

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

### **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ**



**Όνοματεπώνυμο σπουδαστριών:  
ΑΡΒΑΝΙΤΗ ΚΛΕΟΠΑΤΡΑ  
ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗ ΜΑΡΙΑ - ΕΛΕΝΗ**

**Εποπτεύων καθηγητές:  
ΣΠΗΛΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ  
ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΙΡΗΝΗ**

**ΠΑΤΡΑ 2013**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τις εφαρμογές βραχομηχανικής σε τεχνικά έργα. Πιο συγκεκριμένα, ερευνά τις διάφορες μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τεχνικών έργων όπως φράγματα, σήραγγες κ.ά. Η έρευνα και η επεξεργασία των ιδιοτήτων και των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας αποτελεί ίσως τη βασικότερη παράμετρο για τη δημιουργία ενός τεχνικού έργου.

Η μορφολογία της βραχώμαζας παίζει καθοριστικό ρόλο στον τρόπο που θα κατασκευαστεί κάποιο Τεχνικό έργο. Αρχικά ελέγχεται η ύπαρξη των ασυνεχειών, το άνοιγμά τους, η ύπαρξη ή μη υλικού πλήρωσης και κυρίως ο προσανατολισμός τους, καθώς αυτός έχει τον κύριο ρόλο ως προς την ευστάθεια της κατασκευής και κατ' επέκταση στις μεθόδους αντιστήριξης που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ασυνέχειες ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την αστοχία των έργων που θεμελιώνονται σε βραχώδεις σχηματισμούς.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι κατασκευής ειδικών τεχνικών έργων, όπως για παράδειγμα η διάνοιξη σηράγγων, η κατασκευή φραγμάτων κ.ο.κ., καθώς και η ποιότητα – ποσότητα των αδρανών υλικών που προέρχονται από βραχώδεις σχηματισμούς και χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα.

Τέλος, οι εφαρμογές της βραχομηχανικής στα διάφορα τεχνικά έργα, αποτελεί ένα ενδιαφέρον και σημαντικό κεφάλαιο, το οποίο αφενός απασχολεί και μελετάται από επιστήμες πολλών και διαφορετικών ειδικοτήτων και αφετέρου, σε πρακτικό επίπεδο συμβάλει σε μεγάλο βαθμό, μέσω των εφαρμογών της, στην γενικότερη ανάπτυξη μιας χώρας, στη προστασία του περιβάλλοντος και την αισθητική των έργων .

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία παρουσιάζει και αναλύει τις εφαρμογές βραχομηχανικής σε διάφορα τεχνικά έργα και εστιάζει περισσότερο στη διάνοιξη σηράγγων και στην κατασκευή των φραγμάτων και μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βασικά μέρη.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια εισαγωγή στη βραχώμαζα και εξηγούνται διάφορες βασικές έννοιες, όπως οι ασυνέχειες και ο προσανατολισμός τους, τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας, καθώς και ο δείκτης ποιότητας αντοχής της βραχώμαζας RQD (Rock Quality Designation). Οι παραπάνω παράγοντες έχουν μεγάλη βαρύτητα ως προς την αντοχή της βραχώμαζας. Επιπλέον, αναλύονται οι τύποι των θεμελιώσεων και οι διάφορες μορφές αστοχίας.

Στο δεύτερο μέρος εξετάζονται τα υπόγεια έργα και οι σήραγγες. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών, τα υλικά αποσάθρωσης, οι διάφορες παραμορφώσεις που τυχόν έχουν οι σήραγγες καθώς και οι μέθοδοι υποστήριξής τους. Γενικότερα, γίνεται επεξήγηση όλων των ενεργειών που είναι απαραίτητες για τη διάνοιξη μιας σήραγγας.

Στη συνέχεια, αναφέρονται και περιγράφονται οι διάφοροι τύποι φραγμάτων. Αναλυτικότερα, γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας κατασκευής κάθε φράγματος ανάλογα με το είδος του και εξηγούνται αντίστοιχα οι διάφορες μορφές αστοχίας, καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισής τους.

Στο τελευταίο μέρος, γίνεται μια αναφορά στα αδρανή υλικά και στο ρόλο που έχουν στην κατασκευή των παραπάνω έργων. Συνοψίζοντας, η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αναλύει τα διάφορα τεχνικά έργα, τις ενέργειες που απαιτεί η κάθε κατασκευή, τυχόν αστοχίες αλλά και την αποφυγή τους με τα διάφορα μέσα αντιστήριξης.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΒΡΑΧΟΥ

1.1. Εισαγωγή – Ορισμοί .....	1
1.2. Κατάσταση – Παράμετροι βράχου – βραχόμαζας .....	1
1.2.1. Ασυνέχειες – Προσανατολισμός ασυνεχειών Επίπεδες ασυνέχειες – Μέθοδος στερεοδιαγράμματος.....	1
1.2.2. Πυκνότητα ασυνεχειών .....	3
1.2.3. Συστήματα ταξινόμησης αντοχής – ποιότητας βραχόμαζας.....	3
1.2.3.1. Συστήματα ταξινόμησης κατά ISRM.....	5
1.2.3.2. Ταξινόμηση του συμπαγούς υλικού σε συνάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων $C_0$ και $E_i$ και το γεωλογικό όνομα του συμπαγούς βράχου .....	5
1.2.3.3. Συστήματα ταξινόμησης RMR .....	6
1.2.3.4. Συστήματα ταξινόμησης SMR.....	7
1.2.3.5. Συστήματα ταξινόμησης Q .....	8
1.2.4. Σχέση – σύγκριση συστημάτων RMR και Q .....	14
1.2.5. Δείκτες ποιότητας αντοχής.....	14

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ – ΑΣΤΟΧΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2.1. Βραχώδη Πρανή.....	17
2.2. Μέτρα προστασίας σε βραχώδη πρανή.....	19
2.3. Εκτίμηση Δυνητικών Ολισθήσεων .....	23
2.4. Συμπιεστική Δύναμη του Άθικτου Βράχου.....	24
2.5. Διόγκωση.....	25
2.6. Κόπωση .....	26
2.7. Ερπυσμός .....	26
2.8. Παράμετροι Επίλυσης Του Κριτηρίου Hoek - Brown .....	26

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ

#### ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΑΝΩ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

3.1. Ορισμός της φέρουσας ικανότητας.....	29
3.1.1. Μηχανισμοί αστοχίας βράχου-βραχόμαζας.....	29
3.1.2. Επιτρεπόμενη τάση έναντι θραύσης.....	30
3.1.3. Επιτρεπόμενη τάση έναντι οριακών καθιζήσεων.....	30
3.1.4. Συντελεστής ασφαλείας .....	30
3.1.5. Μέθοδοι προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας .....	30
3.1.6. Κριτήριο Hoek - Brown.....	31
3.2. Θεμελίωση πάνω σε οριζόντια επιφάνεια .....	31
3.2.1. Θεμελίωση σε πρανές.....	32
3.2.2. Θεμελίωση στη στέψη απότομου πρανούς .....	35
3.2.3. Θεμελίωση κοντά σε γεωλογικές ασυνέχειες.....	35
3.2.4. Θεμελίωση σε καρστικούς σχηματισμούς .....	35
3.2.5. Κυκλική αστοχία (circular failure).....	35
3.2.6. Επίπεδη αστοχία (plane failure) .....	36

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ – ΣΗΡΑΓΓΕΣ**

4. Αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού σηράγγων .....	37
4.1. Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών .....	39
4.2. Σήραγγες σε ζώνες διάρρηξης .....	41
4.3. Υλικά αποσάθρωσης .....	41
4.4. Επίδραση σεισμών .....	42
4.5. Μηχανισμοί θραύσης .....	42
4.6. Παραμορφώσεις σε σήραγγες .....	42
4.7. Μέθοδοι υποστήριξης σηράγγων .....	43
4.8. Αγκύρια .....	46

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΦΡΑΓΜΑΤΑ**

5. Ταξινόμηση φραγμάτων.....	57
5.1. Σήραγγα εκτροπής (Diversion tunnel) .....	64
5.2. Πρόφραγμα (Cofferdam).....	64
5.3. Σήραγγα επίσκεψης (Inspection gallery).....	64
5.4. Σήραγγες τσιμεντενέσεων (Grouting galleries).....	64
5.5. Σήραγγες αποστράγγισης (Drainage galleries) .....	64
5.6. Κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής του ταμιευτήρα και του άξονα του φράγματος .....	65
5.7. Τύποι φραγμάτων - Γεωλογικό υπόβαθρο και ιδιαιτερότητες σχεδιασμού .....	67
5.8. Αστοχίες σε φράγματα με βάση τα γεωλογικά – τεκτονικά κριτήρια.....	69
5.9. Σεισμική επικινδυνότητα – Ευστάθεια φραγμάτων .....	71
5.10. Τύποι πετρωμάτων και φράγματα .....	76
5.11. Χωμάτινα φράγματα .....	78
5.12. Τα φράγματα στον Ελληνικό χώρο .....	81

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΔΡΑΝΗ**

6. Κατηγορίες αδρανών υλικών .....	92
6.1. Προέλευση .....	92
6.2. Θέσεις λήψης αδρανών .....	93
6.3. Μέγεθος κόκκων .....	93
6.4. Σκυροδέματα .....	93
6.5. Συρματοκιβώτια.....	96

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΒΡΑΧΟΥ**

### **1.1.Εισαγωγή – Ορισμοί**

Η βραχώμαζα είναι ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδες υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί τη φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επιτόπου και σε μεγάλη έκταση.

Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας είναι απαραίτητο εργαλείο για το σχεδιασμό κάθε τεχνικού έργου που κατασκευάζεται μέσα ή πάνω σε αυτή. Η εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι ένα αρκετά δύσκολο αντικείμενο. Οι παράμετροι αυτές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του βραχώδους υλικού, τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους των ασυνεχειών που τη διατέμνουν, από την ύπαρξη ή μη λιθολογικής ανομοιογένειας στη σύσταση και στη δομή της, από την ποικιλία του βαθμού αποσάθρωσης, από το αν υπάρχει ανισότροπο εντατικό πεδίο κ.λπ. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι ο γεωλογικός παράγοντας είναι καθοριστικός στη διαμόρφωση του πλαισίου της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας.

Η μηχανική συμπεριφορά του βραχώδους υλικού, όπως προσδιορίζεται εργαστηριακά είναι προφανές ότι δεν μπορεί να επεκταθεί στη βραχώμαζα, εφόσον οι εκτιμούμενοι παράμετροι αναφέρονται στα υγιέστερα δείγματα του βράχου που είναι και απαλλαγμένα ασυνεχειών, πράγμα που επιτείνει τη μη αντιπροσωπευτικότητα των δοκιμών αυτών για την επέκτασή τους στη βραχώμαζα.

Οι επιτόπου δοκιμές Βραχομηχανικής (δοκιμές ντιλατομέτρησης, φορτίσεις πλάκας, επιτόπου δοκιμές διάτρησης κ.λπ.) θεωρούνται περισσότερο αντιπροσωπευτικές, καθώς εκτελούνται σε μεγαλύτερου όγκου <<δείγματα>> που βρίσκονται στη φυσική τους κατάσταση και τα οποία εμπεριέχουν και δομικές ασυνέχειες. Τα αποτελέσματά τους είναι σαφώς πιο ρεαλιστικά σε σχέση με τα εργαστηριακά αλλά η εκτέλεση των δοκιμών αυτών είναι σημαντικά περιορισμένη λόγω κυρίως της περιορισμένης αντιπροσωπευτικότητας τους, των ειδικών συνθηκών και απαιτήσεων εκτέλεσής τους, του αυξημένου κόστους κ.λπ.

Οι μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας εκτιμώνται συνήθως με έμμεσο τρόπο και μεθόδους που βασίζονται στη συσσωρευμένη εμπειρία από πραγματικές περιπτώσεις κατασκευής τεχνικών έργων σε διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Οι εμπειρικές αυτές μέθοδοι βασίζονται στη χρήση των «συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας» ( rock mass classification systems) τα πιο σημαντικά από τα οποία περιγράφονται με λεπτομέρεια στη συνέχεια.

### **1.2. Κατάσταση- Παράμετροι βράχου-βραχώμαζας**

Οι τεκτονικές επιδράσεις που έχει υποστεί ο βράχος, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο έχει σχηματιστεί, έχουν δημιουργήσει στη μάζα του επίπεδα στρώσεων, διακλάσεις, επιφάνειες σχιστότητας, πτυχώσεις. Τα δομικά αυτά στοιχεία λέγονται ασυνέχειες και διακόπτουν κατά τμήματα ή σε μεγάλη έκταση τη συνέχεια του βράχου. Οι ασυνέχειες διακρίνονται σε επίπεδες, όπως είναι οι επιφάνειες των διακλάσεων, τα επίπεδα στρώσης του στρωσιγενούς βράχου, οι επιφάνειες σχιστότητας και σε γραμμικές ασυνέχειες όπως είναι οι άξονες των πτυχώσεων και οι γραμμές αλληλοτομής των διακλάσεων.

#### **1.2.1. Ασυνέχειες-Προσανατολισμός ασυνεχειών**

##### **Επίπεδες ασυνέχειες – Μέθοδος στερεοδιαγράμματος**

Σπάνια συναντάται ένας τυχαίος προσανατολισμός των ασυνεχειών. Συνήθως αναπτύσσονται κατά δέσμες-μία ή περισσότερες- προσδίδοντας έτσι ένα ορισμένο σύστημα στη συναρμογή το οποίο καθορίζει τη γεωμετρική και δομική ανισοτροπία του βράχου και υποδηλώνει τη

μηχανική ανισοτροπία του ενώ η επιρροή της συναρμογής στη μηχανική συμπεριφορά του βράχου είναι μεγάλη.

Όλα τα δομικά στοιχεία του βράχου έχουν τις γεωμετρικές ιδιότητες ενός επιπέδου ή μιας ευθείας γραμμής. Η θέση τους στο χώρο ορίζεται από τις γωνιακές σχέσεις τους ως προς το σύστημα των γεωγραφικών αξόνων.

### **Επίπεδες ασυνέχειες (planar discontinuities)**

Ο προσανατολισμός μιας επίπεδης ασυνέχειας ορίζεται με την κλίση και την παράταξη της. **Κλίση (dip)** είναι η γωνία την οποία σχηματίζει η ασυνέχεια με το οριζόντιο επίπεδο. **Παράταξη (strike)** είναι η ευθεία τομής της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο. Η παράταξη ορίζεται με τη γωνία η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία αυτή και στον άξονα του γεωγραφικού Βορρά.

- Όσον αφορά την κλίση της ασυνέχειας χρειάζεται προσοχή στα εξής:
- Για κάθε αναφορά στην κλίση της ασυνέχειας εννοείται η **μέγιστη κλίση (true dip)** δηλαδή τη μέγιστη γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο και είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και στην ευθεία τομής της ασυνέχειας με εκείνο το κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την ευθεία μέγιστης κλίσης της ασυνέχειας, δηλαδή εκείνης της ευθείας γραμμής την οποία ακολουθεί ένα σώμα. Η γωνία η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και στην ευθεία τομής της ασυνέχειας με οποιοδήποτε άλλο κατακόρυφο επίπεδο είναι η **φαινόμενη κλίση** της ασυνέχειας (**apparent dip**).
- Η διεύθυνση μιας ασυνέχειας μπορεί επίσης να οριστεί- αντί με την παράταξη- με τη διεύθυνση μέγιστης κλίσης (**dip direction**). Η διεύθυνση μέγιστης κλίσης είναι η γωνία η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα του Βορρά και στην ευθεία τομής του κατακόρυφου επιπέδου που περιέχει την ευθεία μέγιστης κλίσης με το οριζόντιο επίπεδο. Η κλίση και η παράταξη μετριοούνται με τη γεωλογική πυξίδα.

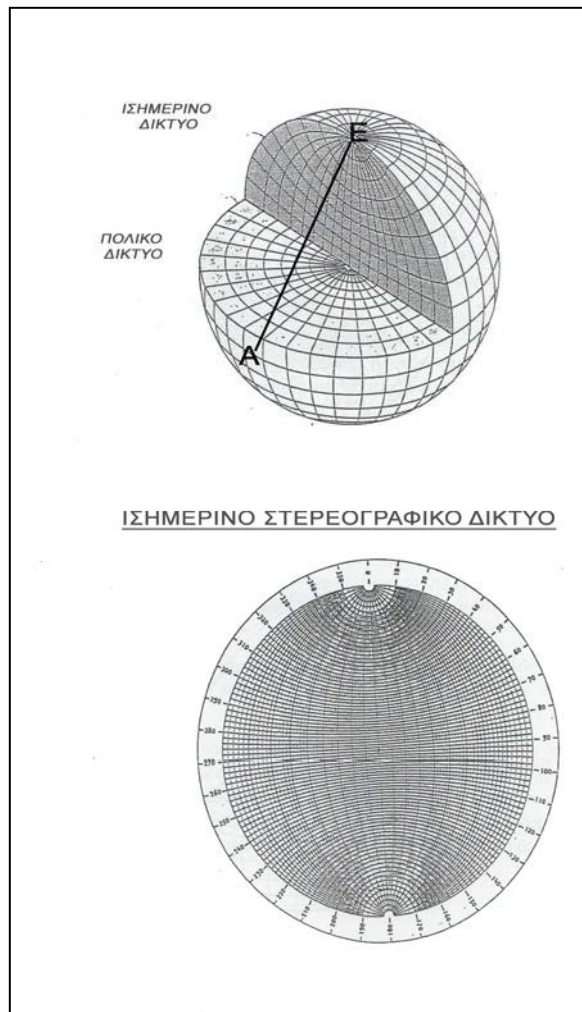
### **Γραμμικές ασυνέχειες (linear discontinuities)**

Ο προσανατολισμός μιας γραμμικής ασυνέχειας ορίζεται με την κλίση και με τη διεύθυνση της κλίσης. **Κλίση (plunge)** είναι η οξεία γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη γραμμική ασυνέχεια και στην ευθεία τομής του κατακόρυφου επιπέδου που την περιέχει με το οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή την οριζόντια προβολή της ασυνέχειας.

### **ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΕΡΕΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ**

Η συμπεριφορά των βραχωδών μαζών εξαρτάται κυρίως από την συχνότητα, το είδος, τον τύπο αλλά και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (ρήγματα, διακλάσεις, επίπεδα στρώσεις, κ.α.). Επομένως είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας εύχρηστος και συστηματικός τρόπος απεικόνισης των ασυνεχειών αυτών στο χώρο. Η απεικόνιση ενός σημείου που βρίσκεται σε επιφάνεια σφαίρας σε επίπεδο λέγεται σφαιρική προβολή. Η προβολή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην βραχομηχανική χρησιμοποιείται η λεγόμενη στερεογραφική ή ισογωνιακή προβολή όπως περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.

Από το άνω σημείο της σφαίρας αναφοράς E (ζενίθ), το οποίο λαμβάνεται ως εστία της προβολής, φέρνουμε ευθεία που ενώνει το σημείο E με ένα τυχαίο σημείο A που βρίσκεται στην επιφάνεια της σφαίρας. Η τομή της ευθείας EA με το οριζόντιο επίπεδο είναι η στερεογραφική προβολή του A. Από την στερεογραφική προβολή προκύπτουν το ισημερινό και το πολικό δίκτυο, τα οποία χρησιμεύουν στην στατική επεξεργασία του προσανατολισμού των ασυνεχειών, επειδή οι ίσες επιφάνειες στη σφαίρα προβάλλονται σε ίσες επιφάνειες στο επίπεδο.



Σχ. 1.1. Στερεοδιάγραμμα

### 1.2.2. Η πυκνότητα των ασυνεχειών (discontinuities density)

Η πυκνότητα των ασυνεχειών  $k$  είναι ο μέσος αριθμός όλων των ασυνεχειών που εμφανίζονται κατά μήκος μιας οποιασδήποτε ευθείας που τοποθετείται στην εμφάνιση του βράχου.

$$k = n/l$$

Όπου  $n$  = ο αριθμός των ασυνεχειών

$l$  = το μήκος της ευθείας στο οποίο περιέχονται οι  $n$  ασυνέχειες.

Ο λόγος  $l/k$  ορίζει τη **μέση απόσταση των ασυνεχειών (space)**.

Η **πυκνότητα μιας δέσμης ασυνεχειών (discontinuities set density)** είναι ο αριθμός των ασυνεχειών της δέσμης οι οποίες εμφανίζονται ανά τρέχον μέτρο μιας ευθείας η οποία τοποθετείται κάθετα στη δέσμη.

### 1.2.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ – ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

#### Γενικά

Ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς, προϋποθέτει τη διερεύνηση όλων των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν άμεσα τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Η ακριβής γνώση των παραγόντων αυτών και το εύρος της πιθανής



διακύμανσής τους, μπορεί να καθορίσει το πλαίσιο της αναμενόμενης μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας και επομένως να οριοθετήσει τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του τεχνικού έργου.

Προς την κατεύθυνση αυτή έχει προ πολλού διαπιστωθεί ότι μια συστηματική ταξινόμηση της βραχομάζας μπορεί να δώσει μια αρκετά ικανοποιητική πληροφόρηση. Η βασική βέβαια απαίτηση για τη ταξινόμηση αυτή είναι η αναγκαιότητα ανάπτυξης των κατάλληλων κριτηρίων ώστε να επιτυγχάνεται η συστηματική κατάταξη της βραχομάζας σε συγκεκριμένες κατηγορίες και ομάδες, που κάθε μια να έχει παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, οπότε και να απαιτεί ενιαία αντιμετώπιση (αντιστήριξη, επιβολή φορτίων κ.λπ.). Τα κριτήρια αυτά θα πρέπει να εκτιμώνται από επιμέρους μετρούμενα μεγέθη, ο προσδιορισμός των οποίων πρέπει να διασφαλίζει την απαιτούμενη αντικειμενικότητα, αξιοπιστία, εγκυρότητα, συγκρισιμότητα και χρησιμότητα – σκοπιμότητα.

Η ανάπτυξη μιας τέτοιας ταξινόμησης και η συσχέτιση των κατασκευαστικών απαιτήσεων του τεχνικού έργου με τις επιμέρους κατηγορίες της ταξινόμησης, πράγμα που αποτελεί το κυρίως ζητούμενο, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σημαντικού δείγματος πραγματικών περιστατικών – εφαρμογών (case histories) τα οποία να πιστοποιούν την εφαρμοσιμότητά της. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένα χρονικό διάστημα «δοκιμασίας» της ταξινόμησης, ώστε να καθοριστούν το «όρια εφαρμογής της» με δυνατότητες πιθανών διορθωτικών επεμβάσεων και βελτιστοποιήσεων των επιμέρους κριτηρίων, ώστε αυτά να προσαρμόζονται καλύτερα στις εκάστοτε τεχνικογεωλογικές συνθήκες.

Σήμερα, οι ταξινομήσεις της βραχομάζας αποτελούν τη βάση του εμπειρικού σχεδιασμού και η εφαρμογή τους είναι πολύ σημαντική στο σχεδιασμό τεχνικών έργων σε βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ η αξιοπιστία τους θεωρείται συνήθως δεδομένη, εφόσον αυτά βασίζονται στην αποκτηθείσα εμπειρία από πολλές περιπτώσεις τεχνικών έργων. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο σχεδιασμό όλων των σιηράγγων και των υψηλών πρानών, χρησιμοποιείται πάντοτε κάποιο σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας.

Αν και η εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης είναι ιδιαίτερα ελκυστική, δεν θα πρέπει να υποκαθιστά αλλά να συμπληρώνει τη γεωλογική και την τεχνική κρίση στην εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας. Οι διάφορες ταξινομήσεις έχουν κάποια όρια εφαρμογής και είναι προφανές ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις αναμενόμενες γεωλογικές και εντατικές καταστάσεις. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε ότι οι μεθοδολογίες ταξινόμησης της βραχομάζας δίνουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα, κυρίως για τις βραχομάζες και τις γεωλογικές καταστάσεις που προσομοιάζουν περισσότερο με τις περιπτώσεις στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξή τους. Διαφορετικά, οι εφαρμογές τους σε περιπτώσεις χωρίς προηγούμενες εμπειρίες είναι δυνατό να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Γενικά, η εφαρμογή και η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας έχουν τους παρακάτω βασικούς στόχους:

- να ταξινομηθεί η βραχομάζα σε επιμέρους ενότητες – κατηγορίες που η κάθε μία να χαρακτηρίζεται από παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, οπότε και να απαιτεί ενιαία αντιμετώπιση (αντιστήριξη, επιβολή φορτίων κ.λπ.)
- να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός τεχνικών έργων στους βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς δίνοντας ποσοτικά στοιχεία και παραμέτρους της βραχομάζας που απαιτούνται στην επίλυση των τεχνικών προβλημάτων σχεδιασμού (παράμετροι αντοχής, παραμορφωσιμότητας κ.λπ.)
- να αποτελέσει μια κοινή βάση συνεννόησης μεταξύ των επιστημονικών ειδικοτήτων που ασχολούνται με τα γεωτεχνικά προβλήματα και μεταξύ Γεωλόγων και Πολιτικών Μηχανικών.

### 1.2.3.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑ ISRM:

Η ακόλουθη ταξινόμηση προτείνεται από την διεθνή ένωση Βραχομηχανικής και βασίζεται στην θλιπτική αντοχή (μονοαξονική) που συμβολίζεται συνήθως με  $c_0$  ή  $\sigma_c$ .

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

Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση κατά ISRM

### 1.2.3.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΛΑΓΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ $C_0$ ΚΑΙ $E_t$ ΚΑΙ ΤΟ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΟΝΟΜΑ ΤΟΥ ΣΥΜΠΛΑΓΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥ

Αυτή η ταξινόμηση προτάθηκε από τον Deere που βασίστηκε σε προηγούμενη εργασία του Miller. Από απόψεως αντοχής ο βράχος χωρίζεται σε πέντε κατηγορίες και από απόψεως του λόγου ελαστικότητας  $E_t / C_0$  σε τρεις κατηγορίες.

1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

<u>Κατηγορία</u>	<u><math>\sigma_c</math> (ΜΡ<sub>ρ</sub>)</u>	<u>Πετρώματα</u>
A	>160	Χαλαζίτες, λεπτόκοκκα εκρηξιγενή.
B	80-160	Εκρηξιγενή, μεταμορωμένα, σκληροί φαμμίτες.
C	40- 80	Ιζηματογενή σκληρά, εκρηξιγενή χαμηλής πυκνότητας.
D	20- 40	Ιζηματογενή μαλακά, σχιστόλιθοι.
E	<20	Εύθρυκτα και κορώδη ιζηματογενή, ατμοσθραμμένα πετρώματα.

2. Λόγος  $E/\sigma_c$

<u>Κατηγορία</u>	<u><math>E/\sigma_c</math></u>	<u>Πετρώματα</u>
H	>500	Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες, Μάρμαρα.
M	200-500	Εκρηξιγενή, Ιζηματογενή.
L	<200	Αργ. Σχιστόλιθοι, φυλλίτες.

**Πίνακας 1.2.** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

### 1.2.3.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ RMR

-Μεθοδολογία και κριτήρια ταξινόμησης

Ονομάζεται «Γεωμηχανική Ταξινόμηση» (Geomechanics Classification) ή σύστημα RMR (Rock Mass Rating) και προτάθηκε αρχικά από τον BIENIAWSKI(1973) ενώ είναι ευρύτερα γνωστό απλά σαν «Σύστημα Bieniawski». Το σύστημα αυτό τροποποιήθηκε μερικώς και βελτιώθηκε από τον BIENIAWSKI στη συνέχεια (1979) ενώ πήρε την τελική (σημερινή) του μορφή το έτος 1989 από τον ίδιο.

Η μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθείται για την εφαρμογή της παραπάνω ταξινόμησης περιλαμβάνει τα παρακάτω επιμέρους στάδια:

Α στάδιο: Η περιοχή στην οποία προβλέπεται να γίνει ταξινόμηση θα πρέπει να διαχωριστεί σε επί μέρους ζώνες, όπου σε καθεμία από τις ζώνες αυτές, τα κύρια χαρακτηριστικά της βραχώμαζας φαίνονται μακροσκοπικά παρόμοια (λιθολογική σύσταση, προσανατολισμός και

απόσταση κύριων ασυνεχειών, φυσική κατάσταση γεωλογικού σχηματισμού κ.λπ.). Ο διαχωρισμός αυτός εξαρτάται προφανώς από τις γενικότερες γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής αλλά και από το εύρος και την έκταση της περιοχής μελέτης (δηλαδή αν πρόκειται για μικρό ή μεγάλο πρηνές, για άξονα σχεδιαζόμενης σήραγγας, για μέτωπο εκσκαφής σήραγγας κ.λπ.). Είναι εύκολα κατανοητό ότι ο διαχωρισμός των ζωνών πρέπει να είναι αρκετά συντηρητικός και προσαρμοσμένος πάντα στη σκοπιμότητα της ταξινόμησης (π.χ. θα ήταν πρακτικά άσκοπος ο διαχωρισμός σε επιμέρους ζώνες ενός μετώπου εκσκαφής μιας σήραγγας). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα όρια των ζωνών αυτών οριοθετούνται από τις διάφορες κύριες γεωλογικές δομές όπως τα ρήγματα, τις ζώνες διάτμησης κ.λπ. ή ακόμα από τις μεταβολές της λιθολογικής σύστασης των γεωλογικών σχηματισμών. Μερικές φορές όταν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, ακόμα και αν αυτές διατέμνουν τον ίδιο τύπο πετρώματος, είναι σκόπιμο να γίνεται διαχωρισμός.

**Β στάδιο:** Μετά το διαχωρισμό των επιμέρους ζωνών γίνεται για κάθε συγκεκριμένη ζώνη προσδιορισμός των μετρούμενων μεγεθών τα οποία καθορίζουν τα κριτήρια της ταξινόμησης. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση εκφράζονται ποσοτικά, μετά από συστηματική εργασία υπαίθρου ή /και από λεπτομερή εξέταση και περιγραφή δειγμάτων από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εργασίες που αναφέρονται στην «Τεχνική Γεωλογία» στο Κεφάλαιο 3 σχετικά με τη μηχανική περιγραφή των ασυνεχειών πρέπει να πραγματοποιούνται κανονικά στα πλαίσια της ταξινόμησης. Οι παράμετροι – κριτήρια που προτείνονται στο σύστημα RMR για την ταξινόμηση της βραχομάζας, αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια.

#### **1.2.3.4. Σύστημα ταξινόμησης SMR**

Ο ROMANA (1985) μετά την επεξεργασία στοιχείων βραχωδών πρηνών, από τα οποία ένας σημαντικός αριθμός αστόχησε, ανέπτυξε μια μεθοδολογία προσέγγισης της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην ευστάθεια των πρηνών, με σκοπό να βελτιώσει προς την κατεύθυνση αυτή το σύστημα ταξινόμησης RMR. Για τον λόγο αυτόν, πρότεινε μια προσαρμογή του συστήματος RMR μόνο για τα βραχώδη πρηνή, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα και έμφαση στη βαθμονόμηση του προσανατολισμού των ασυνεχειών της βραχομάζας σε σχέση με τη γεωμετρία του πρηνούς και στον τρόπο διάνοιξης των πρηνών, καθορίζοντας έτσι τη βάση του συστήματος SMR(Slope Mass Rating).

Αναλυτική παρουσίαση της ταξινόμησης SMR και της βαθμονόμησης των επιμέρους παραγόντων  $F_1, F_2, F_3$  και  $F_4$  δίνεται στον Πίνακα 1.6 όπου φαίνονται συμπληρωματικά στοιχεία σχετικά με το είδος των αναμενόμενων ολισθήσεων για κάθε επιμέρους κατηγορία ταξινόμησης καθώς και τα προτεινόμενα μέτρα προστασίας.

Το παραπάνω σύστημα ταξινόμησης δίνει ικανοποιητική ποιοτική πληροφόρηση για της συνθήκες ευστάθειας των βραχωδών πρηνών σε αναγνωριστικό επίπεδο, ενώ περιλαμβάνει και έντονα ασυνεχείς βραχομάζες. Η εφαρμογή του σε βραχώδη πρηνή του Ελληνικού χώρου (κυρίως ασβεστολιθικής σύστασης) έχει δείξει ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά το πρόβλημα και οδηγεί σε αξιόπιστες εκτιμήσεις κυρίως όσον αφορά το είδος των αναμενόμενων αστοχιών και ολισθήσεων, καθώς και τη γενικότερη θεώρηση των μέτρων προστασίας.

**Πίνακας 1.3.** Ταξινόμηση βραχώμαζας για βραχώδη πρηνή SMR

SMR = RMR <sub>bas</sub> - (F <sub>1</sub> F <sub>2</sub> F <sub>3</sub> ) + F <sub>4</sub>						
ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ						
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
P	$ \alpha - \alpha_s $	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
T	$ \alpha_t - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	F <sub>1</sub>	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta $	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
P	F <sub>2</sub>	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F <sub>2</sub>	1	1	1	1	1
P	$\beta - \beta_s$	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< -10°
T	$\beta_t + \beta_s$	< 110°	110° - 120°	> 120°	--	--
P/T	F <sub>3</sub>	0	6	25	50	60

P : επίπεδη ολίσθηση       $\alpha_s$  : φορά κλίσης πρηνούς       $\alpha_t$  : φορά κλίσης ασυνέχειας  
T : ανατροπή                       $\beta_s$  : κλίση πρηνούς                       $\beta_t$  : κλίση ασυνέχειας

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ					
Μέθοδος	Φυσικό πρηνές	Πρότμηση	Λείων τοιχωμάτων	Εκρηκτικά ή μηχανικά	Ατελή εκρηκτικά
F <sub>4</sub>	15	10	8	0	-8

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ SMR					
Κατηγορία	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Περιγραφή	Πολύ πτωχή	Πτωχή	Μέτρια	Καλή	Πολύ καλή
Ευστάθεια	Τελείως ασταθές	Ασταθές	Μερικά σταθερό	Σταθερό	Τελείως σταθερό
Ολίσθησεις	Εκτεταμένες επίπεδες ή εδαφικού τύπου	Επίπεδες ή εκτεταμένες σφήνες	Πολλές σφήνες	Μερικά τεμάχια	Καμία
Μέτρα προστασίας	Τοίχος βαρύτητας ή τοίχος με αγκύρωση. Επανεκακαφή	Οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τοίχος αναχαίτισης, επανεκακαφή, βαθιά αποστράγγιση	Τάφρος και πλέγμα, τοίχος αναχαίτισης, αγκυρώσεις	Τάφρος, πλέγμα, σποραδικές αγκυρώσεις	Κανένα

### 1.2.3.5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ Q

#### - Μεθοδολογία και κριτήρια ταξινόμησης

Με βάση τις εμπειρίες από την κατασκευή σημαντικού αριθμού υπόγειων τεχνικών έργων στη Σκανδιναβία (περίπου 212 καταγραφές περιστατικών) οι BARTON, LIEN και LUDE (1974) του Νορβηγικού Ινστιτούτου (N.G.I), πρότειναν ένα σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας το οποίο βασίζεται στον ποσοτικό προσδιορισμό του δείκτη ποιότητας της βραχώμαζας, Q.

Ο λόγος (RQD/J<sub>n</sub>) αντιπροσωπεύει την υφή της βραχώμαζας και αποτελεί ένα συγκριτικό μέτρο μεγέθους των βραχωδών τεμαχίων.

Ο λόγος ( $J_r/J_a$ ) αντιπροσωπεύει την τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών ή του υλικού πλήρωσης (εφόσον υπάρχει) και αποτελεί ένα συγκριτικό μέτρο της διατμητικής αντοχής των βραχωδών τεμάχων (δηλαδή εκφράζει το μεταξύ τους αλληλοκλειδώμα). Σε τραχείες υγιείς επιφάνειες τοιχωμάτων που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους αναμένεται η μέγιστη διατμητική αντοχή καθόσον μάλιστα παρατηρείται το φαινόμενο της διαστολής κατά τη διάτμηση. Στην περίπτωση όμως παρουσίας υλικού πλήρωσης ικανοποιητικού πάχους (δεν υπάρχει επαφή των τοιχωμάτων) η διατμητική αντοχή μειώνεται σημαντικά και αυτό αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση ευστάθειας σε μια σήραγγα. Η περίπτωση επαφής των τοιχωμάτων μετά από μικρές διατμητικές μετακινήσεις μπορεί να αποτελέσει έναν καθοριστικό παράγοντα διατήρησης της εκσκαφής από ολική αστοχία.

Ο λόγος ( $J_w/SRF$ ) αποτελεί μια καθαρά εμπειρική έκφραση του πεδίου των τάσεων που επιδρούν στη βραχομάζα. Αποτελεί ένα συνδυασμό της επίδρασης α) των υδροστατικών πιέσεων που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών προκαλώντας μείωση της ορθής ενεργής τάσης ή ακόμα απόπλυση του υλικού πλήρωσης, και β) των επιτόπου τάσεων (γεωστατικών και τεκτονικών) που έχουν προκαλέσει σύνθλιψη του πετρώματος, ασθενείς χαλαρωμένες ζώνες ή ακόμα επιβάλλουν τοπικά υψηλά φορτία στο πέτρωμα.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την ταξινόμηση είναι αντίστοιχη με αυτήν που περιγράφεται για το σύστημα RMR, δηλαδή περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια (βλέπε Κεφάλαιο 1.3.1) με βασική βέβαια διαφοροποίηση στις αντίστοιχες παραμέτρους – κριτήρια που καθορίζουν τη συγκεκριμένη ταξινόμηση.

Το Α στάδιο αναφέρεται στο διαχωρισμό των επιμέρους ζωνών με παρόμοια χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Η διαδικασία είναι εντελώς παρόμοια και απαιτείται συστηματική γεωλογική – τεχνογεωλογική διερεύνηση και πιθανά γεωλογική αποτύπωση με σκοπό την πληρέστερη απεικόνιση όλων των τεχνικογεωλογικών συνθηκών.

Η όλη μεθοδολογία ταξινόμησης που εφαρμόζεται στο στάδιο Β φαίνεται στον Πίνακα 1.7, όπου δίνεται η βαθμονόμηση των επιμέρους παραμέτρων – κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του συστήματος Q. Το τελικό αποτέλεσμα (Γ στάδιο) είναι ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του Q που υπολογίζεται σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, με βάση την οποία γίνεται ο χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχομάζας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.8. Το εύρος των τιμών του Q κυμαίνεται από 0.001 περίπου μέχρι 1000 και καλύπτει όλο το φάσμα ποιότητας της βραχομάζας, από πολύ συνθλιμμένο πέτρωμα – έδαφος μέχρι συμπαγές πέτρωμα χωρίς ασυνέχειες. Σημειώνεται ότι τα πραγματικά περιστατικά που καταγράφηκαν στην ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος αφορούν όλες περίπου τις βασικές κατηγορίες πετρωμάτων από πλευράς σύστασης αλλά και φυσικής κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων και αυτών με εντελώς χαλαρωμένη δομή και αργιλική σύσταση.

#### **Επιπρόσθετες σημαντικές οδηγίες σχετικά με τη χρήση του Πίνακα 1.4:**

1. Ο δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD) υπολογίζεται άμεσα από μετρήσεις σε βραχώδη δείγματα γεωτρήσεων ο οποίος ισούται με το συνολικό άθροισμα των επιμέρους πυκνοτήτων των κυρίων συστημάτων ασυνεχειών και με τη χρήση της αντίστοιχης σχέσης του PALMSTROM (1982):

**Πίνακας 1.4.** Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά BARTON et al (1974)

1. Δείκτης ποιότητας πετρώματος (RQD)		
Περιγραφή	Τιμές RQD (%)	<i>RQD κατά DEERE (1963).</i>  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 (στομίων) 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
<b>3 A. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή ή επαφή πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση</b>		
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	
<b>3 B. Τοιχώματα ασυνέχειας χωρίς καμία επαφή κατά τη διάτμηση</b>		
Ζώνη (υλικό πλήρωσης) που περιέχει αργιλικά ορυκτά σε επαρκές πάχος ώστε να εμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων	1	
Αμμόδης, χαλικώδης 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 $J_a$	$\varphi_r$ (Παραμένουσα)
<b>4 Α. Τοιχώματα ασυνέχειας σε επαφή</b>		
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°
Σπιφρός 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°
<b>4 Β. Επαφή τοιχωμάτων πριν από 10cm διατμητική μετατόπιση</b>		
Υλικό πλήρωσης αμμώδες ή από θρυμματισμένο πέτρωμα (όχι αργιλικής σύστασης)	4	25°–30°
Υλικό πλήρωσης από σπιφρή 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°
<b>4 Γ. Καμιά επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση</b>		
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 (σπιφρή, μαλακή, διογκούμενη) και την παρουσία - δυνατότητα εισόδου νερού στις ασυνέχειες	8–12	
Ζώνες ή διαστρώσεις από σπιφρή 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 (σπιφρή, 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 εκσκαφή ή μικρή εισροή (ταπικά 5 l/min). Πίεση <math>1 \text{ kg/cm}^2</math>	1		
Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πίεση 1–2.5 kg / $\text{cm}^2$	0.66		
Μεγάλη εισροή ή πίεση σε καλής ποιότητας πέτρωμα με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης. Πίεση 2.5 – 10 $\text{kg/cm}^2$	0.50		
Μεγάλη εισροή ή πίεση με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Πίεση 2.5–10 $\text{kg/cm}^2$	0.33		
Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση με προοδευτική μείωση με την πάροδο του χρόνου. Πίεση >10 $\text{kg/cm}^2$	0.2–0.1		
Πολύ μεγάλη εισροή ή πίεση σταθερή. Πίεση >10 $\text{kg/cm}^2$	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 ασθενείς ζώνες επηρεάζουν αλλά δεν διατέμνουν την εκσκαφή
6 Α. Ασθενείς ζώνες (π.χ. ζώνες ρηγμάτων) που τέμνουν την εκσκαφή 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	$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_t / \sigma_1$	2.5
Μέσες τάσεις	200–10	13–0.66	1
Υψηλές τάσεις, πολύ σφικτή δομή	10–5	0.66–0.33	0.5–2
Ήπια εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα)	5–2.5	0.33–0.16	5–10
Έντονη εκτίναξη σκληρού πετρώματος (συμπαγές πέτρωμα)	<math>2.5</math>	<math>0.16</math>	10–20
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

**Πίνακας 1.5.** Χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Q (BARTON et al 1974)

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

2. Σε περιπτώσεις καλά αναπτυγμένης σχιστότητας, φύλλωσης ή σχισμού, οι ασυνέχειες αυτές θεωρούνται σαν αυτόνομο σύστημα και προσμετρώνται κανονικά στην παράμετρο  $J_n$ . Στην περίπτωση που η παρουσία τους παρατηρείται περιστασιακά στη βραχώμαζα ή στα δείγματα των γεωτρήσεων, τότε μπορεί να θεωρηθούν σαν δευτερεύον σύστημα.

3. Οι παράμετροι  $J_r$  και  $J_a$  που αντιπροσωπεύουν τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, πρέπει να αναφέρονται στο σύστημα ασυνεχειών που θεωρείται «κρίσιμο» για το έργο. Μερικές φορές, εάν ένα σύστημα με την μικρότερη τιμή ( $J_r/J_a$ ) έχει ευνοϊκό προσανατολισμό από πλευράς ευστάθειας για το έργο ενώ ένα άλλο με υψηλότερη τιμή ( $J_r/J_a$ ) έχει λιγότερο ευνοϊκό προσανατολισμό, τότε το πλέον δυσμενές από πλευράς προσανατολισμού θα πρέπει να εφαρμοστεί στον υπολογισμό του Q. Η τιμή γενικά του λόγου ( $J_r/J_a$ ) πρέπει να έχει άμεση σχέση με την παρουσία της πιο δυσμενούς επιφάνειας όπου αναμένεται έναρξη της πιθανής αστοχίας.

4. Η εκτίμηση του συντελεστή απομείωσης τάσεων (SRF) είναι καθοριστικής σημασίας στην εφαρμογή της ταξινόμησης. Όταν η βραχώμαζα περιέχει άργιλο η αντοχή του βραχώδους υλικού δεν έχει καμία πρακτική σημασία. Στις περιπτώσεις που έχουμε συμπαγές πέτρωμα, η αντοχή του βραχώδους υλικού έχει σημαντική πρακτική σημασία και η ευστάθεια εξαρτάται από τον λόγο των επιτόπου τάσεων προς την αντοχή του βραχώδους υλικού. Η περίπτωση ύπαρξης ανισότροπου τασικού πεδίου είναι δυσμενής στην ευστάθεια του έργου και ο συντελεστής SRF εκτιμάται προσεγγιστικά σύμφωνα με τις αντίστοιχες σημειώσεις του πίνακα 1.7. Λόγω της σχετικά περιορισμένης υπάρχουσας εμπειρίας, σε περιπτώσεις που το βάθος της σήραγγας είναι μικρότερο από το ανυποστήρικτο τμήμα αυτής, προτείνεται μια αύξηση της τιμής του SRF από 2.5 σε 5.

5. Ο προσδιορισμός της αντοχής σε ανεμπόδιστη (μοναξονική) θλίψη και της εφελκυστικής αντοχής ( $\sigma_c$  και  $\sigma_t$ ) του βραχώδους υλικού πρέπει να γίνεται στις αναμενόμενες επιτόπου συνθήκες του έργου, κυρίως από πλευράς υγρασίας ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται αρκετά συντηρητικές τιμές σε περιπτώσεις πετρωμάτων που υφίστανται χαλάρωση.

#### 1.2.4. Δείκτες ποιότητας - αντοχής

A)Μια παράμετρος η οποία προτάθηκε από το Deere (1967) είναι ο δείκτης ποιότητας του βράχου RQD. Τον προσδιορίζουμε από τους πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και είναι ίσος με το λόγο του συνολικού μήκους εκείνων των πυρήνων οι οποίοι έχουν μήκος μεγαλύτερο από 10cm προς το μήκος που διατρήθηκε. Ο δείκτης RQD εκφράζεται ποσοστιαία [%].

Ο δείκτης ποιότητας RQD χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση του βράχου και βρίσκει εφαρμογή κυρίως στις υπόγειες κατασκευές.

Για περιοχές στις οποίες δεν έχουν γίνει δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, ο Palmstrom (1975) πρότεινε μία σχέση με την οποία την τιμή του RQD την προσδιορίζουμε από τις ασυνέχειες οι οποίες μετρούνται σε εμφανίσεις του βράχου, εμφανίσεις στην ελεύθερη επιφάνεια της γης, στα τοιχώματα σπηραγγών, στις όψεις ερευνητικών σκαμμάτων:

$$RQD=115-3.3J_v$$

Όπου  $J_v$  είναι το άθροισμα του αριθμού των διακλάσεων όλων των οικογενειών των διακλάσεων ανά τρέχον μέτρο μήκους.

B)Ο δείκτης αστοχίας R (strength factor), αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο εκείνης της περιοχής η οποία είναι καθοριστική για την ευστάθεια της κατασκευής. Εκείνης δηλαδή της περιοχής μέσα στην οποία θα αναπτυχθούν οι επιφάνειες ολίσθησης στην οριακή κατάσταση (κρίσιμη περιοχή). Παραδείγματος χάριν, για ένα θεμέλιο, η κρίσιμη περιοχή είναι ο χώρος που εκτείνεται κάτω και πλευρικά από το θεμέλιο, μέχρι μια απόσταση ίση περίπου με το διπλάσιο ή το τριπλάσιο του θεμελίου, ενώ για μια σήραγγα η κρίσιμη περιοχή εκτείνεται σε μια απόσταση ίση περίπου με την τριπλάσια έως την πενταπλάσια ακτίνα της σήραγγας.

> Ο δείκτης αντοχής είναι ο λόγος της διατμητικής αντοχής  $t_r$  που υπάρχει σε επίπεδα διαφορετικών διευθύνσεων που διέρχονται από ένα σημείο της κρίσιμης διατομής προς τη διατμητική τάση  $\tau$  που ασκείται στα επίπεδα αυτά:

Προσδιορίζοντας τις τιμές του R σε ικανό αριθμό σημείων της κρίσιμης διατομής και σε επίπεδα περισσότερων διαφορετικών διευθύνσεων που διέρχονται από τα σημεία αυτά, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ισοβαρείς του δείκτη αντοχής, δηλαδή τις καμπύλες που συνδέουν τα σημεία που έχουν ίδια τιμή R και να οριοθετήσουμε τις ζώνες στις οποίες  $R \leq 1$ , δηλαδή τις ζώνες αστοχίας για κάθε οικογένεια ασυνεχειών. Η ανάλυση με τον τρόπο αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να προσεγγίσουμε την πιθανή τροχιά ολίσθησης και το φορτίο το οποίο θα προκαλέσει τη θραύση (οριακό φορτίο).

Η αδυναμία της μεθόδου είναι ότι ο προσδιορισμός των τάσεων  $\tau, \sigma$  και συνεπώς και του δείκτη R ( $R=t_r/\tau=(\sigma*t_r*g*\phi_r+c_r)/\tau$ ) στηρίζεται στη θεωρία της ελαστικότητας. Προσδιορίζονται δηλαδή οι ελαστικές τάσεις αντί για τις πλαστικές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το συμβιβαστό τάσεων-αντοχής και η μεταφορά της πλεονάζουσας τάσης, δηλαδή εκείνου του μέρους της διατμητικής τάσης που ξεπερνάει τη διατμητική αντοχή, σε άλλες θέσεις με ενδεχόμενο να υπάρξει συσσώρευση τάσεων σε ορισμένες περιοχές και φαινόμενα προοδευτικής θραύσης.

#### 1.2.5. Σχέση – σύγκριση των συστημάτων RMR και Q

Τα δύο συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας RMR και Q παρουσιάζονται σήμερα σαν τα πλέον ολοκληρωμένα και αξιόπιστα. Εκτός από τον αρκετά σημαντικό αριθμό πραγματικών περιστατικών πάνω στα οποία βασίστηκαν οι συγγραφείς τους για να τα αναθέσουν, έχουν δοκιμαστεί και δοκιμάζονται συνέχεια σε μεγάλο πλήθος άλλων πραγματικών περιπτώσεων

τεχνικών έργων (κυρίως σιηράγγων) σε διεθνές αλλά και Ελληνικό επίπεδο, ώστε να γίνουν τελικά αποδεκτά.

Γενικά, οι προβλέψεις και εκτιμήσεις που γίνονται με τη χρήση των συστημάτων αυτών, έχουν αποδειχτεί αρκετά ρεαλιστικές και αυτά αποτελούν πλέον ένα αναπόσπαστο μέρος της γεωλογικής – τεχνικογεωλογικής μελέτης στα πλαίσια της κατασκευής τεχνικών έργων (κυρίως σιηράγγων) σε βραχώδεις σχηματισμούς, καθώς δίνουν πολύ χρήσιμες κατευθύνσεις πρόβλεψης. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται από τις πραγματικές συνθήκες είναι σχετικά μικρές και εντοπίζονται συνήθως στα χαρακτηριστικά του τρόπου υποστήριξης των σιηράγγων.

Από συγκριτικές μελέτες που κατά καιρούς έγιναν στην Ευρώπη, Αμερική, Αυστραλία και Ν. Αφρική, έχουν προκύψει διάφορες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των βαθμονομήσεων των δύο συστημάτων ταξινόμησης, που πρακτικά δεν διαφέρουν σημαντικό μεταξύ τους, με πλέον αντιπροσωπευτικές τις παρακάτω:

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44 \text{ (BIENIAWSKI 1976)}$$

$$\text{RMR} = 13.5 \log_{10} Q + 43 \text{ (RUTLEDGE and PRESTON 1978)}$$

$$\text{RMR} = 15 \log_{10} Q + 50 \text{ (BARTON 1998)}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο για λόγους «επαλήθευσης» των αποτελεσμάτων εφαρμογής των δύο ταξινομήσεων σε μία συγκεκριμένη θέση, καθώς είναι γενικός κανόνας ότι δεν πρέπει με κανέναν τρόπο να υπολογίζεται ο ένας δείκτης από τον άλλον.

Το σύστημα RMR έχει σαν βασικά πλεονεκτήματα ότι είναι σχετικά εύκολο και απλό στη χρήση του και επί πλέον μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο σε σιηραγγες αλλά επίσης σε πρηνή και θεμελιώσεις, καθώςον μάλιστα οδηγεί σε εκτιμήσεις παραμέτρων διατμητικής αντοχής της βραχομάζας (συνοχή  $c$  και γωνία τριβής  $\phi$ ).

Το σύστημα Q αποδεικνύεται στην πράξη περισσότερο ρεαλιστικό και οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται σε σχέση με την πραγματικότητα είναι μικρές και βρίσκονται στη συντηρητική πλευρά των εκτιμήσεων. Η αξιοπιστία του είναι σημαντική και στις πτωχής ποιότητας βραχομάζες και λαμβάνει υπόψη του όλες τις εντατικές καταστάσεις της βραχομάζας, τις περιβάλλουσες τάσεις, τις διογκώσεις κ.λπ. με τις παραμέτρους  $J_w$  και SRF. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό της σιηραγγας σε σχέση πάντα με τον προσανατολισμό των δομικών ασυνεχειών της βραχομάζας. Η βαρύτητα του παράγοντα αυτού είναι φανερή στην ευστάθεια του έργου σε περίπτωση βέβαια που οι ασυνέχειες έχουν σαφείς προσανατολισμούς και είναι συνεχής η ανάπτυξή τους.

Η εμπειρία από την εφαρμογή του συστήματος Q στον Ελληνικό χώρο έχει δείξει ότι οι εκτιμήσεις του είναι βέβαια συντηρητικές αλλά πολύ κοντά στις αναμενόμενες συνθήκες (MAPINOS 1979, ΣΟΦΙΑΝΟΣ και MAPINOS 1990, KALTEZIOTIS, TSIAMBAOW and SABATAKAKIS 1987). Από την εφαρμογή του συστήματος RMR στον Ελληνικό χώρο, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1.3.4 έχει φανεί ότι οι εκτιμήσεις του είναι γενικά αρκετά συντηρητικές, με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της ποιότητας της βραχομάζας και συνεπώς τον υπερσχεδιασμό του τεχνικού έργου με μειωμένη γενικά αξιοπιστία στις χαμηλής ποιότητας βραχομάζες.

Στον Πίνακα 1.6. δίνονται συγκεντρωτικά τα κύρια χαρακτηριστικά που έχουν σχέση με την εφαρμοσιμότητα των δύο συγκεκριμένων συστημάτων ταξινόμησης, όπως αυτό προκύπτει από την υπάρχουσα εμπειρία εφαρμογής τους.

**Πίνακας 1.6.** Συγκριτική θεώρηση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q

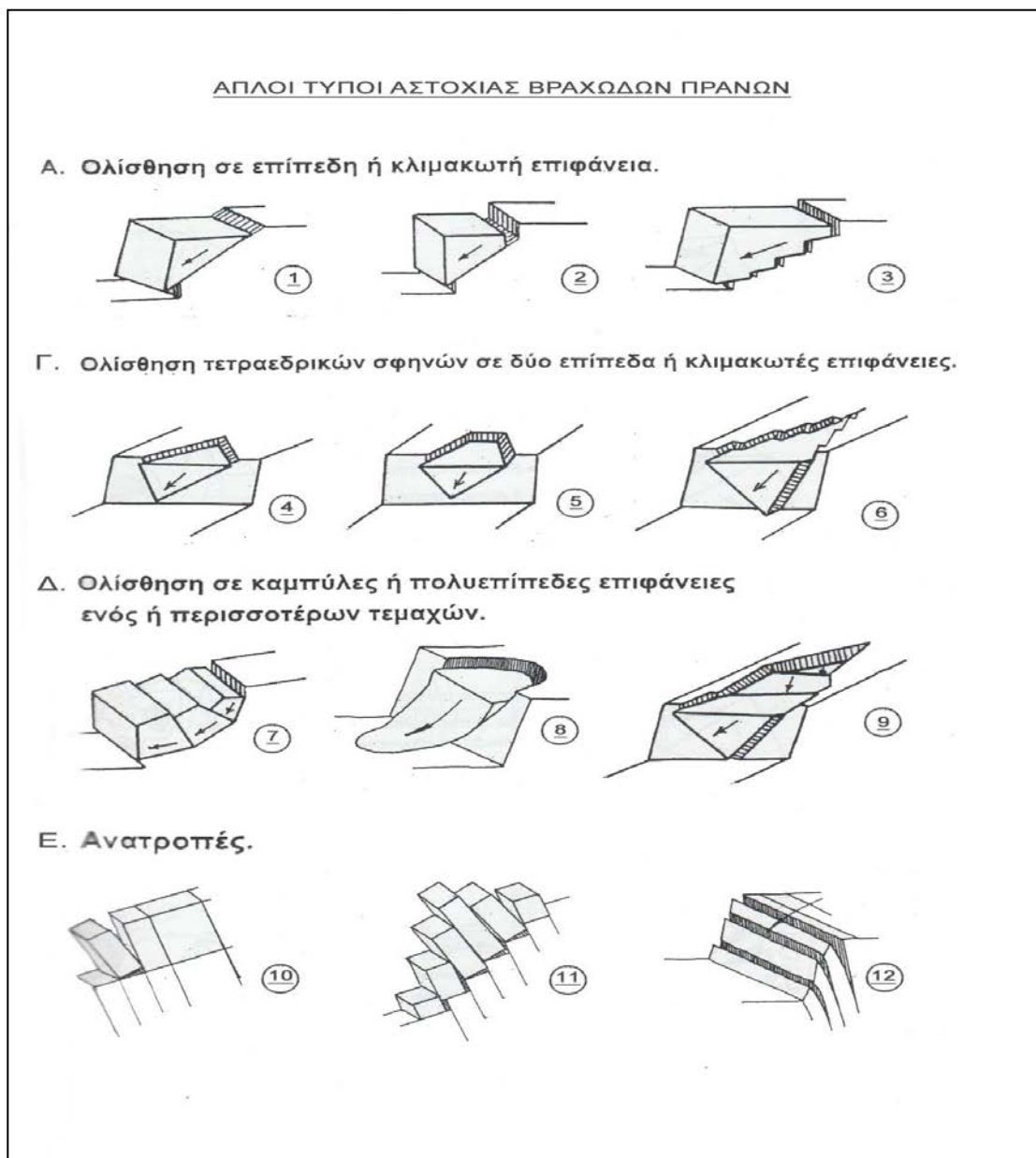
Σύστημα RMR	Σύστημα Q
Απλό στη χρήση του χωρίς να απαιτεί σημαντική εμπειρία του χρήστη	Σύνθετο στη χρήση του και απαιτεί σημαντική εμπειρία του χρήστη
Δυνατότητα εφαρμογής σε όλα τα τεχνικά έργα (πρανή – θεμελιώσεις – σήραγγες)	Δυνατότητα εφαρμογής μόνο σε υπόγεια τεχνικά έργα καλύπτοντας όμως όλο το 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 ( $J_r/J_a$ ) 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 αντανάκλα και τις διαφορετικές «φιλοσοφίες αντιστήριξης» μεταξύ των δύο συστημάτων (Νότια Αφρική και Σκανδιναβία)	

Γενικά πάντως φαίνεται στην πράξη ότι το σύστημα RMR είναι σαφώς περισσότερο διαδεδομένο και σε αυτό συντείνει το γεγονός ότι το Q παρουσιάζεται πιο σύνθετο στη βαθμονόμηση των επιμέρους κριτηρίων – παραμέτρων ταξινόμησης. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει επιδράσει σημαντικά και η επιθυμητή γρήγορη εφαρμογή της ταξινόμησης στην πράξη, π.χ. στην περίπτωση ταξινόμησης των διαδοχικών μετώπων εκσκαφής της βραχομάζας στα πλαίσια της κατασκευής υπόγειων έργων, η οποία αποτελεί στην πραγματικότητα ένα συμβατικό τρόπο κοστολόγησης και αποπληρωμής του έργου. Για να έχουμε τα δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα και τις πλέον αξιόπιστες εκτιμήσεις σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, είναι κοινή διαπίστωση ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται και τα δυο αυτά συστήματα μαζί και να συναξιολογούνται τα αποτελέσματά τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ – ΑΣΤΟΧΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

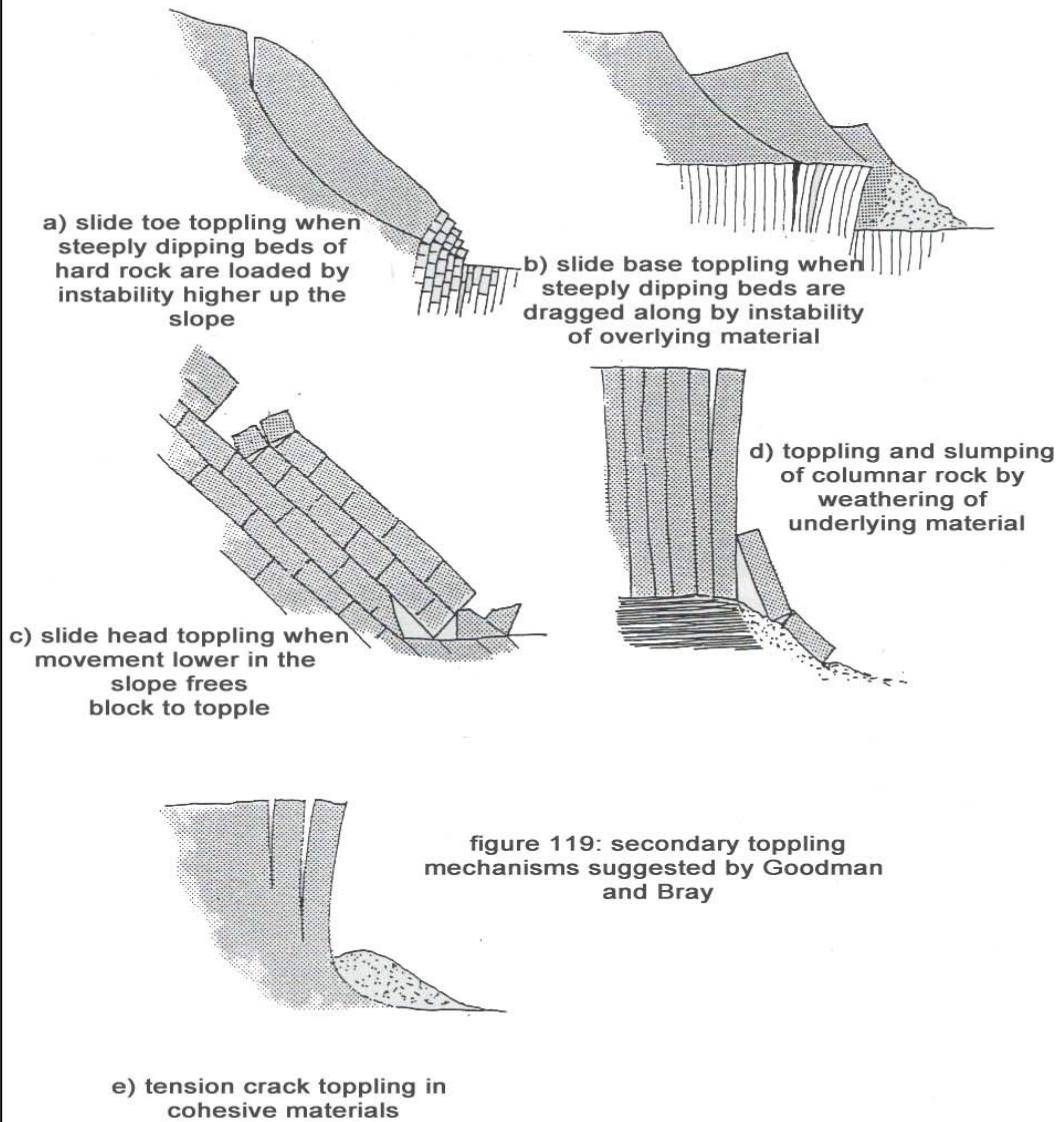
### 2.1. Βραχώδη πρηνή

Κατά την προσέγγιση της ευστάθειας των βραχωδών πρανών ο γεωλογικός παράγοντας παίζει σημαντικό ρόλο καθώς οι επιμέρους παράμετροι μηχανικής περιγραφής των ασυνεχειών πρέπει να προσδιοριστούν επακριβώς, ώστε να εκτιμηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο της δομής της βραχώμαζας. Ανάλογα με το μοντέλο αυτό και τις επιτόπου συνθήκες, εκτιμώνται οι αναμενόμενες αστοχίες και γίνεται ανάλυση της ευστάθειας με τις μεθόδους της οριακής ισορροπίας, κατά μήκος συγκεκριμένων πλέον επιφανειών ολίσθησης χρησιμοποιώντας και τις αντίστοιχες κατά περίπτωση παραμέτρους διατμητικής αντοχής (δηλαδή των επιπέδων ασυνεχειών ή της βραχώμαζας). Παρακάτω παρουσιάζονται με τη βοήθεια των σχημάτων 2.1 και 2.2. απλές αλλά και σύνθετες αστοχίες σε βραχώδη πρηνή.



Σχήμα 2.1. Απλοί τύποι αστοχίας βραχωδών πρανών

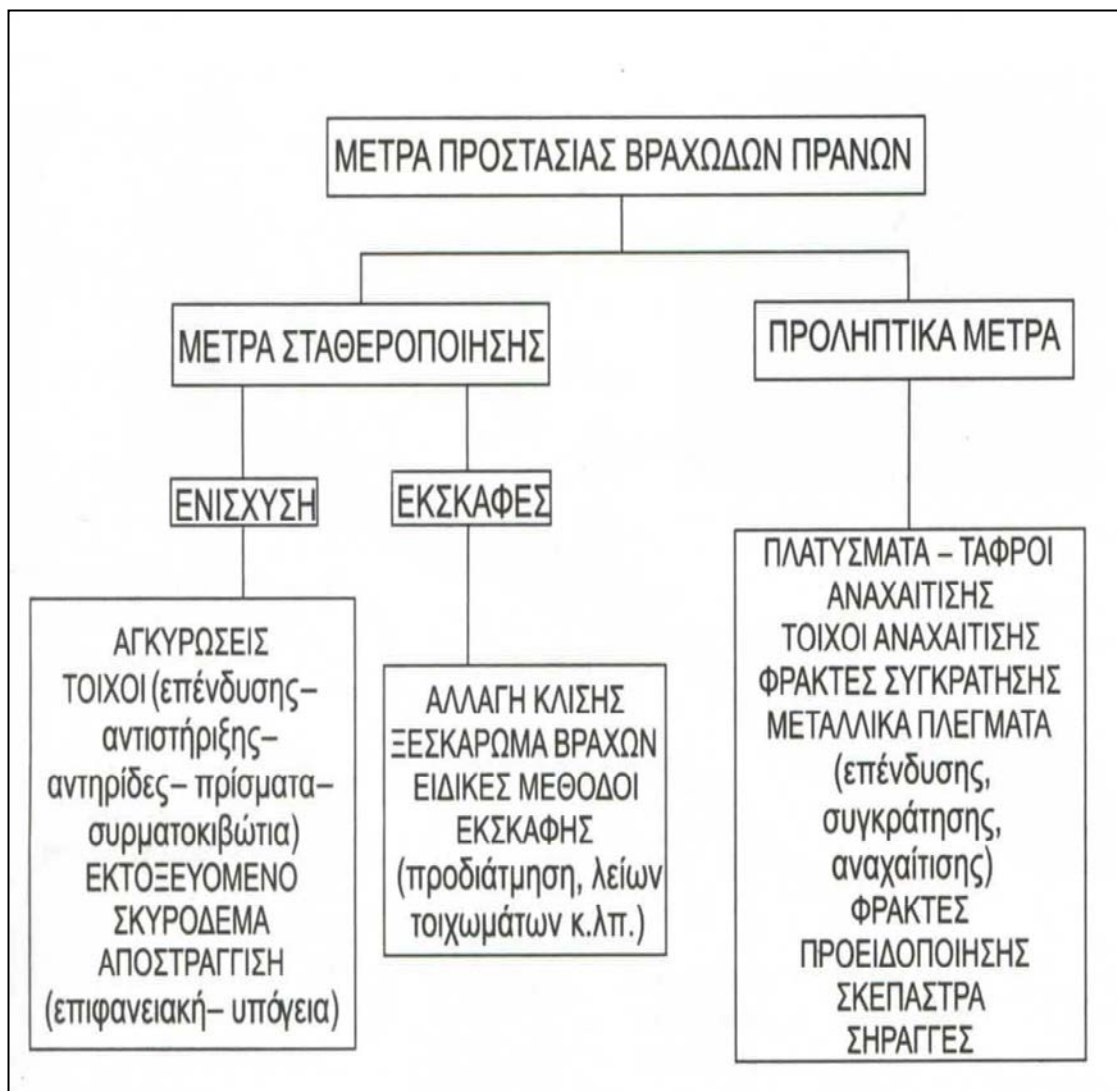
## ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ



Σχήμα 2.2. Σύνθετες αστοχίες

## 2.2. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ

Ο βασικός διαχωρισμός των μέτρων προστασίας στα βραχώδη πρανή έχει σχέση στο χρονικό παράγοντα που αυτά υλοποιούνται δηλαδή πριν ή μετά την εκδήλωση του φαινομένου ( προληπτικά μέτρα και μέτρα αποκατάστασης και σταθεροποίησης). Στην περίπτωση των βραχωδών πρανών υπάρχει ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ προληπτικών και σταθεροποιητικών μέτρων, καθόσον λόγω του είδους των συνηθέστερων αστοχιών (π.χ. καταπτώσεις βράχων) τα προληπτικά μέτρα αποτελούν τη βασική πρακτική εφαρμογής. Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι κατηγορίες των μέτρων προστασίας των βραχωδών πρανών.

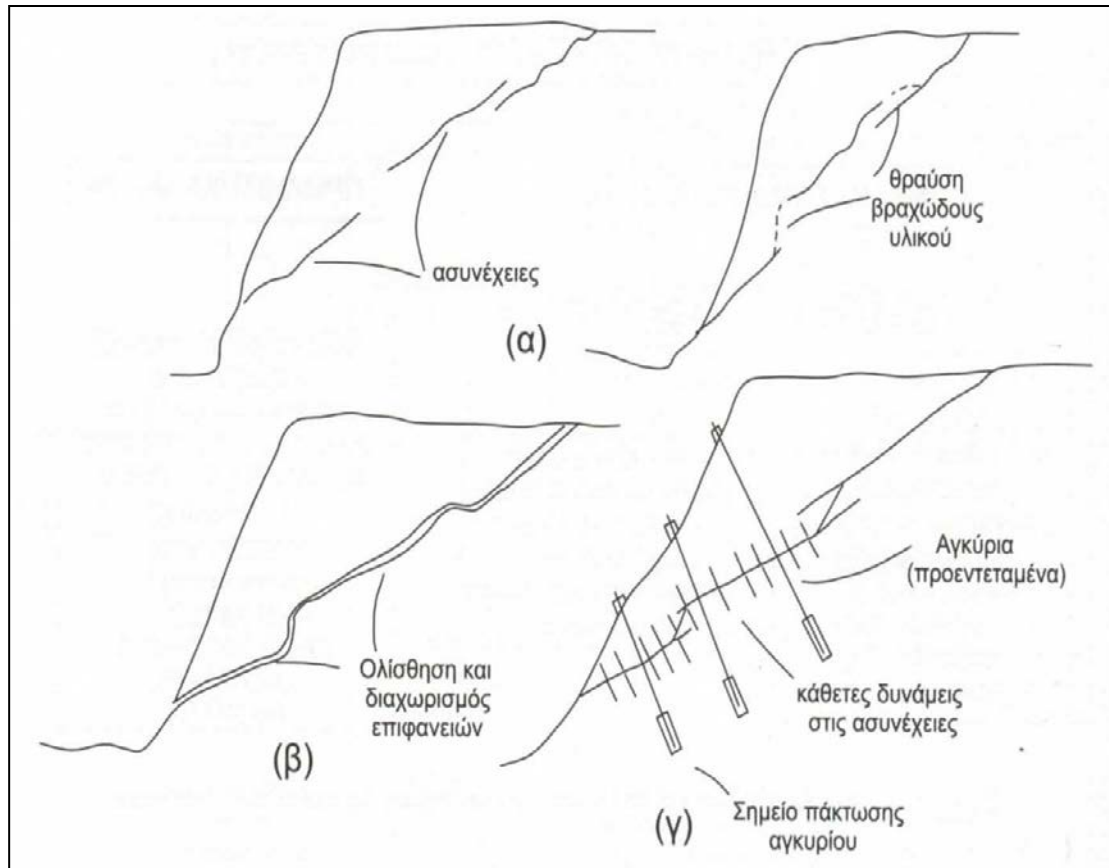


Σχήμα 2.3. Κατηγορίες μέτρων προστασίας βραχωδών πρανών

### ΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αγκυρώσεις. Οι αγκυρώσεις συμβάλουν γενικά στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας κυρίως με την αύξηση των κάθετων δυνάμεων που επενεργούν στις κρίσιμες επιφάνειες αδυναμίας (ασυνέχειες) (Σχήμα 2.4). Χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση τόσο των βραχωδών όσο και εδαφικών πρανών και διέπονται από τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας τους.





**Σχήμα 2.4.** Πιθανός μηχανισμός θραύσης σε βραχώδες πρανές: (α) οι ασυνέχειες μπορεί να συνδεθούν μεταξύ τους μετά από θραύση του βραχώδους υλικού (β) διαμορφώνεται μια συνεχής επιφάνεια θραύσης (γ) η τοποθέτηση αγκυρίων αυξάνει τις κάθετες δυνάμεις που ενεργούν στην επιφάνεια θραύσης και επιφέρουν έτσι σημαντική αντίσταση στην ολίσθηση

Τα αγκύρια έχουν μήκος από 5 μέχρι 50 m και μεταβιβάζουν δυνάμεις από 150 μέχρι 2500 KN, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσουν μέχρι 10000 KN, ενώ εφαρμόζονται τόσο σε βραχώδεις όσο και σε εδαφικούς σχηματισμούς. Τα μικρού μήκους αγκύρια ονομάζονται κοχλίες ή μπουλόνια, έχουν μήκος 1.50 μέχρι 6 m και χρησιμοποιούνται μόνο σε πετρώματα για την υποστήριξη κυρίως υπόγειων έργων.

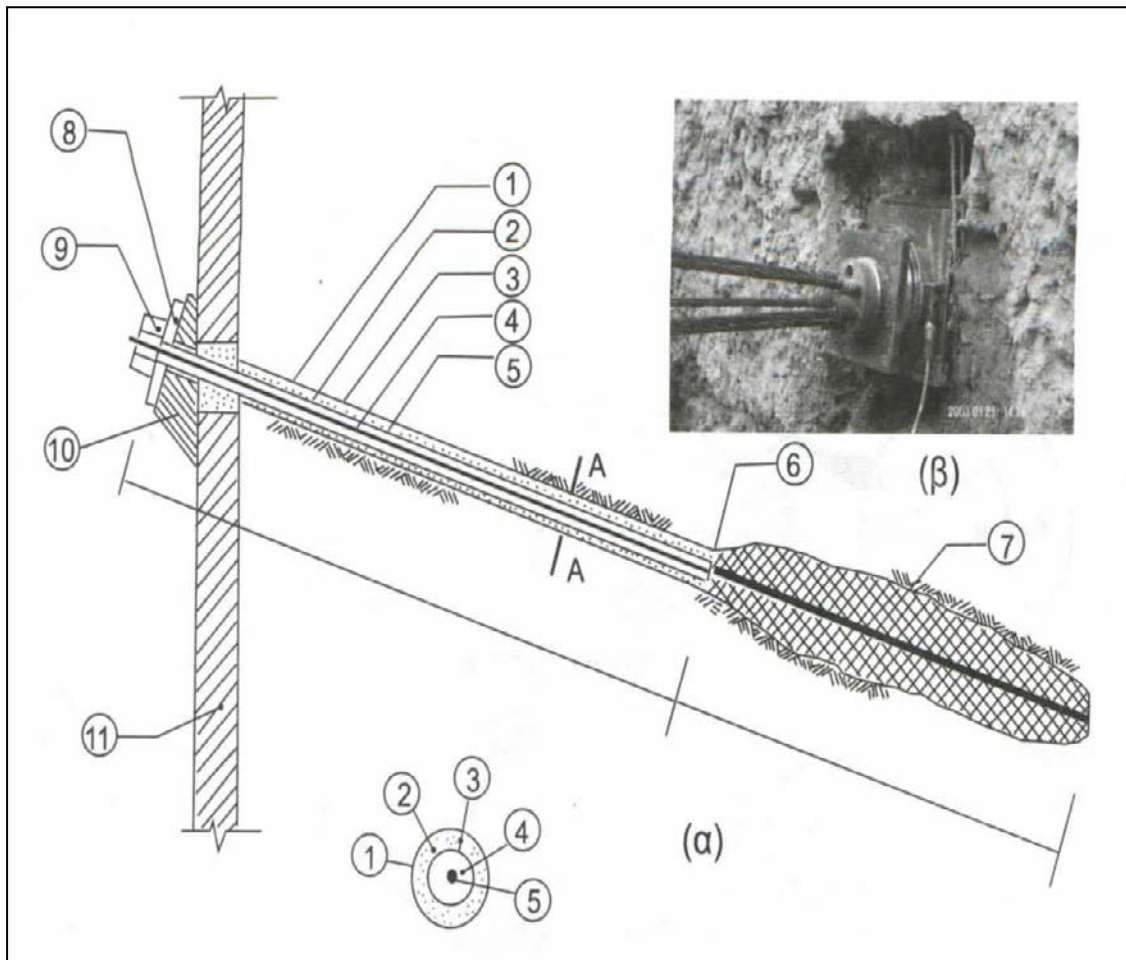
Τα αγκύρια και τα μπουλόνια, ανάλογα με τη διάρκεια ζωής τους διακρίνονται σε α) προσωρινά (διάρκεια ζωής ενάμισι με δυο χρόνια μέχρι να κατασκευαστεί η μόνιμη επένδυση κυρίως στις σήραγγες) και β) μόνιμα (διάρκεια ζωής όσο και ο χρόνος λειτουργίας του έργου). Από πλευράς στατικής λειτουργίας καθώς επίσης και του ρόλου στο Σχήμα 2.5α τους στην εντατική κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου (βραχώμαζα ή έδαφος) διακρίνονται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

α) ενεργά ή προεντεταμένα, που προεντείνονται στην τελική φάση κατασκευής τους και επιβάλουν μια καινούργια δύναμη που συμβάλει στη σταθεροποίηση. (Σχημα 2.5β)

β) παθητικά, που δεν παραλαμβάνουν καμία δύναμη με την εγκατάστασή τους αλλά ενεργοποιούνται όταν αρχίσει η παραμόρφωση.

Το αγκύριο είναι ένας τένοντας που μεταφέρει εφελκυστική δύναμη από την επιφάνεια μέσα στην μάζα του εδαφικού ή βραχώδους σχηματισμού. Τα βασικά στοιχεία του φαίνονται ενδεικτικά. Στα εδαφικά πρανά τα αγκύρια είναι προεντεταμένα και συνήθως εφαρμόζονται

για την ενίσχυση τοίχων αντιστήριξης και πετασμάτων. Αντίθετα, στα βραχώδη μπορεί να είναι αγκύρια προεντεταμένα ή παθητικά ή ακόμα και κοχλίες ή μπουλόνια επίσης προεντεταμένα ή παθητικά.

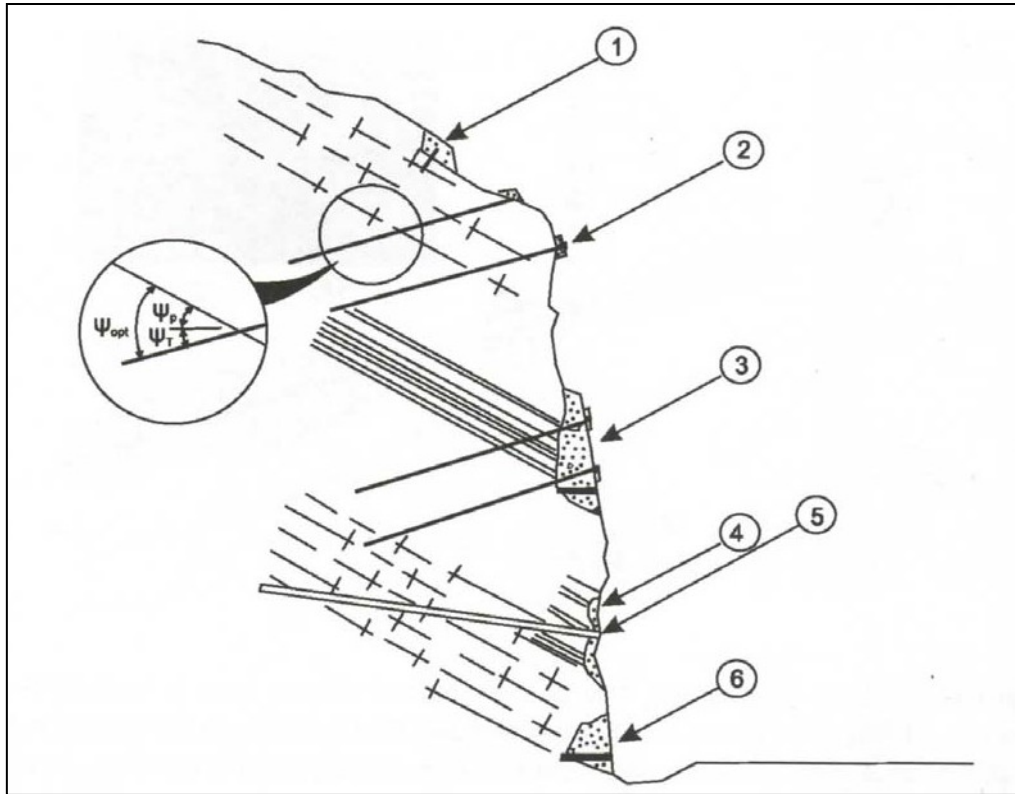


**Σχήμα 2.5.** (α) Σχηματική διάταξη αγκυρίου σε χαλαρό έδαφος, (1) διάτρημα, (2) τσιμεντένεμα, (3) προστατευτικό περίβλημα, (4) αντιδιαβρωτική προστασία, (5) τένοντας, (6) πώμα, (7) ένεμα στην περιοχή πάκτωσης, (8) μεταλλική πλάκα έδρασης της κεφαλής, (9) κεφαλή στερέωσης (κόνος ή μπουλόνι), (10) τριγωνικό υπόθεμα, σφήνα, (11) τοίχωμα παρειάς (π.χ. μετόν). (β) κεφαλή προεντεταμένου αγκυρίου

Τοίχοι: Στα βραχώδη πρανή χρησιμοποιούνται οι τοίχοι επένδυσης (tieback walls), που έχουν σαν βασικό σκοπό την επένδυση της βάσης ή άλλου τμήματος του πρανούς που αποτελείται από χαμηλής ανθεκτικότητας βραχώδη υλικά, η χαλάρωση των οποίων μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα αστάθειας (καταπτώσεις). Οι τοίχοι αυτοί είναι συνήθως οπλισμένοι, φέρουν οπές αποστράγγισης και συχνά ενισχύονται με προεντεταμένες αγκυρώσεις. Με τον τρόπο αυτό επέρχεται καλύτερη κατανομή των εφελκυστικών τάσεων των αγκυρώσεων μέσω του τοίχου στην χαμηλής ποιότητας βραχομάζα (Σχήμα 2.6).

Επίσης χρησιμοποιούνται πρίσματα και αντιρίδες από οπλισμένο σκυρόδεμα σε περιπτώσεις που απαιτείται αντιστήριξη επικρεμαμένου τμήματος της βραχομάζας, το οποίο δεν μπορεί

να απομακρυνθεί με εκσκαφές λόγω απότομης μορφολογίας. Μία συνοπτική παρουσίαση των μέτρων αντιστήριξης σε βραχώδη πρανή δίνεται στο Σχήμα 2.6.



**Σχήμα 2.6.** Μέθοδοι ενίσχυσης βραχώδους πρανού: (1) σκυρόδεμα ενισχυμένο με κοχλίες για την προστασία της χαλάρωσης της κορυφής του μετώπου, (2) προεντεταμένα αγκύρια για την διασφάλιση επίπεδων ολισθήσεων στο κορυφαίο τμήμα του μετώπου, (3) τοίχος επένδυσης για την προστασία ολίσθησης στην ασταθή ζώνη του ρήγματος, (4) εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την συγκράτηση ζώνης έντονα διακλασμένου πετρώματος, (5) οριζόντιο στραγγιστήριο για την μείωση των υδροστατικών πιέσεων στη βραχώμαζα, (6) αντηρίδα από σκυρόδεμα για την αντιστήριξη του πετρώματος σε έγκοιλο

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete): Είναι είδος σκυροδέματος που αποτελείται από μείγμα τσιμέντου, άμμου και λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού με νερό, που εκτοξεύεται από ειδική αντλία με μεγάλη ταχύτητα και υπό πίεση και με τον τρόπο αυτόν εφαρμόζεται και προσκολλάται στο βραχώδες πρανές. Συμβάλλει στην ενίσχυση του πρανού και στην προστασία του από τους αποσθρωτικούς παράγοντες. Συχνά συνοδεύεται με τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος για μεγαλύτερη ενίσχυση.

Αποστράγγιση: Περιλαμβάνει γενικά τα αντίστοιχα έργα που απαιτούνται στην περίπτωση των εδαφικών πρανών.

### 2.3. Εκτίμηση δυνητικών ολισθήσεων

Η εκτίμηση δυνητικών ολισθήσεων αποτελεί το πρώτο βήμα των αναλύσεων ευστάθειας σε βραχώδη πρανή, καθόσον δίνει την βασική πληροφόρηση σχετικά με τις δυνατότητες εκδήλωσης κάποιας μορφής αστάθειας στο πρανές, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στα συστήματα των ασυνεχειών που διατέμνουν την βραχώμαζα. Συνεπώς, η βασική παράμετρος που υπεισέρχεται στο πρόβλημα είναι ο προσανατολισμός των επιπέδων των ασυνεχειών και η σύγκρισή του με τον αντίστοιχο προσανατολισμό του επιπέδου του πρανούς. Η αποτύπωση των επιπέδων, πρανούς και ασυνεχειών, γίνεται ως γνωστών στο στερεοδιάγραμμα Schmidt. Στο στερεοδιάγραμμα επίσης αποτυπώνεται ο κύκλος τριβής των ασυνεχειών, δηλαδή ο κύκλος που αντιπροσωπεύει την γωνία τριβής των ασυνεχειών.

Οι δυνατές περιπτώσεις που μπορούν να εκτιμηθούν με βάση το στερεοδιάγραμμα είναι οι παρακάτω:

α) Η έντονη διασπορά των πόλων των ασυνεχειών, χωρίς την ύπαρξη συγκεκριμένων συστημάτων, πιστοποιεί έντονα διακλασμένη και τεκτονισμένη βραχώμαζα. Δυνατότητα ολίσθησης κατά μήκος μιας μεικτής επιφάνειας ολίσθησης κατά προσέγγιση κυκλοειδούς μορφής.

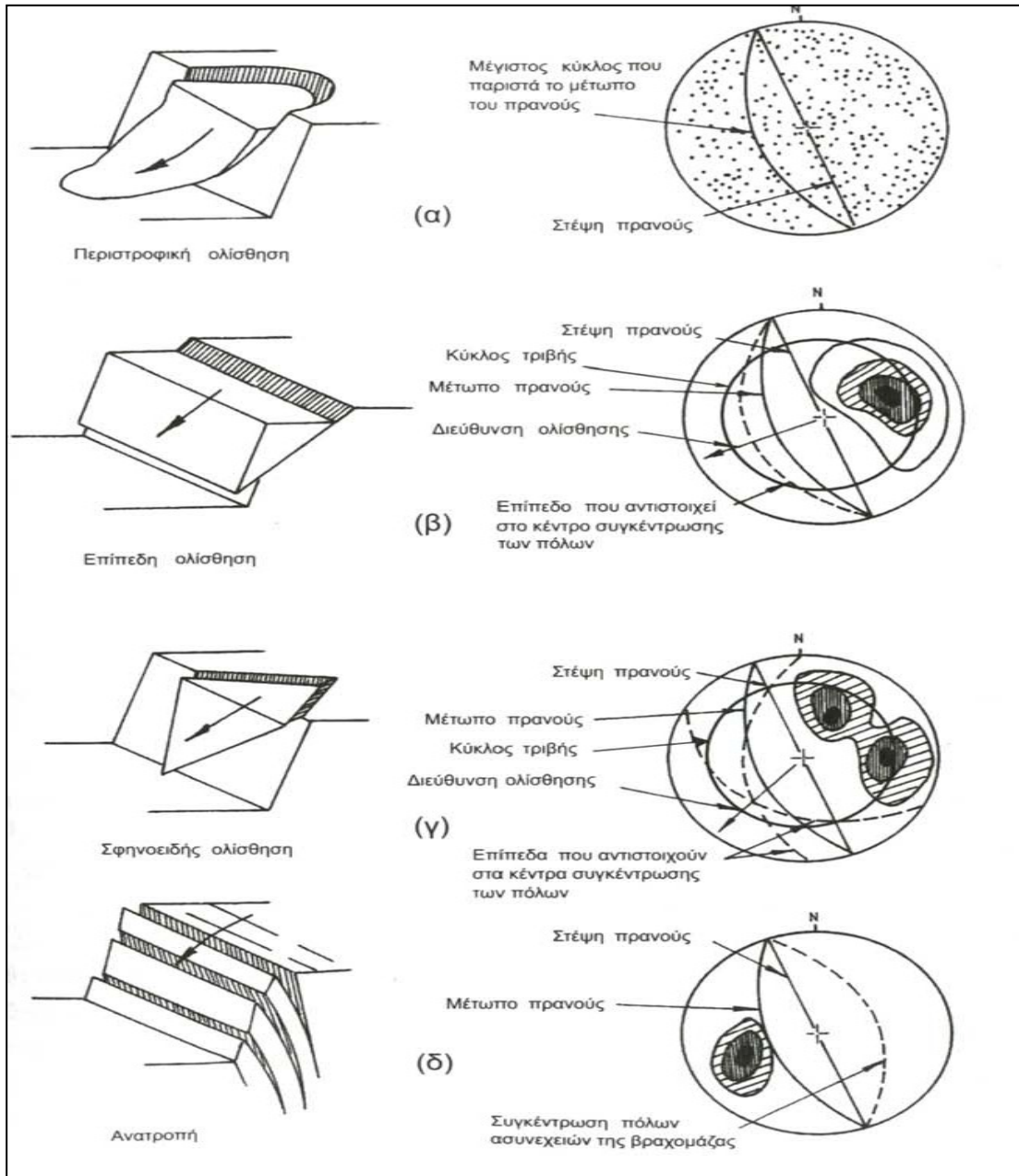
β) Η ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών (δηλαδή η συγκέντρωση των πόλων) με προσανατολισμό ίδιο με του πρανούς, συνεπάγεται δυνατότητα εκδήλωσης επίπεδης ολίσθησης κατά μήκος του συγκεκριμένου επιπέδου ασυνεχειών.

γ) Η ύπαρξη δυο συστημάτων ασυνεχειών που το σημείο τομής τους εμπίπτει στην ζώνη μεταξύ του πρανούς και του κύκλου ασυνεχειών. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται συνθήκες εκδήλωσης σφηνοειδούς ολίσθησης κατά μήκος των δύο επιπέδων.

δ) Η ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών με διεύθυνση περίπου ίδια με αυτή του πρανούς αλλά με αντίθετη φορά κλίσης που δημιουργεί συνθήκες εκδήλωσης ανατροπών.

Με την παραπάνω μεθοδολογία γίνεται μια πρώτη αναγνώριση και εκτίμηση της δυνατότητας εκδήλωσης διαφόρων τύπων ολίσθησης στα βραχώδη πρανή, λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό των ασυνεχειών που διατέμνουν την βραχώμαζα. Στην συνέχεια επιβάλλεται, όπως η δυνατότητα εκδήλωσης κάθε τύπου ολίσθησης που εκτιμήθηκε, να μελετάται περαιτέρω και να εξετάζεται με τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας των βραχωδών πρανών.

Τα πρανή σε βραχώδεις σχηματισμούς παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία αστοχιών ανάλογα με τον τύπο του υλικού και τον προσανατολισμό των γεωλογικών ασυνεχειών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένους κύριους τύπους αστοχίας: 1) Ολίσθηση σε κυκλική επιφάνεια (γεώδη πρανή ή σε κατακόρυφο βράχο), 2) Επίπεδη ολίσθηση πρίσματος, 3) Ολίσθηση σφήνας και 4) Ανατροπή



**Σχήμα 2.7.** Βασικοί τύποι ολισθήσεων βραχωδών πρηνών και αντίστοιχα διαγράμματα στατιστικής επεξεργασίας όλων ασυνεχιών- αποτύπωσης κυρίων επιπέδων(από HOEK and BRAY 1973)

#### 2.4. Συμπιεστική δύναμη του άθικτου βράχου

Η συμπιεστική δύναμη του άθικτου βράχου μπορεί εύκολα να μετρηθεί χρησιμοποιώντας είτε μια μηχανή συμπίεσης είτε έναν ελεγκτή φορτίων σημείου. Η μηχανή συμπίεσης δίνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα.

Η εκτίμηση της συμπιεστικής δύναμης με τον εξοπλισμό δοκιμής φορτίων σημείου έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εξετάζει τα μήκη του απροετοίμαστου

πυρήνα στις αξονικές και διαμετρικές κατευθύνσεις, καθώς επίσης και στα ανώμαλα κομμάτια του βράχου (ISRM, 1985). Ο εξοπλισμός είναι φορητός και μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στο πεδίο. Η αρχή της λειτουργίας είναι ότι ένα συμπιεστικό φορτίο εφαρμόζεται μέσω δύο κωνικών πλακών στερέωσης που αναγκάζει το βράχο να σπάσει στην ένωση αυτών των δύο σημείων.

Έχει βρεθεί κατά μέσον όρο ότι η συμπιεστική δύναμη είναι περίπου 20-25 φορές ο δείκτης δύναμης φορτίων σημείου. Εντούτοις, οι δοκιμές σε πολλούς διαφορετικούς τύπους βράχων δείχνουν ότι η αναλογία μπορεί να ποικίλει μεταξύ 15 και 50 φορές, ειδικά για τους ανισότροπους βράχους. Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνονται από μια σειρά συμπιεστικών δοκιμών, οι οποίες πραγματοποιούνται για να αξιολογήσουν τις δοκιμές φορτίων-σημείου.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής φορτίων-σημείου δεν είναι αποδεκτά εάν το σημείο αστοχίας βρίσκεται μερικώς κατά μήκος μιας προϋπάρχουσας ασυνέχειας στο βράχο, ή δεν είναι συμπίπτον με τη γραμμή μεταξύ των πλακών στερέωσης.

## 2.5. Διόγκωση

Τα αίτια της διόγκωσης στο βράχο μπορούν να διαιρεθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες σχετικές είτε με τις αλλαγές στους όρους πίεσης, είτε με τις χημικές αντιδράσεις (Lindner, 1976). Η επίδραση διόγκωσης στις δομές, μπορεί να είναι γενική ή διαφορική ανύψωση, καθώς επίσης και η ανάπτυξη των εξωτερικών πιέσεων στις άκαμπτες, θαμμένες δομές. Παραδείγματος χάριν, η μέτρηση των πιέσεων σε δείγμα προϊστορικής αργίλου έχει καταγράψει τις τιμές τόσο υψηλές όπως 1400 kPa (200 p.s.i.) μετά από μια περίοδο μιας ημέρας (Madsen, 1979) και οι ανυψώσεις έχουν μετρηθεί μεγαλύτερες από 100mm. Η συνηθέστερη μέθοδος οικοδόμησης θεμελίου στον διογκωμένο βράχο είναι η χρήση των σωρών που επεκτείνονται κάτω από το βάθος της πιθανής διόγκωσης.

Οι σωροί πρέπει να είναι ικανοί να φέρουν οποιοσδήποτε έκτακτες δυνάμεις που αναπτύσσονται με τη διόγκωση του εδάφους μέσω του οποίου περνούν. Επίσης μεγάλης σπουδαιότητας στο σχέδιο είναι η σύνδεση όλων των υποστηριγμένων εξαρτημάτων του εδάφους όπως οι σήραγγες και οι αυτοκινητόδρομοι που θα υποβληθούν στη σχετική μετακίνηση όσον αφορά την υποστηριγμένη σωρό.

Για την ανακούφιση της πίεσης υπάρχουν δύο κοινές αιτίες στα θεμέλια του βράχου. Κατ' αρχάς, οι αλλαγές στους όρους υπόγειου νερού, που μπορεί να προκληθεί με την πλήρωση μιας δεξαμενής στην περίπτωση των φραγμάτων, ή τις διακυμάνσεις στα επίπεδα ποταμών στην περίπτωση των γεφυρών, μπορούν να οδηγήσουν στην εσωτερική ανισορροπία και διογκώνονται. Δεύτερον, η μείωση των εξωτερικών δυνάμεων ως αποτέλεσμα της παραγωγής μιας βαθιάς ανασκαφής, παραδείγματος χάριν, μπορεί να προκαλέσει ανύψωση.

Η διόγκωση λόγω της μείωσης των εσωτερικών δυνάμεων στον άθικτο βράχο μπορεί να εμφανιστεί στους τύπους βράχου όπως οι σχιστόλιθοι και οι αδύναμα τσιμενταρισμένοι ψαμμίτες. Αυτοί οι βράχοι μπορούν να υποβληθούν στις μεγάλες ογκομετρικές αυξήσεις επάνω στην προσθήκη του ύδατος σε μια διαδικασία που είναι ανεξάρτητη από τη χημική αντίδραση τέτοιας διόγκωσης. Όλο αυτό το φαινόμενο επηρεάζεται από την παρουσία ή την απουσία ύδατος. Μια άλλη επιρροή στη διόγκωση, είναι το τσιμεντάρισμα του βράχου και της δυνατότητάς του να αντισταθεί στην τάση για τα μόρια που χωρίζουν επάνω στην επαφή με το ύδωρ.

Η ανύψωση μπορεί επίσης να εμφανιστεί ως αποτέλεσμα της διόγκωσης της αργίλου που περιλαμβάνεται στις ασυνέχειες.

Η δυνατότητα για τη διόγκωση μπορεί να αφορά τα όρια Atterburg και τη περιεκτικότητα του δείγματος σε άργιλο. Όταν ο δείκτης πλαστικότητας και η περιεκτικότητα σε άργιλο του δείγματος υπερβαίνουν το 20-30%, η δυνατότητα για τη διόγκωση μπορεί να είναι υψηλή

(Holtz και Gibbs, 1956 Merwe, 1964). Η δίογκωση των βράχων μπορεί επίσης να είναι αποτέλεσμα της ανακούφισης της πίεσης που λαμβάνει τη μορφή της παραμόρφωσης του βράχου στην αφαίρεση της πίεσης περιορισμού.

(β) Η δίογκωση σχετίζεται και μπορεί να προκύψει από τις χημικές αντιδράσεις όπως η υδάτωση, η οξειδωση ή η υγρασία που δημιουργούν τα υποπροϊόντα που καταλαμβάνουν έναν μεγαλύτερο όγκο από τα αρχικά υλικά. Παραδείγματος χάριν, η προσθήκη του ύδατος σε μερικούς τύπους σουλφιδίων μπορεί να προκαλέσει τις πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και τις πιέσεις (Dougherty και Barsotti, 1972). Η υδάτωση προκαλεί μετατροπή του ανυδρίτη ( $\text{CaSO}_4$ ) στο γύψο ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) που εμφανίζεται με μια επέκταση στον όγκο που μπορεί να πραγματοποιηθεί βίαια (Brune, 1967).

## 2.6. Κόπωση

Τα θεμέλια των μηχανημάτων μπορούν να συμβάλουν στην αστοχία του φέροντος βράχου και ποικίλουν με το χρόνο. Τέτοια αστοχία θα μπορούσε να λάβει τη μορφή σπασίματος του άρηκτου βράχου και χαλάρωσης του σπασμένου βράχου λόγω της συντριβής των σημείων της επαφής μεταξύ των φραγμών του βράχου.

Τα αποτελέσματα των κυκλικών δοκιμών φόρτισης στα κομμάτια του άθικτου βράχου στο εργαστήριο δείχνουν ότι το όριο κόπωσης του βράχου μπορεί να είναι στη σειρά 10.000.100.000 κύκλοι. Η πίεση στην αποτυχία υπό αυτόν τον όρο φόρτισης είναι περίπου 80% της στατικής δύναμης για τη συμπιεστική φόρτιση και περίπου 60% της στατικής δύναμης για την εκτατή φόρτιση. Η δύναμη κόπωσης του βράχου έχει μελετηθεί μόνο σε μια περιορισμένη έκταση και τα επιτευχθέντα αποτελέσματα είναι κάπως αντιφατικά λόγω του ευρέος φάσματος της φόρτισης και των γεωλογικών όρων που πρέπει να μελετηθούν. Οι όροι φόρτισης περιλαμβάνουν τη συχνότητα, τη διάρκεια, το μέγεθος και το σημείο δόνησης (συμπίεση μόνο, ένταση μόνο ή συμπίεση-ένταση που συνδυάζεται). Η δοκιμή έχει πραγματοποιηθεί γενικά στο εργαστήριο στα δείγματα του άθικτου βράχου για τις μελέτες τεμαχισμού, και η συμπεριφορά κόπωσης του σπασμένου βράχου είναι λιγότερο ευρέως γνωστή.

Αυτά τα αποτελέσματα είναι μόνο ενδεικτικά για τη μείωση της δύναμης που μπορεί να εμφανιστεί λόγω της φόρτισης κόπωσης, και μια συνετή διαδικασία σχεδίου θα ήταν να χρησιμοποιηθεί μια φέρουσα πίεση ίσως 25-50% της κανονικής στατικής φέρουσας πίεσης να αποτρέψει την απώλεια δύναμης με το χρόνο. Μια άλλη σημαντική εκτίμηση σχεδίου είναι η απώλεια ικανότητας της φέρουσας αντοχής στην κυκλική φόρτιση λόγω της προοδευτικής χαλάρωσης του πολύ σπασμένου βράχου.

## 2.7. Ερπυσμός

Τόσο οι συμπαγείς βράχοι όσο και οι βραχώμαζες υφίσταται ερπυσμό και χαλάρωση δηλαδή εξακολουθούν να παραμορφώνονται με σταθερό φορτίο στον χρόνο ή να μειώνουν την εντατική τους κατάσταση για σταθερή μετατόπιση.

Μια τυπική καμπύλη μετατόπισης – χρόνου για σταθερό φορτίο δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε τρεις φάσεις, α) μειωμένης μετατόπισης (ρυθμού μετατόπισης) σταθερό ρυθμό και επιταχυνόμενο. Η τρίτη φάση οδηγεί στην αστοχία. Για χαμηλά φορτία (κάτω από κάποιο όριο) το υλικό δεν φτάνει στην τρίτη φάση.

Για την προσομοίωση αυτών των μετατοπίσεων έχουν αναπτυχθεί θεωρίες γραμμικής και μη γραμμικής ιξοδοελαστικότητας. Μερικά πρότυπα (μοντέλα) της γραμμικής ιξοδοελαστικότητας φαίνονται στο επόμενο σχήμα.

## 2.8. Παράμετροι επίλυσης του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown

Το αρχικό κριτήριο θραύσης Hoek-Brown για την βραχώμαζα περιγράφεται όπως είναι γνωστό από τη σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \sqrt{\left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}}\right) + s}$$

Για  $\sigma'_3=0$  η παραπάνω σχέση περιγράφει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχώμαζας, δηλαδή:

$$\sigma'_1 = \sigma_{cm} = \sigma_c \sqrt{s}$$

επειδή και ο δείκτης RMI περιγράφει επίσης την αντοχή της βραχώμαζας σε μονοαξονική θλίψη, σημαίνει ότι:

$$\sigma_c \sqrt{s} = \sigma_c (JP) \Rightarrow s = (JP)^2$$

Σχετικά με την παράμετρο  $m_b$ , ο PALMSTROM (1996<sub>a</sub>, 1996<sub>b</sub>) προτείνει:  
Για αδιατάρακτη βραχώμαζα  $m_b = m_i (JP)^{0.64}$

Για διαταραγμένη βραχώμαζα  $m_b = m_i (JP)^{0.857}$   
Όπου η σταθερά  $m_b$  αντιπροσωπεύει την «απομειωμένη» τιμή της αντίστοιχης σταθεράς  $m_i$  η οποία αναφέρεται στο βραχώδες υλικό.





**Εικόνα 2.1.** Ενδείξεις εσωτερικού ερπυσμού σε λεπτότερα στρώματα ψαμμίτη

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΑΝΩ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**

### **3.1. Ορισμός της φέρουσας ικανότητας**

Ο ορισμός της φέρουσας ικανότητας μιας θεμελίωσης εξαρτάται από τη συμπεριφορά του βράχου στον οποίο γίνεται η θεμελίωση και ορίζεται με τους εξής τρόπους:

1. **Φέρουσα ικανότητα** ενός θεμελίου είναι το οριακό φορτίο το οποίο αν το εφαρμόσουμε μέσω του θεμελίου ο βράχος θα αστοχήσει. Η αποτυχία μπορεί να οφείλεται σε έναν από τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως για παράδειγμα σε διάτμηση ή σε διάτρηση και εκδηλώνεται με απότομη βύθιση του θεμελίου.

2. **Φέρουσα ικανότητα** ενός θεμελίου είναι εκείνο το οριακό φορτίο πέρα από το οποίο παρατηρείται ένας επιταχυνόμενος ρυθμός αύξησης των καθιζήσεων σε βράχους οι οποίοι παρουσιάζουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται πλαστικά. Για παράδειγμα ολισθηκές κινήσεις κατά μήκος των ασυνεχειών ή λόγω πλαστικοποίησης (πλαστικής διαρροής) του βράχου. Πρόκειται για έναν ορισμό ανάλογο με τον ορισμό της φέρουσας ικανότητας του έναντι συνεχούς βύθισης που γίνεται στην Εδαφομηχανική.

#### **3.1.1. Μηχανισμοί θραύσης**

Τα αίτια, η μορφή και ο μηχανισμός θραύσης μιας θεμελίωσης συνδέονται με τη γεωλογική δομή και τις ιδιότητες του βράχου που βρίσκεται στην περιοχή που επηρεάζεται από τα φορτία της κατασκευής. Σύμφωνα με το Sowers, οι κυριότερες μορφές αστοχίας μιας θεμελίωσης είναι:

- Σε μαλακούς αποσαθρωμένους βράχους, η θεμελίωση αστοχεί με τον τρόπο που αστοχεί μια θεμελίωση σε έναν εδαφικό σχηματισμό. Κάτω από το θεμέλιο αναπτύσσονται ενεργές και παθητικές σφήνες, οι οποίες μετατοπιζόμενες πλευρικά, προκαλούν την απότομη βύθιση του θεμελίου.
- Αστοχία λεπτής, άκαμπτης επιφανειακής στρώσης που βρίσκεται πάνω από πλαστικό βράχο.
- Βύθιση του θεμελίου εξαιτίας υποχωρήσεων που προκαλούνται από ολισθητικές κατά μήκος αποσαθρωμένων ασυνεχειών.
- Αστοχία εξαιτίας συμπίεσης και διάτρησης πορώδους μαλακού βράχου που βρίσκεται κάτω από άκαμπτη λεπτή στρώση βράχου.
- Θραύση αιχμηρών προεκτάσεων ανθρακικών κυρίως πετρωμάτων που παρεμβάλλονται σε ασθενέστερο σχηματισμό.
- Αστοχία πρηνούς την οποία προκαλούν τα φορτία της κατασκευής.
- Αστοχίας εξαιτίας της παρουσίας μιας ρηχής κοιλότητας.
- Βυθίσματα που προκαλούνται από τη διάλυση ασβεστολιθικών πετρωμάτων (καρστικά φαινόμενα).
- Στις παραπάνω μορφές θραύσης θα πρέπει να προστεθεί ο τρόπος με τον οποίο αστοχεί ένα θεμέλιο που εδράζεται σε βράχο στον οποίο επικρατεί ένα σύστημα ασυνεχειών. Στην οριακή κατάσταση κάτω από το θεμέλιο δημιουργείται ένα σώμα ολίσθησης το οποίο μετατοπιζόμενο πλευρικά του θεμελίου και προς τα πάνω οδηγεί στη απότομη βύθιση του θεμελίου. Η μορφή αυτή θραύσης παρατηρείται σε βράχους οι οποίοι εμφανίζουν ένα δυσμενές σύστημα ασυνεχειών. Η υπέρβαση της αντοχής τριβής στις ασυνέχειες προκαλεί τη μετατόπιση σφηνών οι οποίες κατά κύριο λόγο μορφώνονται από συνδυασμό των ήδη υπάρχοντων ασυνεχειών. Όταν το σύστημα των ασυνεχειών είναι πιο ευνοϊκό στη μόρφωση του σώματος ολίσθησης αντιστέκονται και συμπαγή τμήματα του βράχου. Η φέρουσα ικανότητα είναι αυξημένη. Σε συμπαγείς βράχους υψηλής αντοχής ή όταν σε αυτούς οι ασυνέχειες είναι

αμελητέες, τα φορτία τα οποία θα οδηγήσουν στη θραύση του βράχου με την έννοια της εξώθησης σφηνών είναι πολύ υψηλά και πού μεγαλύτερα από την αντοχή του σκυροδέματος.

### **3.1.2. Επιτρεπόμενη τάση έναντι θραύσης**

Πρόκειται για ένα μέρος της φέρουσας ικανότητας. Είναι εκείνη η τάση για την οποία δεχόμαστε ότι αν την εφαρμόσουμε, η θεμελίωση θα είναι ασφαλής έναντι της θραύσης. Την επιτρεπόμενη τάση την προσδιορίζουμε διαιρώντας τη φέρουσα ικανότητα με ένα συντελεστή ασφαλείας ώστε αφενός να μην είμαστε κοντά στην κατάσταση θραύσης και αφετέρου να αντισταθμίζουμε αποκλίσεις της πραγματικής συμπεριφοράς από τα θεωρητικά μοντέλα τα οποία εφαρμόζουμε για να προσδιορίσουμε τη φέρουσα ικανότητα καθώς επίσης και ανακρίβειες στις τιμές των μηχανικών παραμέτρων του βράχου που εισάγουμε στους υπολογισμούς.

### **3.1.3. Επιτρεπόμενη τάση έναντι οριακών καθιζήσεων**

Εξαιτίας των διαφορετικών φορτίων που μεταφέρουν τα διάφορα θεμέλια στο βράχο αλλά και λόγω μεταβολών των ιδιοτήτων του στις διάφορες θέσεις, κάτω από τα θεμέλια προκαλούνται διαφορετικές καθιζήσεις. Υπάρχουν κατασκευές οι οποίες είναι ευαίσθητες ακόμη και για πολύ μικρές τιμές διαφόρων καθιζήσεων. Ο περιορισμός αυτός μας αναγκάζει να ορίσουμε την τιμή της επιτρεπόμενης τάσης κατά τρόπο ώστε οι διαφορικές καθιζήσεις να μην ξεπερνούν τις προδιαγεγραμμένες τιμές (διαφορετικές για κάθε είδος κατασκευής) των διαφορικών καθιζήσεων. Η επιτρεπόμενη τάση είναι τώρα εκείνη η τάση την οποία αν εφαρμόσουμε, οι διαφορικές καθιζήσεις θα βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Επομένως, μιλάμε για επιτρεπόμενη τάση έναντι οριακών καθιζήσεων.

### **3.1.4. Συντελεστής ασφαλείας**

Η επιλογή της τιμής του συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία έχουν προσδιοριστεί οι μηχανικές παράμετροι του βράχου (αν έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά ή αν έχουν εκτιμηθεί) και από την ακρίβεια του μαθηματικού μοντέλου που εφαρμόζουμε για να προσεγγίσουμε τη γεωτεχνική συμπεριφορά της κατασκευής.

### **3.1.5. Μέθοδοι προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας**

Οι μέθοδοι τις οποίες εφαρμόζουμε για να προσδιορίσουμε τη φέρουσα ικανότητα ενός θεμελίου διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γεωλογική δομή (στρωματογραφία) και τη συναρμογή του βράχου και μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής:

1. Μέθοδοι της κλασικής Εδαφομηχανικής.
2. Απλοποιημένες μέθοδοι οριακής ισορροπίας. Προσαρμόζονται στη γεωλογική δομή, στη συναρμογή και στις μηχανικές ιδιότητες του βράχου και στηρίζονται στις αρχές της Εδαφομηχανικής ή σε απλές σχέσεις της θεωρίας αντοχής των υλικών.
3. Σύνθετες μέθοδοι, στις οποίες περιλαμβάνονται :
  - Η μέθοδος του δείκτη αντοχής.
  - Μέθοδοι οι οποίες συνδέουν τη φέρουσα ικανότητα με την επίδραση των ασυνεχειών στη μετάδοση των τάσεων.
  - Γραφικές μέθοδοι ανάλυσης.

Οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται κατά κύριο λόγο στον ασυνεχή βράχο.

Προσδιορισμός της επιτρεπόμενης τάσης με βάση εμπειρικά στοιχεία που περιέχονται σε δημοσιευμένους πίνακες ή σε οικοδομικούς κώδικες. Σε αυτούς η επιτρεπόμενη τάση συνδέεται με την ποιότητα του βράχου.

### 3.1.6. Κριτήριο Hoek-Brown.

Η μέθοδος στην οποία χρησιμοποιείται το κριτήριο Hoek-Brown εφαρμόζεται σε πυκνά διακλασμένο (περισσότερες δέσμες), πρακτικά ισότροπο βράχο και είναι οι εξής:

Θεωρούμε ότι στην οριακή κατάσταση κάτω από το θεμέλιο αναπτύσσονται ενεργές και παθητικές σφήνες. Τις σφήνες τις ορίζουμε με ευθείες γραμμές έτσι ώστε να μορφώνεται μια ενεργός ζώνη A και μια παθητική ζώνη B. Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι οι παράμετροι του ρηγματωμένου βράχου ή οι παράμετροι των ασυνεχειών. Επομένως γίνεται η θεώρηση ότι η περιοχή του βράχου που βρίσκεται κάτω από το θεμέλιο (ορίζεται από τα κατακόρυφα επίπεδα που διέρχονται από τα άκρα του θεμελίου) φορτίζεται όπως ένα δοκίμιο το οποίο υποβάλλεται σε τριαξονική δοκιμή. Αν αγνοήσουμε το ίδιο βάρος της ζώνης A, η μέγιστη κύρια τάση που ενεργεί στη ζώνη A είναι η τάση που εφαρμόζουμε μέσω του θεμελίου. Η ελάχιστη κύρια τάση είναι η αντίσταση που είναι σε θέση να προβάλλει η ζώνη B. Όμως και η ζώνη B φορτίζεται όπως ένα δοκίμιο που υποβάλλεται σε τριαξονική δοκιμή. Η μέγιστη κύρια τάση που ασκείται στη ζώνη αυτή είναι η οριζόντια. Αν η θεμελίωση γίνει στην επιφάνεια του βράχου, η ελάχιστη κύρια τάση που ασκείται στη ζώνη B είναι μηδενική. Αν η θεμελίωση γίνει σε βάθος  $D_f$ , η ελάχιστη κύρια τάση είναι η  $q_s$  που ασκεί το ίδιο βάρος του βράχου που υπάρχει ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια και στο επίπεδο θεμελίωσης. Τη στιγμή που η θεμελίωση αστοχεί, αστοχούν ταυτόχρονα και οι δύο ζώνες, η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_{3A}$  που ασκείται στη ζώνη A είναι ίση με τη μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_{1B}$  που ασκείται στη ζώνη B. Η μέγιστη τιμή της  $\sigma_{3A}$  που μπορεί να αναπτυχθεί στη ζώνη A δεν μπορεί να ξεπερνάει την αντοχή σε απλή θλίψη του ρηγματωμένου βράχου της ζώνης B, την αντοχή σε απλή θλίψη όταν η  $q_s$  είναι μηδενική ή την αντοχή σε παρεμποδιζόμενη θλίψη όταν  $q_s > 0$ . Η αντοχή του ρηγματωμένου βράχου προσδιορίζεται με τριαξονικές δοκιμές ( $\sigma_1 > \sigma_3 = \sigma_2$ ) από τις οποίες μπορούμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown: m, s,  $\sigma_c$ .

### 3.2. Θεμελίωση πάνω σε οριζόντια επιφάνεια

Οι πιο καθοριστικές παράμετροι για το σχεδιασμό μιας θεμελίωσης είναι:

1) Η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το έργο. Όταν η ελεύθερη επιφάνεια είναι οριζόντια ή περίπου οριζόντια, δεν υπάρχουν ιδιαίτερες δυσκολίες. Προβλήματα παρουσιάζονται όταν πρέπει να γίνει θεμελίωση πάνω σε πρηνή (κλιτύες) ή πάνω στη στέψη πρηνών.

2) Το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης. Όταν τα φορτία είναι μεγάλα και πρέπει να θεμελιωθούν στο βραχώδες υπόβαθρο, το πάχος του αποσαθρωμένου τμήματος είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει το βάθος θεμελίωσης, τον όγκο και το κόστος μεταφοράς των υλικών που πρέπει να απομακρυνθούν. Όταν ο βράχος βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, καταφεύγουμε σε βαθιά θεμελίωση.

3) Η έκταση του έργου. Οι θεμελιώσεις κτιρίων, ενεργειακών σταθμών και τοξωτών φραγμάτων καταλαμβάνουν μικρή έκταση σε αντίθεση με τη θεμελίωση αυτοκινητοδρόμων, σιδηροδρόμων και αγωγών μεταφοράς πετρελαίου ή αερίων. Όσο περισσότερο περιορισμένη τοπικά είναι μια θεμελίωση τόσο ευκολότερα μπορεί να διερευνηθεί, τόσο λιγότερο μεταβλητή είναι η φύση και η συμπεριφορά του βράχου.

4) Η σπουδαιότητα του έργου, η ευαισθησία του σε διαφορικές, αν πρόκειται για βαριά ή ελαφριά κατασκευή. Στην κατηγορία των βαριών και ευαίσθητων κατασκευών ανήκουν για παράδειγμα τα τοξωτά φράγματα και οι ενεργειακοί σταθμοί.

5) Το μέγεθος του θεμελίου, η απόστασή του από τα γειτονικά θεμέλια, το μέγεθος και η διεύθυνση του μεταφερόμενου φορτίου. Η πιθανότητα να εδραστεί ένα μεγάλο θεμέλιο σε ανομοιογενή βράχο είναι μεγαλύτερη από ότι ένα μικρό θεμέλιο.

Η πιο καθοριστική όμως από τις παραπάνω παραμέτρους για το σχεδιασμό μιας κατασκευής είναι η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας. Τόσο τα γεωτεχνικά όσο και τα κατασκευαστικά προβλήματα θα εξαρτηθούν από το αν το έργο θα θεμελιωθεί πάνω σε οριζόντια επιφάνεια ή πάνω σε ένα απότομο πρανές, αν θα θεμελιωθεί στη «μύτη» που σχηματίζεται από δύο αντίθετα πίπτοντα πρανή.

#### • Θεμελίωση πάνω σε οριζόντια επιφάνεια

Όταν η ελεύθερη επιφάνεια είναι οριζόντια ή περίπου οριζόντια, η θεμελίωση των κατασκευών δεν παρουσιάζει συνήθως προβλήματα, κυρίως εξαιτίας του ότι μπορούμε να αυξήσουμε τη φέρουσα ικανότητα με μικρή αύξηση του βάθους θεμελίωσης. Προσοχή χρειάζεται όταν η διάταξη των ασυνεχειών κάτω από το θεμέλιο είναι τέτοια ώστε να ενοείται η μόρφωση σφηνών οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν προς την ελεύθερη επιφάνεια.

Η επίδραση της συναρμογής του βράχου πρέπει να εξετάζεται ιδιαίτερα όταν η διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου είναι λοξή. Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας αντιμετωπίζεται συνήθως με την εφαρμογή συστήματος προεντεταμένων αγκυριών στην ελεύθερη επιφάνεια που βρίσκεται πίσω από το θεμέλιο. Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του δείκτη αντοχής ή με γραφικές μεθόδους ανάλυσης όπως για παράδειγμα με τη γραφική μέθοδο του John (1968). Οι τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση του θεμελίου (τάσεις επαφής) δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες. Οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται στα όρια του θεμελίου. Όταν η τάση που εφαρμόζουμε μέσω του θεμελίου είναι υψηλή, δηλαδή υπάρχουν καλές συνθήκες θεμελίωσης, υπάρχει το ενδεχόμενο η δύναμη που ασκείται στο θεμέλιο να ξεπεράσει τη διαθέσιμη αντίσταση του θεμελίου. Η κωνική μορφή που δίνουμε στα θεμέλια που εδράζονται σε εδαφικούς σχηματισμούς ενδέχεται να οδηγήσει στην αστοχία του θεμελίου. Αυτό το οποίο εξασφαλίζει η αύξηση του πλάτους της βάσης του θεμελίου στην περίπτωση των εδαφικών σχηματισμών το παρέχει η ανθεκτική-έναντι κατακόρυφης διάτμησης-οδοντωτή σύνδεση του θεμελίου με τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής.

Υπερεκσκαφές κατά την κατασκευή της θεμελίωσης αυξάνουν το πλάτος του θεμελίου, το βάθος του και τον όγκο του σώματος ολίσθησης. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης.

Τη σύνδεση των πλευρικών τοιχωμάτων του στύλου με τις οδοντωτές παρειές της εκσκαφής πρέπει να τη λάβουμε υπόψη μας κατά τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας και των καθιζήσεων, μπορούμε να εκτιμήσουμε υπολογιστικά ή να την αφήσουμε έξω από τους υπολογισμούς σαν περιθώριο ασφαλείας. Θα μπορούσαμε για παράδειγμα να την υπολογίσουμε θεωρώντας ότι η πρώτη σειρά των στοιχείων κατάτμησης του βράχου η οποία συγκολλάται με το στύλο αποτελεί τμήμα του θεμελίου. Πέραν του ότι η σύνδεση αυτή μειώνει- λόγω της αύξησης του πλάτους της θεμελίωσης- το μέγεθος της μεταφερόμενης τάσης στην επιφάνεια θεμελίωσης αυξάνει το πλάτος και το βάθος του σώματος ολίσθησης σημαντικά.

#### 3.2.1. Θεμελίωση πάνω σε πρανές

Τα προβλήματα που θέτει η θεμελίωση μιας κατασκευής όταν η ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζει κλίση είναι διαφορετικά. Τις περισσότερες φορές (κυρίως όταν η κλίση ξεπερνάει τις 30°) η θεμελίωση παρουσιάζει δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν με μέτρα ενίσχυσης της θεμελίωσης. Όσο πιο απότομο είναι το πρανές, τόσο πιο δύσκολη χαρακτηρίζεται η κατάσταση. Οι λόγοι είναι οι εξής:

- Η ιδιομορφία που παρουσιάζει το πρωτογενές (πριν ακόμα γίνει η εκσκαφή για τη θεμελίωση) τασικό πεδίο. Πιο αναλυτικά, κοντά στη στέψη επικρατούν εφελκυστικές τάσεις στο κυρίως σώμα του πρανούς οι τάσεις κατά κύριο λόγο είναι θλιπτικές ενώ στον πόδα του

πρανούς επικρατούν διατμητικές τάσεις. Η εφαρμογή μέσω των θεμελίων, φορτίων στο πρανές μπορεί λόγω αυτής της ιδιομορφίας να οδηγήσει σε τοπικές υπερβάσεις της αντοχής του βράχου, κυρίως όταν λόγω δυσμενούς συναρμογής του, η διάχυση των τάσεων είναι περιορισμένη.

- Τις περισσότερες φορές ο βράχος εμφανίζει μεγάλες, συνεχείς διακλάσεις ή επιφάνειες στρώσεις οι οποίες διατάσσονται παράλληλα με την ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς καθώς και απότομα ρήγματα, σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους, συνήθως η παράταξη των ρηγμάτων είναι παράλληλη στην παράταξη του πρανούς. Πρόκειται για ένα σύστημα ασυνεχειών που επιδρά δυσμενώς στην ευστάθεια των κατασκευών: Τα κατακόρυφα ρήγματα και οι επιφάνειες στρώσης σχηματίζουν ρομβοειδή στοιχεία τα οποία ενεργούν υπό μορφή σφήνας πάνω στα παρακείμενα στοιχεία κατάτμησης και τείνουν να τα ανατρέψουν. Μία αύξηση του βάθους θεμελίωσης δε βοηθάει στην περίπτωση αυτή. Αποτελεσματική είναι η εφαρμογή ισχυρών συστημάτων αγκύρωσης. Κατά τον σχεδιασμό των μέτρων στερέωσης θα πρέπει εκτός από τα φορτία που μεταφέρονται μέσω του θεμελίου να λάβουμε υπόψη μας και το ίδιο το βάρος του στοιχείου κατάτμησης πάνω στο οποίο εδράζεται ο στύλος. Δυσκολίες παρουσιάζονται και όταν δεν υπάρχουν μεγάλα, λοξά ρήγματα αλλά μικρές διακλάσεις. Τα φορτία της κατασκευής προκαλούν πλήρη διάρρηξη των μικροδιακλάσεων μορφώνοντας με τον τρόπο αυτό στοιχεία που οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα.

- Απότομα κυρίως πρανή παρουσιάζουν συχνά **ιδιοκινήσεις** που οφείλονται σε ερπυστικά φαινόμενα ή σε ωθήσεις γαιών. Αν δεν πάρουμε τα απαραίτητα μέτρα, τα φαινόμενα αυτά θα προκαλέσουν καθιζήσεις στην κατασκευή. Οι παθητικές καθιζήσεις μπορεί να είναι ακίνδυνες ή αντίθετα να απειλούν σοβαρά την κατασκευή. Ακίνδυνες είναι όταν τα ερπυστικά φαινόμενα εξελίσσονται σε μεγάλη έκταση, όταν οι κινήσεις δεν προκαλούν μεταβολές όγκου στην έρπουσα μάζα ή ολισθητικές παραμορφώσεις.

Τα μέτρα που εφαρμόζουμε για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων είναι τα εξής:

1) Η παρεμπόδιση των ιδιοκινήσεων θα ήταν η καλύτερη λύση. Το κόστος όμως είναι πολύ υψηλό ιδιαίτερα όταν ο όγκος της ζώνης ερπυσμού είναι μεγάλος. Εκτός όμως από τη μεγάλη οικονομική δαπάνη που απαιτεί η λύση αυτή, το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί από τη λήψη των μέτρων μέχρι να ηρεμήσει το πρανές είναι πολύ μεγάλο, μπορεί να διαρκέσει χρόνια μπορεί και δεκαετίες ακόμη.

2) Η θεμελίωση να γίνει βαθύτερα από τη θέση μέχρι την οποία πραγματοποιούνται οι κινήσεις, οι στύλοι ή τα βάθρα να σχεδιαστούν έτσι ώστε να είναι σε θέση να παραλάβουν τα φορτία που ασκούν πάνω τους οι έρπουσες μάζες. Ήδη για μικρά πάχη της ζώνης ερπυσμού (λίγα μόνο μέτρα), οι δυνάμεις που ασκούνται στα βάθρα είναι πολύ υψηλές. Στη μετωπική πλευρά του βάθρου που «κοιτάει» στο πρανές ενεργεί (όταν αυτή είναι κάθετα τοποθετημένη στη διεύθυνση των μετακινήσεων) η παθητική αντίσταση της ζώνης ερπυσμού. Η παθητική ώθηση προσδιορίζεται με τη βοήθεια της σφήνας. Η συνολική δύναμη που ασκείται στο βάθρο, είναι ίση με το άθροισμα της παθητικής αυτής ώθησης και των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στις δύο πλευρές του βάθρου, αποδεικνύεται ότι οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις πλευρές του βάθρου είναι μεγαλύτερες από την παθητική ώθηση.

Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται μορφώνοντας τη μετωπική πλευρά του βάθρου κωνική, διατηρώντας μικρές τις διαστάσεις των πλευρών του βάθρου που είναι παράλληλες στη διεύθυνση της ερπυκικής κίνησης και δίνοντας σε αυτές συγκλίνουσα μορφή. Η καταπόνηση του βάθρου ελαχιστοποιείται όταν οι ροπές ανατροπής της παθητικής ώθησης και των δυνάμεων παραληφθούν από αγκυρώσεις.

3) Η θεμελίωση να γίνει κάτω από τη ζώνη ερπυσμού και να ληφθούν μέτρα που αποκλείουν τη μεταφορά των φορτίων στα βάθρα και στις έρπουσες μάζες κατασκευάζεται ένας ελεύθερος χώρος με διαστάσεις τέτοιες ώστε να μην επιτραπεί στη ζώνη ερπυσμού να έρθει σε επαφή με το βάθρο ούτε μετά από παρέλευση πολλών δεκαετιών. Ο τρόπος αυτός

εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει κίνδυνος κατολίσθησης και οι ερπυστικές κινήσεις εξελίσσονται πολύ αργά.

4) Να κατασκευαστεί προστατευτικός τοίχος αντιστήριξης ή προστατευτικό κέλυφος αντιστήριξης το οποίο, υπό μορφή «ομπρέλας» δε θα επιτρέπει στις έρπουσες μάζες να έρθουν σε επαφή με το βάθρο. Η «ροή» της έρπουσας μάζας γίνεται πλευρικά του βάρου. Οι τοίχοι κατασκευάζονται κατά τμήματα από πάνω προς τα κάτω. Τα τμήματα αγκυρώνονται αμέσως ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος να εξελιχθούν απότομα κατολισθητικά φαινόμενα. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν εφαρμόζεται πολλές φορές συνδυασμός «κλειστών» αγκυρωμένων τοίχων με αγκυρωμένους κατακόρυφους στύλους και επένδυση των διάκενων με οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Προσοχή χρειάζεται κατά τη διαστασιολόγηση του τοίχου επειδή η ώθηση μπορεί να ξεπεράσει σημαντικά την ενεργό ώθηση ή την ώθηση ηρεμίας.

- Ο τύπος του θεμελίου-αν δηλαδή το θεμέλιο είναι μεμονωμένο ή αν είναι πεδילוδοκός μεγάλου μήκους- και η διάταξη του θεμελίου στην επιφάνεια του πρανούς συνδέονται με τα προβλήματα που θα αντιμετωπίσουμε κατά τη θεμελίωση. Πεδילוδοκοί μεγάλου μήκους οι οποίες τοποθετούνται εγκάρσια στην παράταξη του πρανούς δεν προκαλούν ιδιαίτερα προβλήματα στην ευστάθεια της θεμελίωσης, συνδέονται όμως με προβλήματα αντιστήριξης επειδή το ύψος των παρειών των εκσκαφών που θα διανοιχτούν για τη θεμελίωση των πεδילוδοκών αυξάνεται με το μήκος των πεδילוδοκών. Το αντίθετο συμβαίνει όταν οι πεδילוδοκοί τοποθετούνται παράλληλα στην παράταξη: Η διάνοιξη της εκσκαφής για τη θεμελίωση προωθεί μετακινήσεις του πρανούς, τα θεμέλια φορτίζουν σε μεγάλο μήκος το πρανές. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τοβ οποίο οι αυτοκινητόδρομοι που τοποθετούνται κατά μήκος απότομων κλιτύων κατασκευάζονται με τη μορφή γεφυρών. Όσο πιο δυσμενείς είναι οι γεωλογικές συνθήκες, τόσο μεγαλύτερες επιλέγονται οι αποστάσεις των βράχων.

- Το μέγεθος του θεμελίου. Όταν μεγάλα θεμέλια εδράζονται πάνω σε πρανή που παρουσιάζουν στρώσεις οι οποίες είναι παράλληλες στην επιφάνεια του πρανούς (μεγάλες συνεχείς διακλάσεις ή επίπεδα σχιστότητας) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μεγαλύτερη κινητικότητα που παρουσιάζουν οι εξωτερικές στρώσεις. Οι στρώσεις ανάλογα με την απόστασή τους από την ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς έχουν την τάση να ολισθαίνουν λιγότερο ή περισσότερο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορετικές (κλιμακωτές) υποχωρήσεις κάτω από το θεμέλιο. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με αγκυρώσεις ή με την παράλληλη στις στρώσεις τοποθέτηση του θεμελίου και ενδεχομένως ενίσχυση με πρόσθετη αγκύρωση.

Όταν η επιφάνεια του θεμελίου είναι μεγάλη, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στα βάρθα μεγάλων γεφυρών ή σε μεγαλύτερα οικοδομικά συγκροτήματα τα οποία κατασκευάζονται σε πρανή θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι:

α) Υπάρχει κίνδυνος διαφορικών καθιζήσεων επειδή η πιθανότητα να διαφοροποιούνται οι μηχανικές ιδιότητες του βράχου είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του θεμελίου ή η έκταση της συνολικής θεμελίωσης. Θα πρέπει να παρθούν τα απαραίτητα μέτρα στήριξης, τις περισσότερες φορές, θα χρειαστεί να θεμελιώσουμε κάτω από τον μανδύα αποσάθρωσης.

β) Τα προβλήματα αντιστήριξης της εκσκαφής είναι πολύ μεγαλύτερα όταν το πρανές έχει μεγάλη κλίση και όταν τα θεμέλια είναι μεγάλα. Η αντιστήριξη της είναι πολύ πιο δύσκολη από ότι σε μικρά θεμέλια επειδή το ύψος των πρανών της εκσκαφής προκύπτει μεγαλύτερο, οι δυσκολίες είναι μεγαλύτερες όταν στο επάνω τμήμα της εκσκαφής ο βράχος είναι χαλαρός. Στις περιπτώσεις αυτές ενδείκνυται η σταθεροποίηση της εκσκαφής με επίστρωση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 3 έως 10 εκατοστών.

### 3.2.2. Θεμελίωση σε στέψη απότομου πρανούς

Διαφορετικά είναι τα προβλήματα όταν πρέπει να θεμελιωθεί η στέψη ενός απότομου πρανούς. Για παράδειγμα, πολύ κοντά στο όριο ενός κατακόρυφου πρανούς, πάνω στη στέψη και πολύ κοντά στο όριο ενός απότομου πρανούς ή πάνω στη μύτη που διαμορφώνεται από δύο αντίθετα πίπτοντα πρανή. Στις περιπτώσεις αυτές δεν πρόκειται για ημίχωρο αλλά για ένα σφηνοειδή χώρο μέσα στον οποίο θα περιοριστούν τα φορτία των θεμελίων.

Η εφαρμογή φορτίων πάνω στη στέψη ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα, κυρίως εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων που επικρατούν στην περιοχή που βρίσκεται αμέσως κάτω από τη στέψη και εξαιτίας των εφελκυστικών ρηγμάτων που παρουσιάζει συνήθως η περιοχή αυτή. Όσο πιο απότομο είναι το πρανές, τόσο μεγαλύτερα είναι τα προβλήματα: Εξαιτίας της παρουσίας των κατακόρυφων εφελκυστικών ρηγμάτων, τα φορτία των στύλων περιορίζονται κατακόρυφους λεπτούς δίσκους βράχου οι οποίοι δεν επιτρέπουν τη διάχυση των τάσεων στον ευρύτερο χώρο. Κατά κανόνα, απομακρυνόμαστε από την ακμή του πρανούς ακόμη και όταν ο βράχος δεν παρουσιάζει ουσιαστικά ρήγματα. Η θεμελίωση για παράδειγμα της σιδηροδρομικής γέφυρας στον ισθμό της Κορίνθου βάθους 80 μέτρων έγινε σε απόσταση 10 μέτρων από τις ακμές δύο πρανών. Μόνο όταν ο βράχος είναι εντελώς συμπαγής μπορούμε να θεμελιώσουμε πολύ κοντά στην ακμή του πρανούς.

Μεγαλύτερα είναι τα προβλήματα όταν πρέπει να θεμελιώσουμε πάνω σε «μύτες». Η απουσία της πλευρικής παρεμπόδισης μειώνει αισθητά τη φέρουσα ικανότητα κυρίως όταν ο βράχος παρουσιάζει περισσότερες δέσμες ασυνεχειών, η θεμελίωση καταπονεί το βράχο-τουλάχιστον κοντά στην επιφάνεια- σε απλή θλίψη. Η εφαρμογή συστήματος αγκυρίων στις περιπτώσεις αυτές είναι πολύ αποτελεσματική.

### 3.2.3. Θεμελίωση κοντά σε γεωλογικές ασυνέχειες

Την περίπτωση του σφηνοειδούς ημίχωρου δεν την αντιμετωπίζουμε μόνο όταν θεμελιώνουμε πάνω στη στέψη πρανών αλλά και όταν μια ζώνη διαταραχής ή ένα ανοιχτό ρήγμα διακόπτει τη συνέχεια του ημίχωρου, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό δύο χωριστούς σφηνοειδείς χώρους. Τις περισσότερες φορές στη γειτονική περιοχή των ζωνών διαταραχής εμφανίζονται δέσμες μικροδιακλάσεων με διλαταξη παρόμοια με τη διάταξη διαταραχής.

### 3.2.4. Θεμελίωση σε καρστικούς σχηματισμούς

Η διαλυτότητα ασβεστολιθικών πετρωμάτων, δολομιτών και γύψου σε νερό του βράχου οδηγεί στη διάβρωσή τους με συνέπεια τη διαμόρφωση ακανόνιστης δομής του βραχώδους υποβάθρου. Ανώμαλη επιφάνεια της οροφής του υποβάθρου, με αιχμηρές προεκτάσεις, κοιλότητες οι οποίες μπορεί να έχουν άνοιγμα μέχρι 15 m και έντονη διακύμανση των παραμέτρων αντοχής από θέση σε θέση είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των καρστικών περιοχών. Η κατασκευή τεχνικών έργων σε τέτοιες δομές μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία των θεμελίων. Ο Sowers (1975) αναφέρει την κατάρρευση τεσσάρων ανοιγμάτων μιας γέφυρας στη Φλόριντα των ΗΠΑ.

### 3.2.5. Κυκλική αστοχία (Circular failure)

Εφαρμόζονται οι μέθοδοι Εδαφομηχανικής. Ο χαρακτηρισμός του βράχου σαν ισότροπου χρειάζεται προσοχή. Κριτήρια αποτελούν η συναρμογή του βράχου, η αντοχή του και το τασικό πεδίο που επικρατεί στο πρανές, η συγκέντρωση τάσεων σε ορισμένες περιοχές του πρανούς οι οποίες έχουν παραμείνει στο βράχο από μία προγενέστερη τεκτονική δράση (παραμένουσες τάσεις) μπορεί να έχει μετατρέψει ένα φαινομενικά ισότροπο βράχο σε ανισότροπο. Η μορφή θραύσης του πρανούς στην περίπτωση αυτή (συμβαίνει κυρίως σε σκληρά πετρώματα) θα είναι λοιπόν διαφορετική και η θεώρηση της κυκλικής μορφής αστοχίας θα είναι λάθος.



Ο βράχος θεωρείται ισότροπος όταν:

- Είναι κερματισμένος (μυλωνιτιομένος βράχος)
- Τα πετρώματα που το συνθέτουν χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές, δεν παρουσιάζουν μεγάλες ασυνέχειες και δίκτυα μικρών διακλάσεων, που ενδεχομένως υπάρχουν, παρουσιάζουν μικρό βαθμό διάρρηξης (ελαφρά διακλασμένοι γρανίτες, εκρηξιγενή πετρώματα μεγάλης αντοχής σε τεκτονικά ήσυχες περιοχές κτλ)
- Χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντοχή σε βαθμό ώστε αυτή και όχι το είδος της συναρμογής να είναι καθοριστική για τη μηχανική συμπεριφορά του (μαλακός βράχος, soft rock).

### **3.2.6. Επίπεδη αστοχία (Plane failure)**

Η μορφή της επίπεδης αστοχίας αποτελεί τη πιο απλή περίπτωση. Παρουσιάζεται όταν ο βράχος χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη ασυνέχεια η οποία κλίνει προς το πρηνές και η παράταξή της είναι παράλληλη ή περίπου παράλληλη με την παράταξη του πρηνούς. Προϋπόθεση για να έχουμε αυτή τη μορφή αστοχίας είναι, οι αντιστάσεις έναντι ολίσθησης να προέρχονται μόνο από την επιφάνεια της ασυνέχειας, στα άλλα δύο συνοριακά επίπεδα, τα οποία μαζί με το επίπεδο της ασυνέχειας και τις δύο επιφάνειες του πρηνούς μορφώνουν το μπλοκ που τείνει να ολισθήσει, οι αντιστάσεις πρέπει να είναι αμελητέες.

Βασικά διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Η μία είναι όταν το σώμα ολίσθησης βρίσκεται μόνο υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του, η άλλη όταν στο σώμα ολίσθησης, εκτός από το ίδιο το βάρος του ενεργούν και εξωτερικές δυνάμεις: δυνάμεις αγκυρίων, υδροστατικές ωθήσεις, κτλ.

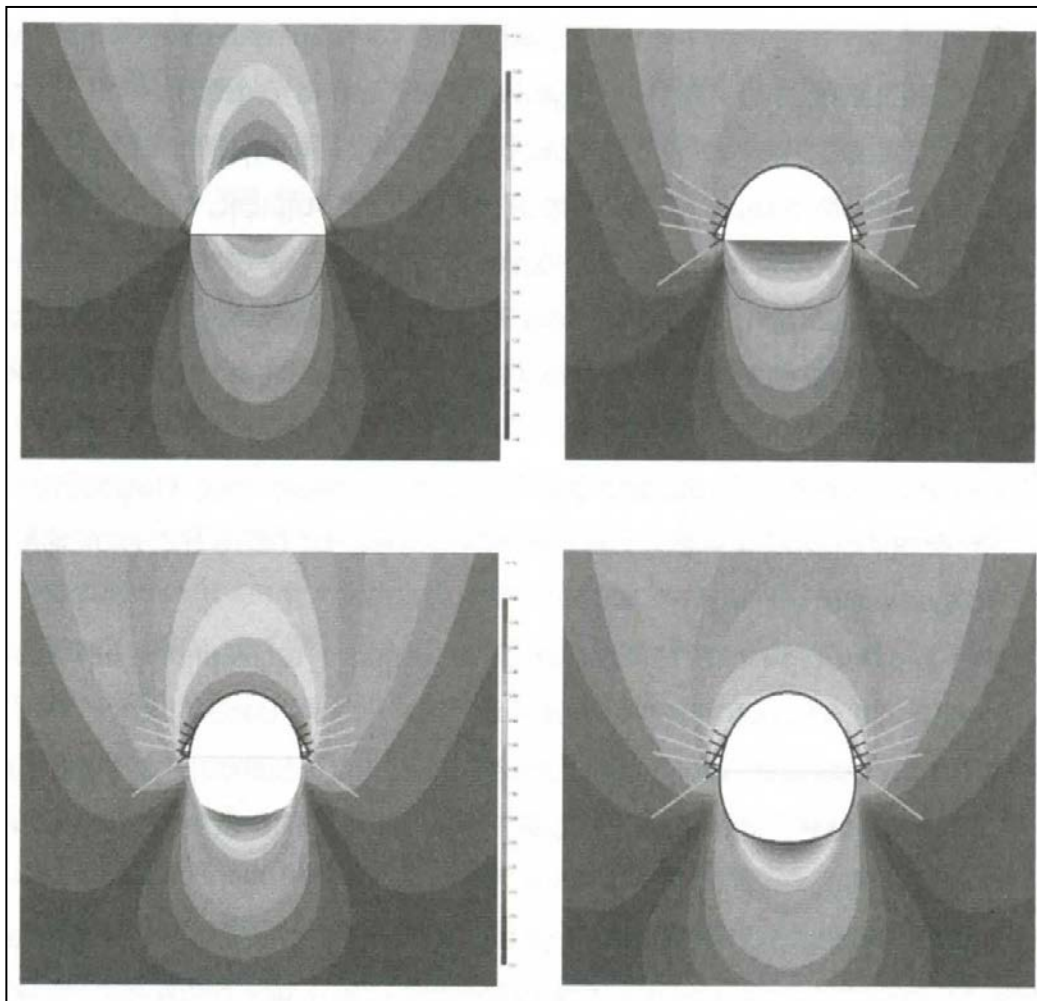
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ – ΣΗΡΑΓΓΕΣ

### 4. Αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού σήραγγων

Στα πλαίσια του σχεδιασμού και της μελέτης ενός υπόγειου τεχνικού έργου, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ευστάθειας της διατομής και συνεπώς η εκτίμηση και ο προσδιορισμός των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Με τον τρόπο αυτόν, καθορίζεται και το εύρος των αναμενόμενων συγκλίσεων που πρέπει να περιορίζονται μέσα σε αποδεκτά όρια, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας, ενώ συγχρόνως θα ενεργοποιηθεί η αντοχή της. Έτσι, σε όλο το μήκος του υπόγειου έργου, σε επίπεδο μελέτης, επιβάλλεται ο καθορισμός τόσο της διαδικασίας – μεθόδου εκσκαφής (αριθμό και διαστάσεις φάσεων εκσκαφής, βήμα προχώρησης – μήκος ανυποστήρικτου τμήματος κ.λπ.) όσο και της άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων, πρόγραμμα τοποθέτησης κ.λπ.).

Το εύρος των παραμορφώσεων (συγκλίσεων) της βραχώμαζας δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα της αλλά επίσης από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προβλεπόμενης διατομής της σήραγγας, τον τρόπο διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης καθώς και το χρόνο τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης. Οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης, των συμβατικών φορτίων στην επένδυση κ.λπ. που βασίζονται στη χρήση των συστημάτων ταξινόμησης της βραχώμαζας, είναι προφανές ότι δίνουν ενδεικτικές μόνον τιμές ενώ δεν μπορεί να έχουν εφαρμογή σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς:

- τα συστήματα ταξινόμησης δεν λαμβάνουν υπόψη τους διαφορετικούς τρόπους διάνοιξης – εκσκαφής (επιμέρους φάσεις διάνοιξης, εκσκαφή με πλευρικές στοές κ.λπ.)
- τα περισσότερα από τα παλαιότερα συστήματα ταξινόμησης δεν έχουν «προσαρμοστεί» στις σύγχρονες μεθόδους άμεσης υποστήριξης
- στις περιπτώσεις που η περιβάλλουσα βραχώμαζα έχει συμπεριφορά «μαλακών βράχων – σκληρών βράχων» ή/και «εδάφους» τα συστήματα ταξινόμησης βραχώμαζας δεν ισχύουν. Συνεπώς, μια ακριβής ανάλυση της συμπεριφοράς ενός υπόγειου τεχνικού έργου, θα πρέπει να περιλαμβάνει την πλήρη ακολουθία των επιμέρους φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ των μέτρων υποστήριξης και της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Προς την κατεύθυνση αυτή κινούνται οι δισδιάστατες αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας, με τη χρήση ειδικών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή (π.χ. PHASES, PLAXIS, TUNNEL, SOFISTIK κ.α.). Τα βασικά χαρακτηριστικά των αναλύσεων αυτών είναι τα εξής:
- μπορεί να γίνει προσομοίωση των διαδοχικών σταδίων (φάσεων) εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας, καθώς και της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης
- η βραχώμαζα αλλά και η άμεση υποστήριξη (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κ.λπ.) προσομοιώνονται σαν ελαστο-πλαστικά υλικά που έχουν κάποια συγκεκριμένα ελαστικά χαρακτηριστικά – παραμέτρους και κάποιο κριτήριο αστοχίας. Για τη βραχώμαζα γενικά θεωρούνται διάφορα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς από το ελαστικό τέλεια πλαστικό Mohr – Coulomb (κυρίως για μέτριας – καλής ποιότητας βραχώμαζες) μέχρι και ισότροπα κρατυνόμενα για εδαφικά υλικά.



**Σχήμα 4.1.** Ολικές παραμορφώσεις διατομής σήραγγας. (α) στάδιο προσομοίωσης (I), (β) στάδιο προσομοίωσης (II), (γ) στάδιο προσομοίωσης (III), (δ) στάδιο προσομοίωσης (IV)

Με τις παραπάνω αναλύσεις υπολογίζονται συνήθως οι παραμορφώσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας για συγκεκριμένα στάδια διάνοιξης, τρόπους υποστήριξης κ.λπ. καθώς επίσης και η έκταση της πλαστικής ζώνης που περιβάλλει την σήραγγα. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να γίνει αξιόπιστη διαστασιολόγηση της μεθοδολογίας διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Ένα τυπικό παράδειγμα ανάλυσης δίνεται στο παραπάνω σχήμα, όπου γίνεται προσομοίωση εκσκαφής σε δυο φάσεις χαρακτηριστικής διατομής της σήραγγας ΣΒ της Ευρείας Παράκαμψης της Πάτρας που διανοίγεται στην κατώτερη γεωτεχνική ενότητα που αποτελείται από τέφρες αργιλικές μάργες. Η ανάλυση γίνεται σε τέσσερα στάδια προσομοίωσης: Το πρώτο στάδιο (I) περιλαμβάνει την εκσκαφή της Α' φάσης, χωρίς υποστήριξη και με θεώρηση ανακατανομής του 25% των τάσεων. Στο στάδιο (II) ενεργοποιούνται τα μέτρα υποστήριξης της Α' φάσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια). Το στάδιο (III) περιλαμβάνει και την εκσκαφή της Β' φάσης, χωρίς ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης και με θεώρηση ανακατανομής του 25% των τάσεων. Τέλος, το στάδιο (IV) αναφέρεται στην πλήρη διατομή με ενεργοποιημένα όλα τα μέτρα υποστήριξης.

#### **4.1. Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών**

Οι σήραγγες (tunnels), όπως και όλα τα υπόγεια τεχνικά έργα, κατασκευάζονται εξολοκλήρου «μέσα» στο υπέδαφος και γι αυτό το λόγο η γεωλογία αποτελεί τη βάση για το σωστό σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Στη σύγχρονη εποχή παρουσιάζουν μια πολύ μεγάλη ποικιλία ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν, το χαρακτήρα και το σχεδιασμό τους και για αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται σαν σιδηροδρομικές, οδοποιίας, μετρό, εκτροπής, αποστραγγιστικές, ενεργειακών σταθμών, υδρευτικές, μεταλλευτικές κ.λπ.

Είναι εκσκαφές οριζόντιες ή σχεδόν οριζόντιες και ανοιχτές σε κάθε άκρο τους στην επιφάνεια του εδάφους στις θέσεις των εισόδων (portals). Όταν η εκσκαφή είναι κατακόρυφη ή σχεδόν κατακόρυφη ονομάζεται φρεάτιο (shaft). Η στοά ή γαλαρία είναι αντίστοιχη εκσκαφή με τη σήραγγα με τη διαφορά ότι έχει μόνο μια είσοδο. Στα υπόγεια έργα εντάσσονται και τα υπόγεια ανοίγματα (caverns, underground openings), που αποτελούν υπόγειες εκσκαφές μεγάλων διαστάσεων και χρησιμοποιούνται για υπόγειους σταθμούς, χώρους εγκατάστασης εργοστασίων, καταφύγια, αθλητικά κέντρα κ.λπ.

##### **• Επίδραση προσανατολισμού ασυνεχειών**

Ο προσανατολισμός και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχώμαζας (απόσταση, τραχύτητα, υλικό πλήρωσης κ.λπ) έχουν καθοριστική σημασία στη διάνοιξη των σηράγγων, καθόσον υπαγορεύουν τις γενικές συνθήκες αστάθειας της οροφής και τοιχωμάτων και επιπλέον καθορίζουν το μέγεθος των υπερεκσκαφών (δηλαδή το μέγεθος των επιπρόσθετων εκσκαφών πέραν της συγκεκριμένης διατομής της σήραγγας). Για να μπορεί ένα βραχώδες τέμαχος να καταπέσει από την οροφή ή τα τοιχώματα μιας υπόγειας εκσκαφής, θα πρέπει το τέμαχος αυτό να μπορεί να αποχωριστεί από την περιβάλλουσα βραχώμαζα, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή πρέπει να διατέμνεται από τουλάχιστον τρία συστήματα ασυνεχειών. Συνεπώς, η δυνητική αστάθεια της οροφής λόγω της παρουσίας ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχώμαζα, μπορεί να διερευνηθεί με τη χρήση των στερεογραφικών προβολών. Κάποιες βασικές αρχές δίνονται παρακάτω:

- Όταν οι μέγιστοι κύκλοι που αντιστοιχούν στα επίπεδα των κύριων συστημάτων ασυνεχειών «περιβάλλουν» το κέντρο του κύκλου της στερεογραφικής προβολής (που αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη που διέρχεται από την κορυφή της σφήνας η οποία σχηματίζεται στην οροφή), τότε αναμένονται καταπτώσεις σφηνών πετρώματος από την οροφή της σήραγγας (ελεύθερη πτώση βραχώδους τέμαχους χωρίς ολίσθηση).

- Όταν οι μέγιστοι κύκλοι που αντιστοιχούν στα επίπεδα των κύριων συστημάτων ασυνεχειών δεν «περιβάλλουν» το κέντρο του κύκλου της στερεογραφικής προβολής (που αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη που διέρχεται από την κορυφή της σφήνας) αλλά ένας μέγιστος κύκλος τέμνει τον ομόκεντρο κύκλο της γωνίας τριβής των ασυνεχειών ( $\phi$ ), τότε αναμένονται οι καταπτώσεις σφηνών πετρώματος από την οροφή της σήραγγας όχι με ελεύθερη πτώση, αλλά σαν ολίσθηση βραχώδους τεμάχους κατά μήκος του επιπέδου της ασυνέχειας που διατέμνει τον κύκλο τριβής. Όταν τα επίπεδα ασυνεχειών βρίσκονται «εκτός» του κύκλου της γωνίας τριβής των ασυνεχειών ( $\phi$ ), αντιπροσωπεύει δυνητικά σταθερή κατάσταση.

- Η ανάλυση της δυνητικής αστάθειας των τοιχωμάτων είναι περισσότερο περίπλοκη και περιγράφεται λεπτομερώς από τους HOEK and BROWN (1980). Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί διάφορα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπως το πρόγραμμα “UNWEDGE”, με τη χρήση των οποίων υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά (γεωμετρία, βάρος) των αναμενόμενων για πτώση –ολίσθηση βραχώδων σφηνών καθώς και ο συντελεστής ασφαλείας τους. Επιπρόσθετα, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά των αγκυρίων (ενεργητικού ή παθητικού τύπου) που απαιτούνται για τη συγκράτηση- αντιστήριξη των σφηνών καθώς επίσης και το πάχος της απαιτούμενης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε γενικές γραμμές ισχύουν τα παρακάτω:

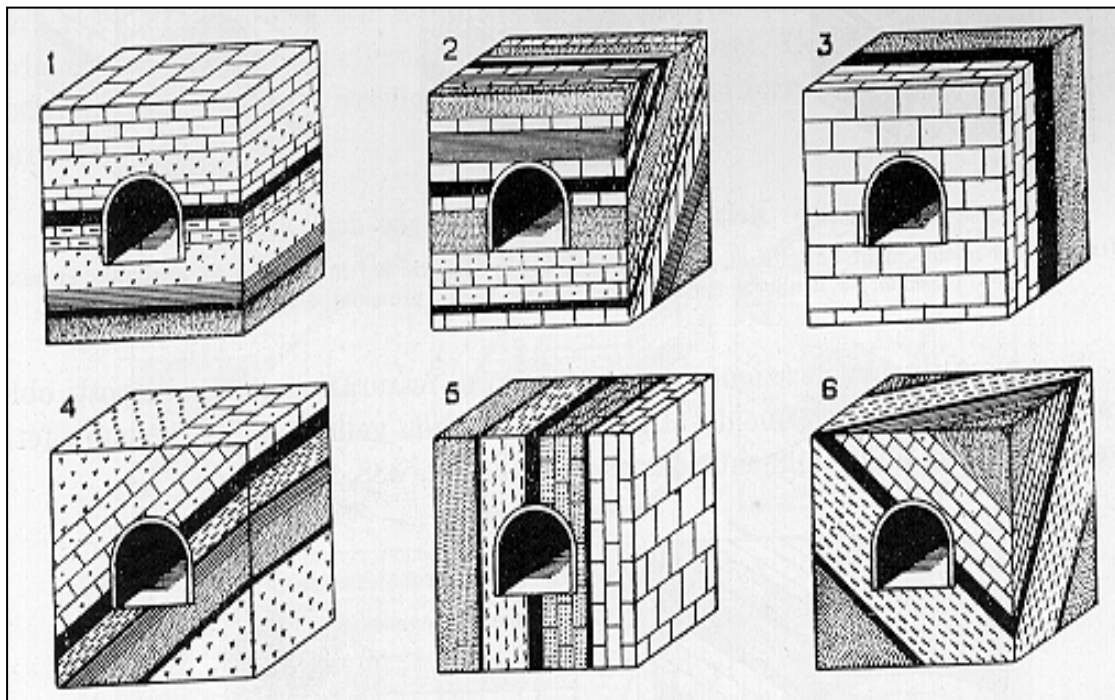
- Όταν οι ασυνέχειες είναι παράλληλες στον άξονα της σήραγγας και κλείνουν με γωνία μεγαλύτερη από  $45^\circ$  (ή από  $30^\circ$  κατά BELL 1980) τότε δημιουργείται απόσπαση πλακών από τα τοιχώματα και καταπτώσεις από την οροφή. Η παρουσία ασυνεχειών με μικρές κλίσεις των επιπέδων τους, προκαλεί αποκόλληση βραχωδών τεμαχίων από την οροφή.

- Όταν ο άξονας της σήραγγας είναι κάθετος στη διεύθυνση των ασυνεχειών και οι κλίσεις τους είναι μικρότερες από  $15^\circ$ , δημιουργούνται πτώσεις μεγάλων βράχων από την οροφή, ενώ τα τοιχώματα τείνουν να παραμείνουν σταθερά.

- Όταν ο άξονας της σήραγγας είναι κάθετος στη διεύθυνση σε στρώματα κατακόρυφα ή με μεγάλες κλίσεις, κάθε στρώμα δρα σαν αντηρίδα με άνοιγμα ίσο με το πλάτος της εγκάρσιας τομής. Στην περίπτωση αυτή οι εκρήξεις για τη διάνοιξη αποδίδουν λιγότερο.

- Όταν ο άξονας της σήραγγας είναι παράλληλος με τη διεύθυνση κατακόρυφων στρωμάτων, τότε το πέτρωμα στην οροφή υποβαθμάζεται από την τριβή κατά μήκος των επιπέδων στρώσης.

- Όταν η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών σε οριζόντια στρώματα είναι μεγαλύτερη από το πλάτος της διατομής, τότε τα στρώματα δημιουργούν δράση γέφυρας (bridge action), δηλαδή δρουν σαν μια συμπαγής πλάκα και απλά κάμπτονται κάτω από το βάρος τους. Έτσι, όταν οι δυνάμεις κάμψης είναι μικρότερες από την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος η οροφή δε χρειάζεται υποστήλωση. Όταν τα στρώματα έχουν μεγάλο πάχος, είναι οριζόντια και διατέμνονται από ασυνέχειες με μεγάλη σχετικά απόσταση, η οροφή της σήραγγας είναι επίπεδη, ενώ όταν τα οριζόντια στρώματα είναι μικρολυ πάχους και διελαύνονται από ασυνέχειες με μικρή σχετικά απόσταση, τότε η οροφή είναι οξύληκτη ενώ η θραύση συνεχίζεται και πέρα από μια κατακόρυφη απόσταση ίση με  $0.5B$ , όπου  $B$  το πλάτος της σήραγγας. Η στρώση αυτού του είδους δημιουργεί σχετικά δυσμενείς συνθήκες όταν τα στρώματα έχουν κλίση  $5^\circ-10^\circ$ , καθώς προκαλείται κατάρρευση της οροφής με την προχώρηση της διάνοιξης της σήραγγας.



Σχήμα 4.2. Συσχετισμός διάταξης στρωμάτων ή ασυνεχειών και άξονα σήραγγας.

#### 4.2. Σήραγγες σε ζώνες διάρρηξης

Οι πιθανές θέσεις μιας σήραγγας σε σχέση με κάποιο ρήγμα είναι:

- Η σήραγγα που έχει τοποθετηθεί μέσα στη ζώνη διάρρηξης (ο άξονας είναι παράλληλος προς τη ζώνη διάρρηξης).
- Η σήραγγα που βρίσκεται στο «πάτωμα» και στο «ταβάνι» του ρήγματος.
- Η σήραγγα που συναντά το ρήγμα εγκάρσια και λοξά.
- Η σήραγγα που βρίσκεται έξω από το ρήγμα.

Καταρχήν, είναι απαραίτητη η γνώση της ηλικίας του ρήγματος, καθόσον στην περίπτωση που αυτό είναι γεωλογικά πρόσφατο, θα πρέπει να θεωρείται ενεργό, οπότε πρέπει να αντιμετωπίζεται η πιθανότητα μιας νέας ανάδρασής του. Γενικά, όταν η σήραγγα συναντά ένα ενεργό ρήγμα, η προστασία της κατασκευής είναι σχεδόν αδύνατη σε περίπτωση ανάδρασης και κάτι τέτοιο αποφεύγεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προτιμάται η παραλλαγή του άξονα της σήραγγας, προκειμένου να αποφευχθεί η διασταύρωση με το ρήγμα (πράγμα που δεν είναι πάντα εύκολο σε σήραγγες μεγάλου μήκους). Στην περίπτωση που κάτι τέτοιο είναι αδύνατο, επιβάλλεται η κατασκευή κατάλληλων αρμών, που επιτρέπουν τις αναμενόμενες σεισμικές μετακινήσεις χωρίς σημαντικές βλάβες στην επένδυση της σήραγγας. Προτιμάται η κατασκευή ανοιχτού ορύγματος (cut and cover) αντί σήραγγας στην περίπτωση βέβαια που κάτι τέτοιο είναι κατασκευαστικά εφικτό.

Σε περιπτώσεις που τέτοιες σήραγγες διαθέτουν ενεργά ρήγματα υπό οξεία γωνία, οπότε και το μήκος της σήραγγας που επηρεάζεται από το ρήγμα είναι σημαντικό, η κατασκευή των κατάλληλων εγκάρσιων αρμών δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Στις θέσεις αυτές, εάν είναι αδύνατη η αλλαγή χάραξης ώστε να μη γίνει η διασταύρωση αυτή, τότε συνήθως γίνεται μια σχετική διεύρυνση της διατομής της σήραγγας στη συγκεκριμένη ζώνη, ώστε να είναι δυνατή η επέμβαση για την αποκατάσταση της λειτουργικότητάς της σε περίπτωση ενεργοποίησης του ρήγματος.

Ανεξάρτητα πάντως από το αν το ρήγμα είναι ενεργό ή όχι, το υλικό που συναντάται στη ζώνη διάρρηξης είναι γενικά κερματισμένο, χαλαρό και ασταθές, ενώ είναι πιθανή η εισροή σημαντικών όγκων νερού. Υπάρχει πιθανότητα εκδήλωσης φαινομένων διόγκωσης του υλικού (όταν αυτό είναι μολονίτης αργιλικής σύστασης), εισροής του (στην περίπτωση που είναι κοκκώδες-θραυστό) ή ακόμα εισροής αιωρήματος άμμου στην περίπτωση παρουσίας υπεδαφικών νερών.

Γενικά, η παρουσία των ρηγμάτων προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων στη σήραγγα. Τα προβλήματα αυξάνουν καθώς η διεύθυνση του ρήγματος τείνει να γίνει παράλληλη προς τον άξονα της σήραγγας, περίπτωση που γενικά πρέπει να αποφεύγεται. Όταν το ρήγμα είναι κάθετο στον άξονα της σήραγγας τα προβλήματα που συναντώνται έχουν σχέση με την κλίση της ρηξιγενούς ζώνης σε σχέση με τη διάνοιξη της σήραγγας. Ειδικότερα, όταν η κλίση της ζώνης διάρρηξης είναι κατά την προχώρηση της σήραγγας, αποτελεί δυσμενή περίπτωση (η ζώνη συναντάται πρώτα στην οροφή της σήραγγας οπότε αναμένονται προβλήματα αστάθειας της οροφής), ενώ στην αντίθετη περίπτωση (κλίση αντίθετα προς την υποχώρηση) είναι ευνοϊκή, καθόσον συναντάται αρχικά στο δάπεδο οπότε και λαμβάνονται τα αντίστοιχα μέτρα αντιστήριξης για τη συνέχεια.

#### 4.3. Υλικά αποσάθρωσης

Τα προϊόντα της αποσάθρωσης είναι ασταθή υλικά μέσα στα οποία η διάνοιξη μιας σήραγγας είναι αρκετά προβληματική. Είναι απαραίτητο η γεωλογική έρευνα να δίνει το πλήρες ανάγλυφο των χαλαρών υλικών αποσάθρωσης που υπέρκεινται των πετρωμάτων, καθόσον αν η σήραγγα συναντήσει τέτοια υλικά χωρίς να έχει γίνει η σχετική πρόβλεψη, είναι δυνατόν να προκληθούν σημαντικές αστάθειες και αστοχίες στο έργο.

#### 4.4. Επίδραση σεισμών

Γενικά, τα υπόγεια τεχνικά έργα θεωρούνται ασφαλέστερα από τα επιφανειακά έναντι σεισμικής δράσης. Εξαιρούνται βέβαια περιπτώσεις στις οποίες το υπόγειο έργο διατέμνεται από ενεργό ρήγμα ή ο γεωλογικός σχηματισμός που περιβάλλει το έργο χάνει όλη ή μέρος της αντοχής του λόγω σεισμού (π.χ. ρευστοποίηση)

Τα διατμητικά σεισμικά κύματα προκαλούν παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας και καμπτική καταπόνηση στην επένδυσή της. Το μέγεθος της καταπόνησης στην επένδυση εξαρτάται πρακτικά από τη σχέση της διαμέτρου της σήραγγας προς το μήκος του σεισμικού κύματος. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις δηλαδή για διάμετρο σήραγγας μέχρι 15m και μήκος σεισμικού κύματος 100-500m, ο λόγος είναι μικρός και συνεπώς η αναμενόμενη καταπόνηση της επένδυσης πολύ μικρή. Σημαντικές διαφοροποιήσεις από τα παραπάνω, εκτός των περιπτώσεων ενεργού ρήγματος ή φαινομένων ρευστοποίησης, παρατηρούνται οι εξής περιπτώσεις:

- Όταν ο γεωλογικός σχηματισμός που περιβάλλει τη σήραγγα αποτελείται από μαλακά εδάφη (στην περίπτωση αυτή το μήκος του σεισμικού κύματος είναι <100 m) και επομένως συγκρίσιμο με τη διάμετρο διατομής
- Όταν ο άξονας της σήραγγας ακολουθεί την επαφή δύο διαφορετικής δυσκαμψίας σχηματισμών (π.χ. κορημάτων και υποκείμενων ασβεστόλιθων), κατά μήκος της οποίας παρατηρείται συγκέντρωση των διατμητικών παραμορφώσεων.

Η εμπειρία πάντως έχει δείξει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαμόρφωση εγκάρσιων αρμών ανά 10-15 m μήκους είναι επαρκής για την ανάληψη των σεισμικών φορτίων από την επένδυση, η διαστασιολόγηση της οποίας βέβαια πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των στατικών φορτίσεων.

#### 4.5. Μηχανισμοί θραύσης

Μια απλοποιημένη και γενική προσέγγιση των προβλημάτων αστάθειας που συνήθως εμφανίζονται στις υπόγειες εκσκαφές μπορεί να γίνει σε σχέση με το βάθος διάνοιξής τους από την επιφάνεια του εδάφους (πάχος υπερκειμένων). Σε μικρά βάθη (αβαθείς διανοίξεις, με μικρό πάχος υπερκειμένων) συνήθως συναντώνται εδαφικής σύστασης γεωλογικοί μηχανισμοί καθώς επίσης και χαμηλής ποιότητας αποσαθρωμένα πετρώματα. Με την αύξηση του βάθους παρατηρείται γενικά μια βελτίωση της ποιότητας των πετρωμάτων κι αντίστοιχη μείωση των ασυνεχειών που διατέμνουν τη βραχώμαζα, οπότε σε μεγάλα βάθη οι ασυνέχειες πρακτικά ελλείπουν και η βραχώμαζα προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά του βραχώδους υλικού. Επιπρόσθετα, η αύξηση του βάθους επιφέρει αύξηση των επιτόπου τάσεων (ιδιαίτερα των γεωστατικών), οπότε σε μεγάλα βάθη αυτές παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές.

Επομένως, στα μικρά βάθη οι αναμενόμενες θραύσεις στις υπόγειες εκσκαφές έχουν σχέση με αστοχία των σχετικά χαλαρών εδαφικών υλικών τα οποία παρουσιάζουν πολύ μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης, ενώ στα ενδιάμεσα βάθη καθοριστικό ρόλο έχουν οι ασυνέχειες οπότε οι αναμενόμενες αστοχίες (πτώση σφηνών από οροφή-τοιχώματα) έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (προσανατολισμός, απόσταση κ.λπ). Τέλος, σε μεγαλύτερα βάθη, οι αναμενόμενες αστοχίες προέρχονται από θραύση λόγω υψηλών επιτόπου τάσεων (spalling, popping).

#### 4.6. Παραμορφώσεις σε σήραγγες

Οι μετρήσιμες παραμορφώσεις (συγκλίσεις) στη βραχώμαζα αρχίζουν σε μια απόσταση περίπου ίση με το μισό της διαμέτρου μπροστά από το μέτωπο. Από το σημείο αυτό και προς το μέρος της εκσκαφής, οι παραμορφώσεις βαθμιαία αυξάνονται και φτάνουν στο ένα τρίτο περίπου της μέγιστης τιμής τους στη θέση τους μετώπου εκσκαφής της σήραγγας. Η μέγιστη τιμή των παραμορφώσεων παρατηρείται σε απόσταση περίπου μιάμιση φορά τη διάμετρο, πίσω από το μέτωπο.

Γενικά, όταν η βραχώμαζα έχει ικανοποιητική αντοχή οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές ενώ αντίθετα, όταν οι παραμορφώσεις γίνονται πλαστικές, εκδηλώνεται κυρίως η θραύση. Θα έπρεπε βέβαια να τονιστεί ότι, οι πλαστικές παραμορφώσεις δε συνεπάγονται υποχρεωτικά και αστοχία της περιβάλλουσας βραχώμαζας, καθόσον η πλαστική ζώνη που αναπτύσσεται έχει ακόμα αντοχή και στην περίπτωση αυτή έχει μικρό πάχος σε σχέση με τη διάμετρο της σήραγγας, οι μόνες ενδείξεις της αστοχίας μπορεί να είναι «φρέσκες» ρωγμές ή περιορισμένης κλίμακας θραύσεις στα τοιχώματα. Αντίθετα, στην περίπτωση που η πλαστική ζώνη αποκτά σημαντικό πάχος, η χαλάρωση της βραχώμαζας οδηγεί συχνά στην αστοχία της εκσκαφής. Ο σκοπός της άμεσης υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια κ.πλ.) είναι να «ελεγχθούν» οι παραμορφώσεις της διατομής της σήραγγας και να προληφθεί η χαλάρωση της βραχώμαζας που θα οδηγήσει τελικά στην αστοχία της διατομής της σήραγγας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε σήραγγα με συγκεκριμένα στοιχεία η οποία διανοίγεται με συγκεκριμένο τρόπο, σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλουσας βραχώμαζας και επιτόπου τάσεων αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη και μοναδική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Επειδή η καμπύλη αυτή δείχνει τη σημαντική επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης της σήραγγας, για το λόγο αυτό, η σχεδιάσή της αποτελεί συνήθως ένα αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης σχεδιασμού του υπόγειου τεχνικού έργου και αναφέρεται στη μεθοδολογία σχεδιασμού της σήραγγας με τη «μέθοδο παρατήρησης» (observation method of design). Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου σχεδιασμού παραμετικά (κατά Hoek and Brown) αλλά η αξιόπιστη προσέγγισή της απαιτεί συνήθως ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά τη διάρκεια κατασκευής ή από πιλοτική σήραγγα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι άλλες μέθοδοι σχεδιασμού υπόγειων έργων είναι η εμπειρική μέθοδος (empirical method) η οποία βασίζεται στα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας.

#### 4.7. Μέθοδοι υποστήριξης σήραγγων

**Πίνακας 4.1.** Βαθμονόμηση παραμέτρων υποστήριξης υπόγειων έργων (PALMSTROM 2000)

Βαθμονόμηση προσανατολισμού κύριων αστημάτων ασυνεχειών ή ζωνών ( $C_0$ ή $C_{0s}$ )	ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ		ΟΡΟΦΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Βαθμός $C_0$ και $C_{0s}$
	παράταξη > 30°	παράταξη < 30°	Όλες οι παράταξεις		
	κλίση < 20°	κλίση < 20°	κλίση > 45°		
	κλίση = 20 - 45°	κλίση = 20 - 45°	κλίση = 20 - 45°		
	κλίση > 45°	-	κλίση < 20°		
-	κλίση > 45°	-	πολύ δυσμενής	3	
Βαθμονόμηση υπόγειου νερού (GW)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ		Κανονική ροή νερού	Ανάπτυξη πίεσης νερού *	Βαθμός GW
Μικρή επίδραση	Όλες οι ασυνέχειες		οχι	οχι	1
Μέτρια επίδραση	Ασυνέχειες με αργιλικό υλικό πλήρωσης ή δυσμενείς		ναι	ή ναι	2.5
Σημαντική επίδραση	Ασυνέχειες με αργιλικό υλικό πλήρωσης ή δυσμενείς		ναι	και ναι	5
* Πίεση μπορεί να αναπτυχθεί σε ασυνέχειες παράλληλες στα τοιχώματα ή την οροφή					
Βαθμονόμηση των επιτόπου τάσεων (SL)	Υπερκείμενα	Βαθμός SL		* Για ευστάθεια σε υψηλά τοιχώματα υπόγειων ανοιγμάτων η επιλογή υψηλών τάσεων είναι συνήθως δυσμενής. Πιθανός βαθμός SL = 0.5 – 0.75	
Πολύ χαμηλές τάσεις (είσοδοι, κ.λπ.)	< 10 m	0.1			
Χαμηλές τάσεις	10 – 35 m	0.5			
Μέτριες τάσεις	35 – 350 m	1			
Υψηλές τάσεις	> 350 m	1.5*			
Βαθμονόμηση τοιχωμάτων και οροφής (C)	C = 1 για οριζόντια οροφή, C = 1.5 / 2.2 / 3 για 30° / 45° / 60° οροφή (σε φρεάτια), C = 5 για κατακόρυφα τοιχώματα				
Βαθμονόμηση αριθμού συστημάτων ασυνεχειών (nj)	Nj = 6 για τυχais ασυνέχειες, Nj = 3 για ένα σύστημα ασυνεχειών, Nj = 2 για ένα σύστημα και ένα δευτερεύον (ή τυχais), Nj = 1.5 για δύο συστήματα, Nj = 1.2 για δύο συστήματα και ένα δευτερεύον (ή τυχais), Nj = 1 για τρία συστήματα κ.λπ.				



\* Πίεση μπορεί να αναπτυχθεί σε ασυνέχειες παράλληλες στα τοιχώματα ή την οροφή

**Όπου:**

$\sigma_\theta$  είναι οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από το υπόγειο άνοιγμα τα μέγεθος των οποίων εξαρτάται από το πεδίο των τάσεων που επικρατούν, την ανισοτροπία και από το σχήμα της υπόγειας εκσκαφής. Η εκτίμηση των εφαπτομενικών τάσεων γύρω από μια υπόγεια εκσκαφή μπορεί να γίνει με βάση τις παρακάτω απλοποιημένες σχέσεις που πρότειναν οι HOEK and BROWN (1980)

στην οροφή:  $\sigma_\theta = p_v(A \times k-1)$  σε MPA  
 στα τοιχώματα  $\sigma_\theta = p_v(B-k)$  σε MPA

όπου k:ο λόγος οριζόντιων προς κατακόρυφες τάσεις  
 $p_v$ : το μέγεθος των κατακόρυφων τάσεων όπως υπολογίζονται από τη σχέση

$p_v = 0.027z$  (σε MPA) με z το πάχος των υπερκείμενων σε m.

A και B είναι οι παράγοντες που δίνονται από τον πίνακα 1.20 ανάλογα με το σχήμα της υπόγειας εκσκαφής.

**Πίνακας 4.2. Σύστημα Q**

Παράμετροι – κριτήρια (Πίνακας 8.7)	Τιμές – Εύρος τιμών	Βαθμολογία
1. RQD	70 (βλέπε όπως RMR)	70
2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών ( $J_n$ )	Τρία συστήματα ασυνεχειών	9
3. Τραχύτητα των ασυνεχειών ( $J_r$ )	Τραχείες ή ακανόνιστες – κυματοειδείς διακλάσεις	3
4. Υλικό πλήρωσης & αποσάθρωση τοιχωμάτων ( $J_a$ )	Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. Παρουσία αμμώδη υμένα ή υμένα αποσυνθεμένου πετρώματος (όχι αργιλικής σύστασης)	2
5. Κατάσταση από πλευράς υδάτων ( $J_w$ )	Μέση εισροή νερού, με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης. Πίεση 1 – 2.5 kg / cm <sup>2</sup>	0.66
6. Συντελεστής απομείωσης τάσεων (SRF)	6.B. Συμπαγές, ικανής αντοχής πέτρωμα με προβλήματα τάσεων. Μέσες τάσεις. $\sigma_2 / \sigma_1 = (60000/100 \times 27) = 22$	1
$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$		7.70
Κατηγορία βραχώμαζας με βάση την τελική βαθμολογία (Πίνακας 1.8)		Μέτρια

**Πίνακας 4.3. Σύστημα RMR**

Παράμετροι – κριτήρια (Πίνακας 1.2 Ενότητα Α)	Τιμές – Εύρος τιμών	Βαθμολογία
1. Αντοχή βραχώδους υλικού	$\sigma_c=60$ MPa δηλ. στο εύρος τιμών του Πίνακα 1.2 (50 – 100 MPa)	7
2. RQD (%)	Εκτιμάται ο δείκτης $J_v$ $J_v=(1/0.2)+(1/0.2)+(1/0.3)=13.3$ ασυν./m <sup>3</sup> Από τη σχέση $RQD=113 - 3.3 (J_v)$ εκτιμάται $RQD \approx 70\%$ δηλ. στο εύρος τιμών του Πίνακα 1.2 (50 – 75%)	13
3. Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)	Η στρώση (B) αποτελεί το «κρίσιμο» σύστημα ασυνεχειών για το έργο (δ/νση σχεδόν παράλληλη στον άξονα και υψηλή συνέχεια) οπότε χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά της για την ταξινόμηση	
	Απόσταση (S)=0.25m δηλ. στο εύρος τιμών του Πίνακα 1.2 (0.2 – 0.6m)	10
	Από το Σχήμα 1.1 για $RQD \approx 70\%$ και (S)=0.25m για τις παραμέτρους – κριτήρια (2) και (3) προκύπτει επίσης συνολική βαθμολογία 23	
4. Κατάσταση ασυνεχειών	Από Πίνακα 1.3: Συνέχεια>20m (0), Διαχωρισμός (άνοιγμα) κανένας (6), Τραχύτητα ελαφρά τραχιές (5), Υλικό πλήρωσης: κανένα (6), Αποσάθρωση τοιχωμάτων: ελαφρά (5)	22
	Από Πίνακα 1.2: Ελαφρά τραχιές επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα. Προκύπτει βαθμολογία 25.	
	Επειδή υπάρχουν «ακριβή» στοιχεία για την κατάσταση των ασυνεχειών χρησιμοποιείται ο Πίνακας 1.3.	
5. Υπόγειο νερό	Από Πίνακα 1.2 (υγρό)	7
Συνολική βαθμολογία παραμέτρων ταξινόμησης από 1 μέχρι 5: $RMR_{bas}$		59
Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών	Η στρώση (B) που αποτελεί το «κρίσιμο» σύστημα ασυνεχειών για το έργο έχει δ/νση σχεδόν παράλληλη στον άξονα της σήραγγας και κλίση 54° οπότε από τον Πίνακα 1.4 χαρακτηρίζεται σαν «πολύ δυσμενής». Οπότε με βάση των Πίνακα 1.2 Ενότητα Β βαθμολογείται η σχετική απομείωση.	-12
Τελική βαθμολογία: $RMR = RMR_{bas} - \text{βαθμός από προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών}$		47
Κατηγορία βραχώμαζας με βάση την τελική βαθμολογία		III Μέτρια

## Σύστημα GSI

Από Πίνακα εκτιμάται ότι η τιμή του GSI είναι περίπου 68 – 72

### Πίνακας 4.4. Σύστημα RMi

Αντοχή σε μοναξονική θλίψη ( $\sigma_c$ )	60 MPa	60MPa
Ογκος βραχωδών τεμαχίων ( $V_b$ )	$J_v = (1/0.2) + (1/0.2) + (1/0.3) = 13.3 \text{ ασυν./m}^3$ $\beta = 20 + 7 \left( \frac{S_{\max}}{S_{\min}} \right)$ οπότε $\beta = 30$ $V_b = \beta J_v^{-3}$ οπότε $V_b = 0.0127 \text{ m}^3$	0.0127m <sup>3</sup>
Παράγοντας κατάστασης ασυνεχειών (jC) $(jC) = (jL) \frac{(jR)}{(jA)}$	(JR) από Πίνακα 1.17. Τραχεία – ελαφρά κυματοειδής – Βαθμός: 3 (JA) από Πίνακα 1.17. Επαφή μεταξύ τοιχωμάτων – Καθαρές ασυνέχειες - Αποσαθρωμένα τοιχώματα – Ένας βαθμός αποσάθρωσης υψηλότερα από του πετρώματος – Βαθμός: 2 (JL) από Πίνακα 1.17. Μήκος: 10 - 30 m, Υψηλή εξάπλωση, Συνεχείς - Βαθμός: 0.75	1.125
D	$D = 0.37 jC^{-0.2} = 0.36$	0.36
JP	$JP = 0.2 \sqrt{jC} V_b^D = 0.0440$	0.0440
$RMi = \sigma_c JP$ οπότε $RMi = 2.64$ (υψηλός δείκτης - υψηλή αντοχή βραχομάζας)		

### 4.8.Υλικά αγκυρίων και μέθοδοι αγκυρώσεων

Οι αγκύρια που χρησιμοποιούνται για τις, χαρακτηριστικές εφαρμογές κατασκευάζονται γενικά από τους άκαμπτους φραγμούς ή το σκέτο χάλυβα, και δένονται με το τσιμέντο ή το ρευστοκονίαμα.

Αυτό το τμήμα περιγράφει τα υλικά που είναι διαθέσιμα από μερικούς ειδικούς κατασκευαστές των προϊόντων των αγκυρίων και των όρων που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Αυτά τα προϊόντα είναι κατάλληλα για τις «μόνιμες» αγκυρώσεις, η απόδοση των οποίων πρέπει να ικανοποιήσει τα ακόλουθα κριτήρια.

1. Ένας υψηλός βαθμός της αξιοπιστίας απαιτείται τόσο για τα επικεφαλής συστατικά των

υλικών που κατασκευάζονται όσο και η ολοκληρωμένη εγκατάσταση.  
2. Τα εφαρμοσμένα δομικά φορτία μπορούν να είναι είτε στατικά είτε κυκλικά, και μπορούν να είναι τόσο υψηλά όπως 5 MN.  
3. Οι ανοχές παραμόρφωσης πρέπει να είναι χαμηλές και προβλέψιμες.  
4. Η ζωή υπηρεσιών δεν πρέπει να είναι λιγότερο από περίπου 50 έτη. Προκειμένου να καλυφθούν αυτές οι απαιτήσεις, τα υλικά πρέπει να είναι πολύ υψηλής ποιότητας και η εγκατάσταση. Οι εξεταστικές διαδικασίες σχεδιάζονται έτσι ώστε η απόδοση κάθε αγκυρίου να μπορεί να ελεγχθεί. Ο λόγος για αυτό το υψηλό επίπεδο του ποιοτικού ελέγχου είναι ότι μόλις εγκατασταθούν οι αγκύρια, είναι ουσιαστικά αδύνατη η επιθεώρηση και η αντικατάστασή τους χωρίς ανασκαφή στο θεμέλιο. Υπάρχουν πολλοί τύποι μπουλονιών βράχου διαθέσιμων στην αγορά που χρησιμοποιούνται στην εξορυκτική βιομηχανία και για την προσωρινή υποστήριξη στις σήραγγες. Αυτά τα προϊόντα περιλαμβάνουν τους διάφορους τύπους άκαμπτων μπουλονιών με τα αγκύρια τύπου υ σφηνών, και τα μπουλόνια τύπου Swellex. Γενικά αυτά τα μπουλόνια έχουν τα μήκη μέχρι περίπου 3 m και σχεδιάζονται για να παραλάβουν τα υψηλά φορτία.

#### **Διαδικασία σχεδιασμού για προεντεταμένα αγκύρια**

Όταν ένα φορτίο εφελκυσμού εφαρμόζεται σε ένα αγκύριο βράχου, το φορτίο αυτό υποστηρίζεται από τη μάζα του βράχου στον οποίο το αγκύριο έχει ενσωματωθεί.

Ο μηχανισμός με τον οποίο το φορτίο μεταφέρεται από το χάλυβα στο γύρω βράχο εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες.

1. Το φορτίο εφαρμόζεται και μεταδίδεται από τα αγκύρια χάλυβα στο βράχο και στα τοιχώματα της γεώτρησης.

2. Η ικανότητα του βράχου να αντέχει αυτές τις καταπονήσεις επηρεάζεται σημαντικά από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών στο βράχο.

#### **Τύποι διάβρωσης**

Η διάβρωση μπορεί να παρουσιαστεί ως γενική διάβρωση σε όλη την επιφάνεια του χάλυβα, ως τοπική διάβρωση αποτελεί σκασίματα και ρωγμές, όπως και ευθραυστότητας από το υδρογόνο. Γενικά τα αποτελέσματα της διάβρωσης, όπου η άνοδος και η κάθοδος είναι περίπου ίση σε έκταση, μπορεί να είναι επωφελής. Σχηματίζει μια λεπτή, σταθερή και συνεχή επίστρωση που προστατεύει το χάλυβα από περαιτέρω επιθέσεις. Η τοπική διάβρωση συνδέεται με ελαττώματα και ανομοιογένειες στους τομείς του χάλυβα, αλλά και όπου παράγει διαλείμματα σε ένα προστατευτικό στρώμα. Οι όροι υπό τους οποίους αυτοί οι τύποι διάβρωσης αναπτύσσονται, αναλύονται παρακάτω (IME A, 1982, Reeves, 1987).  
(Α) Αποτελέσματα διάβρωσης από την έντονη τοπική επίθεση σε έναν ηλεκτρολύτη. Πρόκειται για μία από τις πιο καταστροφικές μορφές διάβρωσης, επειδή η οπή θα μειώσει την διατομή του χάλυβα.

(Β) Ρηγματώδης διάβρωση

Ρηγματώδης διάβρωση λόγω καταπόνησης είναι μια ανοδική διαδικασία διάβρωσης με τη ρωγμή να διαμορφώνεται ανοδικά. Ο σχηματισμός μιας ρωγμής σε ένα χάλυβα υπό υψηλό φορτίο εφελκυσμού εκθέτει μια νέα μεταλλική επιφάνεια σε διάβρωση και τη μείωση της διατομής του χάλυβα και μπορεί τελικά να οδηγήσει σε θραύση των αγκυρίων.

### (Γ) Ευθραυστότητα υδρογόνου

Ευθραυστότητα υδρογόνου συμβαίνει όταν άτομο υδρογόνου που δημιουργείται από τη διάβρωση ή την καθοδική αντίδραση πόλωσης εισέρχεται στο μεταλλικό πλέγμα σε καθοδικές ζώνες. Σε ένα κενό το μέταλλο και το άτομο υδρογόνου θα συνδυαστούν για να σχηματίσουν το μοριακό υδρογόνο σε μια διαδικασία που παράγει εσωτερικές τάσεις και μειώνει την ολκιμότητα του χάλυβα. Σημάδια ευθραυστότητας από το υδρογόνο μπορεί να μην είναι ορατά στην επιφάνεια του χάλυβα, και μπορεί να συμβούν σταδιακά ως αποτέλεσμα της αστοχίας των αγκυρίων με το πέρασμα του χρόνου.

### (Δ) Βακτηριακή διάβρωση

Αφορά άργιλους, βάλτους και οργανικά εδάφη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα που συχνά περιέχουν θειικά ιόντα και βακτήρια που επιταχύνουν τη διάβρωση του χάλυβα. Αυτά τα βακτηρίδια υπάρχουν όταν υγρασία και οργανική ύλη είναι παρόντες, και είναι πιο δραστήρια σε επίπεδα pH μεταξύ 6,2 και 7,8. Δεν επιβιώνουν σε υψηλά επίπεδα pH. Η βακτηριακή διαδικασία διάβρωσης συνεπάγεται τη μείωση των θεικών ιόντων.



Εικόνα 4.1. Σήραγγα Μόρνου





Εικόνα 4.2. Προσωρινή υποστήριξη





Εικόνα 4.3. Μέτωπο γεωτεχνικής κατηγορίας C1,2







**Εικόνα 4.4.** Είσοδος αριστερού κλάδου











## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΦΡΑΓΜΑΤΑ

### ΓΕΝΙΚΑ

Τα φράγματα είναι κατασκευές που σχεδιάζονται και υλοποιούνται σε κοίτες ποταμών και χειμάρρων με σκοπό τη συγκέντρωση νερού σε ένα ταμιευτήρα για διάφορες χρήσεις. Πρόκειται για πολύ σημαντικά τεχνικά έργα που σήμερα πολλά από αυτά κατασκευάζονται για να εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς (παραγωγή ενέργειας, ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση, ανάσχεση πλημμυρών). Συνεπώς, απαιτούν τη διεπιστημονική συνεργασία των συναφών κλάδων, μηχανικού και γεωλόγου, έτσι ώστε το έργο (φράγμα και ταμιευτήρας) να είναι χρήσιμο αλλά και ασφαλές στη διάρκεια λειτουργίας του, δεδομένου ότι τυχόν αστοχία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες σε ζωές και περιουσίες στην κατάντη περιοχή.

Η αντίληψη που επικρατεί σήμερα είναι ότι στην κατασκευή των φραγμάτων πρωταρχικής σημασίας είναι η ασφάλεια και ακολουθεί το κόστος. Αυτό απαιτεί η θεμελίωση και τα ακρόβαθρα να παρέχουν ικανοποιητική αντοχή για τον τύπο του φράγματος που επιλέχθηκε. Επί πλέον τα υπάρχοντα σήμερα φράγματα και ταμιευτήρες είναι απαραίτητο να βρίσκονται κάτω από συνεχή παρακολούθηση, για τυχόν μεταβολές με το χρόνο που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχία με καταστροφικές συνέπειες.

Γενικά τα φράγματα είναι κατασκευές που αφ' ενός προκαλούν τη μεγαλύτερη παρέμβαση στο γεωλογικό περιβάλλον από κάθε άλλο τεχνικό έργο, αφ' ετέρου όμως εξυπηρετούν πολύ σημαντικές λειτουργίες με την ταμίευση του νερού για διάφορες χρήσεις.

Χρονολογούνται ως κατασκευές από πολύ παλιά, με το προϊστορικό φράγμα Marduk στον ποταμό Τίγηρ για τη ρύθμιση της ροής του ποταμού, το οποίο παρέμεινε μέχρι το τέλος του 13<sup>ου</sup> αιώνα μ.Χ., καθώς και το φράγμα που κατασκευάστηκε για να βοηθήσει τους Ισραηλίτες να περάσουν τον Ιορδάνη ποταμό. Το πρώτο λιθόκτιστο φράγμα χτίστηκε από τον Menes, πρώτο βασιλέα της Αιγυπτιακής δυναστείας κάπου πριν από το 4000 π.χ με στόχο την εκτροπή του ποταμού Νείλου για να κατασκευασθεί 19 Km νοτιότερα η πόλη Memphis. Το φράγμα αυτό με μήκος 457μ. και πλάτος τουλάχιστον 15μ. λειτούργησε για περίπου 4500 χρόνια.

Για τα παραπάνω ιστορικά φράγματα δεν διασώζονται πληροφορίες σχετικά με τις γεωλογικές συνθήκες θεμελίωσης. Εν τούτοις για το φράγμα Puentes στην Ισπανία που κτίστηκε μεταξύ 1785 και 1791, μήκους 282μ., πλάτους στη βάση 45μ. και ύψους 50μ., καμπύλο και θραυστό πέτρωμα και κτιστή όψη, θεμελιώθηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος του σε βραχώδης υπόβαθρο και μόνο κοντά στο κεντρικό του τμήμα σε θύλακα από χάλικες πάχους 20μ. περίπου. Αυτή η γεωλογική δυσκολία παρακάμφθηκε τεχνικά, όσον αφορά στη θεμελίωση και προστασία, πλην όμως το 1802 το φράγμα καταστράφηκε λόγω εσωτερικής διάβρωσης και απόπλυσης του παραπάνω θύλακα.

### 5. Ταξινόμηση φραγμάτων

Ο τύπος και το μέγεθος ενός φράγματος που πρόκειται να κατασκευαστεί, εξαρτάται από τις τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων σε κάθε περίπτωση υλικών κατασκευής καθώς τις ανάγκες και τις διαθέσιμες ποσότητες νερού. Γενικά, ταξινομούνται ανάλογα με το σκοπό, τη χρήση τους καθώς και τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής τους.

## **Ανάλογα με το σκοπό**

### Συγκέντρωση νερού

Συγκέντρωση νερού σε επιφανειακούς ταμιευτήρες, δηλαδή δημιουργία τεχνητών λιμνών που αποδίδονται και με τον όρο «λεκάνη κατάκλυσης».

### Εκτροπή

Εκτροπή της ροής του νερού είτε για παροχέτευσή του σε προκαθορισμένο χώρο ή για εκτέλεση εργασιών «εν ξηρώ» και διακρίνονται σε : (α) Μόνιμα και (β) Προσωρινά

### Ανάσχεσης

Ανάσχεση της ταχύτητας ροής, δηλαδή επιβράδυνση αυτής με σκοπό τον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων, την αποφυγή ή μείωση της διάβρωσης λόγω εκδήλωσης χειμαρρικών φαινομένων.

### Ρύθμιση

Ρυθμιστικά για τον έλεγχο και πρόληψη πλημμυρών, την ελεγχόμενη παροχέτευση νερού κ.λ.π.

## **Ανάλογα με τη χρήση**

### Υδροηλεκτρικά (Ενεργειακά)

### Αρδευτικά (Αρδευση)

### Υδρευτικά (Υδρευση)

### Πολλαπλής σκοπιμότητας (Υδροηλεκτρικά και αρδευτικά κ.λπ.)

Τα πλεονεκτήματα από την κατασκευή φραγμάτων πολλαπλής σκοπιμότητας είναι:

- Ορθολογική διαχείριση νερού
- Επιμερισμός δαπανών μεταξύ περισσότερων καταναλωτών ή χρηστών νερού

## **Ανάλογα με τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής**

### **-Τσιμέντινα φράγματα (Concrete dams)**

#### **(α) Βαρύτητας**

Κατασκευάζονται από άοπλο σκυρόδεμα ή και από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Τα τελευταία είναι τα λεγόμενα RCC φράγματα (Roller Compacted Concrete), όπως για παράδειγμα του ΥΗΣ Πλατανόβρυσης στο Νέστο ποταμό, όπου ένα μέρος είναι τσιμέντο και τρία τέφρα προερχόμενη από το ΘΗΣ της Πτολεμαΐδας.

Η λειτουργία των φραγμάτων αυτών στηρίζεται στο βάρος τους με το οποίο και αντισταθμίζουν τις υδροστατικές πιέσεις, την άνωση, τις σεισμικές φορτίσεις και τις δυνάμεις ανατροπής. Παράλληλα, με την κατάλληλη επιλογή της διατομής και τον έλεγχο των συνθηκών θεμελίωσης, αποτρέπεται ο κίνδυνος λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Ένα φράγμα βαρύτητας είναι μία συμπαγής, μονολιθική κατασκευή που συνήθως είναι ευθεία στο σχεδιασμό αν και μερικές φορές μπορεί να είναι ελαφρά καμπύλη και η διατομή του είναι περίπου τραπεζοειδής. (BELL 1993).

Γενικά, τα φράγματα βαρύτητας μπορεί να ανεχθούν μόνο τις μικρότερες διαφορικές κινήσεις και απαιτούν μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, δεδομένου ότι η αντίσταση στη μετατόπιση και γενικότερα η απόκριση σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις εξασφαλίζονται από το ίδιο βάρος. Εν τούτοις, φράγματα βαρύτητας έχουν κατασκευασθεί σε έντονα διερρηγμένο και διαφορετικής σύστασης (εναλλαγές) πέτρωμα και ακόμα σε ποτάμιες αποθέσεις, όπου η θεμελίωση απαιτεί εφαρμογή εξειδικευμένων μεθοδολογιών βελτίωσης πριν την κατασκευή. Πλεονεκτική θέση κατασκευής, είναι συνήθως σε στένωμα μιας κοιλάδας, όπου το υγιές πέτρωμα είναι λογικά κοντά στην επιφάνεια τόσο στη θεμελίωση όσο και στα ακρόβαθρα. Σημαντική επίσης θεώρηση σε μερικές περιοχές είναι η διαθεσιμότητα, σε λογική απόσταση, επαρκών δανειοθαλάμων με κατάλληλα αδρανή για σκυρόδεμα.

### **(β) Τοξωτά**

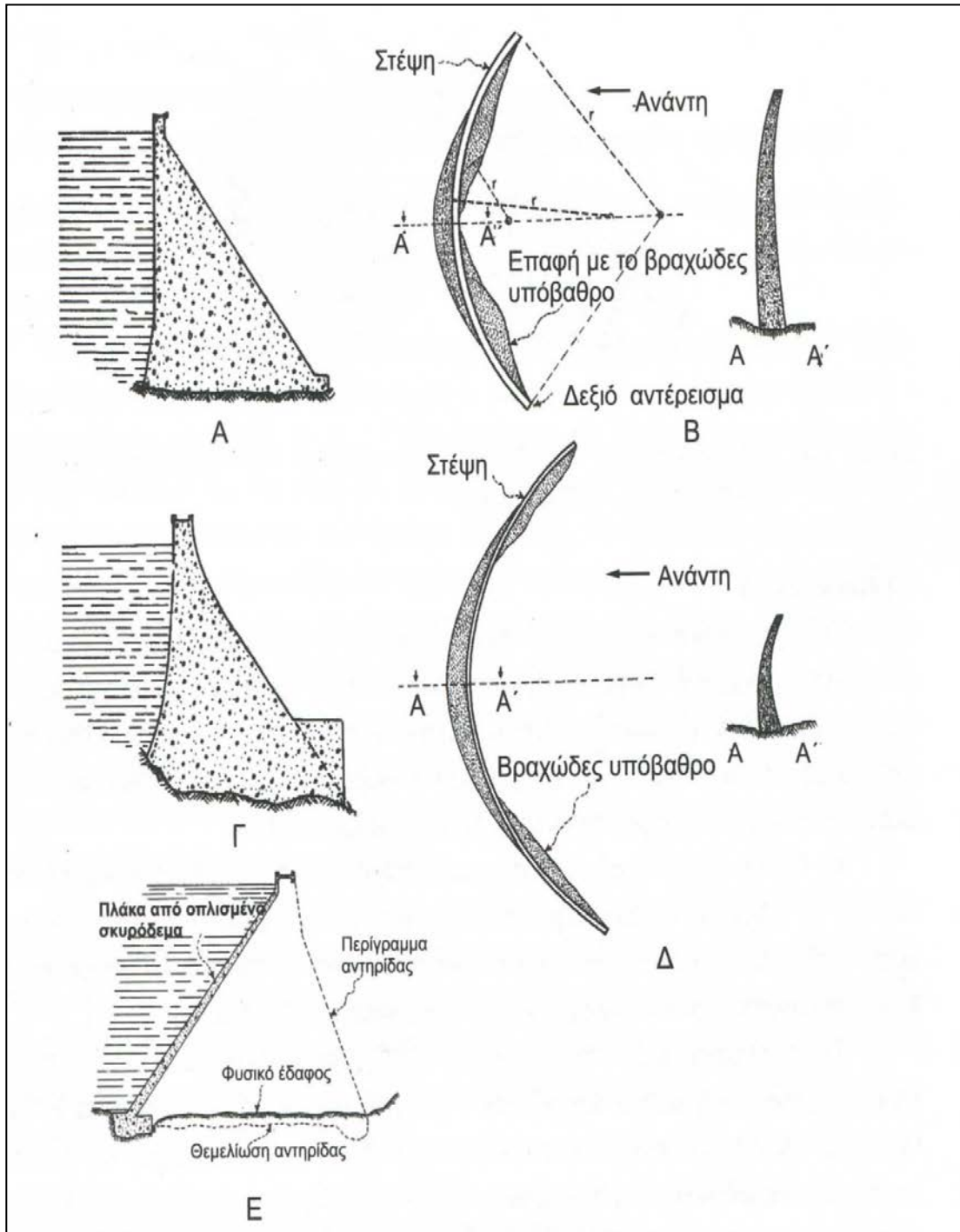
Κατασκευάζονται από άοπλο σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας αλλά ενίοτε και οπλισμένο, είναι δε καμπύλα στο σχεδιασμό με την κυρτή επιφάνεια προς τα ανάντη. Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα. Σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας επιτυγχάνεται οικονομία στον όγκο του σκυροδέματος έως και 70% ενώ όταν το πάχος τους είναι μεγάλο λειτουργούν εν μέρει και ως φράγματα βαρύτητας (βαρύτητα – τοξωτά) (Σχήμα 5.1 Γ). Σύμφωνα με τον BELL (1993) είναι δυνατόν να αντισταθούν σε μεγάλες παραμορφώσεις των σχηματισμών θεμελίωσης, αρκεί αυτές να είναι ομοιόμορφα διανεμημένες. Μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της οριζόντιας ώθησης από το νερό του ταμιευτήρα στα ακρόβαθρα με τη λειτουργία του τόξου και αυτό σε συνδυασμό με την περιορισμένη διατομή τους, σημαίνει ότι επιβάλλουν ισχυρά θλιπτικά φορτία σε στενές ζώνες στη βάση καθώς και στα ακρόβαθρα (Σχήμα 5.2). Επομένως η αντοχή της βραχομάζας, στα ακρόβαθρα και στην αμέσως κατάντη περιοχή του φράγματος πρέπει να είναι αδιαμφισβήτητη και το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) αρκετά υψηλό για να διασφαλίσει ότι η παραμόρφωσή της, κάτω από την ώθηση του τόξου, δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να επιτρέψει υπερβολικές παραμορφώσεις του τόξου.

Ιδανικές θέσεις για τα τοξωτά είναι σε στενά φαράγγια, όπου οι παρειές είναι ικανές να δεχθούν την ώθηση που προκαλείται από τη λειτουργία του τόξου. Το τόξο πρέπει να πακτώνεται καλά στα ακρόβαθρα.

Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες τοξωτών φραγμάτων:

- Σταθερής καμπυλότητας (constant-radius)
- Μεταβλητής καμπυλότητας (μείωση με το βάθος από τη στέψη) (Variable-radius)



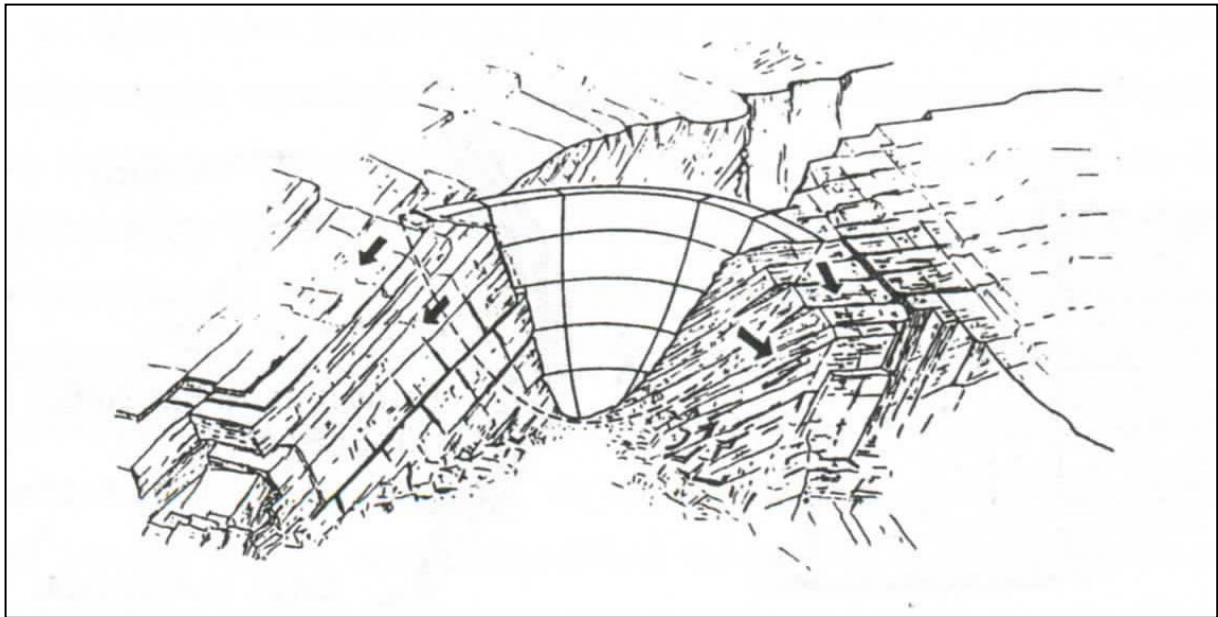


**Σχήμα 5.1.** Τομές τσιμεντινών φραγμάτων

A: Βαρύτητας, B: Τυπικό τοξωτό φράγμα με ποικίλη ακτίνα, Γ: Βαρύτητας – τοξωτό, Δ: Τοξωτό φράγμα – Δομός. Τα τόξα είναι ελλειπτικά και ποικίλης καμπυλότητας, κατά την κατακόρυφη και οριζόντια, E: Αντηριδωτό φράγμα

Όταν τα φράγματα είναι διπλής καμπυλότητας, δηλαδή κατά την οριζόντια και κατακόρυφη, τότε καλούνται «Δόμοι» (Σχήμα 5.1Δ). Τέλος, υπάρχουν τοξωτά φράγματα ή δόμοι

πολλαπλής καμπυλότητας (multiple-dome dams), τα οποία κατασκευάζονται με δύο ή περισσότερα επάλληλα τόξα ή δόμους.



**Σχήμα 5.2.** Τοξωτό φράγμα. Μεταβίβαση των πιέσεων του νερού στα ακρόβαθρα

#### **(γ) Αντηριδωτά**

Πρόκειται για πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος η οποία φέρεται σε αντηρίδες μεταβλητού πλάτους (Σχήμα 5.1E). Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις κυρίως στην επιφάνεια θεμελίωσης και λιγότερο στα αντερείσματα, ενώ σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας επιτυγχάνουν οικονομία στον όγκο του απαιτούμενου σκυροδέματος μέχρι και 90%. Σε θέσεις όπου τα αδρανή σκυροδέματος είναι σε περιορισμένες ποσότητες και το πέτρωμα θεμελίωσης ικανοποιητικό, το αντηριδωτά φράγματα αποτελούν εναλλακτική λύση σε σχέση με άλλα τσιμεντινά φράγματα, τα οποία παράλληλα απαιτούν και πολύ περιορισμένες εκσκαφές στη θεμελίωση.

Τα φράγματα αυτά συνιστούν μία πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα που κλίνει ανάντη και η οποία στηρίζεται από αριθμό αντηρίδων με άξονες κάθετα προς την πλάκα. Οι αντηρίδες στηρίζουν την πλάκα και μεταφέρουν τις στατικές και δυναμικές ωθήσεις στη θεμελίωση. Είναι περιορισμένης διατομής, εξασκώντας έτσι τεράστια φορτία στη θεμελίωση. Ο σχεδιασμός των αντηρίδων θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να αποτρέπει την ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης. Το πρόβλημα πιέσεων λόγω άνωσης (uplift pressures) είναι πρακτικά περιορισμένο στα αντηριδωτά φράγματα και υπάρχει πρόσβαση για την επιθεώρηση της θεμελίωσης αυτών.

#### **(δ) Μικτά**

Βαρύτητας – τοξωτά, τοξωτά – αντηριδωτά κ.λπ.

#### **-Χωμάτινα φράγματα (Embankments – Earth dams)**

Πρόκειται για εύκαμπτες κατασκευές που δεν απαιτούν σχηματισμούς θεμελίωσης εξαιρετικής ποιότητας (Σχήμα 5.3). Διακρίνονται σε:

**(α) Ομογενή χωμάτινα (Homogeneous earth dams)**

Σχεδόν εξ' ολοκλήρου ομοιόμορφα φυσικά υλικά κατασκευής (Σχήμα 3.3B)

**(β) ετερογενή χωμάτινα ή και Λιθορριπτα (Zone – Rolled fill and Rock – fill dams)**

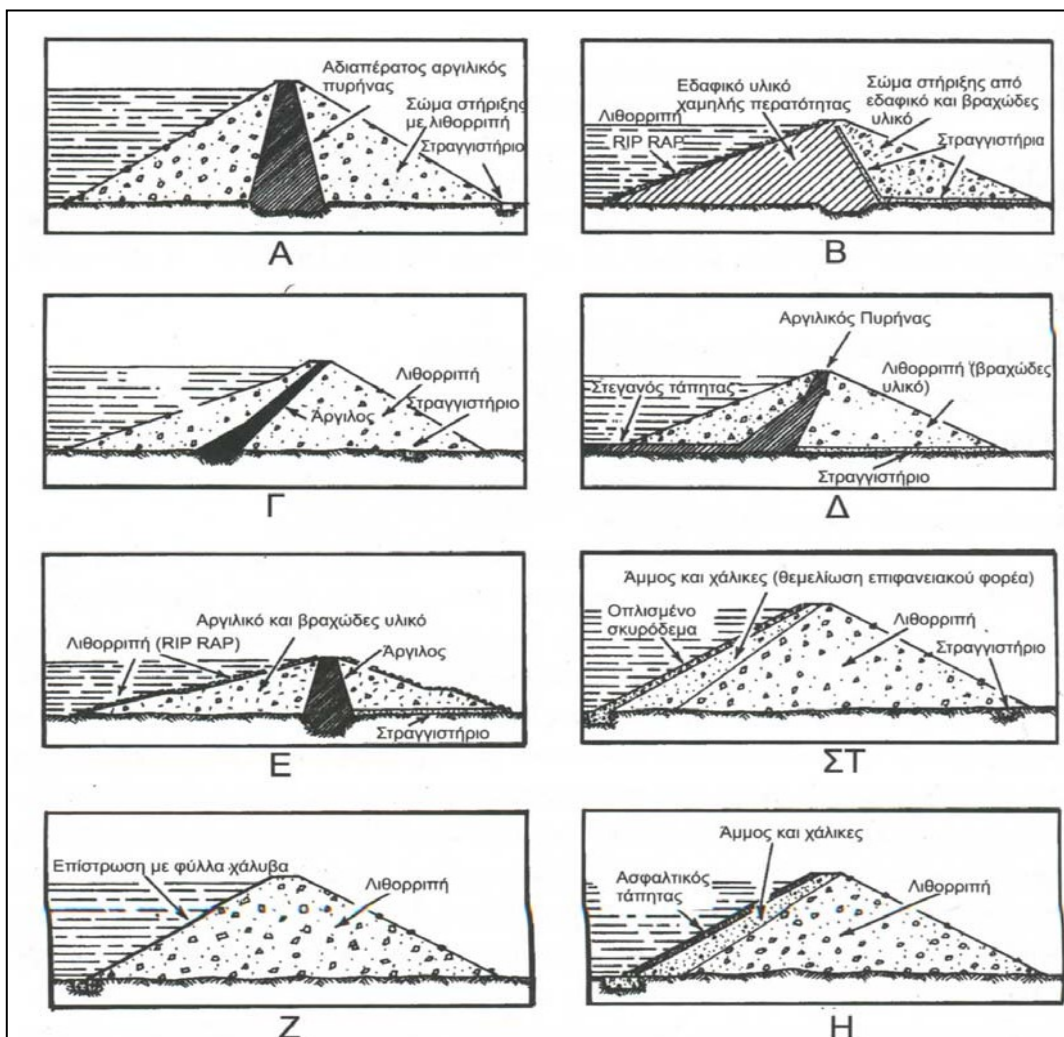
Ζωνώδεις κατασκευές με υλικά διαφόρων γεωμηχανικών ιδιοτήτων και σε διαφορετικά ποσοστά (Σχήματα 5.3 και 5.4).

Τα χωμάτινα φράγματα είναι επιχώματα εδαφικών και αδρανών υλικών (τραπεζοειδές επίχωμα) με αδιαπέρατο πυρήνα (core) για τον έλεγχο της διήθησης διαφυγής νερού. Ο πυρήνας συνήθως είναι από αργιλικά υλικά και εάν αυτά δεν είναι διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες τότε χρησιμοποιούνται πλάκες σκυροδέματος ή ασφαλτοσκυρόδεμα. Ο πυρήνας συνήθως εκτείνεται με τη μορφή όνυχα (εκσκαφής – διαφραγματικής τάφρου) εντός των σχηματισμών θεμελίωσης όταν η διήθηση κάτω από το φράγμα πρέπει να είναι και αρκετά βαθιά μερικές δε φορές επεκτείνονται και μέσα στα ακρόβαθρα ως πλευρικές τάφροι. Στραγγιστήρια άμμου ή και χαλίκων τοποθετούνται μέσα και κάτω από το φράγμα για τον έλεγχο επίσης των διαφυγών.

Λόγω της μεγάλης βάσης τους τα χωμάτινα φράγματα μεταφέρουν πολύ μικρότερες τάσεις στη θεμελίωση από τα τσιμεντένια. Επιπλέον πολύ ευκολότερα μπορεί να παραλάβουν παραμορφώσεις, όπως π.χ. αυτές λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Έτσι το χωμάτινα φράγματα έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη ποικιλία σχηματισμών θεμελίωσης από χαλαρά, μη στερεοποιημένα υλικά ποτάμιων αποθέσεων έως πολύ σκληρά πετρώματα.

**Μικτά ή Σύνθετα φράγματα (Composite dams)**

Αποτελούν συνδυασμό εύκαμπτων και άκαμπτων (βαρύτητας, χωμάτινα, αντηριδωτά) (Σχήμα 5.5)



**Σχήμα 5.3.** Ιδεατές τομές διαφόρων τύπων χωμάτινων φραγμάτων

A. Λιθόρριπτο με κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα

B. Ομογενές χωμάτινο με κατάντη σώμα στήριξης από εδαφικό και βραχώδες υλικό

Γ. Λιθόρριπτο με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα

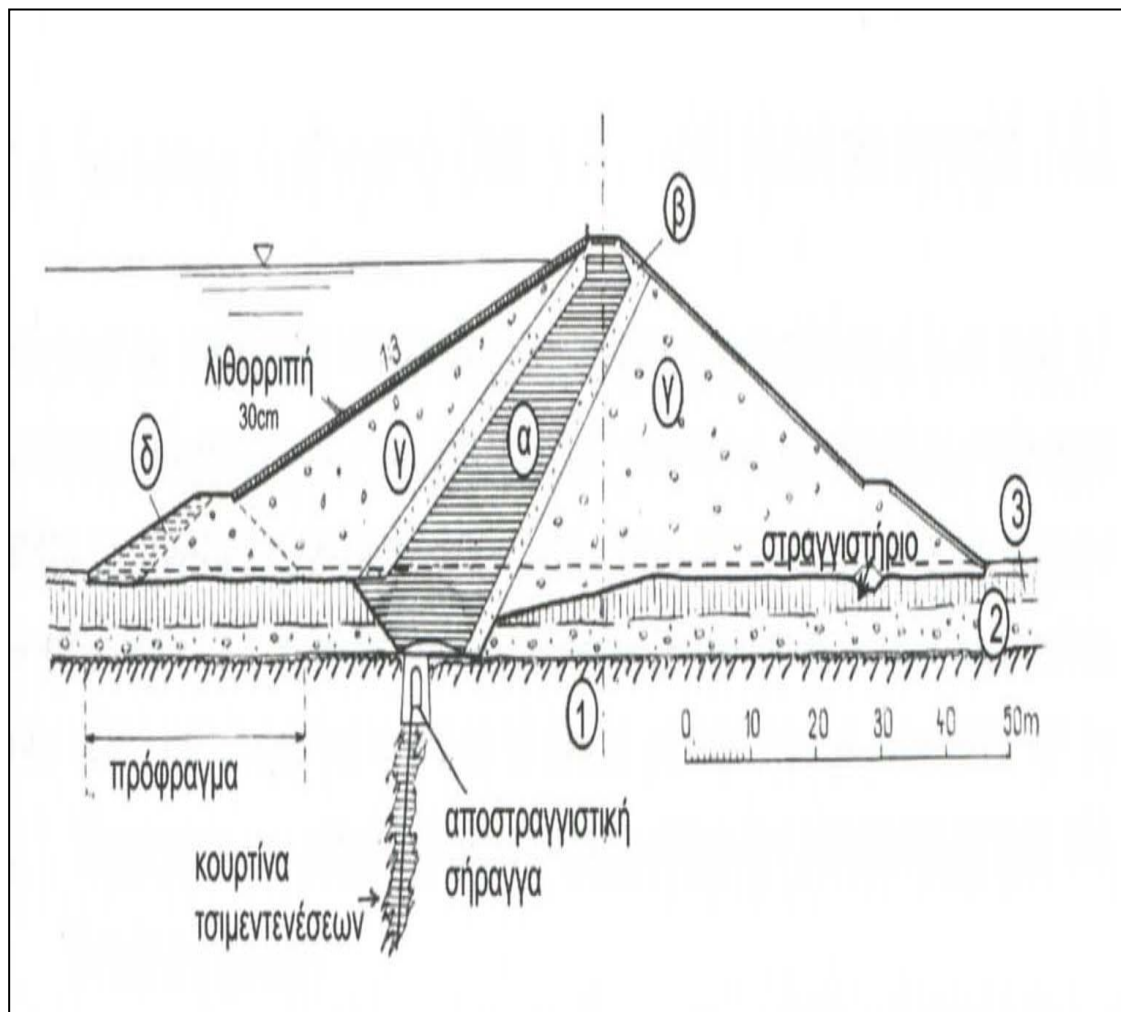
Δ. Λιθόρριπτο με αργιλικό πυρήνα που εκτείνεται ανάντη ως αδιαπέρατος τάπητας με σκοπό να ελαττώσει ή μηδενίσει τη διήθηση του νερού κάτω από το φράγμα

Ε. Φράγμα με σώμα στήριξης από διαβαθμισμένο εδαφικό υλικό και κατακόρυφο αργιλικό πυρήνα

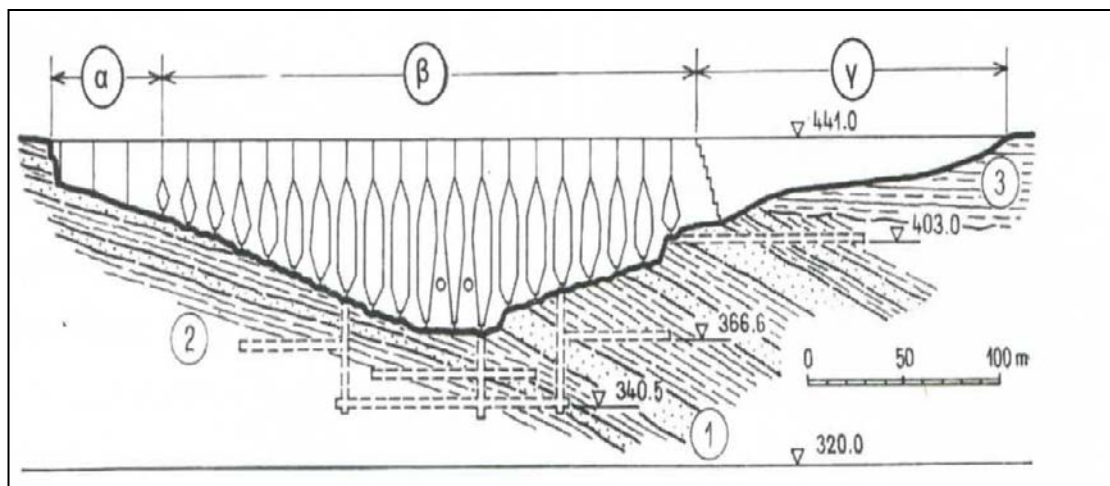
Ζ. Λιθόρριπτο με αδιαπέρατο τάπητα από οπλισμένο σκυρόδεμα, θεμελιωμένο σε στρώση από ανδρομερή υλικά

Η. Λιθόρριπτο με χαλύβδινη αδιαπέραστη μεμβράνη

Θ. Λιθόρριπτο με ασφαλτικό τάπητα ανάντη, θεμελιωμένο σε αμμοχάλικο



**Σχήμα 5.4.** Ζωνώδες χωμάτινο φράγμα θεμελιωμένο σε αδιαπέραστο υπόβαθρο. 1: Αργιλικοί σχιστόλιθοι με ψαμμίτες, 2: Άμμοι και χάλικες, 3: Αλλουβιακές λεπτομερείς αποθέσεις, α: Αδιαπέρατος πυρήνας, β: Φίλτρο άμμου, γ: Άμμοι και χάλικες, δ: Πρόφραγμα από αδιαπέραστο εδαφικό υλικό



**Σχήμα 5.5.** Τομή κατά μήκος του φράγματος. 1: Ψαμίτες, 2: Αργιλοκοί σχιστόλιθοι του Ολιγοκαίνου, 3: Αργιλικά – αμμώδη λιμναία ιζήματα του Ποντίου, α: Βαρύτητας, β: Αντηριδωτό, γ: Λιθόριπτο

### 5.1. Σήραγγα εκτροπής

Το έργο αυτό διευκολύνει τις εργασίες κατασκευής του φράγματος με την ομαλή παροχέτευση (εκτροπή) των νερών του ποταμού προς τα κατόντη. Στην περίπτωση ποταμών μεγάλης παροχής νερού, στους οποίους αναμένονται κατά το στάδιο κατασκευής πιθανές πλημμυρικές παροχές, η σήραγγα εκτροπής συνδυάζεται και με την κατασκευή προφράγματος, τελικά δε με την ολοκλήρωση του έργου και οι δύο αυτές κατασκευές στο κυρίως έργο.

### 5.2. Πρόφραγμα (Cofferdam)

Πρόκειται για προσωρινή κατασκευή με όλα τα χαρακτηριστικά μικρού χωμάτινου φράγματος, ανάντη από ένα φράγμα, για τη συγκέντρωση του νερού και ελεγχόμενη ροή αυτού στο στάδιο της κατασκευής του φράγματος μέσω της σήραγγας εκτροπής.

### 5.3. Σήραγγα επίσκεψης (Inspection gallery)

Μερικά από τα χωμάτινα φράγματα συνδυάζονται και με τη σήραγγα επίσκεψης που είναι κατά μήκος του άξονα του έργου. Μέσα από τη σήραγγα εκτελούνται οι τσιμεντενέσεις στη θεμελίωση ενώ το έργο ανυψώνεται και παράλληλα λειτουργεί ως σήραγγα αποστράγγισης, για την τοποθέτηση οργάνων κ.λπ.

### 5.4. Σήραγγες τσιμεντενέσεων

Μέσα από τα έργα αυτά εκτελούνται οι τσιμεντενέσεις σε διάφορα ύψη των αντερείσμάτων.

### 5.5. Σήραγγες αποστράγγισης (Drainage Galleries)

Αποστραγγίζουν νερά από τα αντερείσματα. Συνήθως οι σήραγγες των τσιμεντενέσεων στα αντερείσματα λειτουργούν και ως αποστραγγιστικές.

## 5.6. Κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής του ταμιευτήρα και του άξονα του φράγματος

Οι ταμιευτήρες με την ταμίευση του νερού και τη σταθεροποίηση της ροής αυτού, εξυπηρετούν κατ' αρχήν τις ποικίλες ανάγκες των καταναλωτών ενώ παράλληλα λειτουργούν ως ρυθμιστές της ροής στην κοίτη του ποταμού, στην περίπτωση πλημμυρών και αποφυγής ως εκ τούτου καταστροφών στην κατάντη περιοχή (BELL 1993). Υπάρχει μία σειρά παραγόντων που επηρεάζουν τη σκοπιμότητα και την οικονομία μιας προτεινόμενης θέσης ταμιευτήρα. Πρωταρχική σημασία έχει γενικά η θέση του φράγματος. Επίσης, σημασία θα πρέπει να δοθεί στα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής στη λεκάνη απορροής, τη στεγανότητα, την ευστάθεια των πρανών της κοιλάδας, πιθανό ρυθμό ιζηματογένεσης (sedimentation) του ταμιευτήρα, την ποιότητα νερού και στην περίπτωση μεγάλου ταμιευτήρα την πιθανότητα σεισμικής δραστηριότητας. Όταν αξιολογηθούν αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να συνεχιστούν με τις παρούσες χρήσεις γης καθώς και τους κοινωνικούς παράγοντες, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι σκοποί που θα εξυπηρετεί ο ταμιευτήρας.

Από τα πλέον ουσιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα είναι η χωρητικότητα (storage capacity) καθώς και η σχέση αυτής με την απόδοση (yield) σε νερό. Η τελευταία είναι η ποσότητα νερού που μπορεί ο ταμιευτήρας να δώσει σε μια δεδομένη στιγμή. Η μέγιστη πιθανή απόδοση ισούται με τη μέση εισροή μείον την εξατμισοδιαπνοή και τις απώλειες λόγω διαφυγών. Ασφαλής απόδοση είναι η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να αποδοθεί σε μια κρίσιμη ξηρή περίοδο. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ότι ο ταμιευτήρας σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να εκκενωθεί τελείως, δηλαδή υπάρχει νεκρό φορτίο.

Σύμφωνα με τους ATTEWELL and FARMER (1979) τα κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής των έργων αυτών έχουν, με βάση ορισμένες τροποποιήσεις και συμπληρώσεις, έχουν ως εξής:

- Διαπίστωση της σειράς των υδρολογικών ετών με τις μικρότερες απορροές, σε μια προκαθορισμένη περίοδο (συνήθως 50-100 χρόνια), με βάση τις καταγραφές της απορροής. Όταν λείπουν οι καταγραφές ή καλύπτουν μικρή περίοδο, γίνεται:

- (1) Προέκταση της περιόδου καταγραφών

- (2) Σύγκριση με παρόμοια ποτάμια

- (3) Αξιολόγηση υδρομετεωρολογικών δεδομένων μακράς περιόδου και κατάρτιση υδρολογικού ισοζυγίου για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.

- Σύγκριση (με αλληλεπίδραση) των υδρογραφημάτων (καμπυλών ροής) με καμπύλες ζήτησης νερού, για μία σειρά ξηρών ετών.

- Η σχεδίαση στηρίζεται στη μέγιστη πιθανή πλημμύρα (καθορισμός μεγίστου ύψους φράγματος σε συνδυασμό με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκχειλιστή).

- Επιλογή της θέσης του φράγματος και του ταμιευτήρα.

- (1) Απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, που συνδέεται περισσότερο άμεσα με την τοπογραφία της κοιλάδας.

- (2) Το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης απορροής (έκταση και χωροχρονικές μεταβολές της απορροής στη λεκάνη αυτή).

- (3) Η μικρή απόσταση από τους κύριους καταναλωτές (κατά το δυνατό να δεσπόζει της περιοχής υδροδότησης) ή/και μέγιστη παραγωγή ενέργειας.

- (4) Περιβαλλοντικοί περιορισμοί.

- (5) Γεωλογικές- τεχνικογεωλογικές συνθήκες

- μορφολογία λεκάνης απορροής, γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες (στρωματογραφική διάθρωση, τεκτονική, υδρογεωλογικό καθεστώς)

- στεγανότητα φράγματος και ταμιευτήρα

- ευστάθεια των πετρωμάτων θεμελίωσης και των πρανών του ταμιευτήρα

- σεισμικότητα της περιοχής

- ρυθμός απόθεσης φερτών υλικών- στερεοπαροχή

-κατάλληλη θέση εκχειλιστή και των άλλων συναφών έργων

-δανειοθάλαμοι απόληξης κατάλληλων υλικών σε μικρή σχετικά απόσταση από το έργο.

Ειδικότερα, όσον αφορά στα υδρολογικά στοιχεία απαραίτητος είναι ο καθορισμός της μέσης ετήσιας απορροής και των πλημμυρικών παροχών. Η πρώτη προσδιορίζει τις δυνατότητες και την απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, ενώ παράλληλα αποτελεί βασικό στοιχείο διαστασιολόγησης των έργων εκτροπής και υδροληψίας μαζί δε με τη μορφολογία της περιοχής καθορίζει το ύψος του φράγματος.

Έτσι, η μέση ετήσια απορροή ( $q$ ) δίνεται από τον τύπο  $q = \alpha * P [m]$ , όπου  $P$  το μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος σε  $m$  και  $\alpha$  ο συντελεστής απορροής με τον οποίο συνεκτιμώνται οι απώλειες εξατμισοδιαπνοής και διήθησης. Ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται ανάλογα με την τιμή του  $P$  και την έκταση της λεκάνης απορροής μεταξύ 0,2 και 0,5, ο προσδιορισμός του δε είναι πολύ δύσκολος γιατί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η τοπογραφία, η γεωλογία, οι κλιματικές συνθήκες, η λιθολογική σύσταση, ο βαθμός φυτοκάλυψης. Επομένως, ο μέσος ετήσιος όγκος νερού σε  $m^3$  που εισρέει στη λεκάνη κατάκλυσης είναι:

$$V = \alpha * P * F10^6$$

Σύμφωνα με τους ATTEWELL και FARMER(1979) τα κριτήρια σχεδιασμού και επιλογής του ταμιευτήρα και του άξονα του φράγματος, με βάση ορισμένες τροποποιήσεις και συμπληρώσεις, έχουν ως εξής:

- Διαπίστωση της σειράς των υδρολογικών ετών με τις μικρότερες απορροές, σε μια προκαθορισμένη περίοδο (συνήθως 50 -100 χρόνια), με βάση τις καταγραφές της απορροής. Όταν λείπουν οι καταγραφές, ή καλύπτουν μικρή περίοδο, γίνεται:

(1) προέκταση περιόδου καταγραφών

(2) σύγκριση με παρόμοια ποτάμια

(3) αξιολόγηση υδρομετεωρολογικών δεδομένων μακράς περιόδου και κατάρτιση υδρολογικού ισοζυγίου για την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.

- Σύγκριση ( με αλληλεπίθεση) των υδρογραφημάτων (καμπύλη ροής) με καμπύλες παροχής νερού και καμπύλες ζήτησης νερού , για μια σειρά ξηρών ετών.

- Η σχεδίαση στηρίζεται στη μέγιστη πιθανή πλημμύρα (καθορισμός μέγιστου ύψους φράγματος σε συνδυασμό με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκχειλιστή).

- Επιλογή της θέσης του φράγματος και του ταμιευτήρα

(1) απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, που συνδέεται περισσότερο άμεσα με την τοπογραφία της κοιλάδας

(2) το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης απορροής (έκταση και χωροχρονικές μεταβολές της απορροής στη λεκάνη αυτή)

(3) η μικρή απόσταση από τους κύριους καταναλωτές (κατά το δυνατόν να δεσπόζει της περιοχής υδροδότησης) ή/και μέγιστη παραγωγή ενέργειας.

(4) περιβαλλοντικοί περιορισμοί

(5) γεωλογικές – τεχνικογεωλογικές συνθήκες

- μορφολογία λεκάνης απορροής, γεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες (στρωματογραφική διάθρωση, τεκτονική , υδρογεωλογικό καθεστώς)

- στεγανότητα φράγματος και ταμιευτήρα

- ευστάθεια των πετρωμάτων θεμελίωσης και των πρανών του ταμιευτήρα

- σεισμικότητα της περιοχής

- ρυθμός απόθεσης φερτών υλικών – στερεοπαροχή

- κατάλληλη θέση εκχειλιστή και των άλλων συναφών έργων

- δανειοθάλαμοι απόληξης κατάλληλων υλικών σε μικρή σχετικά απόσταση από το έργο

(6) γεωμηχανικές παράμετροι (αντοχή και παραμορφωσιμότητα) των σχηματισμών θεμελιώσεων των έργων και της λεκάνης κατάκλυσης (ταμιευτήρα)

## ΤΥΠΟΙ ΚΟΙΛΑΔΩΝ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

### -ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΦΑΡΑΓΓΙΑ

Λεπτά τοξωτά φράγματα ή δομοί, με την προϋπόθεση ότι τα ακρόβαθρα των αντερεισμάτων αντέχουν σε υψηλές πιέσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, το πέτρωμα μπορεί να ενισχυθεί ή ακόμα να εκσκαφτεί μέχρι την υγιή φάση και να αντικατασταθεί με τσιμέντο έτσι ώστε να σχηματισθούν τεχνητά ακρόβαθρα.

Οι δομοί είναι ακόμα πιο λεπτοί από τα τοξωτά φράγματα και το κέλυφος τους έχει τη μεγαλύτερη δυνατή αντοχή.

### -ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΣΤΕΝΕΣ ΚΟΙΛΑΔΕΣ

(α) Μικτά φράγματα, βαρύτητας – τοξωτά: Θεμελιώνονται ιδιαίτερα σε πετρώματα ετερογενή ως προς τις γεωμηχανικές ιδιότητες. Στα ασθενή υλικά θεμελιώνεται το τμήμα βαρύτητας και στα ανθεκτικά υλικά το τοξωτό τμήμα.

(β) Παχιά τοξωτά φράγματα: Το πάχος μικρότερο από ένα φράγμα βαρύτητας (65% περίπου) και μεγαλύτερο από ένα τοξωτό φράγμα.

### - ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΦΑΡΔΙΕΣ ΚΟΙΛΑΔΕΣ

Κάθε τύπος φράγματος μπορεί να κατασκευαστεί εκτός από το αυτοτελές τοξωτό φράγμα (λεπτό ή παχύ). Ειδικότερα, ο τύπος φράγματος εξαρτάται από τη γεωλογία της περιοχής και την απόσταση για τα υλικά κατασκευής.

(α) Φράγματα βαρύτητας (τοιχοποιία ή από συμπαγές σκυρόδεμα)

(β) Φράγματα βαρύτητας – αντηριδωτά. Τα φράγματα αυτά κατασκευάζονται όταν τα πετρώματα θεμελιώσεων έχουν μέτρια φέρουσα ικανότητα.

(γ) Αντηριδωτά φράγματα. Θεμελίωση σε εδάφη ή πετρώματα ανθεκτικά σε άμεσες πιέσεις και ολισθήσεις.

(δ) Φράγματα πολλαπλής καμπυλότητας. Είναι μια ποικιλία των αντηριδωτών φραγμάτων που προσφέρονται σε εναλλαγές σκληρών και μαλακών υλικών με στήριξη των αντηρίδων στο σκληρό πέτρωμα.

(ε) Λιθόρριπτα φράγματα (ετερογενή χωμάτινα φράγματα). Προσφέρονται καλύτερα από όλους τους τύπους φραγμάτων σε πλατειές κοιλάδες.

(στ) Χωμάτινα φράγματα. Απαιτείται μεγάλη ποσότητα υλικού σε λογικά κοντινές αποστάσεις από τον τόπο κατασκευής.

### -ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΕ ΠΕΔΙΑΔΕΣ

Κατά κανόνα είναι φράγματα εκτροπής, χωμάτινα ή λιθόρριπτα πολύ μεγάλου μήκους.

## 5.7. Τύποι φραγμάτων – Γεωλογικό υπόβαθρο και ιδιαιτερότητες σχεδιασμού αυτών

Σύμφωνα με τον WALTERS (1971) οι τοπογραφικές και τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες για τους διάφορους τύπους φραγμάτων έχουν ως εξής:

### **ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ:**

- Πέτρωμα μεγάλης φέρουσας ικανότητας ( $8.5 - 11 \text{ kg/cm}^2$  ή  $0.85 - 1.1 \text{ MPa}$  τουλάχιστον) στην επιφάνεια ή σε βάρος  $< 7 - 10 \mu$ .
- Τα αδρανή για το σκυρόδεμα πρέπει να βρίσκονται κοντά ( $8 - 15 \text{ km}$ ) στην κατασκευή και να είναι προσιτά.
- Μήκος στέψης  $\approx 5$ πλάσιο τουλάχιστον του ύψους από τη θεμελίωση



- Αντιμετωπίζουν τις δυνάμεις του νερού (υδροστατικές), που τείνουν να το ανατρέψουν ή να προκαλέσουν ολίσθηση, με το βάρος τους (χαμηλό κέντρο βάρους).
- Κατά τη σχεδίαση τους πρέπει να διπλασιάζεται το φορτίο του νερού για την εκτέλεση των υπολογισμών ευστάθειας, γιατί δεν είναι δυνατή η αποφυγή της πίεσης του νερού των πόρων στα θεμέλια. Συχνά μια ελαφριά καμπυλότητα αυξάνει την ευστάθεια, επιδέχεται μικρές συστολές και διαστολές που προκαλούνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και κλείνουν οι ρωγμές των πετρωμάτων, από τη μεταβίβαση σε αυτά μέρους των πιέσεων.
- Τριγωνική διατομή με πλάτος της βάσης ίσο τουλάχιστον με τα 2/3 του ύψους μέχρι τη στέψη.
- Απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος σε σχέση με τους άλλους τύπους φραγμάτων.
- Είναι τα πιο ασφαλή φράγματα.
- Είναι κατά 15% φτηνότερα από τα αντίστοιχα χωμάτινα στην ίδια θέση.

### **ΑΝΤΗΡΙΔΩΤΑ:**

- Πέτρωμα μεγάλης φέρουσας ικανότητας ( $22 - 32 \text{ kg/cm}^2$  ή  $2.2 - 3.2 \text{ MPa}$  τουλάχιστον).
- Σημαντική οικονομία σκυροδέματος ( $1/2 - 2/3$  του ολικού όγκου σκυροδέματος που απαιτείται για το αντίστοιχο φράγμα βαρύτητας).
- Χρειάζεται προστασία το σκυρόδεμα από το νερό (αποσάθρωση).
- Μείωση των ανοδικών πιέσεων του νερού (μείωση της επιφάνειας της βάσης θεμελίωσης).
- Πιο οικονομικό από τα φράγματα βαρύτητας, όταν το ύψος ξεπερνά τα 13 μ. και το μήκος είναι μεγάλο.
- Προσφέρονται για περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη ή δυσκολία αποστολής σκύρων για το σκυρόδεμα.
- Σε τομή είναι όμοια με τα φράγματα βαρύτητας αλλά με ανάντη πλευρές μικρότερης κλίσης.
- Στην ανάντη πλευρά πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα στηρίζεται σε μια σειρά από όρθιες αντηρίδες, που το πάχος και η απόσταση τους καθορίζονται από το βάρος της πλάκας και την πίεση του νερού του ταμιευτήρα στην πλάκα.
- Οι αντηρίδες κατανέμουν το συνολικό φορτίο (πλάκας και υδροστατική πίεση) με την ανάπτυξη πλευρικής συνιστώσας της δύναμης στα θεμέλια, που ανθίστανται στην υδροστατική ώθηση.

### **ΤΟΞΩΤΑ:**

Οι γεωτεχνικές απαιτήσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τοξωτών φραγμάτων είναι:

- Φράγματα πολλαπλής καμπυλότητας. Είναι ποικιλία των αντηριδωτών φραγμάτων, κατάλληλα για φαρδιές κοιλάδες, όπου η φέρουσα ικανότητα των πετρωμάτων θεμελίωσης είναι της τάξης των  $2.2 - 3.2 \text{ MPa}$ .
- Παχειά τοξωτά φράγματα. Προσφέρονται για κοιλάδες με λόγο, πλάτος (στη στέψη) προς ύψος μεταξύ 3 και 5 (φαρδιές κοιλάδες), με πολύ ανθεκτικά πετρώματα θεμελίωσης ιδιαίτερα στα αντερείσματα ( $>3.22 \text{ MPa}$ ).
- Λεπτά τοξωτά φράγματα. Προσφέρονται για κοιλάδες με λόγο πλάτος/ύψος  $<3$  και ακτίνα  $<152 \mu$ . Η αντοχή των αντερεισμάτων πρέπει να είναι εξαιρετικά μεγάλη,  $5.35 - 7.49 \text{ MPa}$ , ενώ η ώθηση του φράγματος θα πρέπει να συνεκτιμάται με το είδος και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.
- Δομοί. Είναι ιδεώδεις για φαράγγια με λόγο, χορδή/ύψος  $<3$ . Με την αύξηση του πάχους των αντερεισμάτων είναι η μείωση της πραγματικής φέρουσας πίεσης.

### **ΛΙΘΟΡΡΙΠΤΑ:**

Κατασκευάζονται κάτω από τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Όταν το έδαφος θεμελίωσης δεν προσφέρονται για την κατασκευή τσιμέντινου φράγματος, οποιουδήποτε τύπου (χαμηλή αντοχή των πετρωμάτων στη θέση του φράγματος).
- Δυνατότητα ανάπτυξης λατομείων σε κατάλληλα για τη λιθορριπή πετρώματα στη γειτονική περιοχή ή στην ίδια την εκσκαφή. Τα πετρώματα αυτά πρέπει να είναι σκληρά και να αποσαθρώνονται δύσκολα.
- Ύπαρξη αρκετής ποσότητας αργίλου στην κοντινή περιοχή για την κατασκευή του στεγανού κατακόρυφου ή κεκλιμένου πυρήνα. Όταν δεν υπάρχει άργιλος κατασκευάζεται ανάντη τάπητας με τσιμέντο, ασφαλτικό ή χαλύβδινο.
- Το πλάτος της κοιλάδας και η τοπογραφία να επιτρέπουν την προσέγγιση και το χειρισμό βαριών μηχανημάτων (εκσκαφείς, μπουλντόζες κ.λ.π).

### **ΧΩΜΑΤΙΝΑ:**

Η κατασκευή τους ελέγχεται από τις ποσότητες και το είδος των υλικών που υπάρχουν κοντά στην περιοχή του έργου και από το μέγεθος και την γεωμετρία του φράγματος. Πολλά μικρά φράγματα αποτελούνται εξολοκλήρου από ένα είδος υλικού (αλλούβια, αποσαθρωμένο υπόβαθρο κ.λπ.). Τα μεγάλα όμως χωμάτινα φράγματα έχουν γενικά ζωνώδη κατασκευή από ποικίλα υλικά, που εξάγονται από διαφορετικές τοπικές πηγές ή κατασκευάζονται από μια πηγή με μηχανικό ή υδραυλικό διαχωρισμό, σε κλάσματα με διαφορετικές ιδιότητες. Στα ζωνώδη φράγματα ένα σημαντικό στοιχείο είναι ο στεγανός τάπητας ή πυρήνας που αποτελείται από αργιλικά υλικά. Όταν απουσιάζουν τέτοια υλικά κατασκευάζεται λιθόρριπτο φράγμα με τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο έλεγχος των διηθήσεων μέσα και κάτω από το φράγμα γίνεται με στραγγιστήρια από πορώδη υλικά, μέσα ή αμέσως πίσω από το φράγμα. Τα χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα κατασκευάζονται εκεί που οι γεωμηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι χαμηλές και μπορούν να δεχτούν καθιζήσεις ακόμα και διαφορετικές, κατά και μετά την κατασκευή, μια και τα ακρόβαθρα μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές μετατοπίσεις χωρίς θραύση. Το μήκος συχνά φτάνει τα πολλά km.

### **ΣΥΝΘΕΤΑ:**

Επιβάλλεται συχνά στην ίδια κοιλάδα, η κατασκευή σύνθετων φραγμάτων, όταν η γεωλογική δομή της αποτελείται από πετρώματα με διαφορετικές γεωμηχανικές ιδιότητες ή η τοπογραφία παρουσιάζει μορφολογική ποικιλία.

#### **5.8. Αστοχίες σε φράγματα με βάση τα γεωλογικά – τεκτονικά κριτήρια**

Οι αστοχίες των φραγμάτων μέχρι σήμερα δείχνουν ότι οι κύριες αιτίες συνίστανται (1) στην αδυναμία υπολογισμού εκχειλιστών ικανοποιητικής δυναμικότητας και (2) στην αστοχία του σχηματισμού θεμελίωσης, που ουσιαστικά είναι θέμα γεωλογικής σύστασης και δομής (LEGGET AKD HATHEWAY 1988). Περίπου 100 αστοχίες μεταξύ 1864 και 1876 οφείλονται στην υποσκαφή των υδροπερατών σχηματισμών κάτω από την θεμελίωση του έργου. Επίσης περισσότερες από 60 αστοχίες σε χωμάτινα φράγματα σημειώθηκαν μεταξύ 1869 και 1919. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών λόγω γεωλογικών αδυναμιών είναι αυτά του St Francis στην Καλιφόρνια το 1928, Malpasset στη νότιο Γαλλία το 1959, Vajont στην Ιταλία το 1963 και τον ίδιο χρόνο το φράγμα του Περδίκια κοντά στην Πτολεμαΐδα, το 1976 το φράγμα του Vestre Gansdal στη Νορβηγία καθώς και το Teton φράγμα στο Idaho των Η.Π.Α. Επίσης το 1963 αστόχησε ο ταμιευτήρας στο Baldwin Hills του L.A, Καλιφόρνια. Η Διεθνής Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (1973) έδειξε ότι από ένα σύνολο 9000 μεγάλων φραγμάτων (ύψους πάνω από 15m.) που κατασκευάστηκαν από το 1900 έως το 1965, 200 παρουσίασαν σοβαρά ατυχήματα και 90 καταστράφηκαν. Και στις δύο περιπτώσεις η έρευνα

έδειξε ότι τα περισσότερα από τα μισά περιστατικά οφείλονταν σε γεωλογικά αίτια. Επίσης το 10% τουλάχιστον από το σύνολο των έργων παρουσίασαν εκπλήξεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους (MAPINOS 1994).

Ο BEAVIS (1985) διαπιστώνει κατ'αρχήν ότι η εμπειρία από την κατασκευή φραγμάτων και των αστοχιών που σημειώθηκαν καταδεικνύει ότι κανένα γεωλογικό στοιχείο δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται πριν ή ερευνηθεί σωστά. Στη συνέχεια αναφέρεται στο Monar Dam της Σκωτίας, διπλής καμπυλότητας, που θεμελιώθηκε σε συνεκτικούς, διερρηγμένους μεταμορφωμένους σχηματισμούς. Αναλυτικότερα στη θεμελίωση του φράγματος αυτού εντοπίστηκαν 4 συστήματα διαρρήξεων, ενώ οι περισσότερες από τις διαρρήξεις ήταν πληρωμένες με αργιλικό υλικό (γωνία εσωτερικής τριβής διαρρήξεων  $50^{\circ}$  περίπου και πληρωμένες με αργιλικό υλικό  $25^{\circ}$ ). Η ανάλυση της επίδρασης των διαρρήξεων στην ευστάθεια του φράγματος κατέστησε απαραίτητη την εφαρμογή προγράμματος τσιμεντενέσεων για τη δημιουργία κουρτίνας, με σκοπό (1) την ελάττωση των διαφυγών κάτω από το φράγμα, (2) την πλήρωση των διαρρήξεων και τη μείωση της παραμόρφωσης της θεμελίωσης και (3) την αύξηση της διατμητικής αντίστασης κατά μήκος των διαρρήξεων. Το Τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας της Γεωλογικής Εταιρίας της Αμερικής εξέδωσε δύο τόμους όπου παρατίθεται σειρά παραδειγμάτων από περιπτώσεις φραγμάτων που αστόχησαν ή αντιμετώπισαν σοβαρά προβλήματα με βάση γεωλογικά – τεκτονικά κριτήρια, ενώ παράλληλα αναφέρονται και τα μέτρα που λήφθηκαν σε κάθε περίπτωση. Αναλυτικότερα, στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής:

Ο James (1968), αναφερόμενος στον ταμιευτήρα Baldwin Hills επισημαίνει ότι αστόχησε λόγω μετακίνησης ρήγματος στη θεμελίωση και τονίζει ότι μία κατασκευή είναι μόνο τόσο ανθεκτική όσο και η ασθενέστερη ουσιαδής παράμετρος αυτής. Επίσης, αναφέρει ότι με την αστοχία αυτή επαληθεύτηκε ο GRUMMER (1963) ο οποίος σε εργασία του σχετικά με τις αστοχίες φραγμάτων τονίζει ότι «κάθε φράγμα που συγκρατεί νερό παρουσιάζει ένα πιθανό κίνδυνο που ποτέ δεν θα πρέπει να υπο ή υπερεκτιμηθεί. Ο κίνδυνος αιφνίδιας καταστροφής είναι πάντοτε υπαρκτός και ενώ η γνώση και επαγρύπνηση μπορεί να τον ελαττώσουν ποτέ δεν θα μπορεί να τον εξαφανίσουν».

- Οι WAHLSTROM and HORNBACK (1968) αναφέρουν ότι η κατασκευή του Dillon Dam στο Κολοράντο και σε ιζηματογενή πετρώματα, που διατέμνονται από πολλά ρήγματα και τα στρώματα είναι διερρηγμένα, απαίτησε την εκτέλεση εκτεταμένου προγράμματος τσιμεντενέσεων στη θεμελίωση.

- Επίσης οι WAHLSTROM et al (1968) τονίζουν τη σημασία της διογκωσιμότητας των θραυσμένων ή εξαλλιοωμένων υλικών πλήρωσης σε ρηξιγενείς ζώνες και θεωρούν απαραίτητη τη διερεύνηση των ιδιοτήτων διόγκωσης και της ορυκτολογικής σύστασης αυτών, στοιχεία που βοηθούν στην εξέταση δημιουργίας πιθανών προβλημάτων κατά μήκος των ρηγμάτων αυτών.

- Οι WAGGONER et al (1968) περιγράφουν τις γεωλογικές συνθήκες και τις πρόσθετες απαιτήσεις των κατασκευών στην περίπτωση θεμελίωσης φραγμάτων και των συναφών έργων. Ειδικότερα επισημαίνουν τον αυξημένο αριθμό κατασκευής φραγμάτων τα τελευταία χρόνια που καταλήγουν στην απαίτηση από μέρους των κατασκευαστών σοβαρών αποζημιώσεων, λόγω διαφορετικών συνθηκών, ελλιπούς πληροφόρησης κ.λπ. Θεωρούν δε ότι οι απαιτήσεις λόγω αλλαγής των γεωλογικών συνθηκών θα ήταν πολύ μικρότερες εάν δινόταν στον κατασκευαστή πλήρης αναφορά σχετικά με την ερμηνεία των διαφόρων στοιχείων και τα πιθανά κατασκευαστικά προβλήματα. Μη αναμενόμενα προβλήματα που παρουσιάζονται με την εκσκαφή των θεμελίων και ακρόβαθρων είναι η κύρια πηγή για αποζημιώσεις, όπως π.χ. αστάθεια των πρανών και η ανακάλυψη ρηξιγενών ζωνών (ρηγμάτων). Επισημαίνεται ότι τα προβλήματα αυτά προκαλούν καθυστερήσεις, λόγω του χρόνου διερεύνησης των φαινομένων και θεραπείας αυτών με διάφορους τρόπους, όπως πρόσθετες εκσκαφές, επούλωση, σταθεροποίηση κ.λπ.

Τέλος οι JAMES et al (1988) δίνουν μέσα από μια σειρά αστοχιών σε φράγματα το διδάγματα που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση (τα αίτια των αστοχιών συνδέονται με γεωλογικά – τεκτονικά στοιχεία). Αναλυτικότερα, περιγράφονται οι αστοχίες του Baldwin Hills ταμιευτήρα, του φράγματος Malpasset, του φράγματος St. Francis, του φράγματος Teton, του ταμιευτήρα Vajont και του φράγματος Walter Bouldin.

Ο MAPINOΣ (1994) αναφέρει με λεπτομέρεια τις αστοχίες σχετικά με τα φράγματα St. Francis στην Καλιφόρνια, Malpasset στη Γαλλία, Vajont στην Ιταλία και Περδίκια κοντά στην Πτολεμαΐδα - Ελλάδα.

Οι παραπάνω αστοχίες επισημαίνουν ότι δεν είναι αποτελεσματική και η πλέον λεπτομερής, ποιοτικά και ποσοτικά, έρευνα των ιδιοτήτων των σχηματισμών, εδαφικών και βραχωδών, της θέσης θεμελίωσης εάν πρώτη η γεωλογική έρευνα δεν καθορίσει τους χαρακτήρες και τις ιδιαιτερότητες αυτών καθώς και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος της θέσης.

### **5.9. Σεισμική επικινδυνότητα – Ευστάθεια φραγμάτων**

Όσον αφορά στη σεισμική επικινδυνότητα είναι απαραίτητη η αξιολόγηση όλων των γεωλογικών και σεισμολογικών στοιχείων για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις των σεισμών στο έργο. Γενικά, οι βλάβες στις κατασκευές σε συμπαγή πετρώματα είναι πολύ μικρότερες από τις κατασκευές σε χαλαρά υλικά και μάλιστα κορεσμένα. Τα τσιμέντινα φράγματα πάνω σε συμπαγή, υγιή πετρώματα, κατά κανόνα δεν παθαίνουν σοβαρές ζημιές από τους σεισμούς. Τα χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα, αν και επηρεάζονται από τα σεισμικά κύματα περισσότερο απ'ότι τα τσιμέντινα, γενικά έχουν την ικανότητα να δεχθούν μικρές μετατοπίσεις χωρίς θραύση, εφόσον τα υλικά θεμελίωσης δεν είναι πολύ ασθενή ή δεν έχουν υποστεί μετατόπιση λόγω κινήσεων εφελκυσμού κατά μήκος ζωνών διάρρηξης μέσα στο σώμα του φράγματος.

Ακόμα όμως και όταν δεν υπάρχουν ορατά σημεία βλάβης στα φράγματα λόγω σεισμού, είναι πιθανόν μικρές μετατοπίσεις στα θεμέλια να αλλάξουν τις συνθήκες ροής του υπόγειου νερού μέσα στο φράγμα και κατά θέσεις να διαρρήξουν ή να ξανανοίξουν σφραγισμένες από τις τσιμεντενέσεις ρωγμές. Αντίθετα, στον ταμιευτήρα είναι δυνατόν να εκδηλωθούν εκτεταμένες μετακινήσεις μαζών, ακόμα και μετά από ασθενείς σεισμικές δονήσεις.

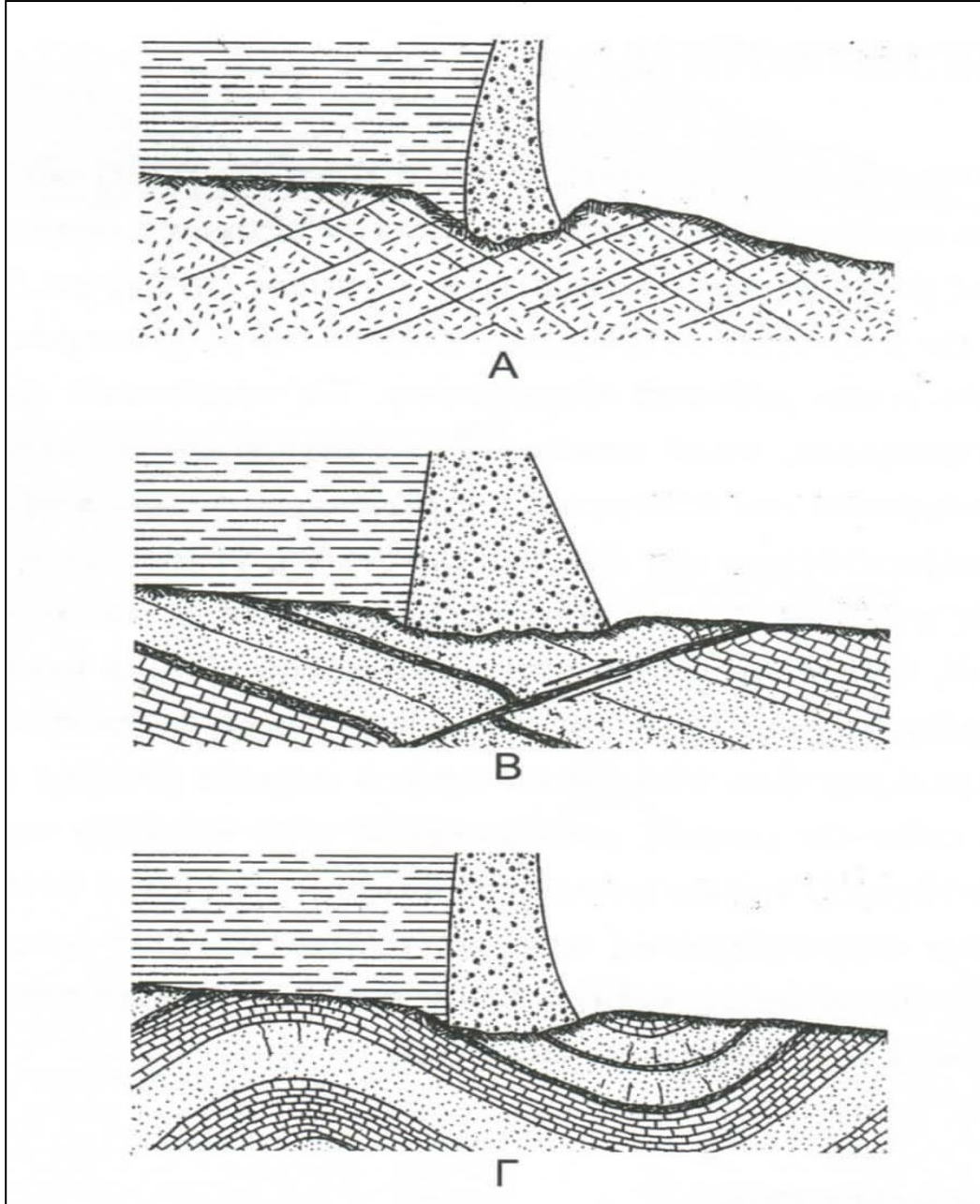
### **ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ**

Γενικά οι θραύσεις στις επίπεδες ή αβαθείς σχεδόν οριζόντιες θεμελιώσεις των λιθόρριπτων και χωμάτινων φραγμάτων δεν προκαλούνται από διατμητικές μετατοπίσεις, λόγω του φορτίου του φράγματος, αλλά λόγω ισχυρών διηθήσεων είτε στο εσωτερικό του φράγματος ή κάτω απ' αυτό ή λόγω θεμελίωσης σε στρώματα που έχουν μεγάλες κλίσεις προς τα ανάντη ή κατόντη. Τα τσιμέντινα φράγματα ασκούν συγκεντρωμένα φορτία καθώς συμπεριφέρονται σαν συμπαγείς κατασκευές (WAHLSTROM 19740).

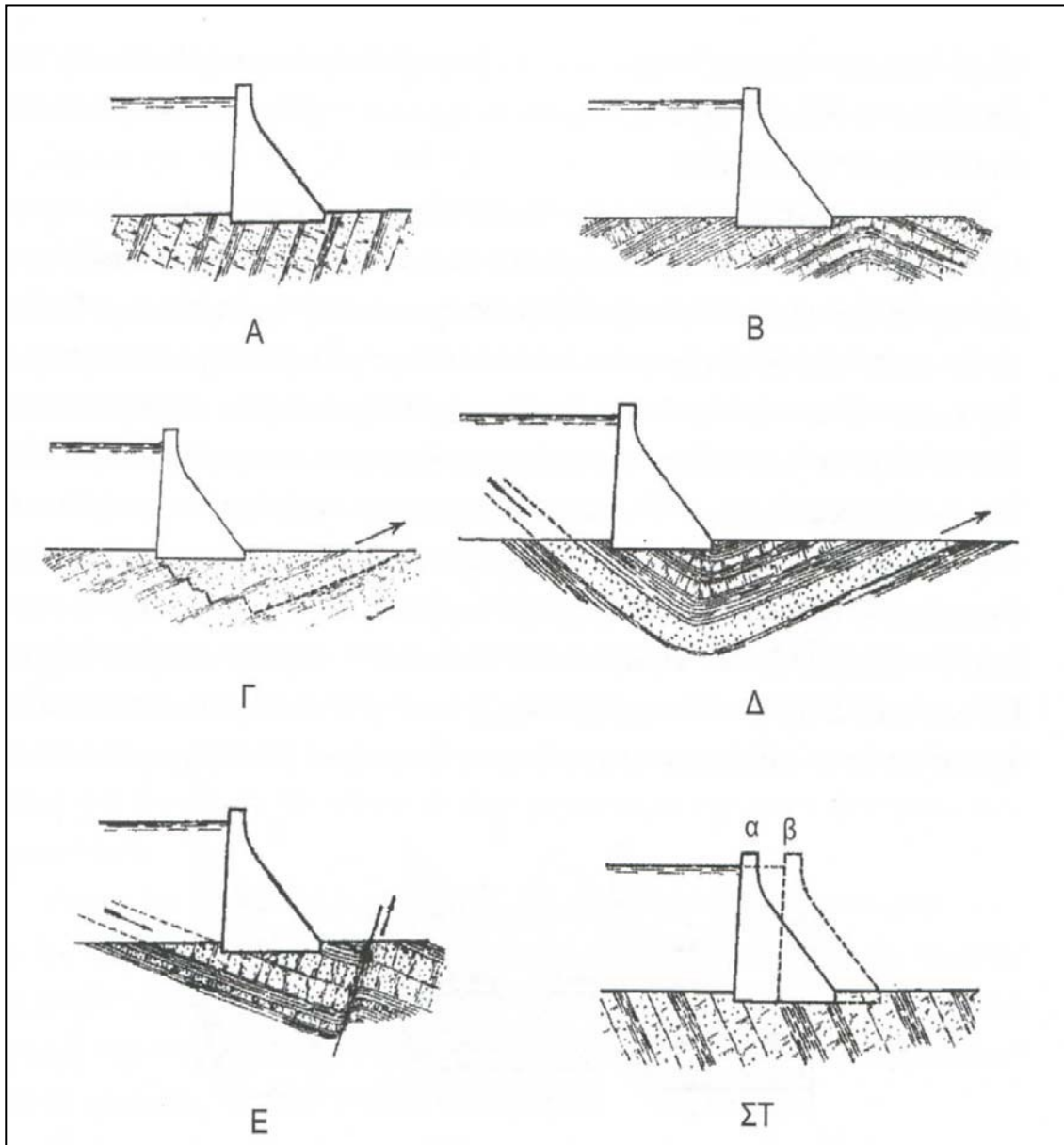
Αν υπάρχουν στην περιοχή προκαθορισμένες επιφάνειες ασυνέχειας (στρώση, ρωγμές, σχιστότητα, ρήγματα) κατάλληλου προσανατολισμού, τότε οι διατμητικές επιφάνειες θα αντανακλαστούν σ' αυτές (Σχήματα 5.6, 5.7 και 5.8) Ο κατάλληλος προσανατολισμός των επιπέδων ασυνέχειας μπορεί να οδηγήσει σε θραύση των θεμελίων λόγω ολίσθησης των τσιμέντινων φραγμάτων, κάτω από την άσκηση υπερβολικών πιέσεων από το νερό.

Προς την κατεύθυνση αυτή πλέον επιρρεπή είναι τα πετρώματα που παρουσιάζουν έντονη σχιστότητα, όπως είναι οι σχιστόλιθοι και οι φυλλίτες, οι ενστρώσεις ασθενών ζωνών σε υγιή βραχώμαζα και η παρουσία επιπέδων διαρρήξεων κατά μήκος των οποίων μειώνεται η εγγενής διατμητική αντοχή της βραχομάζας. Επίσης και οι σχηματισμοί που περιέχουν το διογκούμενο ορυκτό του μοντμοριλονίτη, λόγω μείωσης του συντελεστή τριβής μεταξύ της τσιμέντινης κατασκευής και της θεμελίωσης (BELL 1980).

Η ολίσθηση γενικά της κατασκευής εμποδίζεται με τη δημιουργία ανώμαλης επιφάνειας και πάκτωσης ουσιαστικά σε κάποιο βάθος μέσα στη θεμελίωση. Άλλη λύση είναι να δοθεί κλίση στη βάση του φράγματος στην ανάντη πλευρά και προς το εσωτερικό της κοιλάδας. Σημαντικός επίσης παράγοντας στο σχεδιασμό ενός φράγματος και τη μελέτη ευστάθειας των παρακείμενων πρανών είναι ο υπολογισμός της πίεσης του νερού των πόρων που αναπτύσσεται στους σχηματισμούς της θεμελίωσης. Πρόκειται για μεταβλητή δύναμη που ενεργεί προς όλες τις διευθύνσεις και προκαλεί αλλαγές στο καθεστώς των τάσεων στη βραχομάζα (μείωση της αντοχής σε θλίψη των πετρωμάτων και αύξηση της παραμόρφωσης στην οποία υπόκειται). Ακόμα, το νερό των πόρων μπορεί (1) να προκαλέσει ανύψωση (lift) των στρωμάτων της θεμελίωσης καθώς και του ίδιου του φράγματος, μειώνοντας έτσι τη διατμητική αντοχή και αντίσταση σε ολίσθηση μέσα στη βραχομάζα (2) να μειώσει το συντελεστή τριβής μεταξύ των στρωμάτων σε στρωσιγενή πετρώματα καθώς και μεταξύ της θεμελίωσης και του φράγματος (3) να συμβάλει στη διόγκωση ορισμένων πετρωμάτων και την επιτάχυνση του ρυθμού εξαλλοίωσης αυτών.



**Σχήμα 5.6.** Γεωλογικές συνθήκες που διευκολύνουν αστοχία θεμελίωσης σε τσιμέντινα φράγματα. Α: Πυκνό δίκτυο διακλάσεων σε κρυσταλλικά πετρώματα που ευνοούν την εύκολη διατμητική μετατόπιση της βραχώμαζας. Β: Ιζηματογενή πετρώματα με κλίση προς τα κατάντη, διατέμνονται από ρήγμα με αντίθετη κλίση και υλικά χαμηλής αντοχής κατά μήκος της ζώνης αυτού. Γ: Πτυχωμένα στρώματα ( ασβεστόλιθοι και ψαμμίτες), με λεπτές, ασθενείς ενστρώσεις αργιλικού σχιστόλιθου, παρουσιάζουν δυνατότητα αστοχίας της θεμελίωσης



**Σχήμα 5.7.** Συνθήκες ευστάθειας τσιμέντινων φραγμάτων σε στρωσιγενή πετρώματα  
 Α. Η ισχυρή κλίση των στρωμάτων προς τα ανάντη είναι ευνοϊκή για την θεμελίωση ενός φράγματος

Β. Φράγμα θεμελιωμένο σωστά στο σκέλος αντικλίνου που κλίνει προς τα ανάντη

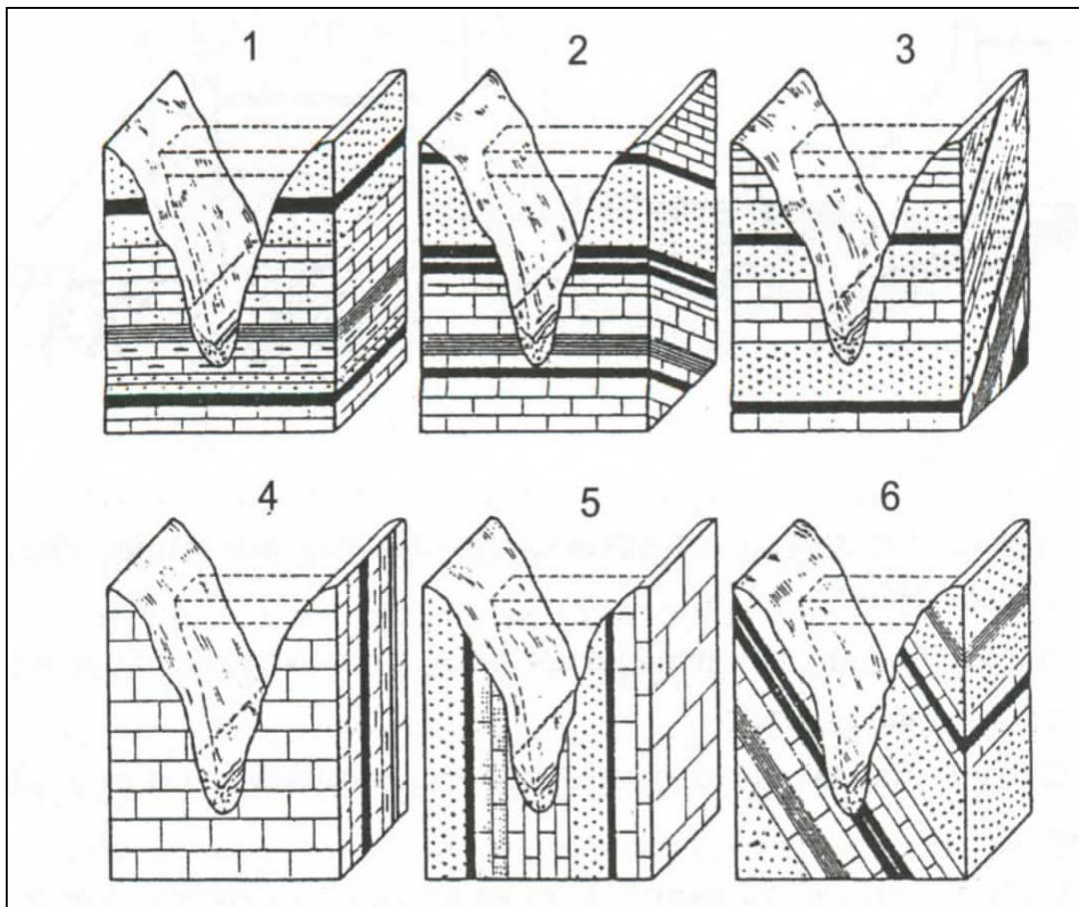
Γ. Όταν τα στρώματα έχουν μέση κλίση προς τα ανάντη μπορεί να υπάρξει διατμητική θραύση της θεμελίωσης του φράγματος κατά μήκος των επιπέδων στρώσης

Δ. Ακατάλληλη θέση του φράγματος στο σκέλος ενός αντικλίνου με κλίση προς τα κατόντη

Ε. Σε διαταραγμένα λόγω ρήγματος στρώματα, με μέση κλίση προς τα κατόντη, σημειώνονται διαφυγές νερού μέσω των υδατοπερατών στρωμάτων και κατά μήκος του ρήγματος, που προοδευτικά οδηγούν σε αστοχία

ΣΤ. Η επίδραση της άνωσης σε ένα φράγμα μειώνεται όταν η ανάντη πλευρά θεμελιώνεται σε αδιαπέραστα στρώματα (β), ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση θεμελίωσης σε περατά στρώματα (α)

Θραύσεις των αντερεισμάτων που στηρίζουν τα ακρόβαθρα του τσιμεντινίου φράγματος είναι σπάνιες μεν αλλά δυνατές. Σπάνιες γιατί όταν μετά την εκσκαφή θεμελιωθεί το φράγμα αυξάνεται η αντοχή των αντερεισμάτων (προσθήκη του βάρους του φράγματος), δυνατές δε γιατί υπάρχει η δυνατότητα θραύσης των πρανών πάνω από το τσιμέντο φράγμα με το μηχανισμό της μετακίνησης μαζών. Τα πρανή κάτω και πάνω από χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα, όταν είναι αρκετά απόκρημνα και εξασθενίζουν από την κατείδυση υπόγειου νερού, μπορεί να θραυστούν κατά μήκος επιφανειών που τέμνουν τα ακρόβαθρα του φράγματος.



**Σχήμα 5.8.** Συνθήκες ευστάθειας θεμελίωσης φράγματος σε σχέση με τη στρώση. 1,4,5: Κατάλληλες, 2: Πολύ κατάλληλες, 3: Ακατάλληλες, 6: Ακατάλληλες στη δεξιά πλευρά και ευνοϊκές στο υπόλοιπο τμήμα.

Σοβαρό πρόβλημα μπορεί ακόμα να προκύψει στη φάση εκβραχισμών για τη θεμελίωση του φράγματος και την αφαίρεση βάρους από τη βραχομάζα, οπότε αυτή κινείται ελαφρά προς τα επάνω ήτοι υπόκειται σε ανύψωση, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας των πετρωμάτων, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το μέτρο τόσο μικρότερη η ανύψωση. Πλέον σύνθετη βέβαια κατάσταση δημιουργείται στην περίπτωση εκδήλωσης



διαφορικής ανύψωσης, όταν η θεμελίωση αποτελείται από αρκετό χρόνο και συνεχίζεται και μετά την κατασκευή του φράγματος (εάν η πίεση ανύψωσης που έχει αναπτυχθεί στα υλικά θεμελίωσης υπερβαίνει το ενεργό βάρος του φράγματος). Για το λόγο αυτό το βάρος στη θεμελίωση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από αυτό των υλικών που αφαιρέθηκαν.

Γενικά ένα φράγμα υφίσταται καθίζηση κάτω από το ίδιο φορτίο ενώ το νερό του ταμιευτήρα με την πλήρωση του προκαλεί πρόσθετη καθίζηση, το ποσό της οποίας εξαρτάται από την αντοχή των σχηματισμών θεμελίωσης. Επίσης ένα φράγμα θεμελιωμένο σε βράχους που διογκώνονται με την αποκάλυψη υπόκεινται σε μεγαλύτερη από τη συνήθη καθίζηση.

Βασικός επίσης παράγοντας στην ασφάλεια και συμπεριφορά των φραγμάτων αποτελεί η διαφυγή νερού στα τσιμέντινα φράγματα μέσα από τη θεμελίωση, που μπορεί να συμβεί ακόμα και σε πολύ καλής ποιότητας και μικρής υδροπερατότητας πέτρωμα, ενώ σε πολύ υδροπερατά πετρώματα η υπερβολική διαρροή κάτω από το φράγμα μπορεί να βλάψει τη θεμελίωση. Οι αρνητικές επιπτώσεις ενός τέτοιου φαινομένου προέρχονται από τη δυνατότητα έκπλυσης από το νερό του υλικού πλήρωσης ρωγμών και διαρρήξεων, που προοδευτικά οδηγεί σε καθίζηση καθώς και σε διεύρυνση των διαρρήξεων με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής της βραχομάζας.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού μπορεί να επιτευχθεί με τον υποβιβασμό του ρυθμού της διήθησης κάτω από το φράγμα, δημιουργώντας διάφραγμα στο σχεδιασμό που ουσιαστικά επιμηκύνει τη ροή και επομένως μειώνει την υδραυλική κλίση. Τοποθετείται συνήθως κάτω από την ανάντη όψη του φράγματος και εκτείνεται μέχρι ένα αδιαπέρατο ορίζοντα ή σε προκαθορισμένο βάθος. Το φαινόμενο μπορεί επίσης να αντιμετωπισθεί με την τοποθέτηση αδιαπέρατου εδαφικού τάπητα στο χαμηλότερο τμήμα της ανάντη όψης του φράγματος.

Τέλος η πίεση λόγω άνωσης στην ανάντη πλευρά του φράγματος ενεργεί ενάντια στη βάση του φράγματος και οφείλεται στο νερό που διηθείται κάτω από αυτό και μάλιστα με το υδροστατικό φορτίο του ταμιευτήρα. Η πίεση αυτή είναι ίση με το βάθος θεμελίωσης κάτω από τη στάθμη του νερού  $\chi$  το ειδικό βάρος του νερού, είναι διαφορετική από την πίεση του νερού των πόρων στους σχηματισμούς κάτω από το φράγμα και μπορεί να ελαττωθεί με την ομαλή παροχέτευση του νερού προς το κατάντη, μέσω στραγγιστήριων που ενσωματώνονται στη θεμελίωση και τη βάση του φράγματος. Η διαφορά στο υδραυλικό φορτίο μεταξύ του ανάντη τμήματος και πόδα της θεμελίωσης του φράγματος υποτίθεται ότι στην πιο απλή περίπτωση διανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ αυτών.

### **5.10. Τύποι πετρωμάτων και φράγματα**

Γενικά υπάρχουν λίγοι σχηματισμοί οι οποίοι δεν είναι ικανοί να αντέξουν τα φορτία ακόμα και υψηλών φραγμάτων, με εξαίρεση τις πλέον ασθενείς φάσεις των σχιστόλιθων, μαργόλιθων, μαργών, πυροκλαστικών πετρωμάτων και ορισμένους τύπους εύθρυπτων ψαμμιτών. Οι διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων, σχετικά με την καταλληλότητά τους για την θεμελίωση φραγμάτων, περιγράφονται παρακάτω.

#### **α) ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ**

Όσον αφορά στα πετρώματα αυτά σημειώνονται τα εξής:

- Τα πλουτωνικά πετρώματα, όταν δεν είναι εξαλλοιωμένα αλλά υγιή, παρουσιάζουν ικανοποιητικές αντοχές και θεωρούνται κατάλληλα για την θεμελίωση τεχνικών έργων.

Από αυτά τα όξινα πετρώματα (γρανίτες, γρανοδιορίτες, συηνίτες) παρουσιάζουν, κατά θέσεις, δομή που αλλοιώνεται λόγω βαθιάς αποσάθρωσης ή υδροθερμικής επίδρασης σε συνδυασμό με την έντονη κατάντηση. Έχει καταγραφεί αποσάθρωση μέχρι 20-30 m και είναι απαραίτητο να καθοριστούν η έκταση και η διατμητική αντοχή του αποσαθρωμένου υλικού για να εκτιμηθεί η δυνατότητα ολίσθησής του στη θεμελίωση. Για τις βαθιά αποσαθρωμένες γρανιτικές μάζες υπάρχουν τρεις εναλλακτικές λύσεις (BELL 1980).

- 1) Βαθιά εκσκαφή μέχρι το υγιές πέτρωμα για την θεμελίωση τσιμεντινίου φράγματος.
- 2) Κατασκευή χωμάτινου φράγματος με την λήψη όλων των απαραίτητων για τις συνθήκες αυτές μέτρων, όσον αφορά τον εκχειλιστή και την ευστάθεια των εκσκαφών.
- 3) Σύνθετο φράγμα π.χ. αντηριδωτό τμήμα με τον εκχειλιστή στη βάση της κοιλάδας, όπου επικρατεί το υγιές πέτρωμα και χωμάτινο στις πλευρές (αντερείσματα).

Τα βασικά υπερβασικά πλουτωνικά πετρώματα (γάββροι, διαβάσες, περιδοτίτες), που αποτελούν σύστημα πετρωμάτων γνωστό ως οφιόλιθοι, όταν είναι υγιή αποτελούν εξαιρετική θεμελίωση για τεχνικά έργα, λόγω των πολύ υψηλών αντοχών. Πλην όμως και τα πετρώματα αυτά έχουν την τάση να ρηγματώνονται και κατά θέσεις να αποσαθρώνονται σε βάθος, ειδικότερα δε οι περιδοτίτες αποσαθρώνονται σε σερπεντινίτες οι οποίοι δεν αποτελούν καλό σχηματισμό θεμελίωσης και ιδιαίτερα για τσιμεντένια φράγματα. Γενικά θεωρούνται στεγανοί σχηματισμοί, εκτός αν είναι ρηγματομένοι. Όσον αφορά στην κατασκευή φραγμάτων ισχύουν οι ίδιες λύσεις όπως και στον γρανίτη, στην περίπτωση έντονης και πυκνής ρηγματώσης.

- Τα ηφαιστειακά πετρώματα (ρυόλιθοι, τραχείτες, ανδεσίτες, δακίτες, βασάλτες) είναι γενικά σκληροί και με υψηλές αωτοχές σχηματισμοί και προσφέρονται για θεμελιώσεις τεχνικών έργων ενώ οι τόφοι είναι συχνότερα χαλαροί. Αναλυτικότερα, τα παχιά συμπαγή βασαλτικά πετρώματα δημιουργούν ικανοποιητικές θέσεις φραγμάτων αλλά μερικοί βασάλτες, συγκριτικά νεαρής γεωλογικής ηλικίας, είναι πολύ υδατοπερατοί, μέσω διακλάσεων, ρηγμάτων και ζωνών επαφής. Όσον αφορά στις συνθήκες θεμελίωσης σε τέτοιους νέους σχηματισμούς προβλήματα λόγω διαφορικής καθίζησης (differential settlement) ή ολίσθησης μπορεί να υπάρξουν από την παρουσία ασθενών στρωμάτων, όπως τέφρες ή τόφοι μεταξύ των βασαλτικών ροών. Επίσης, η αποσάθρωση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα. Όπου βέβαια παχιά και υγιή πετρώματα βασάλτη περικλύουν τέτοιους ασθενείς ορίζοντες οι συνθήκες θεμελίωσης μπορεί να υπαγορεύουν την κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων.

Οι ρυόλιθοι και συχνά οι ανδεσίτες δεν παρουσιάζουν τα ίδια σοβαρά προβλήματα διαφυγών νερού, όπως οι βασάλτες. Οι διακλάσεις τους είναι συνήθως υποκείμενες σε τσιμεντενέσεις. Συχνά προσφέρουν ιδανικές συνθήκες για τσιμεντένια φράγματα αν και σε μερικές περιοχές η αποσάθρωση σε βάθος μπορεί να υποδείξει την κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων. Τα πυροκλαστικά (τέφρες-τόφοι) δημιουργούν εξαιρετικά διαφορετικές συνθήκες θεμελίωσης, λόγω της ευρείας κύμανσης στην αντοχή, ανθεκτικότητα και υδατοπερατότητα.

## β) Μεταμορφωμένα πετρώματα

Τα πετρώματα αυτά ποικίλουν σημαντικά όσον αφορά στην καταλληλότητά τους για θέσεις φραγμάτων. Στα μεταμορφωμένα πετρώματα ανήκουν οι γνεύσιοι, οι αμφιβολίτες, οι διάφοροι τύποι σχιστόλιθων πλην των αργλικών σχιστόλιθων που εντάσσονται στα ιζηματογενή πετρώματα, τα μάρμαρα και οι χαλαζίτες. Τα δύο τελευταία δεν παρουσιάζουν μακροσκοπικά ζωνώδη ή σχιστοφυή ιστό όπως τα προηγούμενα. Χαρακτηριστικό των πετρωμάτων αυτών είναι η ανισοτροπία στη μηχανική τους συμπεριφορά και ειδικότερα στις κατηγορίες που παρουσιάζουν ζωνώδη ή σχιστοφυή ιστό.

Υγιή, θερμοκρασιακά μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως οι χαλαζίτες, είναι πολύ σκληρά και δημιουργούν εξαιρετικές θέσεις φραγμάτων (αντοχή μεγαλύτερη από  $700 \text{ Kg/cm}^2$  ακόμα δε και πάνω από  $1400 \text{ Kg/cm}^2$ ). Προσοχή μόνο χρειάζεται στις ρηγματώσεις του πετρώματος που προήλθαν από τις τεκτονικές κινήσεις. Τα μάρμαρα χαρακτηρίζονται για τις μεγάλες αντοχές, λόγω του δικτύου αγωγών που προήλθε από τη διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου. Ο τελευταίος αυτός χαρακτήρας ελέγχει και τη συμπεριφορά τους στην κατασκευή φραγμάτων, όσον αφορά στη θεμελίωση και υδατοπερατότητα.

### γ) Ιζηματογενή πετρώματα

Προέρχονται από την καταστροφή προϋπαρχόντων πετρωμάτων, μεταφορά των υλικών και απόθεση σε χαμηλότερα σημεία με αποτέλεσμα τη δημιουργία είτε κλαστικών ιζημάτων (κροκαλοπαγή, κροκαλολατυποπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι) είτε χημικών ιζημάτων (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κερατόλιθοι και εβαπορίτες – ανυδρίτες, γύψος, ορυκτό αλάτι κ.ά.). Σημειώνεται επίσης ότι τα κλαστικά υλικά, όταν μετά την απόθεση δεν υποστούν διαγένεση, δεν μετατρέπονται σε πετρώματα αλλά παραμένουν ως εδαφικές αποθέσεις ( κροκάλες, λαπύτες, άμμοι, άργιλοι, ιλύες).

Οι ψαμμίτες έχουν ευρύ φάσμα αντοχής, εξαρτώμενου κατά μεγάλο μέρος από το ποσό και τύπο του συνδετικού υλικού (cement- matrix material) που καταλαμβάνει τους πόρους. Με την εξαίρεση των αργιλικών ψαμμιτών, δεν υπόκεινται σε ταχεία επιφανειακή φθορά με την αποκάλυψη, ενώ ως σχηματισμός θεμελίωσης ακόμα και πτωχά συγκολλημένος δεν επιδέχεται πλαστική παραμόρφωση. Εν τούτοις, εύθρυπτοι ψαμμίτες εισάγουν προβλήματα φθοράς μέσα στη θεμελίωση. Ένα μεγάλο πρόβλημα φραγμάτων σε ψαμμίτες προέρχεται από το γεγονός ότι γενικά διατέμνονται από διαρρήξεις, που ελαττώνουν την αντίσταση σε ολίσθηση. Εν τούτοις οι ψαμμίτες γενικά έχουν υψηλούς συντελεστές εσωτερικής τριβής που τους προσδίδουν μεγάλες διατμητικές αντοχές όταν υπόκεινται σε φόρτιση.

Όσο αφορά στα ανθρακικά πετρώματα η καταλληλότητα θέσεων φραγμάτων σε ασβεστόλιθους ποικίλει σημαντικά. Παχυστρωματώδη και οριζόντια ασβεστολιθικά στρώματα χωρίς καρστικά έγκοιλα (solution cavities) δημιουργούν εξαιρετικές θέσεις φραγμάτων. Οι ασβεστόλιθοι δε χρειάζονται ειδική βελτίωση για να εξασφαλίσουν καλό δεσμό με το τσιμέντο. Αντίθετα λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, πολυπτυχωμένοι ή καρστικοποιημένοι είναι πιθανό να παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα στη θεμελίωση και στα ακρόβαθρα, όσον αφορά τη φέρουσα αντοχή ή στεγανότητα ή και τα δύο. Εάν το πέτρωμα είναι λεπτοστρωματώδες μπορεί να υπάρχει και η πιθανότητα ολίσθησης, γεγονός που απαιτεί την πάκτωση του έργου στο σχηματισμό θεμελίωσης. Στρώματα που διαχωρίζονται από ενστρώσεις αργίλου ή αργιλικού σχιστόλιθου και κυρίως αυτών που κλίνουν προς τα κατάντη, μπορεί να λειτουργήσουν ως επίπεδα ολίσθησης και να προκαλέσουν αστοχία.

### **5.11. Χωμάτινα φράγματα- Πρόσθετα στοιχεία για τα προβλήματα και τον ασφαλή σχεδιασμό τους**

Γενικά, ο σχεδιασμός ενός χωμάτινου φράγματος θα πρέπει να εξασφαλίζει ευσταθή πρηνή και ειδικότερα το ανάντη πρηνές είναι απαραίτητο να προστατεύεται και από τη δράση των κυμάτων της λίμνης. Οι διηθήσεις – διαφυγές νερού και οι υπερβολικές υδροστατικές πιέσεις λόγω άνωσης ελέγχονται με την κατάλληλη αποστράγγιση, ενώ η καθίζηση μετά την κατασκευή της στέψης του φράγματος πρέπει να είναι περιορισμένη.

Η κατασκευή τους είναι συχνά πλέον οικονομική από αυτή των φραγμάτων βαρύτητας και προτιμώνται στις θέσεις όπου τα υλικά κατασκευής είναι διαθέσιμα και παράλληλα η θεμελίωση είναι σε σχηματισμούς μικρών γενικά αντοχών.

Τα υλικά για το χωμάτινα φράγματα θα πρέπει να ζητούνται, όπου αυτό είναι δυνατόν, από το μελλοντικό ταμιευτήρα και για το σκοπό αυτό απαιτείται λεπτομερής γεωλογική έρευνα για την εξασφάλιση αδιαπέρατων και περατών υλικών για το επίχωμα, άμμου και χαλίκων για το φίλτρα και πέτρωμα για τη λιθορριπή. Σύμφωνα με τον Bell (1980) η ταξινόμηση του υλικού, ανάλογα με την υδροπερατότητά του για χωμάτινα φράγματα έχει ως εξής:

- > Αδιαπερατότητα  $\kappa < 0.01 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- > Ημι – αδιαπέρατο  $\kappa$  από  $0.01 - 1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- > Ημι – διαπερατό  $\kappa$  από  $1.0 - 50 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- > Περατό  $\kappa$  από  $50 - 500 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- > Πολύ περατό  $\kappa > 500 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Η διαθεσιμότητα των υλικών στην περιοχή του έργου προσδιορίζει βασικά τον τύπο του χωμάτινου φράγματος. Στα τυπικά χωμάτινα φράγματα τα υλικά κατασκευής μπορεί να είναι:

- Ομογενή – ίδιο εδαφικό υλικό (φράγματα ενιαίας διατομής) με χαρακτηριστικά τέτοια που να εξασφαλίζουν στεγανότητα και ευστάθεια, ενώ συνδυάζονται και με φίλτρα στο κατάντη του φράγματος για την αντιμετώπιση τυχόν διαφυγών. Το υλικό είναι συνήθως λεπτομερές αν και έχουν χρησιμοποιηθεί άμμοι ή προσμίξεις άμμων – κροκαλών. Μάλιστα ζώνες χαμηλότερης υδροπερατότητας μπορεί να επιτευχθούν σε ομογενή φράγμα με μεγαλύτερη συμπίκνωση, ενώ η απουσία της ζωνώδους φόρτισης αντισταθμίζεται με την ηπιότερη κλίση πρανών, γεγονός που συμβάλλει στον έλεγχο της διαφυγής με τη μείωση της ταχύτητας του διηθούμενου νερού. Τα φράγματα αυτά είναι μικρού έως ενδιάμεσου ύψους, ενώ τα πολύ χαμηλά φράγματα είναι πάντοτε ομογενή. Γενικά με τη συμπίκνωση των εδαφικών υλικών στα χωμάτινα φράγματα, ομογενή ή ζωνώδη, επιτυγχάνεται υψηλή διατμητική αντοχή, χαμηλή υδροπερατότητα, χαμηλή απορρόφηση νερού και ελάχιστη καθίζηση (Bell 1980).

- Ετερογενή – ζωνώδη με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, σώμα στήριξης από δύο εξωτερικές υδροπερατές ζώνες ενώ μεταξύ πυρήνα και εξωτερικών ζωνών παρεμβάλλονται διαβαθμισμένα υλικά σε μεταβατικές ζώνες (Σχήμα 3.4 και φωτ.3.7 και 3.12 στο παράρτημα). Τα υλικά αυτά συνήθως προσφέρονται στη γειτονία του φράγματος από τις ποταμοχειμάρριες αποθέσεις (υλικά κοίτης του ποταμού). Ο αριθμός των ζωνών που αυξάνουν σε περατότητα από τον πυρήνα προς τα εξωτερικά πρανή, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και τύπο των υλικών. Η ευστάθεια των φραγμάτων αυτών είναι μεγαλύτερη λόγω του βάρους των εξωτερικών ζωνών.

Ο πυρήνας ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού, μπορεί να είναι κατακόρυφος ή κεκλιμένος ενώ απαραίτητα είναι και τα φίλτρα. Η διαπερατότητα των υλικών του πυρήνα είναι της τάξης του 10<sup>-7</sup> και 10<sup>-9</sup> cm/sec το δε πάχος του εξαρτάται από το κ και το μέγιστο υδραυλικό φορτίο (ΜΑΡΑΓΚΟΣ 1997). Στην περίπτωση εντοπισμού ενός τύπου υλικού σε μία θέση για χωμάτινο φράγμα, εάν αυτό είναι αδιαπέρατο ο σχεδιασμός οδηγεί σε ομογενές επίχωμα που χρειάζεται μικρό μόνο ποσοστό περατού υλικού. Αντίθετα, όπου υπάρχουν άμμοι και κροκάλες σε ποσότητες, ένας αδιαπέρατος πυρήνας μπορεί να κατασκευασθεί ή διαφορετικά μία αδιαπέρατη πλάκα από τσιμέντο, ασφαλτικό ή χαλύβδινη, εδρασμένη στο ανάντη πρανές του σώματος στήριξης. Σε περιοχές με ποικιλία υλικών επιλέγονται ζωνώδεις κατασκευές, με το λεπτομερές του πυρήνα και τα πλέον αδρομερή υλικά προς τα ανάντη και κατάντη.

Τα πρανή σε ένα χωμάτινο φράγμα γίνονται προοδευτικά ηπιότερα από την κορυφή προς την βάση, με στόχο να υπάρχει ομοιόμορφη κατακόρυφη πίεση σε όλα τα σημεία, οι επιτρεπόμενες δε κλίσεις εξαρτώνται από τις αντοχές της θεμελίωσης και των υλικών κατασκευής καθώς και την εσωτερική ζώνωση (BELL 1980). Οι μέσες κλίσεις στην ανάντη όψη φραγμάτων από εδαφικά υλικά είναι 1:2.5 ή 1:3 κάτω από την ανώτατη στάθμη της λίμνης και 1:2 επάνω. Όταν μάλιστα επικρατεί στο φράγμα το αργιλικό υλικό οι μέσες κλίσεις κοντά στη βάση μπορεί να είναι και 1:10. Η κατάντη όψη είναι γενικά 1:2 ή ηπιότερη. Στα λιθόρριπτα τα πρανή είναι 1:5 έως 1:3. γενικά, οι περισσότεροι ήπιες κλίσεις σχεδιάζονται για υψηλά ομογενή φράγματα που αποτελούνται από λεπτομερές υλικό. Όσον αφορά στην ανάλυση ευσταθείας των πρανών του φράγματος ένας ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας 1.5 είναι απαραίτητος που μπορεί να αυξηθεί στην περίπτωση πολύ συνεκτικών αργίλων. Κατά το στάδιο κατασκευής του χωμάτινου φράγματος απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση των πιέσεων πόρων (pore pressures), γεωστατικών πιέσεων (earth pressures) και εσωτερικών παραμορφώσεων με την εγκατάσταση των ανάλογων οργάνων. Έτσι, ελέγχετε ο σχεδιασμός και είναι δυνατή πιθανή τροποποίηση του. Τις μεγαλύτερες πιέσεις πόρων κατά την κατασκευή παρουσιάζουν οι καλά διαβαθμισμένοι αργιλώδεις άμμοι και προσμίξεις άμμου-χαλίκων-αργίλων ενώ οι ομοιόμορφοι ιλύες και λεπτομερείς ιλυώδεις άμμοι είναι λιγότερο

επιδεκτικές. Γενικά, το μέγεθος και διανομή των πιέσεων αυτών εξαρτώνται πρωταρχικά από το περιεχόμενο νερό της κατασκευής, τις ιδιότητες του εδάφους, το ύψος του φράγματος και το ρυθμό με τον οποίο η εκτόνωση (dissipation) μπορεί να συμβεί.

Η πλέον κρίσιμη συνθήκη ευστάθειας στην ανάντη όψη ενός χωμάτινου φράγματος είναι με την υποβίβαση της στάθμης του ταμιευτήρα, μετά την ολική πλήρωση αυτού για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ρυθμιστικό ρόλο προς την κατεύθυνση αυτή παίζουν τα στραγγιστήρια φίλτρα, που ελέγχουν τις πιέσεις πόρων ενώ χρειάζονται και ηπιότερες κλίσεις στα πρανή. Βέβαια στην περίπτωση λιθόρριπων φραγμάτων δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα.

Συνήθως απότομες διακυμάνσεις της στάθμης (rapid drawdowns) συμβαίνουν στα ρυθμιστικά φράγματα ( όπως π.χ των κρεμαστών που ρυθμίζει τη ροή του νερού προς τα φράγματα Καστρακίου και Στράτου) καθώς και στα σχήματα ανακύκλωσης του νερού (rumped-storage schemes).

Το ανάντη τμήμα του φράγματος προστατεύεται από την διάβρωση του κύματος της λίμνης με λιθορρίπη, από μεγάλα υγιή τεμάχια βραχομάζας (rip-rap) και το κατάντη με κατάλληλα διαβαθμισμένα υλικά ( χάλικες ή και θραυστό υλικό) που να εξασφαλίζουν καλή διευθέτηση και σταθερότητα. Κάτω από το rip-rap τοποθετείται φίλτρο από χάλικες για την προστασία του λεπτομερούς υλικού του σώματος. Αντί του rip-rap η προστασία μπορεί να επιτευχθεί από πλάκα σκυροδέματος με αρμούς η μονολιθική.

Τέλος, σημειώνεται ότι ο κυματισμός στον ταμιευτήρα μπορεί να προκληθεί από τον αέρα, απότομες μετακινήσεις μαζών λόγω της εκδήλωσης κατολισθήσεων ή από σεισμούς.

Στα λιθόρριπτα, που είναι επίσης ζωνώδεις κατασκευές οι εξωτερικές ζώνες στήριξης, που συνιστούν και τον κύριο όγκο του έργου, αποτελούνται από υλικά εκβραχισμού – δανειοθαλάμου που είναι καλής ποιότητας και υπάρχουν στη γειτονία του έργου ή χονδροκλαστικά υλικά ποτάμιας προέλευσης. Απαραίτητος στην περίπτωση αυτή είναι ο αργιλικός πυρήνας, κατακόρυφος ή κεκλιμένος, που αποτελεί και την κεντρική πρακτικά αδιαπέρατη ζώνη. Η διαβάθμιση των υλικών από τον πυρήνα προς τις εξωτερικές ζώνες του φράγματος είναι απαραίτητη και εξυπηρετείται έτσι η προστασία από την διάβρωση του πυρήνα. Πολλές φορές αντί πυρήνα μπορεί να τοποθετηθεί στην ανάντη πλευρά πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ασφαλτικός τάπητας.

Γενικά, τα λιθόρριπτα φράγματα κατασκευάζονται εκεί όπου δεν υπάρχουν υλικά σε ικανές ποσότητες για τα άλλα χωμάτινα φράγματα, κατάλληλο βραχώδες υλικό είναι διαθέσιμο, το σκυρόδεμα είναι ακριβό και η θεμελίωση δεν είναι ευνοϊκή για τσιμέντινα φράγματα.

Η ρωγμάτωση (cracking) σε χωμάτινα φράγματα επηρεάζεται από τις ιδιότητες του εδάφους και τις μεθόδους κατασκευής. Επίσης, ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να συμβεί είναι αυτό της διασωλήνωσης (ripping), λόγω εσωτερικής διάβρωσης στη θεμελίωση ή το επίχωμα και το οποίο προκαλείται από διηθήσεις νερού. Λειτουργεί κάτω και μέσα από το φράγμα, κατά μήκος δίοδων αυξημένης υδροπερατότητας και μπορεί να εκδηλωθεί πολλά χρόνια μετά την κατασκευή του φράγματος. Η πλαστικότητα του εδάφους, η διαβάθμιση και ο βαθμός συμπίκνωσης παίζουν βασικό ρόλο στη δημιουργία η μη του φαινομένου. Άργιλοι με πλαστικότητα >15 είναι τα πλέον ανθεκτικά υλικά. Ρωγμές λόγω καθίζησης ακόμα και σε ανθεκτικά υλικά μπορεί να δημιουργήσουν διασωλήνωση. Η αντιμετώπιση του φαινομένου μπορεί να γίνει με την επιμήκυνση της διαδρομής της διήθησης μέσα από το φράγμα και την θεμελίωσή του, με την τοποθέτηση αδιαπέρατου τάπητα (μεμβράνης) από την ανάντη όψη ή αυξάνοντας τη βάση του φράγματος, έτσι ώστε να ελαττωθεί η υδραυλική κλίση και ως εκ τούτου η ταχύτητα.

Με βάση τα προβλήματα που αναφέρθηκαν, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός στραγγιστικού συστήματος, ανάλογα με τον τύπο του φράγματος, ομογενές ή ζωνώδες. Ειδικότερα, ο σχεδιασμός αυτός εξαρτάται από το ύψος του φράγματος, τον τύπο και διαθεσιμότητα περατού υλικού και την υδροπερατότητα της θεμελίωσης. Ένα αποτελεσματικό φίλτρο θα πρέπει να ικανοποιεί τις εξής βασικές απαιτήσεις (BELL 1980) (1) ο συντελεστής

υδροπερατότητας να είναι 10 έως 100 φορές μεγαλύτερος από τον μέσο συντελεστή του υλικού του επιχώματος που αποστραγγίζει, (2) αρκετά μεγάλο για να δεχθεί την προβλεπόμενη ροή (3) κατάλληλα διαβαθμισμένο για να μην επιτρέπει την είσοδο των υλικών του επιχώματος στους πόρους αυτού.

### **5.12. Τα φράγματα στον Ελληνικό χώρο – Τύπος, γεωλογικά δεδομένα και τεχνικογεωλογικά προβλήματα.**

Από τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν στον Ελληνικό χώρο (έτος 1931) είναι το φράγμα βαρύτητας του Μαραθώνα για την ύδρευση των Αθηνών, ύψους 63μ. Στη συνέχεια, τη δεκαετία του '50, άρχισαν να κατασκευάζονται τα μεγάλα φράγματα της ΔΕΗ του συνεχίζονται μέχρι σήμερα και έχουν ως εξής (Λιάκουρης 1994, 1995)

- Φράγμα Λούρου. Βαρύτητας, ύψους 23μ. κατασκευάστηκε το 1954. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος και του ταμιευτήρα είναι Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι της Ιονίου ζώνης. Ο ταμιευτήρας έχει πληρωθεί με φερτά υλικά, πλέον του 80%, από τη στερεοπαροχή του ποταμού και κυρίως από τα υλικά διαπλάτυνσης του δρόμου Άρτας – Ιωαννίνων.

- Φράγμα Λάδωνα. Βαρύτητας, ύψους 56μ. Στη θέση του φράγματος και του ταμιευτήρα επικρατούν οι ασβεστόλιθοι Ολωνού – Πίνδου με παρεμβολές αργιλικών σχιστόλιθων. Για τη διαφραγματική κουρτίνα εκτελέστηκε πυκνό δίκτυο από 111 γεωτρήσεις βάθους 16 – 80μ. συνολικού μήκους 5217 μ. με απορρόφηση 500 περίπου τόνων τσιμέντου.

- Φράγμα Ταυρωπού (Ν. Πλαστήρα). Τοξωτό βαρύτητας 83μ. ύψους με λεπτό έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους Πίνδου και αργιλικές διαστρώσεις στη θέση του φράγματος ενώ τη θέση του ταμιευτήρα καταλαμβάνει η φλύσχης Πίνδου. Το βάθος της κύριας κουρτίνας έφθασε τα 40μ. ενώ της δευτερεύουσας τα 24μ.

- Φράγμα Κρεμαστών (Αχελώος). Χωμάτινο με αργιλικό πυρήνα, ύψους 160μ. Φλύσχης ζώνης Γαβρόβου (κροκαλοπαγή, ιλυόλιθοι, ψαμμίτες) στη θέση του φράγματος, στο δε ταμιευτήρα φλύσχης Γαβρόβου και μικρής επιφανειακής έκτασης ασβεστόλιθοι της ζώνης Γαβρόβου. Το βασικό πρόβλημα του φράγματος αυτού ήταν η αντιμετώπιση των διαφυγών στα αντερείσματα αλλά και στην κοίτη με τη μορφή πολυάριθμων πηγών μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Αυτό γινόταν μέσα από το ψευδοκάρστ και τα ρήγματα του κατώτερου και ιδίως του μέσου κροκαλοπαγούς. Αντιμετωπίστηκε με τη διάνοιξη σηράγγων και την εκτέλεση τσιμεντενέσεων. Άλλα προβλήματα ήταν η αποκάλυψη μεγάλου διαβρωσιγενούς ανοίγματος κάτω από την κοίτη του ποταμού, κατά τη διάρκεια των εργασιών προετοιμασίας του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος, καθώς και οι αστάθειες πρανών στις παραλίμνιες περιοχές του ταμιευτήρα.

- Φράγμα Καστρακίου (Αχελώος). Χωμάτινο με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Έχει ύψος 96.7μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος είναι φλύσχης της Ιονίου ζώνης (παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, ιλυόλιθοι) ενώ στη θέση του ταμιευτήρα επίσης φλύσχης της Ιονίου ζώνης και συγκεκριμένα ψαμμίτες, ιλυόλιθοι και ελάχιστοι ασβεστόλιθοι. Τα τεχνικογεωλογικά προβλήματα περιορίζονταν κυρίως στην ενεργοποίηση τμήματος παλαιών κατολισθήσεων στα πρανή του ταμιευτήρα, οι οποίες και σταθεροποιήθηκαν.

- Φράγμα Πολύφυτου (Αλιάκμονας). Λιθόρριπτο με ανάντη κεκλιμένο πυρήνα, ύψους 105μ. Στη θέση του φράγματος οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι αμφιβολιτικοί γνεύσιοι ενώ στον ταμιευτήρα γνεύσιοι και ιζήματα του Νεογενούς (μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι). Στην επιλογή του χωμάτινου φράγματος, αντί τσιμέντινου, έπαιξαν ρόλο οι ακόλουθοι τεχνικογεωλογικοί παράγοντες:

- Διαπίστωση ενεργών ρηγμάτων νεότερης ηλικίας που θεωρήθηκαν σεισμικά ενεργά

- > Οι δ/νσεις κυρίων ρηγμάτων και ανοικτών διακλάσεων παράλληλα προς τον ποταμό
- > Η ύπαρξη κατολίσθησης στο δεξιό αντέρεισμα
- > Ο κίνδυνος κατολισθήσεων με τις βαθιές εκσκαφές για τη θεμελίωση του τσιμέντινου φράγματος
- > Η ύπαρξη ανομοιόμορφα αποσαθρωμένης ζώνης

- Φράγμα Πουρναρίου (Αραχθος). Χωμάτινο, ύψους 107μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος και του ταμιευτήρα ανήκουν στο φλύσχη της Ιονίου ζώνης (εναλλαγές παχυστρωματωδών ψαμμιτών, ιλυόλιθων). Η διαφραγματική κουρτίνα επεκτάθηκε σε βάθος 60μ. στο πέτρωμα θεμελίωσης. Τα τεχνικογεωλογικά προβλήματα αναφέρονταν κυρίως και στη σταθεροποίηση του φυσικού πρानούς στην υδροληψία καθώς και στον εκχειλιστή – δεξιό πρानές. Οι κατολισθήσεις στον ταμιευτήρα ήταν περιορισμένες, κυρίως επανεργοποιήσεις παλαιών.

- Φράγμα Π. Αώου (Υψίπεδο Πολιτών Μετσόβου και Χρυσοβίτσας). Το ΥΗΕ Π. Αώου συνίσταται από το κύριο φράγμα, το βοηθητικό και πέντε (5) αυχενικά. Το κύριο φράγμα είναι χωμάτινο με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα και έχει ύψος 78μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος είναι οφιόλιθοι Πίνδου. Το βοηθητικό φράγμα είναι χωμάτινο με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα, ύψους 40μ. Τα πέντε αυχενικά φράγματα είναι χωμάτινα και το ύψος τους κυμαίνεται από 13 έως και 35μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του ταμιευτήρα ανήκουν στο φλύσχη της Πίνδου. Τα κυριότερα προβλήματα, κατά το στάδιο της προμελέτης και κατασκευής, είχαν σχέση με την υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, τις υπόγειες κατασκευές, την ευστάθεια των πρानών, τις θεμελιώσεις κ.λπ.

- Φράγμα Σφηκιάς (Αλιάκμονας). Λιθόρριπτο με αργιλικό πυρήνα. Έχει ύψος 82μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος αλλά και του ταμιευτήρα είναι γνεύσιοι και σχιστόλιθοι της Πελαγονικής ζώνης. Τα κύρια προβλήματα αναφέρονται στην αστάθεια πρानών τόσο στον άξονα του φράγματος όσο και στο δρόμο Σφηκιάς – Ασωμάτων καθώς και οι διαφυγές νερού που διαπιστώθηκαν κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα.

- Φράγμα Ασωμάτων (Αλιάκμονας). Χωμάτινο με κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Έχει ύψος 66μ. Στη θέση του φράγματος οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν στο οφιολιθικό σύμπλεγμα της ζώνης Αλμωπίας ενώ στη θέση του ταμιευτήρα είναι γνεύσιοι, αμφιβολιτικοί γνεύσιοι και οφιόλιθοι. Τα κύρια προβλήματα συνδέονταν με την έλλειψη επιφανειακής αποστράγγισης στο δεξιό ακρόβαθρο, παρουσία έντονα διαταραγμένης τεκτονικά ζώνης στο αριστερό της θεμελίωσης στην κοίτη του ποταμού καθώς και διαφυγές νερού μικρής έκτασης στο αριστερό ακρόβαθρο.

- Φράγμα Στράτου (Αχελώος). Χωμάτινο, ύψους 26μ. Στη θέση του φράγματος απαντούν ποτάμιες αποθέσεις και στ αντερείσματα φλύσχης Ιονίου ζώνης (ψαμμίτες και ιλυόλιθοι). Στη θέση του ταμιευτήρα οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ίδιοι με αυτούς στη θέση του φράγματος. Τα προβλήματα για το έργο αυτό ήταν περισσότερο τεχνικό, όπως π.χ. τα έργα εξόδου και φυγής των υδάτων (διώρυγα φυγής) από το χώρο του υπόγειου σταθμού. Σημειώνεται επίσης ότι το φράγμα θεμελιώθηκε πάνω στις ποτάμιες αποθέσεις με την κατασκευή στεγανού διαφράγματος (διαφραγματική κουρτίνα – τοίχος) μέχρι βάθους 23μ. Και τα δύο παραπάνω έργα απαιτούσαν τη λεπτομερή διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών.

- Φράγμα Θησαυρού (Νέστος). Λιθόρριπτο με κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα. Έχει ύψος 172μ. Στη θέση του φράγματος επικρατούν κρυστασχιστώδεις σχηματισμοί της ζώνης της Ροδόπης (γνεύσιοι, γρανιτογνεύσιοι, αμφιβολιτικοί γνεύσιοι, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι) ενώ σε αυτή του ταμιευτήρα οι ίδιοι σχηματισμοί και επί πλέον φακοί μαρμάρων. Τα τεχνικογεωλογικά προβλήματα στο έργο αυτό συνδέονται με τη σοβαρή

αστάθεια στο δεξιό πρηνές και μικρότερη στο αριστερό. Λήφθηκαν μέτρα αποστράγγισης και αντιστήριξης, έγινε μετατόπιση του σταθμού παραγωγής και τροποποίηση στη λεκάνη αποτόνωσης. Η διαφραγματική κουρτίνα κάτω από την κοίτη έφθασε τα 120μ., ενώ πραγματοποιήθηκαν και τσιμεντενέσεις τάπητα.

● Φράγμα Πλατανόβρυσης (Νέστος). Βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (R.C.C.) ύψους 95μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση φράγματος είναι γρανιτογενέσιοι, αμφιβολιτικοί γενέσιοι και μιγματίτες ενώ στη θέση του ταμιευτήρα κρυσταλλοσχιστώδεις σχηματισμοί της ζώνης Ροδόπης (γενέσιοι και γρανίτες). Δεν αναφέρθηκαν σοβαρά τεχνικογεωλογικά προβλήματα.

● Φράγμα Μεσοχώρας (Αχελώος). Λιθόρριπτο με ανάντη πλάκα από σκυρόδεμα, ύψους 150μ. Τη θέση του φράγματος καταλαμβάνουν λεπτο – μεσοσωματώδεις ασβεστόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι και κερατόλιθοι της ζώνης Πίνδου ενώ αυτή του ταμιευτήρα Ιουρασικοί – Κρητιδικόι ασβεστόλιθοι της ζώνης Πίνδου και νεώτερος φλύσχης. Τα κυριότερα προβλήματα ήταν τα ακόλουθα:

- Αφαίρεση δύο στρώσεων, ιλυόδους άμμου ή αμμώδους ιλύος από τις ποτάμιες αποθέσεις κάτω από το φράγμα
- Ομαλοποίηση (αφάλυνση) των παρειών της στενωπού του ποταμού στην έκταση της ζώνης του φράγματος
- Επιπτώσεις στο λιθόρριπτο φράγμα από τυχόν εκδήλωση σεισμού μεγάλου μεγέθους
- Αστάθεια πρηνούς ανάντη και ψηλότερα της εισόδου της σήραγγας εκτροπής και του εκκενωτή πυθμένα

● Φράγμα Μετσοβίτικου (Αραχθός – παραπ. Μετσοβίτικου). Χωμάτινο με αδιαπέρατο πυρήνα, ύψους 12μ. Στη θέση του φράγματος αλλά και του ταμιευτήρα απαντούν οι γεωλογικοί σχηματισμοί του φλύσχης της Ιονίου ζώνης και ειδικότερα στη θέση του φράγματος επικρατούν οι ιλυόλιθοι.

● Φράγμα Πουρναρίου II (Αραχθός). Το ύψος του πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια των αποθέσεων του ποταμού είναι 14μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος και του ταμιευτήρα ανήκουν στο φλύσχης της Ιονίου ζώνης

● Φράγμα Ιλαρίωνα (Αλιάκμονας). Από αμμοχάλικα κοίτης και αδιαπέρατο πυρήνα, ύψους 140μ. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη θέση του φράγματος είναι ασβεστόλιθοι, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και φυλλίτες ενώ στη θέση του ταμιευτήρα ασβεστόλιθοι, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, φυλλίτες, δουνίτες της Πελαγονικής ζώνης και μολασσικοί σχηματισμοί Μεσοελληνικής αύλακας (κροκαλοπαγή, μάργες). Τα βασικά τεχνικογεωλογικά προβλήματα συνδέονται με την αστάθεια πρηνών κοντά στον άξονα του φράγματος και τη δυνατότητα διαφυγών νερού από τον ταμιευτήρα, λόγω παρουσίας υδροπερατών γεωλογικών σχηματισμών.

● Φράγμα Συκιάς (Αχελώος). Χωμάτινο, ύψους 150μ. Στη θέση του φράγματος οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι εναλλαγές Κρητιδικών ασβεστολίθων και αργιλικών σχιστόλιθων της ζώνης Πίνδου ενώ στη θέση του ταμιευτήρα εναλλαγές ασβεστολίθων, ιλυόλιθων, κερατόλιθων, αργιλικών σχιστόλιθων και Πινδικός φλύσχης. Τέλος, περιγράφονται και δύο μικρότερα υδροηλεκτρικά φράγματα της ΔΕΗ, αυτά του Άγρα και Γλαύκου:

● Φράγμα Άγρα (Εδεσσα). Χωμάτινο, ύψους 5μ., μήκους 630μ. Γίνεται εκμετάλλευση του υδάτινου δυναμικού λίμνης Βεγορίτιδας και ποταμού Βόδα. Σήμερα, λόγω πτώσης της στάθμης της λίμνης (από το 1974) λειτουργεί μόνο με τα νερά της περιοχής Νησιού. Γεωλογικά η περιοχή καταλαμβάνεται κυρίως από πετρώματα της ζώνης Αξιού και προς το δυτικά περιθώρια της πεδιάδας Νησιού συναντώνται πετρώματα της Πελαγονικής



ζώνης. Την περιοχή του ταμιευτήρα καλύπτουν στο σύνολό του λιμναίες αποθέσεις του Τεταρτογενούς.

- Φράγμα Γλαύκου (Αχαΐα). Αποτελείται από έργα συλλογής και μεταφοράς νερού (φράγμα υδροληψίας, διώρυγες προσαγωγής, σήραγγα προσαγωγής, πύργος εκτόνωσης και θάλαμος δικλείδων) καθώς και έργα παραγωγής ενέργειας (αγωγός πτώσεως και σταθμός). Γεωλογικά η περιοχή καταλαμβάνεται από πετρώματα της ζώνης Πίνδου (Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι, πρώτος φλύσχος, ραδιολαρίτες Ιουρασικού). Επίσης κατασκευάστηκαν και μεγάλα χωμάτινα φράγματα για αρδευτικούς – υδρευτικούς σκοπούς, όπως αυτό του Περδίκια, στην Πτολεμαΐδα, χωμάτινο που αστόχησε, του Πηνειού ύψους 53μ. για άρδευση, του Μόρνου, ύψους 126μ. για την άρδευση του λεκανοπεδίου της Αττικής, του Μπραμιανού στην Κρήτη, του Αγ. Δημητρίου στον Εύηνο, για την ενίσχυση της ύδρευσης των Αθηνών, του Σμοκόβου στο Σοφοδίτη για άρδευση.



**Εικόνα 5.1.** Το φράγμα Ατατούρκ στον ποταμό Ευφράτη



**Εικόνα 5.2.** Φράγμα Ιβαΐλογκραντ της Βουλγαρίας



**Εικόνα 5.3.** Πηγειός Ν. Ηλείας



**Εικόνα 5.4.** Ποταμός Καλέτζης, λίμνη Πλαστήρα



**Εικόνα 5.5.** Το λιθόρριπτο φράγμα του θυσαυρού, Νέστος



**Εικόνα 5.6.** Φράγμα Αποσελέμη, Ηράκλειο Κρήτης



**Εικόνα 5.7.** Φράγμα Ασωπού, Κόρινθος



**Εικόνα 5.8.** Φράγμα Αχελώου



Εικόνα 5.8. Φράγμα ποταμού Αμαρίου, Ρέθυμνο



Εικόνα 5.9. Φράγμα τριών φαραγγιών, Κίνα



**Εικόνα 5.10.** Φράγμα Νέστου - Δράμα



**Εικόνα 5.11.** Φράγμα Δαφνοζωναρά, Νέου Αργυρίου Ευρυτανίας



**Εικόνα 5.12.** Πλατανόβρυση Νέστου



**Εικόνα 5.13.** Νέο Αργύρι Ευρυτανίας - Το φράγμα



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΔΡΑΝΗ

### 6. Κατηγορίες αδρανών υλικών

Η ταξινόμηση και ο διαχωρισμός των αδρανών υλικών γίνεται με βάση την προέλευση τους, την πηγή λήψης, το μέγεθος των κόκκων καθώς επίσης και το ειδικό τους βάρος.

#### 6.1. Προέλευση

Με βάση την προέλευση τους διαχωρίζονται σε φυσικής προέλευσης, τεχνητά ή βιομηχανικά υλικά και ανακυκλωμένα.

1) Φυσικής προέλευσης είναι τα αδρανή τα οποία έχουν ληφθεί

από το φυσικό περιβάλλον και δεν έχουν υποστεί τίποτε περισσότερο από μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής (π.χ. θραυστά πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί, λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλίκων, λάβα κ.λπ.).

Αποτελούν τον κύριο όγκο των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται και ταξινομούνται σε:

α) αμμοχαλικώδεις χαλαρές αποθέσεις (sand and gravel aggregates) των οποίων η απόληψη είναι εύκολη, ενώ βρίσκονται συνήθως σε περιοχές με ήπιο ανάγλυφο και εύκολη πρόσβαση. Επειδή συνήθως δεν δίνουν υψηλής ποιότητας αδρανή υλικά και σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος επεξεργασίας και μεταφοράς τους, τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για χρήση κοντά στην πηγή λήψης. Τα τελευταία χρόνια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση των υλικών αυτών που συνήθως αποτελούν «χαμηλής ποιότητας αδρανή» καθώς απαιτούν κάποια επεξεργασία πριν τη χρήση τους (ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΣ 2005, SABATAKAKIS et 2006, ΚΟΥΚΙΣ et al 2006). Προς την κατεύθυνση αυτή συμβάλλουν η εκτεταμένη εξάπλωση και η εύκολη και περιβαλλοντικά συνήθως αποδεκτή λήψη τους.

β) θραυστά υλικά (crashed stone aggregates) των οποίων οι διαδικασίες απόληψης απαιτούν διάνοιξη εκτεταμένων λατομείων. Η ραγδαία αστική ανάπτυξη και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί περιορισμοί για τη δημιουργία λατομείων δημιουργούν, σε ορισμένες περιοχές, ελλείψεις θραυστού υλικού καλής ποιότητας. Σε πολλές χώρες, όπου οι μεγαλουπόλεις απλώνονται σε εκτάσεις δεκάδων χιλιομέτρων, το μέλλον στρέφεται στην υπόγεια λατόμευση υλικών, αφού με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται προβλήματα όπως περιβαλλοντικοί περιορισμοί, ο θόρυβος, η σκόνη και η αντίδραση της τοπικής κοινωνίας στη θέα ενός λατομείου κοντά στην πόλη.

2) Τεχνητά ή βιομηχανικά είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας, από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ή άλλης προέλευσης. Τα κυριότερα τεχνητά ή βιομηχανικά υλικά είναι η σκωρία υψικαμίνων, η ιπτάμενη τέφρα λιγνιτών, ο μπετονίτης, το κουρασάνι, η κίσηρης, ο περλίτης και ο βερμικουλίτης.

3) Ανακυκλωμένα είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδάφισης, ασφατικών έργων κ.λπ.). Η ραγδαία αστική ανάπτυξη σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, όπου τα αδρανή υλικά αποτελούν το 70% - 73% των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στη χώρα (U.S.Geological Survey – FS 181, 2000), καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη των ανακυκλωμένων υλικών καθώς η δημιουργία νέων λατομείων κοντά στις μεγαλουπόλεις είναι πλέον πολύ δύσκολη μέχρι απαγορευτική. Τα ανακυκλωμένα υλικά χρησιμοποιούνται κατά 80% σαν υλικά οδοποιίας ενώ 20% για τη δημιουργία ασφατικού σκυροδέματος. Τα μπάτσα μπορούν να ανακυκλώνονται είτε σε σταθερές μονάδες ανακύκλωσης, είτε στον τόπο εξόρυξής τους με φορητό εξοπλισμό. Επιστημονικός στόχος παραμένει η εύρεση των κατάλληλων διαδικασιών, έτσι ώστε η απόδοση των τελικών προϊόντων με τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών να είναι εφάμιλλη των φυσικών.

## 6.2. Πηγή λήψης

Με βάση την πηγή, όπου γίνεται η απόληψη των φυσικών αδρανών υλικών, αυτά χωρίζονται σε φυσικά ή συλλεκτά αδρανή και σε αδρανή λατομείων.

1. Φυσικά ή συλλεκτά αδρανή ονομάζονται τα αδρανή που η λήψη τους γίνεται από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμιες αποθέσεις, πλευρικά κορήματα, αλλουβιακές αποθέσεις χαμηλών περιοχών κ.λπ.). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν ή να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία ανάλογα με τις απαιτήσεις (π.χ. θραύση, πλύσιμο, κ.λπ.). Επειδή στα υλικά αυτά υπάρχει αυξημένος κίνδυνος παρουσίας αργιλικής παιπάλης, έχουν κατά κανόνα αυξημένες απαιτήσεις ως προς την παρουσία της.

2. Αδρανή λατομείων είναι τα υλικά που η εξόρυξη τους γίνεται από ανοικτά ή υπόγεια λατομεία, όπου το πέτρωμα αποσπάται από τη βραχομάζα και υπόκειται σε περαιτέρω επεξεργασία (θραύση κ.λπ.). Η διαδικασία εξόρυξης αρχίζει μετά την αποκάλυψη του πετρώματος, ενώ η μέθοδος και ο τρόπος εκμετάλλευσης εξαρτώνται βασικά από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και τα τελικά επιθυμητά προϊόντα. Τα αδρανή λατομείων είναι η κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο, τόσο για την παραγωγή σκυροδέματος όσο και για άλλες χρήσεις. Η επιλογή μιας περιοχής για τη δημιουργία λατομείου βασίζεται σε διάφορα κριτήρια όπως η παρουσία κατάλληλου πετρώματος, η ποιότητά του, τα αποθέματα, το κόστος παραγωγής και η ζήτηση των προϊόντων καθώς επίσης και στους περιβαλλοντικούς και άλλους όρους που ισχύουν στην περιοχή.

## 6.3. Μέγεθος κόκκων

Με βάση το μέγεθος των κόκκων και σύμφωνα με τους Νέους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς για τα αδρανή (EN 12620) τα υλικά χωρίζονται σε χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα και στην παιπάλη (filler).

- Χονδρόκοκκα είναι τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου  $>4$  mm και ελάχιστο  $>2$  mm (ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι)
- Λεπτόκοκκα είναι τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου μέχρι 4 mm (διάφορα είδη άμμων)
- Παιπάλη (filler) είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2 mm και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70 – 100% από το κόσκινο με μέγεθος οπής 0.063 mm. Είναι ποικίλης σύστασης υλικό, κυρίως αργιλικό καθώς επίσης και ασβεστιτικό ή ιλυώδες.

## 6.4. Σκυροδέματα

Τα αδρανή υλικά αποτελούν το σκελετό του σκυροδέματος καλύπτοντας στο σύνολό τους (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) το 60%-75% του όγκου του σκυροδέματος (70%-85% του βάρους του ) και επηρεάζουν καθοριστικά τις ιδιότητές του, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη μορφή του (MINDESS and YOUNG 1981). Αφού τα αδρανή παραμορφώνονται πολύ λιγότερο από την τσιμεντόπαστα, αντιστέκονται στη διάδοση και ανάπτυξη των μικρορωγματώσεων που προκαλούνται από τη συστολή ξήρανσης και με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν και βελτιώνουν την αντοχή του τσιμεντοπολτού.

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει γενικά να ικανοποιούν τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ) καθώς και το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620. Θα πρέπει γενικά να αποτελούνται από κόκκους υγιείς, σκληρούς, ανθεκτικούς και απαλλαγμένους από βλαπτικές αργιλικές προσμίξεις, οι οποίες επηρεάζουν την ενυδάτωση του τσιμέντου καθώς και την πρόσφυση των κόκκων των αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Τα θραυστά αδρανή πρέπει να έχουν σφαιρική ή κυβική μορφή ενώ για χονδρόκοκκα αδρανή με διάσταση

μεγαλύτερη των 5mm το ποσοστό των κόκκων δυσμενούς μορφής (μεγαλύτερη/μικρότερη διάσταση >3:1) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% κατά βάρος. Επίσης, η συμβατική αντοχή του μητρικού πετρώματος των αδρανών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 65 MPa. Ο δείκτης Los Angeles (LAAV) πρέπει να είναι μικρότερος του 40% ενώ ο δείκτης αποσάθρωσης του πετρώματος (S), με τη χρήση αλάτων Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, μικρότερος από 10% για το κλάσμα της άμμου και μικρότερος του 12% για τα πλέον χονδρόκοκκα αδρανή.

Όσον αφορά τις επιβλαβείς προσμίξεις θα πρέπει να ελέγχεται η περιεκτικότητα εύθρυπτων και μαλακών κόκκων όπως σβώλων αργίλου, τεμαχίων γαιάνθρακα και λιγνίτη καθώς και κερατολίθου με ειδικό βάρος μικρότερο των 2.35 gr/cm<sup>3</sup>. Επίσης, θα πρέπει να ελέγχεται η περιεκτικότητα ορισμένων συστατικών (ενώσεις θείου, σιδήρου, μολύβδου ή ψευδαργύρου κ.λπ.), το οποία μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο σκυρόδεμα κάτω από ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο δείκτης ισοδύναμου άμμου (SE) πρέπει να είναι τουλάχιστον 65% (>75% για σκυρόδεμα εξαιρετικών απαιτήσεων). Μέχρι στιγμής σε Ευρωπαϊκό επίπεδο δεν έχουν καθοριστεί όρια για το ισοδύναμο άμμου. Γενικά θεωρείται ότι μία άμμος ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα της παιπάλης, όταν το ποσοστό της παιπάλης (<0.063 mm) είναι μικρότερο από 3% ή όταν ικανοποιεί τις εθνικές απαιτήσεις για τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου ή τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου ή υφίσταται πολυετής πείρα για την καταλληλότητα της συγκεκριμένης άμμου.

Είναι απαραίτητο να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που εξαρτάται από το μέγιστο κόκκο τους, όπως φαίνεται στους πίνακες 5.8, 5.9 και 5.10.

**Πίνακας 6.1.:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος θραυστών μέγιστο κόκκου 1'', για τη σειρά των Αμερικάνικων Κόσκινων ASTM E11

Κόσκινα		Διερχόμενα %		
Όνομασία	Ανοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε	Υποζώνη Ζ
0,25 *	250 μm	2 – 13	13 – 17	17 – 23
No 50	300 μm	3 – 14	14 – 20	20 – 27
No 30	600 μm	6 – 23	23 – 34	34 – 44
No 16	1,18 mm	12 – 32	32 – 47	47 – 60
No 8	2,36 mm	21 – 43	43 – 58	56 – 69
No 4	4,75 mm	33 – 56	56 – 70	70 – 78
3/8''	9,5 mm	51 – 73	73 – 84	84 – 89
1/2''	12,5 mm	61 – 80	80 – 89	89 – 93
1''	25,0 mm	95 – 100	100	100
1 1/2''	37,5 mm	100	100	100

\* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά Γερμανικών Κοσκίνων

**Πίνακας 6.2:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 1 ½'', για τη σειρά των Αμερικάνικων Κόσκινων ASTM E11

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25 *	250 μm	2 – 11	11 – 16
No 50	300 μm	3 – 13	13 – 19
No 30	600 μm	4 – 20	20 – 30
No 16	1,18 mm	7 – 29	29 – 42
No 8	2,36 mm	12 – 36	36 – 51
No 4	4,75 mm	21 – 45	45 – 62
3/8''	9,5 mm	34 – 60	60 – 74
1/2''	12,5 mm	41 – 66	66 – 80
3/4''	19,0 mm	51 – 75	75 – 87
1''	25,0 mm	60 – 84	84 – 93
1 1/2''	37,5 mm	95 – 100	100
2''	50,0 mm	100	100

\* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά Γερμανικών Κόσκινων

**Πίνακας 6.3.:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 3/8'', για τη σειρά Αμερικανικών Κόσκινων ASTM E11

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25*	250 μm	5 – 11	11 – 21
No 50	300 μm	7 – 15	15 – 26
No 30	600 μm	15 – 30	30 – 43
No 16	1,18 mm	25 – 45	45 – 60
No 8	2,36 mm	42 – 61	61 – 74
No 4	4,75 mm	69 – 80	80 – 88
3/8''	9,5 mm	100	100

\* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά Γερμανικών Κόσκινων

Με βάση τους νέους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς μη επιθυμητά πετρώματα για την παραγωγή αδρανών υλικών για σκυρόδεμα είναι η κιμωλία, η μάργα, πετρώματα χαλαρά συνδεδεμένα με αργιλικά ορυκτά καθώς και πετρώματα με έντονη σχιστότητα, όπως σχιστόλιθοι και φυλλίτες, που όχι μόνο καθιστούν δύσκολη την εργασιμότητα του σκυροδέματος αλλά μειώνουν την αντοχή του και το φαινόμενο βάρος. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε πετρώματα που περιέχουν υψηλό ποσοστό δολομιτικών προσμίξεων ή άμορφων προσμίξεων οξειδίου του πυριτίου (π.χ. κερατόλιθοι) (PENKALA et al 1972). Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να γίνεται εξέταση των συγκεκριμένων αδρανών για διερεύνηση της δυνητικής βλαπτικότητάς τους, σύμφωνα με τις μεθόδους της αλκαλοπυριτικής ή της αλκαλοασβεστιτικής αντίδρασης.

#### **6.5. ΣΥΡΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ:**

Τα συρματοκιβώτια είναι εύκαμπτες, μονολιθικές κατασκευές χρήσιμες για την προστασία των πρηνών από την διάβρωση, τη σταθεροποίηση απότομων κλιτύων, τον εγκιβωτισμό της κοίτης ποταμών κ.α. Είναι συνήθως ορθού τετραγωνικού (αλλά και κυλινδρικού) σχήματος «κλουβιά» κατασκευασμένο από μεταλλικό, εξαγωνικής οπής, πλέγμα και πληρωμένα με βραχώδη υλικά. Τα βραχώδη υλικά που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση των συρματοκιβωτίων πρέπει να είναι σκληρά, υγιή, καθαρά, χωρίς ρωγμές που μπορούν να μειώσουν την αντοχή τους. Δεν χρησιμοποιούνται σχιστόλιθοι και άλλα πετρώματα που διαχωρίζονται εύκολα. Το κοκκομετρικό μέγεθος του υλικού που χρησιμοποιείται συνήθως είναι διαμέτρου μεταξύ 5 in. και 8 in., με το μεγαλύτερο ποσοστό μεταξύ 5 in. μέχρι 6 in., κυβικού σχήματος με στρογγυλεμένες άκρες. Η υγρασία απορρόφησης δεν πρέπει να ξεπερνά το 4%, ενώ ο δείκτης υγείας με τη δοκιμή της αντοχής σε ψύξη και απόψυξη να είναι μικρότερος από 0.80.

**Εικόνα 6.1.** Κατασκευή τοίχου από συρματοκιβώτια για τη σταθεροποίηση της κατολίσθησης στη θέση Κερκίτσα Ν.Αχαΐας



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας 1.** Αντοχή σε απλή θλίψη για διάφορους τύπους συμπαγών πετρωμάτων

Πετρώματα	Θλιπτική αντοχή $\sigma_c$ (MPa)		Αριθμός υλικών διαφορετικής προέλευσης
	Μέσος Όρος	Εύρος τιμών	
<b>Πυριγενή</b>			
♦ <u>Πλουτώνια</u> <u>Φλεβιτικά</u>			
Γρανίτης	183	58-300	76
Διορίτης	192	64-333	14
Γάββρος	218	126-311	6
Δολερίτης	294	211-410	3
♦ <u>Ηφαιστειακά</u>			
Ανδεσίτης	140	77-304	10
Βασάλτης	156	42-355	34
Διαβάσης	238	115-320	15
Ηφ. Τόφφος	57	4-290	19
<b>Ιζηματογενή</b>			
♦ <u>Κλαστικά</u>			
Κροκαλοπαγές	106	18-226	12
Ψαμμίτης	98	10-318	116
Γραουβάκης	81	30-221	12
Σχιστή άργιλος	106	4-504	53
♦ <u>Χημικά - Βιογενή</u>			
Ασβεστόλιθος	105	12-294	149
Δολομίτης	123	33-420	16
Κερατόλιθος	244	202-360	4
Ορυκτό αλάτι	46	21-157	19
<b>Μεταμορφωμένα</b>			
Φυλλίτης	97	7-314	9
Σχιστόλιθος	96	24-245	21
Γνεύσιος	154	26-340	39
Χαλαζίτης	232	77-629	47

**Πίνακας 2.** Φυσικές ιδιότητες χαρακτηριστικών συμπαγών πετρωμάτων

Πετρώματα	Ειδικό βάρος gr/cm <sup>3</sup>	Ολικό Πορώδες %	Ενεργό Πορώδες %	Ταχύτητα διαμήκων κυμάτων V <sub>p</sub> km/sec	Ηλεκτρική αντίσταση Ohm-m	Θερμική αγωγιμότητα 10 <sup>-3</sup> cal/cm-sec C <sup>0</sup>
<b>Πυριγενή</b>						
♦ Πλουτώνια – Φλεβ.						
Γρανίτης	2.5 – 2.7	0.05 – 3	0.2 – 1.6	4.6 – 6.0	500 – 20.000	6.2 – 9.0
Διορίτης	2.8 – 2.9	0.1 – 4	0.1 – 0.4	5.2 – 6.6	500 – 20.000	6.0 – 8.5
Γάββρος	2.7 – 3.0	0 – 2	0 – 0.3	5.4 – 6.7	500 – 20.000	6.0 – 9.0
♦ Ηφαιστειακά						
Ρυόλιθος	2.5 – 2.7	1 – 7	0.1 – 5.6	4.5 – 6.3	10 – 5.000	7.4 – 8.8
Ανδεσίτης	2.2 – 2.7	2 – 11	0.1 – 4.9	5.0 – 6.3	20 – 5.000	4.0 – 8.5
Βασάλτης	2.2 – 2.8	0.1 – 10	0.1 – 9.9	5.0 – 6.6	20 – 5.000	4.0 – 8.6
<b>Ιζηματογενή</b>						
♦ Κλαστικά						
Ψαμίτης	1.9 – 2.6	0.5 – 42	0.7 – 13.8	1.0 – 4.4	20 – 500	3.5 – 7.7
Ιλιόλιθος	2.2 – 2.5	2.2 – 24	0.4 – 6.3	1.4 – 4.4	20 – 500	3.0 – 7.5
Σχιστή άργιλος	2.3 – 2.7	2.9 – 55	0.2 – 6.1	1.5 – 3.5	150 – 500	2.2 – 6.9
♦ Χημικά Βιογενή						
Ασβεστόλιθος	2.5 – 2.7	0.8 – 27	0.1 – 1.8	2.8 – 7.1	200 – 10 <sup>5</sup>	4.7 – 8.0
Δολομίτης	2.5 – 2.7	0.3 – 25	0.3 – 1.2	3.0 – 7.0	50 – 10.000	8.9 – 13.9
Κιμωλία	2.3 – 2.5	4 – 42	0.3 – 4.1	1.7 – 4.2	50 – 10.000	4.7 – 6.4
<b>Μεταμορφωμένα</b>						
Μάρμαρα	2.4 – 2.7	0.1 – 6	0.1 – 0.8	3.8 – 6.9	1.000 – 10 <sup>5</sup>	4.7 – 8.0
Μαρμαρ. Σχιστόλιθος	2.6 – 2.8	0.4 – 10	0 – 0.6	2.3 – 5.7	100 – 3.000	4.1 – 8.9
Γνεύσιος	2.6 – 3.2	0.3 – 2	0.1 – 0.8	3.5 – 7.5	100 – 5000	4.9 – 10.4
Χαλαζίτης	2.6 – 2.7	0.8 – 7	0.1 – 0.8	5.8 – 6.3	500 – 5.000	7.4 – 18.9



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Γεώργιος Χρ. Κούκης, Νικόλαος Σαμπατακάκης, (2007), « ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ », Πανεπιστήμιο Πατρών, (2007)
- Κωνσταντίνος Ι. Παπαντωνόπουλος, (2005), « ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗ », Τμήμα πολιτικών μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, (2007)
- Κούκη Α., (2006), « ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΛΗΡΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΩΝ ΒΡΑΧΩΝ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ », Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, (2006)
- Χρήστος Ν. Μαραγκός, (1997), « ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ – ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ, ΦΡΑΓΜΑΤΑ »
- Duncan C. Wyllie, « FOUNDATIONS ON ROCK », Vancouver, (1998)
- Σοφιανός Α. Ι., « Σημειώσεις μηχανικής πετρωμάτων », Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2001)
- Ρόζος Δ., « Εγχειρίδιο τεχνικής γεωλογίας Ι », Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (Διαδίκτυο)
- Bieniawski, Z.T. (1984) « ROCK MECHANICS DESIGN IN MINING AND TUNNELING », Balkena, Rotterdam
- Brown, E.T. (Ed.) (1981), « ROCK CHARACTERIZATION, TESTING AND MONITORING »: ISRM suggested ME thobs, Pergamon, Oxford
- Brown, E.T. (1987) « ANALYTICAL AND COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING ROCK MECHANICS », Allen & Unwin, London
- Hoek, E. and Bray, J. (1981) « ROCK SLOPE ENGINEERING, 3D ED. » INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, London
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1980) « UNDERGROUND EXCAVATIONS IN ROCK », Institute of mining and metallurgy, London