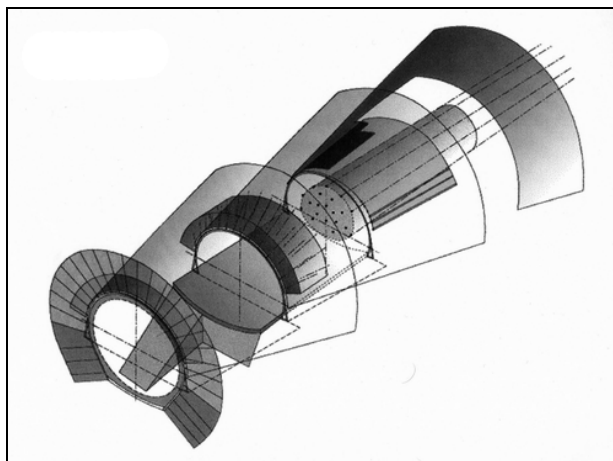


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΘΕΜΑ:

**ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ
ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΖΟΥΛΟΥΜΗ ΕΛΠΙΔΑ
Α.Ε.Μ. 4419

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

Περίληψη

Οι σήραγγες είναι υπόγεια έργα με μεγάλη διαμήκης διάσταση συγκριτικά με την διατομή τους. Οι σήραγγες εφαρμόζονται κυρίως σε συγκοινωνιακά έργα (ως οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες) καθώς και ως τμήματα υδραγωγείου σε υδραυλικά έργα. Ως έργα είναι ιδιαίτερα απαιτητικά τόσο στην φάση του σχεδιασμού τους, της κατασκευής τους και της λειτουργίας - συντήρησής τους, επιπλέον έχουν το μεγαλύτερο κόστος ανά μήκος συγκρινόμενα με άλλα συγκοινωνιακά ή υδραυλικά έργα. Ωστόσο δίνουν λύση όταν ο χώρος είναι περιορισμένος ή όταν οι γεωμορφολογικές συνθήκες είναι δύσκολες.

Η διάνοιξη σηράγγων απαιτεί πολύ καλή γνώση της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας της περιοχής καθώς και των γεωτεχνικών παραμέτρων των εδαφικών και βραχωδών υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται με τεχνικογεωλογικές μελέτες όπου λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το έργο.

Η υλοποίηση του έργου γίνεται δυσκολότερη όταν συναντάται καρστικό περιβάλλον. Τα ευκοδιάλυτα ανθρακικά πετρώματα, η παρουσία κενών και εγκοίλων σ'αυτά καθώς και το καρστικό υπόγειο νερό αυξάνουν την επικινδυνότητα και αστοχία του έργου.

Είναι σημαντική λοιπόν η εργασία του γεωλόγου να αναγνωρίσει, να αναλύσει και να μελετήσει τις συνθήκες γύρω από έργο ώστε να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν αναλόγως πιθανές αστοχίες σε συνεργασία πάντα με τους υπόλοιπους επιστήμονες που συμμετέχουν στο έργο.

Abstract

The tunnels are underground constructions of significant longitudinal dimension compared to their cross section. The tunnels are mainly used in transportation projects (as road or rail tunnels) as well as parts of an aqueduct to water power projects. As construction projects, they are very demanding in all phases meaning the design phase, the construction and the operation – maintenance. In addition their cost is much higher than any other project. Nevertheless, they offer an radical solution when space is limited or when the geological conditions are difficult.

The tunneling in karstigeni rocks needs special attention since the karst system is sensitive to many environmental factors can cause serious geological risks. These risks include sudden collapses of the surface, leakages around dams, lagoons' collapses resulting in leakage of waste.

The tunneling requires very good knowledge of geology and hydrogeology of the area and the geotechnical parameters of soil and rock materials. This is achieved by engineering geology studies that take into account all the factors which affect the project.

The project becomes more difficult when encountered karst environment. The carbonate rocks that are easily dissolved, the presence of voids and cavities and the karst ground water, increase the risk of project failure.

So it crucial that the geologist recognizes, analyzes and studies the circumstances surrounding the project in order to anticipate and address potential failures accordingly, always in collaboration with other scientists involved in the project.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	3
Εισαγωγή	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	10
1. ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ.....	10
1.1. Εισαγωγή	10
1.2. Τα ιζηματογενή πετρώματα	10
1.3. Τα χαρακτηριστικά των ιζηματογενών πετρωμάτων.....	12
1.4. Κατάταξη των ιζηματογενών πετρωμάτων.....	12
1.5. Κλαστικά ή μηχανικά ιζήματα.....	13
1.6. Χημικά ιζήματα	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	23
2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	23
2.1. Εισαγωγή	23
2.2. Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών	24
2.3. Το υπόγειο νερό	26
2.4. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού	27
2.5. Είδη υπόγειου νερού-Υπόγειοι υδροφορείς.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	33
3. ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ	33
3.1. Εισαγωγή	33
3.2. Καρστική Διάβρωση.....	34
3.3. Καρστικές μορφές.....	35
3.4. Καρστικό Υδροφόρο Σύστημα	36
3.5. Διαδικασία καρστικού σχηματισμού	36
3.6. Καρστικοί υδροφορείς.....	39
3.7. Καρστικό νερό – υπόγειο νερό	39

3.8. Χαρακτηριστικά στοιχεία καρστικών περιοχών	41
3.9. Καρστικά σπήλαια - έγκοιλα, καταβόθρες	43
3.10. Πλημμύρες σε καρστιγενείς περιοχές	45
3.11. Η αστάθεια των καρστικών περιοχών	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	48
4. ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	48
ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ	48
4.1. Εισαγωγή	48
4.2. Οι αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής μίας σήραγγας	48
4.3. Τρόποι σχεδιασμού σηράγγων	49
4.4. Γενικά στοιχεία σχεδιασμού και γεωμετρίας οδικών σηράγγων	51
4.5. Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των σηράγγων	53
4.5.1. Τα συνήθη γεωτεχνικά προβλήματα των σηράγγων	54
4.6. Σχέση παραμορφώσεων με αντοχή της βραχώμαζας	55
4.7. Διάρκεια ζωής σχεδιασμού	57
4.8. Η κλίση των σηράγγων	57
4.9. Τυπική Διατομή	58
4.10. Μηχανήματα Εκσκαφής	60
4.11. Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover)	61
4.11.1. Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη	61
4.12. Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης	62
4.12.1. Συμβατικός τρόπος	62
4.12.2. Κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)	63
4.13. Σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης με τη θεώρηση των πλαστικών ζωνών ..	64
4.13.1. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM	66
4.13.2. Φάσεις εκσκαφής	67
4.14. Μέτρα άμεσης υποστήριξης	67
4.14.1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)	67
4.14.2. Αγκύρια βράχου	68
4.14.3. Χαλύβδινες νευρώσεις	69
4.15. Αστοχία σηράγγων	71
4.16. Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας	74
4.17. Μετρήσεις των μετακινήσεων	77

4.17.1 .Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας	77
4.17.2. Μετακινήσεις της βραχώμαζας	78
4.17.3. Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους	79
4.18. Μετρήσεις των πιέσεων	79
4.19. Μετρήσεις δυνάμεων	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο	81
5. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	81
5.1. Εισαγωγή	81
5.2. Ταξινόμηση βραχώμαζας	82
5.3. Μηχανική αντοχή του πετρώματος	83
5.4. Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)	84
5.5. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους	86
5.6. Επιρροή του υπόγειου νερού	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο	91
6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	91
6.1. Εισαγωγή	91
6.2. Οι κύριες φάσεις για το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας σήραγγας	91
Μετρήσεις των εδαφικών πιέσεων	94
Μετρήσεις δυνάμεων (Φορτία εφελκόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) (<i>users.ntua.gr</i>)).	94
6.3. Μελέτη τεχνικογεωλογικών και γεωτεκτονικών συνθηκών	95
6.4. Μελέτη καρστιγενούς περιοχής	96
6.5. Ο σχεδιασμός σηράγγων	98
6.6. Ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο	102
7. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΓΕΝΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	102
7.1. Σήραγγα Αρτεμησίου	102
7.2. Σήραγγες Νεοχωρίου και Στέρνας	104
7.3. Περίπτωση Μελέτης Σηράγγων στη Σλοβενία	109
7.3.1. <i>Kastelec Tunnel</i>	110
7.3.2. Σήραγγες σε καρστ και φλύσχη στη Σλοβενία	111

<i>7.3.3. Η σήραγγα ΔΕΚΑΝΙ</i>	111
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τον τρόπο κατασκευής σηραγγών σε καρστικά περιβάλλοντα. Λόγω της ιδιάζουσας περίπτωσης των ανθρακικών πετρωμάτων, τονίζεται η ανάγκη να αναλυθούν εκτενώς όλες οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και επηρεάζουν το έργο και να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης. Η Ελλάδα είναι μία περιοχή στην οποία αφθονούν τα ανθρακικά πετρώματα και οι συγκεκριμένες γνώσεις είναι απαραίτητες για τους επιστήμονες γεωλόγους που αναλαμβάνουν έργα διάνοιξης σηραγγών.

Οι σήραγγες αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά τεχνικά έργα λόγω του ότι συνδέουν δυσπρόσιτες περιοχές και εξυπηρετούν κυρίως συγκοινωνιακές ανάγκες και δευτερευόντως άλλες χρήσεις (π.χ. μεταφορά νερού, πετρελαίου κλπ.). Αποτελούν δύσκολα έργα λόγω της ετερογένειας και μη προβλεψιμότητας των ιδιοτήτων του εδάφους, του μεγάλου βάρους που καλούνται να συγκρατήσουν και του υψηλού κόστους που οφείλεται κυρίως στον εξειδικευμένο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη διάνοιξη.

Η διάνοιξη της σήραγγας είναι το κρισιμότερο στάδιο στην κατασκευή της. Ανάλογα με την μεθοδολογία κατασκευής μπορεί να γίνεται ανεξάρτητα ή ταυτόχρονα με την τελική επένδυση της σήραγγας. Κατά την διάνοιξη προκαλείται αποτόνωση των τάσεων στον περιβάλλοντα βράχο με αποτέλεσμα την εκδήλωση παραμορφώσεων (Μπαντής, 2004-2005).. Σε κάθε περίπτωση οι παραμορφώσεις πρέπει να είναι ελεγχόμενες ώστε να διατηρείται η επιθυμητή διατομή και να αποτρέπεται η αστοχία μέχρι και την πλήρη κατάρρευση (μέσω σύνθλιψης των τοιχωμάτων ή αστοχίας του μετώπου). Οι τεχνικές διάνοιξης μπορούν να χωριστούν καταρχήν σε Συμβατικές και σε πλήρως Μηχανοποιημένες μεθόδους. Κατά την διάνοιξη και ανάλογα με την μεθοδολογία εκσκαφής είτε τοποθετείται άμεσα η τελική επένδυση είτε κάποια προσωρινά μέτρα υποστήριξης τα οποία διατηρούν την διατομή μέχρι την τελική επένδυση(Μαρίνος, 1997).

Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1980 - αρχές '90, η βασικότερη εμπειρία σηράγγων σε οδικά έργα ήταν η μελέτη και κατασκευή των Σηράγγων Αρτεμισίου στην Τρίπολη και του Μετσόβου στην Ήπειρο.

Μετά το 1993 και μέχρι σήμερα, η εξέλιξη στην μελέτη και κατασκευή τους έχει πολλαπλασιασθεί και αυξάνει συνέχεια. Συνέπεια τούτου είναι η συνεχώς ανανεούμενη γνώση στον τομέα της επιστημονικής ανάλυσης και τον σχεδιασμό των

σηράγγων, με τον εμπλουτισμό από τα συμπεράσματα και τις εμπειρίες από τα διεθνή συνέδρια και ημερίδες, και τις αναμορφούμενες κανονιστικές διατάξεις (Μαρίνος, 1993).

Οι καρστικές περιοχές οι οποίες ονομάζονται έτσι από τον γεωμορφολογικό όρο καρστ που περιγράφει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που δημιουργούνται στα ανθρακικά πετρώματα εξαιτίας της διαλυτικής δράσης του νερού χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή καθώς χαρακτηρίζονται από την έλλειψη των επιφανειακών υδάτων. Το ιδιαίτερο πρόβλημα των καρστικών εδαφών είναι η έλλειψη ορθολογικών κανονισμών που αφορούν την παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων και οι καρστιγενείς περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Αυτό οφείλεται στην ευκολία της ροής του νερού και στο ότι το φυσικό φιλτράρισμα είναι σχεδόν ανύπαρκτο(Μαραγκός, 1997).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας είναι η συλλογή στοιχείων από δευτερεύουσες πηγές όπως βιβλιογραφία και έγκυρων άρθρων περιοδικών και του διαδικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. ΤΑ ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

1.1. Εισαγωγή

Τα ανθρακικά πετρώματα αποτελούν το 25% του συνόλου των ιζηματογενών πετρωμάτων στην επιφάνεια της γης και η ηλικία τους φτάνει μέχρι 2,7 δισεκατομμύρια χρόνια. Σ' αυτά περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι, τα μάρμαρα και οι δολομίτες που αποτελούν σπουδαίο κεφάλαιο του ορυκτού πλούτου της Ελλάδας, αφού έχουν πολλές εφαρμογές και χρήσεις. Τα μάρμαρα συνήθως αποτελούνται από λεπτόκοκκο μέχρι χονδρόκοκκο ανακρυσταλλωμένο ασβεστίτη ή/και δολομίτη. Είναι πετρώματα που μπορούν να κοπούν, να λειανθούν, να στιλβωθούν και να δώσουν πλάκες για επίστρωση και επένδυση

1.2. Τα ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι μια από τις τρεις βασικές κατηγορίες ταξινόμησης των πετρωμάτων, ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους.

Στη μεγάλη αυτή κατηγορία περιλαμβάνονται πετρώματα που σχηματίστηκαν από την αποσάθρωση άλλων πετρωμάτων, εκρηξιγενών ή μεταμορφωμένων, τα οποία προϋπήρχαν σε άλλες περιοχές. Τα προϊόντα της αποσάθρωσης (εύθρυπτα ή ευδιάλυτα υλικά) απομακρύνθηκαν από την αρχική τους θέση, κυρίως με το νερό της βροχής και μεταφέρθηκαν σε κατάλληλους για ιζηματογένεση χώρους (γεωσύγκλινα), όπου αποτέθηκαν και άρχισαν έτσι να δημιουργούνται τα πετρώματα αυτής της κατηγορίας.

Πολύ συνοπτικά το φαινόμενο της ιζηματογένεσης, δηλαδή της απόθεσης υλικού σε κατάλληλο χώρο, περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους φάσεις:

- Αποσάθρωση του μητρικού πετρώματος με την επίδραση διαφόρων παραγόντων (νερό, θερμοκρασιακές μεταβολές, άνεμος κ.ά.).
- Μεταφορά των προϊόντων της αποσάθρωσης με φυσικούς τρόπους σε άλλο χώρο.
- Απόθεση των προϊόντων της αποσάθρωσης στη νέα τους θέση.
- Διαγένεση.

Για κάθε μια από τις παραπάνω φάσεις σημειώνονται τα εξής:

- Η αποσάθρωση, δηλαδή η καταστροφή ενός πετρώματος λόγω συγκεκριμένων φυσικοχημικών διεργασιών, μπορεί να διακριθεί σε:

- Φυσική ή μηχανική αποσάθρωση, που οφείλεται σε θερμοκρασιακές μεταβολές και στη δράση του νερού ή του ανέμου. Εκδηλώνεται με την καταστροφή του ιστού του πετρώματος και τον καταθρυμματισμό του, χωρίς, όμως να υπάρχει και μεταβολή της χημικής σύστασης των ορυκτολογικών του συστατικών. Πιο συγκεκριμένα, όπου υπάρχει μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας παρατηρείται διαδοχική μεταβολή του όγκου των δομικών μονάδων του πετρώματος που προκαλεί στην αρχή χαλάρωση της συνοχής του και στη συνέχεια τον κατακερματισμό του. Το νερό, εξάλλου, σε υγρή ή στερεά μορφή, είτε όταν κινείται πάνω σε ένα πέτρωμα, είτε όταν διεισδύει στους πόρους ή στις κοιλότητες του, έχει διαβρωτική δράση. Επίσης και ο άνεμος όταν κινείται με ορμή και συμπαρασύρει κόκκους άμμου μπορεί να προκαλέσει διάβρωση ενός πετρώματος, η οποία στην προκειμένη περίπτωση λέγεται αιολική διάβρωση.

- Χημική αποσάθρωση, που οφείλεται σε σειρά χημικών διεργασιών στη μάζα του μητρικού πετρώματος που οδηγούν στο σχηματισμό νέων ορυκτολογικών συστατικών με διαφορετική χημική σύσταση.

- Οργανική αποσάθρωση, που οφείλεται στη δράση φυτικών και ζωικών οργανισμών που υπάρχουν πάνω ή μέσα στο πέτρωμα (φυτά, διάφοροι μικροοργανισμοί κ.ά.).

- Η μεταφορά των προϊόντων της αποσάθρωσης γίνεται κυρίως με το νερό της βροχής, αλλά και με τον άνεμο. Τα προϊόντα της αποσάθρωσης κατά τη μεταφορά τους με το νερό υφίστανται μια φυσική διαλογή με αποτέλεσμα τα μεγαλύτερα και βαρύτερα να μην απομακρύνονται πολύ από τον τόπο της αρχικής τους γένεσης, ενώ οι μικρότεροι κόκκοι μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις μέχρι τις εκβολές ποταμών και τους βυθούς λιμνών και θαλασσών. Στο νερό μεταφοράς, εξάλλου, υπάρχουν και διαλυμένα υλικά της αποσάθρωσης (π.χ. ανθρακικές, θεικές, χλωριούχες ενώσεις ασβεστίου, μαγνησίου, αλκαλίων κ.ά.). Οι ενώσεις αυτές καθιζάνουν σε περιοχές όπου η κινητική ενέργεια του νερού μηδενίζεται.

- Η απόθεση των μεταφερόμενων υλικών γίνεται σε οριζόντιες επάλληλες στρώσεις σε χώρους με κατάλληλο τοπογραφικό ανάγλυφο (γεωσύγκλινα) όπου μηδενίζεται η μεταφορική ενέργεια του νερού ή και του ανέμου (θαλάσσιες λεκάνες, λίμνες, πεδινές εκτάσεις). Με τις αποθέσεις αυτές άρχισε η δημιουργία των

ιζημάτων που με την πάροδο των γεωλογικών αιώνων έδωσαν τα ιζηματογενή πετρώματα.

- Η διαγένεση είναι το σύνολο των μεταβολών που υπέστη το αρχικό ίζημα στη διάρκεια των γεωλογικών αιώνων, λόγω διαφόρων παραγόντων (πίεση, υψηλές θερμοκρασίες, χημικές δράσεις κ.λπ.) με αποτέλεσμα, τελικά, να μεταβληθεί σε συμπαγές πέτρωμα. Κατά τη διαγένεση ο ιζηματογενής γεωλογικός σχηματισμός έγινε συμπαγής είτε λόγω της μεγάλης πίεσης που εξασκούσαν τα υπερκείμενα στρώματα στα υποκείμενα, είτε λόγω της συγκόλλησης των υλικών μεταξύ τους με φυσικές συγκολλητικές ουσίες (π.χ. όξινο ανθρακικό ασβέστιο, διοξείδιο πυριτίου, άργιλος), είτε, τέλος, με μεταλλαγές των ορυκτολογικών δομικών μονάδων του αρχικού ιζήματος.

1.3. Τα χαρακτηριστικά των ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα ιζηματογενή πετρώματα, λόγω του τρόπου σχηματισμού των, έχουν κατά κανόνα στρωσιγενή όψη και περικλείουν απολιθώματα, δηλαδή σκελετικά στοιχεία ή κελύφη οργανισμών που έζησαν και πέθαναν στην περιοχή της ιζηματογένεσης. Τα απολιθώματα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ευδιάκριτα, ωστόσο τις περισσότερες φορές είναι κατακερματισμένα λόγω της διαγένεσης και δεν μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν. Από τα απολιθώματα οι ειδικοί επιστήμονες μπορούν να προσδιορίσουν τη γεωλογική ηλικία των ιζηματογενών πετρωμάτων. Τα ιζηματογενή πετρώματα, επίσης, χαρακτηρίζονται από την παρουσία ορισμένων ορυκτών, όπως είναι για παράδειγμα τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου.

1.4. Κατάταξη των ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα ιζηματογενή πετρώματα ανάλογα με τις συνθήκες γένεσής τους μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- κλαστικά ή μηχανικά ιζήματα
- χημικά ιζήματα
- βιογενή ιζήματα
- ηφαίστεια ιζήματα

Η παραπάνω διάκριση σε πάρα πολλές περιπτώσεις δεν είναι εύκολη κι αυτό γιατί τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν σχηματιστεί με σύνθετο τρόπο (π.χ. παράλληλη χημική και οργανική ιζηματογένεση).

Για τις παραπάνω κατηγορίες ιζηματογενών πετρωμάτων, πολύ συνοπτικά, σημειώνονται τα εξής:

1.5. Κλαστικά ή μηχανικά ιζήματα

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται πετρώματα που συνίστανται από δομικές μονάδες (λίθους ή λεπτούς κόκκους), που μεταφέρθηκαν στο χώρο ιζηματογένεσης και με τη διαγένεση μεταβλήθηκαν σε συμπαγή πετρώματα.

Τέτοια πετρώματα είναι:

- Διάφορα κροκαλοπαγή ή λατυποπαγή, δηλαδή πετρώματα που αποτελούνται από στρογγυλεμένους ή γωνιώδεις λίθους, αντίστοιχα, μεγέθους 5 έως 25 εκατ. περίπου, συγκολλημένους μεταξύ τους με φυσική ορυκτή κόλλα (ασβεστολιθικό ή πυριτικό συγκολλητικό υλικό, προϊόν της διαγένεσης).

- Οι ψαμμίτες που σχηματίστηκαν από τη διαγένεση στρωμάτων άμμου (πυριτικής ή ασβεστολιθικής), οι κόκκοι της οποίας έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους με φυσική ορυκτή κόλλα. Στους ψαμμίτες η κοκκομετρία της άμμου μπορεί να ποικίλλει από 1/16 έως 2 χλστ., ενώ η φυσική συγκολλητική ύλη μπορεί να είναι πυριτική (στις περισσότερες περιπτώσεις), ανθρακικό ασβέστιο ή άργιλος. Οι ψαμμίτες όταν στη μάζα τους επικρατούν κρύσταλλοι μικρού μεγέθους ή άμορφο υλικό (περισσότερο από 15%) ονομάζονται γραουβάκες, ενώ οι ψαμμίτες που προέρχονται από αστριούχες άμμους ονομάζονται α ρ κ ό ζ ε ς. Αρκόζες επίσης ονομάζονται τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε κόκκους αστρίων και περιεκτικότητα σε χαλαζία μικρότερη του 75% (Τρώντσιος, 1991).

- Η σχιστή άργιλος, πέτρωμα σχετικά συμπαγές που προέρχεται από την πρώτη φάση διαγένεσης αργιλικών ιζημάτων (τα τεμαχίδια ενός αργιλικού ιζήματος έχουν μέγεθος μικρότερο του 1/256 χλστ.). Η φυσική συγκολλητική ύλη στη σχιστή άργιλο είναι η άργιλος. Από τη σχιστή άργιλο, μετά από μια δεύτερη φάση διαγένεσης προήλθε ο αργιλικός σχιστόλιθος, πέτρωμα με χρώμα πρασινωπό ή μαύρο που σχίζεται εύκολα σε λεπτές πλάκες παράλληλα προς τη στρώση του.

Στα κλαστικά ιζηματογενή κατατάσσονται επίσης οι φλύσχεις, καθώς και ορισμένα άλλα πετρώματα που, όμως, δε χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των διακοσμητικών πετρωμάτων.

1. Μηχανικά ή κλαστικά

Ταξινόμηση κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων

Είδος υλικού		WENTWORTH σε mm	Αντιστοιχία σε πετρώματα	
			Χαλαρά	Συμπαγή
Ογκόλιθοι, μικροί ογκόλιθοι		>500, 500-200	Σωρός Ογκολίθων	Ογκολιθοπαγή
Χάλικες	Μεγάλοι χάλικες	200-20	Αποθέσεις από κροκάλες, λατύπες, και πλευρικά κορίμματα	Κροκαλοπαγή και λατυποπαγή
	Μικροί χάλικες	20-2		
Άμμος	Πολύ χονδρή άμμος	2 - 1	Αποθέσεις από χοντρή μέτρια ή λεπτή άμμο	Ψομίτες
	Χονδρή άμμος	1 - 0,5		
	Μεσαία άμμος	0,5 - 0,25		
	Λεπτή άμμος	0,25 - 0,125		
	Πολύ λεπτή άμμος	0,125 - 0,0625		
ΐλος	Χονδρή ίλος	0,0625 - 0,031	Αποθέσεις ίλων	ΐσολιθοί
	Μέση ίλος	0,031 - 0,0156		
	Λεπτή ίλος	0,0156 - 0,0078		
	Πολύ λεπτή ίλος	0,0078 - 0,0039		
Αργίλος		< 0,0039	Αποθέσεις αργίλων ή μαργών	Σχιστές άργιλοι, σχιστές μαργες
Πηλός		~1-0,0039	Αποθέσεις πηλών	Σπορός πηλός

1.6. Χημικά ιζήματα

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται πετρώματα που σχηματίστηκαν με χημικές διεργασίες οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την απόθεση ανθρακικών αλάτων, κυρίως ασβεστίου και μαγνησίου που υπήρχαν διαλυμένα στο νερό. Τέτοια πετρώματα είναι κυρίως οι τραβερτίνες και ορισμένοι ασβεστόλιθοι, ενώ στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται και οι γνωστοί σταλακτίτες και σταλαγμίτες κ.ά.

Τραβερτίνες

Τα ιζήματα τραβερτίνη σχηματίστηκαν σε περιοχές με γλυκά νερά, δηλαδή σε νερά αβαθών λιμνών, πηγών, θερμών πηγών ή παρόχθιων ζωνών ποταμών ή χειμάρρων. Στις περιοχές αυτές, τα υδροχαρή φυτά, που βρίσκονταν μέσα στο νερό, καθώς και οι σωροί φυτικών λειψάνων (κλαδιά, φύλλα κ.λπ.) διαβρέχονταν συνέχεια από τα νερά με αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου, να περιασβεστούνται, δηλαδή να αποτίθεται επάνω τους ανθρακικό ασβέστιο.

Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου στα φυτά γινόταν λόγω της γρήγορης μετατροπής του μεταφερόμενου από το νερό ευδιάλυτου όξινου ανθρακικού ασβεστίου $[Ca(HCO_3)_2]$ σε αδιάλυτο ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$), εξαιτίας είτε της αύξησης της πυκνότητας του διαλύματος σε όξινο ανθρακικό ασβέστιο με την εξάτμιση του νερού, είτε της παρουσίας μέσα στο νερό ανθρακικού

αμμωνίου $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ από τη σήψη των φυτικών οργανισμών. Στη συνέχεια, με την καταστροφή των περιασβεστωμένων φυτικών ιστών σχηματίζονταν οι αποθέσεις τραβερτίνη που μπορεί να καταλαμβάνουν πολύ μεγάλες εκτάσεις. Οι τραβερτίνες, συνήθως, έχουν χρώμα κιτρινωπό, μερικές φορές όμως και ερυθρωπό λόγω της παρουσίας υδροξειδίων του σιδήρου. Η μάζα του πετρώματος παρουσιάζει μια χαρακτηριστική κυψελώδη δομή που περιλαμβάνει κενά σε μορφή σωληνίσκων, μεγάλων πόρων κ.λπ. Η ηλικία αυτών των πετρωμάτων είναι συνήθως πλειοκαινική ή και νεότερη (Kuniansky, 2001).

Ασβεστόλιθοι χημικής προέλευσης

Οι ασβεστόλιθοι χημικής προέλευσης σχηματίστηκαν όπως και οι τραβερτίνες, δηλαδή σε γλυκά νερά πλούσια σε όξινο ανθρακικό ασβέστιο όπου έγινε καθίζηση αυτού με μορφή ουδέτερου ανθρακικού άλατος και σχηματίστηκαν στρώματα εύθρυπτα και πορώδη (το ανθρακικό ασβέστιο στη μορφή του ορυκτού αραγωνίτη). Με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση των παραγόντων της διαγένεσης ο αραγωνίτης μετετράπη σε ασβεστίτη (σταθερότερη μορφή του ανθρακικού ασβεστίου).

Γενικά στους ασβεστολίθους χημικής προέλευσης ο μηχανισμός σχηματισμού τους ήταν ο εξής: τα νερά της βροχής τα οποία απέρρεαν στη θάλασσα περιείχαν διαλυμένο όξινο ανθρακικό ασβέστιο. Ένα μέρος του διαλυμένου στο νερό όξινου ανθρακικού ασβεστίου προσλαμβάνονταν από τους θαλάσσιους οργανισμούς για το σχηματισμό των κελυφών τους ή των σκελετικών τους στοιχείων, ενώ το υπόλοιπο παρέμενε διαλυμένο.

Μετατροπή του όξινου ανθρακικού ασβεστίου σε ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο

Η διαλυμένη ποσότητα όξινου ανθρακικού ασβεστίου στο νερό της θάλασσας εξαρτάτο από την περιεχόμενη σ' αυτή ποσότητα του CO_2 . Έτσι, καθώς ελαττώνονταν η περιεκτικότητα του νερού σε διοξείδιου του άνθρακα, ελαττώνονταν και η διαλυμένη ποσότητα του όξινου ανθρακικού ασβεστίου (αυξανόμενη της θερμοκρασίας του νερού ελαττώνεται η ποσότητα του διαλυμένου σ' αυτό διοξειδίου του άνθρακα). Με τον τρόπο αυτό το όξινο ανθρακικό ασβέστιο απελευθέρωνε διοξείδιο του άνθρακα και μετέπιπτε σε ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο ως

αδιάλυτο καθίζανε και έτσι δημιουργείται το χημικής προέλευσης ασβεστολιθικό ίζημα.

Επίσης, άλλη αιτία μετατροπής του όξινου ανθρακικού ασβεστίου σε ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο, ήταν η παρουσία στο νερό ανθρακικού αμμωνίου, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, το οποίο προήρχετο από τη σήψη μικροοργανισμών (το φαινόμενο αυτό παρατηρείτο κυρίως σε λίμνες). Στους ασβεστολίθους αυτής της κατηγορίας κατατάσσεται και ο όνυχας, όπως λέγεται εμπορικά το ονυχομάρμαρο (onyx marble), το ασβεστολιθικό, δηλαδή, συμπαγές πέτρωμα που παρουσιάζει ταινιώδη όψη λόγω των έγχρωμων και διαφανών στρώσεων ασβεστίτη ή/και αραγωνίτη και το οποίο μπορεί να στιλβωθεί.

Ένας τύπος ασβεστολίθων χημικής προέλευσης είναι και ο ωολιθικός ασβεστόλιθος. Οι ωολιθικοί ασβεστόλιθοι σχηματίστηκαν σε περιοχές θερμών πηγών όπου υπήρχαν αναβράζοντα νερά με μεγάλη περιεκτικότητα σε διαλυμένο όξινο ανθρακικό ασβέστιο. Εκεί οι κόκκοι της άμμου που βρίσκονταν στην έξοδο των νερών των πηγών, καθώς αναπηδούσαν στο αναβράζον νερό περιασβεστώνονταν συνεχώς σφαιροποιούμενοι μέχρις ότου το βάρος τους μεγάλωνε τόσο που τους ανάγκαζε να καθιζήσουν. Στη συνέχεια, με την επίδραση των παραγόντων της διαγένεσης, οι ωόλιθοι αυτοί συγκολλήθηκαν μεταξύ τους σχηματίζοντας ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Όταν το μέγεθος των κόκκων αυτών των σχηματισμών είναι πιο μεγάλο (μέγεθος πύσου) οι αντίστοιχοι ασβεστόλιθοι ονομάζονται πισολιθικοί.

Βιογενή ιζήματα

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται πετρώματα που σχηματίστηκαν από ζωικά ή φυτικά λείψανα, όπως για παράδειγμα οι ασβεστόλιθοι, οι δολομίτες, καθώς και οι ορυκτοί άνθρακες (τύρφη, λιγνίτης κ.ά.).

Βιογενείς ασβεστόλιθοι

Οι βιογενείς ασβεστόλιθοι σχηματίστηκαν από όστρακα ή κελύφη ή παντός είδους ασβεστιτικά σκελετικά στοιχεία που υπήρχαν μέσα σε θάλασσες και τα οποία παρασύρθηκαν από ρεύματα και συσσωρεύτηκαν εκλεκτικά, κατά περιοχές, σε παχύτατα στρώματα. Τα στρώματα αυτά με την πάροδο των γεωλογικών αιώνων σχημάτισαν με τη διαγένεση τα βιογενούς προέλευσης ασβεστολιθικά πετρώματα. Στους οργανογενείς ασβεστολίθους τα απολιθώματα, από τα οποία και

δημιουργήθηκαν, σπάνια διατηρήθηκαν σε καλή κατάσταση λόγω της έντονης διαγένεσής τους. Συνήθως, τα απολιθώματα είναι κατεστραμμένα και δυσδιάγνωστα και σ' αυτό έχει συντελέσει εκτός της διαγένεσης και η ορογενετική δράση στις περιοχές της ιζηματογένεσης.

Οι ασβεστόλιθοι βιογενούς προέλευσης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους απολιθώματα, έχουν και αντίστοιχες ονομασίες, όπως για παράδειγμα νουμμουλιτοφόροι, ρουδιστοφόροι, αμμωνιτοφόροι ασβεστόλιθοι στην περίπτωση που τα απολιθώματα είναι, αντίστοιχα, νουμμουλίτες, ρουδιστές, αμμωνίτες.

Δολομίτες

Οι δολομίτες είναι πετρώματα που αποτελούνται από το ορυκτό δολομίτης, το οποίο είναι διπλό ανθρακικό άλας του ασβεστίου και μαγνησίου ($\text{CaCO}_3\text{?MgCO}_3$), δηλαδή η χημική σύσταση ενός καθαρού δολομιτικού πετρώματος είναι: CaCO_3 54,35% – MgCO_3 45,65%.

Οι δολομίτες μοιάζουν με τους ασβεστόλιθους, αλλά έχουν χαρακτηριστική κυψελώδη σύσταση. Ένας εύκολος τρόπος διάκρισης των δολομιτών από τους ασβεστολίθους είναι η ασθενής αντίδραση που παρουσιάζουν στο αραιό υδροχλωρικό οξύ.

Οι δολομίτες σχηματίστηκαν σε θαλάσσιες λεκάνες, όπως και οι ασβεστόλιθοι, όπου αποτέθηκαν είτε εξ αρχής ως δολομίτες, είτε ως δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και μεταβλήθηκαν με την πάροδο του χρόνου σε δολομίτες (δολομιτίωση). Επομένως, οι σχηματισμοί των δολομιτών μπορεί να είναι είτε πρωτογενείς, είτε δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς σχηματισμοί έγιναν είτε με τη διαγένεση οστράκων ή σκελετικών στοιχείων πλούσιων σε ανθρακικό μαγνήσιο (σκελετοί κοραλλιών), είτε με χημική ιζηματογένεση όταν έλαβε χώρα καθίζηση και συγκρυστάλλωση σε δολομίτη του όξινου ανθρακικού μαγνησίου $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ και του όξινου ανθρακικού ασβεστίου $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ που ήταν διαλυμένα στο θαλασσινό νερό. Από τις ενώσεις αυτές, με την αποβολή διοξειδίου του άνθρακα που συμβαίνει όταν ανεβαίνει η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, καθιζάνει το διπλούν άλας $\text{MgCO}_3\text{?CaCO}_3$.

Κατά το δευτερογενή σχηματισμό των δολομιτών έλαβε χώρα εμπλουτισμός των ασβεστολιθικών πετρωμάτων με ανθρακικό μαγνήσιο. Ο εμπλουτισμός αυτός έγινε εκλεκτικά σε ειδικές περιοχές όπου κατέληγαν νερά πλούσια σε μαγνησιούχα

διαλύματα. Τέτοια φαινόμενα συνέβησαν κυρίως σε θάλασσες κοραλλιογενών νησιών στις οποίες επικρατούσε σχετική ηρεμία από ωκεάνια ρεύματα.

Μάργες

Οι μάργες είναι ασβεστολιθικά αργιλούχα ιζήματα, δηλαδή η σύστασή τους βρίσκεται μεταξύ εκείνης των ασβεστολίθων και των σχιστών αργίλων. Γενικά, όταν η περιεκτικότητα της αργίλου σε ανθρακικό ασβέστιο είναι μεγαλύτερη του 60% τότε το ιζήμα χαρακτηρίζεται ως μάργα. Σε μια τυπική μάργα η χημική σύσταση είναι συνήθως: ανθρακικό ασβέστιο 74%, άργιλος 22% και διάφορες προσμίξεις (χαλαζίας, μαρμαρυγίας, σιδηροπυρίτης κ.λπ.): 4%.

Μεταξύ των μαργών και των ασβεστολίθων, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ανθρακικά, μπορούν να διακριθούν πολλοί τύποι πετρωμάτων, με διαφοροποιημένη χημική σύσταση, όπως ασβεστόχος μάργα, μαργαϊκός ασβεστόλιθος, αργιλούχος μάργα, δολομιτική μάργα κ.ά.

Οι αποθέσεις των μαργών μπορεί να είναι είτε βιογενούς, είτε χημικής προέλευσης, όπως και στην περίπτωση των ασβεστόλιθων, ενώ η ιζηματογένεσή τους μπορεί να έλαβε χώρα σε αβαθείς ή βαθιές θάλασσες ή και λίμνες, οπότε οι μάργες μπορούν να διακριθούν αντίστοιχα σε μάργες αβαθών θαλασσών, μάργες βαθέων θαλασσών και λιμναίες μάργες.

Ετσι, το χρώμα των μαργών ποικίλλει ανάλογα με τις περιεχόμενες προσμίξεις και την περιοχή ιζηματογένεσης. Συνήθως οι λιμναίες μάργες και οι μάργες βαθέων θαλασσών είναι κυανές έως πρασινωπές – φαιές. Το πρασινωπό ή κυανό χρώμα τους οφείλεται συνήθως στην παρουσία του γλαυκονίτη (ένυδρο αργιλοπυριτικό άλας του σιδήρου και καλίου). Οι μάργες των αβαθών θαλασσών είναι κίτρινες. Οι μάργες πρόσφατης ηλικίας και κυρίως οι μάργες του νεογενούς χαρακτηρίζονται από την παρουσία απολιθωμάτων που διατηρούνται σε καλή κατάσταση.

Οι ασβεστόλιθοι

Οι ασβεστόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα που έχουν ως κύριο ορυκτολογικό τους συστατικό τον ασβέστιο (CaCO_3). Επομένως η χημική σύσταση ενός καθαρού ασβεστολιθικού πετρώματος είναι CaO 56%, CO_2 44%. Συνήθως, όμως, οι ασβεστόλιθοι περιέχουν διάφορες προσμίξεις ενώσεων οξειδίων και υδροξειδίων του αργιλίου, του σιδήρου κ.ά. η παρουσία των οποίων επηρεάζει και το χρωματισμό του πετρώματος.

Όταν οι ασβεστόλιθοι περιέχουν 5-15% MgO καλούνται μαγνησιούχοι ασβεστόλιθοι, ενώ όταν η περιεκτικότητά τους σε MgO είναι πάνω από 15% καλούνται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι.

Οι ασβεστόλιθοι με την επίδραση αραιού υδροχλωρικού οξέος αναβράζουν χαρακτηριστικά λόγω έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ($\text{CaCO}_2 + 2\text{HCl} > \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) και το γεγονός αυτό διευκολύνει στην ευχερή αναγνώρισή τους στην ύπαιθρο.

Οι ασβεστόλιθοι έχουν προέλθει είτε από βιογενή, είτε από χημικά ιζήματα, είτε από ιζήματα συνδυασμού βιογενούς και χημικής δράσης.

Τα ασβεστολιθικά πετρώματα, εκτός από τα απολιθώματα που τα χαρακτηρίζουν, έχουν και όψη που ποικίλλει ανάλογα με την περίοδο και το χώρο που έλαβε χώρα η ιζηματογένεση. Έτσι, οι ασβεστόλιθοι των διάφορων γεωλογικών περιόδων παρουσιάζουν μακροσκοπικές διαφορές, οι οποίες σε πρώτη αναγνώριση είναι καθοδηγητικά στοιχεία για τη στρωματογραφική τους διαίρεση. Καθώς, λοιπόν, η ιζηματογένεση των ασβεστολιθικών αποθέσεων έλαβε χώρα είτε σε αβαθή, είτε σε βαθιά γεωσύγκλινα, το χρώμα τους που ποικίλλει ανάλογα με τις προσμίξεις, σχετίζεται σε πολλές περιπτώσεις και με το χώρο της ιζηματογένεσης.

Γενικά, οι μαύροι ασβεστόλιθοι σχηματίστηκαν σε αβαθή νερά, κοντά σε παράκτιες ζώνες όπου παρασύρθηκαν διάφοροι χερσαίοι οργανισμοί.

Οι κόκκινοι και ροδόχροοι οφείλουν το χρώμα τους σε οξειδία του σιδήρου (αιματίτη). Τα οξειδία αυτά για να σχηματιστούν προϋποθέτουν έντονη οξείδωση που απαιτεί περίσσεια οξυγόνου, η οποία υπήρχε μόνο σε βαθιές θάλασσες και μάλιστα πολικές, γι' αυτό και οι ασβεστόλιθοι αυτοί υποστηρίζεται ότι σχηματίστηκαν σε βαθιές θάλασσες.

Οι γκριζοκύανοι ασβεστόλιθοι οφείλουν το χρώμα τους στην παρουσία διθειούχου σιδήρου σε λεπτότατο διαμερισμό, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ιζηματογένεσή τους έλαβε χώρα σε αβαθή νερά, αφού ο διθειούχος σίδηρος προέρχεται από την αποσύνθεση οργανικών ουσιών με την περαιτέρω οξείδωσή τους.

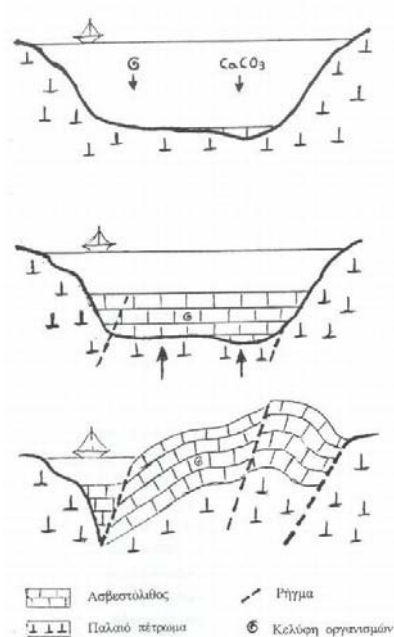
Το ειδικό βάρος των ασβεστολίθων είναι συνήθως 2,7, ενώ η αντοχή τους στη θλίψη κυμαίνεται από 900 – 1900 kgf/cm² ανάλογα με την περιεχόμενη ποσότητα αργίλου.

Ο ασβεστόλιθος είναι κυρίως θαλάσσιο ιζημα που δημιουργήθηκε σε παλαιότερες γεωλογικές εποχές από συνεχή, αργή και σταθερή καθίζηση κελυφών ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) διάφορων οργανισμών που ζούσαν την εποχή

εκείνη, κατά προτίμηση όχι σε μεγάλα βάθη. Εκτός από τα όστρακα, φύκη και άλλοι θαλάσσιοι οργανισμοί δημιούργησαν αυτό που αποκαλείται «βιόστρωμα». Άλλα κελύφη, αυτά των οργανισμών που αποτελούν το πλαγκτόν (τρηματοφόρα, ακτινόζωα, διάτομα, που ζούσαν σε ανοιχτές θάλασσες), κατακάθισαν και δημιούργησαν τους ονομαζόμενους «πελαγικούς ασβεστόλιθους». Αυτά τα ιζήματα εμπλουτίστηκαν και με ανθρακικό ασβέστιο που περιέχεται στα νερά των θαλασσών.

Όλα αυτά τα ιζήματα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και δημιουργούν στρώματα διαφορετικού πάχους, αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περιοχή. Πολλές φορές, παράλληλα με αυτά τα στρώματα, παρεμβάλλονται και άλλα διαφορετικής σύστασης. Ακριβώς κατά μήκος αυτών των στρωμάτων, που πολλές φορές διαβρώνονται πιο εύκολα, δημιουργούνται συνήθως οι κοιλάτιδες.

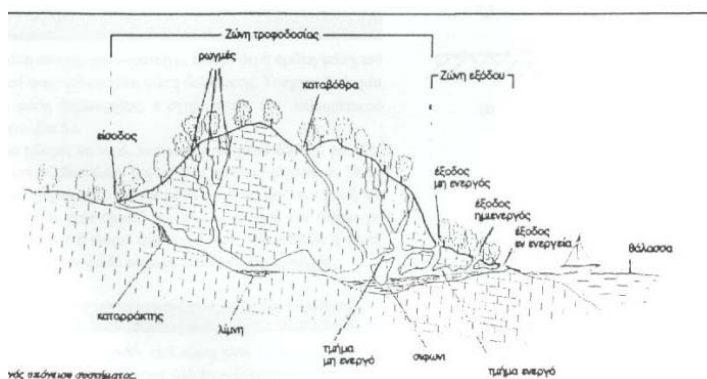
Εξαιτίας μιας σειράς φυσικοχημικών φαινομένων, γνωστών με το όνομα διαγένεση, αυτό το θαλάσσιο ιζήμα, σιγά σιγά στερεοποιείται και τελικά μετατρέπεται σε συμπαγή ασβεστόλιθο.



Σχήμα 1. Δημιουργία ασβεστόλιθων Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., (2006)

Από τη γεωλογία γνωρίζουμε ότι ορισμένα ρεύματα από το εσωτερικό της γης γίνονται η αιτία της μετακίνησης των διαφόρων «πλακών» στις οποίες είναι χωρισμένος ο στερεός φλοιός της γης (τεκτονισμός). Η κίνηση αυτή προκαλεί πολλές φορές και την ορογένεση (σχηματισμός των ορέων) έτσι ώστε οι ασβεστόλιθοι που κάποτε δημιουργήθηκαν στους πυθμένες των θαλασσών να σχηματίζουν ολόκληρα

βουνά και να αποτελούν πολύ μεγάλο ποσοστό της χέρσου. Το αρχικό ίζημα, το οποίο έχει πλέον σκληρυνθεί, δέχεται δυνάμεις μεγάλης ισχύος, με αποτέλεσμα να σπάει και να δημιουργεί ρωγμές. Υπάρχουν πολύ μεγάλες ρωγμές με κίνηση του ενός ή και των δυο μερών, οι οποίες ονομάζονται ρήγματα, αλλά και μικρορωγμές -που είναι η πλειοψηφία- και που με δυσκολία διακρίνονται με γυμνό μάτι. Από αυτές τις ρωγμές ξεκινούν και εξελίσσονται τα καρστικά φαινόμενα τα οποία τελικά δημιουργούν τα περισσότερα Κελύφη οργανισμών σπήλαια. Για να κατανοήσουμε το σπουδαίο ρόλο των ρωγμών, θα πρέπει να δούμε τη χημική σύσταση του ασβεστόλιθου.



Σχήμα 2: Σχήμα ενός υπογειου συστήματος Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., (2006)

Το πέτρωμα αυτό, που όπως αναφέραμε αποτελείται από ανθρακικό ασβέστιο, άλας, το οποίο είναι σχεδόν αδιάλυτο από το νερό, γίνεται πολύ διαλυτό εάν το νερό είναι «όξινο» και ειδικά όταν μέσα σε αυτό έχει διαλυθεί διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Το βρόχινο νερό εμπλουτίζεται με διοξείδιο του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και ειδικά με φυτικά κατάλοιπα που βρίσκονται στο έδαφος.

Η χημική αντίδραση του φαινομένου είναι: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Με αυτό τον τρόπο το νερό διαλύει το αδιάλυτο ανθρακικό ασβέστιο και περνώντας μέσα από τις ρωγμές που αναφέραμε τις ανοίγει περισσότερο, προχωρώντας όλο και πιο βαθιά.

Το ανθρακικό ασβέστιο όμως δεν το βρίσκουμε σχεδόν ποτέ καθαρό. Μέσα σ' αυτό υπάρχουν άλλες ουσίες, όπως οξείδια του σιδήρου κ.τ.λ., τα οποία είναι αδιάλυτα στο νερό και παρασύρονται από αυτό σε μορφή σκόνης, που όταν έρχεται σε επαφή με το πέτρωμα το διαβρώνει περισσότερο. Έτσι βλέπουμε από τη μία πλευρά τη χημική διάβρωση του ασβεστόλιθου από το νερό και από την άλλη τη

μηχανική διάβρωση, η οποία εξαρτάται και από την ταχύτητα ροής του νερού. Οι υπόγειες ρωγμές σιγά σιγά μετασχηματίζονται σε έγκοιλα ή σε στοές που διαπλατώνονται συνεχώς, επιτρέποντας τη διέλευση όλο και περισσότερης ποσότητας νερού, το οποίο μπορεί να μεταφέρει, εκτός από λεπτή ύλη, και άλλα υλικά, όπως άμμο, πέτρες διαφόρου μεγέθους κ.τ.λ, τα οποία ενδυναμώνουν τη μηχανική διάβρωση του σπηλαίου και δίνουν μορφές στο σπήλαιο, όπως κοιλώματα στο δάπεδο και θόλους στην οροφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

2.1. Εισαγωγή

Ο υδρολογικός κύκλος (hydrologic cycle) περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σε αυτή την αλυσίδα το νερό εμφανίζεται με όλες τις μορφές: υγρό, αέριο (υδρατμοί), στερεό (χιόνι, χαλάζι). Το σύνολο της ενέργειας που κατευθύνει τον κύκλο του νερού προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από τον ήλιο.

Το νερό στην ατμόσφαιρα βρίσκεται με τη μορφή υδρατμών και αφού υποστεί συμπύκνωση πέφτει στην επιφάνεια της γης σε υγρή (βροχή) ή στερεή μορφή (χαλάζι, χιόνι). Με τον όρο ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα περιλαμβάνονται όλες οι μορφές με τις οποίες το νερό φθάνει στη γη (βροχή, χιόνι, χαλάζι κ Απ.). Όλες οι μορφές κατακρημνισμάτων ανάγονται σε ισοδύναμο ύψος βροχής. Όσον αφορά τη χιονόπτωση, όταν δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία (πυκνότητα χιονιού), θεωρείται ότι 10 mm ύψος χιονιού ισοδυναμούν με 1 mm ύψος βροχής (αναλογία 10:1).

Η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύει τις ποσότητες του νερού, που επανέρχονται στην ατμόσφαιρα με τη συνδυασμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής.

Εξάτμιση είναι η διαδικασία μεταφοράς, με τη μορφή υδρατμών, του νερού από την επιφάνεια της γης στην ατμόσφαιρα με σύγχρονη κατανάλωση ηλιακής ενέργειας, απαραίτητης για την αλλαγή της φάσης του νερού από υγρή σε αέρια. Με τον όρο διαπνοή εννοούνται οι διαδικασίες εκείνες με τις οποίες το νερό μεταβαίνει από την υγρή στην αέρια φάση διαμέσου του σώματος των φυτών.

Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής γιατί συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους (αφού κάποια, ποσότητα δεσμευτεί ως νερό κατακράτησης) και φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες προστιθέμενο στα αποθέματα των υπόγειων νερών και μετέχει στις κινήσεις του υπόγειου νερού. Η ικανότητα κατείσδυσης (infiltration capacity)

εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, τη λιθολογία, την κλίση και τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, την ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων κ.λπ.

Μέτρο της κατεισδυσσης είναι ο συντελεστής κατεισδυσσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατεισδυσσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

2.2. Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών

Το πορώδες (Porosity)

Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_K) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος /εδάφους ($V_{ολ}$): $n=V_K/V_{ολ}$

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ολικού πορώδους από 0-60%.

Πίνακας 1. Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης, 1999)

Προσχώσεις	Πορώδες %	Ιζηματογενή (%) πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλύολιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημέν οι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένο ι γρανίτες	34-57
Ψύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity) αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την

επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια).

Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν *πρωτογενές* δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και σαν *δευτερογενές* δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. (Σχ. 17). Το *πρωτογενές* πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων.

Μετά από κοσκίνισμα με κόσκινα καθορισμένης σειράς ανοίγματος διακένων κατασκευάζονται οι αθροιστικές κόκκο μετρικές καμπύλες των χαλαρών γεωλογικών υλικών. Από τις καμπύλες αυτές υπολογίζονται χρήσιμα μεγέθη όπως: το ενεργό μέγεθος κόκκων, ο συντελεστής ομοιομορφίας, ο συντελεστής διαβάθμισης κ.ά.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται ανάλογα με τη δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους με την επίδραση της βαρύτητας σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους υδροπερατούς και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Υδροπερατοί σχηματισμοί

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας των και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Μικροδιαπερατά

Πρόκειται για χαλαρά υλικά (άμμοι, χάλικες, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

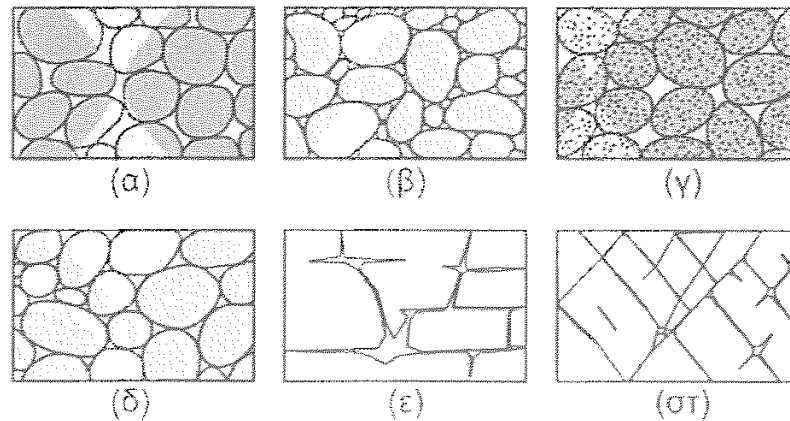
2. Μακροδιαπερατά

Πρόκειται για πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες.

Είναι σύνηθες οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί να είναι μικρό- και μακρό-διαπερατοί.

Αδιεπέρατοι σχηματισμοί

Είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δεν επιτρέπουν την κίνηση των νερών διαμέσου της μάζας των. υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης.



Σχήμα 3: Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με «ψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες από διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923).

2.3. Το υπόγειο νερό

Το υπόγειο νερό είναι αυτό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως κατάστασης, βάθους και προέλευσης. Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και αντιστοιχούν σε 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη. Η κυριότερη προέλευση τους είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (μετεωρικά νερά).

Μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο (νεαρό νερό, juvenile). Το συγγενετικό (connate) είναι νερό που δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μαγματικό και το μεταμορφωμένο νερό συνδέονται με την άνοδο του μάγματος και τις διαδικασίες της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων, αντίστοιχα.

Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά κινείται αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με τη διαπνοή των φυτών.

Ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος αποτελεί την ηλικία του νερού, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί με φυσικά ραδιοϊσότοπα, κυρίως το τρίτιο (H^3 και τον άνθρακα $14(C^{14})$).

2.4. Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Η παρουσία του υπόγειου νερού στο υπέδαφος μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες:

1. Ζώνη αερισμού (Zone of aeration)

Η ζώνη αυτή αποτελείται από διάκενα, που κατέχονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα (διφασική ροή). Υποδιαιρείται σε:

- Υποζώνη εδαφικού νερού μικρού πάχους, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση, όπου η υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες.

- Ενδιάμεση ζώνη όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδείς δυνάμεις και από την οποία το νερό πρέπει να περάσει κινούμενο προς τη ζώνη κορεσμού.

- Τριχοειδή υποζώνη με ύψος που μεταβάλλεται, αντιστρόφως ανάλογα, με το μέγεθος των διακένων (20-πλάσια στη λεπτόκοκκη άμμο από τους χάλικες). Η τριχοειδής ανύψωση (h_c) δίνεται από τη σχέση (Σχ. 1.5): $h_c = (2\tau/\epsilon R)\sin\phi$

όπου: τ = η επιφανειακή τάση, ϵ = το ειδικό βάρος του νερού, R = η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα και ϕ = η γωνία συνεπαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και το μηνίσκο.

Για καθαρό νερό στους $20^\circ C$, το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης είναι $h_c = 0,153/R$.

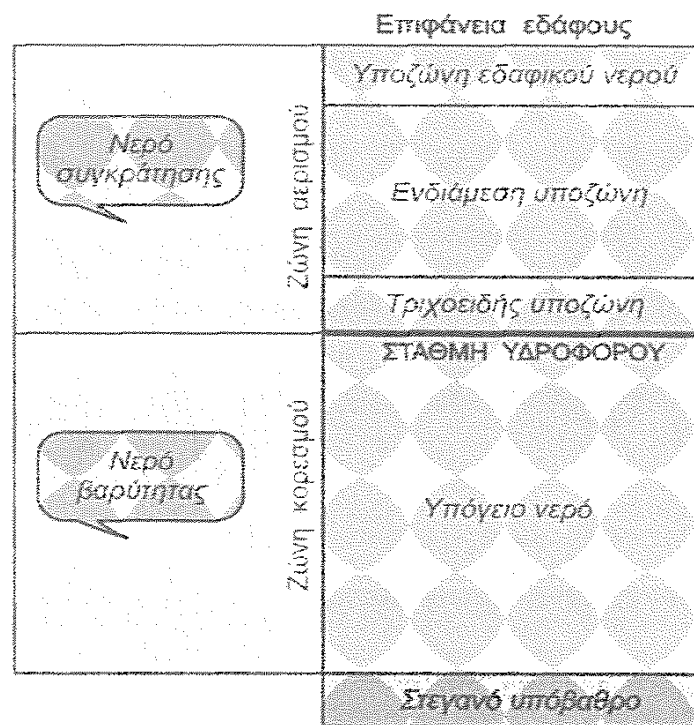
Στα αργιλώδη εδάφη το αναπτυσσόμενο δυναμικό από τριχοειδή φαινόμενα είναι μεγάλο, σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη στα οποία είναι ασήμαντο.

2. Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)

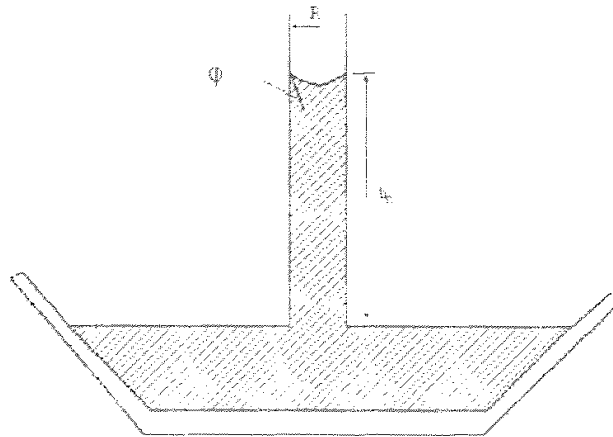
Όλα τα διάκενα της ζώνης αυτής είναι γεμάτα νερό κάτω από υδροστατική πίεση (μονοφασική ροή). Αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα και η επάνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι η ελεύθερη (φρεάτια) επιφάνεια. Η ζώνη αυτή μπορεί να μας τροφοδοτήσει με νερό και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία.

Το επιφανειακό νερό με την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης, των τριχοειδών δυνάμεων κ.λπ. διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διακένων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Η κατείδυση δηλ. αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού στη ζώνη αερισμού και η διήθηση στην κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη.



Σχήμα 4: Ζώνες του υπόγειου νερού Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., (2006)



Σχήμα 5: Τριχοειδής ανύψωση (Fetter, 1994)

3. Ακόρεστη ζώνη

Η *ακόρεστη ζώνη* (vadose or unsaturated) ή μερικά κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Με εξαίρεση τμημάτων των τριχοειδών κροσσών, οι πόροι περιέχουν νερό και αέρα.

Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ), που ορίζεται ως: $\theta = V_w / V_T$ όπου V_w είναι ο όγκος του νερού και V_T είναι ο όγκος του μέσου.

Αν οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι, ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες (n). Συνεπώς στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ $0 \leq \theta \leq n$.

Η ροή στην ακόρεστη ζώνη έχει ως κύρια συνιστώσα την κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση). Ο ρόλος της ακόρεστης ζώνης στην εξασθένηση της ρύπανσης και στην τρωτότητα των υπόγειων νερών είναι σημαντικός.

2.5. Είδη υπόγειου νερού-Υπόγειοι υδροφορείς

Γενικά το υπόγειο νερό που προέρχεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται σε:

- **Βαρυτικό νερό:** Είναι το νερό που υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Το νερό αυτό μπορεί να ληφθεί άμεσα ή έμμεσα.

- **Ειδική απόδοση S_y** (specific yield) ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του βαρυτικού νερού (V_w) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V): $S_y=V_w/V$

- Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το **ενεργό πορώδες**.

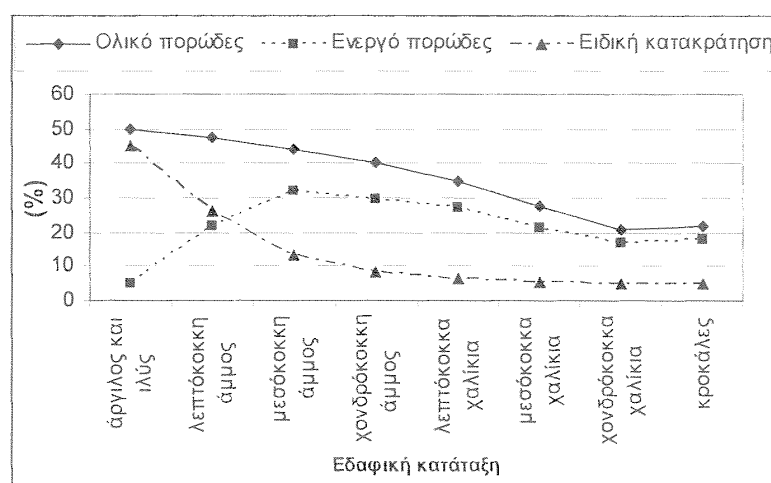
- **Νερό κατακράτησης:** Είναι το νερό που δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συνεπώς δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.

- **Ειδική κατακράτηση S_r** (specific retention) ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο λόγος του νερού κατακράτησης (V_r) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V): $S_r=V_r/V$

Στο Σχήμα 6 φαίνεται η μεταβολή του ολικού και ενεργού πορώδους, καθώς και της ειδικής κατακράτησης ανάλογα με την εδαφική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών.

Υδροφορείς ή υδροφόροι (aquifers) είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν αρκετό κορεσμένο με νερό υλικό, ώστε να τροφοδοτήσουν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις ή πηγές. Οι υδροφορείς έχουν αυξημένη ικανότητα να αποθηκεύουν και να μεταβιβάζουν νερό.

Το υδροφόρο στρώμα αποτελείται από το γεωλογικό σχηματισμό (σκελετό) και το υπεδafικό νερό, που βρίσκεται σε βαρυτική μορφή και ως νερό συγκράτησης. Ως υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια του υδροφόρου, αν και οι έννοιες υδροφορέας, υδροφόρος, υδροφόρο στρώμα, υδροφόρος ορίζοντας χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν το ίδιο πράγμα.



Σχήμα 6: Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με την εδαφική κατάταξη. Μπαντής Στ., (2004-2005)

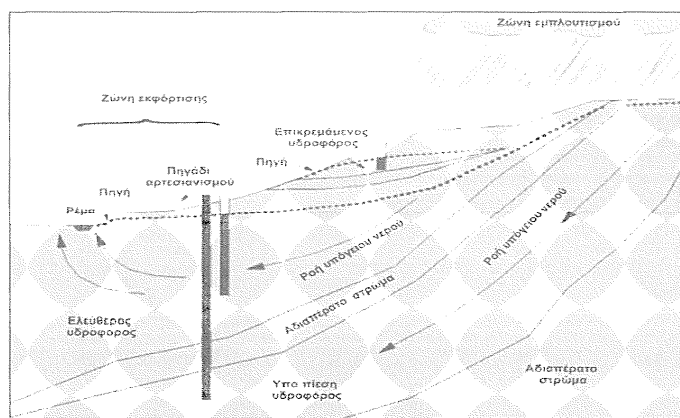
Οι κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων είναι:

1) *Ελεύθεροι υδροφορείς*

Είναι οι υδροφόροι που έχουν ως δάπεδο στεγανό στρώμα και στην οροφή τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην *ελεύθερη επιφάνεια* (φρεάτια) των υπόγειων νερών η υδροστατική πίεση να είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Οι μεταβολές της στάθμης του νερού αντιστοιχούν σε μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφόρο. Ειδική περίπτωση ελεύθερων υδροφόρων είναι οι κρεμαστοί ή επικρεμάμενοι υδροφόροι (perched) (Σχ. 1.7).

2) *Υπό πίεση υδροφόροι ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί*

Στα υδροφόρα αυτά στρώματα το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής (Σχ. 7). Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για τον λόγο αυτό η *πιεζομετρική επιφάνεια*, η οποία είναι μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφόρο, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός).



Σχήμα 7. Είδη υδροφόρων οριζόντων Μπαντής Στ., (2004-2005)

3) Ημιαρτεσιανοί (υπό μερική πίεση) υδροφορείς

Πρόκειται για υπόγειους υδροφορείς ανάλογους με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλ. μικρή υδροπερατότητα.

Από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται δυο μεγάλες κατηγορίες υδροφορέων:

1) **καρστικοί** (karst aquifers), που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και

2) **πορώδεις** (porous aquifers), που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς (τεταρτογενείς και αδρομερείς νεογενείς αποθέσεις).

Πρακτικά η ενέργεια αυτή (H) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) είναι ίση με το άθροισμα του **φορτίου πίεσης** P/γ (pressure head) και του **φορτίου ύψους** (ή υψομετρικό ή θέσης) της απόστασης δηλ, από το επίπεδο αναφοράς ζ (elevation head): $H=(P/\gamma)+z$, όπου P= η υδροστατική πίεση και γ = το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητα του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Καρστ είναι ο γεωμορφολογικός όρος που περιγράφει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που δημιουργούνται στα ανθρακικά πετρώματα εξαιτίας της διαλυτικής δράσης του νερού. Το καρστ δημιουργεί συστήματα κυκλοφορίας ρευστών, υπόγεια όσο και επιφανειακά. Δολίνες, γλυφές, συμπλέγματα σπηλαίων αποτελούν στοιχεία του καρστ. Η διαλυτική δράση του νερού οφείλεται στον εμπλουτισμό του, κυρίως με CO₂¹, αλλά και με H₂S². Πρώτη αναφορά για το Καρτ έγινε στην περιοχή της Σλοβενίας Kras ή Karst που σημαίνει βραχώδης περιοχή. Έκτοτε κάθε περιοχή με εφάμιλλα χαρακτηριστικά ονομάζεται *καρστική*

Στα ασβεστολιθικά πετρώματα ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο είναι η παρουσία κενών στη μάζα τους (αύλακες, έγκοιλα, φρέατα κ.λπ. μέχρι καταβόθρες και σπήλαια), που δημιουργήθηκαν με την πάροδο των αιώνων από την εκλεκτική χημική διάλυση του πετρώματος λόγω της επίδρασης των νερών της βροχής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται καρστικό, ενώ τα κενά που δημιουργούνται καρστικοί σχηματισμοί.

Τα κενά αυτά προήλθαν από τη δράση νερού της βροχής, εμπλουτισμένο σε διοξείδιο του άνθρακα, που κυκλοφορούσε μέσα τη μάζα του πετρώματος και μετέτρεψε το ουδέτερο ανθρακικό ασβέστιο του ιζήματος σε ευδιάλυτο όξινο ανθρακικό ασβέστιο που απομακρύνθηκε.

Η δημιουργία των καρστικών σχηματισμών σχετίζεται επίσης και με τεκτονικά αίτια που προκάλεσαν αρχικά κατακερματισμό του πετρώματος

¹ Το **διοξείδιο του άνθρακα** (χημικός τύπος : CO₂) είναι χημική ένωση που αποτελείται από δύο άτομα οξυγόνου ενωμένα με ομοιοπολικό δεσμό με ένα άτομο άνθρακα. Είναι γραμμικό μόριο χωρίς διπολική ροπή. Περιέχει 27,3 % w/w άνθρακα και 72,7 % w/w οξυγόνο. Μπορεί να αποδοθεί με το συντακτικό τύπο : O=C=O. Είναι αέριο συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, άχρωμο, άοσμο και άγευστο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και επίσης είναι ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου.

² Το «**υδρόθειο**» ή «**σουλφάνιο**» ή «**υδροσουλφίδιο**» ή «**σουλφίδιο του υδρογόνου**» είναι η χημική ένωση του υδρογόνου και του θείου με χημικό τύπο H₂S. Είναι ένα άχρωμο, πολύ τοξικό και εύφλεκτο αέριο με τη χαρακτηριστική οσμή των κλούβιων αυγών. Είναι συχνά το αποτέλεσμα της αναερόβιας βακτηριδιακής αποικοδόμησης οργανικών ουσιών που περιέχουν θείο, σε έλη και αποχετεύσεις. Επίσης βρίσκεται στα ηφαιστειακά αέρια, στο φυσικό αέριο και στο νερό κάποιων πηγαδιών.

3.2. Καρστική Διάβρωση

Οι γενεσιουργοί δυναμικοί παράγοντες, που προκαλούν μεταβολές της μορφής της επιφάνειας της γης, διακρίνονται σε ενδογενείς και εξωγενείς. Οι ενδογενείς παράγοντες είναι οι ηπειρωτικές και οι ορογενετικές διαδικασίες. Ο σημαντικότερος εξωγενής παράγοντας είναι η αποσάθρωση, δηλαδή το σύνολο των φαινομένων που προκαλούνται από τη δράση της ηλιακής ενέργειας και της βαρύτητας και οδηγούν στην καταστροφή των πετρωμάτων. Η αποσάθρωση διακρίνεται σε χημική και φυσικομηχανική.

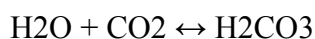
Κατά τη χημική αποσάθρωση προκαλείται μεταβολή της χημικής σύστασης ενός ή περισσότερων ορυκτών του πετρώματος, συνήθως από το νερό ή από τα σε διάλυση συστατικά ενώ κατά τη μηχανική ή φυσική διαταράσσεται η συνοχή και οι μηχανικές ιδιότητες αυτού χωρίς τη μεταβολή της χημικής σύστασης. Ο όρος διάβρωση εμπεριέχει την ταυτόχρονη καταστροφή και μεταφορά του πετρώματος. Το νερό όταν εμπλουτίζεται με CO₂, από την ατμόσφαιρα ή το έδαφος, λόγω της αποσυνθέσεως των οργανικών ουσιών, γίνεται ισχυρό διαλυτικό μέσο και διαλύει τα ανθρακικά κυρίως άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου, που μετατρέπονται σε διαλυτά όξινα ανθρακικά άλατα.

Η διαλυτική δράση του νερού οδηγεί στη διάλυση των ανθρακικών αλάτων που καλείται *καρστική διάβρωση*. Εκτός του CO₂, το νερό είναι δυνατό να εμπλουτιστεί και με H₂S. Παράγοντες που επιδρούν στην καρστική διάβρωση είναι η κατάλληλη τεκτονική κατασκευή της περιοχής, η κλίση της επιφάνειας του εδάφους, οι κλιματολογικές συνθήκες και η χημική σύσταση των πετρωμάτων.

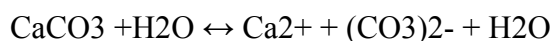
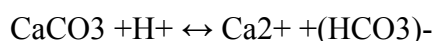
Ο ασβεστόλιθος είναι λίγο διαλυτός στο καθαρό νερό. Σε απεσταγμένο ύδωρ και σε συνήθη θερμοκρασία η διαλυτότητά του ανέρχεται σε 16mg/lit CaCO₃. Η κύρια διαλυτική ικανότητα του νερού οφείλεται στο γεγονός ότι προσλαμβάνει το CO₂ το οποίο μετατρέπεται σε H₂CO₃, ένα ισχυρό διαλυτικό μέσο. Σε συνήθεις συνθήκες τα νερά με πρόσληψη CO₂ πενταπλασιάζουν τη διαλυτική τους ικανότητα ενώ, όχι σπάνια, είναι δυνατό ένα λίτρο ύδατος να διαλύει ακόμη και 400mg πετρώματος. Στη φύση πάντως η διαλυτική ικανότητα του εμπλουτισμένου με CO₂ νερό ανέρχεται σε 100-200mg/lit.

Οι αντιδράσεις που γίνονται είναι οι εξής:

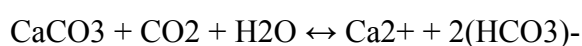
1) Το νερό προσλαμβάνει το CO₂ και μετατρέπεται σε ανθρακικό οξύ



2) Το νερό που περιέχει CO₂ θα αντιδράσει με τον ασβεστόλιθο σύμφωνα με τις αντιδράσεις :



Οι οποίες συνδυάζονται σε μία συνολική αντίδραση:



στην οποία η στοιχειομετρία παίζει σημαντικό ρόλο όπως φαίνεται. Για κάθε όν Ca²⁺ που διαλύεται απαιτείται ένα mol CO₂ το οποίο μετατρέπεται τελικά σε (HCO₃)⁻. Από αυτές τις αντιδράσεις, αποδεικνύεται πως η αντίδραση του συστήματος H₂O-CO₂ με το CaCO₃ εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των (HCO₃)⁻-H₂CO₃ και του Ca²⁺ στην ασβεστιτική επιφάνεια.

3.3. Καρστικές μορφές

Οι καρστικές μορφές που δημιουργούνται κατανέμονται σε επιφανειακές και υπόγειες. Οι επιφανειακές διαχωρίζονται σε μεγάλες και μικρές ενώ οι μικρές διακρίνονται παραπέρα σε ελεύθερες εδαφικού καλύμματος και ημιελεύθερες. Συγκεκριμένα κατανέμονται ως εξής:

Επιφανειακές Καρστικές Μορφές

- Μεγάλες Καρστικές Μορφές

Δολίνες, Ουβάλες, Πόλγες

- Μικρές Καρστικές μορφές

1. Ελεύθερες (Δακτυλιογλυφές, Αμαξοτροχιές, Ίχνη Βροχής, Τεκτονικές Αυλακώσεις)

2. Ημιελεύθερες (Επιφανειακές Χύτρες, Σπηλαιώδεις Μορφές Διάλυσης, Καρστικές Οπές, Υπόγειες Τεκτονικές Αυλακώσεις)

Υπόγειες Καρστικές Μορφές

- Καρστικά φρέατα-Βάραθρα

• Σπήλαια

• Έγκοιλα

- Καταβόθρες

3.4. Καρστικό Υδροφόρο Σύστημα

Ως καρστικό σύστημα είναι το σύστημα εκείνο που συνίσταται εξ ολοκλήρου ή κατά κύριο λόγο από ανθρακικούς σχηματισμούς, στο επίπεδο του οποίου οι υπόγειες ροές είναι έτσι οργανωμένες, ώστε να συνιστούν μια ενότητα αποστράγγισης, δηλαδή στοιχειώδης ανεξάρτητη και αυτόνομη μονάδα υδροφορίας (ΣΟΥΛΙΟΣ 1986).

Το καρστικό σύστημα είναι δυνατό να χωριστεί σε τρεις διακριτές ζώνες ανάλογα με την κίνηση του νερού:

α) Στη ζώνη τροφοδοσίας ή κατείσδυσης του καρστ,

β)στη ζώνη μετακίνησης της κύριας μάζας του νερού ή φρεατική (κύριος καρστικός υδροφόρος ορίζοντας) και

γ)στη ζώνη εξαγωγής του νερού από το καρστ..

Στη ζώνη κατείσδυσης είναι δυνατό να λειτουργούν επιμέρους υδροφόροι ορίζοντες που ονομάζονται επικαρστικοί. Το νερό που εισάγεται στο καρστικό σύστημα προέρχεται από μικρορροές, χείμαρρους ή ποταμούς που καταλήγουν στον καρστικό υδροφόρο (αλλογενές νερό), από τις ασυνέχειες του πετρώματος στις οποίες κινείται με διάχυση και από τα βάραθρα, καταβόθρες ή τους υπόγειους ποταμούς. Η μετακίνηση του νερού στη μάζα του καρστ σύμφωνα πραγματοποιείται με διάχυση διαμέσου του πορώδους, των ασυνεχειών (άνοιγμα μέχρι και 10mm) και των καρστικών αγωγών (10mm- 1000m). Στη ζώνη εξαγωγής σημαντικό στοιχείο αποτελούν οι πηγές οι οποίες αποφορτίζουν το καρστικό σύστημα.

3.5. Διαδικασία καρστικού σχηματισμού

Είναι ο πλέον διαδεδομένος και ο σημαντικότερος τύπος σπηλαίων που προέρχεται από τη χημική διάλυση του ασβεστόλιθου από το εμπλουτισμένο με CO₂ νερό.

Ο ασβεστόλιθος ο οποίος είναι κυρίως θαλάσσιο ίζημα που δημιουργήθηκε σε παλαιότερες γεωλογικές εποχές από συνεχή, αργή και σταθερή καθίζηση κελυφών ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) διαφόρων οργανισμών που ζούσαν την εποχή εκείνη, κατά προτίμηση όχι σε μεγάλα βάθη. Αυτά τα ιζήματα εμπλουτίστηκαν και με ανθρακικό ασβέστιο που περιέχεται στο νερό των θαλασσών.

Όλα αυτά τα ιζήματα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και δημιουργούν στρώματα διαφορετικού πάχους, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή.

Εξαιτίας μιας σειράς φυσικοχημικών φαινομένων, γνωστών με το όνομα διαγένεση, αυτό το θαλάσσιο ίζημα σιγά-σιγά στερεοποιείται και τελικά μετατρέπεται σε συμπαγή ασβεστόλιθο.

Από τη γεωλογία γνωρίζουμε ότι ορισμένα ρεύματα από το εσωτερικό της γης γίνονται η αιτία της μετακίνησης των διαφόρων πλακών στις οποίες είναι χωρισμένος ο στερεός φλοιός της γης (τεκτονισμός). Η κίνηση αυτή προκαλεί πολλές φορές και την ορογένεση, με τρόπο ώστε οι ασβεστόλιθοι που κάποτε δημιουργήθηκαν στους πυθμένες των θαλασσών να σχηματίζουν ολόκληρα βουνά και να αποτελούν πολύ μεγάλο μέρος της χέρσου. Το αρχικό ίζημα, το οποίο έχει πλέον σκληρυνθεί, δέχεται δυνάμεις μεγάλης ισχύος, με αποτέλεσμα να σπάει και να δημιουργεί ρωγμές. Υπάρχουν πολύ μεγάλες ρωγμές με κίνηση του ενός ή και των δυο μερών, οι οποίες ονομάζονται ρήγματα, αλλά και μικρορωγμές-που είναι η πλειοψηφία-και που με δυσκολία διακρίνονται με γυμνό μάτι. Από αυτές ξεκινούν και εξελίσσονται τα καρστικά φαινόμενα, τα οποία τελικά δημιουργούν τα περισσότερα σπήλαια. Για να κατανοήσουμε το σπουδαίο ρόλο των ρωγμών θα πρέπει να δούμε τη χημική σύσταση του ασβεστολίθου.

Το πέτρωμα αυτό, που όπως αναφέραμε αποτελείται από ανθρακικό ασβέστιο, άλας σχεδόν αδιάλυτο από το νερό, γίνεται πολύ διαλυτό αν το νερό είναι όξινο και ειδικά όταν μέσα σε αυτό έχει διαλυθεί διοξείδιο του άνθρακα(CO₂). Το βρόχινο νερό εμπλουτίζεται με διοξείδιο του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και ειδικά με φυτικά κατάλοιπα που βρίσκονται στο έδαφος.

Η χημική αντίδραση του φαινομένου είναι:



Με αυτόν τον τρόπο το νερό διαλύει το αδιάλυτο ανθρακικό ασβέστιο και περνώντας μέσα από τις ρωγμές που αναφέραμε τις ανοίγει περισσότερο, προχωρώντας όλο και πιο βαθιά.

Το ανθρακικό ασβέστιο όμως δεν το βρίσκουμε σχεδόν ποτέ καθαρό. Μέσα σε αυτό υπάρχουν άλλες ουσίες, όπως οξείδια του σιδήρου κ.λ.π., τα οποία είναι αδιάλυτα στο νερό και παρασύρονται από αυτό σε μορφή σκόνης, που όταν έρχεται σε επαφή με το πέτρωμα το διαβρώνει περισσότερο. Έτσι βλέπουμε από τη μια πλευρά τη χημική διάβρωση του ασβεστολίθου από το νερό, και από την άλλη τη

μηχανική διάβρωση, η οποία εξαρτάται και από την ταχύτητα ροής του νερού. Οι υπόγειες ρωγμές σιγά-σιγά μετασχηματίζονται σε έγκοιλα ή σε στοές που διαπλατώνονται συνεχώς, επιτρέποντας τη διέλευση όλο και περισσότερης ποσότητας νερού, το οποίο μπορεί να μεταφέρει, εκτός από λεπτή ύλη, και άλλα υλικά όπως άμμο, πέτρες, κ.λ.π., τα οποία ενδυναμώνουν τη μηχανική διάβρωση του σπηλαιού και δίνουν μορφές στο σπήλαιο, όπως κοιλώματα στο δάπεδο και θόλους στην οροφή. Το μήκος αυτών των σπηλαίων κυμαίνεται από λίγα μέτρα έως και εκατοντάδες χιλιόμετρα.

ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα 8. Επεξήγηση του καρστικού συστήματος (Σύνθετο διάγραμμα που παρουσιάζονται τα κυριότερα φαινόμενα που απαντούν στις καρστικές περιοχές

Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., (2006)

3.6. Καρστικοί υδροφορείς

Οι ασβεστόλιθοι είναι οι γκρίζοι βράχοι που συναντάει κανείς στα περισσότερα ελληνικά βουνά. Είναι πετρώματα γνωστά στον πολύ κόσμο καθώς σε αυτά σχηματίζονται τα σπήλαια. Είναι διαλυτοί από το νερό της βροχής, το οποίο με την πάροδο του χρόνου σχηματίζει μέσα στη μάζα τους αγωγούς και τις κοιλότητες. Οι πιο μεγάλες από αυτές τις κοιλότητες, εφόσον επικοινωνούν μέσω μικρών στομιών με την επιφάνεια του εδάφους, χαρακτηρίζονται σπήλαια. Σε αυτά τα πετρώματα σχηματίζονται μερικοί από τους μεγαλύτερους υδροφόρους ορίζοντες της Ελλάδας, που σε ορισμένες περιπτώσεις τροφοδοτούν μερικές από τις μεγαλύτερες πηγές της χώρας. Οι υδροφόροι αυτοί ορίζοντες ονομάζονται καρστικοί υδροφόροι ορίζοντες, ενώ οι αντίστοιχες πηγές καρστικές πηγές

3.7. Καρστικό νερό – υπόγειο νερό

Στους κύκλους των υδρογεωλόγων εξακολουθεί να υπάρχει κάποια σύγχυση όσον αφορά στη χρήση των όρων «καρστικό νερό» και «υπόγειο νερό» ως συνέπεια της θεωρίας του Grund κατά την οποία το επίπεδο της θάλασσας αποτελεί υδρολογικό «επίπεδο βάσης», αλλά και επίπεδο κάτω από το οποίο δεν λαμβάνει χώρα «διάβρωση» ή καλύτερα διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων. Πάνω από το επίπεδο αυτό αναπτύσσεται η ζώνη του «υπόγειου νερού», όπου το νερό σπάνια κινείται. Πάνω από τη ζώνη του «υπόγειου νερού», αναπτύσσεται μία ζώνη «καρστικού νερού» όπου το τελευταίο κινείται πλευρικά προς τη θάλασσα συνήθως ή προς την πηγή.

Το υπόγειο νερό συμπεριλαβαίνει όλο το νερό που απαντά σε βάθος. Η IASH (1939), ορίζει το «υπόγειο νερό» «ως νερό που γεμίζει τις κοιλότητες του φλοιού της γης συνεχώς και υπόκειται μόνο στη βαρύτητα και την υδραυλική πίεση. Ο όρος υπόγειο νερό δεν συναρτάται με το αν οι πιο πάνω κοιλότητες είναι σε χαλαρά ή συμπαγή υλικά, σε διαβρωμένα ή συμπαγή πετρώματα και αν βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια ή σε βάθος.

Η Διεθνής Ένωση Επιστημονικής Υδρογεωλογίας (IASH) στον όρο «υπόγειο νερό» (ground water) περιλαμβάνει:

- Το πορώδες υπόγειο νερό (pore groundwater).
- Το ρωγμώδες υπόγειο νερό (joint groundwater) και

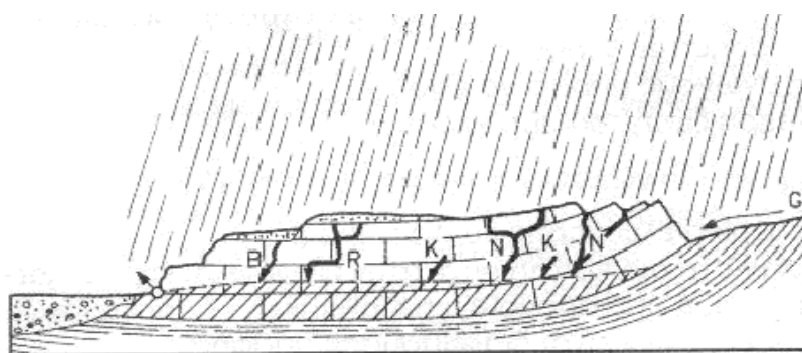
- Το καρστικό υπόγειο νερό (karst water).

Η πρόταση της IASH έχει πλέον υιοθετηθεί ευρύτατα ανάμεσα στους υδρογεωλόγους. Το καρστικό νερό τροφοδοτείται από το διηθημένο νερό που προέρχεται από:

- Τις βροχοπτώσεις πάνω στο γυμνό ασβεστόλιθο (N)
- Το εδαφικό νερό (B)
- Την επιφανειακή απορροή (G) και
- Το νερό συμπύκνωσης (K).

Όλα αυτά τα υπόγεια νερά αναμιγνύονται στο υπέδαφος και τελικά συγκεντρώνονται στη φρεάτια ζώνη ή στραγγίζονται με τη μορφή πηγών. Κατά την κίνηση τους, τα διάφορα είδη νερού έχουν διαφορετική συμπεριφορά και το ποσοστό όξινου ανθρακικού ασβεστίου σε αυτά κυμαίνεται.

Στα αρχικά στάδια της καρστοποίησης τα καρστικά πετρώματα συμπεριφέρονται απέναντι στο νερό σαν τα αδιάλυτα συμπαγή πετρώματα, είναι δηλαδή αδιαπέρατα. Όταν ρωγματωθούν από ποικίλα τεκτονικά αίτια διαμορφώνεται το δευτερογενές πορώδες το οποίο οφείλεται στη διέλευση, του νερού στο δίκτυο των ρωγμών οπότε δημιουργείται ένα είδος ζώνης διήθησης, ανάλογη της φρεάτιας ζώνης, με υπόγειο νερό που βρίσκεται σε άμεση σχέση και στη γειτονιά της γήινης επιφάνειας.



Σχήμα 9. Υπόγειο καρστικό νερό

Όταν διευρυνθούν οι ρωγμές, με τη διάλυση, τότε η πάνω κορεσμένη ζώνη κινείται βαθύτερα και βρίσκεται υπό την άμεση επίδραση του επιπέδου βάσης ή σχηματίζεται ρηχό καρστ πάνω από στεγανό στρώμα. Όταν η ζώνη διήθησης φτάσει στο μεγαλύτερο πάχος του, έχει πια διαμορφωθεί η ρηχή ζώνη (Klimchouk, 2000).

3.8. Χαρακτηριστικά στοιχεία καρστικών περιοχών

Οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από την έλλειψη των επιφανειακών υδάτων. Τα εδάφη μπορεί να είναι αρκετά εύφορα, και οι βροχοπτώσεις μπορεί να είναι επαρκής, αλλά το νερό της βροχής κινείται γρήγορα μέσα από τις ρωγμές στο έδαφος, μερικές φορές αφήνοντας την επιφάνεια του εδάφους να διψάει για βροχή.

Ένα «παράθυρο» υπάρχει όταν ένα υπόγειο ρεύμα αναδύεται στην επιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων του βράχου, και στη συνέχεια εξαφανίζεται πίσω, συχνά σε μια καταβόθρα.

Ποτάμια καρστικών περιοχών μπορεί να εξαφανίζονται απότομα και την άνοιξη να εμφανίζονται σε διαφορετικά μέρη. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο ποταμός Ρορο Άγιο ποταμού στο Fremont County, Wyoming . Σε μια τοποθεσία που ονομάζεται απλά "Οι νεροχύτες" στο Νεροχύτες Canyon State Park , ο ποταμός ρέει σε μια σπηλιά σε ένα σχηματισμό γνωστό ως το Μάντισον Ασβεστόλιθος, και στη συνέχεια να αυξάνεται και πάλι μισό μίλι κάτω από το φαράγγι σε μια ήρεμη λίμνη.

Η Turlough είναι ένα μοναδικό είδος εποχικής λίμνης, βρίσκεται στην Ιρλανδία, και είναι ένα καρστικό φαινόμενο που διαμορφώνεται μία φορά τον χρόνο όπου αναβλύζουν υπόγεια νερά.

Προμήθειες νερού από πηγάδια καρστικών τοπογραφιών μπορούν να είναι ασφαλής, δεδομένου ότι το νερό μπορεί να τρέχει απρόσκοπτα από καταβόθρα σε ένα λιβάδι βοοειδή, μέσω μια σπηλιά και στο πηγάδι, παρακάμπτοντας το κανονικό φιλτράρισμα που απαντάται σε έναν υδροφόρο ορίζοντα. Οι σχηματισμοί καρστ είναι σπηλαιώδης και, συνεπώς, έχουν υψηλά ποσοστά διαπερατότητας με αποτέλεσμα τη μειωμένη δυνατότητα για τις προσμείξεις οι οποίες πρέπει να φιλτράρονται.

Τα υπόγεια νερά καρστικών περιοχών εύκολα μολύνονται από καταβόθρες, όταν στην επιφάνεια υπάρχουν αγροικίες ή κοινότητες με χωματερές σκουπιδιών. Υπεφορτωμένες ή δυσλειτουργικές σπητικές δεξαμενές σε καρστικά τοπία μπορεί να απορρίπτουν ακατέργαστα λύματα κατευθείαν στα υπόγειο κανάλια.

Η ίδια η τοπογραφία καρστ δημιουργεί δυσκολίες για τις ανθρώπινες κατοικίες (*White, 1988*).

Καταβόθρες μπορεί να αναπτυχθούν σταδιακά ως ανοίγματα στην επιφάνεια αλλά μεγαλώνουν, προοδευτικά και αόρατα γίνεται η διάβρωση και τελικά η οροφή

του υπόγειου σπηλαίου καταρρέει ξαφνικά. Τέτοιου ίδους φαινόμενα έχουν καταπεί τα σπίτια, τα βοοειδή, τα αυτοκίνητα και γεωργικά μηχανήματα.

Μερικά καρστικά τοπία είναι ευαίσθητα στις εξωτερικές αλλαγές, εν μέρει λόγω της μεγάλης διαπερατότητας και του λεπτού εδάφους το οποίο είναι αποτέλεσμα της εντατικής καρστικοποίησης.

Η ευαισθησία αυτή, σε συνδυασμό με τις δημογραφικές πιέσεις και την αντιδεδοντολογική συμπεριφορά πολλών υπευθύνων έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση του εδάφους, την υποβάθμιση των υδάτινων πόρων, την ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Πλημμύρες σε σπήλαια σε πυκνοκατοικημένες περιοχές μπορούν να μεταδώσουν ρύπους σε μεγάλες εκτάσεις.

Για παράδειγμα, στα μέσα της δεκαετίας του 1980, από τις πλημμύρες, γέμισαν νερά με μεγάλη πίεση σε σπηλιές κάτω από την πόλη του Bowling Green, στο Kentucky στην Αμερική και έγινε διασπορά υδρογονανθράκων (από βιομηχανικά απόβλητα) μέσα από ρωγμές, σε εκρηκτικά επίπεδα σε υπόγεια και υπερκείμενο γύρω πηγάδια.

Το πιο εξοργιστικό πρόβλημα στα καρστικά εδάφη σήμερα είναι η έλλειψη ορθολογικών κανονισμών που αφορούν την παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων, και η κατάσταση περιπλέκεται από μια κοινή παρανόηση τη διαφορά καρστικών και μη-καρστικών υδροφορέων.

Οι καρστιγενείς περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Αυτό οφείλεται στην ευκολία της ροής του νερού και στο ότι το φυσικό φιλτράρισμα είναι σχεδόν ανύπαρκτο

Η χρήση των σπηλαίων ως αγωγοί φυσικών αποχετευτικών αγωγών, καθώς και καταβοθρών ως σκουπιδότοπους σε μικρές πόλεις και αγροτικές περιοχές, βάζει τις τοπικές προμήθειες πόσιμου νερού σε κίνδυνο.

Η αστική επέκταση καρστικών περιοχών βάζει συχνά σε κίνδυνο την οικοδόμηση των σπιτιών σε εκτάσεις που δεν μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος και τα προβλήματα των σπητικών δεξαμενών από τα υπόγεια διαλείμματα του αγωγού και τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Επίσης οι καρστιγενείς περιοχές υπόκεινται σε ταχείες μεταβολές. Αυτές αποτελούν μία πολύτιμη καταγραφή της περιβαλλοντικής αλλαγής, και θα πρέπει να παρακολουθούνται στενά για την επίδρασή τους στην ανθρώπινη οικισμών και των κτισμάτων.

3.9. Καρστικά σπήλαια - έγκοιλα, καταβόθρες

Ο ασβεστόλιθος, με υψηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, διαλύεται εύκολα στα οξέα που παράγονται από οργανικά υλικά. Περίπου το 10% της γης (και το 15% των Ηνωμένων Πολιτειών») στην επιφάνεια της γης αποτελείται από διαλυτές ασβεστόλιθο, το οποίο μπορεί εύκολα να λυθεί με την αδύναμη λύση του ανθρακικού οξέος που βρίσκεται σε υπόγεια ύδατα.

Όταν ασβεστόλιθος αλληλεπιδρά με υπόγειο νερό, το νερό διαλύει τον ασβεστόλιθο καρστικού να σχηματίσουν τοπογραφία - μια συγχώνευση των σπηλαίων, υπόγεια κανάλια, και ένα τραχύ και ανώμαλο επιφάνεια του εδάφους.

Τα υπόγεια νερά των καρστικών επιφανειών χαράζουν εντυπωσιακά κανάλια και σπηλιές που είναι δυνατόν να καταρρεύσουν. Όταν ο ασβεστόλιθος διαβρώνεται υπόγεια δημιουργείται καταβόθρα (δολίνη). Οι καταβόθρες κυμαίνονται σε μέγεθος από μερικά ή μέτρα έως 100 μέτρα (300 πόδια) βάθος. Καταβόθρες έχουν καταπιεί αυτοκίνητα, σπίτια, επιχειρήσεις, κ.ά. Πολλές καταβόθρες υπάρχουν στην Φλόρινα οι οποίες προκαλούν απώλεια υπόγειων υδάτων από την άντληση.



Σχήμα 10: Καρστικό σπήλαιο

Μία καταβόθρα είναι μία λεκάνη, όπως οι ρωγμές στο έδαφος που μπορεί να ανοίξει ξαφνικά, αργά ή κατά τη διάρκεια μιας περιόδου του χρόνου. Το μέγεθός τους ποικίλλει από λίγα μέτρα έως εκατοντάδες. Πολλές είναι κυκλικές και άλλες επιμήκης που κυμαίνονται από λίγα μέτρα βάθος έως 100 μέτρα βάθος ή και περισσότερο. Οι καταβόθρες διεξάγουν βρόχινο νερό προς τα κάτω σε υπόγειες σπηλιές και ποτάμια (Jennings, 1985).

Μία επιφάνεια η οποία έχει καταβόθρες είναι ασταθής και γενικά κακή για την κατασκευή κάθε είδους κτίσματος χωρίς έκτακτη και δαπανηρή έρευνα υπεδάφους.

Τρεις διαδικασίες μεγαλώνουν τις καταβόθρες:

- 1) βράχοι που διαλύονται ασθενώς από όξινο νερό,
- 2) το βάρος το οποίο πέφτει στα κενά που προκύπτουν, τις κοιλότητες, στα σπήλαια και, και
- 3) το νερό μεταφέρει μακριά τα υλικά που πέφτουν και κάνουν τα κενά μεγαλύτερα.

Εν ολίγοις, το έδαφος γύρω από μια καταβόθρα γίνεται διαρκώς πιο ασταθές.

Μια καταβόθρα μπορεί ακόμη και να καταρρεύσει μέσα από την οροφή ενός υπόγειου σπηλαίου. Υπάρχουν πάρα πολλά σπήλαια σ' όλο τον κόσμο που δεν έχουν διερευνηθεί καθώς δεν υπάρχει το άνοιγμα του σπηλαίου από την επιφάνεια της γης. Μέσα στα καρστικά σπήλαια θα μπορούσε κανείς να βρει ένα ευρύ φάσμα από σπηλαιοθέματα, δομές που δημιουργούνται από ανθρακικό ασβέστιο που στάζει. Οι πέτρες που στάζουν μετατρέπουν το νερό σε σταλακτίτες, αυτά κρέμονται από τα ταβάνια των σπηλαίων, και καθώς στάζουν εδώ και χιλιάδες έτη δημιουργούν πάνω στο έδαφος σταλαγμίτες. Όταν οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες ενώνονται δημιουργούν συνεκτικούς βράχους. Αυτά δημιουργούν ένα εντυπωσιακό τοπίο εξαιτίας πολλοί τουρίστες τα επισκέπτονται τα σπήλαια για να θαυμάσουν. Η σπηλιά μαμούθ είναι στο Κεντάκυ είναι πάνω από 350 μίλια (560 χιλ.) μακριά.

Τα σπήλαια περιέχουν μια ποικιλία χαρακτηριστικών διάλυσης, τα ιζήματα και διάκοσμο (καταθέσεις με διάφορες μορφές και ορυκτολογία, κυρίως ασβεστίτη), τα οποία μπορεί να διατηρήσει ένα αρχείο με τη γεωλογική και κλιματική ιστορία της περιοχής.

Έτσι ως σπήλαιο ορίζεται οποιαδήποτε φυσική κοιλότητα στο εσωτερικό της γης, στην οποία μπορεί να έχει πρόσβαση ο άνθρωπος. Σε αντίθετη περίπτωση, κατά την οποία δεν υπάρχει πρόσβαση για τον άνθρωπο, γίνεται λόγος για έγκοιλο.

Η διαδικασία δημιουργίας των σπηλαίων είναι καθαρά γεωλογική - χημική. Η συνηθέστερη διαδικασία δημιουργίας σπηλαίου είναι η εξής:

Η διείσδυση του νερού της βροχής στις σχισμές των ασβεστολιθικών πετρωμάτων τα διαλύει πολύ αργά, δημιουργώντας σταδιακά ολοένα και μεγαλύτερες κοιλότητες στο εσωτερικό τους. Μέσα στα σπήλαια συναντούμε διάκοσμο από ασβεστολιθικές αποθέσεις. Το νερό που διαλύει τα ασβεστολιθικά πετρώματα και

δημιουργεί το σπήλαιο γίνεται πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο και εναποθέτει βαθμηδόν στα σημεία όπου υπάρχει σταγονορροή. Έτσι, στην οροφή του σπηλαίου δημιουργούνται οι σταλακτίτες και στο έδαφος οι σταλαγμίτες. Πλήθος άλλων εξειδικευμένων μορφών δημιουργούνται από την ίδια διαδικασία, δίνοντας πολύπλοκα και πολύ όμορφα συμπλέγματα.

Το φαινόμενο καστ είναι σημαντικό για την κοινωνία, λόγω της παγκόσμιας διανομής (20 εκατομμύρια km², το 12% περίπου της χερσαίας επιφάνειας της Γης), και για τους πόρους που περιέχει, καθώς το ένα τέταρτο του παγκόσμιου πληθυσμού τροφοδοτείται από το νερό που προέρχεται από καρστικούς υδροφορείς.

Για να επισκευαστούν οι καταβόθρες χρειάζονται πολλά χρήματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η πτώση βράχων σε καταβόθρα μπορεί να μετριάσει το πρόβλημα, αλλά αυτό είναι πιθανό μόνο μια προσωρινή λύση, γιατί η καταβόθρα συνήθως ανοίγει και πάλι.

Αυτό συμβαίνει επειδή οι περισσότερες καταβόθρες έχουν πραγματικά πολλές τρύπες προς τα κάτω καθώς και ανοίγματα στο πλάι μεταξύ των πετρωμάτων. Αυτά μοιάζουν σαν σουρωτήρι του μάγειρα. Όταν οι μηχανικοί, οι σύμβουλοι, οι εργολάβοι δεν γνωρίζουν τους κινδύνους από τις καταβόθρες και δεν τους λάβουν υπόψιν στον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων, το αποτέλεσμα θα είναι οι εγκαταστάσεις και οι δομές να ραγίσουν και να καταρρεύσουν και τα έξοδα επισκευής και αντικατάστασης είναι φυσικά πολύ υψηλά (*Begus, 2000*).

3.10. Πλημμύρες σε καρστιγενείς περιοχές

Οι σπηλιές και τα υπόγεια ποτάμια έχουν περιορισμένη ικανότητα αποστράγγισης για τη μεταφορά του νερού που περισσεύει. Όταν η ποσότητα του νερού υπερβαίνει τις δυνατότητές του, το νερό ανεβαίνει στις υπόγειες σωληνώσεις και βράζει πάνω στην επιφάνεια, διάδοση πάνω από καταβόθρες και γης. In time the water will drain and the underground rivers will return to normal stage flow. Με τον καιρό το νερό θα στραγγίξει και τα υπόγεια ποτάμια θα επιστρέψει στην κανονική ροή στάδιο.

Καρστικές πλημμύρες

Κανονικά, τα ποτάμια ανά διαστήματα πλημμυρίζουν. Καθώς όμως το νερό απλώνεται, η ταχύτητά του επιβραδύνεται και τα ιζήματα του φορτίου πέφτουν έξω. Έτσι οι πλημμύρες κάνουν το έδαφος πλούσιο κάτι το οποίο θέλουν οι αγρότες.

Οι πλημμύρες επαναλαμβάνονται και υπονομεύουν τις οικήματα που οικοδομήθηκαν κοντά σ' αυτές. Οι νόμοι δεν επιτρέπουν δημιουργία μεγάλων έργων κοντά σε κοίτες ποταμών λόγω απαγορευτικού κόστους επισκευής και ασφάλισης.

3.11. Η αστάθεια των καρστικών περιοχών

Οι καρστικές περιοχές φιλοξενούν πολλά κοιτάσματα ορυκτών (συμπεριλαμβανομένων των σημαντικών μόλυβδος, ψευδάργυρος και κασσίτερος καταθέσεις κοιτασμάτων, και τη μορφή σημαντικούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Επίσης αποτελούν σημαντικά αξιοθέατα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην τοπική οικονομία.

Το καρστικό σύστημα είναι ευαίσθητο σε πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικούς γεωλογικούς κινδύνους. Οι κίνδυνοι αυτοί περιλαμβάνουν καταβόθρες με ξαφνική κατάρρευση της επιφάνειας, διαρροές γύρω από φράγματα, κατάρρευση των λιμνοθαλασσών με αποτέλεσμα διαρροή αποβλήτων. Η παρουσία και η ανάπτυξη των σπηλαίων μπορεί να προκαλέσει βραχυπρόθεσμα προβλήματα, συμπεριλαμβανομένης της κατάρρευσης υπόβαθρου, διαφορές στην απόδοση και, κακή ποιότητα των υπόγειων υδάτων λόγω της έλλειψης δράσης φιλτραρίσματος, αστάθεια των εδαφών που υπερκαλύπτουν, και δυσκολία στο σχεδιασμό αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης γύρω από τις εγκαταστάσεις αποβλήτων.

Η αστάθεια των καρστικών επιφανειών οδηγεί κάθε χρόνο εκατομμύρια δολάρια των ζημιών στους δρόμους, κτίρια και άλλες κατασκευές στη Βόρεια Αμερική και μόνο τα επίπεδα ραδονίου σε υπόγεια καρστικά τείνουν να είναι υψηλά σε ορισμένες περιοχές, καθώς και οι υπόγειοι αγωγοί μπορεί να διανέμουν άνισα ραδόνιο³ καθ' όλη τη συγκεκριμένη περιοχή.

³ Το χημικό στοιχείο **Ραδόνιο** (σύμβολο: **Rn**) είναι ένα ευγενές αέριο με ατομικό αριθμό 86 και ατομικό βάρος (222) . Έχει θερμοκρασία τήξης -71 C° και θερμοκρασία βρασμού -61,8 C°. Είναι ραδιενεργό και ένα από τα βαρύτερα αέρια. Το πιο σταθερό του ισότοπο είναι το ραδόνιο-222 με χρόνο ημιζωής 3,8 ημέρες. Σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου είναι άχρωμο αλλά όταν ψυχανθεί κάτω από τη θερμοκρασία πήξης του αποκτά ένα υποκίτρινο χρώμα που καθώς μειώνουμε τη θερμοκρασία μετατρέπεται σε κίτρινο και στη συνέχεια σε πορτοκαλοκόκκινο.

Το ραδόνιο θεωρείται επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Το ραδόνιο υπάρχει στο έδαφος και μπορεί να συγκεντρωθεί στο εσωτερικό των κτηρίων που δεν αερίζονται αρκετά. Ευθύνεται για την πρόκληση καρκίνου του πνεύμονα: αν και έχει μικρό χρόνο ημιζωής, διασπάται σε άλλα ραδιενεργά στοιχεία τα οποία έχουν χρόνο ημιζωής δεκαετιών, με αποτέλεσμα η εισπνοή ραδονίου από κάποιον να αποτελεί συνεχή κίνδυνο. Μεγάλα ποσοστά ραδονίου υπάρχουν στο έδαφος της Ικαρίας.

Επειδή η μεγάλη ποικιλία των κενών κάτω από επιφάνεια της γης προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες, το καρστικό τοπίο διατηρεί τις περιβαλλοντικές διαταραχές καθώς και άλλες γεωλογικές μεταβολές.

Η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, τη φύση του εδάφους και της βλάστησης, των παγετώνων, διάβρωση ποταμιών, καθώς και τα πρότυπα της ροής των υπογείων υδάτων μπορούν συνήθως να διαβαστούν από τα εκθέματα των σπηλαίων (*Beck, 1989*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ

4.1. Εισαγωγή

Σήραγγες ονομάζονται υπόγεια έργα προς συντόμευση οδικών δικτύων για το πέρασμα ορεινών όγκων στον ελλαδικό χώρο, με την ιδιαιτερότητα του εδαφικού ανάγλυφου των. Απαιτούν συνδυασμό επίλυσης γεωλογικών και εδαφικών προβλημάτων, με την επίτευξη του καλύτερου αισθητικού αποτελέσματος.

Η χρήση σηράγγων στα σύγχρονα δίκτυα μεταφορών εμφανίζει ραγδαία εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς εξασφαλίζει άμεση μετακίνηση επιβατών και αγαθών δια μέσου φυσικών εμποδίων, συνδυάζοντας ασφάλεια, αποδοτικότητα και αδιάκοπη επιχειρησιακή ροή.

Τα Έργα Σηράγγων αποτελούν ιδιαίτερα από πλευράς διαχείρισης και απαιτητικά από τεχνικής πλευράς αντικείμενα, η επιτυχής υλοποίηση των οποίων συνδέεται άμεσα και καθοριστικά με το γεωλογικό και το γεωτεχνικό "παράγοντα". Η ιδιαιτερότητα των Έργων Σηράγγων ανάγεται στην ανάγκη διαχείρισης αβεβαιοτήτων και ρίσκου σε όλα τα στάδια εξέλιξης τους (Μπαντής, 2004-2005).

Για την κατασκευή υπόγειων έργων εφαρμόζονται δυο διαφορετικοί τρόποι: Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος όπου η εκσκαφή γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος κλειστής διάνοιξης όπου το έργο κατασκευάζεται με υπόγεια εκσκαφή χωρίς να διαταραχθεί η-επιφάνεια (Μαραγκός, 1997).

4.2. Οι αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις της κατασκευής μίας σήραγγας

Οι αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις οφείλονται στην αντιμετώπιση των μελετητικών και κατασκευαστικών προβλημάτων χωρίς τις εναλλακτικές επιλογές που επιτρέπει ένα συνηθισμένο έργο Πολιτικού Μηχανικού. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν οι εξής περιορισμοί :

Η «θέση Έργου» μιας σήραγγας έχει μεν μικρό εύρος, αλλά καλύπτει μεγάλη απόσταση με περιορισμένες δυνατότητες αλλαγής της οριζόντιας και κάθετης χάραξης. Ο τύπος και η ποιότητα των υλικών δόμησης (εδάφους ή βράχου) δεν

επιλέγονται, τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζουν στοχαστική διακύμανση και, συχνά, απρόβλεπτη συμπεριφορά. Οι συνθήκες του υπεδάφους, γενικά, ερμηνεύονται επαγωγικά εισάγοντας το στοιχείο της αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των εμπλεκόμενων μεταβλητών, που συνήθως συναρτάται με τη γραμμική διάσταση του Έργου. Τέλος, οι πρακτικές δυνατότητες βελτίωσης της ποιότητας προβληματικών υλικών είναι περιορισμένες σε σχέση με το υψηλό κόστος των απαιτούμενων επεμβάσεων (Τρώντσιος, 1991).

Επομένως, είναι σαφές ότι η τεχνικά και οικονομικά επιτυχής υλοποίηση ενός έργου σήραγγας εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από την αξιοπιστία πρόβλεψης και κατανόησης των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραγόντων και τις επιλογές αντιμετώπισης των πιθανών προβλημάτων. Ο «γεωλογικός παράγων» συνίσταται, γενικά, από τον τύπο των πετρωμάτων, τις γεωλογικές δομές και το καθεστώς του υπόγειου νερού. Ο «γεωτεχνικός παράγων» ανάγεται στην ικανότητα του υλικού δόμησης (πετρώματος) να παραλάβει τις φορτίσεις, που θα αναπτυχθούν στο στάδιο κατασκευής και λειτουργίας της σήραγγας, καθώς και στις παραμέτρους, που επηρεάζουν αυτή.

Το τρίπτυχο «τάσεις - παραμορφωσιμότητα - αντοχή» βραχόμαζας προδιαγράφει τη γεωτεχνική συμπεριφορά (ευστάθεια) μιας σήραγγας και τις τεχνικές απαιτήσεις υποστήριξης (τύπο και ποσότητα μέτρων) για να επιτευχθεί ισορροπία, που θα εγγυάται τη μακροχρόνια ασφάλεια του Έργου.

Πλήρως τεκμηριωμένη πρόβλεψη του γεωλογικού / γεωτεχνικού περιβάλλοντος είναι συνήθως πρακτικά αδύνατη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλου μήκους σήραγγες που διανοίγονται εις βάθος. Κατά συνέπεια οι αβεβαιότητες και η σοβαρότητα των συνεπειών, που αυτές μπορεί να έχουν στην υλοποίηση του Έργου, θα πρέπει να αποτιμούνται και να συμπεριλαμβάνονται στις προσεγγίσεις και των τριών συντελεστών του Έργου (Μελετητή - Κατασκευαστή - Κύριου του Έργου) (Μπαντής, 2004-2005).

4.3. Τρόποι σχεδιασμού σιράγγων

Ο σχεδιασμός των υπογείων έργων και των σιράγγων μπορεί να γίνει με διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως είναι:

1. Με την διαισθητική μέθοδο κατά την οποία ο μηχανικός εξετάζει επί τόπου τις γεωλογικές, τεκτονικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, καρότα

γεωτρήσεων και αποτυπώσεις των ασυνεχειών και προτείνει το τρόπο εξόρυξης, τη διαστασιολόγηση της σήραγγος και την επιλογή και διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης (κοχλίες, πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος κ.λπ.)

2. Με την εμπειρική μέθοδο ακολουθώντας κάποιο σύστημα (εμπειρικό) γεωμηχανικής ταξινόμησης των εδαφοβραχομαζών και εμπειρικά νομογράμματα, πίνακες ή τύπους.

3. Με την επιστημονική μεθοδολογία που βασίζεται αφενός μεν σε επί τόπου μετρήσεις των τάσεων ή/και των μετατοπίσεων και εργαστηριακές πειραματικές μετρήσεις της Εδαφομηχανικής και της Βραχομηχανικής, αφετέρου δε σε καταστατικούς νόμους της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωυλικών και σε θεμελιώδεις εξισώσεις της Μηχανικής (λ.χ. νόμοι διατήρησης ορμής και στροφορμής, νόμος διατήρησης μάζας και ενέργειας). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής συνήθως γίνεται η παραδοχή της συνέχειας του γεωλογικού μέσου (θεωρία της «Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου») και η μηχανική ανάλυση με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων ή συνοριακών στοιχείων.

Λόγω της πολύπλοκης φύσης του προβλήματος και των κοστολογικών-χρονικών περιορισμών αλλά και της ακρίβειας που απαιτείται στο σχεδιασμό ενός υπόγειου έργου σπάνια εφαρμόζεται ξεχωριστά μία μέθοδος εκ των παραπάνω. Συνήθως η μεθοδολογία σχεδιασμού περιλαμβάνει και τις τρεις μεθόδους. Παρόλαυτα η γενίκευση και η προώθηση της μηχανικής των υπογείων έργων και των σηράγγων δεν μπορεί να γίνει χωρίς την τρίτη μέθοδο. Πρέπει όμως να γίνει κατανοητό ότι η μη-κριτική εφαρμογή των εμπορικών συνήθως υπολογιστικών προγραμμάτων μηχανικής ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει σε ανασφαλή αποτελέσματα γι' αυτό και πρέπει να δίνεται έμφαση στην παραγωγή και χρήση αναλυτικών λύσεων. Οι αναλυτικές λύσεις δίνουν την σχετική επίδραση των ποιό σημαντικών παραμέτρων και των μηχανισμών που υπεισέρχονται στη μηχανική ανάλυση ενός υπόγειου έργου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών μοντέλων (*Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006*).

Η θεώρηση του γεωλογικού σχηματισμού ως συνεχούς μέσου είναι αναγκαία λόγω της πολυπλοκότητας που προέρχεται από τους εξής παράγοντες:

- Τρισδιάστατη φύση του εντατικοπαραμορφωσιακού πεδίου πέριξ της σήραγγος.

- Πολύπλοκη συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών (ανισοτροπία, μη-γραμμικότητα, πλαστική διαρροή, μόνιμες παραμορφώσεις, υστέρηση, ερπυσμός, ασυνέχειες κ.λπ.).

- Τοπικές μεταβολές (πολλές φορές έντονες) των ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών. Κάποιος θα μπορούσε να ρωτήσει αν είναι σκόπιμο και ρεαλιστικό να γίνουν μοντέλα Συνεχούς Μέσου που θα προσομοιώνουν πολύπλοκα γεωπεριβάλλοντα. Η απάντηση είναι ότι πρέπει να γίνουν γιατί:

1. Τα μοντέλα δεν αναπαριστούν την πραγματικότητα αλλά δίνουν τα βασικά χαρακτηριστικά της μελετούμενης διαδικασίας που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στη πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς ενός έργου. Είναι διατυπωμένη πλέον πρακτική άποψη ότι οι κατασκευαστές είναι δύσκολο πλέον να αναλάβουν μόνοι τους το γεωτεχνικό ρίσκο της αστοχίας κάποιας διαδικασίας κατά την κατασκευή ενός έργου και επιζητούν επιτακτικά την πρόβλεψη της πιθανότητας αστοχίας στην φάση της μελέτης του έργου.

2. Βοηθάνε την διαίσθηση και τον τρόπο σκέψης του μηχανικού για την εύρεση της καλύτερης λύσης εφόσον βοηθάνε στην αναγνώριση φυσικών ποσοτήτων που είναι σημαντικές για το πρόβλημα.

3. Βοηθάνε στην ανάδρομη ανάλυση επί τόπου μετρήσεων καθιζήσεων, συγκλίσεων και τάσεων στη γειτονιά υπόγειων έργων και κατόπιν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ή και τιμών παραμέτρων του πετρώματος.

Είναι προφανές ότι θεωρήσεις που βασίζονται στη γεωλογική ή γεωτεχνική διαίσθηση και την εμπειρία δεν είναι μοντέλα από τη στιγμή που δεν λαμβάνουν υπόψη τους νόμους της Μηχανικής (Τσιραμπίδης, 1996).

4.4. Γενικά στοιχεία σχεδιασμού και γεωμετρίας οδικών σιράγγων

Οι συνιστώσες σχεδιασμού ενός Έργου Σήραγγας είναι :

- Γεωμετρικός σχεδιασμός (άξονας χάραξης και διατομή)
- Γεωτεχνικός Σχεδιασμός (Προσωρινή Επένδυση) Μόνιμη επένδυση
- Στεγανοποίηση και αποστράγγιση
- Όργανα και παρακολούθηση
- Περιβαλλοντικές Θεωρήσεις

Τα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού μιας Οδικής Σήραγγας αντιστοιχούν σε διεθνώς ισχύοντα πρότυπα που αφορούν στα ακόλουθα:

- Διατομή σχεδιασμού (κατασκευής και χρήσεως)
- Διαμήκης και εγκάρσια κλίσεις
- Έργα εξυπηρέτησης της Σήραγγας
- Λωρίδες στάθμευσης ανάγκης
- Πίνακες διανομής
- Θέσεις εγκατάστασης Η/Μ εξοπλισμού

Η διατομή των τυπικών οδικών σηράγγων είναι πεταλοειδούς σχήματος με κυκλικό τμήμα θόλου ακτίνας R1 (ενδεικτικά = 6.5m) και με τόξο εφαρμογής 2x90° εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας, συναρμοζόμενου σε κατακόρυφα πλευρικά τμήματα μέχρι τη βάση του τοιχώματος, όπου και γίνονται οι εκσκαφές των πέδινων της επένδυσης.

Τυπικές γεωμετρικές διαστάσεις έχουν ως εξής:

- Ακτίνα διατομής χρήσεως : 5.5m
- Περιτύπωμα κυκλοφορίας : 5.0 x 8.5m

Τυπική διατομή χρήσεως με όλη τη γεωμετρία στοιχείων δίδεται στο Σχήμα 1.8 (εγκεκριμένη διατομή ΕΟΑΕ).

Για τον υπολογισμό της γεωμετρίας των εκσκαφών ορίζονται τα ακόλουθα (Σχήμα 11):

- Γραμμή "Α" : Γραμμή ελάχιστης εκσκαφής
- Γραμμή "Β" : Γραμμή υπολογισμού μέγιστης πληρωμένης εκσκαφής

Ο υπολογισμός των "Α" και "Β" θα γίνεται ως εξής:

$$\text{- Ακτίνα γραμμής "Α" : } R_A = I_R + D_1 + d_2 + d_3$$

$$\text{- Ακτίνα γραμμής "Β" : } R_B = R_A + d_0$$

όπου I_R = ακτίνα διατομής χρήσεως = 5.50m

d_3 = πάχος μόνιμης επένδυσης

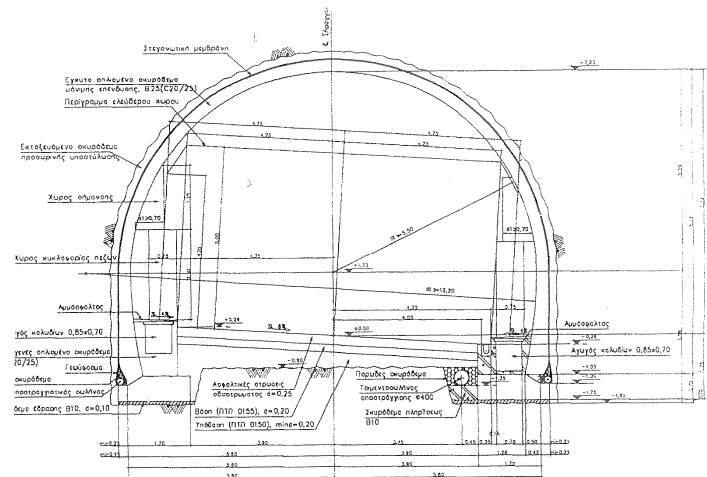
d_2 = αναμενόμενη σύγκλιση

d_1 = πάχος προσωρινής επένδυσης

d_0 = απόσταση γραμμών "Α" και "Β"

Ως διάρκεια ζωής σχεδιασμού Έργων Σηράγγων λαμβάνεται περίοδος 100-120 ετών. Εξ αυτού νοείται ότι ο σχεδιασμός του έργου έναντι προβλεπόμενων

φορτίσεων και ασφάλεια για τη συγκεκριμένη περίοδο θα πρέπει να εξασφαλίσει απρόσκοπτη λειτουργία χωρίς ανάγκη δομικών επεμβάσεων (Μπαντής, 2005).



Σχήμα 11. Διατομή σήραγγας Μπαντής Στ., (2004-2005)

4.5. Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των σηράγγων

Οι υψηλές τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις ασφαλείας των σηράγγων και το κόστος καθιστούν το Γεωτεχνικό Σχεδιασμό από τις πιο σημαντικές συνιστώσες επιτυχούς υλοποίησης. Ο Γεωτεχνικός Σχεδιασμός νοείται ως επαλληλία σταδίων έρευνας - μελέτης - παρακολούθησης του Έργου και απαιτεί γνώση, κρίση και εμπειρία. Η διάρθρωση του παρόντος Τεύχους είναι μια προσπάθεια συμβολής προς αυτή την κατεύθυνση. (Μπαντής, 2005).

Βασική προϋπόθεση για τον οικονομικά και τεχνικά άρτιο γεωτεχνικό σχεδιασμό μιας σήραγγας είναι η αξιοποίηση της βραχώμαζας σαν το κύριο δομικό υλικό, παρέχοντας κατά το δυνατόν περιορισμένη υποστήριξη με σκυρόδεμα και χάλυβα. Στη συμπαγή φυσική κατάσταση και υπό θλιπτικά φορτία, οι περισσότεροι σκληροί βράχοι διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το σκυρόδεμα και ορισμένοι προσεγγίζουν εκείνη του χάλυβα. Επομένως, αντικατάσταση ενός καθ' όλα επαρκούς

υλικού με άλλα υποδεέστερης ποιότητας, θα πρέπει να συμβαίνει για την αντιμετώπιση εντοπισμένων και σωστά αξιολογημένων προβλημάτων. Το κατά πόσο τα παραπάνω επιτυγχάνονται στην πράξη, εξαρτάται από τις επικρατούσες γεωλογικές / γεωτεχνικές συνθήκες κατά μήκος του άξονα της Σήραγγας και από το βαθμό που ο Μελετητής προβλέπει και συνεκτιμά τις επιπτώσεις από αυτές στη Μελέτη Σχεδιασμού.

Όπως ήδη επισημάνθηκε, πλήρως τεκμηριωμένη πρόβλεψη των συνθηκών υπεδάφους είναι συνήθως πρακτικά αδύνατη. Κατά συνέπεια η υλοποίηση έργων σηράγγων εμπεριέχει αβεβαιότητες και η επιτυχία μιας Μελέτης σήραγγας εν πολλοίς, εξαρτάται από την ικανότητα του Μελετητή να διαβλέψει και ταξινομήσει τις εγγενείς αβεβαιότητες σε κατηγορίες πιθανών προβλημάτων, να εκτιμήσει με λογική προσέγγιση την έκταση εμφάνισης τους και να προβλέψει μέτρα για την αντιμετώπιση τους (Τρόντσιος, 1991).

4.5.1. Τα συνήθη γεωτεχνικά προβλήματα των σηράγγων

Τα συνήθη γεωτεχνικά προβλήματα των σηράγγων είναι η εκδήλωση συγκλίσεων, υπερεκσκαφών, μακροχρόνιων παραμορφώσεων λόγω ερπυστικών φαινομένων, φαινομένων αστάθειας λόγω συνθλίψεως, κλπ. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται είτε:

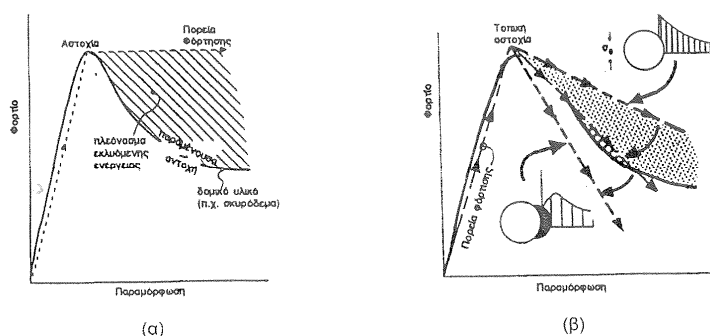
- στη πτωχή ποιότητα της βραχώμαζας (αποσαθρωμένα πετρώματα σε μικρά βάθη, τεκτονισμένες ζώνες-ρήγματα, ημίβραχοι, κλπ.), ή
- στη δομική ασυνεχότητα της βραχώμαζας, ή
- σε υψηλές πιέσεις λόγω μεγάλου βάθους ή ύπαρξης εγκλωβισμένων τάσεων ή, γενικότερα, όταν ο λόγος "αντοχή του υλικού" / "τάση εδάφους" είναι μικρός, ή
- στην παρουσία υπόγειου νερού, ή
- σε συνδυασμό παραγόντων.

Πέραν των ανωτέρω παραγόντων που αποτελούν αναπόφευκτους καταναγκασμούς, υπάρχουν και άλλες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα τυπικά Έργα Πολιτικού Μηχανικού, που έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό μιας σήραγγας:

- Το εντατικό πεδίο γύρω από μια σήραγγα, όπως διαμορφώνεται κατά την κατασκευή της (δευτερογενές εντατικό πεδίο), είναι δυσμενέστερο από την πρωτογενή εντατική κατάσταση της βραχώμαζας.

Το φορτία είναι "ανακόλουθου" (non-following) χαρακτήρα. Σε ένα τυπικό (π.χ. κτιριακό) έργο τα φορτία ανωδομής είναι "ακόλουθου" τύπου (following loads), δηλαδή παραμένουν σταθερά, ανεξάρτητα από την παραμόρφωση του δομικού υλικού (Σχήμα 12,12α). Υπέρβαση της αντοχής του δομικού υλικού, προκαλεί πλεόνασμα εκλυόμενης ενέργειας. Κατ' επέκταση, εξίσωση την εξωτερικών φορτίων με τη φέρουσα ικανότητα του δομικού στοιχείου σηματοδοτεί έναρξη αστοχίας με αποχωρισμό των επιφανειών θραύσης και χωρίς δυνατότητα αλληλεπίδρασης ή παραλαβής φορτίων λόγω των εφελκυστικών τάσεων που επικρατούν.

Στο μοντέλο μιας σήραγγας οι συντοιακές τάσεις πεδίου ανάγονται σε συνθήκες άπειρου χώρου ή ημιχώρου. Τοπική υπέρβαση της αντοχής (π.χ. θραύση του βράχου ή διάτμηση ασυνεχειών) προκαλεί τοπική εντατική εκτόνωση και ανακατανομή των τάσεων, δηλαδή παραλαβή τους από γειτονικές ζώνες υλικού υψηλότερης δυσκαμψίας. Στα σημεία θραύσης λοιπόν, είναι δυνατόν να επικρατήσουν συνθήκες "ανακόλουθων φορτίων (non-following loads) κατά το Σχήμα 2 (Μπαντής, 2005).



Σχήμα 12: (α) Φορτίσεις ακόλουθου τύπου: Τοπική υπέρβαση της αντοχής είναι δυνατό να οδηγήσει σε καθολική αστοχία (β) Μεταφορά των φορτίων εκτός της ζώνης θραύσης δημιουργεί τοπική εκτόνωση. Κατ' επέκταση τοπική υπέρβαση της αντοχής δεν συνεπάγεται καθολική αστοχία.

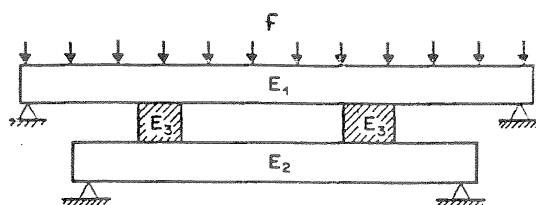
Μπαντής Στ., (2004-2005)

4.6. Σχέση παραμορφώσεων με αντοχή της βραχόμαζας

Το κατά πόσον οι παραμορφώσεις που θα προκύψουν μετά τη θραύση της βραχόμαζας για τη διάνοιξη σήραγγας, θα παραμείνουν σε ανεκτά για την ευστάθεια της κατασκευής όρια, θα εξαρτηθεί από την παραμένουσα αντοχή της βραχόμαζας στη ζώνη θραύσης και από το μέγεθος των δευτερογενών τάσεων. Η δευτερογενής εντατική κατάσταση θα περιλαμβάνει αφ' ενός μειωμένες διατρητικές συνιστώσες

και αφετέρου ορθές συνιστώσες θλιπτικού χαρακτήρα. Οι τελευταίες ενεργοποιούν την παραμένουσα αντοχή της βραχόμαζας, που είναι ουσιαστικά η διαθέσιμη διατηρητική αντοχή κατά μήκος των προϋπαρχουσών ή νέων ασυνεχειών.

Τα φορτία που εφαρμόζονται στην επένδυση υποστήριξης μιας σήραγγας εξαρτώνται από την παραμόρφωση τόσο της εκσκαφής όσο και της επένδυσης. Στην απλή αναπαράσταση του Σχήματος 13, η κάτω δοκός (δακτύλιος επένδυσης δυσκαμψίας E_2) θα παραλάβει φορτία, μόνον αν τα εξωτερικά φορτία F προκαλέσουν κάμψη της άνω δοκού (βραχόμαζας δυσκαμψίας E_2) και τα σημεία (μπλοκ) που συνδέουν τις E_1 και E_2 μεταφέρουν τα φορτία F στην υποκείμενη δοκό. Τα σημεία αυτά μπορεί να θεωρηθεί ο τι εκπροσωπούν το σύστημα προσωρινής υποστήριξης δυσκαμψίας E_3 .



Σχήμα 13. Αλληλεπίδραση επένδυσης σήραγγας με την περιβάλλουσα μάζα.

Τα φορτία στη δοκό E_2 θα αυξηθούν αν : (α) αυξηθούν τα εξωτερικά φορτία F , (β) μειωθεί η δυσκαμψία της δοκού E_1 (χαλάρωση βραχόμαζας), (γ) αυξηθεί η δυσκαμψία των μπλοκ E_3 και (δ) αυξηθεί η δυσκαμψία της δοκού E_2 (μεγάλο πάχος επένδυσης).

Το κύριο πρόβλημα στην ποσοτική αξιολόγηση των παραπάνω είναι ο υπολογισμός των μακροχρόνια μεταφερόμενων φορτίων στην επένδυση, καθώς είναι αβέβαιη η πρόβλεψη του μεγέθους των παραμορφώσεων της βραχόμαζας, της κατανομής τους αλλά και του χρόνου εκδήλωσής τους.

Η βραχόμαζα αποτελεί ένα σύνθετο, πολυμεταβλητό σύστημα σε φυσική ισορροπία, όπως αυτή έχει διαμορφωθεί κατά τη γεωλογική εξέλιξη της. Η διατάραξη της ισορροπίας κατά την κατασκευή ενός έργου έχει ως συνέπεια τη διατάραξη υφιστάμενων ισορροπιών. Ανάλογα με το βαθμό διατάραξης είναι δυνατό να προκύψουν ελεγχόμενα έως μείζονος σημασίας προβλήματα. Πα τη σωστή μελέτη και αντιμετώπιση των προβλημάτων, θα πρέπει ο Μηχανικός να κατανοήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ εγγενών και εξωγενών μεταβλητών.

4.7. Διάρκεια ζωής σχεδιασμού

Όλες οι σήραγγες και άλλες υπόγειες κατασκευές θα έχουν ελάχιστη διάρκεια ζωής σχεδιασμού 100 ετών για τα δομικά στοιχεία.

Οι σήραγγες και άλλες υπόγειες κατασκευές δεν θα απαιτούν δομική συντήρηση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

Η μελέτη θα προβλέπει τη δυνατότητα ασφαλούς και αποδοτικής συντήρησης στοιχείων για τα οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί η ελάχιστη διάρκεια ζωής σχεδιασμού δομικών στοιχείων. Η δαπάνη της συντήρησης αυτής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για όλη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού (Τρώντσιος, 1991).

4.8. Η κλίση των σηράγγων

Εντός σηράγγων σε οδούς της κατηγορίας Α οι κατά μήκος κλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 4%. Ιδιαίτερα σε σήραγγες μεγάλου μήκους (> 1km), πρέπει να επιδιώκεται η τιμή της μέγιστης κατά μήκος κλίσης να μην υπερβαίνει το 2.5%.

Εντονότερες κατά μήκος κλίσεις έχουν τα εξής μειονεκτήματα:

- υψηλότερη ρύπανση
- μεγαλύτερη πιθανότητα ατυχημάτων
- διασπορά εύφλεκτων υλικών με μεγάλη ταχύτητα
- μείωση της ταχύτητας των βαρέων οχημάτων

Προκειμένου να μην υποβαθμίζεται το παρεχόμενο επίπεδο εξυπηρέτησης, ιδιαίτερα στις σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, όπου απαγορεύεται η προσπέραση, πρέπει να επιδιώκεται η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ βαρέων φορτηγών και επιβατηγών οχημάτων να μην υπερβαίνει τα 15km/h (βλέπε Παράρτημα Γ).

Στον Πίνακα 2 δίδεται το προτεινόμενο μέγιστο συνιστώμενο μήκος σήραγγας ως συνάρτηση της κατά μήκος κλίσης.

s (%)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
ΣΔΚ (m)	> 3000	> 3000	> 3000	1400	700	500	400	300
ΣΜΚ (m)	> 3000	> 3000	> 3000	> 3000	> 3000	> 3000	1000	600

Σημείωση: ΣΔΚ: Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης
ΣΜΚ: Σήραγγα Μονής Κατεύθυνσης

Πίνακας 2: Μέγιστο μήκος σήραγγας ως προς την επιρροή της κατά μήκος κλίσης

Επισημαίνεται, ότι οι τιμές του Πίνακα 2 έχουν προκύψει με την θεώρηση, ότι τα οχήματα κινούνται ανεμπόδιστα και δεν λήφθηκαν υπόψη οι μεταβλητές, οι οποίες αφορούν το επίπεδο εξυπηρέτησης της οδού και την οικονομική επιβάρυνση στο σύστημα αερισμού.

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 2 που αναφέρονται στη Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης (ΣΔΚ), είναι δυνατός ο κατ' αρχήν προσεγγιστικός προσδιορισμός της κατά μήκος κλίσης σε σχέση με το μήκος της. Αποκλίσεις από τις υπόψη τιμές πρέπει να αιτιολογούνται.

Κατά την επιλογή της κατά μήκος κλίσης και του μήκους εφαρμογής της πρέπει να

- προσδιορίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης και
- να εκτιμάται η οικονομική επιβάρυνση στο σύστημα αερισμού(*portal.survey.ntua.gr*).

4.9. Τυπική Διατομή

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης διατομής μιας σήραγγας είναι :

- ο κυκλοφοριακός φόρτος και
- η γεωλογία της περιοχής

Εκτός όμως από τα στοιχεία του καταστρώματος μιας σήραγγας, σημαντικό ρόλο παίζουν εν προκειμένω οι διαστάσεις του περιτυπώματος και του πρόσθετου χώρου για τον λειτουργικό εξοπλισμό της σήραγγας.

Το περιτύπωμα είναι ο χώρος της διατομής της οδού, στον οποίο δεν πρέπει να υπεισέρχονται σταθερά εμπόδια. Αποτελείται από τον κυκλοφοριακό χώρο, τον άνω και τον πλευρικό χώρο ελευθερίας κινήσεων.

Το συνολικό πλάτος του περιτυπώματος προκύπτει από την εκάστοτε διατομή οδού της σήραγγας.

Το ελάχιστο απαιτούμενο ελεύθερο ύψος για την μηχανοκίνητη κυκλοφορία ανέρχεται σε 4,50m. Τα πλευρικά όρια του χώρου κυκλοφορίας πρέπει να είναι κάθετα στο οδόστρωμα. Έτσι σε περίπτωση εφαρμογής των μέγιστων τιμών επικλίσεων μπορεί να απαιτηθεί διαπλάτυνση του πλευρικού χώρου ελευθερίας κινήσεων, ώστε σε κάθε περίπτωση να διατίθεται ο αναγκαίος χώρος ελεύθερου εμποδίων.

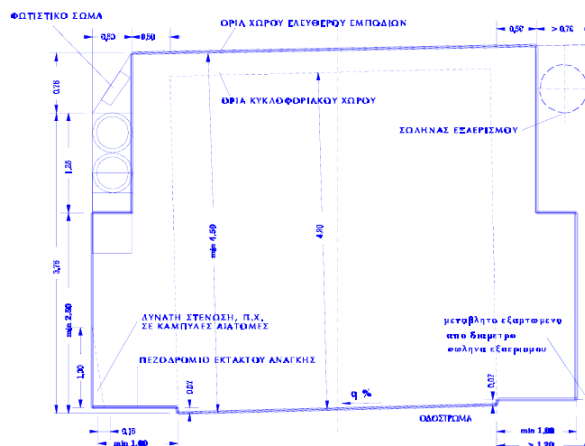
Το απαιτούμενο πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης στις ευθυγραμμίες είναι 0.25m.

Στις καμπύλες κυμαίνεται από 0.25m έως 0.50m.

Τα αντικείμενα που παραμορφώνονται εύκολα, όπως οι πινακίδες σήμανσης πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση μεγαλύτερη των 2,50m πάνω από το πεζοδρόμιο της σήραγγας και να απέχουν από τα όρια του κυκλοφοριακού χώρου κατ' ελάχιστο 50cm. Οι απαραίτητοι για τον αερισμό ανεμιστήρες πρέπει να τοποθετούνται σε εσοχές στην οροφή της σήραγγας.

Επιτρέπεται η τοποθέτηση των εύκολα παραμορφώσιμων φωτιστικών σωμάτων σε κατακόρυφη απόσταση μεγαλύτερη από 3,75m από το πεζοδρόμιο και έως 50cm από τα όρια του κυκλοφοριακού χώρου.

Σε περίπτωση που η διάμετρος των ανεμιστήρων είναι $> 70\text{cm}$, είναι απαραίτητη η διαπλάτυνση των πεζοδρομίων σε συνάρτηση με την διάμετρο των ανεμιστήρα.



Σχήμα 14. Τυπικές διαστάσεις περιτυπώματος

4.10. Μηχανήματα Εκσκαφής

Τα Μηχανήματα Εκσκαφής Σηράγγων ή TBM όπως ονομάζονται από το αγγλικό αρκτικόλεξο (*Tunnel boring machines*) σχετίζονται με πολλά συμπληρωματικά στοιχεία που μπορούν να αυτοματοποιήσουν ολόκληρη την διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας.



Εικ.1. Ένα μηχάνημα εκσκαφής σηράγγων που χρησιμοποιήθηκε στην Νεβάδα των Η.Π.Α.

Υπάρχουν πολλών ειδών TBM που λειτουργούν σε ένα εύρος συνθηκών, από σκληρά πετρώματα μέχρι έδαφος με θύλακες νερού. Ορισμένοι τύποι TBM έχουν διαμερίσματα υπό πίεση στο μπροστινό μέρος, επιτρέποντας τα να χρησιμοποιούνται σε δύσκολες συνθήκες όπως κάτω από υδάτινο πυθμένα. Αυτό συμπιέζει το έδαφος μπροστά από την κεφαλή εκσκαφής του TBM για να αντισταθμίσει στην πίεση του νερού. Ο χειριστής εργάζεται υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση πίσω από το συμπιεσμένο διαμέρισμα, αλλά μπορεί να χρειαστεί να εισέλθει στο συμπιεσμένο διαμέρισμα για να αλλάξει ή να επιδιορθώσει τους κόφτες. Αυτό απαιτεί ειδικές προφυλάξεις, όπως τοπική προεργασία του εδάφους ή την ακινητοποίηση του TBM σε περιοχή χωρίς νερό. Παρ όλες τις δυσκολίες, σήμερα προτιμούνται τα TBM από την προηγούμενη μέθοδο της εκσκαφής σε ατμόσφαιρα υπό πίεση, με έναν θάλαμο απομόνωσης και αποσυμπίεσης σε κάποια απόσταση από το TBM, η οποία απαιτεί να εργάζονται οι χειριστές σε υψηλή πίεση και να πρέπει να περνούν από θάλαμο αποσυμπίεσης στο τέλος της βάρδιας τους, όπως οι δύτες.

Μέχρι πρόσφατα, το μεγαλύτερο TBM που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε για την διάνοιξη της σήραγγας Πράσινη Καρδιά (αγγλικά: *Green Heart Tunnel*, Ολλανδικά: *Tunnel Groene Hart*) στην Ολλανδία. Είχε διάμετρο 14,87 μέτρα.

Σήμερα υπάρχουν ακόμα μεγαλύτερα μηχανήματα, όπως για παράδειγμα τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του περιφερειακού δρόμου της Μαδρίτης στην Ισπανία και της σήραγγας Χονγκ Μινγκ στην Σανγκάη στην Κίνα (*Klimchouk, et al., 1997*).

4.11.Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover)

Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος (Cut and Cover) εφαρμόζεται σε εδαφικούς σχηματισμούς όταν το έργο είναι σε μικρό βάθος, Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος εφαρμόζεται διαφορετικά σε ακατοίκητες και διαφορετικά σε κατοικημένες περιοχές. Σε ακατοίκητες περιοχές δεν αντιμετωπίζουμε προβλήματα. Η εκσκαφή γίνεται σε όλο της το εύρος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το βάθος στο οποίο θα εδρασθεί το έργο· δεν γίνεται αντιστήριξη των παρειών της εκσκαφής οι οποίες διαμορφώνονται με την κλίση που επιτρέπει το έδαφος. Όταν υπάρχουν υπόγεια νερά η στάθμη υποβιβάζεται μέχρις ότου κατασκευαστεί το έργο.

Δυσκολίες παρουσιάζονται σε κατοικημένες περιοχές επειδή η κατασκευή των έργων δεν πρέπει αφενός να προκαλέσει προβλήματα στην κυκλοφορία και αφετέρου ζημιές στις γειτονικές κατασκευές: οικοδομές, υπόγειους αγωγούς, υπόγεια καλώδια.

Ανάλογα με τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα γίνει το έργο εφαρμόζονται οι παρακάτω λύσεις:

4.11.1.Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη

Κατασκευάζεται αρχικά η μισή διατομή ώστε να είναι δυνατή η κυκλοφορία στο άλλο ήμισυ της οδού. Η εκσκαφή αντιστηρίζεται -με διαφραγματικούς τοίχους ή με πασσαλοσανίδες- ώστε να αποφευχθούν ζημιές στις γειτονικές κατασκευές. Προσοχή χρειάζεται στη σύνδεση των δύο τμημάτων της διατομής.

- **Διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης**

Κατασκευάζεται αρχικά η αντιστήριξη (διαφραγματικοί τοίχοι, πασσαλοσανίδες, πασσαλοσυστοιχίες) πάνω στην οποία τοποθετείται προσωρινή κάλυψη ή μόνιμη πλάκα κάλυψης για την γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας. Η εκσκαφή γίνεται κάτω και υπό την προστασία της κάλυψης.

Ο σχεδιασμός υπόγειων έργων με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος δεν παρουσιάζει δυσκολίες. Οι διαφραγματικοί τοίχοι προστατεύουν σχεδόν απόλυτα τις υπάρχουσες κατασκευές. Οι παραμορφώσεις του εδάφους πίσω από διαφραγματικούς τοίχους έχουν αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής έρευνας: τα εμπειρικά στοιχεία από μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές είναι πλούσια. Οι καθιζήσεις εκτείνονται σε απόσταση 1 έως 2 μέτρα πίσω από τους τοίχους και είναι συνάρτηση του ολικού βάθους της εκσκαφής. Σε αργιλικά εδάφη μπορεί να είναι σχετικά μεγάλες, της τάξης

του 1 έως 2% του ολικού βάθους της εκσκαφής σε αμμώδη εδάφη ανέρχονται στο ήμισυ των παραπάνω τιμών ενώ σε πυκνές άμμους είναι αμελητέες. Αν ληφθούν όλα τα κατάλληλα μέτρα αντιστήριξης των διαφραγματικών τοίχων και οι εκσκαφές γίνουν με «φροντίδα, οι καθιζήσεις του εδάφους έχουν ασήμαντες επιπτώσεις στη συμπεριφορά των θεμελιώσεων των γειτονικών κατασκευών. Εντούτοις είναι απαραίτητο πριν από την έναρξη των έργων να γίνεται αποτύπωση της κατάστασης των παρακείμενων οικοδομών και είναι καλό ο εργολάβος να καλύπτεται από ασφαλιστική εταιρεία. (Μαραγκός, 1997).

Η διατομή της σήραγγας είναι ορθογωνική και κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πάχος της πλάκας οροφής είναι της τάξης των 60-80 εκατοστών τοποθετείται συνήθως σε βάθος 1 έως 1,5 μέτρο από την επιφάνεια ώστε η κατανομή των επιφανειακών φορτίων πάνω της να είναι καλή (μειώνονται οι ροπές και οι διατμητικές τάσεις. Προβλήματα θεμελίωσης δεν υπάρχουν επειδή τα φορτία που υπήρχαν πριν αφαιρεθεί το έδαφος ήταν μεγαλύτερα από τα φορτία που μεταφέρει στο έδαφος η σήραγγα. Το δάπεδο αποτελεί πλάκα θεμελίωσης και προστατεύει τη σήραγγα από την εισροή υπόγειων νερών. Οι κατακόρυφοι τοίχοι δέχονται τις ωθήσεις του εδάφους και της κυκλοφορίας που δεν είναι σημαντικές. Για λόγους στεγανότητας γίνεται επίστρωση με ασφαλικό υλικό για λόγους αισθητικής και ηχητικής προστασίας η κατασκευή επενδύεται εσωτερικά.

4.12. Η μέθοδος κλειστής διάνοιξης

Εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους εδαφών όταν το βάθος είναι σχετικά μεγάλο και σχεδόν πάντοτε όταν η διάνοιξη πρέπει να γίνει σε βραχώδες υλικό. Βασικά διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τρόπους κατασκευής: το συμβατικό τρόπο κατασκευής και την κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης.

4.12.1. Συμβατικός τρόπος

Η διάνοιξη της εκσκαφής γίνεται με μηχανικά μέσα (εδαφικοί σχηματισμοί, μαλακός ή αποσαθρωμένος βράχος, έντονα διακλασμένος βράχος) ή με εκρηκτικές ύλες όταν η διάνοιξη με μηχανικά μέσα δεν είναι δυνατή (σκληρός βράχος που χαρακτηρίζεται από ατελώς διαμορφωμένα ή μεγάλα στοιχεία κατάτμησης)· αμέσως μετά τη διάνοιξη ενός τμήματος (η έκταση του εξαρτάται από την ευστάθεια του

ανοίγματος) τοποθετείται προσωρινή υποστήριξη. Η οριστική υποστήριξη γίνεται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ή και πριν από την ολοκλήρωση της ανάλογα με το γενικότερο σχεδιασμό του έργου. Όταν το έδαφος είναι κακής ποιότητας είναι δυνατόν να προηγηθεί βελτίωση του εδάφους με σιμε-ντενέσεις ή με πάγωμα του εδάφους που περιβάλλει την εκσκαφή.

4.12.2. Κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σηράγγων κυκλικής διατομής. Με τις μηχανές αυτές εκτελούνται ταυτόχρονα η διάνοιξη, η υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων της σήραγγας και η τοποθέτηση της οριστικής υποστήριξης.

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης περιλαμβάνουν:

- Μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή (τύμπανο προώθησης) εφοδιασμένη με διάφορα είδη κοπτικών (σιαγώνες σύνθλιψης για εδάφη και κυλιόμενοι κοπτικοί δίσκοι για σκληρά πετρώματα). Στο τύμπανο προώθησης το οποίο εκτός από τη διάνοιξη εξασφαλίζει και τη στήριξη του μετώπου της σήραγγας υπάρχουν μεταβλητά ανοίγματα ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή των κοπτήρων υπό ασφαλείς συνθήκες. Η κοπτική κεφαλή έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται και στις δύο διευθύνσεις ώστε οι σιαγώνες να μπορούν να καθαρίσουν από μόνες τους όταν τρυπούν μαλακά εδάφη. Στο τύμπανο υπάρχουν ανθρωποθυρίδες οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα να επιθεωρείται το μέτωπο με την είσοδο ειδικών στο χώρο μεταξύ του μετώπου και του τύμπανου (γίνεται μικρή οπισθοχώρηση της μηχανής) ώστε να προλαμβάνονται ζημιές σε αρχαιολογικά ευρήματα. Όταν το έδαφος το επιτρέπει η διάνοιξη μπορεί να γίνει με εκσκαπτικά μηχανήματα τα οποία εργάζονται υπό την προστασία της ασπίδας.

- Μία μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την ακτινική υποστήριξη της σήραγγας. Όταν δεν υπάρχουν προβλήματα καταπτώσεων η ασπίδα δε χρησιμοποιείται.

- Ένα θάλαμο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή.

- Μία ανυψωτική μηχανή η οποία μεταφέρει και τοποθετεί την επένδυση στο πίσω μέρος της ασπίδας. Η επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα θολωτά στοιχεία από μπετόν ή από χυτοσίδηρο (θολίτες) τα οποία συνδεόμενα το ένα με το άλλο με κοχλίες σχηματίζουν ένα δακτύλιο (συνήθως οκτώ θολίτες συνθέτουν ένα

δακτύλιο· οι θολίτες έχουν πλάτος της τάξης του ενός μέτρου). Σύνδεση γίνεται και μεταξύ των δακτυλίων. Η μεταλλική ασπίδα και οι θολίτες είναι υδατοστεγείς· νερό μπορεί να μπει μόνο στο μέτωπο της σήραγγας μέσα από τα μικρά ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής. Το νερό αντλείται από το κάτω μέρος του θαλάμου εργασίας.

- Ένα σύστημα υδραυλικών προωθητικοί γρύλων σε κυκλική διάταξη εξασφαλίζει την προώθηση του τύμπανου με τη πίεση που ασκούν οι γρύλοι στο δακτύλιο της επένδυσης ο οποίος τοποθετήθηκε τελευταία.

- Μηχανή αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής. Τα προϊόντα απομακρύνονται από το μέτωπο με μεταφορική ταινία η οποία τα μεταφέρει και τα φορτώνει σε ανατρεπόμενα βαγονέτα. Η μεταφορά γίνεται σε θέσεις υποδοχής έξω από τη σήραγγα όπου αποθηκεύονται μέχρι την οριστική τους μεταφορά στον τελικό τόπο εναπόθεσης.

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης έχουν διάμετρο η οποία φτάνει μέχρι-και 12 μέτρα. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 15 έως 30 μέτρα την ημέρα. Στη σήραγγα της Μάγχης χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα 11 μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης διαμέτρου 8,85 μέτρα. Στο μετρό της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν τρεις μηχανές διαμέτρου 9,5 μέτρων (Μαραγκός, 1997).

4.13. Σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης με τη θεώρηση των πλαστικών

ζωνών

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1960. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της.

Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σήραγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι εναλλακτικοί τρόποι διάνοιξης σήραγγων που δεν υπάγονται στη μέθοδο NATM είναι:

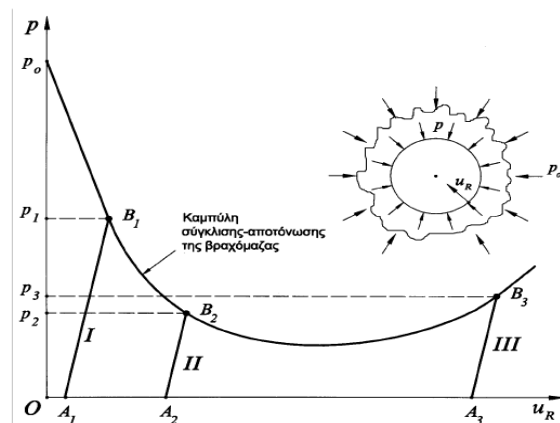
1. Διάνοιξη με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM), επειδή κατά τη μέθοδο αυτή η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ασκεί πίεση επί του μετώπου εκσκαφής.

2. Διάνοιξη με προστατευτική ασπίδα (shield) επειδή η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται μέσω της ασπίδας και όχι με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων.

3. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος διάνοιξης κατά την οποία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια, όπως π.χ. με έγχυτο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέταλλο ή άλλο υλικό.

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM. Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας).

Η ονομασία "New Austrian Tunnelling Method - NATM" εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1964 σε μια σειρά τριών άρθρων του L. von Rabcewicz στο περιοδικό Water Power. Στα άρθρα αυτά αναφέρεται η κατασκευή μιας σήραγγας στη Βενεζουέλα κατά την περίοδο 1957-58 όπου εφαρμόστηκε υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια.



Σχήμα 15. Η επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας

I πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p_1) είναι πολύ μεγάλη.

II κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) έχει μειωθεί σημαντικά.

III πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης (χαλάρωσης) της βραχώμαζας, συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης.

4.13.1. Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (διάνοιξη με TBM ή ασπίδα) είναι τα εξής:

1. Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβαλλόμενες γεωτεχνικές συνθήκες.
2. Προσαρμόζεται εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μή-κυκλικών διατομών.
3. Περιλαμβάνει μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρού κόστους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
4. Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).

4.13.2. Φάσεις εκσκαφής

Η εκσκαφή σήραγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

1. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench).

Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πλότο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχώμαζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαιτέρως δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας (Μαραγκός, 1997).

4.14. Μέτρα άμεσης υποστήριξης

4.14.1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Ο όρος χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm) τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση (με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες. Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος η αναλογία ανάμιξης είναι η εξής (για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου βάρους 2250-2350 kg):

- Τσιμέντο: 400-450 kg

Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10mm): 1600-1700 kg

- Παιπάλη πυριτίου (micro-silica): 30-50 kg
- Επιταχυντής πήξεως: 10-15 kg
- Νερό: 200-250 kg

Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζουλάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζουλάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης (rebound) κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm.

Η αντοχή και η πλαστιμότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα (wire mesh reinforcement). Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-60 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Η προσθήκη μεταλλικών ινών πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος και για τους εξής λόγους:

1. Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση (rebound) του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
2. Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση (corrosion) επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.
3. Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ό τι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι αρκετά ανώμαλη (*Τσιραμπίδης, 2002*).

4.14.2. Αγκύρια βράχου

Τα αγκύρια βράχου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- (α) Προεντεταμένα αγκύρια, (tensioned cables) που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης.
- (β) Παθητικά αγκύρια (rock-bolts) των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας.

Τα παθητικά αγκύρια διακρίνονται σε αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (fully bonded) και πρόσφυσης άκρου (end anchored).

Τα αγκύρια πρόσφυσης άκρου είναι συνήθως τύπου διαστελόμενης κεφαλής.

Στα αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης ανήκουν οι εξής τύποι:

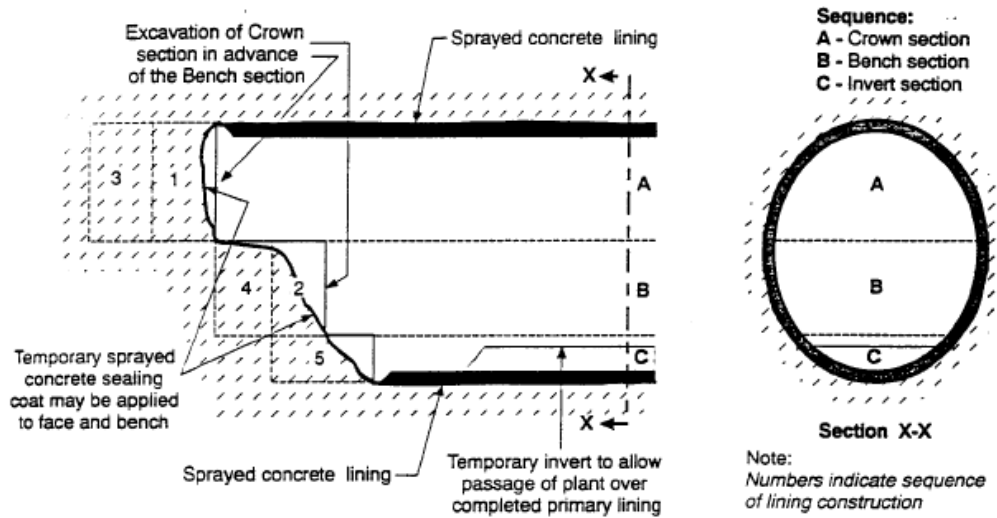
(α) Οι ηλώσεις βράχου (grouted nails) που αποτελούνται από μια χαλύβδινη ράβδο (τυπικά ράβδο οπλισμού StIV διαμέτρου 20-25mm) η οποία τοποθετείται εντός οπής στη βραχώμαζα (διαμέτρου 38-50mm) που πληρούται με ένεμα (τσιμεντένεμα ή ένεμα συνθετικής ρητίνης). Οι ηλώσεις αυτές είναι συνήθως προσωρινές (δηλαδή έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής) μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως μόνιμες με κατάλληλη προστασία από τη διάβρωση (double corrosion protection).

(β) Οι ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση τύπου Swellex (που παράγονται από την εταιρεία Atlas-Corco) ή τύπου Split-Set (που παράγονται από την εταιρεία Ingersoll-Rand). Οι ηλώσεις αυτές αποτελούνται από κοίλη μεταλλική διατομή και αποκτούν συνεχή πρόσφυση με τη βραχώμαζα με εισπίεση νερού στο εσωτερικό της διατομής που προκαλεί τη διόγκωσή της. Λόγω έλλειψης προστασίας από τη διάβρωση αλλά και λόγω της λεπτότοιχης διατομής τα αγκύρια αυτά έχουν μικρή διάρκεια ζωής. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι αναλαμβάνουν φορτία πολύ γρήγορα επειδή δεν απαιτούν την πήξη του ενέματος για την επίτευξη πρόσφυσης με την περιβάλλουσα βραχώμαζα.

4.14.3. Χαλύβδινες νευρώσεις

Οι χαλύβδινες νευρώσεις λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων. Οι χαλύβδινες νευρώσεις τοποθετούνται κατά τη διατομή της σήραγγας και είναι των εξής τύπων:

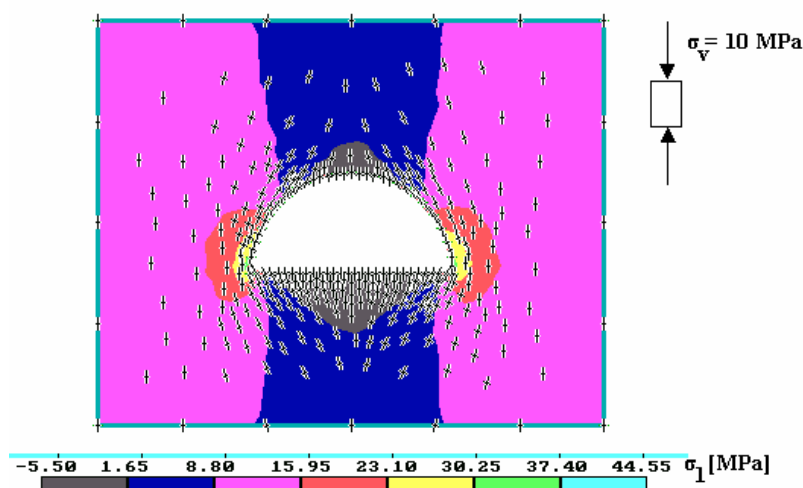
1. Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB100-160.
2. Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) που αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτύωματος.
3. Συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού (π.χ. 4-6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες σε αποστάσεις της τάξεως του μέτρου).



Σχήμα 16. Διάνοιξη σήραγγας σε τρεις φάσεις καθ' ύψος

4.15. Αστοχία σηράγγων

Κατά την κατασκευή υπογείων έργων είναι γεγονός ότι οποιοσδήποτε τύπος εδαφικής μάζας ή βραχομάζας - εκτός από την κινούμενη άμμο - αναπτύσσει «φυσικό θόλο» στην γειτονιά αυτών. Αυτή η ιδιότητα των γεωυλικών είναι που επιτρέπει την όρυξη ανοιγμάτων σ'αυτά. Η τέχνη της σηραγγοποιίας έγκειται στην μικρότερη δυνατή διαταραχή αυτού του τόξου κατά την εξόρυξη και στην πρόβλεψη των τάσεων και των παραμορφώσεων και όχι στην εκ των υστέρων αντιμετώπιση υψηλών τάσεων και μετατοπίσεων με μέτρα υποστήριξης. Στο παράδειγμα του Σχ. 17 φαίνεται ο σχηματισμός ενός τέτοιου τόξου πέριξ της ημικυκλικής σήραγγας – στην οροφή και στο δάπεδο αντιστοίχως - σε συνεχές, ομογενές και ισότροπο πέτρωμα.



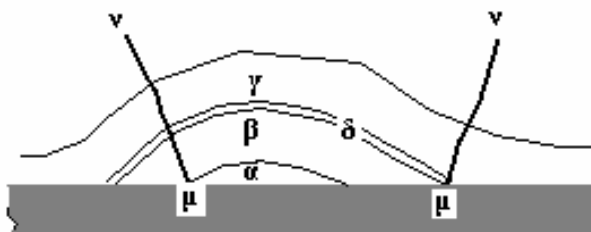
Σχήμα 17. Διάγραμμα κυρίων τάσεων πέριξ ημικυκλικής στοάς σε μονοαξονικό πεδίο επί τόπου τάσεων

Οι περισσότεροι κίνδυνοι κατά την διάνοιξη υπογείων έργων οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα. Όταν το πέτρωμα είναι συνεχές και ομοιογενές τότε δεν υπάρχει κίνδυνος.

Συνήθως όμως οι μάζες των εδαφών και των πετρωμάτων είναι πτυχωμένες, διασχίζονται από διακλάσεις ή είναι ανομοιογενείς, που σημαίνει ότι κακή εκτίμηση – πρόβλεψη αυτών των γεωλογικών συνθηκών μπροστά από το μέτωπο εγκυμονεί κινδύνους κατά την εξόρυξη.

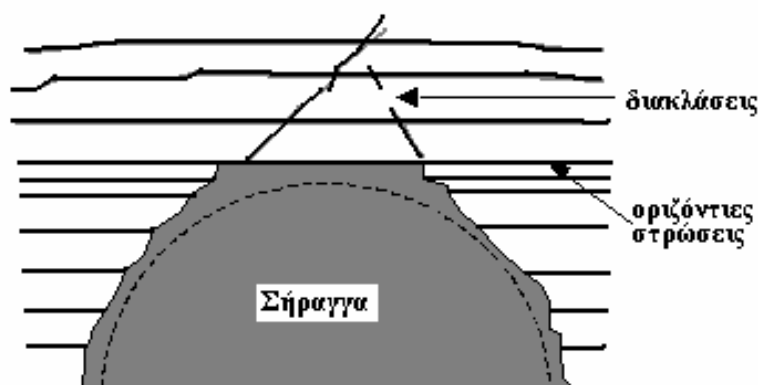
Μιά συνήθης περίπτωση αστοχίας σηράγγων παρουσιάζεται στο Σχ.8. Αφού το μέτωπο έχει προχωρήσει από ένα φαινομενικά καλό πέτρωμα, οι πτυχώσεις (α) και

(β) έχουν απωλέσει το δάπεδο τους εξαιτίας της εξόρυξης. Το υπόγειο ύδωρ που διεισδύει μέσω των ρηγμάτων (μν) διαλυτοποιεί το υλικό πληρώσεως και συνοχής που συγκρατεί τις στρώσεις μεταξύ των με συνέπεια το ογκοτεμαχισμένο πέτρωμα να καταπέσει εντός της σήραγγος.



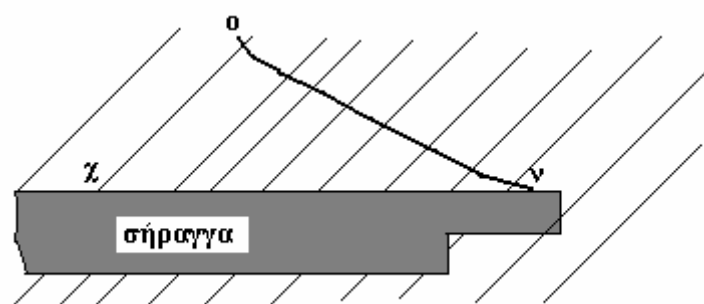
Σχήμα 18. Κίνδυνος κατάπτωσης της οροφής λόγω υποσκαφής – κατά την όρυξη σήραγγος – των πτυχώσεων (α) και (β). Το ύδωρ που εισέρχεται από τα ρήγματα (μν) θα διαλυτοποιήσει το υλικό συ-νοχής (δ) που συγκρατεί το ογκοτεμάχιο πετρώματος στη θέση του.

Αστοχία στην οροφή μιας σήραγγος μπορεί επίσης να εκδηλωθεί αν η βραχομάζα διασχίζεται από πυκνό δίκτυο οριζοντίων στρώσεων (λ.χ. λεπτοπλακώδεις ασβεστολιθικές μάζες, σχιστόλιθοι κ.λπ.). Αν η οροφή της σήραγγας που φαίνεται στο Σχ. 19 αφηθεί ανυποστήρικτη για αρκετό χρονικό διάστημα, τότε η ογκοτεμαχισμένη στρώση της οροφής θα χάσει την συνοχή της εξαιτίας της εκτόνωσης των τάσεων στην περιοχή αυτή και θα κατακρημνισθεί. Παρουσία ύδατος – που υπάρχει πάντα σε ρηγματωμένες μάζες πετρωμάτων – η πτώση της οροφής είναι βεβαία. Συνεπώς, και στις δύο περιπτώσεις των Σχ. 8 και 9 η αστοχία της οροφής θα αποφευχθεί όταν η υποστήριξη τοποθετηθεί πριν από την κρίσιμη χαλάρωση της βραχομάζας (λόγω της εκτόνωσης των τάσεων).



Σχήμα 19. Κίνδυνος κατάπτωσης οροφής λόγω οριζόντιας στρωσιγένειας του πετρώματος και διακλάσεων μεγάλης κλίσης (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).

Μια άλλη κατάσταση πιθανής αστοχίας της οροφής σήραγγος παρουσιάζεται στο Σχ. 20. Αν από το ρήγμα (ον) μεταφέρεται ύδωρ τότε η ζώνη αστοχίας περικλείεται μεταξύ του (χ) και του (ν), ήτοι οποιοδήποτε ογκοτεμάχιο που βρίσκεται σ' αυτή τη ζώνη μπορεί να κατακρημνισθεί ή πιθανώς καταπέσει όλη η μάζα του πετρώματος κάτω από το ρήγμα.



Σχήμα 20. Διάνοιξη σήραγγας σε στρωσιγενές και ρηγματωμένο πέτρωμα, με παρουσία υδροφορίας στο ρήγμα (ον). (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).

Η μεταβολή των γεωλογικών συνθηκών κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας – λ.χ. απότμηση άλλου στρώματος πετρώματος - εγκυμονεί κίνδυνο αστοχίας αυτής. Στο Σχ. 21 το μέτωπο της σήραγγος έχει διατρυπήσει μαλακό σχηματισμό (Κ). Ακριβώς στη ζώνη μετάβασης υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κατάπτωσης της οροφής, στην περίπτωση δε που υπάρχει ρήγμα στο στρώμα (Κ) η κατάπτωση της οροφής θεωρείται βεβαία.



Σχήμα 21. Μετάβαση από ένα τύπο πετρώματος (M) σε άλλο μαλακό πέτρωμα (K) κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Η αστοχία έχει μεγάλη πιθανότητα να εκδηλωθεί στην επαφή των δύο πετρωμάτων (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).

4.16. Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας

Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας πετρώματος που αποκαλύπτεται κατά την εκσκαφή υπογείου έργου εξαρτάται από τον προσανατολισμό, την γεωμετρία και την αντοχή των πιο επίμονων (μεγαλύτερου μήκους, persistent) ασυνεχειών του πετρώματος. Η ανάλυση της ευστάθειας, ο προσδιορισμός της γεωμετρίας της εξόρυξης και η πρόταση για ενδεχόμενα μέτρα υποστήριξης πριν την έναρξη της κατασκευής του υπόγειου έργου βασίζεται στα κάτωθι τρία βήματα:

1. Αποτύπωση των ασυνεχειών στη μάζα του πετρώματος
2. Εκτίμηση καταρχήν αν οι ασυνέχειες μπορούν να αποτημήσουν ογκοτεμάχια πετρώματος και αν ναι τότε αν αυτά είναι δυνητικά ασταθή σύμφωνα με δεδομένους μηχανισμούς αστοχίας
3. Προσδιορισμός της ευστάθειας των δυνητικά ασταθών ογκοτεμαχίων πετρώματος, προσδιορισμός πιθανών μέτρων υποστήριξης και αν είναι δυνατόν τροποποίηση της γεωμετρίας και του προσανατολισμού της εκσκαφής.

Η ευστάθεια ενός πρίσματος ή μιας σφήνας που είναι δυνητικά ασταθής εξαρτάται από:

- Τις τάσεις που ασκούνται επί των επιφανειών αυτών των ογκοτεμαχίων, οι οποίες εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των και από το εντατικό πεδίο περίξ της εκσκαφής
- Τις ιδιότητες τριβής των ασυνεχειών

- Το βάρος του πρίσματος ή της σφήνας, ήτοι του όγκου του και του μοναδιαίου βάρους του

Ο προσανατολισμός ενός επιπέδου ασυνέχειας

Ο προσανατολισμός ενός επιπέδου ασυνέχειας μπορεί να περιγραφεί με τη βύθιση και τη διεύθυνση είτε της γραμμής μέγιστης κλίσης είτε του πόλου του επιπέδου. Όταν έχει αποτυπωθεί ο προσανατολισμός πολλών ασυνεχειών είναι σύνηθες να παρουσιάζονται οι πόλοι των ασυνεχειών σε ημισφαιρική προβολή.

Για την ανάλυση της γεωμετρίας και της ευστάθειας των σφηνών που διαμορφώνονται στην γειτονιά κάποιου υπόγειου ανοίγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα “UNWEDGE” του τμήματος Rock Engineering του Πανεπιστημίου Toronto.

Η γεωμετρία της εκσκαφής μπορεί να έχει δημιουργηθεί πριν με την βοήθεια του AUTOCADTM. Σ' αυτήν την περίπτωση μπορεί να εισαχθεί στο παρόν πρόγραμμα ως αρχείο DXF. Το πρόγραμμα βασίζεται στη θεώρηση ότι οι σφήνες ορίζονται από 3 επίπεδα ασυνεχειών και φέρουν μόνο το ίδιο βάρος τους. Η επίλυση παρέχει το βάρος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σφήνας καθώς και τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζονται στην ανάλυση διαδοχικές ολισθήσεις σφηνών, αλλά ολισθαίνει μια σφήνα κάθε φορά. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι οι μετακινήσεις λαμβάνουν χώρα επί των ασυνεχειών και ότι οι σφήνες κινούνται ως άκαμπτα σώματα χωρίς εσωτερική παραμόρφωση ή ρηγμάτωση. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης με τη μορφή κοχλιών ή εκτοξευομένου σκυροδέματος δίνοντας την αντίστοιχη βελτίωση του συντελεστή ασφαλείας.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση αυτού του τύπου είναι απαραίτητο να ορισθεί ο όρος «επιφανειακή γραμμή». Ας θεωρηθεί οποιοδήποτε επίπεδο που είναι κάθετο στο μέτωπο της εκσκαφής και περνάει από την κορυφή του ογκοτεμαχίου (καλείται κάθετο επίπεδο). Οι ευθείες γραμμές που ορίζονται από την τομή αυτού του επιπέδου με την επιφάνεια του στοιχειώδους όγκου καλούνται «επιφανειακές γραμμές». Μία επιφανειακή γραμμή που ορίζεται επί του μετώπου της εκσκαφής καλείται «επιφανειακή γραμμή μετώπου», ενώ τα ζεύγη των επιφανειακών γραμμών που ορίζονται από τα επίπεδα των ασυνεχειών που περιβάλλουν το ογκοτεμάχιο καλούνται «επιφανειακές γραμμές του ογκοτεμαχίου». Κάθε γωνία του ογκοτεμαχίου παριστά μια επιφανειακή γραμμή ογκοτεμαχίου που είναι κοινή σε δεδομένο ζεύγος αλληλοτεμνομένων επιπέδων ασυνεχειών.

Για να μπορεί να μετακινηθεί προς την ανοικτή εκσκαφή ένας στοιχειώδης όγκος πετρώματος κάτω από την επίδραση της βαρύτητας πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής τρεις κινηματικές συνθήκες:

1. Όλα τα ζεύγη των επιφανειακών γραμμών του ογκοτεμαχίου πρέπει είτε να είναι παράλληλα είτε αποκλίνουντα από το μέτωπο της εκσκαφής (οροφή ή παραμέντα).

2. Τουλάχιστον μια επιφανειακή γραμμή ογκοτεμαχίου πρέπει να κλίνει προς τα κάτω από την οριζόντια προς το μέτωπο της εκσκαφής.

3. Όλες οι επιφανειακές γραμμές του ογκοτεμαχίου πρέπει να εκτείνονται από την κορυφή του και να «ξετρυπούν» στο μέτωπο της εκσκαφής.

Αν οι παραπάνω φαινομενικά «τετριμμένες» κινηματικές συνθήκες ικανοποιούνται και αν οι δυνάμεις διαταραχής υπερβαίνουν τις δυνάμεις αντίστασης τότε ο στοιχειώδης όγκος είτε θα ολισθήσει κατά την έννοια επιφανειακής γραμμής του είτε θα κατακρημνισθεί κατά την κατακόρυφη έννοια.

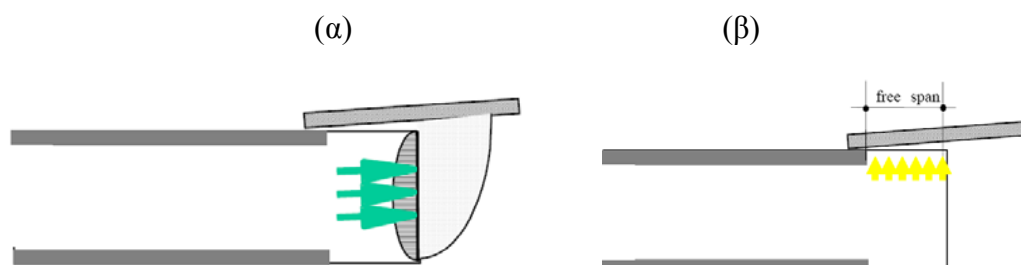
Η κακή εκτίμηση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν σε ένα υπόγειο έργο με πιθανότητα αστοχίας του γίνεται λόγω πτωχής γνώσης των μηχανισμών παραμόρφωσης, αστοχίας και αστάθειας.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την φάση της κατασκευής αβαθών σιράγγων είναι η αστοχία του μετώπου εκσκαφής. Η κατασκευή αβαθών σιράγγων δεν είναι ίδια όπως οι επιφανειακές γεωτεχνικές κατασκευές, όπου επέρχεται φυσική ισορροπία δυνάμεων, μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους, μετά από την ολοκλήρωση της κατασκευής με την εμφάνιση πεπερασμένων συνήθως καθιζήσεων που είναι αναγκαίες για την παραλαβή των φορτίων. Στις υπόγειες κατασκευές όπως οι σήραγγες γίνεται έντονη διαταραχή της υπάρχουσας ισορροπίας που συνίσταται κυρίως στην αφαίρεση εδαφικών μαζών και την δημιουργία ενός τρισδιάστατου κενού. Η έκταση και ένταση της προσχεδιασμένης αυτής διαταραχής δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητές.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των υπόγειων κατασκευών είναι, ότι το στάδιο στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη παραλαβή φορτίων από την κατασκευή δεν βρίσκεται ούτε στην έναρξη των εργασιών αλλά ούτε στο πέρας αυτών. Το στάδιο που μεσολαβεί ανάμεσα στα δυο προαναφερθέντα είναι αυτό που παρουσιάζει τη μέγιστη επικινδυνότητα. Για να κατανοήσει κανείς ποσό 'ευαίσθητο' είναι αυτό το ενδιάμεσο στάδιο, αρκεί να καταλάβει ότι η σωστή υποστήριξη της σήραγγας και η προκύπτουσα ανακατανομή των τάσεων γύρω από αυτήν είναι οι παράγοντες που

καθορίζουν και το χρόνο ζωής της. Η υποστήριξη και παραλαβή των φορτίων μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους (Σχήμα 22):

- Υποστήριξη στο μέτωπο της σήραγγας
- Υποστήριξη μπροστά από το μέτωπο



Σχήμα22: α) Υποστηριζόμενο μέτωπο β) Υποστηριζόμενο βήμα εκσκαφής (forepoling)

Μέχρι την δεκαετία του 1970 δεν είχαν αποκτηθεί πολλά δεδομένα σχετικά με την μετακίνηση των εδαφών γύρω από την σήραγγα. Από τότε μέχρι σήμερα τα δεδομένα ολοένα και αυξάνουν αλλά η αλλαγή επήλθε κυρίως χάρη στις μετρήσεις που έγιναν στις σήραγγες της Βαλτιμόρης και της Ουάσινγκτόν D.C.

4.17.Μετρήσεις των μετακινήσεων

4.17.1 .Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας

1. Τοπογραφική αποτύπωση της μετακίνησης σε τρεις άξονες (3-D convergency). Αμέσως μετά την εκσκαφή της σήραγγας τοποθετούνται στο τοίχωμα (με κατάλληλα βλήτρα) οπτικοί ανακλαστήρες (reflex targets). Οι συντεταγμένες στο χώρο των ανακλαστήρων μετρούνται σε τακτά διαστήματα με τοπογραφικό όργανο (total station). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης ενός σημείου του τοιχώματος της σήραγγας ή η σχετική απόσταση μεταξύ δυο σημείων του τοιχώματος. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση σκόπευσης, την ακρίβεια του οργάνου αλλά και άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα και η παρουσία καυσαερίων στη σήραγγα. Η συνήθης ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων είναι 2-4mm.

2. Χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling). Με τοπογραφικό όργανο (χωροβάτη) μετράται το υψόμετρο στόχων που τοποθετούνται στο δάπεδο και τις παρειές της σήραγγας. Η συνήθης ακρίβεια των μετρήσεων αυτών είναι 1-2mm.

3. Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δυο σημείων στο τοίχωμα της σήραγγας με μεταλλική μετροταινία (tape extensometer). Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του 0.5mm.

4.17.2. Μετακινήσεις της βραχόμαζας

1. Εκτασιόμετρα ράβδου τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (multi-point rodextensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετούνται μεταλλικές ράβδοι των οποίων το ένα άκρο πακτώνεται εντός της γεώτρησης (με κάποιο σύστημα αγκύρωσης) και το άλλο άκρο προεξέχει ελαφρώς από το στόμιο της γεώτρησης. Στην ίδια γεώτρηση μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες της μιας ράβδοι που πακτώνονται σε διάφορα βάθη. Με το όργανο αυτό μετράται η σχετική μετακίνηση του σημείου πακτώσεως της ράβδου ως προς το στόμιο της γεώτρησης (δηλαδή ως προς το τοίχωμα της σήραγγας, εφόσον οι γεωτρήσεις γίνονται από το εσωτερικό της σήραγγας).

2. Μαγνητικά εκτασιόμετρα τοποθετούμενα εντός γεωτρήσεων (magnetic probe extensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται πλαστικός σωλήνας ο οποίος φέρει μεταλλικούς δακτυλίους σε τακτά διαστήματα (π.χ. ανά 0.50m). Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεωτρήσεως με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση, εισάγεται στο σωλήνα μια βολίδα η οποία με μαγνητική μέθοδο μετρά την απόσταση μεταξύ των δακτυλίων. Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.

3. Ολισθαίνοντα εκτασιόμετρα (sliding micrometer). Εντός γεώτρησης τοποθετείται ειδικός πλαστικός σωλήνας ο οποίος σε τακτά διαστήματα φέρει μεταλλικούς δακτυλίους κατάλληλου σχήματος (measuring marks). Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεώτρησης με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση εισάγεται στο σωλήνα μεταλλικό στέλεχος που ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα και σταματά (κλειδώνει) στις θέσεις των μεταλλικών δακτυλίων. Με τον τρόπο αυτό μετράται η σχετική απόσταση μεταξύ των δακτυλίων με μεγάλη ακρίβεια (της τάξεως του

0.01mm). Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχόμαζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχόμαζας.

4. Αποκλισιόμετρα (inclinometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται (και πακτώνεται με τσιμεντένεμα) ειδικός πλαστικός σωλήνας. Κατά τη μέτρηση εισάγεται εντός του σωλήνα ειδική βολίδα η οποία εφαρμόζει ακριβώς και ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα. Η βολίδα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό σύστημα (ηλεκτρονικό εκκρεμές) με το οποίο καταγράφεται η απόκλιση από την κατακόρυφο της βολίδας σε κάθε θέση.

Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση του σωλήνα σε διεύθυνση εγκάρσια προς τον άξονά του. Τα αποκλισιόμετρα συνήθως τοποθετούνται από την επιφάνεια του εδάφους σε κατακόρυφη διεύθυνση και μετρώνται οι οριζόντιες αποκλίσεις του σωλήνα με την πάροδο του χρόνου.

4.17.3. Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους

Οι βυθίσεις (καθιζήσεις) της επιφάνειας του εδάφους λόγω της κατασκευής υπογείων έργων μπορούν να μετρηθούν με τα εξής όργανα:

1. Με χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση (levelling) με χρήση χωροβάτη.

2. Με οριζοντίως διατεταγμένα αποκλισιόμετρα (electro-levels). Με τα όργανα αυτά μετράται η απόκλιση από την οριζόντια διεύθυνση σε διάφορα σημεία μιας πρακτικώς οριζόντιας γραμμής (π.χ. κατά μήκος του δαπέδου ενός κτιρίου). Με ολοκλήρωση των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθούν οι βυθίσεις των σημείων της αρχικώς οριζόντιας γραμμής.

3. Με όργανα μέτρησης του ανοίγματος ρωγμών (crack meters). Τέτοια όργανα τοποθετούνται π.χ. στη μεσοτοιχία γειτονικών κτιρίων με σκοπό να μετρηθεί η σχετική απομάκρυνσή τους.

4.18. Μετρήσεις των πιέσεων

1. Οι εδαφικές πιέσεις στην επένδυση της σήραγγας μπορούν να μετρηθούν με κύτταρα πίεσεως (pressure cells) που τοποθετούνται στη διεπιφάνεια κατά την κατασκευή της επένδυσης.

2. Οι υδατικές πιέσεις στο έδαφος γύρω από μια σήραγγα μπορούν να μετρηθούν με πιεζόμετρα. Τα πιεζόμετρα είναι διαφόρων τύπων: υδραυλικά (stand-pipe), ηλεκτρικά (vibrating wire, strain gauge) ή πνευματικά (pneumatic).

4.19. Μετρήσεις δυνάμεων

1. Φορτία εφελκόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) μπορούν να μετρηθούν με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges) ή μετρητών φορτίου (load cells) κατά την κατασκευή των φορτιζόμενων στοιχείων. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μέτρηση του φορτίου σε ένα φορτιζόμενο στοιχείο στο οποίο δεν έχει τοποθετηθεί εκ των προτέρων σύστημα μέτρησης, η συνηθέστερη μέθοδος είναι η μέθοδος της αποφόρτισης με δειγματοληψία (overcoring). Κατά τη μέθοδο αυτή ανοίγεται μια μικρή οπή στο φορτιζόμενο στοιχείο, τοποθετείται ένα σύστημα τριών ηλεκτρομηκυνσιομέτρων τα οποία στη συνέχεια πακτώνονται εντός της οπής με εποξειδική ρητίνη. Στη συνέχεια αφαιρείται ένα αρκετά μεγάλο τμήμα του φορτιζόμενου στοιχείου που περιλαμβάνει και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Κατά την αφαίρεση (overcoring) το στοιχείο αποφορτίζεται και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα φορτίζονται με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του στοιχείου πριν αφαιρεθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Βραχώμαζα είναι ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδεις υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επιτόπου και σε μεγάλη έκταση (Κούκης & Σαμπατάκης 2007). Με το γενικό όρο ασυνέχεια ορίζεται οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος, που έχει μηδενική ή χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό (Τσουτρέλης 1985).

Πρακτικά περιλαμβάνει τις διακλάσεις (επιφάνεια αποχωρισμού τεμαχών τεκτονικής προέλευσης (ρωγμάτωση) πάνω στην οποία δεν παρατηρείται σχετική μετακίνηση των παρειών), τις ασθενείς διαστρώσεις (επιφάνεια αποχωρισμού παράλληλη με την αρχική επιφάνεια ιζηματογένεσης του υλικού, που διαχωρίζει τα διάφορα στρώματα του υλικού), τα ασθενή επίπεδα σχιστότητας (επιφάνεια που προήλθε από παράλληλο προσανατολισμό φυλλωδών ορυκτών των μεταμορφωμένων πετρωμάτων), τις ασθενείς ζώνεις και τις μεταπτώσεις.

Υπάρχουν επιπλέον και οι μικροσκοπικής κλίμακας ασυνέχειες όπως η εκλεκτική εξαλλοίωση ορισμένων ορυκτών, οι μικρορωγμές κ.ά. οι οποίες επηρεάζουν τις εργαστηριακές δοκιμές αντοχής. Η μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υλικού όπως προσδιορίζεται εργαστηριακά είναι προφανές ότι δεν μπορεί να επεκταθεί στη βραχώμαζα, καθόσον οι εκτιμώμενες παράμετροι αναφέρονται στα υγιέστερα δείγματα του βράχου που είναι απαλλαγμένα από ασυνέχειες.

Η προϊστορία της φόρτισης παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη της βραχώμαζας. Ο χρόνος ως παράγοντας που επηρεάζει τη βραχώμαζα έχει μεγάλη σημασία, αφού η γεωλογική δραστηριότητα συνεχίζεται εσαεί αν και στο χρόνο ζωής ενός τεχνικού έργου οι τεκτονικές δραστηριότητες θεωρούνται αμελητέες. Φαινόμενα όμως όπως ο ερπυσμός (η συνεχόμενη αύξηση της παραμόρφωσης με σταθερή τάση) και της χαλάρωσης (η συνεχόμενη μείωση της παραμόρφωσης με σταθερή τάση) έχουν χρονική διάσταση σε αντίθεση με τη θεωρία ελαστικότητας -τη βάση της μηχανικής και κατ' επέκταση και της βραχομηχανικής- που είναι αμετάβλητη χρονικά. Ένα υπόγειο έργο καλείται να ανακατανείμει τις υπάρχουσες τάσεις του βραχώδους υλικού κατά τρόπο ώστε να είναι εφικτή η παραμονή του μέσα στη

βραχώμαζα τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του έργου. Η παρουσία του υπόγειου νερού έχει επίσης μεγάλη σημασία αν και οι πιέσεις των πόρων δε λαμβάνονται υπόψη γιατί ο βράχος θεωρείται συμπαγές υλικό στο οποίο έχει επίδραση η υδραυλική του αγωγιμότητα μόνο μέσω των ασυνεχειών.

5.2. Ταξινόμηση βραχώμαζας

Η χρησιμοποίηση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας έχουν τους παρακάτω βασικούς στόχους:

- Πρώτον να ταξινομηθεί η βραχώμαζα σε επιμέρους κατηγορίες που η κάθε μία να χαρακτηρίζεται από παρόμοια μηχανική συμπεριφορά οπότε να απαιτεί και ενιαία αντιμετώπιση.

- Δεύτερον να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός τεχνικών έργων στο βράχο δίνοντας ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία και παραμέτρους της βραχώμαζας που απαιτούνται στην επίλυση των τεχνικών προβλημάτων σχεδιασμού. Τρίτον να αποτελεί μια κοινή βάση συνεννόησης μεταξύ των επιστημονικών ειδικοτήτων που ασχολούνται με τα γεωτεχνικά προβλήματα.

Η βραχώμαζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι ρηγματωμένη, διασχίζεται από ποικίλα συστήματα ασυνεχειών, παρουσιάζει μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

1. Η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχώμαζα
2. Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)
3. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους
4. Η παρουσία υπόγειου νερού

5.3. Μηχανική αντοχή του πετρώματος

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχώμαζα εκφράζεται μέσω της αντοχής (σ_{ci}) που προκύπτει κατά τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του "συμπαγούς" πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών, με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του "συμπαγούς" πετρώματος.

Με βάση την αντοχή (σ_{ci}), τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 3.: Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση την αντοχή

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ
(κατά ISRM, 1981)

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
> 250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με το νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

Η μηχανική αντοχή του "συμπαγούς" πετρώματος εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το βαθμό αποσάθρωσης. Με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 4. Κατηγορίες πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάθρωσης

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ
(κατά την British Geological Society, 1970))

Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης
Ελάχιστα αποσαθρωμένο (F.W)	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών
Ολίγον αποσαθρωμένο (S.W)	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού
Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα
Έντονα αποσαθρωμένο (H.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού
Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W)	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής
Έδαφος (R.S)	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)

5.4. Ο δείκτης κερματισμού της βραγύμαζας (RQD)

Η πρόβλεψη και ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών κατασκευής ενός τεχνικού έργου έχουν ιδιαίτερη σημασία για την τεχνική αρτιότητα της Μελέτης και την αξιοπιστία των ελέγχων ασφαλείας, οι οποίοι γενικώς περιλαμβάνουν :

- Υπολογισμό των εντατικών μεγεθών και των αντιδράσεων υποστήριξης
- Υπολογισμό των αναμενόμενων καταπονήσεων και παραμορφώσεων με βάση τα
 - εντατικά μεγέθη.
 - Έλεγχο της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων με βάση τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του δομικού υλικού που λαμβάνεται ως αντιπροσωπευτική της μηχανικής συμπεριφοράς για την προδιαγραφόμενη πορείας φόρτισης και τις παραδοχές συνοριακών συνθηκών.

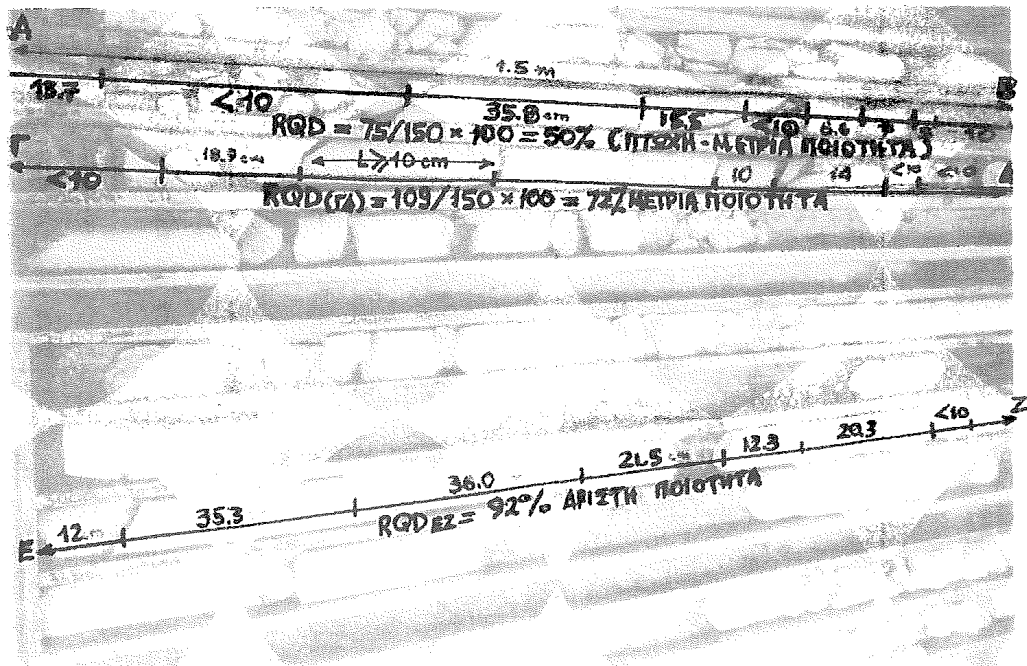
Η εφαρμογή των παραπάνω στη μελέτη κατασκευών για τις οποίες χρησιμοποιούνται τεχνητά υλικά έχει προσδιοριστικό χαρακτήρα, καθώς ο Μελετητής έχει τη δυνατότητα επιλογής, προδιαγραφής και ελέγχου των υλικών και διαστασιολόγησης των φερόντων στοιχείων σύμφωνα με επιλύσεις της κλασσικής Μηχανικής.

Οι διανοίξεις σηράγγων, εκσκαφές πρανών και, γενικότερα, τα γεωτεχνικά έργα στην επιφάνεια και στο εσωτερικό εδαφικών ή βραχωδών μαζών απαιτούν ιδιαίτερη προσέγγιση, όπως υπονοούν οι περιγραφικοί όροι των αντίστοιχων τεχνικών κλάδων της «*Εδαφομηχανικής*» και της «*Βραχομηχανικής*».

Η κλασσική Μηχανική (Αντοχή Υλικών - θεωρία Ελαστικότητας) παρέχει τις λύσεις ποικιλίας προβλημάτων Εδαφομηχανικής και Βραχομηχανικής. Αναγκαία συνθήκη για την ισχύ των λύσεων αυτών αποτελεί η συνέχεια των παραμορφώσεων του καταπονούμενου υλικού. Επομένως, οι θεωρίες ελαστικότητας και ελαστοπλαστικότητας ισχύουν για μέσα συνεχή, όπως π.χ. τα συνήθη δομικά υλικά (σκυρόδεμα, μέταλλα, κλπ.) και ορισμένες κατηγορίες φυσικών υλικών που αποτελούν μάλλον την εξαίρεση (*Μπαντής Στ., 2004-2005*).

Είναι γνωστό ότι τόσο τα εδαφικά όσο και τα βραχώδη υλικά διαφέρουν από τα ιδανικά πρότυπα των συνεχών μέσων. Τα εδαφικά υλικά αποτελούν μέσα ασυνεχή καθώς συνίστανται από κόκκους και πόρους. Εν τούτοις, στις κλίμακες των

γεωτεχνικών έργων η συμπεριφορά τους είναι δυνατό να προσομοιωθεί με εκείνη των συνεχών μέσων. Κατ' επέκταση οι Θεωρίες ελαστικότητας και ελαστοπλαστικότητας είναι εφαρμόσιμες σε επιλύσεις των περισσότερων προβλημάτων Εδαφομηχανικής ανεξαρτήτως της κλίμακας του υπό φόρτιση όγκου εδάφους. (Μπαντής, 2005).



Σχήμα 23. Διαβάθμιση ποιότητας βραχώμαζας σύμφωνα με το δείκτη ECD (Rock Quality Designation όπου $RQD = \Sigma L = 10 \text{ cm} / L$) (Μπαντής, 2005).

5.5. Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

(α) Δομική ασυνεχότητα

Τα βραχώδη υλικά διαφέρουν από τα εδαφικά και τα τεχνητά υλικά στο ότι πέραν των πόρων, μικρορωγμών και άλλων μικροσκοπικών "ατελειών" εμφανίζουν *δομική ασυνεχότητα μακροσκοπικής κλίμακας*, η επίδραση της οποίας συναρτάται με το μέγεθος του φορτιζόμενου όγκου. Αποτέλεσμα της κατάτμησης των βραχωδών μαζών από δομικές ασυνέχειες είναι η δημιουργία ενός μέσου ιδιότυπης μηχανικής συμπεριφοράς με κύρια χαρακτηριστικά την *ανομογένεια, ανισοτροπία και ανελαστικότητα*.

Τα περισσότερα βραχώδη υλικά σε άρρηκτη κατάσταση (πετρώματα) εμφανίζουν πόρους μεταξύ των κόκκων ή/και μικρορωγμές στην κρυσταλλική δομή τους. Οι ατέλειες αυτές χαρακτηρίζονται ως *μικροδομική ασυνεχότητα* των πετρωμάτων με την οποία συναρτώνται χαρακτηριστικά όπως η μη-γραμμική παραμορφωσιμότητα ιδιαίτερα σε χαμηλές τάσεις, η μειωμένη εφελκυστική αντοχή, η διακύμανση των εργαστηριακών μετρήσεων αντοχής και η γενική τάση μείωσης της αντοχής / δυσκαμψίας με αυξανόμενο μέγεθος δοκιμίου.

Η *μακροδομική ασυνεχότητα* προέρχεται από τις φυσικές *ασυνέχειες* που διατέμνουν τους περισσότερους βραχώδεις σχηματισμούς και οι οποίες επαναλαμβάνονται με επιλεκτικούς προσανατολισμούς, δημιουργώντας στο χώρο ένα σύμπλεγμα βραχωδών τεμαχίων.

Οι ασυνέχειες είναι επιφάνειες μηχανικής θραύσης που δημιουργήθηκαν από τεκτονικές ή άλλες φορτίσεις των (αρχικά) άρρηκτων γεωλογικών υλικών (πετρωμάτων). Σχετικοί όροι περιγράφουν τις ασυνέχειες σαν διακλάσεις, επίπεδα σχιστότητας, επίπεδα στρώσεων, ρήγματα, κ.λ.π. ανάλογα με τις συνθήκες γένεσης και εξέλιξης τους.

Οι ασυνέχειες διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- *Στρώσεις*
- *Ρήγματα*
- *Διακλάσεις*.

Οι *στρώσεις* αποτελούν επιφάνειες διαχωρισμού ιζηματογενών πετρωμάτων της ίδιας ή διαφορετικής λιθολογίας.

Από γεωλογικής πλευράς, οι στρώσεις υποδηλώνουν μεταβολή των συνθηκών ή υλικών κατά την ιζηματογένεση. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιπέδων στρώσεων ποικίλει από $< 10\text{mm}$ μέχρι $> 2\text{m}$.

Από γεωτεχνικής πλευράς, τα επίπεδα στρώσεων αποτελούν πιθανές επιφάνειες ολισθήσεων μεγάλης συνεχύτητας (μέχρι και αρκετών εκατοντάδων τετραγωνικών μέτρων). Αρκετά συχνά τα επίπεδα στρώσεων εμφανίζουν κυματοειδές ανάγλυφο, το οποίο προσφέρει μία σημαντική συνιστώσα διατρητικής αντοχής.

Τα *ρήγματα* είναι επιφάνειες θραύσης του βράχου, κατά μήκος των οποίων έχουν σημειωθεί σημαντικές μετατοπίσεις. Τα ρήγματα σχηματίστηκαν λόγω της συγκέντρωσης τάσεων τεκτονικής προέλευσης και υπέρβασης του ορίου της μηχανικής αντοχής του βράχου. Εμφανίζονται είτε μεμονωμένα ή σε επαλληλία, σχηματίζοντας ρηγματωμένες ζώνες.

Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και το μέγεθος των μετατοπίσεων, το υλικό στην επιφάνεια του ρήματος κατακερματίζεται λαμβάνοντας μορφή λιθοσυντρίμματος έως λεπτόκοκκου μαλακού υλικού. Εάν οι διατρητικές μετατοπίσεις ήταν μεγάλες, σχηματίζεται ζώνη μυλωνιτικού υλικού με σημαντικό αργιλικό κλάσμα, η οποία είναι δυνατόν να διαθέτει σχιστότητα και μηχανικά χαρακτηριστικά, που επηρεάζονται από τις συνθήκες υγρασίας με επακόλουθες συνέπειες τη δραστική μείωση της διατρητικής αντοχής, πιέσεις διόγκωσης, κλπ.. Τα ρήγματα εμφανίζονται σε πολύ μικρότερο αριθμό από τους άλλους τύπους ασυνεχειών, αλλά αποτελούν πάντοτε αιτία σοβαρών τεχνικών προβλημάτων, διότι διαθέτουν χαμηλή διατρητική αντοχή και δυσκαμψία και το μέγεθος τους συχνά αποκλείει την δυνατότητα τεχνικών επεμβάσεων.

Οι *διακλάσεις* είναι επιφάνειες θραύσης του βράχου, η δημιουργία των οποίων δεν συνοδεύθηκε από σχετικές μετατοπίσεις των επιφανειών. Υπάρχουν περισσότερες της μίας θεωρίες ως προς την προέλευση των διακλάσεων (*Hoek., Kaise, Bawden, 1995*).

Οι διακλάσεις εμφανίζουν επαναληψιμότητα και επιλεκτικό προσανατολισμό στο χώρο, σχηματίζοντας συστήματα. Μία βραχομάζα είναι δυνατόν να διατέμνεται από αρκετά συστήματα διακλάσεων, αλλά συνήθως τα κύρια συστήματα είναι 2-3. Ο χαρακτηρισμός "κύριο σύστημα" απορρέει από τη συχνότητα εμφάνισης, την έκταση των ασυνεχειών, κ.λπ. Αρκετά δευτερεύοντα συστήματα είναι δυνατόν να συνυπάρχουν, δημιουργώντας μία σύνθετη τεκτονική δομή. Το μήκος των

διακλάσεων ποικίλει από μερικά εκατοστά μέχρι αρκετές δεκάδες μέτρα (κατακλάσεις) ((Μπαντής, 2005).

(β) Αργές Μηχανικής του Ασυνεχούς Μέσου

Η μηχανική κατάσταση μιας διακλασμένης βραχόμαζας αντιστοιχεί σε εκείνη ενός υλικού, που έχει υποστεί αστοχία. Κατά συνέπεια, η αντοχή και παραμορφωσιμότητα της ασυνεχούς βραχόμαζας αντιστοιχούν στις "παραμένουσες" ιδιότητες του μητρικού πετρώματος καθώς οι ασυνέχειες διευκολύνουν τον αποχωρισμό των άρρηκτων βραχωδών τεμαχίων διό μέσου μηχανισμών διατμητικής ολίσθησης, εφελκυστικής αποκόλλησης ή περιστροφής.

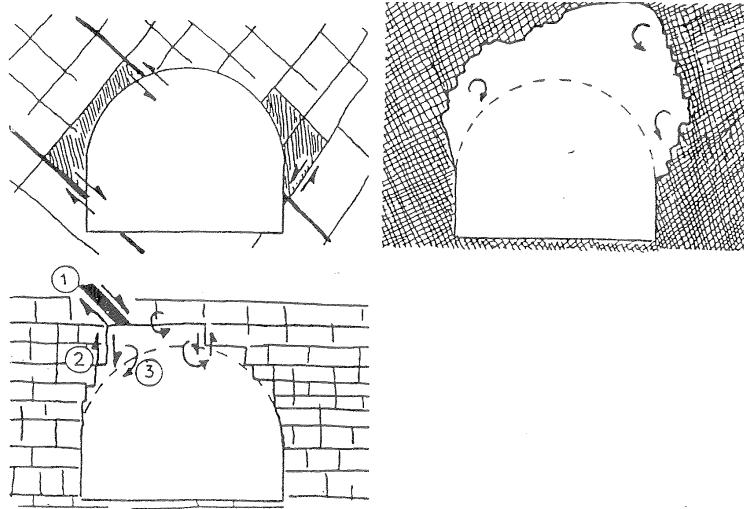
Οι δομικές ασυνέχειες διαθέτουν συνήθως μηδενική εφελκυστική αντοχή κάθετα προς τα επίπεδα τους και προσανατολίζουν τις διατμητικές τάσεις παράλληλα προς αυτά.

Κατά συνέπεια οι ασυνέχειες στο σύνολο τους, και εφόσον δεν παρουσιάζουν τυχαία κατανομή και διάταξη στο χώρο προκαλούν εξαιρετική ανισοτροπία στην αντοχή και παραμορφωσιμότητα της βραχόμαζας. Επίσης, καθορίζουν την υδραυλική αγωγιμότητα καθώς παρέχουν τους κύριους "αγωγούς" διακίνησης του υπόγειου νερού.

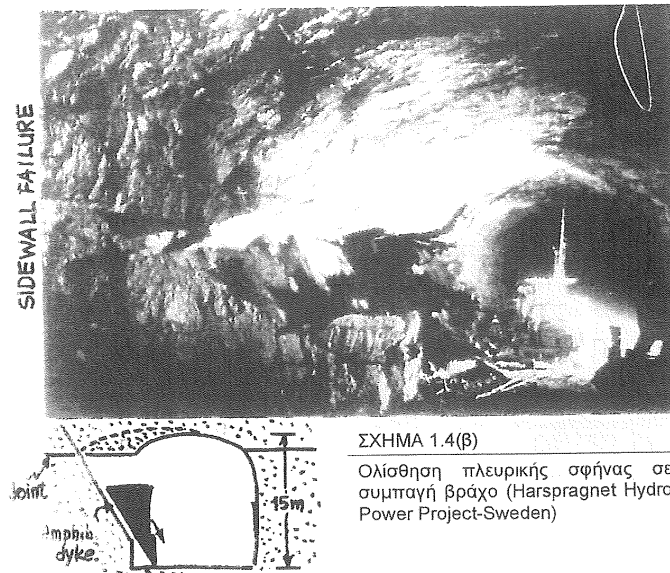
Στα παραδείγματα του Σχήματος 24 εικονίζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις δυνητικής και πραγματικής αστάθειας σηράγγων. Η έννοια της "δυνητικής αστάθειας" αναφέρεται στο γεωμετρικά δυσμενή προσανατολισμό των ελεύθερων επιφανειών της κατασκευής σε σχέση με τον προσανατολισμό των επιπέδων ασυνεχειών.

Στις φωτογραφίες του Σχήματος 25 παρουσιάζονται παραδείγματα τυπικών ασυνεχών βραχωδών μαζών.

Στο Σχήμα 26 σημειώνονται τυπικά όρια διακύμανσης της ποιότητας βραχόμαζας ανάλογα με το βαθμό κερματισμού και τα αντίστοιχα όρια ισχύος κατάλληλων μεθόδων ανάλυσης. Μια ενδεικτική διαβάθμιση της ποιότητας σε σχέση με το βαθμό κερματισμού δίδεται με τους πυρήνες γεωτρήσεως χαρακτηριζόμενους με το δείκτη RQD ((Μπαντής, 2005).



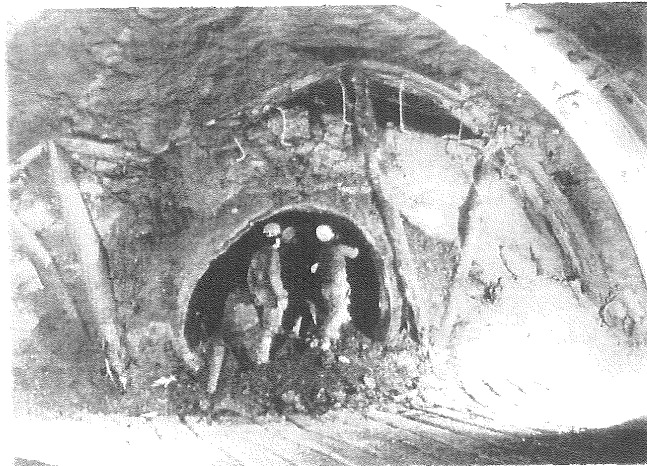
Σχήμα 24. Τοπικές μορφές αστάθειας σχετιζόμενες με τη δομική γεωμετρία και το βαθμό κερματισμού. (Μπαντής, 2005).



ΣΧΗΜΑ 1.4(β)

Ολίσθηση πλευρικής σφίνας σε συμπαγή βράχο (Harspragnet Hydro Power Project-Sweden)

Σχήμα 25. Ολίσθηση πλευρικής σφίνας σε συμπαγή βράχο(Μπαντής, 2005).



ΣΧΗΜΑ 1.4(γ)

Καθολική αστοχία τμήματος της Σήραγγας Μετσόβου σε φλύσχη. Η αστοχία έλαβε χώρα σε τμήμα 67m και αρκετούς μήνες μετά τη διάνοιξη και υποστήριξη.

Σχήμα 26. Καθολική αστοχία τμήματος της Σήραγγας Μετσόβου σε φλύσχη. Η αστοχία έλαβε χώρα σε τμήμα 57 m και αρκετούς μήνες μετά τη διάνοιξη και υποστήριξη (Μπαντής, 2005).

5.6. Επιρροή του υπόγειου νερού

Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, ιδίως σε βραχώμαζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχώμαζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχώμαζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχώμαζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως (Καββαδά, 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

6.1. Εισαγωγή

Είναι απαραίτητο πριν την κατασκευή μίας σήραγγας να προηγείται από μία εμπεριστατωμένη μελέτη της κατάστασης του εδάφους. Η ανάλυση αυτής της μελέτης θα οδηγήσει σε καλύτερη επιλογή των μηχανημάτων και των μεθόδων διάνοιξης. Στα αρχικά στάδια, ο οριζόντιος και ο κάθετος προσανατολισμός της σήραγγας θα βελτιστοποιηθεί βάση της γεωτεχνικής μελέτης ώστε να αποφευχθεί το ασταθές ή πολύ σκληρό έδαφος όπως επίσης και θύλακες νερού.

Σε μερικές περιπτώσεις, συμβατικές μέθοδοι της γεωτεχνικής μελέτης δεν παράγουν επαρκείς πληροφορίες για την εκτίμηση, για παράδειγμα, της φύσης των όγκων πετρωμάτων ή της ακριβής περιοχής ελαττωματικών ζωνών. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερο πρόβλημα σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προηγείται της κυρίως σήραγγας μία πιλοτική σήραγγα, ή φρεάτιο. Αυτή η σήραγγας μικρότερης διαμέτρου μπορεί να υποστηριχθεί ευκολότερα όταν προκύψουν απρόβλεπτες συνθήκες και τελικά να ενσωματωθεί στην τελική σήραγγα. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βαθιές οπές όπου παίρνονται δείγματα μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας.

6.2.Οι κύριες φάσεις για το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας σήραγγας

Οι κύριες φάσεις για το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας σήραγγας

Οι κύριες φάσεις για το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας σήραγγας, είναι:

α. Η αναγκαιότητα κατασκευής έργου

β. Οι εργασίες γραφείου

γ. Η υπαίθρια έρευνα

Α. Αναγκαιότητα κατασκευής έργου

Πέρα από την όποια αρχική διοικητική απόφαση, η αναγκαιότητα κατασκευής σήραγγας στο πλαίσιο ενός γραμμικού τεχνικού έργου, εκτός του ότι διευκολύνει την ασφαλή και σύντομη χάραξη, καθορίζεται και από συγκεκριμένες συνθήκες όπως:

(α) την απουσία ελεύθερου χώρου (κατοικημένη περιοχή -ΜΕΤΡΟ)

(β) τη διέλευση από μεγάλο ύψους φυσικό εμπόδιο (π.χ.βουνό)

γ) την παράκαμψη ενεργών ή πιθανά ενεργών ρηξιγενώνζωνών (ΠΑΘΕ, Κακιά Σκάλα, Καμένα Βούρλα κλπ).

Εργασίες γραφείου

Οι εργασίες γραφείου συνίστανται, όπως και σε κάθε γεωτεχνική μελέτη, στη συγκέντρωση όλων των αναγκαίων πληροφοριών που υπάρχουν για την περιοχή ενδιαφέροντος, προκειμένου να διευκολυνθεί η έρευνα και να μειωθεί το κόστος αυτής, όπως;

- Προγενέστερες εργασίες και έρευνες (γεωλογικές, υδρογεωλογικές, τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές, σεισμοτεκτονικές κλπ).
- Αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες της περιοχής.
- Τοπογραφικοί, μορφολογικοί, γεωλογικοί, τεκτονικοί υδρογεωλογικοί, τεχνικογεωλογικοί, κλπ χάρτες.
- Προγενέστερες γεωτρητικές έρευνες με επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές.
- Κάθε άλλη μονογραφία, μελέτη ή και έρευνα μπορεί να βοηθήσει στην πληρέστερη εκτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών στην επιφάνεια και σε βάθος.

Υπαίθρια έρευνα

Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο μελέτης,

(α) επηρεάζουν κάθε απόφαση που λαμβάνεται αναφορικά με το σχεδιασμό και την κατασκευή μιας σήραγγας,

(β) καθορίζουν το κόστος κατασκευής και

(γ) προδιαγράφουν σε ένα βαθμό τη συμπεριφορά του έργου κατά τη λειτουργία του.

Στον σχεδιασμό των σηράγγων πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στους εξής παράγοντες :

Είναι απαραίτητο πριν την κατασκευή μίας σήραγγας να προηγείται από μία εμπεριστατωμένη μελέτη της κατάστασης του εδάφους. Η ανάλυση αυτής της μελέτης θα οδηγήσει σε καλύτερη επιλογή των μηχανημάτων και των μεθόδων διάνοιξης. Στα αρχικά στάδια, ο οριζόντιος και ο κάθετος προσανατολισμός της σήραγγας θα βελτιστοποιηθεί βάση της γεωτεχνικής μελέτης ώστε να αποφευχθεί το ασταθές ή πολύ σκληρό έδαφος όπως επίσης και θύλακες νερού.

Σε μερικές περιπτώσεις, συμβατικές μέθοδοι της γεωτεχνικής μελέτης δεν παράγουν επαρκείς πληροφορίες για την εκτίμηση, για παράδειγμα, της φύσης των όγκων πετρωμάτων ή της ακριβούς περιοχής ελαττωματικών ζωνών. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερο πρόβλημα σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προηγείται της κυρίως σήραγγας μία πιλοτική σήραγγα, ή φρεάτιο. Αυτή η σήραγγα μικρότερης διαμέτρου μπορεί να υποστηριχθεί ευκολότερα όταν προκύψουν απρόβλεπτες συνθήκες και τελικά να ενσωματωθεί στην τελική σήραγγα. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βαθιές οπές όπου παίρνονται δείγματα μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας(wikipedia.org/).

Η κλίση των σηράγγων

Εντός σηράγγων σε οδούς της κατηγορίας Α οι κατά μήκος κλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 4%. Ιδιαίτερα σε σήραγγες μεγάλου μήκους (> 1km), πρέπει να επιδιώκεται η τιμή της μέγιστης κατά μήκος κλίσης να μην υπερβαίνει το 2.5%.

Τοπική Διατομή

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης διατομής μίας σήραγγας είναι :

- ο κυκλοφοριακός φόρτος και
- η γεωλογία της περιοχής

Επιλογή μηχανημάτων Εκσκαφής

Υπάρχουν πολλών ειδών TBM που λειτουργούν σε ένα εύρος συνθηκών, από σκληρά πετρώματα μέχρι έδαφος με θύλακες νερού

Σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης με τη θεώρηση των πλαστικών ζωνών

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μία "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960

Φάσεις εκσκαφής

- Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench).
- Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

Μέτρα άμεσης υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Αγκύρια βράχου: (α) Προεντεταμένα αγκύρια, (tensioned cables) που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης και (β) Παθητικά αγκύρια (rock-bolts) των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας

Χαλύβδινες νευρώσεις

Οι χαλύβδινες νευρώσεις λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του.

Αστοχία σήραγγων

Κατά την κατασκευή υπογείων έργων είναι γεγονός ότι οποιοσδήποτε τύπος εδαφικής μάζας ή βραχομάζας - εκτός από την κινούμενη άμμο - αναπτύσσει «φυσικό θόλο» στην γειτονιά αυτών. Αυτή η ιδιότητα των γεωυλικών είναι που επιτρέπει την όρυξη ανοιγμάτων σ'αυτά. Η τέχνη της σήραγγοποιίας έγκειται στην μικρότερη δυνατή διαταραχή αυτού του τόξου κατά την εξόρυξη και στην πρόβλεψη των τάσεων και των παραμορφώσεων και όχι στην εκ των υστέρων αντιμετώπιση υψηλών τάσεων και μετατοπίσεων με μέτρα υποστήριξης(Μπαντής, 2004-2005).

Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας

Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας πετρώματος που αποκαλύπτεται κατά την εκσκαφή υπογείου έργου εξαρτάται από τον προσανατολισμό, την γεωμετρία και την αντοχή των πιο επίμονων (μεγαλύτερου μήκους, persistent) ασυνεχειών του πετρώματος

Μετρήσεις των μετακινήσεων

Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας

Μετακινήσεις της βραχώμαζας

Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους

Μετρήσεις των εδαφικών πιέσεων

Μετρήσεις δυνάμεων (Φορτία εφελκόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) (*users.ntua.gr*).

Τέλος πρέπει να γίνεται η Ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης μιας σήραγγας έχει τους εξής σκοπούς:

1. Να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής, δηλαδή ότι το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας.

2. Να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχόμαζας και (εφόσον απαιτείται) της επιφάνειας του εδάφους είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή της σήραγγας και από την απαίτηση να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας αλλά και ταυτοχρόνως να ενεργοποιηθεί η αντοχή της βραχόμαζας σε ικανοποιητικό βαθμό.

3. Να προσδιορίσει τη διαδικασία εκσκαφής (αριθμός και διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής και μέγιστο βήμα προχώρησης) και το σύστημα άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων υποστήριξης, πρόγραμμα τοποθέτησης κλπ) τα οποία συνδυάζουν ικανοποιητική ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος (Τσιραμπίδης.,2002).

6.3. Μελέτη τεχνικογεωλογικών και γεωτεκτονικών συνθηκών

Οι σήραγγες αποτελούν έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από πλευράς μηχανικού, όμως άρρηκτα συνδεδεμένα (όσο κανένα άλλο τεχνικό έργο) με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες του χώρου διέλευσης, από το στάδιο σχεδιασμού του έργου μέχρι και αυτού της λειτουργίας του, καθώς:

οι παράγοντες μεθόδου κατασκευής συναρτώνται από:

(α) τις γεωτεκτονικές συνθήκες (γεωλογία – τεκτονική)

(β) το μήκος της σήραγγας

Συνεπώς οι γεωλογικές συνθήκες μαζί με την τεκτονική αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων , αφού η γεωμάζα σε αντίθεση με άλλες κατασκευές επιφέρει τις διάφορες φορτίσεις στη σήραγγα ενώ παράλληλα προσφέρεται σαν τοαρχικό μέσο υποστήριξης.

Καθώς δηλαδή η εκσκαφή προχωρεί, η αντοχή των σχηματισμών συνήθως κρατά τη σήραγγα ανοικτή για το αναγκαίο διάστημα εγκατάστασης της υποστήριξης.

Άρα, οι εδαφικοί ή βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν μια σήραγγα αποτελούν κατά κάποιο τρόπο υλικό κατασκευής, του οποίου οι γεωμηχανικές ιδιότητες (όπως και του σιδήρου και του μπετόν που χρησιμοποιείται) είναι σημαντικές.

Αναγκαία είναι λοιπόν η διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή κατασκευής, αφού βοηθά στον ορθολογικό σχεδιασμό του έργου για ασφάλεια και οικονομία, με:

Την κατανόηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών (ζώνες μειζόνων ασυνεχειών, πτυχώσεις, επωθήσεις, επιπτεύσεις, λεπιώσεις,) καθώς και της μικροτεκτονικής προκειμένου για βραχομάζα

6.4. Μελέτη καρστιγενής περιοχής

Για τη μελέτη καρστικών περιοχών απαιτείται μία ολιστική έρευνα που να καλύπτει ολόκληρο το εύρος των χαρακτηριστικών και την αλληλεπίδραση των διαδικασιών: γεωλογία, χημεία, μηχανική, επιστήμη του εδάφους, βιολογία, μετεωρολογία και, κυρίως, υδρολογία.

Ένα βασικό σημείο εκκίνησης για κάθε παρακολούθηση είναι η υδρογεωλογική και καρστική απογραφή. Αυτό μπορεί να αποθηκευτεί σε μορφή βάσης δεδομένων ή GIS (Geographic Information System). Θα πρέπει να καταγράφουν πηγές, καταβόθρες ρεύμα, δολίνες, σπηλιά συστήματα, βαφής, τον εντοπισμό και άλλων σχετικών πληροφοριών. Αυτό παρέχει ένα πλαίσιο στο οποίο λεπτομερείς εργασίες μπορούν στη συνέχεια να σχετίζονται. Πολλές από τις πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν από τους χάρτες, αεροφωτογραφίες, περιοδικά και εκθέσεις (Drew, Hotzl, 1999).

Υδρολογικές και γεωχημικές μετρήσεις των πηγών, βυθισμένων ρεμάτων, νερών που στάζουν σε σπηλιές παρέχον αρχαία βραχυπρόθεσμων αλλαγών στην ποιότητα του νερού και χημικών διεργασιών.

Οι σημαντικότερες μεταβλητές περιλαμβάνουν το pH, τη θερμοκρασία, Ca, Mg, Na, Cl, HCO₃, και SO₄. Ο γύψος θα μπορούσε να μετρηθεί από το ποσό του Ca SO₄ 2H₂ O (m³ από 1 χιλιόμετρο² ανά έτος) παρασυρθεί από υπόγεια απορροή. Η διάλυση αλατιού μπορεί να εκτιμηθεί με παρόμοιο τρόπο. Σε ορισμένες καρστικές περιοχές το ποσό των μεταβιβάσεων που πραγματοποιούνε καθίζηση επιφάνειας μπορεί να δώσει μια καλή ένδειξη του ρυθμού διάλυσης του υπεδάφους.

Άντληση δοκιμών σε πηγάδια είναι χρήσιμη για την αποσαφήνιση της φύσης του πορώδους και της διαπερατότητας των καρστικών υδροφόρων οριζόντων, όπως είναι η απλή παρακολούθηση των φυσικών αλλαγών της στάθμης των υδάτων στα ρεύματα σε σπηλιές.

Μελέτες ορυκτολογίας και γεωχημείας ιζημάτων του σπηλαιίου (με περίθλαση ακτίνων X, φωταύγεια, αναλογίες ισοτόπων και ιχνοστοιχεία), μπορεί να αποκαλύψουν το παρελθόν τις αλλαγές στη θερμοκρασία, την υγρασία, τα ποσοστά διείσδυσης και της χημείας των υπόγειων υδάτων.

Αυτές οι αλλαγές μπορεί να τοποθετηθούν σε ένα χρονικό πλαίσιο που χρονολογείται από καταθέσεις χρήση U-Θ, palaeomagnetic και Electron μέθοδοι μαγνητικού συντονισμού.

Στις αστικές περιοχές, είναι σημαντικό να εντοπιστούν και να θαφτούν οι καταβόθρες κοιλότητες και να παρακολουθούν τις δυνατότητές τους για την κατάρρευση, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό γεωφυσικών ερευνών, διερευνητικών γεωτρήσεων.

Παράγοντες που απειλούν την ακεραιότητα του σπηλαιίου και των καρστικών συστημάτων περιλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις ή υδρολογικές μεταβολές, ρύπανση των υπογείων υδάτων, καθώς και την άμεση ανθρώπινη επίδραση.

Η συχνότητα των μετρήσεων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και της σύστασης του εδάφους σε καρστικές εκτάσεις, τα οποία είναι εμφανώς ασταθή και μπορούν να αλλάξουν γρήγορα, συνήθως καταστροφικά.

Σε υγρά κλίματα, οι περισσότερες καταρρεύσεις της επιφάνειας γίνονται συνήθως κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά τις πλημμύρες.

Αλλάζουν τόσο γρήγορα τα συστατικά των υπόγειων υδάτων και η μόλυνση προχωρά τόσο γρήγορα ώστε απαιτούνται συνεχείς μετρήσεις, τουλάχιστον μία φορά τον μήνα. προκειμένου να ερμηνευτεί το καρστικό σύστημα.

Όμως οι μελέτες των καρστικών επιφανειών παρεμποδίζονται από το γεγονός ότι τα επιφανειακά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την υπόγεια κίνηση του νερού. Όταν δεν ξέρουμε αυτήν είναι αδύνατον να ερμηνευτεί η επιφάνεια σωστά.

Οι αλλαγές στα καρστικά επίπεδα είναι συχνά τόσο ξαφνικές και απρόβλεπτες ώστε είναι δύσκολο να σχεδιαστεί μία έγκυρη στρατηγική παρακολούθησης. Επομένως και το περιβάλλον στα σπήλαια είναι τόσο δύσκολο για τους ειδικούς να εργαστούν ώστε απαιτείται εξειδικευμένη τεχνογνωσία και εξοπλισμός (Τσιραμπίδης, 1983).

Οι καρστιγενείς περιοχές ανταποκρίνονται με μεγάλη ευαισθησία στις περιβαλλοντικές αλλαγές, και τα καρστικά χαρακτηριστικά ώστε περιέχουν πολλές ενδείξεις για το παρελθόν, τα κλιματικά και υδρολογικά γεγονότα και τις αλλαγές σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Είναι αβέβαιο να δοθεί το μέλλον μιας καρστιγενούς περιοχής επειδή οι πολλές αλλαγές είναι απότομες και ασυνεχής (Beck, 1989).

6.5. Ο σχεδιασμός σηράγγων

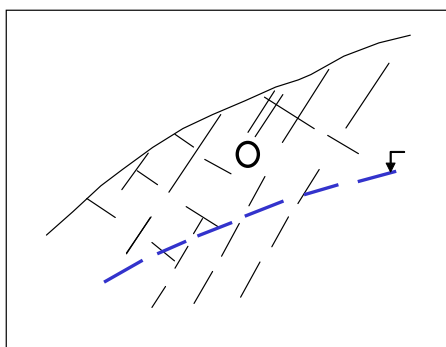
Ο σχεδιασμός των υπογείων έργων και των σηράγγων μπορεί να γίνει με διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως είναι:

1. Με την διαισθητική μέθοδο κατά την οποία ο μηχανικός εξετάζει επί τόπου τις γεωλογικές, τεκτονικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, καρότα γεωτρήσεων και αποτυπώσεις των ασυνεχειών και προτείνει το τρόπο εξόρυξης, τη διαστασιολόγηση της σήραγγος και την επιλογή και διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης (κοχλίες, πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος κ.λπ.)

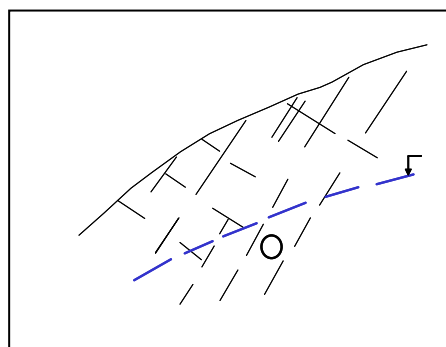
2. Με την εμπειρική μέθοδο ακολουθώντας κάποιο σύστημα (εμπειρικό) γεωμηχανικής ταξινόμησης των εδαφοβραχομαζών και εμπειρικά νομογράμματα, πίνακες ή τύπους.

3. Με την επιστημονική μεθοδολογία που βασίζεται αφενός μεν σε επί τόπου μετρήσεις των τάσεων ή/και των μετατοπίσεων και εργαστηριακές πειραματικές μετρήσεις της Εδαφομηχανικής και της Βραχομηχανικής, αφετέρου δε σε καταστατικούς νόμους της μηχανικής συμπεριφοράς των γεωϋλικών και σε θεμελιώδεις εξισώσεις της Μηχανικής (λ.χ. νόμοι διατήρησης ορμής και στροφορμής, νόμος διατήρησης μάζας και ενέργειας). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής συνήθως γίνεται η παραδοχή της συνέχειας του γεωλογικού μέσου (θεωρία της «Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου») και η μηχανική ανάλυση με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων ή συνορικών στοιχείων.

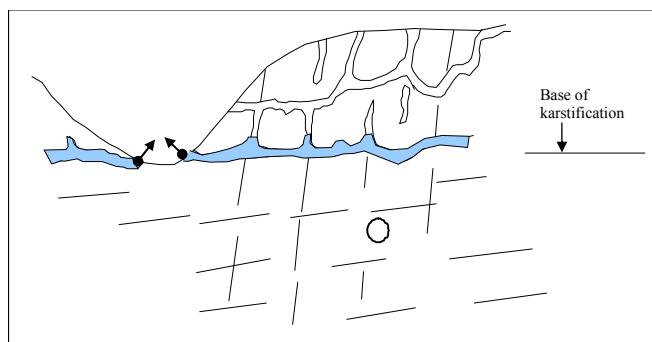
Λόγω της πολύπλοκης φύσης του προβλήματος και των κοστολογικών-χρονικών περιορισμών αλλά και της ακρίβειας που απαιτείται στο σχεδιασμό ενός υπόγειου έργου σπάνια εφαρμόζεται ξεχωριστά μία μέθοδος εκ των παραπάνω. Συνήθως η μεθοδολογία σχεδιασμού περιλαμβάνει και τις τρεις μεθόδους.



Σχήμα 27. Σήραγγα σε ακόρεστη ζώνη μη καρστικού με διακλάσεις ασβεστόλιθο Μαρίνος, Π., (2005)



Σχήμα 28. Σήραγγα κάτω από το επίπεδο νερού για μη καρστικό με διακλάσεις ασβεστόλιθο Μαρίνος, Π., (2005),



Σχήμα 29. Σήραγγα κάτω από το βασικό επίπεδο του Καρστ Μαρίνος, Π., (2005),

Συνιστώσες σχεδιασμού

Όπως ήδη έχουν προαναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια οι συνιστώσες σχεδιασμού ενός Έργου Σήραγγας είναι :

- Γεωμετρικός σχεδιασμός (άξονας χάραξης και διατομή)
- Γεωτεχνικός Σχεδιασμός (Προσωρινή Επένδυση) Μόνιμη επένδυση
- Στεγανοποίηση και αποστράγγιση
- Όργανα και παρακολούθηση
- Περιβαλλοντικές Θεωρήσεις

Τρόπος διάνοιξης σήραγγας

Κατόπιν επειδή οι σήραγγες είναι υπόγεια τεχνικά έργα σε εδαφικούς ή και βραχώδεις σχηματισμούς όταν η ανοικτή εκσκαφή δεν είναι εφικτή, πρέπει να αποφασίσουμε με ποιο τρόπο να γίνει η διάνοιξή τους, δηλαδή:

- (α) με κοπή και επανεπίχωση (cut and cover).
- β) με τη χρήση εκρηκτικών (drilling and blasting).

(γ) με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, όπως μηχανημάτων ολομέτωπης Κοπής

(δ) με τη βοήθεια ασπίδας προστασίας

(ε) με τη μορφή προκατασκευασμένων τμημάτων που τοποθετούνται στον πυθμένα για ζεύξη στενού διαύλου (π.χ. Άκτιο Πρέβεζας

(στ) με τη μορφή προκατασκευασμένων τμημάτων που ωθούνται μέσα στο έδαφος με τη βοήθεια υδραυλικών γρύλων (pipe jacking)

Σχεδιασμός των μέτρων υποστήριξης με τη θεώρηση των πλαστικών ζωνών

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικώς δεν αποτελεί μία "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960

Φάσεις εκσκαφής

- Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench).

- Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts).

Μέτρα άμεσης υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete)

Αγκύρια βράχου: (α) Προεντεταμένα αγκύρια, (tensioned cables) που αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες (strands) και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχώμαζας λόγω της προέντασης και (β) Παθητικά αγκύρια (rock-bolts) των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτισή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχώμαζας

Χαλύβδινες νευρώσεις

Οι χαλύβδινες νευρώσεις λειτουργούν κυρίως ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του.

Αστοχία σηράγγων

Κατά την κατασκευή υπογείων έργων είναι γεγονός ότι οποιοσδήποτε τύπος εδαφικής μάζας ή βραχομάζας - εκτός από την κινούμενη άμμο - αναπτύσσει «φυσικό θόλο» στην γειτονιά αυτών. Αυτή η ιδιότητα των γεωυλικών είναι που επιτρέπει την όρυξη ανοιγμάτων σ'αυτά. Η τέχνη της σηραγγοποιίας έγκειται στην μικρότερη δυνατή διαταραχή αυτού του τόξου κατά την εξόρυξη και στην πρόβλεψη των

τάσεων και των παραμορφώσεων και όχι στην εκ των υστέρων αντιμετώπιση υψηλών τάσεων και μετατοπίσεων με μέτρα υποστήριξης

Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας

Η ευστάθεια ασυνεχούς μάζας πετρώματος που αποκαλύπτεται κατά την εκσκαφή υπογείου έργου εξαρτάται από τον προσανατολισμό, την γεωμετρία και την αντοχή των πιο επίμονων (μεγαλύτερου μήκους, persistent) ασυνεχειών του πετρώματος

Μετρήσεις των μετακινήσεων

Μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας

Μετακινήσεις της βραχόμαζας

Μετακινήσεις (βυθίσεις) της επιφάνειας του εδάφους

Μετρήσεις των εδαφικών πιέσεων

Μετρήσεις δυνάμεων (Φορτία εφελκόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια, χαλύβδινα πλαίσια κλπ) (www.legah.metal.ntua.gr).

6.6. Ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης μιας σήραγγας έχει τους εξής σκοπούς:

1. Να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής, δηλαδή ότι το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας.

2. Να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχόμαζας και (εφόσον απαιτείται) της επιφάνειας του εδάφους είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή της σήραγγας και από την απαίτηση να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας αλλά και ταυτοχρόνως να ενεργοποιηθεί η αντοχή της βραχόμαζας σε ικανοποιητικό βαθμό.

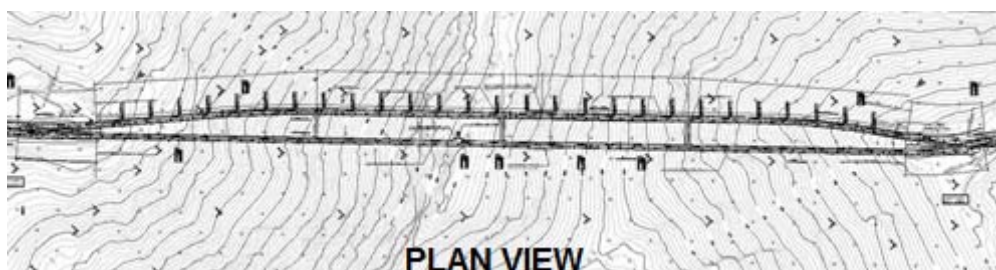
3. Να προσδιορίσει τη διαδικασία εκσκαφής (αριθμός και διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής και μέγιστο βήμα προχώρησης) και το σύστημα άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων υποστήριξης, πρόγραμμα τοποθέτησης κλπ) τα οποία συνδυάζουν ικανοποιητική ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΓΕΝΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

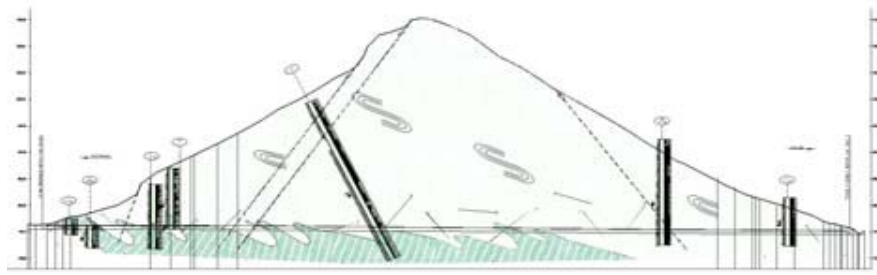
7.1. Σήραγγα Αρτεμισίου

Η σήραγγα Αρτεμισίου διανοίγεται εντός του ομώνυμου ορεινού όγκου. Πρόκειται για δίδυμη οδική σήραγγα μήκους 1403m με μία μικρή κατά μήκος κλίση 1% (σχ.30.). Ο δεξιός κλάδος της σήραγγας είχε κατασκευαστεί από το 1987 και εξυπηρετούσε μέχρι πρόσφατα την κυκλοφορία και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων ανέρχεται σε 400μ.



Σχήμα 30: Οριζοντιογραφία σήραγγας Αρτεμισίου. Διακρίνεται η σημαντική αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων

Για τον σχεδιασμό του γεωλογικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο οι πληροφορίες από τη διάνοιξη του δεξιού κλάδου (γεωτρήσεις, χαρτογραφίες μετώπου). Απαντώνται δύο κατηγορίες πετρωμάτων, Ασβεστόλιθοι και Ραδιολαρίτες. Ο σχηματισμός των Ραδιολαριτών αποτελείται από πρασινόφαιους ραδιολαρίτες, μαύρους κερατολίθους καθώς και ερυθρόφαιους σχιστόλιθους και ψαμμίτες. Πρόκειται για λεπτοστρωματώδη κερματισμένη βραχομάζα, μέτρια έως πολύ αποσαθρωμένη. Σε ότι αφορά στον ασβεστολιθικό σχηματισμό αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις, πτυχωμένους, ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένους, ελαφρά καρστικοποιημένους ασβεστολίθους με λεπτές παρεμβολές σχιστολίθων και ενστρώσεις κερατολίθων.



Σχήμα 31: Γεωλογικό μοντέλο σήραγγας Αρτεμεισίου.

Εφαρμόστηκαν τέσσερις κατηγορίες υποστήριξης σε μήκη και ποσοστά πολύ κοντά σε αυτά τα οποία είχαν προβλεφθεί από τη μελέτη. Παρουσιάστηκαν μικρότερες από τις αναμενόμενες εισροές υδάτων, κυρίως εντοπισμένες στις επαφές μεταξύ των δύο σχηματισμών. Οι περιορισμένες εισροές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι ο υφιστάμενος δεξιός κλάδος δρα αποστραγγιστικά αποτονώνοντας σημαντικά τις πιέσεις πόρων εντός της βραχομάζας.

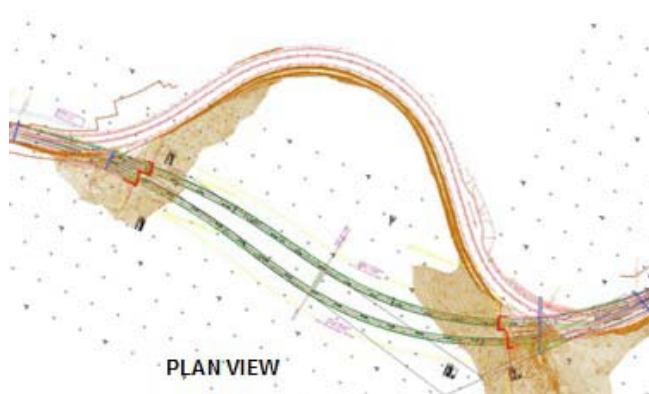


Εικόνα 2. Εμφάνιση ραδιολαριτών στο μέτωπο της σήραγγας Αρτεμεισίου

7.2. Σήραγγες Νεοχωρίου και Στέρνας

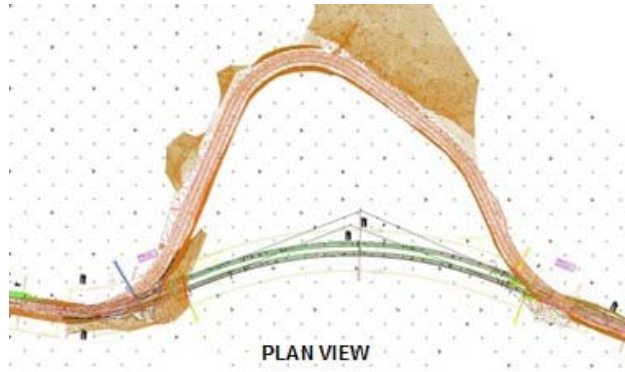
Πρόκειται για δίδυμες οδικές σήραγγες οι οποίες κατασκευάστηκαν στο υφιστάμενο τμήμα του αυτοκινητοδρόμου Κορίνθου - Τρίπολης με σκοπό τη βελτίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού στο ορεινό τμήμα της χάραξης πριν από τη σήραγγα Αρτεμισίου.

Η σήραγγα Νεοχωρίου έχει συνολικό υπόγειο μήκος 1459μ (707μ για τον αριστερό και 752μ για το δεξιό κλάδο αντίστοιχα) με μηκοτομική κλίση 5%. Η μέγιστη αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων είναι 47,5μ ενώ το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων είναι 180μ (σχ.29).



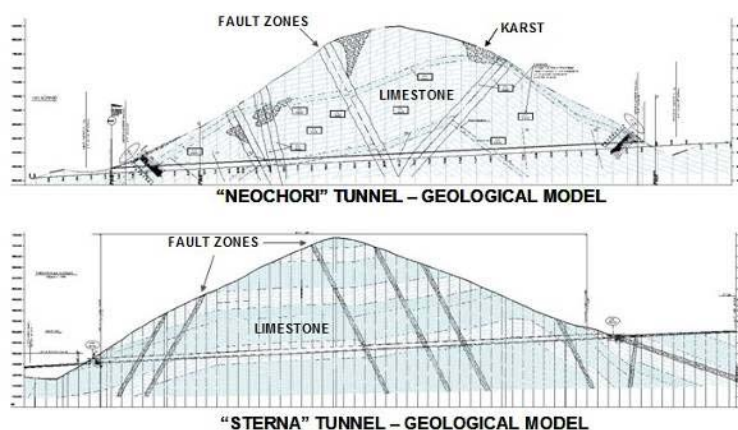
Σχήμα 29: Οριζοντιογραφία σήραγγας Νεοχωρίου. Διακρίνεται και η παλαιά χάραξη του αυτοκινητοδρόμου.

Αντίστοιχα η σήραγγα Στέρνας έχει συνολικό υπόγειο μήκος 1855μ (915μ για τον αριστερό και 940μ για τον δεξιό κλάδο αντίστοιχα), μηκοτομική κλίση 5%, μέγιστη αξονική απόσταση μεταξύ των δύο κλάδων 25μ και μέγιστο ύψος υπερκειμένων 200μ (σχ30.).



Σχήμα 30: Οριζοντιογραφία σήραγγας Στέρνας. Διακρίνεται και η παλαιά χάραξη του αυτοκινητοδρόμου.

Και οι δύο σήραγγες διασχίζουν τον ορεινό όγκο Μελιδόνη με τη γεωλογική δομή της περιοχής να εμφανίζεται μονότονη. Σύμφωνα με το γεωλογικό μοντέλο (σχ.31.) της περιοχής του έργου, το οποίο βασίστηκε τόσο σε επιφανειακές χαρτογραφήσεις όσο και σε ερευνητικές γεωτρήσεις, οι σήραγγες διανοίγονται εντός παχυστρωματωδών, έντονα καρστικοποιημένων Δολομιτών και Ασβεστολιθικών Δολομιτών. Λόγω παρόμοιας γεωλογίας αλλά και ύψους υπερκειμένων ακολουθήθηκε παραπλήσιος σχεδιασμός εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης για τις δύο σήραγγες.



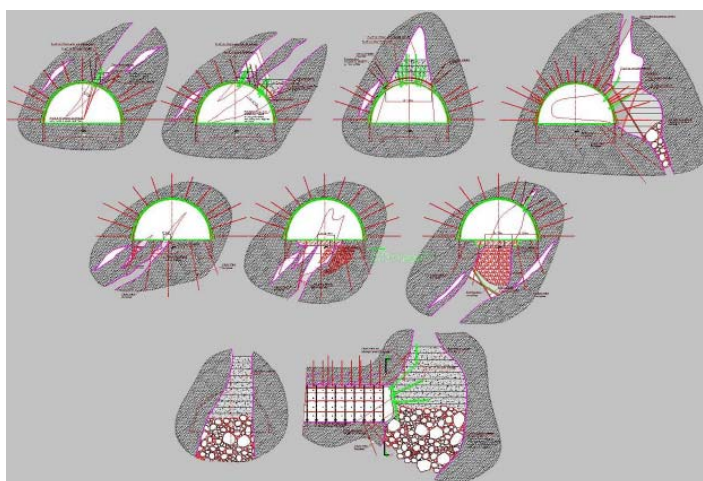
Σχήμα 31: Γεωλογικό μοντέλο σηράγγων Νεοχωρίου και Στέρνας.

Διακρίθηκαν 3 κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης με μέτρα άμεσης υποστήριξης που περιελάμβαναν από απλή εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε συνδυασμό με αγκύρια βράχου (Κατ. I) έως και εφαρμογή δικτυωτών πλαισίων στις χειρότερες κατηγορίες βραχομάζας (Κατ. II & III). Η βραχομάζα η οποία

απαντήθηκε κατά την κατασκευή ήταν ελαφρώς καλύτερης ποιότητας από την προβλεφθείσα με αποτέλεσμα την εφαρμογή των κατηγοριών υποστήριξης I & II σε ποσοστά μεγαλύτερα των προβλεφθέντων από την μελέτη.

Κατά το σχεδιασμό των σηράγγων Νεοχωρίου και Στέρνας δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση τόσο στην πρόβλεψη όσο και στην αντιμετώπιση της έντονης καρστικοποίησης της βραχομάζας.

Για το λόγο αυτό κατά τη φάση σύνταξης του γεωλογικού μοντέλου της περιοχής εκτελέστηκαν διερευνητικές διατρήσεις (χωρίς δειγματοληψία), κυρίως κοντά στα στόμια των δύο σηράγγων με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση τόσο του μεγέθους όσο και της χωρικής κατανομής των καρστικών εγκοίλων. Επιπρόσθετα, η μελέτη της άμεσης υποστήριξης περιελάμβανε και αναλυτικές οδηγίες - σχέδια (σχ.32) για την προχώρηση της σήραγγας μέσα από περιοχές έντονης καρστικοποίησης.



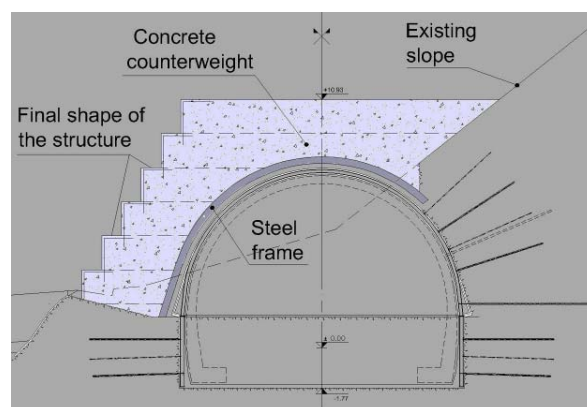
Σχήμα 32: Σχέδιο αντιμετώπισης καρστικών εγκοίλων ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος τους.

Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός της περιοχής των στομιών εξόδου της σήραγγας Στέρνας. Ο άξονας της σήραγγας τέμνει το υφιστάμενο πρηνές του αυτοκινητοδρόμου με κλίση περίπου 30ο και συνεχίζει εντός αυτού, για μήκος περίπου 30μ, αφήνοντας ένα πολύ μικρό τμήμα έντονα αποσαθρωμένης βραχομάζας μεταξύ της παρειάς της σήραγγας και της εξωτερικής επιφάνειας του πρηνούς. Η

λύση η οποία επιλέχθηκε για την προσβολή των μετώπων εξόδου της σήραγγας προέβλεπε την κατασκευή ενός "αντιβάρου" (Εικ. 3) με σκοπό αφενός την αντιστήριξη - σταθεροποίηση των πρανών του αυτοκινητοδρόμου και αφετέρου τη διαμόρφωση κατάλληλης γεωμετρίας αρχικού μετώπου για την έναρξη της εκσκαφής. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 ενώ η εσωτερική παρειά του θόλου υλοποιήθηκε μέσω σύμμεικτης κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικών πλαισίων τύπου (HEB240 @ 0.75μ) (Ford, 1989).



Εικόνα 3: Αεροφωτογραφία των στομιών εξόδου της σήραγγας Στέρνας. Διακρίνονται οι κατασκευές των αντιβάρων καθώς και η κατασκευή του Cut & Cover εξόδου.



Σχήμα 33: Σκαριφηματική τομή της λύσης του "αντιβάρου".



Εικόνα 4: Τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων και οπλισμού για την κατασκευή του εσωραχίου του αντίβαρου. Χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την αποφυγή χρήσης μεταλλότυπου

Η εκσκαφή κάτω από το αντίβαρο έγινε με μηχανικά μέσα ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε και στην κατά το δυνατόν καλύτερη αισθητική και οπτική ενσωμάτωση του αντίβαρου στο φυσικό τοπίο καθώς αποτελεί μόνιμη κατασκευή.



Εικόνα 5: Από την έναρξη των εργασιών εκσκαφής κάτω από το αντίβαρο του δεξιού κλάδου. Διακρίνεται το μεταλλικό πλαίσιο του σύμμεικτου εσωραχίου. Στο βάθος διακρίνεται το αντίβαρο του αριστερού κλάδου.

7.3. Περίπτωση Μελέτης Σηράγγων στη Σλοβενία

Η Σλοβενία βρίσκεται στην διασταύρωση πολλών Ευρωπαϊκών χωρών, ιδίως στο βορειοδυτικό τμήμα της Σλοβενίας όπου υπάρχουν αρκετοί κύριοι δρόμοι όπου βρίσκονται σχεδιάζονται ή βρίσκονται σε φάση κατασκευών. Πολλοί αυτοκινητόδρομοι ή σιδηρόδρομοι περνούν στην επικράτεια.

Η μορφολογία του βορειοδυτικού τμήματος της χώρας χαρακτηρίζεται από ειδικές γεωλογικές κατασκευές : υψηλά επίπεδα από καρστιγενή ασβεστόλιθο, κυρίως σε κατάσταση ώθησης, απότομα χαμηλώνουν στα πεδινά όπου αποτελούνται από τμήματα φλύσχης μερικά από τα κατασκευαζόμενα τούνελ διασχίζουν φράγμα, ενώ άλλα διατρέχουν σχηματισμούς από φλύσχους / ασβεστόλιθους.

Πίνακας 5. Οι κυριότερες κατασκευασμένες υπό κατασκευή σήραγγες αυτοκινητόδρομων και εθνικών οδών στην βορειοδυτική Σλοβενία

όνομα	Τύπος σήραγγας και στάδιο υλοποίησης	Main features
Markovec	Σήραγγα με παροχή νερού κοντά σε ακτή. Κατασκευάστηκε το 1995	Φλύσχης , διόγκωση
Tabor	Σήραγγα σε διεθνή οδό σε καρστιγενή ασβεστόλιθο, κατασκευάστηκε το 1996	Μερικές πολύ μεγάλες σπηλιές
Kastelec	Σήραγγα σε διεθνή οδό σε καρστιγενή ασβεστόλιθο, 8% μάργες φύλων , η κατασκευή άρχισε το 2002	Βρέθηκε ένα καλά αναπτυσσόμενο σύστημα σπηλιών
Dekani	Σήραγγα σε εθνική οδό. Η κατασκευή άρχισε το 2002	Κατασκευή με πτυχώσεις σε εναλλακτική ακολουθία φλύσχης
S oik an	Σήραγγα σε αυτοκινητόδρομο σε φλύσχη και ασβεστόλιθο, το στάδιο σχεδιάστηκε.	Εναλλακτικός ασβεστόλιθος, φλύσχης και γλιστερά στρώματα
B arnica & Tabor	Σήραγγες σε εθνική οδό σε φλύσχης, το στάδιο σχεδιάστηκε	Γλιστερά στρώματα σε σχηματισμούς φλύσχης
Markovec	Σήραγγα σε αυτοκινητόδρομο	Παχύ στρώμα ασβεστολιθικού ψαμμίτη
11, rail Divaca - Koper	Σήραγγες σε αυτοκινητόδρομο περνάνε κυρίως διαμέσου καρστιγενών ασβεστόλιθων και εδάφους φλύσχης.	Υψηλά καρστιγενή ασβεστόλιθοι κυρίως στην κορεσμένη ζώνη

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται μερικά από τα σπουδαιότερα τούνελ της Σλοβενίας. Ο πίνακας δείχνει ότι τα πιο πολλά ακόμη πρέπει να κατασκευαστούν. Οι εμπειρίες και οι πραγματικές γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες είναι από δύο αυτοκινητόδρομους υπό κατασκευή Kastelec (σε ανθρακικά πετρώματα) και Dekani (σε σχηματισμούς φλύσχης), είναι ένα πολύτιμο πλεονέκτημα για μια καλύτερη πρόβλεψη της πρακτικής και περαιτέρω σχεδιασμός έρευνας.

7.3.1. Kastelec Tunnel

Η διπλής διόδου σήραγγα (κατά προσέγγιση 2200 m μακριά) διασχίζει το ανώτερο κομμάτι ασβεστόλιθου / φλύσχης το οποίο ονομάζεται κόψη του Καρστ, στον μελλοντικό αυτοκινητόδρομο Λουμπλιάνα στο Κόπερ. Μετά από έρευνα το 1999 και το 2000 οι εργασίες κατασκευής ξεκίνησαν το 2002 και το τούνελ σκάφτηκε το 2003.

Η βραχώμαζα αποτελούνταν κυρίως από Ηώκαινο alveoline-nummulite ασβεστόλιθο με δύο μάργες φύλλων. Ήδη μετά τη φάση της έρευνας έγινε προφανές ότι το καρστιγενές φαινόμενο θα μπορούσε να επηρεάσει πολύ τη διαδικασία κατασκευής.

Έγιναν μεγάλες προσπάθειες για να προβλέψουν τα μέρη της γραμμής του τούνελ με υψηλή ακρίβεια των σπηλαίων και των σπηλιών. Πάνω στην επιφάνεια , η επίπεδη επιφάνεια ονομαζόμενη Petrinjski kras, πολλές καταβόθρες, και πολύ κοντά τέσσερεις σπηλιές διερευνήθηκαν πλήρως. Τα κύρια χαρακτηριστικά που αποτέλεσαν σημαντικό μέρος της περαιτέρω ερμηνείας της καρστικοποίησης ήταν: 1) ανάλυση των αεροφωτογραφιών που έδειχναν καθαρά ότι οι καταβόθρες ήταν προσανατολισμένες σε δύο ίσιες γραμμές που περνούσαν από την γραμμή του τούνελ, 2) στην σπηλιά Skrklovica παρατηρήθηκε ότι η καρστική κατασκευή αναπτύχθηκε στην επιφάνεια και είχε κατακόρυφες ρωγμές. Με βάση αυτά τα δύο χαρακτηριστικά και άλλα αποτελέσματα έρευνας (χαρτογράφηση, καταβόθρες, γεωφυσική...) αξιολογήθηκε η πιθανότητα της ακρίβειας της μέγιστης καρστικοποίησης και οι ζώνες υπόγειων υδάτων και έγινε το τελικό προγνωστικό προφίλ. Το προγνωστικό προφίλ εξυπηρέτησε πολύ καλά την εκσκαφή κ.ά. α) τον Ιανουάριο του 2003 το τούνελ πέρασε την προβλεπόμενη σπηλιά (εικ.6) β) και όπως είχε γίνει η πρόβλεψη δεν υπήρχαν προβλήματα με το υπόγειο νερό.



Εικόνα 6. Η σπηλιά αριστερά του τούνελ

7.3.2. Σήραγγες σε καρστ και φλύσχη στη Σλοβενία

Εισροές – θεωρώντας ότι το τούνελ είναι τοποθετημένο πάνω από υπόγειο νερό περίμεναν μερικές ελάχιστες εισροές νερού να εισρέουν κατά μήκος των καρστιγενών ασυνεχειών στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Από την άλλη πλευρά, η πραγματική ποσότητα νερού στις τεκτονικές ζώνες επαφής ανάμεσα στον φλύσχη και ασβεστόλιθο δεν ήταν τόσο σπουδαία όσο προβλέποντα. Προφανώς αυτές οι ζώνες δεν ήταν τόσο σπουδαίες όσο τα τεκτονικά και καρστικά στοιχεία από μόνα τους (*Tsirampides, Pilippidis, Kassoli-Fouranaraki, 1993*).

7.3.3. Η σήραγγα DEKANI

Η σήραγγα DEKANI εξερευνήθηκε κατά την περίοδο 1999 – 2000 και η εκσκαφή έγινε το 2003. Είναι μία διπλή σήραγγα κτισμένη σε Ηώκαινο φλύσχη που περιέχει μία εναλλαγή από μάργες, ψαμμίτες και ασβεστολιθικό ψαμμίτη.

Το κύριο χαρακτηριστικό του τούνελ όταν αποφασίστηκε η φάση της έρευνας: διπλωμένα στρώματα λόγω των πιέσεων orogenie με προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ. Η θέση των ασυνεχειών του άξονα του τούνελ είναι πολύ σπουδαία για τα σταθερότητα της εκσκαφής.

Η αναδίπλωση με εύρος από 1 έως 30 m σαφώς βλέπονταν στις επανθίσεις της επιφάνειας κατά τη φάση της έρευνας και επίσης μέσα στο τούνελ κατά τη διάρκεια της εκσκαφής.

Ο προσανατολισμός της αναδίπλωσης είχε προβλεφθεί πολύ καλά. Το τούνελ είναι 2200 μ. μακρύ και συνορεύει με ρεματιές των τοπικών ρευμάτων. Τρεις

240-490 m, 940-1130 m και 1340-

1580 m.

Η εμφάνιση του νερού να τρέχει ήταν επίσης αναμενόμενη εξαιτίας της εμφάνισης στρωμάτων ψαμμίτη. Τρεις τύποι εισροών είχαν προβλεφθεί: 1) ροές νερού εξαιτίας αυστηρά από την ροή, 2) μόνιμη εισροές με επαρκή περιοχή τροφοδοσίας, ανάλογα με τη δομή στρωμάτων ψαμμίτη και πτυχώσεις και 3) μικρής περιόδου ροές εξαιτίας της εκσκαφής που προέρχονται από την εξάντληση των σχετικά κλειστών ρωγμών.

Η έξτρα πρόβλεψη των πτυχώσεων, που τεκτονικά διαταράχθηκε από τα στρώματα ψαμμίτη στη διασταύρωση με τη γραμμή της σήραγγας μπορούσε να είναι αβέβαιη έτσι η πρόβλεψη της ακριβούς θέσης των ροών του τούνελ κατά τη διάρκεια της εκσκαφής μπορούσε να είναι αβέβαιη. συζήτηση και συμπεράσματα

Η θέση και η έκταση της καρστικοποίησης είναι ο πιο σημαντικός τομέας που πρέπει να δοθεί σημασία στο σχεδιασμό μίας σήραγγας και η εκσκαφή αυτής σε ανθρακικά πετρώματα βορειοδυτικά της Σλοβενίας.

Έχει αποδειχθεί ότι η προσεκτική έρευνα στα καρστιγενή χαρακτηριστικά, στη μορφολογία και λιθολογία των καρστιγενών ζωνών και σπηλαίων μπορούσε να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια όχι μόνο στη γειτνίαση του τούνελ αλλά επίσης και στη θέση της γραμμής του τούνελ. Το νερό που τρέχει στο τούνελ εξαρτάται από τα φαινόμενα που συζητήθηκαν πιο πάνω καθώς και από τις λιθολογικές αλλαγές. Πάντως οι λιθολογικές αλλαγές είναι δευτερεύουσες. Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει σήραγγα υπό κατασκευή που να περνάει την κορεσμένη ζώνη του καρστικού υδροφορέα.

Σε σήραγγες που είναι τοποθετημένες σε σχηματισμούς φλύσχης στη θέση με λιπαντικά χώματα και ψαμμίτη είναι ο πιο σπουδαίος παράγοντας, ο οποίος θα μπορούσε να προβλεφθεί μόνο με προσεκτική γεωλογική έρευνας όλων των εμφανίσεων στην περιοχή (εικ. 7). Η ακριβής θέση των διατομών των στρωμάτων ψαμμίτη και της γραμμής της σήραγγας μερικές φορές δύσκολα μπορούσε να προσδιοριστεί εξαιτίας της ανομοιογένειας των πτυχώσεων και των τεκτονικών κινήσεως του γεωλογικού σχηματισμού.



Εικόνα 7. Πτυχώσεις από ψαμμίτη στην επιφάνεια αριστερά και στο τούνελ δεξιά

Οι θέσεις των ρωών και οι συνθήκες εκσκαφής θα μπορούσαν αρκετά καλά να προβλεφθούν για τη θέση που θα μπει η γραμμή του τούνελ στα ανθρακικά βράχια, ενώ η πρόβλεψη δεν θα μπορούσε να είναι αξιόπιστη για τις γραμμές της σήραγγας σε εδάφη φλύσσης. Η πίεση λόγω διόγκωσης πρέπει να υπολογίζεται σε όλη την έρευνα και να σχεδιάζεται η πρακτική σε εδάφη φλύσσης. Επιπλέον, από τη στιγμή που ένα βέβαιο έδαφος με βράχια φλύσσης αντιπροσωπεύει έναν σπουδαίο υδροφόρο ορίζοντα για την τοπική παροχή νερού, οι έρευνες πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά και σ' αυτό το πεδίο της δουλειάς (Begus, 2000).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η κατασκευή μίας σήραγγας απαιτεί εξέταση γεωλογικών και γεωτεχνικών παραγόντων ώστε να αντιμετωπιστούν πιθανά προβλήματα, καθώς το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι υψηλό και η ευθύνη όσον αφορά την ασφάλεια μεγάλη.
- Ο «γεωλογικός παράγων» συνίσταται από τον τύπο των πετρωμάτων, τις γεωλογικές δομές και το καθεστώς του υπόγειου νερού.
- Ο «γεωτεχνικός παράγων» ανάγεται στην ικανότητα του υλικού δόμησης να παραλάβει τις φορτίσεις που θα αναπτυχθούν στο στάδιο κατασκευής και λειτουργίας της σήραγγας.
- Το υπόγειο νερό είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές προβλημάτων κατά την κατασκευή της σήραγγας όσον αφορά θέματα σταθερότητας και ασφάλειας.
- Εισχωρήσεις ή διαρροές σε υπόγεια έργα από γειτονικό υδροφορέα μπορεί να έχουν επικίνδυνες συνέπειες στην περιοχή του έργου. Επίσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα μόλυνσης υδροφορέα υποκείμενου του έργου.
- Μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στην εκτίμηση των υδρογεωλογικών συνθηκών πριν την κατασκευή μιας σήραγγας όταν αυτή γίνεται κοντά στην επιφάνεια ή κοντά σε αστικές περιοχές, μέσα από ερευνητικές τεχνικές (μετρήσεις διαπερατότητας, εκφορτίσεων, πιεζόμετρα). Σημαντική είναι και η συμβολή γεωφυσικών μεθόδων.
- Οι απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες όταν συναντάται καρστικό περιβάλλον καθώς αντιμετωπίζεται μεγάλη διαπερατότητα, αναπτυγμένο σύστημα αγωγών που μεταφέρουν νερό, με ή χωρίς υλικό, και φυσικές υπόγειες διαρροές λόγω πλημμύρων.
- Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητη η γνώση του βάθους και της γεωμετρίας του Καρστ μέσα από υδρογράμματα πηγών και ο καθορισμός ζωνών μεγάλης διαπερατότητας ώστε να αποφευχθούν εισροές που μπορεί να απειλούν την κατασκευή.
- Μέσα από ερευνητικές γεωτρήσεις καταγράφονται συνεχώς οι διακυμάνσεις στάθμης του υπόγειου νερού. Υπάρχουν διάφορα

υδρογεωλογικά μοντέλα όσον αφορά ανθρακικά περιβάλλοντα ώστε να γίνει ο σωστός σχεδιασμός σήραγγας και να αποφευχθούν κίνδυνοι σχετικοί με καρστικές συνθήκες (Παράδειγμα μοντέλου: Διάνοιξη πάνω ή κάτω από το βασικό επίπεδο Καρστ).

- Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων μία συνηθισμένη, φτηνή και αποτελεσματική μέθοδος είναι η αποστράγγιση πριν την κατασκευή της σήραγγας, και της ευρύτερης περιοχής γύρω από αυτήν, με μία σειρά γεωτρήσεων που στοχεύει στην μείωση της στάθμης του νερού.
- Σε περιπτώσεις που συναντώνται κενά ή σπήλαια είτε επιχωματώνονται όταν είναι άδεια είτε γίνεται διάνοιξη στις περιοχές των χαλαρών υλικών πλήρωσης όταν είναι γεμάτα. Σε αστικές περιοχές η ύπαρξη κενών μπορεί να ερευνηθεί με γεωφυσικές μεθόδους (γεωραντάρ, τομογραφία). Αναλόγως το βάθος διάνοιξης και των υλικών που συναντώνται χρησιμοποιούνται και τα κατάλληλα είδη TBM.
- Η διάνοιξη σήραγγας σε καρστικό περιβάλλον απαιτεί μία ολοκληρωμένη υδρογεωλογική γνώση της ευρύτερης περιοχής. Η έλλειψη αυτής μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιασμό που δεν θα μπορεί να αντιμετωπίσει πιθανά προβλήματα ή κινδύνους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Καθοριστικό ρόλο για τις αποφάσεις που θα παρθούν κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου είναι εκτός από τις μηχανικές μεθόδους η κριτική ικανότητα του επιστήμονα γεωλόγου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., (2006), *«Κατασκευή και Μηχανική των σπηραγγων και των υπόγειων έργων»*, Χανιά.
2. Καββαδά Μ., (2005), *«Σημειώσεις υπόγειων έργων»*, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, έκδ. Ε.Μ. Πολυτεχνείου.
3. Καλλέργης Γ.Α., (1999), *«Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία»*, Α', Β' & Γ' τόμος, Αθήνα.
4. Μαραγκός Χρ., (1997), *«Τεχνικά έργα υποδομής. Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου υπόγειες κατασκευές, φράγματα»*, Θεσσαλονίκη.
5. Μαρίνος, Π., (1993), *«Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας»*, Αθήνα.
6. Μαρίνος, Π., (1997), *«Γεωλογία Σπηραγγων και Υπογείων Έργων»*, Αθήνα.
7. Μαρίνος, Π., (2005), *Experiences in tunneling through karstic rocks, Water resources & environmental problems in Karst, KARST 2005,– an IAH International Conference, Belgrade, 15 September.*
8. Μπαντής Στ., (2004-2005), *«Βραχομηχανική ΙΙ. Επιφανειακές και Υπόγειες Εκσκαφές»*. Σημειώσεις Μαθήματος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής – Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, έκδ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.
9. Τρώντσιος, Γ.Λ., (1991), *«Κοκκομετρική, ορυκτολογική και χημική μελέτη των Παλαιογενών ιζημάτων από γεωτρήσεις στο δέλτα του Έβρου»*, Διδακτ. Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
10. Τσιραμπίδης Α., (1983), *«Κοκκομετρική, ορυκτολογική και οξυγονο-ϊσοτοπική μελέτη Νεογνών ιζημάτων από πυρήνες γεωτρήσεων στο δέλτα του Νέστου»*, Διδακτ. Διατριβή, ΑΠΘ.
11. Τσιραμπίδης Α., (1996), *«Προσδιορισμός προέλευσης ελληνικών λευκών μαρμάρων με ισοτοπική ανάλυση οξυγόνου και άνθρακα»*, Πρακτ. 2^{οο} Συμπ. Ελλην. Αρχαιομ. Εταιρ., Θεσσαλονίκη.
12. Τσιραμπίδης Α., (2002), Καθ. Ορυκτολογίας – Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας Γεωλογικού Τμήματος ΑΠΘ, *«Πετρολογία ιζηματογενών πετρωμάτων»*, δεύτερη έκδοση, Θεσσαλονίκη.

Ξένη βιβλιογραφία

1. Tsirampides, A. Pilippidis, A. and Kassoli-Fouranaraki, A., (1993), «*Zeolitic alteration of Eocene volcanoclastic sediments at Metaxades*», Thrace, Greece, Appl. Clay Sci.
2. Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995), "*Support of Underground Excavations in Hard Rock*", Balkema Publishers.των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως
3. Beck, BF. (1989), «*Engineering and environmental implications of sinkholes and karst*», Rotterdam: Balkema.
4. Beck, BF. (1989), «*Μηχανικών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καταβόθρες και καρστικού Ρότερνταμ*», Balkema.
5. Begus, T., (2000), «*Inzenirsko geoloska prognoza razmer na predvidenem avtocestnem predoru Kastelec pri Kozini*». Zbornik 5. mednarodnega posvetovanja o gradnji predorov in podzemnih prostorow Ljubljana 2000.
6. Drew, D. & Hotzl, H. (1999), «*Karst hydrogeology and human activities*», Balkema. Ντρου, Δ. & Hotzl, H. 1999. Καρστ υδρογεωλογίας και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Balkema.
7. Ford, DC & PW Williams, (1989), «*Karst geomorphology and hydrology*», London: Unwin Hyman. Η Ford, DC & PWWilliams 1989 γεωμορφολογίας και υδρολογίας Καρστ, Λονδίνο: Unwin Hyman.
8. Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A. and Sauro, U. (Eds). Klimchouk, A., Lowe, Δ., Cooper, A. και Sauro, U. (Επιμ.). (1997), «*Gypsum karst of the world*», (Καρστικού γύψου του κόσμου). International Journal of Speleology. Vol. 5 (3-4) for 1996, 307pp 5 (3-4) για το 1996, pp 307.
9. Jennings, JN (1985), «*Karst geomorphology*», Oxford: Basil Blackwell, Blackwell.
10. Klimchouk B. Alexander, Ford C. Derek, Palmer N. Arthur, and Dreybrodt Wolfgang (eds) (2000), «*Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*», National Speleological Society, Huntsville, Alabama.
11. Kuniansky, EL (ed) (2001), «*US Geological Survey Karst*», Interest Group Proceedings, Petersburg, Florida. Water-Resources Investigations Report 01-4011. Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης των ΗΠΑ, υδατικών πόρων, έρευνας, Έκθεση 01-4011.

12. White, WB, (1988), «*Geomorphology and hydrology of karst terrains*», Oxford: Oxford University Press.

Διαδίκτυο

1. Σακκάς Ι. (Πολ. Μηχανικός, πρόεδρος), Αγγέλης Ε. (Πολ. Μηχανικός), Μπακογιάννης Ι. (Μεταλλειολόγος Μηχανικός), Καζίλης Ν. (Τεχνικός Γεωλόγος), Ρόζενμπερκ Α. (Μεταλλειολόγος Μηχανικός), Σοφιανός Α. (Πολ. Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π), Ηλίας Μ. (Πολ. Μηχανικός-Γεωτεχνικός, Μελετητής), Αντωνίου Γ. (Πολ. Μηχανικός, Μελετητής), (2002), ΟΜΟΕ – Τεύχος Οδικών Σηράγγων. Πρόσβαση στις 10.3.2012 από την ιστοσελίδα library.tee.gr/digital/books_notee/book_58022/book_58022a.pdf
2. «**ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ Ι ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ..**». Πρόσβαση στις 10.6.2012 στην ιστοσελίδα www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/13D.pdf
3. «**ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΤΗ "ΜΕΘΟΔΟ NATM"**». Πρόσβαση στις 10.6.2012 στην ιστοσελίδα users.ntua.gr/kavvadas/Books/Tunneling/ch-5-1.pdf
4. «**Σήραγγα - Βικιπαίδεια**». Πρόσβαση στις 10.6.2012 στην ιστοσελίδα el.wikipedia.org/wiki/Σήραγγα
5. «**Άρθρο 4**». Πρόσβαση στις 10.6.2012 στην ιστοσελίδα portal.survey.ntua.gr/main/labs/roads/...g.../OMOE-TOS.pdf