



# Υπόγεια Ανοίγματα σε έργα Πολιτικού Μηχανικού

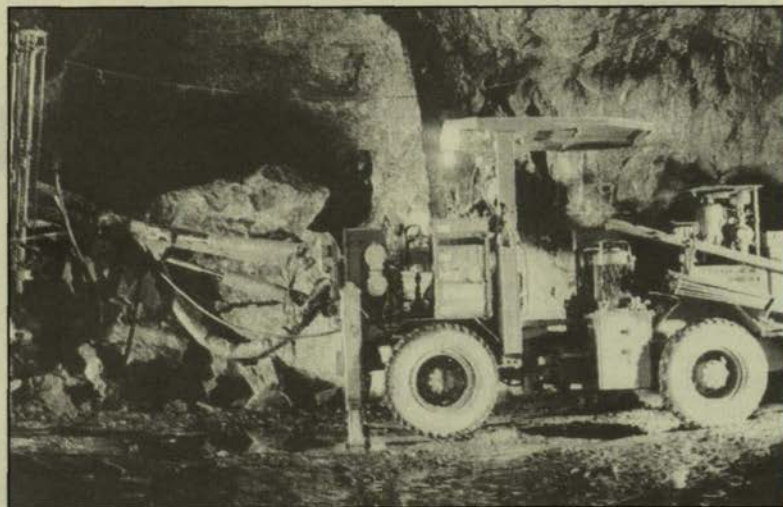
από άποψη μελέτης και κατασκευής

της Ε. Καλκάνη

Τα πρώτα υπόγεια ανοίγματα σε έργα πολιτικού μηχανικού, ήταν οι σήραγγες για σιδηροδρομικές γραμμές και αργότερα, για αυτοκινητοδρόμους. Σήμερα, κατασκευάζονται υπόγεια ανοίγματα μεγάλων μεγεθών και σε διάφορα σχήματα, για την αποθήκευση υλικών, τη στέγαση χώρων στάθμευσης ή τη στέγαση υπογείων υδροηλεκτρικών σταθμών. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται οι εξελίξεις της κατασκευής σιρράγων, οι προϋποθέσεις, τα προβλήματα και οι εφαρμογές της νέας Αυστριακής μεθόδου διάνοιξης, τα μέτρα υποστήριξης, και διάφορες περιπτώσεις μελέτης και κατασκευής.

## 1. Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης της οροφής και των τοιχωμάτων υπογείων ανοιγμάτων, έχει δοθεί από πολύ ενωρίς, μεγάλη σημασία στο πρόβλημα της ταξινόμησης της ποιότητας της βραχομάζας για τη μελέτη υποστηρίξεων σιρράγων (Barton,



Lien and Lunde, 1974). Παράλληλα, τεχνικές για τη μελέτη σιρράγων βασίστηκαν στην ταξινόμηση των ιδιοτήτων της βραχομάζας (Bieniawski, 1979).

Οι πολιτικοί μηχανικοί, προκειμένου να επιλύσουν τα προβλήματα κατασκευής υπογείων ανοιγμάτων, είχαν την ανάγκη, όχι μόνο της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης σχετικά με την κατασκευή σιρράγων σε μαλακά εδάφη (Peck, Hendron Jr. and Mohraz,

1972), αλλά και οδηγίες για την εκσκαφή υπογείων ανοιγμάτων σε βράχο με οικονομία και ασφάλεια (Hoek and Brown, 1980). Αργότερα, με την ανάπτυξη της βραχομηχανικής σαν επιστήμης μηχανικού έγινε δυνατή η εφαρμογή της βραχομηχανικής στη μελέτη υπογείων ανοιγμάτων ορυχείων και σιρράγων (Bieniawski, 1984), και γενικότερα στην αντιμετώπιση προβλημάτων των κατασκευών μέσα σε βράχο (Wittke, 1984). Μάλιστα, κυκλοφόρη-

**Η Ε. Καλκάνη είναι Αναπλ. Καθηγήτρια, στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.**

σε ένα πρακτικό εγχειρίδιο για προβλήματα υπογείων ανοιγμάτων σε βράχο (Stacey and Page, 1986).

Η υποστήριξη υπογείων ανοιγμάτων τόσο βραχυπρόθεσμα (αμέσως μετά τη διάνοιξη) όσο και μακροπρόθεσμα (κατά τη διάρκεια ζωής του έργου), απαιτεί όχι μόνο γνώση των απαραίτητων επί τόπου δοκιμών και αξιολόγηση των διαφόρων συστημάτων υποστήριξης (Parker et al., 1973), αλλά και από πριν εκτίμηση των απαιτούμενων υποστηρίξεων, η οποία γίνεται κατά το στάδιο της μελέτης των υπογείων ανοιγμάτων (Barton, Lien and Lunde, 1975).

Τα υπόγεια ανοίγματα, ανάλογα με τις χρήσεις τους, απαιτούν επενδύσεις, για τις οποίες μελετάται η αλληλεπίδραση εδάφους, επένδυσης, ιδίως στην κατασκευή σιδηράγων (Ranken, Ghaboussi and Hendron Jr., 1978), ή εφαρμόζονται οδηγίες για τη μελέτη επενδύσεων σιδηράγων, ειδικά από σκυρόδεμα (Paul et al., 1983) και γενικότερα διαφόρων τύπων επενδύσεων (O' Rourke, 1984).

Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά την κατασκευή υπογείων ανοιγμάτων, οφείλονται στη νέα εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στη βραχομάζα, η οποία είναι μη εφελκνόμενο υλικό (Zienkiewicz, Valliapan and King, 1968), και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με μεθόδους βραχομηχανικής όπως εφαρμόζονται από πολιτικούς μηχανικούς (Stagg and Zienkiewicz, 1978).

Τέλος, το πως θα αποφεύγονται και θα επιλύονται ασυμφωνίες στην κατασκευή υπογείων έργων (Underground Technology Research Council, 1989), είναι ένα πρόβλημα που προκύπτει συνήθως, μεταξύ των μερών που συμμετέχουν, δηλαδή, μεταξύ του ιδιοκτήτη, του μελετητή και του εργολάβου του υπογείου ανοίγματος. Σε μερικές περιπτώσεις, εμπεριβαίνει η κρατική αρχή, η οποία, ενδεχομένως, είναι επιφορτισμένη με την έκδοση άδειας κατασκευής, την επίλυση προβλημάτων δικαιοματικών χρήσης γης και το συντονισμό διαφόρων εγκρίσεων από κρατικές υπηρεσίες.



## 2. Εξέλιξη Μεθόδων Μελέτης - Κατασκευής Σιδηράγων

Για πρώτη φορά στην πρώην Τσεχοσλοβακία το 1848, προσπάθησαν οι μηχανικοί να χρησιμοποιήσουν σιμεντοκονία ταχείας πήξης, προκειμένου να μειώσουν τις βαρείες ξύλινες υποστηρίξεις σε ανθρακορυχείο της Wejwanow. Αργότερα, ο Rziha, ονομαστός Γερμανός μηχανικός για σιδηράγες, υποστήριξε ότι, είναι πρακτικότερο να αποτρέψει κανείς τα φορτία βράχου παρά να τα αντιμετωπίσει. Η μείωση των φορτίων βράχου, λόγω της πλήρους παραμόρφωσης μετά την εκσκαφή του και πριν από την επένδυση του υπογείου ανοίγματος με σκυρόδεμα, εφαρμόστηκε αργότερα (Sauer, 1990).

Ο Αυστριακός μηχανικός Brunner χρησιμοποίησε το 1954 πλήρως εκτοξευόμενη σιμεντοκονία, για να σταθεροποιήσει παραμορφωμένα εδάφη σε μία από τις σιδηράγες εκτροπής της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης Rungserau, στην Αυστρία. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε το 1964 στη σιδηροδρομική σιδηράγα Schwaikeheim, στη Γερμανία, στην οποία συμμετείχαν οι Καθηγητές L. Muller και Rabcewicz, οι οποίοι μάλιστα, έδωσαν εξηγήσεις της μεθόδου, σε περισσότερο θεωρητικό επίπεδο.

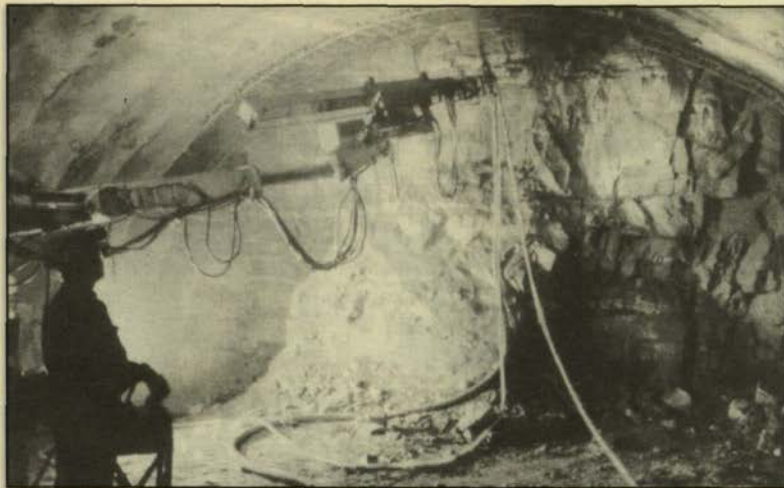
Η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σιδηράγων NATM (New Austrian Tunneling Method), βασίζεται στη χρησιμοποίηση όλων των μέσων που διατίθενται, έτσι ώστε η βραχομάζα να σταθεροποιείται πλήρως μετά τη διάνοιξη του υπογείου ανοίγματος. Στην

περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται αγκύρια, μεταλλικές διαδοκίδες σε σχάρα, συρματοπλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σε διάφορους συνδυασμούς, για να παρέχουν ελαστική συμπεριφορά στην αρχική υποστήριξη και να επιτρέπουν στο βράχο να χαλαρώσει και να καταλήξει σε μία κατάσταση ισορροπίας στο υπόγειο άνοιγμα. Αυτό γίνεται σε αντίθεση προς τη βαρεία ξύλινη υποστήριξη και τα μεταλλικά πλαίσια τα οποία χρησιμοποιούσαν οι μηχανικοί στο παρελθόν. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου NATM, γίνεται παρακολούθηση των αλλαγών της εντατικής κατάστασης στη βραχομάζα, συγκέντρωση μετρήσεων και αξιολόγηση των μετρήσεων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υπογείου ανοίγματος στο μέλλον, κατά τη διάρκεια ζωής του έργου (Sauer, 1990).

Η μέθοδος NATM, χρησιμοποιήθηκε το 1968 σε μαλακά εδάφη κατά την κατασκευή του υπογείου σιδηροδρόμου της Φρανκφούρτης, η διατομή του οποίου είχε δύο ανοίγματα, εκ των οποίων το πρώτο παρείχε ανθεκτική πρώτη υποστήριξη και το δεύτερο, δέχτηκε την αναμενόμενη παραμόρφωση και προστατεύεσε από την ανάπτυξη φορτίων βράχου.

## 3. Προϋποθέσεις Μεθόδου NATM

Προβλήματα τα οποία μπορεί να προκύψουν κατά τον προγραμματισμό της διάνοιξης σιδηράγων με τη μέθοδο NATM, και ενδεχομένως έχουν επι-



πτώσεις στην εφαρμογή της μεθόδου είναι τα εξής:

- στην περίπτωση δύο σηράγγων ποιά θα διανοιχθεί πρώτα (επάνω ή κάτω, δεξιά ή αριστερά),
- το τμήμα του εδάφους μεταξύ δύο σηράγγων πρέπει να παραμείνει ή να αντικατασταθεί από σκυρόδεμα,
- σε ποιές περιπτώσεις και πόσο γρήγορα θα πρέπει να εκσκαφεί ο πυθμένας της σήραγγας και να επενδυθεί, ώστε να σχηματίσει δακτύλιο υποστήριξης, παρά να παραμείνει επίπεδος ενώ η οροφή υποστηρίζεται με τη μέθοδο NATM,
- πόσο γρήγορα πρέπει να αναθεωρείται το σχέδιο μέτρων υποστήριξης όταν συναντώνται περισσότερο εύκολες ή δύσκολες περιπτώσεις ποιότητας βράχου.

Είναι απαραίτητο να γίνεται στενή παρακολούθηση της συμπεριφοράς του βράχου, έτσι ώστε, ο μελετητής να λαμβάνει την πληροφόρηση που απαιτείται και να καθορίζει την ακριβή ποσότητα των μέτρων υποστήριξης για τον τύπο βράχου που ελικράται.

Από τις μετρήσεις που γίνονται κατά τη διάρκεια διάνοιξης του υλογείου ανοίγματος, λαμβάνονται αποφάσεις για τα ακόλουθα:

- τη διαδικασία της εκσκαφής,
- την πυκνότητα των υποστηρίξεων,
- τη συγκέντρωση τάσεων, που οδηγεί σε περιοδική συστολή και παραμόρφωση των αγκυρίων και ρωγμές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα,

- τη φέρουσα αντοχή του εδάφους, η οποία μπορεί να διατηρηθεί, με το να αποφευχθούν παραμορφώσεις, σχεδιάζοντας στενότερη τη βάση του ανοίγματος,
- το κλείσιμο του δακτύλιου της επένδυσης στη βάση με οπλισμένο σκυρόδεμα, στην περίπτωση σημαντικών παραμορφώσεων στη βάση του ανοίγματος.

Σύμφωνα με μοντέλα που προβλέπουν τη συγκέντρωση τάσεων κατά την εκσκαφή σηράγγων, ο δακτύλιος υποστήριξης, θα πρέπει να στηρίζεται ικανοποιητικά σε αποστάσεις 1.5 φορές τη διάμετρο της σήραγγας από το πρόσωπο εκσκαφής.

Στην περίπτωση εδάφους με μικρή συνεκτικότητα, το υλικό θα πρέπει να υποστηρίζεται στο πρόσωπο εκσκαφής με επέκταση του συστήματος υποστήριξης μέσα στο μέτωπο εκσκαφής. Ανάλογα με την ποιότητα του βράχου, τα άμεσα μέτρα υποστήριξης μπορεί να κυμαίνονται από τοπικές αγκυρώσεις σε καλής ποιότητας βράχο, μέχρι συστηματική εκτεταμένη αγκύρωση, δοκούς σε σχάρα, συρματοπλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σε λιγότερο σταθερά εδάφη. Ο πυθμένας θα πρέπει να εκσκαφεί και ο δακτύλιος των μέτρων υποστήριξης να συμπληρωθεί στη βάση με συρματοπλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

#### 4. Προβλήματα Μεθόδου NATM

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής, αναμένεται ότι θα συναντηθούν συνθήκες διαφορετικές από τη μελέτη, οι οποίες

πρέπει να αντιμετωπισθούν. Για τις περιπτώσεις αυτές, προβλέπονται από τη NATM μία σειρά άμεσων μέτρων υποστήριξης. Τα διάφορα μέτρα υποστήριξης της μεθόδου NATM, επιτρέπουν στον εργολάβο να αντιμετωπίσει τις μεταβαλλόμενες συνθήκες εδάφους.

Η μέθοδος NATM χρησιμοποιήθηκε αρχικά, σε σχετικά υγρή βράχο, όπως ψαμίτες και ασβεστολίθους, με σημαντική ικανότητα ανάλιψης φορτίων από τον ίδιο το βράχο. Στις περιπτώσεις αυτές, η μέθοδος NATM αποδείχθηκε, όχι μόνον επιτυχής, αλλά και οικονομική. Την τελευταία δεκαετία, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε διάφορους τύπους εδαφών και αποδείχθηκε ότι, όχι μόνο επιτυγχάνονται οικονομικές υποστηρίξεις υπογείων ανοιγμάτων, αλλά συγχρόνως δεν υφίσταται κίνδυνος κατάρρευσης των τοιχωμάτων του υλογείου ανοίγματος κατά τη διάνοιξη ή αργότερα, κατά τη διάρκεια ζωής του έργου (Sauer, 1990).

Τα συμβαλλόμενα μέρη για την κατασκευή ενός υλογείου ανοίγματος, όπως ο ιδιοκτήτης, ο μελετητής, ο εργολάβος και τα συνεργεία, πρέπει να συνεργάζονται για την εφαρμογή της μεθόδου NATM, σε ημερήσια βάση. Αυτό βέβαια, προϋποθέτει την κατάλληλη σύμβαση και ένα καλό κλίμα συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, διαφορετικά αναμένονται αποτυχίες.

Η αστοχία που μπορεί να συμβεί κατά τη διάνοιξη υλογείου ανοίγματος, μπορεί να οφείλεται σε παραλείψεις της μελέτης ή στην ακαταλληλότητα της μεθόδου κατασκευής. Ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλογείου ανοίγματος, όπως η εισροή νερών από τον υπόγειο ορίζοντα, γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, και τεκτονικές ανωμαλίες, δεν μπορούν να προβλεφθούν από το μελετητή ή να εμφανιστούν σαν ενδείξεις οργάνων οι οποίες θα ληφθούν υπόψη από τον κατασκευαστή. Άλλωστε, και στην περίπτωση που τα όργανα δεν έχουν τοποθετηθεί στην κατάλληλη θέση ή τα μέτρα της αρχικής υποστήριξης δεν ήταν επιτυχής και ακόμη αν ο ρυθμός διάνοιξης έχει αυξηθεί και υπάρχει προσπάθεια μείωσης του κό-

στους των μέτρων προστασίας, αναμενόμενο είναι να συμβεί αστοχία.

Η έναρξη της αστοχίας εμφανίζεται με σύγκλιση της βάσης των τοιχωμάτων του υπογείου ανοίγματος, κατάπτωση της οροφής και άλλες παραμορφώσεις οι οποίες υποδεικνύουν ισχυρή εντατική κατάσταση στην περίμετρο του υπογείου ανοίγματος, αλλά δεν δίνουν στοιχεία για τις τάσεις που αναπτύχθηκαν. Πάντως, είναι πολύ σημαντικό το συνεργείο εκσκαφής να έχει εμπειρία στη διάνοιξη υπογείων ανοιγμάτων, και να μπορεί να συνδυάσει τις υποδείξεις της μελέτης με τις δικές του παρατηρήσεις, και να λάβει τα αναγκαία μέτρα τα οποία άλλωστε αφορούν και τη δική του ασφάλεια.

Ιδιαίτερα προσεκτική πρέπει να είναι η νυκτερινή βάρδια, η οποία λόγω μάλιστα έλλειψης της επίβλεψης, δίνει μεγαλύτερη σημασία στην αύξηση της ταχύτητας διάνοιξης και εγκατάστασης των μέτρων υποστήριξης, ενώ μία αστοχία κατά τη νύκτα, θα δημιουργήσει καθυστέρηση μέχρις ότου ληφθούν αποφάσεις για τα νέα μέτρα που θα εφαρμοστούν στην επόμενη βάρδια.

Σε δύσκολες περιπτώσεις εδαφών, η αλληλονχία της εκσκαφής, μπορεί να γίνει με μικρότερο μήκος μετώπου και σε τμήματα του μετώπου (πλευρές, κέντρο). Για παράδειγμα, το μήκος διάνοιξης, μπορεί να μειωθεί από 3μ, σε 1.5μ. Επίσης, θα απαιτήσει την ενίσχυση της εκτοξευόμενης σιμεντοκονίας, με επί πλέον μεταλλικές δοκούς, σφυροματόπλεγμα και με εφαρμογή χαλυβδίνων βελόνων στο μίγμα και στην αύξηση του πάχους του. Μπορεί, επίσης, να απαιτηθεί η άμεση διάνοιξη του πυθμένα για το κλείσιμο του δακτύλιου της επένδυσης του ανοίγματος, ο οποίος δακτύλιος, θα σταθεροποιήσει την όλη διατομή ενωρίτερα από ότι είχε προγραμματιστεί.

Μεγάλη ταχύτητα στη διάνοιξη και υποστήριξη των τοιχωμάτων σπράγγων, δεν πρέπει να εφαρμοζέται. Ενδιάμεσα διαστήματα αδράνειας επιτρέπουν την εκτόνωση τάσεων ή τη συγκέντρωση τάσεων, στην οποία όμως, δεν είναι δυνατόν να αντισταθούν τα υποστηρίγματα. Η εγκατάσταση ισχυρών μεταλλικών πλαισίων δεν αποδεικνύεται αποτελεσματική για μεγάλα χρονικά διαστήματα, επειδή τα πλαίσια αυτά, όσο ισχυρά και αν είναι ή



όσο πυκνά και αν είναι δεν αυξάνουν την αντοχή του περιβάλλοντος βράχου. Άλλωστε, είναι σε επαφή, μόνο με μερικά σημεία του βράχου και όχι στο συνολικό μήκος τους, ενώ επιτρέπουν μετακίνηση μεγάλων τμημάτων βράχου. Αντίθετα, με την αύξηση του αριθμού και του μήκους των αγκυριών, του πάχους της εκτοξευόμενης σιμεντοκονίας και του μεταλλικού πλέγματος ή σφυροματόπλεγματος και ινών χάλυβα, μπορεί να ελέγχεται η μετακίνηση του εδάφους.

Επίσης, η εκσκαφή θα πρέπει να διατηρείται σε κυκλικό σχήμα, όσο το δυνατόν περισσότερο. Επομένως, για κυκλική διατομή, η βάση των τοίχων της διατομής θα πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν σε κυκλικό τόξο στον πυθμένα της διατομής. Ο πυθμένας, θα πρέπει να εκσκαπείται και να επενδύεται αμέσως με σφυροματόπλεγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, σήμερα, η μέθοδος NATM, χρησιμοποιεί όλα τα μέσα για την ανάπτυξη της αντοχής του εδάφους, ενώ συγχρόνως υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της κακής ποιότητας εδάφους (Sauer, 1990).

## 5. Προϋποθέσεις Μελέτης Σπράγγων

Για τη μελέτη σπράγγων από τον πολιτικό μηχανικό, θα πρέπει να καθορίζονται:

- το μέγεθος, το σχήμα και η κατεύθυνση της σήραγγας,
- η μέθοδος εκσκαφής,
- τα αρχικά μέτρα υποστήριξης,

- η τελική επένδυση και το οδόστρωμα.

Ειδικότερα, θα πρέπει να είναι γνωστά τα γεωτεχνικά στοιχεία όπως:

- η γεωλογία, η σεισμολογία και η υδρολογία,
- οι συνθήκες διάνοιξης της σήραγγας (μέθοδος διάνοιξης και ταχύτητα διάνοιξης).

Από μη τεχνική άποψη, απαιτούνται τα εξής:

- διαθεσιμότητα κονδυλίων,
- κρατικοί έλεγχοι για τη μελέτη,
- διαδικασίες συμβάσεων,
- κατανομή ευθυνών προς τρίτους,
- κατανομή ευθυνών μεταξύ των συμβαλλομένων.

Η μοντέρνα φιλοσοφία για τη μελέτη σπράγγων, περιλαμβάνει (Slakey and Abramson, 1990):

- την από κοινού ευθύνη του μελετητή και του εργολάβου για τον καθορισμό των αρχικών μέτρων υποστήριξης,
- τη χρησιμοποίηση των αρχικών μέτρων υποστήριξης σαν μόνιμων, με αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους επένδυσης και της διατομής της εκσκαφής.

Οι μέθοδοι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, είναι αναλυτικές, θεωρητικές, εμπειρικές και μέθοδοι παρατήρησης. Οι θεωρητικές μέθοδοι αποτελούν τις βασικές μεθόδους για τη μελέτη και τη δημοπρασία της σήραγγας, και επομένως η παρουσίαση στη μελέτη ενός ενισχυμένου τόξου στην οροφή με αγκυρώσεις, παρέχει την εγγύηση για την ασφάλεια της κατα-



σκεινής. Στην περίπτωση όμως αυτή, ο οπλισμός της διατομής μπορεί να είναι υπερβολικός σε καλή ποιότητα βράχου, και συγχρόνως η επένδυση της σήραγγας με σκυρόδεμα (ελάχιστο πάχος 0.25μ) να είναι μόνο διακοσμητική.

Προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του κόστους κατά την κατασκευή και τη μακροχρόνια λειτουργία και συντήρηση μίας σήραγγας, θα πρέπει:

- να αποφασίζεται το ελάχιστο πάχος της επένδυσης με σκυρόδεμα, λαμβανομένων υπόψη των αγκυρώσεων, εσαφών οπλισμού, και κατασκευαστικών προβλημάτων,
- να καθορίζεται μόνιμη υποστήριξη του βράχου,
- να προβλέπεται προσωρινή ενίσχυση του βράχου.

Ειδικότερα, για σήραγγες οδοποιίας, οι επενδύσεις είναι διαφορετικές από τις επενδύσεις άλλων σηράγγων, οι οποίες σχεδιάζονται πάντα με την οικονομικότητα της κατασκευής. Από άποψη συνολικής μελέτης μίας σήραγγας, απαιτούνται εγκρίσεις από:

- τον ιδιοκτήτη του έργου,
- το χρηματοδότη,
- την υπηρεσία εγκρίσεων.

Σχετικά με τα απαιτούμενα τεχνικά στοιχεία λαμβάνονται υπόψη:

- απαιτήσεις της κυκλοφορίας,
- προστασία από πυρκαϊές,
- ασφάλεια έναντι ατυχημάτων,
- αερισμός, φωτισμός, ύδρευση, αποστράγγιση,
- σηματοδότηση, τηλεπικοινωνίες,
- αρχιτεκτονικά τελειώματα.

## 6. Αντιστήριξη Συγκεκριμένων Σφημών Βράχου

Η κατανομή των διακλάσεων του βράχου, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του υπογείου ανοίγματος. Οι οικογένειες διακλάσεων, χαρακτηρίζονται από τον προσανατολισμό και το βαθμό ρηγματώσεώς τους, που μπορεί να προσδιοριστεί στατιστικά. Για διακλάσεις που δεν περιέχουν υλικό πλήρωσης, η διατμητική αντοχή τους είναι συνάρτηση της γωνίας τριβής και της ενεργούς τάσης κάθετης στο επίπεδο της διάκλασης. Η ορθή και η διατμητική τάση που ασκούνται στο επίπεδο μίας διάκλασης, εξαρτώνται από την κατεύθυνση των κυρίων τάσεων στη βραχομάζα και τον προσανατολισμό της διάκλασης. Παράλληλα, οι διακλάσεις που περιέχουν υλικό πλήρωσης, αντιμετωπίζονται για ολίσθηση στο υλικό αυτό, και επομένως, λαμβάνεται υπόψη η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού πλήρωσης (Marangos, 1990).

Στις περιπτώσεις διακλάσεων, οι σφήνες βράχου που θα κατολισθήσουν στο εσωτερικό του υπογείου ανοίγματος, μελετώνται για το αν η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση  $\tau$  είναι μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή  $\delta$  στην επιφάνεια της διάκλασης. Η διατμητική τάση  $\tau$ , υπολογίζεται από την κάθετη στη διάκλαση τάση  $\sigma$ , την επαπτομένη της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$ , τη συνοχή  $c$ , και τους δείκτες 1 (πλήρωση με αργιλλικό υλικό) και 2 (χωρίς υλικό πλήρωσης) σύμφωνα με την εξίσωση (Marangos, 1990):

$\tau = 1 \sigma \tan(\phi_1) + c_1$ , σε περίπτωση με υλικό πλήρωσης, και

$\tau = \sigma \tan(\phi_2)$ , σε περίπτωση χωρίς υλικό πλήρωσης.

Οι εξισώσεις αυτές γίνονται περισσότερο πολύπλοκες όταν λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής  $\lambda$ , ο οποίος δηλώνει το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας προς τη συνολική, δηλαδή:

$$\tau = \lambda (\sigma \tan(\phi_1) + c_1) + (1 - \lambda) (\sigma \tan(\phi_2) + c_2),$$

για αριμούς με υλικό πλήρωσης, και

$$\tau = \lambda \sigma \tan(\phi_2) + (1 - \lambda) (\sigma \tan(\phi_2) + c_2),$$

για αριμούς χωρίς υλικό πλήρωσης.

## 7. Προϋποθέσεις Μελέτης Πολλαπλών Ανοιγμάτων

Στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλά υπόγεια ανοίγματα σε παράλληλη διάταξη, σε μικρά βάθη και σε ρηγματωμένο βράχο, η τοπογραφία της περιοχής και η υπάρχουσα εντατική κατάσταση, καθώς και οι περιοχές με υπερβολικά ρηγματωμένο και αποσθρωμένο βράχο πρέπει να καθορίζονται επακριβώς και να λαμβάνονται υπόψη στον τρόπο εκσκαφής και στα μέτρα υποστήριξης, τα οποία θα εφαρμοστούν.

Για τη μελέτη πολλαπλών ανοιγμάτων, αποφασίζεται η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Οι κυριότεροι λόγοι, είναι εξής:

- ο εκσκαπόμενος όγκος είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με τον όγκο βράχου που παραμένει,
- το πάχος βράχου επάνω από τα ανοίγματα είναι μικρό ενώ τα ανοίγματα έχουν μεγάλο πλάτος,
- ο βράχος να είναι υπερβολικά ρηγματωμένος σε μερικές περιοχές,
- να υπάρχει φόβος μελλοντικής επιφανειακής επιβάρυνσης από οικοδομές,
- να υπάρχει ανεπάρκεια των παλαιών μεθόδων ανάλυσης.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε παρόμοια πολλαπλά ανοίγματα στη Φιλανδία, είναι του JOHANSSON (Johansson et al., 1988), FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua (Itasca, 1987) και UDEC: Universal Distinct Element Code (Itasca, 1989), οι οποίες, αφενός μεν, μπορούν να ενοπίσουν περιοχές μειωμένης ευστά-

θειας, και αφετέρου, να προσομοιώσουν επιτυχώς τα πολλαπλά στάδια κατασκευής και την εγκατάσταση υποστηρίγματα (Logig and Johansson, 1990).

Στις περιπτώσεις που η απόσταση των ασυνεχειών ήταν μεγάλη, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα UDEC, διαφορετικά σε υπερβολικά ρηγματομένο βράχο, το πρόγραμμα FLAC. Για πυκνές οριζόντιες και κατακόρυφες ασυνέχειες, η αστάθεια περιλαμβάνει κατολίσθηση τμημάτων βράχου στα τοιχώματα των ανοιγμάτων. Αν οι οριζόντιες ασυνέχειες είναι περισσότερες απομακρυσμένες και διακοπτόμενες, η αστάθεια περιορίζεται σε μικρούς όγκους βράχου στην οροφή.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης, σημειώθηκε ότι:

- η επιφανειακή φόρτιση αύξησε τις δυνάμεις των υποστηρίξεων ελάχιστα,
- η μείωση κατά 2 μ του πάχους της μάζας του βράχου των τοιχωμάτων, είχε μικρή επίπτωση στο λόγο αντοχής / τάση, και καμία επίπτωση αλλού,
- η εκβάθυνση ορισμένων ανοιγμάτων κατά 4μ, δεν είχε καμία επίπτωση στην ευστάθεια των τοιχωμάτων και της οροφής.

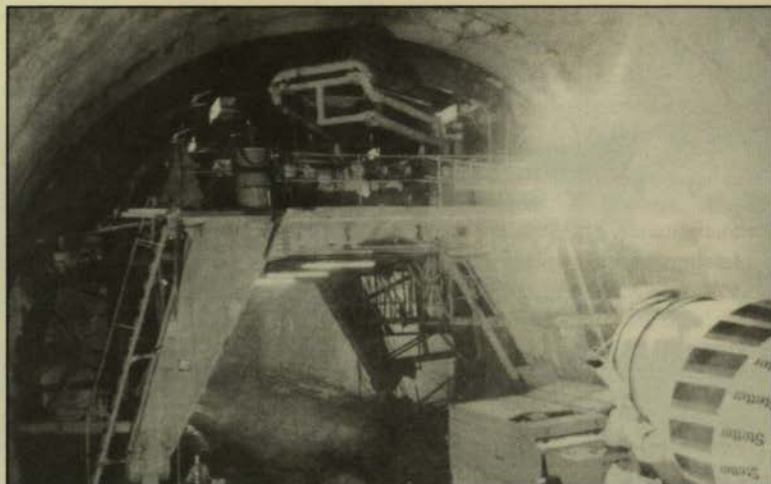
Η παρακολούθηση της εκσκαφής με όργανα (Johansson et al, 1989) χρησιμοποιήθηκε, κυρίως, στις περιοχές όπου αναμενόταν αστάθεια. Το πρόγραμμα περιλάμβανε την τοποθέτηση οργάνων για την επιβεβαίωση της συμπεριφοράς της βραχώδους μάζας.

Ειδικότερα, τα όργανα τοποθετήθηκαν για τους εξής λόγους:

- τον έλεγχο της οροφής, σε περιπτώσεις μικρού πάχους βράχου,
- τον έλεγχο της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων βράχου,
- την επιβεβαίωση του μοντέλου προσομοίωσης,
- τον έλεγχο της συνολικής ευστάθειας.

Τα όργανα παρακολούθησης που τοποθετήθηκαν ήταν:

- μηχανοσκόπια από την επιφάνεια,
- μηχανοσκόπια από τα υπόγεια ανοίγματα,
- δείκτες παραμόρφωσης στα βάθρα (μεταξύ των ανοιγμάτων),
- κύτταρα τάσεων στα βάθρα (μεταξύ των ανοιγμάτων),



- κύτταρα μέτρησης φορτίων αγκυρώσεων,
- κύτταρα μέτρησης πίεσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος,
- σημεία μέτρησης σύγκλισης των τοιχωμάτων των ανοιγμάτων,
- αυτόματοι καταγραφείς δεδομένων και κομπιούτερ.

## 8. Περιπτώσεις Μελέτης Κατασκευής Υπόγειων Ανοιγμάτων

Στην περίπτωση εκσκαφής ενός υπογείου γκαράζ στο Landsberg της Γερμανίας (κοντά στο Μόναχο), χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι διάνοιξης σπράγγων, λόγω της τοπογραφίας και για λόγους περιβαλλοντικούς, αντί για μεθόδους εκσκαφής, κατασκευής του γκαράζ και επανεπίχωσης. Η γεωλογία περιλάμβανε 17μ συμπαγούς χαλικώδους εδάφους επάνω από αργιλλικούς και αργιλλοαμμώδεις σχηματισμούς του τεταρτογενούς. Η διατομή του υπογείου ανοίγματος, διαστάσεων 18,9μ x 16,4μ, περιλαμβάνει 3 ορόφους για πάρκινγκ πλάτους 15μ (για στάθμευση 2 αυτοκινήτων εκατέρωθεν και κεντρικού διαδρόμου), θαλάμους χειρισμών επάνω και κάτω, μέσα σε πεταλοειδή διατομή 240τμ. Συγκριτικά, σε σιδηροδρομική σήραγγα μίας γραμμής ωκεί διατομή 35τμ, ενώ σε σήραγγα διπλής γραμμής μεγάλης ταχύτητας, αρκεί διατομή 150τμ.

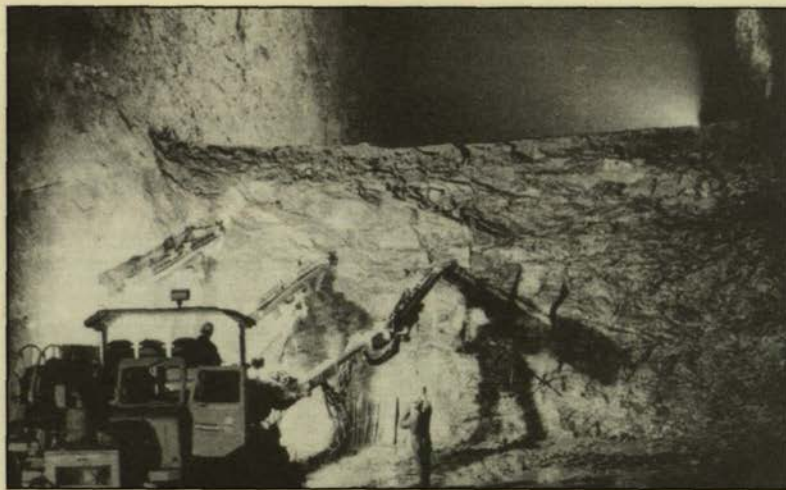
Στην περίπτωση κατασκευής υπογείου ανοίγματος θυροφραγμάτων (1988) για τον εξαιρεισμό μίας σήραγγας σιδηροδρομικής γραμμής στην British Columbia, Canada, απαιτήθηκε

άνοιγμα ύψους 27μ, πλάτους 16μ και μήκους 20μ, σε βάθος 400μ και σε μεταμορφωσιγενείς σχηματισμούς (φυλλίτες, σχιστολίθους και χαλαζίτες). Αγκύρια βράχου και εκτοξευόμενη σιμεντοκονία, είχαν προβλεφθεί για τη μόνιμη μακροχρόνια υποστήριξη. Η ανάλυση έγινε με οριακά στοιχεία σε δύο διαστάσεις (Hook and Brown, 1980), προκειμένου να επιλυθεί η περίπτωση εκφόρτωσης από την εκσκαφή σε επίπεδη παραμόρφωση, ενώ τα αγκύρια και τα μέσα υποστήριξης προσομοιώθηκαν σαν εσωτερικές δυνάμεις. Επίσης, υπολογίστηκε ο λόγος της υπάρχουσας αντοχής του βράχου προς την αναπτυσσόμενη τάση, και σχεδιάστηκαν οι ισοστασικές γραμμές κυρίων τάσεων για διαφορετικές τιμές του λόγου αρχικών οριζοντίων προς κατακόρυφες τάσεις.

Για την αποθήκευση Liquefied Natural Gas (LNG) στην Ιταλία, σε σχηματισμό ασβεστόχων μαργών και ασβεστολίθου, έγινε μελέτη σκοπιμότητας για τη διάνοιξη των υπογείων ανοιγμάτων. Δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν:

α) μεταλλική δεξαμενή αποθήκευσης μέσα σε υπόγειο άνοιγμα πλάτους 40μ επί 65μ ύψος σε 155μ βάθος, και

β) αποθήκευση σε υπόγειο άνοιγμα πλάτους 35μ επί 45μ ύψος, σε βάθος 175μ. Η ανάλυση έδειξε την ανάγκη ενίσχυσης του βράχου με αγκύρια και αύξηση της συνεκτικότητας στο έδαφος με προεντεταμένες αγκυρώσεις. Η πλαστική περιοχή εκτείνεται στα τοιχώματα του ανοίγματος κατά 50%-60% του πλάτους του ανοίγματος. Έ-



τοι, προβλέφθηκαν ακύρια βράχου για την σταθεροποίηση της πλαστικής ζώνης.

Για την αποθήκευση νερών πλημμύρας που προέρχονται από την αποστράγγιση ενός συγκεκριμένου τμήματος του αυτοκινητοδρόμου του Dallas, Texas, μελετήθηκαν υπόγεια ανοίγματα κάτω από ένα δημοσιο πάρκο της πόλης. Στην είσοδο των ανοιγμάτων, υπάρχουν εκχειλιστές για την υπερχείλιση του επιπλέον νερού των ομβρίων μέσα στα υπόγεια ανοίγματα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διατομής με σταθερό ύψος 12.2μ. Με βάση την κατανομή τάσεων στην περίμετρο του ανοίγματος και τις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στα ενδιάμεσα τμήματα βράχου, εξελέγη διατομή με πλάτος 7.3μ και ενδιάμεσα τοιχώματα πάχους 4.8μ. Η ανάλυση ευστάθειας των ενδιάμεσων τμημάτων βράχου (βάθρα), έγινε λαμβάνοντας υπόψη γωνία εσωτερικής τριβής του βράχου 20 μοιρών και υπολογίζοντας τις κλίσεις για τις οποίες σφήνες βράχου είναι επικίνδυνες να ολισθήσουν.

Στην περίπτωση υπογείου ανοίγματος για εγκατάσταση μονάδων υδροηλεκτρικού σταθμού, με διαστάσεις 44μ ύψος επί 20μ πλάτος, εξετάστηκαν διάφορες καμπυλόπληρες των τοιχωμάτων για διάφορες τιμές οριζόντιας προς κατακόρυφη αρχική τάση, για μεταβολή της θέσης του υπογείου ανοίγματος κάτω από την επιφάνεια του βράχου, και για διάφορες κλίσεις της επιφάνειας του βράχου. Η μελέτη έγινε με την ε-

φαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα με τις ισοτασιζές της ελαχίστης κυρίας τάσης για τη διατομή υπογείου ανοίγματος με κατακόρυφα τοιχώματα, με ελαφρώς καμπύλα τοιχώματα και με καμπύλα τοιχώματα. Τα πλεονεκτήματα της περίπτωσης διατομής με καμπύλα τοιχώματα είναι εμφανή, λόγω της μείωσης των περιοχών με αρνητικές κύριες τάσεις. Οι περιοχές αυτές, απαιτούν μελέτη υποστήριξης με ακύρια τα οποία θα συγκρατήσουν το βάρος της μάζας βράχου που αντιπροσωπεύουν οι περιοχές αυτές.

## 9. Συμπεράσματα

Τα υπόγεια ανοίγματα σε έργα πολιτικού μηχανικού, όπως είναι οι σήραγγες για σιδηροδρόμους και αυτοκινητοδρόμους, ανοίγματα για αποθήκευση υλικών, στέγαση χώρων στάθμευσης και υπογείων υδροηλεκτρικών σταθμών, απαιτούν την κατάλληλη μέθοδο διάνοιξης, ασφαλή μέτρα υποστήριξης και όργανα παρακολούθησης, τα οποία προσδιορίζονται και εφαρμόζονται στα στάδια μελέτης και κατασκευής.

## Βιβλιογραφία

- Barton, N., Lien, R. and J. Lunde, 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, Springer Verlag, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- Barton, N., Lien, R. and J. Lunde, 1975, Estimation of support requirements for underground excavation, 16th Symposium on Rock

- Mechanics, Design Methods in Rock Mechanics, ASCE, pp. 163-177.
- Bieniawski, Z.T., 1979, Tunnel design by rock mass classification, Pennsylvania State University Press.
- Bieniawski, Z.T., 1984, Rock mechanics design in mining and tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hoek, E. and E. T. Brown, 1980, Underground excavation in rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, England.
- Itasca Consulting Group, Inc., 1987, FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Manual, Version 2.0, Minneapolis, Minnesota.
- Itasca Consulting Group, Inc., 1989, UDEC: Universal Distinct Element Code, User's Manual, Version 2.0, Minneapolis, Minnesota.
- Johansson E., R. Riekkola and L. J. Lorig, 1988, Design Analysis of multiple parallel caverns using explicit finite differences methods, in Key Questions in Rock Mechanics, Ed. A. A. Balkema, pp. 325-334.
- Lorig, L. J. and E. Johansson, 1990, Use of Numerical Models in Design and Excavation Monitoring of Multiple Parallel Caverns, Sanio and Riekkola Consulting Engineers, Helsinki, Finland, in Int. Symposium on Unique Underground Structures, Colorado School of Mines, Denver, Colorado, USA, p. 11.1-19.
- Marangos, Ch., 1990, Design Criteria for Underground Structure Supporting on Jointed Rock, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, in Int. Symposium on Unique Underground Structures, Colorado School of Mines, Denver, Colorado, USA, p. 4.1-18.
- O'Rourke, T. D., Ed. 1984, Guidelines for tunnel lining design, ASCE, pp. 1-82.
- Parker, H. W., Deere, D. U., Peck, R. B., Birkmoe, P. C. and R. M. Sample, 1973, Testing and evaluation of prototype tunnel support systems, Illinois Univ. Report FRA-ORDD 74-11, NTIS Technical Report PB 231 912.

- Paul, S.L., Hendron, A. J., Cording, E. J., Sgouris, G. E. and P.K. Saba, 1983, Design recommendations for concrete tunnel linings, Vol. II: Summary of Research and Proposed Recommendations, US Department of transportation, Report No. UMTA-MA-060100-83-3.
- Peck, R. B., Hendron Jr. A. J. and B. Mohraz, 1972, State of the art of soft ground tunneling, in Rapid Excavation and tunneling Conference, Chicago Illinois, Vol. I, pp. 259-286.
- Ranken, R. E., Ghaboussi, J. and A. J. Hendron Jr., 1978, Analysis of ground liner interaction for tunnels, Report No. UMTA-IL-06-0043-78-3, US Department of Transportation, p. 441.
- Sauer, G., 1990, Design Concept for Large Underground Openings in Soft Ground Using the NATM, Salzburg, Austria, in Int. Symposium on Unique Underground Structures, Colorado School of Mines, Denver, Colorado, USA, p. 1.1-20.
- Slakey, D. M. and L. W. Abramson, 1990, Highway Tunnel Linings, PBQD, Inc., San Francisco, CA, in Int. Symposium on Unique Underground Structures, Colorado School of Mines, Denver, Colorado, USA, p. 22.1-20.
- Stacey, T. R. and C. H. Page, 1986, Practical handbook for underground rock mechanics, Trans Tech. Publications.
- Stagg, K. G. and O. C. Zienkiewicz, 1978, Rock mechanics in engineering practice, John Wiley and Sons, New York, 442.
- Underground Technology Research Council, 1989, Avoiding and resolving disputes in underground construction, ASCE Committee on Contracting Practices, 66p.
- Wittke, W., 1984, Felsmechanik, Grundlagen fur wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer Verlag.
- Zienkiewicz, O. C., S. Valliapan and I. P. King, 1968, Stress analysis of rock as a no tension material, Geotechnique, Vol. 18, No. 56.

