

Μια νέα προσέγγιση σχεδιασμού σηράγγων σε ανομοιογενείς εδαφοβραχώμαζες

A new approach of tunneling design in heterogeneous soil-rock masses

ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. Λέκτορας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΣΑΡΑΤΣΗΣ, Γ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, Υπ. Διδάκτορας, Πολυτεχνείο Κρήτης
ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, Γ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα μοντελοποίησης της χωρικής ετερογένειας των μηχανικών ιδιοτήτων εδαφοβραχωμαζών – εξαιτίας της γεωλογικής φύσης των - με τη βοήθεια της γεωστατιστικής μεθόδου. Στη συνέχεια γίνεται η πλήρης σύζευξη γεωστατιστικών ογκομετρικών μοντέλων με τρισδιάστατο αριθμητικό κώδικα πεπερασμένων διαφορών για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των υπογείων έργων. Τέλος, παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία κατά την εφαρμογή της στον σχεδιασμό δίδυμων σηράγγων στον Ελληνικό χώρο.

ABSTRACT: In this paper, the possibility of modeling the structural spatial heterogeneity exhibited by the mechanical properties of the soil-rock masses, with the aid of the classical geostatistical theory, is investigated. In the sequel, the complete coupling of geostatistical block models with a three-dimensional numerical mechanical model, is successfully performed aiming at the analysis of the mechanical behavior of the heterogeneous rock mass around tunnels. Finally, all the steps that should be performed according to the proposed methodology, are illustrated for a case the design of twin tunnels in Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία σχεδιασμού υπογείων έργων σήμερα, περιλαμβάνει την κατασκευή του γεωλογικού μοντέλου, εν συνεχεία του γεωτεχνικού μοντέλου (χαρακτηρισμός των γεωμηχανικών παραμέτρων της εδαφοβραχώμαζας, ύδατα και επιτόπου τάσεις), την κατασκευή του γεωμηχανικού μοντέλου (γεωμετρία των ανοιγμάτων και απαιτήσεις κατασκευής, συντοριακές συνθήκες, επιλογή μεθόδου εκσκαφής και υποστύλωσης) και μετά την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος εδαφοβραχώμαζας-υποστύλωσης. Στην συνέχεια διερευνάται αν η συμπεριφορά του καταρχήν προτεινόμενου συστήματος εκσκαφής και υποστύλωσης ικανοποιεί τις απαιτήσεις κατασκευής και ασφαλείας και με επαναληπτική διαδικασία οδηγούμεθα σε πρώτη φάση στην καλύτερη λύση. Κατόπιν,

επιμερίζοντας τα μοναδιαία κόστη και χρόνους για κάθε συνιστώσα του συστήματος, γίνεται η εκτίμηση του ρίσκου (πιθανότητα αστοχίας ή κακής εκτίμησης του κόστους) και εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της βέλτιστης σχεδιαστικής λύσης με το αποδεκτό παραμένον ρίσκο.

Ένας απ'τους ασθενέστερους κρίκους αυτής της διαδικασίας σχεδιασμού είναι η κατασκευή του γεωτεχνικού μοντέλου, το οποίο συνήθως δεν εμπεριέχει με ποσοτικό τρόπο την λεπτομερή χωρική ετερογένεια της εδαφοβραχώμαζας με εξαίρεση περιπτώσεις εντόνων τοπικών μεταβολών που οφείλονται στην ύπαρξη μεγάλων πτυχώσεων και ρηγμάτων, μετάβαση από ένα γεωλογικό σχηματισμό σε έναν άλλο κ.λπ. Ακόμα και σε περιπτώσεις καλής κρίσης του γεωλόγου ή του μηχανικού, η ποσοτικοποίηση της χωρικής ανομοιογένειας της βραχώμαζας και της

σχετιζόμενης αβεβαιότητας των εκτιμώμενων ιδιοτήτων δεν γίνεται με κάποιο τυποποιημένο και αξιόπιστο (ελεύθερο σφαλμάτων) τρόπο. Αυτό έχει συχνά ως αποτέλεσμα οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στα γεωμηχανικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας να υποεκτιμώνται ή να εξομαλύνονται σημαντικά, και ως εκ τούτου να μην είναι αντιπροσωπευτικά των γεωλογικών σχηματισμών. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί συνήθως σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και απώλεια χρόνου. Η εφαρμογή της γεωστατιστικής μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης σχεδιαστικής λύσης αλλά και στον υπολογισμό της σχέσης του μεγέθους της επένδυσης στην γεωλογική-γεωτεχνική έρευνα με το ρίσκο δεδομένων αστοχιών.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μεθοδολογία που βασίζεται (α) στη γεωστατιστική μέθοδο παρεμβολής δειγματοληπτικών τιμών γεωτεχνικών μεταβλητών στο χώρο, (β) σε σύγχρονες μεθόδους τρισδιάστατης ψηφιακής απεικόνισης γεωμηχανικών μοντέλων και (γ) σε τρισδιάστατες υπολογιστικές μεθόδους προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς της εδαφο-βραχώμαζας. Ο συνδυασμός των (α) και (β) μπορεί να αναπαράξει εύκολα την χωρική γεωλογική ετερογένεια και την χωρική μεταβλητότητα των μηχανικών ιδιοτήτων μιας εδαφοβραχώμαζας. Η επιτευχθείσα προτεινόμενη άμεση σύνδεση των τριών αυτών μοντέλων-εργαλείων με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους οδηγεί στην επίλυση τρισδιάστατων μηχανικών προβλημάτων κατασκευής υπογείων έργων σε ανομοιογενείς εδαφοβραχώμαζες.

Τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό και την οπτική απεικόνιση (visualization) της μηχανικής συμπεριφοράς σπηραγγών είναι το γεωστατιστικό πρόγραμμα SURPAC, το γεωμηχανικό πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC^{3D}, και άλλοι κώδικες σε γλώσσα προγραμματισμού C, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης εργασίας και ήταν αναγκαίοι για την πληρέστερη γεωστατιστική ανάλυση, την επαλήθευση των ογκομετρικών μοντέλων παρεμβολής και την σύζευξη του γεωστατιστικού και του μηχανικού μοντέλου.

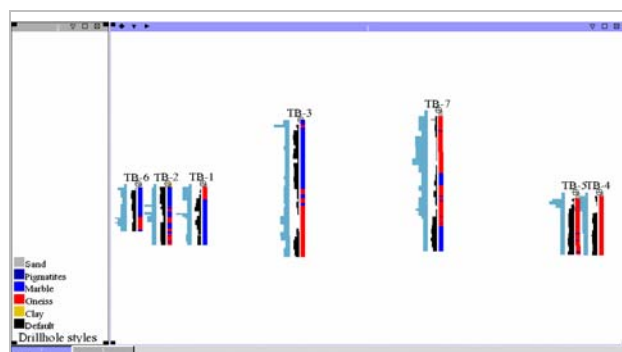
2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα στάδια που προτείνονται για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου γεωλογικού –γεωτεχνικού μοντέλου παρουσιάζονται στη συνέχεια με συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής στο σχεδιασμό μιας δίδυμης σήραγγας στην Ελλάδα.

2.1 Κατασκευή βάσης δεδομένων

Το πρώτο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναφέρεται στην συλλογή και επεξεργασία δεδομένων πεδίου, όπως γεωλογική χαρτογράφηση και τεκτονική αποτύπωση στην γειτονιά των σπηραγγών, τοπογραφικούς χάρτες και δεδομένα επι-τόπου ερευνητικών γεωτρήσεων (λιθολογία, δείκτης κερματισμού, δείκτης αποσάθρωσης, ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους, υπόγεια ύδατα, επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές σε αντιπροσωπευτικά δείγματα). Τα στοιχεία αυτά επεξεργάστηκαν κατάλληλα και εισήχθησαν σε δύο βάσεις δεδομένων με απευθείας επικοινωνία ACCESS και SURPAC, αντίστοιχα. Η επεξεργασία των στοιχείων έγινε με βάση το σύστημα ταξινόμησης Bieniawski του 1989.

Σύμφωνα με την γεωλογική μελέτη της περιοχής ενδιαφέροντος, οι δίδυμες σήραγγες θα διανοιχθούν σε σχηματισμούς μαρμάρων και βιοτιπικών γνευσίων. Κατά τη φάση του γεωερευνητικού προγράμματος της μελέτης, κατά μήκος των αξόνων των σπηραγγών, ορύχθηκαν επτά ερευνητικές γεωτρήσεις.

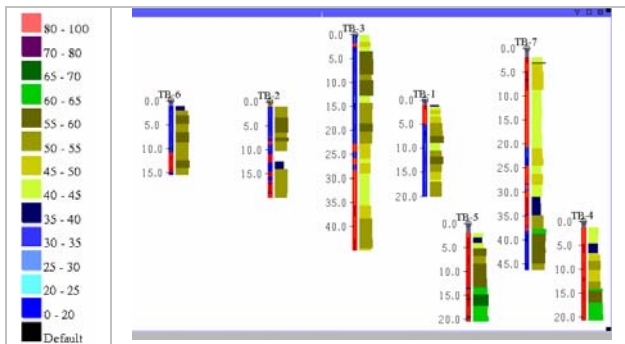


Σχήμα 1. Λιθολογία και κατανομή του RQD στις ερευνητικές γεωτρήσεις.

Figure 1. Lithology and distribution of RQD along the boreholes.

Η λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών στους πυρήνες δειγματοληψίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1, όπου επιπλέον έχουν

αποτυπωθεί και οι μετρηθείσες τιμές του δείκτη ποιότητας πετρώματος RQD υπό μορφή ιστογράμματος συχνότητας. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται υπό μορφή ιστογράμματος συχνότητας ο δείκτης ταξινόμησης RMR κατά μήκος των ερευνητικών γεωτρήσεων.

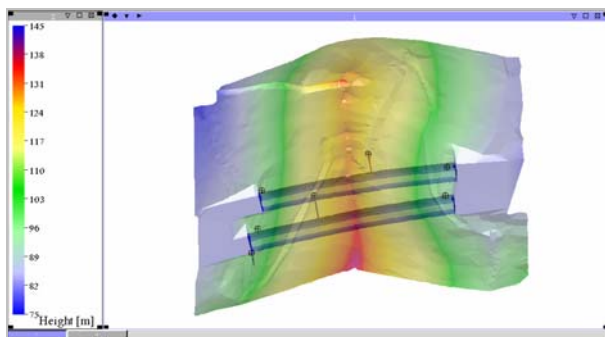


Σχήμα 2. Τιμές RMR κατά μήκος των γεωτρήσεων.

Figure 2. Distribution of RMR values along the boreholes.

2.2 Κατασκευή τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων επιφανείας και γεωλογίας

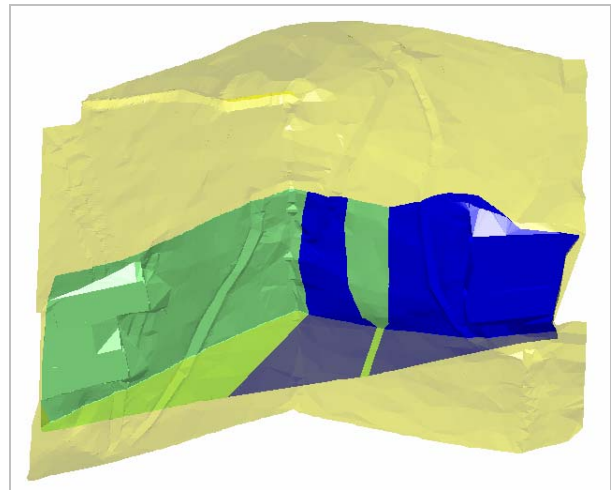
Στο στάδιο αυτό, με βάση τους τοπογραφικούς χάρτες και τα σχέδια των σηράγγων κατασκευάζεται ψηφιακό μοντέλο επιφανείας DTM (Digital Terrain Model) της περιοχής στην άμεση γειτονία των σηράγγων και τοποθετούνται στο μοντέλο αυτό οι θέσεις των γεωτρήσεων και των άλλων μεθόδων δειγματοληψίας, Σχήμα 3. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος τριγωνοποίησης του υπολογιστικού προγράμματος Surpac για την κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας της περιοχής των διδύμων σηράγγων από δεδομένα τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:500.



Σχήμα 3. Ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DTM) με τις ερευνητικές γεωτρήσεις και τις σήραγγες.

Figure 3. Digital terrain model with the boreholes and tunnels.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωλογίας και της τεκτονικής με βάση επιφανειακές γεωλογικές – τεκτονικές αποτυπώσεις και τα δεδομένα λιθολογικής εξέτασης των ερευνητικών γεωτρήσεων. Τα δύο αυτά μοντέλα στο τέλος ολοκληρώνονται σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας – γεωλογίας – τεκτονικής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Το γεωλογικό μοντέλο μας βοηθάει στην καλύτερη και αντικειμενική γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων που ακολουθεί.



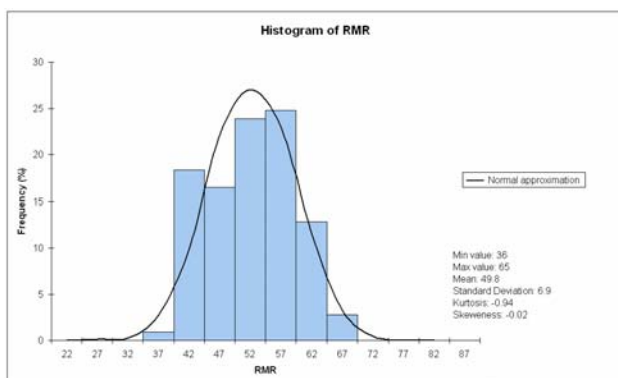
Σχήμα 4. Απεικόνιση του γεωλογικού μοντέλου της περιοχής μελέτης (το μάρμαρο και ο γνεύσιος παρουσιάζονται με πράσινο και μπλε χρώμα, αντίστοιχα)

Figure 4. Geological model of the studied area (marble and gneiss are shown with green and blue color, respectively).

2.3 Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου κατανομής γεωτεχνικών παραμέτρων

Το τρίτο στάδιο αφορά: (α) στην κλασική στατιστική ανάλυση των δειγμάτων που έχουν αποθηκευθεί στη βάση δεδομένων (Στάδιο Ι) με σκοπό τον υπολογισμό του τύπου της κατανομής που ακολουθούν αυτά, καθώς και των επιπέδων εμπιστοσύνης των εκτιμήσεων, (β) στην κατασκευή βαριογραμμάτων με βάση τα οποία υπολογίζονται οι μέγιστες αποστάσεις και διευθύνσεις επιρροής (χωρική συσχέτιση) της κάθε χωρικής μεταβλητής, και (γ) στην κατασκευή του ογκομετρικού μοντέλου με κατάλληλη μέθοδο παρεμβολής. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η εκτιμώμενη μέση τιμή και διασπορά κάθε μιας από τις γεωτεχνικές παραμέτρους σε πρισματικούς όγκους καταλλήλων διαστάσεων, στους οποίους έχει υποδιαιρεθεί ολόκληρη η περιοχή ενδιαφέροντος.

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της γεωστατιστικής ανάλυσης είναι τα δεδομένα να αναφέρονται σε πυρήνες ίδιου μήκους. Οι μεταβλητές των δειγμάτων για πυρήνες ίσου μήκους $l = 3 \text{ m}$ υπολογίστηκαν με σταθμικούς μέσους των αντίστοιχων μεταβλητών των πραγματικών δειγμάτων διαφορετικού μήκους. Δεδομένου ότι η τεχνική «Ordinary Kriging» που θα εφαρμοστεί στη συνέχεια υποθέτει κανονική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πόσο καλά η κατανομή μιας μεταβλητής προσεγγίζει την κανονική (Gaussian) κατανομή πιθανότητας. Ένας πρώτος ποιοτικός έλεγχος της υπόθεσης αυτής για τη μεταβλητή RMR – μετά την κανονικοποίηση της σε πυρήνες ίδιου μήκους - παρουσιάζεται στο Σχήμα 5, όπου παρουσιάζεται υπό μορφή ιστογράμματος η κατανομή συχνότητας του. Από το Σχήμα 5 μπορεί να παρατηρηθεί πως στην συγκεκριμένη περίπτωση, η κατανομή του RMR μπορεί να προσεγγιστεί με την κανονική κατανομή με μέση τιμή RMR=50 και τυπική απόκλιση ίση με RMR=7. Η βραχόμαζα μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες βραχόμαζας (δηλ. Κατηγορία II: $61 < \text{RMR} < 80$, III: $41 < \text{RMR} < 60$ και IV: $21 < \text{RMR} < 40$).

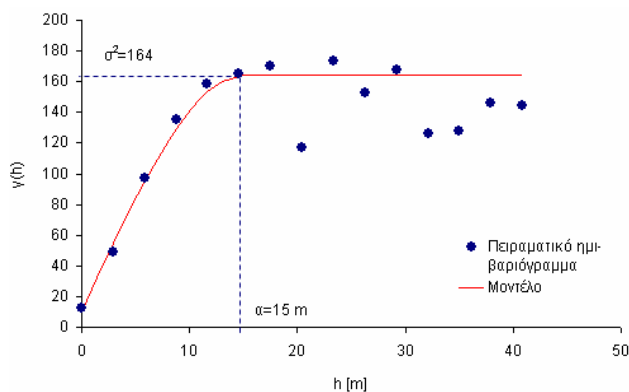


Σχήμα 5. Ιστόγραμμα κατανομής της συχνότητας εμφάνισης των τιμών του RMR και η προσαρμοσμένη καμπύλη κανονικής κατανομής (συνεχής γραμμή).
Figure 5. Frequency histogram of RMR.

Το πειραματικό ημι – βαριόγραμμα του RMR παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Το ημι-βαριόγραμμα συμβολίζεται με $\gamma(\cdot)$ και ορίζεται ως το μισό της μέσης εκτιμώμενης τιμής της διαφοράς μεταξύ δύο δειγματοληψιών σε σημεία που απέχουν με διάστημα h_i υψωμένης στο τετράγωνο, δηλ.

$$\gamma(h_i) = \frac{1}{2N(h_i)} \sum_{i=1}^{N(h_i)} [Z(x_i) - Z(x_i + h_i)]^2 \quad (1)$$

όπου $N(h_i)$ είναι ο αριθμός των ζευγαριών, $Z(x_i)$ και $Z(x_i + h_i)$ είναι οι μετρηθείσες τιμές της μεταβλητής.



Σχήμα 6. Ισότροπο πειραματικό ημι – βαριόγραμμα του RMR με το προσαρμοσμένο σφαιρικό μοντέλο ημι-βαριόγραμματος.
Figure 6. Omnidirectional semi-variogram of RMR and fitted spherical model.

Το αρχικό σφάλμα είναι η τιμή $\gamma(0)$, δηλ. η τιμή του ημι – βαριόγραμματος για απόσταση δειγμάτων ίση με το μηδέν. Κανονικά, η τιμή αυτή πρέπει να είναι ίση με μηδέν, αλλά συνήθως αυτό δεν συμβαίνει εξαιτίας της τοπικής γεωλογικής ετερογένειας, των σφαλμάτων κατά την δειγματοληψία κ.λπ. Το ημι – βαριόγραμμα αυξάνει με την απόσταση, γεγονός που δείχνει πως η συσχέτιση του RMR μειώνεται (ή η συνδιασπορά μειώνεται) καθώς αυξάνει η απόσταση (lag) h μεταξύ δύο σημείων δειγματοληψίας. Όταν η απόσταση γίνει αρκετά μεγάλη η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών $Z(x_i)$ και $Z(x_i + h)$ παύει να υπάρχει, και το ημι – βαριόγραμμα τείνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή. Η απόσταση αυτή καλείται «ακτίνα επιρροής», και αναπαριστά εκείνη την απόσταση (για ισότροπο μοντέλο) πέρα από την οποία τα ζεύγη των δειγμάτων δεν συσχετίζονται πλέον μεταξύ τους. Η διαφορά μεταξύ της «οροφής» και της τιμής του ημι – βαριόγραμματος σε απόσταση h , δίδει το επίπεδο εμπιστοσύνης μιας προβλεφθείσας τιμής. Είναι δυνατό να υπολογιστεί το στατιστικό σφάλμα σ_i (τυπική απόκλιση), των διαφορών για ένα διάστημα, από τις ημι – διασπορές, καθώς

$$\sigma_i = \sqrt{\gamma_i} \quad (2)$$

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το τυπικό σφάλμα υπολογισμού αυτών έχει τη δική του χωρική μεταβλητότητα, που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα χωρικό μοντέλο μαζί με τις προβλεφθείσες μέσες τιμές.

Το πειραματικό ισότροπο ημι-βαριόγραμμα του RMR, μπορεί να προσεγγισθεί με το σφαιρικό μοντέλο ημι-βαριογράμματος, που αποδίδεται από την σχέση:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \left(\frac{3h}{2\alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\alpha} \right)^3 \right) \sigma^2, & 0 \leq h \leq \alpha \\ \sigma^2, & h > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

όπου α είναι η ακτίνα επιρροής και σ^2 η διασπορά του πληθυσμού. Οι παράμετροι του ημι-βαριογράμματος για το RMR όπως αυτό προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Γεωτεχνική παράμετρος	Παράμετροι ημι-βαριογράμματος		
	Φαινόμενο κόκκου	Οροφή	Ακτίνα [m]
RMR	10	154	15.0

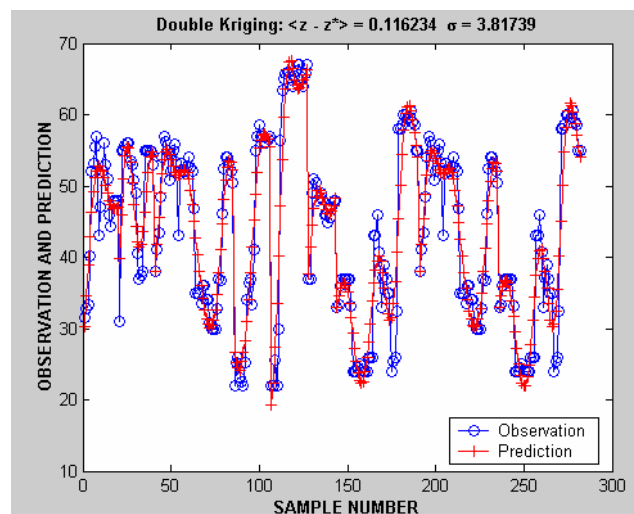
Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο κόκκου είναι μικρό, γεγονός που δείχνει πως δεν υπάρχει κάποια σημαντική μεταβολή στις τιμές του RMR σε πολύ μικρές αποστάσεις h . Όπως φαίνεται στον πίνακα η μέγιστη ακτίνα επιρροής του RMR είναι ίση με 15 m.

Στη συνέχεια, έγινε χρήση της μεθόδου «ογκομετρικού kriging», για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής του RMR στην περιοχή γύρω από τις γεωτρήσεις. Η μέθοδος αυτή προβλέπει την «καλύτερη αμερόληπτη γραμμική εκτιμήτρια» της μέσης τιμής μιας χωρικής μεταβλητής σε οποιονδήποτε όγκο V της βραχόμαζας, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί την αβεβαιότητα των προβλέψεων.

Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου ογκομετρικής μοντελοποίησης (block modeling), είναι η πλήρωση του τρισδιάστατου χώρου με μικρά ορθογωνικά παραλληλεπίπεδα στοιχεία, που καλούνται

στοιχειώδεις όγκοι (blocks) και η βέλτιστη αμερόληπτη πρόβλεψη στο εσωτερικό ενός εκάστου των στοιχείων της μέσης τιμής και της διασποράς του RMR βάσει του θεωρητικού βαριογράμματος και των περιορισμένων πειραματικών μετρήσεων στις δεδομένες θέσεις δειγματοληψίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ένα σύνολο από κυβικά ογκοτεμάχια διαστάσεων 5x5x5 m, για να καλυφθεί η υπό μελέτη περιοχή. Το θεωρητικό ημι-βαριόγραμμα του Σχήματος 6 χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς.

Ο υπολογισμός των τιμών του RMR στο εσωτερικό των κυβικών ογκοτεμαχίων βασίστηκε στη μέθοδο του «Συνήθους Kriging». Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε μόνο στα σημεία τα οποία εμπεριέχονται σε μια σφαίρα ακτίνας ίσης με την μέγιστη ακτίνα επιρροής γύρω από τα γνωστά σημεία δειγματοληψίας, καθώς όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν θεωρήθηκαν ισότροπα. Η θεώρηση αυτή έγινε, καθώς ο αριθμός των αρχικών δεδομένων δεν ήταν αρκετός ώστε να κατασκευαστούν αξιόπιστα ημι-βαριογράμματα σε διαφορετικές διευθύνσεις.



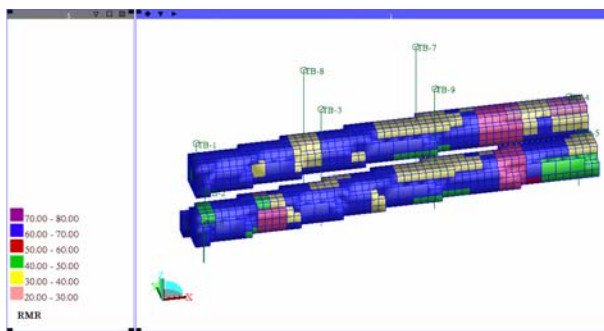
Σχήμα 7. Σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα σε κάθε σημείο δειγματοληψίας στις γεωτρήσεις.

Figure 7. Comparison of the model and experiment with the method of double Kriging.

Το επόμενο στάδιο πριν την κατασκευή του μηχανικού μοντέλου, αφορά την επαλήθευση του ογκομετρικού μοντέλου Kriging. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε η διαδικασία του διπλού Kriging κατά την οποία σε πρώτη φάση υπολογίζονται τα RMR σε κάθε κόμβο του τριδιάστατου πλέγματος και σε δεύτερη φάση με βάση τις προβλέψεις αυτές εκτιμώνται

τα RMR στις θέσεις δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα της ανάδρομης αυτής ανάλυσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 7. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μοντέλο αν και επιβάλλει κάποια μικρή εξομάλυνση, εν τούτοις βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις.

Τα ογκομετρικά μοντέλα των διδύμων σηράγγων παρουσιάζονται στο Σχήμα 8. Μετά το στάδιο της χωρικής συσχέτισης των δεδομένων των γεωτρήσεων, με την επέκταση της βάσης δεδομένων με το ογκομετρικό μοντέλο του RMR, έπεται η μεταφορά του ογκομετρικού μοντέλου μηχανικών ιδιοτήτων της βραχόμαζας σε κατάλληλο τρισδιάστατο αριθμητικό κώδικα.



Σχήμα 8. Τρισδιάστατο ογκομετρικό μοντέλο δείκτη ταξινόμησης RMR στην περιοχή των σηράγγων.

Figure 8. 3D block model of RMR for the system of twin tunnels.

2.4 Μεταφορά του ογκομετρικού μοντέλου σε 3D αριθμητικό κώδικα προσομοίωσης

Στο τελευταίο στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας γίνεται αυτόματη μεταφορά του ογκομετρικού μοντέλου μηχανικών ιδιοτήτων σε τρισδιάστατο αριθμητικό κώδικα έτσι ώστε να είναι έτοιμο το πλήρες γεωμηχανικό μοντέλο για περαιτέρω προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των σηράγγων και των σταδίων εκσκαφής και υποστύλωσης.

Στο υπόψη παράδειγμα κατασκευάστηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού C για την αυτόματη μεταφορά στο τρισδιάστατο κώδικα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$, Σχήμα 9:

- του ογκομετρικού μοντέλου δεικτών γεωτεχνικής ταξινόμησης βραχόμαζας που έχει προκύψει από την γεωστατιστική ανάλυση (δηλαδή, των συντεταγμένων των διακριτοποιημένων όγκων καθώς και του δείκτη RMR σε καθένα όγκο όπως

υπολογίσθηκαν με την μέθοδο kriging από το Surpac),

- των εκτιμήσεων σε κάθε ένα διακριτοποιημένο όγκο των μηχανικών ιδιοτήτων του, βάσει εξισώσεων συσχέτισης που έχουν καθιερωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.



Σχήμα 9. Σύζευξη γεωστατιστικού – αριθμητικού μοντέλου (X,Y,Z είναι οι Καρτεσιανές συντεταγμένες).

Figure 9. Sketch of the coupling of the geostatistical and numerical models.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχόμαζας έγινε σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

- ο λόγος Poisson της βραχόμαζας θεωρήθηκε ίσος με 0.3, ενώ το μέτρο ελαστικότητας E υπολογίσθηκε με την χρήση του εμπειρικού νόμου των Serafim και Pereira

$$E = 10^{40} \frac{RMR-10}{40}, \quad RMR < 80$$

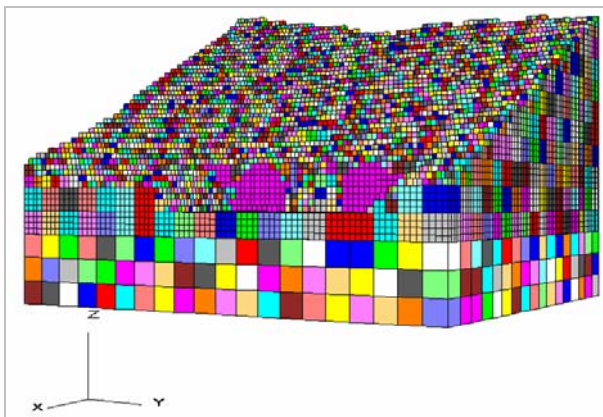
- η συνοχή c της βραχόμαζας συσχετίστηκε με το RMR με την χρήση γραμμικής παρεμβολής, σύμφωνα με τον Bieniawski και προέκυψε η παρακάτω εξίσωση:

$$c = 0.005 \cdot RMR \quad [MPa]$$

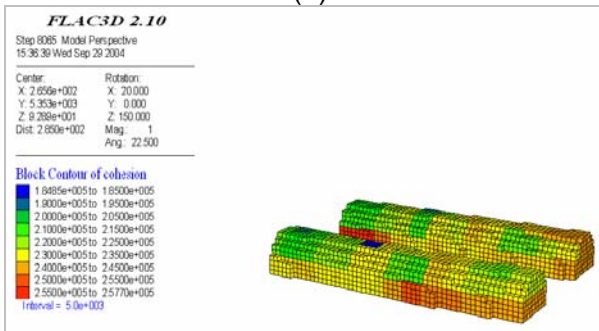
- η γωνία εσωτερικής τριβής της βραχόμαζας υπολογίσθηκε από το RMR με την χρήση πάλι της εμπειρικής σχέσης του Bieniawski

$$\varphi = 0.5 \cdot RMR + 5 \quad [deg]$$

Το πλέγμα των πεπερασμένων ογκοτεμαχίων που μεταφέρθηκε από το Surpac στο $FLAC^{3D}$, παρουσιάζεται στο Σχήμα 10α, όπου διακρίνονται στοιχεία διαστάσεων 1.25x1.25x1.25 m και 5x5x5 m στο επάνω και στο κάτω τμήμα του μοντέλου, αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από 123496 στοιχεία κυβικού σχήματος. Στο Σχήμα 10β παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή της συνοχής της βραχόμαζας στην περιοχή των σηράγγων.



(α)



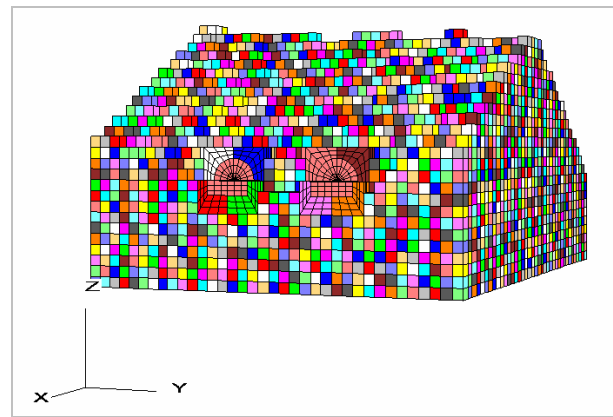
(β)

Σχήμα 10. (α) Τρισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών όπως αυτό εισήχθη στο FLAC^{3D} από το SURPAC και (β) κατανομή της συνοχής στις σήραγγες.

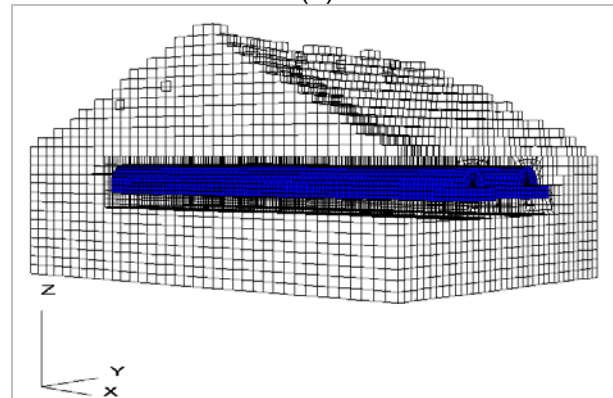
Figure 10. (a) 3D finite differences grid and (b) distribution of cohesion of the rock mass inside the tunnels.

Τα κυβικά στοιχεία που κατασκευάστηκαν στο Surpac, έχουν το μειονέκτημα ότι δημιουργούν ανώμαλες επιφάνειες στο σύνορο των σηράγγων αποτελούμενες από ένα σύνολο ευθυγράμμων τμημάτων, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα κυρίως κατά το στάδιο εισαγωγής των στοιχείων προσομοίωσης της προσωρινής υποστύλωσης των σηράγγων. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί με δύο τρόπους: (α) είτε μειώνοντας πάρα πολύ τις διαστάσεις των στοιχείων του μοντέλου, κάτι που αυξάνει απαγορευτικά το χρόνο επίλυσης, (β) είτε προσαρμόζοντας στην περιοχή της διατομής της σήραγγας το κυβικό σχήμα των στοιχείων του SURPAC σε κατάλληλα κυλινδρικά ακτινικά στοιχεία που χρησιμοποιεί το FLAC^{3D}.

Το τελικό πλέγμα και οι σήραγγες με τα κυλινδρικά στοιχεία στην περιοχή διατομής των σηράγγων παρουσιάζονται στο Σχήμα 11. Στην περίπτωση αυτή το τρισδιάστατο μοντέλο αποτελείται από 50123 στοιχεία, αριθμό πολύ μικρότερο από αυτό του πρώτου, γεγονός που



(α)



(β)

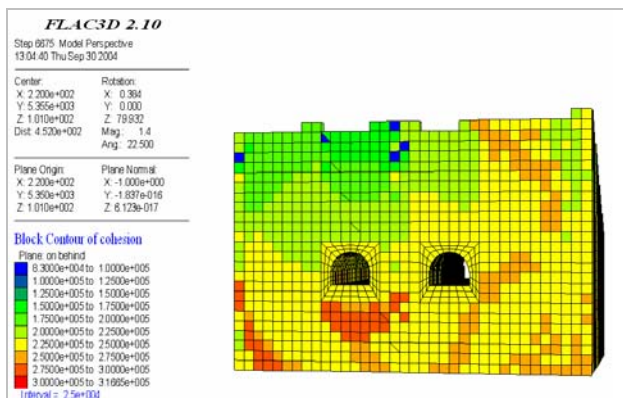
Σχήμα 11. (α) Απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων διαφορών αποτελούμενο από κυλινδρικού και κυβικού σχήματος στοιχεία και (β) το πλέγμα του μοντέλου με τις διδυμες σήραγγες.

Figure 11. (a) Perspective views of FLAC^{3D} finite difference mesh consisting of brick- and cylindrical- shaped elements, and (b) model grid with the twin tunnels.

επιταχύνει αρκετά την επίλυση. Τέλος, στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κατανομή της συνοχής σε τυχαία τομή κατά μήκος του άξονα των σηράγγων. Μετά την επιτυχή μεταφορά του γεωστατιστικού μοντέλου στο FLAC^{3D}, είναι δυνατή η περαιτέρω προσομοίωση των διαφόρων σταδίων εκσκαφής και υποστύλωσης των σηράγγων.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γεωλογική και συχνά αβέβαιη φύση των γεωτεχνικών παραμέτρων και των καταστατικών νόμων των γεωυλικών, καθώς και η διαρκώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα σχεδιασμού και κατασκευής των υπογείων έργων απαιτούν πιο προηγμένα μοντέλα και



Σχήμα 12. Κατακόρυφη τομή όπου απεικονίζεται η κατανομή της συνοχής της βραχομάζας.
Figure 12. Vertical cross-section of the spatial distribution of cohesion.

εργαλεία για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας με συστηματική και ενδεδειγμένη μεθοδολογία, τα οποία ταυτόχρονα να ικανοποιούν τις ανάγκες του μηχανικού. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι: (α) να καταδειχθεί πως η δομική συνιστώσα της χωρική ανομοιογένειας των γεωτεχνικών παραμέτρων μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, και (β) να συνδέσει τη γεωστατιστική μέθοδο πρόβλεψης Kriging με τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις αναλύσεις τάσης – παραμόρφωσης στις υπόγειες εκσκαφές. Συμπερασματικά μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

1. η εγγενής χωρική ετερογένεια των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας μπορεί να αναπαραχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό με τη βοήθεια της μεθόδου Kriging.
2. Το συζευγμένο γεωστατιστικό-τρισεπίπεδο αριθμητικό μοντέλο μπορεί να αποτελέσει εργαλείο πρόβλεψης των αναμενόμενων γεωτεχνικών συνθηκών και το εντατικό – παραμορφωσιακό πεδίο μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας και γύρω από αυτήν και να ελέγχεται συνεχώς κατά την εξόρυξη, αναβαθμίζοντας ή διορθώνοντας το αρχικό μοντέλο με νέα στοιχεία. Η τελευταία αυτή προσέγγιση αποτελεί σήμερα και την κεντρική ιδέα της παρατηρησιακής μεθόδου (*observational method*) στο σχεδιασμό και κατασκευή των υπογείων έργων.
3. Η παρούσα μεθοδολογία σε συνδυασμό με προηγμένες μεθόδους οπτικοποίησης της μεταβολής της γεωλογίας, των γεωτεχνικών παραμέτρων και των τάσεων, αλλά και δεδομένων επί τόπου μετρήσεων

των παραμορφώσεων των υπογείων έργων, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο του μηχανικού για την αποφυγή συντηρητικού σχεδιασμού των με τη χρήση εμπειρικών και ντετερμινιστικών μεθόδων.

4. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Ευρωπαϊκή Κοινότητα για την οικονομική ενίσχυση της έρευνάς τους στα πλαίσια του ερευνητικού έργου TUNCONSTRUCT (Project No. NMP2-CT-2005-011817). Επίσης τους Τεχνικούς Γεωλόγους Μπουρούνη Χ. και Σωτηροπούλου Α. για τη συνδρομή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bieniawski Z.T. (1989), Engineering rock mass classifications. Wiley, New York.
- Itasca Consulting Group Inc., 2002. FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions: User's Guide, Minneapolis, Minnesota 55401 USA.
- Journel A.G. and Huijbregts, CH. J. (1978), Mining Geostatistics, Academic Press, London.
- Kitanidis P.K. (1997), Introduction to Geostatistics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Surpac Software International (ed.) 2004: Core Management System-Users Reference- Generic Tools Reference. Belmont, WA (Surpac Software International, Inc.).