

ΔΙΗΜΕΡΙΔΑ

**“ΟΙ ΣΗΡΑΓΓΕΣ
ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ”**

**ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
(ΤΜΗΜΑ 1.1.6. ΣΗΡΑΓΓΑ Σ2) –
ΣΥΛΛΗΨΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ**

Εισηγητές :

**Δρ Ιωάννης Λέφας – Κ.Ι. ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε.
Αθανάσιος Δάλλας – ΔΩΔΩΝΙΣ ΕΠΕ
Νίκος Κορωνάκης – ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ
ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΠΕ**

**Ιωάννινα, 7 & 8/12/2001
“ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.”
& Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.**

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (ΤΜΗΜΑ 1.1.6. - ΣΗΡΑΓΓΑ Σ2) – ΣΥΛΛΗΨΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Δρ Ιωάννης Λέφας – Κ.Ι. ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε.
Αθανάσιος Δάλλας – ΔΩΔΩΝΙΣ ΕΠΕ
Νίκος Κορωνάκης – ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΠΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για νέες υπόγειες κατασκευές επιβάλλει την κατασκευή σηράγγων σε δύσκολες και ιδιόμορφες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, μέσω εκτεταμένων ζωνών από ισχυρά κερματισμένα, τεκτονισμένα και αποδιοργανωμένα βραχώματα. Η συμπεριφορά τέτοιων πετρωμάτων επιδρά άμεσα στη σύλληψη, στο σχεδιασμό και στη μελέτη κατασκευής του έργου και βεβαίως καθορίζει το κόστος αυτού. Κατά την κατασκευή της σήραγγας Σ2 του τμήματος 1.1.6 της Εγνατίας Οδού, μεταξύ Κρυσταλλοπηγής και Ψηλορράχης αντιμετωπίζονται ιδιαίτερα δυσχερείς και ιδιόμορφες συνθήκες ασβεστολιθικής βραχώμαζας κατακλαστικού τύπου με κινηματική συμπεριφορά στο 70% περίπου του συνολικού μήκους της σήραγγας ενώ στο υπόλοιπο τμήμα αντιμετωπίζονται ως επί το πλείστον σε αργιλοαμμώδη έως χαλικοαργιλώδη γεωυλικά πολύ χαμηλής αντοχής που εμπεριέχουν εβαποριτικά ογκοτεμάχια είτε εβαπορίτες στο επίπεδο της βαθμίδας της διατομής της σήραγγας. Μία εκτεταμένη ζώνη επώθησης διαχωρίζει τις δύο βασικές γεωλογικές ομάδες υλικών. Το παρόν άρθρο πραγματεύεται τις μελετητικές προσεγγίσεις και την εμπειρία της κατασκευής από την αντιμετώπιση της συμπεριφοράς του κατακλαστικού ασβεστολιθικού σχηματισμού κατά τη φάση της εκσκαφής και της υποστήριξης των δύο κλάδων της σήραγγας Σ2.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σήραγγα Σ2 εντάσσεται στο τμήμα 1.1.6. της Εγνατίας Οδού βρίσκεται μεταξύ των χωριών Κρυσταλλοπηγής και Ψηλορράχης στην περιοχή της Ηπείρου και απέχει περίπου 35χλμ. οδικώς από την Ηγουμενίτσα, προς τα ανατολικά. Η σήραγγα είναι διπλής κατεύθυνσης, συνίσταται από δύο κλάδους, ένα ανά κατεύθυνση οι οποίοι απέχουν κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους ώστε να παρεμβάλλεται ενδιάμεσα στύλος βραχομάζας ικανού πάχους. Τα μήκη του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας ανέρχονται σε 1126μ. και 866μ. αντίστοιχα.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι στην περιοχή του εν λόγω τμήματος της σήραγγας συναντάται εν γένει ο σχηματισμός των ασβεστολίθων του Παντοκράτορα. Ο σχηματισμός εμφανίζεται στο σύνολό του ισχυρά διαρρηγμένος και λατυπτοπαγής με εναλλαγές στο βαθμό

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

τεκτονισμού μεταξύ ενός βραχώδους, πλήρους κερματισμένου, υλικού και μιας εδαφικής φάσης. Κύριο χαρακτηριστικό της εικόνας των γεωλογικών σχηματισμών εντός των οποίων διανοίγεται η σήραγγα Σ2, αποτελεί η έντονη μεταβλητότητα των τεχνικογεωλογικών συνθηκών είτε κατά μήκος (σε κλίμακα μερικών μόνο μέτρων) είτε κατά την εγκάρσια έννοια της διατομής, με ποικίλες εναλλαγές της συμπεριφοράς των σχηματισμών λόγω δομής, αλληλεμπλοκής τεμαχίων, ρεολογικής συμπεριφοράς, ύπαρξης ρηξιγενών ζωνών κλπ.

Με την ολοκλήρωση των Γεωλογικών και Γεωτεχνικών ερευνών και τα αποτελέσματα των πρώτων αναλυτικών προσεγγίσεων διαπιστώθηκε η ανάγκη πλήρους και συνεχούς συνεργασίας Μελετητή και Κατασκευαστή για το σχεδιασμό της σήραγγας Σ2. Και αυτό διότι η επίλυση της σήραγγας μόνο με τασικές θεωρήσεις κατέληγε σε συμπεράσματα που βρίσκονταν σε πλήρη αντίθεση με τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών εκσκαφών που εκτελέστηκαν στην περιοχή του έργου για τον προσδιορισμό της πλέον δόκιμης μεθοδολογίας κατασκευής και των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης της σήραγγας ('εμπειρική' προσέγγιση). Συγκεκριμένα, ο αναλυτικός υπολογισμός οδηγούσε στον προσδιορισμό ελαχίστων μέτρων άμεσης υποστήριξης της υπόγειας κατασκευής αγνοώντας τελείως τη μεθοδολογία κατασκευής και την κινηματική συμπεριφορά του πετρώματος. Σε αντίθεση, η 'εμπειρική' προσέγγιση διαπίστωνε ότι το βασικό πρόβλημα εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας Σ2 εντοπιζόταν στην ανάγκη αποτροπής, κατά το αρχικό στάδιο της εκσκαφής, της αποκόλλησης ή ροής του υλικού και της 'συγκράτησης' του πετρώματος στα επιτρεπόμενα γεωμετρικά όρια ώστε, στη συνέχεια, να εφαρμοστούν τα προκύπτοντα από αναλυτικό υπολογισμό μέτρα αντιστήριξης.

Η σύλληψη και ο σχεδιασμός της σήραγγας Σ2 έγινε με τη στενή συνεργασία Μελετητή και Κατασκευαστή και οι αριθμητικές αναλύσεις βασίστηκαν στις γεωτεχνικές συνθήκες και τις παραμέτρους σχεδιασμού που παρουσιάζονται στα ακόλουθα κεφάλαια αλλά και στην αξιολόγηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς διάνοιξης σηράγγων σε παρόμοια πετρώματα σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής.

2. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι κύριες γεωτεχνικές ενότητες – κατηγορίες βραχώμαζας που αφορούν σε ομοιογενείς συνθήκες μετώπου εκσκαφής έχουν ως εξής :

Κατηγορία Α. «Ρηγματωμένος Ασβεστόλιθος»

- Άστρωτος,
- με 3 ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών (κυρίως διακλάσεις, μικρά ρήγματα), τοπικές εξαλλοιώσεις (κυρίως αποχρωματισμός), σποραδικά με υλικό πλήρωσης στις ασυνέχειες κυρίως αμμώδους σύστασης,
- καλή αλληλεμπλοκή τεμαχίων (αρκετά σφικτή δομή).
- Μέσο BLOCK SIZE: $\geq 10\text{cm}$

Κατηγορία Β. «Κατακερματισμένος (sugar cube) Ασβεστόλιθος»

- Άστρωτος,
- με 3 ή περισσότερα πολύ πυκνά συστήματα ασυνεχειών (κυρίως διακλάσεις, ρηξισχισμός και μικρά ρήγματα),

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

- ασυνέχειες ως επί το πλείστον ανοικτές, σποραδικά αμμώδεις υλικό ανάμεσα στα ασβεστολιθικά τεμάχια,
- πτωχή αλληλεμπλοκή τεμαχίων (χαλαρή δομή), δομή sugar cube.
- Μέσο BLOCK SIZE: 5-10cm

Κατηγορία C. «Κατακλαστικός Ασβεστόλιθος»

- Άστρωτος,
- με 3 ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών (κυρίως διακλάσεις, ρηξισχισμός και μεσοσκοπικά ρήγματα (F)),
- με συχνές παρεμβολές αμμώδους έως χαλικώδους υλικού κατάκλασης (κατακλαστίτης), κυρίως σε ρηξιγενείς ζώνες (F) αλλά και ανάμεσα στα ασβεστολιθικά τεμάχια (γενικά τα ασβεστολιθικά τεμάχια επικρατούν του κατακλαστίτη).
- Δομή χαοτική λόγω της έντονης παραμόρφωσης του υλικού.
- Μέσο BLOCK SIZE: $\leq 5\text{cm}$

Κατηγορία D. «Ασβεστολιθική “κονία” (fault gauge) ή Ασβεστολιθικός κατακλαστίτης (fault breccia)»

- Αποδιοργανωμένο πέτρωμα (είναι δύσκολο έως αδύνατο να προσδιοριστεί η μητρική δομή του πετρώματος),
- Αμμώδεις χάλικες (κατακλαστίτης) ή/και ασβεστολιθική κονία με παρεμβολές κατακλαστικού ασβεστολίθου (γενικά επικρατούν ο κατακλαστίτης ή η ασβεστολιθική κονία του κατακλαστικού ασβεστολίθου).
- Δομή χαοτική λόγω της πολύ ισχυρής παραμόρφωσης.
- ΔΕΝ ΟΡΙΖΕΤΑΙ BLOCK SIZE.
- Ρηξιγενής ζώνη με κατακλαστικό υλικό ή ασβεστολιθική κονία ενός κατακλαστικού ασβεστολίθου ή ρηγματωμένου ασβεστόλιθου (περιοχές μεγάλων ρηγμάτων).

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι αντιπροσωπευτικές γεωτεχνικές παράμετροι για το εύρος των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που συναντώνται στην περιοχή του έργου καθώς και οι παράμετροι των κριτηρίων αστοχίας Hoek - Brown και Mohr - Coulomb, εξετάστηκαν τα πρωτογενή εργαστηριακά και γεωτρητικά δεδομένα ενώ παράλληλα εφαρμόστηκε κατάλληλα η κατάταξη πετρωμάτων με βάση το δείκτη GSI - Geological Strength Index.

Ωστόσο, έχοντας υπόψη ότι οι παραπάνω παράμετροι της βραχόμαζας είναι πιθανό να παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα ακόμη και σε περιορισμένα τμήματα της βραχόμαζας, ο προσδιορισμός τους με αυστηρά αιτιοκρατικές μεθόδους υπόκειται σε αμφισβήτηση όσον αφορά την αντιπροσωπευτικότητα. Μία κατάλληλη μέθοδος για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος κατά τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας είναι η εφαρμογή της μεθόδου της στοχαστικής προσομοίωσης της κατανομής των τιμών των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, με την μέθοδο Monte Carlo. Η μεθοδολογία αυτή είναι περισσότερο αξιόπιστη δεδομένου ότι, οι υπολογισμοί βασίζονται σε όλο το εύρος της κατανομής των τιμών των παραμέτρων εισόδου και όχι σε αντιπροσωπευτικές μόνον τιμές,

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

τα δε αποτελέσματα δίνονται σε μορφή κατανομών πυκνότητας πιθανότητας εμφάνισης της τιμής που λαμβάνει κάθε παράμετρος. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα να επιλέγονται τιμές των παραμέτρων με τον επιθυμητό βαθμό εμπιστοσύνης και επομένως να επιλέγεται η πιθανότητα αστοχίας.

Για κάθε κατηγορία βραχόμαζας έγιναν αναλύσεις με εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας. Στον Πίνακα που ακολουθεί δίνονται επίσης η μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή για κάθε παράμετρο αντοχής (c και ϕ) και παραμορφωσιμότητας (E) της βραχόμαζας για κάθε κατηγορία βραχόμαζας.

Πίνακας Error! Unknown switch argument.: Χαρακτηριστικά και παράμετροι σχεδιασμού των διατομών προσομοίωσης.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Εύρος τιμών GSI	Εύρος τιμών σ_c (MPa)	Εύρος τιμών m_i	Εύρος τιμών σ_{cm} (MPa)	Εύρος τιμών Γωνίας Τριβής(°)	Εύρος τιμών Συνοχής (MPa)	Εύρος τιμών Μέτρου Ελαστικότητας (GPa)	γ (kN/m ³)	Λόγος Poisson	strain - ϵ (%)
A	35-45 (40)	35-45 (40)	10±2	3.6-6.0 (4.70)	26-31 (29)	1.1-1.7 (1.40)	2.5-4.8 (3.50)	26	0.30	0.44- 1.16 (0.71)
B	25-35 (30)	35-45 (40)	10±2	2.7-4.8 (3.78)	23-29 (26)	0.9-1.4 (1.15)	1.4-2.8 (2.00)	26	0.30	0.96- 3.10 (1.69)
C	15-25 (20)	30-40 (35)	10±2	1.3-2.8 (1.90)	19-26 (23)	0.46- 0.88 (0.65)	0.7-1.4 (1.05)	26	0.35	2.7-17 (6.3)
D	<15 (13)	30-40 (35)	10±2	0.99- 1.86 (1.4)	17-22 (20)	0.36- 0.63 (0.48)	0.55- 0.84 (0.69)	26	0.35	10-54 (21)

Στην παρένθεση δίνεται η μέση τιμή της κατανομής που προέκυψε για κάθε παράμετρο, από την στοχαστική προσομοίωση με την μέθοδο Monte Carlo. Οι τιμές αυτές των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν στους αριθμητικούς υπολογισμούς.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στην προσωρινή υποστήριξη ως και για την εκτίμηση των συγκλίσεων που επισυμβαίνουν κατά τη διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC της Itasca Consulting Group, Inc και επιλύθηκε η δυσμενέστερη διατομή για ύψος υπερκειμένων 70 m για τις τέσσερεις κύριες κατηγορίες βραχόμαζας.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

Εκτός των αριθμητικών προσομοιώσεων της εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας που έγιναν, με την παραδοχή γεωμηχανικής συμπεριφοράς συνεχούς μέσου για τη βραχώμαζα, έγιναν και προσομοιώσεις με εφαρμογή της μεθόδου των διακριτών στοιχείων (Distinct element method) με χρήση του προγράμματος UDEC. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν με σκοπό τη διερεύνηση της αναγκαιότητας και της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων αγκυρίων προπορείας, λαμβάνοντας υπόψη τον έντονο κερματισμό της βραχώμαζας σε πολύ μικρά τεμάχια, μη συνεκτικά συνδεδεμένα.

4.1 ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΣΟΥ (ΤΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ)

Με βάση τη γεωμετρία, τους γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας για κάθε μία από τις ανωτέρω διατομές κατασκευάζεται στον κώδικα FLAC πλέγμα πεπερασμένων διαφορών αποτελούμενο από δισδιάστατα επίπεδα στοιχεία. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται με τον προκαθορισμένο νόμο τάσεων - παραμορφώσεων και τις εφαρμοζόμενες συνοριακές συνθήκες (δυνάμεις ή μετατοπίσεις). Τα μέτρα υποστήριξης προσομοιώνονται με ειδικά δομικά στοιχεία. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements) και τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης με ραβδωτά στοιχεία (cable elements). Η δράση των μεταλλικών πλαισίων λαμβάνεται υπόψη στα στοιχεία δοκού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με την αρχή του σύμικτου φορέα μέσω του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας, εμβαδού διατομής και της ροπής αδράνειας. Στα ομοιώματα που αναπτύχθηκαν καθορίστηκαν αναλυτικά όλες οι φάσεις κατασκευής και τα μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των υλικών των διατομών άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, πλαίσια, κλπ.), ως και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχώμαζας.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η σταδιακή τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης καθώς και η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η προσομοίωση της τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης έγινε σε περισσότερα του ενός στάδια. Επίσης, στις περιπτώσεις διατομών με προσωρινό και μόνιμο ανάστροφο πυθμένα, προσομοιώνονται αναλόγως ενδιάμεσα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης. Έτσι, για την περίπτωση της κατηγορίας Α λήφθησαν 20 στάδια προσομοίωσης, για την κατηγορία Β 26 στάδια, ενώ για τις κατηγορίες C και D 30 στάδια. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται παραμετρικά για ένα εύρος τιμών του λόγου τάσεων K που κυμαίνεται μεταξύ 0.6 και 0.9.

Μετά τον υπολογισμό της καμπύλης αντίδρασης της βραχώμαζας γίνεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών υποστήριξης, ως και ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών καμπυλών των επί μέρους μέτρων. Από τη συναξιολόγηση των καμπυλών αντίδρασης της βραχώμαζας και των χαρακτηριστικών καμπυλών υποστήριξης είναι δυνατό να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης βραχώμαζας - υποστήριξης. Ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης λαμβάνεται υπόψη μέσω των αρχικών μετατοπίσεων που συμβαίνουν στην βραχώμαζα πριν την τοποθέτησή τους. Οι μετατοπίσεις αυτές είναι συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο στην οποία τοποθετούνται τα μέτρα υποστήριξης και για κάθε γεωτεχνική ενότητα υπολογίζονται με την βοήθεια των καμπυλών του Panet.

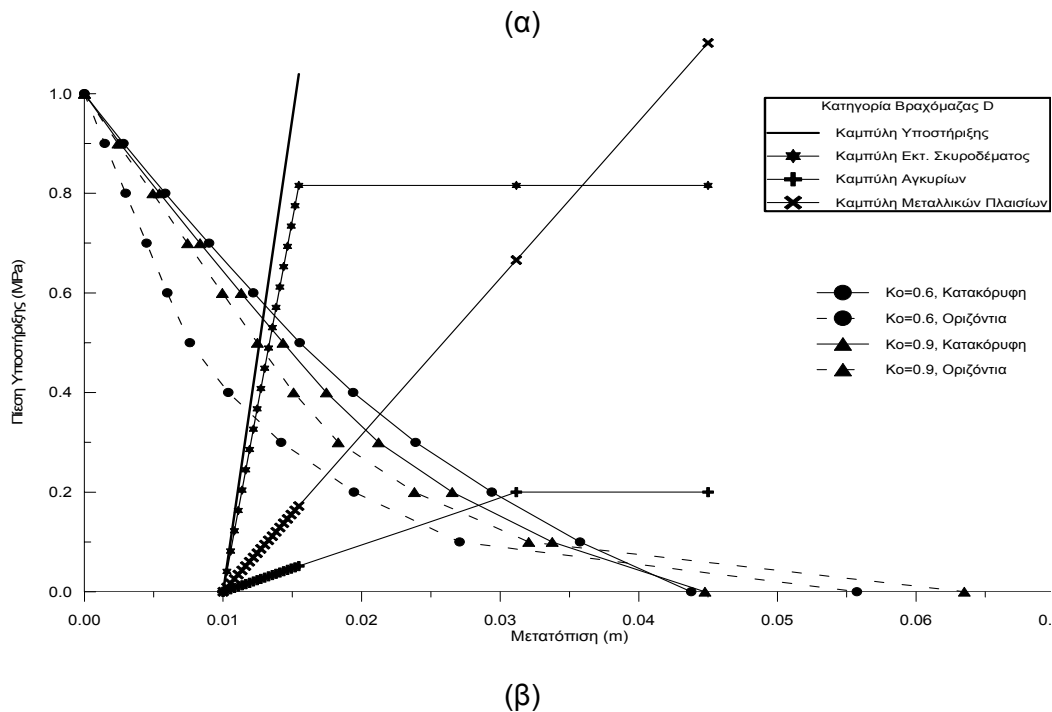
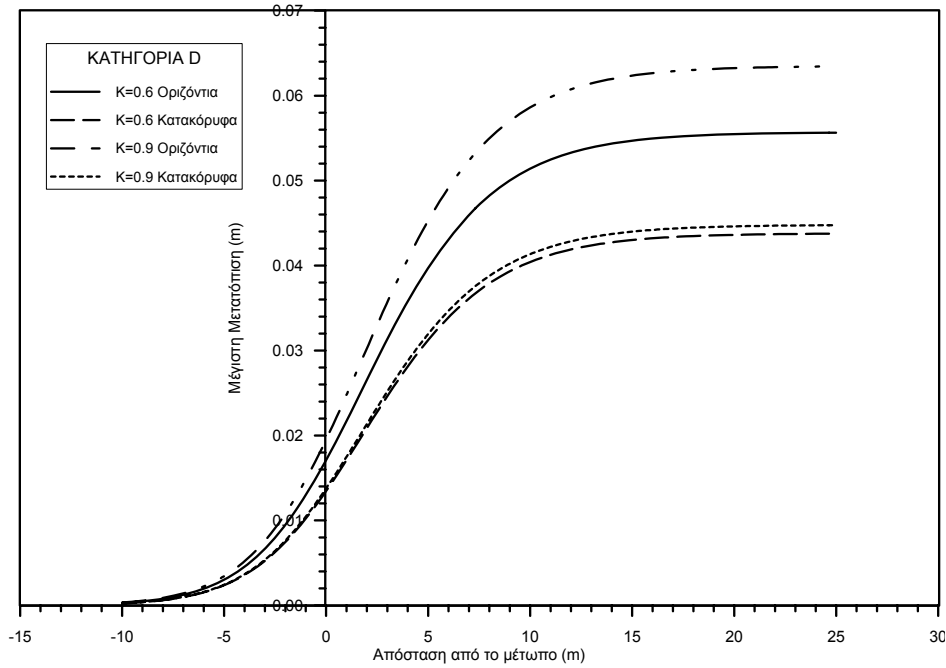
Πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προσομοιώνεται κατά στρώσεις όπου οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής λαμβάνουν αρχικά μικρές τιμές και αυξάνονται σταδιακά στα επόμενα στάδια προσομοίωσης. Ο συνδυασμός

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μεταλλικών πλαισίων προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements), των οποίων τα χαρακτηριστικά αντοχής και ακαμψίας υπολογίζονται σύμφωνα με την αρχή του σύμμικτου φορέα, μέσω του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας, της ροπής αδράνειας και της ισοδύναμης διατομής. Στις θέσεις της διατομής της σήραγγας όπου εφαρμόζεται διεύρυνση της προσωρινής υποστήριξης σε μορφή elephant foot, τα στοιχεία προσομοίωσης ακολουθούν την γεωμετρία της διεύρυνσης και στα αντίστοιχα πεπερασμένα στοιχεία προσδίδονται οι ιδιότητες που αντιστοιχούν στο elephant foot. Τα αγκύρια στον κώδικα FLAC προσομοιώνονται με ραβδωτά στοιχεία (cable elements), που δύνανται να φέρουν εφελκυστικά φορτία. Η συμπεριφορά του ενέματος πάκτωσης προσομοιώνεται με τις παραμέτρους ακαμψίας και αντοχής του (K_{bond} , S_{bond}). Η παράμετρος K_{bond} εκφράζει την ακαμψία του σκυροδέματος πάκτωσης του αγκυρίου ενώ η παράμετρος S_{bond} εκφράζει την διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια της ράβδου του αγκυρίου και του σκυροδέματος πάκτωσης καθώς και στην διεπιφάνεια του σκυροδέματος πάκτωσης και της βραχόμαζας. Στην περίπτωση των κατηγοριών βραχόμαζας C και D προβλέπεται η διεύρυνση της θεμελίωσης του πλαισίου κατά την υποστήριξη της άνω ημιδιατομής. Η διεύρυνση αυτή ακολουθεί την κωνική μορφή των δοκών ή αγκυρίων προπορείας και επομένως η θεμελιολωρίδα που διαμορφώνεται στην θέση της έδρασης έχει σχήμα τραπεζίου. Η γεωμετρία του elephant foot προσομοιώθηκε με δύο διαφορετικά στοιχεία δοκού, το ένα εδραζόμενο στην εξωτερική πλευρά της διεύρυνσης και το δεύτερο σε αναμονή για την σύνδεση με το πλαίσιο που τοποθετείται κατά την εκσκαφή της βαθμίδας. Με τον τρόπο αυτό αφ'ενός επιτυγχάνεται πλέον ακριβής προσομοίωση της δράσης της θεμελίωσης και αφ' ετέρου είναι δυνατή η ανεξάρτητη διαστασιολόγηση των στοιχείων του elephant foot. Τα χαρακτηριστικά αντοχής και ακαμψίας ενός εκάστου στοιχείου δοκού (beam element) υπολογίζονται σύμφωνα με την αρχή του σύμμικτου φορέα, μέσω του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας, της ροπής αδράνειας και της ισοδύναμης διατομής, όπου σε κάθε πλαίσιο του elephant foot αντιστοιχεί το ήμισυ του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για την προσομοίωση των δοκών προπορείας θεωρείται ζώνη πάχους 0.80-1.00 m (όσο περίπου το πάχος βραχόμαζας λόγω της κεκλιμένης τοποθέτησης των δοκών) με ενισχυμένη ακαμψία όσο η αναλογία συμμετοχής των χαλύβδινων δοκών, τουτσιμεντενέματος και της βραχόμαζας σε συνάρτηση με το εμβαδόν της διατομής κάθε στοιχείου. Ο φορέας του κελύφους της προσωρινής υποστήριξης αποτελείται από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την κατηγορία A και συνδυασμό μεταλλικών πλαισίων με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για τις κατηγορίες B, C και D. Ο φορέας της προσωρινής υποστήριξης είναι μικτή διατομή που περιλαμβάνει σκυρόδεμα και πλαίσια (υλικό ST37) και επομένως για τη διαστασιολόγηση αυτής πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα υλικά που τη συνθέτουν.

Ο έλεγχος επάρκειας γίνεται από τη σύγκριση των υπολογιζόμενων τάσεων που αναπτύσσονται στην εσωτερική και εξωτερική παρειά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και την εσωτερική και εξωτερική παρειά του πλαισίου με την αντοχή του σε θλίψη και εφελκυσμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του χάλυβα αντιστοίχως. Ο υπολογισμός των τάσεων για την περίπτωση σύνθετης διατομής έγινε με κατανομή των υπολογισθέντων εντατικών μεγεθών (M, Q και N) σύμφωνα με τα προτεινόμενα από τον Ευρωκώδικα 4, για τις σύμμικτες διατομές.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση



Σχήμα Error! Unknown switch argument.: Καμπύλη Panet από ελαστοπλαστική επίλυση (α) και αλληλεπίδραση βραχώμαζας – μέτρων υποστήριξης (β).

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

Η τοποθέτηση δοκών και αγκυρίων προπορείας θεωρείται ως το πλέον ενδεδειγμένο άμεσο μέτρο προστασίας της οροφής της σήραγγας έναντι καταπτώσεων και δημιουργίας θόλου, όπου, είτε λόγω του χαμηλού πάχους υπερκειμένων είτε των υψηλών τιμών του εντατικού πεδίου είτε λόγω της φύσης του εδάφους και των διαστάσεων της σήραγγας, δύναται να επεκταθεί σε μεγάλο ύψος. Η διαστασιολόγηση του αναγκαίου αριθμού δοκών και αγκυρίων προπορείας, ως και των γεωμετρικών (ήτοι στατικών) χαρακτηριστικών αυτών, προϋποθέτει εκτίμηση των φορτίων που είναι δυνατόν να ασκηθούν επί αυτών.

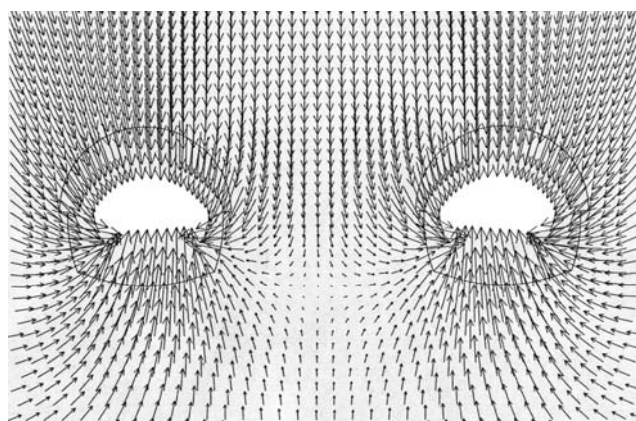
Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη ότι στη σήραγγα δύνανται να επισυμβούν καταπτώσεις βραχώμαζας, στο τμήμα της οροφής της σήραγγας επί ύψους θόλου υπολογίζεται η απαιτούμενη πυκνότητα εφαρμογής δοκών ή αγκυρίων προπορείας με θεώρηση χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών βραχώμαζας. Ως στατικό σύστημα των δοκών και αγκυρίων προπορείας για τον υπολογισμό της αναγκαίας καμπτικής αντοχής θεωρείται η αμφίπακτη δοκός (πακτωμένη δοκός και στα δύο άκρα) και ο υπολογισμός γίνεται με βάση το DIN 1880. Λαμβάνονται υπόψη το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος κάμψης της δοκού προκειμένου να μην γίνει υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα της ράβδου. Η θεωρητική βάση για την ανάλυση της στατικής συμπεριφοράς του μετώπου και την πιθανότητα ή μη εκδήλωσης αστοχίας, περιλαμβάνει τις ροπές των ασκούμενων δυνάμεων λόγω ιδίου βάρους, εξωτερικών φορτίων, οριζοντίων γεωστατικών φορτίων, ως και τις ροπές αντίστασης τριβών και συνοχής του πυρήνα και της περιοχής του μετώπου. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας προκύπτει από τη μέθοδο ανάλυσης κατά λωρίδες της εν δυνάμει να αστοχήσει περιοχής έμπροσθεν του μετώπου. Ο παραμετρικός υπολογισμός τόσο της περιοχής του κέντρου της κυλινδρικής περιοχής ολίσθησης, όσο και της επίδρασης των μειωμένων γεωμηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού, του υδροφόρου ορίζοντα, της πίεσης υποστήριξης του εκτοξευομένου σκυροδέματος, της ύπαρξης ή μη δοκών προπορείας, της ύπαρξης κατακόρυφου γεωστατικού φορτίου, της γεωμετρίας εκσκαφής του μετώπου, της τρισδιάστατης συμπεριφοράς του μετώπου και του πυρήνα εκσκαφής και των θυσιαζομένων αγκυρίων του μετώπου, οδηγεί στην πλέον αξιόπιστη εκτίμηση των συνθηκών ευστάθειας του μετώπου και στον υπολογισμό με μεγάλη ακρίβεια του απαιτούμενου συντελεστή ασφαλείας.

4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΣΗ ΑΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΣΟΥ (ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)

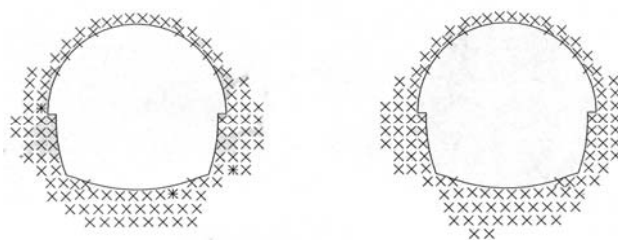
Στις αριθμητικές αναλύσεις συνεχούς μέσου που έγιναν με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC, η συμπεριφορά της βραχώμαζας προσομοιώνεται ως ένα ελαστοπλαστικό μέσο με κριτήριο πλαστικής διαρροής κατά Mohr-Coulomb. Σε αυτή την περίπτωση η συμβολή των δοκών προπορείας στην ευστάθεια της σήραγγας λαμβάνεται υπόψη ως μία ζώνη ενισχυμένης ακαμψίας κατ'αναλογία προς τη συμβολή της ακαμψίας των χαλύβδινων δοκών ή αγκυρίων και του ενέματος. Επομένως, ο έλεγχος επάρκειας της υποστήριξης δύναται να γίνει μόνον όσον αφορά στις υπολογιζόμενες συγκλίσεις των τοιχωμάτων της εκσκαφής καθώς και στο εύρος της ζώνης πλαστικών παραμορφώσεων που δημιουργείται γύρω από αυτή. Στην περίπτωση όμως της βραχώμαζας της σήραγγας Σ2, ο σημαντικότερος λόγος επιλογής εφαρμογής δοκών ή αγκυρίων προπορείας, είναι ο έντονος κατακερματισμός της βραχώμαζας σε πολύ μικρά τεμάχια βράχου ασύνδετα μεταξύ τους χωρίς την παρουσία συνεκτικού υλικού και των οποίων η συνεκτικότητα βασίζεται μόνον στην παρεμπόδιση που προσφέρεται από το αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

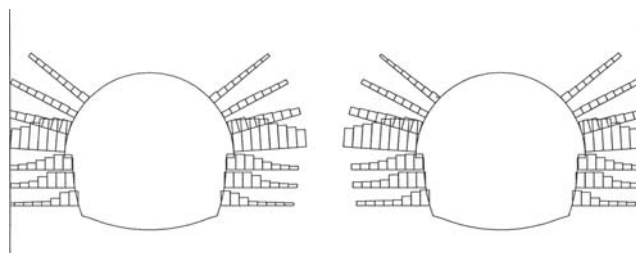
(τριαξονικές συνθήκες φόρτισης). Η δομή αυτή της βραχόμαζας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνεκτικότητας του υλικού στις περιπτώσεις των ζωνών χαλάρωσης, λόγω απουσίας της απαιτούμενης παρεμπόδισης και τον κίνδυνο καταπτώσεων του υλικού σε μορφή ρέουσα. Ο μηχανισμός αυτός αστοχίας αναφέρεται κυρίως στις περιπτώσεις των κατηγοριών Β και C, και για την αντιμετώπιση του φαινομένου, υιοθετήθηκε η εφαρμογή αγκυρίων προπορείας. Στην περίπτωση της κατηγορίας D, υιοθετείται η εφαρμογή δοκών προπορείας βαρέως τύπου, για την προσταθεροποίηση κυρίως του μετώπου όπου αναμένεται δημιουργία εκτεταμένων ζωνών πλαστικών παραμορφώσεων.



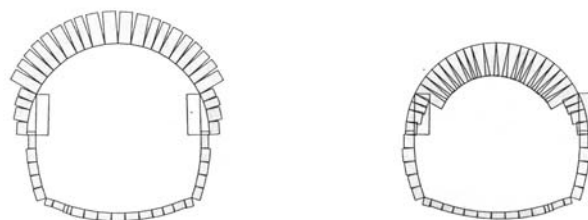
Παραμορφώσεις



Ζώνη πλαστικοποίησης



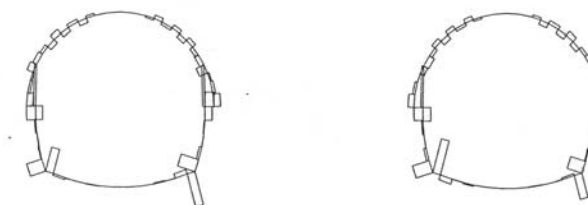
Φορτία αγκυρίων



Αξονικές δυνάμεις κελύφους



Ροπές κελύφους



Διατμητικές δυνάμεις κελύφους

Σχήμα Error! Unknown switch argument.: Ενδεικτικά αποτελέσματα αναλύσεων FLAC κατηγορίας D κατά το στάδιο πλήρους εκσκαφής της διατομής της σήραγγας.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

Για την προσομοίωση των παραπάνω μηχανισμών αστοχίας της βραχόμαζας επιλέχθηκε το πρόγραμμα UDEC το οποίο βασίζεται στην μέθοδο των διακριτών στοιχείων και είναι κατάλληλο για την προσομοίωση ασυνεχών μέσων (όπως είναι οι περιπτώσεις ρωγματωμένης βραχόμαζας) σε δύο διαστάσεις. Το ασυνεχές μέσο προσομοιώνεται ως συναρμογή διακριτών τεμαχίων τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες. Τα τεμάχια αυτά έχουν την δυνατότητα να μετακινούνται και να περιστρέφονται ανεξάρτητα μεταξύ τους λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών, ενώ παράλληλα δύνανται να θεωρηθούν ότι είναι ή όχι παραμορφώσιμα.

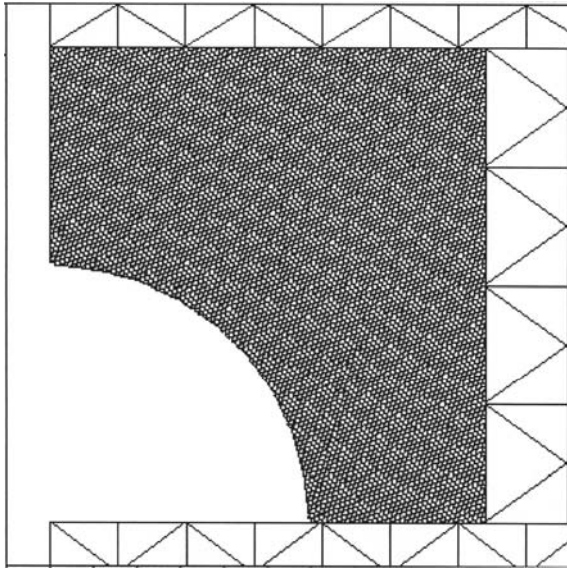
Στην περίπτωση παραμορφώσιμων τεμαχίων βράχου, γίνεται διακριτοποίηση των τεμαχίων σε πεπερασμένα στοιχεία τα οποία παραμορφώνονται σύμφωνα με γραμμικό ή μη-γραμμικό νόμο συμπεριφοράς. Η μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών προσομοιώνεται επίσης με την εφαρμογή γραμμικών ή μη-γραμμικών σχέσεων που σχετίζουν τις μετακινήσεις (άνοιγμα και κλείσιμο των ασυνεχειών καθώς και διατμητικές μετακινήσεις) με τις αναπτυσσόμενες τάσεις επί των παρειών τους.

Ο κύριος στόχος των αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν με το πρόγραμμα UDEC είναι η ρεαλιστική κατά το δυνατόν προσομοίωση του μηχανισμού δράσεως των αγκυριών προπορείας στην περίπτωση της κατακερματισμένης βραχόμαζας και ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής όσον αφορά στην ευστάθεια της βραχόμαζας. Η κατακλαστικού τύπου ασβεστολιθική βραχόμαζα εμφανίζεται ως ένα μίγμα κονιοποιημένου ασβεστολίθου και τεμαχίων πολύ μικρού μεγέθους. Η ανάμιξη των δύο αυτών φάσεων, ανάλογα με τον τεκτονισμό που έχει υποστεί η βραχόμαζα διαβαθμίζεται κατά μήκος της σήραγγας σε κατηγορίες όπου επικρατεί η παρουσία τεμαχίων ασβεστολίθου μη συνεκτικά συνδεδεμένων μεταξύ τους (bricked structures) μέχρι περιπτώσεις όπου επικρατεί ο κονιοποιημένος ασβεστόλιθος (flower).

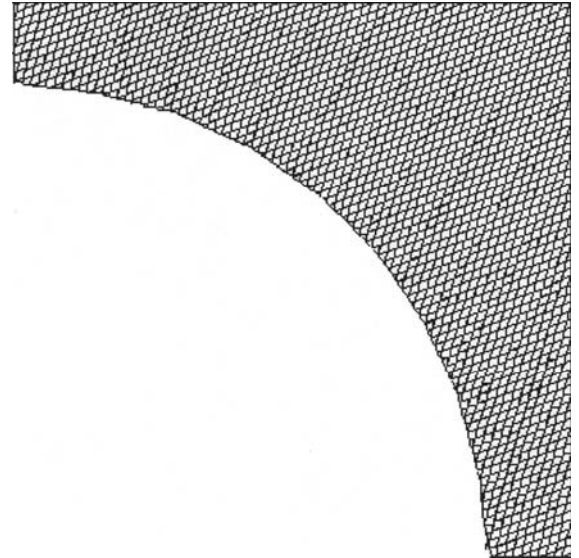
Στην περίπτωση του κατακερματισμένου ασβεστολίθου λόγω του έντονου τεκτονισμού δεν παρατηρείται συστηματικότητα των υφιστάμενων ασυνεχειών και επομένως δεν είναι δυνατό να γίνει επί τόπου αποτύπωση ασυνεχειών και ταξινόμηση τους σε συστήματα. Επίσης, η πυκνότητα των ασυνεχειών είναι τέτοια που το μέγεθος των τεμαχίων πολλές φορές δεν υπερβαίνει τα 10 cm. Σύμφωνα επομένως με τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται για την προσομοίωση των ασυνεχειών όσον αφορά στον προσανατολισμό τους λήφθηκαν παραμετρικά ενώ οι τιμές που αφορούν στις αποστάσεις και το μήκος του ίχνους λήφθηκαν κατά τρόπο ώστε το μέγεθος των τεμαχίων που προκύπτουν να είναι αντιπροσωπευτικό των επί τόπου συνθηκών. Σε κάθε αριθμητικό μοντέλο θεωρήθηκαν δύο συστήματα ασυνεχειών και η ελάχιστη πυκνότητα ασυνεχειών που επιτεύχθηκε να προσομοιωθεί είναι ασυνέχειες με αποστάσεις μεταξύ τους περίπου 7cm.

Για την προσομοίωση των παραπάνω γεωμετρικών στοιχείων των ασυνεχειών, λόγω των μεγάλων απαιτήσεων υπολογιστικής μνήμης θα ήταν αδύνατη η προσομοίωση της βραχόμαζας σε όλη την έκταση του μοντέλου με την παραδοχή ασυνεχούς μέσου. Για τον λόγο αυτό, υιοθετήθηκε υβριδικό μοντέλο προσομοίωσης το οποίο χωρίζεται σε δύο ζώνες:

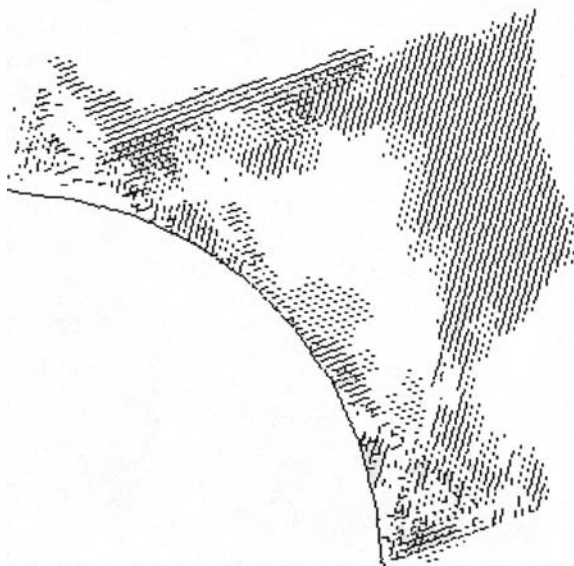
Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση



Συνδυασμένος κάνναβος διακριτών στοιχείων με θεώρηση ασυνεχούς μέσου και πεπερασμένων στοιχείων σε απόσταση από τη σήραγγα.

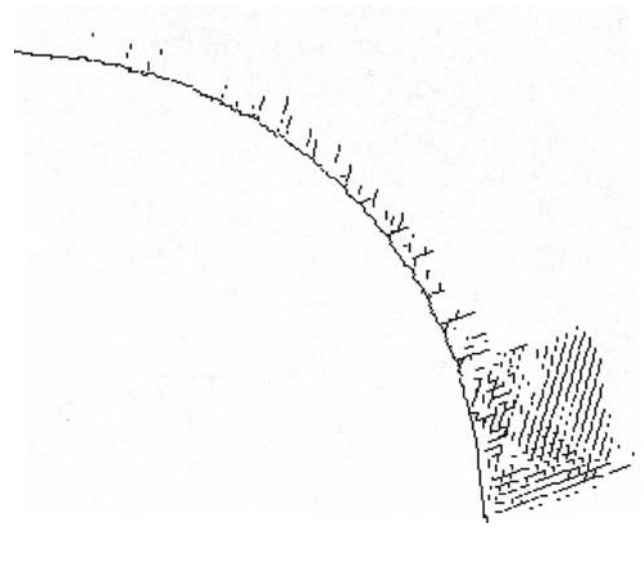


Πυκνότητα διακριτοποίησης ογκοτεμαχίων κατακλαστικού υλικού με μέση απόσταση ασυνεχειών 7cm.



Ανυποστηρίκτες συνθήκες. Περιοχή υπέρβασης διατμητικής αντοχής ασυνεχειών.

Σχήμα Error! Unknown switch argument.: **Ενδεικτικά αποτελέσματα αναλύσεων UDEC (κινηματική θεώρηση).**



Υποστηριγμένες συνθήκες. Περιοχή υπέρβασης διατμητικής αντοχής ασυνεχειών.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

- i) σε μία ζώνη εύρους περίπου 6 m που περιλαμβάνει την περιοχή γύρω από την σήραγγα. Στην ζώνη αυτή γίνεται η παραδοχή ασυνεχούς μέσου.
- ii) στην δεύτερη ζώνη που περιλαμβάνει το υπόλοιπο μοντέλο και στην οποία γίνεται η παραδοχή μηχανικής συμπεριφοράς συνεχούς μέσου. Στην ζώνη αυτή γίνεται διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία όπως στην περίπτωση των αναλύσεων με το κώδικα FLAC. Η βραχόμαζα θεωρείται ότι ακολουθεί ελαστοπλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και ως τιμές των παραμέτρων για τις αναλύσεις λήφθηκαν αυτές της κατηγορίας B των αναλύσεων με τον κώδικα FLAC.

Τα στάδια προσομοίωσης που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

1. Αρχικό τασικό πεδίο: η ανάπτυξη του αρχικού πεδίου των τάσεων γίνεται με ορισμό των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων με την παραδοχή τάσεων λόγω βαρύτητας και για μέγιστο πάχος υπερκειμένων 70 m από τη στέψη της σήραγγας.
2. Εκσκαφή της σήραγγας και υπολογισμοί σε ανυποστήρικτες συνθήκες: Αφαιρούνται όλα τα τεμάχια βράχου που βρίσκονται μέσα από το περίγραμμα της σήραγγας και διενεργούνται αριθμητικοί υπολογισμοί μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία και αριθμητική σύγκλιση.
3. Εκσκαφή της σήραγγας και υπολογισμοί λαμβάνοντας υπόψη τη δράση των αγκυρίων προπορείας: επανεκκίνηση από τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης προσομοίωσης και προσομοίωση της επίδρασης των αγκυρίων προπορείας θεωρώντας περιορισμό των μετακινήσεων (στηρίξεις) στις θέσεις τοποθέτησης των δοκών. Η μέθοδος προσομοίωσης των δοκών με στηρίξεις θεωρείται δόκιμη για τις ανάγκες των αναλύσεων με το UDEC δεδομένου ότι ο σκοπός των αναλύσεων δεν είναι ο υπολογισμός των μετακινήσεων ή η επίδραση των υπολοίπων μέτρων υποστήριξης, αλλά η αποτελεσματικότητα των αγκυρίων προπορείας για την συγκράτηση των μικρών τεμαχίων βράχου έναντι καταπτώσεων σε ρέουσα μορφή στα μεταξύ των αγκυρίων διαστήματα.

Η αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος των αγκυρίων προπορείας γίνεται με κριτήριο το μέγεθος των διατμητικών μετακινήσεων μεταξύ των ασυνεχειών στην περιοχή γύρω από το όριο εκσκαφής της σήραγγας για την περίπτωση εφαρμογής αγκυρίων προπορείας σε σύγκριση με τις ανυποστήρικτες συνθήκες. Σε αυτές η μέγιστη διατμητική μετακίνηση υπερβαίνει τα 15cm με μη δυνατότητα αριθμητικής σύγκλισης του μοντέλου. Οι μετακινήσεις αυτές περιορίζονται σε 1 cm με την προσομοίωση αγκυρίων προπορείας σε αποστάσεις 50 cm και σύγκλιση του μοντέλου. Επίσης εντοπίζονται οι επιφάνειες των ασυνεχειών όπου έχει συμβεί υπέρβαση της διατμητικής αντοχής για ανυποστήρικτες συνθήκες και για εφαρμογή αγκυρίων προπορείας. Από τα παραπάνω, τεκμαίρεται η ευνοϊκή δράση και αποτελεσματικότητα των αγκυρίων προπορείας στη συγκράτηση των τεμαχίων βράχου και στη δημιουργία παρεμποδιζόμενων συνθηκών (τριαξονικές συνθήκες φόρτισης) ώστε να περιορίζεται η ζώνη διατμητικής αστοχίας των ασυνεχειών και το μέγεθος των διατμητικών μετακινήσεων. Σύμφωνα με την εκτίμηση των επί τόπου συνθηκών και τις

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

παραδοχές της παρούσας μελέτης οι συνθήκες αυτές κερματισμού της βραχώμαζας είναι αντιπροσωπευτικές της κατηγορίας Β. Παρόμοια αποτελέσματα υπολογίσθηκαν για τις περιπτώσεις στις οποίες οι αποστάσεις των ασυνεχειών λήφθηκαν επίσης 10 cm και τροποποιήθηκαν οι κλίσεις τους. Έτσι, εξετάζεται η επίδραση του μηχανισμού αστοχίας σε ένα σημαντικό εύρος προσανατολισμού των ασυνεχειών.

Αντίστοιχα αποτελέσματα υπολογίσθηκαν για την περίπτωση όπου η μέση απόσταση των ασυνεχειών είναι 7 cm, συνθήκες που προσεγγίζουν τις αναμενόμενες για την κατηγορία C. Στην περίπτωση αυτή, η αποτελεσματική αξονική απόσταση των αγκυρίων προπορείας είναι 40cm. Σε ανυποστήρικτες συνθήκες η μέγιστη διατμητική μετακίνηση υπερβαίνει τα 20 cm με μη δυνατότητα αριθμητικής σύγκλισης του μοντέλου.

Από την ως άνω ανάλυση είναι εμφανής η πλήρης αποδιοργάνωση της βραχώμαζας σε ανυποστήρικτες συνθήκες σε πολλά σημεία της περιμέτρου της εκσκαφής με πίο έντονο το φαινόμενο να εμφανίζεται στην οροφή και στην παρειά της άνω ημιδιατομής της σήραγγας. Τα μικρά τεμάχια της βραχώμαζας αποκολλώνται και περιστρέφονται με πλήρη απώλεια οιασδήποτε συνεκτικότητας μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, η αποτελεσματική πυκνότητα των αγκυρίων προπορείας εκτιμάται κατ'αρχήν σε 40 cm. Στα αποτελέσματα όπου φαίνονται οι διατμητικές μετακινήσεις καθώς και τα ίχνη των επαφών μεταξύ των τεμαχίων βράχου όπου έχει συμβεί διατμητική αστοχία, σε συνθήκες εφαρμογής αγκυρίων προπορείας, είναι εμφανείς οι περιοχές προσομοίωσης των δοκών προπορείας, όπου εξαλείφονται οι διατμητικές μετακινήσεις και η διατμητική αστοχία. Επίσης, στα τμήματα μεταξύ των δοκών περιορίζονται σημαντικά οι μετακινήσεις. Εξαίρεση αποτελεί το τμήμα της βάσης της εκσκαφής όπου είναι πιθανό να απαιτηθεί σύμφωνα με τις επί τόπου παρατηρήσεις, επέκταση του εύρους εφαρμογής των αγκυρίων προπορείας μέχρι τη βάση της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής.

5. ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Ο κατ' αρχήν προσδιορισμός από το Μελετητή του έργου των τυπικών διατομών εφαρμογής στηρίζεται στο δεδομένο όρυξης της σήραγγας σε ομοιογενές υλικό με συγκεκριμένες, ανά διατομή, γεωτεχνικές παραμέτρους γεγονός όμως που είναι δύσκολο έως αδύνατο να επαληθεύεται κατά τη φάση κατασκευής, και ιδιαίτερα σε κατακλαστικά πετρώματα.

Κατά τη φάση εκπόνησης της μελέτης και σε συνεργασία Μελετητή και Κατασκευαστή έγινε μια – κατ'αρχήν- εκτίμηση των πιθανών περιπτώσεων για τις οποίες θα χρειαζόταν ειδική αντιμετώπιση. Τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά το σχέδιο της κατασκευής του έργου και για τα οποία χρειάστηκε ειδική αντιμετώπιση ήταν τα ακόλουθα:

1. Βραχομάζα αμελητέας συνοχής και έντονης τάσης προς ροή.
2. Έντονη παρουσία ασβεστολιθικής κονίας στο μέτωπο εκσκαφής και φαινόμενα αστάθειας του μετώπου κατά την εκσκαφή.
3. Κατάπτωση ή κατάρρευση βραχομάζας μικρής ή αμελητέας συνοχής στο στάδιο εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

4. Έλεγχος υπερεσκαφών για τις ζώνες εκσκαφής εκτός δοκών ή αγκυρίων προπορείας.
5. Βήμα προχώρησης και έλεγχος υπερεσκαφών στις εκσκαφές σήραγγας κατά τη Β' φάση.
6. Αντιμετώπιση μεικτών διατομών εκσκαφής – Ενδιάμεσες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης.

5.1 ΥΛΙΚΟ ΑΜΕΛΗΤΕΑΣ ΣΥΝΟΧΗΣ

Σε περιπτώσεις αντιμετώπισης βραχόμαζας αμελητέας συνοχής και έντονης τάσης προς ροή, διανοίγονται με τη χρήση του εξοπλισμού forepoling οπές άνωθεν των δοκών προπορείας, διαμέτρου 130-140mm με ανωφερική κλίση σε αποστάσεις των 50-70cm στις 90° της άνω ημιδιατομής ή/και στο μέτωπο εκσκαφής (5-10 οπές) μήκους 3-6m ανάλογα με τις επί τόπου συνθήκες, προς εκτέλεση τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης της περιβάλλουσας τη σήραγγα βραχόμαζας με σκοπό την κατά το δυνατόν αποκατάσταση της συνοχής αυτής. Εάν απαιτηθεί κατά την προχώρηση, εφαρμόζονται και αγκύρια αυτοδιάτρησης, μήκους 6m και φέρουσας ικανότητας 200 ή 300kN, μεταξύ των δοκών προπορείας στην περιοχή των τσιμεντενέσεων με στόχο την περαιτέρω ισχυροποίηση και την αποτελεσματική εξασφάλιση της οροφής. Λόγω της καρσικότητας του ορυσσόμενου σχηματισμού, των ανοικτών διακλάσεων και της εν γένει ανισοτροπίας αυτού κατά θέσεις, είναι συνήθης η κατανάλωση μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέματος από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες. Τονίζεται ότι τόσο κατά την εργασία ενεμάτωσης των δοκών προπορείας, όσο και των αγκυρίων fiberglass και selfdrilling, όταν παρατηρείται απορρόφηση ενέματος μεγαλύτερη της θεωρητικά προβλεπόμενης, σε κάθε περίπτωση συνεχίζεται η εργασία ενεμάτωσης υπό πίεση ούτως ώστε να επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν η μεγαλύτερη δυνατή σταθεροποίηση της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

5.2 ΕΝΤΟΝΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΚΟΝΙΑΣ

Σε ειδικές περιπτώσεις αντιμετώπισης ασβεστολιθικής κονιάς μηδενικής συνοχής στο μέτωπο εκσκαφής που καθιστούσε αδύνατη τη διατήρηση του προβλεπόμενου βήματος προχώρησης και παρουσίασε σημαντικά προβλήματα ροής υλικού και αστάθειας του θόλου, εφαρμόστηκαν παραοριζόντιοι τσιμεντοπάσσαλοι μήκους 12m και διαμέτρου 130mm, σε ακτινικές διατάξεις με αποστάσεις 80cm, για τη συγκράτηση του μετώπου. Η εργασία περιλάμβανε την υιοθέτηση ειδικής τεχνικής κατά την οποία αμέσως μετά τη διάτρηση, η απομάκρυνση των στελεχών γινόταν κατά τον ίδιο χρόνο με την εκτέλεση της σκυροδέτησης, καθώς ήταν αδύνατη η διατήρηση των οπών ανοικτών λόγω της ιδιόμορφης φύσης του υλικού.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σε περιοχές – όχι υποχρεωτικά σε όλο το ανάπτυγμα της επιφάνειας εκσκαφής- με πέτρωμα μικρής ή αμελητέας συνοχής και μικρής ή μηδενικής απορροφητικότητας σε τσιμεντένεμα υπήρξαν σημαντικές καταπτώσεις και ροή του πετρώματος κατά το στάδιο εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Από την πίεση του εκτοξευόμενου υλικού προκαλούνταν αφ' ενός πρόσθετη εκσκαφή της βραχομάζας (που πολλές φορές ήταν

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

ανεξέλεγκτη) και αφ'ετέρου καθίστατο αδύνατη η εφαρμογή της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αναγκαίας προϋπόθεσης για την εκτέλεση των επομένων εργασιών σταθεροποίησης της διατομής.

Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη χρήση φύλλων νευρομετάλλ, που τοποθετούνταν κάτω από τις δοκούς ή τα αγκύρια προπορείας, και επί των οποίων γινόταν η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χωρίς αυτό να έρχεται σε άμεση επαφή με τη βραχομάζα. Εναλλακτικά χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική της σταδιακής εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ξεκινώντας από περιοχές της επιφάνειας εκσκαφής με μεγαλύτερη συνοχή του πετρώματος. Στην πρώτη περίπτωση, μετά την οριστική εφαρμογή των μέτρων αντιστήριξης, πληρούνταν με τσιμεντένεμα τα πιθανά κενά μεταξύ νευροματάλλ και βραχομάζας.

5.4 ΥΠΕΡΕΣΚΑΦΕΣ ΠΛΕΟΝ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 'B'

Όταν το πέτρωμα είχε μικρή ή αμελητέα συνοχή και μικρή ή μηδενική απορροφητικότητα σε τσιμεντένεμα στις περιοχές της διατομής που δεν προϋποστηρίζονταν με δοκούς ή αγκύρια προπορείας δηλαδή στις ζώνες που βρίσκονταν κοντά στις θέσεις στήριξης των πλαισίων προκαλούνταν, παρά την ιδιαίτερη επιμέλεια κατά την εκσκαφή, υπερεσκαφές μεγαλύτερες των μέσων υπερεσκαφών που προσδιορίζονται από τη γραμμή 'B'.

Στις περιπτώσεις αυτές με την εμπειρία που αποκτήθηκε καταβαλλόταν προσπάθεια προεκτίμησης των περιοχών με ανάλογη συμπεριφορά και προσταθεροποίησης της βραχομάζας, πριν την έναρξη της εκσκαφής, με τσιμεντενέσεις σχετικά μικρού μήκους.

5.5 ΥΠΕΡΕΣΚΑΦΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ 'B' ΦΑΣΗ

Κατά το στάδιο εκσκαφής της 'B' φάσης της σήραγγας παρατηρήθηκε στις παρειές και καθ'ολο το ύψος εκσκαφής το ίδιο φαινόμενο με αυτό που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4 και αντιμετωπίστηκε με τον ίδιο τρόπο. Επιπρόσθετα διαπιστώθηκε ότι σε περίπτωση βραχομάζας με μικρή συνοχή ότι το βήμα προχώρησης των δύο (2) μέτρων ήταν μεγάλο και δυσχέραινε τον έλεγχο των ορίων εκσκαφής. Στις περιπτώσεις αυτές το βήμα προχώρησης κατά την εκσκαφή της B' φάσης της σήραγγας μειώθηκε στο ένα (1) μέτρο.

5.6 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΙΚΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΕΚΣΚΑΦΗΣ - ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Τονίζεται ότι η θεώρηση των διατομών και η μελέτη προς καθορισμό των μέτρων υποστήριξης έγινε υπό τη βασική προϋπόθεση ότι τόσο το πέτρωμα της διατομής της σήραγγας, όσο και η αμέσως περιβάλλουσα αυτήν βραχομάζα παρουσιάζουν ομοιογένεια, τα αυτά περίπου γεωμηχανικά χαρακτηριστικά και επομένως την αυτή γενικώς συμπεριφορά. Εν τούτοις αρκετά συχνά, ιδιαίτερα δε σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η όρυξη της σήραγγας διενεργείται εντός τεκτονικώς διαταραγμένων ζωνών ή/και πετρωμάτων που παρουσιάζουν σχεδόν συνεχή εναλλαγή της φύσεως και των εν γένει χαρακτηριστικών τους, αντιμετωπίζονται μεικτές διατομές στις οποίες ο καθορισμός των μέτρων υποστήριξης είναι ιδιαίτερα προβληματικός, δεδομένου ότι το μηχανικώς ασθενέστερο τμήμα της διατομής, ακόμα και σε μικρό ποσοστό συμμετοχής είναι δυνατόν υπό ορισμένες συνθήκες, να

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

επηρεάσει λίαν δυσμενώς τη συνολική ευστάθεια της διατομής της σήραγγας όταν αυτό βρίσκεται σε κρίσιμη περιοχή της διατομής. Το αυτό είναι δυνατόν να συμβεί εάν η αμέσως περιβάλλουσα τη διατομή βραχόμαζα, ιδιαίτερα στην περιοχή της οροφής, παρουσιάζει χαμηλότερα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το πέτρωμα της διατομής. Σε αυτές τις περιπτώσεις για λόγους εξασφάλισης της κατασκευής εφαρμόζονται τα μέτρα

Πίνακας Error! Unknown switch argument.: Τεχνικογεωλογική ταξινόμηση κατηγοριών.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	A	A/B	B	B/C	C	C/D	D
BLOCK SIZE (cm)	>10	5 – 10	5 – 10	<5	<5	NA	NA
GSI	35 - 45	ΟΜΟΙΟΓΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ~ 35 ΜΕΙΚΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ * (I) * (II)	25 – 35	ΟΜΟΙΟΓΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ~ 25 ΜΕΙΚΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ * (I) * (II)	15 – 25	ΟΜΟΙΟΓΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗ ~ 15 ΜΕΙΚΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ * (I) * (II)	<15
		ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΠΟ Β		ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΠΟ C		ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΠΟ D	
ΔΟΜΗ-ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗ ΤΕΜΑΧΩΝ	ΚΑΛΗ ΠΟΛΥ ΣΦΙΚΤΗ ΔΟΜΗ	ΜΕΤΡΙΑ ΣΦΙΚΤΗ ΔΟΜΗ	ΠΤΩΧΗ ΧΑΛΑΡΗ ΔΟΜΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ ΠΟΛΥ ΧΑΛΑΡΗ ΔΟΜΗ	ΧΑΟΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΣΥΧΝΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΤΗ	ΧΑΟΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΑΡΚΕΤΑ ΣΥΧΝΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΤΗ Ή ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΚΟΝΙΑΣ	ΧΑΟΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΔΟΥΣ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΤΗ Ή ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΗΣ ΚΟΝΙΑΣ

* (I) Επί τόπου αξιολόγηση, * (II) Εξοκαφή με βάση όχι το ασθενέστερο αλλά το γεωμηχανικά και κατασκευαστικά κρίσιμο τμήμα της διατομής

υποστήριξης που αντιστοιχούν στην αντίστοιχη ενδιάμεση κατηγορία εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης μετά από την αξιολόγηση των επί τόπου συνθηκών.

Τονίζεται επίσης, ότι οι εν λόγω ενδιάμεσες κατηγορίες εφαρμόζονται και σε περιπτώσεις μετάβασης προς τις αντίστοιχες καλύτερες ποιότητες βραχόμαζας, προς το σκοπό της ομαλής και ασφαλούς προσαρμογής της κατασκευής στις συνθήκες εδάφους και προς αποφυγή συχνών αλλαγών της διαδικασίας κατασκευής εξαιτίας ψευδομεταβολών των εδαφικών συνθηκών (μεταβατικές ζώνες).

Οι ακόλουθες, ενδιάμεσες των κυρίων A, B, C και D, κατηγορίες εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης βραχόμαζας, καλούνται ως A/B, B/C και C/D. Όπως είναι σαφές, οι κύριες κατηγορίες A, B, C και D καλύπτονται από πλήρη υπολογιστική τεκμηρίωση και γεωτεχνικές αναλύσεις, ενώ οι ενδιάμεσες προκύπτουν με βάση κυρίως κατασκευαστικές τροποποιήσεις και διαφοροποιήσεις των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, σε κάθε

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

περίπτωση είναι κυμαινόμενες μεταξύ των ορίων εφαρμογής των δύο εκατέρωθεν κύριων κατηγοριών και με δυνατότητες τοπικών αυξομειώσεων των μέτρων υποστήριξης ανάλογα με τις επί τόπου εναλλαγές της συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών. Η περιγραφή των ενδιάμεσων κατηγοριών που ακολουθεί αφορά στο γενικό πλαίσιο αρχών εφαρμογής αυτών επί τόπου του έργου, καθώς είναι πρόδηλη η αδυναμία εκ των προτέρων ακριβούς και πλήρους προσδιορισμού του συνόλου των προβλεπόμενων μέτρων υποστήριξης και των συναφών τεχνικών επιλογών σε περιπτώσεις εφαρμογών υβριδικής μορφής λύσεων που συνίστανται συχνά από διαδικασίες επί τόπου αξιολόγησης συνθηκών συμπεριφοράς της βραχώμαζας και υπόκεινται σε σχετικές αυξομειώσεις μέτρων ανάλογα με τις σχετικές εκτιμήσεις που διατυπώνονται στα πλαίσια της επί τόπου παρουσίας του Μελετητή στο έργο.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΝΔΙΑΜΕΣΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ B/C ΚΑΙ C/D

6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η εφαρμογή των ενδιάμεσων κατηγοριών αντιστήριξης με στοιχεία προπορείας (κατηγορίες B/C και C/D) προϋποθέτει την αξιολόγηση των στοιχείων που προκύπτουν από τις ερευνητικές διατρήσεις προπορείας (δοκοί προπορείας για την κατηγορία C/D και spilling για την κατηγορία B/C) και τα στοιχεία ενεμάτωσής τους, σε συνδυασμό με τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία από τη χαρτογράφηση των προηγούμενων μετώπων εκσκαφής. Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής:

- ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΤΩΠΩΝ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Η γεωλογική χαρτογράφηση του μετώπου, που εκτός της αποτύπωσης της γεωλογίας καταγράφει και την συμπεριφορά της βραχώμαζας, προσδιορίζει κατ' αρχήν την επιλογή της κατηγορίας αντιστήριξης που θα εφαρμοστεί στα επόμενα βήματα διάνοιξης. Πέραν αυτού παρέχει και τη βασική πληροφόρηση για τη διευθέτηση, την κατανομή και την αλληλοσυσχέτιση στο μέτωπο και κυρίως στο θόλο της σήραγγας των επιμέρους πετρογραφικών τύπων του γεωλογικού σχηματισμού του ασβεστόλιθου Παντοκράτορα, που συναντάται στα μέτωπα Α4 και Δ4.

- ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ

Κατά την παρακολούθηση της διάτρησης των ερευνητικών σωλήνων προπορείας για την κατηγορία C/D και αντίστοιχα των spiles για την κατηγορία B/C συλλέγονται τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Κρούση κοπτικού κατά τη διάτρηση
2. Επιστρεφόμενα υλικά διάτρησης, ήτοι τα θραυσμένα υλικά μαζί με το νερό που χρησιμοποιείται κατά τη διάτρηση
3. Χρώμα των επιστρεφόμενων
4. Ταχύτητα διάτρησης

Η αξιολόγηση των παραπάνω στοιχείων δίνει μία προσεγγιστική εικόνα της κατανομής των πετρογραφικών τύπων στο θόλο. Πιο συγκεκριμένα η ύπαρξη συνεχόμενης κρούσης ή αντίθετα η προχώρηση της διάτρησης χωρίς κρούση προσδιορίζει τα δύο ακραία μέλη των αναμενόμενων πετρογραφικών τύπων, ήτοι τον κατακερματισμένο ασβεστόλιθο και

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

τον κατακλαστίτη (ή την ασβεστολιθική κονία). Οι ενδιάμεσες περιπτώσεις αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στον κατακλαστικό ασβεστόλιθο. Η ταχύτητα διάτρησης υποβοηθά και ενισχύει την παραπάνω ποιοτική αντιστοίχιση. Η ύπαρξη ή η απώλεια των επιστρεφόμενων προσδιορίζει το δευτερογενές πορώδες του υλικού, ενώ το χρώμα προσδιορίζει ποιοτικά το υλικό (η διαπίστωση ερυθρών ή καστανών επιστρεφόμενων αντιστοιχεί σε αργιλικά υλικά πλήρωσης ασυνεχειών ενώ τα υπόλευκα επιστρεφόμενα αντιστοιχούν σε καθαρό ασβεστολιθικό υλικό.

- ΕΝΕΜΑΤΩΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΝ (μόνο για την κατηγορία C/D)

Η ενεμάτωση παρέχει πληροφορίες την ποιοτική διαφοροποίηση και το πορώδες των πετρογραφικών τύπων, καθώς και για την προενίσχυση που πραγματοποιήθηκε κατά την ενεμάτωση. Τα στοιχεία που συλλέγονται είναι:

1. Η ποσότητα του ενέματος
2. Η σύνθεση του ενέματος
3. Οι εφαρμοσθείσες πιέσεις κατά την ενεμάτωση

Σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες σε σχέση με τη θεωρητική για την πλήρωση της δοκού προσδιορίζουν την ύπαρξη κατακερματισμένου ή κατακλαστικού ασβεστόλιθου με μεγάλο δευτερογενές πορώδες, ενώ αντίστροφα μικρές καταναλώσεις προσδιορίζουν αμμώδες κλάσμα στα τοιχώματα της διάτρησης και επομένως δεικνύουν την ύπαρξη κατακλαστίτη ή ασβεστολιθικής κονίας. Οι εφαρμοζόμενες συνθέσεις ενέματος στις δύο ακραίες αυτές περιπτώσεις είναι αντίστοιχα 4/10 και >6/10 (λόγος N/T). Αντίστοιχα εφαρμόζονται μικρές πιέσεις στην πρώτη περίπτωση και μεγάλες στη δεύτερη.

- ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΠΥΚΝΩΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ

Όλα τα παραπάνω στοιχεία καταγράφονται και ακόλουθα συναξιολογούνται ούτως ώστε να προκύψει μία ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση των συνθηκών στο θόλο (υπό μορφή αναπτύγματος) και δευτερευόντως στο μέτωπο των επομένων εκσκαφών. Οι εκτιμήσεις της κατανομής των συνθηκών μεταφράζονται ακόλουθα με τοπικές πυκνώσεις ή αραιώσεις των στοιχείων προπορείας σε σχέση με τη θεωρητική απόσταση των στοιχείων προπορείας των κατηγορίας C και D (για την κατηγορία B/C και C/D αντίστοιχα).

Πρέπει να τονιστεί ότι η παραπάνω περιγραφή της διαδικασίας αξιολόγησης είναι ενδεικτική καθώς οι μεταβολές στην κατανομή των επιμέρους πετρογραφικών τύπων (και επομένως των γεωτεχνικών συνθηκών) είναι συνεχείς από μέτωπο σε μέτωπο με αποτέλεσμα την έντονη και συνεχώς μεταβαλλόμενη ετερογένεια της βραχώμαζας στις τρεις διαστάσεις. Καθοριστικό και τελικώς πρωτεύοντα ρόλο στη διαδικασία έχει η διαρκώς αποκτώμενη από τη συνεχή παρακολούθηση εμπειρία τόσο στη συλλογή των στοιχείων όσο και στην συσχέτισή τους με τις πραγματικές συνθήκες που αποκαλύπτονται εκ των υστέρων με την εκσκαφή.

6.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ C/D

Βασικά στοιχεία διαφοροποίησης σε σχέση με τα προβλεπόμενα στην κατηγορία D:

1. Μείωση της επικάλυψης των δοκών προπορείας από 4m σε 3m.
2. Τοποθέτηση των πλαισίων διατομής HEB 160 ανά 1,10m και εφαρμογή των ηλώσεων τύπου αυτοδιάτρησης σε κάρναβο 1,5m (κατά πλάτος) x 1,1m (κατά μήκος).
3. Εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος προστασίας του υπογείου μετώπου εκσκαφής σε στατικό πάχος 5cm σε όλα τα βήματα προχώρησης εκτός από το πρώτο βήμα

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

εκκίνησης έκαστης ομπρέλλας των δοκών προπορείας, στο οποίο διατηρείται στατικό πάχος 10cm.

4. Μη εφαρμογή θυσιαζομένων ηλώσεων τύπου fiberglass για την προστασία του υπογείου μετώπου εκσκαφής.
5. Αλλαγή στη σειρά και διαδικασία τοποθέτησης και ενεμάτωσης των δοκών προπορείας ως εξής:
 - Διάτρηση και σωλήνωση κάθε τέταρτης δοκού στο προβλεπόμενο σύνολο της άνω ημιδιατομής, για την κατηγορία D με βάση τη μέγιστη αξονική απόσταση της εν λόγω κατηγορίας.
 - Αξιολόγηση των συνθηκών και αποτελεσμάτων διάτρησης ως ερευνητικών διασκοπήσεων προπορείας.
 - Καταβολή προσπάθειας για την επίτευξη του μέγιστου δυνατού τεχνικού αποτελέσματος από την εργασία ενεμάτωσης των δοκών προπορείας και της περιβάλλουσας αυτών βραχόμαζας.
 - Εκτίμηση του τελικού αποτελέσματος σταθεροποίησης μέσω της ενεμάτωσης.
 - Λήψη απόφασης για τοπική αραίωση ή πύκνωση της μέγιστης προτεινόμενης απόστασης μεταξύ των δοκών προπορείας από την οριστική μελέτη εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης για την κατηγορία D. Αναμενόμενη μέση απόσταση των δοκών προπορείας 40cm.
 - Προσπάθεια εφαρμογής διαμήκων εγκοπών επί των δοκών προπορείας, μήκους περίπου 60cm και ανοίγματος 1cm ανά 1m επί του μήκους των δοκών (χωρίς επικάλυψη) σε γωνιακές διευθύνσεις επί του μηκοτομικού άξονα των δοκών προπορείας, σε περιπτώσεις διατήρησης ανοικτών των διατηρημάτων.
 - Εφαρμογή ενεμάτων με λόγο νερού / τσιμέντου κυμαινόμενου ανάλογα με τα αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών από 0,4 έως 1.
 - Ενδεχόμενη χρήση μπεντονίτη σε ποσοστό κυμαινόμενο μεταξύ 1 έως 3% κατά βάρος, με στόχο την αποφυγή ιζηματοποίησης του ενέματος.
 - Καταβολή προσπάθειας για αύξηση των εφαρμοζόμενων πιέσεων ενεμάτωσης σε συνδυασμό με το ρυθμό απορρόφησης του ενέματος.

6.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β/Σ

Βασικά στοιχεία διαφοροποίησης σε σχέση με τα προβλεπόμενα στην κατηγορία C:

1. Εφαρμογή ηλώσεων τύπου αυτοδιάτρησης φέρουσας ικανότητας 200kN. Εφαρμογή των ηλώσεων ανά 1,5m κατά μήκος.
2. Υιοθέτηση βήματος προχώρησης 1,5m με αντίστοιχες αποστάσεις τοποθέτησης των μεταλλικών πλαισίων και εφαρμογή δύο μεταλλικών πλαισίων ανά ομπρέλλα, διατομής ΗΕΒ 140.(εφαρμογή δύο πλαισίων ανά ομπρέλλα). Μη συστηματική υιοθέτηση βήματος 1m με αντίστοιχες αποστάσεις τοποθέτησης πλαισίων (εφαρμογή τριών πλαισίων ανά ομπρέλλα) μόνο σε περιπτώσεις αδυναμίας αντιμετώπισης συνθηκών ροής του υλικού μεταξύ των αγκυρίων προπορείας.
3. Εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος προστασίας του υπογείου μετώπου εκσκαφής σε στατικό πάχος 5cm σε όλα τα βήματα προχώρησης εκτός από το πρώτο βήμα

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

εκκίνησης έκαστης ομπρέλλας των δοκών προπορείας, στο οποίο διατηρείται στατικό πάχος 10cm.

4. Μη εφαρμογή προσωρινού ανεστραμμένου τόξου για την άνω ημιδιατομή.
5. Μη εφαρμογή τελικού ανεστραμμένου τόξου.
6. Εφαρμογή αγκυρίων προπορείας Φ30/11, μήκους 6m, τύπου αυτοδιάτρησης (αναμενόμενη μέση απόσταση 40cm).
7. Αλλαγή της διαδικασίας διάτρησης τοποθέτησης και ενεμάτωσης των αγκυρίων προπορείας ως εξής:
 - Διάτρηση τοποθέτηση και ενεμάτωση κάθε δεύτερου αγκυρίου προπορείας με βάση τις μέγιστες αξονικές αποστάσεις της κατηγορίας C.
 - Αξιολόγηση των συνθηκών του υπογείου μετώπου εκσκαφής και των αποτελεσμάτων διάτρησης των αγκυρίων προπορείας.
 - Λήψη απόφασης για την τοπική πύκνωση ή αραίωση των ενδιάμεσων αγκυρίων.

6.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Το γενικό πλαίσιο αρχών υιοθέτησης και επιλογής διαδικασίας εκσκαφής και μέτρων υποστήριξης για τις κατηγορίες A/B, B/C, C/D, αφορά είτε τις ενδιάμεσες ομοιογενείς περιπτώσεις διατομής, είτε τις ενδιάμεσες (μεικτές) διατομές σήραγγας από πλευράς γεωτεχνικών συνθηκών και δομικής ή ρεολογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας.

- Υπό την ως άνω έννοια, οι προαναφερθείσες ενδιάμεσες κατηγορίες διατομών δεν αποτελούν τροποποιήσεις των υφισταμένων κατηγοριών A, B, C, D αλλά πλαίσια δυνατοτήτων εφαρμογής μέτρων εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης για γεωτεχνικές και κατασκευαστικές συνθήκες στα γεωτεχνικά και γεωλογικά ακραία όρια εφαρμογής των κατηγοριών A, B, C, D.
- Οι ενδιάμεσες κατηγορίες A/B, B/C, C/D, αποτελούν δοκιμαστικές λύσεις, η αξιολόγηση και εκτίμηση των τεχνικών αποτελεσμάτων των οποίων γίνεται επί τόπου της κατασκευής με τη συμμετοχή του Μελετητή του έργου.
- Σε οποιαδήποτε περίπτωση διαπιστωθούν συνθήκες ή συμπεριφορά της βραχόμαζας δυσμενέστερη της προβλεπόμενης για την οιαδήποτε ενδιάμεση κατηγορία, τότε επιβάλλεται η άμεση «επιστροφή» της διαδικασίας εκσκαφής και υποστήριξης στην αμέσως δυσμενέστερη κατηγορία.
- Όλα τα παραπάνω, αποτελούν γενικό πλαίσιο αρχών και δύνανται να υπόκεινται σε μικρομεταβολές αναλόγως των επί τόπου συνθηκών και ελαφρές τροποποιήσεις με βάση τη συνεκτίμηση τόσο της δομικής συμπεριφοράς του κελύφους της προσωρινής υποστήριξης, ως επίσης και της ρεολογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας.
- Οι ενδεχόμενες επιλογές για κάθε ενδιάμεση κατηγορία διατομής, δύνανται να εφαρμόζονται είτε μερικώς είτε συνολικά, ανάλογα με την αξιολόγηση των επί τόπου συνθηκών κατασκευής.
- Σκοπό του διατυπωμένου ως άνω γενικού πλαισίου αρχών για την επιλογή των μέτρων υποστήριξης και τις διαδικασίες εκσκαφής των ενδιάμεσων κατηγοριών A/B, B/C, C/D, αποτελεί η άμβλυση των ποσοτικών και ποιοτικών διαφοροποιήσεων των μέτρων άμεσης υποστήριξης μεταξύ των κυρίων διατομών A, B, C, D, και η παροχή της δυνατότητας τροποποιήσεων ή μεταβολών επί τόπου του έργου με τη σύμφωνη γνώμη της Επίβλεψης και τη σύμπραξη του Μελετητή του έργου με βάση την αξιολόγηση και

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

συνεκτίμηση των υφισταμένων γεωτεχνικών και κατασκευαστικών συνθηκών υπό τη σαφή προϋπόθεση της μη μεταβολής των κεντρικών δομικών χαρακτηριστικών της υποστήριξης των κυρίων κατηγοριών εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης που προβλέπονται από την εγκεκριμένη μελέτη.

- Κατά τη φάση της κατασκευής είναι ενδεχόμενη η αναγκαιότητα λήψης πρόσθετων έκτακτων μέτρων – επεμβάσεων για την αντιμετώπιση συνθηκών τοπικά δυσμενέστερων των προβλεπόμενων από τη μελέτη. Η εν λόγω ανάγκη έχει προκύψει με βάση την αξιολόγηση της γνώσης και εμπειρίας από τη μέχρι σήμερα διάνοιξη της σήραγγας και τα σχετικά αποτελέσματα του προγράμματος γεωτεχνικής παρακολούθησης της σήραγγας στα μέχρι σήμερα διανοιχθέντα τμήματα, με βάση τα οποία ενδέχεται να απαιτηθεί η εφαρμογή τεχνικών όπως π.χ. τσιμεντοπασσάλων προΐσχυροποίησης του υπογείου μετώπου εκσκαφής ή η εκτέλεση τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης υπό τις διευρύνσεις ποδός του κελύφους προσωρινής υποστήριξης της άνω ημιδιατομής ή η εκτέλεση μικροπασσάλων με τσιμεντένεμα για τη διασφάλιση της έδρασης του κελύφους της άνω ημιδιατομής της σήραγγας σε περιπτώσεις αντιμετώπισης σημαντικών καθιζήσεων κλπ.

7. ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙΣΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Σε κάθε κατασκευή έργου εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης σηράγγων παρατηρείται μια σταδιακή πρόοδος του ημερήσιου ρυθμού προχώρησης μέχρις ότου επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση οπότε και σταθεροποιείται ο ρυθμός προχώρησης. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τόσο την καμπύλη μεταβολής του ρυθμού προχώρησης όσο και τον χρόνο που απαιτείται μέχρι την επίτευξη της σταθεροποίησης των αποδόσεων του συνεργείου εκσκαφής είναι οι ακόλουθοι:

- Καταλληλότητα προσωπικού και στελέχωση ομάδων εργασίας
- Εξοπλισμός του συνεργείου με τα κατάλληλα μηχανήματα
- Εξοικείωση του προσωπικού με τη μέθοδο εργασίας
- Αντιμετώπιση ειδικών περιπτώσεων για τις οποίες απαιτείται εφαρμογή ιδιαίτερων μεθόδων εργασίας

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

Πίνακας Error! Unknown switch argument.: Στοιχεία κατασκευής κατηγοριών υποστήριξης.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	A	A/B	B	B//C	C	C/D	D
ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	15 cm INEΣ	20 cm + INEΣ	20 cm + INEΣ	25 cm + INEΣ	25 cm + INEΣ	25 cm + INEΣ	25 cm + INEΣ
ΠΡΟΣΩΡΙΝΟ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΤΟΞΟ + INEΣ	OXI	OXI	OXI	OXI	20 cm + INEΣ	20 cm + INEΣ	20 cm + INEΣ
ΤΕΛΙΚΟ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΤΟΞΟ + ΠΛΕΓΜΑ	OXI	OXI	OXI	OXI	25 cm + ΠΛΕΓΜΑ	25 cm + ΠΛΕΓΜΑ	25 cm + ΠΛΕΓΜΑ
ΗΛΩΣΕΙΣ	1,5 x 2 5m (200KN)	1,5 x 1,5 5m (200KN)	1,5 x 1,5 6m SD (200KN)	1,5 x 1,5 6m SD (200KN)	1,5 x 1 6m SD (300KN)	1,5 x 1,1 6m SD (300KN)	1,5 x 1 6m SD (300KN)
ΠΛΑΙΣΙΑ ΒΗΜΑ	OXI	HEB 120 1,5m	HEB 120 1,5m	HEB 140 1,5m	HEB 140 1,0m	HEB 160 1,1m	HEB 160 1,0m
ΒΗΜΑ	2m	1,5m	1,5m	1,5m ΠΥΡΗΝΑΣ	1,0m ΠΥΡΗΝΑΣ	1,0m ΠΥΡΗΝΑΣ	1,0m ΠΥΡΗΝΑΣ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΩΠΟΥ	OXI	OXI	5cm	10cm στο πρώτο βήμα 5cm στα επόμενα	10cm	10cm στο πρώτο βήμα 5cm στα επόμενα	10cm + FG
ΑΓΚΥΡΙΑ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ	OXI	OXI	SD Φ30/11, 6m, 140°, 50cm	SD Φ30/ 11, 6m, 140°, 40cm, ΔΙΑΦ. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	SD Φ51, 6m, 140°, 40cm	OXI	OXI
ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΠΟΡΕΙΑΣ	OXI	OXI	OXI	OXI	OXI	Φ114, 3m, 140°, 40cm ΔΙΑΦ. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	Φ114mm, 12m, 4m 140°, 20-30cm
ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΤΕΛ. ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	35	40	40	40	40	45	45
ΣΥΓΚΛΙΣΕΙΣ & ΚΑΤΑΣΚ. ΑΝΟΧΕΣ	7	8	8	9	9	10	10

Τονίζεται ότι η τελευταία παράμετρος είναι ιδιαίτερης σημασίας και επηρεάζει αποφασιστικά το χρόνο που μεσολαβεί από την έναρξη των εργασιών μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται άμεσα από τους εξής παράγοντες:

- Την έκταση και την ένταση των απρόβλεπτων φαινομένων

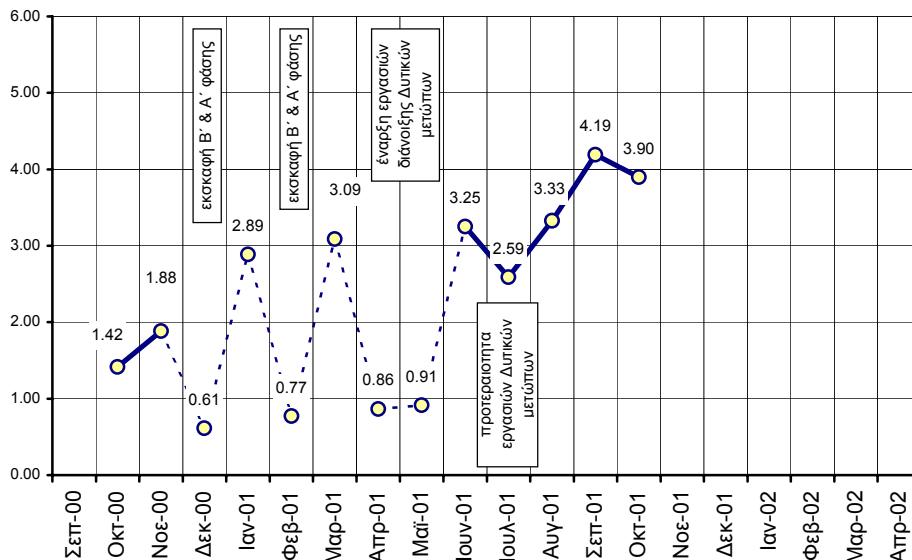
Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

- Τη συχνότητα και την πιθανή πολυμορφία των συμβάντων
- Την ταχύτητα αντιμετώπισής τους (επιλογή ασφαλούς λύσης, επιβεβαίωση ορθότητας της λύσης, χρόνος εξοικείωσης προσωπικού)
- Τον ιδιαίτερο χαρακτήρα των περιστατικών και τη δυνατότητα ή μη πρόβλεψης τους ώστε να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα
- Τον εξοπλισμό του εργοταξίου με πρόσθετα ειδικά μηχανήματα που απαιτούνται για αντιμετώπιση ειδικών καταπτώσεων που δεν αντιμετωπίζονται με το συνήθη εξοπλισμό σηράγγων του εργοταξίου

Οι ημερήσιες αποδόσεις στα μέτωπα της σήραγγας Σ2 και για την περιοχή που απαντάται το κατακλαστικό υλικό αποτυπώνονται στο Σχήμα 4. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Αρχική Ημερήσια Απόδοση : 1.42 μέτρα
- Μέγιστη Ημερήσια Απόδοση : 4.19 μέτρα
- Μέση Ημερήσια Απόδοση : 2.95 μέτρα
- Χρόνος για επίτευξη μέγιστης απόδοσης : 11 μήνες

ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ Α΄ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΣΗΡΑΓΓΑ Σ2



Σχήμα 4: Διάγραμμα ημερήσιας απόδοσης διάνοιξης Α΄ φάσης της σήραγγας Σ2 σε κατακλαστικό υλικό

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πραγματική ημερήσια μέση απόδοση ανήλθε (από την αρχή του έργου μέχρι τα τέλη Οκτωβρίου 2001) σε 2.95 μέτρα, έναντι των 2.50 μέτρων που είχαν εκτιμηθεί κατά την έναρξη του έργου δηλ. τη σύνταξη του χρονοδιαγράμματος

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση

εργασιών. Η καταγραφείσα θετική απόκλιση μεταξύ μέσης πραγματικής και εκτιμώμενης ημερήσιας απόδοσης είναι στα τέλη Οκτωβρίου 2001, 18 %.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δυνατότητα διάνοιξης της σήραγγας Σ2 μέσω εκτεταμένων ζωνών έντονα τεκτονισμένης και αποδιοργανωμένης βραχομάζας κατέδειξε τα ακόλουθα :

1. Απαιτείται στενή συνεργασία Μελετητή και Κατασκευαστή στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού της σήραγγας για την αξιολόγηση ερευνών και δοκιμαστικών διατρήσεων σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής και την εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για τις αναλυτικές προσεγγίσεις.
2. Λόγω σημαντικής μεταβλητότητας των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας η μέθοδος της στοχαστικής προσομοίωσης των τιμών των παραμέτρων βοηθά στην επιλογή παραμέτρων με επιθυμητό βαθμό εμπιστοσύνης.
3. Για τον υπολογισμό της κατάλληλης προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας απαιτούνται επιλύσεις τόσο με θεώρηση συνεχούς όσο και ασυνεχούς μέσου.
4. Η ετερογένεια του κατακλαστικού υλικού και η συχνή εμφάνιση μεικτών διατομών απαιτεί ειδική αντιμετώπιση κατά τη φάση κατασκευής προβλημάτων σχετικών με την τάση για ροή του υλικού και τον έλεγχο των υπερεσκαφών.
5. Προτείνεται διαδικασία αξιολόγησης των γεωτεχνικών συνθηκών που προκύπτουν από ερευνητικές διατρήσεις προπορείας και τα στοιχεία ενεμάτωσης τους και πλαίσιο αρχών υιοθέτησης και επιλογής διαδικασίας εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης για τις διάφορες κατηγορίες βραχομάζας.
6. Καταγράφονται οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το ρυθμό προχώρησης της σήραγγας και παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της πραγματικής ημερήσιας μέσης απόδοσης στο έργο της εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας Σ2.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους στο Γεωλόγο Δρ. Κ. Μπορονκάου και το Μεταλλειολόγο Μηχανικό David Noel Power για τη συμβολή τους στην απρόσκοπτη εφαρμογή του σχεδιασμού και την άρτια εκτέλεση των εργασιών κατασκευής της σήραγγας Σ2, καθώς και στις Δ/νσεις Εργων Δυτ. Τομέα και Μελετών (Τμήμα Σηράγγων) της ΕΟΑΕ για τις εποικοδομητικές συζητήσεις και σχόλια για τον καθορισμό των αρχών σχεδιασμού της σήραγγας Σ2.

Αναφορές

1. Itasca consulting Group, Inc. (2000) FLAC ver. 4.0 Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.
2. Itasca consulting Group, Inc. (2000) UDEC ver. 3.10 Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.

Σήραγγες σε κατακλαστικά υλικά (τμήμα 1.1.6. – Σήραγγα Σ2) – Σύλληψη, σχεδιασμός και υλοποίηση