοποθεσίας, των ιδιοτήτων και των σχέσεων των χαρακτηριστικών από χωρικά δεδομένα μέσα από την ταύτιση και άλλων τεχνικών ανάλυσης με σκοπό τη δημιουργία καίριων ερωτημάτων και την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας. Επίσης, η χωρική ανάλυση εξάγει και δημιουργεί νέες πληροφορίες για τα χωρικά δεδομένα (Κακλίδης, 2009).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του γεωλογικού χαρακτηρισμού συνήθως περιλαμβάνει χωρική ανάλυση της διακύμανσης μιας ή περισσότερων μεταβλητών. Ο στόχος είναι η σκιαγράφηση ενός όγκου του οποίου τα γεωμετρικά όρια καθορίζονται από την εμφάνιση των τιμών των μεταβλητών που υπερβαίνουν ένα καθορισμένο όριο. Ο όγκος περικλείει όλα τα σημεία όπου η μεταβλητή υπερβαίνει το όριο, και επομένως περικλείεται από τη ισοεπιφάνεια (*isosurface*) της μεταβλητής για την τιμή του ορίου. Χρειάζεται να καθορίσουμε όχι μόνο τον όγκο που περιέχεται από μια τέτοια ισοεπιφάνεια, αλλά και τη μέση τιμή της μεταβλητής μαζί ένα μέτρο της σχετικής αβεβαιότητας.

Συνήθως αναφερόμαστε σε μια τέτοια ισοεπιφάνεια σαν ένα “μαλακό” όριο, δεδομένου ότι δεν συμπίπτει με κάποια σαφώς οριοθετημένη γεωλογική ασυνέχεια. Σε αντίθεση, τα σύνορα που ορίζουν διακριτούς όγκους των γεωλογικών σχηματισμών και δομικές ασυνέχειες θεωρούνται σαν “σκληρά” σύνορα.

Η χρήση της χωρικής ανάλυσης, συναντά εφαρμογή σε αρκετούς τομείς της γεωτεχνολογίας, της μεταλλευτικής και της γεωτεχνικής μηχανικής. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικά παραδείγματα.

2.4.1. Χωρική ανάλυση στην περιβαλλοντική μηχανική

Στα πλαίσια περιβαλλοντικής μηχανικής το όριο συνήθως καθορίζεται από το επίπεδο δράσης για ένα έδαφος ή για συγκέντρωση ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Η προκύπτουσα ισοεπιφάνεια καθορίζει τα όρια του μολυσμένου υλικού και ότι αυτό είναι δυνητικά επιβλαβές και πρέπει να λαμβάνονται διορθωτικά μέτρα. Ο κλειστός όγκος, η έκταση και ο βαθμός της μόλυνσης υπαγορεύουν γενικά το κόστος της αποκατάστασης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να επεκτείνουμε την ανάλυσή μας για την παροχή αναλύσεων του όγκου της ισοεπιφάνειας από άποψη γεωλογικού

τύπου. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές κόστους μεταξύ αποκατάστασης των μολυσμένων υλικών άμμου, ιλύος και αργίλου. Αυτό απαιτεί μία ογκομετρική τομή της επιφάνειας με διακριτά γεωλογικούς όγκους.

2.4.2. Χωρική ανάλυση στη μεταλλευτική

Στα πλαίσια εξόρυξης μεταλλευμάτων συνήθως ορίζεται ένα όριο, κάτω από το οποίο το μέταλλευμα δεν μπορεί να εξαχθεί οικονομικά και να υποστεί επεξεργασία. Η προκύπτουσα επιφάνεια καθορίζει το όριο του μεταλλεύματος, που είναι θεωρητικά οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Ο όγκος του, η ποιότητά του και η γεωμετρία του τελικά θα καθορίσει κατά πόσον το μέταλλευμα αποτελεί μια βιώσιμη ευκαιρία εξόρυξης. Στην πράξη, μια εκμετάλλευση μπορεί να αποτελείται από διάφορους τύπους μεταλλεύματος, που δεν είναι όλοι απαραίτητοι, ενώ καθορίζεται και το στείρο από το μέταλλευμα.

Σε μερικές περιπτώσεις πιθανόν να χρειάζεται να θεωρήσουμε την διασταύρωση δύο ή περισσότερων ισοεπιφανειών για την απόκτηση ενός καθορισμένου όγκου από διάφορα όρια για μεμονωμένες μεταβλητές.

2.4.3. Χωρική ανάλυση στην υδρογεωλογία

Στα πλαίσια της υδρογεωλογίας, η χωρική ανάλυση, συνήθως δεν αφορά σε αυτό το στάδιο αν και η ισοεπιφάνεια του πορώδους που ορίζει τις πιο πιθανές οδούς μετανάστευσης των ρύπων μπορεί να είναι χρήσιμη. Ενδιαφέρει περισσότερο η μεταφορά των αποτελεσμάτων ενός γεωλογικού χαρακτηρισμού σε ένα μοντέλο υπόγειας ροής για περαιτέρω ανάλυση.

2.4.4. Χωρική ανάλυση στην γεωτεχνική μηχανική

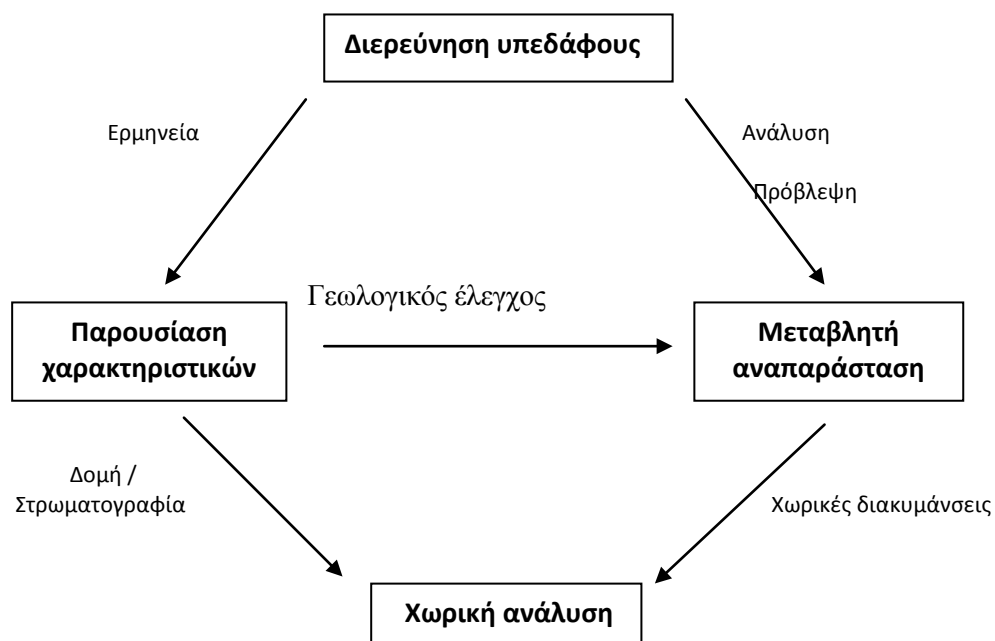
Με εφαρμογή του ορισμού της χωρικής ανάλυσης στην λογική της αξιολόγησης του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας και των γεωτεχνικών της χαρακτηριστικών, όπως αυτά προκύπτουν από εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων που εξέρχονται μέσα από τις γεωτρήσεις, η χωρική ανάλυση:

- χρησιμοποιεί όλες τις χωρικές πληροφορίες των γεωλογικών στρωμάτων.
- ελέγχει τη σχέση που έχει δημιουργηθεί μέσα στο σύνολο αυτών (χωρική και μη).
- εντοπίζει περιοχές για τις οποίες μπορεί να ειπωθεί κάποιο ιδιαίτερο συμπέρασμα ή περιοχές που χρήζουν πιο λεπτομερή εξέταση.
- επιπλέον, δημιουργεί κι άλλα ερωτήματα που χρήζουν διερεύνησης και προσδίδει στις χωρικές οντότητες νέα χαρακτηριστικά μέσω των τεχνικών πρόβλεψης και των συνδυασμών αυτών.

Σε μια σήραγγα ενδιαφέρουν λιγότερο οι μεταβλητές ισοεπιφάνειες, και περισσότερο η εστίαση στο αν η προτεινόμενη εκσκαφή συναντά χαλαρά εδάφη / πετρώματα και εκτεταμένο σύστημα ασυνεχειών. Με την χωρική ανάλυση σε ένα γεωτεχνικό έργο είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι προκύπτουν, μέσα από διάφορες μαθηματικές μεθόδους, δεδομένα ανάμεσα στις γεωτρήσεις. Λειτουργεί έτσι σαν “ακτινογραφία” του χώρου και προσδιορίζονται αδύναμες ζώνες που θα παρουσιαστούν κατά την κατασκευαστική διαδικασία.

Η οπτική απεικόνιση με αριθμητικά στοιχεία βοηθάει σε μεγάλο βαθμό στη χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Είτε οι απεικονίσεις είναι σε χαρτί ή σε υπολογιστή, είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιολόγηση, τον έλεγχο και τον συσχετισμό χωρικών πληροφοριών, ενισχύοντας την εκτίμησή μας για πολύπλοκες συνθήκες. Το κλειδί για την επιτυχή απεικόνιση είναι η διαθεσιμότητα ενός ευρέος φάσματος γραφικών εργαλείων απεικόνισης που μπορεί να εφαρμοστεί σε κατάλληλους συνδυασμούς.

Στο επόμενο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η γενική διαδικασία για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό που ξεκινάει από την διερεύνηση του υπεδάφους μέχρι την χωρική ανάλυση.



Σχήμα 2.1: Γενική διαδικασία γεωλογικού χαρακτηρισμού μέχρι την χωρική ανάλυση (Houlding, 1994)

Επομένως, πέραν των περιγραφικών τεχνικών που βοηθούν στην κατανόηση του χαρακτήρα και της λειτουργίας ενός φαινομένου, η χωρική ανάλυση και οι τεχνικές της είναι το κλειδί για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή του εντοπισμού των ευρύτερων γεωμηχανικών χαρακτηριστικών που επικρατούν στον υπόγειο χώρο υγειονομικής ταφής ρυπασμένων εδαφών στο Λαύριο και περαιτέρω της μαθηματικής σχέσης που συνδέει τις μεταβλητές και της προβολής των αριθμητικών τιμών αυτών.

2.5. Η εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων στη γεωτεχνολογία

Η κατασκευή υπογείων έργων και σιράγγων καθώς και το υψηλό κόστος που συνοδεύει αυτές τις κατασκευές έχει δημιουργήσει την απαίτηση για μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα στην διαδικασία γεωλογικού χαρακτηρισμού. Από την ανάγκη λοιπόν αυτή υπάρχει μεγάλη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, των υπολογιστικών μεθόδων για την ανάλυση των γεωλογικών σχηματισμών.

Σε σχέση με ένα μεταλλείο όπου γίνεται απεικόνιση του κοιτάσματος και ο διαχωρισμός του από το στείρο, σε ένα υπόγειο έργο ενδιαφέρει η γεωλογική στρωματογραφία και οι ιδιότητες του πετρώματος.

Αυτές οι εφαρμογές ανέπτυξαν προσεγγίσεις στη βάση επιφανειών που προσεγγίζουν στον υπολογιστικό γεωλογικό χαρακτηρισμό. Για εκμετάλλευση ενός λατομείου και πετρελαίου η παρουσίαση των κοιτασμάτων γίνεται σε οριζόντια 2D πλεγμικά μοντέλα επιφανείας. Κάθε στρώμα ή επιφάνεια ενδιαφέροντος των σχηματισμών καθορίζεται από το ύψος ή το βάθος, καθώς και από το πάχος του κοιτάσματος που καθορίζεται από διάφορες τεχνικές πρόβλεψης.

Αυτό είναι το υπολογιστικό ισοδύναμο της συμβατικής προσέγγισης για την παραγωγή περιγραμμάτων ή δομικών επιφανειών ή ισοπαχών, εκτός του ότι ένα πλεγμικό μοντέλο περιλαμβάνει αρκετές επιφάνειες ή σχηματισμούς.

Στη συνέχεια η προσέγγιση με πλεγματοποιημένη επιφάνεια (*grid*), τελειοποιήθηκε από την εφαρμογή του τρισδιάστατου μοντέλου που είναι τακτικό σε κάτοψη, αλλά ακανόνιστο στην τρίτη διάσταση. Αυτό περιέχει βελτιωμένη παρουσίαση της γεωλογίας, σαν διακριτούς πλεγμικούς όγκους από ότι επιφάνειες, αλλά δημιουργεί δυσκολίες στην ολοκλήρωση των διαφόρων τεχνικών πρόβλεψης.

Αργότερα παρόμοιες προσεγγίσεις αναπτύχθηκαν, χρησιμοποιώντας τριγωνικές επιφάνειες, και όχι δικτυωτές. Αυτές παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία και λεπτομέρεια και παρουσιάζουν ένα πραγματικό διανυσματικό μέγεθος (*vector*) σχετικά με το εκάστοτε πρόβλημα. Παρόλα αυτά ακόμα και σήμερα η κύρια έλλειψη των περισσότερων προσεγγίσεων είναι η επισήμανση δομικών ασυνεχειών όπως διαρρήξεις, ρήγματα και εφιπτεύσεις.

Μέχρι πρόσφατα η χρήση υπολογιστικών χωρικών αναλύσεων, περιοριζόταν σε διακυμάνσεις σταθμισμένης απόστασης αλγορίθμων του περιγράμματος, εκτεταμένο μερικές φορές σε τρεις διαστάσεις.

Η έξαρση των υπολογιστικών μεθόδων για την αναγνώριση των ενεργειακών και μεταλλευτικών κοιτασμάτων ξεκίνησε στα τέλη του 60' με την χρήση μεγάλων κεντρικών υπολογιστών. Οι διάφορες προσεγγίσεις έχουν εξελιχθεί σημαντικά από τότε και έχουν γίνει πιο απλές στις λύσεις που δίνουν.

Σε αντίθεση, οι υπολογιστικές μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό σε άλλους τομείς της γεωεπιστήμης ξεκίνησαν με την ανάπτυξη των γραφικών και των προσωπικών υπολογιστών. Οι σύγχρονες εφαρμογές κάνουν χρήση λοιπόν διαθέσιμων αρχείων CAD, GIS και βάσεων δεδομένων. Σαν αποτέλεσμα μεγάλο μέρος των χειρωνακτικών μεθόδων χαρακτηρισμού αντικαταστάθηκε από τις υπολογιστικές μεθόδους, όμως οι βασικές και εγγενείς διαφορές τους, παραμένουν.

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές οπτικοποίησης (*visualization*) έχουν αναπτυχθεί σημαντικά, εξαιτίας κυρίως της ανάπτυξης των γραφικών για κινούμενα σχέδια που είναι διαθέσιμα και σε άλλους πλέον τομείς. Το κλειδί για μια επιτυχημένη 3D αναπαράσταση βασίζεται στο γεγονός ότι πρέπει η πηγή πληροφόρησης και οι βάσεις δεδομένων να είναι συμβατές με τις τεχνικές οπτικοποίησης.

Έτσι, οι υπολογιστικές μέθοδοι χρειάζεται να παρέχουν 3D γραφικών εργαλείων όπως το χρώμα, την χαρτογράφηση, την διαφάνεια, τον φωτισμό, τομές και περιστροφές των μοντέλων που μπορούν να εφαρμοστούν σε σημείο, γραμμή, πολύγωνο, επιφάνεια, όγκο και σε γεωμετρικές ισοεπιφανειών.

2.5.1. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Όλες οι προσεγγίσεις του γεωλογικού χαρακτηρισμού περιλαμβάνουν έναν σημαντικό αριθμό παραδοχών και ποικίλους βαθμούς προσεγγίσεων και απλουστεύσεων, ενώ όλες έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Βγαίνει λοιπόν το συμπέρασμα ότι κάθε ακριβής παρουσίαση κάθε δυνατής κατάστασης που μπορεί να παρουσιαστεί εξαρτάται από τις τρέχουσες ικανότητες που αφορούν το στήσιμο ενός τρισδιάστατου μοντέλου που θα μειώσει τα μειονεκτήματα και θα οδηγήσει σε μια δυναμική – νέα προσέγγιση του γεωλογικού χαρακτηρισμού που θα ικανοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις.

Οι περιορισμοί λοιπόν των συμβατικών μεθόδων είναι προφανείς. Η τμηματική προσέγγιση προσεγγίζει το συνεχές μέσο του υπεδάφους σαν ένα σετ δισδιάστατων τμημάτων και έμμεσα υποθέτει ότι οι συνθήκες κάθε τμήματος εκτείνονται σε μια πεπερασμένη απόσταση στην τρίτη διάσταση.

Η συσχέτιση έτσι των πληροφοριών ανάμεσα στα τμήματα είναι δύσκολη και αν απαιτείται ένα νέο τμήμα σε ένα αυθαίρετο προσανατολισμό, πρέπει να ξαναγίνει η πρόβλεψη εικονικά. Η δισδιάστατη χωρική πρόβλεψη των μεταβλητών εκτελείται σε τμήματα χρησιμοποιώντας προβλεπόμενες θέσεις των δειγμάτων, από ότι οι πραγματικές τους θέσεις. Η διαμόρφωση περιγραμμάτων με το χέρι είναι μια τεχνική πρόβλεψης και απασχολεί το ισοδύναμο ενός γραμμικού αλγορίθμου παρεμβολής.

Συχνά αγνοεί τις γεωλογικές επιδράσεις και κατά κανόνα αγνοεί την ανισοτροπία και τις τοπικές τάσεις. Η χωρική ανάλυση περιορίζεται στον σχεδιασμό των περιγραμμάτων και οι τμηματικές περιοχές θεωρούνται συνεχείς και στην τρίτη διάσταση. Τα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης μειώνονται όσο ο αριθμός των τμημάτων αυξάνεται και η απόσταση μικραίνει.

Το πλεονέκτημα των συμβατικών προσεγγίσεων είναι πως εφαρμόζουν ό,τι είναι περισσότερο λογικό και αποδοτικό για την γεωλογική ερμηνεία. Ως εκ τούτου, είναι ένας τρόπος για τον μηχανικό για τη βελτίωση της ερμηνείας, κάτι στο οποίο οι υπολογιστικές μέθοδοι προσέγγισης είναι ανεπαρκείς. Μια δεύτερη θεώρηση είναι ότι οι περισσότεροι αντιμετωπίζουν δυσκολία στην ερμηνεία σύνθετων καταστάσεων στις τρεις διαστάσεις. Ανεξάρτητα αν εργάζονται ή όχι σε κάποιο υπολογιστή. Έτσι είναι αποτελεσματικότερο αν χωριστεί η διαδικασία σε διάφορα βήματα με την προσέγγιση της τμηματικής ερμηνείας σε δύο διαστάσεις.

Από την άλλη μεριά η κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων, παρέχει την κατάλληλη δομή δεδομένων για την παρουσίαση της χωρικής διακύμανσης μια μεταβλητής. Επιτρέπει να προβλεφθούν και να αποθηκευτούν πληροφορίες ψηφιδωτής μορφής (raster) σε οποιαδήποτε πυκνότητα, όμως είναι ακατάλληλο για την σωστή παρουσίαση γεωλογικών δομών με την χρήση των τεχνικών ανάλυσης (π.χ. *block-modelling*).

Ένα τρισδιάστατο μοντέλο παρέχει επίσης μια προσέγγιση για την αναπαράσταση μιας συνεχούς μέτρησης της χωρικής διακύμανσης μιας μεταβλητής.

- Πρώτον γιατί χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό κατάλληλες τεχνικές πρόβλεψης
- Δεύτερον γιατί ενσωματώνεται με μια πιο αποδεκτή προσέγγιση για την αναπαράσταση γεωλογικών δομών. Επίσης η αναπαράσταση της γεωλογίας γίνεται από συνεχόμενες επιφάνειες, ανεξάρτητα αν αυτές «μεταφράζονται» σε όγκους ή όχι, κάτι που δημιουργεί δυσκολίες στον υπολογισμό των ασυνεχών γεωλογικών δομών.

2.5.2. Περίπλοκοι παράγοντες για τις υπολογιστικές μεθόδους

Όπως αναφέρθηκε το προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχει πολυπλοκότητα στον ακριβή προσδιορισμό του γεωλογικού μοντέλου, με μερικούς παράγοντες να είναι δύσκολο να ερμηνευτούν και με την υπολογιστική προσέγγιση. Για την αποτελεσματική προσέγγιση με ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, απαιτούνται διανυσματικές αναπαραστάσεις των γεωλογικών δομών που ερμηνεύονται σε κάρναβο για την χωρική ανάλυση των μεταβλητών. Μέσα λοιπόν από κατάλληλες βάσεις δεδομένων τα αποτελέσματα των αναλύσεων πρέπει με κάποιο τρόπο να εισαχθούν, να

συσχετιστούν μεταξύ τους, να ερμηνευτούν, να προβλεφθούν, να αποθηκευτούν και τελικά να απεικονιστούν τρισδιάστατα μέσα από υπολογιστικά προγράμματα. Αυτή η διαδικασία επηρεάζεται από αρκετούς περίπλοκους παράγοντες που είτε με συμβατικές προσεγγίσεις, είτε με υπολογιστικές προσεγγίσεις, είναι δύσκολο να ερμηνευτούν και οδηγούν σε πιο απλοποιητικές θεωρήσεις. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι οι παρακάτω:

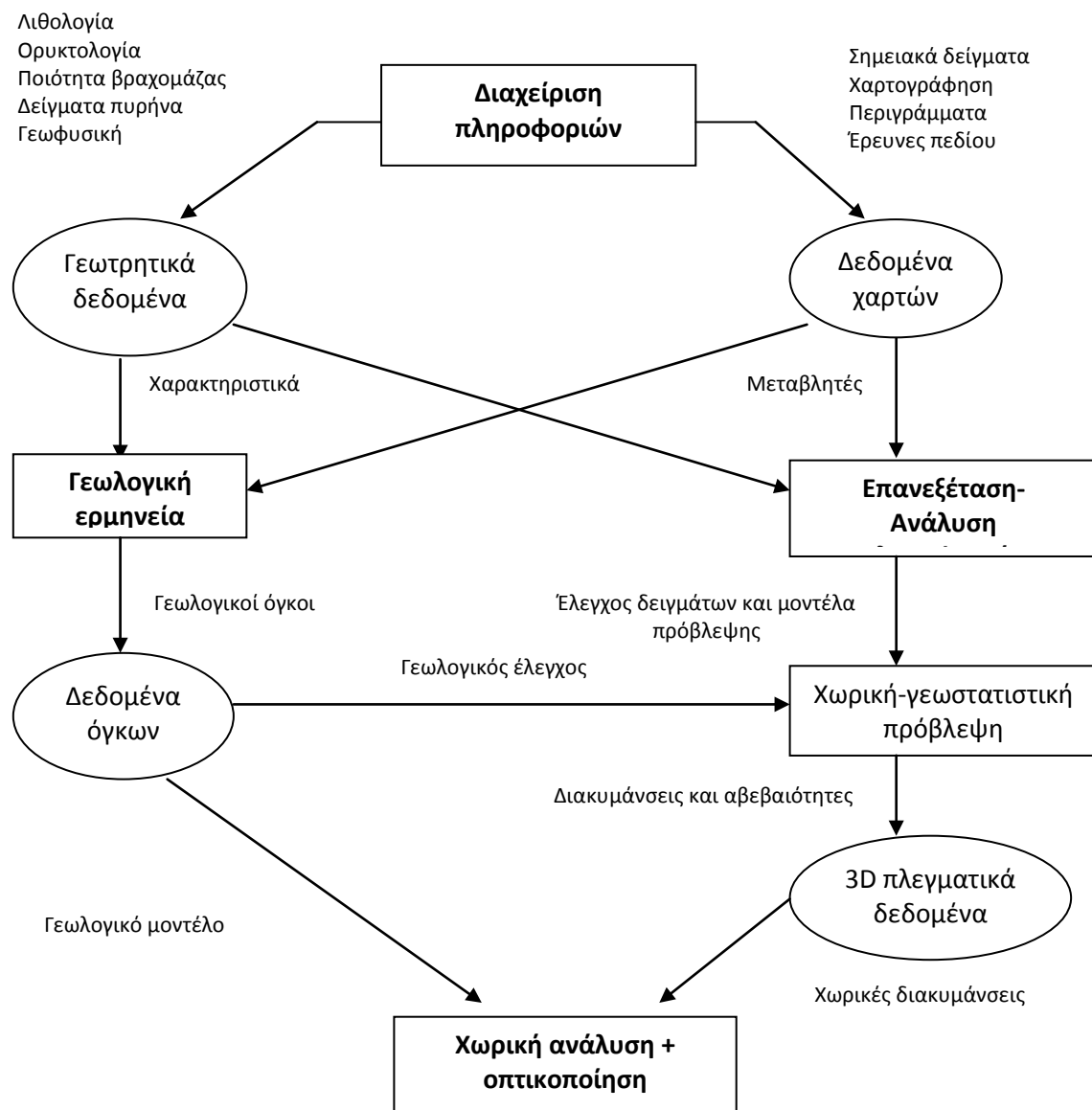
- *Γεωμετρική περιπλοκότητα που δημιουργείται από την δυνητική πολυπλοκότητα της στρωματογραφίας. Ο υπολογιστής απαιτεί μια δομή δεδομένων που να μπορεί αποδοτικά να “φιλοξενήσει” τη γεωμετρία και τα διακριτά χαρακτηριστικά των τρισδιάστατων γεωλογικών όγκων.*
- *Ο ερμηνευτικός έλεγχος της υπολογιστικής αναπαράστασης των γεωλογικών δομών απαιτεί η γεωμετρία των γεωλογικών όγκων, να είναι προσδιορίσιμη σε ένα διαδραστικό πλαίσιο, συμπληρωματικά με την επαναληπτική, υποκειμενική διαδικασία της ερμηνείας.*
- *Πολύπλοκες χωρικές διακυμάνσεις δημιουργούνται εξαιτίας των δυσκολιών στη χωρική ανάλυση των μεταβλητών, όπως ανισοτροπία και υπερκείμενες τάσεις.*
- *Πηγές πληροφόρησης για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό απορρέουν από το πλήθος των διερευνητικών μεθόδων του υπεδάφους, όπου κάθε μια έχει διαφορετική σχέση μεταξύ της γεωμετρίας και των δειγμάτων.*
- *Γεωλογική ποικιλομορφία όπου μπορεί να συναντηθούν απλά γεωλογικά στρώματα μέχρι σύνθετες γεωλογικές δομές με ρήγματα και εφιπτεύσεις. Μια υπολογιστική προσέγγιση πρέπει να καθορίζει αποδοτικά τις διάφορες καταστάσεις με τα κατάλληλα εναλλακτικά μοντέλα για τον καθορισμό των γεωλογικών στρωμάτων (διεύθυνση, κλίση κλπ).*
- *Διάσταση του χρόνου που προσθέτει ένα τέταρτο επίπεδο στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας. Έτσι οι χωρικές αναλύσεις γίνονται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, με την χρήση δεδομένων που είναι διαθέσιμα.*
- *Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που γίνεται ραγδαία υποχρεωτική απαίτηση (όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό, για περιβαλλοντικούς - κοινωνικούς και οικονομικούς λόγους.*

2.5.3. Στόχοι της χωρικής ανάλυσης

Οι υπολογιστικές προσεγγίσεις που ασχολούνται με την μέθοδο των χωρικών αναλύσεων χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα αρκετών τεχνικών που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν. Αυτά περιλαμβάνουν συμβατικές στατιστικές αναλύσεις,

γεωστατιστικές αναλύσεις της χωρικής διακύμανσης, τρισδιάστατα πλεγμικά ή διανυσματικά μοντέλα για την αναπαράσταση χωρικών αναλύσεων των μεταβλητών, τριγωνικά μοντέλα για την αναπαράσταση απλών γεωλογικών συνθηκών και τέλος τεχνικές οπτικών απεικονίσεων. Αυτά λοιπόν τα εργαλεία έχουν ενσωματωθεί και επεκταθεί από μια τεχνολογία που παρέχει γεωμετρικό χαρακτηρισμό των διακριτών γεωλογικών όγκων.

Στο επόμενο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι γενικές απαιτήσεις που πρέπει να γίνουν σταδιακά για να καταλήξουμε στην χωρική ανάλυση, για τον χαρακτηρισμό της γεωλογικής –γεωτεχνικής διαδικασίας.



Σχήμα 2.2: Γενικές απαιτήσεις για τον χαρακτηρισμό της γεωλογικής –γεωτεχνικής διαδικασίας (Houlding, 1994)

Οι χωρικές διακυμάνσεις, είναι η πηγή πληροφόρησης για την δημιουργία ισοεπιφανειών των μεταβλητών. Στη συνέχεια πρέπει να προσδιοριστεί ο όγκος μιας γεωλογικής μονάδας ή αντίστοιχα οι τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων σε ένα σχηματισμό και αυτά να συνδυαστούν ανάμεσα σε ένα πλήθος κοινών κάθε φορά στοιχείων ώστε να γίνει η κατανομή τους στο χώρο (μέσα σε καθορισμένα όρια κάθε φορά).

Η ικανότητα των υπολογιστικών μεθόδων είναι ότι μέσα από δισδιάστατες – χρονοβόρες απεικονίσεις, προκύπτουν τρισδιάστατα μοντέλα που “πλέκουν” πληροφορίες δισδιάστατων τμημάτων (2D sections).

Εκτός από τον χαρακτηρισμό και την οπτικοποίηση του υπεδάφους μπορεί να γίνει ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός έργου που θα πραγματοποιηθεί στο υπέδαφος, γνωρίζοντας χωρικά που θα συναντηθούν αδύναμες περιοχές που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

2.6. Μέθοδοι χωρικής παρεμβολής (Spatial interpolation methods)

Ο όρος της χωρικής παρεμβολής αναφέρεται γενικά στη διαδικασία προσδιορισμού της τιμής μιας μεταβλητής z σε κάποιο σημείο (x,y) του χώρου, δεδομένου ότι είναι γνωστές οι τιμές της μεταβλητής αυτής σε ένα σύνολο σημείων, που είναι συνήθως τυχαία κατανεμημένα στο χώρο (Goodchild and Lam, 1980). Βάσει των μεθόδων χωρικής παρεμβολής, η αρχική αποσπασματική πληροφορία που περικλείουν τα αρχικά σημεία για την υπό εξέταση παράμετρο, μετατρέπεται σε συνεχή πληροφορία που αντιπροσωπεύεται από μια συνεχή επιφάνεια / κάρναβο. Η χωρική διακριτική ικανότητα του καννάβου (οι διαστάσεις των φατνίων του), μπορεί να προσδιορισθεί πριν την εφαρμογή της μεθόδου (ESRI, 1994), ενώ στην τελική συνεχή επιφάνεια που προκύπτει, σε κάθε κελί του καννάβου αντιστοιχεί και μία προσομοιωμένη τιμή της υπό εξέταση παραμέτρου (Burrough, 1993).

Η βασική λογική της χωρικής παρεμβολής είναι η απλή παρατήρηση ότι συνήθως, σημεία που βρίσκονται κοντά στο χώρο είναι πιο πιθανό να έχουν παρόμοιες τιμές όσον αφορά σε μία συγκεκριμένη μεταβλητή, από ότι αυτά που είναι απομακρυσμένα (Ripley, 1981). Διάφοροι αλγόριθμοι σημειακής παρεμβολής έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς. Από αυτούς κανείς δεν μπορεί να χαρακτηριστεί σαν βέλτιστος, αφού η μέθοδος παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται άμεσα από τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Fotheringham and Rogerson, 1993). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος παρεμβολής είναι συνάρτηση του τύπου των δεδομένων, του βαθμού ακρίβειας που απαιτείται, καθώς και των δυνατοτήτων των υπολογιστών και υπολογιστικών προγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν, αφού πολλές μέθοδοι προϋποθέτουν χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες (Lam, 1983).

Οι μέθοδοι σημειακής παρεμβολής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς, τις κατηγοριοποιεί σε σφαιρικές και σε τοπικές ή μερικές.

Στις σφαιρικές μεθόδους, όλες οι τιμές της υπό εξέταση μεταβλητής στα αρχικά σημεία, όπου έχουν διεξαχθεί μετρήσεις πεδίου, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της τιμής της μεταβλητής σε ένα νέο σημείο του χώρου, ενώ στις τοπικές μεθόδους γίνεται χρήση μόνο εκείνων των τιμών που προέρχονται από αρχικά σημεία που είναι γειτονικά στο νέο σημείο (Oliver and Webster, 1990). Ένας άλλος διαχωρισμός των μεθόδων παρεμβολής τις ταξινομεί σαν ακριβείς ή προσεγγιστικές ανάλογα με το αν διατηρούνται ή όχι στην τελική επιφάνεια που προκύπτει, οι τιμές της παραμέτρου στις θέσεις των αρχικών σημείων (Lam, 1983 ; Παπαδόπουλος, 2009).

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι δημιουργίας ψηφιακού μοντέλου των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, η κάθε μια από τις οποίες προσφέρει διαφορετική ερμηνεία των δεδομένων, αφού κάθε μέθοδος υπολογίζει τις τιμές των κομβικών σημείων με διαφορετικό αλγόριθμο. Στο κέντρο κάθε block αποδίδεται, με βάση τα δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και με εφαρμογή μεθόδων χωρικής παρεμβολής μια τιμή που αντιπροσωπεύει όλο το block. Η Μέθοδος παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (Inverse Distance Weighted), η Kriging, η Natural Neighbor, η Nearest Neighbor και η Moving Average αποτελούν ορισμένες από τις μεθόδους δημιουργίας Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους με τη μέθοδο GRID.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η Inverse Distance Weighted, μια από τις απλούστερες και γρηγορότερες μεθόδους παρεμβολής, όπου η εξαγόμενη επιφάνεια επηρεάζεται από τη διαδικασία ομαδοποίησης.

2.6.1. Μέθοδος παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (Inverse Distance Weighted Interpolation Method)

Η μέθοδος παρεμβολής IDW υποθέτει ότι σημεία τα οποία βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο είναι περισσότερο όμοια σε σχέση με σημεία που είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους. Προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή σε μια άγνωστη περιοχή, η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη της τις τιμές των σημείων που βρίσκονται περιμετρικά. Τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στην ζητούμενη τιμή έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα από όσα βρίσκονται πιο μακριά. Η επίδραση κάθε σημείου είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τη ζητούμενη τιμή (Καραλή, 2009).

Η γενική σχέση στην οποία στηρίζεται η μέθοδος είναι η ακόλουθη (Crain, 1970):

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n w(d_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w(d_i)}$$

όπου $f(x, y)$ η προσομοιωμένη τιμή της υπό εξέταση παραμέτρου στο σημείο (x, y) , $w(d_i)$ η συνάρτηση βάρους, z_i η μετρημένη τιμή της παραμέτρου στο σημείο i και d_i

η απόσταση του σημείου i από το σημείο (x,y) . Η συνεχής επιφάνεια που προκύπτει από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου παρεμβολής, εξαρτάται άμεσα από τη συνάρτηση βάρους που θα χρησιμοποιηθεί. Η συνάρτηση βάρους μπορεί να πάρει πολλές μορφές, βασική όμως προϋπόθεση είναι ότι για $d \rightarrow 0$, $w(d_i) \rightarrow \infty$. Συναρτήσεις που ικανοποιούν αυτή την παραδοχή είναι της μορφής d^r ($r > 0$), $\exp(-ad)$ ή $\exp(-ad^2)$ κ.ο.κ. (Crain and Bhattacharyya, 1967 ; Burrough, 1996). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι οι συναρτήσεις της μορφής d^r ($r > 0$), όπου όσο περισσότερο αυξάνει η τιμή του r , τόσο μεγαλύτερο βάρος δίνεται στα πιο κοντινά, στο σημείο που θα γίνει παρεμβολή, αρχικά σημεία, με αποτέλεσμα η μέθοδος να αποκτά περισσότερο τοπικό χαρακτήρα και κατά συνέπεια η προκύπτουσα επιφάνεια να εμπεριέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια και να είναι λιγότερο εξομαλυμένη (Watson and Philip, 1985). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση βάρους, η οποία έχει εκτιμηθεί σαν η πιο αποτελεσματική, είναι η d^{-2} (Crain, 1970 ; ESRI, 1994). Για την τιμή οποιουδήποτε σημείου που προκύπτει από την παρεμβολή, ισχύει η σχέση $\min(z_i) < f(x,y) < \max(z_i)$, δεδομένου ότι $w(d_i) > 0$ (Crain and Bhattacharyya, 1967, Crain, 1970). Αυτό θεωρείται σαν μειονέκτημα της μεθόδου, γιατί η προκύπτουσα επιφάνεια δεν είναι δυνατό να προβλέψει με ακρίβεια τις θέσεις και τα μεγέθη των μέγιστων και ελάχιστων τιμών, εάν αυτές δε συμπεριλαμβάνονται στα αρχικά δείγματα (Burrough, 1996b). Παρόλα αυτά, η απλότητα της μεθόδου αυτής, η ταχύτητα στο ν υπο λογισμό, η ευκολία στον προγραμματισμό και τα λογικά αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορους τύπους δεδομένων, έχουν οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή της (Lam, 1983 ; Παπαδόπουλος, 2009).

2.6.2. Average nearest neighbor

Το Average Nearest Neighbor Distance tool μετρά την απόσταση μεταξύ κέντρου κάθε οντότητας και του κοντινότερου γειτονικού κέντρου και ακολούθως μετρά τους μέσους όρους αυτών των αποστάσεων. Αν ο μέσος όρος των αποστάσεων είναι μικρότερος από τον μέσο όρο μιας υποθετικής τυχαίας κατανομής, τότε η κατανομή των οντοτήτων θεωρείται ομαδοποιημένη (clustered). Αν η μέση απόσταση είναι μεγαλύτερη από την υποθετική τυχαία κατανομή, τότε οι οντότητες θεωρούνται διασπαρμένες (dispersed).

Για τον υπολογισμό του average nearest neighbor, υπολογίζεται πρώτα το εμβαδόν της περιοχής μελέτης ώστε να σχηματιστεί το ορθογώνιο με το συγκεκριμένο εμβαδόν και σε αυτό να γίνει ο υπολογισμός του δείκτη (Νεοφύτου, 2010).

2.6.3. Γεωστατιστική

Ο όρος «γεωστατιστική» εκφράζει τη στατιστική μελέτη φυσικών φαινομένων. Ένα φυσικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται «χωρικό», όταν οι μεταβλητές ενδιαφέροντός του εξαρτώνται από τον χώρο ή/και τον χρόνο. Η γεωστατιστική βρήκε σημαντικό πεδίο ανάπτυξης στη γεωτεχνολογία, και σε άλλους τομείς όπως στη δασοκομία, στη βαθυμετρία, στην τοπογραφία και στην κατανομή της πυκνότητας του πληθυσμού σε διάφορες περιοχές. Σχεδόν όλες οι μεταβλητές, που αφορούν στις γεωεπιστήμες μπορούν να θεωρηθούν ως χωρικές.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα της κλασικής στατιστικής, τα οποία αγνοούν τη θέση του δείγματος και βασίζονται στην υπόθεση ότι οι τιμές κατανέμονται τυχαία μέσα στο υπέδαφος και τα δείγματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, η γεωστατιστική ξεκινά από μια ριζικά διαφορετική θέση. Η γεωστατιστική υποθέτει ότι η τιμή του δείγματος είναι συνάρτηση της θέσης του μέσα στο υπέδαφος και οι διαφορές των τιμών μεταξύ των δειγμάτων είναι συνάρτηση των αποστάσεων μεταξύ τους. Στη γεωστατιστική, η μεταβλητότητα μιας παραμέτρου αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη συνιστώσα του συσχετισμού και την τυχαία συνιστώσα.

Από μαθηματικής πλευράς, μια χωρική μεταβλητή είναι μια συνάρτηση $f(x)$, η οποία λαμβάνει μία τιμή για κάθε σημείο a με συντεταγμένες X, Y, Z , σε έναν χώρο τριών διαστάσεων. Οι τιμές αυτές συχνά είναι τόσο ακανόνιστες, ώστε η συνάρτηση να μην μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά.

Όμως φαίνεται να υπάρχουν «ζώνες», στις οποίες οι τιμές συσχετίζονται. Δηλαδή, η τιμή της συνάρτησης $f(x)$ εξαρτάται από τη θέση του σημείου a .

Έτσι, η χωρική μεταβλητή έχει δύο, φαινομενικά αντιφατικά, χαρακτηριστικά:

- (α) μια τοπική, τυχαία, ακανόνιστη όψη, η οποία υποδεικνύει μια τυχαία μεταβλητή
- (β) μια γενική (ή μέση) δομική όψη, η οποία απαιτεί μια συγκεκριμένη συναρτησιακή αναπαράσταση.

Η τυχαία μεταβλητή λαμβάνει ένα συγκεκριμένο εύρος αριθμητικών τιμών, σύμφωνα με μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας. Για παράδειγμα, η περιεκτικότητα $z(x_1)$ ενός κοιτάσματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο x_1 , αποτελεί την πραγμάτωση μιας συγκεκριμένης τυχαίας μεταβλητής $Z(x_1)$, ορισμένης στο σημείο x_1 . Έτσι, η ομάδα των περιεκτικοτήτων $z(x)$ για όλα τα σημεία x ενός κοιτάσματος, δηλαδή η χωρική μεταβλητή $z(x)$, μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγκεκριμένη πραγμάτωση της ομάδας των τυχαίων μεταβλητών $\{Z(x), x \in \text{στο κοιτάσμα}\}$. Η ομάδα αυτή των τυχαίων μεταβλητών καλείται τυχαία συνάρτηση και εκφράζει την τυχαιότητα και τη δομή μιας χωρικής μεταβλητής:

- η $Z(x_1)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή, τοπικά, στο σημείο x_1 .
- η $Z(x)$ είναι μια τυχαία συνάρτηση, υπό την έννοια ότι για κάθε ζεύγος σημείων x_1 και x_1+h , οι αντίστοιχες τυχαίες μεταβλητές $Z(x_1)$ και $Z(x_1+h)$

δεν είναι, γενικά, ανεξάρτητες, αλλά συνδέονται από μια σχέση, η οποία εκφράζει τη χωρική κατασκευή της αρχικής χωρικής μεταβλητής $z(x)$.

Το στοχαστικό μοντέλο προκύπτει, επομένως, από γνωστές τιμές δειγμάτων και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αντίστοιχων τιμών σε περιοχές, που δεν έχει πραγματοποιηθεί δειγματοληψία. Μια τέτοια στατιστική επαγωγή είναι λογική, μόνο όταν το μοντέλο, που αναπτύσσεται, αναπαριστά τις ιδιότητες τόσο των περιοχών που έχει γίνει δειγματοληψία, όσο και αυτών που πρόκειται να εκτιμηθούν. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται ορισμένες Υποθέσεις Στατικότητας και να προτιμάται το μοντέλο με τις λιγότερο περιοριστικές υποθέσεις (Μενεγάκη, 2010).

2.6.4. Μέθοδος Kriging

Πρόκειται για μια προχωρημένη γεωστατιστική μέθοδο που παράγει μια επιφάνεια εκτίμησης ενός χωρικού φαινομένου χρησιμοποιώντας σαν πληροφορία ένα διασκορπισμένο σύνολο μετρήσεων. Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή θα πρέπει να προηγηθεί μια διερεύνηση της χωρικής συμπεριφοράς του φαινομένου που μελετάται, έτσι ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος εκτίμησης για την παραγωγή της τελικής επιφάνειας.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος Kriging αποτελεί μια μέθοδο χωρικής παρεμβολής που βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα που περιλαμβάνουν αυτοσυσχέτιση, δηλαδή την ύπαρξη σχέσεων ανάμεσα στα υπό μελέτη σημεία. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος υπάρχει η δυνατότητα μιας επιφάνειας πρόβλεψης αλλά ταυτόχρονα είναι γνωστός και ο βαθμός ακριβείας των προβλέψεων.

Ιστορικά η ονομασία της μεθόδου προήλθε από τον Matheron (1971), ο οποίος χρησιμοποίησε το όνομα του Νοτιοαφρικανού μηχανικού μεταλλείων D.G Krige, ο οποίος είχε αναπτύξει κατά τη δεκαετία του 50' μεθόδους εκτίμησης της κατανομής μεταλλευμάτων χρησιμοποιώντας σαν βάση τις τιμές των δειγμάτων.

Η μέθοδος υποθέτει ότι η απόσταση, ή η διεύθυνση των σημείων, που χρησιμοποιούνται δειγματοληπτικά, αντανακλά μια χωρική συσχέτιση που μπορεί να εξηγήσει την μεταβολή της επιφάνειας. Στα σημεία που χρησιμοποιούνται σαν πρωτογενή δεδομένα εφαρμόζεται μια μαθηματική συνάρτηση η οποία θα καθορίσει μια τελική τιμή για κάθε περιοχή.

2.7. Παραδείγματα χωρικής ανάλυσης στην γεωτεχνική μηχανική

Η εφαρμογή των χωρικών αναλύσεων στην πρόβλεψη γεωτεχνικών παραμέτρων δεν έχει μεγάλη εφαρμογή ακόμα και σήμερα, παρόλο που οι υπολογιστικές μέθοδοι για την πρόβλεψη χωρικών δεδομένων είναι εύκολα προσβάσιμες. Η χρήση τους έχει μεγαλύτερη εφαρμογή στην μεταλλευτική όπου με βάση στοιχεία που προκύπτουν από τις γεωτρήσεις, μπορεί να γίνει καθορισμός του κοιτάσματος.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες εφαρμογές χωρικών αναλύσεων στην γεωτεχνική μηχανική με τον καθορισμό των γεωλογικών σχηματισμών και των αβεβαιοτήτων που αυτοί εμπεριέχουν καθώς και στην εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων.

2.7.1. Εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την όρυξη υπογείων έργων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (μετρό Αθήνας)

Μια από αυτές τις εφαρμογές έγινε για το διάστημα Πανόρμου – Κατεχάκη της γραμμής 3 της Αττικό μετρό (Μπενάρδος, 2002).

Το αντικείμενο του συγκεκριμένου παραδείγματος είναι η διαχείριση της αβεβαιότητας που οφείλεται στα χαρακτηριστικά του γεωλογικού μέσου και η συνολική εκτίμηση των προβλημάτων που ενδέχεται να συναντηθούν κατά την όρυξη υπόγειων έργων με τη χρήση μηχανών ολομέτωπης κοπής.

Οι κύριοι στόχοι είναι ο εντοπισμός των περιοχών που είναι πιθανόν να προξενήσουν προβλήματα στο έργο και της έντασης των προβλημάτων αυτών και ο καθορισμός της επίδρασης των «δύσκολων» περιοχών στην ταχύτητα προχώρησης των εργασιών όρυξης.

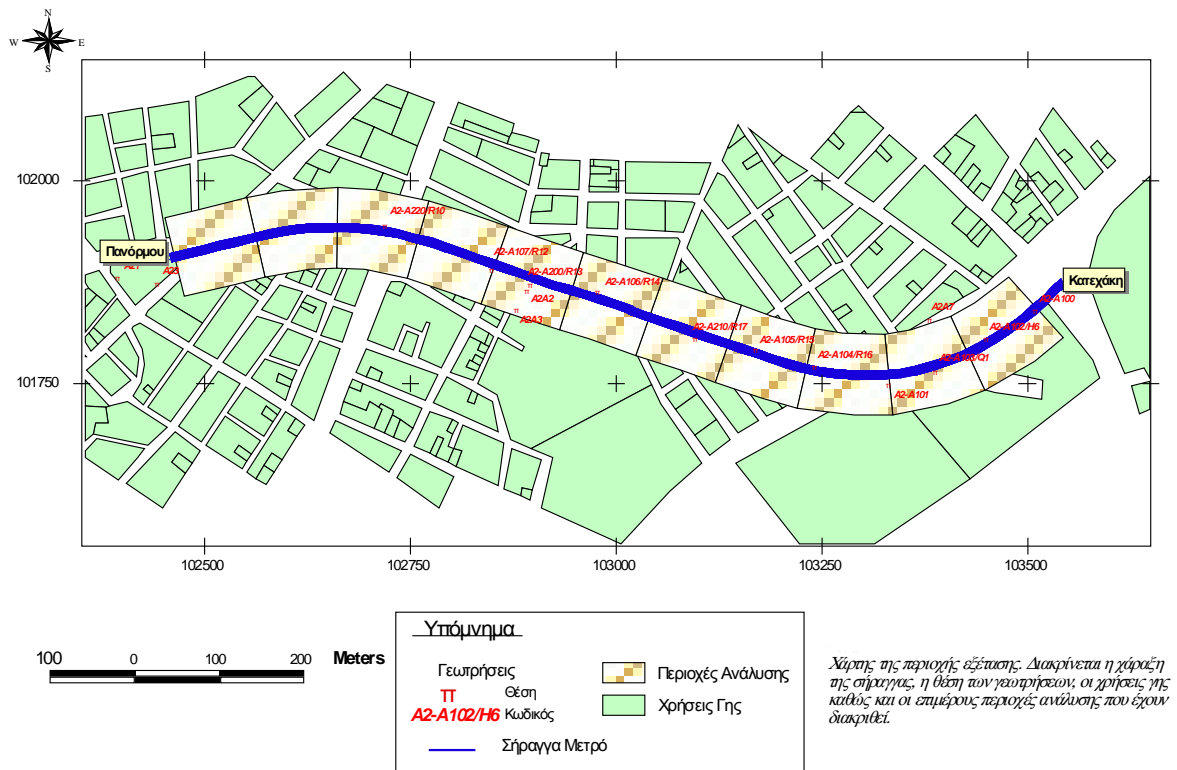
Επίσης έγινε προσπάθεια να εκτιμηθεί η τρωτότητα, με την δημιουργία ενός δείκτη που περιγράφει την τρωτότητα (vulnerability), του γεωλογικού μέσου καθώς και τον τρόπο που αυτή επιδρά στην ακολουθούμενη κατασκευαστική πρακτική. Ενώ έγινε και αναγνώριση της επικινδυνότητας για το έργο (hazard identification), κατά τα αρχικά στάδια διερεύνησης.

Τα αρχικά δεδομένα της έρευνας προέκυψαν από ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών που καθόρισε το τοπογραφικό υπόβαθρο και στη συνέχεια έγινε η χωρική ανάλυση των δεδομένων, όπως προέκυψαν από την επιτόπου έρευνα και τις γεωτρήσεις (RMR, RQD, υπερκείμενα, υδρογεωλογία, εμφάνιση γεωλογικών σχηματισμών).

Στο μεσοδιάστημα Πανόρμου – Κατεχάκη (συνολικό μήκος: 1.129,36 m) που εξετάστηκε (σχήμα 2.3), ήταν διαθέσιμες 16 γεωτρήσεις στις οποίες εντοπίστηκαν 35 συνολικά διαφορετικοί λιθολογικοί τύποι με ιδιαίτερα υψηλή χωρική μεταβλητότητα στους γεωλογικούς σχηματισμούς (Benardos,2004).

Από το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών και την Χωρική Μοντελοποίηση έγινε:

- ✓ Διάκριση σε 11 τμήματα ανάλυσης (segments)
- ✓ Χωρική μοντελοποίηση δεδομένων κατά επίπεδα (strata)
- ✓ Απλή μέθοδος παρεμβολής: Μέθοδος του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης



Σχήμα 2.3: Χάρτης της περιοχής με τα επιμέρους τμήματα ανάλυσης (Μπενάρδος, 2002)

Χωρική Μοντελοποίηση

Η ανάλυση έγινε με βάση τους δύο βασικούς τύπους δεδομένων (χωρικά δεδομένα, δεδομένα εξαρτώμενα από τη γεωλογία).

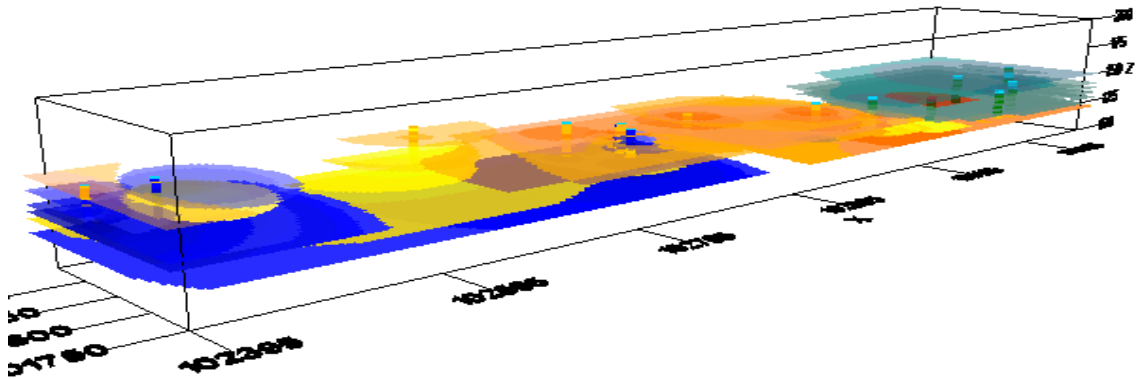
Χωρικά Δεδομένα:

- Κατανομή που προκύπτει από χωρική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ως εισαγωγή στο πιθανολογικό μοντέλο (μετά τη βαθμονόμησή της)

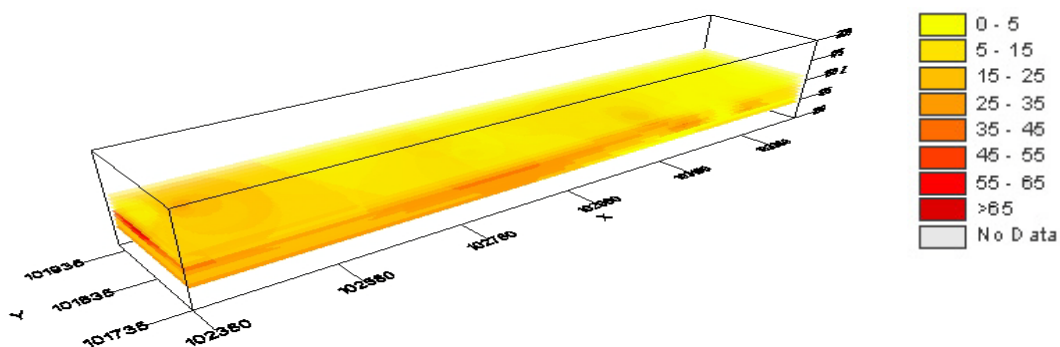
Δεδομένα συσχετιζόμενα με γεωλογία:

- Χωρική μοντελοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης των γεωλογικών σχηματισμών (Εικόνα 2.1).
- Επιλογή βασικών στατιστικών κατανομών για να περιγράψουν τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη γεωλογία

- Εισαγωγή στο πιθανολογικό μοντέλο του προϊόντος του γραμμικού συνδυασμού της πιθανότητας εμφάνισης του γεωλογικού σχηματισμού με την τιμή της παραμέτρου εξέτασης που αντιστοιχεί σε αυτόν (Εικόνα 2.2).



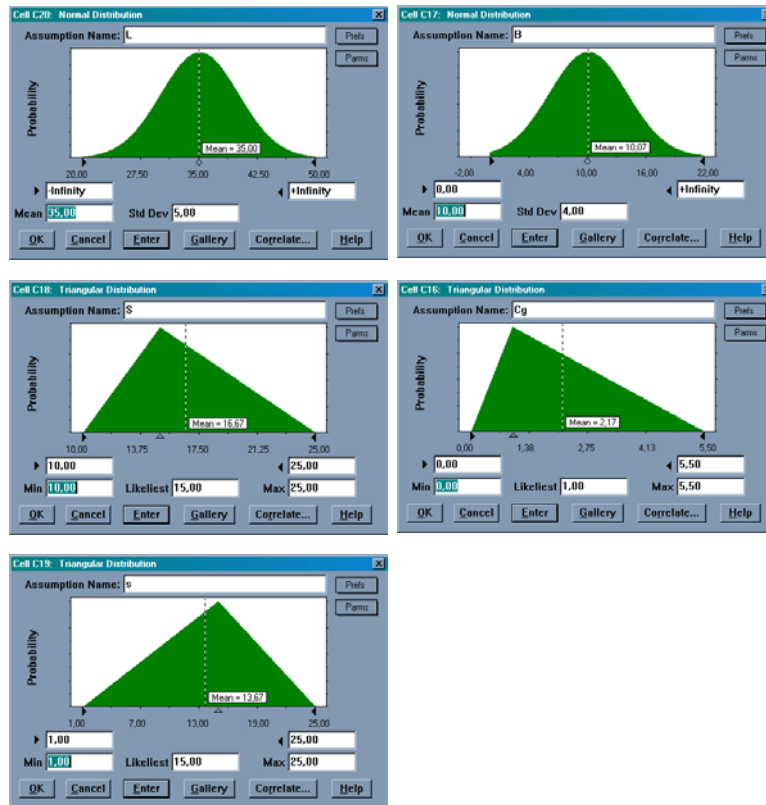
Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωλογικής δομής της περιοχής (Μπενάρδος, 2002)



Εικόνα 2.2: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της κατανομής των τιμών RQD στην περιοχή μελέτης (Μπενάρδος, 2002)

Στατιστικές Κατανομές Αποτύπωσης της Συμπεριφοράς των Μεταβλητών

Έγινε λήψη δεδομένων από τα διαθέσιμα πρωτογενή στοιχεία καθώς και από υπάρχουσες πληροφορίες και αναφορές για τους σχηματισμούς καθώς και χρήση αυξημένου εύρους στις κατανομές ώστε να μπορούν να καλυφθούν και περιπτώσεις ύπαρξης ακραίων τιμών (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Γραφική παρουσίαση των επιλεγμένων κατανομών αντοχής των γεωλογικών ενοτήτων (Benardos, 2004)

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των παραμέτρων εξέτασης με βάση την αντανάκλαση και απόδοση που η διαφοροποίηση των τιμών προκαλεί στο έργο σε σχέση με τις κατασκευαστικές πρακτικές που έχουν επιλεγθεί (Σχήμα 2.5). Τελικά και με την πιθανολογική ανάλυση εκτίμησης της τρωτότητας που έγινε προέκυψε ο ακόλουθος χάρτης για την περιοχή εξέτασης (Benardos et al., 2004).



Σχήμα 2.5: Αναγνώριση των κατηγοριών τρωτότητας στις επιλεγθείσες περιοχές ανάλυσης (Benardos et al, 2004)

2.7.2. Κατασκευή τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου δίδυμων σηράγγων στο Χονγκ Κονγκ

Μια άλλη εφαρμογή που έχει πραγματοποιηθεί, ύστερα από έρευνα του Εξαδάκτυλου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, είναι η κατασκευή ενός τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου της περιοχής του Χονγκ Κονγκ όπου διανοίχθηκαν δίδυμες σήραγγες καθώς και να προταθεί μία τρισδιάστατη υπολογιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό σηράγγων (Σίμου, 2010).

Για την επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιήθηκε καταρχήν η γεωτεχνική ανάλυση και πιο συγκεκριμένα, η συλλογή και η επεξεργασία δεδομένων από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και εργαστηριακές δοκιμές. Επίσης, το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας δηλ. τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας της βραχομάζας RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989) στις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Σε επόμενο στάδιο, κατασκευάστηκαν τα 3-δισδιάστατα στερεά κάθε γεωλογικού όγκου ξεχωριστά και η ψηφιοποιημένη τοπογραφία της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια του υπολογιστικού - σχεδιαστικού προγράμματος MIDAS – GTS. Εν συνεχεία τα στερεά αυτά διακριτοποιήθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία με το ίδιο λογισμικό.

Επακολούθως, χρησιμοποιώντας το γεωστατιστικό κώδικα KRIGSTAT, που χρησιμοποιείται για τη γεωστατιστική ανάλυση χωρικών δεδομένων, έγινε παρεμβολή του δείκτη RMR κατά μήκος της χάραξης των σηράγγων, αλλά και σε όλο το διακριτοποιημένο ογκομετρικό μοντέλο.

Τέλος, με την γεωστατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση τους με τις επί τόπου μετρήσεις δεικτών βραχομάζας RMR του μετώπου κατά την εκσκαφή των σηράγγων, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τη χρησιμότητα της μεθόδου που παρουσιάζει αυτή η προτεινόμενη μέθοδος κατά την αρχική μελέτη ενός υπό σχεδίαση υπόγειου έργου.

Γεωτεχνική ανάλυση

Στο στάδιο αυτό, έγινε συλλογή των γεωλογικών δεδομένων από τριανταοχτώ γεωτρήσεις οι οποίες ορύχθηκαν κατά μήκος των αξόνων των σηράγγων καθώς και από δοκιμές ανεμπόδιστης και τριαξονικής θλίψης που έγιναν στους πυρήνες ορισμένων γεωτρήσεων. Για την πιο πρακτική χρήση των δεδομένων, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων σε μορφή xls, ώστε να υπολογιστούν οι τιμές RMR σύμφωνα με την εμπειρική ταξινόμηση Bieniawski.

Το RMR χρησιμοποιείται σήμερα στον σχεδιασμό των υπόγειων έργων, για την ποιοτική ταξινόμηση της βραχομάζας και ως εργαλείο για τον υπολογισμό των

συντελεστών απομείωσης της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος που μετρούνται στο εργαστήριο.

Τα στοιχεία που ήταν διαθέσιμα για την επίτευξη της έρευνας ήταν

- ✓ Γεωλογική μηκοτομή κατά μήκος της χάραξης του έργου
- ✓ Τοπογραφικός Χάρτης περιοχής με την χάραξη του έργου
- ✓ Στοιχεία τριαντοχτώ γεωτρήσεων (περιγραφή λιθολογίας, RQD, υψόμετρο εδάφους κ.α)
- ✓ Εργαστηριακά δεδομένα από δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη

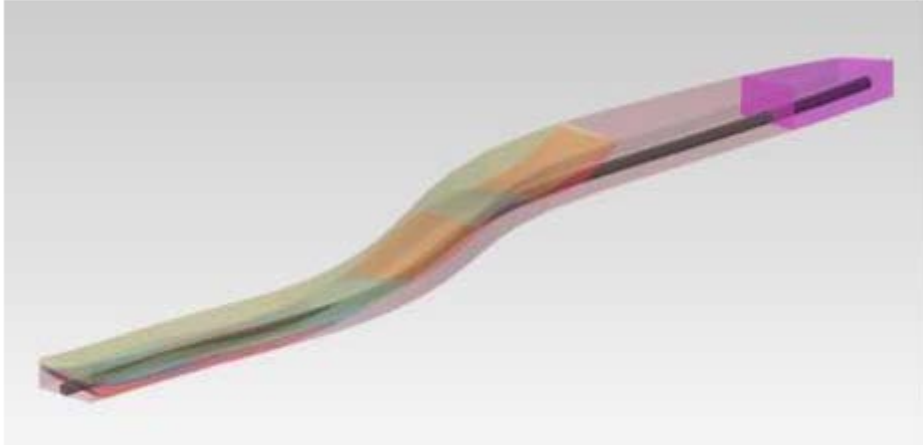
Γεωτεχνική Ταξινόμηση Βραχομάζας

Σε αυτή την φάση έγινε η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχομάζας, με τον υπολογισμό του δείκτη ποιότητας κατά RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski, 1989) στις θέσεις των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων με βάση τα στοιχεία αυτών. Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του συγκεκριμένου συστήματος ταξινόμησης είναι η εύκολη συσχέτισή του με άλλα συστήματα ταξινόμησης όπως το Q κατά Barton και το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI.

Κατασκευή 3D γεωλογικού μοντέλου

Για την κατασκευή του γεωλογικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις (Εικόνα 2.3).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα στοιχεία για να εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη αξιοπιστία του μοντέλου, τα οποία βρέθηκαν από τη γεωλογική τομή, στα σημεία όπου δεν υπήρχε επαρκής αριθμός γεωτρήσεων. Προς χάριν απλότητας και χωρίς να επηρεάζει την ανάλυση των δεδομένων και τα αποτελέσματα, έγινε η συγχώνευση των γεωλογικών στρωμάτων των αλλουβίων με τις θαλάσσιες αποθέσεις, αφού και τα δύο ανήκουν στους εδαφικούς σχηματισμούς.



Εικόνα 2.3: Εμφάνιση γεωλογικού μοντέλου και σήραγγας (Σίμου, 2010)

Στη συνέχεια έγινε η διακριτικοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα τρισδιάστατα στοιχεία χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Mid $\&$ GTS (Geotechnical and Tunnel analysis System) (Εικόνα 2.4). Με αυτό τον τρόπο είναι γνωστές οι συντεταγμένες κάθε κόμβου του πλέγματος και των αντίστοιχων στοιχείων. Ταυτόχρονα εκτός από τις συντεταγμένες γνωρίζουμε τη λιθολογική ταυτότητα κάθε στοιχείου. Σε επόμενη φάση, με βάση τον δείκτη ποιότητας βραχομάζας στις θέσεις των γεωτρήσεων και χρησιμοποιώντας τον γεωστατιστικό αλγόριθμο kriging θα γίνει παρεμβολή στα στοιχεία του πλέγματος και του δείκτη RMR .



Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατο διακριτοποιημένο γεωλογικό μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία, με ξεχωριστά τα γεωλογικά στρώματα. (Σίμου, 2010)

Γεωστατιστική επεξεργασία

Ο υπολογισμός της χωρικής κατανομής των δεικτών ποιότητας RMR έγινε με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής Kriging του κώδικα KRIGSTAT που έχει κατασκευασθεί στο Εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων.

Η χρήση της μεθόδου γραμμικής παρεμβολής Kriging και ειδικότερα της μεθόδου του συνηθούς kriging (ordinary kriging), έχει τα πλεονεκτήματα του ότι είναι απλή στην χρήση της, γρήγορη και η πρόβλεψη προκύπτει με ελαχιστοποίηση του

σφάλματος καθώς θεωρείται ως ο Βέλτιστος Αμερόληπτος Γραμμικός Εκτιμητής (BLUE) μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας.

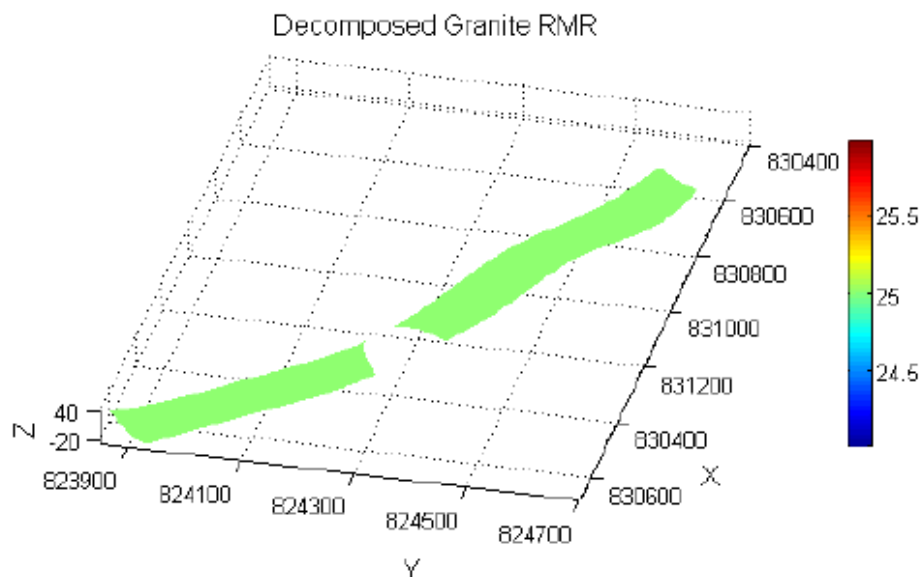
Στη συνέχεια αναφέρονται τα στάδια της γεωστατιστικής ανάλυσης.

- Προεπεξεργασία των δεδομένων
- Έλεγχος και διόρθωση των δεδομένων.
- Ομαδοποίηση/ εξομάλυνση των δεδομένων
- Υπολογισμός της στατιστικής κατανομής και των παραμέτρων αυτής (μέση τιμή, διασπορά, κύρτωση, λοξότητα κ.τ.λ.)
- Έλεγχος αν χρειάζεται μετασχηματισμός των δεδομένων ώστε να προσεγγίζουν την κανονική κατανομή (KS-test QQ Plot).

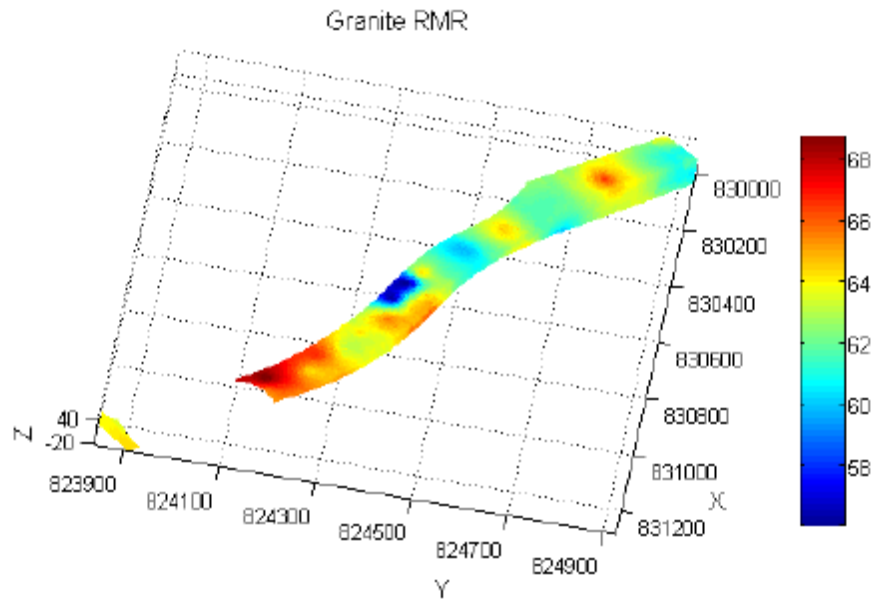
Η χωρική ανάλυση αναφέρεται:

- Στον υπολογισμό του πειραματικού ημιβαριογράμματος
- Στην προσαρμογή θεωρητικού ημιβαριογράμματος με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.
- Στην γραμμική παρεμβολή με την μέθοδο Kriging
- Στον έλεγχο/εξαγωγή/γραφική απεικόνιση της λύσης παρεμβολής κανονικού kriging.

Στα παρακάτω σχήματα 2.6 και 2.7 παρουσιάζονται μερικά από τα αποτελέσματα από το kriging κατά μήκος της στενής περιοχής της σήραγγας και συγκεκριμένα στους γεωλογικούς σχηματισμούς των γρανιτών και του γρανοδιορίτη όπως αυτά προέκυψαν από τις αναλύσεις.

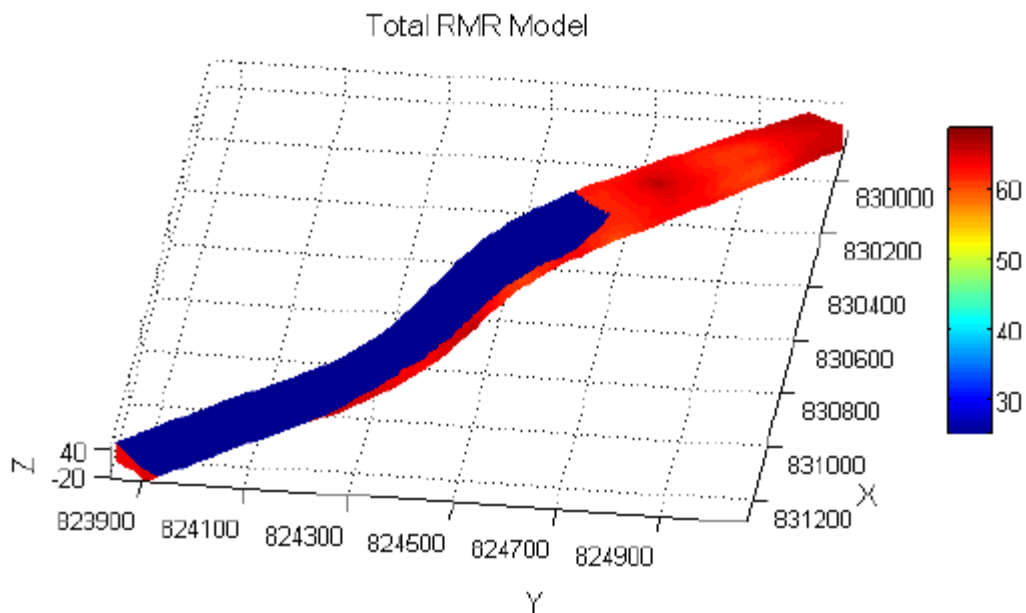


Σχήμα 2.6: Αποτελέσματα του kriging για τον πλήρως αποσαθρωμένο γρανίτη με τιμές RMR=25 (Σίμου, 2010)



Σχήμα 2.7: Χάρτης εκτίμησης RMR και της διασποράς στο σχηματισμό του γρανίτη (Σίμου, 2010)

Επίσης στη συνέχεια φαίνεται το συνολικό μοντέλο της σήραγγας (Σχήμα 2.8), με εμφανή τη έντονη διαφορά των τιμών RMR μεταξύ του πλήρως αποσαθρωμένου γρανίτη (μπλε χρώμα) και της καλής αντοχής γρανίτη και γρανοδιορίτη (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 2.8: Απεικόνιση της διασποράς των τιμών σε ολόκληρο το γεωτεχνικό μοντέλο (Σίμου, 2010)

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την κατασκευή του τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία:

- ✓ Η χωρική διακύμανση του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας RMR μπορεί να προσομοιωθεί με την κατασκευή τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου με βάση τη γεωστατιστική ανάλυση, με σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια.
- ✓ Η πρόβλεψη των τιμών του δείκτη RMR σε όλο το γεωτεχνικό μοντέλο κατά μήκος της υπό μελέτης σήραγγας, ήταν αρκετά καλή, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα που αποτυπώθηκαν στο μέτωπο της σήραγγας κατά την εκσκαφή της με τη γεωστατιστική επεξεργασία με τη μέθοδο Kriging.
- ✓ Από τη σύγκριση των υπολογισθέντων τιμών RMR στα πλαίσια της παρούσας εργασίας με τις επί τόπου καταγραφές των τιμών RMR από το μέτωπο εκσκαφής, προέκυψε καλή η μεταξύ τους συμφωνία, μέχρι και τα 700 m περίπου, έχοντας πολύ κοντινές μέσες τιμές αλλά με τις τυπικές αποκλίσεις του να διαφέρουν. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στον υποκειμενικό παράγοντα κατά την ταξινόμηση της βραχομάζας και στη μη επάρκεια του αριθμού των γεωτρήσεων σε σχέση με την συνεχή αποτύπωση κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Επίσης, η αδυναμία των γεωτρήσεων να καταγράψουν ζώνες διάτμησης που αποτυπώθηκαν στα μέτωπα, κυρίως μετά τα 700 m, καθώς και κάποιες κατακόρυφες ασυνέχειες, συμβάλλει με τη σειρά της στην απόκλιση των τυπικών αποκλίσεων μεταξύ των μετρήσεων των τιμών RMR από τις γεωτρήσεις και από τις επί τόπου καταγραφές.

2.7.3. Σήραγγες Kungkuan στην Ταϊπέι, Taiwan

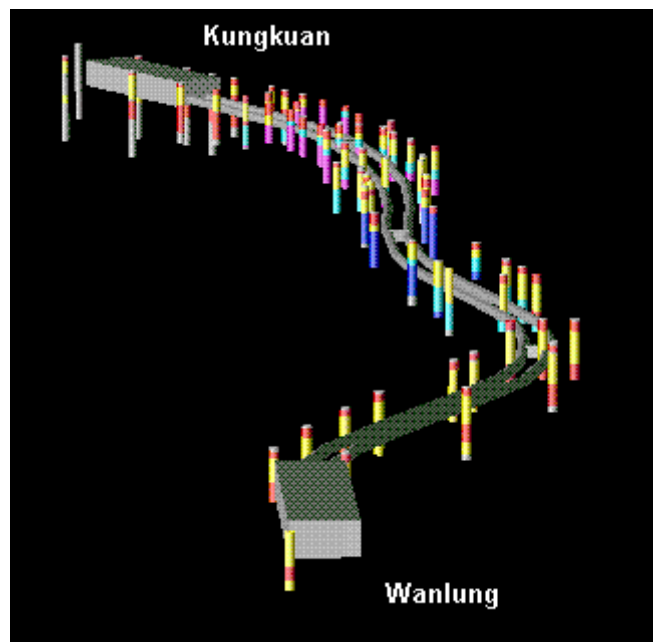
Μια άλλη εφαρμογή έγινε για το έργο που αφορά την κατασκευή των δίδυμων 5, σήραγγες διαμέτρου, που αντιπροσωπεύουν 1,6km επέκταση του Μετρό μεταξύ Ταϊπέι και τους σταθμούς Kungkuan Wanlung με ολομέτωπη κοπή. Η εξαιρετικά μεταβλητή εδάφους / βράχου στρωματογραφία και η διακύμανση των γεωτεχνικών συνθηκών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας υπαγόρευσαν την ανάγκη για ενισχυμένη εκτίμηση των συνθηκών του υπεδάφους πριν από την έναρξη των εργασιών.

Ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων των 3D εγγραφών της περιοχής διερεύνησης, 3D ερμηνεία του εδάφους και των όγκων του πετρώματος, γεωστατιστική πρόβλεψη της CPT και των τιμών του RQD από δείγματα των γεωτρήσεων, και χωρική ανάλυση των συνθηκών κατά μήκος της χάραξης της σήραγγας (Lynx Geosystems Inc. Vancouver, n.d)

Διερεύνηση υπεδάφους

Η εξαιρετικά μεταβλητή στρωματογραφία του εδάφους περιλαμβάνει τη συνεχή εναλλαγή στρωμάτων και φακούς από χαλίκι, άμμο, λάσπη και πηλό. Υπάρχει συνεχής επικάλυψη εδαφών με κεκλιμένα στρώματα ψαμμίτη, σχιστόλιθο και ηφαιστειακή τέφρα. Η τοπογραφία είναι σχετικά επίπεδη, με έναν υδροφόρο ορίζοντα σε βάθος περίπου 8m. Το βάθος της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ 15-20m και τέμνει τόσο εδαφικό όσο και βραχώδη σχηματισμό.

Η κύρια πηγή δεδομένων αποτελείται από 66 γεωτρήσεις (Σχήμα 2.9) που περιέχουν τα αρχεία του εδάφους και την λιθολογία των πετρωμάτων, τιμές RQD και CPT, καθώς και τιμές μονοαξονικής θλίψης.

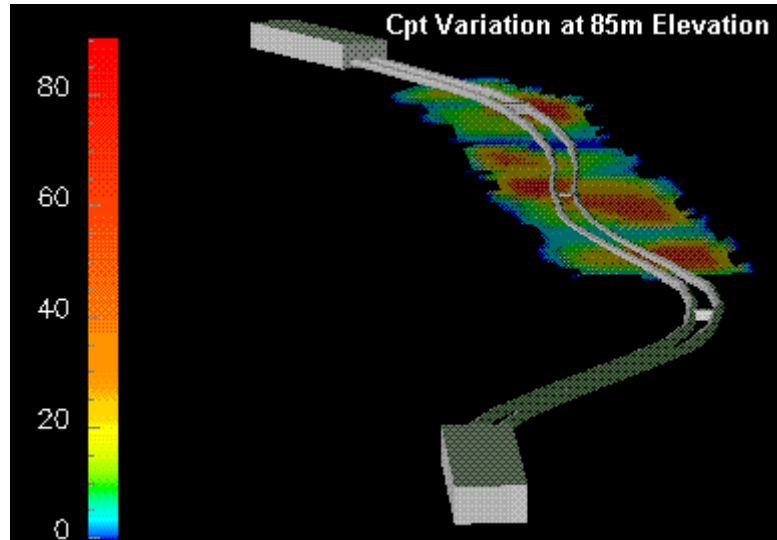


Σχήμα 2.9: Απεικόνιση των γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας (Lynx Geosystems Inc, n.d)

Πρόβλεψη τιμών CPT και RQD

Η Χωρική μεταβλητότητα (με ημι-βαριογράμμα) με ανάλυση που έγινε σε 689 δείγματα εδάφους CPT δείχνει ένα εύρος της επιρροής των 45m. Αυτή είναι η μέση απόσταση στην οποία οι τιμές των δειγμάτων καθίστανται ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή δεν έχουν καμία χωρική συσχέτιση. Η ανάλυση από 387 δείγματα πετρωμάτων RQD δείχνει μεγαλύτερη χωρική συσχέτιση.

Οι τιμές αυτές εφαρμόζονται με τη γεωστατιστική μέθοδο kriging για να προβλέψει τις μεταβολές του CPT (Σχήμα 2.10) στο εδαφικό υλικό και του RQD στα πετρώματα αντίστοιχα.



Σχήμα 2.10: Τιμές CPT κατά μήκος της σήραγγας
(Lynx Geosystems Inc, n.d)

2.8. Συμπεράσματα

Οι τεχνικές μοντελοποίησης με 3D απεικόνιση δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως σε περιπτώσεις σηράγγων και γεωτεχνικής μηχανική στο παρελθόν. Παρ' όλα αυτά, μέσα από τα παραδείγματα αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητά τους για την απόκτηση μιας ενισχυμένης εκτίμησης των υπογείων συνθηκών πριν από την διάνοιξη μιας σήραγγας.

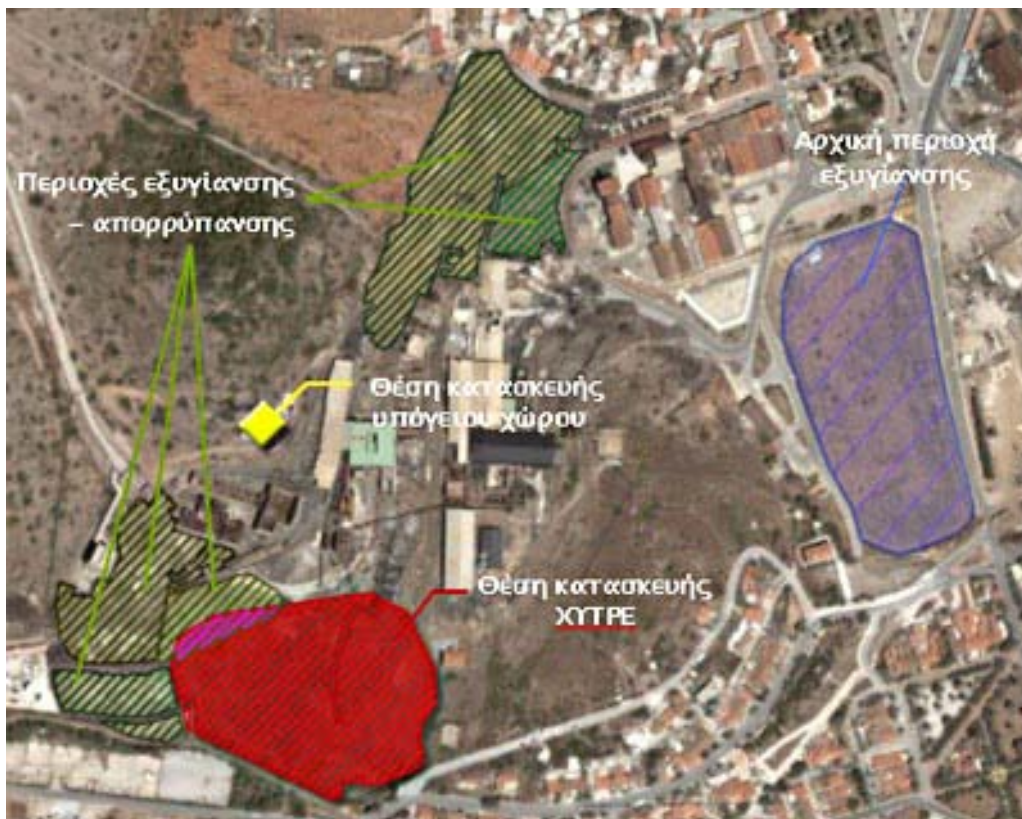
Επίσης γίνεται διαχείριση των αβέβαιων και ασαφών δεδομένων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του γεωλογικού μέσου, καθώς και η ύπαρξη μοντέλων που είναι σε θέση να προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα προχώρησης των μηχανημάτων, κάτι που μπορεί να αξιοποιηθεί και σε άλλες περιοχές.

Κεφάλαιο_3: Ο Υπόγειος Χώρος του Λαυρίου

3.1. Εισαγωγή

Το Τεχνολογικό - Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ) βρίσκεται στη βόρεια είσοδο της πόλης του Λαυρίου πλησίον του κόλπου του Θορικού. Το Πάρκο οριοθετείται στις εγκαταστάσεις της πρώην Γαλλικής Εταιρείας Μεταλλευμάτων Λαυρίου (ΓΕΜΛ) και καταλαμβάνει έκταση 250.000m². Στοχεύει στην επαναχρησιμοποίηση των εγκαταστάσεων προκειμένου να φιλοξενηθούν ερευνητικές και επιχειρηματικές δραστηριότητες.

Ολόκληρη η περιοχή του Τ.Π.Π.Λ. θεωρείται εξαιρετικά ρυπασμένη εξαιτίας των βιομηχανικών δραστηριοτήτων που έλαβαν χώρα τα τελευταία 100 έτη. Συγκεκριμένα λόγω της εντατικής μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας δημιουργήθηκαν εκτεταμένοι σωροί μεταλλευτικών απορριμμάτων και σκωριών στα όρια του πάρκου. Στην εικόνα 3.1. φαίνεται η ευρύτερη περιοχή του τεχνολογικού πάρκου και τα έργα που έχουν πραγματοποιηθεί για την περιβαλλοντική εξυγίανση της περιοχής.



Εικόνα 3.1: Ευρύτερη περιοχή του Τ.Π.Π.Λ
(ltp.ntua.gr, 2010)

Για την αντιμετώπιση των μεταλλευτικών απορριμμάτων, κατασκευάστηκε μέσα στο Τ.Π.Π.Λ ένας επιφανειακός χώρος υγειονομικής ταφής ρυπασμένων εδαφών (Χ.Υ.Τ.Ρ.Ε) καθώς και ένας υπόγειος χώρος διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων (Εικόνα 3.2.).

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου εντάσσεται στο συνολικότερο σχεδιασμό που στοχεύει στην περιβαλλοντική εξυγίανση του χώρου του Τ.Π.Π.Λ (Μπενάρδος et al., 2006). Ειδικότερα ο υπόγειος χώρος στοχεύει στην ασφαλή αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων, τα οποία, για τεχνικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, κρίθηκε σκόπιμο να μην αναμειχθούν με τα ρυπασμένα εδάφη που τοποθετήθηκαν στον επιφανειακό.



Εικόνα 3.2: Περιοχή κατασκευής του υπόγειου χώρου (Μπενάρδος, 2010)

Τα απόβλητα αυτά, κυρίως αρσενικούχες ενώσεις με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις, προέρχονται από τη μεταλλευτική / μεταλλουργική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε στο παρελθόν στο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. και κυρίως εντοπίζονται εντός του κτηρίου «Κονοφάγου» (Kaliampakos et al., 2009).

Το έργο αυτό συνεπάγεται πολλαπλά οφέλη για την περιοχή του Λαυρίου καθώς συνεισφέρει στην αντιμετώπιση σοβαρών προβλημάτων ρύπανσης της περιοχής από την παλαιά μεταλλουργική δραστηριότητα και ενισχύει την παραγωγική διαδικασία σε μια ιδιαίτερα προβληματική περιοχή.

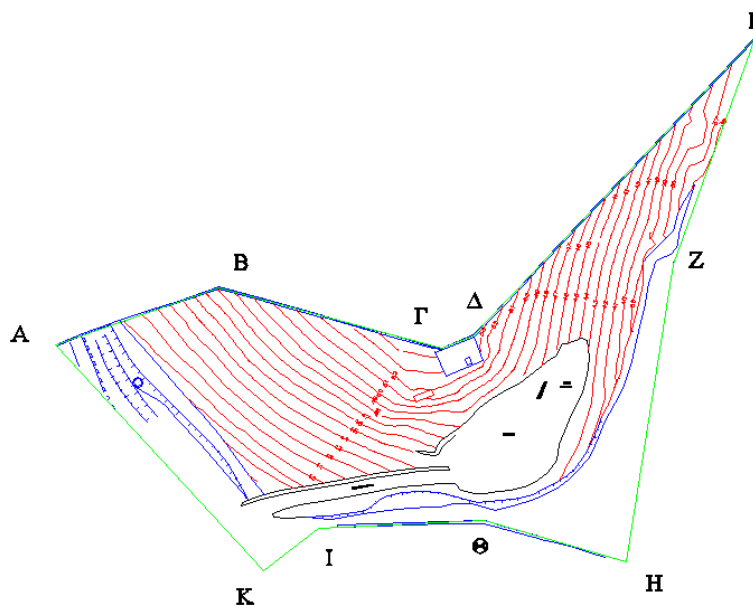
3.2. Σχεδιασμός – Στοιχεία του υπόγειου χώρου

Το έργο έχει κατασκευαστεί με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων, εντός της περιοχής που οριοθετείται από τις συντεταγμένες των σημείων Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ, Η, Θ, Ι και Κ (Πίνακας 3.1, Σχήμα 3.1).

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες σημείων οριοθέτησης της θέσεως κατασκευής.

Σημείο	X	Y
A	503770,5	4174824,6
B	503821,1	4174842,3
Γ	503890,2	4174823,5
Δ	503899,9	4174827,4
E	503987,4	4174919,7
Z	503962,0	4174849,6
H	503947,4	4174757,0
Θ	503903,6	4174769,8
I	503852,0	4174767,6
K	503835,0	4174754,3

Πιο συγκεκριμένα, η θέση κατασκευής του υπόγειου συγκροτήματος βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής, πλησίον των σημείων Β και Γ.

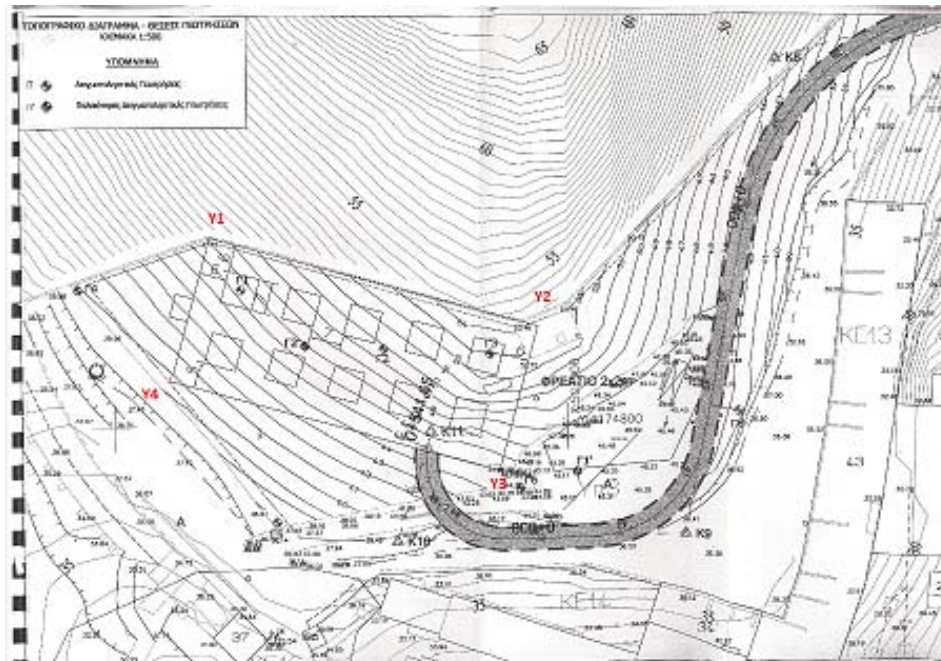


Σχήμα 3.1: Περιοχή χωροθέτησης του υπόγειου έργου στο χώρο του ΤΠΠΛ.

Οι συντεταγμένες των ορίων του υπόγειου συγκροτήματος δίνονται στον Πίνακα 3.2. ενώ στο σχήμα 3.2 φαίνεται το τοπογραφικό διάγραμμα και οι θέσεις των γεωτρήσεων.

Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες ορίων του 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 3.2: Τοπογραφικό διάγραμμα και όρια κατασκευής του υπόγειου χώρου

Το έργο έχει κατασκευαστεί στο βορειοδυτικό τμήμα του Τ.Π.Π.Α., εντός της λοφώδους δομής που αναπτύσσεται εκεί με μέγιστο απόλυτο υψόμετρο που φτάνει τα +54 m. Το έργο έχει κατασκευαστεί εντός του σχηματισμού του Ανώτερου Μαρμάρου, με δάπεδο που αναπτύσσεται στο επίπεδο των +12 m και με μέγιστο ύψος που φτάνει τα 5,5 m. Το ύψος των υπερκειμένων κυμαίνεται από 20 m έως 35 m περίπου.

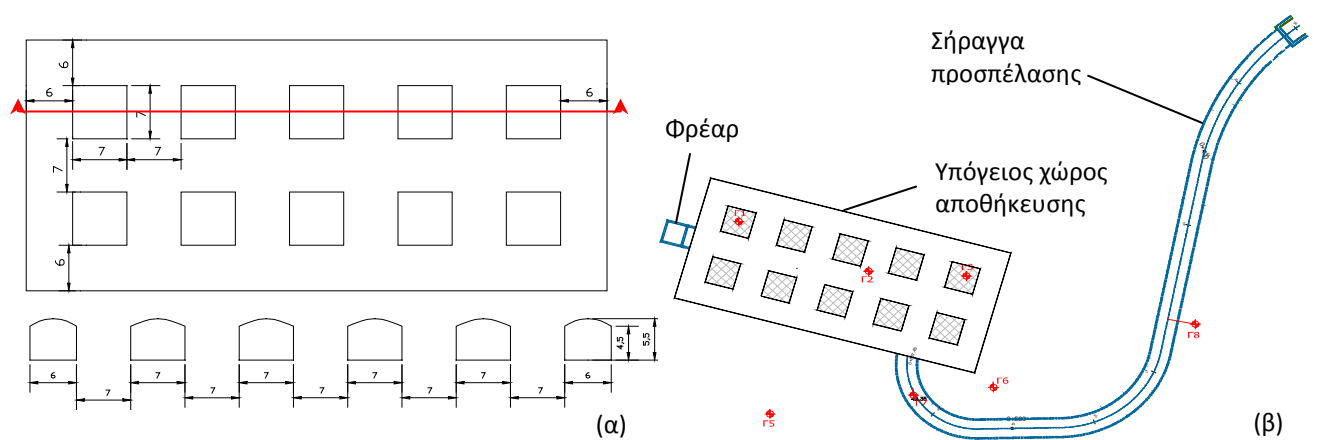
Ο υπόγειος χώρος έχει διαστάσεις 75 m x 33 m, καταλαμβάνοντας μια συνολική έκταση 2.475 m² (Benardos et al, 2009). Στην εικόνα 3.3 φαίνεται ο υπόγειος χώρος σε τελικό στάδιο και η μια από τις δύο σειρές στύλων.



Εικόνα 3.3: Άποψη του υπόγειου χώρου στην τελική φάση

Η εκσκαφή του πετρώματος έγινε με τη δημιουργία παράλληλων και κάθετων στοών (θαλάμων), οι άξονες των οποίων ισαπέχουν μεταξύ τους, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους στύλους του πετρώματος. Έχουν δημιουργηθεί στύλοι τετραγωνικής διατομής με πλάτος $WP=7\text{ m}$ και θάλαμοι με πλάτος $WR=7\text{ m}$. Οι στύλοι δομούνται σε δύο σειρές, ενώ οι αποστάσεις τους από τις παρειές του χώρου (περιμετρικοί θάλαμοι) είναι 6 m . Με βάση τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το ωφέλιμο εμβαδόν του υπόγειου έργου είναι 1.900 m^2 περίπου.

Στο επόμενο σχήμα 3.3 φαίνονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπόγειου χώρου, καθώς και η σήραγγα προσπέλασης με το φρέαρ αερισμού.



Σχήμα 3.3: (α). Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπόγειου θαλάμου,
(β) Γενική άποψη του υπόγειου έργου αποθήκευσης στο Τ.Π.Π.Λ.

Καθώς ο ασβεστολιθικός σχηματισμός είναι διαπερατός, η υδραυλική απομόνωση των αποβλήτων εξαρτάται από την δημιουργία τεχνητών φραγμών (engineering barriers). Αυτά συνίστανται στην εισαγωγή ειδικών πρόσμικτων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την μείωση της υδροπερατότητας του, την κατασκευή αδιαπέρατου βιομηχανικού δαπέδου, καθώς επίσης και τη χρήση ειδικών δοχείων (drums) για την αποθήκευση των επικίνδυνων αποβλήτων. Επίσης, έχει τοποθετηθεί σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των αποβλήτων, σε περίπτωση που υπάρξει εισροή υδάτων και ανάμιξή τους με τα απόβλητα.

Η πρόσβαση στο χώρο αποθήκευσης γίνεται μέσω δύο έργων προσπέλασης, μιας σήραγγας (Εικόνα 3.4) και ενός φρέατος. Η σήραγγα έχει μήκος περί τα 175 m. Ξεκινάει από τα βορειοανατολικά, από το υψόμετρο των +34 m, και με κλίση περίπου 11% φτάνει στο νοτιοανατολικό τμήμα του υπόγειου χώρου στο επίπεδο των +12 m.



Εικόνα 3.4: Η σήραγγα προσπέλασης κατά την φάση λειτουργίας του χώρου

Η σήραγγα προσπέλασης έχει πεταλοειδή διατομή, ελευθέρου ύψους 5,5 m και ανοίγματος 4,5 m. Το φρέαρ, βάθους 30 m, έχει ορυχθεί πλησίον της δυτικής παρειάς του έργου. Η διατομή του είναι ορθογωνική, με διαστάσεις 5,0 m x 5,6 m.

3.3. Γεωλογικά – Υδρογεωλογικά Στοιχεία

3.3.1. Εισαγωγή

Η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου, όπως και όλη η ΝΑ Αττική αποτελεί τμήμα της μεταμορφωμένης Αττικοκυκλαδικής Μάζας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι μεταμορφωμένοι ή ημιμεταμορφωμένοι, αποτελούμενοι από μάρμαρα, δολομιτικά μάρμαρα ή δολομίτες, μαρμαρυγικούς 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 επικλυσιγενείς και αποτελούν το Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα. Στην περιοχή του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου φαίνεται ότι εμφανίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί και των δύο λιθοστρωματογραφικών τεκτονικών ενοτήτων της ΝΑ Αττικής:

3.3.1.1. Σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής (αυτόχθονο σύστημα)

Η σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής αποτελείται από μάρμαρα, δολομίτες και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, έχει δε γνωστό πάχος άνω των 1000 m. Χωρίζεται συνήθως σε τρεις διαπλάσεις, το Κατώτερο μάρμαρο, τον σχιστόλιθο Καισαριανής ή Καμάριζας και το Ανώτερο μάρμαρο. Ο παραπάνω διαχωρισμός σε τρεις βαθμίδες είναι γενικός, καθώς σε πολλά μέρη το σύνολο του αυτόχθονου συστήματος αποτελείται από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστόλιθων ποικίλου πάχους, χωρίς να είναι πάντα δυνατή η διάκριση σε σαφείς ξεχωριστούς ορίζοντες.

- **Κατώτερο μάρμαρο**

Έχει μεγάλο πάχος (άνω των 800 m) και σημαντική εξάπλωση σε όλη τη ΝΑ Αττική. Μέσα στα βαθύτερα γνωστά τμήματα αυτού (Νότιος Υμηττός, Κερατοβούνι, Όλυμπος, Καμάριζα) υπάρχουν δολομίτες και κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι (δολομίτες Πιρναρής, σχιστόλιθοι Βάρης). Είναι λευκό έως κυανότεφρο κοκκώδες μάρμαρο, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται ροδόχρουν.

Το ανώτερο τμήμα του κατώτερου μαρμάρου εμφανίζει διαφορετική όψη στα δύο μισά της Λαυρεωτικής χερσονήσου. Στο ανατολικό τμήμα είναι λευκό και σε στρώματα μεγάλου πάχους, ενώ στο δυτικό τμήμα είναι σχεδόν χωρίς στρώση, λατυποπαγές και συνήθως ροδόχρουν έως καστανό.

- **Σχιστόλιθοι Καισαριανής (Καμάριζας)**

Κυρίως μοσχοβιτικοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες, συνήθως μαύροι (με γραφίτοειδή), με ενστρώσεις μαρμάρων συνήθως λεπτοστρωματωδών. Το πάχος των σχιστολίθων μεταξύ των δύο μαρμάρων κυμαίνεται από 0 – 300 m. Στην περιοχή της Πλάκας οι σχιστόλιθοι έχουν μεταμορφωθεί εξ επαφής σε κερατίτες, γύρω από τον γνωστό γρανοδιοριτικό όγκο της Πλάκας.

- **Ανώτερο μάρμαρο**

Είναι λευκό έως τεφρό, σε λεπτότερα συνήθως στρώματα απ' ότι εμφανίζεται το κατώτερο μάρμαρο. Σε εκσκαφή λατομείου κοντά στο Λαύριο εμφανίζεται σε δύο ορίζοντες, πλήρως διαχωρισμένους χρωματικά. Ο κατώτερος ορίζοντας είναι χρώματος λευκού, ενώ ο ανώτερος είναι χρώματος τεφρού. Το συνολικό πάχος του ανώτερου μαρμάρου κυμαίνεται από λίγα έως και 100 m. Έχει σημαντική εξάπλωση κυρίως στην νοτιοανατολική πλευρά της Λαυρεωτικής και στο βόρειο Υμηττό.

3.3.1.2. Νεοελληνικό τεκτονικό κάλυμμα

Οι σχηματισμοί Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος που εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές της Νότιας Αττικής, βρίσκονται επωθημένοι πάνω στους σχηματισμούς του αυτόχθονου συστήματος της σειράς Υμηττού – Νότιας Αττικής. Το συνολικό πάχος των σχηματισμών του Φυλλιτικού καλύμματος υπερβαίνει πολλές φορές τα 800 m. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται, κυρίως, από φυλλίτες, σερικιτικούς και χαλαζιακούς σχιστόλιθους και χαλαζίτες, με παρεμβολές μεταμορφωμένων βασικών εκρηξιγενών (πρασινιτών).

Επίσης απαντώνται σ' αυτούς ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, ποικίλου πάχους, κυρίως στα ανώτερα μέλη των σχηματισμών του τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για μυλονιτωμένα μάρμαρα, συνήθως χρώματος καστανού λόγω αγκεριτώσεως από τη δράση μεταγενέστερων σιδηρούχων διαλυμάτων. Μυλονιτώση, δολομιτώση και αγκεριτώση υπέστη επίσης και το ανώτερο τμήμα του ανώτερου ή του κατώτερου μαρμάρου, το οποίο βρέθηκε κάτω από την επιφάνεια της επώθησης. Τα αγκεριτωμένα αυτά μάρμαρα, στη βάση του επωθημένου καλύμματος θεώρησε ο LEPSIUS σαν ιδιαίτερο στρωματογραφικό ορίζοντα, τον οποίο ονόμασε κατώτερο ασβεστόλιθο ή σιδηρούχο ασβεστόλιθο.

Οι σχηματισμοί του νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος επικρατούν στους λόφους που περιβάλλουν τις εγκαταστάσεις του Τ.Π.Π.Α. Αποτελούνται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, εντός των οποίων κατά θέσεις εμφανίζονται σχιστολιθικές και χαλαζιτικές ενστρώσεις. Στον βορειοδυτικό λόφο του Πάρκου είναι άστρωτοι, τοφώδεις, αγκεριτωμένοι.

3.3.1.3. Προσχωματικές αποθέσεις

Οι αποθέσεις αυτές χαρακτηρίζονται από ποικίλη λιθολογική και κοκκομετρική σύσταση. Ανάλογα με τη θέση ανάπτυξής τους, επικρατούν τα αδρομερή ή τα λεπτομερή υλικά. Στα περιθώρια της χαμηλής ζώνης εμφανίζονται αδρομερή υλικά, συνήθως μικρών διαστάσεων κώνοι κορημάτων, καθώς και πλευρικά κορήματα.

Στις υψομετρικά χαμηλότερες ζώνες επικρατούν ποικίλης σύστασης λεπτομερέστερα υλικά. Συνήθως δεν είναι ορατά στην επιφάνεια του εδάφους, λόγω κάλυψης αυτών από δευτερογενή υλικά, τα οποία προέρχονται από τη μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα.

3.3.1.4. Τεχνητά μάζα από υλικά της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας

Το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης του Τ.Π.Π.Α. καλύπτεται από τεχνητά επιχώματα τα οποία προέρχονται από υλικά της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας. Το πάχος αυτών ποικίλει κατά θέσεις.

3.3.1.5. Ζώνες εξυγίανσης εδαφών

Είναι χώροι στους οποίους με την κάλυψη των υλικών καμίνευσης με ασβεστολιθικό υλικό και στη συνέχεια με ένα στρώμα ερυθράς αργίλου επιχειρείται μείωση της τοξικότητας των υλικών αυτών στο χώρο του Τ.Π.Π.Α.

3.3.3. Πιεζομετρία στο χώρο του Τ.Π.Π.Α.

Ο υδροφόρος που υπάρχει στην περιοχή έχει άμεση υδραυλική επαφή με τη θάλασσα κατά μήκος της ακτογραμμής και η πιεζομετρική του επιφάνεια εμφανίζει απόλυτα υψόμετρα που κυμαίνονται από 0 έως 3 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η υπόγεια ροή συγκλίνει προς το κέντρο του χώρου του Τ.Π.Π.Α. ενώ εμφανώς η κύρια ζώνη εκφόρτισης του υδροφόρου ορίζοντα είναι προς τον Όρμο Θορικού. Η μέση υδραυλική κλίση κατά τη διεύθυνση Α-Δ είναι 0,005, όμως, λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στα κράσπεδα της λεκάνης που αναπτύσσεται στο χώρο του πάρκου και μειώνεται σημαντικά εντός αυτής.

3.3.4. Γεωλογικά δεδομένα στην θέση κατασκευής

Εντός του υπόγειου έργου, στο λόφο στο βόρειο τμήμα του Τ.Π.Π.Λ., πραγματοποιήθηκαν 8 ερευνητικές γεωτρήσεις. Στόχος τους ήταν τόσο η διερεύνηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους στη θέση κατασκευής αλλά και ο εντοπισμός του υψόμετρου έναρξης του σχηματισμού του Ανώτερου Μαρμάρου, εντός του οποίου θα κατασκευαστεί ο υπόγειος χώρος.

Από τις γεωτρήσεις αυτές, οι Γ1, Γ2 και Γ3 έγιναν εντός των προτεινόμενων ορίων του υπόγειου χώρου, ενώ πλησίον του έχουν τοποθετηθεί οι Γ6 και Γ7, σε αποστάσεις 5,5 και 9,5 m, αντίστοιχα από τις παρειές του. Οι γεωτρήσεις Γ4, Γ5, και Γ8 έχουν ορυχθεί περιμετρικά της προτεινόμενης θέσης του χώρου.

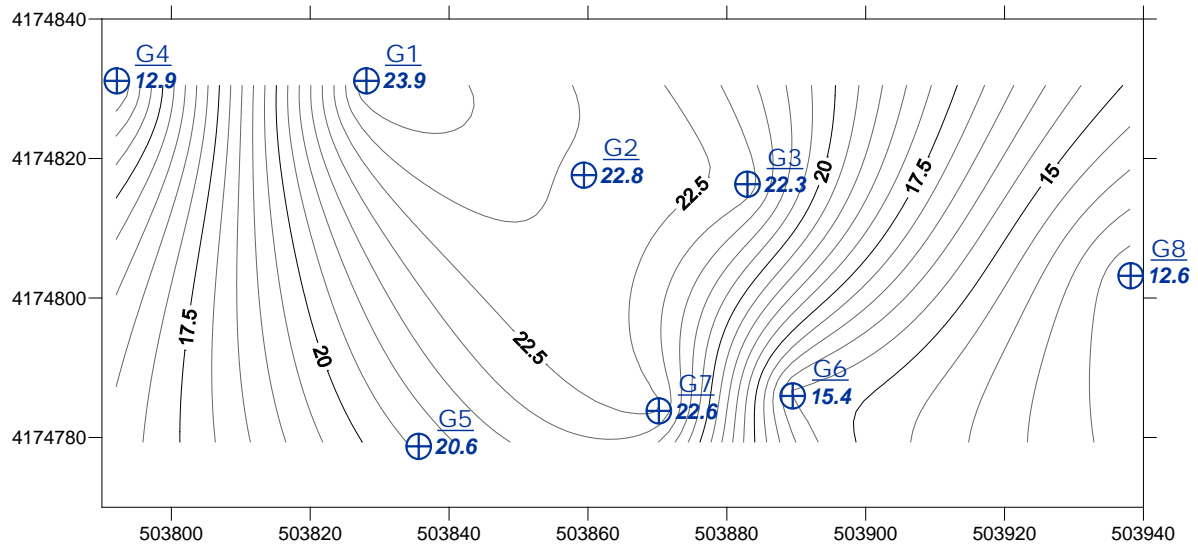
Υπήρξαν και 2 αρχικές γεωτρήσεις, οι οποίες έγιναν για τον εντοπισμό της επαφής του ανωτέρου μαρμάρου. Η Γ1 βρίσκεται εκτός των ορίων του χώρου, πλησίον της Γ6, ενώ η Γ2 εντός του χώρου μεταξύ των γεωτρήσεων Γ1 και Γ2.

Τα δεδομένα των νέων γεωτρήσεων επιβεβαιώνουν μερικώς τα ευρήματα της αρχικής γεωτρητικής έρευνας, καθώς στην θέση κατασκευής του υπόγειου χώρου ο ανώτερος ορίζοντας των μαρμάρων (επαφή Ανώτερου Μαρμάρου και υπερκείμενου επωθημένου καλύμματος) εντοπίζεται σε υψόμετρα +22,3 έως +23,9 m (Γ2': +23,7 m), ενώ στην θέση Γ6 στο υψόμετρο +15,4 m (Γ1': +14,75m). Τα αναλυτικά στοιχεία των γεωτρήσεων δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Αναλυτικά στοιχεία γεωτρήσεων και απόλυτο υψόμετρο εμφάνισης οροφής σχηματισμού «Ανώτερου Μαρμάρου».

Γεώτρηση	X	Y	Υψόμετρο φυσικού (m)	Βάθος ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου (m)	Υψόμετρο ασβεστόλιθου Ανώτερου Μαρμάρου (m)
Γ1	503828,0	4174830,5	46,2	22,3	23,9
Γ2	503859,3	4174817,3	49,8	27,0	22,8
Γ3	503882,9	4174816,0	50,5	28,2	22,3
Γ4	503792,1	4174830,5	39,8	26,9	12,9
Γ5	503835,5	4174779,3	36,5	15,9	20,6
Γ6	503889,4	4174786,4	43,8	28,4	15,4
Γ7	503870,1	4174784,3	41,4	18,8	22,6
Γ8	503938,0	4174803,2	41,2	28,6	12,6

Από την γεωτρητική διερεύνηση φαίνεται ότι υπάρχει μια τοπική ανωμαλία (πιθανώς ρήγμα) η οποία εντοπίζεται στις γεωτρήσεις Γ1 και Γ6 και η οποία προκαλεί αύξηση του βάθους συνάντησης του ορίζοντα του Ανώτερου Μαρμάρου κατά 7 m περίπου (Σχήμα 3.4).



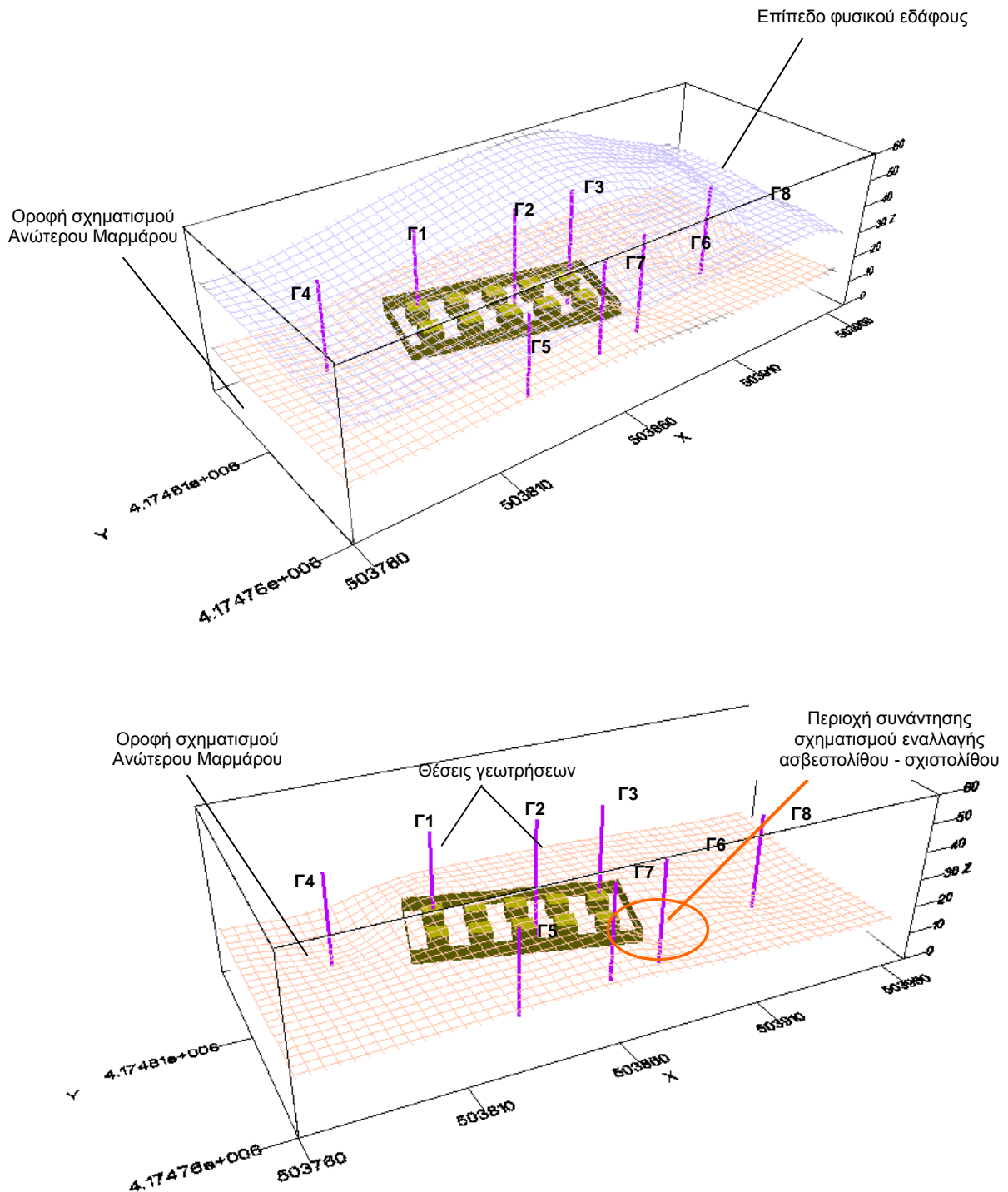
Σχήμα 3.4: Ισοϋψείς καμπύλες εμφάνισης της οροφής του ασβεστολιθικού σχηματισμού του Ανώτερου Μαρμάρου.

Το δάπεδο κατασκευής του υπόγειου χώρου είχε τοποθετηθεί αρχικά στο επίπεδο των +15 m, ενώ το μέγιστο ύψος του βρίσκονταν στο επίπεδο των +20,5 m. Ωστόσο το τελικό υψόμετρο του δαπέδου, κατασκευάστηκε στα +12 m και της οροφής στα +17,5m.

Τα δεδομένα των γεωτρήσεων έδειξαν ότι το ανώτερο υψόμετρο του ασβεστολιθικού ορίζοντα (Ανώτερου Μαρμάρου) κυμαίνεται περί τα +22 m. Αυτό δεν επηρεάζει την αντοχή των στύλων, εντούτοις δημιούργησε δυσχέρειες στην οροφή του υπόγειου χώρου. Προτάθηκε λοιπόν η μείωση του επιπέδου κατασκευής και η αντίστοιχη αύξηση του πάχους του ασβεστολιθικού σχηματισμού στην οροφή, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 4,8 m (Γ3) και 6,4 m (Γ1).

Επιπλέον, η κατασκευή του χώρου στο επίπεδο +12 m βοήθησε στην μείωση της πιθανότητας συνάντησης σχηματισμών του επωθημένου καλύμματος και πιο συγκεκριμένα την ζώνη εναλλαγής του ασβεστολιθικού σχηματισμού με το σχηματισμό του γραφιτικού σχιστόλιθου σε τμήμα της νοτιοδυτικής παρειάς του χώρου (πλησίον της γεώτρησης Γ6) . Σε κάθε περίπτωση πάντως, στο συγκεκριμένο τμήμα χρειάστηκε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τις εργασίες κατασκευής και διαμόρφωσης του υπόγειου χώρου, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα καταπτώσεων (Παπακωνσταντίνου, 2009).

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της συγκεκριμένης επαφής με τους σχηματισμούς του επωθημένου καλύμματος, σε σχέση με το υπόγειο έργο δίνεται στο σχήμα 3.5 (α, β).



Σχήμα 3.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπογείου χώρου στο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους και το επίπεδο επαφής του Ανώτερου Μαρμάρου και του επωθημένου καλύμματος. Διακρίνεται η περιοχή όπου πιθανώς θα συναντηθεί η μεταβατική ζώνη ασβεστολίθου – σχιστολίθου.

Πιο αναλυτικά, οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στις γεωτρήσεις Γ1, Γ2, Γ3, οι οποίες βρίσκονται εντός των ορίων της προτεινόμενης θέσης κατασκευής, αλλά και

στις γεωτρήσεις Γ4, Γ6 και Γ7, οι οποίες είναι οι πιο κοντινές στο έργο έχουν ως ακολούθως:

Γεώτρηση Γ1 (+46,5):

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- 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 42,2 m (πέρασ της γεώτρησης) συναντάται ο ασβεστόλιθος του ανώτερου μαρμάρου, ανοικτότεφρου χρώματος, κατά θέσεις με οξείδια και μικροκάρστ. Ο σχηματισμός εμφανίζεται με κλίσεις ασυνεχειών από 0° έως 45°, λείες, ανοικτές ή κλειστές. Η πυκνότητά τους κυμαίνεται από 2- 10 ασυνέχειες ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του κυμαίνεται από II έως III.

Γεώτρηση Γ2 (+51,0):

Αρχικά απαντάται άργιλος καστανού χρώματος με χάλικες, μέχρι βάθους 2,00 m.

Στη συνέχεια εμφανίζεται σχηματισμός πρασινοσχιστόλιθου – φυλλίτη του τεκτονικού καλύμματος, με ενδιαστρώσεις αγκεριτωμένου ασβεστόλιθου, μέχρι το βάθος των 16,2 m. Ο σχηματισμός εμφανίζεται με κλίσεις ασυνεχειών από 20° έως 70°, μέτρια τραχείες, κατά θέσεις αργιλοποιημένες, με πυκνότητα από 4-10 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 27,0 m. Οι ασυνέχειες εμφανίζονται τραχείες, με κλίσεις από 0°- 50°, ενώ η πυκνότητά τους από 4- 10 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης κυμαίνεται από III - IV.

Τέλος από το βάθος των 27,0 m μέχρι το πέρας της γεώτρησης (βάθος 45,8 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°- 70°, και με πυκνότητα από 2÷ 7 ανά μέτρο. Ο κερματισμός τους είναι II – III ενώ ο βαθμός αποσάθρωσής τους είναι επίσης II-III.

Γεώτρηση Γ3 (+53,0):

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÷ 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 απθώς 90°, μέτρια τραχείες ως λείες, με πυκνότητα από 4 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού κυμαίνεται από II έως IV και αποσάθρωσής του επίσης από II έως IV.

Από το βάθος των 18,6 m έως αυτό των 26,3 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 - σχιστολίθου σε εναλλαγές με τη μορφή ημισυνεκτικού ψηφιδολατυποπαγούς, μέχρι το βάθος των 28,2 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 48,3 m εμφανίζεται ο σχηματισμός του μαρμάρου του «Ανωτέρου μαρμάρου», λευκού χρώματος, με βαθμό κερματισμού II και αποσάθρωσης I.

Γεώτρηση Γ4 (+40,0):

Στα αρχικά στάδια της γεώτρησης μέχρι το βάθος των 1,8 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 26,9 m. Εμφανίζεται πτυχωμένος από το βάθος των 6,90 έως 23,00 m, καθώς και καρστικό έγκοιλο από το βάθος των 26,0 έως 26,2 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 ανά μέτρο. Ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσης του σχηματισμού κυμαίνεται από II – IV.

Στη συνέχεια, μέχρι το βάθος των 34,0 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 35,2 m ο σχηματισμός του μαρμάρου του «Ανωτέρου μαρμάρου», λευκού χρώματος με βαθμού κερματισμού II και αποσάθρωσης I.

Γεώτρηση Γ6 (+44,0):

Στα αρχικά στάδια της γεώτρησης μέχρι το βάθος των 2,0 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 19,4 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 γραφικός σχιστόλιθος, του τεκτονικού καλύμματος, με χαλαζία και κατά θέσεις αργιλοποιημένος, μέχρι βάθους 24,5 m. Οι ασυνέχειες του σχηματισμού εμφανίζονται τραχείες, με κλίσεις που κυμαίνεται από 0°- 60°, ενώ η πυκνότητά τους είναι από 10 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 28,4 m. Στο τμήμα από 26,3 έως 28,4 ο ασβεστόλιθος εμφανίζεται οξειδωμένος, ενώ ο βαθμός κερματισμού και αποσάθρωσής του είναι III – V.

Ακολουθεί ο ανοικτότεφος ασβεστόλιθος του «Ανωτέρου μαρμάρου», μέχρι το βάθος των 39,2 m, ο οποίος κατά θέσεις συναντάται με οξείδια και ασβεστίτη. 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 (+44,0):

Μέχρι το βάθος των 3,0 m συναντάται άργιλος, στιφρή με εμφάνιση χαλίκων.

Στη συνέχεια μέχρι το βάθος των 9,0 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 18,3 m, ο οποίος είναι πολύ έντονα κερματισμένος.

Στη συνέχεια με πολύ μικρό πάχος (0,5m) και μέχρι το βάθος των 18,8 m συναντάται υλικό τεκτονικής επαφής ασβεστολίθου – σχιστολίθου.

Ο σχηματισμός του ανοικτότεφρου ασβεστολίθου του «Ανώτερου μαρμάρου» με ασβεστίτη και μικροκάρστ κατά θέσεις, συναντάται μέχρι το βάθος των 37,5 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.

Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στους πυρήνες των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I, καθώς και τα αποτελέσματα των επιτόπιων δοκιμών για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας,

3.4. Γεωτεχνικοί παράμετροι αναλύσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γεωτεχνικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο για την χωρική ανάλυση του υπόγειου χώρου στο Λαύριο. Για να υπάρχουν περισσότερες τιμές στην μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, ώστε να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με τις αναλύσεις για την αντοχή των στύλων και του υπόγειου συγκροτήματος, έγινε προσαρμογή με τον δείκτη σημειακής φόρτισης.

3.4.1. Μονοαξονική αντοχή του πετρώματος σε θλίψη UCS

Χρησιμοποιείται η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σε (MPa) ή η τιμή του δείκτη σημειακής φόρτισης $I_s(50)$ (MPa). Η βαθμονόμηση φαίνεται στον Πίνακα 3.4. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την κατηγορία είναι από τις εργαστηριακές δοκιμές και από τις περιγραφές των πυρήνων των γεωτρήσεων.

Πίνακας 3.4: Βαθμονόμηση με βάση την αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σε (MPa)

Αντοχή σε (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

3.4.2. Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης

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 διάφορων 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)

Σύμφωνα με τους Broch and 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 $D=50$ mm, βρέθηκε ότι:

$$UCS \approx 24 \cdot I_s$$

3.4.3. Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD (%).

Όπως έχει προαναφερθεί, ο δείκτης RQD προκύπτει από το λόγο του συνολικού μήκους των τεμαχίων του πυρήνα γεώτρησης που το μήκος του καθενός από αυτά είναι ίσο ή μεγαλύτερο από 10cm, διά του συνολικού μήκους της πυρηνοληψίας (Deere, 1963). Η βαθμονόμηση φαίνεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Βαθμονόμηση με βάση το δείκτη RQD (%)

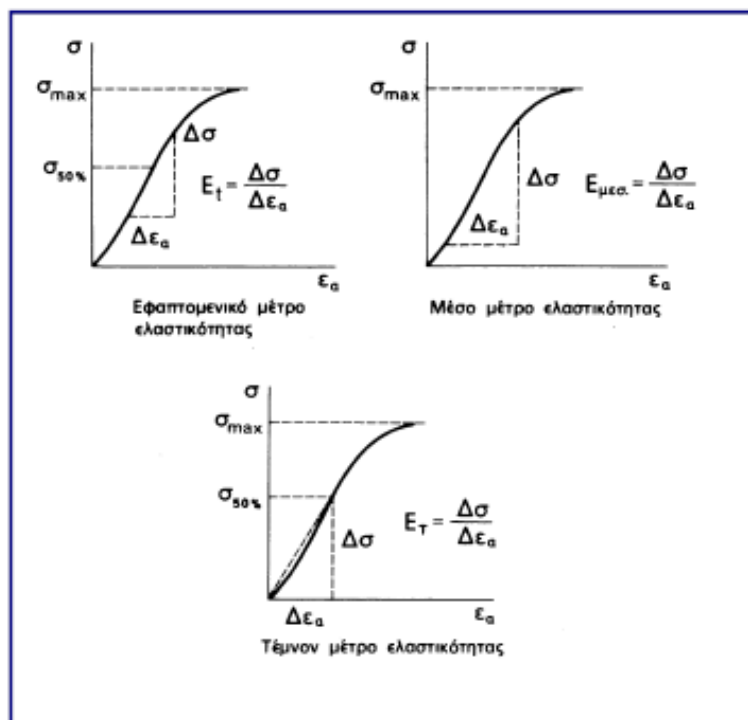
RQD (%)	Χαρακτηρισμός
90-100	Εξαιρετική
75-90	Καλή
50-75	Μέτρια
25-50	Πτωχή
<25	Πολύ πτωχή

3.4.4. Μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό να

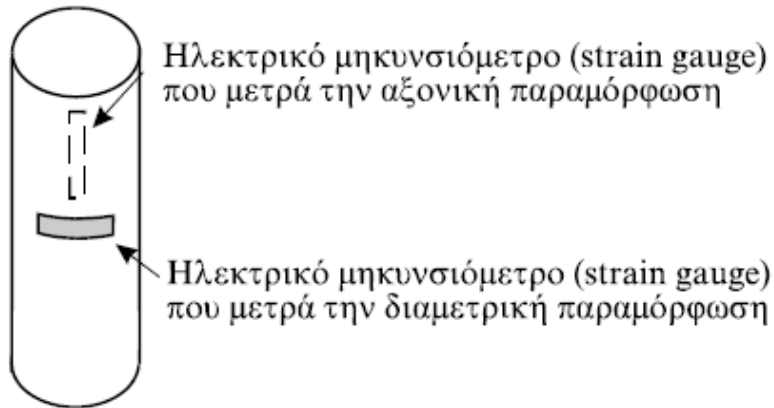
υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος, δηλαδή η μέγιστη τάση (μέση τιμή σε ένα επίπεδο) την οποία ένα πέτρωμα δύναται να αντέξει.

Επίσης με βάση το διάγραμμα (Σχήμα 3.6) 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 3.6: 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 3.7. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, και ο οριζόντιος την διαμετρική παραμόρφωση.



Σχήμα 3.7: 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:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x}, \quad \epsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad (1)$$

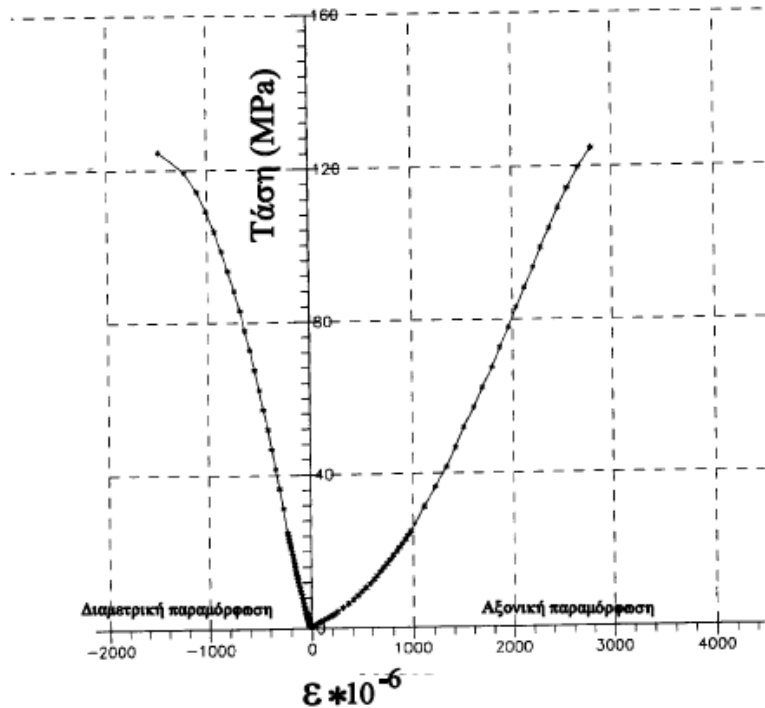
όπου η μεταβολή του μήκους που μετράει ο μετρητής και το μήκος στο οποίο γίνεται αυτή η μέτρηση (3 cm). Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων, τα μεγέθη ϵ_x , ϵ_y δίνονται από τις ενδείξεις των ενισχυτών του, πολλαπλασιαζόμενες με κατάλληλο συντελεστή. Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται 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 ($E_{μεσ}$) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: 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).

3.5. Στατιστική επεξεργασία των γεωτρήσεων

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται τα στατικά στοιχεία των γεωτρήσεων όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση των 8 γεωτρήσεων που έγιναν στον υπόγειο χώρο, για την διερεύνηση του υπεδάφους.

Οι τιμές των εργαστηριακών δοκιμών για την μονοαξονική αντοχή των δειγμάτων σε θλίψη (UCS) προσαυξήθηκαν με τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δειγμάτων σε δοκιμή σημειακής φόρτισης (I_s) σύμφωνα με τον τύπο των Broch and Franklin (1972): $UCS \approx 24 \cdot I_s$.

Οι σχηματισμοί που συναντήθηκαν από τις γεωτρήσεις είναι:

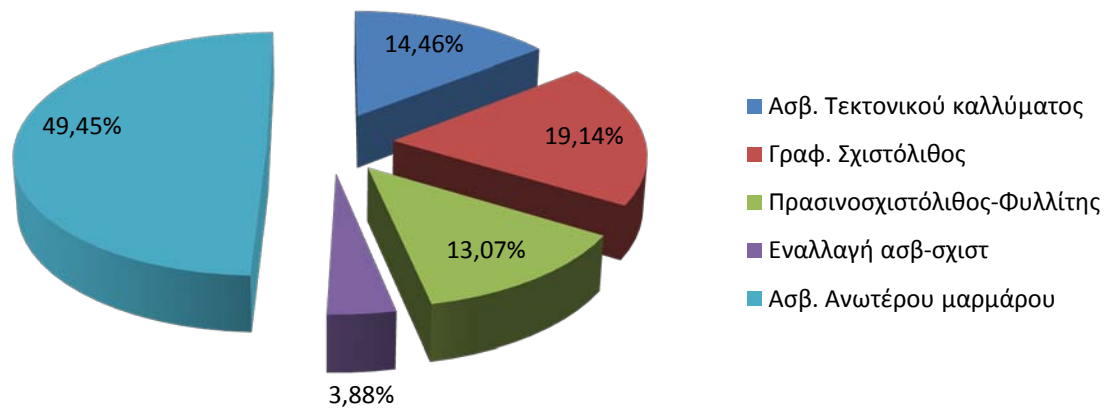
- Ασβεστόλιθος τεκτονικού καλύμματος
- Γραφικός σχιστόλιθος
- Πρασινοςχιστόλιθος – Φυλλίτης
- Εναλλαγή ασβεστολίθου – σχιστολίθου
- Ασβεστόλιθος ανωτέρου μαρμάρου

Η στατιστική επεξεργασία των γεωτρήσεων έγινε για

- Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών
- Μονοαξονική αντοχή του πετρώματος σε θλίψη UCS με σημειακή φόρτιση I_s (MPa)
- Δείκτη ποιότητας βραχομάζας RQD (%)
- Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)
- Μονοαξονική αντοχή του πετρώματος UCS (MPa)

Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών

Ύστερα από το πέρας των γεωτρήσεων, τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων και την ποιότητα της βραχομάζας, έγινε κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών (Σχήμα 3.9). Σχεδόν στο 50 % των δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις συναντήθηκε ασβεστόλιθος ανωτέρου μαρμάρου, όπου έγινε και το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής του υπόγειου χώρου.



Σχήμα 3.9: Κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών μέσα από τις γεωτρήσεις

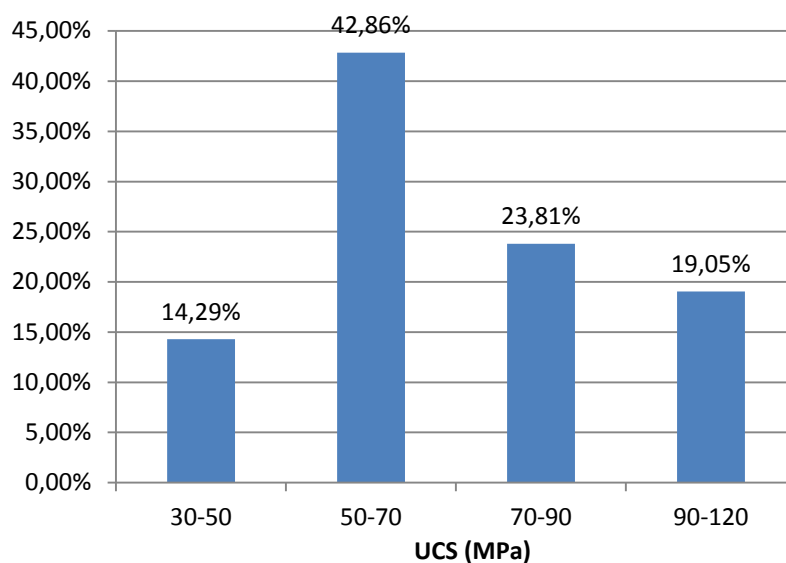
Ασβεστόλιθος τεκτονικού καλύμματος

Στον επόμενο πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των δειγμάτων των γεωτρήσεων για τον ασβεστόλιθο του τεκτονικού καλύμματος. Παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που εξάγονται αν συμπεριληφθούν οι δοκιμές UCS και οι δοκιμές Is δίνουν καλύτερες τιμές. Ενδεικτικά στον μέσο όρο (average) υπάρχει μια αύξηση 14,7% συγκριτικά με το την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS).

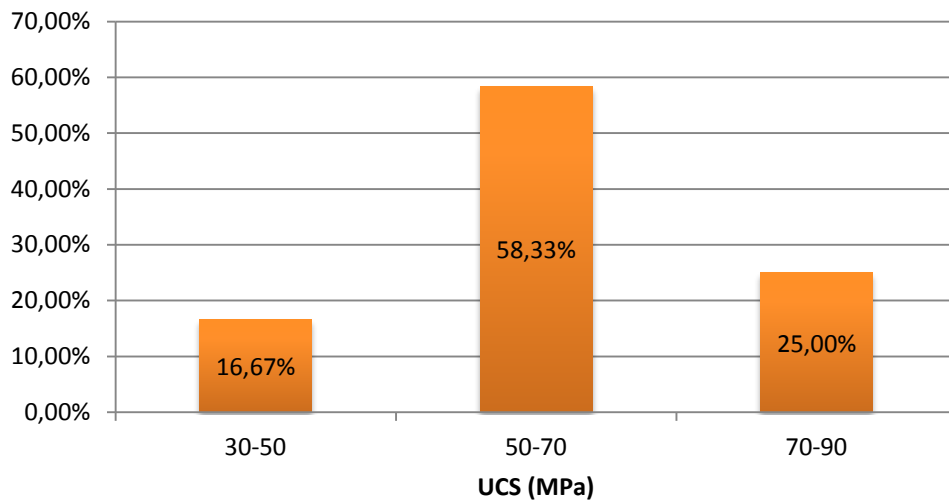
Πίνακας 3.6: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον ασβεστόλιθο τεκτονικού καλύμματος

	UCS (MPa)	RQD (%)	E (MPa)	UCS με Is (MPa)
min	38,02	0	7258	38,02
max	81,73	98	14489	112,51
average	61,73	74,3	11270	70,86
stdev	12,27	24,9	2164,3	20,05
median	61,41	87	11333	68,78

Το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων (42,86%) παρουσιάζει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη στο εύρος τιμών μεταξύ 50-70MPa ενώ στις χαμηλότερες τιμές με εύρος 30-50 MPa κατηγοριοποιείται το μικρότερο μέρος των δεδομένων (14,3%) (Σχήμα 3.10).

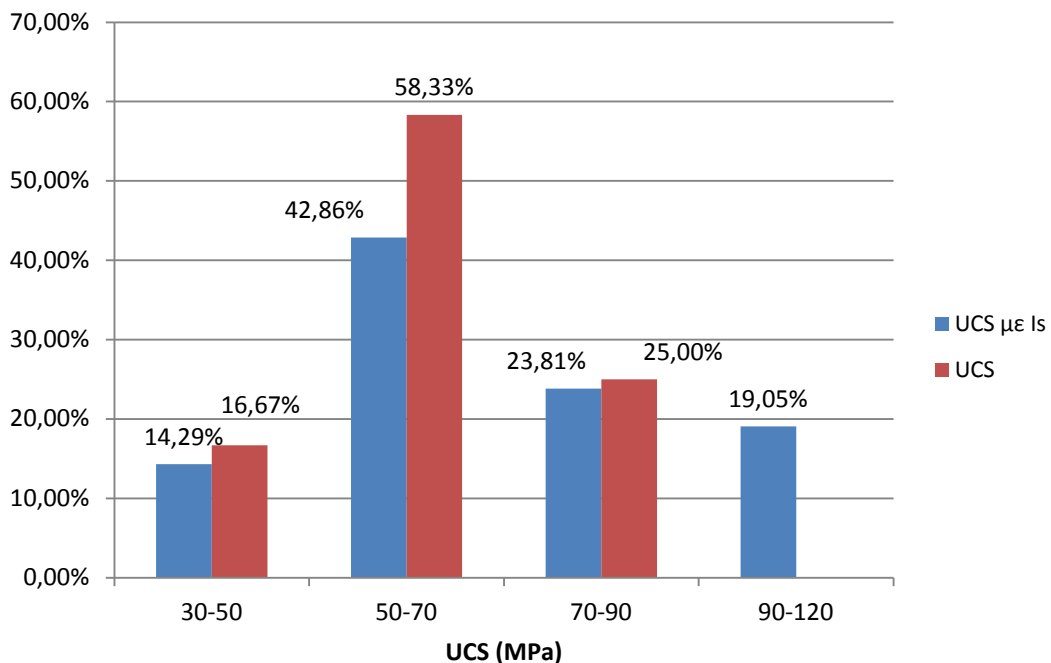


Σχήμα 3.10: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος



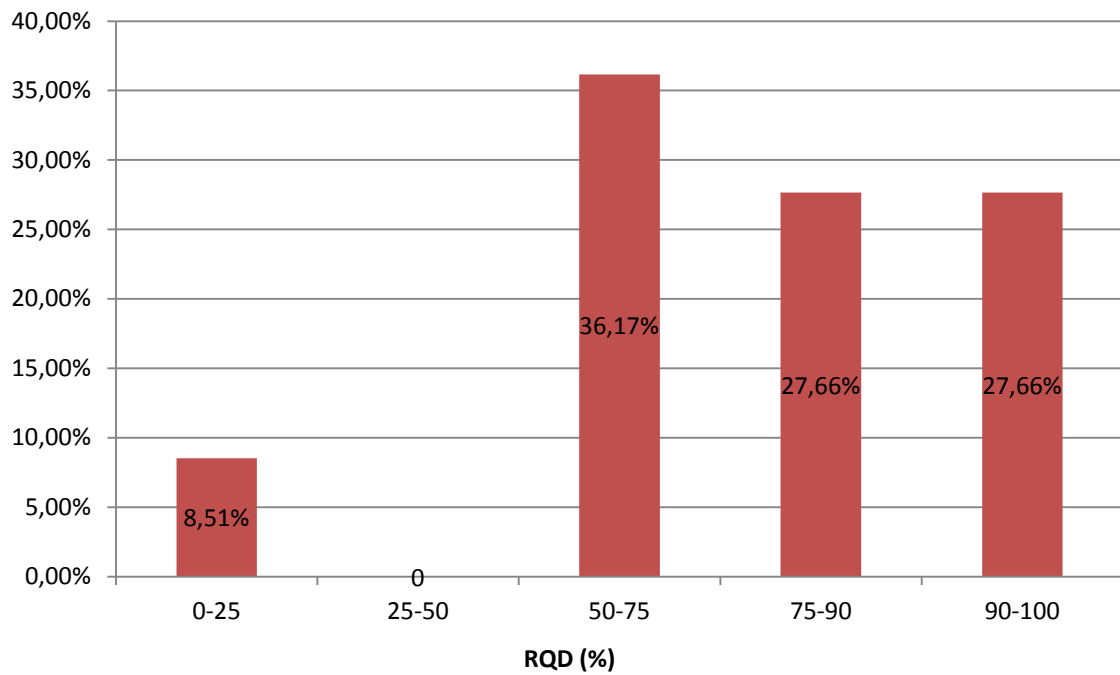
Σχήμα 3.11: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος

Στο συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό για το UCS, από 30-90MPa. Στο εύρος τιμών όμως 90-120MPa φαίνεται ότι υπάρχουν τιμές μόνο UCS με Is (19%) (Σχήμα 3.12).



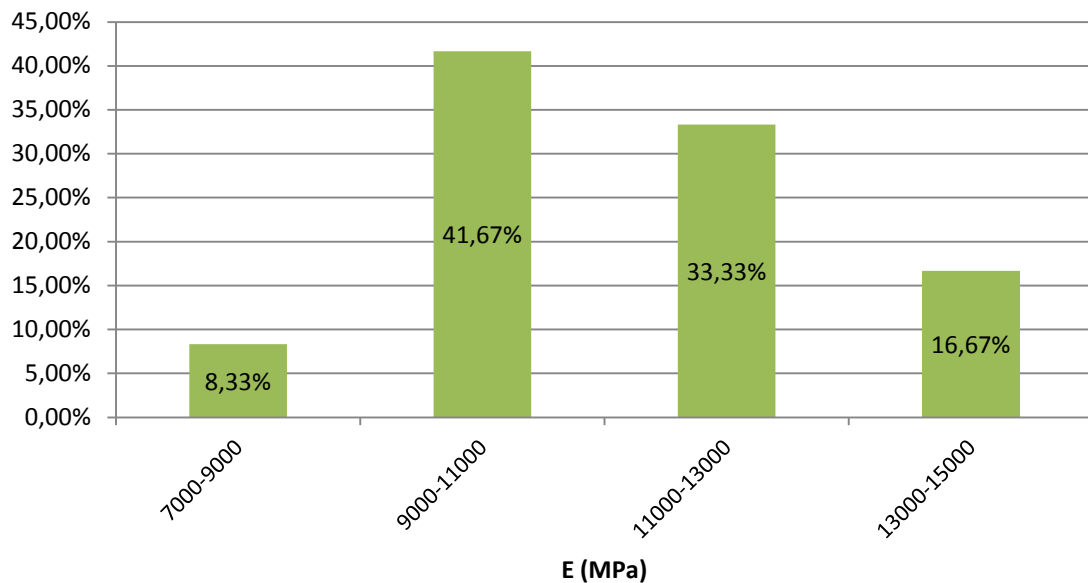
Σχήμα 3.12: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος

Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας (RQD) έχει το 55% των δειγμάτων σε εύρος τιμών 75-100 και το 36% σε τιμές μεταξύ 50-75 (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος

Στο μέτρο ελαστικότητας το 75% των δειγμάτων βρίσκονται σε εύρος τιμών 9000-13000MPa (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος

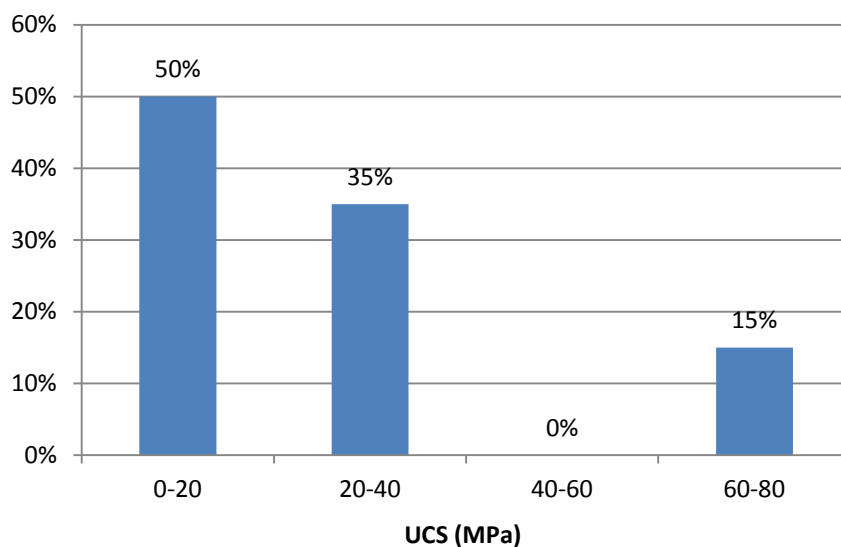
Γραφιτικός σχιστόλιθος

Στον επόμενο πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των δειγμάτων των γεωτρήσεων για τον γραφιτικό σχιστόλιθο. Εδώ παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που εξάγονται αν συμπεριληφθούν οι δοκιμές UCS και οι δοκιμές Is δίνουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το UCS. Ενδεικτικά στον μέσο όρο (average) υπάρχει μια μείωση 43,5% συγκριτικά με το UCS.

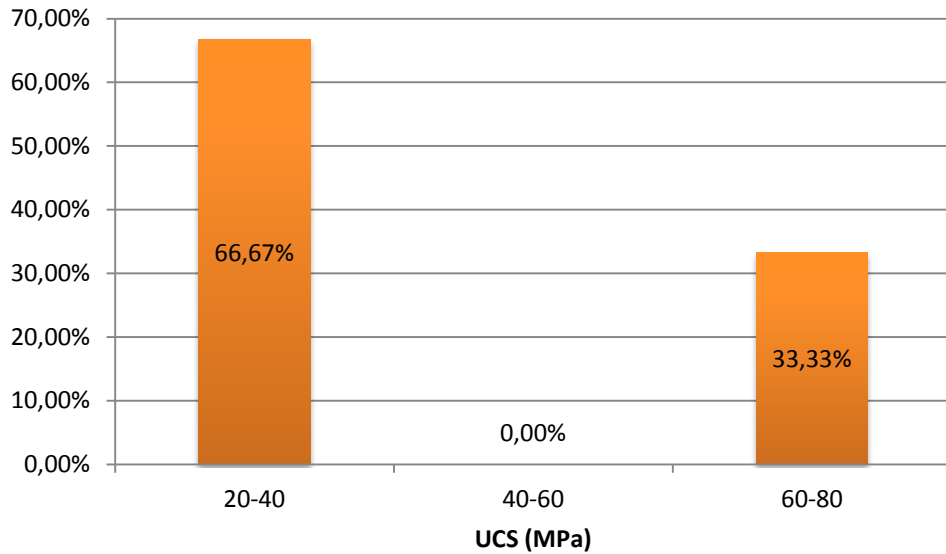
Πίνακας 3.7: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον γραφιτικό σχιστόλιθο

	UCS (MPa)	RQD (%)	E (MPa)	UCS με Is (MPa)
min	22,31	0	5649	3,5
max	70,49	93	7626	70,49
average	42,54	45,6	6792	24,03
stdev	18,57	27,4	57,42	21,35
median	37,79	45	6923	17,3

Το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων (85%) σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη βρίσκεται στο εύρος τιμών 0-40MPa και το μικρότερο (15%) στις τιμές 60-80MPa. Στο εύρος 40-60MPa δεν υπάρχουν δείγματα (Σχήμα 3.15).

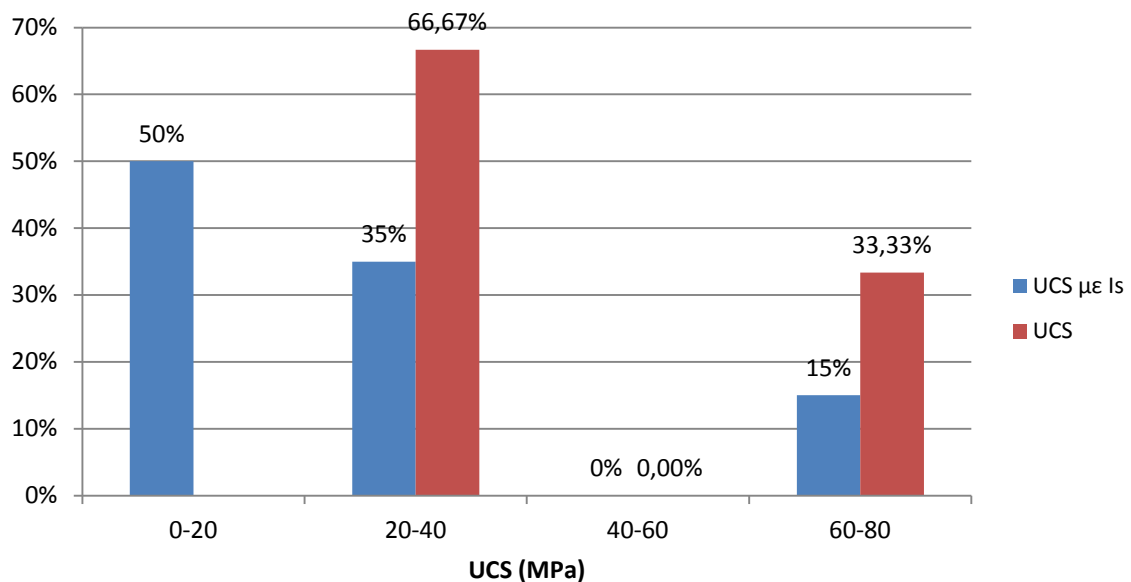


Σχήμα 3.15: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) γραφιτικού σχιστόλιθου



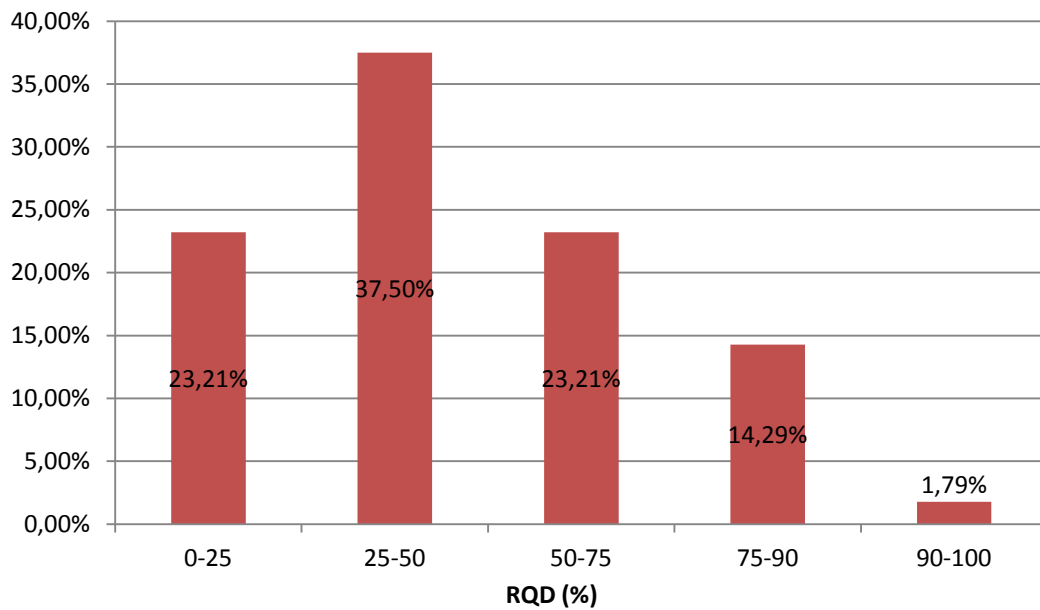
Σχήμα 3.16: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) γραφιτικού σχιστόλιθου

Στο συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με I_s και UCS παρατηρείται για το UCS ότι το 67% των δειγμάτων βρίσκεται μεταξύ 20-40MPa και το 33% μεταξύ 60-80MPa. Αντίθετα το εύρος τιμών για το UCS με I_s είναι κατανεμημένο από 0-80MPa, με το 50% να είναι στα 0-20MPa. Να σημειωθεί ότι και στις 2 περιπτώσεις δεν υπάρχουν τιμές στο εύρος 40-60MPa (Σχήμα 3.17).



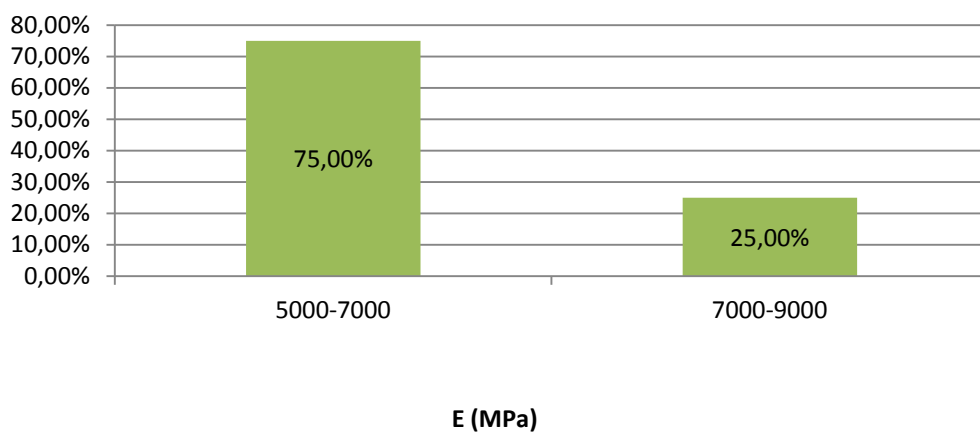
Σχήμα 3.17: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με I_s και UCS γραφιτικού σχιστόλιθου

Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας (RQD) έχει το 60% των δειγμάτων σε χαμηλό εύρος τιμών 0-50% και μόλις 1,79% με τιμές 90-100% (Σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.18: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD γραφιτικού σχιστόλιθου

Στο μέτρο ελαστικότητας το 75% των δειγμάτων βρίσκονται σε εύρος τιμών 5000-7000MPa και το υπόλοιπο 25% μεταξύ 7000-9000MPa (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) γραφιτικού σχιστόλιθου

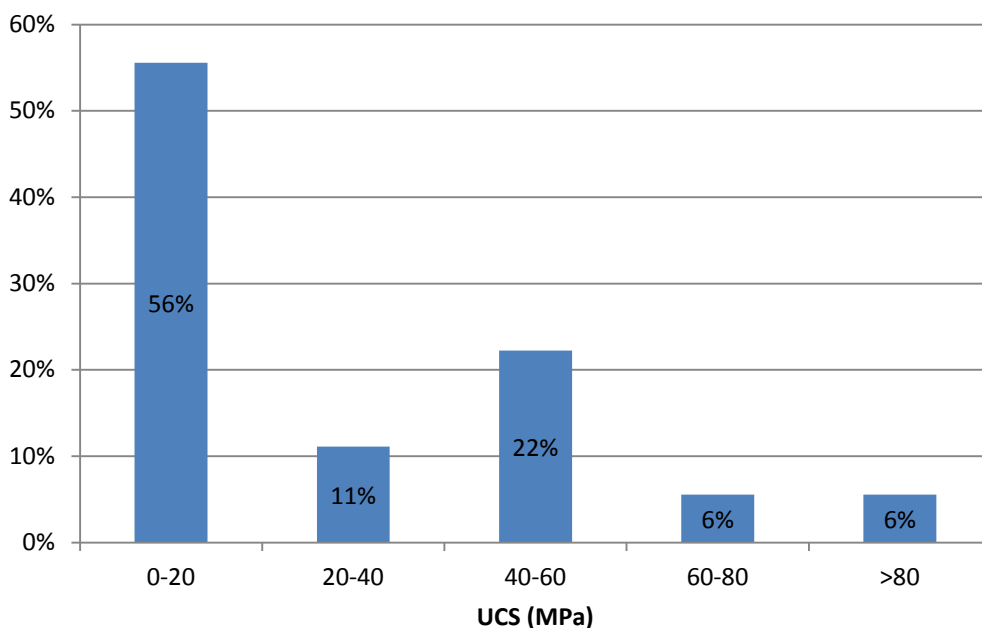
Πρασινοσχιστόλιθος – Φυλλίτης

Στον επόμενο πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των δειγμάτων των γεωτρήσεων για τον πρασινοσχιστόλιθο-φυλλίτη. Και εδώ παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που εξάγονται αν συμπεριληφθούν οι δοκιμές UCS και οι δοκιμές Is είναι χαμηλότερες σε σχέση με το UCS. Ενδεικτικά στον μέσο όρο (average) υπάρχει μια μείωση 32,45% συγκριτικά με το UCS.

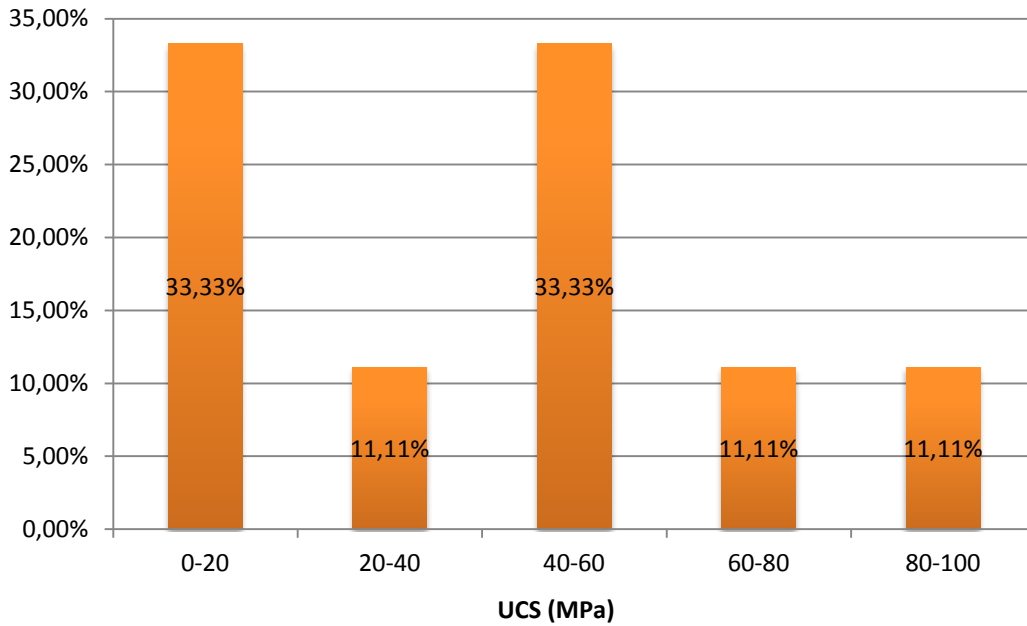
Πίνακας 3.8: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον πρασινοσχιστόλιθο-φυλλίτη

	UCS (MPa)	RQD (%)	E (MPa)	UCS με Is (MPa)
min	8,04	0	1964	2,47
max	80,2	93	13031	80,2
average	42,68	52,2	7467	28,83
stdev	27,8	27,9	3850	27,12
median	47,51	54	7816	13,5

Το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων (56%) σε μονοαξονική αντοχή σε θλίψη βρίσκεται στο εύρος τιμών 0-20MPa και το μικρότερο (12%) στις τιμές >60MPa (Σχήμα 3.20).

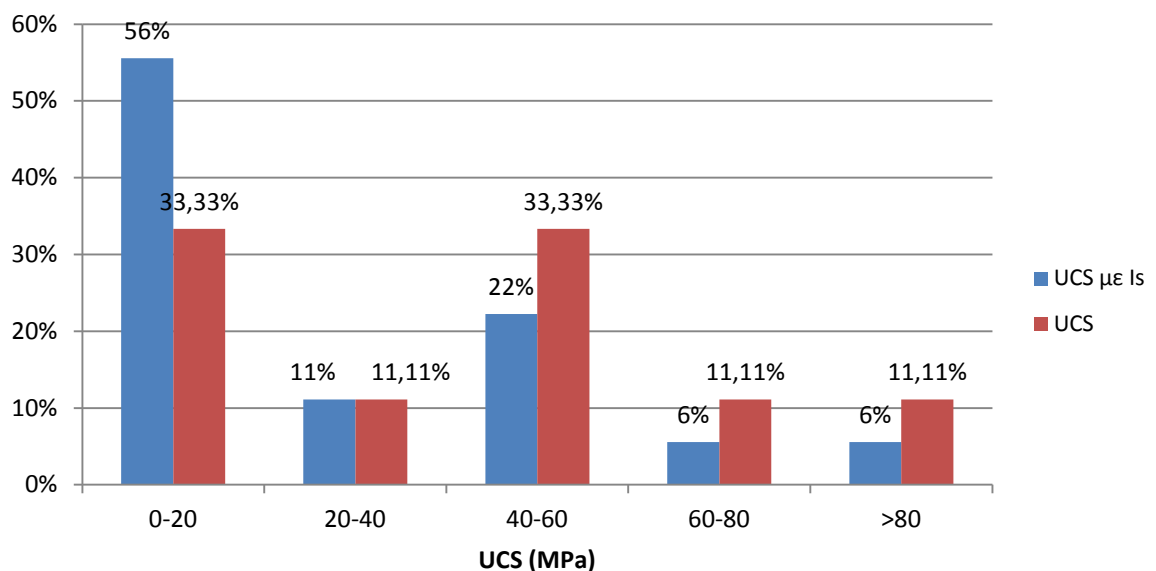


Σχήμα 3.20: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη



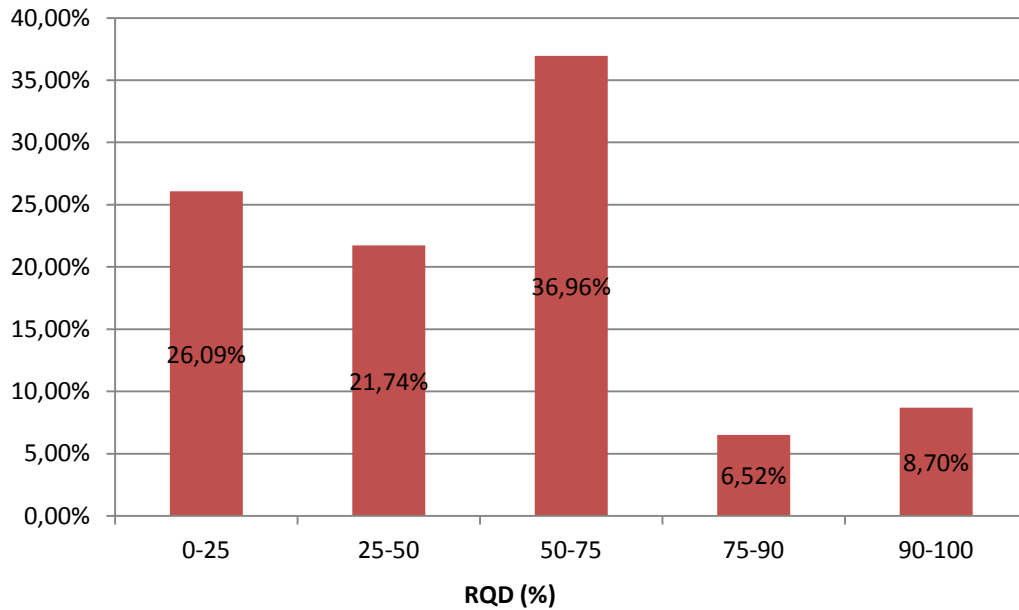
Σχήμα 3.21: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη

Στο συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS παρατηρείται ότι το UCS με Is έχει το 56% των δειγμάτων μεταξύ 0-20MPa και αρκετά χαμηλότερα ποσοστά σε σχέση με το UCS για το υπόλοιπο εύρος εξέτασης (Σχήμα 3.22).



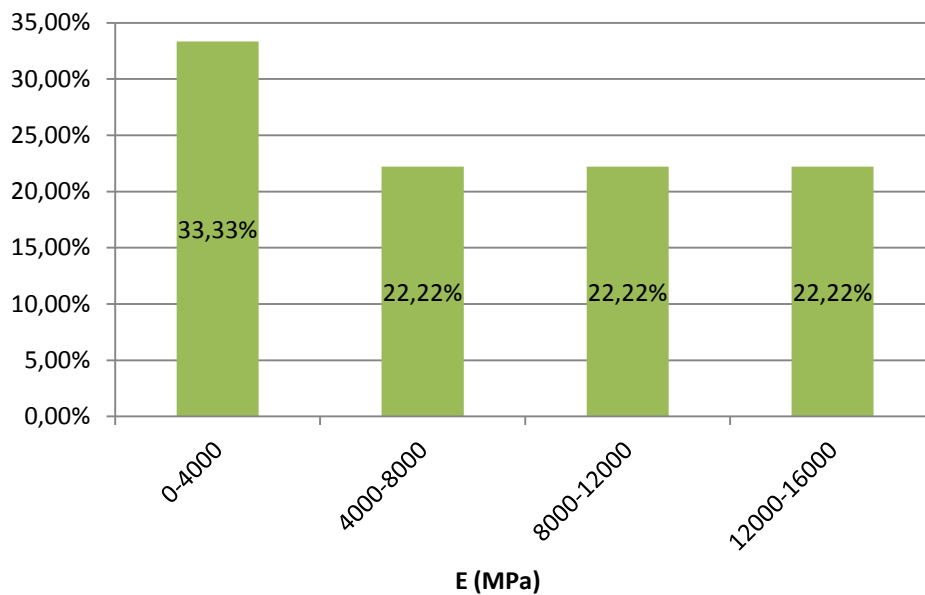
Σχήμα 3.22: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη

Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας (RQD) έχει το 37% σχεδόν των δειγμάτων σε εύρος τιμών 50-75% και το 47% μεταξύ 0-50% (Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη

Χαρακτηριστικό είναι το μέτρο ελαστικότητας το οποίο έχει εύρο από 0-16000MPa αρκετά ομοιόμορφα κατανεμημένο (Σχήμα 3.24).



Σχήμα 3.24: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη

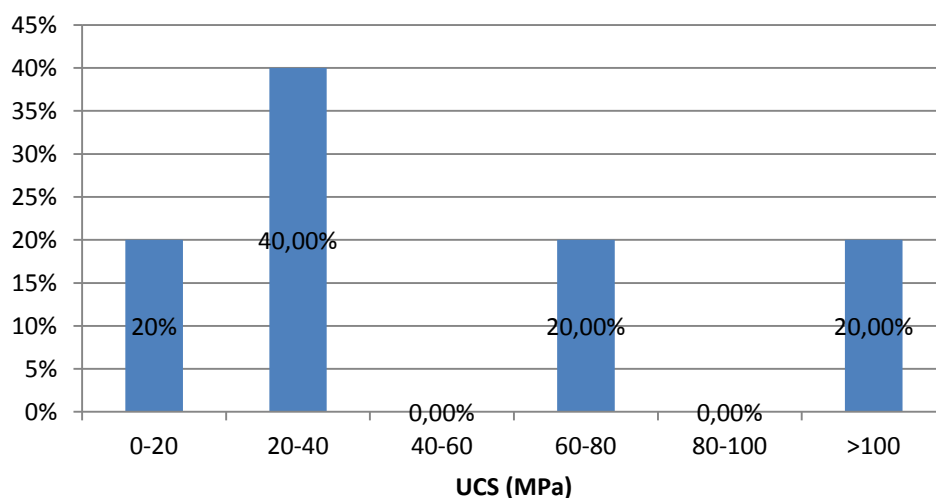
Εναλλαγή ασβεστολίθου – σχιστολίθου

Στον επόμενο πίνακα 3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των δειγμάτων των γεωτρήσεων για την εναλλαγή ασβεστολίθου – σχιστολίθου. Παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που εξάγονται αν συμπεριληφθούν οι δοκιμές UCS και οι δοκιμές Is δίνουν καλύτερες τιμές σε σχέση με το UCS. Ενδεικτικά στον μέσο όρο (average) υπάρχει μια αύξηση 36,25% συγκριτικά με το UCS.

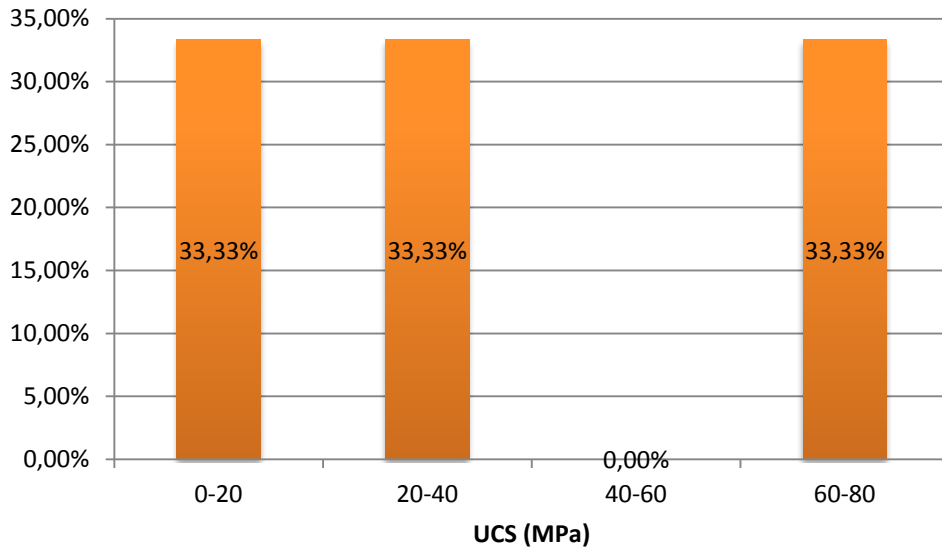
Πίνακας 3.9: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον εναλλαγή ασβεστολίθου με σχιστόλιθο

	UCS (MPa)	RQD (%)	E (MPa)	UCS με Is (MPa)
min	16,71	0	4712	16,71
max	67,68	77	13634	116,02
average	39,94	45,5	8126	54,42
stdev	25,78	24,2	4815,7	38,93
median	35,43	53	6031	36,74

Το 60% των δειγμάτων έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με Is 0-40MPa και το υπόλοιπο 40% κυμαίνεται πάνω από 60MPa. Να σημειωθεί ότι στο εύρος 40-60 και 80-100 δεν υπάρχουν τιμές για τα δείγματα (Σχήμα 3.25).

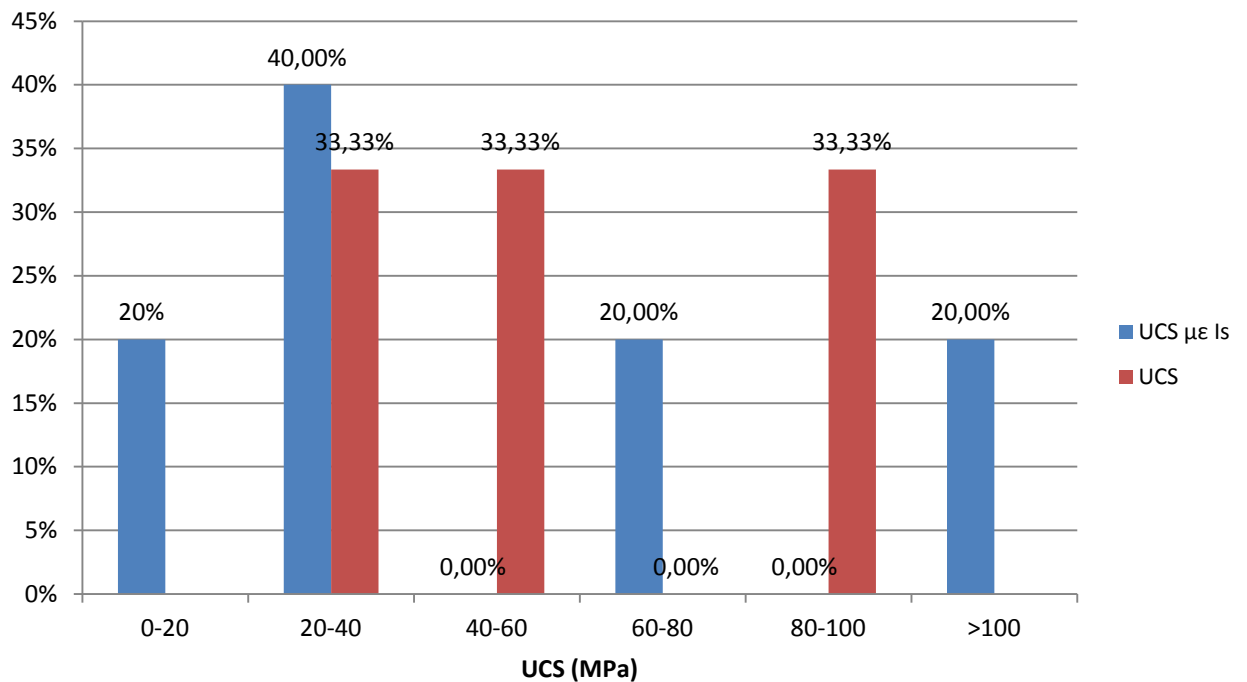


Σχήμα 3.25: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου – σχιστολίθου



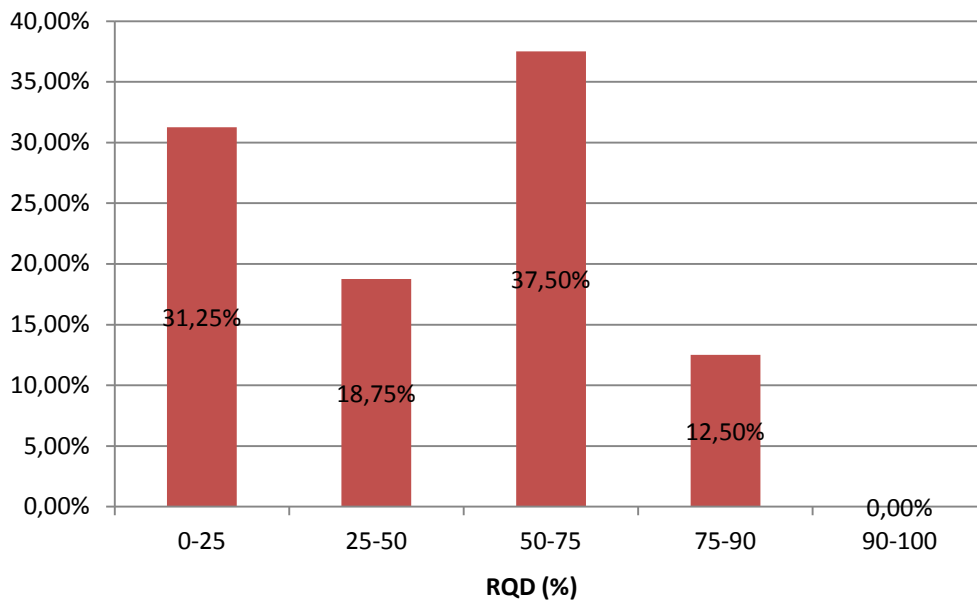
Σχήμα 3.26: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου

Στο συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS παρατηρείται ότι το UCS με Is έχει το 40% των δειγμάτων μεταξύ 0-20MPa και >100MPa, ενώ το UCS περιορίζεται μεταξύ 20-100MPa ομοιόμορφα κατανεμημένο (Σχήμα 3.27).



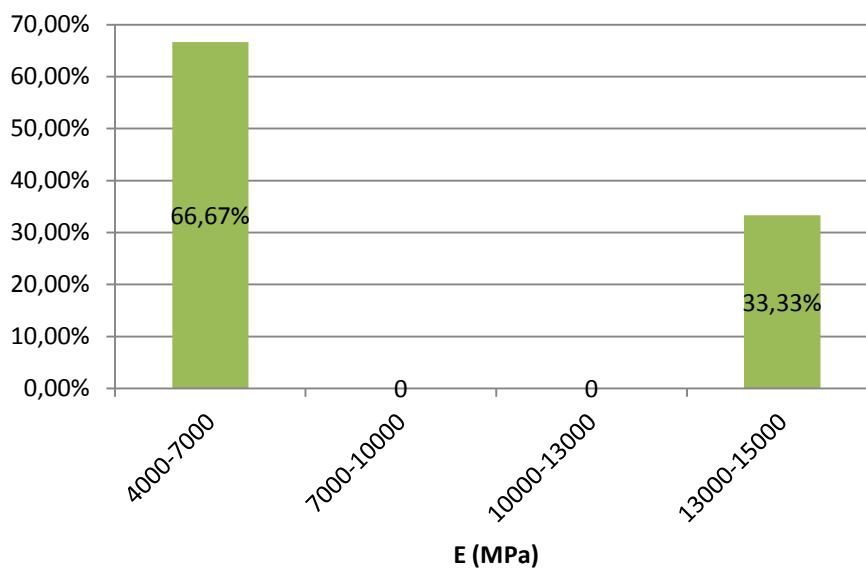
Σχήμα 3.27: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου

Το 87,5% των δειγμάτων έχουν RQD 0-75% και μόλις το 12,5% έχει εύρος τιμών 75-90% (Σχήμα 3.28).



Σχήμα 3.28: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου

Το μέτρο ελαστικότητας για τα δείγματα που έχουν εναλλαγή ασβεστολίθου-σχιστολίθου φαίνεται να έχει σχεδόν το 70% των δειγμάτων τιμές 4000-7000MPa και το υπόλοιπο 30% σχεδόν, τιμές 13000-15000MPa. Αυτό δείχνει και την εναλλαγή των δύο σχηματισμών (Σχήμα 3.29).



Σχήμα 3.29: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου

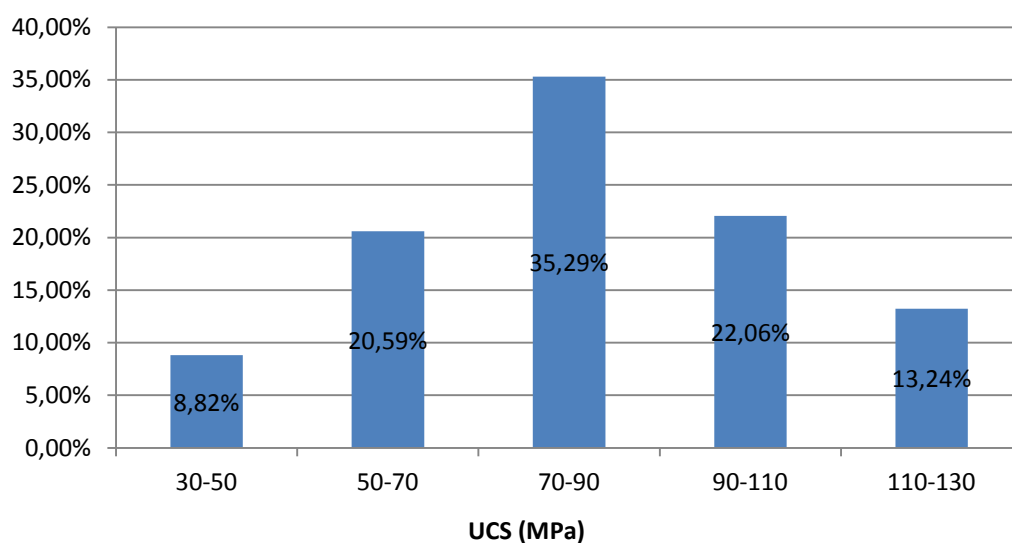
Ασβεστόλιθος ανώτερου μαρμάρου

Στον επόμενο πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του συνόλου των δειγμάτων των γεωτρήσεων για τον ασβεστόλιθο του ανωτέρου μαρμάρου. Να σημειωθεί ότι σε αυτό τον σχηματισμό κατασκευάστηκε το μεγαλύτερο τμήμα του υπόγειου συγκροτήματος Παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχής που εξάγονται αν συμπεριληφθούν οι δοκιμές UCS και οι δοκιμές Is δίνουν καλύτερες τιμές σε σχέση με το UCS. Ενδεικτικά στον μέσο όρο (average) υπάρχει μια αύξηση 14,42% συγκριτικά με το UCS.

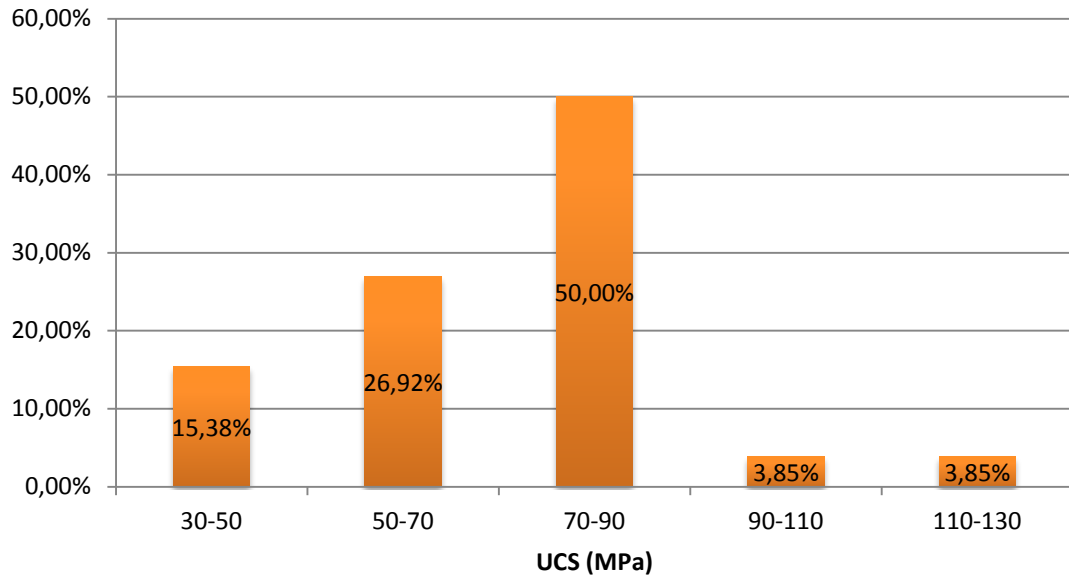
Πίνακας 3.10: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον ασβεστόλιθο ανωτέρου μαρμάρου

	UCS (MPa)	RQD (%)	E (MPa)	UCS με Is (MPa)
min	39,2	0	6804	36,98
max	116,63	100	17340	123,05
average	71,38	82,05	12403	81,68
stdev	17,98	17,4	2834	22,78
median	74,43	86	12003	79,87

Πάνω από το 70% των δειγμάτων έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με Is, 70-130MPa και μόλις το 24% των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 30-70MPa (Σχήμα 3.30).

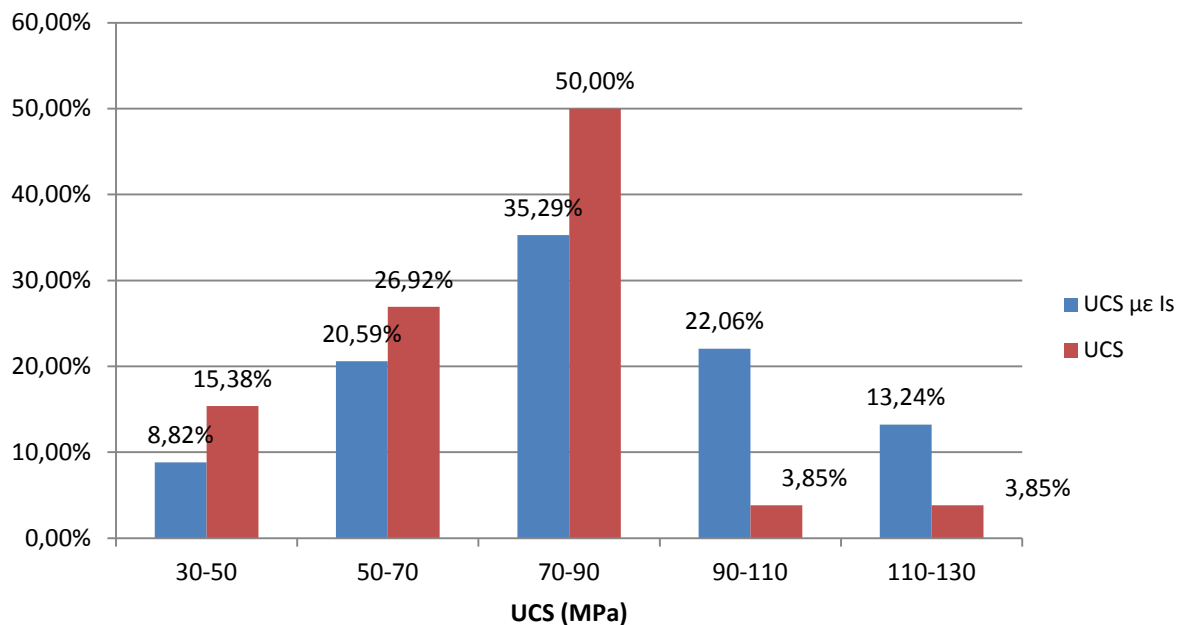


Σχήμα 3.30: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) ασβεστόλιθου αν. μαρμάρου



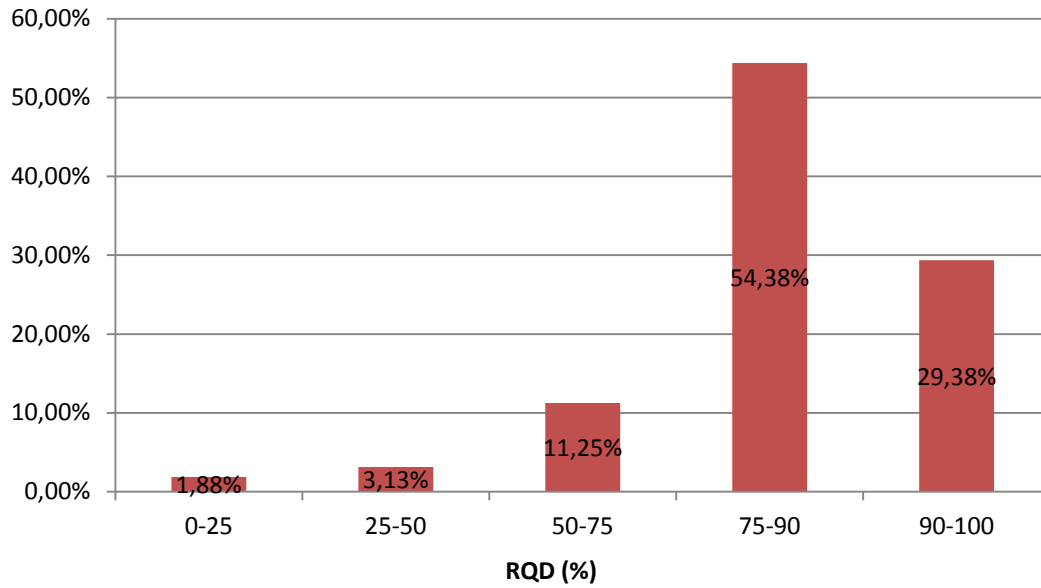
Σχήμα 3.31: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) ασβεστολίθου αν. μαρμάρου

Στο συγκριτικό διάγραμμα UCS με Is και UCS παρατηρείται ότι το UCS με Is έχει από 30-90MPa χαμηλότερες τιμές, ενώ από 90-130MPa αρκετά υψηλότερες (Σχήμα 3.32).



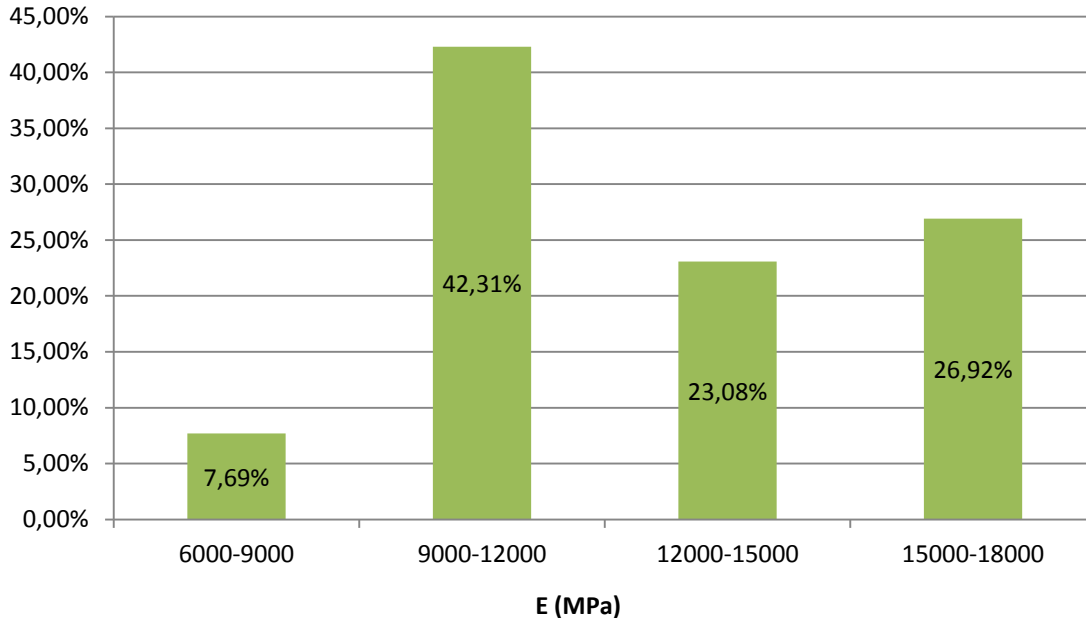
Σχήμα 3.32: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS ασβεστολίθου αν. μαρμάρου

Υψηλές τιμές έχει και ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας (RQD) με το 83,7% των δειγμάτων να έχει τιμές 75-100% (Σχήμα 3.33).



Σχήμα 3.33: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD ασβεστολίθου αν. μαρμάρου

Το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 6000-18000MPa, με το 93% βέβαια να κυμαίνεται πάνω από 9000MPa (Σχήμα 3.34).



Σχήμα 3.34: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) ασβεστολίθου αν. Μαρμάρου

3.6. Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας στην θέση κατασκευής

Η γεωτεχνική ταξινόμηση της βραχώμαζας για το υπόγειο έργο βασίζεται στις εργαστηριακές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί. Εντοπίζεται μια ζώνη η οποία περιλαμβάνει τον υπόγειο χώρο, καθώς και την άμεση οροφή του συγκροτήματος, από το υψόμετρο των +12,0 m έως το +23,0 m περίπου.

Αναλύονται τα δεδομένα που προκύπτουν για το επίπεδο κατασκευής του υπόγειου χώρου από τις γεωτρήσεις Γ1, Γ2 και Γ3. Επίσης δίνεται η γεωτεχνική ταξινόμηση στη γεώτρηση Γ6 για τους σχηματισμούς του γραφιτικού σχιστόλιθου και της τεκτονικής επαφής ασβεστόλιθου – σχιστόλιθου, καθώς όπως αναφέρθηκε υπάρχει η πιθανότητα συνάντησης των εν λόγω σχηματισμών, και ιδιαίτερα του δεύτερου, τοπικά στο νοτιοδυτικό άκρο του χώρου. Αναλυτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 3.11 έως και 3.13 (Πανγαία, 2007).

Πίνακας 3.11: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ1.

ΘΕΣΗ :	Γεώτρηση Γ1		
ΒΑΘΟΣ:	22,30 m – 34,20 m		
ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜ:	+23,90 m- +12,00 m		
ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ:	Ασβεστόλιθος Ανώτερου Μαρμάρου		
Παράμετροι ταξινόμησης	Τιμή	Βαθμολογία	
1. ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΓΟΥΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	50 - 100 MPa	7	
2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΥ (RQD)	75 – 90 %	17	
3. ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	0,06 – 0,2 m 0,2 – 0,6 m	8 έως 10	
4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ			
4.1. ΜΗΚΟΣ	1 - 3 m	4	
4.2. ΑΝΟΙΓΜΑ	0,1 – 1 mm 1 - 5 mm	1 έως 4	
4.3. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	Λείες	1	
4.4. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	Κενές	6	
4.5. ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ	Ελαφρά Μέτρια	3 έως 6	
5. ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	Στεγνό	15	
	Τιμή RMR	62 έως 70	
6. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΗΡΑΓΓΕΣ	Μέτριος	-5	
ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ (Διορθωμένο RMR)		57 - 65	

Πίνακας 3.12: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ2.

ΘΕΣΗ :	Γεώτρηση Γ2		
ΒΑΘΟΣ:	27,00 m – 37,80 m		
ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜ:	+22,80 m- +12,00 m		
ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ:	Ασβεστόλιθος Ανώτερου Μαρμάρου		
Παράμετροι ταξινόμησης	Τιμή	Βαθμολογία	
1. ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΓΟΥΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	50 - 100 MPa	7	
2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΥ (RQD)	75 – 90 % 90 – 100 %	17 έως 20	
3. ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	0,06 – 0,2 m 0,2 – 0,6 m	8 έως 10	
4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ			
4.1. ΜΗΚΟΣ	1 - 3 m	4	
4.2. ΑΝΟΙΓΜΑ	1 - 5 mm	1	
4.3. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	Λείες Ελαφρά Τραχείες	1 έως 3	
4.4. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	Κενές Αργίλικό υλικό <5mm	2 έως 6	
4.5. ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ	Ελαφρά Μέτρια	3 έως 6	
5. ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	Στεγνό	15	
	Τιμή RMR	58 έως 72	
6. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΗΡΑΓΓΕΣ	Μέτριος	-5	
ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ (Διορθωμένο RMR)			53 - 67

Πίνακας 3.13: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ3.

ΘΕΣΗ :	Γεώτρηση Γ3		
ΒΑΘΟΣ:	28,20 m – 38,50 m		
ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜ:	+22,30 m- +12,00 m		
ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ:	Ασβεστόλιθος Ανώτερου Μαρμάρου		
Παράμετροι ταξινόμησης	Τιμή	Βαθμολογία	
1. ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΓΟΥΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	50 - 100 MPa	7	
2. ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΥ (RQD)	75 – 90 %	17	
3. ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	0,06 – 0,2 m 0,2 – 0,6 m	8 έως 10	
4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ			
4.1. ΜΗΚΟΣ	1 - 3 m	4	
4.2. ΑΝΟΙΓΜΑ	1 - 5 mm	1	
4.3. ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	Λείες	1	

4.4. ΥΛΙΚΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	Κενές Ασβεστίτης <5mm	4 έως 6
4.5. ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ	Ελαφρά Μέτρια	3 έως 6
5. ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	Στεγνό	15
Τιμή RMR		60 έως 67
6. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΛΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΗΡΑΓΓΕΣ	Μέτριος	-5
ΤΕΛΙΚΗ ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ (Διορθωμένο RMR)		54 - 62

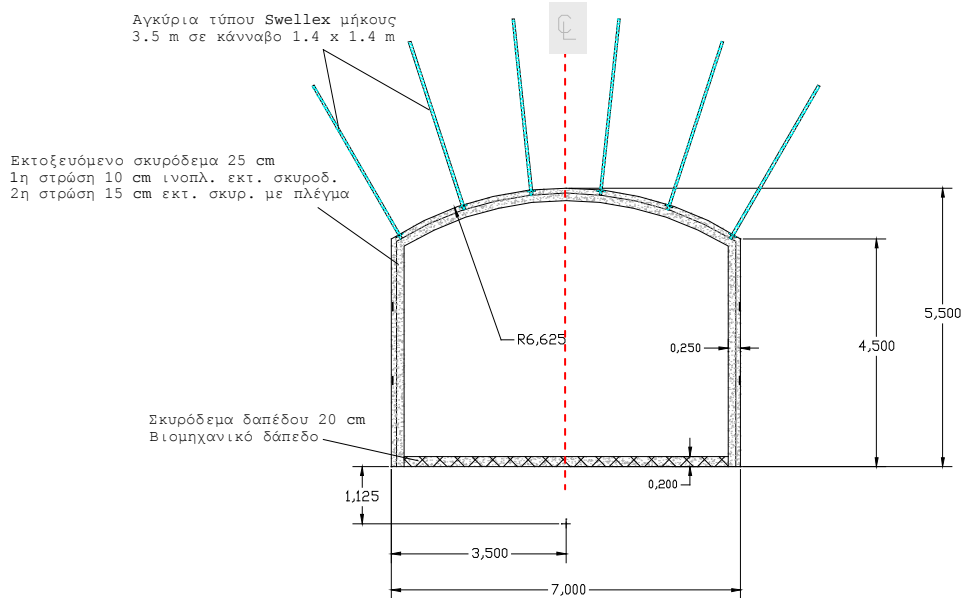
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ταξινόμηση κατά RMR για τον ασβεστόλιθο του «Ανώτερου Μαρμάρου» δίνει τιμές που κυμαίνονται από 53 έως 67 περίπου. Αυτό σημαίνει ότι η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από μέτριας έως καλής ποιότητας. Ως τιμή, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό, λαμβάνεται η τιμή RMR=60. Σύμφωνα με την τιμή αυτή προκύπτουν τα κάτωθι:

ΤΙΜΗ ΚΑΤΑ RMR	60
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	III
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΜΕΤΡΙΑ
ΓΩΝΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ φ (°)	25 - 35
ΣΥΝΟΧΗ c (kN/m ²)	200 – 300

3.7. Υποστήριξη του υπόγειου χώρου

Η υποστήριξη της οροφής του υπόγειου χώρου έγινε με τη χρήση κοχλιών Swellex 200 kN, μήκους 3,5 m σε κάνναβο 1,4 m x 1,4 m, παράλληλα με την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνολικού πάχους 25 cm σε δύο φάσεις. Η πρώτη, περιελάμβανε στρώση 10 cm ινοπλισμένου (με περιεκτικότητα ινών 30 kg/m³) εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ενώ η δεύτερη, τελική, στρώση αποτελούνταν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 15 cm, μαζί με μεταλλικό πλέγμα (Σχήμα 3.35).

Όλες οι στρώσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος περιείχαν ειδικά πρόσμικτα (πυριτική παιπάλη τύπου ELKEM Microsilica 920D σε αναλογία 6% κ.β.) για τη στεγανοποίηση του χώρου, σύμφωνα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές (συντ. υδροπερατότητας 10⁻⁹ m/s). Στις παρειές του χώρου, καθώς και στους στύλους, δεν πραγματοποιήθηκαν κοχλιώσεις.



Σχήμα 3.35: Σκαρίφημα των μέτρων υποστήριξης των υπογείων θαλάμων.

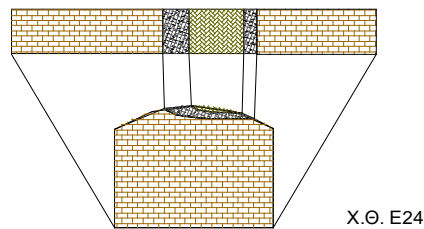
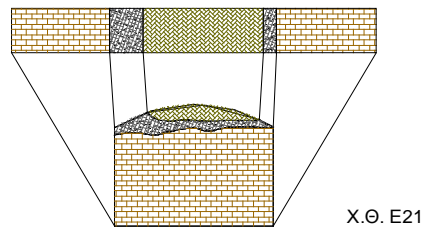
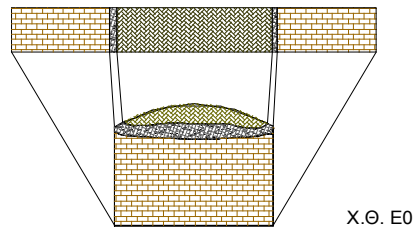
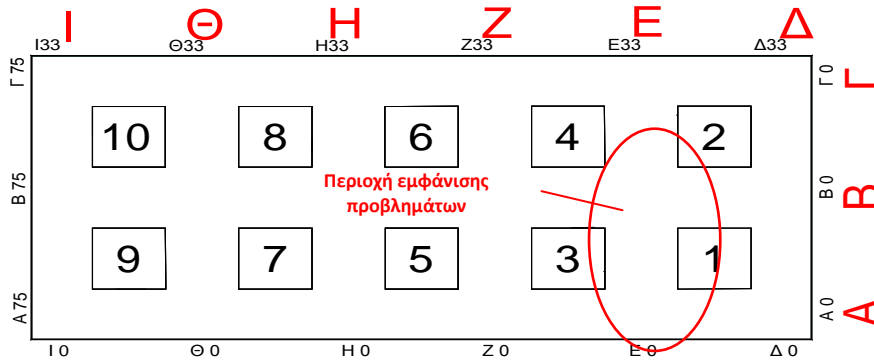
3.8. Γεωλογικά – Γεωτεχνικά προβλήματα

Κατά το στάδιο ολοκλήρωσης της σήραγγας προσπέλασης (Εικόνα 3.5), παρατηρήθηκε μια σημαντική επιδείνωση της ποιότητας του ασβεστολιθικού πετρώματος. Μάλιστα, στη θέση συναρμογής της με τον υπόγειο θάλαμο του συγκροτήματος, συναντήθηκε ρήγμα με διεύθυνση περίπου Α-Δ, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικής υπερεκσκαφής.



Εικόνα 3.5: Συνάντηση σήραγγας προσπέλασης με υπόγειο χώρο (Μπενάρδος, 2009)

Σταδιακά αποκαλύφθηκε διείσδυση του στρώματος του γραφικού σχιστόλιθου στο επίπεδο κατασκευής του έργου, και πιο συγκεκριμένα στη στέψη και σε μικρό τμήμα της παρειάς του θαλάμου (επίπεδο +16,5 m έως +17,0 m περίπου). Η προβληματική ζώνη εκτείνονταν ΒΒΑ της περιοχής εισόδου σε μια έκταση 25 m, η οποία σταδιακά αποσφηνώνεται, όπως χαρακτηριστικά παρατηρείται στο Σχήμα 3.36, όπου δίνονται οι γεωλογικές χαρτογραφήσεις του μετώπου (Μπενάρδος, 2009).



- Καστανή άργιλος και χάλικες
- Πρασινόσχιστόλιθος - Φυλλίτης με ενδιάστρωσεις ασβεστόλιθου τεκτ. καλύμματος
- Γραφικός σχιστόλιθος με χαλαζία του τεκτονικού καλύμματος
- Εναλλαγές σχιστολίθου - ασβεστολίθου
- Ασβεστόλιθος - Ανώτερο Μάρμαρο
- Ασβεστόλιθος διατημένος με ενδιάστρωσεις αργίλου
- Επίπτευση τεκτονικού καλύμματος στο Ανώτερο Μάρμαρο

Σχήμα 3.36: Γεωλογικές χαρτογραφήσεις του μετώπου εκσκαφής στις θέσεις E0, E21 και E24. (Μπενάρδος, 2009)

Με βάση τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά GSI, οι τιμές των σχηματισμών στις συγκεκριμένες θέσεις (E0, E21 και E24) ήταν: $GSI_{ασβ}=62-68$, $GSI_{τεκτ.επαφ}=52-57$ και $GSI_{γραφ.σχιστ.}=25-32$. Η εμφάνιση του στρώματος του γραφιτικού σχιστόλιθου σε χαμηλότερα επίπεδα από τα αναμενόμενα, δημιούργησε ένα σοβαρό προβληματισμό για την ευστάθεια των στύλων του υπόγειου συγκροτήματος. Αν και οι συντελεστές ασφαλείας σχεδιασμού τους ήταν αρκετά υψηλοί, η ύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών και γεωτεχνικών σχηματισμών θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας των στύλων (Iannacchione, 1999). Ακόμα, η πιθανή ύπαρξη επιπέδου αδυναμίας στη μάζα τους, στη διεπιφάνεια επαφής μεταξύ των σχηματισμών, θα επιδρούσε αρνητικά στην ευστάθειά τους.

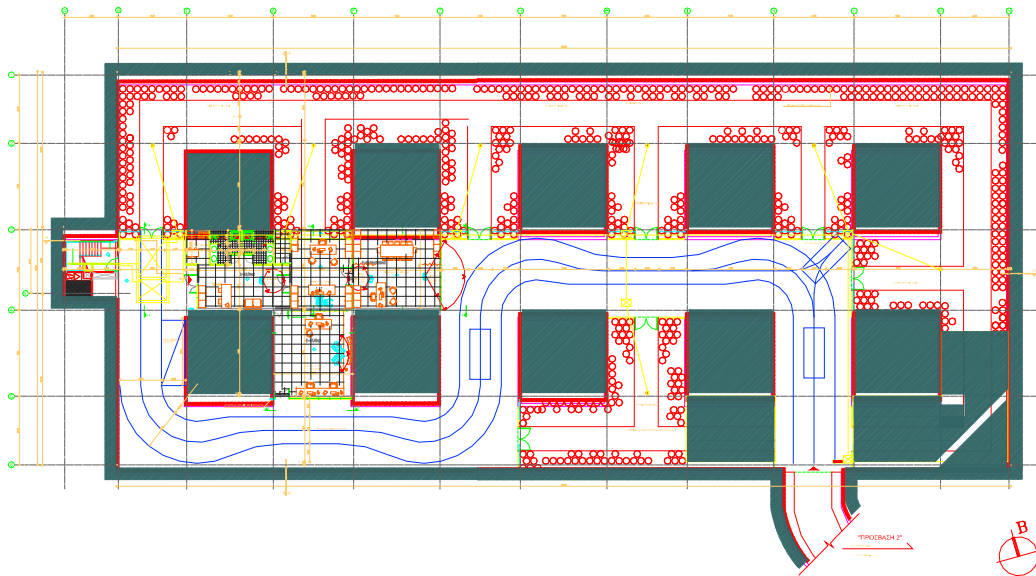
Η εμφάνιση του γραφιτικού σχιστολίθου στην οροφή του χώρου είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αστοχιών μικρής κλίμακας, οι οποίες εκδηλώθηκαν κυρίως με καταπτώσεις οροφής και δημιουργίας υπερεκσκαφών. Το ζήτημα ήταν σημαντικό διότι η περιοχή εκδήλωσής τους ήταν στο σημείο εισόδου του υπόγειου χώρου με προφανείς αρνητικές συνέπειες. Για την άμεση αντιμετώπιση των αστοχιών που εκδηλώθηκαν στην οροφή του συγκροτήματος επιλέχθηκε η χρήση πρόσθετων αγκυρώσεων σε κάναβο 1,4 m x 1,4 m. Οι νέες αγκυρώσεις έγιναν με τη χρήση αυτοδιατρούμενων αγκυρών (self drilling), μήκους 8 m, τα οποία τοποθετήθηκαν σε πεσοειδή διάταξη και στις ενδιάμεσες θέσεις των αρχικών αγκυρώσεων Swellex.

Η συγκεκριμένη παρέμβαση στην προβληματική περιοχή, σε συνδυασμό με επιπρόσθετη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, λειτούργησε ικανοποιητικά με αποτέλεσμα την εξασφάλιση της οροφής του συγκροτήματος και τον έλεγχο των αστοχιών.

Για την προετοιμασία έναντι κάθε πιθανού ενδεχομένου, διερευνήθηκε και η εφαρμογή πρόσθετων μέτρων ενίσχυσης των στύλων, με τη χρήση προεντεταμένων κοχλιώσεων μέσα στη μάζα τους. Η εκτέλεση του συγκεκριμένου μέτρου θα δημιουργούσε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης στους στύλους και συνεπώς θα βελτιώνε τη φέρουσα ικανότητά τους. Παράλληλα, οι κοχλιώσεις θα ήταν σε θέση να βελτιώσουν τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών ή επιπέδου στρώσεων που βρίσκονται μέσα στη μάζα των στύλων και επομένως να βελτιώσουν περαιτέρω την συμπεριφορά του.

Η ανάπτυξη του χώρου συνεχίστηκε με την διάνοιξη του θαλάμου Α, καθώς και των υπόλοιπων εγκαρσίων, δημιουργώντας τους στύλους του συγκροτήματος. Τέλος, επιλέχθηκε να υπάρξει μια συντηρητική αντιμετώπιση στην περιοχή της εισόδου και να μην πραγματοποιηθεί η διάνοιξη των περιμετρικών θαλάμων του χώρου εκατέρωθεν του σημείου εισόδου, δημιουργώντας μια μορφή επιμήκους στύλου (rib pillar). Με τον τρόπο αυτό επετεύχθη η καλύτερη προστασία της εισόδου, μιας κρίσιμης περιοχής για την ασφάλεια του έργου, τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο

και κατά τη φάση λειτουργίας. Η τελική μορφή του έργου μαζί με τα σχέδια της λειτουργικής του μορφής δίνονται στο Σχήμα 3.37.



Σχήμα 3.37: Άποψη της τελικής μορφής του χώρου όπως κατασκευάστηκε.

Στο έργο έχουν τοποθετηθεί μια σειρά από γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης της συμπεριφοράς της υπόγειας εκσκαφής. Αυτά αποτελούνται από δύο μηκυσιόμετρα τριών ράβδων (1,5 m, 3 m και 5 m) τα οποία είναι τοποθετημένα στο κέντρο των θαλάμων, δύο μηκυσιόμετρα που έχουν τοποθετηθεί στην επιφάνεια για την καταγραφή πιθανών παραμορφώσεων και καθιζήσεων, καθώς επίσης και κελιά φορτίου κοχλιώσεων και κυψέλη φορτίου σε θέση στύλου του συγκροτήματος. Μέχρι σήμερα δεν έχει υπάρξει καμία ένδειξη για εμφάνιση αστοχίας στους στύλους ή στην οροφή του έργου. Επίσης, με βάση τα στοιχεία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μετά το πέρας της κατασκευής, οι συγκλίσεις εντός του χώρου, όπως επίσης και οι επιφανειακές καθιζήσεις είναι μηδενικές.

Κεφάλαιο_4: Χωρική ανάλυση γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου

4.1. Εισαγωγή

Η αβεβαιότητα των γεωλογικών σχηματισμών και οι επιπτώσεις που αυτή μπορεί να επιφέρει σε ένα υπόγειο έργο, αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Εκτός από την εκτενή γεωτεχνική έρευνα, η χωρική ανάλυση (spatial analysis) είναι ένας τρόπος πρόβλεψης των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών του πετρώματος και του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια χωρικής ανάλυσης των γεωτεχνικών δεδομένων στην περιοχή του υπόγειου χώρου του Λαυρίου, ώστε να παρουσιαστεί ο χώρος και η κατάσταση της βραχομάζας στα ενδιάμεσα σημεία των γεωτρήσεων. Γίνεται λοιπόν μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου και ανάλυση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών όπως αυτά προέκυψαν μέσα από την ανάλυση.

Ουσιαστικά επιχειρείται η ενδεδειγμένη χαρτογράφηση των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής του έργου, η αξιολόγηση τους και ο εντοπισμός πιθανών προβληματικών περιοχών για το έργο. Το τελευταίο μπορεί και να αποτελέσει και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των χωρικών μοντελοποιήσεων (validation) μέσω της αντιπαραβολής των στοιχείων της ανάλυσης με αυτά που πραγματικά συναντήθηκαν.

Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εξαγωγή στατιστικών δεδομένων για τον εντοπισμό των ασθενέστερων ζωνών του υπόγειου χώρου.

4.2. Δεδομένα-αναλύσεις αποτελεσμάτων

4.2.1. Μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου

Τα γεωτρητικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και αναλυθεί στα πλαίσια της περιοχής εξέτασης, εμπεριέχουν πολλές πληροφορίες για μεμονωμένα σημεία πάνω στην περιοχή.

Σκοπός αυτού του σταδίου της μεθοδολογίας είναι η χρήση αυτών των δεδομένων, ώστε βάση μόνο των ερευνητικών γεωτρήσεων και γεωγραφικών δεδομένων της περιοχής να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο του υπόγειου χώρου, το οποίο να αποδίδει με μεγάλη ακρίβεια το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και να προσδίδει τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που έχουμε ορίσει στα δομικά στοιχεία (blocks) που συγκροτούν το μοντέλο.

4.2.2. Λογισμικό Surpac

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του μοντέλου είναι το Gemcom Surpac, ένα αρκετά διαδεδομένο πακέτο λογισμικού χρησιμοποιούμενο ευρέως για γεωλογικές και μεταλλευτικές εφαρμογές, σε ερευνητικό και βιομηχανικό επίπεδο.

Το λογισμικό είναι βασισμένο στην υπόθεση ότι αφού ο πραγματικός κόσμος είναι τρισδιάστατος τότε και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν για να τον αναπαραστήσουν θα πρέπει να είναι τρισδιάστατα.

Το Surpac επιτυγχάνει ακριβώς αυτό χρησιμοποιώντας, σε όλα τα modules, τα string files. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύουν τα δεδομένα σε μορφή strings (αλληλουχίες). Ένα string file περιέχει τις συντεταγμένες X, Y, Z των σημείων, διασυνδεδεμένες με ένα κοινό δείκτη, που ονομάζεται string number. Η συνθήκη για τις συντεταγμένες που χρησιμοποιεί το Surpac, είναι: Y = η διεύθυνση του Βορρά (Nothing), X = η διεύθυνση της Ανατολής (Easting).

Μπορεί όμως να αποθηκεύσει και επιπλέον πληροφορίες για κάθε σημείο όπως για παράδειγμα την περιεκτικότητα, στα περιγραφικά πεδία (description fields), που ακολουθούν τις σειρές των συντεταγμένων.

Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αναπαρασταθούν οποιαδήποτε χαρακτηριστικά του χώρου όπως τοπογραφικά σχέδια και γεωλογικά όρια. Τα βασικά εργαλεία (modules) για τη δημιουργία και την επεξεργασία των string files στο Surpac είναι:

- **Graphics:** εργαλείο τρισδιάστατης σχεδίασης γραφικών που ενσωματώνει την δυνατότητα φωτοσκίασης (rendering) για την δημιουργία στερεών αντικειμένων. Περιλαμβάνει επίσης την δυνατότητα ψηφιοποίησης δεδομένων (digitizing interface) καθώς και εργαλεία CAD για τον σχεδιασμό υπόγειων εκσκαφών.
- **String Tools:** συλλογή εργαλείων για την διαχείριση των string files. Περιλαμβάνει διασύνδεση (interface) για αρχεία CAD, DXF.
- **DTM Tools:** εργαλείο δημιουργίας ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Digital Terrain Models) δηλαδή τριγωνοποιημένα δίκτυα σημείων. Εδώ δίνεται η δυνατότητα για την δημιουργία τομών και για τον υπολογισμό όγκων.
- **Plotting:** χαρτογραφικό εργαλείο για την εκτύπωση δεδομένων από τα υπόλοιπα εργαλεία.
- **Grid Tools:** εργαλείο για την αποθήκευση, διαχείριση και εξαγωγή δεδομένων που είναι διατεταγμένα σε κανονικό κάρναβο.
- **Block model:** εργαλείο για την μοντελοποίηση διάφορων ιδιοτήτων του χώρου που έχουν οριστεί από τον χρήστη (π.χ. κατανομή περιεκτικότητας κοιτάσματος, δείκτης RQD, γεωλογική δομή).

- **Geostatistics:** εργαλείο για την επεξεργασία των δεδομένων με κλασική στατιστική ή με γεωστατιστική.

Το Surpac επίσης, για την καλύτερη διαχείριση πολλών δεδομένων όπως τα αρχεία γεωτρήσεων, δίνει την δυνατότητα δημιουργίας βάσης δεδομένων μέσω του module Geological Database. Η βάση αυτή μπορεί να είναι συμβατή με άλλες εξωτερικές βάσεις δεδομένων όπως η Microsoft Access, η Paradox, ή η Dbase.

Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα που έχει αποθηκεύσει στη βάση σε άλλα modules του προγράμματος όπως το Geostatistics για τη δημιουργία βαριογραμμάτων και στοχαστικών μοντέλων (Μενεγάκη, 2010).

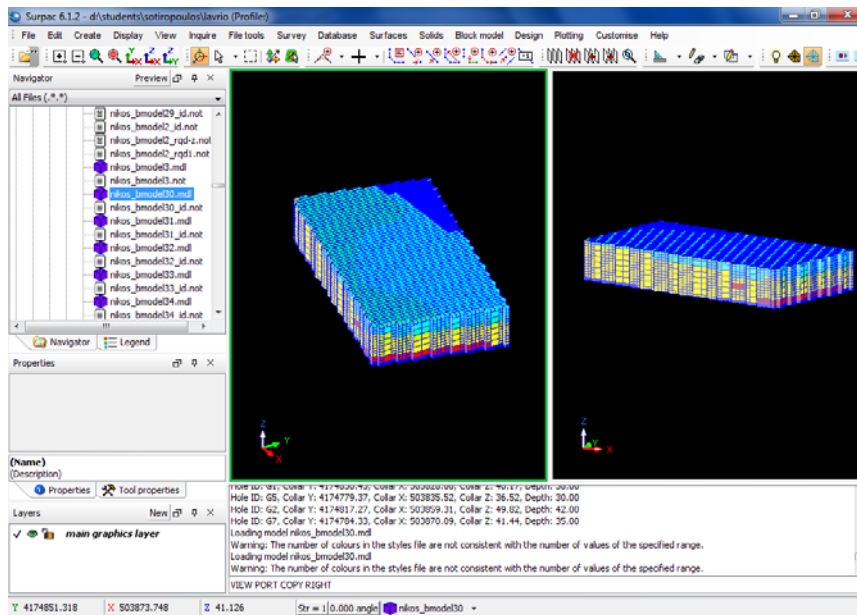
4.2.3. Λειτουργία Block Modelling

Το block model, είναι μια βάση δεδομένων που αναπτύσσεται στο χώρο και αναφέρεται σε συγκεκριμένες ιδιότητές του. Χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των ιδιοτήτων σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του χώρου (volume), οι οποίες για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα σχετίζονται με τις παραμέτρους ανάλυσης που έχουν οριστεί νωρίτερα (Εικόνα 4.1).

Τα δεδομένα στο block model αναφέρονται σε διακριτά στοιχεία όγκου τα οποία ονομάζονται blocks. Αυτά είναι παραλληλεπίπεδα τμήματα του προς μοντελοποίηση χώρου που δημιουργούνται από τον χρήστη.

Στο κέντρο κάθε block αποδίδεται, με βάση τα δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και με εφαρμογή μεθόδων χωρικής παρεμβολής (π.χ. μέθοδος inverse distance weighting ή kriging) μια τιμή περιεκτικότητας, η οποία αντιπροσωπεύει όλο το block.

Επίσης δίνεται η δυνατότητα, σε κάθε στάδιο δημιουργίας του μοντέλου, να εφαρμοστούν περιορισμοί. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να είναι επίπεδες επιφάνειες, γεωμορφολογικά ανάγλυφα, κλειστά strings, οι οποίοι περιορίζουν τον αριθμό των blocks ώστε η μοντελοποίηση του χώρου να είναι πιο αποτελεσματική (Μενεγάκη, 2010).



Εικόνα 4.1: Το τυπικό περιβάλλον λειτουργίας του Surpac για την αξιολόγηση των γεωτεχνικών δεδομένων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α

4.2.4. Εισαγωγή γεωτρητικών δεδομένων στο λογισμικό Surpac

Το πρώτο ουσιαστικό στάδιο της μοντελοποίησης, παρόλο που δεν εκτελείται σε περιβάλλον Surpac, είναι η σωστή ψηφιοποίηση των μητρώων των γεωτρήσεων.

Η εισαγωγή γεωτρητικών δεδομένων στο Surpac περιλαμβάνει τις παρακάτω 4 μεταβλητές ιδιότητες του υπογείου χώρου συζευγμένες με μεταβλητές ταξινόμησής τους (όνομα γεώτρησης – hole_id, αύξων αριθμός στοιχείου στη βάση δεδομένων – sample_id, από και έως βάθος – depth_from depth_to):

1. RQD (ασυνέχειες και ο βαθμός ρωγμάτωσης των σχηματισμών)
2. sc (μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του πετρώματος)
3. sc με Is (μονοαξονική αντοχή σε θλίψη σε συνδυασμό με σημειακή φόρτιση)
4. E (μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος)
5. geol (γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος των γεωτρήσεων)

Ωστόσο μέσα στη βάση δεδομένων εισήλθαν και οι παράμετροι υγρασίας του δείγματος (w), ο λόγος του Poisson (v), η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ_t), οι οποίοι δεν εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Αυτό έγινε λόγω έλλειψης στοιχείων από τις γεωτρήσεις, καθώς επίσης και ότι οι παραπάνω παράμετροι δεν δίνουν σημαντικά στοιχεία σχετικά με την ποιότητα της βραχομάζας στο σύνολο της.

Συνεχείς τιμές κατά μήκος των δειγμάτων υπήρχαν μόνο για τον δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD).

Για να υπάρχουν περισσότερες τιμές στην μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, ώστε να προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή των στύλων και του υπόγειου χώρου, έγινε προσαρμογή με τον δείκτη σημειακής φόρτισης. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο: $UCS \approx 24 * I_s$

Στην εικόνα 4.2, φαίνεται η εισαγωγή των γεωτρητικών δεδομένων σε υπολογιστικό φύλλο xls. Ενδεικτικά φαίνεται ένα τμήμα της γεώτρησης Γ1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
2	G1	1	17,60	18,10	54	26,16	47,51	7816	0,228		1,905	prs-fyl
3	G1	2	18,10	18,30	54							prs-fyl
4	G1	3	18,30	18,50	32							prs-fyl
5	G1	4	18,50	18,70	32		12,38			0,516		prs-fyl
6	G1	5	18,70	19,50	32							prs-fyl
7	G1	6	19,50	19,70	87	25,45	59,38	8852	0,276			prs-fyl
8	G1	7	19,70	20,20	87							prs-fyl
9	G1	8	20,20	20,50	87		31,75			1,323		prs-fyl
10	G1	9	20,50	21,30	72							prs-fyl
11	G1	10	21,30	21,50	72	26,65	56,73	8807	0,294			prs-fyl
12	G1	11	21,50	21,80	72							prs-fyl
13	G1	12	21,80	22,00	72		59,26			2,469		prs-fyl
14	G1	13	22,00	22,30	72							prs-fyl
15	G1	14	22,30	22,80	100							up-marb
16	G1	15	22,80	22,90	100	26,08					4,475	up-marb
17	G1	16	22,90	23,50	100							up-marb
18	G1	17	23,50	23,70	80		84,38			3,516		up-marb
19	G1	18	23,70	24,40	80							up-marb
20	G1	19	24,40	24,60	80	26,38	74,86	15042	0,300			up-marb
21	G1	20	24,60	24,90	80							up-marb
22	G1	21	24,90	25,10	80		96,48			4,020		up-marb
23	G1	22	25,10	26,00	0							up-marb
24	G1	23	26,00	26,60	80	25,29	88,77	15513	0,269	3,083	5,205	up-marb
25	G1	24	26,60	27,30	80							up-marb
26	G1	25	27,30	27,90	95		70,32			2,930		up-marb
27	G1	26	27,90	28,50	95							up-marb
28	G1	27	28,50	29,50	90							up-marb
29	G1	28	29,50	30,60	90		77,52			3,230		up-marb
30	G1	29	30,60	31,40	98							up-marb

Εικόνα 4.2: Εισαγωγή γεωτρητικών δεδομένων σε φύλλο xls από τα μητρώα των γεωτρήσεων

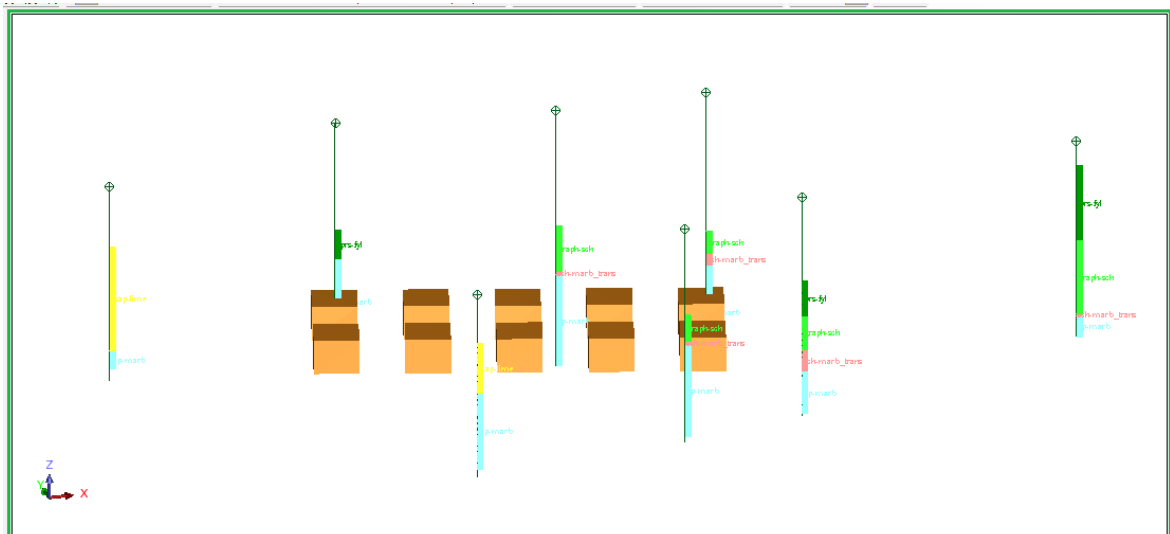
4.2.5. Εισαγωγή χωρικών και γεωγραφικών δεδομένων στο λογισμικό Surpac

Πέρα από την εισαγωγή των συντεταγμένων των γεωτρήσεων (Πίνακας 4.1), απαιτείται να οριστεί το collar (y,x,z) και το depth ώστε να αναγνωρίσει τα δεδομένα το πρόγραμμα (Surpac). Επίσης έγινε και ψηφιοποίηση του τοπογραφικού υποβάθρου, παρά την μικρή υψομετρική διαφοροποίηση της επιφάνειας στην περιοχή.

Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά στοιχεία γεωτρήσεων για τη εισαγωγή τους στο Surpac

Hole_id	Collar y	Collar x	Collar z	Depth
G8	4174803.21	503939.01	41.18	32.00
G7	4174784.33	503870.09	41.44	35.00
G6	4174786.33	503889.36	43.82	36.00
G5	4174779.37	503835.52	36.52	30.00
G4	4174830.45	503792.07	39.83	32.00
G3	4174816.00	503882.85	50.49	45.00
G2	4174817.27	503859.31	49.82	42.00
G1	4174830.45	503838.00	46.17	38.00

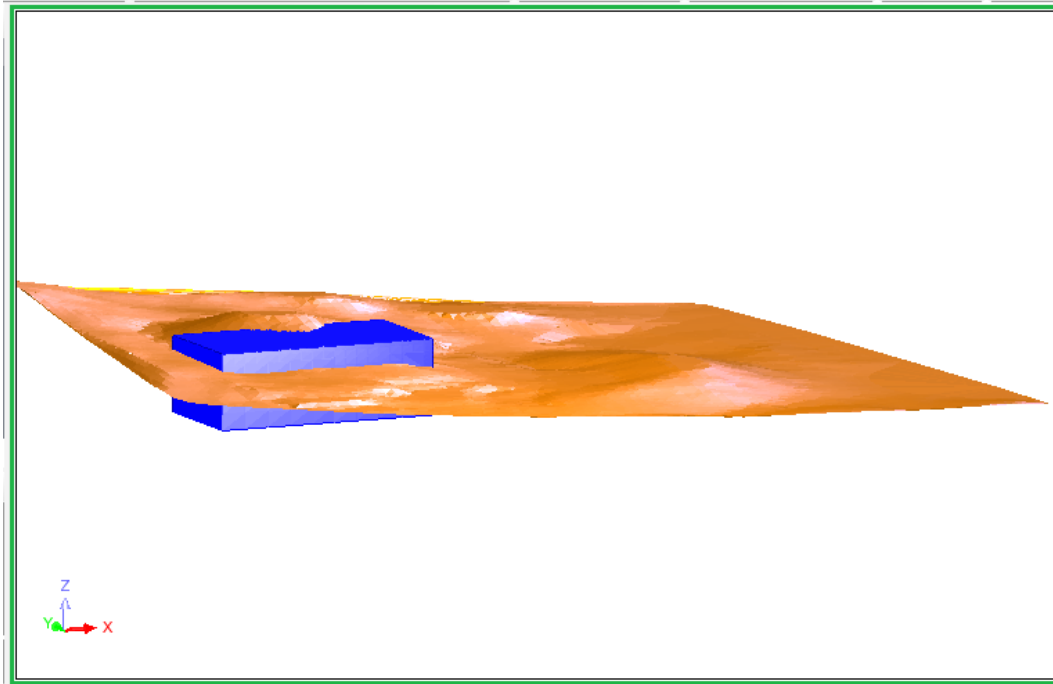
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως ο γεωγραφικός προσδιορισμός των ορίων της περιοχής εξέτασης και των θέσεων των γεωτρήσεων μέσα σε αυτήν έγινε κατά ΕΓΣΑ 87, δηλαδή του ελληνικού γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Στην εικόνα 4.3 φαίνονται οι στύλοι του υπόγειου χώρου και οι γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσα και γύρω από αυτόν, καθώς και οι γεωλογικοί σχηματισμοί.



Εικόνα 4.3: Στύλοι υπόγειου χώρου, γεωτρήσεις και γεωλογικοί σχηματισμοί

4.2.6. Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων ανάλυσης (Block Models)

Για τη αποτελεσματική παρουσίαση του χώρου, αρχικά δημιουργήθηκε ένα μεγάλο σε έκταση block model (μπλε) ώστε να δείχνει την οπτική απεικόνιση του εξεταζόμενου χώρου σε μεγάλο εύρος, μέσα στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (dtm) που σχεδιάστηκε (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Block model και τοπογραφικό ανάγλυφο περιοχής εξέτασης

Με βάση έναν κάρναβο 8 γεωτρήσεων περιορισμένης έκτασης, δημιουργήθηκε ένα «μεγάλο» block model το οποίο αναφέρεται στην ευρύτερη περιοχή εξέτασης.

Προκειμένου να δημιουργηθεί το block model έγιναν τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία του μοντέλου έχοντας ανοιχτή την βάση δεδομένων που κατασκευάστηκε..
2. Ορισμός των στοιχείων του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό εκτός από το μέγεθος των blocks χρειάζονται και οι συντεταγμένες της περιοχής τις οποίες τις παίρνουμε πλέον από το string file που έχουν δημιουργηθεί. Οι συντεταγμένες που παίρνει ο πίνακας δημιουργούν ένα όριο με βάση τις γεωτρήσεις. Στο στάδιο αυτό μπορούν να αλλάξουν οι συντεταγμένες και να εισαχθούν αυτές που ορίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος. Ορίζεται επίσης το μέγεθος των blocks που θα δημιουργηθούν.
3. Πατώντας apply εμφανίζεται ο πίνακας με τα στοιχεία του μοντέλου. Επιλογή του create model.
4. Ορίζονται οι παράμετροι για το εκάστοτε χαρακτηριστικό εξέτασης που εξετάζεται. Στην προκειμένη περίπτωση δημιουργούνται block models για rqd, sc με Is, e.

5. Επιλέγεται η μέθοδος δημιουργίας του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το Inverse Distance.
6. Ορίζεται το αρχείο από το οποίο θα πάρει τα δεδομένα. Το αρχείο αυτό είναι το string file που δημιουργείται από την βάση δεδομένων, το οποίο περιέχει τα δεδομένα της παραμέτρου που θα μοντελοποιηθεί.
7. Ορίζονται οι παράμετροι με βάση τις οποίες τα blocks που δημιουργούνται θα πάρουν τιμές. Οι παράμετροι αυτές δεν είναι σταθερές. Το Minimum και maximum number of samples ορίζει το πλήθος των γειτονικών γεωτρήσεων, που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της τιμής ενός block. Το maximum search radius ορίζει τη μέγιστη ακτίνα από την οποία θα μπορεί το μοντέλο να πάρει δεδομένα για να διαμορφώσει την τιμή ενός block. Αντίστοιχα, το maximum vertical search distance ορίζει το μέγιστο βάθος από το οποίο θα μπορεί το μοντέλο να πάρει δεδομένα για να διαμορφώσει την τιμή ενός block. Το anisotropy ratios ορίζεται με βάση στο σχήμα του ελλειψοειδούς που θα διαμορφωθεί για τη δημιουργία του μοντέλου.
8. Ορίζονται οι παράμετροι για την εφαρμογή της μεθόδου Inverse Distance, καθώς και το όνομα και τη μορφή του αρχείου που θα δημιουργηθεί.

Τα μοντέλα ανάλυσης που δημιουργήθηκαν με το λογισμικό Surpac δομούνται σύμφωνα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Blocks

Βασικό δομικό στοιχείο αποτελούν τα blocks, τα οποία ορίζονται ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα σταθερών διαστάσεων 3x3x2m στους άξονες y, x και z αντίστοιχα. Η επιλογή των διαστάσεων αυτών έγινε μετά από δοκιμές μοντελοποίησης για διάφορα μεγέθη blocks.

Η κάθετη διάσταση από την αρχή ορίστηκε ως μικρότερη των υπολοίπων δεδομένου του μικρού συνολικού ύψους του υπόγειου χώρου 5,5 m έναντι 75m x 33m του μήκους και του πλάτους αυτού, ακόμα και πριν την εφαρμογή χωρικών περιορισμών.

Τα blocks αυτά λαμβάνουν τιμές για τις τέσσερις παραμέτρους που θα εξεταστούν συμψηφίζοντας τα δεδομένα κοντινών τους γεωτρήσεων.

Απόδοση ιδιοτήτων στα blocks

Για την απόδοση ιδιοτήτων στα block model χρησιμοποιείται η μέθοδος χωρικής παρεμβολής inverse distance weighting (IDW). Πρόκειται για μία μέθοδο παρεμβολής πολυμεταβλητών (multivariate interpolation), δηλαδή μία διαδικασία κατά την οποία προσδίδονται τιμές σε άγνωστα σημεία (blocks) χρησιμοποιώντας τιμές από ένα σύνολο γνωστών σημείων διεσπαρμένων στον χώρο (γεωτρητικά

δεδομένα). Οι τιμές που προσδίδονται στα άγνωστα σημεία αποτελούν σταθμισμένα μέσα των γνωστών τιμών των ιδιοτήτων από τις γειτονικές σε αυτά γεωτρήσεις.

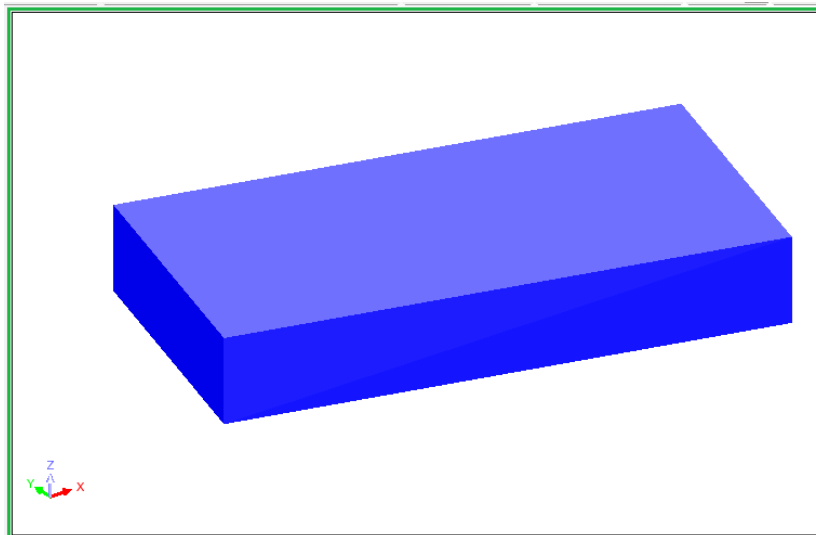
Με εφαρμογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής inverse distance weighting, τα γεωτρητικά δεδομένα των γεωτρήσεων προσδίδουν στο κέντρο κάθε block τιμή για τις κάθε μία από τις 4 μεταβλητές, ορίζοντας τις ιδιότητες του χώρου για τον όγκο του κάθε block.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου έγινε αφενός μεν γιατί το πλήθος των στοιχείων δεν επέτρεπε την χρήση γεωστατιστικής (μέθοδος kriging) και αφετέρου γιατί η IDW είναι μια αρκετά καλή και ευρέως διαδεδομένη μέθοδος παρεμβολής, που χρησιμοποιείται με καλά αποτελέσματα (Lam, 1983).

Ορισμός χωρικών περιορισμών (constraints)

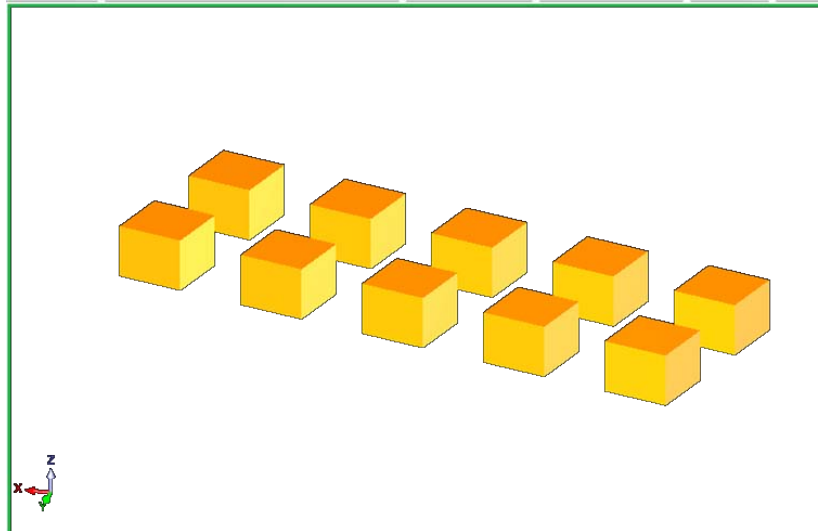
Τα όρια που θέτονται μέσω χωρικών περιορισμών στο αρχικά ακατέργαστο σύνολο από blocks που δημιουργείται από το σύστημα ορίζουν την περιοχή στην οποία θα περιοριστεί η ανάλυση. Οι τρεις βασικοί χωρικοί περιορισμοί που επιλέχθηκαν είναι:

1. Η δημιουργία ενός ευρύτερου χώρου (bound), σε σχέση με τον υπόγειο χώρο, ώστε να εξεταστούν οι συνθήκες γύρω από αυτόν (Εικόνα 4.5). Οι νέες διαστάσεις του εξεταζόμενου χώρου είναι (13,5m x 85m x 43m).



Εικόνα 4.5: Ευρύτερη περιοχή εξέτασης υπόγειου χώρου (bound)

2. Οι στύλοι του υπόγειου χώρου (pillars), ώστε να εντοπιστούν τα ακριβή γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των σημαντικών αυτών δομικών στοιχείων του χώρου. (εικόνα 4.6). Να σημειωθεί ότι ο χώρος έχει κατασκευαστεί διαφορετικά στην τελική του μορφή, λόγω γεωτεχνικών προβλημάτων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο τέλος του κεφαλαίου_3.



Εικόνα 4.6: Οι στύλοι του υπόγειου χώρου (pillars)

3. Τρεις υποπεριοχές (areas) ώστε να συγκριθούν και να προκύψουν τα κατάλληλα στατιστικά δεδομένα.

Πέρα από τους ανωτέρω χωρικούς περιορισμούς που ορίστηκαν αρχικά για να αποδώσουν την περιοχή εξέτασης, χρησιμοποιήθηκαν και άλλοι κυρίως συσχετιζόμενοι με τις ιδιότητες των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για συγκεκριμένες ανάγκες της εργασίας, ώστε να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση.

4.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για την ανάλυση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου δημιουργήθηκαν 31 block models με την μέθοδο inverse distance για τον εντοπισμό των τιμών των blocks στα σημεία ενδιάμεσα των γεωτρήσεων:

- ✓ 10 block models με την μονοαξονική αντοχής σε θλίψη των πετρωμάτων, σε συνδυασμό με τον δείκτη σημειακής φόρτισης (UCS με I_s).
- ✓ 10 block models με τον δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD),
- ✓ 10 block models με το μέτρο ελαστικότητας (E),
- ✓ 1 block model με την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (UCS)

Ο μεγάλος αριθμός των block models κυρίως σχετίζεται με την διερεύνηση για την επίτευξη καλύτερης αξιοπιστίας του μοντέλου και προέκυψε από το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί συνδυασμοί ώστε να προκύψει η καλύτερη δυνατή εξέταση – ανάλυση του υπόγειου χώρου.

Οι συνδυασμοί σχετίζονται με τον τρόπο αναζήτησης στο χώρο και την βαρύτητα που δίνει στην ανάλυση το εκάστοτε γεωμετρικό σχήμα. Τα γεωμετρικά σχήματα που

χρησιμοποιήθηκαν ήταν σφαίρα και έλλειψη (anisotropy ratios) ώστε να γίνεται ο οριζόντιος καθορισμός των παραμέτρων και της στρωματογραφίας των γεωλογικών σχηματισμών. Παρακάτω φαίνονται 2 από τα γεωμετρικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αναλύσεις. Στην εικόνα (α) φαίνεται αναζήτηση με σφαίρα, όπου λόγος των αξόνων είναι 1:1.

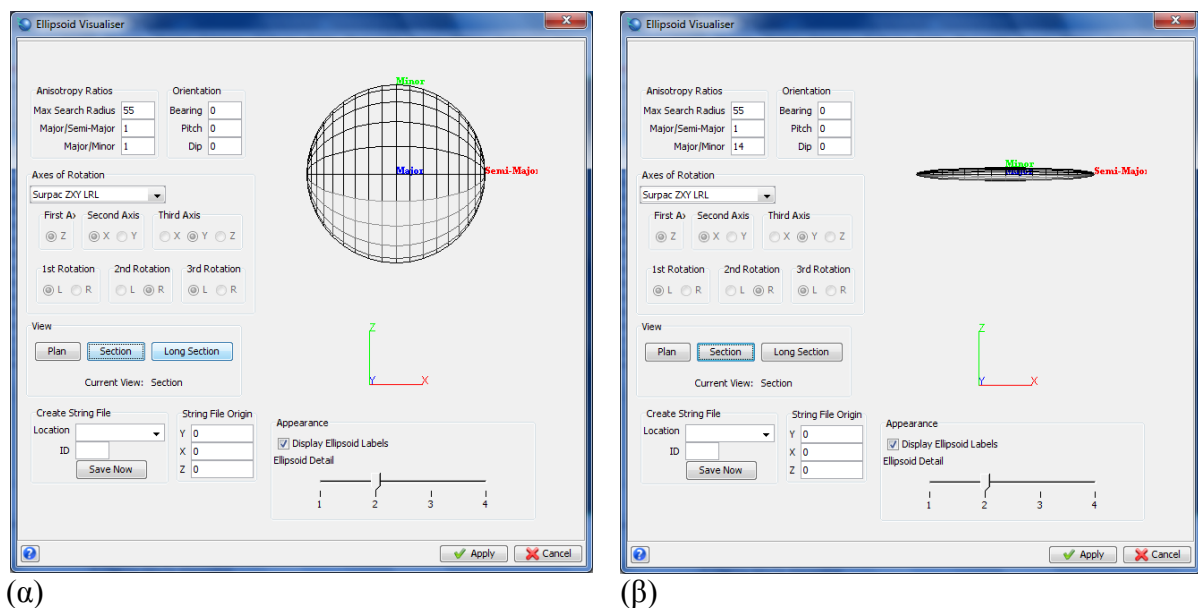
- Major/semi-major: 1
- Major/minor: 1

όπου γίνεται ομοιόμορφη αναζήτηση στο χώρο.

Ενώ στην εικόνα (β) γίνεται αναζήτηση με ελλειψοειδές με λόγο αξόνων 1:14.

- Major/semi-major: 1
- Major/minor: 14

όπου γίνεται αναζήτηση με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα καθ' ύψος, γιατί ο χώρος χωρίζεται σε αρκετά μικρότερα πάχη διερεύνησης.



Εικόνα 4.7: (α) Αναζήτηση τιμών στο χώρο με σφαίρα
(β) Αναζήτηση τιμών στο χώρο με έλλειψη

Επίσης σημαντικό για τις αναλύσεις και στην επιλογή των βέλτιστων είναι η εντολή στο πρόγραμμα για την πραγματοποίηση μιας παρεμβολής κατά μήκος της γεώτρησης, ώστε από τα σημειακά δεδομένα της δειγματοληψίας σε διάφορα βάθη να προσδιορισθούν τιμές σε όλο το μήκος της γεώτρησης. Για το σκοπό αυτό διαιρείται η γεώτρηση σε διαστήματα κάθε ένα από τα οποία, λαμβάνει μία συγκεκριμένη τιμή. Η πληροφορία που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή, αποθηκεύεται σε ένα αρχείο της μορφής .str (string file).

Από το μενού της βάσης δεδομένων επιλέγεται η εντολή Composite → Downhole. Ακολούθως δημιουργείται το string file, το οποίο θα πάρει τα δεδομένα της βάσης, επιλέγοντας ταυτόχρονα, τις παραμέτρους που χρησιμοποιηθούν.

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται ο πίνακας των αναλύσεων τόσο για το anisotropy ratios, όσο και για το composite downhole.

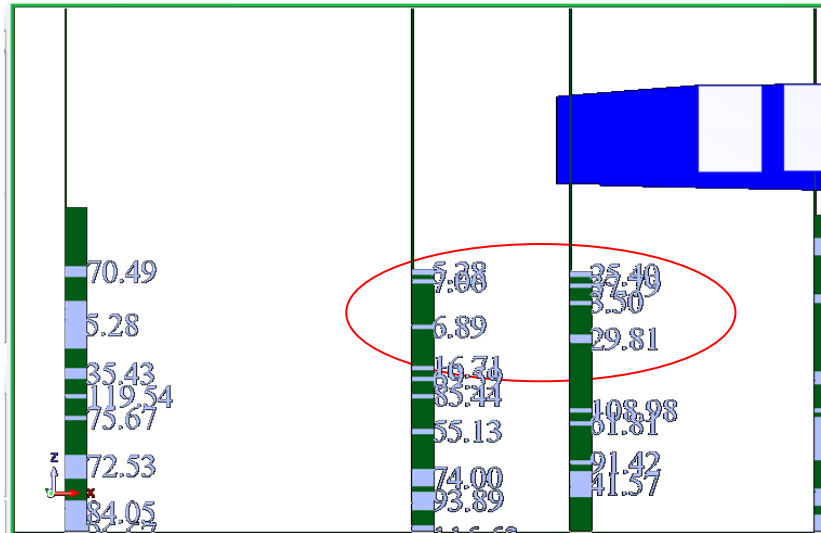
Πίνακας 4.2: Πίνακας αναλύσεων του block model

	0,75/25%	0,5/75%	0,5/50%	
1.Έλλειψη 1/14	✓	✓		(3,15,55)
2.Έλλειψη 1/25	✓	✓	✓	(3,15,55)
3.Σφαίρα		✓		(1,5,55)
4.Σφαίρα		✓		(3,15,55)
5.Έλλειψη 1/8			✓	(3,15,55)
6.Έλλειψη 1/14		✓		(3,15,35)
7.Σφαίρα		✓		(3,15,35)

Ενδεικτικά στη συνέχεια παρουσιάζεται block model για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (σε) όπου η αναζήτηση γίνεται με ελλειψοειδή αναζήτηση 1:14 και το composite downhole είναι 0,75/25% (μοντέλο 1 από πίνακα 4.2).

Το κριτήριο επιλογής του μοντέλου ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου, ώστε σε κάθε ανάλυση να γίνεται σωστός συσχετισμός των τιμών που υπάρχουν στα δείγματα των γεωτρήσεων με τον εκάστοτε χωρικό περιορισμό που έχει τεθεί.

Στην εικόνα 4.8 φαίνεται ότι κοντινές τιμές δεν έχουν συσχετιστεί για χωρικό περιορισμό του block model, με blocks 0-30MPa και δεν υπάρχει κάποιο block σε αυτά τα σημεία.



Εικόνα 4.8: Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου για UCS μεταξύ των γεωτρήσεων

4.3.1. Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν τελικά για τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (inverse distance) και το composite downhole για την ανάλυση του μοντέλου όσον αφορά την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη των πετρωμάτων που υπάρχουν στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου είναι:

Πίνακας 4.3: Δεδομένα αναλύσεων για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη

Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS	
Minimum number of samples: 3	maximum search radius: 55
Maximum number of samples: 15	maximum vertical search distance: 2
Bearing: 0	major / semi-major: 1
Plunge: 0	major / minor: 14
Dip: 0	Composite downhole – 0,5/75%

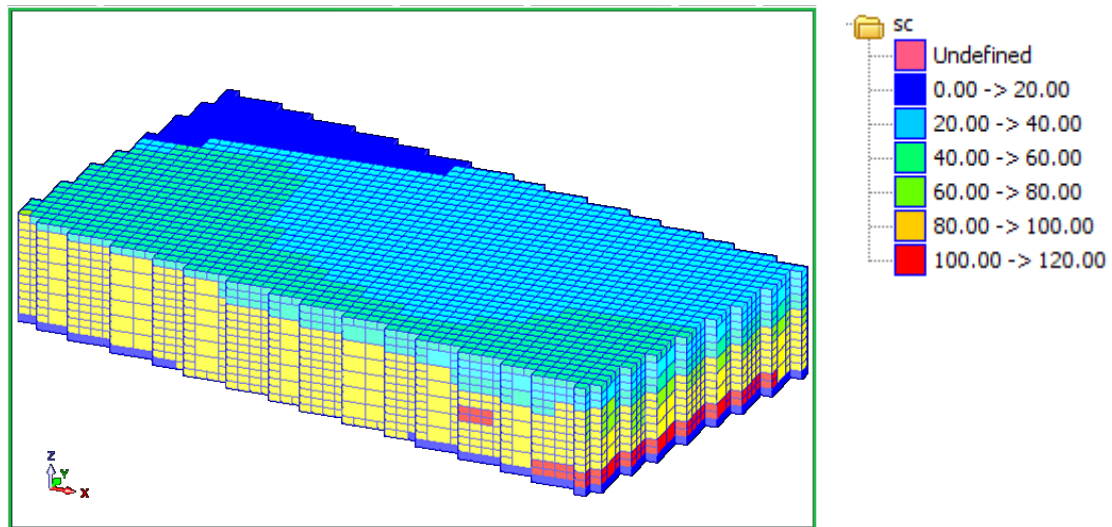
Η επιλογή των δεδομένων έγινε ώστε να γίνει ανάλυση σε όλες τις τιμές για UCS που υπάρχουν στις γεωτρήσεις. Ο αριθμός των δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις είναι 132 δείγματα, σε σύνολο δειγμάτων 325. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός των δειγμάτων επιλέχτηκε ώστε να γίνεται πιο σωστά η παρεμβολή των τιμών ανάμεσα στις γεωτρήσεις (interpolation). Αντίστοιχα η ακτίνα αναζήτησης επιλέχτηκε ώστε να μην μένει καμία γεώτρηση ανεξάρτητη, αλλά να υπάρχει επίδραση όλων των γεωτρήσεων στις αναλύσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι 54m για αυτό έγινε επιλογή για 55m. Το μέγιστο ύψος για την αναζήτηση επιλέχτηκε στα 2m, ώστε να ελέγχει ικανοποιητικά τον υπόγειο χώρο που έχει μέγιστο ύψος 5,5m. Ο αριθμός των blocks είναι 2854.

Η αναζήτηση γίνεται με οριζόντια έλλειψη 1:14 στο χώρο (z), χωρίς όμως προσανατολισμό, γιατί δεν υπάρχει γνώση για την διεύθυνση και κλίση των στρωμάτων όπως αυτά προέκυψαν μέσα από την γεωτρητική έρευνα.

Το composite → downhole επιλέχτηκε να είναι 0,5/75%. Το composite length (0,5m) προέκυψε από το γεγονός ότι το πιο συχνά απαντώμενο μήκος δειγμάτων, όπως φάνηκε στις γεωτρήσεις που έγιναν, είναι τα 0,5m. Το 75% καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό την περίπτωση, καθώς όσο χαμηλώνει το ποσοστό χρειάζονται περισσότερα valid δείγματα, ενώ όσο μεγαλώνει, δυσκολεύει η κατάσταση ταύτισης του composite length με το μήκος της δειγματοληψίας.

Στην επόμενη εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών της αντοχής σε θλίψη στην περιοχή εξέτασης (ευρύτερος χωρικός περιορισμός) και το υπόμνημα της

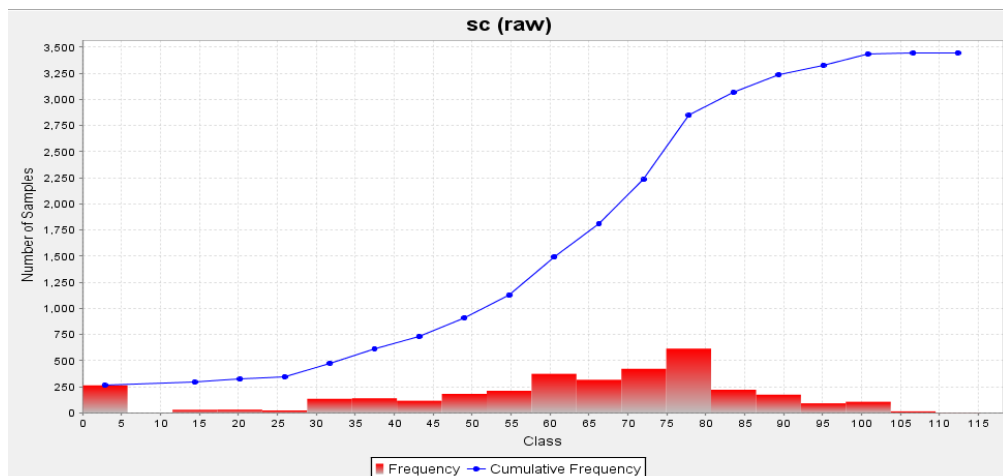
απεικόνισης. Φαίνεται ότι με κατεύθυνση από την οροφή προς το δάπεδο να υπάρχει βελτίωση των χαρακτηριστικών του μοντέλου.



Εικόνα 4.9: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής υπόγειου χώρου με UCS

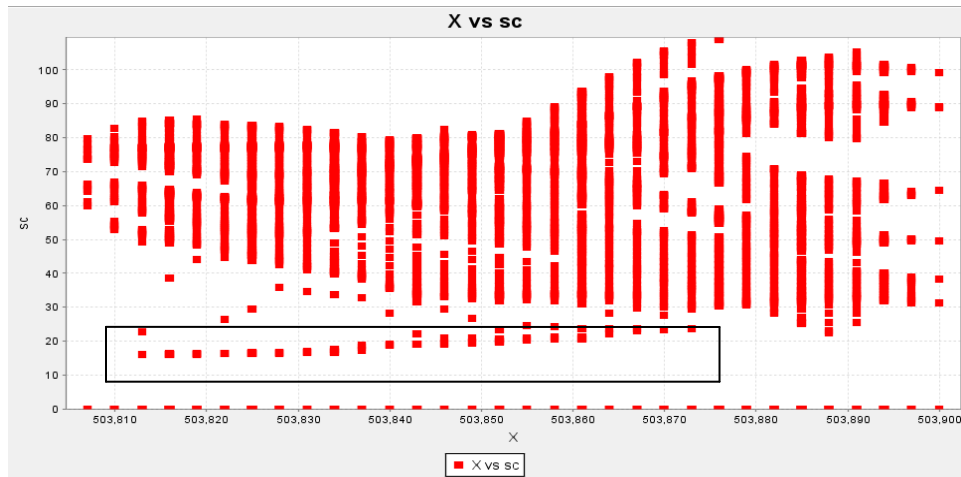
Διαγράμματα για την ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου

Στο διάγραμμα (Σχήμα 4.1) που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή της μονοαξονικής αντοχής στον υπόγειο χώρο. Οι τιμές έχουν εύρος 0-105MPa ενώ μεγαλύτερη συσσώρευση υπάρχει μεταξύ 60-80 MPa.

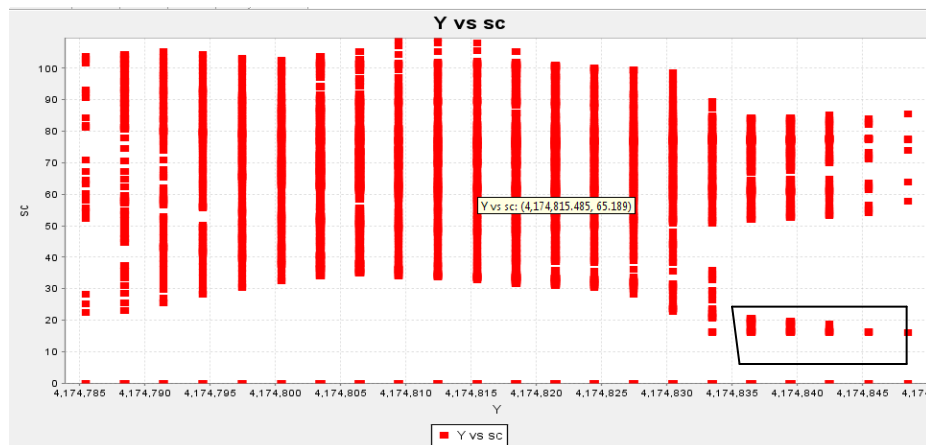


Σχήμα 4.1: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο

Στα δύο επόμενα διαγράμματα (Σχήμα 4.2 και 4.3) φαίνονται οι κατανομές των τιμών για την αντοχή σε θλίψη κατά μήκος (x) και κατά πλάτος (y) της περιοχής εξέτασης. Ενώ παρουσιάζονται και οι συντεταγμένες των περιοχών που είναι ασθενέστερες.



Σχήμα 4.2: Κατανομή των τιμών αντοχής σε θλίψη κατά μήκος (x) της περιοχής εξέτασης



Σχήμα 4.3: Κατανομή των τιμών UCS κατά πλάτος (y) της περιοχής εξέτασης

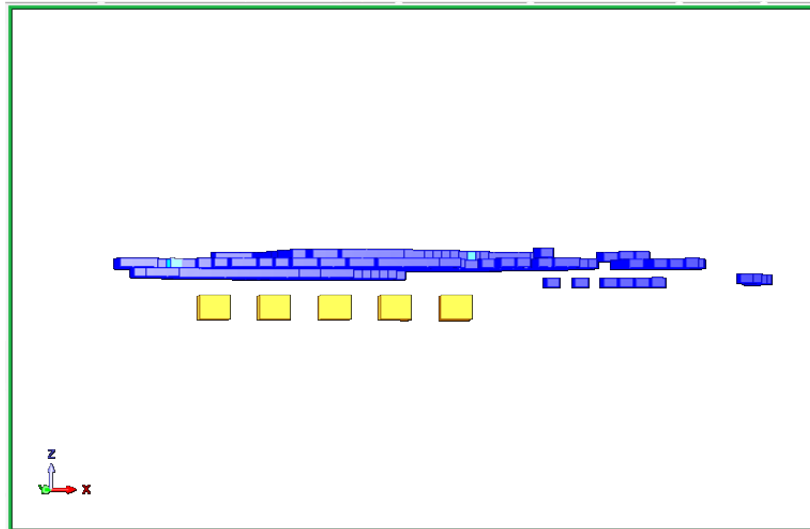
Παρουσίαση του χώρου εξέτασης με blocks

Για καλύτερη αντίληψη της κατάστασης στον υπόγειο χώρο, έγινε διαχωρισμός της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη (MPa) σε blocks:

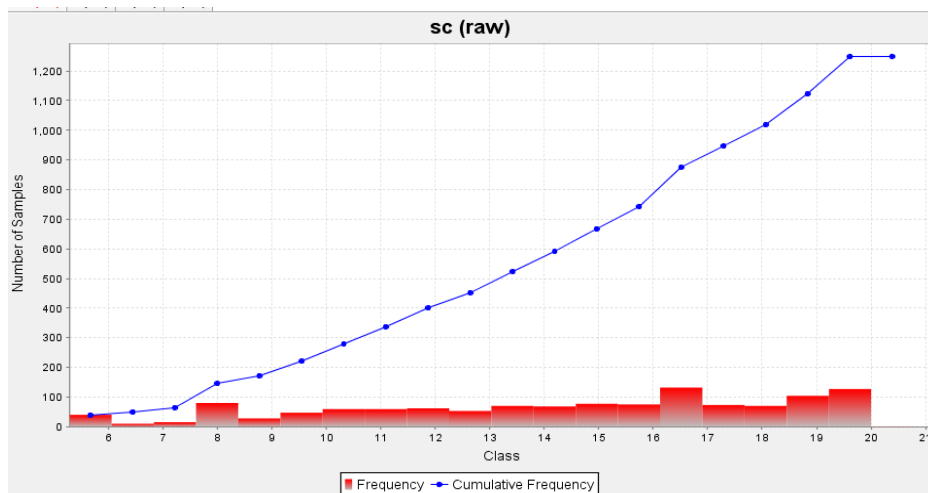
- 0-20
- 20-40
- 40-60
- 60-80
- 80+

Στην περίπτωση όπου παρουσιάζονται τα blocks που ανήκουν στην περιοχής $0 \leq UCS \leq 20$ MPa φαίνεται ότι η περιοχή εμφάνισής τους βρίσκεται στο ανώτερο υψομετρικό επίπεδο από τον χώρο κατασκευής (+20m) (Εικόνα 4.10). Ενώ από το

διάγραμμα φαίνεται μια ομοιόμορφη κατανομή των τιμών, με περισσότερα blocks να είναι 8-20 MPa (Σχήμα 4.4).



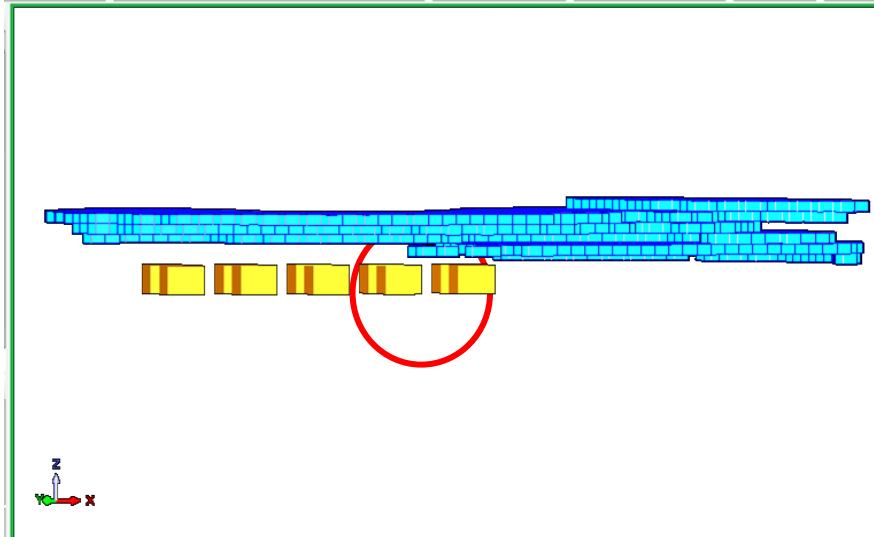
Εικόνα 4.10: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $0 < UCS \leq 20 \text{ MPa}$



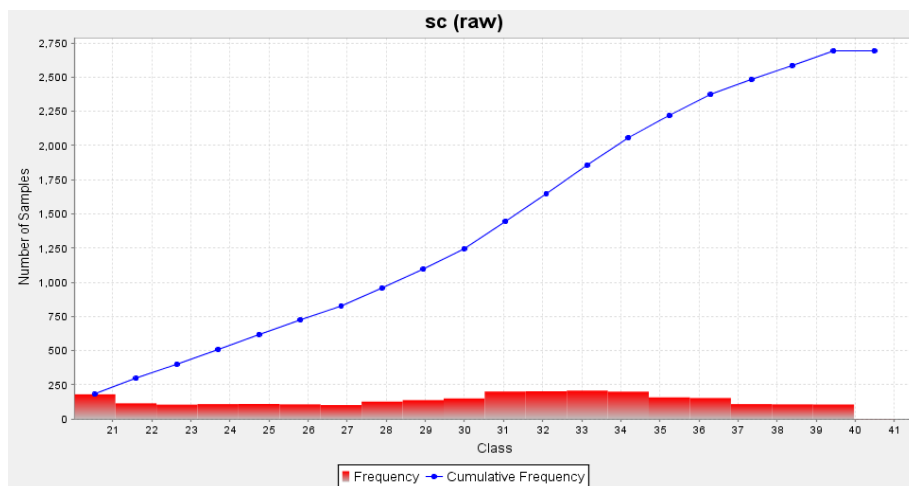
Σχήμα 4.4: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $0 < UCS \leq 20 \text{ MPa}$

Στην περίπτωση $20 \leq UCS \leq 40 \text{ MPa}$ οι χαμηλές τιμές για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη είναι πιο κοντά στον υπόγειο χώρο, ενώ είναι ακόμα πιο κοντά στην οροφή του χώρου (+19,5m), στο σημείο της εισόδου, εκεί που παρουσιάστηκε αστοχία κατά την διάρκεια της κατασκευής (Εικόνα 4.11).

Στο διάγραμμα υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των τιμών της αντοχής σε θλίψη (Σχήμα 4.5).

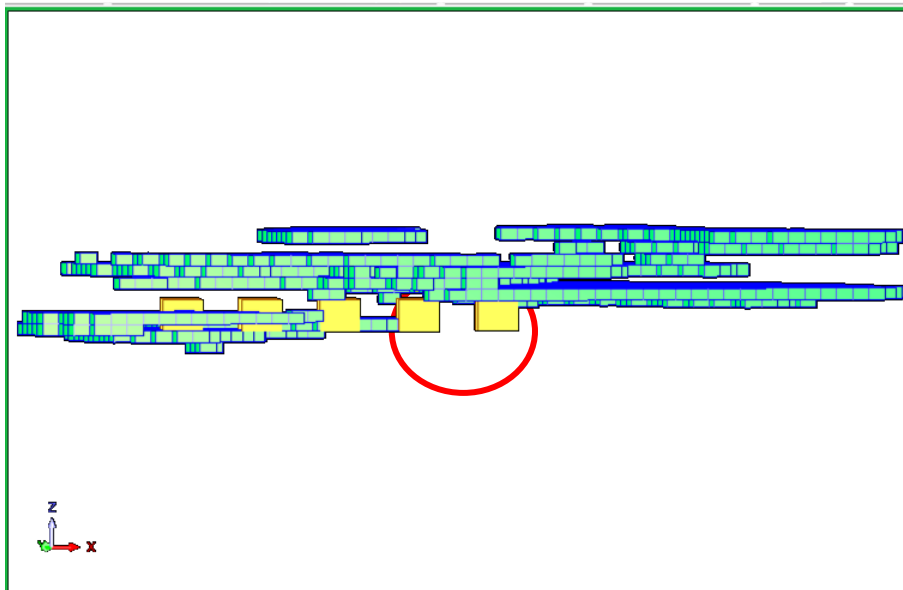


Εικόνα 4.11: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $20 < UCS \leq 40 \text{ MPa}$

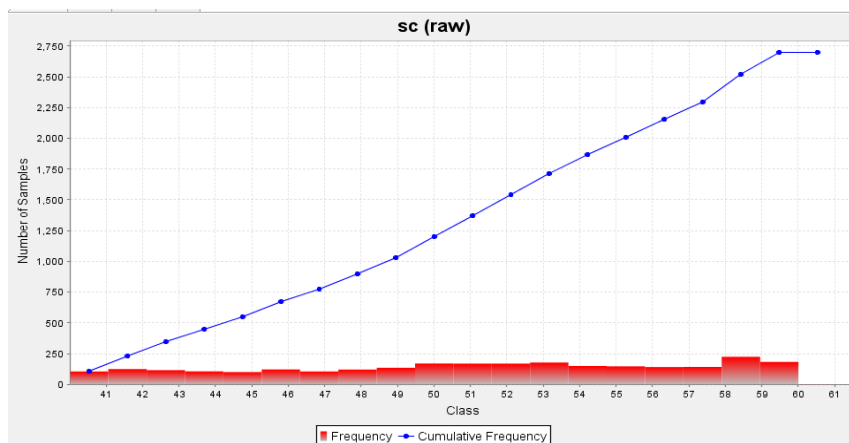


Σχήμα 4.5: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $20 < UCS \leq 40 \text{ MPa}$

Στην περίπτωση $40 \leq UCS \leq 60 \text{ MPa}$ η ζώνη αυτή πλησιάζει τον υπόγειο χώρο ακόμα περισσότερο στο σημείο της εισόδου (2 πρώτοι στύλοι ανατολικά). Παρατηρείται ότι υπάρχουν μερικά blocks στο δάπεδο του κεντρικού τμήματος του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.12). Στο διάγραμμα φαίνεται ότι οι τιμές κατανέμονται ομοιόμορφα, ενώ στο δάπεδο του κεντρικού τμήματος του χώρου οι τιμές είναι 50-54MPa (Σχήμα 4.6).

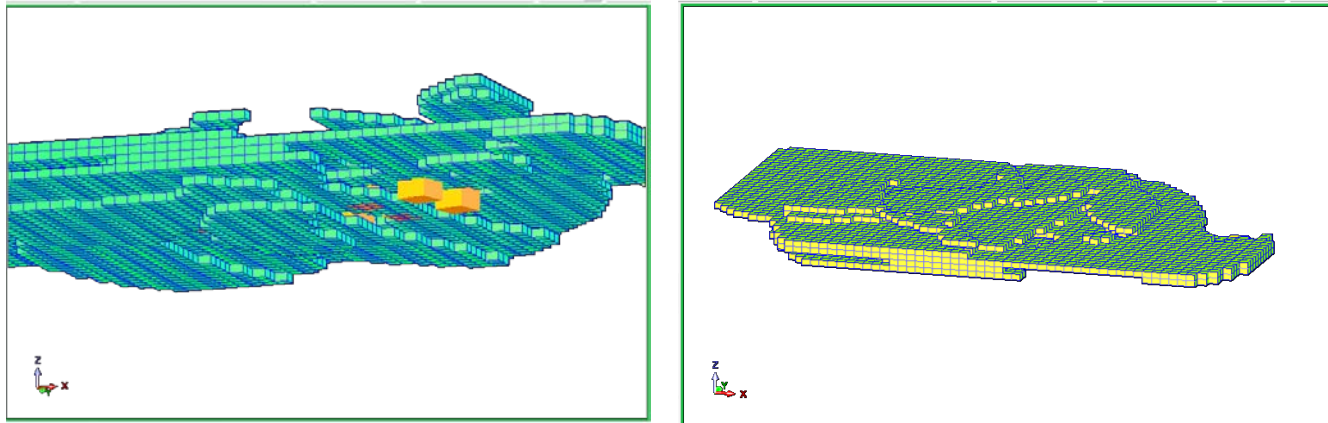


Εικόνα 4.12: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $40 < UCS \leq 60$ MPa

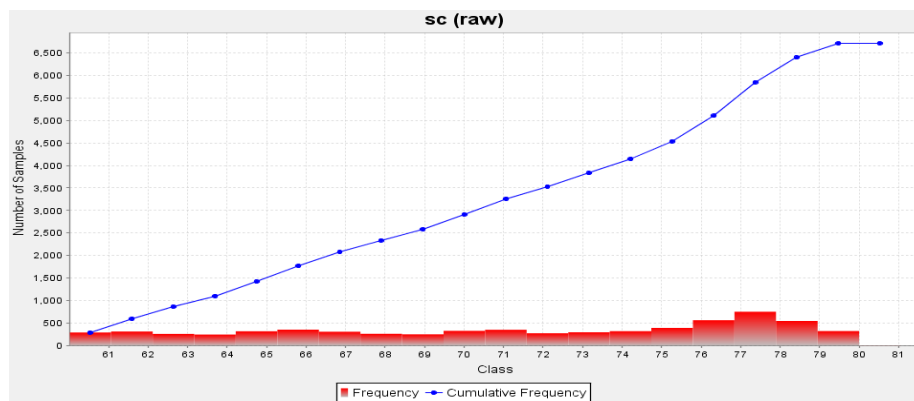


Σχήμα 4.6: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $40 < UCS \leq 60$ MPa

Στις τιμές $60 \leq UCS \leq 80$ MPa βρίσκεται το μεγαλύτερο τμήμα του υπόγειου χώρου εκτός από το μεσαίο τμήμα των τεσσάρων στύλων της εισόδου (Εικόνα 4.13). Το μεγαλύτερο εύρος των blocks κατανέμεται ομοιόμορφα (Σχήμα 4.7).

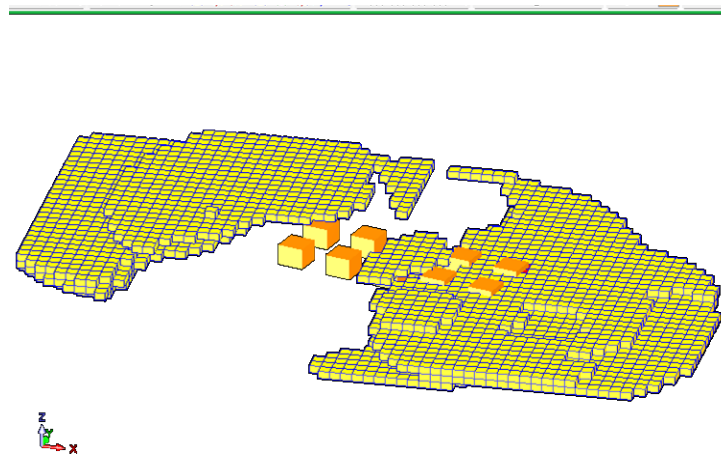


Εικόνα 4.13: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $60 < UCS \leq 80$ MPa

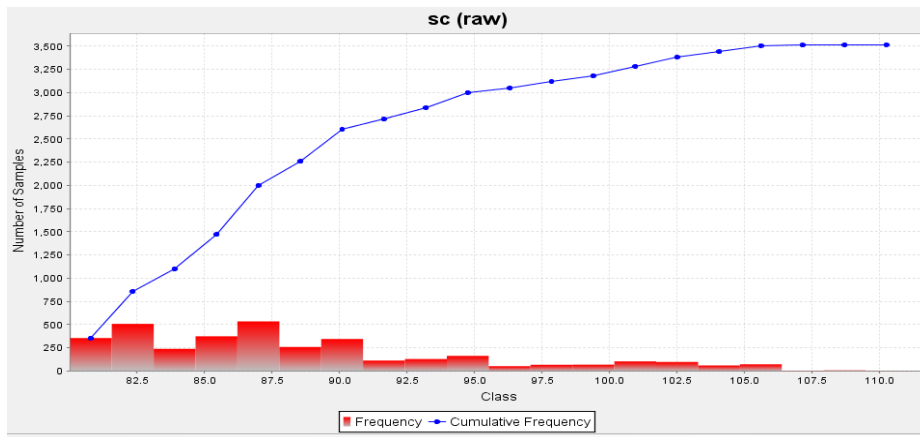


Σχήμα 4.7: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $60 < UCS \leq 80$ MPa

Για τιμές μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη $UCS > 80$ MPa παρατηρείται συγκέντρωση των τιμών στο δάπεδο, ανατολικά (δεξιά) του υπόγειου χώρου, δείχνοντας ότι ο σχηματισμός (ασβεστόλιθος Αν. μαρμάρου) ακολουθεί τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων (Εικόνα 4.14). Οι τιμές κατανέμονται ομοιόμορφα, ενώ παρατηρείται μεγαλύτερη συσσώρευση μέχρι τα 95 MPa (Σχήμα 4.8).



Εικόνα 4.14: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $UCS > 80$ MPa

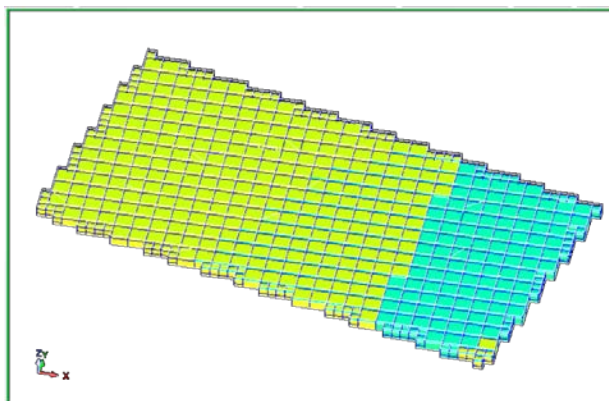
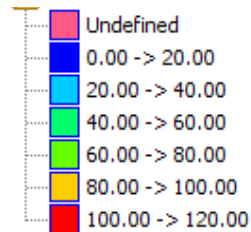


Σχήμα 4.8: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks UCS>80MPa

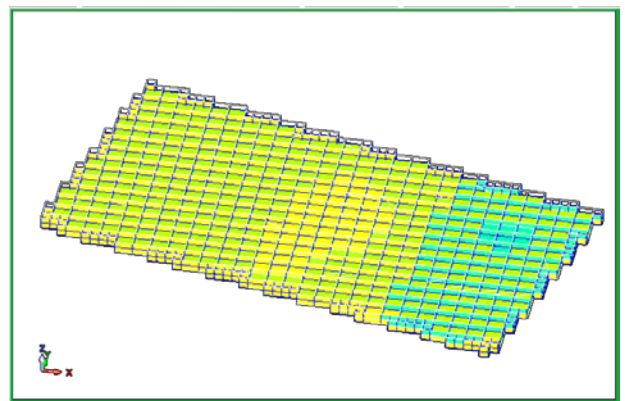
Οριζόντιες τομές

Για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η κατάσταση που επικρατεί μέσα στον υπόγειο χώρο, έγιναν οριζόντιες τομές καθ' ύψος z (από πάνω προς τα κάτω), ώστε να φανεί η διακύμανση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη των σχηματισμών (Εικόνα 4.15).

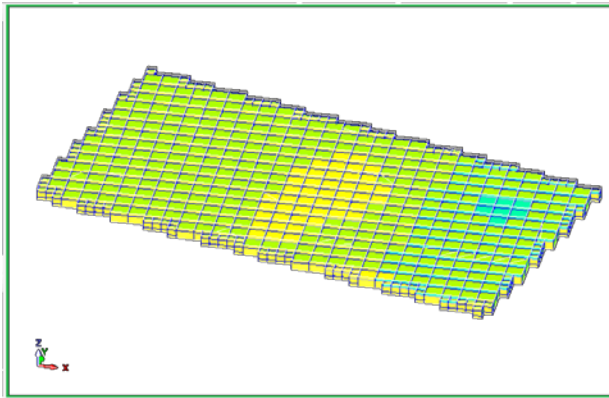
Από τα +19,5m μέχρι τα +17,5m, στην περιοχή εισόδου του υπόγειου χώρου (δυτικά), φαίνεται να υπάρχουν χαμηλές αντοχές του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (40-50MPa), ενώ η κατάσταση βελτιώνεται προς δυτικά (αριστερά). Στα +15,5m η κατάσταση διαφοροποιείται και γίνεται καλύτερη στην είσοδο (70-80MPa). Στο κεντρικό τμήμα κοντά στο δάπεδο του χώρου (+14 έως +12,5m) φαίνονται κάποιες ασθενείς περιοχές με τιμές UCS ~ 52MPa.



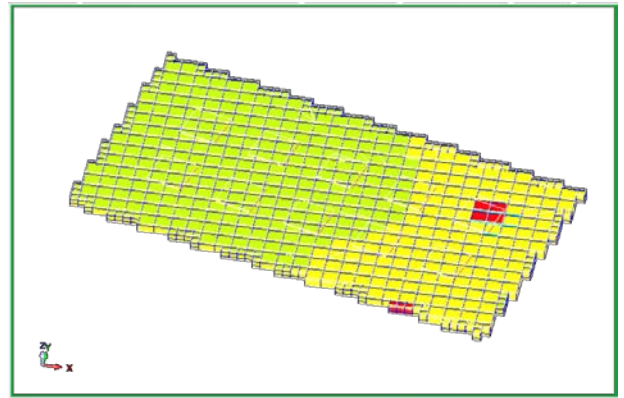
z=19.5m



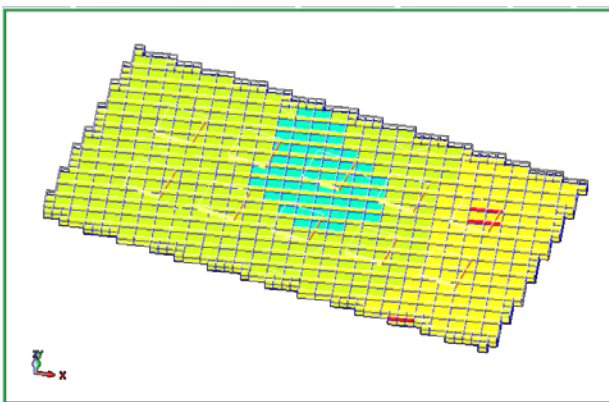
z=18m



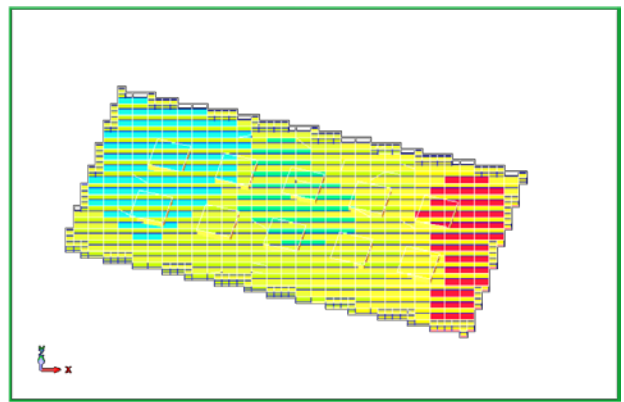
$z=17.5m$



$z=15.5m$



$z=14m$

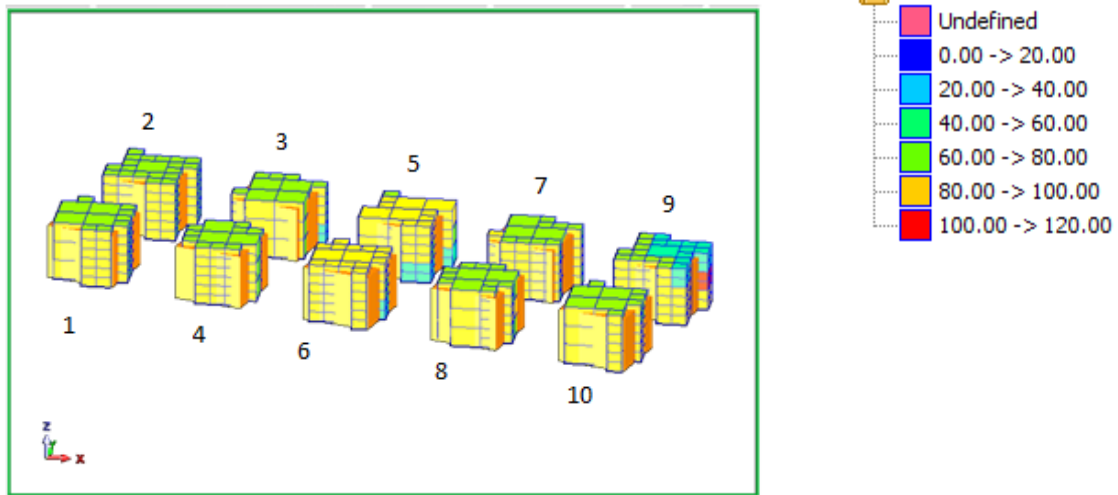


$z=12.5m$

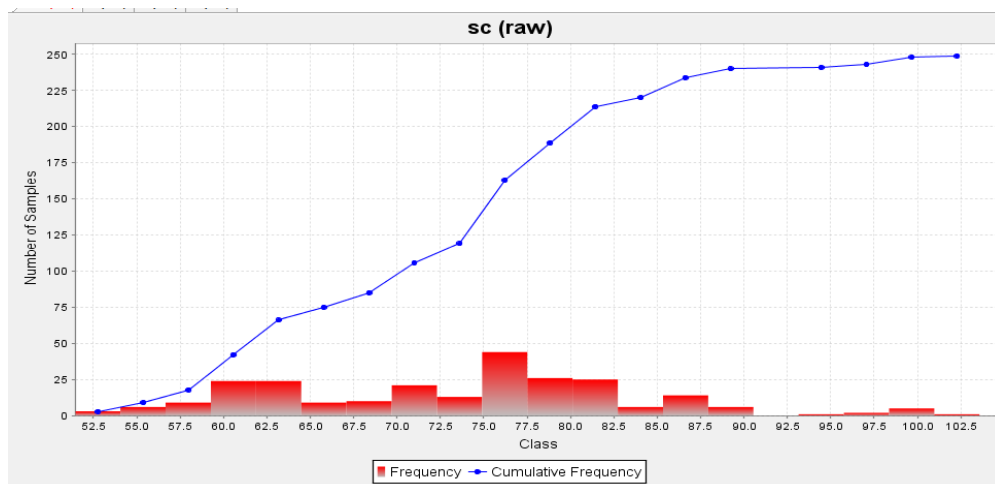
Εικόνα 4.15: Οριζόντιες τομές στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη

Γραφική απεικόνιση της κατανομής της αντοχής (UCS) στους στύλους

Εκτός από τη ευρύτερη περιοχή εξέτασης του υπόγειου χώρου, έγινε απεικόνιση της κατανομής της αντοχής (UCS) και για τους στύλους, οι οποίοι αποτελούν τα “δομικά στοιχεία” του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.16). Η μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών γίνεται μεταξύ 55-90MPa (Σχήμα 4.9).

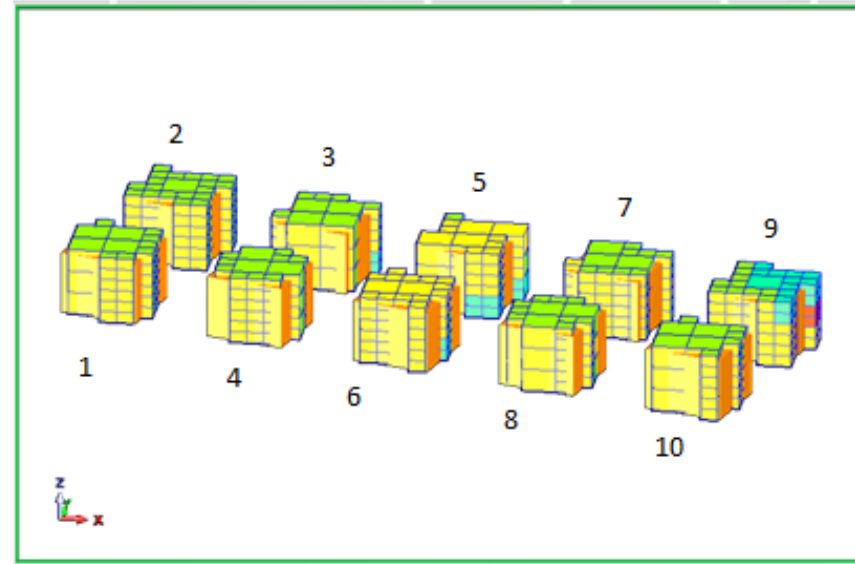
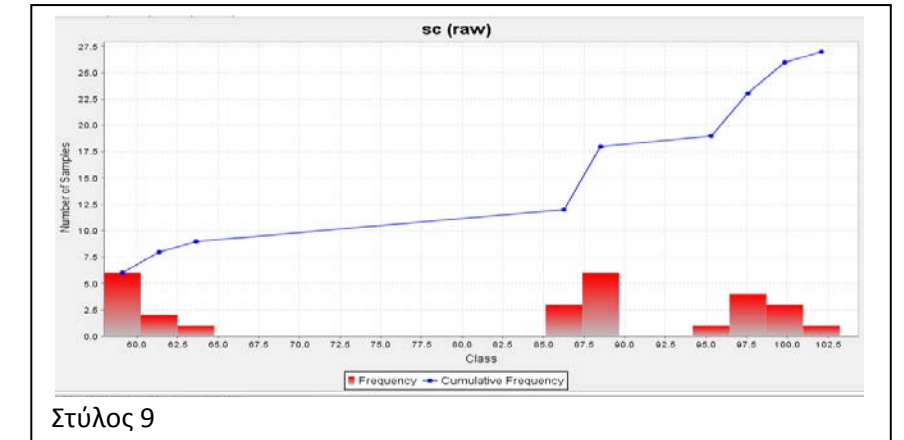
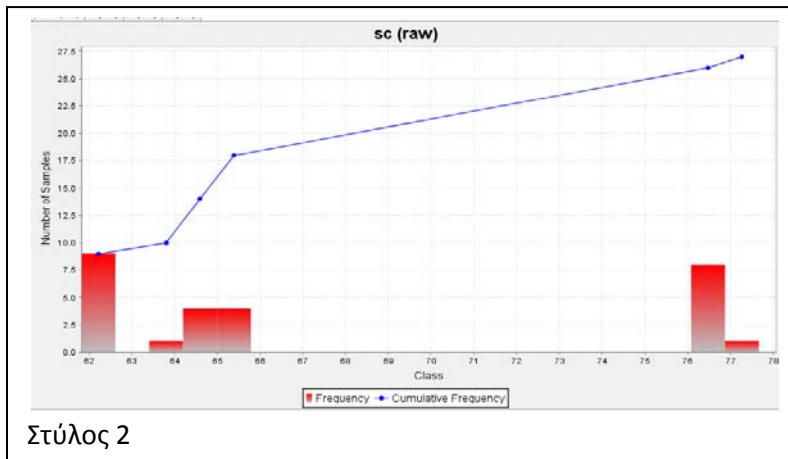
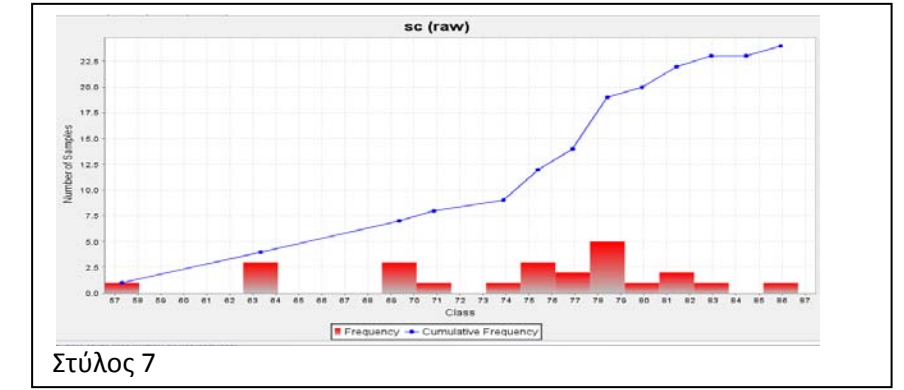
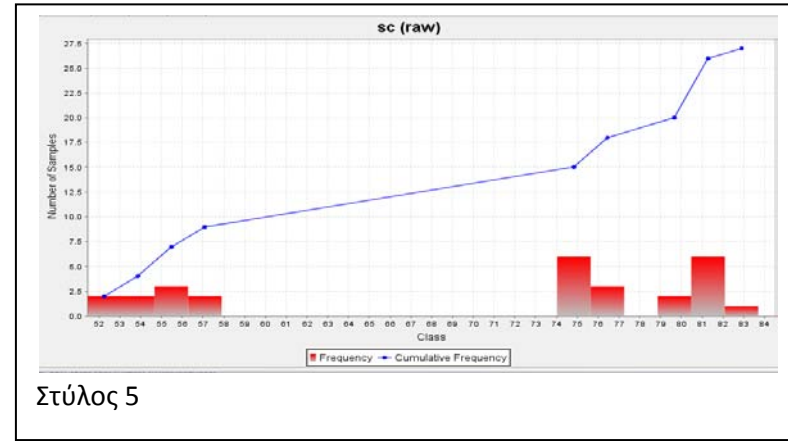
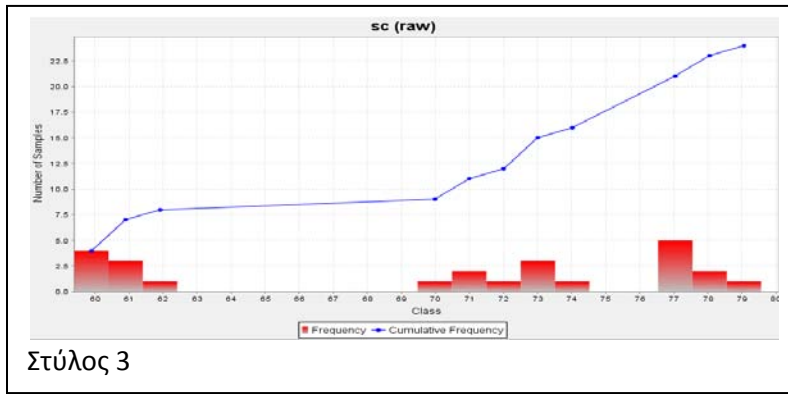


Εικόνα 4.16: Γραφική απεικόνιση της κατανομής της αντοχής (UCS) στους στύλους του υπόγειου συγκροτήματος

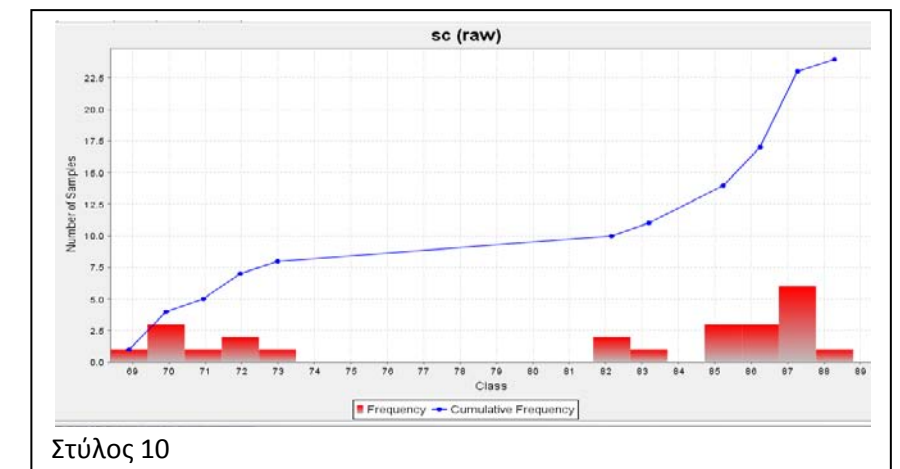
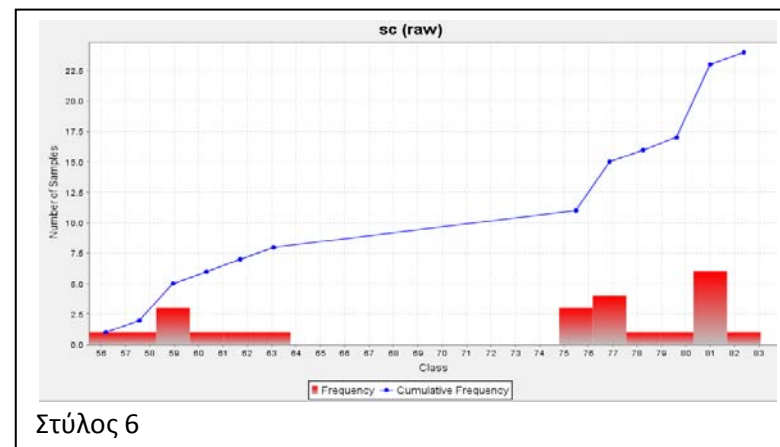
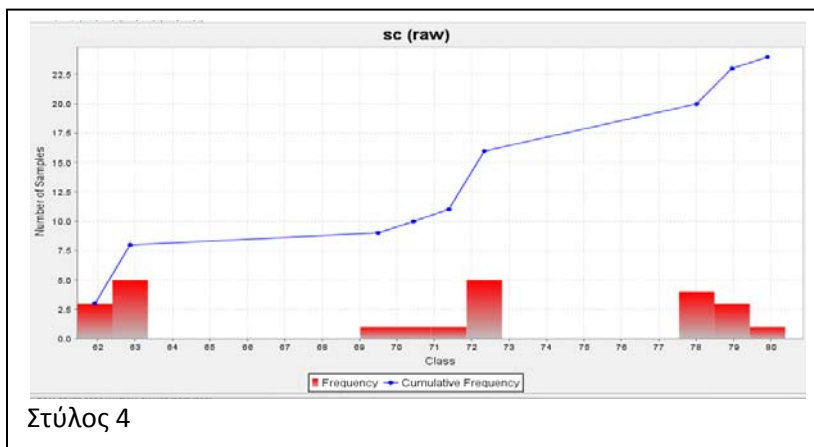
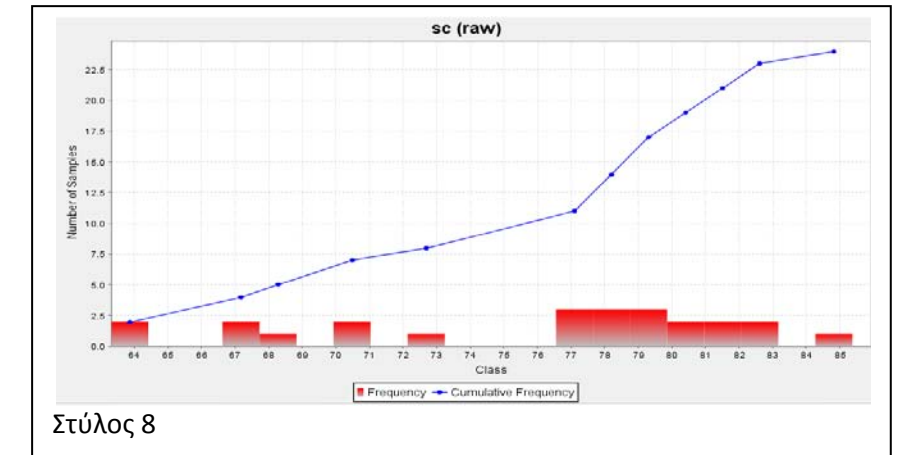
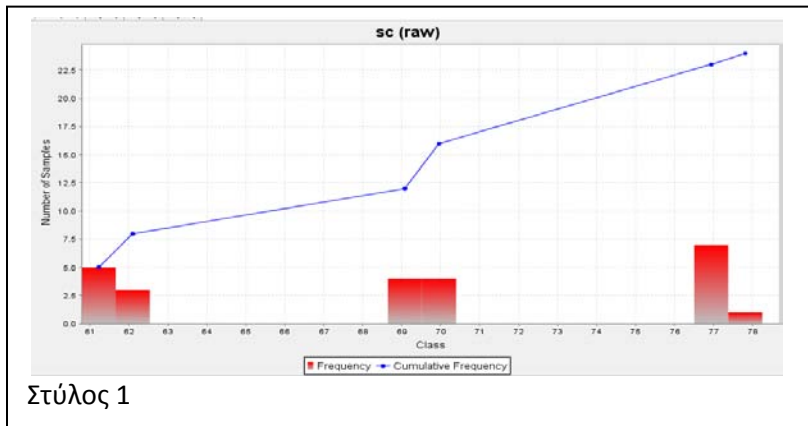


Σχήμα 4.9: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στους στύλους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα/γραφήματα από την ανάλυση των στύλων (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10 : Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη για κάθε στύλο



Στον πίνακα 4.4, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στατιστικά δεδομένα για τους στύλους. Η πιο χαμηλή τιμή της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη συναντάται στο στύλο 5 με 51,44MPa, και παρατηρείται στην περιοχή επαφής του με το δάπεδο του υπόγειου χώρου. Φαίνεται ότι όλοι οι στύλοι παρουσιάζουν σχετικά καλά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 4.4: Τιμές sc με Is για στύλους

	n	min	max	mean	median	stdev
Στύλος 1	24	60,79	77,37	69,30	69,53	6,48
Στύλος 2	27	61,82	76,87	67,93	64,81	6,30
Στύλος 3	24	59,39	78,55	70,00	72,09	7,05
Στύλος 4	24	61,45	79,43	70,90	71,99	6,71
Στύλος 5	27	51,44	82,08	70,54	75,48	11,33
Στύλος 6	24	55,50	81,69	72,26	76,52	9,31
Στύλος 7	24	56,55	85,19	74,27	76,01	7,05
Στύλος 8	24	63,31	84,26	75,77	78,01	6,10
Στύλος 9	27	57,97	100,97	82,20	88,33	16,36
Στύλος 10	24	68,39	87,77	80,88	85,07	7,28

4.3.2. Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν για την μέθοδο χωρικής παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (inverse distance) και το composite downhole για την ανάλυση του μοντέλου όσον αφορά τον δείκτη ποιότητας (RQD) των πετρωμάτων που υπάρχουν στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου είναι:

Πίνακας 4.5: Δεδομένα αναλύσεων για RQD

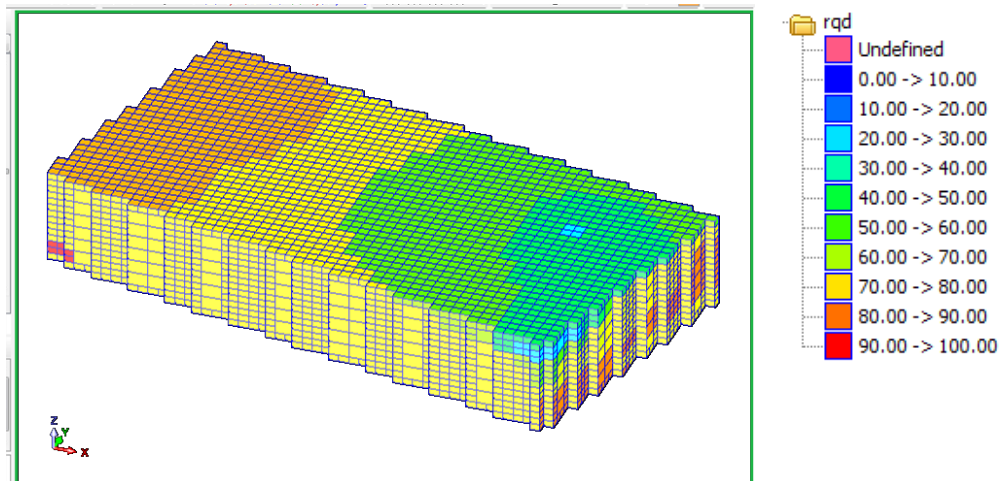
Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD	
Minimum number of samples: 3	maximum search radius: 55
Maximum number of samples: 15	maximum vertical search distance: 2
Bearing: 0	major / semi-major: 1
Plunge: 0	major / minor: 14
Dip: 0	Composite downhole – 0,5/75%

Η επιλογή των δεδομένων έγινε ώστε να γίνει ανάλυση σε όλες τις τιμές για RQD που υπάρχουν στις γεωτρήσεις. Ο αριθμός των δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις είναι 325 δείγματα, όσα είναι όλα τα δείγματα. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός των δειγμάτων επιλέχθηκε ώστε να γίνεται πιο σωστά η παρεμβολή των τιμών ανάμεσα στις γεωτρήσεις (interpolation). Αντίστοιχα η ακτίνα αναζήτησης επιλέχθηκε ώστε να μην μένει καμία γεώτρηση ανεξάρτητη, αλλά να υπάρχει επίδραση όλων των γεωτρήσεων στις αναλύσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι 54m για αυτό έγινε επιλογή για 55m. Το μέγιστο ύψος για την αναζήτηση επιλέχθηκε στα 2m, ώστε να ελέγχει ικανοποιητικά τον υπόγειο χώρο που έχει μέγιστο ύψος 5,5m. Ο αριθμός των blocks είναι 2854.

Η αναζήτηση γίνεται με οριζόντια έλλειψη 1:14 στο χώρο (z), χωρίς όμως προσανατολισμό, γιατί δεν υπάρχει γνώση για την διεύθυνση και κλίση των στρωμάτων όπως αυτά προέκυψαν μέσα από την γεωτρητική έρευνα.

Το composite → downhole επιλέχθηκε να είναι 0,5/75%. Το composite length (0,5m) προέκυψε από το γεγονός ότι το πιο συχνά απαντώμενο μήκος δειγμάτων, όπως φάνηκε στις γεωτρήσεις που έγιναν, είναι τα 0,5m. Το 75% καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό την περίπτωση, καθώς όσο χαμηλώνει το ποσοστό χρειάζονται περισσότερα valid δείγματα, ενώ όσο μεγαλώνει, δυσκολεύει η κατάσταση ταύτισης του composite length με το μήκος της δειγματοληψίας.

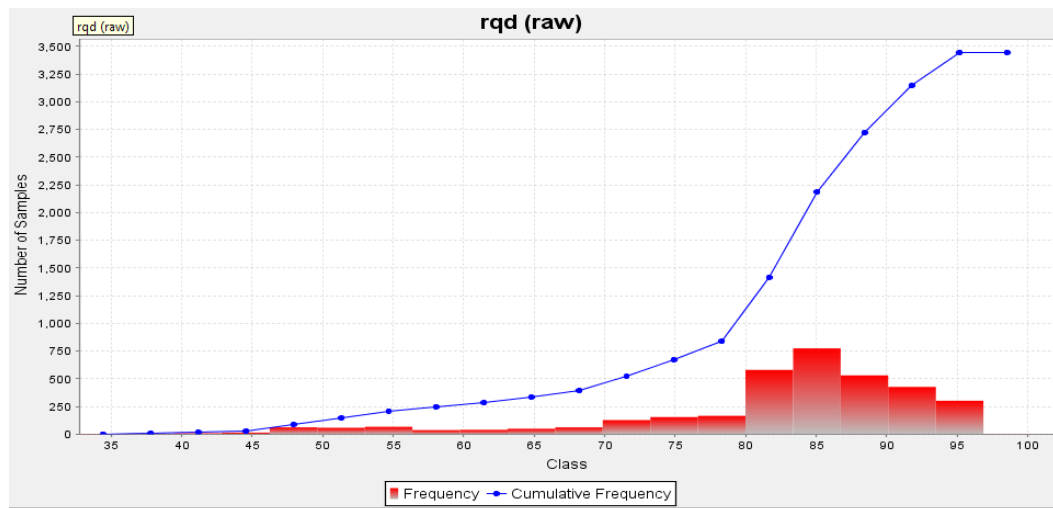
Στην επόμενη εικόνα 4.17 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών του RQD(%) στην περιοχή εξέτασης και το υπόμνημα της απεικόνισης. Φαίνεται ότι με κατεύθυνση από την οροφή προς το δάπεδο υπάρχει βελτίωση των χαρακτηριστικών του μοντέλου.



Εικόνα 4.17: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής υπόγειου χώρου με RQD

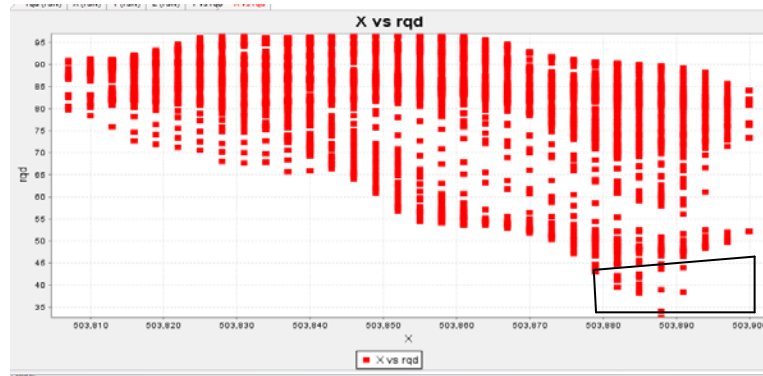
Διαγράμματα για τον υπόγειο χώρο

Στα διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή του RQD στο χώρο. Οι τιμές έχουν εύρος 45-100% ενώ μεγαλύτερη συσσώρευση υπάρχει μεταξύ του 80-95% (Σχήμα 4.11).

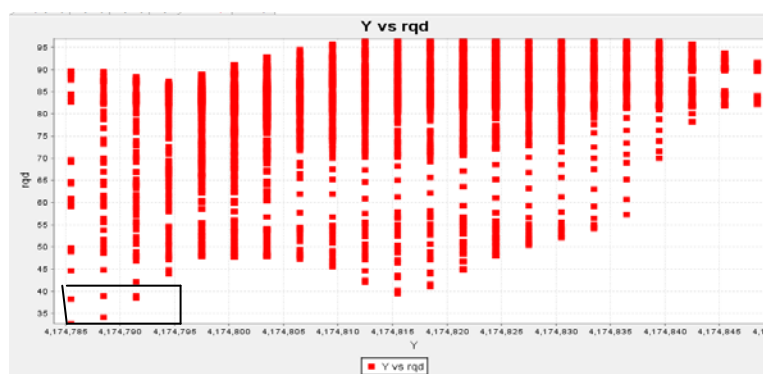


Σχήμα 4.11: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD στον υπόγειο χώρο

Στα δύο επόμενα διαγράμματα (Σχήμα 4.12 και 4.13) φαίνονται οι κατανομές των τιμών RQD κατά μήκος (x) και κατά πλάτος (y) της περιοχής εξέτασης. Ενώ παρουσιάζονται και οι συντεταγμένες των περιοχών που είναι ασθενέστερες.



Σχήμα 4.12: Κατανομή των τιμών RQD κατά πλάτος (x) της περιοχής εξέτασης



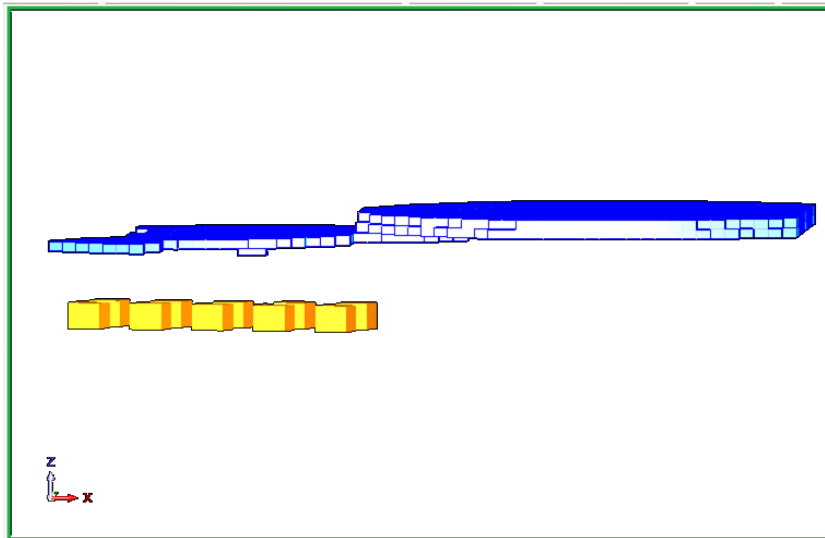
Σχήμα 4.13: Κατανομή των τιμών RQD κατά μήκος (y) της περιοχής εξέτασης

Παρουσίαση του χώρου με blocks

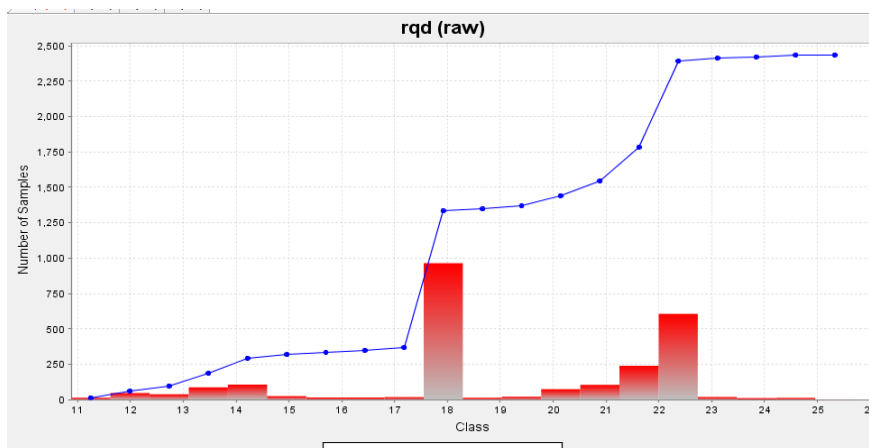
Για καλύτερη αντίληψη της κατάστασης στον υπόγειο χώρο, έγινε διαχωρισμός του δείκτη ποιότητας RQD σε blocks:

- 0-25%
- 25-50%
- 50-75%
- 75-90%
- 90-100%

Στην περίπτωση κατά την οποία το RQD λαμβάνει τιμές από **0-25 %** δεν υπάρχουν blocks μέσα στον υπόγειο χώρο και οι τιμές είναι αρκετά μακριά από αυτόν (+25m) (Εικόνα 4.18). Ενώ από το διάγραμμα φαίνεται μια ομοιόμορφη κατανομή των τιμών, με περισσότερα blocks να είναι στις τιμές 18% και 20-23% (Σχήμα 4.14).

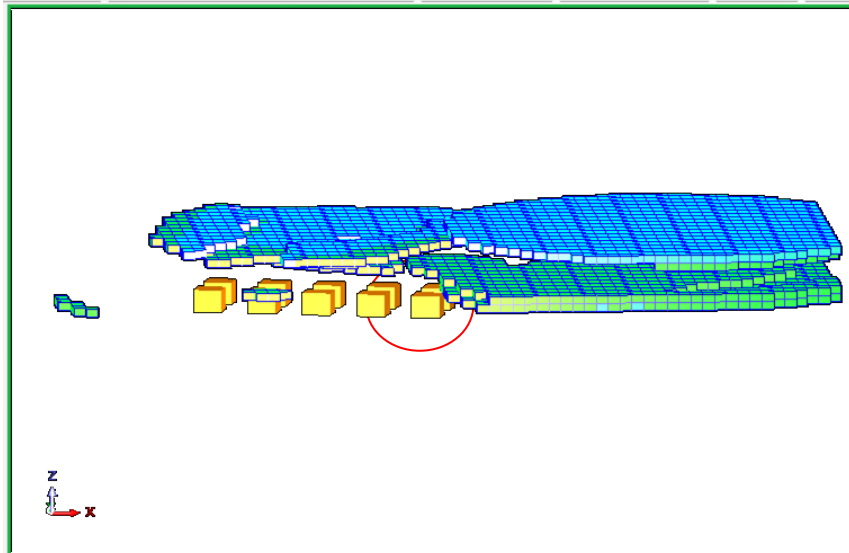


Εικόνα 4.18: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με τιμές blocks $0 < RQD \leq 25$

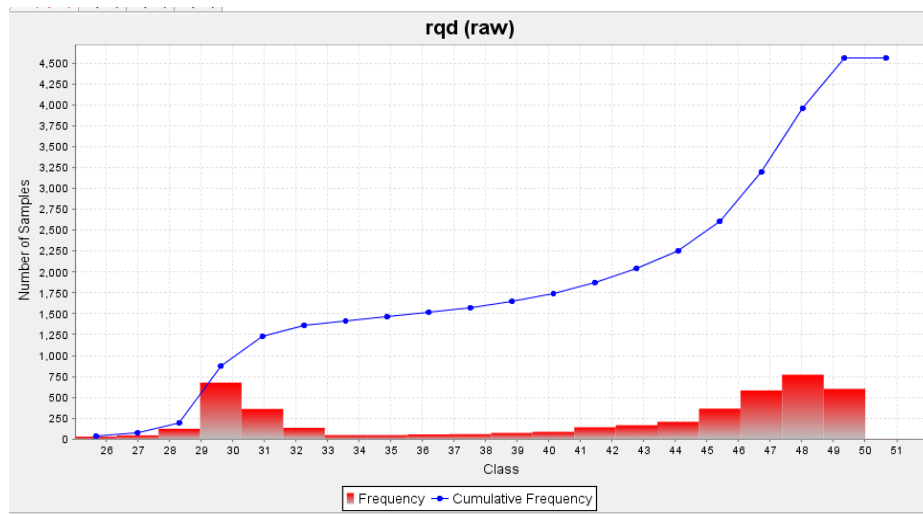


Σχήμα 4.14: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στον υπόγειο χώρο με blocks $0 < RQD \leq 25$

Στην περίπτωση κατά την οποία το RQD λαμβάνει τιμές από **25-50 %**, η περιοχή πλησιάζει τον υπόγειο χώρο και ιδιαίτερα από ανατολικά. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων φανερώνει ότι υπάρχει περιοχή σχιστόλιθου, η οποία συνεχίζει μέσα στον χώρο (Εικόνα 4.19). Οι περισσότερες τιμές, όπως φαίνεται από το διάγραμμα είναι 29 - 32 % και 45 - 50 % (Σχήμα 4.15).

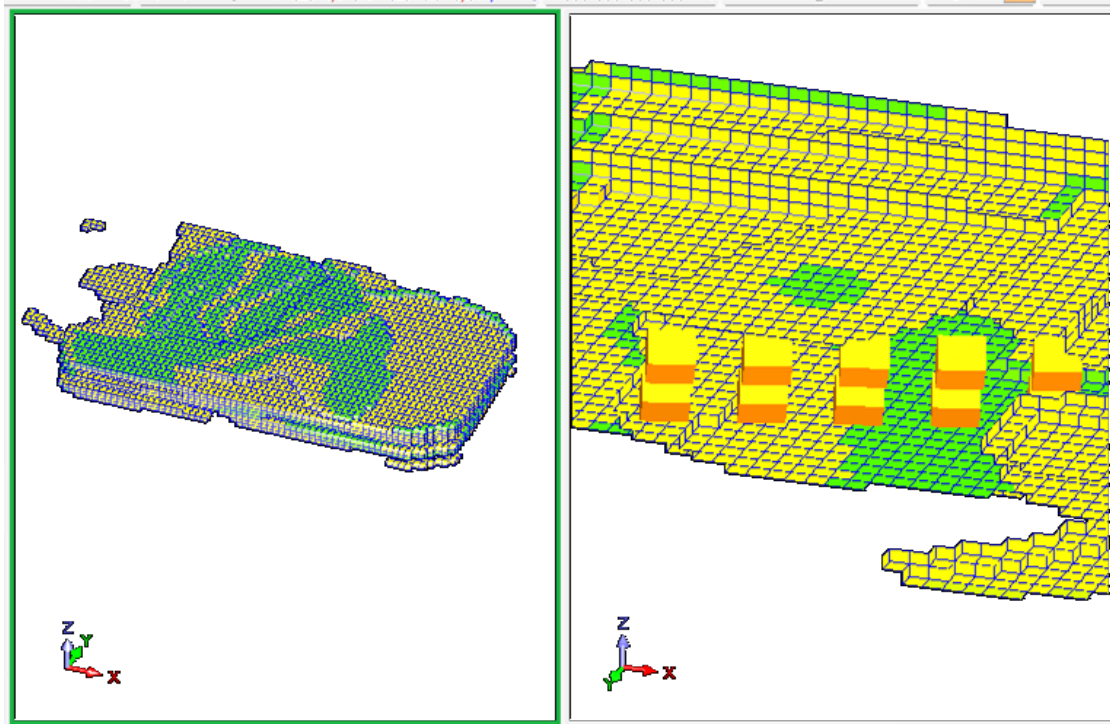


Εικόνα 4.19: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με τιμές $25 < RQD \leq 50$

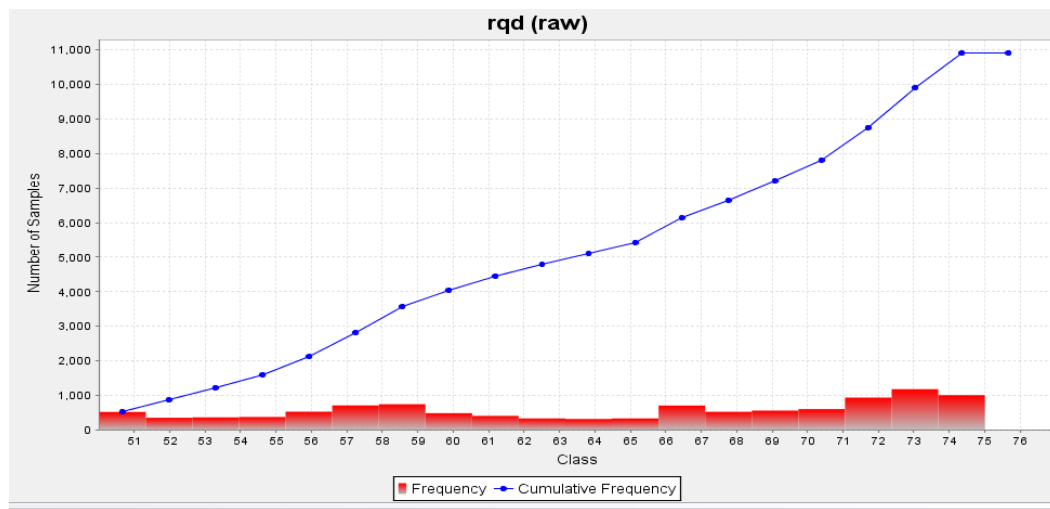


Σχήμα 4.15: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στον υπόγειο χώρο με $25 < RQD \leq 50$

Στην περίπτωση **50-75 %**, η περιοχή που έχει εύρος μέσα σε αυτές τις τιμές, πλησιάζει τον υπόγειο χώρο στο σύνολό του, χωρίς να υπάρχει μέσα σε αυτόν (Εικόνα 4.20). Οι περισσότερες τιμές, όπως φαίνεται από το διάγραμμα κατανομών ομοιόμορφα (Σχήμα 4.16).

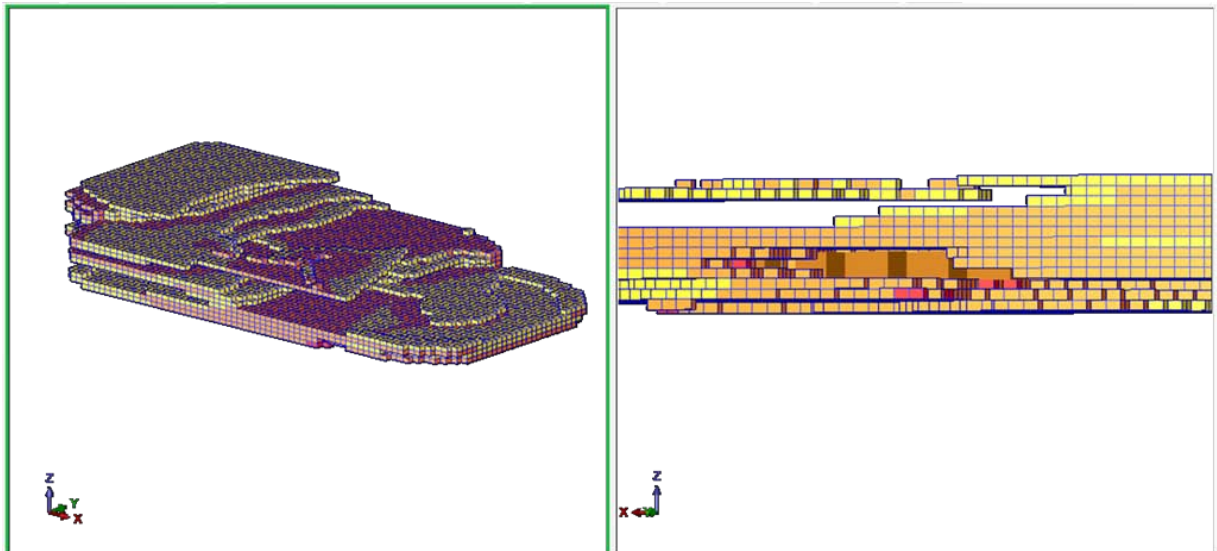


Εικόνα 4.20: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $50 < RQD \leq 75$

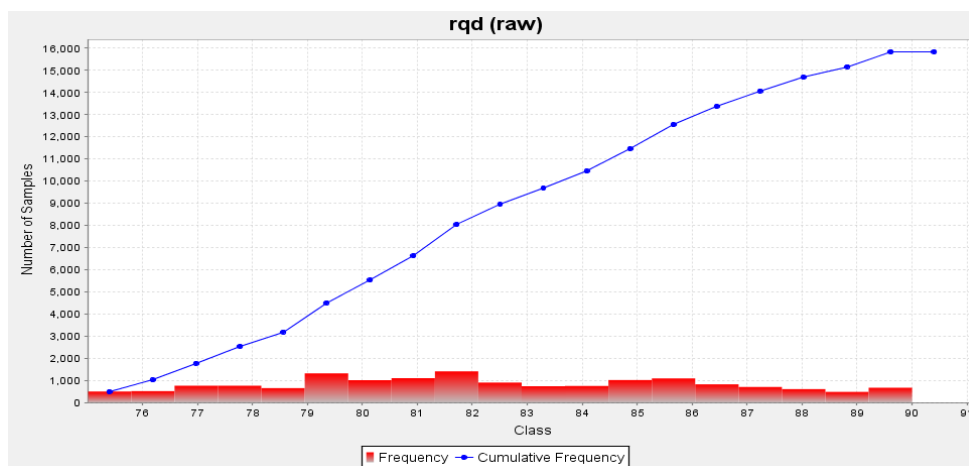


Σχήμα 4.16: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $50 < RQD \leq 75$

Στην περιοχή που το RQD έχει τιμές **75-90%** βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος του block model που δημιουργήθηκε, χωρίς όμως να υπάρχουν αυτές οι τιμές και στο εσωτερικό του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.21). Οι τιμές καλύπτουν ομοιόμορφα όλο το εύρος που εξετάζεται (Σχήμα 4.17).



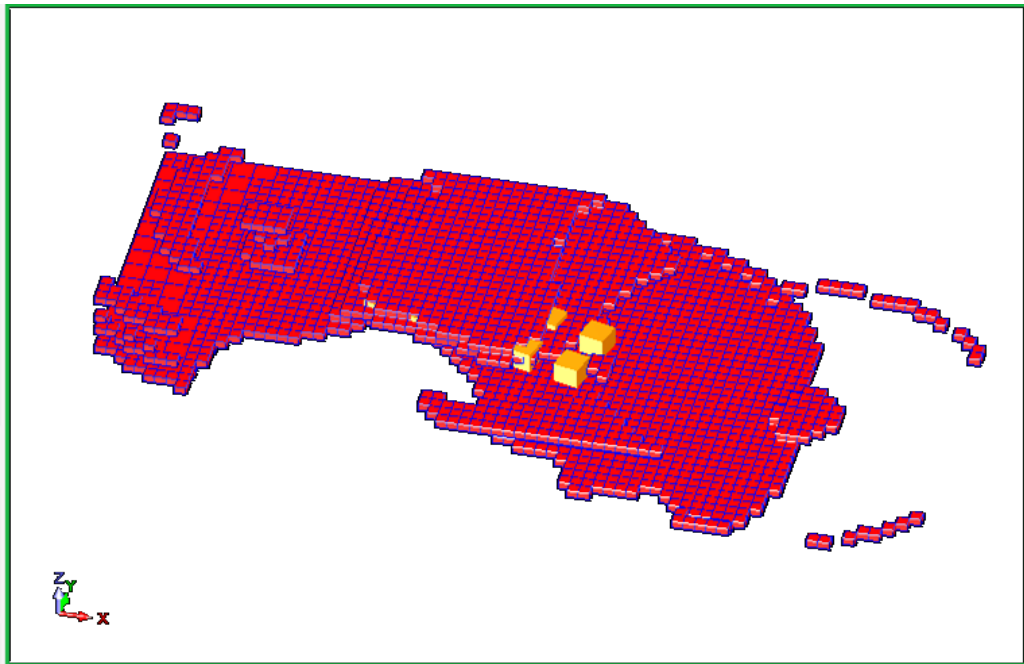
Εικόνα 4.21: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $75 < RQD \leq 90$



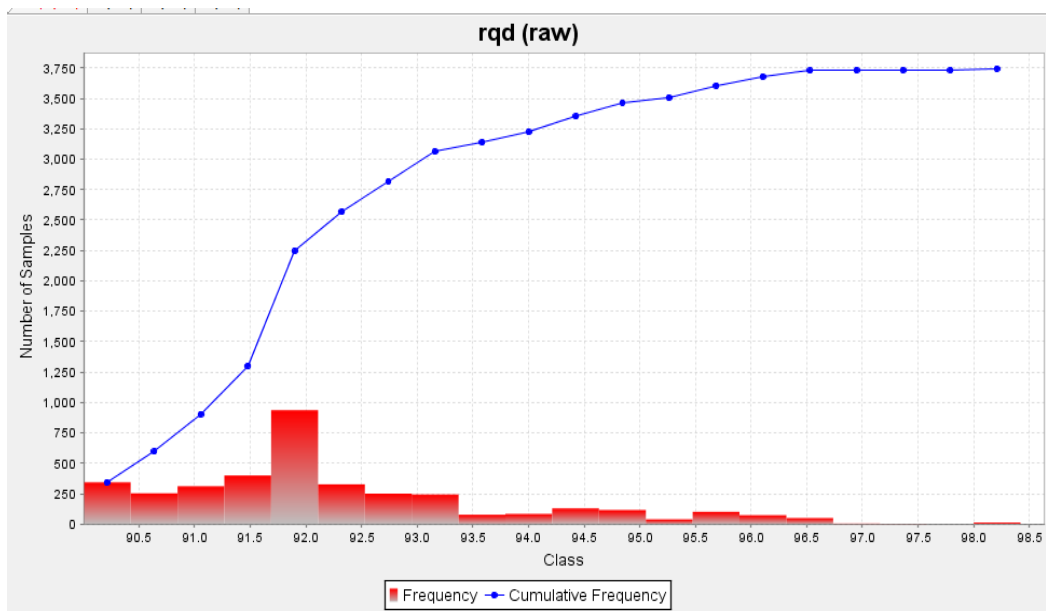
Σχήμα 4.17: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $75 < RQD \leq 90$

Η περιοχή με τιμές για δείκτη ποιότητας βραχομάζας RQD **90-100 %**, πολύ καλό πέτρωμα (ασβεστόλιθος ανωτέρου μαρμάρου), καλύπτει σχεδόν το σύνολο του υπόγειου. Εξαίρεση αποτελούν οι 4 στύλοι στην είσοδο του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.22).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων και για το RQD φανερώνει ενδείξεις ότι ο σχηματισμός του γραφιτικού σχιστόλιθου εισέρχεται μέσα στον υπόγειο χώρο από δεξιά. (Σχήμα 4.18).



Εικόνα 4.22: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $90 < RQD \leq 100$



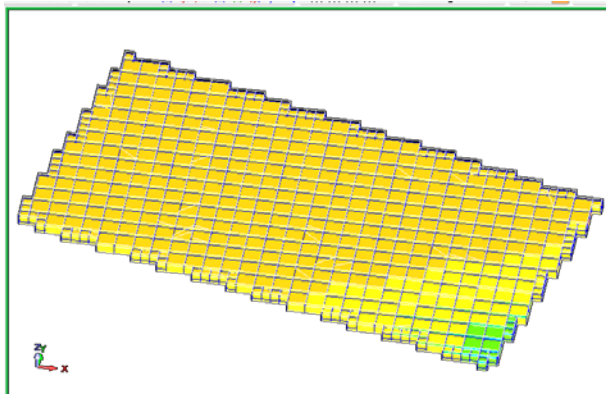
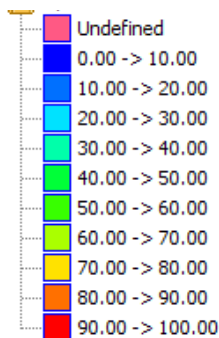
Σχήμα 4.18: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $90 < RQD \leq 100$

Οριζόντιες τομές

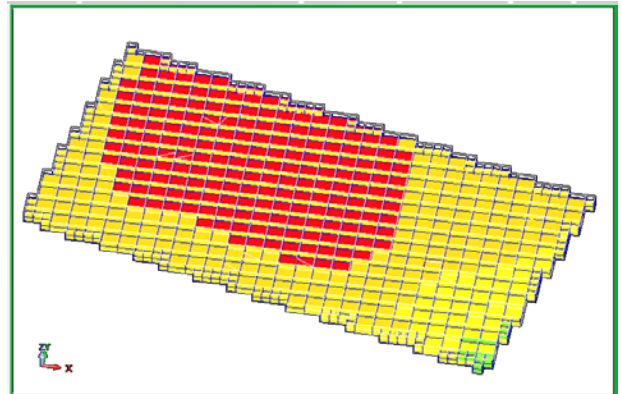
Η κατάσταση που παρουσιάζεται ύστερα από τις οριζόντιες τομές που έγιναν σε όλο το ύψος του χώρου (Εικόνα 4.23), ώστε να υπάρξει μεγαλύτερη ανάλυση, δείχνει ότι:

- Από ανατολικά προς δυτικά (δεξιά προς αριστερά) οι τιμές του RQD αυξάνονται
- Ο υπόγειος χώρος με εξαίρεση την περιοχή εισόδου βρίσκεται μέσα σε καλό πέτρωμα, ως προς τις τιμές RQD (%).

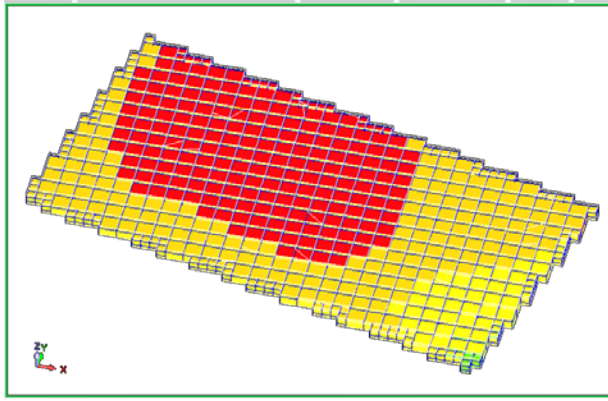
Φαίνεται ότι η ανάλυση του RQD, προσομοιώνει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες κατασκευής του υπόγειου χώρου, από τις αναλύσεις για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές για το RQD ήταν συνεχείς μέσα στις γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός ή ανάλυσή τους μέσω του downhole και του inverse distance να είναι καλύτερος.



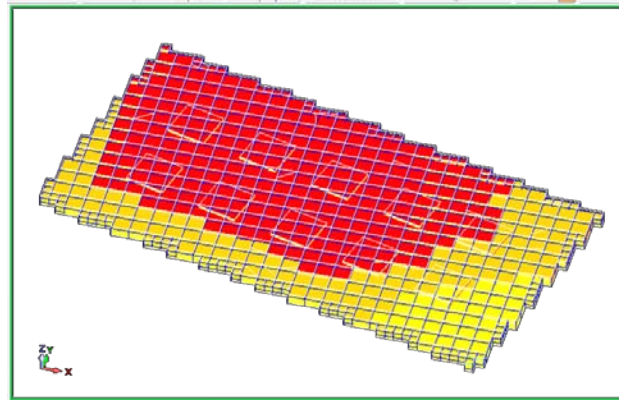
z=19.5m



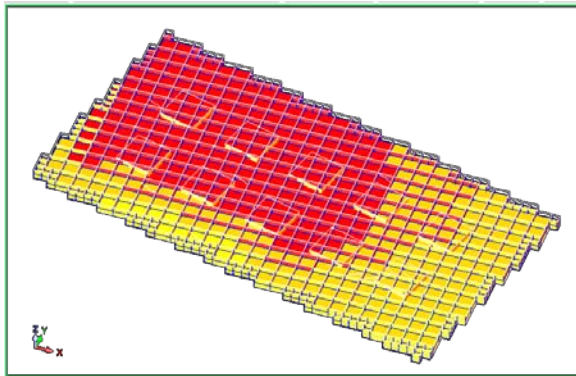
z=18m



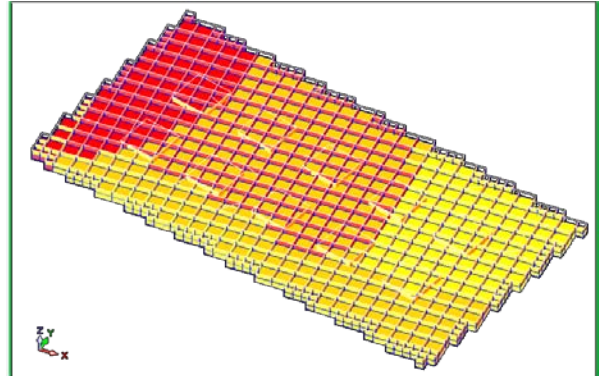
$z=17.5\text{m}$



$z=15.5\text{m}$



$z=14\text{m}$

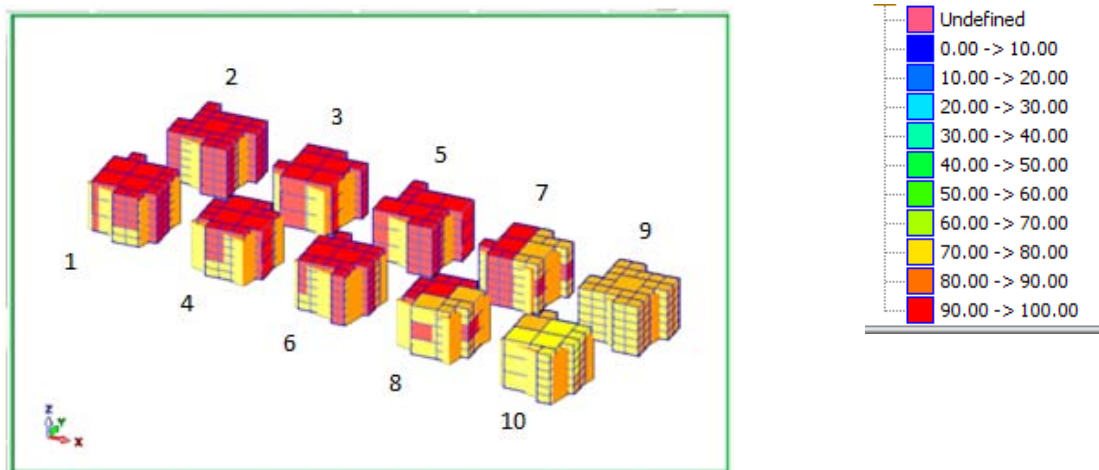


$z=12\text{m}$

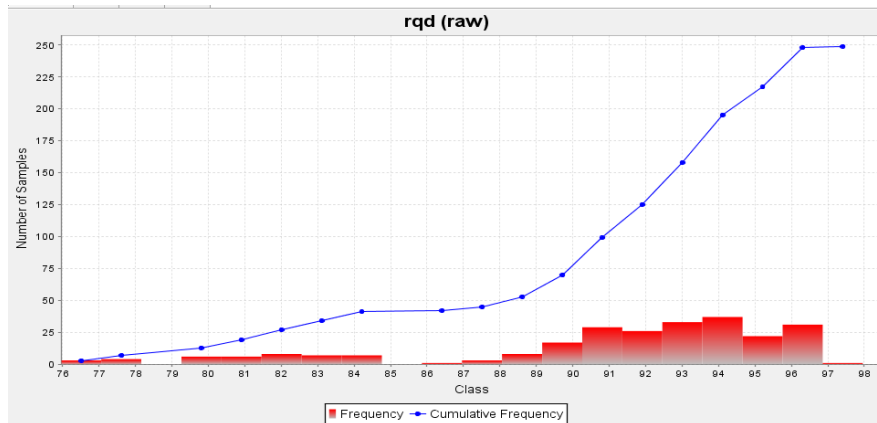
Εικόνα 4.23: Οριζόντιες τομές στον υπόγειο χώρο για RQD

Γραφική απεικόνιση της κατανομής του RQD στους στύλους

Εκτός από τον υπόγειο χώρο, έγινε γραφική απεικόνιση της κατανομής του RQD και για τους στύλους, οι οποίοι αποτελούν τα “δομικά στοιχεία” του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.24). Η μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών γίνεται μεταξύ 90-97% (Σχήμα 4.19).

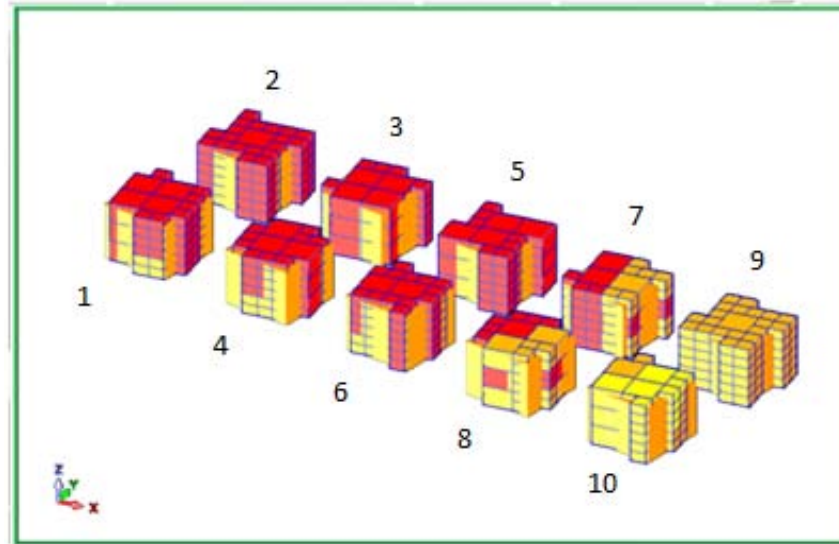
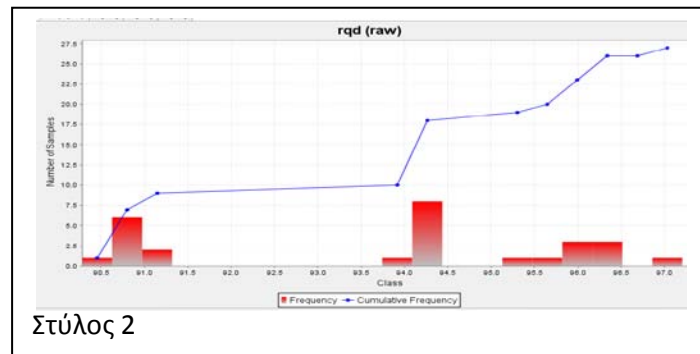
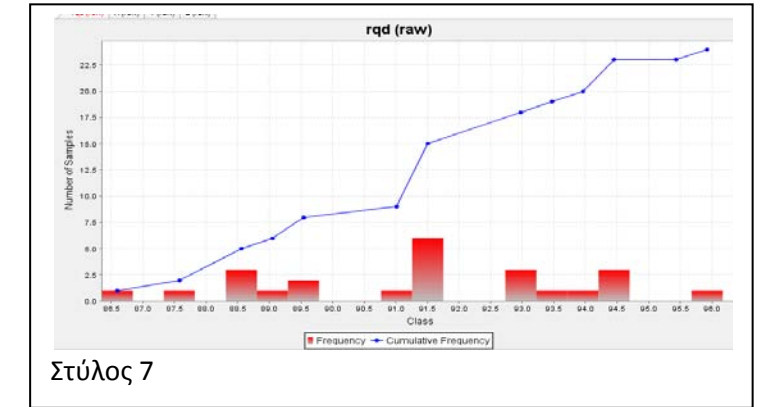
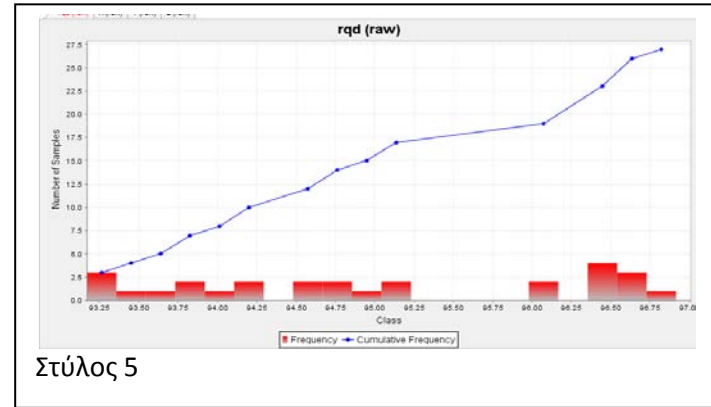
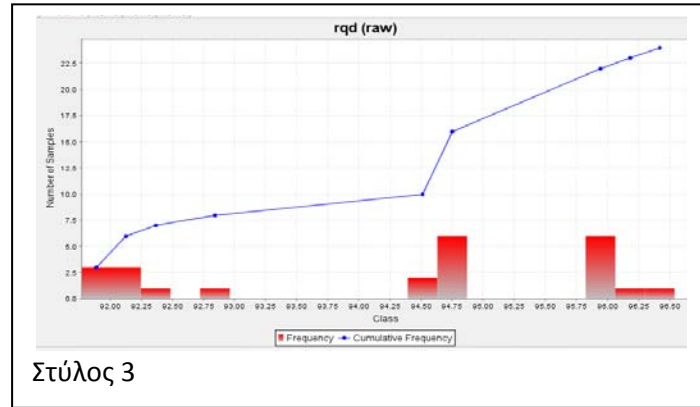


Εικόνα 4.24: Γραφική απεικόνιση της κατανομής του δείκτη RQD στους στύλους

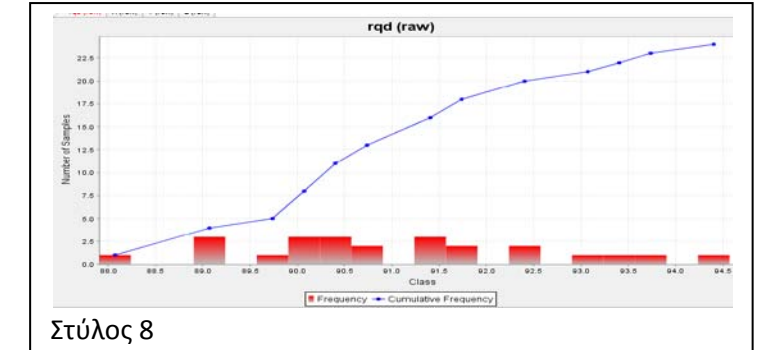
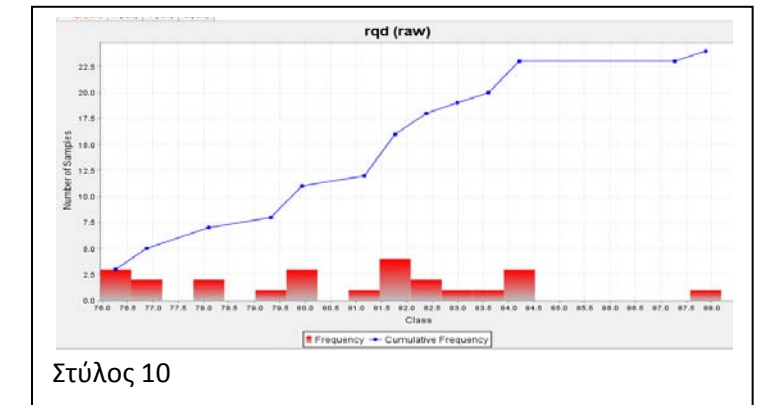
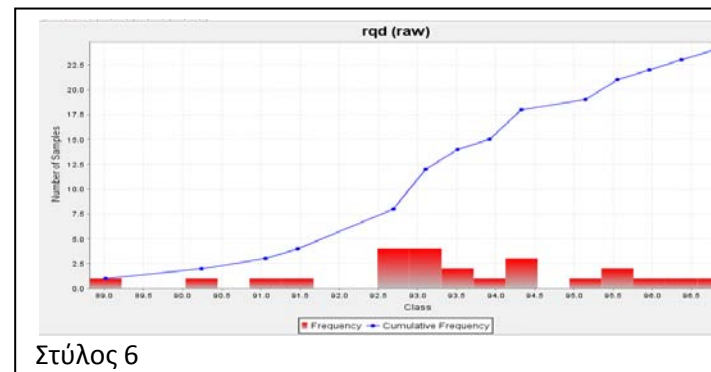
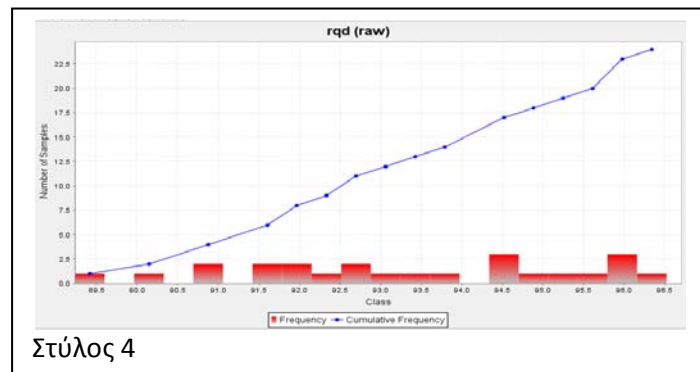
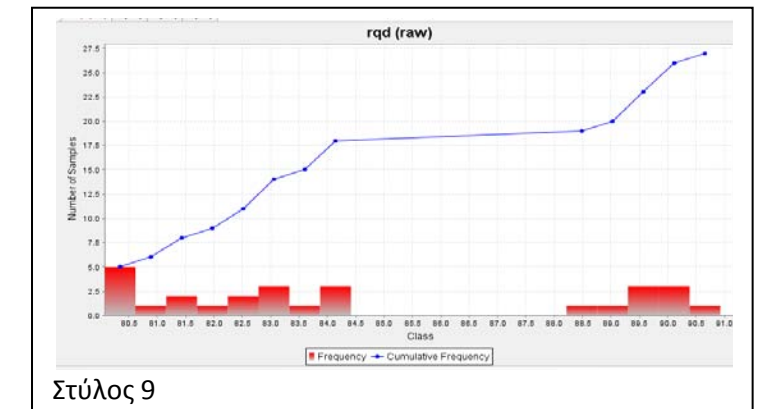
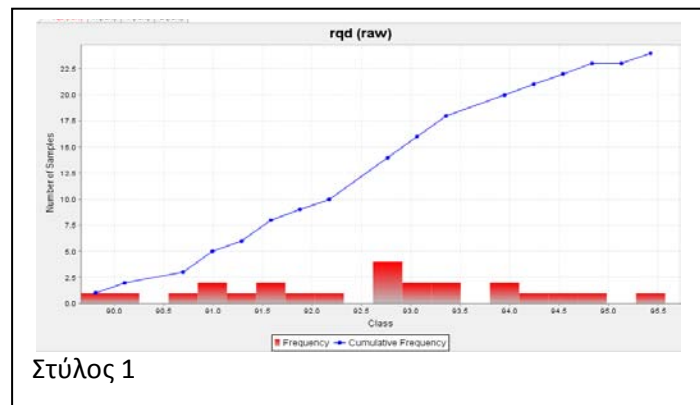


Σχήμα 4.19: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD στους στύλους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα/γραφήματα από την ανάλυση των στύλων (Σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.20: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD για κάθε στύλο



Στον πίνακα 4.6, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στατιστικά δεδομένα για τους στύλους. Η πιο χαμηλή τιμή του RQD συναντάται στο στύλο 10 με 75.89%, που είναι στην είσοδο του χώρου (επαφή στύλου με οροφή υπόγειου χώρου) και η αμέσως επόμενη χαμηλότερη τιμή συναντάται στον στύλο 9 με 80%.

Επίσης στους στύλους 9 και 10 παρατηρείται μεγαλύτερη τυπική απόκλιση (stdev), σε σχέση με τους υπόλοιπους στύλους, κάτι που μπορεί να δείχνει την ύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών τύπων και γεωλογικών σχηματισμών, όπως φάνηκε και από την ανάλυση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη.

Πίνακας 4.6: Τιμές RQD για στύλους

	n	min	max	mean	median	stdev
Στύλος 1	24	89,60	95,27	92,57	92,75	1,45
Στύλος 2	27	90,28	96,85	93,70	94,25	2,23
Στύλος 3	24	91,77	96,30	94,27	94,68	1,61
Στύλος 4	24	89,23	96,16	93,29	93,25	1,99
Στύλος 5	27	93,16	96,72	95,01	94,76	1,22
Στύλος 6	24	88,81	96,57	93,50	93,31	1,85
Στύλος 7	24	86,34	95,68	91,35	91,44	2,38
Στύλος 8	24	87,90	94,23	91,01	90,78	1,57
Στύλος 9	27	80,00	90,38	84,59	83,09	3,84
Στύλος 10	24	75,89	87,57	80,74	81,33	3,03

4.3.3. Μέτρο ελαστικότητας E

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν για την μέθοδο χωρικής παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (inverse distance) και το composite downhole για την ανάλυση του μοντέλου όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας των πετρωμάτων που υπάρχουν στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου είναι:

Πίνακας 4.7: Δεδομένα αναλύσεων για E

Μέτρο ελαστικότητας των πετρωμάτων E	
Minimum number of samples: 3	maximum search radius: 55
Maximum number of samples: 15	maximum vertical search distance: 2
Bearing: 0	major / semi-major: 1
Plunge: 0	major / minor: 1
Dip: 0	Composite downhole – 0,5/75%

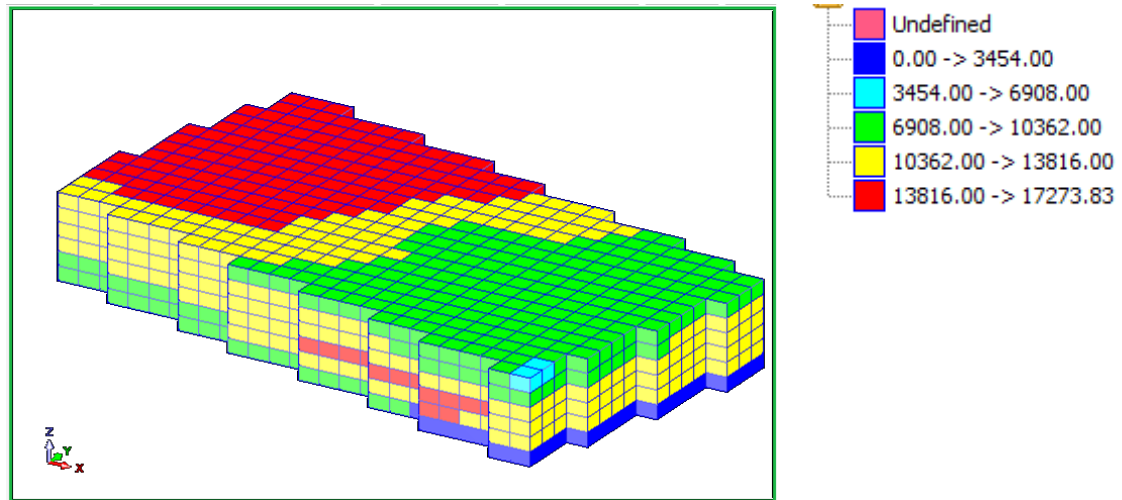
Η επιλογή των δεδομένων έγινε ώστε να γίνει ανάλυση σε όλες τις τιμές για το μέτρο ελαστικότητας που υπάρχουν στις γεωτρήσεις. Τα δείγματα για το μέτρο ελαστικότητας ήταν μόλις 59, σε σύνολο 325. Επομένως ήταν λίγα και η ανάλυσή τους δείχνει ενδεικτικά περισσότερο το τι συμβαίνει σαν τάση. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός των δειγμάτων επιλέχθηκε για να βγαίνει τιμή μέσω του interpolation. Αντίστοιχα η ακτίνα αναζήτησης επιλέχθηκε να είναι σφαίρα 1:1. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να μην μένει καμία γεώτρηση ανεξάρτητη, αλλά να υπάρχει επίδραση όλων των γεωτρήσεων στις αναλύσεις. Ο αριθμός των blocks είναι 2854.

Επίσης τα δεδομένα του μέτρου ελαστικότητας από τις γεωτρήσεις είναι λίγα και έπρεπε να υπάρχει μια ομοιόμορφη αναζήτηση, για την παραγωγή αποτελεσμάτων.

Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι 54m για αυτό έγινε επιλογή για 55m. Το μέγιστο ύψος για την αναζήτηση επιλέχθηκε στα 2m, ώστε να ελέγχει ικανοποιητικά τον υπόγειο χώρο που έχει μέγιστο ύψος 5,5m.

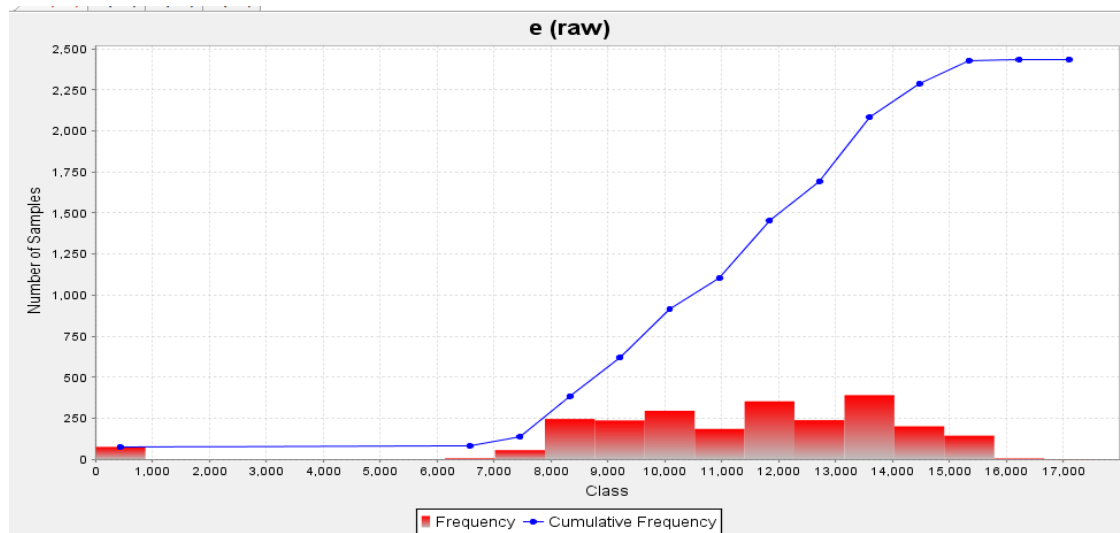
Το composite → downhole επιλέχθηκε να είναι 0,5/75%. Το composite length (0,5m) προέκυψε από το γεγονός ότι το πιο συχνά απαντώμενο μήκος δειγμάτων, όπως φάνηκε στις γεωτρήσεις που έγιναν, είναι τα 0,5m. Το 75% καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό την περίπτωση, καθώς όσο χαμηλώνει το ποσοστό χρειάζονται περισσότερα valid δείγματα, ενώ όσο μεγαλώνει, δυσκολεύει η κατάσταση ταύτισης του composite length με το μήκος της δειγματοληψίας.

Στην επόμενη εικόνα 4.25 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών του Ε στην περιοχή εξέτασης και το υπόμνημα της απεικόνισης. Φαίνεται ότι με κατεύθυνση από την οροφή προς το δάπεδο υπάρχει βελτίωση των χαρακτηριστικών του μοντέλου.



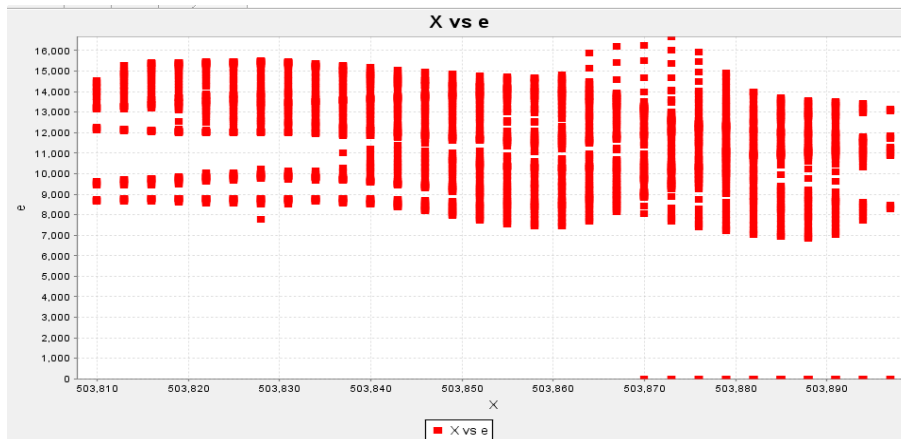
Εικόνα 4.25: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου με Ε

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η συγκέντρωση των τιμών για το μέτρο ελαστικότητας είναι 7000-16000MPa (Σχήμα 4.21)

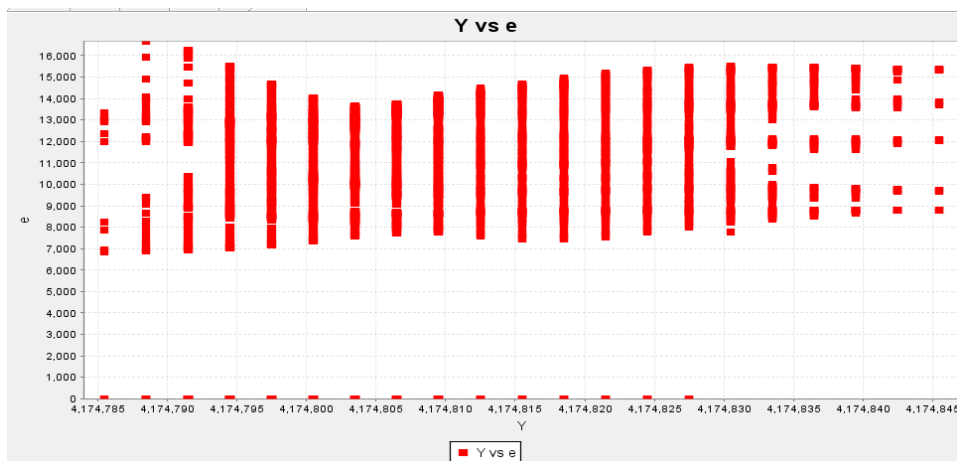


Σχήμα 4.21: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του Ε στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου

Στα δύο επόμενα διαγράμματα (Σχήμα 4.22 και 4.23) φαίνονται οι κατανομές των τιμών Ε κατά μήκος (x) και κατά πλάτος (y) της περιοχής εξέτασης.



Σχήμα 4.22: Κατανομή των τιμών E κατά μήκος (y) της περιοχής εξέτασης



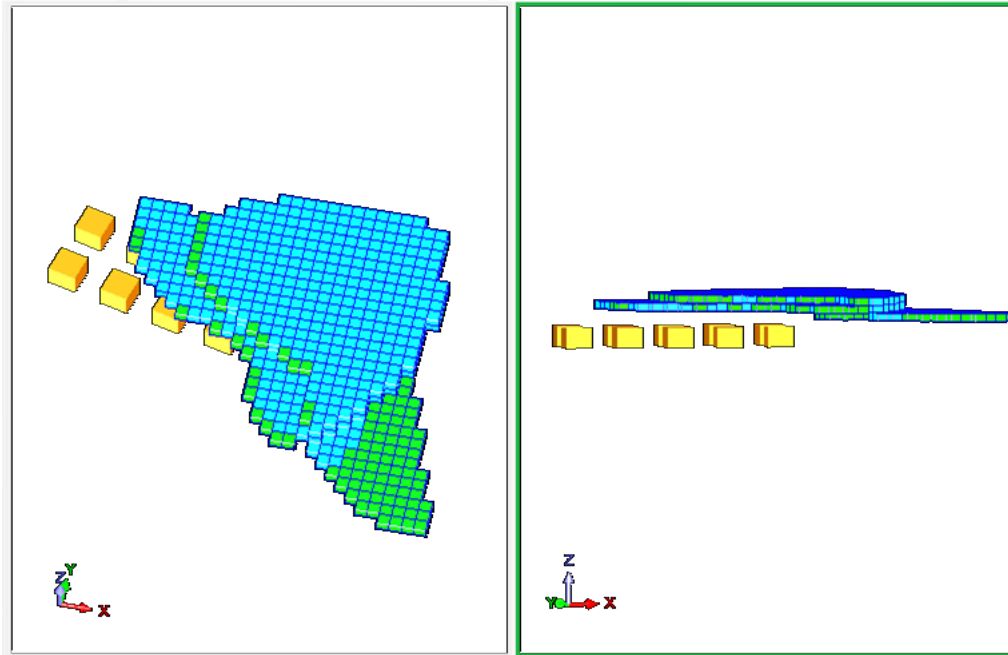
Σχήμα 4.23: Κατανομή των τιμών E κατά πλάτος (x) της περιοχής εξέτασης

Παρουσίαση του χώρου με blocks

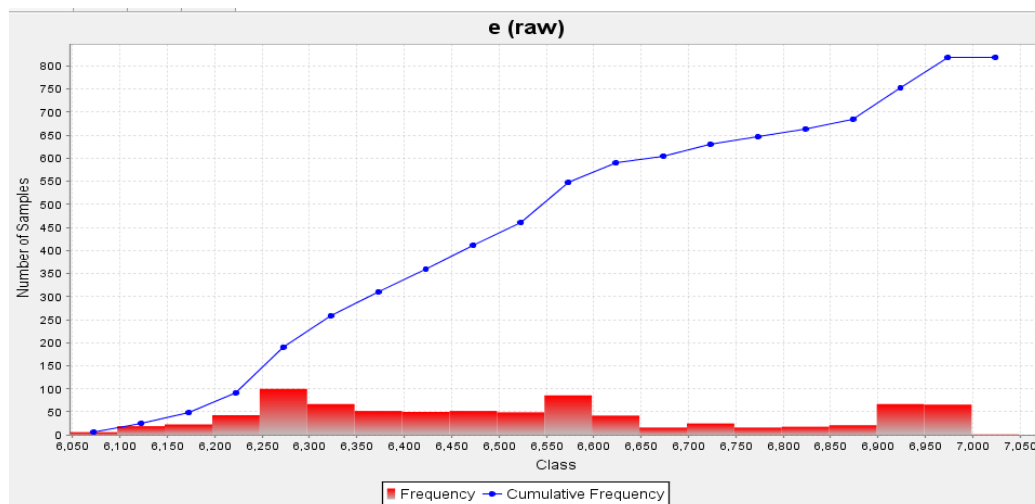
Για καλύτερη αντίληψη της κατάστασης στον υπόγειο χώρο, έγινε διαχωρισμός του μέτρου ελαστικότητας σε blocks σε MPa:

- 3500-7000
- 7000-10500
- 10500-14000
- 14000+

Στην περίπτωση **3500-7000 MPa** φαίνεται να υπάρχουν blocks μεταξύ 6000-7000MPa και οι τιμές είναι μακριά από αυτόν (+23m) (Εικόνα 4.26). Η συγκέντρωση των χαμηλών τιμών βρίσκεται κυρίως ανατολικά (δεξιά) του χώρου εξέτασης, ενώ από το διάγραμμα φαίνεται μια ομοιόμορφη κατανομή των τιμών (Σχήμα 4.24).

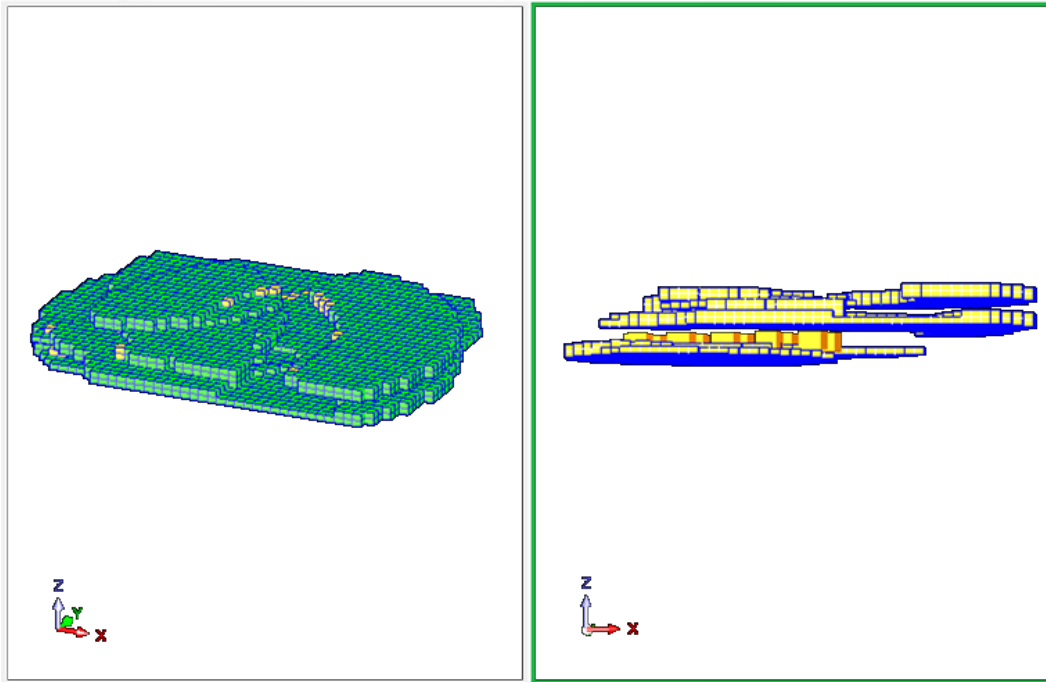


Εικόνα 4.26: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $3500 < E \leq 7000$

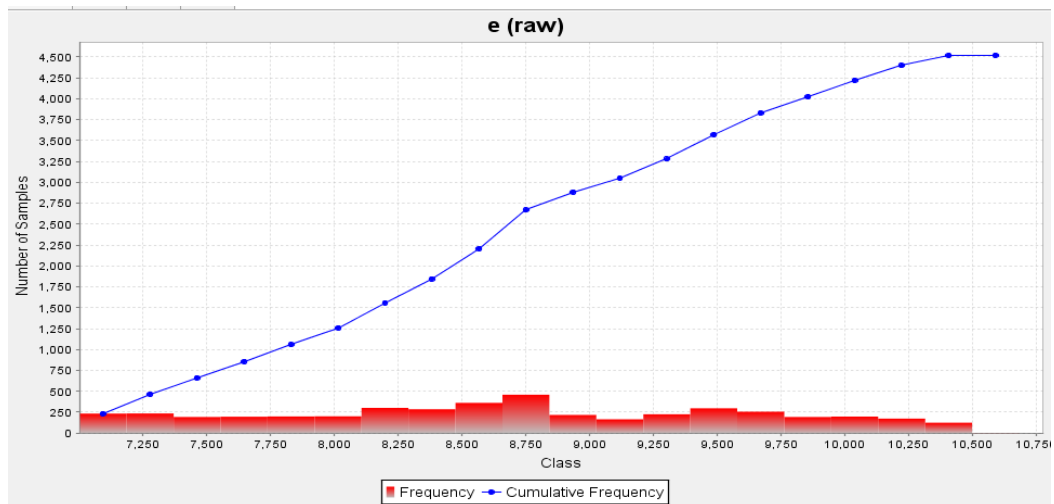


Σχήμα 4.24: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $3500 < E \leq 7000$

Στην περίπτωση $7000 \leq E \leq 10500$ MPa φαίνεται να μην υπάρχουν blocks μέσα στον υπόγειο χώρο και οι τιμές είναι γύρω από αυτόν (Εικόνα 4.27), ενώ από το διάγραμμα φαίνεται μια ομοιόμορφη κατανομή των τιμών (Σχήμα 4.25).

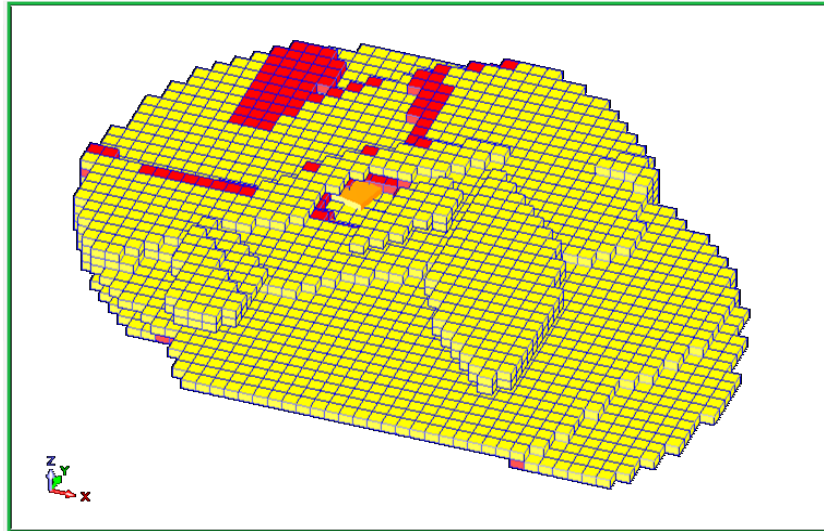


Εικόνα 4.27: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $7000 < E \leq 10500$

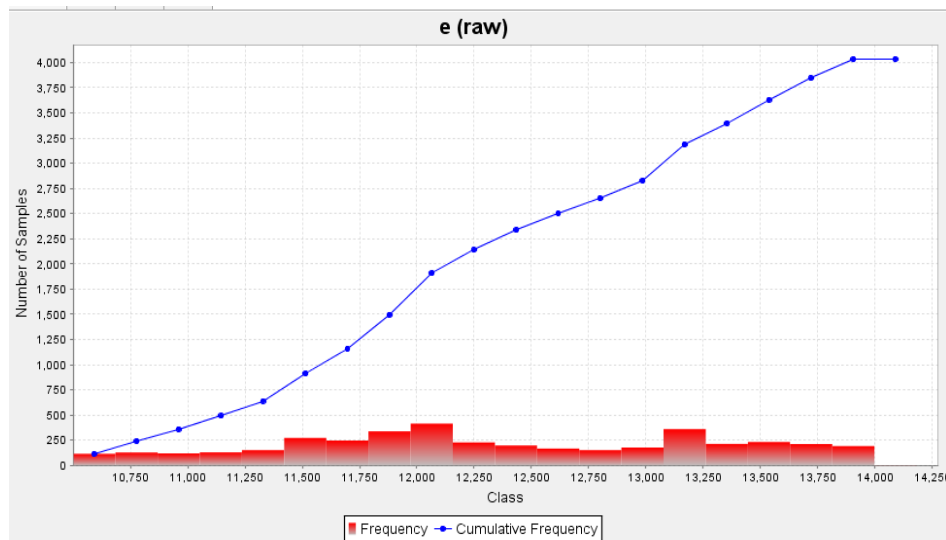


Σχήμα 4.25: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $7000 < E \leq 10500$

Από $10500 \leq E \leq 14000$ MPa φαίνεται ότι βρίσκεται το σύνολο του υπόγειου χώρου με εξαίρεση την οροφή στο κεντρικό τμήμα (Εικόνα 4.28). Στο διάγραμμα οι τιμές φαίνονται ομοιόμορφα κατανομημένες (Σχήμα 4.26).

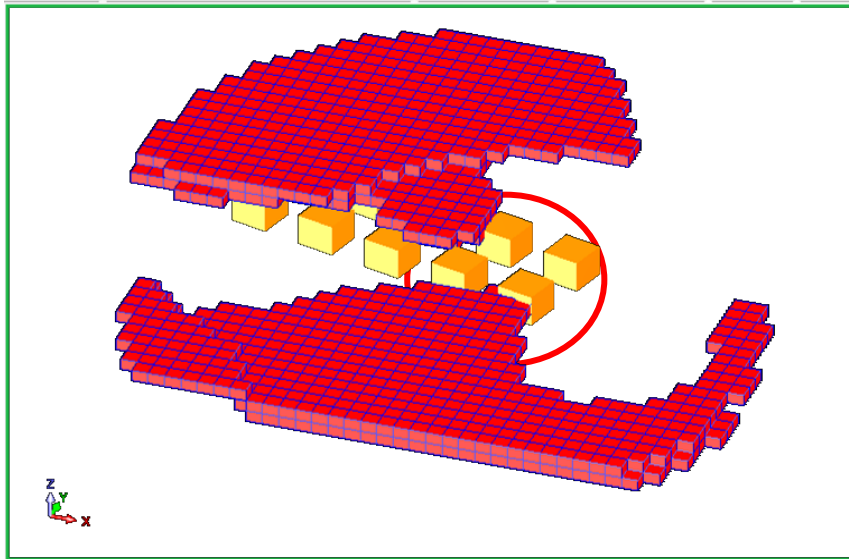


Εικόνα 4.28: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $10500 < E \leq 14000$

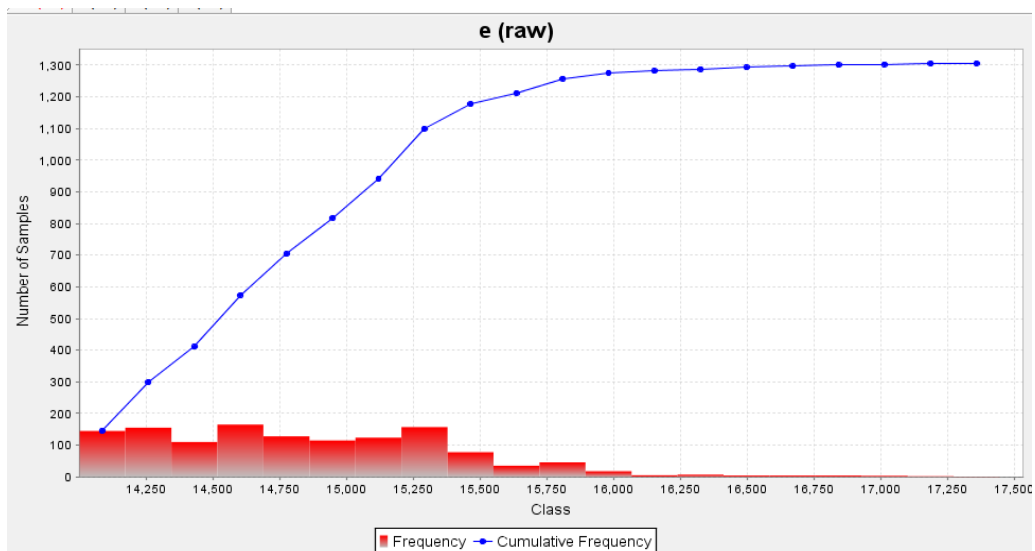


Σχήμα 4.26: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $10500 < E \leq 14000$

Για $E > 14000$ MPa υπάρχουν blocks χαμηλά στην είσοδο του χώρου (Εικόνα 4.29). Οι τιμές φτάνουν μέχρι τα 15750MPa (Σχήμα 4.27).



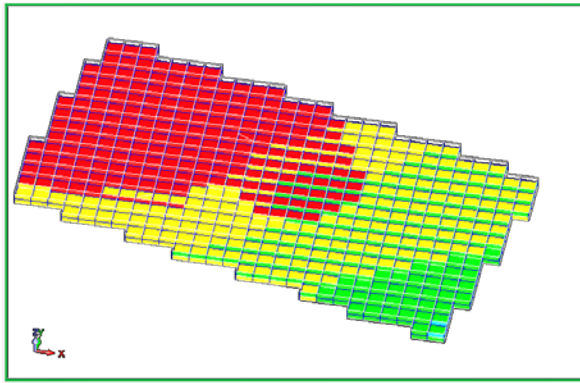
Εικόνα 4.29: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $E > 14000$



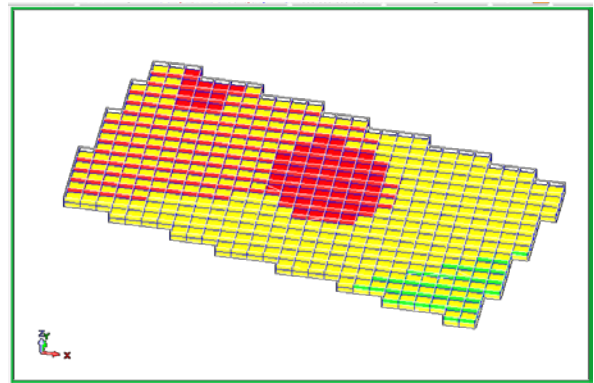
Σχήμα 4.27: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $E > 14000$

Οριζόντιες τομές

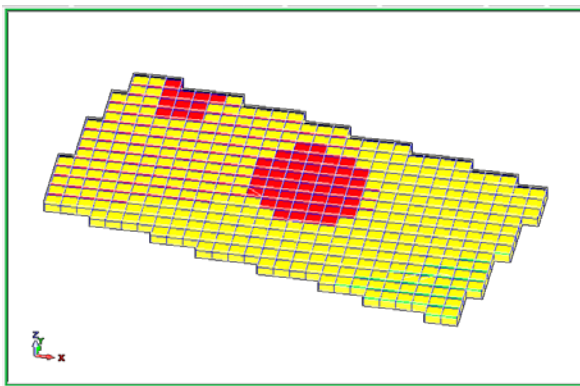
Οι τομές μέχρι τα +17,5m (οροφή του υπόγειου χώρου) δείχνουν ότι από ανατολικά προς δυτικά υπάρχουν καλύτερες τιμές για το μέτρο ελαστικότητας. Στα +15,5m φαίνεται να υπάρχει καλό πέτρωμα, κάτι που επαναλαμβάνει τις πραγματικές συνθήκες κατασκευής. Στα +14m έως +12m φαίνεται μια αλλαγή της κατάστασης προς χειρότερες συνθήκες (Εικόνα 4.30).



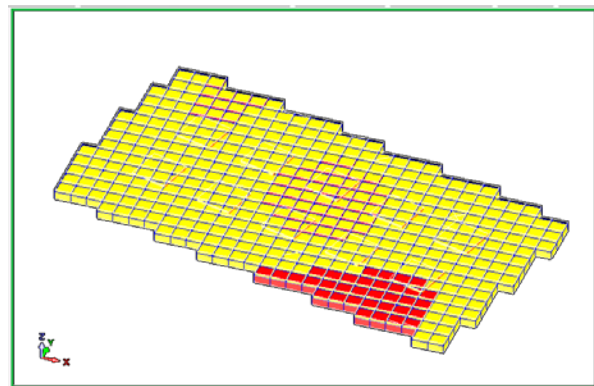
z=19.5m



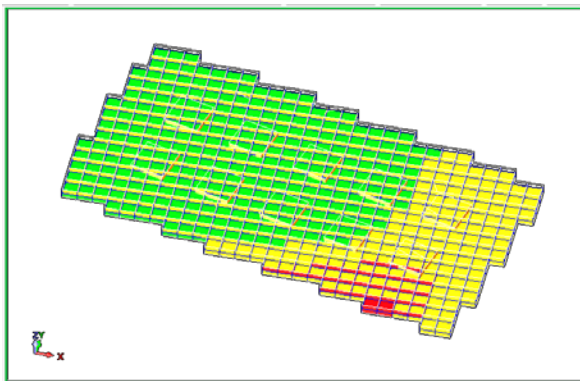
z=18m



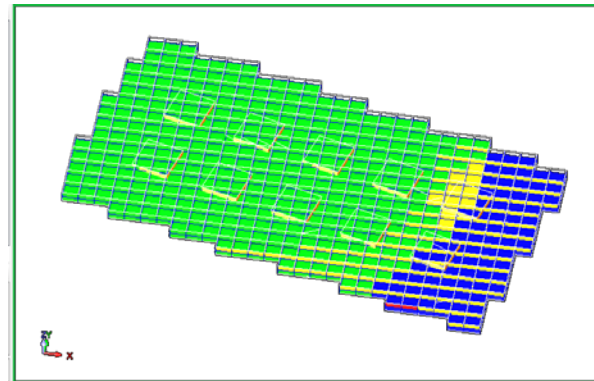
Z=17,5m



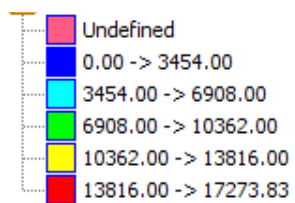
z=15,5m



z=14m



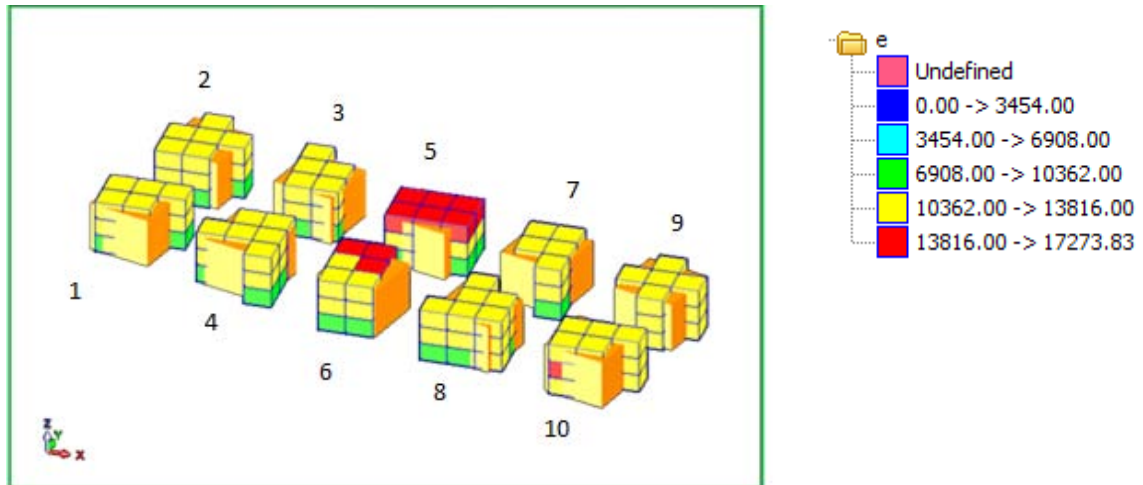
z=12m



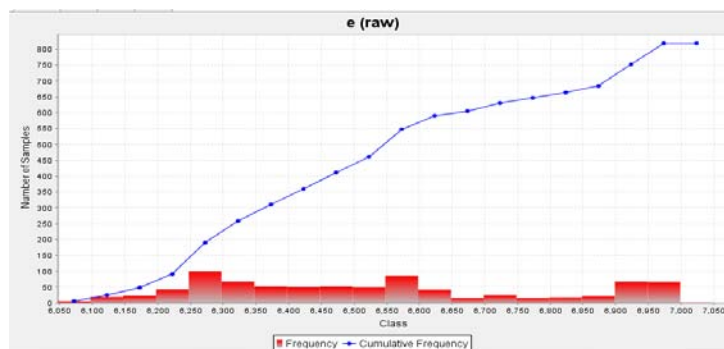
Εικόνα 4.30: Οριζόντιες τομές στον υπόγειο χώρο για Ε

Γραφική απεικόνιση της κατανομής του E στους στύλους

Εκτός από την εγγύς περιοχή του υπόγειου χώρου, έγινε ανάλυση και για τους στύλους, οι οποίοι αποτελούν τα “δομικά στοιχεία” του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.31). Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των τιμών από 6100 και πάνω (Σχήμα 4.28).

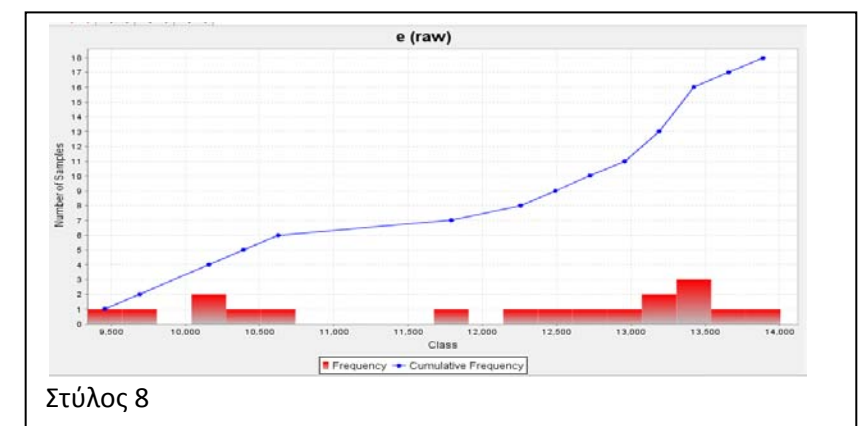
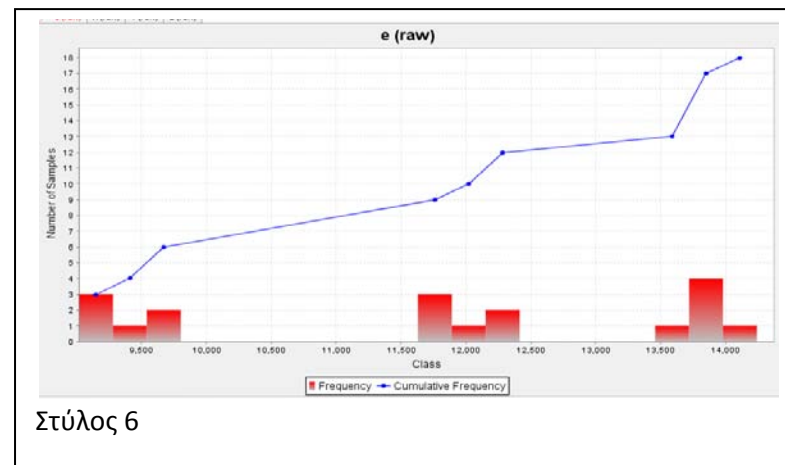
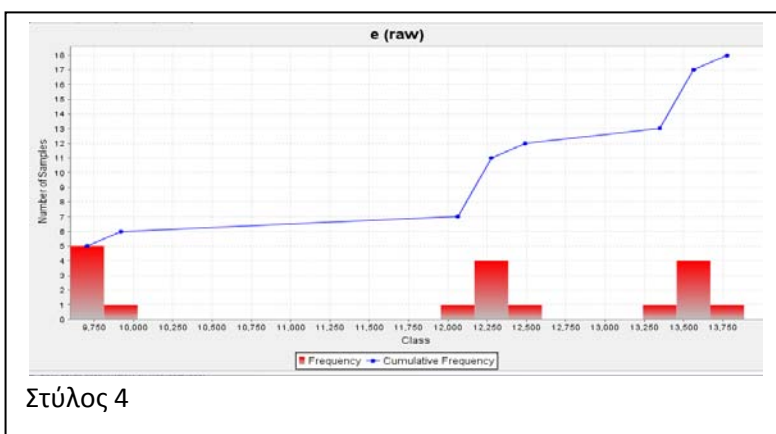
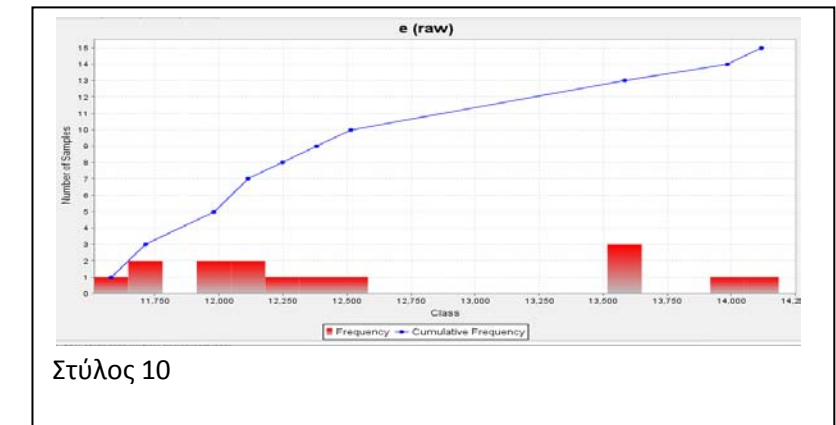
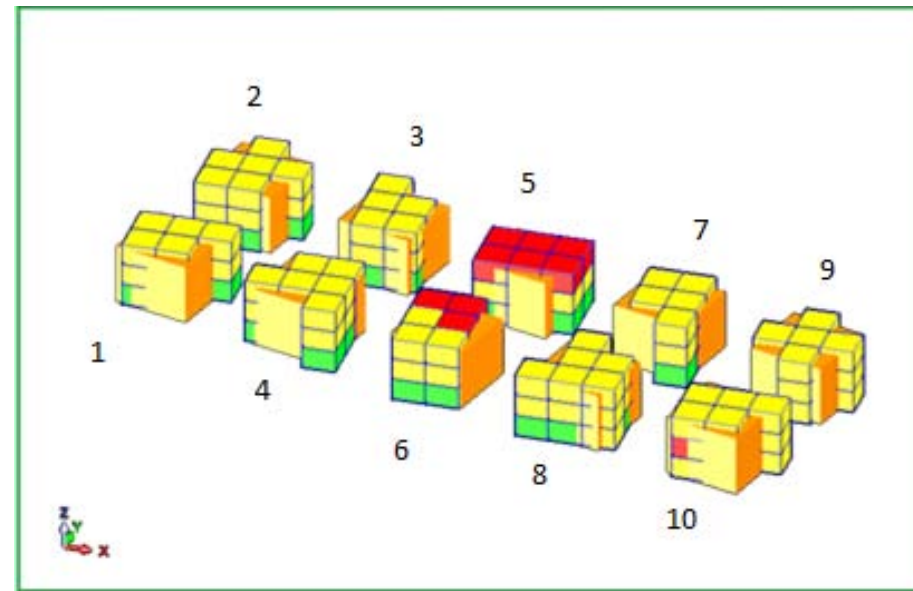
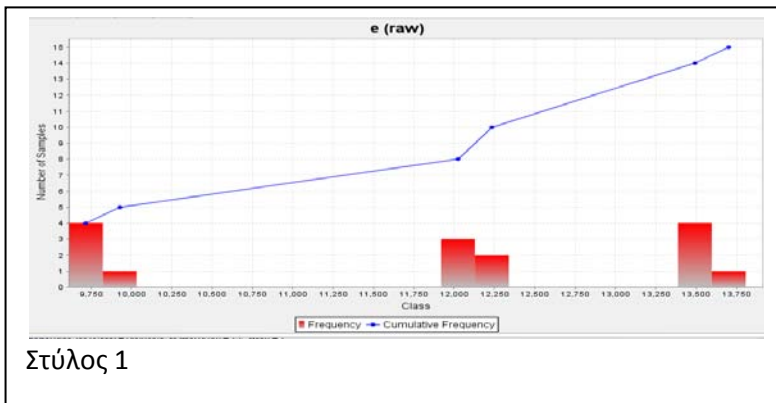
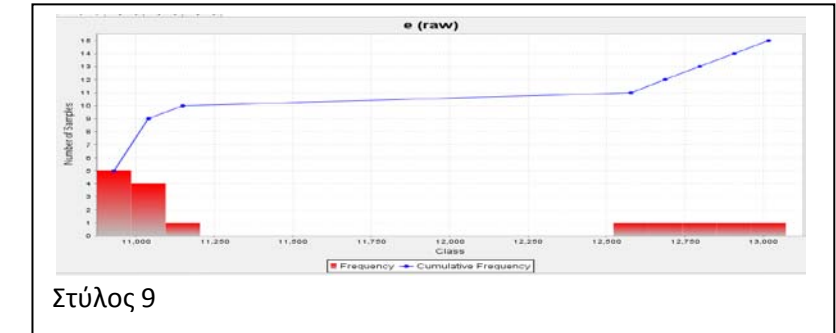
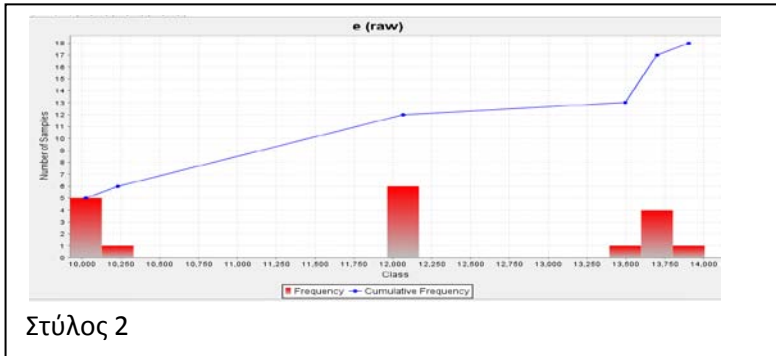
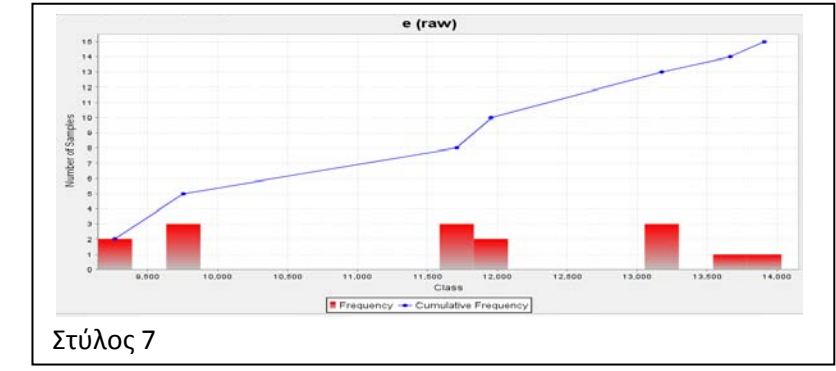
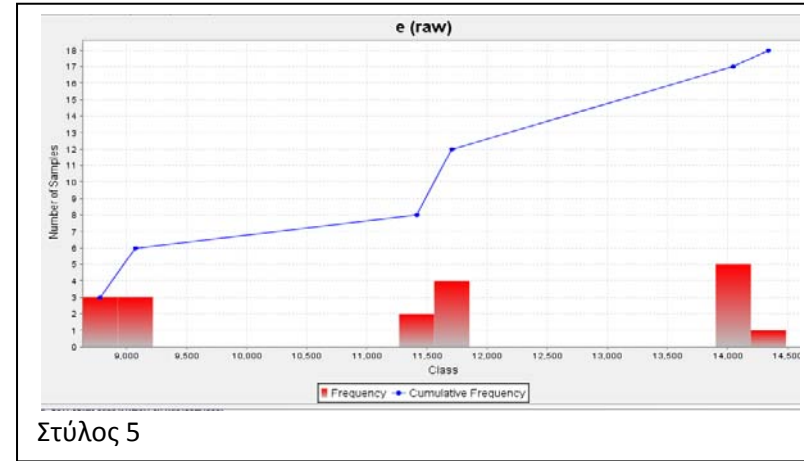
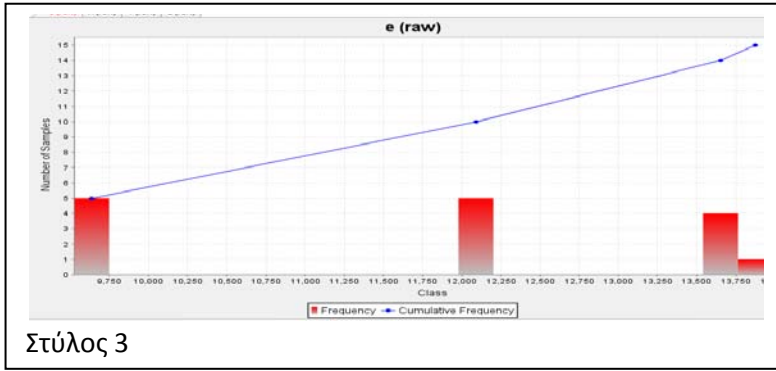


Εικόνα 4.31: Γραφική απεικόνιση της κατανομής του E στους στύλους



Σχήμα 4.28: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του E στους στύλους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα/γραφήματα από την ανάλυση των στύλων (Σχήμα 4.29).



Στον πίνακα 4.8, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στατιστικά δεδομένα για τους στύλους. Η πιο χαμηλή τιμή του E συναντάται στο στύλο 5 με 8634, που είναι στο κεντρικό τμήμα του χώρου .

Επίσης στους στύλους 5 και 6 παρατηρείται μεγαλύτερη τυπική απόκλιση (stdev), σε σχέση με τους υπόλοιπους στύλους, κάτι που μπορεί να δείχνει την ύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών τύπων, κάτι όμως που δεν αποδείχτηκε κατά την διάρκεια κατασκευής του υπόγειου χώρου.

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των στύλων για τον υπόγειο χώρο χαρακτηρίζονται ελλιπή ως ένα βαθμό. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη στοιχείων από τα δεδομένα των γεωτρήσεων και την δυσκολία του προγράμματος για χωρική παρεμβολή (interpolation). Επιπλέον τα δείγματα-blocks των στύλων είναι 15-18 ενώ στα προηγούμενα μοντέλα (UCS, RQD) 24 και 27 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.8: Τιμές E για στύλους

	n	min	max	mean	median	stdev
Στύλος 1	15	9612	13597	11785	12005	1574
Στύλος 2	18	9922	13801	11910	12056	1501
Στύλος 3	15	9525	13764	11794	12036	1669
Στύλος 4	18	9598	13670	11855	12293	1593
Στύλος 5	18	8634	14193	11502	11592	2121
Στύλος 6	18	9017	13980	11714	11949	1839
Στύλος 7	15	9142	13787	11581	11828	1640
Στύλος 8	18	9342	13773	12030	12601	1474
Στύλος 9	15	10874	12962	11587	11028	854
Στύλος 10	15	11512	14051	12611	12275	863

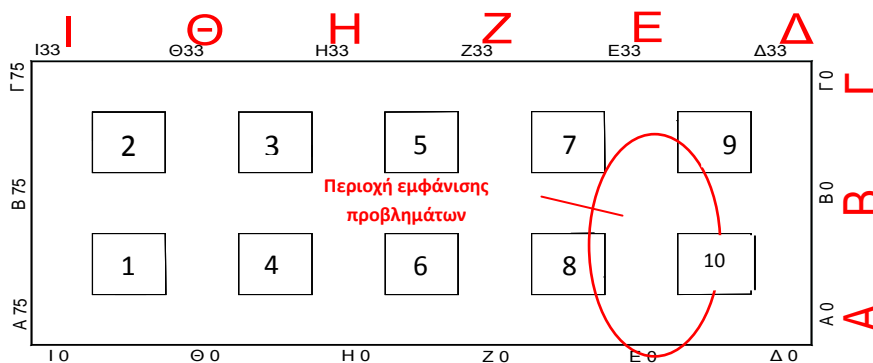
4.4. Σύγκριση της πραγματικής κατάστασης με τα αποτελέσματα των αναλύσεων

Ύστερα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν μέσα από τις αναλύσεις, σε αυτή την παράγραφο γίνεται προσπάθεια αντιπαραβολής της πραγματικής κατάστασης με τα αποτελέσματα των χωρικών αναλύσεων.

Κάτι τέτοιο θα δώσει ένα μέτρο της ακρίβειας των μοντελοποιήσεων, στο βαθμό που θα μπορέσει να υποδείξει διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που αναλύονται και να τα συνδέσει με τις πραγματικές συνθήκες/προβλήματα που συναντήθηκαν κατά την φάση κατασκευής του έργου.

4.4.1. Γεωτεχνικά προβλήματα στην περιοχή της εισόδου κατά την κατασκευή

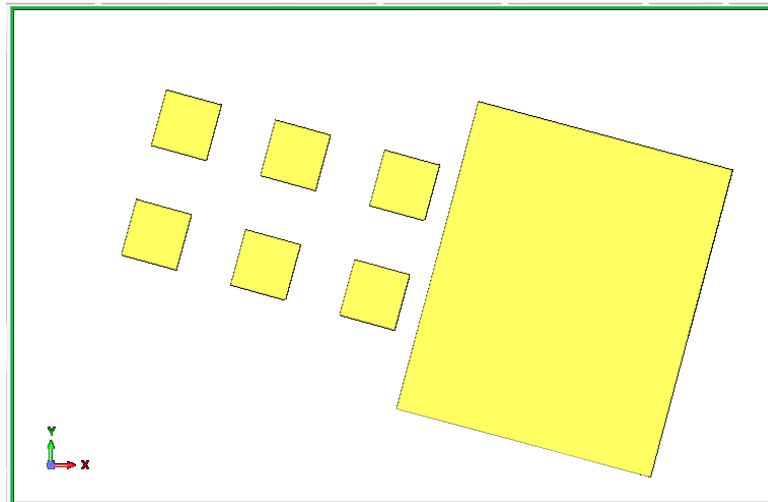
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο_3, κατά το στάδιο ολοκλήρωσης της σήραγγας προσπέλασης, παρατηρήθηκε μια σημαντική επιδείνωση της ποιότητας του ασβεστολιθικού πετρώματος. Σταδιακά αποκαλύφθηκε διείσδυση του στρώματος του γραφιτικού σχιστόλιθου στο επίπεδο κατασκευής του έργου, και πιο συγκεκριμένα στη στέψη και σε μικρό τμήμα της παρειάς του θαλάμου (επίπεδο +16,5 m έως +17,0 m περίπου) (Σχήμα 4.30). Η εμφάνιση του γραφιτικού σχιστόλιθου στην οροφή του χώρου είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αστοχιών μικρής κλίμακας, οι οποίες εκδηλώθηκαν κυρίως με καταπτώσεις οροφής και δημιουργίας υπερεκσκαφών. Το ζήτημα ήταν σημαντικό διότι η περιοχή εκδήλωσής τους ήταν στο σημείο εισόδου του υπόγειου χώρου με αρνητικές συνέπειες για την εξέλιξη του έργου όπως ματαίωση του έργου και οικονομικές απώλειες.



Σχήμα 4.30: Περιοχή εμφάνισης προβλημάτων

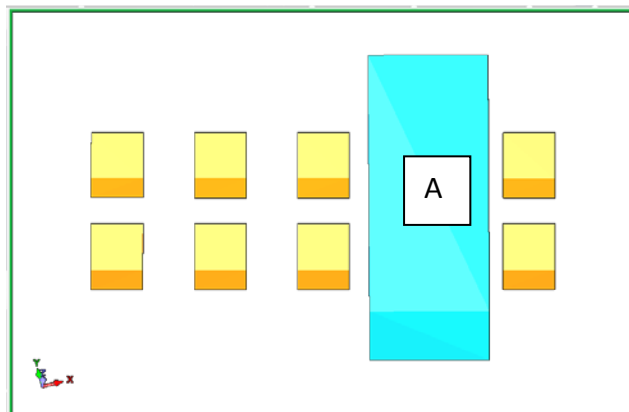
4.4.2. Ερμηνεία αναλύσεων μοντελοποίησης σε τρεις περιοχές στον υπόγειο χώρο

Για την εξέταση και την διακρίβωση των δεδομένων στην περιοχή εισόδου του υπόγειου χώρου, δημιουργήθηκε ένας χωρικός περιορισμός (Εικόνα 4.32). Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει τους 4 στύλους στην περιοχή της εισόδου του υπόγειου χώρου, στο σημείο που παρατηρήθηκαν προβλήματα, λόγω παρουσίας γραφιτικού σχιστόλιθου.

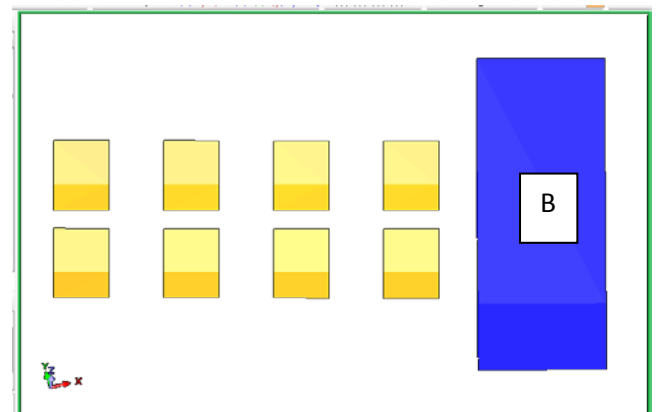


Εικόνα 4.32: Περιοχή εισόδου

Η περιοχή εισόδου στη συνέχεια χωρίστηκε σε 2 περιοχές ώστε να εντοπιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι αδύναμες ζώνες (Εικόνα 4.33).



(α)



(β)

Εικόνα 4.33: (α) Περιοχή Α στην είσοδο
(β) Περιοχή Β στην είσοδο

Για όλες τις περιπτώσεις που αναλύονται στη συνέχεια οι περιοχές χωρίζονται καθ' ύψος (+10m έως +16m_δάπεδο και +16m έως +23m_οροφή). Και στις 2 περιπτώσεις διαχωρισμού κατά z, η ανάλυση προχωράει μέχρι 2m χαμηλότερα από το δάπεδο (+12m) και 5,5m υψηλότερα από την οροφή (+23m).

Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη

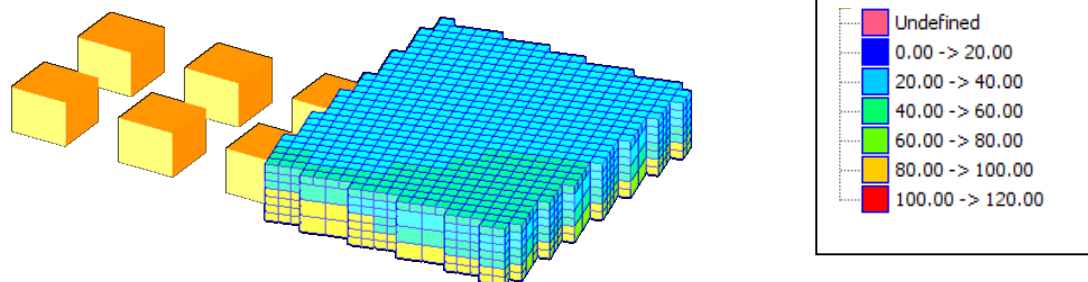
Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας (Πίνακας 4.9) με τα στοιχεία για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη των περιοχών (Περιοχή εισόδου, Περιοχή Α και Περιοχή Β). Όπως προκύπτουν είναι φανερό ότι υπάρχουν μειωμένες τιμές για UCS στην οροφή των εξεταζόμενων περιοχών, σε σχέση με το δάπεδο, κάτι που θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

Πίνακας 4.9: Στοιχεία για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη των 3 περιοχών

	n	min	max	mean	median	stdev
Περιοχή εισόδου	1085	22,10	103,00	66,95	68,56	21,44
Περιοχή εισόδου δάπεδο	465	52,50	103,00	86,46	87,37	10,30
Περιοχή εισόδου_οροφή	620	22,10	81,64	52,30	50,70	15,00
Περιοχή Α	581	22,10	98,62	66,32	69,92	18,66
Περιοχή Α_δάπεδο	249	52,50	98,62	80,82	81,82	9,89
Περιοχή Α_οροφή	332	22,10	81,64	55,45	54,50	16,14
Περιοχή Β	567	25,30	103,00	67,70	66,45	23,97
Περιοχή Β_δάπεδο	243	78,30	103,00	92,50	91,60	6,40
Περιοχή Β_οροφή	324	25,30	80,10	49,08	48,28	12,86

Περιοχή εισόδου οροφή

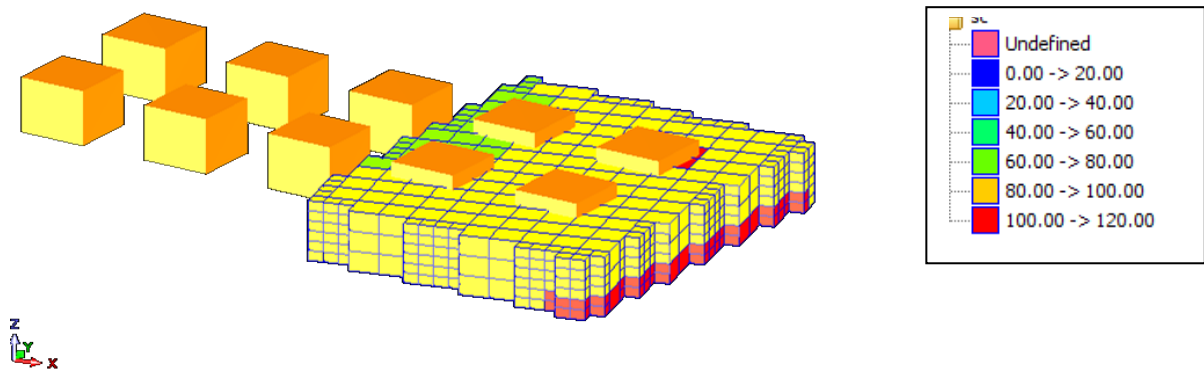
Από την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από την χωρική ανάλυση, φαίνεται στην οροφή του υπόγειου χώρου υπάρχουν χαμηλές τιμές μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη (Εικόνα 4.34). Οι τιμές είναι πιο χαμηλές ανατολικά (δεξιά), έξω από την εγγύς περιοχή του υπόγειου χώρου, κάτι που φανερώνει ενδείξεις για την ύπαρξη ασθενέστερου γεωλογικού σχηματισμού (γραφιτικός σχιστόλιθος) σε σχέση με τον υπόλοιπο υπόγειο χώρο (ασβεστόλιθος Ανωτέρου μαρμάρου).



Εικόνα 4.34: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή εισόδου_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή εισόδου δάπεδο

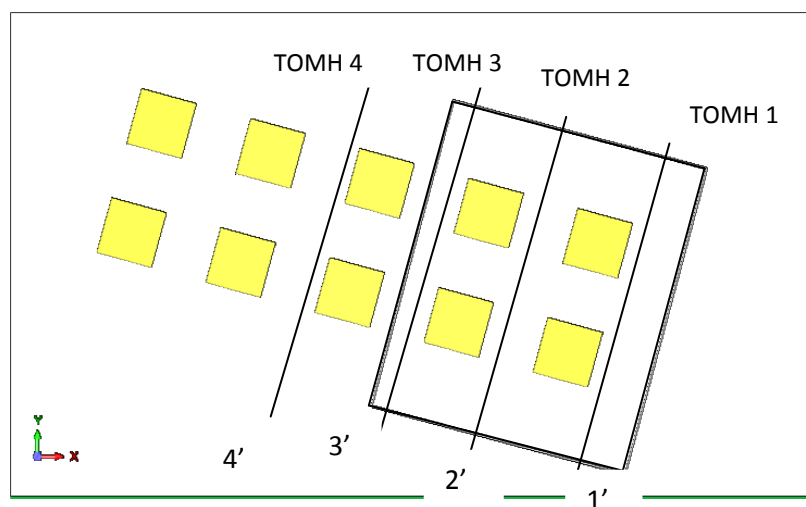
Από τα +10m έως +16m φαίνεται ότι οι τιμές σε UCS του υπόγειου χώρου είναι υψηλές, ενώ ανατολικά στο δάπεδο υπάρχουν υψηλότερες τιμές, κάτι που δείχνει την βελτίωση της κατάστασης προς τα κάτω (Εικόνα 4.35).



Εικόνα 4.35: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή εισόδου_δάπεδο του υπόγειου χώρου

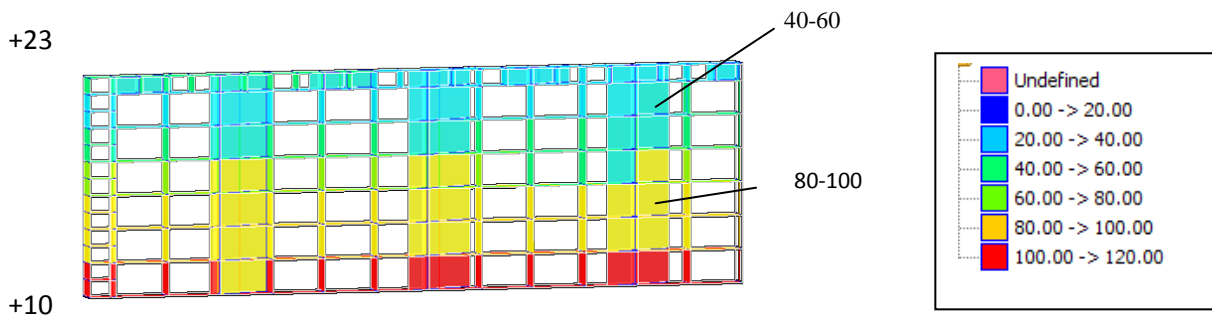
Τομές κατά πλάτος του υπόγειου χώρου

Για καλύτερη εξέταση της περιοχής, έγιναν τομές κατά πλάτος του υπόγειου χώρου, (Εικόνα 4.36 και 4.37) ώστε να φανεί η βελτίωση της κατάστασης για UCS από την οροφή προς το δάπεδο, καθώς και από ανατολικά προς δυτικά (Α-Δ).

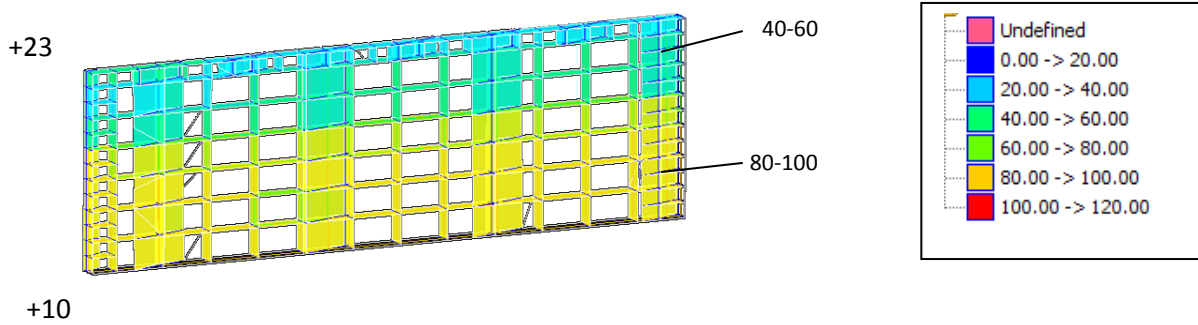


Εικόνα 4.36: Τομές κατά πλάτος του υπόγειου χώρου

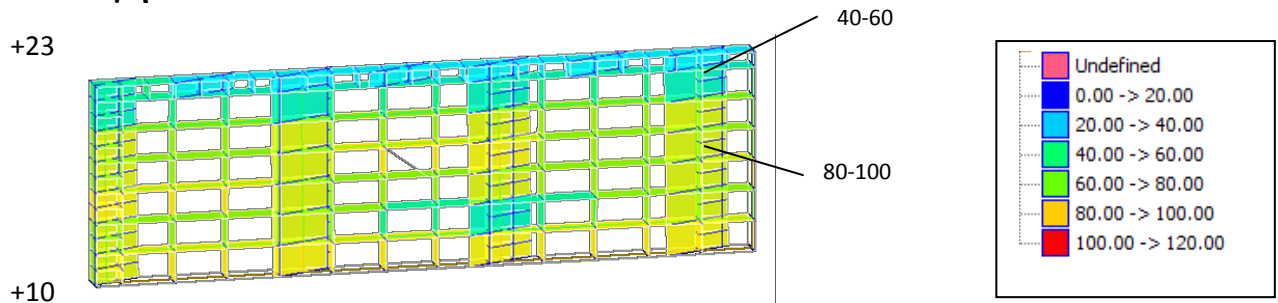
Τομή 1-1'



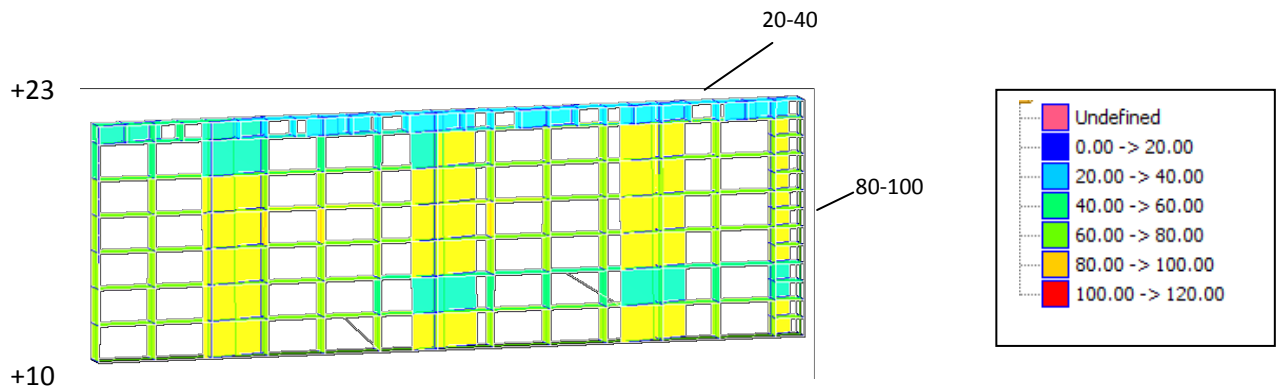
Τομή 2-2'



Τομή 3-3'



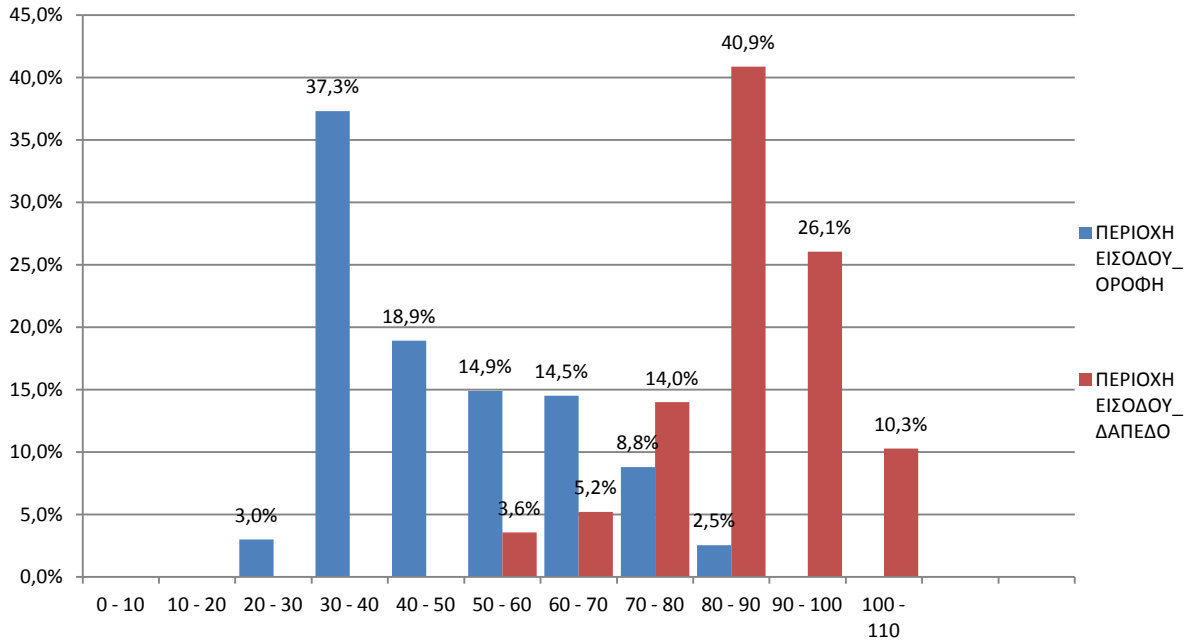
Τομή 4-4'



Εικόνα 4.37: Απεικόνιση των τομών για UCS κατά πλάτος του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για UCS

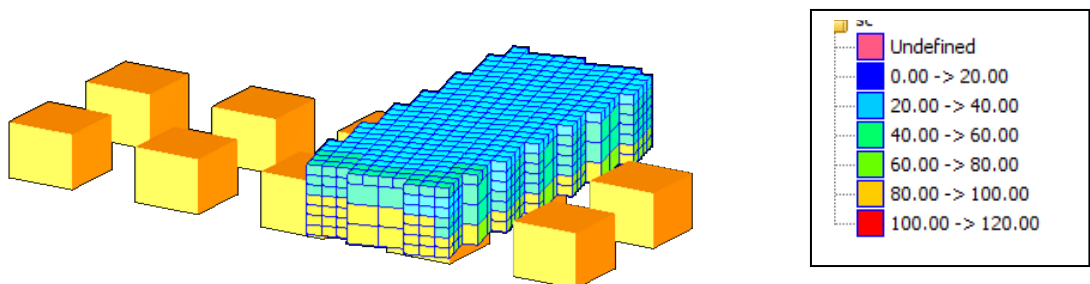
Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου της περιοχής εισόδου, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 60% των τιμών UCS που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <50MPa, ενώ το σύνολο των τιμών UCS για το δάπεδο είναι >50MPa. Στο δάπεδο επίσης, το 40% είναι στο εύρος τιμών 80-90MPa, ενώ στην οροφή το 37% βρίσκεται στο εύρος 30-40MPa (Σχήμα 4.31).



Σχήμα 4.31: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για UCS

Περιοχή Α_οροφή

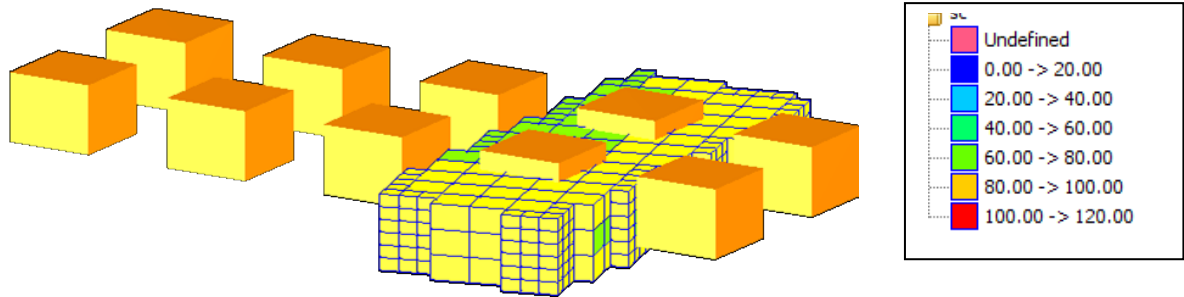
Από την χωρική ανάλυση της περιοχής Α, φαίνονται χαμηλές τιμές για UCS στην οροφή (Εικόνα 4.38).



Εικόνα 4.38: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Α_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή Α _ δάπεδο

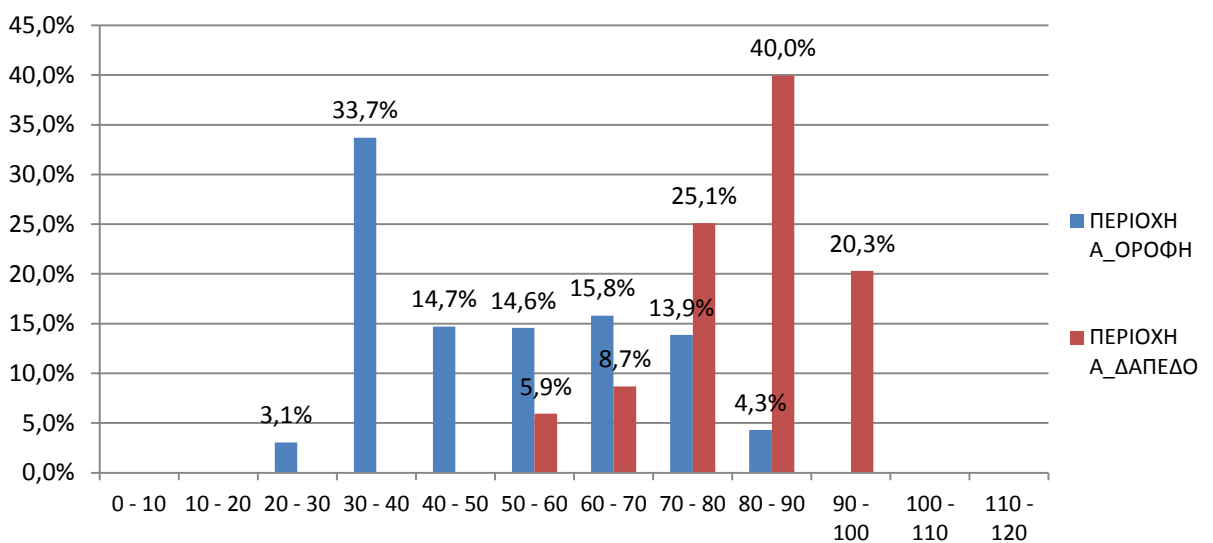
Η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά στο δάπεδο έως το +16m, κάτι που επαληθεύεται και από την πραγματική κατάσταση που αντιμετωπίστηκε κατά την διάρκεια της κατασκευής (Εικόνα 4.39).



Εικόνα 4.39: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Α_οροφή του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Α για UCS

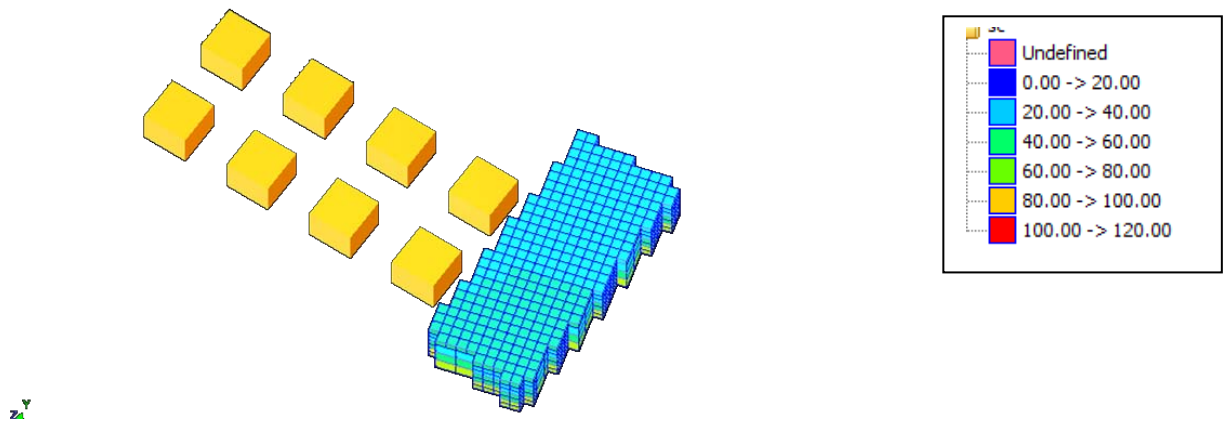
Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου, της περιοχής Α, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 51.5% των τιμών UCS που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <50MPa, ενώ το σύνολο των τιμών UCS για το δάπεδο είναι >50MPa. Στο δάπεδο επίσης, το 40% είναι στο εύρος τιμών 80-90MPa, ενώ στην οροφή το 33,7% βρίσκεται στο εύρος 30-40MPa (Σχήμα 4.32).



Σχήμα 4.32: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Α για UCS

Περιοχή B_οροφή

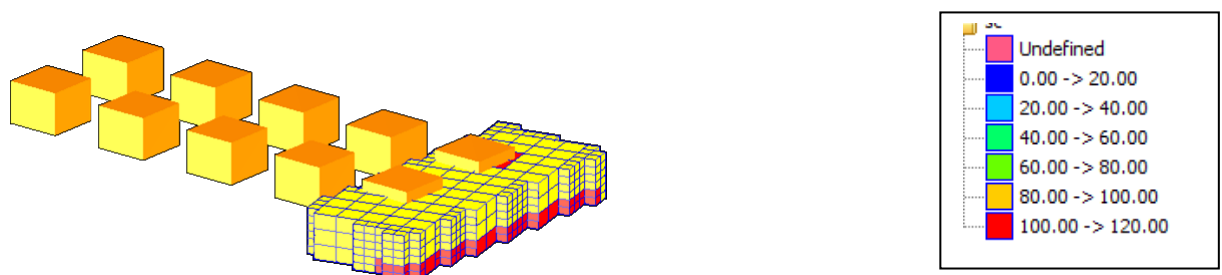
Από την χωρική ανάλυση της περιοχής A, φαίνονται χαμηλές τιμές για UCS στην οροφή (Εικόνα 4.40).



Εικόνα 4.40: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή B_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή B_δάπεδο

Η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά στο δάπεδο έως το +16m, κάτι που επαληθεύεται και από την πραγματική κατάσταση που αντιμετωπίστηκε κατά την διάρκεια της κατασκευής (Εικόνα 4.41).

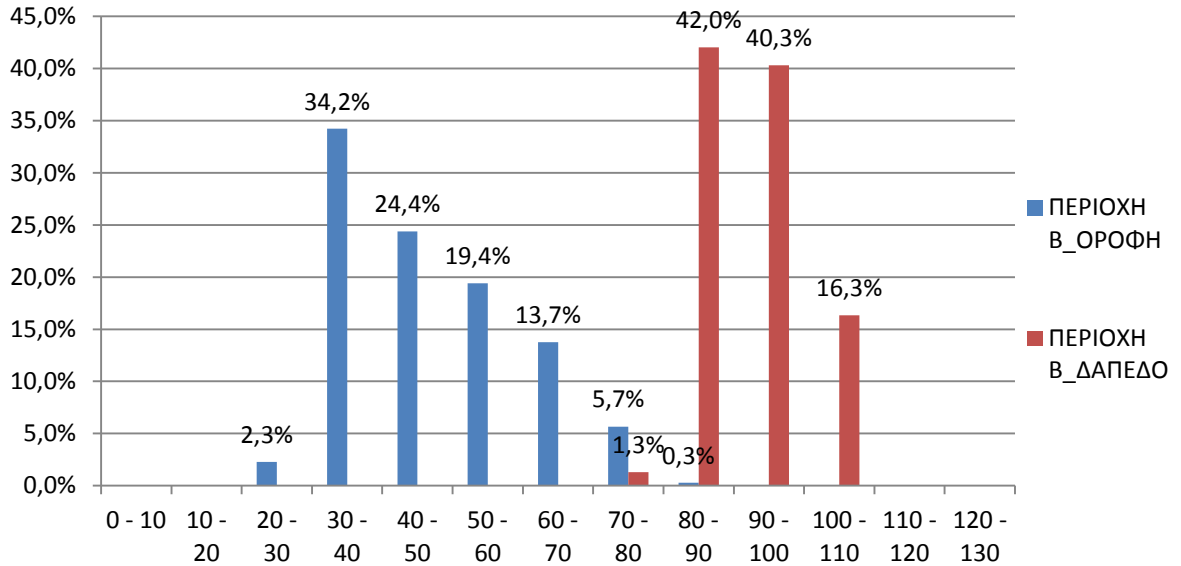


Εικόνα 4.41: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή B_δάπεδο του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής B για UCS

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου, της περιοχής A, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά

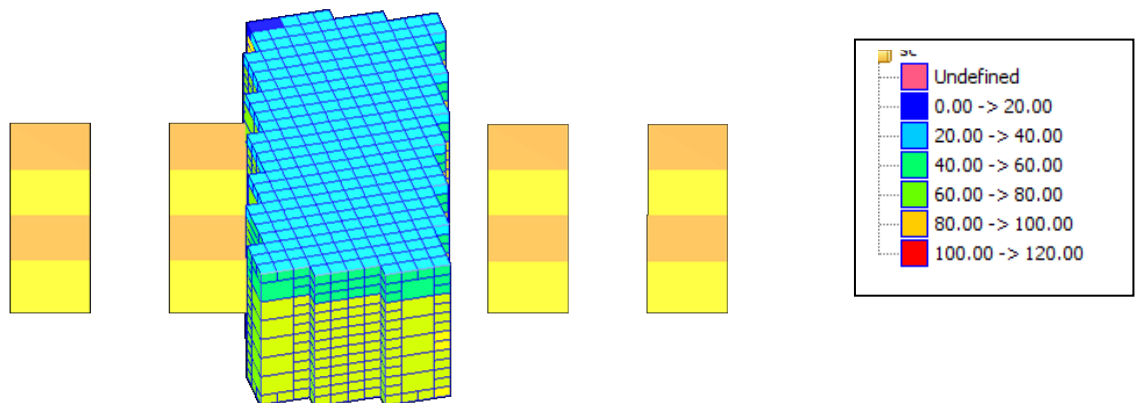
ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 60% των τιμών UCS που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <50MPa, ενώ το σύνολο των τιμών UCS για το δάπεδο είναι >70MPa. Στο δάπεδο επίσης, το 42% είναι στο εύρος τιμών 80-90MPa και το 40% στο εύρος 90-100MPa, ενώ στην οροφή το 34% βρίσκεται στο εύρος 30-40MPa (Σχήμα 4.33).



Σχήμα 4.33: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Β για UCS

Περιοχή Γ

Εκτός από τις περιοχές Α και Β που αναλύθηκαν προηγουμένως, δημιουργήθηκε και μια Τρίτη περιοχή (Περιοχή Γ), με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ώστε να εντοπιστεί η κατάσταση προς τα δυτικά του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.42).



Εικόνα 4.42: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Γ του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για UCS

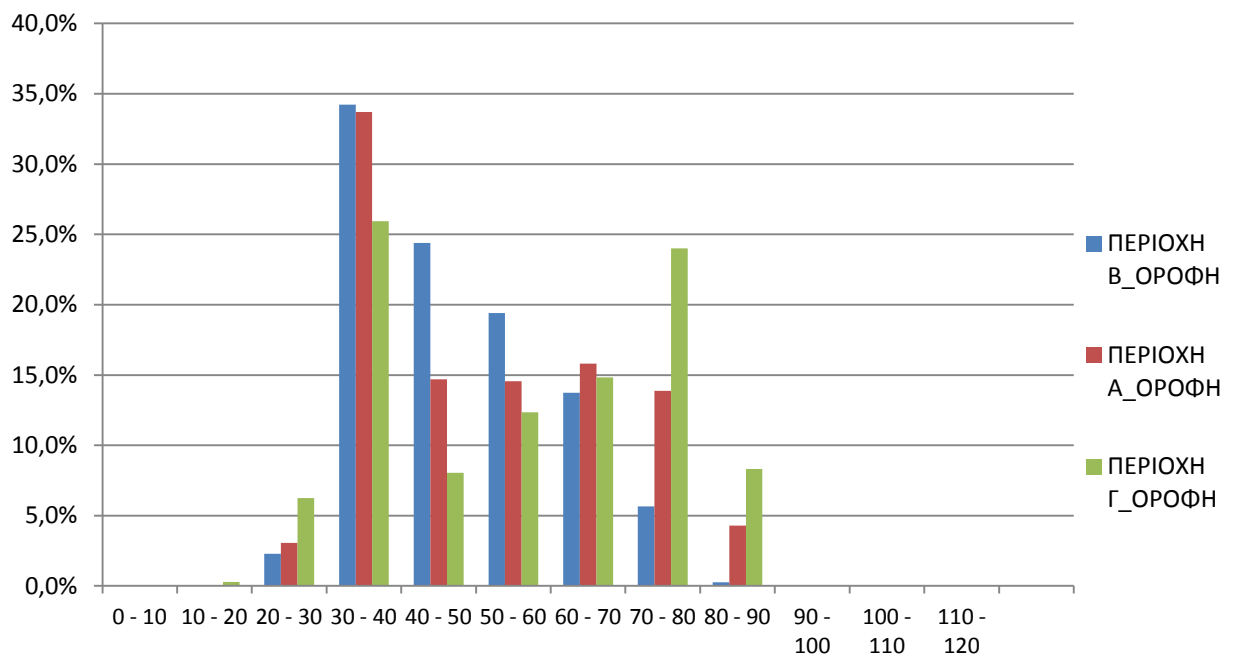
Στο συγκριτικό διάγραμμα για την περιοχή της οροφής των 3 περιοχών που εξετάστηκαν, φαίνεται ότι υψηλότερες τιμές για UCS εντοπίζονται στην Περιοχή Γ, αμέσως μετά είναι η Περιοχή Α και χειρότερη η περιοχή Β.

Στην περιοχή Β το 62% των τιμών για UCS είναι <50MPa και μόλις το 6% >70MPa, ενώ μεταξύ 50-70MPa είναι το 32%.

Στην περιοχή Α το 50% των τιμών για UCS είναι <50MPa και 18% >70MPa, ενώ μεταξύ 50-70MPa είναι το 32%.

Στην περιοχή Γ το 40% των τιμών για UCS είναι <50 MPa και 33%>70MPa ενώ μεταξύ 50-70MPa είναι το 27%.

Στις 3 περιοχές υπάρχει σχεδόν ίδιος καταμερισμός στο εύρος τιμών 50-70MPa (~30%). Εντοπίζεται λοιπόν βελτίωση των συνθηκών προς δυτικά του χώρου, γεγονός που επαληθεύεται από την πραγματική κατάσταση που αντιμετωπίστηκε κατά την κατασκευή του υπόγειου χώρου (Σχήμα 4.34).



Σχήμα 4.34: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για UCS

Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD

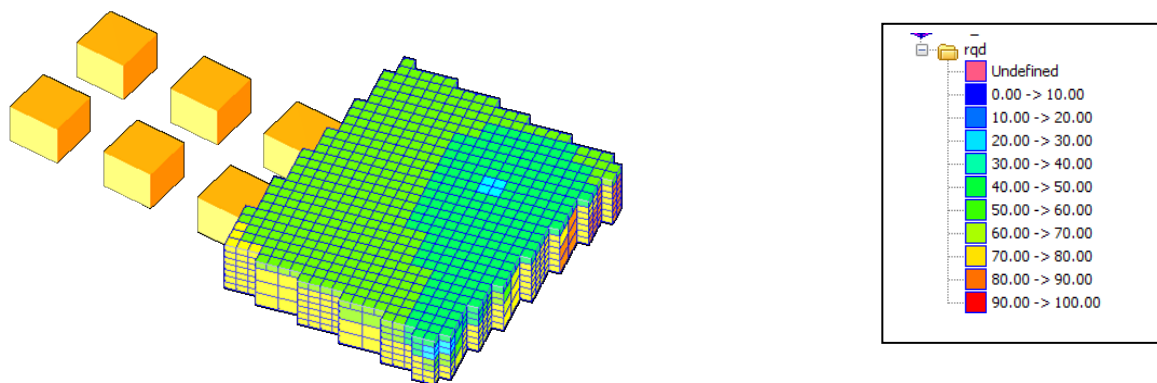
Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας (Πίνακας 4.10) με τα στοιχεία για RQD των περιοχών (Περιοχή εισόδου, Περιοχή Α και Περιοχή Β). Είναι φανερό ότι υπάρχουν μειωμένες τιμές για RQD στην οροφή των εξεταζόμενων περιοχών, σε σχέση με το δάπεδο, κάτι που θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

Πίνακας 4.10: Στοιχεία για RQD των 3 περιοχών

	n	min	max	mean	median	stdev
Περιοχή εισόδου	1240	38.9	96.5	77.9	82.4	12.69
Περιοχή εισόδου δάπεδο	465	64.83	96.54	83.78	83.67	6.59
Περιοχή εισόδου οροφή	620	38.9	94.85	72.78	80.48	15.1
Περιοχή Α	581	47.16	96.54	80.73	84.23	12.40
Περιοχή Α δάπεδο	249	73.38	96.54	86.80	86.47	5.58
Περιοχή Β οροφή	332	47.16	94.85	76.17	83.10	14.05
Περιοχή Β	648	38.9	90.69	74.7	79.75	12.75
Περιοχή Β δάπεδο	243	64.83	90.69	80.59	81.60	5.91
Περιοχή Β οροφή	324	38.9	88.75	69.35	74.51	15.30

Περιοχή εισόδου_οροφή

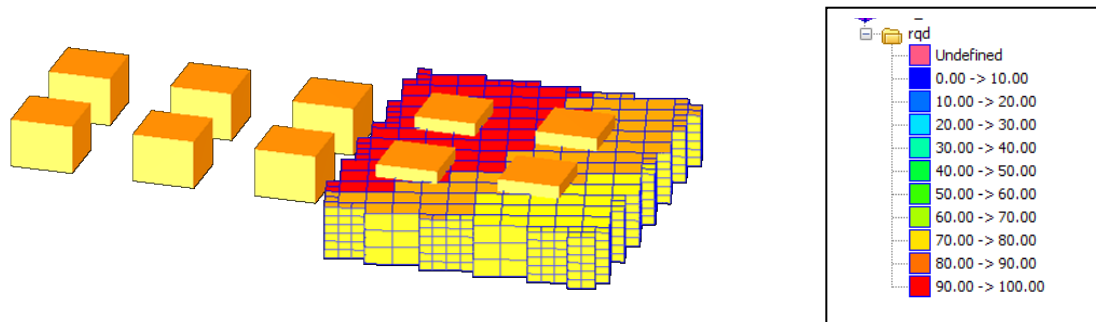
Από τα +16m έως +23m το RQD δείχνει να παρουσιάζει χαμηλές τιμές κυρίως προς ΒΔ του υπόγειου χώρου. Από την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από την χωρική ανάλυση, φαίνεται ότι δυτικά στην οροφή του υπόγειου χώρου υπάρχουν χαμηλές τιμές RQD. Οι τιμές έρχονται από πιο ανατολικά, έξω από την εγγύς περιοχή του υπόγειου χώρου, κάτι που φανερώνει ενδείξεις για την ύπαρξη ασθενέστερου γεωλογικού σχηματισμού (γραφιτικός σχιστόλιθος) σε σχέση με τον υπόλοιπο υπόγειο χώρο (ασβεστόλιθος Ανωτέρου μαρμάρου) (Εικόνα 4.43).



Εικόνα 4.43: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή εισόδου_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή εισόδου_δάπεδο

Στο RQD (σε αντίθεση με την ανάλυση για UCS) φαίνεται βελτίωση των συνθηκών προς τα δυτικά του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.44).

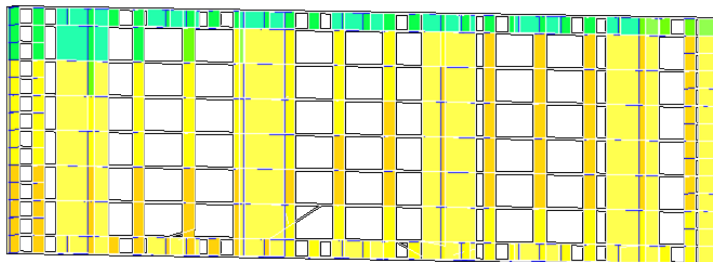


Εικόνα 4.44: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή εισόδου_δάπεδο του υπόγειου χώρου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομές κατά πλάτος του υπόγειου χώρου για τον δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD%) (Εικόνα 4.45).

Τομή 1-1'

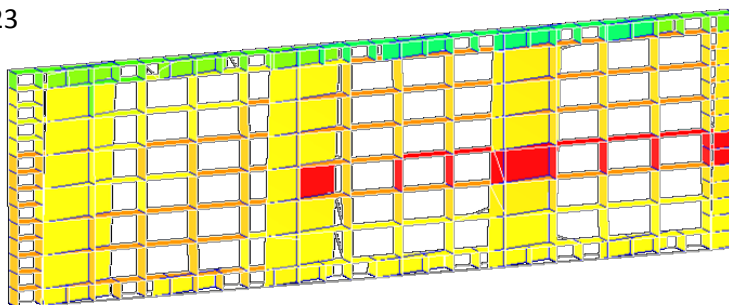
+23



+10

Τομή 2-2'

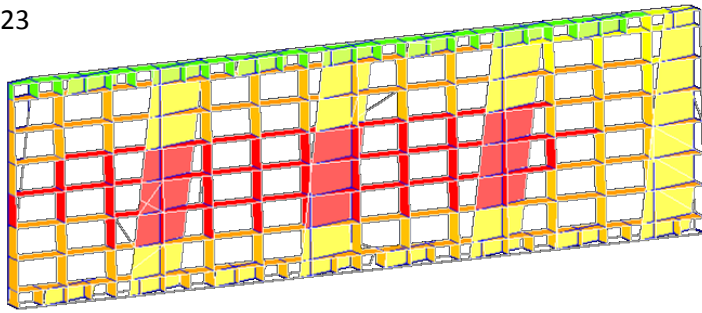
+23



+10

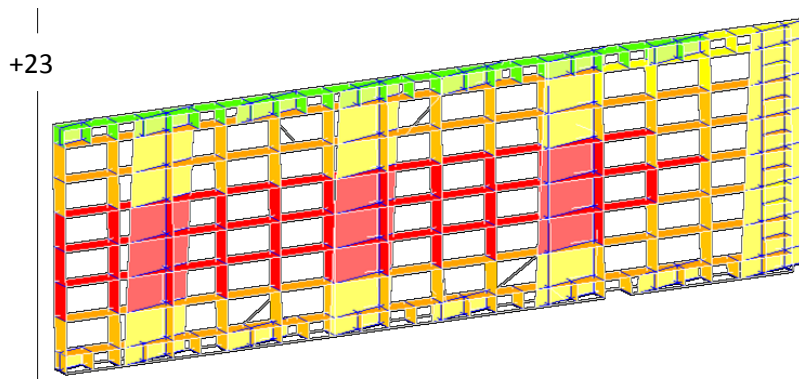
Τομή 3-3'

+23



+10

Τομή 4-4'



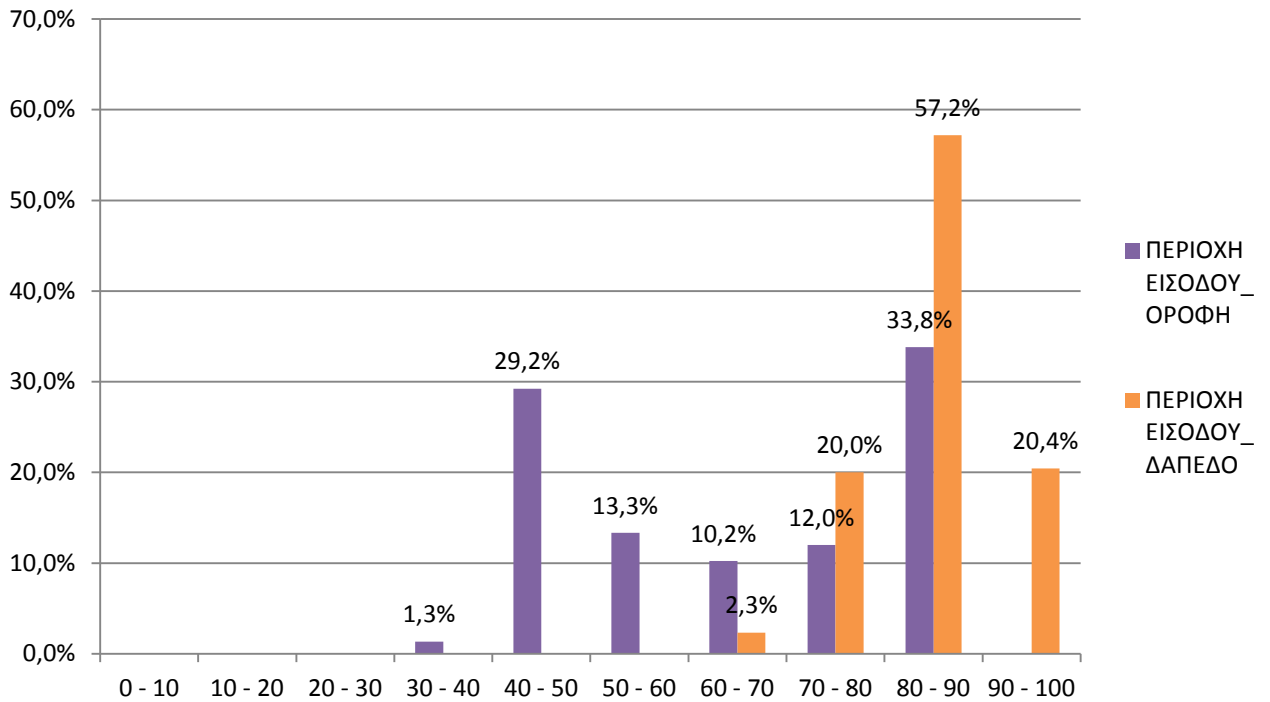
+10

Εικόνα 4.45: Απεικόνιση των τομών για RQD κατά πλάτος του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για RQD

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου της περιοχής εισόδου, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 54% των τιμών RDQ που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <70%, ενώ το 98% των τιμών RQD για το δάπεδο είναι >70%.

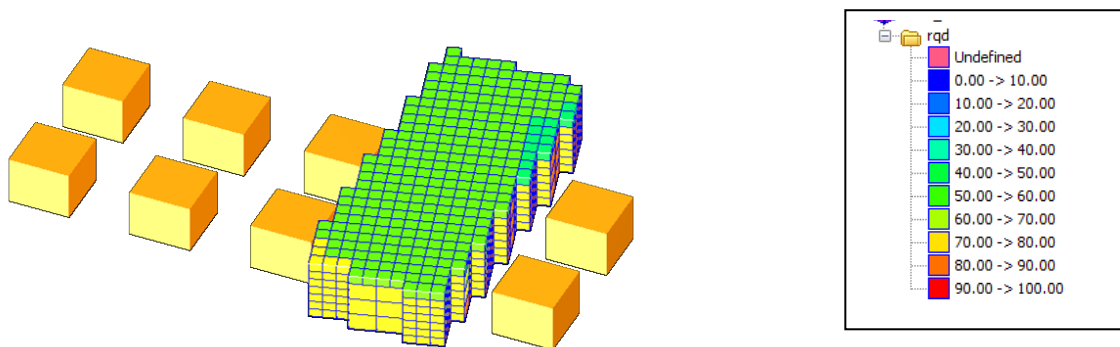
Στην οροφή επίσης, το 29% είναι στο εύρος τιμών 40-50%, ενώ στο δάπεδο το 77% βρίσκεται στο εύρος 80-100% (Σχήμα 4.35).



Σχήμα 4.35: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για RQD

Περιοχή A_οροφή

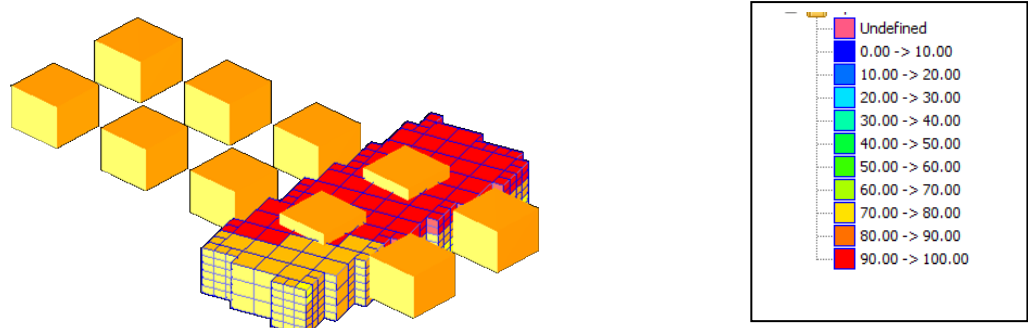
Στην οροφή του υπόγειου χώρου εντοπίζεται βελτίωση των συνθηκών προς τα βόρεια και προς το δάπεδο (Εικόνα 4.46).



Εικόνα 4.46: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή A_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή Α_δάπεδο

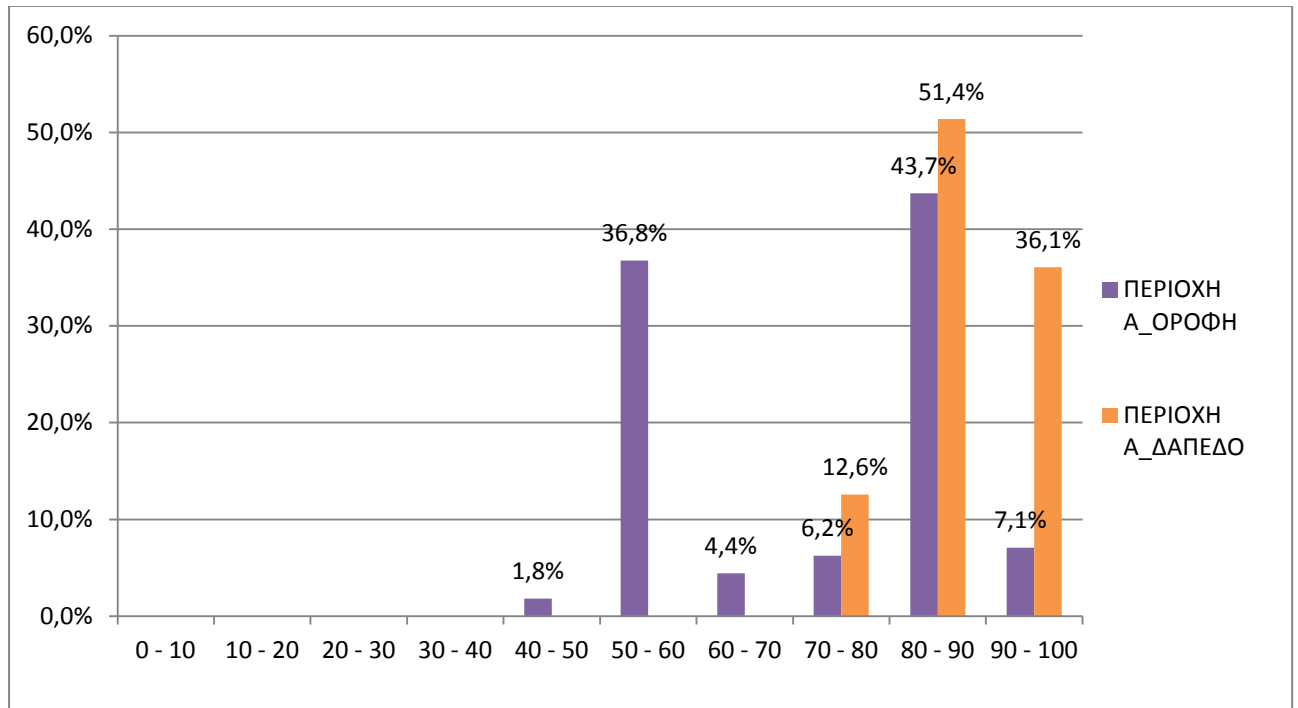
Στο δάπεδο εντοπίζεται βελτίωση προς τα ΒΔ του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.47).



Εικόνα 4.47: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Α_δάπεδο του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής - δαπέδου περιοχής Α για UCS

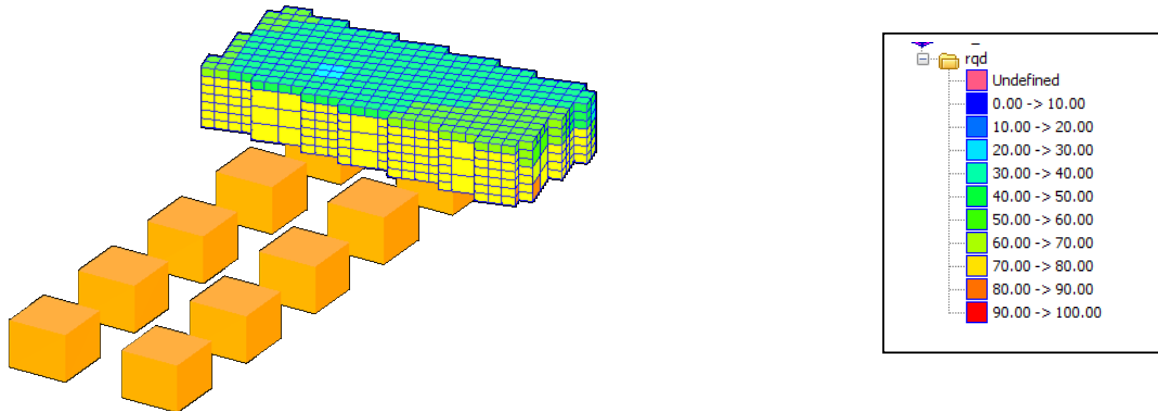
Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου, της περιοχής Α, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 39% των τιμών RQD που μετρήθηκαν στην οροφή είναι μεταξύ 40-60%, ενώ το σύνολο των τιμών RQD για το δάπεδο είναι >70% (Σχήμα 4.36).



Σχήμα 4.36: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Α για RQD

Περιοχή B_οροφή

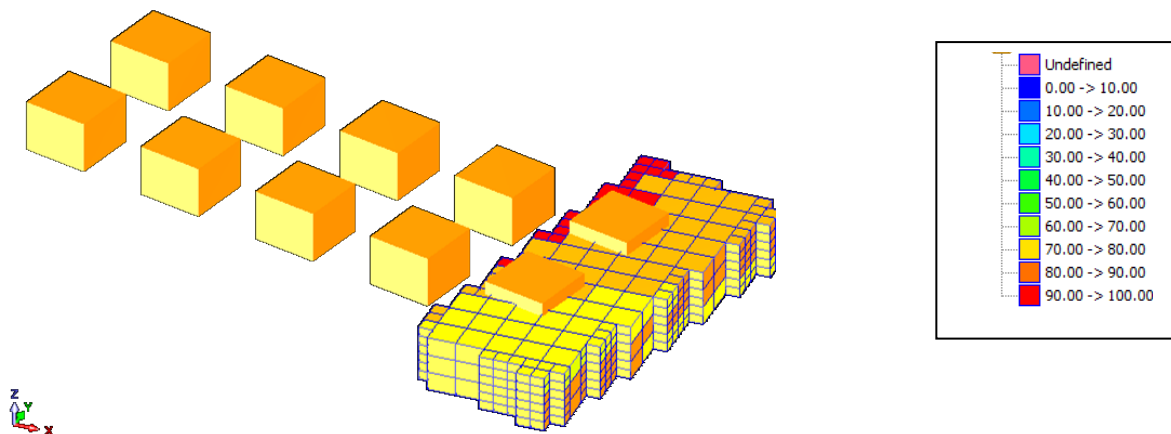
Στην οροφή του υπόγειου χώρου εντοπίζεται βελτίωση των συνθηκών προς το δάπεδο (Εικόνα 4.48).



Εικόνα 4.48: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή B_οροφή του υπόγειου χώρου

Περιοχή B_δάπεδο

Στο δάπεδο εντοπίζεται βελτίωση προς τα ΒΔ του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.49).

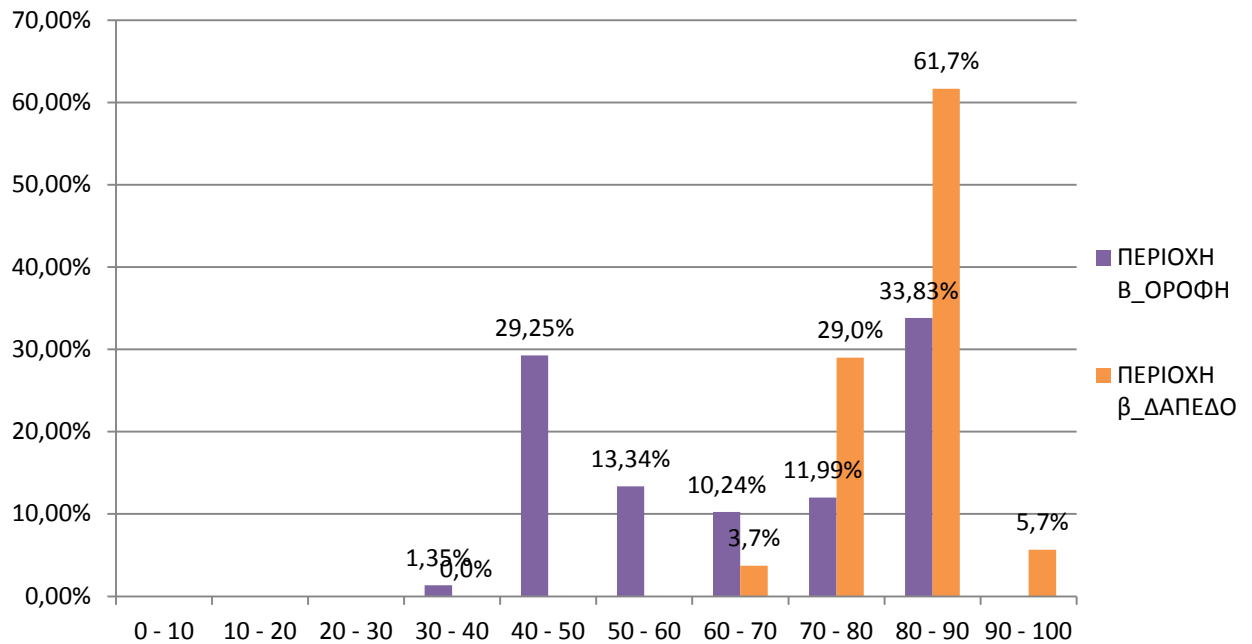


Εικόνα 4.49: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή B_δάπεδο του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής B για UCS

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου, της περιοχής B, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 32% των τιμών RQD που μετρήθηκαν στην οροφή είναι

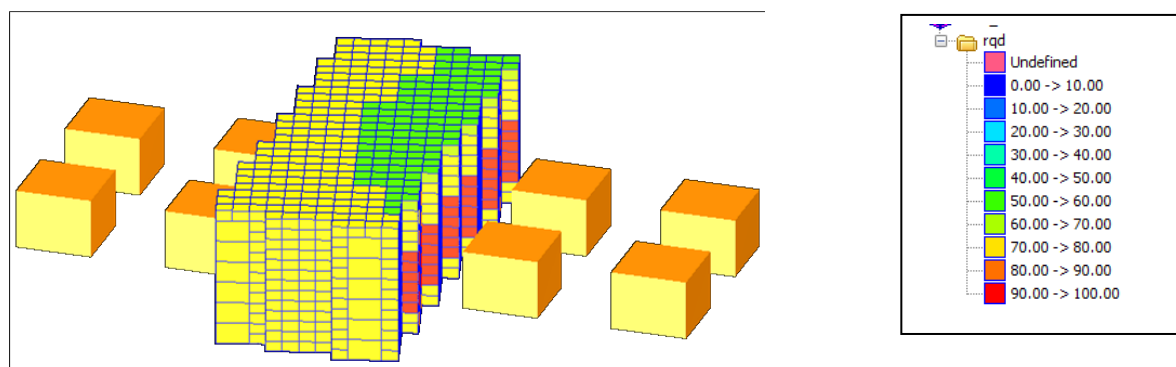
μεταξύ 30-50%, ενώ το σύνολο των τιμών RQD για το δάπεδο είναι >60% (Σχήμα 4.37).



Σχήμα 4.37: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Β για RQD

Περιοχή Γ

Εκτός από τις περιοχές Α και Β που αναλύθηκαν προηγουμένως, δημιουργήθηκε και μια Τρίτη περιοχή (Περιοχή Γ), με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ώστε να εντοπιστεί η κατάσταση προς τα δυτικά του υπόγειου χώρου (Εικόνα 4.50).



Εικόνα 4.50: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Γ του υπόγειου χώρου

Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για RQD

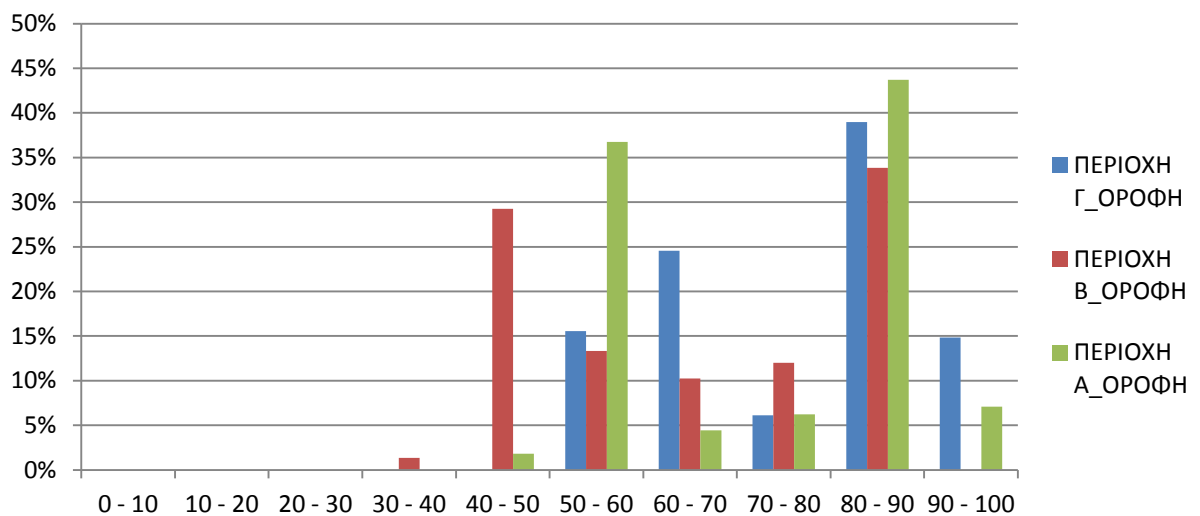
Στο συγκριτικό διάγραμμα για την περιοχή της οροφής των 3 περιοχών που εξετάστηκαν, φαίνεται ότι υψηλότερες τιμές για RQD εντοπίζονται στην Περιοχή Γ, αμέσως μετά είναι η Περιοχή Α και χειρότερη η περιοχή Β.

Στην περιοχή Β το 30% των τιμών για RQD είναι <50% και το 34% 80-90%.

Στην περιοχή Α το 2% των τιμών για RQD είναι <50% και 51% >80%.

Στην περιοχή Γ δεν εντοπίζονται τιμές για RQD<50% και 33%>70MPa και 54% είναι 80-100%.

Εντοπίζεται λοιπόν βελτίωση των συνθηκών προς δυτικά του χώρου, γεγονός που επαληθεύεται από την πραγματική κατάσταση που αντιμετωπίστηκε κατά την κατασκευή του υπόγειου χώρου, με τα αποτελέσματα να είναι καλύτερα για το RQD (σε σχέση με UCS) για την απεικόνιση της πραγματικότητας όπως αυτή αντιμετωπίστηκε κατά την διάρκεια της κατασκευής (Σχήμα 4.38).



Σχήμα 4.38: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για RQD

Κεφάλαιο_5: Συμπεράσματα

Η κατασκευή των υπογείων έργων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον παράγοντα της αβεβαιότητας που παρουσιάζει το γεωλογικό μέσο εξαιτίας της πολυπλοκότητας και του μικρού αριθμού στοιχείων που συνήθως προκύπτουν από την γεωτεχνική έρευνα κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου. Για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό του υπεδάφους, σημαντική είναι η πρόβλεψη της χωρικής ποικιλομορφίας των γεωλογικών-γεωτεχνικών μεταβλητών που προκύπτουν μέσα από τις χωρικές αναλύσεις (**spatial analysis**).

Σε αυτή την κατεύθυνση στοχεύει το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ώστε να αποτελέσει υπόβαθρο για περαιτέρω αναλύσεις στο επιστημονικό αυτό πεδίο.

Εξετάζονται οι τεχνικές για την δημιουργία χωρικών αναλύσεων με σκοπό την πρόβλεψη των συνθηκών του σύνθετου γεωλογικού περιβάλλοντος, ενώ παρουσιάζονται και τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό δεδομένων γύρω από γνωστές γεωτρήσεις. Επιπλέον γίνεται προσπάθεια χωρικής ανάλυσης του υπόγειου χώρου του Λαυρίου με το πρόγραμμα SURPAC, ώστε να προσδιοριστούν οι γεωτεχνικές παράμετροι της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη με προσαρμογή των δοκιμών σημειακής φόρτισης ($UCS=24*Is$), του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD) και του μέτρου ελαστικότητας των πετρωμάτων (E) στο χώρο.

Γίνεται λοιπόν μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη γνώση και ανάλυση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών όπως αυτά προέκυψαν μέσα από την ανάλυση. Επιχειρείται:

- Η ενδελεχής χαρτογράφηση των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής του έργου,
- Η αξιολόγηση τους και ο εντοπισμός πιθανών προβληματικών περιοχών για το έργο, ώστε να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας των χωρικών μοντελοποιήσεων (validation) μέσω της αντιπαραβολής των στοιχείων της ανάλυσης με αυτά που πραγματικά συναντήθηκαν.
- Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εξαγωγή δεδομένων για τον εντοπισμό των ασθενέστερων ζωνών.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμόζεται σε έργα πριν την κατασκευή τους ώστε να εντοπίζονται οι ασθενείς ζώνες, να προβλέπεται μέχρι ένα βαθμό η αβεβαιότητα που παρουσιάζει το γεωλογικό μέσο, να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης και τελικά να υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων. Εκτός όμως από την αξιοποίηση της μοντελοποίησης του υπόγειου χώρου πριν την κατασκευή του εκάστοτε έργου, αποτελεί και ένα δείκτη επαλήθευσης του μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα του συνόλου των γεωτρήσεων.

Η μοντελοποίηση του υπόγειου χώρου έγινε με την μέθοδο παρεμβολής αντιστρόφου βαρύνουσας απόστασης (Inverse Distance Weighted Interpolation Method). Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου έγινε αφενός μεν γιατί το πλήθος των στοιχείων

δεν επέτρεπε την χρήση γεωστατιστικής (μέθοδος kriging) και αφετέρου γιατί η IDW είναι μια αρκετά καλή και ευρέως διαδεδομένη μέθοδος παρεμβολής, που χρησιμοποιείται με καλά αποτελέσματα (Lam, 1983).

Μέσα από τις αναλύσεις φάνηκε ότι στην περιοχή εισόδου του υπόγειου χώρου εμφανίζονται χαμηλότερα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τον υπόλοιπο χώρο. Υπάρχουν ενδείξεις ότι υπάρχει κάποιος ασθενής γεωλογικός σχηματισμός (γραφιτικός σχιστόλιθος) με κατεύθυνση Α-Δ που εμφανίζεται στην επαφή των στύλων 9 και 10 με την οροφή του υπόγειου χώρου. Υπάρχουν λοιπόν στοιχεία ότι η μοντελοποίηση μπορεί να προσομοιώσει σε ένα βαθμό την πραγματικότητα.

Για να φτάσει όμως η ανάλυση σε κάποιο αποτέλεσμα έγιναν πολλές δοκιμές ώστε τα δεδομένα που εισάγονται να έχουν αξιοπιστία συγκριτικά με τα πραγματικά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνεται σωστός συσχετισμός μεταξύ των τιμών που υπάρχουν στα δοκίμια κατά μήκος των γεωτρήσεων, ώστε να φτιαχτούν πιο αξιόπιστα μοντέλα.

Από τα μοντέλα που αναλύθηκαν, το RQD φαίνεται να λειτουργεί πιο αξιόπιστα σε σχέση με το UCS και το E, καθώς οι τιμές από τα δοκίμια των γεωτρήσεων ήταν πλήρεις και συνεχείς, με αποτέλεσμα να βγάζει χειρότερα αποτελέσματα για την περιοχή της εισόδου, επαληθεύοντας την πραγματική κατάσταση. Ωστόσο ένας πιο πυκνός κάρναβος γεωτρήσεων θα έδινε αρκετά καλύτερα αποτελέσματα.

Πέρα από τους ανωτέρω χωρικούς περιορισμούς που ορίστηκαν αρχικά για να αποδώσουν την περιοχή εξέτασης, χρησιμοποιήθηκαν και άλλοι κυρίως συσχετιζόμενοι με τις ιδιότητες των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για συγκεκριμένες ανάγκες της εργασίας, ώστε να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση.

Ο μεγάλος αριθμός των block models κυρίως σχετίζεται με την διερεύνηση για την επίτευξη καλύτερης αξιοπιστίας του μοντέλου και προέκυψε από το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί συνδυασμοί ώστε να προκύψει η καλύτερη δυνατή εξέταση – ανάλυση του υπόγειου χώρου.

Οι συνδυασμοί σχετίζονται με τον τρόπο αναζήτησης στο χώρο και την βαρύτητα που δίνει στην ανάλυση το εκάστοτε γεωμετρικό σχήμα. Τα γεωμετρικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σφαίρα και έλλειψη (anisotropy ratios) ώστε να γίνεται ο οριζόντιος καθορισμός των παραμέτρων και της στρωματογραφίας των γεωλογικών σχηματισμών. Δεν μπόρεσε να γίνει αναζήτηση σύμφωνα με κλίση, καθώς η διεύθυνση και κλίση των στρωμάτων των γεωλογικών σχηματισμών δεν είναι εμφανή μέσα από τα δείγματα των γεωτρήσεων.

Το κριτήριο επιλογής του μοντέλου ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου, ώστε σε κάθε ανάλυση να γίνεται σωστός συσχετισμός των τιμών που υπάρχουν στα δείγματα των γεωτρήσεων με τον εκάστοτε χωρικό περιορισμό που έχει τεθεί.

- Για την **μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (UCS)** η επιλογή των δεδομένων έγινε ώστε να γίνει ανάλυση σε όλες τις τιμές για UCS που υπάρχουν στις

γεωτρήσεις. Ο αριθμός των δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις είναι 132 δείγματα, σε σύνολο δειγμάτων 325.

- Για τον **δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD)**, ο αριθμός των δειγμάτων μέσα από τις γεωτρήσεις είναι 325 δείγματα, όσα είναι όλα τα δείγματα.

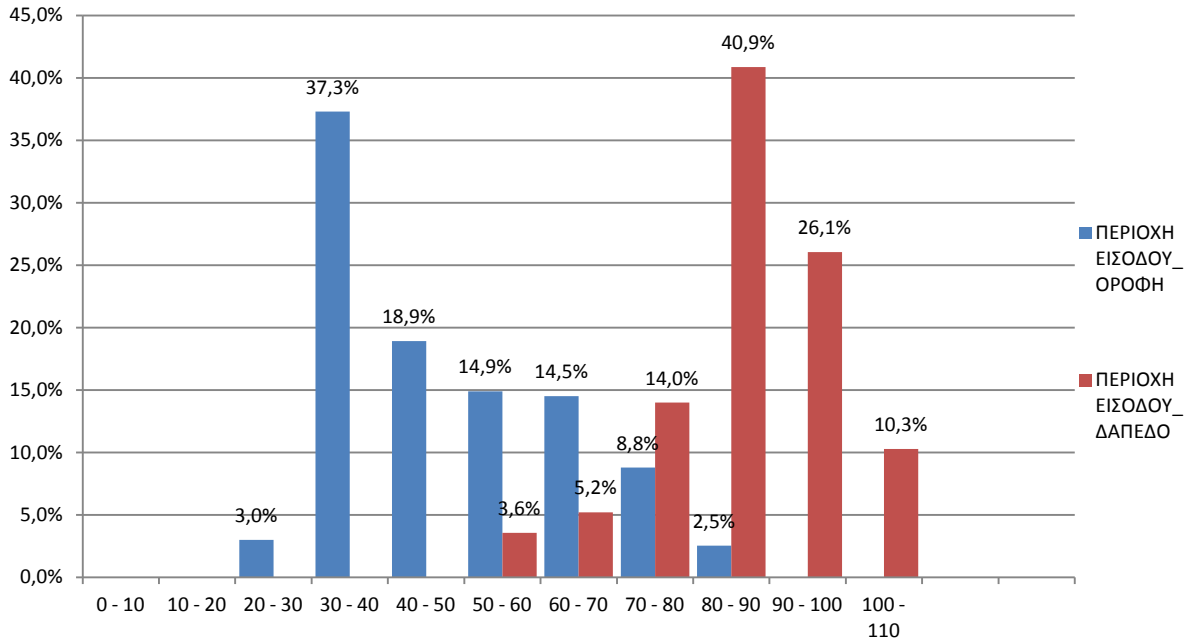
Αντίστοιχα η ακτίνα αναζήτησης στο χώρο (55m) επιλέχτηκε ώστε να μην μένει καμία γεώτρηση ανεξάρτητη, αλλά να υπάρχει επίδραση όλων των γεωτρήσεων στις αναλύσεις.

Φαίνεται ότι η ανάλυση του RQD, προσομοιώνει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες κατασκευής του υπόγειου χώρου, από τις αναλύσεις για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές για το RQD ήταν συνεχείς μέσα στις γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός τους μέσω του downhole και του inverse distance να είναι καλύτερος.

Ύστερα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν μέσα από τις αναλύσεις, έγινε προσπάθεια αντιπαραβολής της πραγματικής κατάστασης με τα αποτελέσματα των χωρικών αναλύσεων.

Κάτι τέτοιο μπορεί να δώσει ένα μεγαλύτερο μέτρο της ακρίβειας των μοντελοποιήσεων, στο βαθμό που θα μπορέσει να υποδείξει διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που αναλύονται και να τα συνδέσει με τις πραγματικές συνθήκες/προβλήματα που συναντήθηκαν κατά την φάση κατασκευής του έργου.

Ενδεικτικά το σχήμα 5.1 απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου της περιοχής εισόδου, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση. Είναι διακριτή η διαφορά ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 60% των τιμών UCS που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <50MPa, ενώ το σύνολο των τιμών UCS για το δάπεδο είναι >50MPa. Στο δάπεδο επίσης, το 40% είναι στο εύρος τιμών 80-90MPa, ενώ στην οροφή το 37% βρίσκεται στο εύρος 30-40MPa.

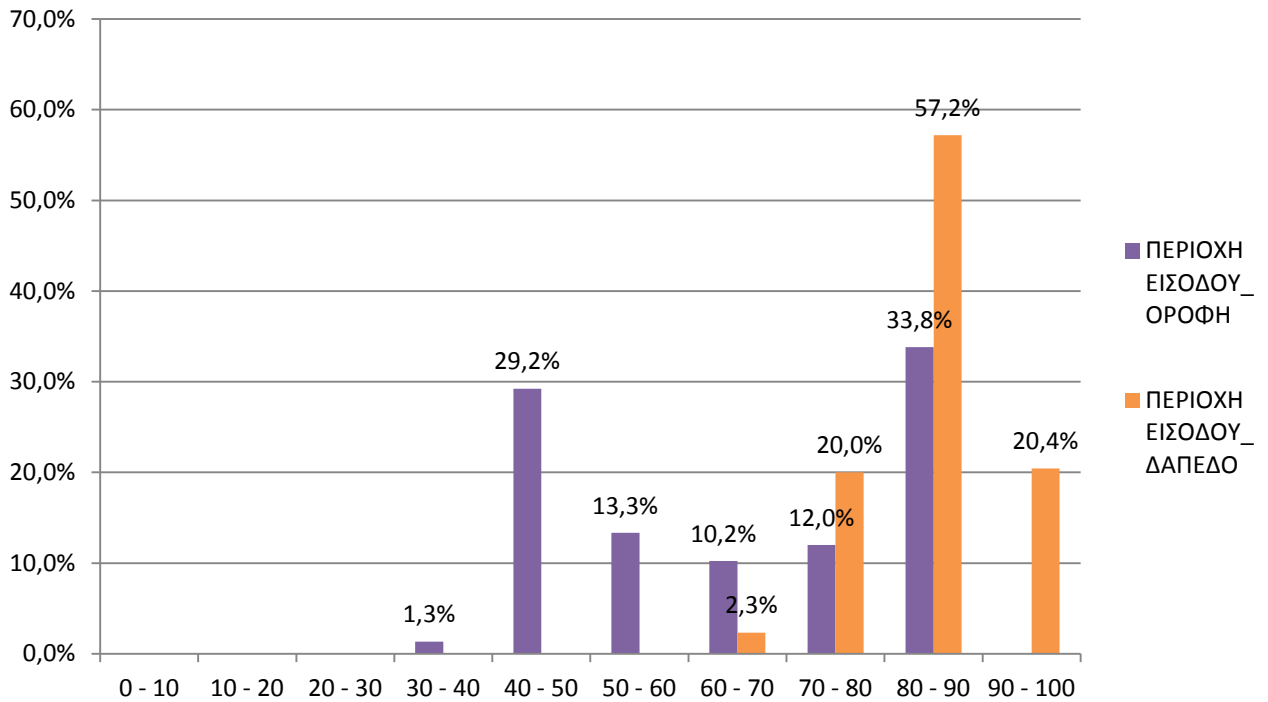


Σχήμα 5.1: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για UCS

Επίσης το σχήμα 5.2 απεικονίζει την σύγκριση των τιμών της οροφής και του δαπέδου της περιοχής εισόδου. Όπως και στο σχήμα για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, είναι εμφανής και η διαφορά για RQD ανάμεσα στις 2 περιοχές. Το 54% των τιμών RDQ που μετρήθηκαν στην οροφή είναι <70%, ενώ το 98% των τιμών RQD για το δάπεδο είναι >70%.

Στην οροφή επίσης, το 29% είναι στο εύρος τιμών 40-50%, ενώ στο δάπεδο το 77% βρίσκεται στο εύρος 80-100%.

Ωστόσο τα αποτελέσματα για τον δείκτη ποιότητας της βραχομάζας (RQD) μπορεί να μην δουλέψουν σε όλους τους τύπους των πετρωμάτων. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι πετρώματα (π.χ. μάργες) μπορεί να έχουν υψηλό δείκτη RQD, χωρίς κερματισμό αλλά να μην έχουν υψηλή αντοχή σε μονοαξονική θλίψη με ό,τι συνεπάγεται αυτό για την κατασκευή του έργου.



Σχήμα 5.2: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για RQD

Η μεθοδολογία της χωρικής ανάλυσης αποτελεί λοιπόν μία τεχνική διαχείρισης της αβεβαιότητας του γεωλογικού μέσου σε δραστηριότητες που σχετίζονται με το αντικείμενο του μηχανικού.

Θεωρείται εφικτή και απαραίτητη η επέκταση της μεθοδολογίας στις διάφορες τεχνικές κατασκευής υπόγειων κατασκευών, καθώς και η πιθανή ανάπτυξη μίας ενιαίας προσέγγισης προς τα υπόγεια έργα, με προκαθορισμένες διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους εξέτασης ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μελέτης και χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας.

Η κατασκευή υπόγειων - τεχνικών έργων, αποσκοπεί στην βελτίωση της ποιότητας ζωής του κοινωνικού συνόλου και η αξιοποίηση του υπόγειου χώρου, μπορεί να προσφέρει ρεαλιστικές και βιώσιμες λύσεις στην αντιμετώπιση προβλημάτων, όπως ο υπόγειος χώρος του Λαυρίου,

Έτσι η πρόληψη πιθανών αστοχιών πριν την κατασκευή του έργου αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα που πολλές φορές κρίνει την υλοποίηση αλλά και την συνολική βιωσιμότητα ενός έργου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στους πυρήνες των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες.

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Γ1	1	17,60	18,10	54	26,16	47,51	7816	0,228		1,905	prs-fyl
Γ1	2	18,10	18,30	54							prs-fyl
Γ1	3	18,30	18,50	32							prs-fyl
Γ1	4	18,50	18,70	32		12,38			0,516		prs-fyl
Γ1	5	18,70	19,50	32							prs-fyl
Γ1	6	19,50	19,70	87	25,45	59,38	8852	0,276			prs-fyl
Γ1	7	19,70	20,20	87							prs-fyl
Γ1	8	20,20	20,50	87		31,75			1,323		prs-fyl
Γ1	9	20,50	21,30	72							prs-fyl
Γ1	10	21,30	21,50	72	26,65	56,73	8807	0,294			prs-fyl
Γ1	11	21,50	21,80	72							prs-fyl
Γ1	12	21,80	22,00	72		59,26			2,469		prs-fyl
Γ1	13	22,00	22,30	72							prs-fyl
Γ1	14	22,30	22,80	100							up-marb
Γ1	15	22,80	22,90	100	26,08					4,475	up-marb
Γ1	16	22,90	23,50	100							up-marb
Γ1	17	23,50	23,70	80		84,38			3,516		up-marb
Γ1	18	23,70	24,40	80							up-marb
Γ1	19	24,40	24,60	80	26,38	74,86	15042	0,300			up-marb
Γ1	20	24,60	24,90	80							up-marb
Γ1	21	24,90	25,10	80		96,48			4,020		up-marb
Γ1	22	25,10	26,00	0							up-marb
Γ1	23	26,00	26,60	80	25,29	88,77	15513	0,269	3,083	5,205	up-marb
Γ1	24	26,60	27,30	80							up-marb

Γ1	25	27,30	27,90	95		70,32			2,930		up-marb
Γ1	26	27,90	28,50	95							up-marb
Γ1	27	28,50	29,50	90							up-marb
Γ1	28	29,50	30,60	90		77,52			3,230		up-marb
Γ1	29	30,60	31,40	98							up-marb
Γ1	30	31,40	32,00	98		51,10			2,129		up-marb
Γ1	31	32,00	32,40	98							up-marb
Γ1	32	32,40	32,90	98	25,16	64,45	10947	0,283	2,124	5,738	up-marb
Γ1	33	32,90	33,30	98							up-marb
Γ1	34	33,30	33,50	90		61,54			2,564		up-marb
Γ1	35	33,50	34,40	90							up-marb
Γ1	36	34,40	34,60	90	26,03	80,10	15513	0,269			up-marb
Γ1	37	34,60	35,10	90							up-marb
Γ1	38	35,10	35,80	90	25,72	49,61	6804	0,192	4,688		up-marb
Γ1	39	35,80	36,00	90							up-marb
Γ1	40	36,00	36,10	90	25,15					5,514	up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ1

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Γ2	41	19,10	19,30	8							graph-sch
Γ2	42	19,30	20,30	8							graph-sch
Γ2	43	20,30	21,40	25							graph-sch
Γ2	44	21,40	21,80	33							graph-sch
Γ2	45	21,80	22,30	33	27,52	70,49	6923	0,222	0,439		graph-sch
Γ2	46	22,30	22,60	33							graph-sch
Γ2	47	22,60	22,70	33	25,69					2,011	graph-sch

Γ2	48	22,70	23,40	33							graph-sch
Γ2	49	23,40	23,60	33		5,28			0,220		graph-sch
Γ2	50	23,60	25,60	33		5,28			0,220		graph-sch
Γ2	51	25,60	26,50	33							graph-sch
Γ2	52	26,50	27,00	33	27,20	35,43	6031	0,205	0,146		sch-marb_trans
Γ2	53	27,00	27,70	84							up-marb
Γ2	54	27,70	27,90	84		119,54			4,981		up-marb
Γ2	55	27,90	28,70	84							up-marb
Γ2	56	28,70	28,90	84	26,77	75,67	13966	0,303			up-marb
Γ2	57	28,90	30,50	84							up-marb
Γ2	58	30,50	31,60	84	26,23	72,53	14515	0,251	4,541	5,159	up-marb
Γ2	59	31,60	32,10	84							up-marb
Γ2	60	32,10	32,60	97							up-marb
Γ2	61	32,60	33,80	97	25,04	84,05	15725	0,291		6,505	up-marb
Γ2	62	33,80	34,60	97		96,67			4,028		up-marb
Γ2	63	34,60	35,60	97	25,77	56,55	10752	0,226	3,662	5,866	up-marb
Γ2	64	35,60	36,30	97							up-marb
Γ2	65	36,30	37,25	97	26,33	39,20	7373	0,203	3,727		up-marb
Γ2	66	37,25	37,90	97							up-marb
Γ2	67	37,90	38,10	84		108,74			4,531		up-marb
Γ2	68	38,10	38,80	84							up-marb
Γ2	69	38,80	38,90	84	25,41					4,708	up-marb
Γ2	70	38,90	39,50	84							up-marb
Γ2	71	39,50	39,70	87		93,17			3,882		up-marb
Γ2	72	39,70	40,00	87							up-marb
Γ2	73	40,00	40,20	87		66,79			2,783		up-marb
Γ2	74	40,20	40,70	87							up-marb
Γ2	75	40,70	40,90	87	25,18	62,90	11009	0,279			up-marb
Γ2	76	40,90	42,00	94							up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ2

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Г3	77	22,70	22,90	88	26,76	25,40	5649	0,265			graph-sch
Г3	78	22,90	23,20	88							graph-sch
Г3	79	23,20	23,40	88	26,56	37,79	6780	0,291			graph-sch
Г3	80	23,40	23,70	88							graph-sch
Г3	81	23,70	24,00	63							graph-sch
Г3	82	24,00	24,20	63		3,50			0,146		graph-sch
Г3	83	24,20	25,20	63							graph-sch
Г3	84	25,20	25,60	80							graph-sch
Г3	85	25,60	26,00	80	26,87	29,81	6296	0,253	0,230		graph-sch
Г3	86	26,00	26,30	80							graph-sch
Г3	87	26,30	26,70	18							sch-marb_trans
Г3	88	26,70	26,90	18	26,07					4,018	sch-marb_trans
Г3	89	26,90	27,30	18							sch-marb_trans
Г3	90	27,30	27,60	0							sch-marb_trans
Г3	91	27,60	28,20	25							sch-marb_trans
Г3	92	28,20	29,00	91							up-marb
Г3	93	29,00	29,20	91		108,98			4,541		up-marb
Г3	94	29,20	29,60	91							up-marb
Г3	95	29,60	29,80	91	26,16	61,81	9782	0,277			up-marb
Г3	96	29,80	30,40	91							up-marb
Г3	97	30,40	30,50	91	25,59					5,116	up-marb
Г3	98	30,50	31,10	91							up-marb
Г3	99	31,10	31,40	82							up-marb
Г3	100	31,40	31,60	82		91,42			3,809		up-marb
Г3	101	31,60	31,90	82							up-marb
Г3	102	31,90	33,10	82	26,18	41,57	10815	0,250	4,688	4,869	up-marb
Г3	103	33,10	33,60	82							up-marb

Γ3	104	33,60	34,10	82							up-marb
Γ3	105	34,10	34,50	82							up-marb
Γ3	106	34,50	35,60	91							up-marb
Γ3	107	35,60	36,00	91							up-marb
Γ3	108	36,00	36,60	91		121,30			5,054		up-marb
Γ3	109	36,60	37,00	78							up-marb
Γ3	110	37,00	37,20	78		107,23			4,468		up-marb
Γ3	111	37,20	37,70	78							up-marb
Γ3	112	37,70	38,60	78	25,25	81,03	10978	0,247	4,395	4,334	up-marb
Γ3	113	38,60	39,00	78							up-marb
Γ3	114	39,00	39,20	78		123,05			5,127		up-marb
Γ3	115	39,20	39,50	78							up-marb
Γ3	116	39,50	40,10	60							up-marb
Γ3	117	40,10	40,50	60	25,95	116,02			4,834	4,726	up-marb
Γ3	118	40,50	41,40	60							up-marb
Γ3	119	41,40	41,60	60		36,98			1,541		up-marb
Γ3	120	41,60	42,00	60							up-marb
Γ3	121	42,00	42,20	98							up-marb
Γ3	122	42,20	42,40	98		107,47			4,478		up-marb
Γ3	123	42,40	42,60	98							up-marb
Γ3	124	42,60	42,80	98	25,50	69,83	11103	0,307			up-marb
Γ3	125	42,80	43,60	98							up-marb
Γ3	126	43,60	43,80	98	26,33	79,64	14599	0,194			up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ3

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Г4	127	10,00	10,20	95	25,48	60,19	13903	0,269			cap-lime
Г4	128	10,20	11,00	70							cap-lime
Г4	129	11,00	11,20	70	26,81	65,08	14489	0,203			cap-lime
Г4	130	11,20	12,20	94							cap-lime
Г4	131	12,20	12,50	94	25,05	62,63	9340	0,250	4,012		cap-lime
Г4	132	12,50	13,30	94							cap-lime
Г4	133	13,30	13,50	95	27,06	58,26	10839	0,229			cap-lime
Г4	134	13,50	14,50	87							cap-lime
Г4	135	14,50	14,70	87	26,35					4,303	cap-lime
Г4	136	14,70	15,50	87							cap-lime
Г4	137	15,50	15,80	87		55,03			2,293		cap-lime
Г4	138	15,80	16,00	87							cap-lime
Г4	139	16,00	16,20	87	26,98	44,51	12592	0,336			cap-lime
Г4	140	16,20	17,00	71							cap-lime
Г4	141	17,00	17,10	71	25,90					3,534	cap-lime
Г4	142	17,10	17,60	71							cap-lime
Г4	143	17,60	17,90	71	26,02	69,29	9651	0,203	4,299		cap-lime
Г4	144	17,90	18,80	93							cap-lime
Г4	145	18,80	19,60	93	25,92	93,55			3,898	4,436	cap-lime
Г4	146	19,60	20,00	93							cap-lime
Г4	147	20,00	20,70	61	26,06	74,16			3,090	4,496	cap-lime
Г4	148	20,70	21,30	61							cap-lime
Г4	149	21,30	22,00	61		68,78			2,866		cap-lime
Г4	150	22,00	22,45	98							cap-lime
Г4	151	22,45	23,30	98							cap-lime
Г4	152	23,30	24,20	98	26,34	81,73	12960	0,312			cap-lime
Г4	153	24,20	24,50	69							cap-lime
Г4	154	24,50	25,30	69	26,30	96,12			4,005	4,005	cap-lime
Г4	155	25,30	25,60	69							cap-lime

Γ4	156	25,60	26,25	69		89,42			3,726		cap-lime
Γ4	157	26,25	26,60	92							cap-lime
Γ4	158	26,60	26,90	92		108,48			4,520		cap-lime
Γ4	159	26,90	28,10	92							up-marb
Γ4	160	28,10	28,50	92		71,40			2,975		up-marb
Γ4	161	28,50	28,90	92							up-marb
Γ4	162	28,90	29,10	92		111,22			4,634		up-marb
Γ4	163	29,10	29,80	92							up-marb
Γ4	164	29,80	30,00	92		72,91			3,038		up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ4

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Γ5	165	8,00	8,20	61	26,98	60,06	10869	0,299			cap-lime
Γ5	166	8,20	9,40	61							cap-lime
Γ5	167	9,40	10,00	52	26,32	38,02	7258	0,195		1,003	cap-lime
Γ5	168	10,00	10,30	52							cap-lime
Γ5	169	10,30	11,00	0							cap-lime
Γ5	170	11,00	11,30	0							cap-lime
Γ5	171	11,30	11,70	87	26,27	71,13	12514	0,226	4,834		cap-lime
Γ5	172	11,70	12,50	87							cap-lime
Γ5	173	12,50	12,90	87	26,49	74,99	11797	0,268	5,054		cap-lime
Γ5	174	12,90	13,60	87							cap-lime
Γ5	175	13,60	13,80	87	26,93	54,91	9030	0,240			cap-lime
Γ5	176	13,80	14,10	87							cap-lime
Γ5	177	14,10	14,60	87	25,39	49,22			2,051	4,565	cap-lime
Γ5	178	14,60	15,90	11							cap-lime
Γ5	179	15,90	16,10	11			112,51		4,688		cap-lime

Γ5	180	16,10	17,20	89							up-marb
Γ5	181	17,20	18,10	89	25,61	45,10	9237	0,226			up-marb
Γ5	182	18,10	18,40	89	25,84	84,24			3,510	5,193	up-marb
Γ5	183	18,40	18,80	89							up-marb
Γ5	184	18,80	19,00	100							up-marb
Γ5	185	19,00	19,75	100		73,82			3,076		up-marb
Γ5	186	19,75	20,90	31							up-marb
Γ5	187	20,90	21,50	86		75,50			3,146		up-marb
Γ5	188	21,50	22,10	86							up-marb
Γ5	189	22,10	22,90	86	24,67	38,66			1,611	3,921	up-marb
Γ5	190	22,90	23,20	40							up-marb
Γ5	191	23,20	23,90	40		91,87			3,828		up-marb
Γ5	192	23,90	24,50	40							up-marb
Γ5	193	24,50	24,70	40	25,63					4,047	up-marb
Γ5	194	24,70	25,60	93							up-marb
Γ5	195	25,60	26,00	93		66,29			2,762		up-marb
Γ5	196	26,00	26,20	0		108,14			4,506		up-marb
Γ5	197	26,20	27,00	0							up-marb
Γ5	198	27,00	27,70	77							up-marb
Γ5	199	27,70	27,90	77	26,24	75,25	15513	0,269			up-marb
Γ5	200	27,90	28,40	77							up-marb
Γ5	201	28,40	28,60	77		110,47			4,603		up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ5

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Г6	209	19,40	21,00	50							graph-sch
Г6	210	21,00	21,60	50	26,83	60,74	6603	0,274		2,548	graph-sch
Г6	211	21,60	22,10	30							graph-sch
Г6	212	22,10	22,70	30							graph-sch
Г6	213	22,70	22,90	30		22,85			0,952		graph-sch
Г6	214	22,90	23,10	30							graph-sch
Г6	215	23,10	24,00	30		10,54			0,439		graph-sch
Г6	216	24,00	25,10	50	26,93	67,19	6967	0,244	0,792	6,132	graph-sch
Г6	202	13,80	13,90	93	26,14					5,097	prs-fyl
Г6	203	13,90	14,80	93							prs-fyl
Г6	204	14,80	15,60	93	26,10	80,20	13031	0,241	2,490		prs-fyl
Г6	205	15,60	16,60	93							prs-fyl
Г6	206	16,60	17,40	50							prs-fyl
Г6	207	17,40	17,80	50	26,40	76,27	12294	0,241	3,076		prs-fyl
Г6	208	17,80	19,40	50							prs-fyl
Г6	217	25,10	25,50	77							sch-marb_trans
Г6	218	25,50	25,70	77							sch-marb_trans
Г6	219	25,70	26,40	38							sch-marb_trans
Г6	220	26,40	27,20	66	26,03	67,68	13634	0,269			sch-marb_trans
Г6	221	27,20	27,60	66							sch-marb_trans
Г6	222	27,60	28,30	66		36,74			1,531		sch-marb_trans
Г6	223	28,30	28,50	56		116,02			4,834		sch-marb_trans
Г6	224	28,50	29,10	56							up-marb
Г6	225	29,10	30,00	56	26,14	75,68	12928	0,172	4,667	7,104	up-marb
Г6	226	30,00	30,20	56		110,26			4,594		up-marb
Г6	227	30,20	30,70	90							up-marb
Г6	228	30,70	30,90	90		106,99			4,458		up-marb

Γ6	229	30,90	31,50	90							up-marb
Γ6	230	31,50	32,10	90	26,58	108,74			4,531	6,555	up-marb
Γ6	231	32,10	33,30	90							up-marb
Γ6	232	33,30	33,50	90	26,43	78,90	12902	0,303			up-marb
Γ6	233	33,50	34,10	90							up-marb
Γ6	234	34,10	34,30	90		114,00			4,750		up-marb
Γ6	235	34,30	35,50	90							up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ6

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Γ7	236	14,00	14,20	0		5,28			0,220		graph-sch
Γ7	237	14,20	14,40	0							graph-sch
Γ7	238	14,40	14,60	0		7,06			0,294		graph-sch
Γ7	239	14,60	16,50	0							graph-sch
Γ7	240	16,50	16,70	0		6,89			0,287		graph-sch
Γ7	241	16,70	18,40	0							graph-sch
Γ7	242	18,40	18,60	60	26,47	16,71	4712	0,241			sch-marb_trans
Γ7	243	18,60	18,90	60							sch-marb_trans
Γ7	244	18,90	19,10	60	25,58	69,59	10442	0,228			up-marb
Γ7	245	19,10	19,70	60							up-marb
Γ7	246	19,70	19,90	60		85,44			3,560		up-marb
Γ7	247	19,90	20,20	60							up-marb
Γ7	248	20,20	20,40	68	26,52					5,023	up-marb
Γ7	249	20,40	21,30	68							up-marb
Γ7	250	21,30	21,60	68	26,13	55,13			2,297	5,522	up-marb
Γ7	251	21,60	22,60	68							up-marb
Γ7	252	22,60	23,20	68							up-marb
Γ7	253	23,20	24,00	95	25,25	74,00	9197	0,301	3,044		up-marb

Γ7	254	24,00	24,25	95							up-marb
Γ7	255	24,25	25,10	83		93,89			3,912		up-marb
Γ7	256	25,10	25,80	83							up-marb
Γ7	257	25,80	27,00	83	26,06	116,63	17340	0,297			up-marb
Γ7	258	27,00	27,90	83	25,98					4,849	up-marb
Γ7	259	27,90	28,10	83	26,12	104,71	16140	0,300			up-marb
Γ7	260	28,10	28,40	83							up-marb
Γ7	261	28,40	28,60	83		86,83			3,618		up-marb
Γ7	262	28,60	28,80	83							up-marb
Γ7	263	28,80	29,10	83	26,24	89,59			3,733	6,350	up-marb
Γ7	264	29,10	29,50	83							up-marb
Γ7	265	29,50	29,80	83		55,13			2,297		up-marb
Γ7	266	29,80	30,00	83							up-marb
Γ7	267	30,00	30,20	83	26,55	50,56	11083	0,296			up-marb
Γ7	268	30,20	31,70	83							up-marb
Γ7	269	31,70	31,90	83		52,46			2,186		up-marb
Γ7	270	31,90	32,20	83							up-marb
Γ7	271	32,20	33,00	90							up-marb
Γ7	272	33,00	33,30	90		96,65			4,027		up-marb
Γ7	273	33,30	33,70	90							up-marb
Γ7	274	33,70	34,00	90	26,42	82,94	13267	0,270		6,082	up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ7

hole_id	sample_id	depth_from	depth_to	rqd	w	sc	e	v	Is	st	geol
Γ8	301	16,20	16,70	75	26,12	31,12	7626	0,242		2,531	graph-sch
Γ8	302	16,70	17,40	75							graph-sch

Г8	303	17,40	18,10	57							graph-sch	
Г8	304	18,10	18,80	25							graph-sch	
Г8	305	18,80	18,90	25	25,64					2,437	graph-sch	
Г8	306	18,90	19,30	25							graph-sch	
Г8	307	19,30	19,50	25		11,64				0,485	graph-sch	
Г8	308	19,50	20,10	45							graph-sch	
Г8	309	20,10	20,70	45	26,02	22,31	7272	0,198	0,586	2,338	graph-sch	
Г8	310	20,70	20,90	45							graph-sch	
Г8	311	20,90	21,00	45		7,03				0,293	graph-sch	
Г8	312	21,00	21,20	45							graph-sch	
Г8	313	21,20	21,70	74							graph-sch	
Г8	314	21,70	22,20	74	26,26	38,03	7016	0,229	0,513		graph-sch	
Г8	315	22,20	22,40	74							graph-sch	
Г8	316	22,40	22,90	74							graph-sch	
Г8	317	22,90	24,30	29							graph-sch	
Г8	318	24,30	25,50	72							graph-sch	
Г8	319	25,50	25,80	72	25,50	12,29				0,512	2,430	graph-sch
Г8	320	25,80	26,80	72							graph-sch	
Г8	321	26,80	28,20	93							graph-sch	
Г8	275	3,90	4,10	0	26,04	8,04	3577	0,274			prs-fyl	
Г8	276	4,10	4,50	0							prs-fyl	
Г8	277	4,50	5,40	18							prs-fyl	
Г8	278	5,40	5,60	18		2,47				0,103	prs-fyl	
Г8	279	5,60	6,30	18							prs-fyl	
Г8	280	6,30	6,50	18		2,81				0,117	prs-fyl	
Г8	281	6,50	6,70	18							prs-fyl	
Г8	282	6,70	6,90	18		3,17				0,132	prs-fyl	
Г8	283	6,90	7,20	18							prs-fyl	
Г8	284	7,20	7,40	37							prs-fyl	
Г8	285	7,40	7,90	37	25,77	14,71	3582	0,185	0,190		prs-fyl	
Г8	286	7,90	8,20	37	25,53	10,82	1964	0,332			prs-fyl	

Γ8	287	8,20	8,70	37							prs-fyl
Γ8	288	8,70	9,50	21							prs-fyl
Γ8	289	9,50	9,70	21		5,28			0,220		prs-fyl
Γ8	290	9,70	10,10	21							prs-fyl
Γ8	291	10,10	11,10	71							prs-fyl
Γ8	292	11,10	11,40	71							prs-fyl
Γ8	293	11,40	11,60	71		10,56			0,440		prs-fyl
Γ8	294	11,60	12,00	64							prs-fyl
Γ8	295	12,00	13,00	64	25,44	30,50	7279	0,185		1,310	prs-fyl
Γ8	296	13,00	13,80	75							prs-fyl
Γ8	297	13,80	14,40	75							prs-fyl
Γ8	298	14,40	15,20	75							prs-fyl
Γ8	299	15,20	16,00	75		7,06			0,294		prs-fyl
Γ8	300	16,00	16,20	75							prs-fyl
Γ8	322	28,20	28,60	50							sch-marb_trans
Γ8	323	28,60	29,30	86							up-marb
Γ8	324	29,30	30,70	61							up-marb
Γ8	325	30,70	32,00	94							up-marb

Δεδομένα γεώτρησης Γ8

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο_1: Γεωτεχνική έρευνα-αβεβαιότητα γεωλογικού μέσου-κίνδυνοι κατά την κατασκευή υπογείων έργων	1
1.1. Εισαγωγή	3
1.2. Γεωλογική – Γεωτεχνική έρευνα υπεδάφους.....	3
1.2.1. Διάταξη και βάθος γεωτρήσεων σε σημαντικά έργα.....	6
1.2.2. Γεωτεχνική έκθεση	7
1.3. Πολυπλοκότητα του γεωλογικού μοντέλου.....	9
1.3.1. Επίδραση της Αβεβαιότητας στη Ζωή του Έργου	11
1.3.2. Υπόγεια έργα και αβεβαιότητα.....	12
1.4. Εμφάνιση προβλημάτων και κλίμακα της γεωλογικής έρευνας.....	15
1.4.1. Προβλήματα στην κατασκευή υπογείων έργων	16
1.4.1.1. Πτώση τεμαχίων βράχου.....	19
1.4.1.2. Κατάρρευση/ κατάπτωση μετώπου - οροφής	20
1.4.1.3. Επιφανειακές καθιζήσεις/ καταπτώσεις.....	20
1.4.1.4. Εισροή υδάτων	21
1.4.1.5. Ακαριαία διάρρηξη (απότομη εκτόνωση τάσης)	22
1.4.1.6. Σύγκλιση-διόγκωση.....	22
1.4.1.7. Οικονομικές συνέπειες.....	23
1.5. Προσπάθειες ελέγχου και αντιμετώπισης των προβλημάτων	24
Κεφάλαιο_2: Εισαγωγή στην χωρική ανάλυση (Spatial analysis).....	27
2.1. Εισαγωγή	29
2.2. Πρόβλεψη των γεωλογικών μεταβλητών	29
2.3. Ερμηνεία των γεωλογικών χαρακτηριστικών.....	30
2.4. Χωρική ανάλυση (Spatial analysis).....	31
2.4.1. Χωρική ανάλυση στην περιβαλλοντική μηχανική.....	31
2.4.2. Χωρική ανάλυση στη μεταλλευτική.....	32
2.4.3. Χωρική ανάλυση στην υδρογεωλογία.....	32
2.4.4. Χωρική ανάλυση στην γεωτεχνική μηχανική	32
2.5. Η εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων στη γεωτεχνολογία.....	34
2.5.1. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί.....	35
2.5.2. Περίπλοκοι παράγοντες για τις υπολογιστικές μεθόδους.....	36

2.5.3.	Στόχοι της χωρικής ανάλυσης	37
2.6.	Μέθοδοι χωρικής παρεμβολής (Spatial interpolation methods).....	39
2.6.1.	Μέθοδος παρεμβολής Αντιστρόφου Βαρύνουσας Απόστασης (Inverse Distance Weighted Interpolation Method).....	40
2.6.2.	Average nearest neighbour	41
2.6.3.	Γεωστατιστική	42
2.6.4.	Μέθοδος Kriging	43
2.7.	Παραδείγματα χωρικής ανάλυσης στην γεωτεχνική μηχανική	44
2.7.1.	Εκτίμηση επικινδυνότητας κατά την όρυξη υπογείων έργων με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (μετρό Αθήνας)	44
2.7.2.	Κατασκευή τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου δίδυμων σηράγγων στο Χονγκ Κονγκ.....	48
2.7.3.	Σήραγγες Kungkuan στην Ταϊpei, Taiwan	53
2.8.	Συμπεράσματα	55
Κεφάλαιο_3: Ο Υπόγειος Χώρος του Λαυρίου		57
3.1.	Εισαγωγή.....	59
3.2.	Σχεδιασμός – Στοιχεία του υπόγειου χώρου.....	61
3.3.	Γεωλογικά – Υδρογεωλογικά Στοιχεία.....	65
3.3.1.	Εισαγωγή	65
3.3.1.1.	Σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής (αυτόχθονο σύστημα)	65
3.3.1.2.	Νεοελληνικό τεκτονικό κάλυμμα.....	66
3.3.1.3.	Προσχωματικές αποθέσεις	67
3.3.1.4.	Τεχνητά μπάζα από υλικά της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας.....	67
3.3.1.5.	Ζώνες εξυγίανσης εδαφών.....	67
3.3.3.	Πιεζομετρία στο χώρο του Τ.Π.Π.Λ.....	67
3.3.4.	Γεωλογικά δεδομένα στην θέση κατασκευής.....	68
3.4.	Γεωτεχνικοί παράμετροι αναλύσεων.....	75
3.4.1.	Μονοαξονική αντοχή του πετρώματος σε θλίψη UCS.....	75
3.4.2.	Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης	75
3.4.3.	Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD (%).....	76
3.4.4.	Μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος	76
3.5.	Στατιστική επεξεργασία των γεωτρήσεων.....	79
3.6.	Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομάζας στην θέση κατασκευής.....	96

3.7. Υποστήριξη του υπόγειου χώρου.....	98
3.8. Γεωλογικά – Γεωτεχνικά προβλήματα.....	99

Κεφάλαιο_4: Χωρική ανάλυση γεωτεχνικών παραμέτρων στον υπόγειο χώρο του Λαυρίου.....103

4.1. Εισαγωγή	105
4.2. Δεδομένα-αναλύσεις αποτελεσμάτων	105
4.2.1. Μοντελοποίηση της ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου.....	105
4.2.2. Λογισμικό Surpac	106
4.2.3. Λειτουργία Block Modelling.....	107
4.2.4. Εισαγωγή γεωτρητικών δεδομένων στο λογισμικό Surpac.....	108
4.2.5. Εισαγωγή χωρικών και γεωγραφικών δεδομένων στο λογισμικό Surpac	109
4.2.6. Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων ανάλυσης (Block Models).....	111
4.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων	114
4.3.1. Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS	118
4.3.2. Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD.....	130
4.3.3. Μέτρο ελαστικότητας E	143
4.4. Σύγκριση της πραγματικής κατάστασης με τα αποτελέσματα των αναλύσεων.	154
4.4.1. Γεωτεχνικά προβλήματα στην περιοχή της εισόδου κατά την κατασκευή	154
4.4.2. Ερμηνεία αναλύσεων μοντελοποίησης σε τρεις περιοχές στον υπόγειο χώρο.....	155

Κεφάλαιο_5: Συμπεράσματα 173

Βιβλιογραφία 181

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1.1: Συνάντηση λιγνίτη κατά την διάρκεια διάνοιξης σήραγγας	7
Εικόνα 1.2: Απλό γεωλογικό μοντέλο.....	9
Εικόνα 1.3: Σύνθετο γεωλογικό μοντέλο	10
Εικόνα 1.4: Γεωλογική πολυπλοκότητα και προσομοίωση ηλικιακή κατανομή. Σε ένα απλό (1), σε ένα ενδιάμεσο (2), και σε ένα σύνθετο υδρογεωλογικό εννοιολογικό μοντέλο (3).....	14
Εικόνα 1.5: Αποστραγγιστική σήραγγα φράγματος Θησαυρού.....	19
Εικόνα 1.6: Καταρρεόν υλικό στο μέτωπο σήραγγας.....	20
Εικόνα 1.7: Περιστατικό καθίζησης στην οδό Πανεπιστημίου.....	21
Εικόνα 1.8 : Αποτελέσματα ψαθυρής θραύσης σε βάθος 3000m σε ορυχείο χρυσού στην Ν. Αφρική.....	22
Εικόνα 1.9: Σήραγγα. Τυμφορηστού. Φαινόμενα σύνθλιψης στον φλύσχη: σύγκλιση οροφής σε σήραγγα σε περιβάλλον ασθενούς διατημημένου φλύσχη.....	23
Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωλογικής δομής της περιοχής.....	46
Εικόνα 2.2: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της κατανομής των τιμών RQD στην περιοχή μελέτης	46
Εικόνα 2.3: Εμφάνιση γεωλογικού μοντέλου και σήραγγας.....	50
Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατο διακριτοποιημένο γεωλογικό μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία, με ξεχωριστά τα γεωλογικά στρώματα.	50
Εικόνα 3.1: Ευρύτερη περιοχή του Τ.Π.Π.Α	59
Εικόνα 3.2: Περιοχή κατασκευής του υπόγειου χώρου	60
Εικόνα 3.3: Άποψη του υπόγειου χώρου στην τελική φάση.....	63
Εικόνα 3.4: Η σήραγγα προσπέλασης κατά την φάση λειτουργίας του χώρου	64
Εικόνα 3.5: Συνάντηση σήραγγας προσπέλασης με υπόγειο χώρο.....	99
Εικόνα 4.1: Το τυπικό περιβάλλον λειτουργίας του Suprac για την αξιολόγηση των γεωτεχνικών δεδομένων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π.Α.....	108
Εικόνα 4.2: Εισαγωγή γεωτρητικών δεδομένων σε φύλλο xls από τα μητρώα των γεωτρήσεων.....	109
Εικόνα 4.3: Στύλοι υπόγειου χώρου, γεωτρήσεις και γεωλογικοί σχηματισμοί	110
Εικόνα 4.4: Block model και τοπογραφικό ανάγλυφο περιοχής εξέτασης.....	111
Εικόνα 4.5: Ευρύτερη περιοχή εξέτασης υπόγειου χώρου (bound).....	113
Εικόνα 4.6: Οι στύλοι του υπόγειου χώρου (pillars).....	114
Εικόνα 4.7: (α) Αναζήτηση τιμών στο χώρο με σφαίρα	115
(β) Αναζήτηση τιμών στο χώρο με έλλειψη.....	115
Εικόνα 4.8: Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου για UCS μεταξύ των γεωτρήσεων.....	117
Εικόνα 4.9: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής υπόγειου χώρου με UCS.....	119
Εικόνα 4.10: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $0 < UCS \leq 20 \text{MPa}$	121
Εικόνα 4.11: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $20 < UCS \leq 40 \text{MPa}$	122
Εικόνα 4.12: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $40 < UCS \leq 60 \text{MPa}$	123
Εικόνα 4.13: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $60 < UCS \leq 80 \text{MPa}$	124
Εικόνα 4.14: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη με blocks $UCS > 80 \text{MPa}$	124

Εικόνα 4.15: Οριζόντιες τομές στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου για την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη.....	125
Εικόνα 4.16: Γραφική απεικόνιση της κατανομής της αντοχής (UCS) στους στύλους του υπόγειου συγκροτήματος.....	127
Εικόνα 4.17: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής υπόγειου χώρου με RQD.....	131
Εικόνα 4.18: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με τιμές blocks $0 < RQD \leq 25$	133
Εικόνα 4.19: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με τιμές blocks $25 < RQD \leq 50$	134
Εικόνα 4.20: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $50 < RQD \leq 75$	135
Εικόνα 4.21: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $75 < RQD \leq 90$	136
Εικόνα 4.22: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας με blocks $90 < RQD \leq 100$	137
Εικόνα 4.23: Οριζόντιες τομές στον υπόγειο χώρο για RQD.....	139
Εικόνα 4.24: Γραφική απεικόνιση της κατανομής του δείκτη RQD στους στύλους.....	140
Εικόνα 4.25: Χωρικός περιορισμός ευρύτερης περιοχής του υπόγειου χώρου με E.....	144
Εικόνα 4.26: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $3500 < E \leq 7000$	146
Εικόνα 4.27: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $7000 < E \leq 10500$	147
Εικόνα 4.28: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $10500 < E \leq 14000$	148
Εικόνα 4.29: Μέτρο ελαστικότητας με blocks $E > 14000$	149
Εικόνα 4.30: Οριζόντιες τομές στον υπόγειο χώρο για E.....	150
Εικόνα 4.31: Γραφική απεικόνιση της κατανομής του E στους στύλους.....	151
Εικόνα 4.32: Περιοχή εισόδου.....	155
Εικόνα 4.33: (α) Περιοχή Α στην είσοδο.....	155
Εικόνα 4.34: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή εισόδου_οροφή του υπόγειου χώρου.....	156
Εικόνα 4.35: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή εισόδου_δάπεδο του υπόγειου χώρου.....	157
Εικόνα 4.36: Τομές κατά πλάτος του υπόγειου χώρου.....	157
Εικόνα 4.37: Απεικόνιση των τομών για UCS κατά πλάτος του υπόγειου χώρου.....	158
Εικόνα 4.38: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Α_οροφή του υπόγειου χώρου.....	159
Εικόνα 4.39: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Α_οροφή του υπόγειου χώρου.....	160
Εικόνα 4.40: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Β_οροφή του υπόγειου χώρου.....	161
Εικόνα 4.41: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Β_δάπεδο του υπόγειου χώρου.....	161
Εικόνα 4.42: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές UCS στην περιοχή Γ του υπόγειου χώρου.....	162
Εικόνα 4.43: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή εισόδου_οροφή του υπόγειου χώρου.....	164
Εικόνα 4.44: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή εισόδου_δάπεδο του υπόγειου χώρου.....	165
Εικόνα 4.45: Απεικόνιση των τομών για RQD κατά πλάτος του υπόγειου χώρου.....	166
Εικόνα 4.46: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Α_οροφή του υπόγειου χώρου.....	167
Εικόνα 4.47: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Α_δάπεδο του υπόγειου χώρου.....	168
Εικόνα 4.48: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Β_οροφή του υπόγειου χώρου.....	169

Εικόνα 4.49: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Β_δάπεδο του υπόγειου χώρου 169
Εικόνα 4.50: Απεικόνιση χωρικής ανάλυσης για τιμές RQD στην περιοχή Γ του υπόγειου χώρου..... 170

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1.: Συνάρτηση της γεωλογικής έρευνας μεταξύ της γεωλογικής δομής και του μεγέθους του έργου 5
Σχήμα 1.2: Συσχέτιση του κόστους έρευνας και του κόστους κατασκευαστικών προβλημάτων..... 6
Σχήμα 1.3: Παρουσίαση του εύρους της αβεβαιότητας..... 11
Σχήμα 1.4: Σχέση μεταξύ κόστους απαιτήσεων και λόγου μήκους γεωτρήσεων προς το μήκος σήραγγας 16
Σχήμα 1.5: Σχέση μεταξύ κόστους απαιτήσεων και κόστους των εργασιών έρευνας 16
Σχήμα 1.6: Κατανομή ανεπιθύμητων συμβάντων..... 18
Σχήμα 1.7: Επιλογές και επιπτώσεις στη σύμβαση μιας σήραγγας..... 24
Σχήμα 1.8: Διάγραμμα διασποράς χρόνου – κόστους κατασκευής της σήραγγας Gotthard... 25
Σχήμα 1.9: Μηκοτομή της εξεταζόμενης σήραγγας στον αρχαιολογικό χώρο του Κεραμεικού.....25

Σχήμα 2.1: Γενική διαδικασία γεωλογικού χαρακτηρισμού μέχρι την χωρική ανάλυση..... 33
Σχήμα 2.2: Γενικές απαιτήσεις για τον χαρακτηρισμό της γεωλογικής –γεωτεχνικής διαδικασίας..... 38
Σχήμα 2.3: Χάρτης της περιοχής με τα επιμέρους τμήματα ανάλυσης.....45
Σχήμα 2.4: Γραφική παρουσίαση των επιλεγμένων κατανομών αντοχής των γεωλογικών ενοτήτων..... 47
Σχήμα 2.5: Αναγνώριση των κατηγοριών τρωτότητας στις επιλεχθείσες περιοχές ανάλυσης 47
Σχήμα 2.6: Αποτελέσματα του krigging για τον πλήρως αποσαθρωμένο γρανίτη με τιμές RMR=25 51
Σχήμα 2.7: Χάρτης εκτίμησης RMR και της διασποράς στο σχηματισμό του γρανίτη 52
Σχήμα 2.8: Απεικόνιση της διασποράς των τιμών σε ολόκληρο το γεωτεχνικό μοντέλο 52
Σχήμα 2.9: Απεικόνιση των γεωτρήσεων κατά μήκος της σήραγγας 54
Σχήμα 2.10: Τιμές CPT κατά μήκος της σήραγγας..... 55

Σχήμα 3.1: Περιοχή χωροθέτησης του υπόγειου έργου στο χώρο του ΤΠΠΑ..... 61
Σχήμα 3.2: Τοπογραφικό διάγραμμα και όρια κατασκευής του υπόγειου χώρου..... 62
Σχήμα 3.3: (α). Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπόγειου θαλάμου
(β) Γενική άποψη του υπόγειου έργου αποθήκευσης στο Τ.Π.Π.Α..... 63
Σχήμα 3.4: Ισοϋψείς καμπύλες εμφάνισης της οροφής του ασβεστολιθικού σχηματισμού του Ανώτερου Μαρμάρου..... 69
Σχήμα 3.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπογείου χώρου στο χώρο του Τ.Π.Π.Α. σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους και το επίπεδο επαφής του Ανώτερου Μαρμάρου και του επωθημένου καλύμματος. Διακρίνεται η περιοχή όπου πιθανώς θα συναντηθεί η μεταβατική ζώνη ασβεστολίθου – σχιστολίθου..... 70
Σχήμα 3.6: Γραφικός προσδιορισμός διαφόρων μέτρων ελαστικότητας 77
Σχήμα 3.7: Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων..... 78
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πετρώματος.....79

Σχήμα 3.9: Κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών μέσα από τις γεωτρήσεις	80
Σχήμα 3.10: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος	81
Σχήμα 3.11: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος	82
Σχήμα 3.12: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος	82
Σχήμα 3.13: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος ..	83
Σχήμα 3.14: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) ασβεστόλιθου τεκτονικού καλύμματος.....	83
Σχήμα 3.15: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) γραφικού σχιστόλιθου.....	84
Σχήμα 3.16: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) γραφικού σχιστόλιθου	85
Σχήμα 3.17: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS γραφικού σχιστόλιθου.....	85
Σχήμα 3.18: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD γραφικού σχιστόλιθου.....	86
Σχήμα 3.19: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) γραφικού σχιστόλιθου.....	86
Σχήμα 3.20: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη	87
Σχήμα 3.21: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη.....	88
Σχήμα 3.22: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη	88
Σχήμα 3.23: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη.....	89
Σχήμα 3.24: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) πρασινοσχιστόλιθου-φυλλίτη.....	89
Σχήμα 3.25: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου	90
Σχήμα 3.26: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου	91
Σχήμα 3.27: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου	91
Σχήμα 3.28: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου.	92
Σχήμα 3.29: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) εναλλαγής ασβεστολίθου - σχιστολίθου	92
Σχήμα 3.30: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS με Is (MPa) ασβεστολίθου αν. μαρμάρου	93
Σχήμα 3.31: Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη UCS (MPa) ασβεστολίθου αν. μαρμάρου.....	94
Σχήμα 3.32: Συγκριτικό ιστόγραμμα UCS με Is και UCS ασβεστολίθου αν. μαρμάρου	94
Σχήμα 3.33: Δείκτης ποιότητας βραχομάζας RQD ασβεστολίθου αν. μαρμάρου	95
Σχήμα 3.34: Μέτρο ελαστικότητας E (MPa) ασβεστολίθου αν. Μαρμάρου	90
Σχήμα 3.35: Σκαρίφημα των μέτρων υποστήριξης των υπογείων θαλάμων.....	99
Σχήμα 3.36: Γεωλογικές χαρτογραφήσεις του μετώπου εκσκαφής στις θέσεις E0, E21 και E24.	100
Σχήμα 3.37: Άποψη της τελικής μορφής του χώρου όπως κατασκευάστηκε.	102
Σχήμα 4.1: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο	119
Σχήμα 4.2: Κατανομή των τιμών αντοχής σε θλίψη κατά μήκος (x) της περιοχής εξέτασης	120
Σχήμα 4.3: Κατανομή των τιμών UCS κατά πλάτος (y) της περιοχής εξέτασης.....	120
Σχήμα 4.4: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $0 < UCS \leq 20 \text{MPa}$	121

Σχήμα 4.5: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $20 < UCS \leq 40 \text{MPa}$	122
Σχήμα 4.6: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $40 < UCS \leq 60 \text{MPa}$	123
Σχήμα 4.7: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $60 < UCS \leq 80 \text{MPa}$	124
Σχήμα 4.8: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στον υπόγειο χώρο με blocks $UCS > 80 \text{MPa}$	125
Σχήμα 4.9: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη στους στύλους.....	127
Σχήμα 4.10 : Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη για κάθε στύλο.....	128
Σχήμα 4.11: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD στον υπόγειο χώρο.....	131
Σχήμα 4.12: Κατανομή των τιμών RQD κατά πλάτος (x) της περιοχής εξέτασης	132
Σχήμα 4.13: Κατανομή των τιμών RQD κατά μήκος (y) της περιοχής εξέτασης.....	132
Σχήμα 4.14: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στον υπόγειο χώρο με blocks $0 < RQD \leq 25$	133
Σχήμα 4.15: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στον υπόγειο χώρο με blocks $25 < RQD \leq 50$	134
Σχήμα 4.16: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $50 < RQD \leq 75$	135
Σχήμα 4.17: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $75 < RQD \leq 90$	136
Σχήμα 4.18: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $90 < RQD \leq 100$	137
Σχήμα 4.19: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD στους στύλους.....	140
Σχήμα 4.20: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του RQD για κάθε στύλο.....	141
Σχήμα 4.21: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του E στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου	144
Σχήμα 4.22: Κατανομή των τιμών E κατά μήκος (y) της περιοχής εξέτασης.....	145
Σχήμα 4.23: Κατανομή των τιμών E κατά πλάτος (x) της περιοχής εξέτασης	145
Σχήμα 4.24: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $3500 < E \leq 7000$	146
Σχήμα 4.25: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $7000 < E \leq 10500$	147
Σχήμα 4.26: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $10500 < E \leq 14000$	148
Σχήμα 4.27: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του μέτρου ελαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή του υπόγειου χώρου με blocks $E > 14000$	149
Σχήμα 4.28: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του E στους στύλους.....	151
Σχήμα 4.29: Συχνότητα και αθροιστική συχνότητα του E για κάθε στύλο.....	152
Σχήμα 4.30: Περιοχή εμφάνισης προβλημάτων.....	154
Σχήμα 4.31: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για UCS	159
Σχήμα 4.32: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Α για UCS.....	160
Σχήμα 4.33: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Β για UCS.....	162
Σχήμα 4.34: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για UCS.....	163
Σχήμα 4.35: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής εισόδου για RQD	167
Σχήμα 4.36: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Α για RQD	168

Σχήμα 4.37: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής-δαπέδου περιοχής Β για RQD.....	170
Σχήμα 4.38: Συγκριτικό διάγραμμα οροφής περιοχών Α, Β και Γ για RQD	171

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1.1: Μεταβλητότητα στα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας.....	13
Πίνακας 1.2: Τύποι ατυχημάτων κατά την κατασκευή υπογείων έργων	17
Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες σημείων οριοθέτησης της θέσεως κατασκευής.....	61
Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες ορίων του υπόγειου έργου.....	62
Πίνακας 3.3: Αναλυτικά στοιχεία γεωτρήσεων και απόλυτο υψόμετρο εμφάνισης οροφής σχηματισμού «Ανωτέρου Μαρμάρου».	68
Πίνακας 3.4: Βαθμονόμηση με βάση την αντοχή άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη σε (MPa)	75
Πίνακας 3.5: Βαθμονόμηση με βάση το δείκτη RQD (%).....	76
Πίνακας 3.6: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον ασβεστόλιθο τεκτονικού καλύμματος	81
Πίνακας 3.7: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον γραφιτικό σχιστόλιθο... ..	84
Πίνακας 3.8: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον πρασινοσχιστόλιθο-φυλλίτη.....	87
Πίνακας 3.9: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον εναλλαγή ασβεστολίθου με σχιστόλιθο	90
Πίνακας 3.10: Στατιστικά στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών για τον ασβεστόλιθο ανωτέρου μαρμάρου.....	93
Πίνακας 3.11: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ1.....	96
Πίνακας 3.12: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ2.....	97
Πίνακας 3.13: Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχώμαζας ασβεστολίθου του «Ανωτέρου Μαρμάρου» στη γεώτρηση Γ3.....	97
Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά στοιχεία γεωτρήσεων για τη εισαγωγή τους στο Surpac	110
Πίνακας 4.2: Πίνακας αναλύσεων του block model	116
Πίνακας 4.3: Δεδομένα αναλύσεων για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη.....	118
Πίνακας 4.4: Τιμές σ_c με I_s για στύλους	129
Πίνακας 4.5: Δεδομένα αναλύσεων για RQD.....	130
Πίνακας 4.6: Τιμές RQD για στύλους.....	142
Πίνακας 4.7: Δεδομένα αναλύσεων για E	143
Πίνακας 4.8: Τιμές E για στύλους.....	153
Πίνακας 4.9: Στοιχεία για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη των 3 περιοχών	156
Πίνακας 4.10: Στοιχεία για RQD των 3 περιοχών	164

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ_

- **Ζαβερδινός Μ.,** «Εξέταση των δυνατοτήτων επέκτασης του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο χώρο του Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου», Ε.Μ.Π., 2011
- **Καββαδάς Μ.,** «Σημειώσεις Μαθήματος: Σχεδιασμός Υπογείων Έργων», Ε.Μ.Π., 2005
- **Κακλίδης Α.,** «Χωρική ανάλυση προτύπων εσωτερικής μετανάστευσης και κινητικότητας με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών – προσδιορισμός ενός γεωγραφικά σταθμισμένου υποδείγματος», Ε.Μ.Π., 2009
- **Καραλή Ο.,** «Οπτικοποίηση ψηφιακού μοντέλου φυσικής επιφανείας, θεωρία & πράξη», Ε.Μ.Π., 2009
- **Καρασσάβας Χ., Σκαρλάτος Ε.,** «Σχεδιασμός εκμετάλλευσης λατομείου αργιλικών υλικών στην περιοχή Βασιλικού στην Κύπρο», Ε.Μ.Π., 2011
- **Κρασσακόπουλος Γ., Ταμβάκης Λ.,** «Εκτίμηση Κινδύνου στην Επέκταση της Γραμμής 2 του Μετρό των Αθηνών, Άγιος Αντώνιος-Περιστέρι», Ε.Μ.Π., 2011
- **Μαρίνος Π.,** «Μηχανοποιημένη όρυξη σηράγγων», Ε.Μ.Π., 2008
- **Μαρίνος Π.,** «Σχεδιασμός Σηράγγων», Ε.Μ.Π., 2009
- **Μενεγάκη Μ.,** «Σημειώσεις του Μαθήματος Σχεδιασμός Υπαιθρίων Εκμεταλλεύσεων», Ε.Μ.Π., 2010
- **Μπενάρδος Α.,** «Εκτίμηση Επικινδυνότητας κατά την Όρυξη Σηράγγων με Μηχανήματα Ολομέτωπης Κοπής» Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., 2002
- **Μπενάρδος Α., Καλιαμπάκος Δ.,** «Σημειώσεις Μαθήματος: Υπόγεια Έργα», Ε.Μ.Π., 2010
- **Μπενάρδος Α., Βαντόλας Β., Τσατσανίφος Χ., Ψαρρόπουλος Π., Παναγιώτου Μ., Καλιαμπάκος, Δ.,** «Γεωλογικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα κατά την Κατασκευή του Πρώτου Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Επικίνδυνων Αποβλήτων στην Ελλάδα»
- **Νεοφύτου Ν.,** «Χωροθετική ανάλυση εκπαιδευτικών μονάδων με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών: Μελέτη εφαρμογής στο Δήμο Πάφου», Ε.Μ.Π., 2010
- **ΠΑΝΓΑΙΑ σύμβουλοι μηχανικοί,** «Διαμόρφωση Υπόγειου Χώρου Στο Τ.Π.Π. Λαυρίου, Μελέτη Υπόγειου Χώρου», 2007

- **Παπαδόπουλος Α.**, «Ανάπτυξη χωρικού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη χωρικά καθορισμένη διαχείριση καλλιεργειών», Ε.Μ.Π., 2009
- **Παπακωνσταντίνου Δ.**, «Ανάλυση ευστάθειας στύλων στον υπόγειο χώρο του Τ.Π.Π. Λαυρίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Ε.Μ.Π., 2009
- **Παρασκευοπούλου Χ.**, «Ανάλυση κόστους εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης ελληνικών οδικών σηράγγων», Ε.Μ.Π., 2011
- **Σίμου Ι.**, «Κατασκευή τρισδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου δίδυμων σηράγγων στο Χονγκ Κονγκ», Πολυτεχνείο Κρήτης., 2010
- **Σοφιανός Α., Νομικός Π.**, «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων» Ε.Μ.Π., 2008
- **Τσαγγαράτος Π.**, «Διερεύνηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών με τη χρήση πληροφοριακών συστημάτων», Ε.Μ.Π., 2012
- **Τσιαμπάος Γ.**, «Μέθοδοι διερεύνησης υπεδάφους», Ε.Μ.Π., 2010
- **Φώτης Α., Γεωργακόπουλος Γ., Μανώλη Κ.**, «Εφαρμογή Block Modeling για την Προσομοίωση της Διασποράς Χημικών Παραμέτρων στα Υπερκείμενα Άγωνα των Ορυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας» Ε.Μ.Π., 2011
- **Χριστοπούλου Μ.**, «Σχεδιασμός εκπαιδευτικού προγράμματος στις γεωεπιστήμες», Ε.Μ.Π., 2011
- **Χριστοφόρου Μ.**, «Διερεύνηση χωροχρονικής εξέλιξης καταγίδας», Ε.Μ.Π., 2011

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ_

- **Akram M., and Bakar M. Z. A.**, “Correlation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index for Salt-Range Rocks”, 2007
- **Benardos A.**, “A methodology for accessing geotechnical hazards for TBM tunneling – illustrated by the Athens Metro, Greece”, 2004

- **Bieniawski, Z., T.** “Engineering Rock Mass Classifications” John Wiley, New York., 1989
- **Burrough, P.A.,** “Introduction to interpolation and elementary geostatistics. Lecture notes for GEOS. Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen” Universiteit Utrecht, 1993
- **Burrough, P.A.,** “Natural Objects with Indeterminate Boundaries. InGeographic” Objects with Indeterminate Boundaries, (eds.) P.A. Burrough and A. Frank, Taylor and Francis, 3-29, 1996a
- **Burrough, P.A.,** “Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment” Oxford, Clarendon Press, 1996b
- **Calcagno P., Courrioux G., Guillen A., Fitzgerald D., Mcinerney P.,** “How 3D implicit Geometric Modelling Helps To Understand Geology: The 3DGeoModeller Methodology”, 2006
- **Chilès J., Aug C., Guillen A., Lees T.,** “Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data: The Potential-Field Method”, 2004
- **Crain, I.K. and Bhattacharyya, B.K.,** “The treatment of two dimensional non-equispaced data with a digital computer” *Geoexploration*, **5**, 173-194, 1967
- **Crain, I.K.,**” Computer interpolation and contouring of two-dimensional data; a review” *Geoexploration*, **8**, 71-86, 1970
- **Christian, J.T., Ladd, C.C., Baecher, G.B.,** “Reliability Applied to Slope Stability Analysis”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, Issue 12, pp. 2180-2207, 1994
- **Einstein, H.H., Dudt, J.P., Halabe, V.B., Descoudres, F.,** “Decision Aids in Tunnelling – Principle and Practical Application”, Monograph, Swiss Fed. Office of Transportation, Project Alptransit, 1992
- **Fotheringham, A.S. and Rogerson, P.A.,** “GIS and spatial analytical problems” *Int. Journal of Geographical Information Systems*, **7(1)**, 3-19, 1993
- **Gemcom,** “Geological Database Surpac v6.1”, 2009
- **GIS by ESRI,** “Cell-based modeling with grid” Environmental Systems Research Institute. Inc. USA, 1994
- **Goodchild, M.F. and Lam, N.S-N.,** “Areal interpolation: a variant of the traditional spatial problem” *Geo-Processing*, **1**, 297-312, 1980

- **Grandori, R.**, “The Universal TBM in the Year 2000 – Technical and Contractual Aspects”, Σημειώσεις Μεταπτυχιακού Προγράμματος Εξειδίκευσης «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων», Ε.Μ.Π., 2000
- **Hamburger, D.**, “The Project Manager: Risk Taker and Contingency Planning”, Project Management Journal, vol. 4, June, pp. 43-48, 1990
- **Houlding S.**, “3D geosciences modeling - computer techniques for geological characterization”, Vancouver, 1994
- **International Tunnelling Association**, ‘Guidelines for Tunnelling Risk Management’, 2002
- **Lam, N.S.**, “Spatial interpolation methods: a review” The American Cartographer, **10**, 129-149, 1983
- **Loudon T.**, “Geoscience after IT - Part G. Familiarization with spatial analysis”, 2000
- **Matheron, G.**, “The theory of regionalized variables and its applications” Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau, No. 5, Paris, 1971
- **Nilsson B. , Højberg A., Refsgaard J., Troldborg L.**, “Uncertainty in geological and hydrogeological data” Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark, 2007
- **Oliver, M.A. and Webster, R.**, “Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. Int. J. Geographical Information Systems” **4(3)**, 313-332, 1990
- **Overeem I.**, “Geological Modeling:Introduction” University of Colorado, 2008
- **Parker, H.W.**, “Geotechnical Site Investigations”, Tunnelling Engineering Handbook, Ed. by Bickel J., Kuesel T., King E., Chapman and Hall, pp. 46-79, 1996
- **Ripley, B.**, “Spatial statistics” New York: Wiley, 1981
- **Sandersen P.**, “Uncertainty assessment of geological models – a qualitative approach”, 2007

- **Sinfield, J.V., Einstein, H.H.**, “Evaluation of Tunnelling Technology Using the Decision Aids in Tunnelling ”, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 11, No 4, pp. 491-504, 1996
- **Sousa. Rita L**, ‘Risk Analysis for Tunnelling Projects’, Massachusetts Institute of technology (MIT), 2010
- **Stavropoulou M., Xiroudakis G., Exadaktylos G.**, “Spatial estimation of geotechnical parameters for numerical tunneling simulations and TBM performance models”, 2010
- **Sterling R., Godard J.P.**, “Geoengineering considerations in the optimum use of underground space”,
- **U.S. National Committee on Tunneling Technology**, “ Geotechnical Site Investigations for Underground Projects, Volume 1 and Volume 2”, National Research Council 1984
- **Watson, D.F. and Philip, G.M.**, “A refinement of inverse distance weighted interpolation” Geo-Processing, 2, 315-327, 1985

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ_

<http://www.spatialanalysisonline.com/output/>

http://www.lynxgeo.com/HTML/Applications/apps_4.htm

<http://uww.ita-aites.org/index.php?id=573>

<http://www.ltp.ntua.gr/>

<http://www.sciencedirect.com/>

<http://www.lib.ntua.gr/>

