



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Φοιτητής: ΤΣΑΚΑΛΙΑΝ ΑΡΜΕΝΑΚ
ΑΜ: 47117

Επιβλέπων:

ΑΛΕΞΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

Τίτλος εργασίας

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Αλεξάκης Δημήτριος	Καθηγητής	
2	Βρυζίδης Ισαάκ	Επίκουρος Καθηγητής	
3	Εξαρχάκος Γεώργιος	ΕΔΙΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσακαλιάν Αρμενάκ του Μισάκ, με αριθμό μητρώου 47117 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Περίληψη

Γεωλογία ονομάζεται η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών φαινομένων και διαδικασιών που εκτυλίχθηκαν κυρίως στο στερεό φλοιό της γης από την περίοδο του σχηματισμού του μέχρι σήμερα. Στόχοι της γεωλογίας είναι η κατανόηση και η ερμηνεία των φυσικών φαινομένων και διεργασιών και, ακόμη, η αξιοποίηση των συμπερασμάτων για το καλό της ανθρωπότητας. Συνεπώς, η μηχανική γεωλογία ασχολείται με τη μελέτη της δομής της γης σε συνεργασία με τον πολιτικό μηχανικό για την εκτέλεση ασφαλούς και οικονομικά αποδοτικού σχεδιασμού για κατασκευαστικά έργα.

Στην εργασία αυτή, αναλύονται το έδαφος και τη βραχομάζα και παρουσιάζονται τα βασικότερα κριτήρια και συστήματα. Υποδεικνύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά και ταξινομήσεις τους. Στην συνέχεια μελετώνται εξειδικευμένα έργα όπου η γνώση των προηγούμενων μεθόδων είναι απαραίτητη. Σε κάθε κεφάλαιο παρουσιάζονται ότι κρίνεται απαραίτητο για την σωστή μελέτη του υπεδάφους, αλλά και την κατασκευή τεχνικών έργων.

Λέξεις – κλειδιά

Χαρακτηριστικά εδαφών

Συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας

Μέθοδοι κατασκευής σηράγγων

Φράγματα από σκυρόδεμα

Φράγματα αναχωματικού τύπου

Αστοχίες

Abstract

Geology is the science that concerned with the study of the natural phenomena and processes that have unfolded mainly in Earth's crust from the period of its formation until today. The aims of geology are to understand and interpret natural phenomena and processes and, furthermore, to use the findings for the benefit of mankind. Consequently, engineering geology is concerned with the study of the earth's structure in collaboration with the civil engineer to carry out safe and cost-effective design for construction projects.

In this paper, soil and rock mass are analyzed and the main criteria and systems are presented. Their main characteristics and classifications are indicated. Specialized projects are then studied where knowledge of the previous methods is essential. Each chapter presents what is considered necessary for the proper study of the subsurface and the construction of engineering works.

Keywords

Soil Characteristics

Rockmass Classification Systems

Tunnel Construction Methods

Concrete Dams

Embankment Dams

Failures

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Περίληψη	4
Κατάλογος Πινάκων	8
Κατάλογος Εικόνων	9
Αλφαβητικό ευρετήριο	10
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1 Γενική παρουσίαση	11
1.2 Μεθοδολογία	11
Κεφάλαιο 2 Τεχνική γεωλογία εδαφών	12
2.1 Έδαφος	12
2.2 Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη	13
2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών	14
2.3.1 Σχετική πυκνότητα	14
2.3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση	15
2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά συνεκτικών εδαφών	17
2.5 Ταξινόμηση εδαφών	19
Κεφάλαιο 3 Τεχνική γεωλογία βραχομάζας	22
3.1 Βραχομάζα	22
3.2 Γενικά ταξινόμησης	23
3.3 Δείκτης ποιότητας βραχομάζας	24
3.4 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά της	24
3.5 Σύστημα ταξινόμησης RMR	25
3.6 Σύστημα ταξινόμησης Q	30
3.7 Σχέση και σύγκριση των συστημάτων RMR και Q	34
3.8 Γεωλογικός δείκτης GSI	36
3.9 Ταξινόμηση RMI	38
Κεφάλαιο 4 Σήραγγες και υπόγεια έργα	40
4.1 Μέθοδοι κατασκευής	40
4.1.1 Μέθοδος ανοιχτού ορύγματος (Cut and Cover)	40
4.1.2 Μέθοδος κλειστής διάνοιξης με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)	42

4.1.3 Μέθοδος NATM	45
4.1.4 Διάνοιξη σηράγγων με τη Νορβηγική μέθοδο	49
4.2 Μέτρα άμεσης υποστήριξης.....	50
4.2.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	50
4.2.2 Αγκύρια βράχου	51
4.2.3 Χαλύβδινες νευρώσεις.....	51
4.2.4 Σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης	51
4.3 Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών	52
4.4 Υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους λόγω υπογείων εκσκαφών	53
4.5 Σεισμική επικινδυνότητα.....	53
4.6 Αστοχίες σηράγγων.....	54
Κεφάλαιο 5 Φράγματα.....	58
5.1 Γενικά – Σχεδιασμός.....	58
5.2 Συναφή έργα.....	59
5.3 Φράγματα από σκυρόδεμα	60
5.3.1 Φράγματα βαρύτητας	60
5.3.2 Τοξωτά ή Αψιδωτά φράγματα.....	64
5.3.3 Αντηριδωτά φράγματα	68
5.4 Φράγματα αναχωματικού τύπου	70
5.4.1 Χωμάτινα φράγματα.....	70
5.4.2 Λιθόριπτα φράγματα	72
5.5 Σεισμική επικινδυνότητα.....	73
5.6 Αστοχίες φραγμάτων.....	74
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	75
Βιβλιογραφία	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών (Καββαδάς, 2016)	13
Πίνακας 2: Η κατάταξη της άμμου βάση της πυκνότητας (Καββαδάς, 2016)	15
Πίνακας 3: Κατάταξη εδαφών βάση των Βρετανικών Κανονισμών (Καββαδάς, 2016)	16
Πίνακας 4: Μεγέθη κοσκίνων (Καββαδάς, 2016)	16
Πίνακας 5: Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (Καββαδάς, 2016).....	21
Πίνακας 6: Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας(BIENIAWSKI 1989) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)	27
Πίνακας 7: Οδηγίες για την ταξινόμηση της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην κατασκευή σηράγγων(WICHAM et al 1972) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).....	29
Πίνακας 8: χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q(BARTON et al 1974) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)	34
Πίνακας 9: Συγκριτική θεώρηση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)	35
Πίνακας 10: Πάχος βάσης τοξωτών φραγμάτων (Σαχπάζης, 2016)	66

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Χάρτης πλαστιμότητας του Casagrande (Καββαδάς, 2016)	19
Εικόνα 2: Ταξινόμηση της βραχομάζας (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)	33
Εικόνα 3: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (HOEK and MARINOS 2000) (Καββαδάς, 2005).....	37
Εικόνα 4: Η μέθοδος cut and cover (1).....	41
Εικόνα 5: Μηχάνημα διάνοιξης σιράγγων (TBM) – Αττικό μετρό (2)	42
Εικόνα 6: Η μέθοδος NATM (3)	46
Εικόνα 7: Εκσκαφή σήραγγος σε τρεις φάσεις (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)	47
Εικόνα 8: Απλοποιημένοι κύκλοι εργασιών (α) για την εκσκαφή και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και (β) για την τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης (από HOEK and BROWN 1980) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).....	48
Εικόνα 9: Διάγραμμα κυρίων τάσεων γύρω από την ημικυκλική στοά σε μονοαξονικό πεδίο επί τόπου τάσεων (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).....	54
Εικόνα 10: 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 συνοχής (δ) που συγκρατεί το ογκοτεμάχιο πετρώματος στη θέση (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)	55
Εικόνα 11: Κίνδυνος κατάπτωσης οροφής λόγω οριζόντιας στρωσιγένειας του πετρώματος και δικλάσεων μεγάλης κλίσης (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)	55
Εικόνα 12: Διάνοιξη σήραγγας σε στρωσιγενές και ρηγματωμένο πέτρωμα, με παρουσία υδροφορίας στο ρήγμα (ον) (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)	56
Εικόνα 13: 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)	57
Εικόνα 14: Το φερτό γεωϋλικό (Π) που έχει αποθεθεί σε κοιλότητα εντός του μητρικού πετρώματος (N) είναι βέβαιο ότι θα κατακρημνισθεί (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)	57
Εικόνα 15: Παράδειγμα φράγματος βαρύτητας (4).....	61
Εικόνα 16: Παραδείγματα φραγμάτων βαρύτητας (Σαχπάζης, 2016).....	62
Εικόνα 17: Παράδειγμα αρμού συστολής-διαστολής (Σαχπάζης, 2016)	63
Εικόνα 18: Παράδειγμα τοξωτού φράγματος (5)	65
Εικόνα 19: Δεύτερο παράδειγμα τοξωτού φράγματος (Σαχπάζης, 2016)	67
Εικόνα 20: Παράδειγμα αντηριδωτού φράγματος (Fu C., Hafliadson B., 2015)	68
Εικόνα 21: Τύποι χωμάτινων φραγμάτων (Σαχπάζης, 2016)	70
Εικόνα 22: Παράδειγμα λιθόριπτου φράγματος (Σαχπάζης, 2016).....	72

Αλφαβητικό ευρετήριο

GSI - Geological Strength Index

NATM - Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων

NTM - Norwegian Tunnelling Method

NGI - Norwegian Geotechnical Institute

RQD - Rock Quality Designation

RMR - Rock Mass Rating

Q System – Rock Tunnelling Quality System

TBM - Tunnel Boring Machines

Όρια Atterberg – Όριο υδαρότητας και πλαστικότητας

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Γενική παρουσίαση

Είναι γνωστό ότι τα τεχνικά έργα θεμελιώνονται στη Γη, οι πολιτικοί μηχανικοί πρέπει να έχουν βασικές γνώσεις γεωλογίας για να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ασφαλή τεχνικά έργα. Οι πολιτικοί μηχανικοί πρέπει επίσης να κατανοούν τους κοινούς τύπους εδάφους και βράχων, να κατασκευάζουν απλές γεωλογικές τομές, να διαβάζουν γεωλογικούς χάρτες και να είναι σε θέση να εντοπίζουν γεωλογικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και την συντήρηση τεχνικών έργων.

Για τους παραπάνω λόγους, κύριο θέμα της εργασίας είναι η επίδραση της γεωλογίας στα τεχνικά έργα. Θα δειχθεί πως η συνεργασία γεωλόγου και πολιτικού μηχανικού είναι απαραίτητη, ώστε να γίνει σωστή έρευνα της Γης για την κατασκευή ασφαλών τεχνικών έργων.

Έτσι σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση όλων των βασικών μεθόδων και χαρακτηριστικών για των διαχωρισμό και ταξινόμηση των εδαφών και της βραχομάζας. Επίσης, αναλύονται οι τρόποι κατασκευής και οι αστοχίες μεγάλων τεχνικών έργων.

1.2 Μεθοδολογία

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη επισκόπηση της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία.

Στο κεφάλαιο 2 θα αναλυθεί το έδαφος, θα γίνει διάκριση ανάλογα με τον σχηματισμό τους. Επίσης θα αναφερθούν τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, αλλά και η ταξινόμηση τους σύμφωνα με τα διεθνή Πρότυπα.

Στο κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστεί η βραχομάζα, αρχικά ως προς τα γενικά χαρακτηριστικά και τον δείκτη ποιότητας. Ύστερα θα γίνει εκτενής αναφορά στα κυριότερα συστήματα ταξινόμησης με σύγκριση δύο από αυτών. Τέλος θα δείξουμε και τον γεωλογικό δείκτη GSI.

Το κεφάλαιο 4 αφορά τις σήραγγες και τα υπόγεια έργα. Αρχικά θα αναφέρουμε όλους τους τρόπους κατασκευής και τα κατάλληλα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Ακόμα θα δείξουμε πως επιδρά ο προσανατολισμός των ασυνεχειών και οι σεισμοί σε αυτά, αλλά και οι τρόποι αστοχίας τους.

Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιάσουμε τα φράγματα, αρχικά τα συναφή έργα, ενώ ύστερα θα γίνει διαχωρισμός των φραγμάτων από σκυρόδεμα και αναχωματικού τύπου με όλες τις περιπτώσεις τους. Τέλος θα γίνει αναφορά στην σεισμική επικινδυνότητα και τις αστοχίες αυτών.

Κεφάλαιο 2 Τεχνική γεωλογία εδαφών

2.1 Έδαφος

Το έδαφος είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, οι πόροι μεταξύ τους περιέχουν νερό ή/και αέρα. Τα εδαφικά υλικά δημιουργούνται από την αποσύνθεση των πετρωμάτων που γίνεται, είτε μηχανικά, είτε χημικά(Καββαδάς,2016).

Η μηχανική αποσάθρωση είναι αποτέλεσμα (Καββαδάς,2016):

- του παγετού,
- των συνεχών θερμοκρασιακών μεταβολών,
- των λειτουργιών φυτών, ζώων, και του ανθρώπου,

και οδηγεί σε κατατεμαχισμό και θρυμματισμό των βράχων. Η διαδικασία αυτή συντελεί κυρίως στην δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλικών και άμμων).

Από την άλλη, η χημική αποσάθρωση προκαλείται από τους παρακάτω λόγους (Καββαδάς,2016):

- οξείδωσης,
- ενανθράκωσης,
- αναγωγής και άλλων διαδικασιών.

Με την σειρά της είναι ο κυριότερος παράγων γένεσης λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων).

Τα εδάφη διακρίνονται σε αυτόχθονα και ιζηματογενή, ανάλογα τον τρόπο μεταφοράς και τελικής απόθεσης των προϊόντων της αποσάθρωσης. Τα αυτόχθονα εδάφη δημιουργούνται από την επιτόπου απόθεση των προϊόντων αποσάθρωσης, χωρίς να μεσολαβήσει μεταφορά τους μακριά από την περιοχή της αποσάθρωσης. Αντίθετα, τα ιζηματογενή προέρχονται από τη μεταφορά των προϊόντων αποσάθρωσης με τα νερά των ποταμών μακριά από την αρχική τους θέση και την επακόλουθη απόθεσή τους στην περιοχή των εκβολών. Υπάρχουν και περιπτώσεις μεταφοράς των προϊόντων αποσάθρωσης με τον αέρα (αιολικές αποθέσεις). Για τον διαχωρισμό τους κατά μέγεθος κόκκων γίνεται με την μεταφορά και απόθεση των ιζηματογενών εδαφικών σχηματισμών με το νερό. Έτσι, στις κοίτες των ποταμών και σε περιοχές κοντά στις εκβολές τους, αποτίθενται συνήθως χονδρόκοκκα ιζήματα (χάλικες και άμμοι). Από την άλλη, τα λεπτόκοκκα ιζήματα (ιλείς και άργιλοι) αιωρούμενα μεταφέρονται σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις και αποτίθενται με αργό ρυθμό στον πυθμένα των λιμνών και θαλασσών μακριά από τις εκβολές των ποταμών, σχηματίζοντας περίπου οριζόντιες στρώσεις. Αρκετά συνηθισμένη είναι και η διαδοχική απόθεση στρώσεων λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων ιζημάτων στην ίδια περιοχή, που οφείλεται είτε στη διαδοχή περιόδων έντονων βροχοπτώσεων και απορροών (που οδηγούν στην απόθεση χονδροκλαστικών κυρίως ιζημάτων) με ήπιες περιόδους (που οδηγούν στην απόθεση λεπτόκοκκων εδαφών) είτε σε τεκτονικές κινήσεις του γήινου φλοιού (που συχνά μετατρέπουν

κοίτες ποταμών σε πυθμένες ωκεανών και το αντίθετο). Δεν έχει σημασία ο τρόπος δημιουργίας, μεταφοράς και απόθεσης των εδαφών, τα κενά που δημιουργούνται και υπάρχουν μεταξύ των κόκκων γεμίζουν με νερό. Στο μακρό χρονικό διάστημα, όμως, που μεσολάβησε από την ιζηματογένεση, το νερό των πόρων αντικαταστάθηκε μερικά ή ολικά από αέρα, διότι πολλοί εδαφικοί σχηματισμοί βρέθηκαν πάνω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Έτσι, σήμερα, τα περισσότερα εδάφη περιέχουν στους πόρους τους και αέρα και νερό (Καββαδάς, 2016).

2.2 Χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα ιζηματογενή εδάφη, διακρίνονται σε χονδρόκοκκα (χάλικες και άμμοι) και λεπτόκοκκα (ίλιες και άργιλοι) και αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών. Οι διαφορές μεταξύ των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ιζημάτων είναι πολλοί και δεν έχουν να κάνουν με τον τρόπο δημιουργίας τους. Όταν οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι από 2 mm είναι χάλικες, στις διαστάσεις 2 mm έως 0.06 mm ανήκουν οι άμμοι, οι ίλιες με την σειρά τους ανήκουν στις διαστάσεις 0.06 mm έως 0.002 mm και τέλος κόκκοι με μέγεθος μικρότερο από 0.002 mm είναι οι άργιλοι. Φαίνονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 1 (Καββαδάς, 2016).

Οι κόκκοι των άμμων και των χαλικών έχουν σφαιρικό σχήμα, αυτό σημαίνει ότι οι μεγαλύτερα και μικρότεροι κόκκοι δεν παρουσιάζουν διαφορές. Οι επιφάνειες των κόκκων διαφέρουν και είναι μεταξύ λείας και γωνιώδους. Οι τιμές της πυκνότητας έχουν να κάνουν με την διάταξη των κόκκων και είναι μεταξύ μιας ελάχιστης και μέγιστης πυκνότητας, ανάλογα πόσο χαλαρή ή πόσο πυκνή είναι η δομή. Ωστόσο η διαφορά μεταξύ των τιμών αυτών δεν είναι μεγάλη, επειδή οι κόκκοι μονίμως βρίσκονται σε επαφή (Καββαδάς, 2016).

Πίνακας 1: Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών (Καββαδάς, 2016)

Άργιλοι	Ίλιες			Άμμοι			Χάλικες			Κροκάλες		
	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές			
0.001	0.002	0.006	0.02	0.06	0.2	0.6	2	6	10	20	60	200
		0.01			0.1	1					100	

Διαστάσεις κόκκων (mm)

Οι κόκκοι των λεπτόκοκκων εδαφών από την μεριά τους, είναι πολύ πεπλατυσμένοι και έχουν τη μορφή πλακιδίων μικρού πάχους σε σχέση με τα χονδρόκοκκα εδάφη. Αναπτύσσονται και άλλες δυνάμεις μεταξύ των κόκκων εκτός αυτών της βαρύτητας και της τριβής. Όλα αυτά επειδή είναι

μικρά σε διάσταση και έχουν πλακοειδή μορφή τα αργιλικά ορυκτά. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων είναι ηλεκτρικά φορτισμένη, με την άνω και κάτω (μεγάλες) επιφάνειες να έχουν αρνητικά φορτία, και η περιφέρεια (το πάχος) να έχει ίσα και αντίθετα θετικά φορτία. Τα παραπάνω δεν παρουσιάζονται στα χονδρόκοκκα εδάφη, είναι σύνηθες όμως στα λεπτόκοκκα, όπου η ένταση τους είναι αρκετές φορές ισχυρότερη από την βαρύτητα. Ενδεικτικά, οι ηλεκτρικές δυνάμεις (που είναι ανάλογες της επιφάνειας) προς τις δυνάμεις βαρύτητας (που είναι ανάλογες της μάζας) εξαρτώνται από την ειδική επιφάνεια, δηλαδή το λόγο που δίνει η επιφάνεια προς τη μάζα του πλακιδίου. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι η διαφορά στην ειδική επιφάνεια των κόκκων ανάμεσα στα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα εδάφη καθορίζει την δομή τους στον χώρο και την μηχανική τους συμπεριφορά (Καββαδάς, 2016).

Επειδή τα λεπτόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους, ονομάζονται συνεκτικά. Αντίθετα, τα χονδρόκοκκα δεν εμφανίζουν την συνοχή αυτή μεταξύ των κόκκων, ονομάζονται μη συνεκτικά.

2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών

Τα βασικότερα ποσοτικά φυσικά χαρακτηριστικά των μη-συνεκτικών εδαφικών υλικών είναι η σχετική πυκνότητα και η κοκκομετρική διαβάθμιση. Με τον υπολογισμό τους μπορούμε να έχουμε έμπιστα αποτελέσματα για την συμπεριφορά των χονδρόκοκκων εδαφών ακόμα και αν δεν γνωρίζουμε τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

2.3.1 Σχετική πυκνότητα

Κάποιο μη-συνεκτικό εδαφικό υλικό εμφανίζεται στη φύση με ποικίλες μορφές ανάλογα με την εκάστοτε διάταξη (δομή) των κόκκων του. Με το μέγιστο ποσοστό κενών και η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων έχουμε ελάχιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή είναι αποτέλεσμα της βραδείας απόθεσης μιας άμμου μέσα στο νερό υπό συνθήκες αντίστοιχες με αυτές της ιζηματογένεσης. Έτσι, η ελάχιστη πυκνότητα προσεγγίζεται από πρόσφατες αποθέσεις άμμων. Όταν είναι ελάχιστο το ποσοστό των κενών και οι κόκκοι σε πυκνά τοποθετημένοι, τότε έχουμε μέγιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί, με έντονη και συνεχόμενη δόνηση, όπου οι κόκκοι επανατοποθετούνται σε πυκνότερες δομές. Είναι σαφές ότι τόσο η ελάχιστη όσο η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγέθη συμβατικά και αναφέρονται σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές (Καββαδάς, 2016).

Παρακάτω δίνεται ο τύπος της σχετικής πυκνότητας που χαρακτηρίζει την κατάσταση της άμμου όσον αφορά την ελάχιστη και την μέγιστη πυκνότητα (Καββαδάς, 2016):

$$Dr \equiv \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 (\%)$$

Όπου:

e : είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου,

e_{\max} : ελάχιστη συμβατική πυκνότητα

e_{\min} : μέγιστη συμβατική πυκνότητα

Για τον προσδιορισμό της τιμής μιας άμμου χρειάζεται να γνωρίζουμε το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών των κόκκων της. Έτσι, όταν υπάρχει μεγάλη ποικιλία κόκκων σε έναν αμμώδη σχηματισμό, τόσο η μικρότερη και μεγαλύτερη πυκνότητα είναι μεγαλύτερες (Καββαδάς, 2016).

Η κατάταξη των αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα φαίνεται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Η κατάταξη της άμμου βάση της πυκνότητας (Καββαδάς, 2016)

Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μή-συνεκτικού εδάφους
0-15	Πολύ χαλαρό
15-35	Χαλαρό
35-65	Μέσης πυκνότητας
65-85	Πυκνό
85-100	Πολύ πυκνό

2.3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση

Στα χονδρόκοκκα εδάφη η μηχανική τους συμπεριφορά, επηρεάζεται από το μέγεθος και την ποικιλία των κόκκων και για αυτό μελετάται στα πλαίσια των φυσικών χαρακτηριστικών .

Οι χάλικες περιέχουν κόκκους μεγέθους αρκετών εκατοστών, αντίθετα οι άργιλοι αποτελούνται από κόκκους που το μέγεθός τους είναι μικρότερο του ενός μίκρου (μm), δηλαδή 1000 φορές μικρότεροι από τους κόκκους των χαλικών. Η μέθοδος κατάταξης των εδαφών, η οποία τείνει να γίνει γενικά αποδεκτή στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα είναι ο Πίνακας 3 όπως προτείνεται από τον Βρετανικό Κανονισμό (British Standards) (Καββαδάς, 2016).

Πίνακας 3: Κατάταξη εδαφών βάση των Βρετανικών Κανονισμών (Καββαδάς, 2016)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Μέγεθος κόκκων (mm)	
		Από	Έως
Χάλικες	Χονδρόκοκκοι	60	20
	Μεσόκοκκοι	20	6
	Λεπτόκοκκοι	6	2
Άμμοι	Χονδρόκοκκες	2	0,6
	Μεσόκοκκες	0,6	0,2
	Λεπτόκοκκες	0,2	0,06
Ύλεις	Χονδρόκοκκες	0,06	0,02
	Μεσόκοκκες	0,02	0,006
	Λεπτόκοκκες	0,006	0,002
Αργίλοι	-	<0,002	-

Για την κοκκομετρική διαβάθμιση, δηλαδή τον προσδιορισμό των μεγεθών των κόκκων γίνεται με “κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα” για τους χάλικες, ενώ “κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο του αραιόμετρου” για τις αργίλους (Καββαδάς, 2016).

Στην μέθοδο ανάλυσης με κόσκινα περνά το εδαφικό υλικό μέσα από κόσκινα με βαθμιαία μικρότερες οπές και μετράται το βάρος του υλικού που μένει σε κάθε κόσκινο. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία πρότυπων μεγεθών σε κόσκινα. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν την Αμερικάνικη διάσταση (ASTM D422-1980) (Καββαδάς, 2016).

Προδιαγραφή ASTM D422-1980. Ο κωδικός και η διάσταση της οπής των κοσκίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4: Μεγέθη κοσκίων (Καββαδάς, 2016)

Αριθμός κοσκίου (No)	Διάσταση οπής (mm)
4	4.75
10	2
20	0.85
40	0.425
60	0.25
100	0.15
140	0.106
200	0.075

Σημειώνεται ότι το κόσκινο Νο 200 είναι η μικρότερη οπή που χρησιμοποιείται στις άμμους (0,06 mm). Επειδή δεν είναι πρακτικό, κοκκομετρώνται εδάφη με μέγεθος μέχρι το Νο 200. Για αυτό για την κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων εδαφών χρησιμοποιείται το αραιόμετρο, η οποία βασίζεται στο νόμο του Stokes. Η χρήση της μεθόδου γίνεται σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, όπου μετράται η ταχύτητα καθίζησης των σφαιρών, τα οποία εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ιδίου του υλικού, αλλά και αυτά του ρευστού. Με την μέθοδο του αραιομέτρου υπολογίζεται οι πυκνότητες εδάφους και νερού σε διαφορετικές περιόδους και ύστερα προκύπτει η ταχύτητα με την οποία βυθίζονται οι κόκκοι του εδάφους από την οποία γίνεται κατανομή των μεγεθών των κόκκων (Καββαδάς, 2016).

2.4 Φυσικά χαρακτηριστικά συνεκτικών εδαφών

Παραπάνω αναλύθηκαν, η σχετική πυκνότητα και η κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα ως τα φυσικά χαρακτηριστικά των χονδρόκοκκων εδαφών, με τα οποία μπορεί να έχουμε έναν ολοκληρωμένο προσδιορισμό των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Από την άλλη στα λεπτόκοκκα υλικά ο υπολογισμός των φυσικών χαρακτηριστικών δεν είναι απλός. Αυτό γιατί οι κόκκοι έχουν πολύ μικρό μέγεθος και τα φυσικά χαρακτηριστικά δεν είναι άμεσα ταυτισμένα με τις μηχανικές ιδιότητες. Λόγω των παραπάνω τα φυσικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφών είναι τα όρια Atterberg και το ποσοστό υγρασίας. Τα όρια Atterberg δείχνουν την ενεργότητα των ηλεκτρικών δυνάμεων μεταξύ των εδαφικών πλακιδίων, όλα αυτά με το μέγεθος των κόκκων, γιατί όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι τόσο μεγαλύτερες ηλεκτρικές δυνάμεις αναπτύσσονται. Τέλος το ποσοστό υγρασίας δίνει το ποσοστό των κόκκων στο εδαφικό υλικό που με την σειρά του αντιστοιχεί στην σχετική πυκνότητα (Καββαδάς, 2016).

Η επιρροή του νερού είναι καθοριστική στα συνεκτικά εδάφη καθώς επηρεάζει την μηχανική του συμπεριφορά. Όσο αυξάνει το ποσοστό της υγρασίας, η συμπεριφορά του μοιάζει με τη συμπεριφορά των ρευστών, και αυτό γιατί μειώνονται οι αντιδράσεις μεταξύ των κόκκων. Ένα συνεκτικό εδαφικό υλικό διακρίνεται και αλλάζει διαδοχικά τέσσερις καταστάσεις ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας (από πολύ μικρό σε πολύ μεγάλο). Πρώτον εύθρυπτο στερεό, όπου η συμπεριφορά του μοιάζει με τα ψαθυρά υλικά, στο έδαφος υπάρχουν μικρές παραμορφώσεις και η θραύση γίνεται ακαριαία. Δεύτερον ημιστέρεο είναι μια παροδική κατάσταση μεταξύ της εύθρυπτης και της πλάστιμης με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τρίτον πλάστιμο στερεό, όσο αυξάνει η υγρασία μειώνεται η δυσκαμψία, το έδαφος μπορεί να δέχεται παραμορφώσεις χωρίς ρηγματώσεις και θραύση. Τέταρτον παχύρευστο υγρό, στην κατάσταση αυτή το έδαφος παραμορφώνεται όταν λαμβάνει διατμητικές τάσεις (Καββαδάς, 2016).

Ανάμεσα σε κάθε όριο των παραπάνω τεσσάρων καταστάσεων αντιστοιχεί ένα ποσοστό υγρασίας. Ανάμεσα στην στερεά και την ημιστέρεα υπάρχει το όριο συρρίκνωσης, ανάμεσα στην ημιστέρεα

και την πλάστιμη υπάρχει το όριο πλαστιμότητας και τέλος ανάμεσα στην πλάστιμη και την υδαρής υπάρχει το όριο υδαρότητας (Καββαδάς, 2016).

Τα παραπάνω όρια, αναφέρονται ως όρια Atterberg και είναι τα χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών και οι τιμές τους υπολογίζονται με κατάλληλες δοκιμές. Για να υπολογιστεί το όριο υδαρότητας, γίνεται με την χρήση της συσκευής Casagrande, όπου σε εδαφικό υλικό τα χείλη της σχισμής που δημιουργήθηκε κλείνουν μετά από 25 πτώσεις κάψας, πάνω σε ειδική βάση. Όριο πλαστιμότητας είναι εκείνο το ποσοστό υγρασίας, όπου το εδαφικό υλικό θρυμματίζεται όταν η διάμετρος φτάσει τα 3 mm. Τέλος όριο συρρίκνωσης είναι εκείνο το όριο όπου η μείωση της υγρασίας στα κενά των πόρων του εδαφικού υλικού δεν επιφέρει και μείωση του όγκου του (Καββαδάς, 2016).

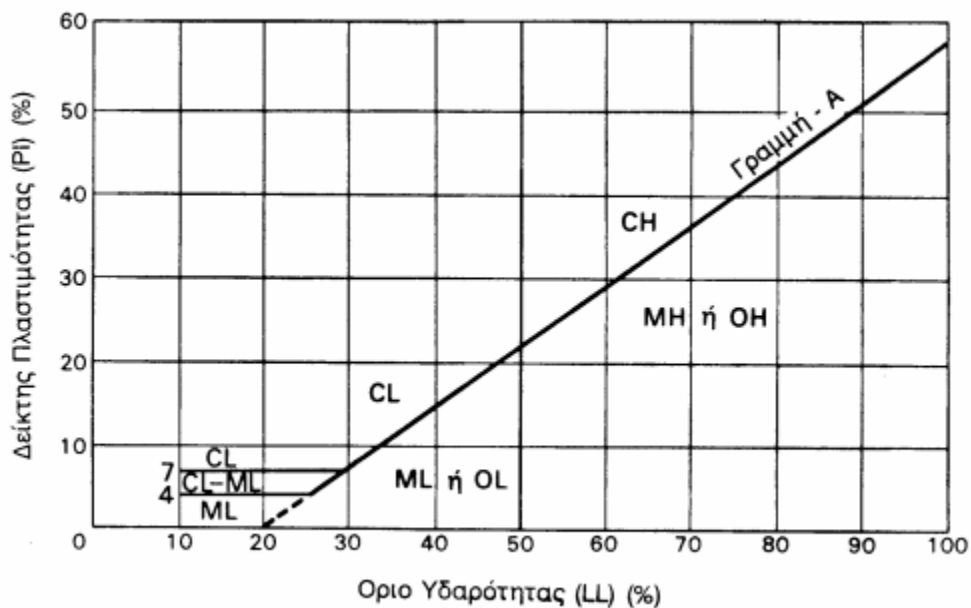
Τέλος, θα γίνει αναφορά σε δυο ακραίες καταστάσεις, όπου η αλλαγή του ποσοστού υγρασίας, προκαλούν αλλαγές στην συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών. Αρχικά εάν αφαιρέσουμε το νερό και την υγρασία από τους πόρους μιας αργίλου, π.χ. με θέρμανση σε κλίβανο, τότε το υλικό γίνεται στερεό με μεγάλη αντοχή (π.χ. τούβλα, κεραμίδια). Όταν αφαιρείται το νερό των πόρων, τα πλακίδια αργίλου έρχονται σε στενή επαφή, όπου αναπτύσσονται μεγάλες ελκτικές ηλεκτροχημικές δυνάμεις τύπου Van der Waals. Αυτές οι δυνάμεις είναι τόσο ισχυρές, ώστε είναι δύσκολη έως αδύνατη η απορρόφηση νερού από τις αργίλους και την διόγκωση του υλικού. Είναι γνωστό ότι δεν μειώνεται η αντοχή και η ποιότητα των καλών κεραμικών με τον καιρό και δεν υπάρχει θρυμματισμός σε επαφή τους με το νερό. Τέλος έχουμε και την υδαρής κατάσταση όταν έχουμε μίγμα νερού και αργίλου. Αυτή η κατάσταση είναι το αρχικό στάδιο ιζηματογένεσης και παρατηρείται στον πυθμένα θαλασσών και τις εκβολές ποταμών. Υπάρχει βαθμιαία καθίζηση με την οριακή ταχύτητα των πλακιδίων της αργίλου. Η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει εκατοντάδες χρόνια και αυτό γιατί τα πλακίδια έχουν μικρό μέγεθος (Καββαδάς, 2016).

Τα λεπτόκοκκα εδάφη έχουν την δυνατότητα να εμποτίζονται με νερό στην επιφάνεια των αργίλων. Όλα αυτά χωρίς να μειώνεται αισθητά η ένταση έλξης μεταξύ των πλακιδίων και στην συνέχεια χωρίς να μειώνεται η μηχανική τους αντοχή. Αυτή είναι η σημασία των ορίων Atterberg. Όμως η δυνατότητα να απορροφούν νερό χωρίς να μειώνεται η αντοχή του δεν συμβαίνει μονίμως. Τα όρια Atterberg καθορίζονται από το ποσοστό υγρασίας που μπορεί να προσροφήσει το έδαφος χωρίς να επηρεάσει την κατάστασή του (στερεά, ημιστέρεα, πλάστιμη και υδαρής) (Καββαδάς, 2016).

2.5 Ταξινόμηση εδαφών

Διάφορα συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί και εξελιχθεί με τη πάροδο του χρόνου για το χαρακτηρισμό των εδαφών. Πρόκειται για το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS, Unified Classification System for Soil), το σύστημα της Αμερικανικής Ένωσης Δοκιμών και Υλικών (ASTM, American Society for Testing and Materials) που αποτελεί τροποποίηση USCS, το σύστημα της Αμερικανικής Ένωσης Αυτοκινητοδρόμων και Μεταφορών (AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials) και τα Βρετανικά Πρότυπα (BS, British Standards) (Καββαδάς, 2016).

Για την ταξινόμηση των εδαφών χρησιμοποιούν ως πρότυπες δοκιμές η ανάλυση με κόσκινα και τις δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg, τα οποία είναι εύκολα στην χρήση, γρήγορα, άμεσα και φθηνά. Στην Ελλάδα επικρατεί το USCS. Για το USCS χρησιμοποιούνται τα εδάφη που συγκρατούνται στα κόσκινα με Νο 200 και Νο 4, και με την χρήση του χάρτη Casagrande των ορίων Atterberg όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Ο χάρτης αυτός χωρίζεται με την γραμμή A και το όριο υδαρότητας σε ποσοστό 50%. Στον άξονα χ παρουσιάζεται το όριο υδαρότητας, ενώ στον άξονα ψ ο δείκτης πλαστιμότητας (Καββαδάς, 2016).



Εικόνα 1: Χάρτης πλαστιμότητας του Casagrande (Καββαδάς, 2016)

Τα εδάφη που τα σημεία τους είναι πάνω από την A είναι οι άργιλοι άργιλοι (C), από την άλλη τα σημεία που είναι κάτω από την A αντιστοιχούν σε ίλεις. Επίσης, εδάφη σε σημεία δεξιά από το $LL=50\%$ ονομάζονται εδάφη υψηλής πλαστιμότητας (H), ενώ χαμηλής πλαστιμότητας (L) είναι τα σημεία αριστερά από την $LL=50\%$ (Καββαδάς, 2016).

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει το Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών. Η τελευταία στήλη είναι για τον χαρακτηρισμό κάθε είδος εδάφους (πχ. SM=ιλυώδεις άμμοι) (Καββαδάς, 2016).

Πίνακας 5: Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (Καββαδάς, 2016)

ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ εδάφη: < 50% διέρχεται από το No. 200	ΧΑΛΙΚΕΣ: < 50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No. 4	ΚΑΘΑΡΟΙ ΧΑΛΙΚΕΣ: < 5% διέρχεται από το No. 200	ΚΑΛΩΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΙ ΧΑΛΙΚΕΣ: Cu > 4	GW
		ΧΑΛΙΚΕΣ ΜΕ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ υλικό: > 12% διέρχεται από το No. 200	ΚΑΚΩΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΙ ΧΑΛΙΚΕΣ: Cu < 4	GP
			ΙΛΥΩΔΕΙΣ ΧΑΛΙΚΕΣ: κάτω από τη γραμμή A, ή Ip < 4	GM
	ΑΜΜΟΙ: > 50% του χονδρόκοκκου κλάσματος διέρχεται από το No. 4	ΚΑΘΑΡΕΣ ΑΜΜΟΙ: < 5% διέρχεται από το No. 200	ΑΡΓΙΛΩΔΕΙΣ ΧΑΛΙΚΕΣ: πάνω από τη γραμμή A, ή Ip > 7	GC
			ΚΑΛΩΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΙ ΧΑΛΙΚΕΣ: Cu > 6	SW
		ΚΑΚΩΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΙ ΧΑΛΙΚΕΣ: Cu < 6	SP	
ΑΜΜΟΙ ΜΕ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ υλικό: > 12% διέρχεται από το No. 200	ΑΜΜΟΙ ΜΕ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ υλικό: > 12% διέρχεται από το No. 200	ΙΛΥΩΔΕΙΣ ΑΜΜΟΙ: κάτω από τη γραμμή A, ή Ip < 5	SM	
		ΑΡΓΙΛΩΔΕΙΣ ΑΜΜΟΙ: πάνω από τη γραμμή A, ή Ip > 7	SC	
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ εδάφη: > 50% διέρχεται από το No. 200	Εδάφη ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: wL < 50%	ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: πάνω από τη γραμμή A	CL	
		ΙΛΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: κάτω από τη γραμμή A	ML	
		ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΛΕΙΣ ή ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ	OL	
	Εδάφη ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: wL < 50%	ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: πάνω από τη γραμμή A	CH	
		ΙΛΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: κάτω από τη γραμμή A	MH	
		ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΛΕΙΣ ή ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ	OH	
Κυρίως οργανικά υλικά			Pt	

Κεφάλαιο 3 Τεχνική γεωλογία βραχομάζας

3.1 Βραχομάζα

Ως βραχομάζα χαρακτηρίζεται το στερεό που παρουσιάζει ασυνέχειες και είναι μέρος ενός βραχώδους υλικού. Το πέτρωμα εμφανίζεται σε αυτή την κατάσταση στην φύση, σε πολύ μεγάλες εκτάσεις (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Για τον σχεδιασμό και την ολοκλήρωση τεχνικών έργων είναι απαραίτητο να υπάρχει γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας, ανεξαρτήτως αν είναι υπόγεια (π.χ. σήραγγα, πρανές) ή επίγεια (π.χ. κτίρια). Δύσκολο αντικείμενο αποτελεί ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της βραχομάζας, σε ότι έχει να κάνει με την αντοχή και παραμορφωσιμότητα, και αυτό γιατί οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του βράχου και τις ασυνέχειες που εμφανίζονται σε αυτό. Έτσι για μια ρεαλιστική και αξιόπιστη εκτίμηση, είναι απαραίτητη η γνώση των γεωλογικών δεικτών που επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά του βράχου, ώστε να αντληθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για τον σωστό σχεδιασμό (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Με επιτόπου δοκιμές βραχομηχανικής βγαίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, επειδή εκτελούνται σε περισσότερα «δείγματα» που είναι στην φυσική τους κατάσταση έχοντας και δομικές ασυνέχειες. Ως προς τα αποτελέσματα, θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά σε σχέση με τα αντίστοιχα των εργαστηρίων. Όμως οι δοκιμές αυτές είναι αρκετά περιορισμένες λόγω μικρότερης αντιπροσωπευτικότητας, των ειδικών συνθηκών, του μεγάλου κόστους κ.λπ. Η εμπειρία μας από πραγματικές κατασκευές τεχνικών έργων σε ποικίλες γεωλογικές συνθήκες, μας δίνουν την δυνατότητα εκτίμησης των μηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται στην χρήση «συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας», τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στην συνέχεια (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

3.2 Γενικά ταξινόμησης

Σε έργα που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σε βραχώδεις γεωλογικές συνθήκες, πρέπει να υπάρχει πλήρης γνώση των κριτηρίων που είναι ικανά να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά τη βραχομάζας. Πλήρης επίγνωση των συνθηκών και τα επαρκή περιθώρια τους, δίνει τις κατάλληλες κατασκευαστικές απαιτήσεις του έργου, όλα αυτά με την σωστή εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Είναι ευρέως γνωστό ότι με οργανωμένη και μεθοδική ταξινόμηση της βραχομάζας, μας δίνει επαρκή πληροφόρηση. Απαραίτητη θεωρείται για κάθε ταξινόμηση γενικότερα, η ανάπτυξη παρόμοιων κριτηρίων έτσι ώστε να είναι άμεση η κατάταξη κάθε βραχομάζας σε κατηγορίες και ομάδες με παρόμοια χαρακτηριστικά, ώστε να αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο. Θα πρέπει να υπάρχουν αντικειμενικά, αξιόπιστα, έγκυρα, συγκρίσιμα και χρήσιμα συμπεράσματα και αποτελέσματα, μέσα από παραμέτρους που θα προσδιορίζονται από ποσοτικά μεγέθη. Πλέον στις μέρες μας, λόγω της μεγάλης εμπειρίας από πλήθος κατασκευών τεχνικών έργων, η αξιοπιστία των συστημάτων ταξινόμησης είναι σχεδόν σίγουρη και αποτελούν θεμέλιο του εμπειρικού σχεδιασμού καθιστώντας την εφαρμογή τους απαραίτητη. Σημειώνεται ότι μονίμως κάποιο από τα συστήματα ταξινόμησης χρησιμοποιείται, για τον σχεδιασμό υπογείων έργων και πρυνών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Οι βασικοί στόχοι της εφαρμογής και χρήσης των συστημάτων ταξινόμησης είναι να έχουν ίδια αντιμετώπιση, βραχομάζες με παραπλήσιες μηχανικές συμπεριφορές και έχουν ταξινομηθεί ανάλογα των κριτηρίων τους (αντιστήριξη, επιβολή φορτίων κ.λπ.). Επίσης με την παροχή στοιχείων και παραμέτρων της βραχομάζας για να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός τεχνικών έργων σε βραχώδεις γεωλογικές συνθήκες. Τέλος να υπάρξει κοινό 'έδαφος' συναντήληψης πολιτικών μηχανικών και γεωλόγων που είναι οι κύριοι τομείς ασχολίας με γεωτεχνικά προβλήματα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

3.3 Δείκτης ποιότητας βραχομάζας

Με τον δείκτη ποιότητας βραχομάζας (Rock Quality Designation – RQD) εκτιμώνται οι ποιότητες της βραχομάζας με βάση πυρήνες γεωτρήσεων. Σε καθορισμένο μήκος γεώτρησης υπολογίζονται τα τεμάχια με μήκος άνω των 10 cm ως ποσοστό, δηλαδή (Καββαδάς, 2005):

$$RQD = \frac{\sum(\text{μήκους τεμαχίων μήκους} > 10\text{cm})}{\text{Ολικό μήκος του πυρήνα}} \times 100\%$$

Ο παραπάνω δείκτης εφαρμόζεται συνηθέστερα για την περιγραφή της βραχομάζας, αλλά έχει ελαττώματα. Παρουσιάζει ευαισθησίες σε οριακές αλλαγές του συνολικού μήκους των πυρήνων. Επίσης παρουσιάζει ευαισθησία στην δειγματοληψία (τύπος και διάμετρος του δειγματολήπτη), όπως και σε μικρές αλλαγές στην γεώτρηση (π.χ. οι περιστροφές, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, ο τύπος της κεφαλής κ.α.). Τέλος έχει μεγάλη εξάρτηση στον τρόπο που γίνεται η γεώτρηση όσον αφορά τις ασυνέχειες του βράχου(Καββαδάς, 2005).

3.4 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά της

Οι ασυνέχειες που εμφανίζονται στην βραχομάζα ίσως να εξαρτώνται από ρηγματώσεις, διακλάσεις, επιφάνειες στρώσης και επιφάνειες σχιστότητας. Το πλήθος από τα συστήματα των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζουν τις ασυνέχειες της βραχομάζας. Πολλά συστήματα ασυνεχειών απαρτίζονται από παρόμοιες και παράλληλες ασυνέχειες. Επίσης το πλήθος των ασυνεχειών που έχει η βραχομάζα, προκύπτει από το πλήθος των συστημάτων ασυνεχειών και την σχετική απόσταση μεταξύ αυτών σε ένα σύστημα. Οι αποστάσεις ανάμεσα στις ασυνέχειες χαρακτηρίζονται παρακάτω (Καββαδάς, 2005):

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (m)	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών
>2 m	Μεγάλη
0,6 – 2 m	Αρκετά μεγάλη
0,2 – 0,6 m	Μέση
0,06 – 0,2 m	Μικρή
<0,06 m	Πολύ μικρή

Η τραχύτητα είναι αυτή που καθορίζει την κατάσταση των ασυνεχειών. Ανάλογα το μέγεθος τραχύτητας, οι ασυνέχειες διαχωρίζονται από: πολύ τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (Καββαδάς, 2005).

Η ολίσθηση που χρειάζεται να συμβεί στο μήκος της ασυνέχειας, ώστε να εξαϋλωθούν οι επιφάνειες, για την αποκατάσταση της επαφής μεταξύ των βραχώδων τεμαχών (Καββαδάς, 2005):

- (1) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)
- (2) Ολίσθηση έως 100 mm
- (3) Ολίσθηση άνω των 100 mm

Εναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος): πάχος 0, πάχος έως 1 mm, πάχος 1-5 mm, πάχος άνω των 5 mm (Καββαδάς, 2005).

3.5 Σύστημα ταξινόμησης RMR

Ονομάζεται γεωτεχνική ταξινόμηση ή αλλιώς RMR (Rock Mass Rating) και ο πρώτος που την παρουσίασε ήταν ο BIENIAWSKI (1973) ενώ πλέον είναι γνωστό ως «Σύστημα Bieniawski». Ο BIENIAWSKI βελτίωσε το σύστημα το 1979 ενώ του έδωσε και την τελική (σημερινή) του μορφή το 1989 (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η ορθή εφαρμογή της μεθόδου ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

1^ο στάδιο: Αρχικά τα μέρη της βραχομάζας που θα μελετηθούν χωρίζονται σε επιμέρους ζώνες, όπου σε κάθε ζώνη παρουσιάζονται μακροσκοπικά παρόμοια κύρια χαρακτηριστικά (λιθολογική σύσταση, ασυνέχειες, φυσική κατάσταση γεωλογικού σχηματισμού κλπ.). Βασικός παράγοντας του παραπάνω διαχωρισμού είναι οι γενικότερες συνθήκες της περιοχής που μελετάται αλλά και το συνολικό εύρος. Οι διάφορες κύριες γεωλογικές δομές όπως κάποιο ρήγμα ή ζώνη διάτμησης κλπ. ή επίσης από την αλλαγή των γεωλογικών συνθηκών με άλλο τύπο βράχου, έχουν καθοριστικό ρόλο στην οριοθέτηση των παραπάνω ζωνών. Για αυτό σε περίπτωση σημαντικής μεταβολής των ασυνεχειών που έχει το πέτρωμα, στην περίπτωση που μελετάται στο αρχικό πέτρωμα που, συνηθίζεται ο διαχωρισμός του (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

2^ο στάδιο: Αφού διαχωριστούν οι επιμέρους ζώνες, τότε για κάθε μια από αυτές συλλέγονται τα μεγέθη με τα οποία επιλέγονται τα κριτήρια ταξινόμησης. Ύστερα από μετρήσεις στην ύπαιθρο, αλλά και λεπτομερή εξέταση και έλεγχο δειγμάτων από γεωτρήσεις, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ποσοτικά και είναι απαραίτητα για την ταξινόμηση. Το σύστημα RMR λαμβάνει υπόψιν σειρά παραμέτρων για την

κατάλληλη ταξινόμηση, όπως η αντοχή του βράχου σε θλιπτικές δυνάμεις, ο δείκτης ποιότητας βραχομάζας που αναλύθηκε παραπάνω (RQD), οι αποστάσεις και οι καταστάσεις μεταξύ ασυνεχειών, οι υδρογεωλογικές συνθήκες και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τον τρόπο κατασκευής του έργου.

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται ολοκληρωμένα τα βήματα που ακολουθούνται για την χρήση του συστήματος RMR. Σημειώνεται ότι στο σύστημα RMR από την πρώτη του κιόλας εμφάνιση (1973) και μετά, έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις και τροποποιήσεις από τον Bieniawski (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Στον Πίνακα 6 υπάρχουν υποδιαιρέσεις με τις οποίες βρίσκουμε τα τελικά αποτελέσματα για τις 5 πρώτα κριτήρια, προστίθενται για τον υπολογισμό της βασικής βαθμολογίας (RMRBAS). Στην βασική βαθμολογία (RMRBAS) λαμβάνονται υπόψιν σύμφωνα με τον Πίνακα 6, υπολογισμός των ασυνεχειών όσον αφορά το σχήμα και τον τύπο του έργου για τον καθορισμό των τελικών αποτελεσμάτων RMR (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Πίνακας 6: Γεωμηχανική ταξινόμηση βραχομάζας(BIENIAWSKI 1989) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Ενότητα Α: Παράμετροι – κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησή της									
Παράμετροι ταξινόμησης			Εύρος τιμών						
1	Αντοχή βραχώδους υλικού		>10	4 -10	2 – 4	1-2	Προτιμάρται η δοκιμή μοναξονικής θλίψης		
			>250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5	1	<1
	Βαθμός		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	<25		
	Βαθμός		20	17	13	8	3		
3	Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)		>2	0.6 – 2	0.2 – 0.6	0.06 – 0.2	<60 mm		
	Βαθμός		20	15	10	8	5		
4	Κατάσταση ασυνεχειών		Πολύ τραχείς επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά τοιχώματα.	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμό <1 mm. Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμό <1 mm. Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	Ολισθηρές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης <5 mm ή διακλάσεις ανοιχτές 1-5 mm. Συνεχείς διακλάσεις.	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοικτές > 5mm. Συνεχείς διακλάσεις.		
	Βαθμός		30	25	20	10	0		
5	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10 m μήκους σήραγγας (l/m)	Καμία	<10	10-25	25 – 125	>125		
		Τιμές λόγου (πίεση νερού διακλάσεων/ μέγιστη	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		

		κύρια τάση					
--	--	---------------	--	--	--	--	--

Ενότητα Β: Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών						
Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμοί	Σήραγγες και μεταλλεία	0	-2	-5	-10	-12
	Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60

Ενότητα Γ: Κατηγορίες βραχομάζας με βάση την τελική βαθμολογία					
Βαθμολογία	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	<20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Χαρακτηρισμός	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή

Ενότητα Δ: Τεχνική σημασία ταξινόμησης					
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Μέσος χρόνος διατήρησης διατομής σήραγγας	20 χρόνια για άνοιγμα 15 m	1 χρόνος για άνοιγμα 10 m	1 εβδομάδα για άνοιγμα 5 m	10 ώρες για άνοιγμα 2-5 m	30 min για άνοιγμα 1 m
Συνοχή βραχομάζας (kPa)	>400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Γωνία τριβής βραχομάζας	>45°	35° – 45°	25° – 35°	15° – 25°	<15°

Στον Πίνακα 7 που είναι κυρίως για τα υπόγεια έργα, δίνεται η ποιοτική εκτίμηση της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Πίνακας 7: Οδηγίες για την ταξινόμηση της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην κατασκευή σηράγγων(WICHAM et al 1972) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλα στον άξονα της σήραγγας	
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση αντίθετα με την κλίση			
Κλίση 45° - 90°	Κλίση 20° - 45°	Κλίση 45° - 90°	Κλίση 20° - 45°	Κλίση 45° - 90°	Κλίση 20° - 45°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια
Για κλίση ασυνέχειας 0° – 20° ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της σε σχέση με τον άξονα χαρακτηρίζεται Μέτρια					

Τέλος προκύπτει η τελική βαθμολογία της του συστήματος RMR από την Ενότητα Γ του Πίνακα 7. Η βραχομάζα αντιστοιχεί σε καθορισμένες κατηγορίες, όπου εκτιμάται η μηχανική συμπεριφορά και οι μηχανικοί παράμετροι (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

3^ο στάδιο: Στο τελικό αυτό στάδιο προσδιορίζεται η συμπεριφορά του βράχου, αλλά και εκτιμώνται οι μηχανικοί παράμετροι. Όλα αυτά με την ταξινόμηση και κατάταξη της βραχομάζας σε συγκεκριμένη κατηγορία (Ενότητα Δ του Πίνακα 7) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η ταξινόμηση RMR χρησιμοποιείται σε πλήθος τεχνικών έργων, κυρίως όμως σε σήραγγες, όπως επίσης σε μεταλλεία, πρανή, θεμελιώσεις. Βασικότερη εφαρμογή της μεθόδου είναι σε υπόγεια έργα από την φάση του σχεδιασμού και μελέτης, έως την φάση της κατασκευής. Με βάση την τελική βαθμολογία της RMR, γίνεται ταξινόμηση της βραχομάζας σε μια συγκεκριμένη κατηγορία και ως εκ τούτου τον καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της καθώς και τον καθορισμό της κατάλληλης υποστήριξης σηράγγων με βάση την εμπειρία σε προηγούμενες κατασκευές και οδηγίες (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

3.6 Σύστημα ταξινόμησης Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q προτάθηκε αρχικά, για την ταξινόμηση των βραχωδών μαζών με στόχο να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για την ανάγκη στήριξης σηράγγων. Δημοσιεύθηκε πρώτη φορά το 1974 από της BARTON, LIEN και LUDE του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου, βασίστηκε σε εμπειρίες κατασκευής μεγάλου αριθμού τεχνικών έργων στην Σκανδιναβία. Αργότερα συμπεριλήφθηκε ως βασικός παράγοντας στην διάνοιξη σήραγγας με την μέθοδο NMT, η οποία αποτελεί συμπλήρωμα της NATM. Οι μέθοδοι αυτοί θα αναλυθούν στα παρακάτω κεφάλαια. Το σύστημα αυτό στηρίζεται στον δείκτη που προσδιορίζει την ποιότητα του βραχώδους υλικού (Palmstrom, Broch, 2006).

Ο δείκτης Q υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q=(RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

όπου:

RQD: είναι ο δείκτης ποιότητας πετρώματος

J_n: αριθμητικός παράγοντας του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών

J_r: αριθμητικός παράγοντας της τραχύτητας των ασυνεχειών

J_a: αριθμητικός παράγοντας του βαθμού αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

J_w: συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού της ασυνέχειες

SRF: συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων

Με το (RQD/J_n) εκφράζεται η υφή της βραχομάζας και είναι μέτρο σύγκρισης του πλήθους των βραχωδών τεμαχίων (block size) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Με τον λόγο (J_r/J_a) γίνεται έκφραση της τραχύτητας και των χαρακτηριστικών τριβής στα τοιχώματα των ασυνεχειών και καθορίζεται η αντοχή τους σε διάτμηση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Με τον λόγο (J_w/SRF) είναι ένας εμπειρικός λόγος που εκφράζει τις τάσεις που επιδρούν στο βραχώδες υλικό. Είναι συνδυασμός της επίδρασης της υδροστατικής πίεσης που επηρεάζει την αντοχή σε διάτμηση των ασυνεχειών μειώνοντας έτσι την ενεργό ορθή τάση και εκείνων των δυνάμεων που συνθλίβουν το πέτρωμα, ασθενείς χαλαρωμένες ζώνες ή μπορεί και τοπικές μεγάλες φορτίσεις στην βραχομάζα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Όπως και στην μέθοδο RMR, για την ταξινόμηση ακολουθείται μεθοδολογία που περιλαμβάνει τρία στάδια με βασική διαφορά στα κριτήρια και της παραμέτρους που αντιστοιχούν σε κάθε ταξινόμηση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Στο αρχικό στάδιο (Α) διαχωρίζεται την βραχομάζα με ίδια χαρακτηριστικά σε επιμέρους ζώνες. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι εντελώς παρόμοια και προτιμάται η μεθοδική γεωλογική ανάλυση ολοκληρωμένες απαντήσεις όλων των γεωλογικών συνθηκών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι παράμετροι και τα κριτήρια για την εφαρμογή του συστήματος Q, όπου γίνεται και βαθμονόμηση της (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

1. Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD)		
Περιγραφή	Τιμές RQD (%)	RQD κατά DEERE (1963). Για RQD < 10 (περιλαμβάνεται και η τιμή 0) λαμβάνεται RQD = 10. Η τιμή του RQD λαμβάνεται πάντα στην πλησιέστερη πεντάδα π.χ. 15, 20, 25 κ.λ.π.
Πολύ πτωχή	0 – 25	
Πτωχή	25 – 50	
Μέτρια	50 – 75	
Καλή	75 – 90	
Εξαιρετική	90 – 100	
2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών – Joint set number (J_n)		
Περιγραφή	Τιμές J_n	Στις περιοχές διασταυρώσεων μέσα στη σήραγγα λαμβάνεται ($3 \times J_n$) Στις περιοχές των εισόδων (στοιμίων) της σήραγγας λαμβάνεται ($2 \times J_n$)
Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5 – 1.0	
Ένα σύστημα ασυνεχειών	2	
Ένα κύριο σύστημα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	3	
Δύο συστήματα ασυνεχειών	4	
Δύο κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	6	
Τρία συστήματα ασυνεχειών	9	
Τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και ένα δευτερεύον	12	
Τέσσερα ή περισσότερα συστήματα, τυχαίος προσανατολισμός πολύ διακλασμένο πέτρωμα, δομή « sugar cube »	15	
Θρυμματισμένο πέτρωμα (δομή εδάφους)	20	
3. Τραχύτητα των ασυνεχειών – Joint roughness number (J_r)		
Περιγραφή	Τιμές J_r	Αν η μέση απόσταση των ασυνεχειών του κυρίου συστήματος υπερβαίνει τα 3 m προστίθεται 1 στην τιμή του J_r Τιμή $J_r = 0.5$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες ολισθηρές διακλάσεις με γραμμώσεις που παρουσιάζουν προσανατολισμό
3 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση		
Ασυνεχείς διακλάσεις	4	
Τραχείες ή ακανόνιστες – κυματοειδείς διακλάσεις	3	
Ομαλές – κυματοειδείς διακλάσεις	2	
Ολισθηρές – κυματοειδείς	1.5	
Τραχείες ή ακανόνιστες – επίπεδες	1.5	
Ομαλές – επίπεδες	1	
Ολισθηρές – επίπεδες	0.5	
3 Β. Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή κατά τη διάτμηση		
Ζώνη (υλικό πλήρωσης) που περιέχει αργιλικά ορυκτά σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1	
Αμώδης, χαλικιώδης ζώνη ή ζώνη θρυμματισμού σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1	

4. Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση τοιχωμάτων – Joint alteration number (J_a)		
Περιγραφή	Τιμές J_a	φ_r (Παραμένουσα)
4 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή		
Επουλωμένα τοιχώματα με σκληρό και αδιαπέρατο υλικό (π.χ. χαλαζίας, επίδοτο)	0.75	
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1	25°–35°
Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσυνθεμένου πετρώματος (όχι αργιλικής σύστασης)	2	25°–30°
Στιφρός υμένας από αμμώδη ή ιλυώδη άργιλο	3	20°–25°
Μαλακός αργιλικός υμένας ή από ορυκτά με μικρή γωνία τριβής (τάλκης, χλωρίτης, γύψος) πάχους μέχρι 1–2 mm	4	8°–16°
4 Β. Επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση		
Υλικό πλήρωσης αμμώδες ή από θρυμματισμένο πέτρωμα (όχι αργιλικής σύστασης)	4	25°–30°
Υλικό πλήρωσης από στιφρή υπερστερεοποιημένη άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	6	16°–24°
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο, συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5mm	8	12°–16°
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο (π.χ. μοντμοριλονίτη) συνεχούς ανάπτυξης και πάχους < 5 mm. Οι τιμές του J_a εξαρτώνται από το είδος και το ποσοστό του αργιλικού υλικού και την παρουσία – δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες.	8–12	6°–12°
4 Γ. Καμιά επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση		
Ζώνες ή διαστρώσεις από θρυμματισμένο πέτρωμα	6	6°–24°
Ζώνες ή διαστρώσεις από θραυσμένο πέτρωμα και άργιλο	8	6°–24°
Ζώνες ή διαστρώσεις από άργιλο και θραυσμένο πέτρωμα. Οι τιμές του J_a εξαρτώνται από το είδος και την κατάσταση της αργίλου (στιφρή, μαλακή, διογκούμενη) και την παρουσία - δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες	8–12	
Ζώνες ή διαστρώσεις από στιφρή ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο με χαμηλό περιεχόμενο αργιλικό κλάσμα	5	
Παχιές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστρώσεις αργίλου.	10, 13	6°–24°
Παχιές, συνεχούς ανάπτυξης ζώνες ή ενστρώσεις αργίλου. Οι τιμές του J_a εξαρτώνται από την κατάσταση της αργίλου (στιφρή, μαλακή, διογκούμενη), το ποσοστό του αργιλικού υλικού (πχ. μοντμοριλονίτης) και την παρουσία–δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες	13–20	

5. Κατάσταση από πλευράς υδάτων – Joint water reduction factor (J_w)			
Περιγραφή	Τιμές J_w		Αν έχουν εγκατασταθεί μέτρα αποστράγγισης αυξάνεται η τιμή του J_w Ειδικά προβλήματα που έχουν σχέση με παγετό δεν λαμβάνονται υπόψη
Στεγνή εκκακφή ή μικρή εισροή (ταπικά 5 l/min). Πίεση 1 kg/cm^2	1		
Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πίεση 1–2.5 kg/cm^2	0.66		
Μεγάλη εισροή ή πίεση σε καλής ποιότητας πέτρωμα με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης. Πίεση 2.5 – 10 kg/cm^2	0.50		
Μεγάλη εισροή ή πίεση με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πίεση 2.5–10 kg/cm^2	0.33		
Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση με προοδευτική μείωση με την πάροδο του χρόνου. Πίεση >10 kg/cm^2	0.2–0.1		
Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση σταθερή. Πίεση >10 kg/cm^2	0.05–0.1		
6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων – Stress reduction factor (SRF)			
Περιγραφή	Τιμές SRF		Μείωση της τιμής του SRF κατά 25– 50 % αν οι ασθeneίς ζώνες επηρεάζουν αλλά δεν διατέμνουν την εκκακφή
6 Α. Ασθeneίς ζώνες (π.χ. ζώνες ρηγματίων) που τέμνουν την εκκακφή και μπορούν να χαλαρώσουν τη βραχομάζα με την κατασκευή της σήραγγας.			
Άφθονες ζώνες με αργιλικό υλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10		
Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <math>< 50 \text{ m}</math>)	5		
Μεμονωμένες ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >math>50 \text{ m}</math>)	2.5		
Πολλαπλές ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7.5		
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <math>< 50 \text{ m}</math>)	5		
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >math>50 \text{ m}</math>)	2.5		
Χαλαρές ανοικτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα ή δομή «sugarcube» (για οποιοδήποτε βάθος)	5		
6 Β. Συμπαγές, ικανής αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων			
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια	σ_c / σ_1	σ_1 / σ_1	Σε έντονα ανισότροπο τασικό πεδίο (που έχει μετρηθεί), όταν $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ μείωση του σ_c και σ_1 σε 0.8 σ_c και 0.8 σ_1 . Όταν $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ μείωση αντίστοιχα σε 0.6 σ_c και 0.6 σ_1
Μέσες τάσεις	200– 10	13– 0.66	
Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή	10– 5	0.66– 0.33	
Ήπια εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα)	5– 2.5	0.33– 0.16	
Έντονη εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα)	<math>< 2.5</math>	<math>< 0.16</math>	
6 Γ. Συνθλιμμένο πέτρωμα. Πλαστική παραμόρφωση πετρώματος κάτω από πολύ υψηλές τάσεις			
Μέτρια πίεση σύνθλιψης*	5– 10		
Μεγάλη πίεση σύνθλιψης*	10– 20		
6 Δ. Διογκούμενο πέτρωμα λόγω ενεργότητας με την παρουσία νερού			
Μέτρια πίεση διογκωσης	5– 10		
Μεγάλη πίεση διογκωσης	10– 15		

Εικόνα 2: Ταξινόμηση της βραχομάζας (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Ως συμπέρασμα είναι η εύρεση της τιμής Q βάση του προηγούμενου τύπου, έτσι χαρακτηρίζεται η ποιότητα της βραχομάζας της φαίνεται στον Πίνακα 8. Οι τιμές του Q καλύπτουν όλα τα είδη ποιότητας βραχομάζας, από συνθλιμμένο πέτρωμα έως σκληρό βράχο χωρίς ασυνέχειες, με τιμές από 0,001 περίπου μέχρι 1000 (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Πίνακας 8: χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q(BARTON et al 1974) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Q	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας
< 0,01	Εξαιρετικά πτωχή
0,01 – 0,1	Πάρα πολύ πτωχή
0,1 – 1	Πολύ πτωχή
1 – 4	Πτωχή
4 – 10	Μέτρια
10 – 40	Καλή
40 – 100	Πολύ καλή
100 – 400	Πάρα πολύ καλή
>400	Εξαιρετικά καλή

3.7 Σχέση και σύγκριση των συστημάτων RMR και Q

Στις μέρες μας τα συστήματα RMR και Q πιο έγκυρα και πλήρη συστήματα για την ταξινόμηση της βραχομάζας είναι τα συστήματα RMR και Q. Οι συγγραφείς τους για την ανάπτυξη των συστημάτων βασίστηκαν σε μεγάλο όγκο πραγματικών περιστατικών, αλλά ακόμα και τώρα χρησιμοποιούνται συνεχώς σε πολλά πραγματικά τεχνικά έργα σε διεθνές και Ελληνικό επίπεδο. Γενικά, οι προβλέψεις και οι εκτιμήσεις που δίνουν τα συστήματα αυτά έχουν αποδειχθεί αρκετά ρεαλιστικά, ενώ οι διαφορές που εμφανίζονται από τις πραγματικές συνθήκες θεωρούνται αμελητέες και έχουν να κάνουν με τις μεθόδους υποστήριξης υπογείων έργων (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Το βασικό πλεονέκτημα του συστήματος RMR είναι ότι εκτός από τα υπόγεια έργα χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό πρανών και θεμελιώσεων. Με το σύστημα RMR εκτιμάται η αντοχή σε διάτμηση της βραχομάζας (c και γωνία τριβής ϕ). Επίσης είναι εύκολο και απλό στη χρήση του (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Από την άλλη η ταξινόμηση της βραχομάζας Q φαίνεται στην χρήση πιο αντιπροσωπευτικό και οι διαφορές που υπάρχουν όσον αφορά την πραγματικότητα είναι ελάχιστες και δίνουν πιο συντηρητικές εκτιμήσεις. Ακόμα και στις πτωχής ποιότητας βραχομάζες η αξιοπιστία του είναι σημαντική και παίρνει υπόψη όλες τις εντατικές καταστάσεις της βραχομάζας, τις περιβάλλουσες τάσεις, τις διογκώσεις κ.λπ. με τις παραμέτρους J_w και SRF. Η μέθοδος έχει ως βασικό μειονέκτημα ότι δεν υπολογίζει τις ασυνέχειες του βραχώδους υλικού σε σχέση με την γεωμετρία της σήραγγας. Η παραπάνω κατάσταση γίνεται εμφανής στην ευστάθεια κατασκευών, όταν ο

προσανατολισμός των ασυνεχειών είναι ξεκάθαρος και υπάρχουν σε όλο το μήκος (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Στον Πίνακα 9 δίνονται ολοκληρωμένα τα βασικά κριτήρια που για την εφαρμογή των δύο αυτών συστημάτων, βασισμένη στην εμπειρία που υπάρχει από την εφαρμογή τους (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Πίνακας 9: Συγκριτική θεώρηση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Σύστημα RMR	Σύστημα Q
Απλό στη χρήση του χωρίς να απαιτεί σημαντική εμπειρία του χρήστη	Σύνθετο στη χρήση του και απαιτεί σημαντική εμπειρία του χρήστη
Δυνατότητα εφαρμογής σε όλα τα τεχνικά έργα (πρανή – θεμελιώσεις – σήραγγες)	Δυνατότητα εφαρμογής μόνο σε υπόγεια τεχνικά έργα καλύπτοντας όμως το εύρος αυτών από πλευράς διαστάσεων (σήραγγες, σταθμοί, ανοίγματα κ.λπ.)
Δεν λαμβάνει υπόψη το επιτόπου πεδίο των τάσεων και έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις μόνο που η αστάθεια προκαλείται από χαλάρωση της βραχομάζας. Για το λόγο αυτόν οι απαιτήσεις υποστήριξης αναφέρονται σε συγκεκριμένων διαστάσεων διατομές και ειδικότερα σε σήραγγες διαμέτρου 10 m, με κατακόρυφες τάσεις <25 MPa	Λαμβάνει υπόψη τις επιτόπου τάσεις με την παράμετρο SRF τόσο για περίπτωση συμπαγών και σκληρών πετρωμάτων όσο και για ασθενείς ζώνες διάτμησης και ρηγμάτων μέχρι και συνθλιμμένο και διογκούμενο πέτρωμα
Λαμβάνει υπόψη άμεσα τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με τον προσανατολισμό του τεχνικού έργου	Δεν λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό των ασυνεχειών παρά μόνο έμμεσα στην εκτίμηση του λόγου (Jr/Ja) που αναφέρεται στο πλέον δυσμενές σύστημα
Οδηγεί σε εκτιμήσεις των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας	Δεν οδηγεί σε εκτιμήσεις των παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας
Η εφαρμογή του σε χαμηλής ποιότητας βραχομάζες δεν είναι αρκετά αξιόπιστη	Η εφαρμογή του σε χαμηλής ποιότητας βραχομάζες έχει σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας
Οι απαιτήσεις υποστήριξης είναι αρκετά συντηρητικές και οδηγούν μέχρι και σε υπερσχεδιασμό του έργου	Οι απαιτήσεις υποστήριξης είναι περισσότερο ρεαλιστικές και οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται σε σχέση με την πραγματικότητα είναι μικρές και βρίσκονται στη συντηρητική πλευρά των εκτιμήσεων
Ο χρόνος αυτοϋποστήριξης του ανυποστήρικτου τμήματος με το σύστημα RMR είναι αρκετά συντηρητικός σε σχέση με το Q που αντανακλά και τις διαφορετικές «φιλοσοφίες αντιστήριξης» μεταξύ των δύο συστημάτων (Νότια Αφρική και Σκανδιναβία)	

3.8 Γεωλογικός δείκτης GSI

Ο γεωλογικός δείκτης GSI (Geological Strength Index) χρησιμοποιείται για την ανάλυση πιο πτωχών σε ποιότητα βραχομαζών με $RMR < 40$ αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων. Πρώτη αναφορά έγινε από τον HOEK (1995), και ενημερώθηκε από τους Hoek, Marinos, και Benissi το 1998. Ο ελληνικός χώρος δομείται με ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό με τέτοιου τύπου βραχώμαζες, συνεπώς παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό υπογείων έργων. Το πλεονέκτημα του συστήματος GSI είναι στο ότι παρέχει πιο στοχευμένα αποτελέσματα, χωρίς μεγάλες αλλαγές της τιμής του δείκτη, ενώ παράλληλα δίνει ίδια αποτελέσματα με το σύστημα ταξινόμησης RMR και όλα αυτά για βραχομάζες με $RMR > 40$ (Καββαδάς, 2005).

Για βραχομάζες ποιότητας με $RMR > 40$ γενικώς το σύστημα GSI δίνει ίδια αποτελέσματα, δηλαδή οι τιμές σε αυτές τις ποιότητες είναι παρόμοιες (Καββαδάς, 2005).

Δύο κριτήρια λαμβάνει υπόψιν η μέθοδος GSI. Πρώτον τη δομή της βραχώμαζας, που δείχνει την επαφή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων. Δεύτερον την αντοχή των ασυνεχειών σε διατμητικές δυνάμεις (Καββαδάς, 2005).

Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι αξιολογήσεις των κριτηρίων για τον καθορισμό των τιμών του δείκτη GSI. Ο γεωλογικός δείκτης χρησιμοποιείται σε βραχώδες υλικά με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων, δηλαδή σε βραχώμαζες όπου η συμμετοχή του εδαφικού υλικού είναι μικρή (Καββαδάς, 2005).

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p>		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
ΔΟΜΗ		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
		Πολύ τραχιές, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες	Τραχιές, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργίλιο υλικό πλήρωσης
		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
	BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
	VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			40	30	
	DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων				20	
	LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων	N/A	N/A			10
		↑ ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ↓				

Εικόνα 3: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (HOEK and MARINOS 2000) (Καββαδάς, 2005)

3.9 Ταξινόμηση R_{Mi}

Ο δείκτης βραχομάζας R_{Mi} (Rock Mass index), προτάθηκε από τον Palmstrom (1995), αποτελεί σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας, με τα αποτελέσματα χαρακτηρίζεται η αντοχή σε θλίψη της βραχομάζας για την κατασκευή τεχνικών έργων. Η μέθοδος είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της κατάλληλης υποστήριξης σηράγγων, όσο αποτελεί την ποσοτικοποίηση που αναλύουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Από την μείωση της αντοχής του πετρώματος λόγω παρουσίας των ασυνεχειών, υπολογίζεται η ταξινόμηση και μαζί ο δείκτης R_{Mi}, σύμφωνα με τον τύπο (Νομικός, 2015):

$$R_{Mi} = C_0 * J_P$$

C₀ υπολογίζεται από την δοκιμή του πετρώματος σε πείραμα θλίψης από όπου προκύπτει η αντοχή αυτού και J_P (jointing parameter) έχει να κάνει με την μείωση της αντοχής του πετρώματος, η οποία έχει άμεση σχέση με το μήκος του υλικού που μελετάται και το είδος των ασυνεχειών. Η τιμή J_P είναι μεταξύ 0 και 1. Τον συντελεστή J_P τον υπολογίζουμε από τον παρακάτω τύπο (Νομικός, 2015):

$$J_P = 0.2\sqrt{j_C} * V_b D$$

V_b ορίζεται ως ο όγκος των άρρηκτων πετρωμάτων της βραχομάζας (m³). j_C είναι η τιμή, η οποία εκφράζει την κατάσταση των επιφανειών των διακλάσεων. Η τιμή βγαίνει από τον παρακάτω τύπο (Νομικός, 2015):

$$j_C = j_L * (j_A * j_R)$$

Με το j_L εκφράζονται το πλήθος των ασυνεχειών που εμφανίζονται στην βραχομάζα. Με τον όρο j_R ορίζεται η τραχύτητα και με το j_A η αλλοίωση των τοιχωμάτων διακλάσεων. Η τιμή του D είναι σε σχέση με το j_C και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (Palmstrom 1995) (Νομικός, 2015):

$$D = 0.37j_C^{-0.2}$$

Με το σύστημα RMI, η βραχομάζα ταξινομείται σε διαφορετικές κατηγορίες αντοχής ανάλογα με τις τιμές που προκύπτουν. Ασθενής θεωρείται η βραχομάζα για $RMI < 0,001$, αντίθετα χαρακτηρίζεται εξαιρετικά ισχυρή για $RMI > 100$ (Νομικός, 2015).

Κεφάλαιο 4 Σήραγγες και υπόγεια έργα

4.1 Μέθοδοι κατασκευής

4.1.1 Μέθοδος ανοιχτού ορύγματος (Cut and Cover)

Με την μέθοδο ανοιχτού ορύγματος κατασκευάζονται έργα σε εδάφη, όπου η σήραγγα δεν είναι σε μεγάλο βάθος. Ανάλογα αν η περιοχή είναι ακατοίκητη ή κατοικημένη εφαρμόζεται με τον τρόπο της η μέθοδος. Δεν παρουσιάζονται προβλήματα σε περιοχές χωρίς υπερκείμενες κατασκευές. Σε όλο το μήκος και πλάτος του έργου γίνεται η εκσκαφή και αντίστοιχα σε όλο το ύψος της κατασκευής. Ανάλογα με την επιτρεπόμενη κλίση του εδάφους παίρνουν την μορφή τους οι παρειές εκσκαφής, οι οποίες δεν αντιστηρίζονται. Σε περίπτωση παρουσίας υπογείων νερών, μειώνεται η στάθμη μέχρι να ολοκληρωθεί το έργο (Μαραγκός, 1997).

Δύσκολη είναι η περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου σε κατοικημένες περιοχές, ώστε αφενός να μην υπάρξουν κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, και επιπλέον στα γύρω τεχνικά έργα: αγωγούς, υπόγεια καλώδια, τεχνικά έργα. Έτσι βάση των πολεοδομικών κριτηρίων της περιοχής που θα κατασκευαστεί το τεχνικό έργο ακολουθούνται τα επιμέρους βήματα (Μαραγκός, 1997):

4.1.1.1 Αντιστηριζόμενη εκσκαφή χωρίς κάλυψη

Για την αποφυγή κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, κατασκευάζεται αρχικά η μισή διατομή. Έτσι μένει ελεύθερη η υπόλοιπη για να είναι δυνατή η κυκλοφορία. Ζητούμενο είναι η αποφυγή ζημιών σε γειτονικές κατασκευές, οπότε για την αντιστήριξη επιλέγονται διαφραγματικοί τοίχοι ή πασσαλοσανίδες. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται κατά την σύνδεση των δύο τμημάτων της διατομής (Μαραγκός, 1997).

4.1.1.2 Διάνοιξη υπό την προστασία κάλυψης

Για να μην υπάρξουν σοβαρά κυκλοφοριακά προβλήματα, ολοκληρώνεται η αντιστήριξη με την τοποθέτηση προσωρινής κάλυψης και μόνιμης πλάκας. Σε δεύτερο χρόνο στο εσωτερικό της κάλυψης και της σήραγγας γίνεται η εκσκαφή και συνεχίζεται το έργο. Ένα παράδειγμα της μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 (Μαραγκός, 1997).



Εικόνα 4: Η μέθοδος cut and cover (1)

Δεν υπάρχουν σοβαρά προβλήματα στον σχεδιασμό και κατασκευή έργων με την μέθοδο cut and cover και οι υπάρχουσες κατασκευές προστατεύονται πλήρως από τους διαφραγματικούς τοίχους. Από την μεριά τους οι καθιζήσεις εξαρτώνται από το ολικό βάθος της εκσκαφής και δεν ξεπερνούν τα 1 με 2 μέτρα στις μεριές των τοίχων. Σε πυκνές άμμους οι καθιζήσεις είναι αμελητέες, ενώ στα αμμώδη εδάφη είναι λίγο μεγαλύτερες. Αντιθέτως στα αργιλικά εδάφη θεωρούνται μεγάλες, καθώς φτάνουν το 1 έως 2% του συνολικού βάθους εκσκαφής. Λαμβάνοντας υπόψιν τα προβλεπόμενα κριτήρια για την στήριξη των τοίχων και με σωστές εργασίες εκσκαφών, έχουμε αμελητέες καθιζήσεις του εδάφους που δεν δημιουργούν προβλήματα στην θεμελίωση των τεχνικών έργων της γύρω περιοχής (Μαραγκός, 1997).

Χρησιμοποιείται ορθογωνική διατομή από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένη. Στην οροφή η πλάκα έχει πάχος 60-80 εκατοστά και για την ιδανική κατανομή των φορτίων συνηθίζεται να τοποθετείται σε βάθος 1-1,5 μέτρο από την επιφάνεια. Τα φορτία του εδάφους είναι μεγαλύτερα από την ίδια την σήραγγα για αυτό δεν παρουσιάζονται προβλήματα στην θεμελίωση. Η σήραγγα προστατεύεται από την εισροή υπόγειων νερών από το δάπεδο που είναι και πλάκα θεμελιώσεις. Οι δυνάμεις από τις ωθήσεις του εδάφους και την κυκλοφορία μεταφέρονται στους κατακόρυφους τοίχους, όμως δεν είναι σημαντικές. Για καλή στεγανότητα επιστρώνεται με ασφαλτικό υλικό και επενδύεται εσωτερικά για ηχομόνωση και αισθητικούς λόγους (Μαραγκός, 1997).

4.1.2 Μέθοδος κλειστής διάνοιξης με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)

Η μέθοδος διάνοιξης με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine) εφαρμόζεται εξίσου αποτελεσματικά για τις σήραγγες σε σκληρά ή χαλαρά πετρώματα και εδάφη. Είναι κατάλληλα για διάνοιξη με διάμετρο από 1 έως 15 m, με δυνατότητες να φτάσουν ακόμα και τα 19 μέτρα. Η ταχύτητα τους ανάλογα με τις συνθήκες της περιοχής κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως τα 130 m εβδομαδιαίως. Οι μηχανές αυτές είναι κατάλληλες για ταυτόχρονη διάνοιξη, αλλά τόσο για την υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας όσο και της τελικής υποστήριξης αυτής. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένα TBM της εταιρείας Αττικό Μετρό (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



Εικόνα 5: Μηχάνημα διάνοιξης σιράγγων (TBM) – Αττικό μετρό (2)

Η ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής εξαρτώνται από τις συνθήκες του εδάφους και τις απαιτήσεις από το TBM, η περιστροφή γίνεται με ταχύτητες από 1 έως 10 rpm. Αν η γεωλογία δεν επιτρέπει την σήραγγα να μένει ανυποστήρικτη, τότε για την υποστήριξη της σήραγγας τοποθετούνται προκατασκευασμένοι δακτύλιοι σκυροδέματος. Η διαδικασία γίνεται ενώ το μηχάνημα κινείται εμπρός ταυτόχρονα γίνεται και τοποθέτηση των δακτυλίων (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).

Πάνω στην κοπτική κεφαλή που περιστρέφεται βρίσκονται κυκλικοί δίσκοι που είναι απαραίτητοι για την κοπή του πετρώματος (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).

Τα μηχανήματα εκσκαφής σιηράγγων (TBM) ανάλογα με τις δυνατότητες εκσκαφής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες στα μηχανήματα σημειακής (επιλεκτικής) κοπής (Roadheader) που κυρίως χρησιμοποιούνται σε σήραγγες μη κυκλικής διατομής. Όμως στα θετικά είναι ότι είναι αρκετά ευκίνητα και παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις γεωλογικές αλλαγές της βραχομάζας. Ακόμα με την μέθοδο αυτή προσβάλουν μια περιορισμένη έκταση του μετώπου εκσκαφής. Και στα μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής (full – face machines) από την άλλη γίνεται η διάνοιξη σε όλη την διάμετρο της σήραγγας. Χρησιμοποιούνται κεφαλές ίση με την διάμετρο της σήραγγας και για τον λόγω αυτό εκσκάπτουν μόνο κυκλικές σήραγγες. Ο συνηθέστερος τύπος ενός τέτοιου μηχανήματος αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

- (1) την κεφαλή κοπής (cutter head) που είναι το περιστρεφόμενο τμήμα του TBM και είναι ενισχυμένη με τα κοπτικά άκρα (cutting tools) που αποτελούνται από δίσκους κοπής (cutter discs) και κοπίδια (drag bits), το πλήθος και η διάταξη των οποίων εξαρτώνται από την ποιότητα και τη σκληρότητα του πετρώματος
- (2) το σύστημα που προωθεί την κοπτική κεφαλή και την ασπίδα καθώς και το σύστημα που μεταδίδει την κίνηση περιστροφής της κοπτικής κεφαλής στο μέτωπο εκσκαφής
- (3) το σύστημα που μεταφέρει και μαζεύει τα προϊόντα εκσκαφής και περιλαμβάνει σύστημα μεταφορικών ταινιών
- (4) την ασπίδα (shield) που είναι ένας μεταλλικός σωλήνας που είναι γύρω από το TBM το προστατεύει και συγκρατεί τις καταπτώσεις, με δυνατότητες τοποθέτησης της μόνιμης υποστήριξης.

Υπάρχουν γενικά οι παρακάτω τύποι TBM ολομέτωπης εκσκαφής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

- (1) TBM ανοικτού τύπου, χωρίς την χρήση ασπίδας για να συγκρατηθούν οι τοίχοι προσωρινά, επαρκές για ποιοτικές βραχομάζες
- (2) TBM με απλή ή διπλή ασπίδα (με αρθρωτή συνήθως μεταξύ τους σύνδεση), για φτωχότερες βραχομάζες
- (3) TBM με ασπίδα Εξισορρόπησης της Πίεσης Εδάφους (Earth Pressure Balance – EPB) χρησιμοποιείται σε ασταθείς εδαφικές καταστάσεις, όπου το ίδιο το εκσκαμμένο υλικό

γίνεται προσωρινά μέσο υποστήριξης με εξισορρόπηση της εδαφικής πίεσης. Αναμιγνύεται με ρυθμιστικούς παράγοντες όπως νερό, ίλος, μπετονίτης, χημικά πολυμερή, αφρός. Η τυπική χρήση του συγκεκριμένου TBM αναφέρεται σε μαλακά και πλαστικά γεωϋλικά (μίγματα αργίλων – ιλύων και άμμων).

(4) TBM κλειστού μετώπου (slurry shield), όπου το μέτωπο υποστηρίζεται με μπετονιτή και χρησιμοποιείται σε εδάφη από άμμο και χαλίκια.

Βασικότερα πλεονεκτήματα για την διάνοιξη σηράγγων με TBM θεωρούνται οι υψηλές ταχύτητες προχώρησης (ειδικά σε μαλακά και όχι πολύ συνεκτικά πετρώματα). Για TBM με ασπίδα EPB στο Μετρό Αθηνών αναφέρονται ταχύτητες 12 m/ημ. σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο, 8,50 m/ημ. σε Τεταρτογενή και 10 m/ημ. σε Τεταρτογενή και Αθηναϊκούς σχιστόλιθους. Ακόμα τα πετρώματα που περιβάλλονται και η βραχομάζα που θα εξορυχθεί δεν παθαίνουν ζημιές. Επιπλέον παραμένουν λείες οι παρειές της εκσκαφής. Επίσης συνήθως δεν είναι αναγκαία η επιπλέον εργασίες για την τελική μορφή της διατομής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

(1) Είναι ευκολότερος και πιο ακριβής ο έλεγχος της ευθυγραμμίας της στοάς

(2) Απασχολείται μικρότερος αριθμός προσωπικού

(3) Η σημαντική μείωση των υπερεσκαφών

(4) Η αυξημένη ασφάλεια των εργαζομένων κ.α.

Ως βασικότερα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος που είναι απαγορευτικό για μικρό μήκος σήραγγας, οι μειωμένες επιδόσεις και τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, τα προβλήματα από εισροή υπόγειων νερών κ.α. (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Για την καλύτερη αξιοποίηση του μηχανήματος και την επιλογή του κατάλληλου τύπου, είναι απαραίτητη η πληρέστερη γνώση των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν κατά μήκος της εκσκαφής. Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής είναι αρκετά ευαίσθητα στις γεωλογικές αλλαγές του εδάφους που συναντά κατά την διάνοιξη, για αυτό είναι καθοριστική η πληρότητα της γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής έρευνας. Μετά από λάθος εκτιμήσεις μπορεί να αντιμετωπίσει σοβαρά προβλήματα και να καθηλωθεί επί μακρόν. Για αυτό τον λόγο η σωστή μελέτη των γεωλογικών συνθηκών του άξονα εξ αρχής, προσαρμόζει τον σχεδιασμό του TBM καλύτερα και με καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους κλασσικούς μεθόδους εκσκαφής (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Κρίνεται απαραίτητος ο συνεχής προσδιορισμός της κατάστασης λειτουργίας και των συνθηκών που επικρατούν στο έδαφος, σε όλες τις φάσεις κατά την διάνοιξη των σηράγγων με χρήση του

TBM. Η σωστή εκτίμηση της απόδοσης, ο προγραμματισμός και η διαχείριση του κόστους είναι αναγκαία για την βιωσιμότητα του έργου. Εάν δεν γίνει πρόβλεψη με ακρίβεια, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να οδηγήσει το έργο σε απρόβλεπτες δαπάνες που οδηγούν το έργο λιγότερο επικερδές και εκτός ορισμένου χρονοδιαγράμματος (Mahmoodzadeh A., Reza Nejati H., 2022).

4.1.3 Μέθοδος NATM

Η “Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων” (New Austrian Tunnelling Method – NATM) αναφέρεται στο σύνολο των μεθοδολογιών που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή και υποστήριξη των σηράγγων και όχι σε κάποια συγκεκριμένη μέθοδο. Η μέθοδος εφαρμόστηκε συστηματικά κατά την διάνοιξη των σηράγγων στις Άλπεις την δεκαετία του 1960. Ακριβής ορισμός της μεθόδου NATM δεν υπάρχει, όμως με τον όρο περιγράφεται η διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο μέτωπο εκσκαφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, και τέλος υποστήριξη του υπογείου έργου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Δύο μέθοδοι διάνοιξης και κατασκευής δεν εντάσσονται στην μέθοδο αυτή. Η πρώτη είναι όταν χρησιμοποιούνται μηχανήματα ολομέτωπης εκσκαφής για την διάνοιξη. Και η δεύτερη όταν για την υποστήριξη των τοιχωμάτων δεν χρησιμοποιούνται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια (μπορεί να τοποθετούνται μεταλλικά πλαίσια). Η μέθοδος NATM έχει ως κύρια αρχή την ενεργοποίηση της αντοχής των τοιχωμάτων κατά την διάνοιξη, ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες αποσυμπίεσης και χαλάρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται όταν γίνεται άμεση υποστήριξη της σήραγγας, με τον συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων. Η υποστήριξη αυτή, ενισχύει την βραχομάζα δημιουργώντας ένα «δακτύλιο υποστήριξης», ο οποίος με την σειρά του αντιστέκεται στο φαινόμενο της θολωτής δράσης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).



Εικόνα 6: Η μέθοδος NATM (3)

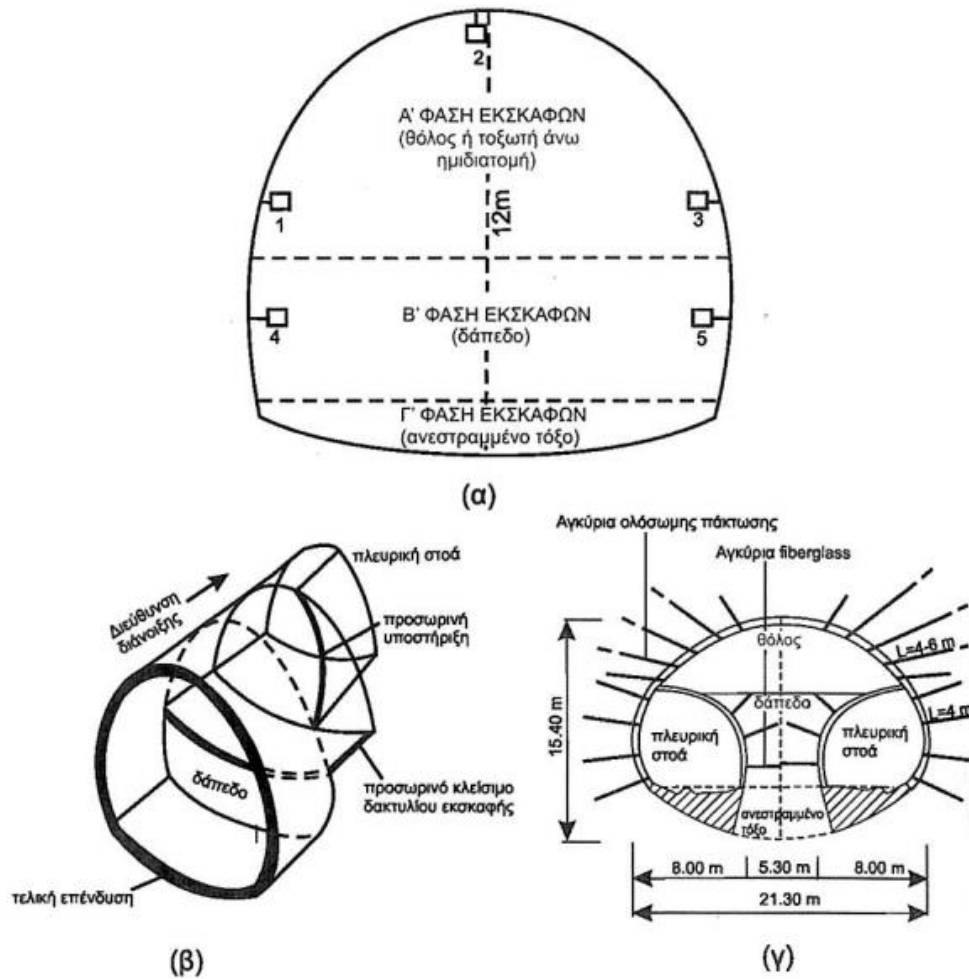
Υπάρχουν κάποιες βασικές αρχές στην εφαρμογή της μεθόδου NATM, οι πλέον σημαντικότερες αναφέρονται κατά την διάνοιξη της σήραγγας, τους τρόπους άμεσης υποστήριξης του με τους τρόπους που αναφέρθηκαν παραπάνω και την ενόργανη παρακολούθηση της περιβάλλουσας βραχομάζας (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Για την διάνοιξη της σήραγγας ακολουθούνται αρκετές φάσεις. Συγκεκριμένα, ακολουθεί τρεις φάσεις, οι οποίες γίνονται από πάνω προς τα κάτω (όπως φαίνεται και στον πίνακα 4). Σαν πρώτη φάση γίνεται εκσκαφή του θόλου ή της τοξωτής άνω διατομής (top heading), οι οποίες μπορεί να διαρκέσουν για περισσότερες υποφάσεις. Ως δεύτερη φάση γίνεται εκσκαφή στο υπόλοιπο τμήμα, που λέγεται δάπεδο (bench). Η τελευταία φάση τελειώνει όταν σκαφτεί το ανεστραμμένο τόξο (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

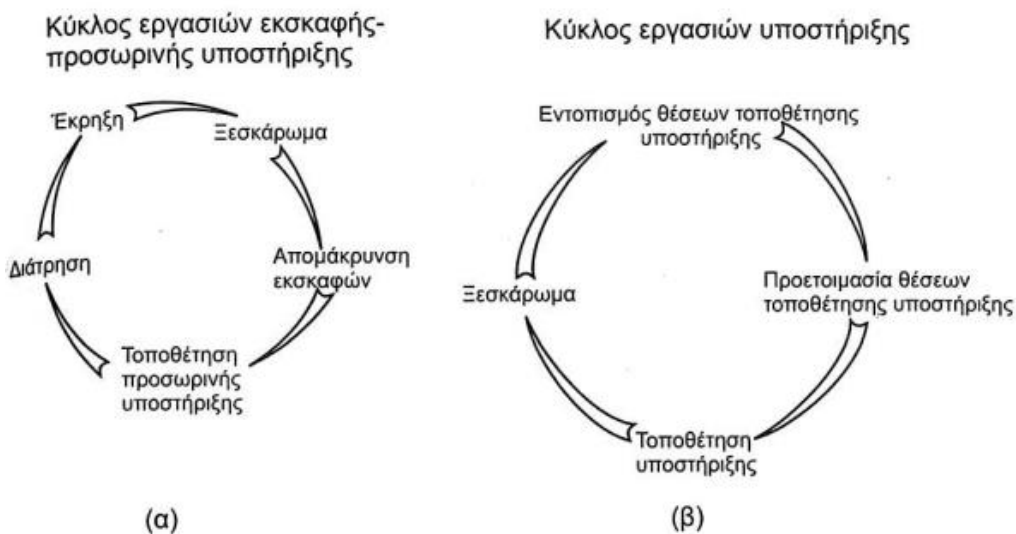
Για την μέγιστη ασφάλεια και την αποφυγή σφαλμάτων στην κατασκευή των υπογείων έργων, θα πρέπει οι εργασίες να προσαρμόζονται κατάλληλα με βάση τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής και την γεωμετρία του έργου. Στις Εικόνες 7 και 8 φαίνεται η σειρά που ακολουθείται των εργασιών ως προς την εκσκαφή και αντιστήριξή τους. Η σειρά που ακολουθείται είναι, αρχικά με την προσωρινή υποστήριξη που γίνεται με την εκσκαφή και χρησιμοποιούνται αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ στην συνέχεια τοποθετούνται επιπλέον αγκύρια και η τελική επένδυση και ολοκληρώνεται η μόνιμη υποστήριξη (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

(α) Εκσκαφή σήραγγας σε τρεις φάσεις (από 1 μέχρι 5 είναι οι ακίδες για την παρακολούθηση των συγκλίσεων), (β) τμηματική μέθοδος εκσκαφής με τη δημιουργία πλευρικής στοάς που

ακολουθείται από την εκσκαφή του θόλου και του δαπέδου (από ΗΟΕΚ 1999), (γ) μέθοδος εκσκαφής με τη δημιουργία πλευρικών στοών σε τμήμα της υποθαλάσσιας σήραγγας της Μάγχης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007) (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Εκσκαφή σήραγγος σε τρεις φάσεις (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)



Εικόνα 8: Απλοποιημένοι κύκλοι εργασιών (α) για την εκσκαφή και τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης και (β) για την τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης (από HOEK and BROWN 1980) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007)

Τέλος σε κάθε μέτωπο εκσκαφής γίνεται σωστή αποτύπωση και ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση τις γεωλογικές συνθήκες, μια πολύ σημαντική εργασία για τον προσδιορισμό της υποστήριξης που θα εφαρμοστεί αλλά και την μέθοδο εκσκαφής. Έτσι, σε κάθε φάση μελέτης του υπόγειου τεχνικού έργου καθορίζονται συγκεκριμένες κατηγορίες βραχομάζας, σύμφωνα με τα συστήματα ταξινόμησης που μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια (RMR, Q, GSI). Έτσι παίρνονται τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης, οπότε κάθε μέτωπο εκσκαφής έχει διαφορετικό τρόπο υποστήριξης (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η εφαρμογή της NATM σε κατοικημένες περιοχές

Σε κατασκευές σιδηρόδρομων που γίνονται σε κατοικημένες περιοχές (μετρό) και μικρό βάθος, προσοχή θέλει ο σχεδιασμός του εξωτερικού δακτυλίου με στόχο την ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων. Τα μέτρα πρέπει να εφαρμοστούν άμεσα με την εκσκαφή και να έχουν μεγάλη ακαμψία. Επιπλέον μέτρα υποστήριξης αποτελούν η εκσκαφή κατά τμήματα της διατομής και η ταχεία ολοκλήρωση του εξωτερικού δακτυλίου με την κατασκευή στο δάπεδο του ανεστραμμένου τόξου. Με την χρήση προεντεταμμένων αγκυρίων μειώνονται ακόμα περισσότερο οι παραμορφώσεις του εξωτερικού δακτυλίου. Η κατασκευή παρακολουθείται συνεχώς με μετρήσεις των συγκλίσεων. Ανάλογα με τις τιμές που μας δίνουν καθορίζεται το μέγεθος και το είδος των αντιστάσεων που πρέπει να εφαρμοστούν ώστε να μην παρουσιάζει προβλήματα η κατασκευή (Μαραγκός, 1997).

4.1.4 Διάνοιξη σηράγγων με τη Νορβηγική μέθοδο

Η Νορβηγία, μια σχετικά μικρή σε πληθυσμό χώρα, φημίζεται για την δραστηριότητα στην κατασκευή σηράγγων καθόσον όπως εκτιμάται, από το έτος 1970 μέχρι σήμερα, έχουν κατασκευαστεί πάνω από 4500 km σήραγγες. Για αυτό, βάση του συστήματος ταξινόμησης Q, αναπτύχθηκε από το NGI (Norwegian Geotechnical Institute) η μέθοδος NTM (Norwegian Tunnelling Method), τα βασικά μέρη της οποίας αναλύονται παρακάτω (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007):

- (1) Συνθήκες συνήθους εφαρμογής μεθόδου:
Διακλασμένο πέτρωμα, εύρος αντοχών σε μοναξονική θλίψη. Αργιλικές ζώνες, ισχυρές επιτόπου τάσεις.
- (2) Συνήθειες μέθοδοι εκσκαφής:
Διάτρηση και χρήση εκρηκτικών, μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης (TBM) σε σκληρά πετρώματα, ενώ σε αργιλικά εδάφη μηχανική εκσκαφή.
- (3) Οι τρόποι υποστήριξης έχουν συνήθως τα παρακάτω χαρακτηριστικά: ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων, περιστασιακά αγκύρια κ.λπ. Γενικά η υποστήριξη έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
 - Η προσωρινή υποστήριξη περιλαμβάνεται στην μόνιμη υποστήριξη
 - Αποφεύγεται η ενίσχυση με μεταλλικό πλέγμα
 - Αποφεύγεται η χρήση σκυροδέματος gunite αλλά μόνο σαν υγρό μίγμα
 - Άκαμπτα μεταλλικά πλαίσια καθώς επίσης και εύκαμπτα δεν χρησιμοποιούνται. Στις αργιλικές ζώνες και στις ζώνες ασθενούς και συνθλιμμένου πετρώματος, χρησιμοποιούνται ενισχυμένοι δακτύλιοι από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
 - Ο κατασκευαστής επιλέγει την προσωρινή υποστήριξη και ο κύριος του έργου την μόνιμη
 - Η τελική επένδυση δεν συνηθίζεται καθόσον η τοποθέτηση αγκυρίων και ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποτελούν συνήθως την τελική υποστήριξη
- (4) Σε όλες τις φάσεις του έργου γίνεται χαρακτηρισμός και ταξινόμηση του βραχώδους υλικού (σύμφωνα με το σύστημα Q) και αυτό για:
 - Τον προσδιορισμό της βραχομάζας
 - Τον προσδιορισμό των απαιτήσεων υποστήριξης
 - Την επικαιροποίηση και επαναπροσέγγιση των μέτρων υποστήριξης όσο κατασκευάζεται το έργο. Ενόργανη παρακολούθηση γίνεται μόνο σε κρίσιμες περιπτώσεις
- (5) Γενικά η μέθοδος NTM απαιτεί μικρό σχετικά κόστος και προεξοφλεί:
 - Γρήγορη προχώρηση σε περιπτώσεις διάνοιξης με διάτρηση – εκρηκτικά
 - Αυξημένη ασφάλεια κατασκευής
 - Διασφάλιση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων

Η μέθοδος NTM βρίσκει εφαρμογή, όπου η βραχομάζα είναι διακλασμένη που έχουν την τάση να δημιουργούν υπερεκσκαφές, όπου χρησιμοποιούνται εκρηκτικά για την διάνοιξη. Αντιθέτως η NATM καλύπτει όλο σχεδόν το εύρος των γεωυλικών (μέχρι και τις «δύσκολες» γεωλογικές συνθήκες) (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

4.2 Μέτρα άμεσης υποστήριξης

4.2.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Για την μέθοδο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιείται σκυρόδεμα που φτιάχνεται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα. Η χρήση του σκυροδέματος γίνεται με εκτόξευση. Υπάρχουν δύο τρόποι παρασκευής εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ο πρώτος είναι ως ξηρό μίγμα (dry mix) όπου γίνεται προσθήκη με νερό πριν την εκτόξευση, και ο δεύτερος ως υγρό μίγμα όπου αναμιγνύεται το νερό στον αναδευτήρα όσο παρασκευάζεται το σκυρόδεμα. Η εφαρμογή του υγρού μίγματος είναι συνηθέστερη όταν καταναλώνεται σκυρόδεμα σε μεγάλες ποσότητες. Για να παρασκευαστεί οπλισμένο σκυρόδεμα αναμιγνύονται τσιμέντο, αδρανή, παιπάλη πυριτίου, επιταχυντής πήξεως και νερό (Καββαδάς, 2005).

Η αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται και η διαπερατότητα μειώνεται, όταν υπάρχει αντίδραση της παιπάλης πυριτίου με το υδροξείδιο του ασβεστίου. Το υδροξείδιο του ασβεστίου δημιουργείται όταν ενυδατώνεται το τσιμέντο. Αυτά βοηθούν να υπάρχει βελτίωση στην πρόσφυση από την βραχομάζα και μεγαλύτερο πάχος νωπού σκυροδέματος. Τέλος με την προσθήκη μεταλλικών ιών, αυξάνονται η αντοχή και πλαστιμότητα του σκυροδέματος και μειώνεται η διαπερατότητά του (Καββαδάς, 2005).

4.2.2 Αγκύρια βράχου

Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες αγκυρίων βράχου είτε προεντεταμένα αγκύρια, όπου οι χαλύβδινοι τένοντες παραλαμβάνουν την ενεργητική φόρτιση της βραχομάζας λόγω της προέντασης είτε παθητικά αγκύρια τα οποία λειτουργούν και φορτίζονται όταν παραμορφώνεται η βραχομάζα (Καββαδάς, 2005).

Δύο είναι και τα ήδη των παθητικών αγκυρίων, αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης και αγκύρια πρόσφυσης (Καββαδάς, 2005).

4.2.3 Χαλύβδινες νευρώσεις

Οι χαλύβδινες νευρώσεις χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Κύριος στόχος είναι η αύξηση της δυσκαμψίας και πλαστιμότητας του αλλά και για τη βελτίωση ανάληψης φορτίων. Οι χαλύβδινες νευρώσεις που τοποθετούνται κατά τη διατομή της σήραγγας και είναι τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB-160 ή δικτυωτά πλαίσια που αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτύωματος ή συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού (π.χ. 4-6 ράβδοι Φ28 σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένες με εγκάρσιους συνδετήρες σε αποστάσεις της τάξεως του μέτρου) (Καββαδάς, 2005).

4.2.4 Σχεδιασμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Με την χρήση αναλυτικών μεθόδων σχεδιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, αλλά και αν μπορεί η μόνιμη υποστήριξη να παραλάβει τα φορτία αυτά. Επίσης υπάρχουν και εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης. Μια τέτοια μέθοδος αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και είναι η NGI και βασίζεται στο σύστημα Q (Καββαδάς, 2005).

4.3 Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών

Πρωταρχική σημασία στην διάνοιξη των σηράγγων έχουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών. Αυτά είναι που μας δείχνουν την αστάθεια των τοιχωμάτων και οροφής και καθορίζουν όπου είναι απαραίτητο τον όγκο των επιπλέον εκσκαφών στην σήραγγα. Για να είναι δυνατή η κατάπτωση της οροφής ή των τοιχωμάτων μιας σήραγγας, θα πρέπει να αποχωριστεί από την βραχομάζα, άρα να διατέμνεται από τουλάχιστον τρεις ασυνέχειες (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Οι βασικές αρχές έχουν να κάνουν, αρχικά όταν οι μέγιστοι κύκλοι που αντιστοιχούν στα επίπεδα των κύριων συστημάτων ασυνεχειών «περιβάλλουν» το κέντρο του κύκλου της στερεογραφικής προβολής, τότε παρατηρούνται καταπτώσεις με ελεύθερη πτώση σφηνών πετρώματος από την οροφή της σήραγγας. Επιπλέον όταν κύκλοι αυτοί δεν «περιβάλλουν» το κέντρο του κύκλου της στερεογραφικής προβολής αλλά ένας μέγιστος κύκλος τέμνει τον ομόκεντρο κύκλο της γωνίας τριβής των ασυνεχειών (ϕ), τότε οι πτώσεις σφηνών από την οροφή δεν είναι με ελεύθερη πτώση, αλλά σαν ολίσθηση βραχώδους υλικού κατά μήκος του επιπέδου της ασυνέχειας που διατέμνει τον κύκλο τριβής. Τέλος αν τα επίπεδα βρίσκονται εκτός του κύκλου της γωνίας τριβής των ασυνεχειών, τότε έχουμε σταθερή κατάσταση (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Οι HOEK και BROWN περιγράφουν αναλυτικά τις αναλύσεις των δυνητικών ασταθειών, που είναι πιο περίπλοκες απ'όσο φαντάζονται. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των σφηνών που αναμένεται να πέσουν όπως και οι συντελεστές ασφαλείας τους, έχουν φτιαχτεί προγράμματα, όπως το "UNWEDGE". Επιπλέον προκύπτουν τα αγκύρια που θα τοποθετηθούν, όπως και η αναγκαία στρώση σκυροδέματος, όλα αυτά για την συγκράτηση των σφηνών (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

4.4 Υποχωρήσεις της επιφάνειας του εδάφους λόγω υπογείων εκσκαφών

Σε κατασκευές σήραγγων σημαντικά προβλήματα παρουσιάζονται στις υποχωρήσεις του εδάφους. Ιδίως στις αστικές περιοχές πιθανά προβλήματα μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στις γειτονικές κατασκευές και σε υπόγειες υποδομές (Καββαδάς, 2005).

Κατά τις εκσκαφές υποχωρήσεις παρατηρούνται σε σήραγγες αρχικά από τον τύπο και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως και το βάθος της εκσκαφής. Επίσης το μέγεθος και ο τρόπος εκσκαφής, ότι έχουν να κάνουν με διάμετρο, μέθοδοι εκσκαφής, φάσεις εκσκαφής. Ακόμα, εξαρτάται από τον τρόπο υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής (δοκοί προπορείας, αγκύρια βράχου κ.λπ.) και οι τύποι, οι τρόποι και οι αποστάσεις των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Τέλος την χρήση πιλοτικής σήραγγας, για την βελτίωση του εδάφους (Καββαδάς, 2005).

Οι πρώτοι τρεις παράγοντες που αναλύθηκαν, εκτιμώνται ποσοτικά βάση εμπειρίας σε παλιότερες κατασκευές. Οι υπόλοιποι έχουν να κάνουν από την εκάστοτε κατασκευή, και γίνεται η εκτίμηση τους επί τόπου. Οι υποχωρήσεις αυτές μπορούν να μειωθούν έως να μηδενιστούν, αν ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την βελτίωση του εδάφους και εφαρμοστούν ικανοί τρόποι κατασκευής (Καββαδάς, 2005).

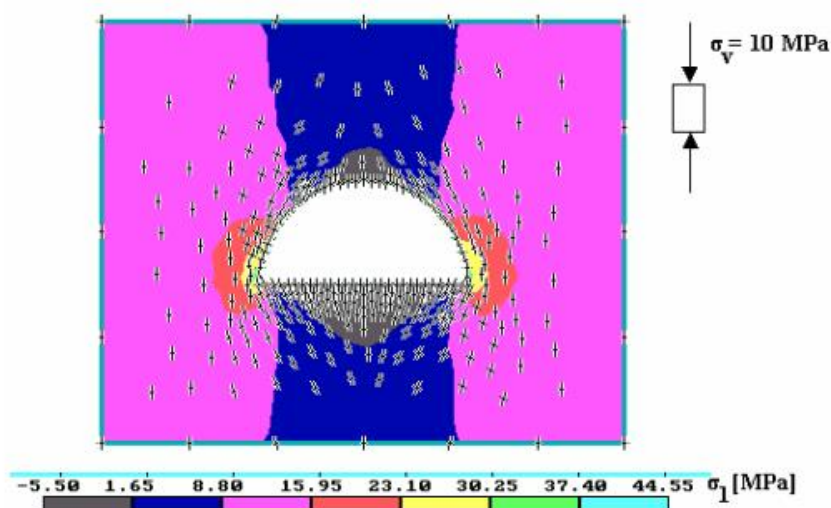
4.5 Σεισμική επικινδυνότητα

Παραδοσιακά τα υπόγεια έργα θεωρούνται ασφαλέστερα από τα επίγεια, όσον αφορά τους σεισμούς. Εξάιρεση αποτελούν σαφώς εκείνα τα έργα που διατέμνονται από ενεργά ρήγματα ή χάνεται η αντοχή του γεωλογικού σχηματισμού μετά από σεισμό. Παραμορφώσεις προκαλούν τα διατμητικά σεισμικά κύματα στην διατομή της σήραγγας και καταπόνηση στην επένδυσή της, που είναι ανάλογη με την διάμετρο της σήραγγας και το μήκος του κύματος του σεισμού. Παραμορφώσεις, εκτός από την παραπάνω περίπτωση, παρατηρούνται επίσης, όταν η γεωλογία του εδάφους γύρω από την σήραγγα αποτελείται από μαλακά εδάφη. Αλλά και όταν, ο άξονας της σήραγγας διαπερνά δύο διαφορετικούς σχηματισμούς, κατά μήκος της οποίας παρατηρούνται διατμητικές παραμορφώσεις (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Για τους παραπάνω λόγους και βάση εμπειρίας, τοποθετούνται αρμοί σε αποστάσεις μεταξύ 10 και 15 m, οι οποίοι θεωρούνται ικανοποιητικοί να αναλάβουν τα φορτία των σεισμών και εξαρτώνται από τις σεισμικές απαιτήσεις (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

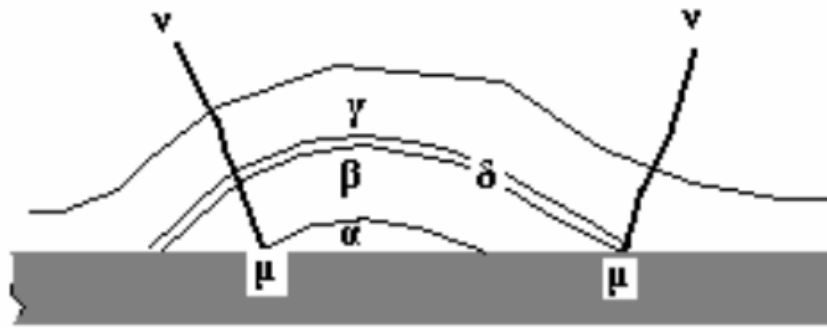
4.6 Αστοχίες σηράγγων

Τα γεωυλικά έχουν την ιδιότητα να διευκολύνουν την δημιουργία ανοιγμάτων. Έτσι κατά την εξόρυξη των υπογείων έργων, σε οποιοδήποτε τύπο εδαφικής μάζας ή βραχομάζας, αναπτύσσεται «φυσικός θόλος». Για αυτό για την μέγιστη ασφάλεια της κατασκευής και την αποφυγή προβλημάτων μετέπειτα, στόχος της σηραγγοποιίας είναι η μικρότερη δυνατή διαταραχή του τόξου και στην σωστή μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων, και όχι με την μεταγενέστερο υπολογισμό τους και υπολογισμό μέτρων υποστήριξης. Στην Εικόνα 9 φαίνεται ο σχηματισμός ενός τόξου στην οροφή και το δάπεδο (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



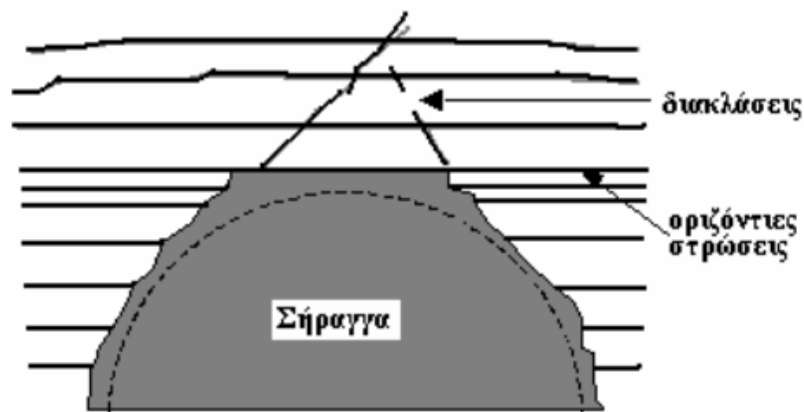
Εικόνα 9: Διάγραμμα κυρίων τάσεων γύρω από την ημικυκλική στοά σε μονοαξονικό πεδίο επί τόπου τάσεων (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)

Σε συνεχείς και ομοιογενείς πετρώματα δεν υπάρχουν κίνδυνοι κατά την διάνοιξη υπογείων έργων. Αλλά σε πετρώματα και εδάφη που παρουσιάζουν διακλάσεις και ασυνέχειες, με κακή εκτίμησή τους μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα κατά την εξόρυξή τους. Όπως γίνεται αντιληπτό τα περισσότερα προβλήματα αφορούν φυσικά φαινόμενα. Μια συνήθης περίπτωση αστοχίας σηράγγων παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Αφού γίνεται εξόρυξη σε ένα καλό πέτρωμα, λόγω της εξόρυξης οι πτυχώσεις (α) και (β) έχουν χάσει την επαφή τους με το δάπεδο. Εισέρχονται υπόγεια νερά μέσω των κάθετων ρηγμάτων ($\mu\nu$) που διαλυτοποιούν το υλικό πυρώσεως και συνοχής. Αυτό το υλικό είναι υπεύθυνο για την συγκράτηση μεταξύ των στρώσεων, με αποτέλεσμα το εδαφικό υλικό να καταπέσει μέσα στην σήραγγα (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



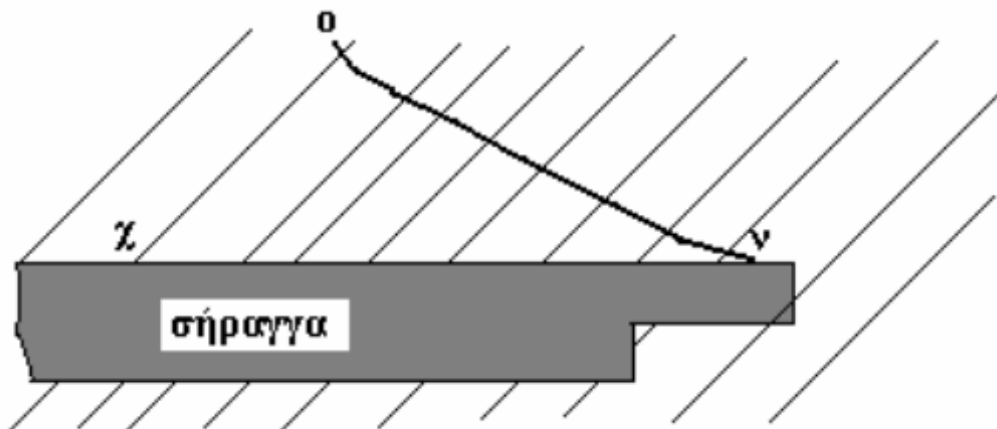
Εικόνα 10: Κίνδυνος κατάπτωσης της οροφής λόγω υποσκαφής – κατά την όρυξη σήραγγας – των πτυχώσεων (α) και (β). Το ύδωρ που εισέρχεται από τα ρήγματα (μν) θα διαλυτοποιήσει το υλικό συνοχής (δ) που συγκρατεί το ογκοτεμάχιο πετρώματος στη θέση (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)

Παρατηρείται αστοχία της οροφής μιας σήραγγας, όταν το πέτρωμα αποτελείται από πυκνές οριζόντιες στρώσεις. Στην εικόνα 11, αν η οροφή της σήραγγας δεν υποστηριχθεί, τότε εξαιτίας των τάσεων στην περιοχή, θα υπάρξει κατάπτωση λόγω της απώλειας της συνοχής των στρώσεων. Ειδικά με την παρουσία υπόγειων νερών, που συνηθίζεται σε τέτοια ρήγματα, η πτώση είναι βέβαιη. Τελικά με την πρόωρη υποστήριξη της οροφής αποφεύγεται η αστοχία τους, από την χαλάρωση της βραχομάζας, και στις δύο περιπτώσεις των Εικόνων 11 και 12 (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



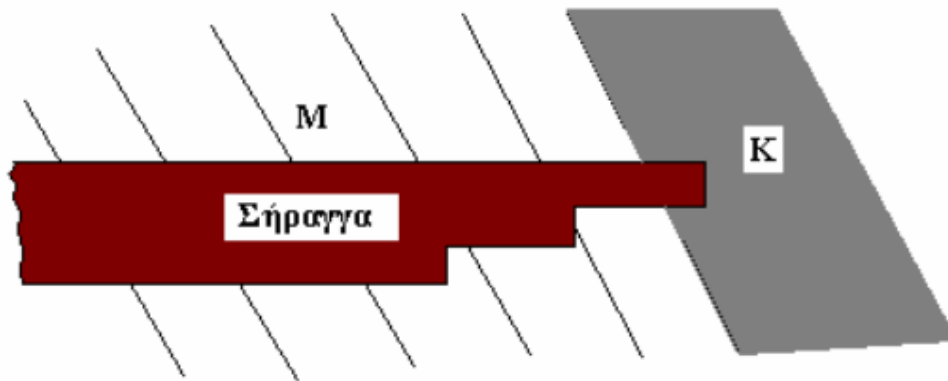
Εικόνα 11: Κίνδυνος κατάπτωσης οροφής λόγω οριζόντιας στρωσιγένειας του πετρώματος και δικλάσεων μεγάλης κλίσης (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)

Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται μια διαφορετική κατάσταση αστοχίας οροφής ενός σήραγγος. Αν στο ρήγμα (ον) υπάρχει παρουσία νερού, τότε αστοχεί η ζώνη (χ) και (ν). Αυτό σημαίνει ότι, οτιδήποτε υπάρχει κάτω από την (ον), τότε μπορεί να αστοχήσει από μερικώς, ακόμα και να καταπέσει όλο το βραχώδες υλικό (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



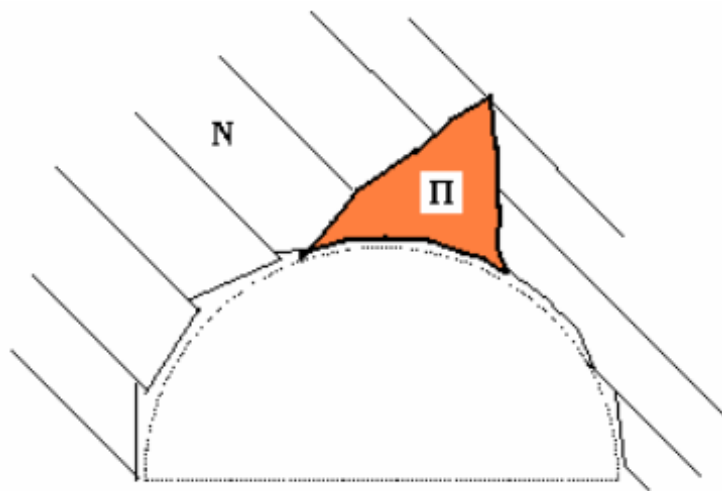
Εικόνα 12: Διάνοιξη σήραγγας σε στρωσιγενές και ρηγματωμένο πέτρωμα, με παρουσία υδροφορίας στο ρήγμα (ον) (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)

Μια ακόμη περίπτωση κατάπτωσης της οροφής συμβαίνει κατά την αλλαγή των λιθολογικών συνθηκών, όταν στην εξόρυξη της σήραγγας υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πετρώματος ή εδάφους. Στην Εικόνα 13 φαίνεται πως το μέτωπο της σήραγγας έχει τρυπήσει μαλακό σχηματισμό (Κ), όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας της οροφής. Σίγουρη πρέπει να θεωρείται η αστοχία σε περιπτώσεις που στο στρώμα (Κ) υπάρχει και ρήγμα (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



Εικόνα 13: 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)

Τέλος πολλές φορές με την βοήθεια υπόγειων υδάτων ξένα γεωυλικά μαζεύονται σε κοιλότητες του μητρικού πετρώματος. Έτσι όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, αυτή δημιουργεί μια πολύ επικίνδυνη περίπτωση κατάπτωσης της οροφής μέσα στην σήραγγα, αν στην σφήνα (Π) περιέχεται νερό (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006).



Εικόνα 14: Το φερτό γεωυλικό (Π) που έχει αποτεθεί σε κοιλότητα εντός του μητρικού πετρώματος (N) είναι βέβαιο ότι θα κατακρημισθεί (Εξαδάκτυλος, Σταυροπούλου, 2006)

Κεφάλαιο 5 Φράγματα

5.1 Γενικά – Σχεδιασμός

Τα φράγματα είναι τεχνικά έργα που έχουν στόχο να συγκεντρώσουν μεγάλες ποσότητες νερού για πολλές ανάγκες του ανθρώπου, για αυτό γίνονται σε ποτάμια και χειμάρρους. Τα τεχνικά έργα αυτά, για την υλοποίησή τους απαιτούν την συνεργασία μηχανικού και γεωλόγου, έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα έργο ασφαλές καθόλη την διάρκεια λειτουργίας του. Αστοχία του έργου προκαλεί απώλειες ζωών, αλλά και περιουσιών στις κοντινές περιοχές κατασκευή του έργου. Για αυτό, η αντίληψη που κυριαρχεί είναι ότι πρώτο λόγο στο έργο έχει η ασφάλεια του και ύστερα το κόστος της κατασκευής. Τα φράγματα είναι από τα πιο σημαντικά έργα στις μέρες μας, εξυπηρετώντας πολλαπλούς σκοπούς, όπως την παραγωγή ενέργειας, ύδρευση, βιομηχανική χρήση, αποφυγή πλημμυρών. Έτσι οι κατασκευές αυτές πρέπει να μελετηθούν στο έπακρο ως προς την αντοχή των θεμελιώσεων και των ακροβάθρων. Τέλος μετά το πέρας της κατασκευής τους απαραίτητη πρέπει να θεωρείται η παρακολούθησή τους με ειδικά μέσα, ώστε να εντοπίζονται τυχόν αλλαγές στον χρόνο και να αποφεύγονται αστοχίες τους με καταστροφικές συνέπειες (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Για το σχεδιασμό και την κατασκευή των έργων του ταμιευτήρα απαραίτητη πρέπει να θεωρείται η γνώση της μορφολογίας της περιοχής. Έπειτα, σημαντικά πρέπει να θεωρούνται τα υδρολογικά δεδομένα, όπως το μέγεθος της λεκάνης απορροής, η απορροή κατά έτος και οι πλημμυρικές παροχές. Ακόμα θα πρέπει να υπάρχει γνώση της γεωλογίας της περιοχής αυτά είναι η στρωματογραφία, τεκτονική, συνθήκες στεγανότητας και υπόγεια έργα. Τέλος βασικά στοιχεία είναι οι γεωμηχανικές παράμετροι και συναρμογή, όσον αφορά τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας, οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την συναρμογή και η πρωτεύουσα εντατική κατάσταση που χαρακτηρίζει την περιοχή των έργων (Μαραγκός, 1997).

Η έκταση που θα καταλαμβάνει η υδαταποθήκη, το είδος του φράγματος και οι θέσεις των έργων εξόδου εξαρτάται από την μορφολογία και γεωλογία της περιοχής. Η παράμετρος αυτή μαζί με τις γεωμηχανικές παραμέτρους καθορίζουν και την θέση του άξονα του φράγματος (Μαραγκός, 1997).

Τα υδρολογικά στοιχεία μας δίνουν καθοριστικά δεδομένα για τον σχεδιασμό ενός ταμιευτήρα, με δεδομένα για την μέση ετήσια απορροή και τις πλημμυρικές παροχές. Με την ετήσια απορροή προσδιορίζονται οι δυνατότητες και η αναγκαία έκταση του ταμιευτήρα. Βάση αυτής και της μορφολογίας της γύρω περιοχής καθορίζονται τα έργα εκτροπής και το πρόφραγμα, αλλά και το απαιτούμενο ύψος που θα έχει το φράγμα. Βάση των πλημμυρικών παροχών διαστασιολογείται ο εκχειλιστής (Μαραγκός, 1997).

Από την άλλη καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των έργων του ταμιευτήρα παίζουν τα γεωλογικά δεδομένα. Για αυτό γίνεται λεπτομερής χαρτογράφηση της περιοχής από την φάση της

προμελέτης. Τέλος η διερεύνηση τελειώνει με γεωτρήσεις, όπου γίνονται δοκιμές υδατοπερατότητας και προκύπτουν στρωματογραφικά, τεκτονικά δεδομένα και συνθήκες στεγανότητας της περιοχής. Οι στρωματογραφικές και τεκτονικές συνθήκες, οι οποίες μπορούν να ποικίλουν από πολύ απλές έως πολύ σύνθετες, είναι υπεύθυνες για την ομαλή λειτουργία του φράγματος, των πρηνών της λεκάνης και των αντρερισμάτων (Μαραγκός, 1997).

Αν τα συμπεράσματα μετά την γεωλογική έρευνα είναι θετικά και αναμενόμενα, τότε ξεκινάει ο λεπτομερής προσδιορισμός των γεωμηχανικών παραμέτρων. Η έρευνα αποσκοπεί στον προσδιορισμό της τοποθεσίας που θα κατασκευαστεί το φράγμα, είναι τόσο σημαντική ειδικά αν λάβουμε υπόψιν ότι το υδροστατικό φορτίο ενεργεί μόνο από την ανάντη μεριά του φράγματος. Τέλος οι παράμετροι συναρμογής, ο προσανατολισμός και η ένταση του πρωτογενούς τασικού πεδίου και οι μηχανικές παράμετροι είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των έργων, τόσο στις αναλύσεις ευστάθειας όσο και σε αυτές των παραμορφώσεων (Μαραγκός, 1997).

5.2 Συναφή έργα

Για την ομαλή λειτουργία, την πολλαπλή σκοπιμότητα, την ασφάλεια του φράγματος, της κατάντης περιοχής και του ταμιευτήρα απαραίτητη πρέπει να θεωρείται μαζί με το κύριο μέρος του φράγματος και των συναφών έργων, για την κατασκευή των οποίων είναι απαραίτητη η γνώση της υδρολογίας, της τοπογραφίας και των γεωλογικών συνθηκών και θα αναλυθούν παρακάτω (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Η σήραγγα εκτροπής κατασκευάζεται για την διευκόλυνση των εργασιών παροχετεύοντας τα ύδατα των ποταμών στην κατάντη περιοχή. Σε ποταμούς με μεγάλο όγκο υδάτων, μαζί με την σήραγγα εκτροπής κατασκευάζεται και το πρόφραγμα. Το πρόφραγμα δεν είναι μόνιμη κατασκευή και μοιάζει σε όλα με ένα κανονικό χωμάτινο φράγμα, συγκεντρώνει το νερό και ελεγχόμενα ρέει όσο κατασκευάζεται το έργο μέσω της σήραγγας εκτροπής. Οι δύο αυτές κατασκευές με την ολοκλήρωση του έργου γίνονται μέρος του κύριου έργου (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Με τον εκχειλιστή εξασφαλίζεται η ελεγχόμενη απορροή του περισσευόμενου νερού προς τα κατάντη. Με τα θυροφράγματα ελέγχεται η ροή του νερού και είναι τοποθετημένα στις κορυφές των εκχειλιστών. Ο εκχειλιστής ελέγχει την απορροή του ταμιευτήρα σε περίπτωση πλήρωσής του, πέφτοντας κατάντη αυτόματα. Η παράλειψη κατασκευής αυτών μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του φράγματος (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Ταμιευτήρας άντλησης – αποθήκευσης είναι εκείνος ο ταμιευτήρας όπου αποθηκεύεται το νερό που έχει αντληθεί την νύχτα. Συνήθως τα ύδατα αυτά χρησιμοποιήθηκαν από τον υδροηλεκτρικό σταθμό για την παραγωγή ενέργειας (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Άλλα επιμέρους τμήματα του φράγματος είναι τα ακρόβαθρα τα οποία είναι οι πλευρές της κοιλάδας που είναι σε επαφή με το φράγμα και την θεμελίωση. Ανάλογα πως το βλέπουμε ανάντη, δεξιό ή αριστερό ακρόβαθρο. Για την αποφυγή διάβρωσης χωμάτινων φραγμάτων, χρησιμοποιούνται επιπλέον φίλτρα αποστράγγισης για την παροχέτευση υδάτων προς τα κατόντη (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

5.3 Φράγματα από σκυρόδεμα

5.3.1 Φράγματα βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας είναι έτσι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα ώστε να στέκονται ελεύθερα χωρίς την χρήση αντιστήριξης ή υποστήριξης. Έτσι τα φράγματα αυτά έχουν χαμηλό κέντρο βάρους, για να αποφεύγεται η αστοχία του παρόλο που δεν θα στηρίζεται σε αντερείσματα. Από την άλλη τα φράγματα αυτά σε σύγκριση με άλλους τύπους φραγμάτων από σκυρόδεμα χρειάζονται μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος, έτσι καταφέρνουν μόνο με το ίδιο βάρος της κατασκευής να έχουν μεγάλη αντίσταση σε μετακίνηση από την υδροστατική πίεση των υδάτων που έχει ο ταμιευτήρας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Οι κοιλάδες θεωρούνται οι ευνοϊκότερες περιοχές για την κατασκευή ενός τέτοιου φράγματος βαρύτητας, αυτό γιατί η υγείας βραχομάζα βρίσκεται κοντά στο φυσικό έδαφος και στην θεμελίωση και στην στήριξη των αντερεισμάτων. Βασικό ζήτημα αποτελεί η διαθεσιμότητα σε κατάλληλα και επαρκή αδρανή και δομικά υλικά για την ολοκλήρωση του έργου (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 15: Παράδειγμα φράγματος βαρύτητας (4)

Φράγματα από λιθοδομή που στηρίζονται στο βάρος της κατασκευής έναντι μετακίνησης ή αστοχίας χρονολογούνται πάνω από 3.000 έως 4.000, με κεκλιμένα πρανή σε κατάντη και ανάντη μέτωπα και πάχος βάσης πολύ μεγαλύτερο από το ύψος του έργου. Ο Rankine πρότεινε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ότι πρέπει να αποφεύγονται οι εφελκυστικές δυνάμεις στο εσωτερικό φραγμάτων βαρύτητας. Ο Levy το 1985 συμπέρανε ότι οι θλιπτικές δυνάμεις στην ανάντη περιοχή του φράγματος πρέπει να είναι ισχυρότερες από τη πίεση του νερού στον πάτο του ταμιευτήρα (Σαχπάζης, 2016).

Το 1982, όταν αστόχησε το φράγμα του Austin στις ΗΠΑ, αναγνωρίστηκε ο κίνδυνος της ανύψωσης ή υποπίεσης στην θεμελίωση του φράγματος, αλλά και ο κίνδυνος ολίσθησης στην πράξη. Η μέθοδος κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία έφερε σημαντικές βελτιώσεις στον τρόπο κατασκευής των φραγμάτων. Στην Εικόνα 16 φαίνονται παραδείγματα φραγμάτων βαρύτητας (Σαχπάζης, 2016).

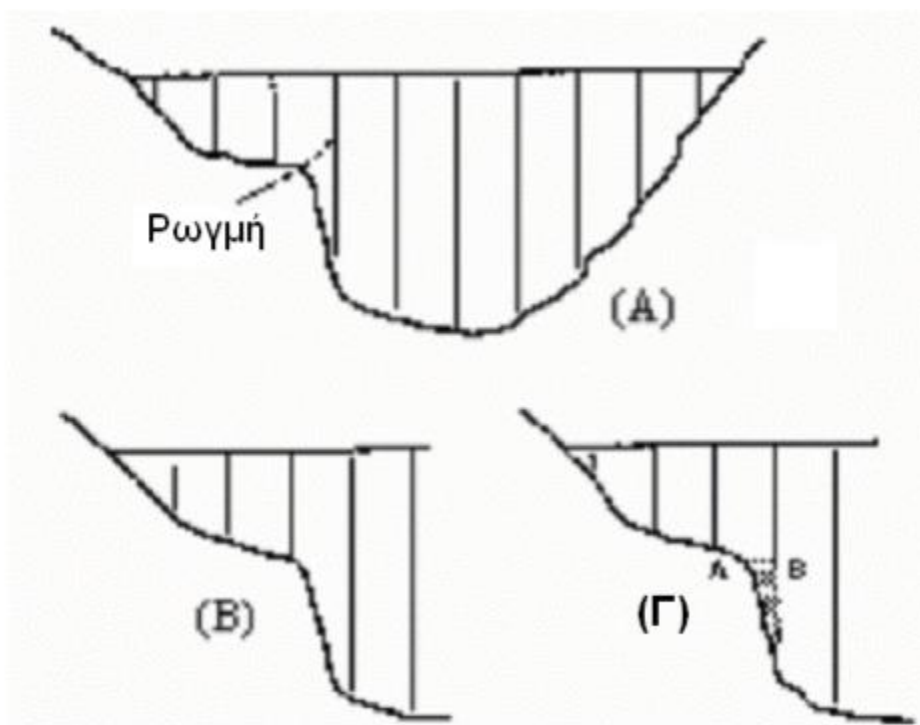
Τυπική Διατομή	Παράδειγμα
	Φράγμα Hoover, στην Νεβάδα-Αριζόνα των Η.Π.Α. (221 m)
	Φράγμα Grand Coulee, Ουάσιγκτον των Η.Π.Α. (168 m)
	Φράγμα Fontana, Tennessee των Η.Π.Α. (137 m)
	Φράγμα Studen Kladenetz, Βουλγαρία (67,5 m)
	Φράγμα Sakuma, Ιαπωνία (140 m)
	Φράγμα Topolintza, Βουλγαρία (85 m)

Εικόνα 16: Παραδείγματα φραγμάτων βαρύτητας (Σαχπάζης, 2016)

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φράγματος βαρύτητας θα πρέπει να είναι η ασφάλεια έναντι στην ανατροπή και ολίσθηση, σε όλα τα επίπεδα στο εσωτερικό και τα θεμέλια του φράγματος. Ακόμα

είναι κατάλληλα μελετημένο και κατασκευασμένο, ώστε να μην υπάρχουν διαρροές και αστοχίες στο σκυρόδεμα και τα θεμέλια του φράγματος (Σαχπάζης, 2016).

Στα φράγματα βαρύτητας, για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία τους πρέπει να τοποθετούνται αρμοί συστολής- διαστολής. Η τοποθέτηση τους γίνεται στο κύριο σώμα, σε φράγμα από σκυρόδεμα, σε αποστάσεις 15 m, και αυτό βάσει εμπειρίας κυρίως από μονολιθικές κατασκευές όπου οι ρωγμές μπορεί να είναι και σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι είναι σημαντικό να κατασκευάζονται οι αρμοί συστολής – διαστολής στις καταλληλότερες αποστάσεις βάσει των αντερεισμάτων του φράγματος, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17 (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 17: Παράδειγμα αρμού συστολής-διαστολής (Σαχπάζης, 2016)

Παραδείγματος χάριν, αν προεξέχει κάποια παρεισδύουσα βραχομάζα, όπως φαίνεται στην εικόνα 17, στο σώμα του φράγματος (διατομή Α) τότε με σιγουριά θα οδηγούνταν στην δημιουργία ρωγμής στο σκυρόδεμα. Έτσι τρόπος που έχουν τοποθετηθεί οι αρμοί συστολής-διαστολής (διατομή Β) είναι καλύτερος, και ακόμα η σκούρα περιοχή (διατομή Γ) θα πρέπει να σκυροδετηθεί χώρια, και να ψυχθεί ή να αφεθεί να κρυώσει κανονικά στη θερμοκρασία της γειτονικής

βραχομάζας. Ύστερα αρχίζει να κατασκευάζεται από την βάση ΑΒ το μονολιθικό σώμα του φράγματος. Τέλος για καλύτερη διατμητική αντοχή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εισπιεζόμενο σιμεντένεμα για να σφραγιστούν οι αρμοί, σε όλους τους αρμούς συστολής διαστολής (Σαχπάζης, 2016).

Τεράστια προβλήματα παρουσιάζονται στις μεγάλες κατασκευές φραγμάτων από τις μεγάλες ψυχόμενες μάζες του σκυροδέματος. Έτσι για την αποφυγή αυτών, προτιμώνται μονόλιθοι με σώματα τετραγωνικού σχήματος ανά 15m, αυτά είναι σε στενή επαφή χωρίς περιθώρια μετακινήσεων από όλες τις κατευθύνσεις. Στις μέρες μας, παρατηρείται κατά κόρον μείωση στους αρμούς συστολής-διαστολής ή ακόμα αποφυγή τελείως κατασκευής τους, μιας και υπάρχουν ενστάσεις με την αποτελεσματικότητά τους σε μονολιθικές στήλες (Σαχπάζης, 2016).

5.3.2 Τοξωτά ή Αψιδωτά φράγματα

Τα τοξωτά φράγματα για την κατασκευή τους απαιτούν μικρότερες ποσότητες σκυροδέματος σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας, αλλά ισχυρότερο οπλισμό, με την χρήση ράβδων χάλυβα ή προεντεταμένων χαλύβδινων καλωδίων. Τα φράγματα αυτά γίνονται λεπτά, κυρτά και σε μεγάλο βάθος, για αυτό παρουσιάζουν μεγάλη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό, την κατασκευή τους και την ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται. Ακόμα θα πρέπει η βραχομάζα να είναι υγιής και με μεγάλη φέρουσα ικανότητα στην θεμελίωση και στα αντερείσματα του φράγματος για να αντέχει στα απαιτητικά φορτία του φράγματος. Παράδειγμα τοξωτού φράγματος είναι η Εικόνα 18 (Σαχπάζης, 2016).

Αυτά τα είδη φραγμάτων επιλέγονται σε ορεινές περιοχές και μεγάλα βάθη, όπου δεν υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα υλικών (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 18: Παράδειγμα τοξωτού φράγματος (5)

Τα τοξωτά φράγματα χωρίζονται σε φράγματα σταθερή ακτίνας καμπυλότητας και φράγματα μεταβλητής ακτίνας καμπυλότητας. Η διαφορά τους είναι ότι τα πρώτα έχουν κατακόρυφο ανάντη μέτωπο με μία σταθερή ακτίνα καμπυλότητας. Ενώ τα δεύτερα έχουν τις ανάντη και κατάντη καμπύλες, με όλο και μικρότερες ακτίνες με το ύψος κάτω από την στέψη (Σαχπάζης, 2016).

Φράγματα κυρτά και στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο είναι αυτά με διπλή κυρτότητα και ονομάζονται φράγματα θόλων. Από την άλλη φράγματα πολλαπλών θόλων είναι εκείνα τα φράγματα που κατασκευάζονται με δύο ή περισσότερες παρακείμενες ασίδες (Σαχπάζης, 2016).

Η ανάλυση των τάσεων και των μετακινήσεων υποθέτει ότι υπάρχει επίδραση από εκτροπή και μετακίνηση στο φράγμα και τα αντερείσματα. Ανατροπή ή περιστροφή του φράγματος γύρω από τον εαυτό του συμβαίνει από την διήθηση του νερού κάτω από αυτό. Ακόμα η πίεση του νερού στον ταμιευτήρα οδηγεί σε επιπέδωση του τόξου ή της ασίδας και το ωθεί προς το κατάντη μέτωπο (Σαχπάζης, 2016).

Για τον σχεδιασμό ενός τοξωτού φράγματος, εκτός από την γεωμετρία πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν αρκετά κριτήρια, ότι έχει να κάνει με φόρτιση στο φράγμα, σταθερότητα στην θεμελίωση και τα αντερείσματα και τα συστατικά στο φράγμα και την θεμελίωση (Σαχπάζης, 2016).

Ενισχύοντας το φράγμα με οπλισμό χάλυβα, αρχικά παρατηρείται μείωση στο πάχος του φράγματος, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται το κόστος. Από την άλλη μπορεί να ρωγματοωθεί το μέτωπο του τόξου αν αποφευχθεί η κατάλληλη ενίσχυση με χαλύβδινο οπλισμό και οφείλεται σε παραλαβή υπερβολικής εφελκυστικής δύναμης λόγω του σχήματος του φράγματος, δευτερογενείς δυνάμεις από την μεγάλη θλιπτική δύναμη στο λεπτό μέρος του φράγματος, δευτερογενείς δυνάμεις εφελκυσμού στην κλείδα του τόξου και δίπλα στα αντερείσματα και θερμοκρασιακές επιπτώσεις από υδάτωση του τσιμέντου, ή από υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές (Σαχπάζης, 2016).

Στον Πίνακα 10 ορίζεται το πάχος της βάσης τοξωτών ή αψιδωτών φραγμάτων σε συνάρτηση με το ύψος h του φράγματος (Σαχπάζης, 2016):

Πίνακας 10: Πάχος βάσης τοξωτών φραγμάτων (Σαχπάζης, 2016)

Λεπτή αψίδα ή τόξο	<0,2 h
Μέση αψίδα ή τόξο	0,2 h – 0,3 h
Παχιά αψίδα ή τόξο	>0,3 h
Αψίδα ή τόξο - βαρύτητας	>0,5 h

Στα τοξωτά φράγματα και φράγματα βαρύτητας δεν είναι απαραίτητη γενικά η ενίσχυση με χαλύβδινο οπλισμό. Αντιθέτως στα λεπτά τοξωτά φράγματα ευνοείται η ενίσχυση με οπλισμό, όμως σε κατασκευή που φτάνει τα 90 m το κόστος για ενίσχυση με οπλισμό χάλυβα φθάνει αρκετά εκατομμύρια ευρώ, πράγμα που είναι ικανό την αποφυγή κατασκευής ενός τέτοιου είδους φράγματος (Σαχπάζης, 2016).

Στα λεπτά τοξωτά φράγματα δεν παρουσιάζονται προβλήματα, ανύψωσης και υποπίεσης, όταν διήθεται το νερό κάτω από το φράγμα. Αντιθέτως στα παχιά τοξωτά φράγματα και στα φράγματα βαρύτητας πρέπει να αποστραγγίζονται τα διηθούμενα νερά. Εάν υποτεθεί βάση σχεδιασμού ότι το σκυρόδεμα ραγίζει σε εφελκυστικές τάσεις άνω των 0,4 MPa, θα υπάρξουν από την υδροστατική πίεση, διαρροή νερού (Σαχπάζης, 2016).

Κατά την φάση της μελέτης και του σχεδιασμού, στόχος είναι όσο το δυνατόν αν εξαλειφθούν οι εφελκυστικές τάσεις, χωρίς πάντοτε να είναι δυνατό. Αυτό συμβαίνει γιατί σε μια ανώμαλη διατομή δημιουργούνται ισχυρές τοπικές δυνάμεις, όπου με εκσκαφή των αντερεισμάτων πέρα

του βασικού σχεδίου, θα άλλαζε την γεωμετρία του έργου και θα επέφερε προβλήματα στην σταθερότητά του (Σαχπάζης, 2016).

Στο σώμα της βραχομάζας των αντερείσμάτων, σε τοξωτά και αψιδωτά φράγματα ασκούνται το ιδίον βάρος της βραχομάζας και δυνάμεις από τεκτονικά και σεισμικά φορτία. Ασκούνται επίσης υδροστατικές δυνάμεις, αφού γεμίσει ο ταμιευτήρας και δυνάμεις που τα παραλαμβάνουν τα αντερείσματα (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 19: Δεύτερο παράδειγμα τοξωτού φράγματος (Σαχπάζης, 2016)

Στα φράγματα διπλής κυρτότητας η ελάχιστη κατάσταση ασφαλείας βρίσκεται κυρίως στο υψηλότερο μέρος. Αυτό γιατί στα ψηλότερα σημεία της κοιλάδας παρατηρούνται μικρότερη ανθεκτικότητα και συμπάγεια . Επίσης τα φορτία του βραχώδους υλικού είναι μικρότερα, έχοντας

έτσι μικρότερη φόρτιση τα επίπεδα που ολισθαίνουν οι ασυνέχειες και οι διακλάσεις του βράχου. Τέλος οι δυνάμεις που μεταφέρονται από το φράγμα στα αντερείσματα γίνεται σε όχι καλές και προβλεπόμενες γωνίες (Σαχπάζης, 2016).

5.3.3 Αντηριδωτά φράγματα

Ένα αντηριδωτό φράγμα από σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20, αποτελείται από πολλαπλούς μονόλιθους σκυροδέματος τοποθετημένους στην σειρά, οι οποίοι διαχωρίζονται με αρμούς συστολής. Κάθε μονόλιθος έχει δύο συνδεδεμένα δομικά στοιχεία, μια σχετικά λεπτή κεκλιμένη μετωπική πλάκα η οποία είναι εκτεθειμένη στην υδροστατική πίεση και μία αντηρίδα που στηρίζει την πρόσθια πλάκα και μεταφέρει τις υδροστατικές δυνάμεις στην θεμελίωση. Η κλίση της μετωπικής πλάκας έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη σταθερότητα λόγω της πρόσθετης κατακόρυφης υδροστατικής πίεσης, ενώ η σχετική λεπτή μετωπική πλάκα και το υποστύλωμα έχουν ως αποτέλεσμα σχετικά χαμηλή πίεση ανύψωσης σε σύγκριση με τα φράγματα βαρύτητας (Fu C., Hafliðason B., 2015).



Εικόνα 20: Παράδειγμα αντηριδωτού φράγματος (Fu C., Hafliðason B., 2015)

Το κύριο πλεονέκτημα κατασκευής ενός αντηριδωτού φράγματος είναι η μικρότερη ποσότητα σκυροδέματος που απαιτείται σε σύγκριση με ένα φράγμα βαρύτητας. Ένα αντηριδωτό φράγμα χρειάζεται λιγότερο από το 50% του σκυροδέματος που απαιτείται για ένα φράγμα βαρύτητας του

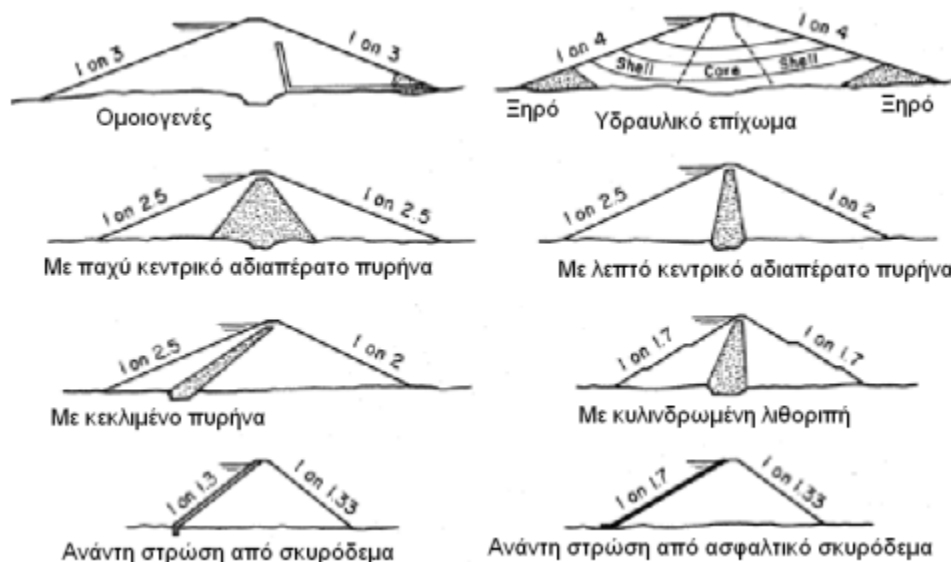
ίδιου ύψους. Ως εκ τούτου, τα αντηριδωτά φράγματα είναι κατάλληλα για θεμέλια χαμηλής ποιότητας που δεν θα μπορούσαν να αντέξουν το βάρος ενός φράγματος βαρύτητας, ωστόσο αναμένεται υψηλότερη πίεση λόγω μικρότερης επιφάνειας επαφής. Παρά την εξοικονόμηση σκυροδέματος, ένα αντηριδωτό φράγμα δεν είναι απαραίτητα λιγότερο δαπανηρό από ένα φράγμα βαρύτητας λόγω της αυξημένης ποσότητας εργασίας και των υλικών όσον αφορά τον ξυλότυπο και την ενίσχυση με οπλισμό (Fu C., Hafliadson B., 2015).

Κατά την κατασκευή του αντηριδωτού φράγματος είναι δυνατόν να υπερχειλιστεί από πιθανές πλημμύρες, χωρίς να επηρεάσουν σοβαρά την κατασκευή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρξει διευκόλυνση όσον αφορά την εκτροπή του ποταμού. Επίσης επιλέγεται αυτός ο τύπος του φράγματος σε κοιλάδες όπου δεν εμφανίζονται υγιής βραχομάζες, για αυτό είναι απαραίτητη η λεπτομερής έρευνα πριν την κατασκευή ειδικά σε άκαμπτα φράγματα. Ακόμα αντηριδωτά φράγματα πολύ λεπτών διαστάσεων που ενδέχεται να περάσουν τα πλημμυρικά νερά πάνω από αυτά, κρίνεται απαραίτητη η εξέταση πιθανών τρόπων δόνησης του φράγματος. Τέλος στα φράγματα αυτά, η κατανομή των τάσεων στις αντηρίδες γίνεται τελείως διαφορετικά και δεν γίνεται σύμφωνα με την γραμμική κατανομή των δυνάμεων στα οριζόντια επίπεδα. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η μελέτη με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Σαχπάζης, 2016).

5.4 Φράγματα αναχωματικού τύπου

5.4.1 Χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα είναι αναχωματικού τύπου, και κατασκευάζονται κυρίως από συνεκτικά υλικά, το οποίο αποτελείται πάνω από το 50% από εδαφικά υλικά (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 21: Τύποι χωμάτινων φραγμάτων (Σαχπάζης, 2016)

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι κλίσεις των χωμάτινων φραγμάτων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής. Αρχικά η κλίση 1 προς 1,33 (ύψος προς μήκος) επιλέγεται για φράγμα από λιθορριπή όπου το ανάντη και κατόντη μέτωπο είναι από σκυρόδεμα, όμως οι ιδανικότερες συνθήκες τοποθέτησης του σκυροδέματος για το ανάντη πρανές είναι 1 προς 1,7. Πρέπει να είναι δυνατή η διέλευση των ανθρώπων σε μια τέτοια κλίση χωρίς επιπλέον βοήθεια, όμως σε κλίση 1 προς 1,33 είναι απαραίτητη η χρήση σχοινίων ασφαλείας. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ασφαλτικά σκυροδέματα, σε σχέση με τα άκαμπτα, έχουν μεγαλύτερη ανοχή σε μετακινήσεις λόγω καθιζήσεων από στερεοποίηση (Σαχπάζης, 2016).

Κατά την κατασκευή των αναχωμάτων τοποθετούνται υλικό ενιαίου τύπου ή από ίδια πηγή λήψης. Το υλικό μπορεί να είναι είτε μικροί κόκκοι που έχουν τοποθετηθεί με υδραυλικά μέσα, είτε αμμοχαλίκια που με μηχανικά μέσα ταξινομούνται και συμπυκνώνονται (Σαχπάζης, 2016).

Για την αποφυγή διαρροών στο εσωτερικό του φράγματος, θα πρέπει το υλικό για την κατασκευή του αναχώματος ή του πυρήνα να είναι αρκετά συνεκτικό και αδιαπέρατο. Επίσης το υλικό θα πρέπει να είναι ικάνο, ώστε κατά την τοποθέτησή του να σταθεροποιείται, ώστε να δημιουργείται μια ομοιόμορφη μάζα. Επιπλέον θεωρείται αναγκαίο το έδαφος να απορροφά τις διατμητικές δυνάμεις, όταν συμπικνώνεται το φράγμα, χωρίς να χάνει σημαντικό μέρος της αφού γεμίσει ο ταμιευτήρας νερό. Τέλος θα πρέπει να αποφεύγονται καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης (Σαχπάζης, 2016).

Επιλέγονται φράγματα με λεπτό πυρήνα όπου δεν υπάρχει μεγάλη ποσότητα εδαφικού υλικού για τον αδιαπέρατο πυρήνα, αλλά πλεόνασμα σε διαπερατό υλικό. Τελικά όταν εμφανίζεται αφθονία διαπερατών και αδιαπέρατων υλικών, επιλέγεται η κατασκευή φράγματος με λεπτό πυρήνα. Τα φράγματα αυτά είναι οικονομικότερα και ευκολότερα στην κατασκευή τους, με τα διαπερατά υλικά μπορεί εύκολα να ελεγχθεί ο πυρήνας ως προς το πάχος, οι συνθήκες και οι περιστάσεις να μην είναι ιδανικές για την κατασκευή πυρήνα με αδιαπέρατα υλικά. Για την κατασκευή του πυρήνα με ελάχιστο πάχος καθοριστικό ρόλο έχουν πολλά χαρακτηριστικά, από το ιδανικό πλάτος για σωστή κατασκευή, το είδος του υλικού που τοποθετείται στον πυρήνα και το φράγμα. Ακόμα η ανοχή σε απώλεια διήθησης και τέλος η προηγούμενη εμπειρία από αντίστοιχα έργα (Σαχπάζης, 2016).

Ο πυρήνας συνηθίζεται να έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από το υπόλοιπο ανάχωμα. Έτσι για την καλύτερη ευστάθεια του φράγματος, συνιστάται ο λεπτότερος πυρήνας. Αντιθέτως ένας πιο παχύς πυρήνας αντιστέκεται καλύτερα σε διαφορεικό ράγισμα, πράγμα που οδηγεί σε διασωλήνωση του εδάφους. Γίνεται σαφές ότι οι αντιστάσεις από την διασωλήνωση εξαρτώνται από τις ιδιότητες του εδάφους (Σαχπάζης, 2016).

Από την άλλη τα χωμάτινα φράγματα με κεκλιμένους πυρήνες έχουν πλεονεκτήματα. Αρχικά είναι δυνατόν να γίνει η κατασκευή πρώτα του κατάντη μετώπου και να γίνει η τοποθέτηση του πυρήνα αργότερα. Έτσι επιτυγχάνεται να ολοκληρωθεί ο πυρήνας σε σύντομο χρονικό διάστημα, όσο δεν υπάρχουν βροχές, από λεπτόκοκκα εδάφη. Επίσης είναι ευκολότερη η κατασκευή λεπτότερων αδιαπέρατων μετώπων ανάντη και κατάντη, απ'ότι να κατασκευαστούν χωμάτινα φράγματα με κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα. Τέλος οι σιμεντενέσεις θεμελίωσης είναι πιο πρακτικά και οικονομικά σε χωμάτινα φράγματα με κεκλιμένους αδιαπέρατους πυρήνες (Σαχπάζης, 2016).

Ενώ τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτού του είδους τα φράγματα, είναι ότι σε κάποιες περιπτώσεις η επιφάνεια που εδράζεται ο πυρήνας και η θεμελίωση, εξαρτάται από το πόσο βαθιά γίνεται η εκσκαφή για τα θεμέλια. Άρα όσο βαθύτερη εκσκαφή έχουμε τόσο η επαφή αυτή πάει προς το ανάντη μέτωπο. Πράγμα που σημαίνει ότι, κάποιες φορές, δεν είναι δυνατός ο ακριβής καθορισμός του βάθους εκσκαφής πριν την έναρξη των εργασιών (Σαχπάζης, 2016).

5.4.2 Λιθόριπτα φράγματα

Λιθόριπτο φράγμα ορίζεται ως αναχωματικού τύπου, σύμφωνα με την ένωση χαμηλών φραγμάτων (ICOLD), που πρωτίστως εξαρτάται από το βραχώδες υλικό που το περιβάλλει και αντιστηρίζει, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Με τον όρο λιθορριπή εννοούμε ένα φράγμα το οποίο αποτελείται πάνω από το μισό του συνολικού όγκου του από συμπυκνωμένο μη συνεκτικό και διαπερατό εδαφικό υλικό. Έτσι για να αποφυγή διαρροών θα πρέπει να υπάρχει έναν αδιαπέρατο μέτωπο στα ανάντη ή να αποτελείται από κάποιο αδιαπέρατο πυρήνα (Σαχπάζης, 2016).



Εικόνα 22: Παράδειγμα λιθόριπτου φράγματος (Σαχπάζης, 2016)

Τα λιθόριπτα φράγματα, όπως και τα χωμάτινα, αποτελούνται από ποικίλα δομικά υλικά ικανών κοκκομετρικών σχημάτων. Παρόλη την διαβάθμιση, λόγω τριβής και στενής επαφής τα υλικά παραμένουν σταθερά και σε ισορροπία των διαφορετικών κοκκομετρικών κατηγοριών, αλλά και από συνδετικούς παράγοντες που δένουν τους εδαφικούς κόκκους (Σαχπάζης, 2016).

Η χρήση της λιθορριπής είναι απαραίτητη όταν στην περιοχή η ποσότητα εδαφικών υλικών δεν είναι επαρκής και η βραχομάζα είναι υγιής με την οποία παράγονται λιθορριπή και αδρανή υλικά. Η χρήση και κατασκευή λιθορριπής είναι απλή, σε οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, που δεν θα ήταν δυνατή για χωματοργικές εργασίες και σκυροδέτηση. Φράγμα από λιθορριπή και αδιάπερατο μέτωπο στα ανάντη είναι ευκολότερο να κατασκευαστεί σε στάδια. Εύκολη θεωρείται η αύξηση του ύψους με προσθήκη επιπλέον λιθορριπής πίσω από το αδιάπερατο υλικό, χωρίς να δημιουργηθεί πρόβλημα στον ταμιευτήρα. Με την τοποθέτηση κατάλληλου αδιάπερατου υλικού στο μέτωπο γίνεται και υδατοστεγές. Σημαντική είναι και η κατασκευή κατά στάδια, κυρίως εγκιβωτισμένων μικρών προφραγμάτων, τα οποία χρησιμεύουν και προστατεύουν, ώστε να ολοκληρωθεί το υπόλοιπο τμήμα της θεμελίωσης (Σαχπάζης, 2016).

Ένα λιθόριπτο φράγμα με χωμάτινο πυρήνα έχει τρία κατασκευαστικά μέρη, την κύρια λιθορριπή, την ανάντη αδιάπερατη ζώνη και τα βοηθητικά αντιστηρικτικά μέλη.

Η κύρια λιθορριπή είναι αυτή που υποστηρίζει και αντιστηρίζει το φράγμα με το ίδιο βάρος. Με την αδιάπερατη ζώνη συγκρατείται το νερό στην ανάντη περιοχή και δεν έχουμε διαρροές στο εσωτερικό του φράγματος. Η ανάντη περιοχή είναι φτιαγμένη από μία αδιάπερατη μεμβράνη, η οποία κρατά το νερό και μεταφέρει το νερό στο σώμα λιθορριπής και στην θεμελίωση. Συνηθίζεται η μεμβράνη ή ο τάπητας στεγάνωσης να έχουν ένα χοντρό κάλλυμα ή έναν πυρήνα από άργιλο ή τάπητα σκυροδέματος κ.α. Η μεμβράνη και τα τμήματα μπορούν να μην κινηθούν με την βοήθεια αντιστηρικτικών μελών. Τα κατασκευαστικά μέρη αυτά είναι ίδια με το σώμα, τον πυρήνα και τα συναφή εξαρτήματα ενός χωμάτινου φράγματος και η ανάλυση τους γίνεται παρόμοια (Σαχπάζης, 2016).

5.5 Σεισμική επικινδυνότητα

Για την ορθή και ασφαλή εκτίμηση συμπερασμάτων σχετικά με τις επιπτώσεις των σεισμών στα έργα των φραγμάτων είναι καίρια η γνώση όλων των γεωλογικών και σεισμολογικών στοιχείων. Συνηθίζεται να έχουμε μικρότερες βλάβες σε κατασκευές πάνω σε συμπαγή πετρώματα απ'ότι σε μη συμπαγή υλικά και ειδικά κορεσμένα. Έτσι φράγματα από τσιμέντο πάνω σε υγιή βραχώμαζα, δεν επηρεάζονται έντονα από τις σεισμικές δυνάμεις. Από την άλλη, χωμάτινα και λιθόριπτα φράγματα μπορεί να έχουν σημαντικά προβλήματα από τους σεισμούς απότι τα τσιμεντένια, έχουν όμως την δυνατότητα να μετατοπίζονται χωρίς θραύση, αν τα υλικά στην θεμελίωση είναι υγιής και δεν έχουν μετακινηθεί (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου λόγω σεισμού δεν υπάρχουν ορατά σημεία διαρροής στο φράγμα, συμβαίνει όμως μικρές μετακινήσεις στην θεμελίωση να είναι ικανές, ώστε να αλλάξει η ροή των υδάτων στο εσωτερικό του φράγματος να διαρρήξουν και να κάνουν ζημιές σε σφραγισμένες από τσιμεντενέσεις ρωγμές, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα. Αντιθέτως, συμβαίνει στον ταμιευτήρα να υπάρχουν μετατοπίσεις μαζών, ακόμα και από μικρούς σεισμούς (Κούκης, Σαμπατακάκης, 2007).

5.6 Αστοχίες φραγμάτων

Από την Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ICOLD) ορίζεται ως αστοχία φράγματος (failure στα αγγλικά), η «Κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της θεμελίωσής του, τόσο ώστε να είναι αδύνατη η συγκράτηση του νερού. Η αστοχία είναι τέτοια, που απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες νερού, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και περιουσίες στην κατάντη περιοχή». Συνεπώς δεν θα πρέπει να καταγράφεται ως αστοχία, η αδυναμία συγκράτησης νερού που δεν είναι επακόλουθο κατάρρευσης ή μετακίνησης του φράγματος. Επιπλέον, ο ορισμός λέει ότι μετά την αστοχία ακολουθεί 'απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού', αλλά θεωρείται ότι αυτό είναι δυνητικό επακόλουθο και όχι υποχρεωτικό, για να οριστεί ένα γεγονός ως αστοχία (Μουτάφης).

Στην Ελλάδα, η πλειοψηφία των φραγμάτων δεν εμφάνισαν αδυναμίες μετά την ολοκλήρωσή τους και ανταποκρίθηκαν επαρκώς στους στόχους κατασκευής τους. Σε μερικά από αυτά δεν ήταν τεχνικά και οικονομικά εφικτή, η αποκατάσταση των προβλημάτων, για αυτό τα φράγματα αυτά θεωρείται ότι αστόχησαν και καταγράφονται έτσι (αστοχίες) (Μουτάφης).

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου τα φράγματα κατά την διάρκεια κατασκευής ή λειτουργίας τους παρουσίασαν προβλήματα και αδυναμία στην ομαλή χρήση τους. Σε κάποια από αυτά η επιδιόρθωση αυτών ήταν δυνατή, και τελικά τα έργα κατάφεραν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις, με επεμβάσεις στο έργο και νέα μεγαλύτερα κόστη σε ευρώ. Η καταγραφή αυτών γίνεται ως ατυχές συμβάν(Μουτάφης).

Με την σωστή καταγραφή τέτοιων περιστατικών, όπως είναι οι αστοχίες και τα ατυχή συμβάντα, με λεπτομέρειες της εξέλιξής τους, και αναζήτηση των αιτιών, είναι μια σημαντική πηγή πληροφοριών για την συμπεριφορά των φραγμάτων κάτω από ορισμένες συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο αντλείται εμπειρία για τον σχεδιασμό νέων έργων. Βασικός στόχος όλο και μεγαλύτερη πρόοδος στις παραδοχές σχεδιασμού, τους τρόπους κατασκευής και την βελτίωση του σχεδιασμού και υπολογισμού έργων για την μείωση του βαθμού διακινδύνευσης των έργων αυτών για την αποφυγή ως το δυνατόν ατυχών συμβάντων και αστοχιών (Μουτάφης).

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Οι γεωλογικές πληροφορίες είναι απαραίτητες σε όλη την διάρκεια του έργου είτε πρόκειται για φάση σχεδιασμού ή κατασκευής αυτού. Ως επακόλουθο η μελέτη δεν περιορίζεται μόνο στη στενή περιοχή κατασκευής του, αλλά επεκτείνεται στον ευρύτερο χώρο που θα μπορούσε να επηρεάσει ή να επηρεαστεί από αυτό. Οι πολιτικοί μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν τις ιδιότητες των πετρωμάτων με ακρίβεια, αλλά και την σωστή επιλογή της τοποθεσίας για την σταθερότητα των θεμελιώσεων. Σε εξιδικευμένα έργα είναι απαραίτητη η γνώση των υπογείων υδάτων για την σύνδεση με εκσκαφικές εργασίες, η γεωλογία της περιοχής για την αποφυγή προβλημάτων στην θεμελίωση φραγμάτων και γεφυρών, ακόμα ακόμα τον εντοπισμό ρηγμάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν ανάλογα για την σταθερότητα της κατασκευής. Κάποιες από τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις τεχνικών έργων που απαιτούν την συνδρομή της γεωλογίας είναι: μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα, έργα οδοποιίας, υδραυλικά και υδροηλεκτρικά έργα, λιμενικά έργα, αεροδρόμια, χάραξη δικτύων τηλεπικοινωνιών και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εγκατάσταση πυρηνικών εργοστασίων και πολλά άλλα.

Μέσα από παραδείγματα, εικόνες και σημαντικά στοιχεία παρουσιάστηκαν οι κυριότεροι διαχωρισμοί και ταξινομήσεις στο έδαφος και την βραχομάζα. Αναλύθηκαν τα κυριότερα χαρακτηριστικά και όπου χρειάστηκε έγινε σύγκριση μεθόδων. Ύστερα δείχθηκαν τρόποι κατασκευής σηράγγων και φραγμάτων και καταδείχθηκε η σημασία της γεωλογίας σε αυτά. Τέλος υποδείχθηκαν οι τρόποι αστοχίας των έργων αυτών από σεισμούς και αστοχίες μετά την κατασκευή.

Εν κατακλείδι, η αρμονική συνεργασία ανάμεσα στον γεωλόγο που είναι υπεύθυνος της διερεύνησης και ορθής εκτίμησης των γεωλογικών παραμέτρων του προβλήματος, και το μηχανικό που έχει την ευθύνη της κατασκευής, οδηγεί σε ασφαλέστερες και οικονομικότερες λύσεις που μειώνουν στο ελάχιστο τις πιθανότητες αστοχιών και καταστροφών. Η συμμετοχή του γεωλόγου κρίνεται απαραίτητη με την γνώση που παρέχουν για το γεωλογικό περιβάλλον, για την αποφυγή θεαματικών αστοχιών με υψηλό οικονομικό και κοινωνικό κόστος.

Βιβλιογραφία

Εξαδάκτυλος Γ., Μ. Σταυροπούλου Μ. (2006), Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων, Χανιά

Καββαδάς Μ. (2005), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καββαδάς Μ. (2016), Στοιχεία Εδαφομηχανικής 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τσότρας, Αθήνα

Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν. (2007), Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Μαραγκός Χ. (1997), Τεχνικά έργα υποδομής, Κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, Υπόγειες κατασκευές, Φράγματα, Εκδότης: Χρήστος Ν. Μαραγκός

Μουτάφης Ν.Ι., Αστοχίες και Ατυχή Συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων, Οδηγίες για την παρουσίαση του τελικού κειμένου για την έκδοση των πρακτικών του 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος.

Νομικός Π. (2015), Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων, Εκδόσεις Κάλλιπος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου

Σακκοπούλου Α. (2010), Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των αγκυρίων τύπου fiberglass στην εξέλιξη των συγκλίσεων οροφής, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμητικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) “Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σαχπάζης Κ. (2016), Γεωτεχνική Μηχανική των Φραγμάτων, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας

Σοφιανός Α. (2018), Διάνοιξη Σηράγγων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου

Fu C., Haflidason B. (2015), Progressive failure analyses of concrete buttress dams, Stockholm

Mahmoodzadeh A., Reza Nejati H., Mohammadi M., Hashim Ibrahim H., Rashidi S., Rashid T. A., (2022), Forecasting tunnel boring machine penetration rate using LSTM deep neural network optimized by grey wolf optimization algorithm

Palmstrom A., Broch E. (2006), Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-SYSTEM, Norway

Ηλεκτρονικές πηγές βιβλιογραφίας

- 1) <https://www.waterproofmag.com/2012/01/cut-and-cover-tunnels/>
- 2) <https://www.athenstransport.com/2013/07/tbm-metro/>
- 3) <https://tunnelingonline.com/understanding-the-new-austrian-tunnel-method-natm/>
- 4) <https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/arrowrock-dam>
- 5) <http://vtaraenergygroup.com/index.php/portfolio/hydro-project-karnataka/>