

ΧΡΗΣΤΟΣ Ε. ΤΣΟΓΚΑΣ

# Υδροδυναμικά Έργα

ISBN 978-960-456-509-2

© Copyright, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Χρήστος Τσόγκας, Σεπτέμβριος 2018

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**

**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΙΚΕ**

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**www.ziti.gr**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:**

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα

Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** www.ziti.gr

**Η** γρήγορη τεχνολογική ανάπτυξη όλων σχεδόν των χωρών του κόσμου τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, συνοδεύτηκε από μεγάλες απαιτήσεις σε νερό για ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας και βιομηχανική χρήση. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται στις περισσότερες περιπτώσεις με τη δημιουργία ταμιευτήρων, που αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες νερού πίσω από φράγματα.

Τα φράγματα είναι μεγάλα έργα, πολυδάπανα και συνήθως δύσκολα. Τα παλιότερα χρόνια (πριν από το 1950) σχεδόν στην πλειονότητά τους κατασκευάζονταν από σκυρόδεμα. Με την ανάπτυξη όμως της εδαφομηχανικής και τη ραγδαία εξέλιξη των χωματουργικών μηχανημάτων, τα σκυρόδετα φράγματα εκτοπίστηκαν από τα χωμάτινα και λιθόρριπτα, ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 πολλαπλασιάζονται τα νέας τεχνολογίας φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή όπως διεθνώς είναι γνωστά, φράγματα R.C.C. (Roller Compacted Concrete), που σήμερα σχεδόν αποτελούν τον κανόνα.

Στην Ελλάδα, η κατασκευή φραγμάτων αρχίζει ουσιαστικά με την ίδρυση της ΔΕΗ, ενώ τα χωμάτινα φράγματα εμφανίζονται στον Ελλαδικό χώρο μέσα στη δεκαετία του 1960.

Σήμερα (2010) έχουν κατασκευαστεί περισσότερα από 100 μεγάλα φράγματα σε όλους σχεδόν τους ποταμούς της Ελλάδος και υπάρχει προοπτική κατασκευής και άλλων τα επόμενα χρόνια.

Ο τόσο ζωτικός αυτός τομέας της μηχανικής των φραγμάτων, στερούνταν ελληνικής βιβλιογραφίας, γεγονός που με οδήγησε το 1980 στη σκέψη, να συμμαζέψω γνώσεις και εμπειρίες και να συγγράψω το βιβλίο «Φράγματα-Τεχνητές λίμνες-Υδροδυναμικά έργα», που εξέδωσε το Υπουργείο Παιδείας το 1982, για χρήση των σπουδαστών των ΤΕΙ της χώρας.

Στη συνέχεια, η συνεργασία μου με την ΑΕΓΕΚ, οι εμπειρίες μου από την παρακολούθηση της κατασκευής των φραγμάτων Ασωμάτων, Σφηκιάς, Πηγών Αώου, Μεσοχώρας, Θησαυρού, Πλατανόβρυσης και οι μεταπτυχιακές σπουδές στην Ολλανδία και Αγγλία με ώθησαν στη συγγραφή ενός βιβλίου με τίτλο 'Υδροδυναμικά έργα' που εκδόθηκε από τον Ο.Ε.Δ.Β. το 1982. Στη συνέχεια εκδόθηκε από



τον εκδοτικό οίκο «Ολυμπιάς» το 1990 ο πρώτος τόμος των «Υδροδυναμικών Έργων», «Φράγματα», με προοπτική τη συγγραφή και των επόμενων τόμων, που όμως αναβάλλονταν συνεχώς λόγω των ανειλημμένων σοβαρών απασχολήσεων.

Τώρα πια, που οι υποχρεώσεις ελαττώθηκαν, αποτόλμησα τη συγγραφή του τρίτου κατά χρονολογική σειρά βιβλίου «Υδροδυναμικά Έργα» που περιλαμβάνει εκτός από τα «Φράγματα» όλα τα συναφή έργα (Υπερχειλιστές, Έργα απόσβεσης της ενέργειας, Έργα εξόδου) καθώς και τις Υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τις Τεχνητές λίμνες, τις Υδατοπτώσεις, το Υδραυλικό πλήγμα, και στοιχειώδη αναφορά στους Υδροστροβίλους.

Το βιβλίο περιλαμβάνει όλα τα γνωστά είδη φραγμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στα χωμάτινα, που αποτελούν το είδος, που σήμερα κατά κανόνα εφαρμόζεται στην Ελλάδα, ενώ γίνεται μικρή μόνο αναφορά στα σκυρόδετα, από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Φιλοδοξεί να αποτελέσει βοήθημα σε όσους ξεκινούν ή θέλουν να ξεκινήσουν μια πορεία γνωριμίας με το αντικείμενο και να βοηθήσει μελετητές και κατασκευαστές, που χρειάζονται ειδικές γνώσεις, με την παραπομπή σε διεθνή περιοδικά και δημοσιεύσεις.

Η σημαντική διεθνής βιβλιογραφία, που χρησιμοποιήθηκε και αναφέρεται στο τέλος κάθε κεφαλαίου, ελπίζεται να αποτελέσει οδηγό για πιο εμπειριστατωμένη μελέτη.

Ευχαριστώ θερμά όλους, όσοι συνέβαλαν στην αρτιότερη παρουσίαση με υποδείξεις, παροχή οδηγιών και διευκολύνσεων. Ιδιαίτερη μνεία οφείλουμε στον αείμνηστο παιδικό φίλο, συνάδελφο και Δ/ντή στο ΚΕΨΕ Θησαυρού επί σειρά ετών, τον Σωτήρη Παπαδόπουλο, που δεν είναι πια κοντά μας. Θερμές ευχαριστίες στον συμφοιτητή και φίλο Γιάννη Τριανταφύλλου Διευθύνοντα Σύμβουλο της εταιρίας ΑΕΓΕΚ, για τη άριστη συνεργασία μας στην κατασκευή του φράγματος των Ασωμάτων και τη διάθεση πολλών στοιχείων από την κατασκευή των φραγμάτων Πηγών Αώου και Μεσοχώρας, καθώς και στους Μηχανικούς της εταιρίας κ. Π. Σερβετά, Στ. Πρεβελάκη, Π. Ρεμπή.

Θα ήταν παράλειψη να μην τύχουν ιδιαίτερης μνείας οι μηχανικοί της ΔΑΥΕ/ΔΕΗ Dr. Νίκος Μουτάφης και Dr. Ι. Στεφανάκος, τώρα πλέον δάσκαλοι στο ΕΜΠ, που η τεράστια εμπειρία τους στην κατασκευή φραγμάτων και η ενθάρυνσή τους, οδήγησαν στη συγγραφή αυτού του πονήματος.

*Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2018*

*Χρήστος Ε. Τσόγκας*

**Μέρος Ι Φράγματα**

**1. Φράγματα**

1.1. Εισαγωγή .....	3
1.2. Είδη φραγμάτων .....	4
1.3. Τα φράγματα της Ελλάδας .....	7
Βιβλιογραφία .....	8

**2. Φράγματα βαρύτητας**

2.1 Γενικά .....	9
2.2. Αναπτυσσόμενες δυνάμεις .....	10
2.2.1. Το βάρος του φράγματος .....	11
2.2.2. Η υδροστατική πίεση .....	11
2.2.3. Η άνωση Α1 .....	13
2.2.4. Η πίεση των φερτών υλών .....	16
2.2.5. Η πίεση του πάγου .....	16
2.2.6. Οι σεισμικές καταπονήσεις .....	18
Παράδειγμα 2.1 .....	19
2.2.7. Απρόβλεπτη αύξηση της στάθμης .....	19
2.3. Συνδυασμός φορτίσεων - συντελεστές ασφάλειας .....	21
2.4. Συνθήκες ισορροπίας .....	22
2.4.1. Ευστάθεια σε ανατροπή .....	22
Παράδειγμα 2.2 .....	23
2.4.2. Ευστάθεια σε ολίσθηση .....	24
Παράδειγμα 2.3 .....	25
2.4.3. Έλεγχος των αναπτυσσόμενων τάσεων .....	26
Παράδειγμα 2.4 .....	27
2.5. Έλεγχος ρηγματώσεων .....	28

2.5.1. Γενικά .....	28
2.5.2. Θερμότητα ενυδάτωσης .....	29
2.5.3. Ψύξη του σκυροδέματος .....	29
2.5.4. Άλλες αιτίες ρηγματώσεων .....	31
2.6. Αρμοί διαστολής .....	37
2.7. Υπερύψωση υπάρχοντος φράγματος .....	42
2.8. Κατασκευή .....	43
2.9. Τρόποι κατασκευής .....	48
Βιβλιογραφία .....	54

### 3. Αντηριδωτά φράγματα

3.1. Φράγματα βαρύτητας με διάκενα .....	57
3.2. Γενικά περί αντηριδωτών φραγμάτων .....	61
3.3. Τα στοιχεία των αντηριδωτών φραγμάτων .....	63
1. Το τοιχείο .....	63
1α. Χωρίς τοιχείο .....	63
1β. Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος .....	64
1γ. Κυλινδρικές επιφάνειες .....	65
1δ. Θολωτές επιφάνειες .....	66
2. Οι αντηρίδες .....	66
3.4. Ευστάθεια αντηριδωτού φράγματος .....	67
Βιβλιογραφία .....	71

### 4. Τοξωτά φράγματα

4.1. Γενικά .....	73
4.2. Μορφές τοξωτών φραγμάτων .....	74
4.2.1. Φράγματα σταθερής ακτίνας, με κυλινδρική την ανάντι επιφάνειά τους .....	75
Παράδειγμα 4.1 .....	82
4.2.2. Φράγματα με σταθερή επίκεντρη γωνία .....	83
4.2.3. Φράγματα μεταβλητής ακτίνας και γωνίας .....	85
4.2.4. Άλλοι τύποι τοξωτών φραγμάτων .....	86
4.3. Μέθοδοι υπολογισμού .....	86
4.3.1. Απλή θεωρία κυλινδρικής επιφάνειας .....	88
4.3.2. Μέθοδος των ενεργών τόξων .....	90
4.3.3. Μέθοδος στύλων και τόξων .....	93
4.3.4. Μέθοδος του ενός στύλου .....	94
4.3.5. Μέθοδος της δοκιμαστικής φόρτισης .....	95

4.3.6. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....	98
4.3.7. Γραφική λύση .....	99
4.4. Επίδραση της θερμοκρασίας .....	102
4.5. Επίδραση του εδάφους θεμελίωσης .....	103
4.6. Συντελεστές ασφάλειας .....	108
4.7. Εμπειρικοί υπολογισμοί των στοιχείων τοξωτών φραγμάτων .....	109
4.7.1. Γενικά .....	109
4.7.2. Υπολογισμός στοιχείων .....	111
Παράδειγμα 4.2 .....	114
4.8. Ρηγματώσεις τοξωτών φραγμάτων .....	114
4.9. Ψύξη του σκυροδέματος .....	119
4.10. Τρόποι αντιμετώπισης των ρηγματώσεων .....	121
4.11. Εκκένωση του ταμιευτήρα .....	124
Βιβλιογραφία .....	125
<b>5. Χωμάτινα φράγματα</b>	
5.1. Γενικά .....	127
5.1.1. Τύποι χωμάτινων φραγμάτων .....	128
5.1.α. Χωμάτινα φράγματα με διάφραγμα .....	128
5.1.β. Ομογενή χωμάτινα φράγματα .....	129
5.1.γ. Ετερογενή φράγματα ή κατά ζώνες .....	131
Παράδειγμα 5.1 .....	132
5.1.2. Αστοχίες χωμάτινων φραγμάτων .....	138
5.2. Διατομή χωμάτινου φράγματος .....	148
5.2.1. Επιλογή της διατομής .....	148
5.2.2. Ύψος φράγματος .....	150
5.2.2.1. Υψόμετρο του ταμιευτήρα .....	151
5.2.2.2. Ανύψωση στάθμης λόγω πλημμύρας .....	151
5.2.2.3. Ύψος κύματος .....	152
Παράδειγμα 5.2 .....	154
5.2.2.4. Ελάχιστο ελεύθερο ύψος .....	154
5.2.3. Πλάτος της στέψης .....	155
5.2.4. Το πλάτος της βάσης .....	157
5.2.5. Οι κλίσεις των πρανών .....	157
5.2.6. Ο πυρήνας .....	160
5.2.6.1. Με αργιλικό υλικό .....	160
5.2.6.2. Με άλλα υλικά .....	163
α) Σκυρόδεμα .....	163

β) Ασφαλτοσκυρόδεμα (κεφ. 6.3) .....	163
γ) Μembrάνες (κεφ. 6.4) .....	164
5.2.7. Φίλτρα-Μεταβατικές ζώνες .....	165
Παράδειγμα 5.3 .....	165
5.2.8. Προστασία των πρανών .....	168
5.2.8.1. Προστασία ανάντι πρανούς .....	168
5.2.8.2. Προστασία του κατάντι πρανούς (φωτ. 5.2.7 -8-9) .....	172
5.3. Θεμελίωση χωμάτινων φραγμάτων .....	173
5.3.1. Γενικά .....	173
5.3.2. Θεμελίωση σε βραχώδη εδάφη .....	174
5.3.2.1. Τιμμεντενέσεις .....	178
5.3.2.1.1. Γενικά .....	178
5.3.2.1.2. Τιμμεντενέσεις σε βραχώδη εδάφη .....	179
5.3.3. Θεμελίωση σε αλλουβιακές αποθέσεις .....	193
5.3.3.1. Τιμμεντενέσεις με μανσέτες (Tube aux manchettes, Packer aux manchettes) .....	196
5.3.3.2. Διαφραγματικός τοίχος .....	200
5.3.3.3. Jet Grouting .....	204
5.3.3.4. Αδιαπέρατος τάπητας ανάντι .....	206
Παράδειγμα 5.4 .....	208
5.3.3.5. Τάφος διακοπής .....	209
5.3.3.6. Πασσαλοσανίδες .....	210
5.3.3.7. Βοηθητικά τεχνικά έργα .....	211
5.3.3.7.1. Στραγγιστικός τάπητας κατάντι .....	211
5.3.3.7.2. Στραγγιστήρι στο κατάντι ποδαρικό του φράγματος .....	213
5.3.3.7.3. Ανακουφιστικές γεωτρήσεις .....	214
5.3.4. Θεμελίωση σε λεπτόκοκκα εδάφη .....	216
5.4. Το πρόβλημα της διήθησης μέσα και κάτω από το φράγμα .....	216
5.4.1. Γενικά .....	216
5.4.2. Δίκτυα ροής .....	218
5.4.3. Υπολογισμός της διήθησης .....	219
Παράδειγμα 5.4 .....	221
Εφαρμογές .....	223
1 <sup>η</sup> εφαρμογή .....	223
2 <sup>η</sup> εφαρμογή .....	224
5.4.4. Γραμμή κορεσμού .....	225
5.4.5. Μέτρα για την αποφυγή διασωλήνωσης .....	226
5.4.6. Μέτρα περιορισμού της διήθησης .....	229



5.4.6.1. Αδιαπέρατα στρώματα .....	230
Α. Αδιαπέρατη ανάντι παρειά του φράγματος .....	230
Β. Αδιαπέρατο τοίχιο στο έδαφος .....	231
Γ. Αδιαπέρατο διάφραγμα στο έδαφος .....	232
Δ. Αδιαπέρατος τάπητας ανάντι .....	233
5.4.7. Εφαρμογή στρωμάτων αποστράγγισης .....	233
5.4.8. Διήθηση σε ομογενές φράγμα με στραγγιστικό τάπητα .....	237
Παράδειγμα 5.4 .....	241
5.4.9. Υπολογισμός των διαστάσεων ενός στραγγιστικού τάπητα .....	243
Παράδειγμα 5.5 .....	244
5.4.10. Ομογενή χωμάτινα φράγματα με στραγγιστήρα στο κατάντι άκρο .....	247
Παράδειγμα 5.6 .....	249
5.4.11. Διήθηση σε χωμάτινο φράγμα με πυρήνα .....	252
Παράδειγμα 5.7 .....	254
5.5. Κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων .....	255
5.5.1. Εκτροπή της ροής του ποταμού .....	255
5.5.2. Εκσκαφές θεμελίωσης .....	261
5.5.2.1. Γενικά .....	261
5.5.2.2. Επιφάνεια θεμελίωσης του πυρήνα .....	261
5.5.2.3. Επεξεργασία των αντρερισμάτων .....	269
5.5.3. Τοποθέτηση και συμπύκνωση των υλικών .....	280
5.6. Όργανα ελέγχου λειτουργίας χωμάτινων φραγμάτων .....	291
5.6.1. Γενικά .....	291
5.6.2. Σκοπός της τοποθέτησης των οργάνων .....	291
5.6.3. Τύποι οργάνων .....	293
5.6.3.1. Πιεσόμετρα .....	293
1. Πιεσόμετρο ανοιχτού σωλήνα .....	293
2. Υδραυλικό πιεσόμετρο .....	294
3. Πνευματικό πιεσόμετρο .....	297
4. Ηλεκτρικό πιεσόμετρο .....	298
5.6.3.2. Μηκνσιόμετρα .....	299
5.6.3.3. Κλισιόμετρα .....	300
5.6.3.4. Επιταχυνσιόμετρο .....	304
5.7. Ρηγματώσεις χωμάτινων φραγμάτων .....	305
5.7.1. Ανάπτυξη και φύση των ρηγματώσεων .....	305
5.7.2. Τρόποι αντιμετώπισης των ρηγματώσεων .....	307
5.7.3. Εμπειρία - Πρακτικές .....	308
Βιβλιογραφία ελληνική .....	310
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	312

## 6. Λιθόρριπτα φράγματα

6.1. Λιθόρριπτα με ανάντι πλάκα σκυροδέματος (CFRD) .....	315
6.1.1. Ο παραδοσιακός σχεδιασμός και η εξέλιξή του .....	315
6.1.2. Ο σχεδιασμός σήμερα .....	323
6.1.2.1. Η λιθορριπή .....	323
6.1.2.2. Η ζώνη 2, υποστήριξης της πλάκας από σκυρόδεμα .....	327
6.1.2.3. Η σκυροδέτηση της πρόσοψης .....	329
6.1.2.3.1. Η πλάκα της ανάντι όψης του φράγματος .....	329
6.1.2.3.2. Η πλάκα του ποδαρικού και ο οπλισμός .....	329
6.1.2.3.3. Οι αρμοί .....	330
6.1.2.3.4. Το σκυρόδεμα .....	336
6.1.2.3.5. Διαστάσεις και ευστάθεια της πλίνθου .....	338
6.1.2.3.6. Τοίχος προστασίας στη στέψη ή τοίχος κορυφής ή παραπέτο ...	338
6.1.2.4. Θεμελίωση .....	339
6.1.2.4.1. Θεμελίωση της πλίνθου .....	339
6.1.2.4.2. Θεμελίωση της λιθορριπής .....	340
6.1.2.4.3. Τιμμεντενέσεις .....	340
6.1.2.5. Όργανα ελέγχου .....	341
6.1.3. Η κατασκευή .....	341
6.1.3.1. Προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέτησης .....	341
6.1.3.2. Η σκυροδέτηση .....	348
6.1.3.3. Η σκλήρυνση του σκυροδέματος .....	349
6.1.4. Η περίπτωση του φράγματος Salt Springs .....	353
6.1.4.1. Γενικά .....	353
6.1.4.2. Περιγραφή της κατάστασης .....	353
6.1.4.3. Περιγραφή του συστήματος γεωμεμβράνης με PVC .....	353
6.1.4.4. Τοποθέτηση .....	356
6.1.4.5. Αποτελέσματα .....	356
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	357
Βιβλιογραφία ελληνική .....	358
6.2. Λιθόρριπτα φράγματα με πρόσοψη από ασφαλτοσκυρόδεμα .....	359
6.2.1. Γενικά .....	359
6.2.2. Βασικές αρχές σχεδιασμού .....	362
6.2.2.1. Γενικά .....	362
6.2.2.2. Απαιτήσεις σχεδιασμού .....	363
6.2.2.3. Τμήματα της αδιαπέρατης στρώσης .....	365
6.2.2.3.1. Συνδετική στρώση .....	365
6.2.2.3.2. Αδιαπέρατες στρώσεις .....	365

6.2.2.3.3. Η αποστραγγιστική στρώση .....	366
6.2.2.3.4. Σφραγιστική επικάλυψη .....	366
6.2.2.3.5. Σύνδεση με τη θεμελίωση σε βράχο .....	367
6.2.2.3.6. Σύνδεση με τη θεμελίωση σε έδαφος .....	369
6.2.2.3.7. Περιμετρική σήραγγα .....	371
6.2.2.3.8. Σύνδεση με βοηθητικές κατασκευές. ....	371
6.2.2.3.9. Σύνδεση με τη στέψη του φράγματος .....	372
6.2.3. Κατασκευαστικές μέθοδοι .....	372
6.2.3.1. Θερμοκρασίες .....	373
6.2.3.2. Ανάμιξη .....	373
6.2.3.3. Μεταφορά .....	374
6.2.3.4. Διάστρωση του υλικού .....	375
6.2.3.5. Συμπύκνωση .....	375
6.2.3.6. Επεξεργασία των ραφών (αρμών) .....	376
6.2.4. Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας .....	376
6.2.4.1. Γενικά .....	376
6.2.4.2. Αστοχίες κατά την πρώτη πλήρωση .....	376
6.2.4.3. Κατασκευαστικά προβλήματα .....	377
6.2.4.4. Προβλήματα που σχετίζονται με την πίσσα .....	378
6.2.4.5. Γήρανση .....	378
6.2.4.6. Έλεγχος της στρώσης .....	378
6.2.5. Το μέλλον των λιθόριπτων φραγμάτων με πρόσοψη από ασφαλτοσκυρόδεμα .....	379
6.2.6. Συμπερασματικά .....	379
Βιβλιογραφία .....	380
6.3. Χωμάτινα-λιθόρριπτα φράγματα με πυρήνα από ασφαλτοσκυρόδεμα	382
6.3.1. Εισαγωγή .....	382
6.3.2. Χαρακτηριστικά των πυρήνων από ασφαλτοσκυρόδεμα .....	382
6.3.3. Βασικές αρχές σχεδιασμού .....	384
6.3.4. Κατασκευαστικές μέθοδοι .....	385
6.3.5. Εμπειρίες που αποκτήθηκαν .....	391
1. Έλεγχος σε διήθηση .....	391
2. Συμπεριφορά σε παραμορφώσεις .....	392
3. Ενδιαφέρουσες εφαρμογές .....	392
Βιβλιογραφία .....	395
6.4. Χωμάτινα - λιθόρριπτα φράγματα με χρήση λεπτών μεμβράνων .....	396
6.4.1. Εισαγωγή .....	396
6.4.2. Η κατασκευή αδιαπέρατων μεμβράνων .....	397

6.4.2.1. Κατηγορίες μεμβρανών .....	397
6.4.2.2. Προσθετικά σε υλικά βάσεων .....	398
6.4.2.3. Ενισχυτικά .....	398
6.4.2.4. Δομή των στοιχείων επένδυσης .....	398
6.4.2.5. Το πάχος των διαφραγμάτων .....	398
6.4.3. Χαρακτηριστικά των διαφραγμάτων .....	398
6.4.4. Αναπτυσσόμενες τάσεις .....	400
6.4.4.1. Ιδιαιτερότητες .....	400
6.4.5. Συστάσεις για τη χρήση διαφραγμάτων σε φράγματα .....	401
6.4.5.1. Περιπτώσεις λιθόρριπτων φραγμάτων .....	401
6.4.5.2. Περιπτώσεις χωμάτινων φραγμάτων .....	402
6.4.5.3. Το διάφραγμα .....	403
6.4.5.4. Αγκυρώσεις του διαφράγματος .....	404
6.4.5.5. Σύνδεση σκυρόδετων κατασκευών με το διάφραγμα .....	404
6.4.5.6. Προστατευτική στρώση .....	405
6.4.5.6.1. Λιθορριπή .....	405
6.4.5.6.2. Ασφαλτοσκυρόδεμα .....	406
6.4.5.6.3. Επιφάνειες σκυροδέματος .....	406
6.4.6. Συμπεράσματα .....	406
Βιβλιογραφία .....	407

## **7. Φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (R.C.C.)**

7.1. Εισαγωγικά .....	409
7.2. Ιστορικό της ανάπτυξης των φραγμάτων RCC .....	410
7.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κατασκευής φραγμάτων με RCC ..	415
7.4. Βασικές παραδοχές μελέτης .....	417
7.5. Εξέλιξη των φραγμάτων RCC .....	418
7.6. Σχεδιασμός φραγμάτων RCC .....	418
7.6.1. Εισαγωγικά .....	418
7.6.2. Έλεγχος της θερμοκρασίας .....	419
7.6.3. Αρμοί διαστολής .....	421
7.6.4. Στοές και σήραγγες .....	421
7.6.5. Υπερχειλιστές .....	422
7.7. Υλικά κατασκευής .....	424
7.7.1. Γενικά .....	424
7.7.2. Τσιμέντο .....	424
7.7.3. Φυσικά πρόσθετα ή πρόσμικτα .....	425
7.7.4. Αδρανή υλικά .....	425

7.7.5. Πρόσμικτα .....	427
7.7.6. Τυπικές αναλογίες ανάμιξης .....	428
7.8. Κατασκευή .....	428
7.8.1. Γενικά .....	428
7.8.2. Παραγωγή αδρανών .....	430
7.8.3. Παραγωγή του RCC .....	431
7.8.4. Μεταφορά του RCC .....	431
Α. Μεταφορά με φορτηγά μέχρι το σημείο διάστρωσης .....	432
Β. Ταινιόδρομοι μέχρι το φράγμα και φορτηγά πάνω στο φράγμα .....	432
7.8.5. Τοποθέτηση και διάστρωση του RCC .....	433
Α. Διάστρωση .....	433
Β. Πάχος στρώσεων .....	435
7.8.6. Συμπύκνωση .....	436
7.8.7. Σύνδεση μεταξύ των στρώσεων του RCC .....	438
7.8.8. Αρμοί διαστολής .....	440
7.8.9. Διαμόρφωση όψεων ενός φράγματος RCC .....	443
7.8.10. Προστασία και συντήρηση του RCC .....	445
7.9. Το φράγμα της Πλατανόβρυσης .....	446
Βιβλιογραφία Ξενόγλωσση .....	457
Βιβλιογραφία Ελληνική .....	458

## Μέρος II

## Υπερχειλιστές και συναφή τεχνικά έργα

### 1. Γενικά περί υπερχειλιστών

1.1. Αναγκαιότητα των υπερχειλιστών .....	461
1.2. Υπερχειλιστές ελεύθερης ή ελεγχόμενης ροής .....	462
1.3. Επιλογή μεγέθους και τύπου υπερχειλιστή .....	464
1.4. Στοιχεία ενός υπερχειλιστή .....	467
1.4.1. Το τεχνικό ελέγχου ή διατομή ελέγχου .....	467
1.4.2. Ο αγωγός παροχέτευσης .....	467
1.4.3. Το τεχνικό εξόδου .....	468
1.5. Μορφές υπερχειλιστών .....	468
1.5.1. Υπερχειλιστές ελεύθερης πτώσης .....	469
1.5.2. Ελεύθεροι ανοιχτοί υπερχειλιστές .....	470
1.5.3. Πλευρικοί υπερχειλιστές .....	471
1.5.4. Φρεατοειδείς υπερχειλιστές .....	472



1.5.5. Υπερχειλιστές μορφής σίφωνα .....	473
1.5.6. Υπερχειλιστές σε σήραγγα .....	475
Βιβλιογραφία .....	477
<b>2. Ελεύθεροι υπερχειλιστές</b>	
2.1. Σχεδιασμός αγωγού σε σχέση με τη διάδευση πλημμύρας .....	479
2.2. Υδραυλικά στοιχεία των ελεύθερων υπερχειλιστών(ανοιχτών αγωγών) ...	481
2.3. Παράγοντες που πρέπει να προσέχονται ιδιαίτερα .....	483
α) Εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής .....	483
β) Σεισμικότητα της περιοχής .....	484
γ) Διάρκεια και ποσότητα της πλημμύρας .....	484
δ) Ο τύπος του φράγματος .....	485
ε) Λειτουργικές ρυθμίσεις .....	485
2.4. Υπερχειλιστές χωρίς θυροφράγματα .....	486
2.5. Υπερχειλιστές με θυροφράγματα .....	487
2.6. Σύστημα υπερχειλιστών .....	488
2.7. Υπενθύμιση ορισμένων στοιχείων υπολογισμού .....	491
Παράδειγμα .....	494
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	497
Βιβλιογραφία ελληνική .....	497
<b>3. Πλευρικοί υπερχειλιστές</b>	
3.1. Γενικά .....	499
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	505
Βιβλιογραφία ελληνική .....	506
<b>4. Φρεατοειδείς υπερχειλιστές</b>	
4.1. Εισαγωγικά .....	507
4.2. Στοιχεία μελέτης και σχεδιασμού .....	512
Βιβλιογραφία .....	515
<b>5. Υπερχειλιστές μορφής σίφωνα</b>	
5.1. Εφαρμογές και ιδιότητες .....	517
5.2. Υδραυλική συμπεριφορά .....	519
Βιβλιογραφία .....	520
<b>6. Υπερχειλιστές μορφής σήραγγας ή οπής</b>	
6.1. Χαρακτηριστικά-εφαρμογές .....	521
Βιβλιογραφία .....	532

## 7. Υπερχειλιστές υψηλών φραγμάτων

7.1. Εισαγωγικά .....	533
7.2. Συνθήκες προσέγγισης της ροής .....	536
7.3. Σχεδιασμός της στέψης .....	536
7.4. Θυροφράγματα .....	538
α) Ακτινωτά θυροφράγματα .....	538
β) Τυμpanοειδή θυροφράγματα .....	540
γ) Κατακόρυφα ανυψούμενα θυροφράγματα .....	540
δ) Θυροφράγματα φλαπέ .....	542
7.5. Σχεδιασμός μεσοβάθρων .....	543
7.6. Σχεδιασμός του αγωγού του υπερχειλιστή .....	544
7.7. Έλεγχος της σπηλαίωσης .....	548
7.8. Εισαγωγή αέρα .....	551
7.9. Κυματισμοί .....	551
7.10. Μελέτη λειτουργίας .....	556
7.11. Μελέτες σε ομοιώματα (μοντέλα) .....	556
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	560
Βιβλιογραφία ελληνική .....	562

## 8. Έργα απόσβεσης της ενέργειας

8.1. Η ενέργεια του νερού .....	563
8.2. Το υδραυλικό άλμα .....	567
Παράδειγμα 8.1 .....	570
Παράδειγμα 8.2 .....	571
8.3. Λεκάνες ηρεμίας .....	571
Παράδειγμα 8.3 .....	578
Παράδειγμα 8.4 .....	578
Παράδειγμα 8.5 .....	580
8.4. Κρίσεις και σχόλια για τις λεκάνες ηρεμίας .....	581
8.5. Συνήθη προβλήματα των λεκανών ηρεμίας .....	584
8.5.1. Υποπίεσεις .....	585
8.5.2. Δονήσεις .....	586
8.5.3. Σπηλαίωση .....	587
8.5.4. Απόξεση .....	587
8.6. Διατάξεις αναπήδησης .....	588
8.6.1. Γενικά .....	588

8.6.2. Λειτουργία της διάταξης αναπήδησης .....	593
8.6.3. Στοιχεία σχεδιασμού .....	593
8.6.4. Εμπειρίες - Κατασκευές .....	596
8.6.5. Λεκάνες αποτόνωσης .....	599
8.6.6. Διατάξεις αναπήδησης υψηλών φραγμάτων .....	600
8.6.7. Αντίσταση του αέρα .....	606
8.6.8. Διαβρώσεις κατάντι .....	608
8.6.9. Δοκιμές σε ομοιώματα .....	610
8.6.10. Λεκάνες αποτόνωσης υψηλών φραγμάτων .....	619
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	623
Βιβλιογραφία ελληνική .....	625

## 9. Έργα εξόδου

9.1. Γενικά .....	627
9.2. Εκκενωτές πυθμένα μεγάλων φραγμάτων .....	630
9.3. Θυροφράγματα και δικλείδες εκκενωτών πυθμένα .....	632
9.4. Θυροφράγματα συντήρησης εκκενωτών πυθμένα .....	634
9.5. Χαλύβδινη επένδυση εκκενωτών .....	640
9.6. Τεχνικό υδροληψίας .....	640
Βιβλιογραφία .....	644

## Μέρος III Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις

### 1. Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις

1.1. Εισαγωγικά .....	649
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων ...	651
Πλεονεκτήματα: .....	651
Μειονεκτήματα: .....	652
1.2. Τα μέρη μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης .....	652
1.3. Μορφές υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων .....	656
1.3.1. Σταθμός παραγωγής στο ποδαρικό του φράγματος .....	656
1.3.2. Σταθμός παραγωγής με διώρυγα παράκαμψης .....	657
1.3.3. Σταθμός παραγωγής με σήραγγα παράκαμψης .....	661
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	663
Βιβλιογραφία ελληνική .....	663

## 2. Τεχνητές λίμνες (ταμιευτήρες)

2.1. Γενικά .....	665
2.2. Χωρητικότητα ταμιευτήρων .....	665
2.3. Διόδευση πλημμύρας σε Ταμιευτήρα .....	667
Παράδειγμα 2.1 .....	671
2.4. Ολοκληρωτικές καμπύλες .....	675
Παράδειγμα 2.2 .....	676
Παράδειγμα 2.3 .....	678
2.5. Παροχή λειτουργίας .....	680
Παράδειγμα 2.4 .....	681
2.6. Καμπύλες διάρκειας .....	681
2.7. Τύποι ταμιευτήρων .....	684
2.8. Απώλειες νερού .....	685
2.8.1. Εξάτμιση .....	686
Παράδειγμα 2.5 .....	687
2.8.2. Διήθηση- Διείδυση .....	688
2.9. Φερτά υλικά .....	690
2.9.1. Στεροπαροχή ρευμάτων .....	690
2.9.2. Καθίζηση φερτών στον ταμιευτήρα .....	691
2.9.3. Έλεγχος της καθίζησης .....	692
2.10. Καθαρισμός της εδαφικής επιφάνειας των ταμιευτήρων .....	694
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	694
Βιβλιογραφία ελληνική .....	695

## 3. Υδατοπτώσεις

3.1. Γενικά .....	697
3.2. Ύψος πτώσης .....	697
3.3. Ισχύς υδροδυναμικών εγκαταστάσεων .....	699
3.4. Μορφές υδροδυναμικών εγκαταστάσεων .....	700
3.4.1. Οι εγκαταστάσεις βάσης .....	700
3.4.2. Οι εγκαταστάσεις αιχμής .....	700
3.4.3. Οι εγκαταστάσεις αντιστρεπτής λειτουργίας .....	701
3.5. Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις μεγάλου ύψους πτώσης .....	702
3.6. Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις μέσου ύψους πτώσης .....	708
3.7. Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις χαμηλού ύψους πτώσης .....	711
3.8. Ημερήσια καμπύλη φορτίου .....	714

3.9. Μορφές ενέργειας .....	715
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	716
Βιβλιογραφία ελληνική .....	716

#### **4. Υδραυλικό πλήγμα**

4.1. Γενικά .....	717
4.2. Εξήγηση του φαινομένου με απλό τρόπο .....	718
Παράδειγμα 4.1 .....	720
4.3. Βασικές εξισώσεις υδραυλικού πλήγματος .....	721
4.4. Γενική λύση των διαφορικών εξισώσεων .....	722
4.4.1. Ανάκλαση του κύματος στον ταμιευτήρα και στη δικλείδα .....	722
4.4.2. Αλυσιδωτή εξίσωση του Allievi .....	723
4.4.3. Εφαρμογές των εξισώσεων του υδραυλικού πλήγματος .....	724
4.5. Υπολογισμός του υδραυλικού πλήγματος σε οποιοδήποτε χρόνο και σημείο του αγωγού .....	726
Παράδειγμα 4.2 .....	727
4.6. Γραφική μέθοδος υπολογισμού .....	729
4.7. Διατάξεις ελέγχου του υδραυλικού πλήγματος .....	731
4.7.1. Γενικά .....	731
1.Αλλαγές στο βασικό σχεδιασμό .....	731
2.Αντιπληγματικές διατάξεις προστασίας .....	732
4.7.2. Αεροφυλάκια, δεξαμενές ανάπαλσης, ταμιευτήρες .....	732
4.8. Ταλαντώσεις της μάζας του νερού στις δεξαμενές ανάπαλσης .....	733
4.9. Μέθοδοι υπολογισμού των δεξαμενών ανάπαλσης .....	735
4.10.Μορφές δεξαμενών ανάπαλσης .....	736
4.11.Στόχοι των δεξαμενών ανάπαλσης .....	738
Βιβλιογραφία .....	740

#### **5. Ποιότητα του νερού των ταμιευτήρων**

5.1. Γενικά .....	741
5.2. Μορφές ρύπανσης .....	742
5.2.1. Μηχανική ή ανόργανη ρύπανση .....	742
5.2.2. Χημική ρύπανση .....	742
5.2.3. Θερμική ρύπανση .....	742
Παράδειγμα 5.1 .....	743
5.2.4. Θερμική στρωμάτωση .....	743
5.2.5. Αγροτική ρύπανση .....	745



5.2.6. Ρύπανση από ραδιενέργεια .....	746
5.2.7. Οργανική ρύπανση .....	747
5.2.8. Άλλες μορφές ρύπανσης .....	747
5.3. Ευτροφισμός .....	748
5.4. Φυσικά και βιο-χημικά χαρακτηριστικά της ποιότητας του νερού .....	749
1. Μορφομετρία .....	749
2. Εισροές .....	750
3. Εκροές .....	750
4. Στρωμάτωση .....	751
5. Καθίζηση και διάβρωση .....	751
6. Θολότητα και διείσδυση του φωτός .....	751
7. Διαλυμένο Οξυγόνο (D.O.) .....	752
8. Αναερόβιες συνθήκες .....	752
5.5. Δημιουργία ρεαλιστικών περιβαλλοντικών στόχων .....	753
5.6. Διαχείριση της ποιότητας του νερού .....	753
5.6.1. Γενικά .....	753
5.6.2. Μελέτη, κατασκευή και λειτουργία του φράγματος .....	753
5.6.3. Εξέταση της λεκάνης απορροής .....	754
5.6.4. Τεχνικές διαχείρισης .....	755
Βιβλιογραφία ξενόγλωσση .....	759
Βιβλιογραφία ελληνική .....	759
<b>6. Υδροστρόβιλοι (τουρμπίνες)</b>	
6.1. Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ) .....	761
6.2. Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton .....	764
6.2.1. Εισαγωγικά .....	764
6.2.2. Απλουστευμένη θεωρία της λειτουργίας Pelton .....	768
6.3. Υδροστρόβιλοι τύπου Francis .....	770
6.4. Υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan .....	777
6.5. Υδροστρόβιλοι τύπου Bulb .....	780
Βιβλιογραφία .....	782
Πίνακας μεγάλων ελληνικών φραγμάτων με αλφαβητική σειρά .....	783

ΜΕΡΟΣ Ι

Φράγματα

---

# 1

## Φράγματα

### 1.1 Εισαγωγή

Φράγμα είναι τεχνικό έργο, που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψει τη συνέχεια της ροής, με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρησιμοποίησή του.

Σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι:

- ▶ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας,
- ▶ η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών,
- ▶ η ύδρευση πόλεων, οικισμών ή βιομηχανικών μονάδων,
- ▶ η συγκράτηση πλημμυρικών παροχών και αποφυγή ζημιών,
- ▶ η διαμόρφωση πλωτών διωρύγων,
- ▶ η αναρρύθμιση της παροχής του ποταμού,
- ▶ η δημιουργία χώρων αναψυχής και τουριστικής ανάπτυξης.

Συνήθως το νερό της τεχνητής λίμνης χρησιμοποιείται πολλές φορές και για διαφορετικό σκοπό κάθε φορά, γεγονός που χαρακτηρίζει το συνολικό έργο ως έργο πολλαπλής σκοπιμότητας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το φράγμα Πλαστήρα στην Καρδίτσα. Το νερό της τεχνητής λίμνης εκτρέπεται προς τη Θεσσαλία, από τη φυσική ροή του που είναι προς τον Αχελώο, και οδηγείται στις τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη διώρυγα φυγής συγκεντρώνεται στην αναρρυθμιστική λίμνη όγκου 600.000 κυβικών μέτρων, από όπου παροχετεύεται μέσω μεριστού, ένα μεγάλο μέρος για την άρδευση του κάμπου της Καρδίτσας (αρδευτικό Ταυρωπού) και ένα μικρότερο για την ύδρευση της πόλης και των γύρω Δήμων και κοινοτήτων. Ταυτόχρονα γύρω από τη λίμνη έχουν αναπτυχθεί αγροτουριστικές μονάδες, ναυταθλητικές εγκαταστάσεις και τουριστικές μονάδες με ξενοδοχεία, εστιατόρια, καφέ. Η περιοχή που πριν μερικές δεκαετίες ήταν απομονω-

μένη και είχε φθίνουσα πορεία, σήμερα αποτελεί μια ζωντανή περιοχή που σφύζει από ζωή και δραστηριότητες.

Με το ίδιο σκεπτικό, που ήταν ιδέα του αείμνηστου καθηγητή του Μετσόβιου Πολυτεχνείου Απ. Κουτσοκώστα, κατασκευάζεται και η εκτροπή μέρους της παροχής του ποταμού Αχελώου από το φράγμα της Συκιάς προς την πεδιάδα της Θεσσαλίας. Το νερό μετά την έξοδό του από τη σήραγγα συγκεντρώνεται σε δύο τεχνητές λίμνες, που θα σχηματιστούν με την κατασκευή των φραγμάτων Πύλης και Μουζακίου.

Τα φράγματα είναι από τα πρώτα τεχνικά επιτεύγματα του ανθρώπου, αφού οι πρώτες κατασκευές ανάγονται στα προϊστορικά χρόνια. Από τα παλιότερα φράγματα αναφέρονται το φράγμα στον ποταμό Ιορδάνη και το φράγμα στον ποταμό Τίγρη. Στα 4.000 π.Χ. κατασκευάστηκε στην Αίγυπτο φράγμα στον ποταμό Νείλο που διατηρήθηκε περίπου 4.500 χρόνια.

Τα φράγματα είναι έργα δαπανηρά, παρουσιάζουν όμως μακροπρόθεσμα μεγάλα οικονομικά και όχι μόνον οφέλη, δεν αντιστρατεύονται την ισορροπία του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ενσωματώνονται με το χρόνο, και για το λόγο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή τους.

Η κατασκευή ενός φράγματος, ανάλογα με το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει, μελετάται και βρίσκεται τόσο ο καλύτερος τύπος φράγματος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του.

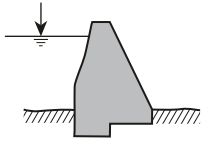
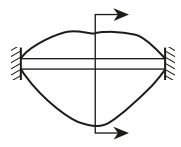
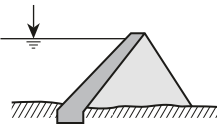
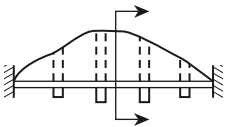
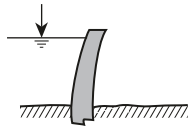
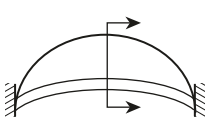
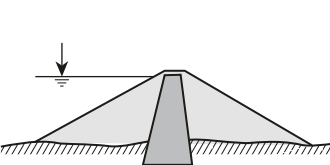
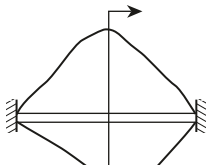
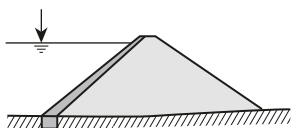
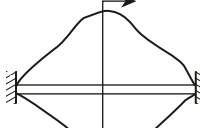
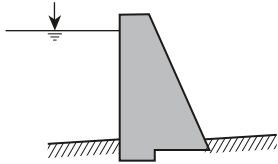
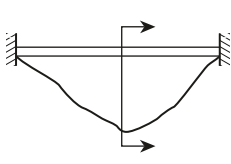
Τα φράγματα είναι έργα ιδιόμορφα, γιατί δεν είναι δυνατό να τυποποιηθούν και να εφαρμόζονται επανειλημμένα. Κάθε φράγμα έχει τη δική του λειτουργία, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του φυσικό περιβάλλον, που παίζει σπουδαίο ρόλο για τη θεμελίωσή του. Η κατασκευή ενός φράγματος και η δημιουργία τεχνητής λίμνης δημιουργεί διαταραχές στο φυσικό περιβάλλον, μεγαλύτερες και εντονότερες από οποιοδήποτε άλλο έργο, γιατί στην περιοχή του συσσωρεύονται τεράστιες ποσότητες νερού με αποτέλεσμα το υπέδαφος να καταπονείται από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις. Η συγκέντρωση εξάλλου μεγάλων ποσοτήτων νερού δημιουργεί προβλήματα διαβρώσεων, διηθήσεων, διαρροών ή και κατολισθήσεων ακόμη στην περιοχή του φράγματος που, αν δεν προβλεφθούν για να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, μπορούν να οδηγήσουν στη μη αποδοτική λειτουργία του ή ακόμη και στην καταστροφή του.

## 1.2

### Είδη φραγμάτων

Ανάλογα με το φυσικό περιβάλλον, τη γεωλογία του υπεδάφους και τη μορφή της κοιλάδας μέσα στην οποία θα κατασκευαστεί, το φράγμα μπορεί να ανήκει σε έναν από τους ακόλουθους τύπους (Σχ. 1.1):

1. Φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα
2. Φράγμα αντηριδωτό από σκυρόδεμα
3. Φράγμα τοξωτό από σκυρόδεμα
4. Φράγμα χωμάτινο
5. Φράγμα λιθόρριπτο
6. Φράγμα R.C.C. (roller-compacted concrete ή κυλινδρούμενο σκυρόδεμα)

Τύπος	Διατομή	Κάτοψη
Βαρύτητας		
Αντηριδωτό		
Τοξωτό		
Χωμάτινο		
Λιθόρριπτο		
R.C.C.		

Σχ. 1.1. Οι βασικοί τύποι φραγμάτων σε τομή και κάτοψη.



# 2

## Φράγματα βαρύτητας

### 2.1 Γενικά

Τα πρώτα φράγματα βαρύτητας κατασκευάστηκαν στην Ισπανία κατά τον 16<sup>ο</sup> αιώνα με ύψος γύρω στα 20 m και με τρόπο εντελώς διαφορετικό από το σημερινό. Περί τα μέσα του 18<sup>ου</sup> αιώνα αρχίζει η συστηματική μελέτη και μπαίνουν οι πρώτες θεωρητικές βάσεις για την επίλυση των προβλημάτων που παρουσίαζε η κατασκευή φραγμάτων βαρύτητας. Η θεωρία στηρίχθηκε στις ακόλουθες αρχές:

- ▶ Ευστάθεια της διατομής έναντι ανατροπής
- ▶ Ευστάθεια έναντι ολίσθησης κατά μήκος της βάσης ή οποιουδήποτε άλλου οριζόντιου επιπέδου
- ▶ Προσδιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων

Γύρω στα 1890 μπαίνει στους υπολογισμούς η προϋπόθεση της μη εμφάνισης εφελκυστικών τάσεων και η διατομή παίρνει μόνιμα τη μορφή τριγώνου. Μια σειρά από καταστροφές φραγμάτων βαρύτητας συνέβαλε στην προσεκτικότερη μελέτη και στον υπολογισμό και άλλων παραγόντων εκτός από το βάρος και την υδροστατική πίεση.

Ένα φράγμα βαρύτητας δεν κινδυνεύει να καταστραφεί από υπερχειλίση ούτε από την πίεση του νερού που τείνει να το ανατρέψει. Ο κίνδυνος προέρχεται από τις υποπίεσεις του νερού, που διηθείται κάτω από το φράγμα και αυξάνει τη ροπή ανατροπής και φυσικά, αν το φράγμα κατασκευαστεί σε ασβεστολιθικά πετρώματα, λόγω της χημικής διάβρωσής τους και της δημιουργίας καρστ. Το βασικότερο σημείο ελέγχου είναι η ευστάθεια σε ανατροπή. Ο κίνδυνος ολίσθησης είναι πολύ μικρός και σπάνιες είναι οι περιπτώσεις καταστροφής φράγματος λόγω ολίσθησης. Από τα στατιστικά στοιχεία της καταστροφής φραγμάτων βαρύτητας βρίσκουμε ότι μόνον όσα είχαν κλίση της κατάντι πλευράς τους μικρότερη από 66:100 καταστράφηκαν. Τα φράγματα που κατασκευάζονται σήμερα έχουν κλίση

της κατάντι πλευράς τουλάχιστον 0,80 (80 ορ:100 κατ) και σε περιπτώσεις υψηλών φραγμάτων ( $h > 100$  m) η κλίση γίνεται μεγαλύτερη.

## 2.2 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις

Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε ένα φράγμα βαρύτητας είναι οι ακόλουθες (Σχ. 2.1):

### A. Οριζόντιες

$H$  = υδροστατική πίεση (οριζόντια συνιστώσα)

$H_1$  = πίεση φερτών (ιλύος)

$H_\pi$  = πίεση του πάγου

$H'_\Sigma$  = σεισμική πίεση του νερού (πίεση ωστικών κυμάτων)

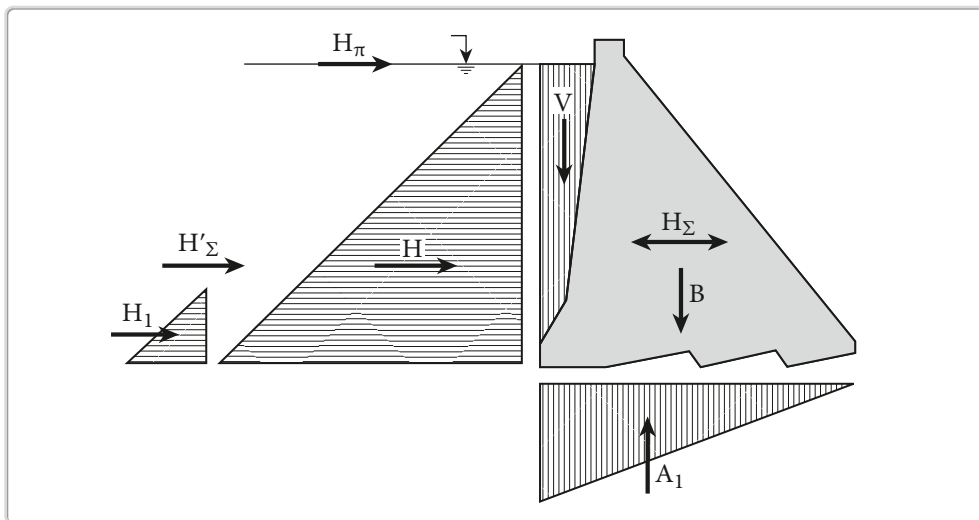
$H_\Sigma$  = ώθηση σεισμού στο φράγμα

### B. Κατακόρυφες

$B$  = ίδιο βάρος του φράγματος

$V$  = υδροστατική πίεση (κατακόρυφη συνιστώσα)

$A_1$  = υποπιέσεις



Σχ. 2.1. Αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε ένα φράγμα βαρύτητας.

### 2.2.1. Το βάρος του φράγματος

Είναι συνήθως η μεγαλύτερη δύναμη με διεύθυνση κατακόρυφη, που με την ύπαρξή της αντισταθμίζει τις άλλες δυνάμεις, που τείνουν να ανατρέψουν το φράγμα. Το υλικό κατασκευής ενός φράγματος βαρύτητας είναι το σκυρόδεμα και το ειδικό βάρος του κυμαίνεται ανάμεσα σε  $2,4 \text{ t/m}^3$  με  $2,6 \text{ t/m}^3$  εξαρτώμενο από τη φύση των αδρανών υλικών. Συνήθης τιμή του είναι για τους υπολογισμούς  $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$ . Έτσι το βάρος ανά μέτρο μήκους του φράγματος είναι:

$$B = \gamma \cdot E \cdot 1$$

με  $E$  τη διατομή σε  $\text{m}^2$ .



Σχ. 2.2.

Συνήθως στην πράξη η διατομή ενός φράγματος βαρύτητας δεν είναι ένα απλό γεωμετρικό σχήμα, μπορεί όμως εύκολα να αναλυθεί σε απλά γεωμετρικά σχήματα που είναι γνωστό το εμβαδόν τους.

### 2.2.2. Η υδροστατική πίεση

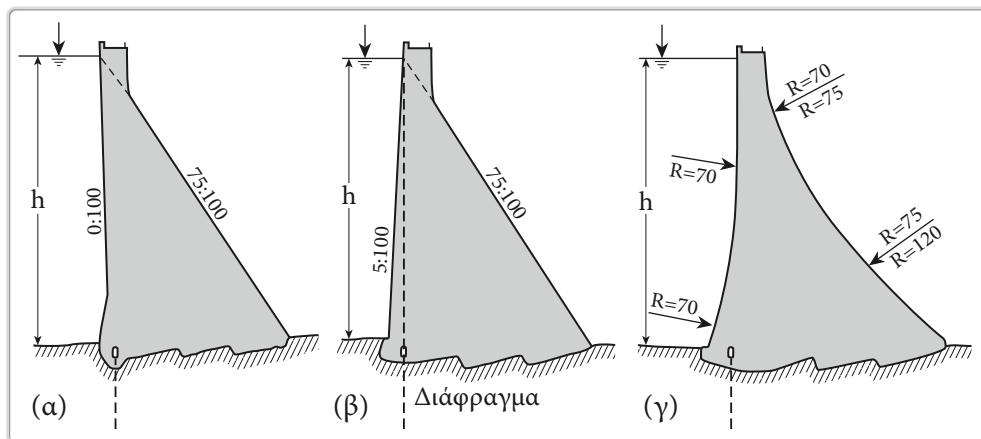
Η συνισταμένη δύναμη των υδροστατικών πιέσεων, ασκείται στην ανάντι πλευρά του φράγματος, που συνήθως είναι κατακόρυφη (Σχ. 2.3α), μπορεί όμως να είναι κεκλιμένη (Σχ. 2.3β), ή και καμπύλη (Σχ. 2.3γ). Στην περίπτωση κατακόρυφης

ανάντι πλευράς η δύναμη  $H$  έχει μέτρο:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2$$

με  $\gamma$  = ειδικό βάρος νερού ( $t/m^2$ ),

$h$  = βάθος του νερού (m).



Σχ. 2.3.

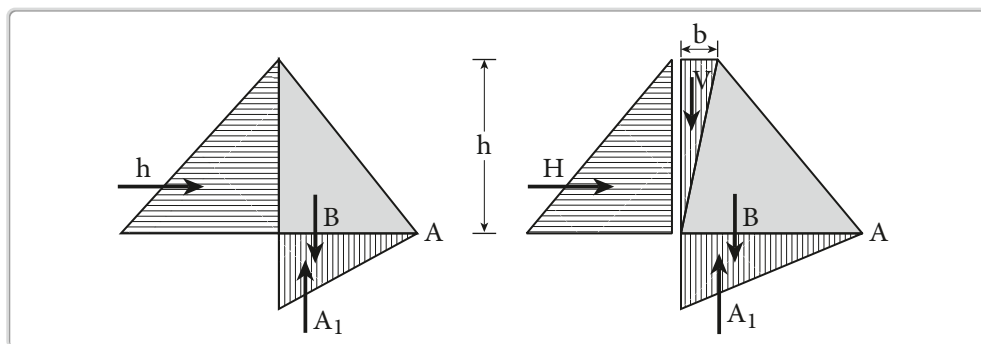
Όταν η ανάντι πλευρά είναι κεκλιμένη η πίεση μπορεί να χωριστεί σε δύο συστατικές, μία οριζόντια  $H$  και μία κατακόρυφη  $V$  με μέτρο (Σχ. 2.4).

$$H = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2$$

και

$$V = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h$$

με  $b$  την οριζόντια προβολή της ανάντι πλευράς σε m.



Σχ. 2.4.

Όταν τέλος η ανάντι πλευρά είναι καμπύλη, τότε η κατακόρυφη συνιστώσα μπορεί να υπολογιστεί από την ανάλυση του σχήματος σύμφωνα με τις αρχές της υδροστατικής.

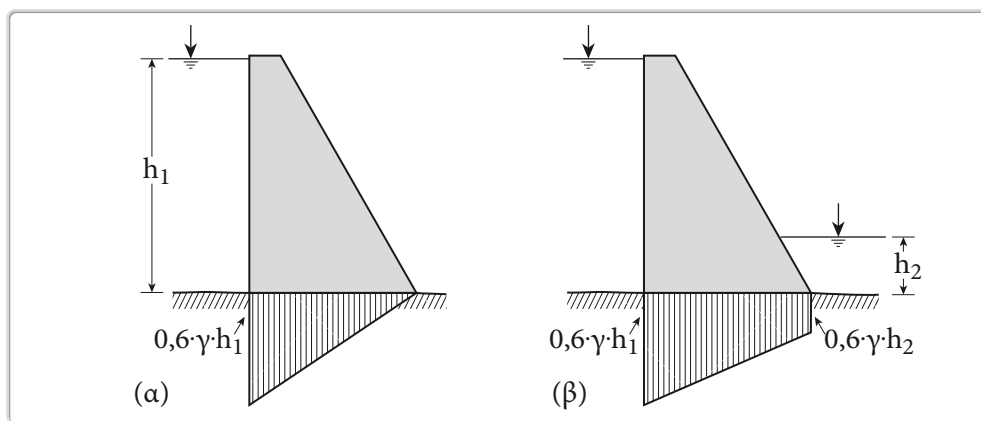
### 2.2.3. Η άνωση Α1

Οφείλεται στις υποπίεσεις του νερού που διηθείται κάτω από το φράγμα. Το νερό περνάει μέσα από τις σχισμές του εδάφους κάτω από την πίεση  $\gamma \cdot h$  και τείνει να διευρύνει τις σχισμές και να συνεχίσει την πορεία του, μέχρι το κατάντι άκρο του φράγματος.

Η κατανομή των υποπίεσεων κάτω από το φράγμα είναι πρόβλημα δύσκολο και πολύπλοκο. Όταν το έδαφος θεμελίωσης δεν είναι συμπαγής βράχος, η κατανομή μπορεί να θεωρηθεί ως διήθηση νερού μέσα σε πορώδες στρώμα (γραμμική). Το διηθούμενο νερό μέσα από τους πόρους του εδάφους συναντάει αντίσταση κι έτσι η πραγματική υποπίεση είναι μικρότερη από την υδροστατική. Το μέγεθός της δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί, δεχόμαστε όμως προσεγγιστικά, μέγεθος υποπίεσης ανάντι, το 60% της υδροστατικής, όταν το φράγμα δεν έχει ανακουφιστικές διατάξεις (στραγγιστήρια και διάφραγμα).

Στην περίπτωση που το κατάντι άκρο του φράγματος δεν είναι βυθισμένο, τότε η κατανομή των υποπίεσεων είναι τριγωνικής μορφής με πίεση στο κατάντι άκρο ίση με μηδέν (Σχ. 2.5α).

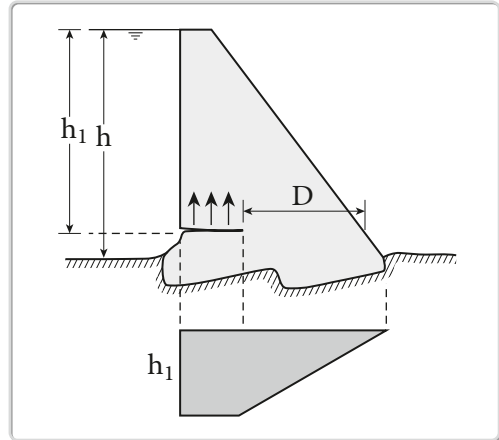
Όταν το κατάντι άκρο είναι βυθισμένο (κατάντι λίμνη), τότε η κατανομή των υποπίεσεων είναι μορφής τραπεζοειδούς (Σχ. 2.5β).



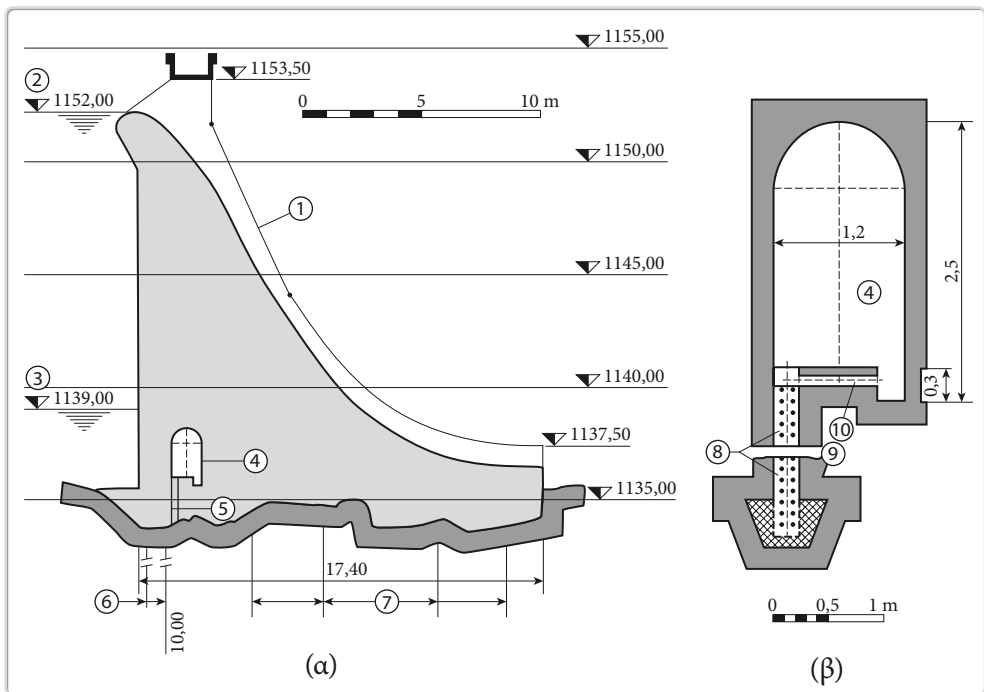
Σχ. 2.5. Κατανομή υποπίεσεων κάτω από το φράγμα.

Υποπίεσεις υπάρχουν και αναπτύσσονται όπου υπάρχει νερό υπό πίεση. Αυτό σημαίνει ότι στους πόρους του σκυροδέματος, που εισχωρεί το νερό και σε ρηγ-

ματώσεις, αναπτύσσονται υποπίεσεις που πρέπει να υπολογίζονται, γιατί επηρεάζουν σοβαρά την ευστάθεια του φράγματος. Στην περίπτωση ρηγμάτωσης της ανάντι πλευράς του φράγματος οι υποπίεσεις υπολογίζονται ίσες με την υδροστατική πίεση που αντιστοιχεί στο βάθος της ρωγμής (Σχ. 2.6). Στην περίπτωση που η ρωγμή εισχωρεί μέχρι ένα βάθος στη μάζα του φράγματος, τότε η ενεργή διατομή δεν είναι πια το πλάτος του φράγματος στο ύψος αυτό αλλά το πλάτος ( $D$ ) που απομένει.



Σχ. 2.6.

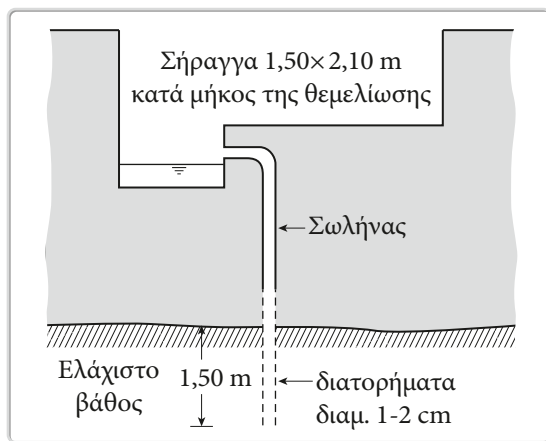


Σχ. 2.7. Το φράγμα Val Darbola. (α) Διατομή του φράγματος. (β) Λεπτομέρεια του συστήματος αποστράγγισης. (1) πλευρικό τοίχιο υπερχειλιστή, (2) μέγιστη στάθμη λίμνης, (3) ελάχιστη στάθμη λίμνης, (4) σήραγγα επισκέψεων, (5) στραγγιστήρια, (6) κουρτίνα τσιμεντενέσεων, (7) τάπητας τσιμεντενέσεων, (8) διάτρητος σωλήνας, (9) πορώδες σκυρόδεμα, (10) συλλεκτήρας διηθούμενου νερού.

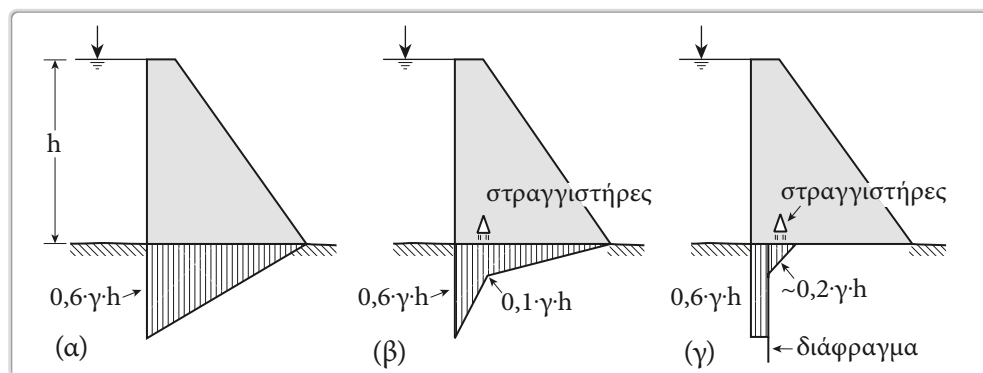
Όταν το έδαφος θεμελίωσης είναι βράχος, όπως στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευής, οι υποπιέσεις είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Γίνεται όμως παραδοχή, ότι η κατανομή είναι ομοιόμορφη σε όλο το πλάτος της βάσης, όπως αναπτύχθηκε προηγούμενα.

Οι υποπιέσεις είναι δυνατό να μειωθούν με την κατασκευή στραγγιστήρων μέσα στο φράγμα, που συλλέγουν το νερό από τις ανακουφιστικές γεωτρήσεις και αποσβένουν τις υποπιέσεις (Σχ. 2.8). Συνήθως η κατασκευή στραγγιστήρων συνδυάζεται με την κατασκευή ανάντι διαφράγματος τσιμεντενέσεων, που αποσκοπεί στην αύξηση του μήκους της διήθησης και φυσικά στη μείωση των υποπιέσεων (Σχ. 2.9).

Οι παρατηρήσεις και μετρήσεις των υποπιέσεων σε φράγματα που έχουν κατασκευαστεί έχουν δώσει μεγάλη ποικιλία αποτελεσμάτων για κάθε ειδική περίπτωση φράγματος.



Σχ. 2.8.



Σχ. 2.9. Κατανομή των υποπιέσεων (α) χωρίς κανένα ανακουφιστικό μέτρο, (β) με στραγγιστήρες, (γ) με συνδυασμό στραγγιστήρων και διαφράγματος.

Παρ' ότι οι γνώσεις, η τεχνική και οι μέθοδοι έχουν βελτιωθεί σημαντικά, όλοι σχεδόν οι μελετητές τοξωτών φραγμάτων κάνουν τους υπολογισμούς τους με ένα συντελεστή ασφάλειας 4:1 και περισσότερο, με βάση το λόγο αντοχής του σκυροδέματος προς τις αναπτυσσόμενες τάσεις.

Γίνεται προσπάθεια αποφυγής εφελκυστικών τάσεων στα θολωτά φράγματα. Όπου αυτό δεν είναι δυνατό, καταβάλλεται προσπάθεια περιορισμού τους, τόσο σε μέγεθος όσο και σε έκταση.



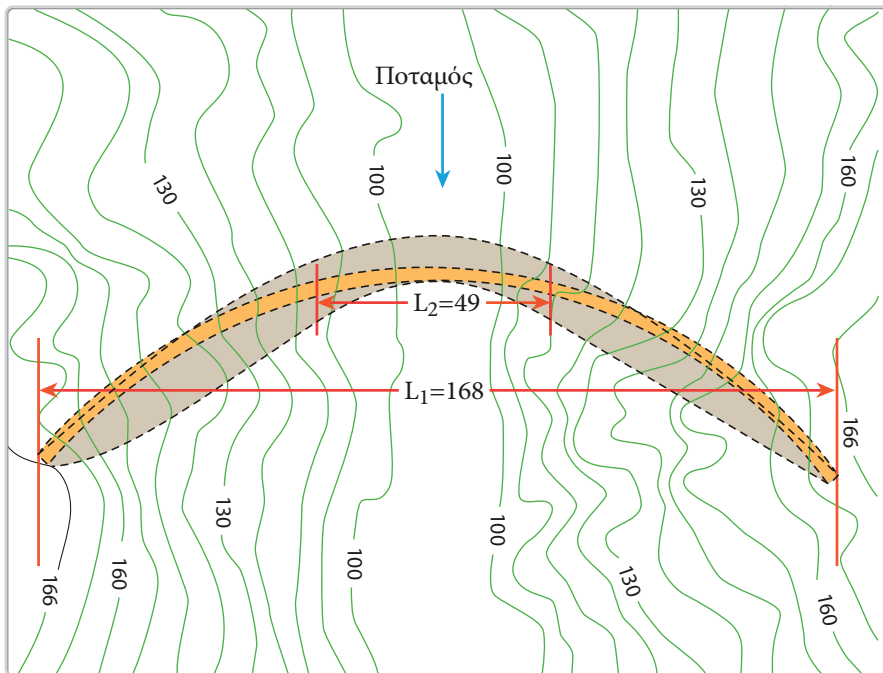
**Φωτ. 4.11.** Το φράγμα Zillertal στην περιοχή της Zillertal της Αυστρίας που η κατασκευή του τελείωσε το 1986. Το φράγμα έχει ύψος 186 m και κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα (στα 120 m περίπου) παρατηρήθηκε διαρροή κοντά στη θεμελίωση. Άρχισε το άδειασμα του ταμιευτήρα και εφαρμόστηκαν σιμεντενέσεις και χρήση εποξειδικών ρητινών για την αποκατάσταση του προβλήματος.



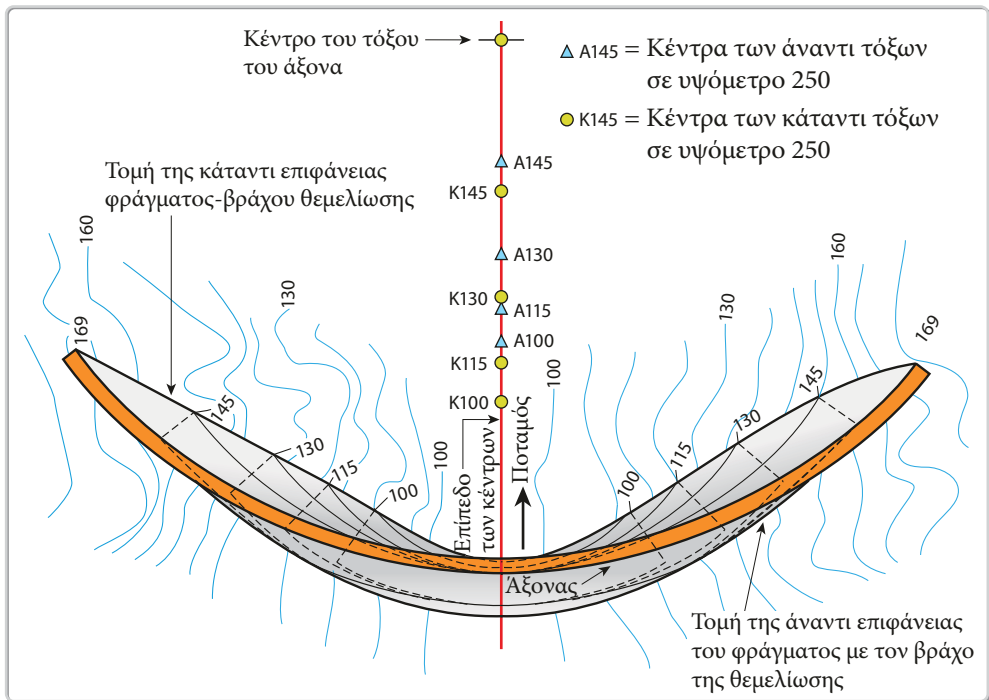
## 4.7.1. Γενικά

Ιδανικές προϋποθέσεις και συνθήκες για την κατασκευή ενός τοξωτού φράγματος είναι σπάνιο φαινόμενο στην πράξη. Έτσι η τελική απόφαση για την κατασκευή ενός τοξωτού φράγματος σε μία στενή κοιλάδα είναι αποτέλεσμα συνεχών αξιολογήσεων και επιλογών των φυσικών χαρακτηριστικών, που ικανοποιούν τις απαιτήσεις της κατασκευής, καθώς και μιας σειράς μελετών, αναλύσεων και βελτιώσεων. Η αρχική εν πάση περιπτώσει μελέτη μπορεί να στηριχθεί σε στοιχεία, που προκύπτουν από εμπειρικές σχέσεις. Η διαδικασία προσδιορισμού των βασικών στοιχείων ενός θολωτού φράγματος κατά το U.S.B.R. [1] είναι η ακόλουθη:

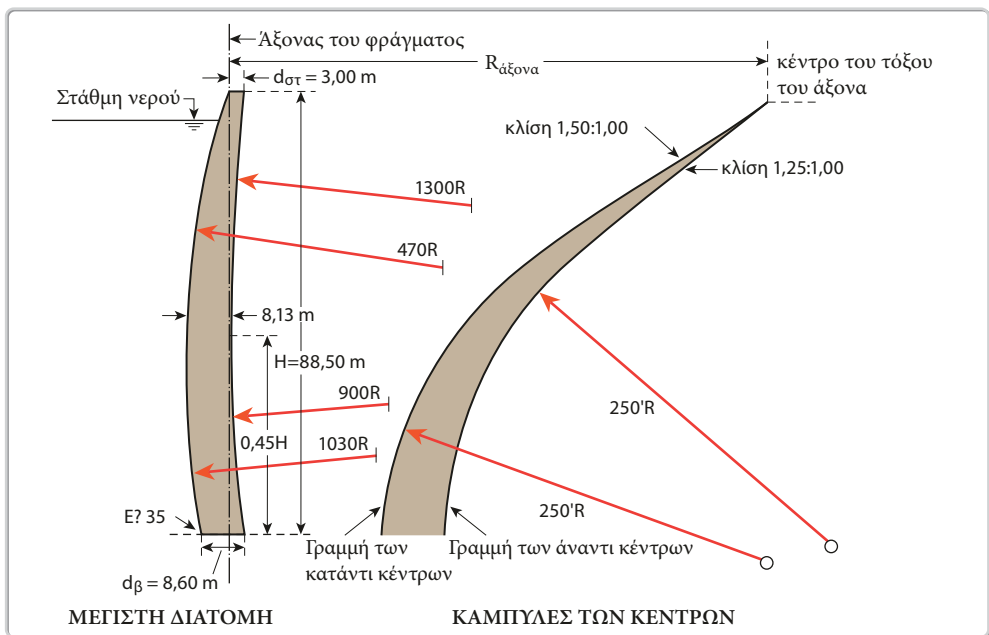
- ▶ Έχοντας προσδιορίσει το ύψος  $H$  του φράγματος μπορούν να μετρηθούν από το χάρτη τα μήκη  $L_1$  και  $L_2$  των χορδών των τόξων της στέψης και του τόξου που βρίσκεται σε ύψος  $0,15 \cdot H$  από τη βάση αντίστοιχα (Σχ. 4.36).
- ▶ Η ακτίνα  $R$  του άξονα του φράγματος είναι ίση με  $R = 0,6 \cdot L_1$ .
- ▶ Το βάθος εκσκαφής μέχρι τον υγρή βράχο προσδιορίζεται από τη μακροσκοπική γεωλογική έρευνα.



Σχ. 4.36.



Σχ. 4.37.



Σχ. 4.38

- ◆ Σχεδίαση πάνω στον τοπογραφικό χάρτη ενός κυκλικού τόξου με την ακτίνα του άξονα έτσι, που να συνδέει τις δύο πλευρές της κοιλάδας στο ύψος της στέψης. (Σχ. 4.37) Αν κατά τη σχεδίαση αποδειχθεί ότι η R, όπως υπολογίστηκε, είναι μικρότερη και το άκρο του τόξου δεν ακουμπάει στη υψομετρική καμπύλη, τότε μπορεί να αυξηθεί. Το τόξο που σχεδιάστηκε έτσι, πρέπει να έχει τέτοιο προσανατολισμό, ώστε οι γωνίες άξονα-καμπυλών να είναι σχεδόν ίσες για τις δύο πλευρές.
- ◆ Πάνω στον άξονα του φράγματος προσδιορίζεται ένα σημείο περίπου στη μέση από τις δύο πλευρές της κοιλάδας και στην κοίτη του ποταμού. Το κατακόρυφο επίπεδο, που ορίζεται από το μέσο του άξονα και το κέντρο του τόξου του άξονα, αποτελεί το επίπεδο πάνω στο οποίο σημειώνονται τα κέντρα των ανάντι και κατάντι τόξων, που αντιστοιχούν στις υψομετρικές καμπύλες πάνω στην επιφάνεια του φράγματος (Σχ. 4.38) Ο γεωμετρικός τόπος των κέντρων, τόσο της ανάντι όσο και της κατάντι επιφάνειας πρέπει να είναι μια ομαλή συνεχής καμπύλη.
- ◆ Τα κέντρα των ανάντι και κατάντι τόξων για κάθε ύψος, πρέπει να απέχουν μεταξύ τους απόσταση τέτοια, που να δημιουργείται η διαφορά ανάμεσα στο πάχος του τόξου στην πάκτωση και στο πάχος του τόξου στο μέσο του θόλου ίση με:

1:1	Για τη στέψη
1,5:1,0	Για το μέσο
1,1:1,0	Για τη βάση

- ◆ Οι υψομετρικές καμπύλες πρέπει να έχουν μία συνέχεια, από τη μία πλευρά της κοιλάδας στην άλλη, μέσω του φράγματος. Οι καμπύλες που θα χαραχθούν στο φράγμα (τόξα), δεν πρέπει να αντιστοιχούν σε ύψη που διαφέρουν μεταξύ τους λιγότερο από 5 m ή περισσότερο από 30 m.
- ◆ Τα άκρα των τόξων αυτών στις πλευρές της κοιλάδας, συνδεόμενα πρέπει να δίνουν μία συνεχή ομαλή καμπύλη.
- ◆ Η εφαπτόμενη στο άκρο κάθε κατάντι τόξου πρέπει να σχηματίζει με τη διεύθυνση της κοιλάδας γωνία τουλάχιστον 30°.

#### 4.7.2. Υπολογισμός στοιχείων

Τα στοιχεία ενός τοξωτού φράγματος που υπολογίζονται με τις εμπειρικές σχέσεις ή από τα νομογραφήματα του U.S.B.R. είναι:

1. Πάχος του κύριου στύλου στο ύψος της στέψης

$$d_{στ} = \frac{H+1,2 \cdot L_1}{100} \text{ σε m}$$

2. Πάχος του κύριου στύλου στη βάση

$$d_B = \sqrt[3]{0,0012 \cdot H \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (H/400)^{H/400}} \text{ σε m}$$

3. Πάχος του κύριου στύλου σε ύψος 0,45 H από τη βάση.

$$d_{0,45} = 0,95 d_B$$

4. Σχεδίαση του κύριου στύλου. Γίνεται με βάση τις αποστάσεις της ανάντι και κατάντι επιφάνειας του φράγματος από τον κατακόρυφο άξονα. Οι αποστάσεις είναι:

α) Στέψη: Ανάντι  $X_\alpha = 0,00$  κατάντι  $X_\kappa = d_{στ}$

β) Βάση: Ανάντι  $X_\alpha = 0,67 d_B$  κατάντι  $X_\kappa = 0,33 d_B$

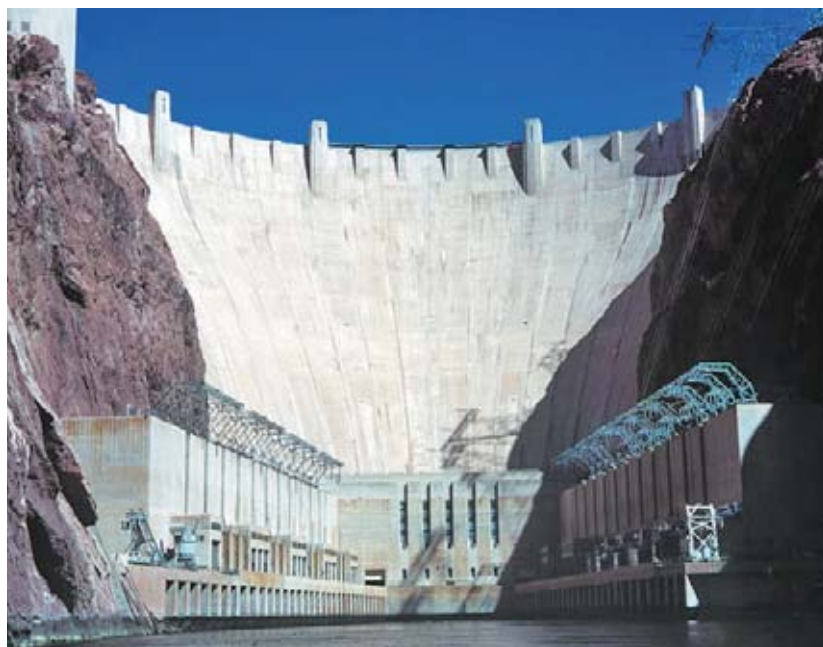
γ) 0,45 H Ανάντι  $X_\alpha = 0,95 d_B$  κατάντι  $X_\kappa = 0,0$ .

5. Ο όγκος του φράγματος V βρίσκεται από τη σχέση:

$$V = V_1 + V_2$$

με  $V_1 = 0,0001765 \cdot H^2 \cdot L_2 \frac{(H+0,8L_1)^2}{L_1-L_2}$

και  $V_2 = 0,0108 \cdot H \cdot L_1 \cdot (H+1,1 L_1)$ .



**Φωτ. 4.12.** Το φράγμα Hoover, πήρε το όνομά του από τον Πρόεδρο των ΗΠΑ Herbert Hoover, που συνέβαλε τα μέγιστα για την κατασκευή του.



**Φωτ. 4.13.** Το φράγμα Hoover στον ποταμό Colorado στις ΗΠΑ έχει ύψος 218 m, μήκος στέφης 375 m και πλάτος στέφης 14 m. Κατασκευάστηκε το 1936 και στην εποχή του ήταν το μεγαλύτερο φράγμα στον κόσμο.



**Φωτ. 4.14.** Το φράγμα Drosen σε πρώτο πλάνο και στο βάθος το φράγμα Mooser κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους. Είναι τα δύο φράγματα που αποτελούν μαζί με το φράγμα Limberg χαμηλότερα, το συγκρότημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην οροσειρά Tauern κοντά στο χειμερινό θέρετρο Karfun.

### Παράδειγμα 4.2

Σε μια στενή κοιλάδα (Σχ. 4.37) πρόκειται να κατασκευαστεί τοξωτό φράγμα, που το ύψος του προσδιορίστηκε στα 88,50 m. Ζητούνται τα στοιχεία του φράγματος και η σχεδιάσή του σε κάτοψη και τομή.

Λύση

α) Από τον τοπογραφικό χάρτη της κοιλάδας μετράμε το μήκος της χορδής

$$L_1 = 168 \text{ m} \quad \text{και} \quad L_2 = 49 \text{ m}.$$

β) Προσδιορίζουμε τα πάχη του τόξου στη στέψη, στη βάση και σε ύψος 0,45 H.

$$d_{\text{στ}} = \frac{H + 1,2 \cdot L_1}{100} = \frac{88,50 + 1,2 \cdot 168}{100} = 2,90 \text{ m},$$

$$d_B = \sqrt[3]{0,0012 \cdot H \cdot L_1 \cdot L_2 (H/400)^{H/400}} = 8,56 \text{ m},$$

$$d_{0,45H} = 0,95d_B = 0,95 \cdot 8,56 = 8,13 \text{ m}.$$

γ) Τα στοιχεία της κύριας διατομής είναι:

$$\text{Στέψη:} \quad X_\alpha = 0,00 \text{ m} \quad X_\kappa = 3,00 \text{ m},$$

$$\text{Βάση:} \quad X_\alpha = 5,73 \text{ m} \quad X_\kappa = 2,82 \text{ m},$$

$$0,45H: \quad X_\alpha = 8,13 \text{ m} \quad X_\kappa = 0,00 \text{ m}.$$

δ) Ο όγκος του φράγματος είναι  $V = V_1 + V_2$

$$V_1 = \frac{0,0001765H^2L_2(H+0,8L_1)^2}{L_1-L_2} = 28.281 \text{ m}^3,$$

$$V_2 = 0,0108 \cdot H \cdot L_1 \cdot (H+1,1L_1) = 43.885 \text{ m}^3,$$

$$V = V_1 + V_2 = 28.281 + 43.885 = 72.166 \text{ m}^3.$$

ε) Η ακτίνα του τόξου του φράγματος είναι  $R = 0,6 \cdot L_1 = 100,80 \text{ m}$ .

## 4.8 Ρηγματώσεις τοξωτών φραγμάτων

Η αποφυγή ρηγματώσεων είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζεται από το πρώτο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης μέχρι το τελευταίο στάδιο της κατασκευής, που γεμίζει ο ταμιευτήρας.

Οι ρηγματώσεις δημιουργούνται στη μάζα του σκυροδέματος, όταν οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις είναι μεγαλύτερες από την αντοχή του σκυρο-





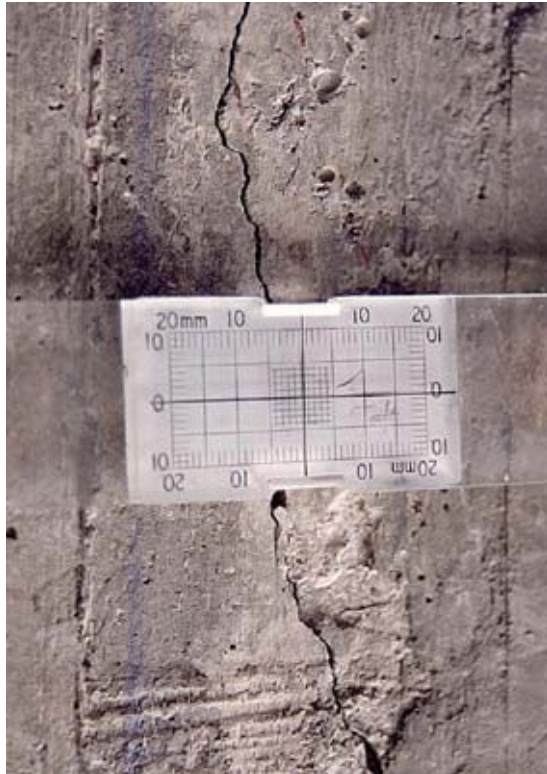
**Φωτ. 4.15.** Οι ρηγματώσεις δεν είναι πάντοτε επικίνδυνες, ούτε προκαλούν πανικό με την εμφάνισή τους. Μελετάται η έκτασή τους, το βάθος τους και η διηθούμενη ποσότητα του νερού και βγαίνουν τα απαιτούμενα συμπεράσματα, όσον αφορά την επικινδυνότητα ή το αβλαβές της ύπαρξής τους. Εδώ μια ρηγματώση στη στοιά επισκέψεων του φράγματος Πλαστήρα. Με την πάροδο του χρόνου το νερό αφήνει στην επιφάνεια του σκυροδέματος τα άλατά του, δημιουργώντας αυτή την ξεχωριστή εικόνα.

δέματος σε εφελκυσμό. Η μεταβολή της θερμικής κατάστασης στη μάζα του σκυροδέματος προκαλεί μεταβολή του όγκου, που προκαλεί την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, επειδή το σώμα δεν είναι ελεύθερο να υποστεί παραμορφώσεις. Οι ρωγμές μπορεί να είναι επιφανειακές με βάθος μερικά μόνο εκατοστά ή μεγάλου βάθους διασχίζοντας όλο το πλάτος του φράγματος.

Η φύση και δομή του εδάφους της θεμελίωσης, που είναι πιθανές αιτίες ρηματογένεσης, εξετάζονται με σχολαστικότητα και λεπτομέρεια, ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας τόσο της ενυδάτωσης όσο και του περιβάλλοντος μελετώνται συστηματικά. Για το σκοπό αυτό γίνονται μετρήσεις και από τα αποτελέσματά τους ρυθμίζεται η διαδικασία έμφραξης με τσιμεντενέσεις των αρμών διαστολής πριν από την πλήρωση του ταμιευτήρα.

Από πλευράς κατανομής των αναπτυσσόμενων τάσεων, το μέτρο ελαστικότητας του βράχου της θεμελίωσης επηρεάζει το μέγεθος και την έκταση των εμφανιζόμενων εφελκυστικών τάσεων. Μία μείωση του λόγου  $E_{\theta}/E_{\sigma}$  τείνει να αυξήσει τις εφελκυστικές τάσεις που εμφανίζονται στα μέσα των τόξων και στα κατώτερα τμήματα των στύλων. Όπου ο βράχος της θεμελίωσης είναι χαμηλής σχετι-

**Φωτ. 1.4.16.** Οι ρηγματώσεις όταν εμφανιστούν σηματοδοτούνται και παρακολουθείται η πιθανή εξέλιξη τους ή απλά η ύπαρξή τους εφόσον δεν επηρεάζουν το φράγμα. Εδώ φαίνεται η διάταξη παρακολούθησης ενός κατακόρυφου αρμού στη στοά επισκέψεων του φράγματος Πλαστήρα.



**Φωτ. 4.17.** Το φράγμα Kariba στον ποταμό Zambesi στα σύνορα της Ζάμπια με τη Ζιμπάμπουε. Είναι τοξωτό με ύψος 128 m και μήκος στέφης 579 m.



κά αντοχής η μελέτη πρέπει να προβλέπει τόξο με έντονη καμπυλότητα, που να περιορίζει την ανάπτυξή τους στο ελάχιστο δυνατό. Η επίκεντρη γωνία του τόξου όμως υπόκειται στον περιορισμό της βέλτιστης τιμής για οικονομική κατασκευή, που αντιστοιχεί σε γωνία 90°/130°. Το πάχος του τόξου της στέψης για τους προκαταρκτικούς υπολογισμούς μπορεί να προσδιοριστεί (όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 4.7) από τη σχέση:

$$d_{στ} = 0,01 (2R + H)$$

με R την ακτίνα του τόξου του φράγματος,

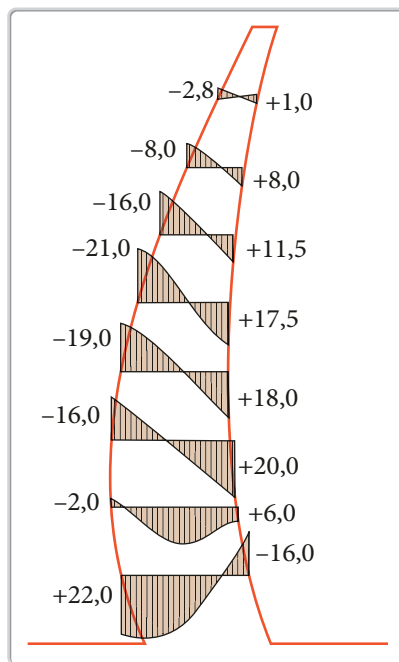
H το ύψος του φράγματος.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στα χαμηλά τόξα στην κατάντι πλευρά τους και στο μέσο των τόξων καθώς και στην ανάντι πλευρά στα άκρα του τόξου (πακτώσεις). Στους στύλους εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στην ανάντι πλευρά, στην βάση του φράγματος και στην κατάντι πλευρά προς τη στέψη τους φράγματος [17] (Σχ. 4.39).

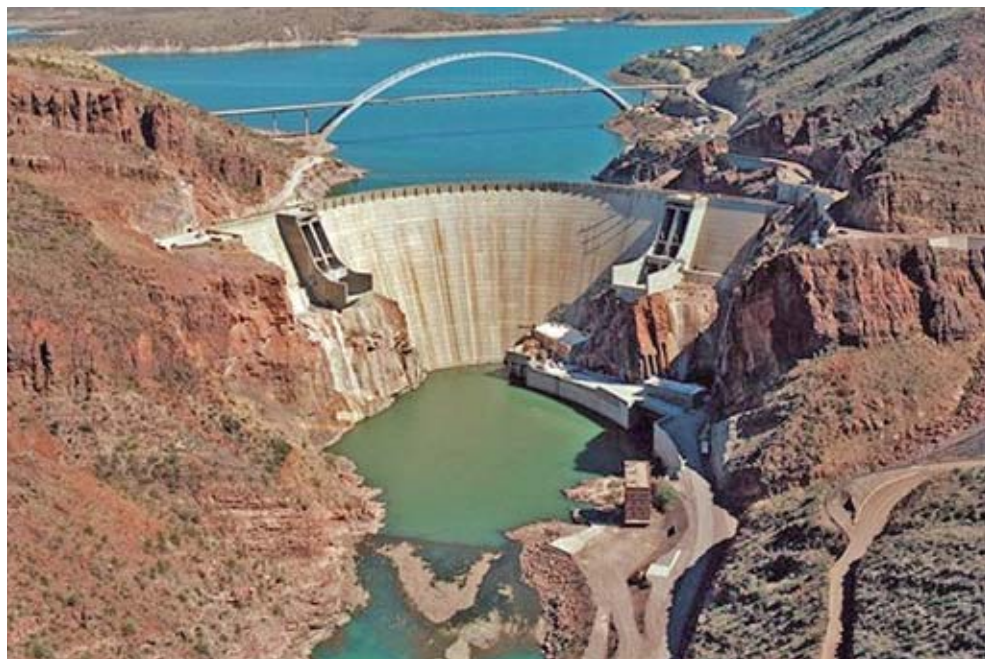
Οι εφελκυστικές τάσεις στα τόξα και τους στύλους μπορούν να μειωθούν με τη μείωση των ακτίνων των τόξων και την εκμετάλλευση της θερμοκρασιακής διαφοράς από την πρόψυξη του σκυροδέματος πριν από την έμφραξη των αρμών.

Οι εφελκυστικές τάσεις στα κατάντι των στύλων μπορούν να μειωθούν ή και να εκμηδενιστούν με τη μείωση του πάχους στα υψηλά τμήματα κοντά στη στέψη.

Εκτός όμως από τη γεωμετρία της κατασκευής, σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων και κατά συνέπεια ρωγμών παίζουν, το μέγεθος των μονολιθικών μπλοκ του σκυροδέματος, η ταχύτητα σκυροδέτησης και η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος. Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας συμβαίνει 2 με 4 μέρες μετά τη σκυροδέτηση, όταν χρησιμοποιείται τεχνητή ψύξη. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κάτω από ιδανικές συνθήκες δεν πρέπει να ξεπερνάει τη θερμοκρασία που θα έχει το φράγμα κατά τη λειτουργία του. Από έρευνες του Bureau of Reclamation των ΗΠΑ, για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας αυτής, που αποκτά η μάζα του φράγματος



Σχ. 4.39.



**Φωτ. 4.18.** Το φράγμα Theodore Roosevelt στο Colorado, έχει ύψος 107 m, μήκος στέφης 217 m και πλάτος στέφης 8 m.



**Φωτ. 4.19-20.** Στο εσωτερικό των τοξωτών φραγμάτων είναι εγκατεστημένα όργανα για την παρακολούθηση του φράγματος και τις πιθανές αποκλίσεις, που εάν φτάσουν τα όρια επικινδυνότητας, λαμβάνονται μέτρα αντιμετώπισης, με πρώτο το άδειασμα του ταμιευτήρα.

**Φωτ. 5.5.6.** Οι εκσκαφές θεμελίωσης του πυρήνα στο φράγμα των Ασωμάτων. Στο αριστερό άκρο φαίνεται το τεχνικό εισόδου του υπερχειλιστή ενώ στο δεξιό το σχεδόν κατακόρυφο αντέρισμα από επισερπεντινομένο βασάλτη.



**Φωτ. 5.5.7.** Η τάφος θεμελίωσης του πυρήνα του φράγματος Θησαυρού είχε πλυθεί και καθαριστεί, έτοιμη να δεχθεί την πρώτη στρώση του αργιλικού υλικού. Μια καταρακτώδης βροχή όμως, πλημμύρισε την τάφο και οι εργασίες καθυστέρησαν, μέχρι να απομακρυνθεί το νερό της βροχής με τη βοήθεια του φρέατος άντλησης, που διακρίνεται στα αριστερά. Στη συνέχεια η βραχύωδης επιφάνεια της θεμελίωσης πλύθηκε και καθαρίστηκε ξανά.



**Φωτ. 5.5.8.** Κατά τη θεμελίωση του φράγματος Πολυφύτου, βρέθηκε ρήγμα, το οποίο, αφού καθαρίστηκε σε αρκετό βάθος, γέμισε με σκυρόδεμα, εξασφαλίζοντας την ομαλότητα της επιφάνειας και την ελαχιστοποίηση της διαπερατότητας.



**Φωτ. 5.5.9.** Όταν στα βραχώδη πρανή υπάρχουν σπηλαιώσεις (ντουλάπια), καλυπώνονται και σκυροδετούνται.



**Φωτ. 5.5.11. α-β.** Μετά το φύσημα και πλύσιμο της επιφάνειας, χύνεται ο τσιμεντοπολτός, για την καλύτερη σύνδεση του βράχου με το σκυρόδεμα. Σε αιχμηρά βαθουλώματα όπου δύσκολα διεισδύει το σκυρόδεμα, παρά τη δόνηση, αφήνονται πλαστικοί σωλήνες σαν καλούπια για την εφαρμογή αργότερα των τσιμεντενέσεων επαφής.



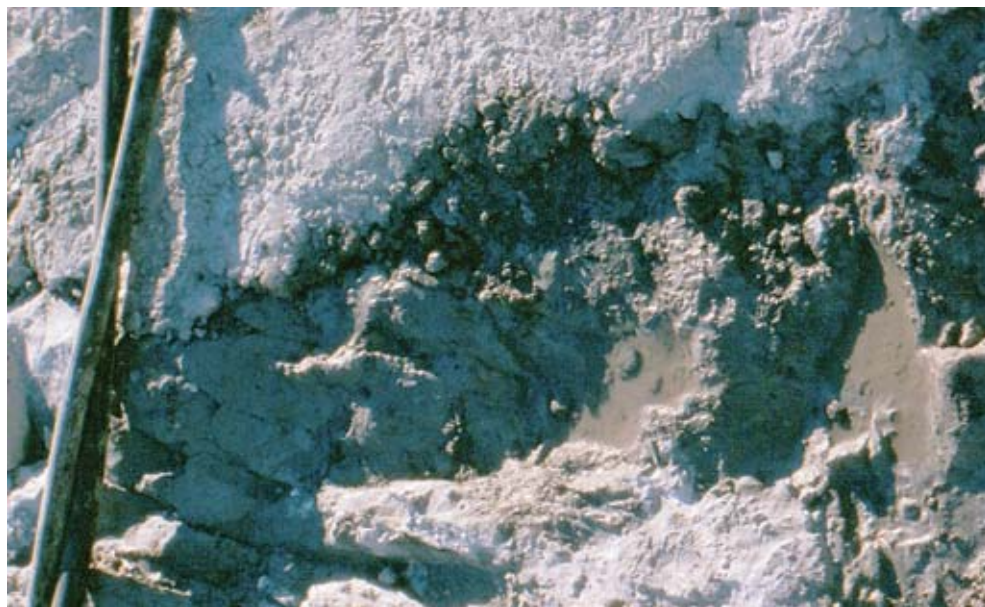


**Φωτ. 5.5.12.** Στην επιφάνεια που έγινε η διάχυση τσιμεντοπολτού, ρίχνεται το σκυρόδεμα με φορτωτή ή ατέρμονα ταινία, που εξομαλύνει τις έντονες ανωμαλίες της επιφάνειας. Πριν από τη στρώση, τοποθετούνται πλαστικοί σωλήνες σαν καλούπια για να τοποθετηθούν μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος τα μηχανικά racker για την εφαρμογή των τσιμεντενέσεων επαφής.



**Φωτ. 5.5.13.** Το μηχανικό racker έχει στο κατώτερο άκρο του ελαστικό δακτύλιο, ο οποίος φουσκώνει, όταν περιστρέφουμε τα δύο κέρατα (επάνω) και το μεταλλικό στέλεχος βιδώνει προς τα κάτω πιέζοντας τον ελαστικό δακτύλιο. Ο δακτύλιος εφαρμόζει ερμητικά στα τοιχώματα της οπής του σκυροδέματος.

**Φωτ. 5.5.14.** Στην κεφαλή του packer υπάρχει ταχυσύνδεσμος, στον οποίο κουμπώνει ο σωλήνας μεταφοράς του ενέματος. Στη σύνδεση υπάρχει πιεσόμετρο που ρυθμίζει τη μέγιστη πίεση, γιατί σε περίπτωση μεγάλων εισπιέσεων ενέματος είναι δυνατό να έχουμε τα αντίθετα αποτελέσματα.



**Φωτ. 5.5.15.** Από τις επιφάνειες επαφής βράχου-σκυροδέματος συνήθως ξεχειλίζει το ένεμα από την εισπίεση, γεγονός που αποδεικνύει την αναγκαιότητα των τσιμεντενέσεων επαφής.





**Φωτ. 5.5.21α,β,γ.** Αγκύρωση πρανών. (α) Το αγκύριο πακτώνεται στο βάθος του διατηρήματος. (β) Στη συνέχεια τοποθετείται η μεταλλική πλάκα και (γ) Το πρανές καλύπτεται από μεταλλικό πλέγμα και στην επιφάνεια εφαρμόζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.





**Φωτ. 5.5.43.** Διάστρωση και συμπίκνωση του πυρήνα και των φίλτρων του φράγματος των Ασωμάτων. Έχει ήδη γίνει η μερική επένδυση του ανάντι πρανούς. Στο βάθος φαίνεται η ροή του ποταμού μετά την έξοδό του από τη σήραγγα εκτροπής.



**Φωτ. 5.5.44.** Το φράγμα της Σφηκιάς και ένα τμήμα του ταμιευτήρα. Το έργο είναι αντιστρεπτής λειτουργίας (pumped storage), σε συνδυασμό με τον κατάντι ταμιευτήρα των Ασωμάτων, από τον οποίο αντλεί νερό τη νύχτα, που η τιμή της kwh είναι χαμηλή και παράγει ενέργεια την ημέρα, που η τιμή της είναι υψηλότερη.

### 7.8.3. Παραγωγή του RCC

Οι αναμικτήρες για το RCC πρέπει να έχουν την απαιτούμενη ικανότητα παραγωγής ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες για ταχύτατη διάστρωση και συμπύκνωση. Η λειτουργία τους δεν πρέπει να διακόπτεται και οι διακοπές για τη συντήρηση πρέπει να είναι προγραμματισμένες, σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου. Τυχαίες διακοπές λειτουργίας πρέπει να αποκαθίστανται ταχύτατα.

Οι τύποι αναμικτήρων που χρησιμοποιήθηκαν στα 103 από τα 157 φράγματα RCC μέχρι το τέλος του 1996 ήταν:

- ◆ Αναμικτήρες με δίδυμο θάλαμο στο 35% των φραγμάτων RCC,
- ◆ Αναμικτήρες με κεκλιμένο τύμπανο στο 27% των φραγμάτων RCC,
- ◆ Αναμικτήρες με χωρισμένο τύμπανο στο 7% των φραγμάτων RCC,
- ◆ Αναμικτήρες συνεχούς λειτουργίας στο 26% των φραγμάτων RCC,
- ◆ Αναμικτήρες άλλου τύπου στο 5% των φραγμάτων RCC.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι αναμικτήρες με δίδυμο θάλαμο αποτελούν την πλειονότητα (σχεδόν το ένα τρίτο) που συνεχώς αυξάνεται, ενώ οι συνεχούς λειτουργίας έχουν μικρότερο ποσοστό, που συνεχώς μειώνεται.

Η διακύμανση του ποσοστού της ελεύθερης υγρασίας στα αδρανή υλικά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην αρχική δοσολογία. Η μικρή προσφορά νερού δυσκολεύει την επεξεργασία του μίγματος, ενώ η διακύμανση της περιεκτικότητας του νερού μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του σκυροδέματος. Γιαυτό, στο χώρο παρασκευής πρέπει να υπάρχει διάταξη για την απευθείας απομάκρυνση του σκυροδέματος που ξεφεύγει από τις προδιαγραφές και να μην διαστρώνεται στο φράγμα.

### 7.8.4. Μεταφορά του RCC

Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά του RCC από το εργοτάξιο παρασκευής μέχρι το σημείο διάστρωσης, βασισμένες στα δεδομένα 129 φραγμάτων από τα 157 που είχαν κατασκευαστεί μέχρι το τέλος του 1996, είναι:

- ◆ Φορτηγά μέχρι το σημείο διάστρωσης σε ποσοστό περίπου 55%,
- ◆ Ταινιόδρομοι μέχρι το φράγμα και φορτηγά πάνω στο φράγμα 21%,
- ◆ Σχοινιόσυρτα βαγονέτα μέχρι το φράγμα και φορτηγά πάνω στο φράγμα 6%,
- ◆ Μόνο ταινιόδρομοι 5%,
- ◆ Διάφορες άλλες μέθοδοι 13%.

Από αυτά φαίνεται καθαρά ότι η πιο δημοφιλής μέθοδος μεταφοράς είναι με φορτηγά (>50%), με δεύτερη τη χρήση ταινιοδρόμων από τον τόπο παραγωγής μέχρι το φράγμα και φορτηγά από το σημείο μεταφόρτωσης μέχρι το εκάστοτε σημείο διάστρωσης.

Μεταφορά τεφρο-  
σκυροδέματος  
στο έργο.



Διάστρωση  
τεφροσκυροδέ-  
ματος.



**Φωτ. 7.10.** Μεταφορά, διάστρωση και συμπίκνωση του RCC στο φράγμα της Πλατανόβρυσης (Α. Κραβαρίτη, Υ-Ε Πλατανόβρυσης, ΔΕΗ, Ιούλιος 1998).





**Φωτ. 7.11.** Μια φάση από την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης. Δεξιά φαίνεται το τμήμα της κατάντι παρειάς, οι διερχόμενοι μέσα από το σώμα του φράγματος αγωγοί μεταφοράς και οι διαμορφώσεις των ανωμαλιών του βραχώδους πρσανούς με RCC.

Η φρεσκοστρωμένη επιφάνεια του RCC πρέπει να είναι λεία, ώστε το τύμπανο του στρωτήρα να προκαλεί μια ενιαία και σταθερή πίεση σε όλο το πλάτος του τυμπάνου. Αν η επιφάνεια της στρώσης δεν είναι λεία, τότε το τύμπανο θα συμπιέζει περισσότερο τις προεξοχές και λιγότερο τις λακκούβες.

Ο ελάχιστος αριθμός διαβάσεων (μια διάβαση εννοείται η μία κατεύθυνση) για έναν συγκεκριμένο κυλινδροσυμπιεστή και μια συγκεκριμένη συμπύκνωση, εξαρτάται από την εργασιμότητα του σκυροδέματος και το πάχος των στρώσεων. Το συμπυκνούμενο πάχος μιας οποιασδήποτε στρώσης RCC πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσιο της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου των αδρανών. Ο αριθμός των απαιτούμενων διαβάσεων του δονούμενου οδοστρωτήρα προσδιορίζεται από επί τόπου πειραματικές δοκιμές στο εργοτάξιο. Μερικές προδιαγραφές σε φράγματα RCC απαιτούν, η πρώτη διάβαση να γίνεται χωρίς δόνηση για να επιτυγχάνεται καλύτερη σταθεροποίηση και να αποφεύγεται η δημιουργία κυματοειδούς επιφάνειας.

Γενικά με 4 έως 8 διαβάσεις ενός 10-τονου δονούμενου κυλινδροσυμπιεστή επιτυγχάνεται μια σταθερή, επιθυμητής συμπύκνωσης στρώση των 300 mm. Σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες η συμπύκνωση πρέπει να τελειώνει όσο το δυ-



**Φωτ. 7.12.** Φάσεις κατασκευής φραγμάτων RCC σε διάφορες περιοχές. Στα θερμά κλίματα η διάστρωση γίνεται συνήθως τις νυχτερικές ώρες (αριστερά), ενώ (κάτω δεξιά) διαστρώνεται η τελευταία στρώση του φράγματος.



**Φωτ. 7.13.** Το φράγμα της Άνω Μεράς στη Μύκονο είναι φράγμα σκληρού επιχώματος (hard fill). Κατασκευάστηκε το 1997, για να καλύψει τις ανάγκες του νησιού σε πόσιμο και αρδευτικό νερό. Στη μέση έχει αφεθεί μια σκάφη για την ελεύθερη υπερχείλιση.

# 6

## Υπερχειλιστές μορφής σήραγγας ή οπής

### 6.1 Χαρακτηριστικά-εφαρμογές

Οι υπερχειλιστές της μορφής οπής μπορεί να χαρακτηριστούν και ως σήραγγες με βυθισμένη είσοδο και συνήθως ελέγχονται από δύο θυροφράγματα, ένα ανάντι και ένα μέσα στη σήραγγα. Η διαφορά τους από τα έργα εξόδου είναι ότι, το άνοιγμα και κλείσιμο γίνεται στο μέσο βάθος του ταμιευτήρα και όχι στο κατώτερο που βρίσκονται οι μηχανισμοί των εκκενωτών.

Το κατάντι θυρόφραγμα ρυθμίζει τον έλεγχο της ροής, ενώ το ανάντι λειτουργεί ως φύλακας και κλείνει όταν απαιτείται συντήρηση στο κατάντι. Μια λεπτομέρεια σημαντική στο σχεδιασμό των θυροφραγμάτων αυτών είναι η μέριμνα, ώστε τα φερτά υλικά που συμπαρασύρονται, να μην προκαλούν δυσλειτουργίες στο στεγανό κλείσιμο των θυροφραγμάτων και καταστροφές εξαιτίας των διαβρώσεων. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με το σφράγισμα του θυροφράγματος στην οροφή της σήραγγας αντί του πυθμένα.

Οδηγίες για τον σχεδιασμό των υπερχειλιστών σηράγγων αναφέρθηκαν στο 20<sup>ο</sup> συνέδριο του ICOLD και μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω.

- ◆ Δύο είσοδοι να υπάρχουν για κάθε σήραγγα,
- ◆ Να υπάρχουν δύο θυροφράγματα για κάθε σήραγγα,
- ◆ Η προσπέλαση στον θάλαμο ελέγχου είναι διαφορετική από τη σήραγγα,
- ◆ Κατάντι του θυροφράγματος ελέγχου να υπάρχει παροχή αέρα,
- ◆ Να γίνεται πάντοτε έλεγχος με φυσικά μοντέλα πριν από τον τελικό σχεδιασμό,
- ◆ Να λαμβάνεται μέριμνα ύπαρξης μεγάλων σχαρών για τη συγκράτηση των ογκοδών φερτών υλικών (κορμών δέντρων, κλαδιών, πνιγμένων ζώων, κ.λπ.).





**Φωτ. 6.1.** Ο υπερχειλιστής τύπου οπής του φράγματος O' Shaugnessy.

Οι υπερχειλιστές μορφής οπής κατασκευάζονται όταν ειδικές συνθήκες της περιοχής το επιβάλλουν. Σε στενές κοιλάδες, παραδείγματος χάριν, είναι συνήθως δύσκολο να ενσωματωθεί στο φράγμα ένας υπερχειλιστής με εκτεταμένο μήκος στέψης, που να είναι ικανός να παραλάβει την αναμενόμενη πλημμυρική απορροή εκατονταετίας. Αντίθετα η λύση της οπής φαίνεται πιο λογική. Έχει βέβαια το μειονέκτημα ότι η παροχή είναι συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του διαθέσιμου φορτίου, ενώ του επιφανειακού υπερχειλιστή είναι συνάρτηση της δύναμης  $3/2$  του φορτίου. Για το λόγο αυτό οι Υ/χ οπής συναντώνται σε ψηλά φράγματα, όπου υπάρχει η δυνατότητα υψηλού υδραυλικού φορτίου (Σχ. 6.1). Παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν τη ροή του ποταμού κατά τη διάρκεια της κατασκευής και το μειονέκτημα ότι μπορεί να φραγούν από μεταφερόμενα στερεά.

**Φωτ. 6.3.** Το φράγμα Gibson στη Μοντάνα των ΗΠΑ είναι τοξωτό ύψους 60 m και έχει δύο σπές για την υπερχειλίση. Το μήκος της στέψης είναι 288 m και το πλάτος της 4,50 m.



**Φωτ. 6.4.** Το φράγμα Owyhee στο Oregon είναι κι αυτό τοξωτό, ύψους 125 m με τρεις σπές για την υπερχειλίση. Έχει μήκος στέψης 250 m και πλάτος 9.







**Φωτ. 9.6.** Δικλείδα hollow-jet.

Ο τύπος της δικλείδας hollow-jet του U.S.B.R. (Φωτ. 9.6) έχει άριστα χαρακτηριστικά λειτουργίας για μεγάλες παροχές και κάτω από υψηλά φορτία. Η κατασκευή της είναι απλή, η κοιλότητα του πίδακα που δίνει είναι καλή και δεν εμφανίζει προβλήματα σπηλαιώσης και κραδασμών γιατί η εκκένωση του νερού γίνεται συνήθως στον αέρα.

Η δικλείδα Butterfly (πεταλούδα) (Φωτ. 9.7) μεγάλης διαμέτρου χρησιμοποιείται ευρύτατα σε υδροηλεκτρικά έργα, σε αρδευτικά και σε αποχετευτικά δίκτυα.



**Φωτ. 9.7.**  
Δικλείδα  
Butterfly.

Οι δοκοί έμφραξης είναι χαλύβδινες κατασκευές που κλείνουν τη δίοδο του νερού κυρίως σε περιπτώσεις επιθεώρησης ή εργασιών συντήρησης των θυροφραγμάτων ή των υπό πίεση αγωγών, που βρίσκονται κατάντι. Ανάλογα με το απαιτούμενο ύψος οι δοκοί έμφραξης μπορεί να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα κομμάτια, που τοποθετούνται ή μετακινούνται με τη βοήθεια γερανογέφυρας και συστήματος κρέμασης.



**Φωτ. 9.10.** Δοκοί έμφραξης.



**Φωτ. 9.11.** Ακτινωτά θυροφράγματα.

# 1

## Υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις

### 1.1

#### Εισαγωγικά

Ο άνθρωπος τιθασεύοντας το νερό κατάφερε να παράγει έργο πριν από χιλιάδες χρόνια. Από αρχαιολογικές έρευνες βρέθηκε, ότι πρώτοι οι Έλληνες γύρω στο 800 π.χ., χρησιμοποίησαν τον **υδραυλικό τροχό** για το άλεσμα του σιταριού και καλαμποκιού και τη μετατροπή τους σε αλεύρι.

Μετά την κλασική εποχή ο τροχός διαδόθηκε στους Ρωμαίους και από αυτούς εξαπλώθηκε σε όλο τον τότε γνωστό κόσμο. Με την πάροδο των αιώνων ο άνθρωπος άρχισε να βελτιώνει τη λειτουργία του υδραυλικού τροχού. Άλλαξε η θέση τροφοδοσίας του νερού, με το κέντρο του τροχού στο επίπεδο της επιφάνειας του νερού και τα πτερύγια έγιναν καμπύλα από επίπεδα, γεγονός που αύξησε την απόδοση του τροχού. Οι βελτιώσεις εξάλλου στη μεταφορά της κίνησης με τους μάντες και τα γρανάζια, αύξησαν το εύρος χρήσης του, σε νέες εφαρμογές όπως, η επεξεργασία του ξύλου και η υφαντουργία και μόλις τον 19<sup>ο</sup> αιώνα η τουρμπίνα σιγά-σιγά άρχισε να αντικαθιστά τον υδραυλικό τροχό, λόγω μεγαλύτερης απόδοσης.

Ο Samuel Howd δημιούργησε πρώτος την **τουρμπίνα (υδροστρόβιλο)**, που ήταν τροποποίηση του τροχού, ενώ ο James Francis, την τελειοποίησε με την καμπυλότητα των πτερυγίων.

Η τουρμπίνα αυτή χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές μέχρις ότου οι ατμομηχανές πήραν τη θέση των τουρμπινών ως πηγές ενέργειας. Πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι που η τουρμπίνα Francis επέστρεψε θριαμβευτικά για την παραγωγή μιας νέας μορφής ενέργειας. Της υδροηλεκτρικής.

Σήμερα σε πολλά μέρη του κόσμου χρησιμοποιούν ακόμη τον υδραυλικό τροχό.





**Φωτ. 1.3.** Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πουρναρίου της ΔΕΗ.



**Φωτ. 1.4.** Ο ΥΗΣ Πουρναρίου. Διακρίνονται τα κίτρινα καπάκια των γεννητριών και ο υποσταθμός με τη γραμμή μεταφοράς. Κάτω από το Σταθμό είναι η έξοδος των διωρύγων φυγής, που εκβάλλουν στην παλιά κοιτή του Άραχθου.

## 1.3 Μορφές υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του υδροηλεκτρικού σταθμού σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Σταθμός παραγωγής στο ποδαρικό του φράγματος
2. Σταθμός με διώρυγα παράκαμψης
3. Σταθμός με σήραγγα παράκαμψης.

### 1.3.1. Σταθμός παραγωγής στο ποδαρικό του φράγματος (Σχ. 1.4, Φωτ. 1.4)

Συνήθως τα φράγματα που κατασκευάζονται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλά, σε κατάλληλες κοιλάδες που εξασφαλίζουν μεγάλο όγκο ταμιευτήρα, ή σε ποταμούς με μεγάλη και συνεχή παροχή. Η υδροληψία για τα σκυρόδετα φράγματα γίνεται στην ανάντι πλευρά του φράγματος και σε ύψος, που δεν πρέπει να βρίσκεται χαμηλότερα από την κατώτατη στάθμη του ταμιευτήρα. Η είσοδος της καλύπτεται από σχάρα για την συγκράτηση των ογκωδών φερτών υλικών του ποταμού, με αυτόματο σύστημα καθαρισμού της, ενώ υπάρχει θυρόφραγμα, συνήθως ανυψούμενο και συνοδευόμενο με δοκούς έμφραξης για περιπτώσεις συντηρήσεων ή απρόσμενων βλαβών.



**Φωτ. 1.5.** Ο υδροηλεκτρικός Σταθμός στο φράγμα της Πλατανόβρυσης βρίσκεται στο κατάντι ποδαρικό του φράγματος κάτω από τη διάταξη αναπήδησης των υπερχειλιστών.





**Φωτ. 1.6.** Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός της Σφηκιάς βρίσκεται στο ποδαρικό του φράγματος. Το νερό προσάγεται στην κάθε μονάδα από την αντίστοιχη σήραγγα προσαγωγής, που διανοίχτηκε στο απέναντι αντέρεισμα και έχει χαλύβδινη επένδυση πάχους 16 mm. Ο Σταθμός είναι αντιστρεπτής λειτουργίας και γιαυτό οι διώρυγες φυγής είναι βυθισμένες στο νερό του ταμιευτήρα των Ασωμάτων.

Η μεταφορά του νερού από τον ταμιευτήρα στις τουρμπίνες γίνεται με αγωγούς, μέσα από το σώμα του φράγματος, μόνο όμως για φράγματα από σκυρόδεμα, ενώ για χωμάτινα ή λιθόρριπτα γίνεται με διάνοιξη σήραγγας σε ένα από τα πρανή της κοιλάδας.

Οι αγωγοί έχουν χαλύβδινη εσωτερική επένδυση και καταλήγουν στο **σαλίγκαρο**. Μετά την διέλευση από την τουρμπίνα το νερό οδηγείται μέσα από τις διώρυγες φυγής στον παρακείμενο ποταμό (Φωτ. 1.4-5-6).

### 1.3.2. Σταθμός παραγωγής με διώρυγα παράκαμψης (Σχ. 1.6)

Συνήθως η δημιουργία υδατοπτώσεων μεγάλης ισχύος επιτυγχάνεται με την εκτροπή της ροής του ποταμού, μέσω της υδροληψίας, και παροχέτευση του νερού μέσω μιας ανοιχτής διώρυγας με μικρή κλίση, σε κατάλληλα επιλεγμένο σημείο του εδάφους με απότομη κλίση. Το νερό οδηγούμενο μέσα σε χαλύβδινους αγωγούς πέφτει με μεγάλη πίεση στις τουρμπίνες που κατασκευάζονται στο χαμηλότερο σημείο και στη συνέχεια επιστρέφει πάλι στην κοίτη του ποταμού σε αρκετή απόσταση κατάντι.



**Φωτ. 1.9.** Υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Στην κορυφή φαίνεται η δεξαμενή ανάπαλσης, και στη συνέχεια οι 6 σωληνώσεις προσαγωγής.

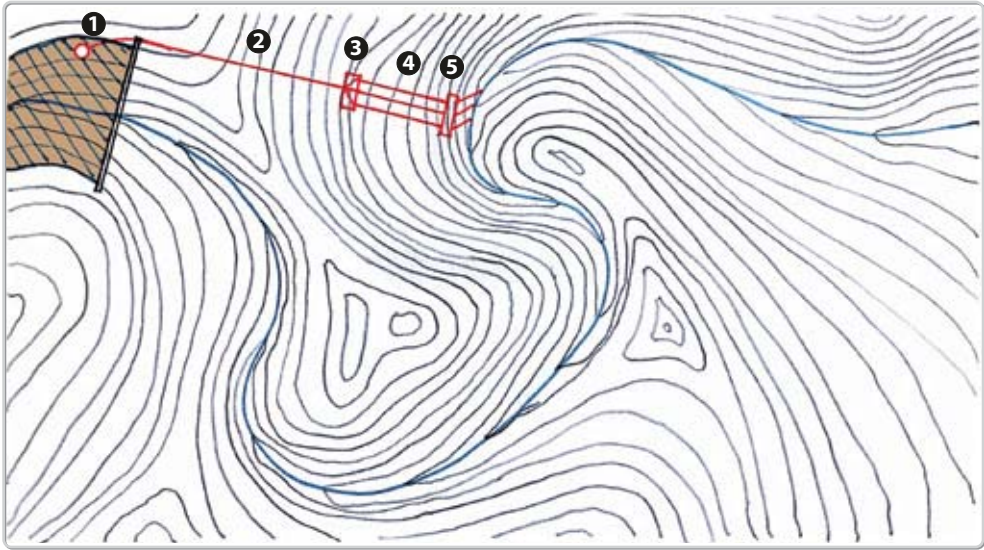


**Φωτ. 1.10.** Η προσαγωγή του νερού από το μεριστή στις τουρμπίνες γίνεται με χαλύβδινους σωλήνες μεγάλης διαμέτρου.

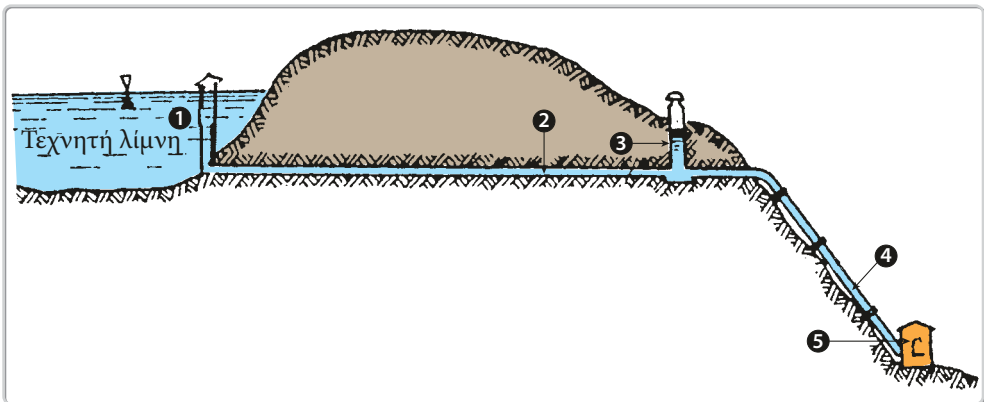
### 1.3.3. Σταθμός παραγωγής με σήραγγα παράκαμψης (Σχ. 1.7)

Η μορφή αυτή υδροδυναμικής εγκατάστασης είναι παρόμοια με την προηγούμενη με ορισμένες βασικές διαφορές, που επιβάλλονται από τη μορφολογία του εδάφους και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού.

Το φράγμα είναι υψηλό και ο ταμιευτήρας μεγάλος για να αναρρυθμίζει τις διακυμάνσεις της παροχής του ποταμού.



Σχ. 1.7. Σχηματική διάταξη υδροδυναμικής εγκατάστασης με σήραγγα παράκαμψης. (1) Υδροληψία, (2) Σήραγγα, (3) Δεξαμενή ανάπαυσης, (4) Σωλήνες προσαγωγής, (5) Σταθμός παραγωγής.



Σχ. 1.8. Κατά μήκος τομή της χάραξης του Σχ. 1.7.



Το νερό από την υδροληψία οδηγείται μέσω μιας σήραγγας, επενδεδυμένης με χαλύβδινους σωλήνες μεγάλης διατομής και υψηλών αντοχών, τόσο σε εσωτερικές όσο και σε εξωτερικές πιέσεις. Η σήραγγα διασχίζει τον ορεινό όγκο, μέχρι το σημείο της απότομης κλίσης του εδάφους, όπου κατασκευάζεται θάλαμος αποφόρτισης (**δεξαμενή ανάπαλσης**) των πιέσεων του υδραυλικού πλήγματος. Από το σημείο αυτό ξεκινούν οι αγωγοί προσαγωγής του νερού στο σταθμό παραγωγής.

Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που η σήραγγα που διασχίζει τον ορεινό όγκο έχει μεγάλο μήκος ή οι αγωγοί προσαγωγής ακολουθώντας το ανάγλυφο του εδάφους αναπτύσσονται σε μήκη χιλιομέτρων, όπως συμβαίνει στον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα στην Καρδίτσα (Φωτ. 1.11).



**Φωτ. 1.11.** Ο αγωγός προσαγωγής του νερού από τον ταμιευτήρα, στον ΥΗΣ Πλαστήρα στην Καρδίτσα.



**Φωτ. 1.12.** Οι αγωγοί προσαγωγής του νερού στον υδροηλεκτρικό σταθμό αγκυρώνονται με σκυρόδεμα ανά αποστάσεις 100 ÷ 150 m. Στα μεταξύ των αγκυρώσεων διαστήματα οι αγωγοί πατάνε σε σάγματα.

**6.1 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ)**

Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί είναι εγκαταστάσεις στις οποίες με τη βοήθεια των υδροστροβίλων και των γεννητριών, η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το νερό, φυσικός ανανεώσιμος πόρος, που δεν αφήνει απόβλητα ούτε εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου.

Το νερό πέφτει με δύναμη επάνω στα πτερύγια της τουρμπίνας, την οποία αναγκάζει να περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Η περιστροφή αυτή μεταδίδεται στη γεννήτρια η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, εξαρτάται από:

- ♦ την ποσότητα του νερού που περνάει από την τουρμπίνα (παροχή  $Q$ ),
- ♦ το ύψος πτώσης του νερού (υδραυλικό φορτίο  $H$ ).

Όσο μεγαλύτερη η παροχή  $Q$  και η υδατόπτωση  $H$ , τόσο μεγαλύτερη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του σταθμού αυτού.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει το ένα τέταρτο της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοτεί περισσότερους από ένα δισεκατομμύριο πολίτες.

Σύμφωνα με το National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ, η παγκόσμια παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας φτάνει τα 675.000 MW, ποσότητα που αντιστοιχεί σε 3,6 δισεκατομμύρια βαρέλια πετρέλαιο.

Η ανάπτυξη των υδροστροβίλων ως υποκεφάλαιο των υδροδυναμικών έργων, δεν θα επεκταθεί σε βάθος γιατί ξεφεύγει από την ειδικότητα του υδραυλικού μηχανικού, οι γνώσεις του οποίου περιορίζονται στον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων που θα βοηθήσουν τον ειδικευμένο μηχανολόγο στην επεξεργασία τους και την επιλογή της βέλτιστης λύσης του συστήματος τουρμπίνας-γεννήτριας.



Ο υδροηλεκτρικός σταθμός στεγάζει τις μονάδες παραγωγής (τουρμπίνα-γεννήτρια) με τα συναφή έργα, που είναι αγωγοί προσαγωγής του νερού, το τεχνικό εισόδο του νερού στην τουρμπίνα (κοχλιωτός σωλήνας ή σαλίγκαρος για τουρμπίνες Francis και Kaplan, αγωγοί με ακροφύσια για τουρμπίνες Pelton), και τις διάφυγες φυγής, που οδηγούν το νερό μετά τις τουρμπίνες πίσω στο ποτάμι.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορεί να είναι υπαίθριοι ή υπόγειοι, με τους τελευταίους να κερδίζουν συνεχώς έδαφος έναντι των υπαίθριων, όχι μόνο για λόγους εθνικής ασφάλειας αλλά και γιατί εμφανίζουν οικονομικά πλεονεκτήματα. Τους υδροστρόβιλους (τουρμπίνες) τους διακρίνουμε, ανάλογα με τον τρόπο που δρα το νερό, σε δύο κατηγορίες:

- ♦ Υδροστρόβιλους εκτόξευσης ή δράσης (Pelton),
- ♦ Υδροστρόβιλους υπερπίεσης ή αντίδρασης (Francis-Karlan).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι υδροστρόβιλοι στους οποίους το νερό εκτοξεύεται από ακροφύσια και χτυπάει τα καμπύλα πτερύγια του στροβίλου, αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι υδροστρόβιλοι στους οποίους το νερό λόγω του μεγάλου φορτίου του πιέζει τα πτερύγια του στροβίλου, προκαλώντας την περιστροφή του.



**Φωτ. 6.1.** Μία φάση από την κατασκευή του Υδροηλεκτρικού Σταθμού Στράτο. Διακρίνονται αριστερά οι αγωγοί μεταφοράς του νερού στις τουρμπίνες. Οι αγωγοί μεταφέρονται στη θέση του έργου κατά τμήματα (δαχτυλίδια) και συγκολλούνται επί τόπου, ενώ στη συνέχεια σκυροδετούνται εξωτερικά.



**Φωτ. 6.2.** Μεταφορά με γερανό ενός γωνιακού δαχτυλιδιού του αγωγού προσαγωγής του νερού στο ΥΗ Σταθμό της Σφηκιάς.



**Φωτ. 6.3.** Η εικόνα από τον υπόγειο ΥΗΣταθμό του Θησαυρού σε φάση συγκόλλησης των δαχτυλιδιών του σαλίγκαρου. Στο κέντρο του σαλίγκαρου θα τοποθετηθεί η τουρμπίνα και πάνω απ' αυτήν η γεννήτρια.





**Φωτ. 6.6.** Συναρμολόγηση των 2 αγωγών που οδηγούν το νερό στα 2 ακροφύσια.



**Φωτ. 6.7.** Ο τροχός με τα περύγια μεταφέρεται στο έργο. Ήδη έχουν εγκατασταθεί οι αγωγοί και ο τροχός έρχεται να κουμπώσει στη θέση του.



**Φωτ. 6.8.** Εγκατάσταση τουρμπίνας Pelton. Διακρίνεται το ένα ακροφύσιο, η τουρμπίνα με το διπλό περύγιο, και δεξιά η γεννήτρια στην επέκταση του άξονα της τουρμπίνας (ευγενής προσφορά εταιρίας Canyon Hydro).



**Φωτ. 6.9.** Μετά τη μεταφορά και συναρμολόγηση των επί μέρους τμημάτων, κατασκευάζεται το οικοδόμημα, που στεγάζει την όλη εγκατάσταση. Οι σκάλες πάνω από τους αγωγούς οδηγούν στο ρυθμιστή της δέσμης του νερού.