



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση και Παρακολούθηση Μεγάλων Φραγμάτων-Εφαρμογή στο Φράγμα Σμοκόβου

υπό τη φοιτήτρια
Κολλάτου Άννα-Μαρία



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

Ιούλιος 2015



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 14069/1
Ημερ. Εισ.: 16-06-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιδετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2015
ΚΟΛ



© 2015 Κολλάτου Άννα-Μαρία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Π. Ντακούλας
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Αι. Κωμοδρόμος
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Π. Καλλιόγλου
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές, κυρίους Ι.Θανόπουλο και Π. Ντακούλα, για την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Στους καθηγητές, Αι. Κωμοδρόμο, Π. Καλλιόγλου, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις πολύτιμες υποδείξεις τους κατά τη διάρκεια παρουσίασης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τον χρόνο που διέθεσαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Γ. Ντουριά, για την παραχώρηση στοιχείων του έργου πολύ σημαντικών για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Για την βοήθειά του κατά την επίσκεψή μου στο φράγμα Σμοκόβου, οφείλω να ευχαριστήσω τον κύριο Α. Κουκουράβα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξή τους τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και κατά το διάστημα εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Στους γονείς μου,



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ

ΚΟΛΛΑΤΟΥ ANNA-MARIA

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέποντες καθηγητές:

Π. Ντακούλας, Καθηγητής

Ι. Θανόπουλος, Σύμβουλος Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει μια προεργασία πάνω στην παρακολούθηση και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των μεγάλων φραγμάτων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη και μη προβληματική λειτουργία τους προς όφελος του δημοσίου συμφέροντος.

Εισαγωγικά, παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τα φράγματα, τους τύπους φραγμάτων, τα οφέλη τους και τους συχνότερους μηχανισμούς αστοχίας των έργων αυτών.

Στη συνέχεια, γίνεται μια προκαταρκτική αξιολόγηση του τρόπου και των υλικών κατασκευής του φράγματος του Σμοκόβου, προκειμένου να διαπιστωθεί αν τηρούνται τα κριτήρια των σύγχρονων διεθνών προδιαγραφών που αφορούν την κατασκευή φραγμάτων από γεωυλικά. Η αξιολόγηση του έργου, συμπληρώνεται με αναλύσεις ευστάθειας του αναχώματος του φράγματος. Σχετικά με τις παραμορφώσεις του αναχώματος παρατίθεται η ανάλυσή τους όπως έγινε από τον Γ. Ντουνιά κατά την κατασκευή του φράγματος και την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα. Για λόγους πληρότητας της εργασίας επιδιώχθηκε η συλλογή μετρήσεων των οργάνων του φράγματος προκειμένου να εξετασθούν και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του φράγματος για τα υπόλοιπα χρόνια λειτουργίας του μέχρι σήμερα, αυτό όμως δεν κατέσται δυνατό.

Τέλος, γίνεται αναφορά στην αναγκαιότητα παρακολούθησης των γεωφραγμάτων μέσω δικτύου οργάνων μέτρησης, στην επιδίωξη της Ελληνικής Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων για την νομική κατοχύρωση της ενόργανης παρακολούθησης των μεγάλων φραγμάτων της Ελλάδας, στα όργανα μέτρησης και τα μετρήσιμα μεγέθη καθώς και στο πρόγραμμα ενοργάνωσης του φράγματος του Σμοκόβου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1° «Εισαγωγικά Στοιχεία για τα Φράγματα»	Σελ.
1.1 Ιστορία των Φραγμάτων	1
1.2 Ορισμοί.....	2
1.3 Τύποι Φραγμάτων	3
1.3.1 Φράγματα Σκυροδέματος	3
1.3.2 Γεωφράγματα	6
1.4 Οφέλη από τις κατασκευές φραγμάτων	7
1.5 Ασφάλεια Φραγμάτων	8
1.5.1 Ιστορικές αστοχίες φραγμάτων	9
1.5.2 Μηχανισμοί αστοχίας φραγμάτων και συχνότητα εμφάνισής τους	12
Κεφάλαιο 2° «Αξιολόγηση Μεγάλων Φραγμάτων-Εφαρμογή στο Φράγμα Σμοκόβου»	Σελ.
2.1 Λίγα λόγια για το Φράγμα Σμοκόβου	14
2.2 Διαζώνιση Χωμάτων Φραγμάτων	17
2.3.1 Διαζώνιση Φράγματος Σμοκόβου	18
2.3.2 Σχολιασμός	19
2.3 Υλικά Κατασκευής	
2.3.1 Πυρήνας	
2.3.1.a Γενικά	19
2.3.1.b Περιγραφή Πυρήνα, Ζώνη 1	21
2.3.2 Φίλτρα-Γενικά	22
2.3.2.1 Φίλτρο Ζώνης 2	
2.3.2.1.a Περιγραφή Φίλτρου Ζώνης 2 (2A)	23
2.3.2.1.b Έλεγχος Επάρκειας Φίλτρου 2A	24
2.3.2.1.c Εκ νέου σχεδιασμός φίλτρου 2A	26
2.3.2.2 Φίλτρο Ζώνης 3	
2.3.2.2.a Περιγραφή Φίλτρου Ζώνης 3 (2B)	32
2.3.2.2.b Έλεγχος Επάρκειας φίλτρου 2B	33
2.3.2.2.c Εκ νέου σχεδιασμός φίλτρου 2B	33
2.3.3 Κατασκευή σωμάτων στήριξης	
2.3.3.1 Γενικά	38
2.3.3.2 Περιγραφή της Λιθορριπής, Ζώνη 4	39
2.4 Απόκριση του έργου κατά την κατασκευή και πρώτη πλήρωση	
2.4.1 Πιέσεις Πόρων	40
2.4.2 Παραμορφώσεις	40
2.4.3 Διηθήσεις	41
2.5 Ευστάθεια Πρανών	

2.5.1	Γενικά	43
2.5.2	Έλεγχος Ευστάθειας Χωμάτινου Φράγματος	44
2.5.3	Ανάλυση Ευστάθειας Χωμάτινου Φράγματος Σε σεισμό	
2.5.3.1	Γενικά	45
2.5.3.2	Ψευδοστατική Ανάλυση	46
2.5.4	Συντελεστής Ασφαλείας	48
2.5.5	Αναλύσεις Ευστάθειας Φράγματος Σμοκόβου υπό στατικές συνθήκες	49
2.5.5.1	Ανάντη Πρανές	
2.5.5.1.a	Συνθήκη Απότομου Καταβιβασμού της στάθμης	50
2.5.5.1.b	Συνθήκη Σταθερής ροής διήθησης	53
2.5.5.2	Κατάντη Πρανές	54
2.5.6	Αναλύσεις Ευστάθειας Φράγματος Σμοκόβου υπό σεισμικό φορτίο ...	56
2.5.6.a	Ανάντη Πρανές	56
2.5.6.b	Κατάντη Πρανές	56
2.5.7	Συμπεράσματα	58

Κεφάλαιο 3° «Ενόργανη Παρακολούθηση (Monitoring) και επιτήρηση φραγμάτων στα πλαίσια εξασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας του.» Σελ.

3.1	Ορισμοί	59
3.2	Γενικά	59
3.3	Πρόταση της ΕΕΜΦ για νομική κατοχύρωση της υποχρεωτικής παρακολούθησης μεγάλων φραγμάτων του Ελληνικού χώρου	60
3.4	Πρόγραμμα Ενόργανης Παρακολούθησης Φράγματος	63
3.4.1	Μέτρηση και παρακολούθηση διαρροών	64
3.4.2	Επιφανειακές Μετακινήσεις	65
3.4.3	Πιέσεις πόρων	66
3.4.3.a	Φρέαρ Παρατήρησης (observation well)	67
3.4.3.b	Ηλεκτρικά πιεσομετρικά κύτταρα δονούμενης χορδής	67
3.4.4	Μετακινήσεις και παραμορφώσεις εδάφους	68
3.4.4.a	Όργανα μέτρησης κατακόρυφης μετακίνησης	69
3.4.4.b	Όργανα μέτρησης οριζόντιας μετακίνησης	69
3.5	Ενοργάνωση Φράγματος Σμοκόβου	71
3.5.1	Διάταξη Οργάνων	73

Κεφάλαιο 4° «Συμπεράσματα»

4.1	Υλικά Κατασκευής	
4.1.1	Πυρήνας	75
4.1.2	Φίλτρα	75
4.1.3	Λιθορριπή	76
4.2	Ευστάθεια Φράγματος	76
4.3	Παρακολούθηση Φράγματος	77

Βιβλιογραφία Παράρτημα Σχεδίων

Ευρετήριο Σχημάτων

Κεφάλαιο 1° «Εισαγωγικά Στοιχεία για τα Φράγματα» Σελ.

Σχήμα 1.1. Φράγμα Μαραθώνα	4
Σχήμα 1.2. Τυπική διατομή φράγματος Μαραθώνα	4
Σχήμα 1.3. Αντιρηδωτό φράγμα Λάδωνα-Πελοπόννησος	5
Σχήμα 1.4. Το τοξωτό φράγμα του Ταυρωπού	6
Σχήμα 1.5. Παραδείγματα τυπικών διατομών γεωφραγμάτων	7
Σχήμα 1.6. Φράγμα Saint-Francis, εικόνα μετά την αστοχία του φράγματος	9
Σχήμα 1.7. Φράγμα Malpasset	10
Σχήμα 1.8. Φράγμα Teton	11
Σχήμα 1.9. Συχνότεροι μηχανισμοί αστοχίας σε χωμάτινα φράγματα	12
Σχήμα 1.10. Συχνότεροι μηχανισμοί αστοχίας φραγμάτων σκυροδέματος	13

Κεφάλαιο 2° «Αξιολόγηση Μεγάλων Φραγμάτων-Εφαρμογή στο Φράγμα Σμοκόβου» Σελ.

Σχήμα 2.1. Φράγμα Σμοκόβου	14
Σχήμα 2.2. Οριζοντιογραφία φράγματος Σμοκόβου	16
Σχήμα 2.3. Κεντρική Διατομή φράγματος Σμοκόβου	16
Σχήμα 2.4. Προδιαγραφές για τα όρια Attemberg που πρέπει να πληροί ο πυρήνας γεωφράγματος	20
Σχήμα 2.5. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού πυρήνα (Ζώνη 1) φράγματος Σμοκόβου	22
Σχήμα 2.6. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 2) φράγματος Σμοκόβου.....	24
Σχήμα 2.7. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου ζώνης 2 όπως εκ νέου σχεδιάστηκε.	29
Σχήμα 2.8. Σύγκριση διαγραμμάτων των κοκκομετρικών καμπυλών του νέου φίλτρου που σχεδιάστηκε με το υπάρχον φίλτρο του φράγματος.	29
Σχήμα 2.9. Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες φίλτρου ζώνης 2 όπως προτείνονται από τον καθηγητή Ν.Ι. Μουτάφη.	30
Σχήμα 2.10. Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών του φίλτρου του φράγματος με τις προτεινόμενες από τον Ν.Ι. Μουτάφη καμπύλες φίλτρου.	31
Σχήμα 2.11. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 3) φράγματος Σμοκόβου	32

Σχήμα 2.12. Διορθωμένη κοκκομετρική καμπύλη φίλτρου ζώνης 2, η οποία λαμβάνεται ως καμπύλη υλικού βάσης για τον σχεδιασμό του φίλτρου ζώνης 3.	34
Σχήμα 2.13. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου ζώνης 3 όπως εκ νέου σχεδιάστηκε.	35
Σχήμα 2.14. Σύγκριση των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης του φίλτρου ζώνης 3 του φράγματος με το φίλτρο που εκ νέου σχεδιάστηκε.	36
Σχήμα 2.15. Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες φίλτρου ζώνης 3 (2B) όπως προτείνονται από τον καθηγητή Ν.Ι. Μουτάφη.	37
Σχήμα 2.16. Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών του φίλτρου του φράγματος με τις προτεινόμενες από τον Ν.Ι. Μουτάφη καμπύλες φίλτρου	37
Σχήμα 2.17. Διάγραμμα μετρήσεων διηθήσεων στον πόδα του φράγματος σε συσχέτιση με τη βροχόπτωση.	41
Σχήμα 2.18. Εκόνα από τη διάταξη μέτρηση διαρροών στον πόδα του φράγματος στην τωρινή της κατάσταση.	42
Σχήμα 2.19. Διατομή Α-Α του φράγματος η οποία χρησιμοποιείται στους ελέγχους ευστάθειας	50
Σχήμα 2.20. Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και λοιπές επιφάνειες	50
Σχήμα 2.21. Οι κρισιμότερες επιφάνειες αστοχίας με τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας.	51
Σχήμα 2.22. Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας	51
Σχήμα 2.23. Πιέσεις πόρων κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας. Στο πάνω διάγραμμα φαίνονται οι μεταβολές τους κατά το καταβιβασμό της στάθμης και στο κάτω οι αρχικές πιέσεις πόρων.....	52
Σχήμα 2.24. Αρχικές πιέσεις πόρων κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας....	52
Σχήμα 2.25. Συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν για συνθήκες λειτουργίας πλήρους ταμιευτήρα.	53
Σχήμα 2.26. Κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας και οι αντίστοιχοι συντελεστές για συνθήκες πλήρους ταμιευτήρα	53
Σχήμα 2.27. 27 Γεωμετρία διατομής Α-Α η οποία χρησιμοποιήθηκε για τους ελέγχους ευστάθειας του κατάντη πρανούς.	54
Σχήμα 2.28. Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας για το κατάντη πρανές για συνθήκες πλήρους ταμιευτήρα	55
Σχήμα 2.29. Όλες οι επιφάνειες ολίσθησης και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας του κατάντη πρανούς για συνθήκες πλήρους ταμιευτήρα	55
Σχήμα 2.30. Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας υπό σεισμικό φορτίο για το ανάντη πρανές	56
Σχήμα 2.31. Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας για το κατάντη πρανές υπό σεισμικό φορτίο	57
Σχήμα 2.32. Επιφάνειες αστοχίας για το κατάντη πρανές υπό σεισμικό φορτίο	57

Κεφάλαιο 3ο «Ενόργανη Παρακολούθηση (Monitoring) και επιτήρηση φραγμάτων στα πλαίσια εξασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας του.» Σελ.

Σχήμα 3.1. Διάταξη μέτρησης διαρροών	65
Σχήμα 3.2. Λεπτομέρειες βάθρων μέτρησης επιφανειακών μετακινήσεων	66
Σχήμα 3.3. Λεπτομέρεια φρέατος παρατήρησης υπογείου ύδατος	67
Σχήμα 3.4. Λεπτομέρεια διάταξης ηλεκτρικού πιεσομετρικού κυττάτρου δονούμενης χορδής	68
Σχήμα 3.5. Λεπτομέρεια οργάνων μέτρησης οριζόντιας μετακίνησης	69
Σχήμα 3.6. Λεπτομέρεια κλισιομέτρου	70
Σχήμα 3.7... Λεπτομέρεια μηκυνσιομέτρου με πολλαπλές ράβδους	71

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 2° «Αξιολόγηση Μεγάλων Φραγμάτων-Εφαρμογή στο Φράγμα Σμοκόβου» Σελ.

Πίνακας 2.1. Τυπικές Ζώνες Χωμάτινων Φραγμάτων	17
Πίνακας 2.2. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 2) φράγματος Σμοκόβου.	24
Πίνακας 2.3. Κατηγορίες εδάφους «βάσης» για τον σχεδιασμό των φίλτρων	27
Πίνακας 2.4. Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος κόκκου D15 για κάθε κατηγορία εδάφους βάσης	27
Πίνακας 2.5. Κριτήριο διαχωρισμού- Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος D90 για την αποφυγή διαχωρισμού	28
Πίνακας 2.6. Πίνακας κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου Ζώνης 2 (2A) όπως εκ νέου υπολογίστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα της διεθνούς βιβλιογραφίας	36
Πίνακας 2.7. 7 Πίνακας ορίων κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 3) φράγματος Σμοκόβου.	
Πίνακας 2.8. Πίνακας κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου Ζώνης 3 (2B) όπως εκ νέου υπολογίστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα της διεθνούς βιβλιογραφίας	
Πίνακας 2.9. Σύγκριση μεθόδων Οριακής Ισορροπίας για την ευστάθεια πρανών..43	
Πίνακας 2.10. Αποδεκτές τιμές συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες καταστάσεις ελέγχου της ευστάθειας των πρανών φράγματος.	10
Πίνακας 2.11. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών του φράγματος που χρησιμοποιούνται κατά τις αναλύσεις.	49

Κεφάλαιο 3ο «Ενόργανη Παρακολούθηση (Monitoring) και επιτήρηση φραγμάτων στα πλαίσια εξασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας του.» Σελ.

Πίνακας 3.1. Κατηγοριοποίηση των φραγμάτων του Ελληνικού χώρου σύμφωνα με την ΕΕΜΦ	61
--	----

- Πίνακας 3.2. Συχνότητα επιθεωρήσεων για όλες τις κατηγορίες φραγμάτων63
- Πίνακας 3.3. Διάταξη των οργάνων μέτρησης του φράγματος Σμοκόβου
- Πίνακας 3.4. Θέσεις των ηλεκτρικών πιεσομετρικών κυττάρων και των οργάνων μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετατόπισης.

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγικά στοιχεία για τα Φράγματα

1.1 Ιστορία των Φραγμάτων

Οι πρώτες κατασκευές φραγμάτων εμφανίζονται τα αρχαία ακόμα χρόνια στην Μεσοποταμία και την Μέση Ανατολή, όπου μικρά φράγματα κατασκευάστηκαν για την ανάσχεση πλημμυρών των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη.

Παρόμοιας χρήσης φράγματα συναντώνται στην Ιορδανία, την Αίγυπτο και την Κίνα, ενώ από τον 3^ο αιώνα π.Χ. στην Ινδία, εμφανίζεται το πρώτο σύστημα φραγμάτων και ταμιευτήρων (16 ταμιευτήρες που συνδέονται με κανάλια μεταξύ τους) για την αποθήκευση και χρήση νερού.

Η Ελλάδα παρουσίασε το πρώτο της φράγμα στα παράλια της δυτικής Αιτωλοακαρνανίας, στην **αρχαία Αλυζία**. Το φράγμα χρονολογείται από τον 1ο π.Χ. αιώνα και δίνει μαθήματα σταθερής κατασκευής εφόσον διατηρείται ως επισκέψιμο μνημείο έως σήμερα. Κατασκευάστηκε για τη συγκράτηση αδρομερών φερτών υλικών που εισέρχονταν στην κοιλάδα του Μύτικα. Πρόκειται για μία κατασκευή από ορθογωνικούς ογκόλιθους χωρίς υλικό πλήρωσης των αρμών, με μήκος στέψης 30m και ανώτατο ύψος από τη στάθμη θεμελίωσης 11m.

Άξιο λόγου και αναφοράς είναι το φράγμα Kallanai, κατασκευασμένο από ακατέργαστους ογκόλιθους στον ποταμό Kaneri στη Νότια Ινδία, 300 μέτρων σε μήκος 4,5 μέτρων ύψος και 20 μέτρα πλάτος, το οποίο χρονολογείται στον 2^ο αιώνα μ.Χ. και είναι η αρχαιότερη κατασκευή που χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Στην εξέλιξη της τεχνοτροπίας συνέβαλλαν οι Ρωμαίοι, οι οποίοι εισάγοντας το σκυρόδεμα σαν υλικό κατασκευής φραγμάτων επέτρεψαν την ανέγερση μεγαλύτερων κατασκευών. Προχώρησαν επίσης στην κατασκευή τοξοτών φραγμάτων.

Τη σκυτάλη παίρνει το Ιράν όπου χρησιμοποιούνται φράγματα για ύδρευση και για παραγωγή μηχανικής-κινητικής ενέργειας (υδρόμυλοι).

Στον Μεσαίωνα καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των φραγμάτων παίζει η Ολλανδία.

Ωστόσο λόγω της έλλειψης τεχνογνωσίας και κατάλληλων υλικών η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων ξεκίνησε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα με ένα φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα το Aswan Low Dam στην Αίγυπτο το 1902 και ακολούθησε το Hoover Dam στις ΗΠΑ, στον ποταμό Colorado, το μεγαλύτερο τοξωτό φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα μέχρι τότε.

1.2 Ορισμοί

Φράγματα: Τεχνικά έργα, που κατασκευάζονται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος ή ποταμού για την αποκοπή της ροής, με σκοπό τη δημιουργία ταμιευτήρα στην ανάντη πλευρά του. Στόχοι κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να είναι η άρδευση, η ύδρευση οικισμών, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και η αναχαίτιση πλημμυρών. Πρόσφατα, έχει ξεκινήσει η κατασκευή φραγμάτων με σκοπό την συγκράτηση στερεών υλικών που αποτελούν προϊόντα λατομείου.

Η επιλογή κατασκευής ενός φράγματος αποτελεί αντικείμενο μελέτης και γίνεται βάσει των αναγκών και των προοπτικών ανάπτυξης της περιοχής κατασκευής. Μετά από μία σειρά μελετών, επιλέγεται ο τύπος και η διάταξη του έργου λαμβάνοντας υπόψη τις τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου, τις υδρολογικές συνθήκες και τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει η ICOLD, η διεθνής επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, μεγάλο χαρακτηρίζεται το φράγμα με ύψος μεγαλύτερο των 15m ή με ύψος από 5 έως 15 μέτρα με τις εξής προϋποθέσεις:

- Μήκος στέψης τουλάχιστον 500m.
- Όγκο ταμιευτήρα τουλάχιστον $1 \times 10^6 \text{m}^3$
- Υπερχειριστή ικανότητας πάνω από $2000 \text{m}^2/\text{s}$

Από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα έχουν γίνει σημαντικά βήματα στην εξέλιξη των φραγμάτων, στα οποία συνηγορούν η βελτιστοποίηση των υλικών, της τεχνοτροπίας και τεχνολογίας και της επιστημονικής γνώσης.

1.3 Τύποι Φραγμάτων

Τα φράγματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το κύριο υλικό κατασκευής τους:

- Φράγματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπτα)
- Φράγματα από γεωλικά (εύκαμπτα)

Βασικά στοιχεία για την επιλογή του τύπου του φράγματος είναι:

- ✓ Η μορφολογία της κοιλάδας
- ✓ Η γεωλογία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της περιοχής κατασκευής
- ✓ Η διαθεσιμότητα κατάλληλων υλικών
- ✓ Η διάταξη των επιμέρους κατασκευών του έργου
- ✓ Και τέλος οι περιορισμοί της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

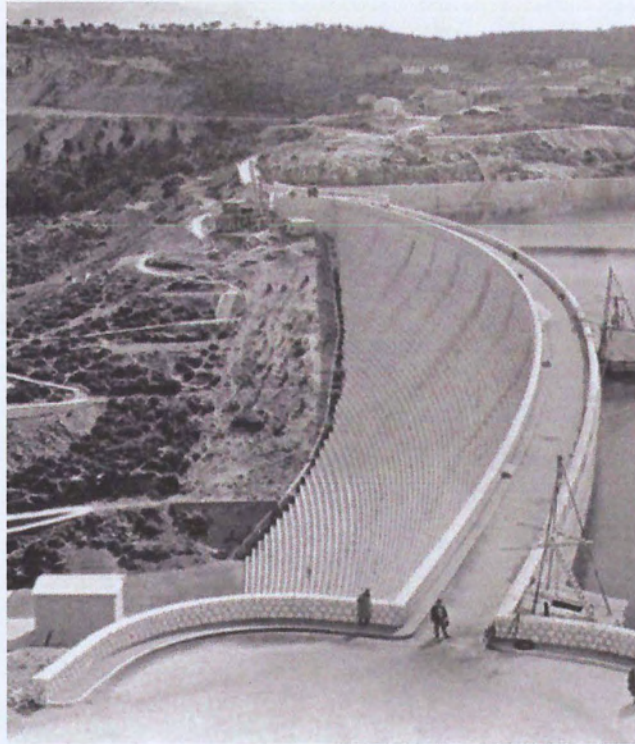
1.3.1 Φράγματα Σκυροδέματος

Στις κατασκευές από σκυρόδεμα ανήκουν τα φράγματα:

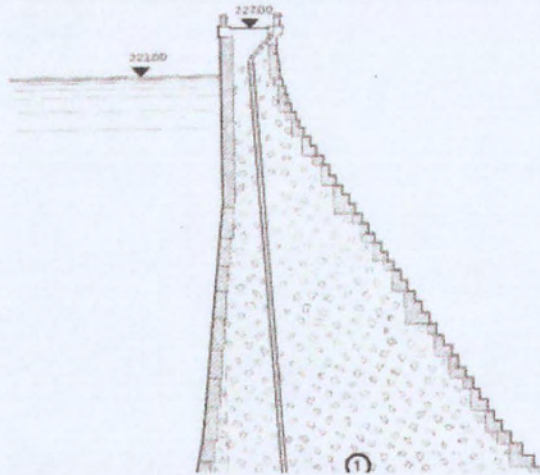
- Βαρύτητας (gravity)
 - Συμβατικού σκυροδέματος
 - Κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC)
 - Ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (lean RCC)
 - Κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (hardfill)

Τα φράγματα βαρύτητας αντιμετωπίζουν τις φορτίσεις λόγω του ιδίου βάρους τους και τα φορτία από την υδροστατική πίεση. Είναι κατασκευές εξασφαλισμένες από ολίσθηση και ανατροπή ενώ δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο υλικό κατασκευής. Ωστόσο πρόκειται για πολύ ογκώδεις και πολυέξοδες κατασκευές και η επιλογή τέτοιου τύπου φράγματος προϋποθέτει πολύ ισχυρό υπόβαθρο θεμελίωσης και μικρό άνοιγμα κοιλάδας. Κατασκευάζονται σε περιοχές με βραχώδες υπόβαθρο και αντοχή εδάφους από 800 έως 1100 KPa.

Τα φράγματα από σκυρόδεμα, RCC και ισχνό RCC σχεδιάζονται με κατακόρυφη ή παρακατακόρυφη την ανάντη παρειά, ενώ τα φράγματα σκληρού επιχώματος σχεδιάζονται με συμμετρικές παρειές.



Σχήμα 1.1 Φράγμα Μαραθώνα (Πηγή: <http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/Fragm.pdf>.)



Σχήμα 1.2 Τυπική διατομή φράγματος Μαραθώνα
(Πηγή: <http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/Fragm.pdf>.)

- Αντηριδωτά (buttress)
 - Με αντηρήδες συμβατικού σκυροδέματος
 - Με αντηρήδες λεπτών στοιχείων
 - Πολλαπλών τόξων

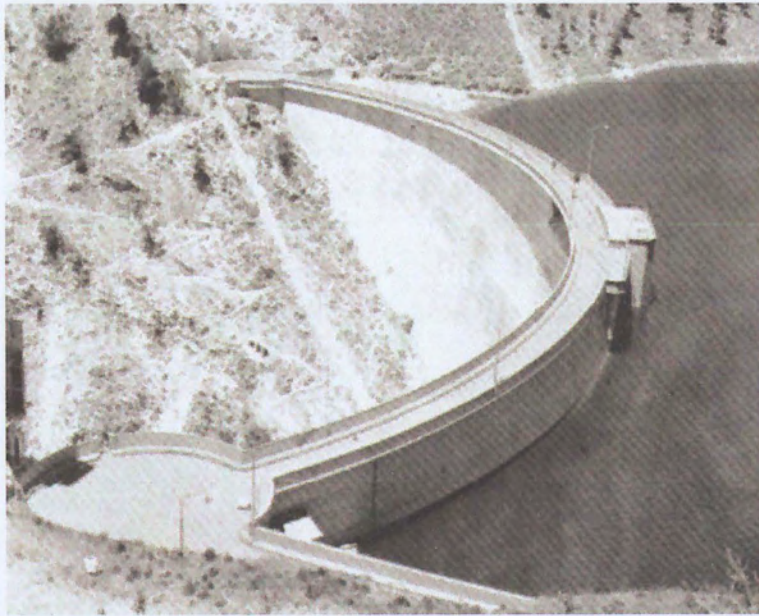


Σχήμα 1.3 Αντιρηδωτό φράγμα Λάδωνα-Πελοπόννησος
(Πηγή:<http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/Fragm.pdf>.)

Η λειτουργία των αντιρηδωτών φραγμάτων είναι παρόμοια με τα φράγματα βαρύτητας, χρησιμοποιούν δηλαδή το βάρος τους για να φέρουν τα φορτία του νερού που συγκρατούν και για την αντιμετώπιση της ολίσθησης και ανατροπής τους. Η διαφορά τους με τα φράγματα βαρύτητας έγκειται στο ότι μειώνεται ο όγκος του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος. Η γεφύρωση μεταξύ των αντιρηδών γίνεται με επίπεδα ή καμπύλα στοιχεία.

- Τοξωτά (arch)
 - Μονής καμπυλότητας
 - Διπλής καμπυλότητας
 - Κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Αυτού του τύπου τα φράγματα μεταφέρουν τα φορτία στα αντερείσματα λόγω του καμπύλου σχήματός τους. Διακρίνονται σε τρεις τύπους: στα τοξωτά φράγματα σταθερής ακτίνας, τα τοξωτά φράγματα σταθερής γωνίας και τα τοξωτά διπλής καμπυλότητας. Η κατασκευή τους προϋποθέτει στενή κοιλάδα θεμελίωσης τύπου V, ώστε να είναι οικονομικά εφικτή η προσαρμογή των τόξων του φράγματος στα πρανή της κοιλάδας. Επιπλέον απαιτείται τα πετρώματα στη θεμελίωση του φράγματος να είναι υψηλής αντοχής ώστε να μπορούν να παραλάβουν με μικρές μόνο μετακινήσεις τα συγκεντρωμένα φορτία από τον φορέα του φράγματος.



Σχήμα 1.4 Το τοξωτό φράγμα του Ταυρωπού (Πηγή:<http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/Fragm.pdf>.)

1.3.2 Γεωφράγματα

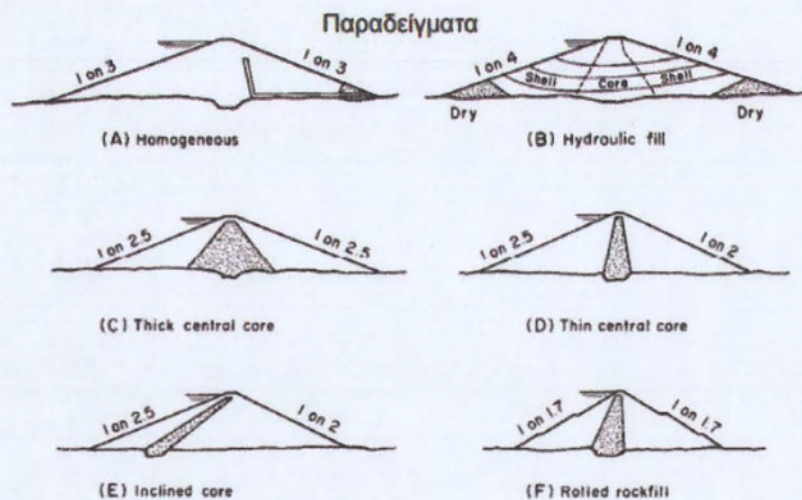
Η ταξινόμηση των γεωφραγμάτων γίνεται με βάση:

- ❖ Το υλικό κατασκευής
 - Χωμάτινα: εδαφικά υλικά, αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα
 - Λιθόρριπτα: Προϊόντα εκσκαφής λατομείου, προϊόντα εκσκαφών βράχου.
- ❖ Τη διαζώνησή τους
 - Ομοιογενή: Ονομάζονται τα γεωφράγματα που κατασκευάζονται από ένα μόνο υλικό, εδαφικής σύστασης και χαμηλής διαπερατότητας. Λόγω του κινδύνου σταδιακής διάπλυσης του υλικού, τα ομοιογενή φράγματα είναι κατασκευές περιορισμένου χρόνου λειτουργίας και μικρού ύψους.
 - Διαζωνισμένα φράγματα: Σχεδιάζονται με χρήση πολλών υλικών κατά θέσεις (ζώνες) του αναχώματος, ώστε κάθε ζώνη να εκπληρώνει ένα σκοπό. Έτσι επιτυγχάνεται η βέλτιστη αξιοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών ενώ ταυτόχρονα καλύπτονται τα μειονεκτήματά τους.

Τυπικές ζώνες διαζωνισμένου φράγματος:

- Ζώνη 1: Πυρήνας
- Ζώνη 2: Φίλτρο
- Ζώνη 3: Στραγγιστήριο
- Ζώνη 4: Κελύφη-Σώματα στήριξης (λιθορριπή)
- Ζώνη 5: Λιθορριπή κυματοπροστασίας ανάντη πρανούς (Rip-Rap)

- ❖ Το στεγανοποιητικό τους στοιχείο
 - Πυρήνας από υλικά χαμηλής διαπερατότητας
 - Ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD)
 - Κεντρικό ασφαλτικό διάφραγμα
- ❖ Τη χρήση τους
 - Εκταμίευσης νερού (ιδιότητα του φράγματος η στεγανότητα)
 - Αντιπλημμυρικά (ιδιότητα του φράγματος η διαπερατότητα)



Σχήμα 1.5 Παραδείγματα τυπικών διατομών γεωφραγμάτων
(Πηγή: <http://users.civil.ntua.gr/kavvadas/Spec-Topics/PDFs/dams-1.pdf>)

Κριτήριο επιλογής για την κατασκευή γεωφράγματος ή όχι, είναι η ύπαρξη ή μη, αξιοποιήσιμου υλικού στην κοιλάδα κατασκευής. Βασικός στόχος σχεδιασμού είναι να αξιοποιηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο να υλικά στην ευρύτερη περιοχή και πλησίον του έργου. Τα χωμάτινα φράγματα είναι εύκαμπτες και ελαφριές κατασκευές, πράγμα που τις καθιστά ανεκτικές σε καθιζήσεις, αρκετά οικονομικές σε σχέση με τα φράγματα σκυροδέματος και δεν έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε έδαφος θεμελίωσης λόγω του μεγάλου εύρους της βάσης τους. Το ύψος τους κυμαίνεται από 10m έως και 300m (Nurek Dam) και προτιμάται η κατασκευή τους σε κοιλάδες μεγάλου εύρους.

1.4 Οφέλη από τις κατασκευές φραγμάτων

Τα πολλαπλά οφέλη των φραγμάτων σε οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο τα κατατάσσουν αναμφίβολα ανάμεσα στα σημαντικότερα έργα υψηλού ενδιαφέροντος.

Η σημαντικότερη ίσως χρήση τους, αφορά στη διαχείριση και συλλογή των επιφανειακών υδάτων. Δεδομένου ότι οι ανάγκες σε ύδρευση και άρδευση

συνεχώς αυξάνονται ενώ ο όγκος του διαθέσιμου νερού παραμένει σταθερός, δημιουργείται η απαίτηση ορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού, προστασίας και επανατροφοδότησης των υπόγειων υδροφορέων. Με την κατασκευή φραγμάτων και τη δημιουργία ταμιευτήρων δίνεται η δυνατότητα συλλογής και αποθήκευσης του νερού κατά την περίοδο των βροχών για την αξιοποίησή του την περίοδο ξηρασίας. Έτσι εξασφαλίζεται το απαιτούμενο πόσιμο νερό σε περιοχές με σημαντικά προβλήματα λειψυδρίας, όπως για παράδειγμα τα νησιά, παρέχεται η δυνατότητα ύδρευσης αστικών περιοχών με αυξημένες ανάγκες, όπως η Αθήνα της οποίας το δίκτυο τροφοδοτείται από το φράγμα του Μαραθώνα, καλύπτονται οι ανάγκες της βιομηχανίας και της άρδευσης καλλιεργήσιμων εκτάσεων με αποτέλεσμα την άνθηση της βιομηχανικής και αγροτικής ανάπτυξης.

Εξίσου σημαντική είναι η συμβολή των φραγμάτων και των ταμιευτήρων στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες τη σήμερον ημέρα αυξάνουν συνεχώς ενώ παράλληλα τίθεται το ζήτημα προστασίας του περιβάλλοντος καθώς οι παραδοσιακοί τρόποι παραγωγής ενέργειας (εξόρυξη λιγνίτη-πετρέλαιο) κρίνονται αρκετά επιβλαβείς για το περιβάλλον. Σημειώνεται έτσι στροφή των εταιρειών παραγωγής ενέργειας προς εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Έτσι και η ελληνική εταιρεία ΔΕΗ Α.Ε σε συνεργασία με το ΥΠΕΧΩΔΕ έχει κατασκευάσει Υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποσκοπώντας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών περιοχών της χώρας. Το έργο του Σμοκόβου προτάθηκε και μελετήθηκε αρχικά από την ELECTROWATT Α.Ε. Την μελέτη του έργου ανέλαβε αργότερα η ΔΕΗ Α.Ε και την κατασκευή του το ΥΠΕΧΩΔΕ με τη βοήθεια τεχνικών συμβούλων.

Η προσφορά όμως των φραγμάτων δεν περιορίζεται μόνο σε αυτά. Η κατασκευή φραγμάτων εξασφαλίζει τον έλεγχο της ροής ποταμών προστατεύοντας με αυτόν τον τρόπο τις κατάντη περιοχές του φράγματος από πλημμύρες. Τέλος ευνοείται η ανάπτυξη τουριστικών ή άλλων δραστηριοτήτων όπως αλιεία, αναψυχή, ναυταθλητισμός κλπ.

1.5 Ασφάλεια φραγμάτων

Τα φράγματα ωστόσο αποτελούν πολύπλοκες κατασκευές, των οποίων ο σχεδιασμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες. Πρόκειται για μεγάλα έργα στον οποίων την κατασκευή συνεισφέρουν πολλές ειδικότητες. Ο πολυπαραμετρικός χαρακτήρας των φραγμάτων καθιστά τον σχεδιασμό τους εξαιρετικά απαιτητικό και πολύπλοκο.

Όπως όλες οι κατασκευές έτσι και τα φράγματα αστοχούν. Τα καταγεγραμμένα περιστατικά αστοχιών σε σύγκριση με τα κατασκευασμένα εν χρήσει φράγματα, είναι πολύ λίγα αλλά όχι μηδενικά. Παρά τη μικρή πιθανότητα εμφάνισης, οι

συνέπειες που έπονται της αστοχίας ενός τόσο μεγάλου έργου είναι ανυπολόγιστες και συχνά εμπεριέχουν και την απώλεια ανθρώπινου δυναμικού.

1.5.1 Ιστορικές αστοχίες φραγμάτων

Κάποια από τα πιο γνωστά τραγικά περιστατικά αστοχιών που έχουν συμβεί παρατίθενται στη συνέχεια.

- **Αστοχία Φράγματος Saint Francis (ΗΠΑ, Καλιφόρνια)**

Πρόκειται για ένα φράγμα βαρύτητας στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ύψους 60m. Η κατασκευή του φράγματος έγινε χωρίς να γίνει προγενέστερη γεωλογική μελέτη. Το δεξί αντέρεισμα αποτελείτο από κροπαλοπαγές ενώ στον υπόλοιπο χώρο θεμελίωσης κυριαρχούσε ο μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος. Η επαφή των δύο πετρωμάτων γινόταν μέσω ρήγματος 2m πληρωμένου με άργιλο και γύψο. Η αστοχία επήλθε κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα και όταν το νερό έφτανε στο όριο της ανώτατης στάθμης, και οφείλεται στην διάλυση του υλικού πλήρωσης του ρήγματος. Πέραν των υλικών ζημιών η αστοχία του έργου στοίχησε τη ζωή σε 500 άτομα.



Σχήμα 1.6 Φράγμα Saint Francis, εικόνα μετά την αστοχία του φράγματος (Πηγή: <http://www.expericela.com/Calendar/eventmore.asp?key=16595>)

- **Φράγμα Malpasset (Γαλλία)**

Το τοξωτό αυτό φράγμα κατασκευάστηκε στη Ν.Α Γαλλία επί υγιούς και μετρίως ρηγματωμένου γνεύσιου. Οι έντονες βροχοπτώσεις οδήγησαν στον εγκλωβισμό νερού στις ρωγμές του γνεύσιου, όπου σε συνδυασμό με την απουσία αποστραγγιστικών έργων κάτω από το φράγμα οδήγησαν στην δημιουργία δίδερου επί του οποίου ασκούσαν υδροστατικές πιέσεις. Κατά την

πλήρωση του φράγματος το δίδρο, πάνω στο οποίο είχε θεμελιωθεί και το φράγμα εκτινάχθηκε.



Σχήμα 1.7 Φράγμα Malpasset (Πηγή:
[http://www.webpages.uidaho.edu/~simkat/geol345_files/malpasset front.jpg](http://www.webpages.uidaho.edu/~simkat/geol345_files/malpasset_front.jpg))

- **Φράγμα Vaiont (Ελβετία)**

Η συγκεκριμένη αστοχία δεν αφορά το ίδιο το έργο. Κατά την λειτουργία του φράγματος μια τεράστια ασβεστολιθική μάζα από το αριστερό πρανές κατέπεσε στον ταμιευτήρα δημιουργώντας κύμα το οποίο υπερπήδησε το φράγμα και κατέστρεψε ολοσχερώς την πόλη Longarone που βρισκόταν κατάντη του φράγματος με 2100 θύματα.

- **Φράγμα Περδίκια (Ελλάδα, Πτολεμαΐδα)**

Το φράγμα Περδίκια βρίσκεται κοντά στην Πτολεμαΐδα και ο ταμιευτήρας του είναι κατασκευασμένα επί αργιλομαργαϊκών και ψαμμιτικών πετρωμάτων, με εξαίρεση ορισμένες θέσεις στον ταμιευτήρα που εμφανίζονται καρστικοί ασβεστόλιθοι με χαμηλή υψομετρική στάθμη. Με την πλήρωση του ταμιευτήρα, το νερό ξέπλενε το υλικό πλήρωσης των καρστικών κενών, με αποτέλεσμα τα τελευταία να λειτουργήσουν ως σημεία κατεΐσδυσης του νερού και να αδειάσει εν τέλει η λίμνη.

- **Φράγμα Teton (ΗΠΑ, Idaho)**

Πρόκειται για χωμάτινο φράγμα του οποίου η κατασκευή αποσκοπούσε στην ύδρευση της ευρύτερης περιοχής και για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το ανάχωμα του φράγματος κατασκευάστηκε από υλικά που θεωρούνται μη-αποδεκτά για την κατασκευή φραγμάτων λόγω της υψηλής διαπερατότητας που εμφανίζουν. Η θεμελίωση του έγινε επί βασαλτικών εδαφών, τα οποία επίσης εμφανίζουν υψηλή διαπερατότητα. Μετά από δύο χρόνια λειτουργίας του έργου, εμφανίστηκαν διαρροές τόσο στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος όσο και σε απόσταση 230m. Τελικά το φράγμα κατέρρευσε λόγω διάβρωσης του εδάφους θεμελίωσης και του αναχώματος με αποτέλεσμα 11 άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους.



Σχήμα 1.8 Φράγμα Teton (Πηγή:
http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/welcome_dam.html)

Δυστυχώς, τα παραπάνω περιστατικά δεν αποτελούν και τα μόνα παραδείγματα αστοχιών. Από καταγραφές που έχουν γίνει παρατηρούμε ότι οι μηχανισμοί αστοχίας φραγμάτων είναι πολύπλοκοι. Αδυναμίες σχεδιασμού, περιορισμένοι κανονισμοί, ατέλειες κατασκευής, ανεπαρκής ποιοτικός έλεγχος, κακή λειτουργία, ελλιπής ή ανύπαρκτη συντήρηση συντελούν ενεργά ή παθητικά στην ανάπτυξη συνθηκών που βαθμηδόν οδηγούν στην αστοχία των κατασκευών.

1.5.2 Μηχανισμοί Αστοχίας Φραγμάτων και συχνότητα εμφάνισης

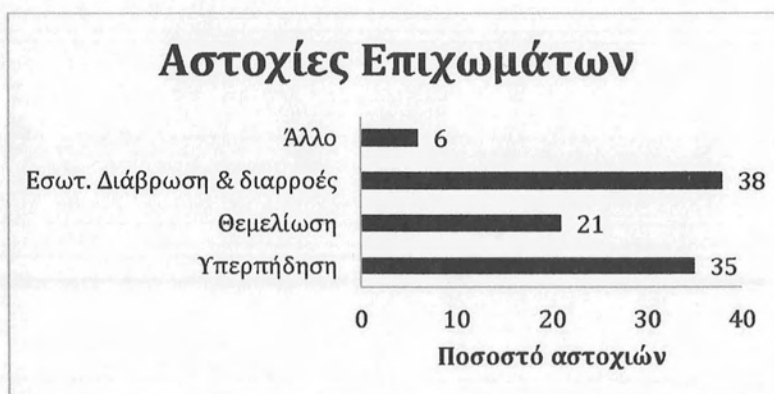
Μια προσπάθεια καταγραφής που έγινε από το τη διεθνή επιτροπή μεγάλων φραγμάτων ICOLD (Bulletin B99) αναλύει με τη βοήθεια της στατιστικής τους συχνότερους μηχανισμούς αστοχίας φραγμάτων. Διενεργήθηκε εκτεταμένη έρευνα επί 14,700 φραγμάτων, εκ των οποίων, όπως προέκυψε, το 7.5% παρουσίασαν προβλήματα κατά τη λειτουργία τους και το 0.7% κατέρρευσαν.

Σύμφωνα με την ICOLD, η αστοχία ορίζεται ως «Κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της θεμελίωσής του, τέτοια ώστε το φράγμα να μην μπορεί να συγκρατήσει νερό».

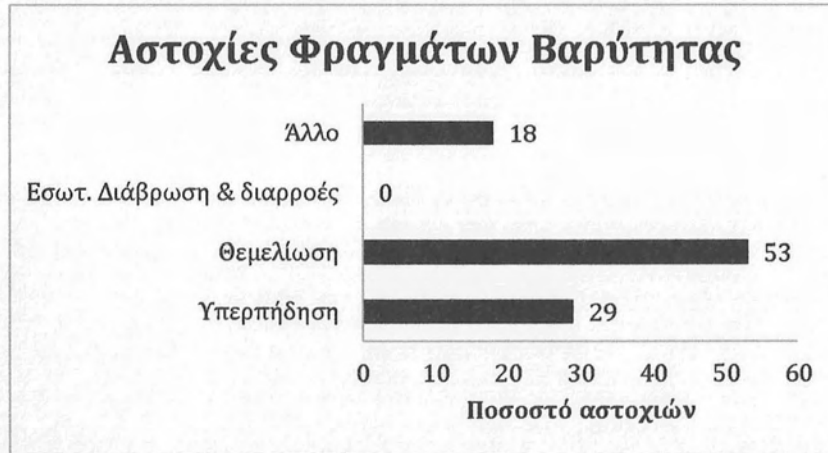
Όπως φαίνεται, φράγματα από σκυρόδεμα αστοχούν λόγω υποχώρησης της θεμελίωσης, εσωτερικής διάβρωσης του σώματος του φράγματος και ανεπαρκούς διατμητικής αντοχής των πρανών θεμελίωσης.

Τα δε χωμάτινα φράγματα αστόχησαν στην πλειοψηφία τους από υπερπήδηση, εσωτερική διάβρωση του σώματος του φράγματος και της θεμελίωσης και διασωλήνωση.

Επίσης υποδεικνύεται ότι η κρισιμότερη περίοδος όπου υπάρχει η μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών είναι κατά την κατάκλυση του ταμιευτήρα και την πρώτη πλήρωση, και μέχρι και 10 χρόνια συνεχούς λειτουργίας. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις αστοχιών που συνέβησαν μετά από μακροχρόνια λειτουργία του φράγματος και ενώ δεν είχαν παρατηρηθεί προβλήματα. Αυτό είναι λογικό όταν πρόκειται για χωμάτινα φράγματα, καθώς σε περιπτώσεις που ο πυρήνας εμφανίζει πολύ χαμηλή διαπερατότητα η αποκατάσταση δικτύου ροής διαμέσου του πυρήνα μπορεί να χρειαστεί και είκοσι έως τριάντα χρόνια. Ότι προβλήματα, λοιπόν, μπορεί να δημιουργηθούν στο φράγμα λόγω ύπαρξης ροής θα εμφανιστούν πολύ αργότερα από την πρώτη δεκαετία λειτουργίας.



Σχήμα 1.9 Συχνότεροι μηχανισμοί αστοχίας σε χωμάτινα φράγματα



Σχήμα 1.10 Συχνότεροι μηχανισμοί αστοχίας φραγμάτων σκυροδέματος

Σε σχέση με το σκυρόδεμα, το έδαφος ως υλικό κατασκευής φραγμάτων είναι πιο δύσκολο εξαιτίας πολλών παραγόντων όπως ανομοιογένεια και ανισοτροπία, μη-τυποποιημένη σύσταση και μη-τυποποιημένα χαρακτηριστικά, η συμπεριφορά του επηρεάζεται από τον τρόπο και τύπο της φόρτισης στο πεδίο πράγμα που δεν το γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια. Η συμπεριφορά του εδάφους υπό φόρτιση είναι γενικότερα μη-γραμμική, εξαρτάται από τον τρόπο και χρόνο φόρτισης (π.χ. φαινόμενο στερεοποίησης σε αργιλικά εδάφη) και χάνουν μέρος της αντοχής τους με την αύξηση της παραμόρφωσης.

Λόγω των ιδιαιτεροτήτων του εδάφους ως υλικό κατασκευής και για την αποφυγή αστοχιών κρίνεται σημαντικός ο ορθός και προσεκτικός σχεδιασμός των φραγμάτων καθώς και η παρακολούθησή τους (Monitoring) μέσω δικτύου οργάνων τα οποία εγκαθίστανται στο φράγμα κατά την κατασκευή του.

Στα πλαίσια της επιταγής για παρακολούθηση των φραγμάτων κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους εκπονείται και η παρούσα διπλωματική εργασία η οποία επικεντρώνεται στο φράγμα Σμοκόβου.

Κεφάλαιο 2^ο Αξιολόγηση Φράγματος Σμοκόβου

Η αξιολόγηση ενός υφιστάμενου φράγματος έγκειται στον έλεγχο των υλικών κατασκευής και της συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά κατασκευής του φράγματος Σμοκόβου καθώς και οι προδιαγραφές τις οποίες καλούνται να πληρούν. Επιπλέον, η συμπεριφορά του φράγματος αξιολογείται μέσω ελέγχων ευστάθειας των πρανών υπό στατικές συνθήκες και σεισμικά φορτία. Τέλος γίνεται αναφορά στις παραμορφώσεις του φράγματος, όπως αυτές ελέγχθηκαν και αξιολογήθηκαν από τον Γ. Ντουνιά, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα συλλογής επαρκών στοιχείων για την περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγησή τους.

2.1 Λίγα λόγια για το Φράγμα

ΦΡΑΓΜΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ



39° 8'49.48"N
22° 3'45.94"E

Νομός: **Καρδίτσα**
Prefecture: **Karditsa**

Ποταμός: **Σοφαδίτης**
River: **Sofaditis**

Σχήμα 2.1 Φράγμα Σμοκόβου (Πηγή: http://www.eeft.gr/Fragmata_Elladas_201311.pdf)

Το φράγμα Σμοκόβου είναι λιθόρριπτο με ελαφρώς κεκλιμένο αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα, το μέγιστο ύψος από τη στάθμη θεμελίωσης είναι 104m, μήκος στέψης 456m πλάτος 11m και όγκο $3,6 \times 10^6 \text{m}^3$.

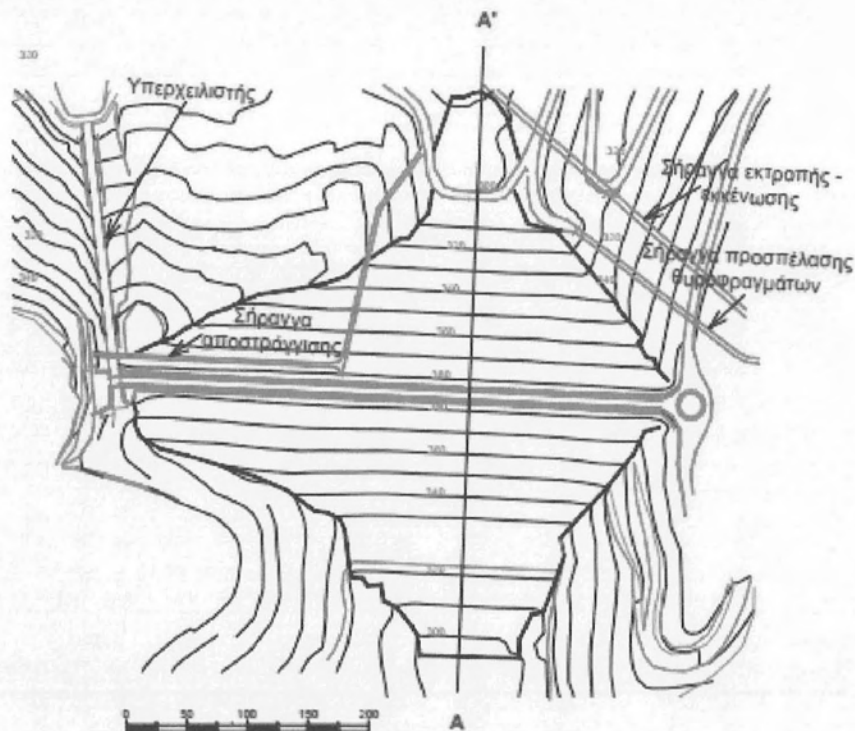
Δημιουργεί ταμιευτήρα ωφέλιμου όγκου $200 \cdot 10^6 \text{m}^3$, εκ των οποίων τα $137 \cdot 10^6 \text{m}^3$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ετησίως για άρδευση. Η επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι 10,000 στρέμματα.

Έχει κατασκευαστεί στην περιοχή των κοινοτήτων Λουτροπηγής και Κτιμένης του νομού Καρδίτσας, στη συμβολή των παραποτάμων του Ονόχωνου (Σοφαδίτη), Πενδάμη και Παπούσα, με σκοπό την άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

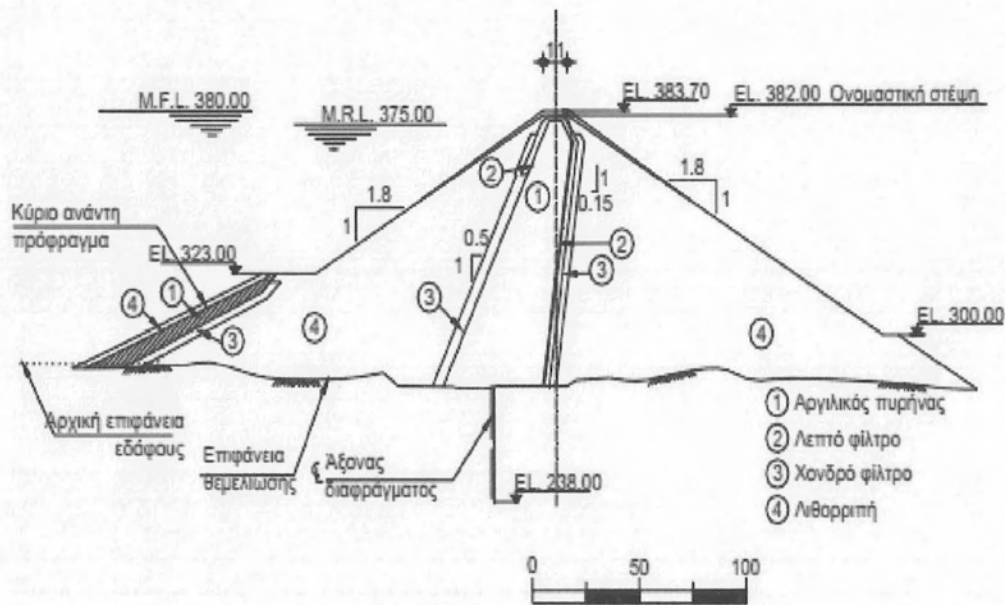
Δημοπρατήθηκε το Δ' τρίμηνο του 1984 και αποπερατώθηκε το 1996 από την ανάδοχη κοινοπραξία «ΤΕΓΚ Α.Ε.- ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.-Κ.Ι. ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε.», ενώ η κατάκλυση του ταμιευτήρα ξεκίνησε 6 χρόνια μετά τον Ιούλιο του 2002 για να ολοκληρωθεί τον Οκτώβριο του 2004.

Το φράγμα είναι κατασκευασμένο επί οφιολίθων (περιδοτίτες) και αποτελείται από 4 κύριες ζώνες. Ζώνη 1 (πυρήνας) κατασκευάστηκε από αργιλοαμμώδεις αλουβιακές αποθέσεις μέσης έως χαμηλής πλαστιμότητας της λεκάνης κατάκλυσης. Οι Ζώνες 2 & 3, το λεπτό και χονδρό φίλτρο αντίστοιχα, κατασκευάστηκαν με κοσκίνισμα και θραύση των αμμοχαλίκων της κοίτης. Τα σώματα στήριξης, Ζώνη 4, κατασκευάστηκαν από λιθορριπή χρησιμοποιώντας τους οφιολίθους που αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής.

Κατά την κατασκευή του φράγματος είχε τοποθετηθεί στο ανάχωμα και στη θεμελίωσή του σύστημα ενόργανης παρακολούθησης που περιελάμβανε ηλεκτρικά πιεσομετρικά κύτταρα δονούμενης χορδής, φρέατα παρατήρησης της στάθμης των υπογείων υδάτων, γραμμικά μηκυσιόμετρα, στήλες μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης, κλισιόμετρα, βάρθρα ελέγχου επιφανειακών μετακινήσεων και επιταχυνσιογράφους.



Σχήμα 2.2 Οριζοντιογραφία Φράγματος Σμοκόβου (Πηγή:
<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/6.5.pdf>)



Σχήμα 2.3 Κεντρική Διατομή φράγματος Σμοκόβου (Πηγή:
<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/6.5.pdf>)

Στο χρόνο που μεσολάβησε από την κατασκευή του αναχώματος μέχρι και την ολοκλήρωση των έργων του φράγματος και την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα το πρόβλημα που απασχόλησε τους συντελεστές του έργου ήταν η συμπεριφορά του φράγματος κατά την κατάκλυση λόγω της μακροχρόνιας παραμονής του εν ξηρώ, καθώς και ότι ο πυρήνας είχε κατασκευασθεί με σχετικά χαμηλή υγρασία.

Στη διάρκεια κατασκευής και πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα καθώς και 2 χρόνια μετά την πρώτη πλήρωση, τη συμπεριφορά του φράγματος παρακολούθησε ομάδα εμπειρογνομόνων (Γ. Καραβοκύρης και Συνεργάτες Α.Ε και ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.).

2.2 Διαζώνιση Χωμάτων Φραγμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή του τύπου φράγματος που θα κατασκευαστεί εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες. Υπάρχουν πολλών ειδών διατομές διαζωνισμένων φραγμάτων και τα υλικά κατασκευής ποικίλουν, καθώς ο οικονομικός σχεδιασμός του έργου επιτάσσει την αξιοποίηση των διαθέσιμων στην κοίτη του ποταμού υλικών. Ωστόσο τυπικές ζώνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χωμάτων διαζωνισμένων φραγμάτων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1 Τυπικές Ζώνες Χωμάτων Φραγμάτων

Ζώνη	Περιγραφή	Υλικά Κατασκευής
1	Πυρήνας	Άργιλος, Ιλύς και πιθανές προσμίξεις με άμμο. Απαιτείται κυρίως λεπτόκοκκο υλικό με ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο No 200 (0.075mm) >35%. Ως υλικό πυρήνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αποσαθρωμένος βράχος (φλύσχης) ο οποίος θα έχει συμπυκνωθεί σε πολύ λεπτές στρώσεις περίπου 20cm.
2A	Λεπτόκοκκο Φίλτρο	Άμμος ή αμμοχάλικο με μη πλαστικά λεπτόκοκκα. Αποτελεί προϊόν θραύσης. Περιορισμοί κοκκομετρίας: <ul style="list-style-type: none">• No 200 >5%• No 4 <60%• Μέγιστο μέγεθος κόκκου 38mm
2B	Χονδρόκοκκο Φίλτρο	Αμμοχάλικο με μη πλαστικά λεπτόκοκκα. Προϊόν θραύσης. <ul style="list-style-type: none">• No 200 >2%• Μέγιστος κόκκος 3" (75mm) Όπως και η ζώνη 2A πρέπει να αποτελείται από υγιή, ανθεκτικά και καλά διαβαθμισμένα υλικά.
2C	Ανάντη Φίλτρο/Φίλτρο κάτω από τη λιθορριπή κυματοπροστασίας (Rip Rap)	Αμμοχάλικο με μη πλαστικά λεπτόκοκκα. <ul style="list-style-type: none">• No 200 >8%• Μέγιστο μέγεθος κόκκου 3" (75mm)

2D	Ζώνες «μαξιλάρια». Τοποθετούνται κάτω από πλάκα σκυροδέματος σε RCC.	Καλά διαβαθμισμένα αμμοχάλικα. <ul style="list-style-type: none">• Νο 200 2%-12% (μείωση της διαπερατότητας)• Μέγιστο μέγεθος κόκκου 200mm για την αποφυγή διαχωρισμού
2E		Καλά διαβαθμισμένη λεπτόκοκκη λιθορριπή, συμπυκνωμένη σε στρώσεις των 50cm. <ul style="list-style-type: none">• Νο 200 2%-12%• Μέγιστο μέγεθος κόκκου 500mm
3A	Λεπτόκοκκη Λιθορριπή	Υλικό λατομείου. Προτιμάται συμπυκνωμένη και με υψηλή αντοχή. <ul style="list-style-type: none">• Νο 200 > 5%• Μέγιστο μέγεθος κόκκου 0.5-1m
3B	Χονδρόκοκκη Λιθορριπή	Υλικό λατομείου. Μέγιστος κόκκος 1.5-2m
4	Λιθορριπή κυματοπροστασίας (Rip Rap)	Ανθεκτικοί ογκόλιθοι. Προσφέρουν προστασία στο ανάντη πρανές από διάβρωση λόγω κυμάτων.

2.2.1 Διαζώνωση Φράγματος Σμοκόβου

Όπως φαίνεται στην τυπική διατομή του φράγματος το φράγμα Σμοκόβου αποτελείται από τέσσερις ζώνες.

- Ζώνη 1: Πυρήνας
- Ζώνη 2: Λεπτόκοκκο φίλτρο
- Ζώνη 3: Χονδρόκοκκο φίλτρο
- Ζώνη 4: Σώματα στήριξης

Το βαθύτερο σημείο της θεμελίωσης του πυρήνα βρίσκεται σε υψόμετρο 278.77m. Το ονομαστικό υψόμετρο στέψης είναι 382.00m με συνολικό πλάτος 11.00m. Η υπερύψωση που δόθηκε στο φράγμα για να αντιμετωπιστούν τυχόν μελλοντικές καθιζήσεις είναι στο μεγαλύτερο κεντρικό μέρος του φράγματος 2m. Η κλίση των εξωτερικών παρειών του σώματος στήριξης, ανάντη και κατάντη, είναι 1:1.8. Ο πυρήνας του φράγματος είναι ελαφρώς κεκλιμένος προς τα ανάντη και έχει κλίση 1:0.5 στην ανάντη παρειά και 1:0.15 στην κατάντη παρειά. Το πλάτος του πυρήνα στο υψόμετρο 372.00m είναι 15m περίπου.

Από το επίπεδο της θεμελίωσης μέχρι το υψόμετρο 360.00m, ο πυρήνας προστατεύεται ανάντη με υλικό ζώνης 3 πάχους 5.00m και κατάντη με υλικό ζωνών 2 και 3 πάχους 3.00m η κάθε μία. Από το υψόμετρο 360.00m μέχρι και το υψόμετρο 375.00m το ανάντη φίλτρο διαμορφώνεται σε δύο ζώνες, 2 και 3, πάχους 3.00m η κάθε μία όπως και κατάντη. Από το υψόμετρο 375.00m μέχρι το υψόμετρο 382.00m ο πυρήνας καλύπτεται συνολικά (ανάντη κατάντη εγκάρσια), με λεπτό φίλτρο (υλικό ζώνης 2) πάχους 3.00m.

2.2.2 Σχολιασμός

Ως προς τη διαζώνιση και τη διαμόρφωση της διατομής του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη μας την τοπογραφία της περιοχής, θα μπορούσαμε να σχολιάσουμε τα εξής:

- Τοπογραφικά η περιοχή κατά μήκος της κοίτης έχει κλίση προς τα κατάντη. Έτσι επιλέχθηκε η κατασκευή κεκλιμένου προς τα ανάντη πυρήνα ώστε να συμβάλλει στην ευστάθεια και την προστασία του κατάντη πρανούς.
- Ωστόσο η κλίση του πυρήνα δρα επιβαρυντικά για την ευστάθεια του ανάντη πρανούς. Αυτό φαίνεται πιο καθαρά αργότερα στις αναλύσεις ευστάθειας. Γι αυτό επιλέχθηκε η κατασκευή αναβαθμού στη βάση του ανάντη πρανούς. Μία άλλη λύση θα ήταν να κατασκευαστεί το ανάντη πρανές με ηπιότερη κλίση (π.χ. 1/2 αντί για 1/1.8).
- Εσωτερικά το φράγμα φαίνεται να έχει πληρωμένη δομή. Τα φίλτρα, «αγκαλιάζουν» τον πυρήνα προστατεύοντάς τον από φαινόμενα διασωλήνωσης και εσωτερικής διάβρωσης, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν στήριξη των πρανών του πυρήνα. Επίσης επιτυγχάνεται η εκτόνωση των πιέσεων πόρων μέσω των φίλτρων και της ελεύθερα στραγγιζόμενης λιθορριπής.

2.3 Υλικά Κατασκευής

2.3.1 Πυρήνας

2.3.1.α Γενικά

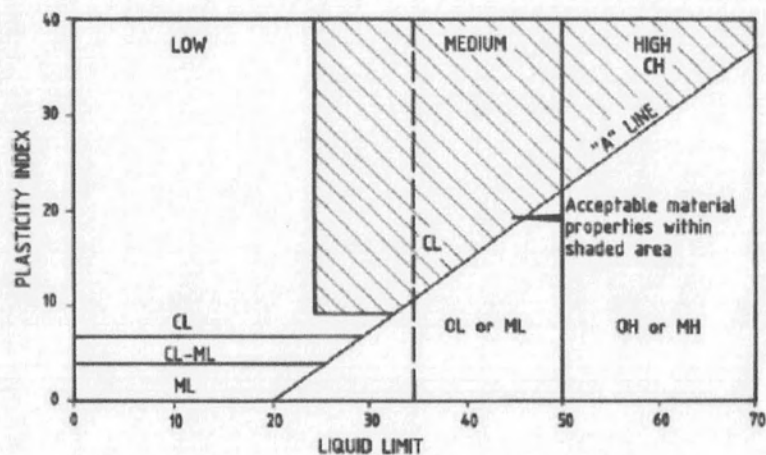
Ο πυρήνας ενός χωμάτινου φράγματος είναι το πρακτικά το αδιαπέρατο τμήμα του αναχώματος, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξασφάλιση της στεγανότητας του φράγματος. Στην πραγματικότητα οι πυρήνες δεν είναι εντελώς αδιαπέρατοι, οπότε με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσεται κανονικά δίκτυο ροής. Συνήθως για υλικά με διαπερατότητα της τάξης του 10^{-8} - 10^{-7} χρειάζονται περίπου 30 χρόνια συνεχούς λειτουργίας του φράγματος προκειμένου να αναπτυχθεί πλήρως δίκτυο ροής στο εσωτερικό του, ενώ για διαπερατότητα υλικού πυρήνα της τάξης του 10^{-6} - 10^{-5} χρειάζονται περίπου 10 χρόνια.

Οι πυρήνες των γεωφραγμάτων αποτελούνται από υλικά φτωχά σε αντοχή, γι αυτό καταβάλλεται κάθε προσπάθεια να επιτευχθεί με τη συμπύκνωση η μέγιστη αντοχή του στο ανάχωμα. Όπως είναι γνωστό από την Εδαφομηχανική, τα εδάφη για ένα ποσοστό υγρασίας (βέλτιστη υγρασία w_{opt}) επιτυγχάνεται η μέγιστη συμπύκνωσή τους και η μέγιστη αντοχή τους. Στόχος, λοιπόν, είναι η

διάστρωση του υλικού πυρήνα να γίνει σε ποσοστά υγρασίας $\pm 2\%$ του w_{opt} . Εξαιρέση αποτελούν οι περιοχές του πυρήνα που βρίσκονται κοντά στη θεμελίωση, όπου αναμένονται μετακινήσεις του υλικού, στις οποίες η διάστρωση υλικού πυρήνα πρέπει να γίνεται σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος ανάπτυξης ρωγμών.

Κατά την κατασκευή του πυρήνα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- ✓ **Η κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγιστο μέγεθος κόκκου.** Το μέγιστο μέγεθος κόκκου πρέπει να περιορίζεται ώστε να διευκολύνεται η συμπύκνωση και να αποφευχθεί ο κίνδυνος διαχωρισμού. Πιο συγκεκριμένα ο μέγιστος κόκκος δεν θα πρέπει να ξεπερνάει σε διάμετρο τα 75mm. Σχετικά με την κοκκομετρία του πυρήνα, κύρια απαίτηση είναι να είναι πλούσιος σε λεπτόκοκκα (ποσοστό διερχόμενο από το Νο 200 $>30\%$) ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη στεγανότητα.
- ✓ **Τα όρια Attemberg.** Εν προκειμένω τίθεται το ζήτημα της πλαστικότητας των αργιλικών εδαφών. Αργιλικά εδάφη με μεγάλη πλαστιμότητα δυσκολεύουν την συμπύκνωση όμως τείνουν να διαβρώνονται λιγότερο, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο για εμφάνιση ρωγμών στον πυρήνα. Αποδεκτές τιμές πλαστικότητας, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, φαίνονται στη γραμμοσκιασμένη περιοχή στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 2.4 Προδιαγραφές για τα όρια Attemberg που πρέπει να πληροί ο πυρήνας Γεωφράγματος
(Πηγή: Geotechnical Engineering Of Dams, Robin Fell)

- ✓ **Πυκνότητα, υγρασία και πάχος στρώσης.** Ο απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 98% και η διάστρωση του πυρήνα θα πρέπει να γίνεται σε υγρασία $\pm 2\%$ της βέλτιστης. Σχετικά με το πάχος στρώσης συμπύκνωσης το σώμα USBR προτείνει η συμπύκνωση του πυρήνα να γίνεται σε στρώσεις των 15cm, ωστόσο πλέον τόσο μικρό πάχος στρώσης θεωρείται πολύ συντηρητικό.

Συγκεκριμένα ο R. Fell προτείνει η συμπύκνωση να γίνεται σε στρώσεις των 20-25cm.

- ✓ **Διάστρωση και διαβροχή.** Κατά τη διάστρωση πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία του μείγματος. Γι' αυτό κάθε στρώση πρέπει να αναμοχλεύεται και να διαβρέχεται. Η διαβροχή του πυρήνα κρίνεται σημαντική για τον επιπλέον λόγο ότι κατά τη διάστρωση χάνεται ποσοστό υγρασίας από το έδαφος.
- ✓ **Θεμελίωση.** Στην διεπιφάνεια μεταξύ της θεμελίωσης και του πυρήνα προτείνεται να χρησιμοποιείται υλικό πιο πλαστικό και με μεγαλύτερη υγρασία, +2%-3% της βέλτιστης, και ο βαθμός συμπύκνωσης να είναι 100%, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη συγκόλληση του υλικού πυρήνα στο βράχο

2.3.1.β Περιγραφή Πυρήνα, Ζώνη Νο1

Για την κατασκευή του πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν μόνο δανειοθάλαμοι εντός της λεκάνης κατάκλυσης, δηλαδή στις κοιλάδες της Παπούσας και του Πενδάμη. Τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης και η μέση κοκκομετρική διαβάθμιση φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ζώνη του πυρήνα πριέχουν 36%-94.6% διερχόμενα από το κόσκινο Νο 4 (0.475mm) και από 20%- 59% διερχόμενα από το κόσκινο Νο 200 (0.075mm).

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού της επιτόπου πυκνότητας, το υλικό εμφανίζεται καλά συμπυκνωμένο με μικρό ποσοστό κενών. Ο βαθμός συμπύκνωσης κυμαίνεται από 84.5% έως 106% με μέσο όρο 99.67%.

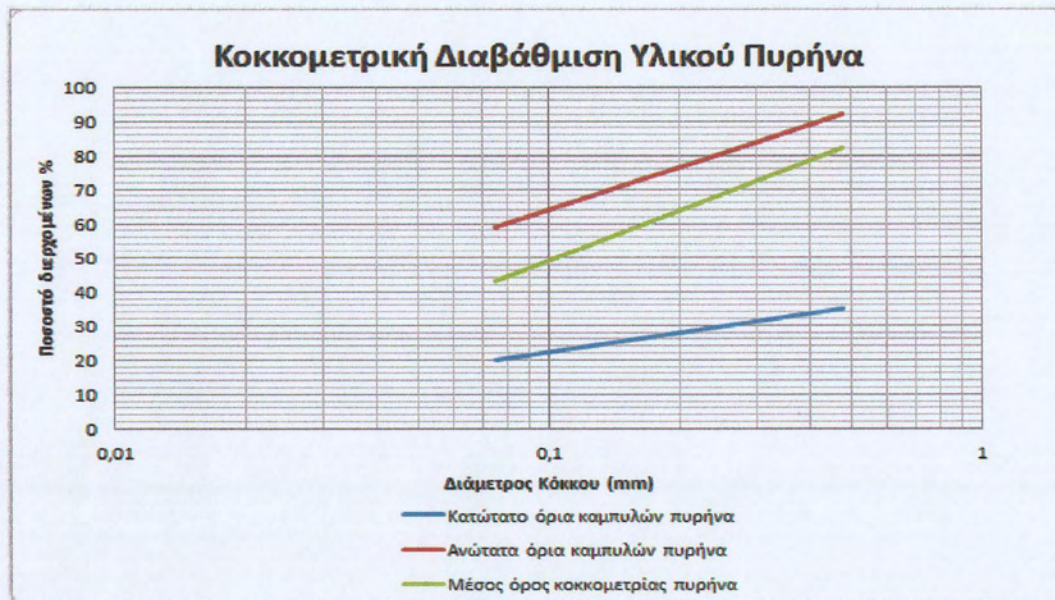
Η ξηρή πυκνότητα του πυρήνα κυμαίνεται από 14.55 kN/m³ έως 19.00 kN/m³ με μέσο όρο 16.95 kN/m³.

Η υγρασία κυμαίνεται από 12.5% έως 25.9% με μέσο όρο 18.18% και με εξαίρεση το κατώτερο τμήμα του όπου ο πυρήνας φαίνεται να έχει κατασκευαστεί με υγρασία χαμηλότερη από το $w_{opt}=17.27\%$.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών έδειξαν ότι για τους υπολογισμούς ευστάθειας πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω στοιχεία:

- Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα : $\gamma_d = 16.95 \text{ KN/m}^3$
- Υγρασία : $W = 19\%$
- Συντελεστής στερεοποίησης : $C_v = 5 \text{ m}^2/\text{yr}$
- Συντελεστής υδροπερατότητας : $k = 10^{-8} \text{ cm/sec}$

- Πραγματική εσωτερική γωνία τριβής : $\varphi' = 25^\circ$
- Πραγματική συνεκτικότητα : $c' = 10 \text{ KN/m}^2$
- Συντελεστής πίεσης πόρων : $B = 0.45$



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού πυρήνα (Ζώνη 1) φράγματος Σμοκόβου

2.3.2 Φίλτρα

Γενικά

Το υλικό των πυρήνων γεωφραγμάτων περιέχει κατά κανόνα υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών (διερχόμενων από το κόσκινο Νο 200). Η μικρή διάσταση των κόκκων-πλακιδίων του υλικού, κάνει τον πυρήνα ευάλωτο σε διάπλυση όταν βρεθεί υπό υδραυλική κλίση, όταν αναπτυχθούν υψηλές ταχύτητες ροής ή όταν υπάρχει η δυνατότητα μετακίνησης του λεπτόκοκκου κλάσματος του υλικού προς τα κατάντη. Κατά συνέπεια επιβάλλεται η πρόβλεψη προστασίας του από διάπλυση του υλικού του και διάβρωση.

Η προστασία αυτή παρέχεται με την παρεμβολή υλικού κατάλληλης διαβάθμισης (υλικό φίλτρου) μεταξύ του πυρήνα και του κατάντη κελύφους. Το υλικό φίλτρου πρέπει να έχει πέντε βασικές ιδιότητες, ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται επιτυχώς στο ρόλο του για την προστασία του πυρήνα:

- Να συγκρατεί το υλικό του πυρήνα ώστε να μην είναι δυνατή η μετακίνηση κόκκων υλικού από τον πυρήνα προς τα κατάντη.

- Να παροχεύεται άμεσα το διηθούμενο νερό (από τον πυρήνα, τη θεμελίωση, τη βροχή), ώστε να μην αναπτύσσονται πιέσεις νερού στο κατάντη του πυρήνα ανάχωμα του φράγματος.
- Να μην διαχωρίζει, κατά τις μετακινήσεις, την εκφόρτωση και τη διάστρωση του υλικού, ώστε να μη μεταβάλλεται η κοκκομετρική διαβάθμιση από τη μία θέση στην άλλη.
- Να καταρρέει όταν βυθίζεται σε νερό, ώστε να μην διατηρούνται ανοιχτές οι ρωγμές που ενδεχομένων να αναπτυχθούν στον πυρήνα και προωθηθούν μέχρι τα φίλτρα.
- Να μην μεταβάλλεται διαχρονικά η κοκκομετρική του διαβάθμιση, είτε λόγω σταδιακής συγκόλλησης των κόκκων (φαινόμενο διαγένεσις) είτε λόγω θραύσης των κόκκων του υλικού λόγω υψηλών φορτίων ή χημικής αλλοίωσης.

Η κοκκομετρία του υλικού φίλτρου εξαρτάται αποκλειστικά από την κοκκομετρία του υλικού του πυρήνα, το οποίο καλείται να προστατέψει. Επειδή το υλικό φίλτρου δεν είναι βιομηχανικό προϊόν, ώστε να έχει μια συγκεκριμένη και σταθερή κοκκομετρία αλλά προκύπτει από επεξεργασία φυσικών υλικών (κοσκίνισμα, θραύση, πλύσιμο) η απαιτούμενη διαβάθμιση του υλικού προσδιορίζεται με δύο περιβάλλουσες καμπύλες (λεπτόκοκκη και χονδρόκοκκη).

Έτσι οποιοδήποτε υλικό του οποίου η κοκκομετρική καμπύλη κείται στο σύνολό της μεταξύ των δύο αυτών περιβαλλουσών, θεωρείται ως κατάλληλο υλικό φίλτρου το οποίο μπορεί να ανταποκριθεί με ασφάλεια στις απαιτήσεις προστασίας του πυρήνα του φράγματος. Ο προσδιορισμός των κοκκομετρικών καμπυλών των δύο περιβαλλουσών, αποτελεί στόχο ειδικής μελέτης, ώστε να ικανοποιούνται τα πέντε κριτήρια καταλληλότητας υλικού που προαναφέραμε.

Για μεγάλα φράγματα προτείνεται η κατασκευή δύο ειδών φίλτρων ενός λεπτόκοκκου (φίλτρο 2Α), και ενός χονδρόκοκκου (φίλτρο 2Β).

2.3.2.1 Φίλτρο 2Α

2.3.2.1.α Περιγραφή Φίλτρου Ζώνης 2 (2Α)

Το μητρώο κατασκευής του φράγματος αναφέρει ότι το υλικό Ζώνης 2 λήφθηκε από υγιή και καθαρά αμμοχάλικα της κοιλάδας Παπούσας. Μετά το πλύσιμο και το κοσκίνισμά του γινόταν εργαστηριακό έλεγχος κοκκομετρικής διαβάθμισης και εμπλουτισμός του σε τυχόν απαιτούμενα κλάσματα. Στα φύλλα των ελέγχων κοκκομετρικής διαβάθμισης το υλικό περιγράφεται ως αμμοχάλικο ποταμού κοσκινισμένο ή θραυστό.

Για την κατασκευή του φίλτρου 2Α χρησιμοποιήθηκε υλικό με την εξής διαβάθμιση και τις κοκκομετρικές καμπύλες.

Πίνακας 2.2 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 2) φράγματος Σμοκόβου.

Φίλτρο 2Α	Max		min	
	100%	38,1mm	100%	19,1mm
78%	19,1mm	90%	9,52mm	
60%	9,52mm	80%	4,76mm	
45%	4,76mm	65%	2,38mm	
31%	2,38mm	50%	1,19mm	
18%	1,190mm	35%	0,59mm	
10%	0,59mm	23%	0,297mm	
2%	0,297mm	15%	0,19mm	
0%	0,149mm	10%	0,074mm	
		5%	0,06mm	



Σχήμα 2.6 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 2) φράγματος Σμοκόβου

Η καμπύλες του υλικού του πυρήνα προσαρμόστηκαν ώστε να ληφθεί υπόψη μόνο το τμήμα που περνάει από το κόσκινο Νο 4 (4,65mm).

2.3.2.1.β Έλεγχος επάρκειας Φίλτρου 2Α

✓ Κριτήριο συγκράτησης υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό του πυρήνα περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό περίπου 50% και επομένων σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA-SCS (ICOLD, Bulletin 95,1994) για τα φίλτρα, ανήκει στην κατηγορία 2. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$D_{15F} \leq 0.7\text{mm}$

Το κριτήριο συγκράτησης υλικού δεν ικανοποιείται, αφού η μέγιστη διάμετρος κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% του φίλτρου είναι περίπου 1mm.

✓ **Κριτήριο δαπερατότητας**

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, Bulletin 95, 1994), ορίζει ότι:

$$D_{15F}/D_{15b} \geq 4 \text{ ή } 5$$

Όπου: D_{15F} : η ελάχιστη επιτρεπόμενη διάμετρος κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% του φίλτρου, εν προκειμένω $D_{15F}=0.19\text{mm}$.

D_{15b} : η διάμετρος κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% του υλικού πυρήνα, εν προκειμένω, $D_{15b}=0.01\text{mm}$.

$$D_{15F}/D_{15b}=19$$

Το κριτήριο διαπερατότητας ικανοποιείται.

✓ **Κριτήριο Ομοιομορφίας**

Το κριτήριο ομοιομορφίας επιβάλλεται ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος διαχωρισμού του αδρομερούς κλάσματος του υλικού κατά την εκφόρτωση και διάστρωσή του. Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος μεταξύ των μικρών και μεγάλων κόκκων του υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση διαχωρισμού. Έτσι ζητείται ο συντελεστής ομοιομορφίας $C_u = D_{60}/D_{10}$ να είναι μικρότερος του 6. Επίσης, προτείνεται συσχέτιση της μέγιστης διάστασης κόκκου D_{90} με τη μέγιστη διάσταση κόκκου D_{10} , καθώς και επιβάλλεται μέγιστη διάσταση κόκκου τα 24mm (Μουτάφης) ή 37mm (Fell).

Για το φίλτρο 2A του φράγματος ο συντελεστής ομοιομορφίας παίρνει τιμές $C_u=16.13$ για τη χονδρόκοκκη περιβάλλουσα του φίλτρου και $C_u=25.67$ για τη λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του φίλτρου, τιμές που ξεπερνούν κατά πολύ την απαίτηση για ομοιομορφία του υλικού.

Επίσης για μέγιστη διάμετρο κόκκου $D_{10}=0.59\text{mm}$ προβλέπεται μέγιστη διάσταση κόκκου $D_{90}=25\text{mm}$. Για το φίλτρο του φράγματος $D_{90\text{max}}=20\text{mm}$.

Η μέγιστη διάμετρος κόκκου που χρησιμοποιείται είναι τα 38.1mm που ελαφρώς αποκλίνει από τα απαιτούμενα όρια.

✓ **Κριτήριο Κατάρρευσης**

Αναφέραμε προηγουμένων ότι είναι επιθυμητό το φίλτρο όταν έρχεται σε επαφή να καταρρέει, ώστε τυχόν ρωγμές που θα δημιουργηθούν στον πυρήνα να μην προωθηθούν στο υλικό του φίλτρου. Αυτό επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο φίλτρο, τα οποία του προσδίδουν συνοχή, σε μικρότερο του 5%. Στο φίλτρο του φράγματος το ποσοστό των λεπτόκοκκων κυμαίνεται μεταξύ 0% και 10%.

✓ Κριτήριο Αλλοίωσης

Η κοκκομετρία του υλικού φίλτρου είναι σημαντικό να παραμένει αναλλοίωτη καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του φράγματος. Αλλοίωση της κοκκομετρίας του φράγματος μπορεί να προκύψει είτε από θρυμματισμό είτε από συγκόλληση των κόκκων του υλικού.

Ο έλεγχος ψαθυρότητας του υλικού γίνεται μέσω της δοκιμής Los Angeles. Δεν είναι εφικτό να γνωρίζουμε αν έχει πραγματοποιηθεί η δοκιμή, πάντως στο έντυπο αξιολόγησης υλικών κατασκευής του φράγματος δεν αναφέρεται η πραγματοποίησή της.

Η προδιάθεση του υλικού για συγκόλληση των κόκκων του δεν έχει διερευνηθεί εις βάθος, ωστόσο σημαντικό ρόλο φαίνεται να παίζει η χημική σύσταση του νερού καθώς και η παρουσία λεπτόκοκκων στο υλικό του φίλτρου.

2.3.2.1.γ Εκ νέου σχεδιασμός φίλτρου 2A

Οι καμπύλες του λεπτόκοκκου φίλτρου (Ζώνη 2A) σχεδιάστηκαν ως ακολούθως, όπως προτείνεται από τον Robin Fell στο βιβλίο του Geotechnical Engineering of Dams.

1. Η καμπύλη του πυρήνα που επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό των φίλτρων ήταν η λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του υλικού του πυρήνα, καθώς εφόσον αυτή αποτελεί τη δυσμενέστερη κοκκομετρία του πυρήνα από τον κίνδυνο διάπλυσης.
2. Η μελέτη επάρκειας του φίλτρου βασίζεται στις τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες του προς συγκράτηση υλικού, που περιλαμβάνουν μόνο το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No 4 (4.65mm). Επομένως, απαιτείται επανασχεδιασμός της λεπτόκοκκης περιβάλλουσας του πυρήνα, μετά την αφαίρεση του κλάσματος με διάσταση μεγαλύτερη από 4,65mm.

No	200	51,2%
(0,075mm)		
No 4 (4.65mm)		100%

3. Το υλικό βάσης κατατάσσεται στην κατηγορία 2A σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.3 Κατηγορίες εδάφους «βάσης» για τον σχεδιασμό των φίλτρων. (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

Base soil category	% finer than 0.075 mm (after regrading, where applicable)	Base soil description
1	>85	Fine silts and clays
2A	35-85	Silty and clayey sands; sandy clays; and clay, silt, sand, gravel mixes
4A	15-35	Silty and clayey sands and gravel
3	<15	Sands and gravel

4. Για την κατηγορία 2A λαμβάνεται η μέγιστη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 15% ίση με 0,7mm όπως προτείνεται από τον επόμενο πίνακα. **Max D_{15F}=0.7mm**

Πίνακας 2.4 Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος κόκκου D15 για κάθε κατηγορία εδάφους βάσης. (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

Base soil category	Filtering criteria
1	$\leq 9 \times D_{R5B}$ but not less than 0.2 mm (a)
2A	≤ 0.7 mm (b)
3	$\leq 4 \times D_{R5B}$ of base soil after regrading
4A	$(35 - A/35 - 15) [(4 \times D_{R5B}) - 0.7 \text{ mm}] + 0.7$ mm A = % passing 0.075 mm sieve after regrading (If $4 \times D_{R5B}$ is less than 0.7 mm, use 0.7 mm)

5. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ελάχιστη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 15%. $D_{15F} \geq \max \{4 \cdot D_{15B} ; 0.1 \text{ mm}\}$ όπου D_{15B} : η διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 15% του χρονοδροκοκκου κλάσματος του πυρήνα. Θεωρούμε (δεδομένου ότι δεν υπάρχουν δεδομένα για το τμήμα αυτό της καμπύλης του πυρήνα) $D_{15B} = 0,01 \text{ mm}$. Τότε $D_{15F} \geq \max \{0.04 \text{ mm} ; 0.1 \text{ mm}\} \Rightarrow \text{Min } D_{15F} \geq 0.1 \text{ mm}$.

6. Για τις διαμέτρους των ποσοστών διερχομένων μικρότερων του 60% , προκειμένου να τηρείται η ομοιομορφία του υλικού ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος διαχωρισμού, ένας συντελεστής ομοιομορφίας $\frac{D_{x \max}}{D_{x \min}} \leq 5$. Κάνουμε τον έλεγχο για το ποσοστό 15%.

$$\frac{D_{15F \max}}{D_{15F \min}} = \frac{0.7}{0.1} = 7 > 5 \text{ Οπότε επιλέγουμε την ελάχιστη διάμετρο για ποσοστό διερχομένων 15% ίση με } \text{min } D_{15F} = 0.14 \text{ mm}$$

7. Για λόγους ομοιομορφίας του μείγματος πρέπει να τηρείται συντελεστής ≤ 6 μεταξύ των ποσοστών των διερχομένων διαμέτρων. Η κοκκομετρική καμπύλη δηλαδή πρέπει να έχει κλίση περίπου 6. Υπολογίζουμε με αυτόν τον τρόπο τη μέγιστη και ελάχιστη διάμετρο για ποσοστό διερχομένων 10% και προκύπτουν οι τιμές:

$$\text{Min } D_{10F} = 0.12 \text{ mm και } \text{max } D_{10F} = 0.58 \text{ mm}$$

8. Στη συνέχεια λόγω της απαίτησης $\frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 6$ υπολογίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 60% και προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές:

$$\text{Min } D_{60F} = 0.72 \text{ mm και } \text{max } D_{60F} = 3.48 \text{ mm}$$

9. Για τον υπολογισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης διαμέτρου D_{90F} χρησιμοποιούμε τον παρακάτω πίνακα λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρο για ποσοστό διερχομένων 10%, $D_{10F} = 0.58 \text{ mm}$. Οπότε προκύπτει $\text{max } D_{90F} = 25 \text{ mm}$.

Base soil category	If D_{10F} (mm) is:	Then maximum D_{90F} (mm) is:
All categories	<0.5	20
	0.5–1.0	25
	1.0–2.0	30
	2.0–5.0	40
	5.0–10	50
	>10	60

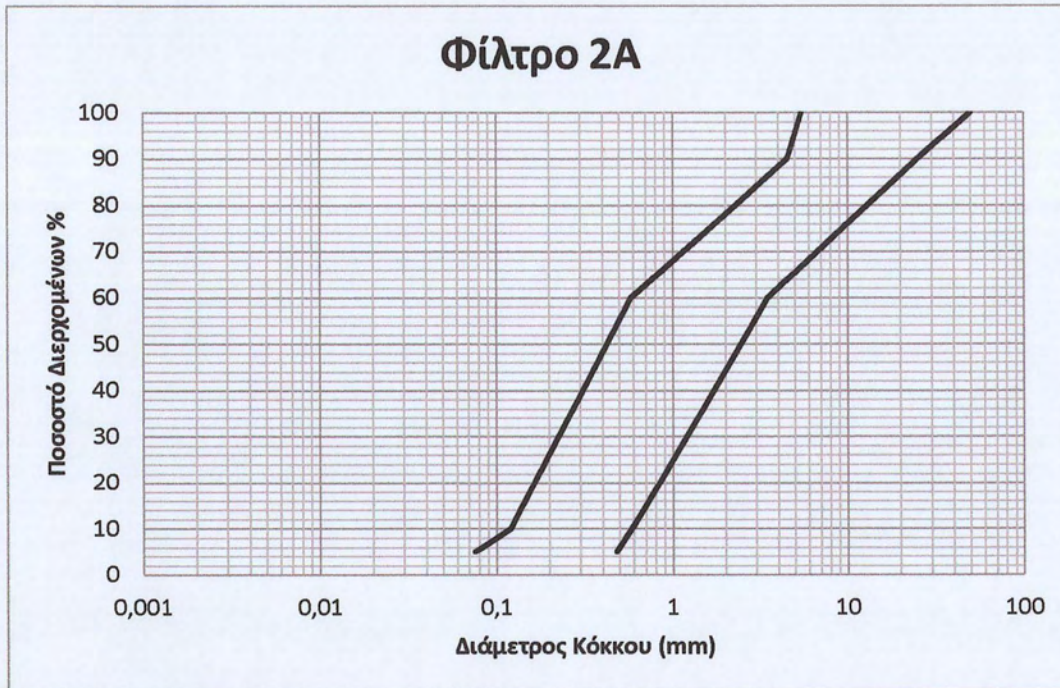
Πίνακας 2.5 Κριτήριο διαχωρισμού- Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος D_{90} για την αποφυγή διαχωρισμού. (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

10. Τέλος, πρέπει να συνυπολογίσουμε ότι το μέγιστο ποσοστό λεπτόκοκκων (διερχόμενα από κόσκινο No 200) είναι 5% και ότι η μέγιστη διάμετρος κόκκου που επιτρέπεται για την κατασκευή φίλτρων ζώνης 2A είναι 50mm.

Έτσι καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα:

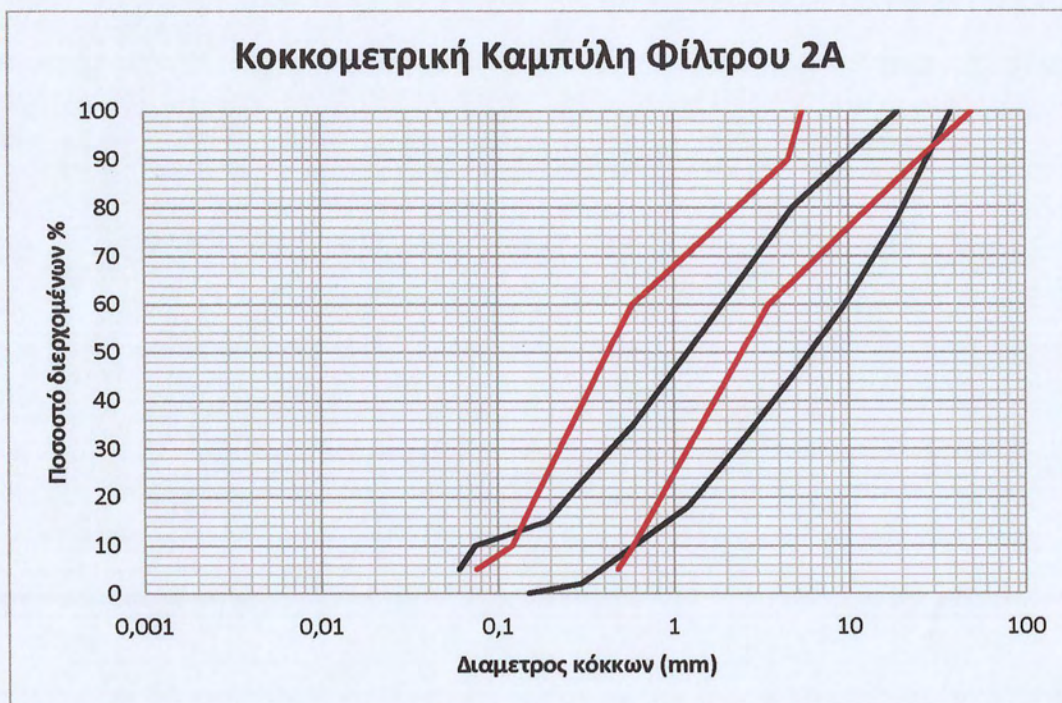
Πίνακας 2.6 Πίνακας κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου Ζώνης 2 (2A) όπως εκ νέου υπολογίστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα της διεθνούς βιβλιογραφίας

2A	max		Min	
	D_{100F}	50	D_{100F}	5,4
D_{90F}	25	D_{90F}	4,5	
D_{60F}	3,48	D_{60F}	0,58	
D_{15F}	0,7	D_{15F}	0,14	
D_{10F}	0,5833	D_{10F}	0,12	
D_{5F}	0,48	D_{5F}	0,075	



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου ζώνης 2 όπως εκ νέου σχεδιάστηκε.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες του φίλτρου του φράγματος ως έχει (μαύρο χρώμα) σε σύγκριση με τις καμπύλες του φίλτρου που σχεδιάσαμε (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 2.8 Σύγκριση διαγραμμάτων των κοκκομετρικών καμπυλών του νέου φίλτρου που σχεδιάστηκε με το υπάρχον φίλτρο του φράγματος.

Τα ήδη υπάρχοντα φίλτρα φαίνονται αν διαφοροποιούνται στα εξής δύο σημεία:

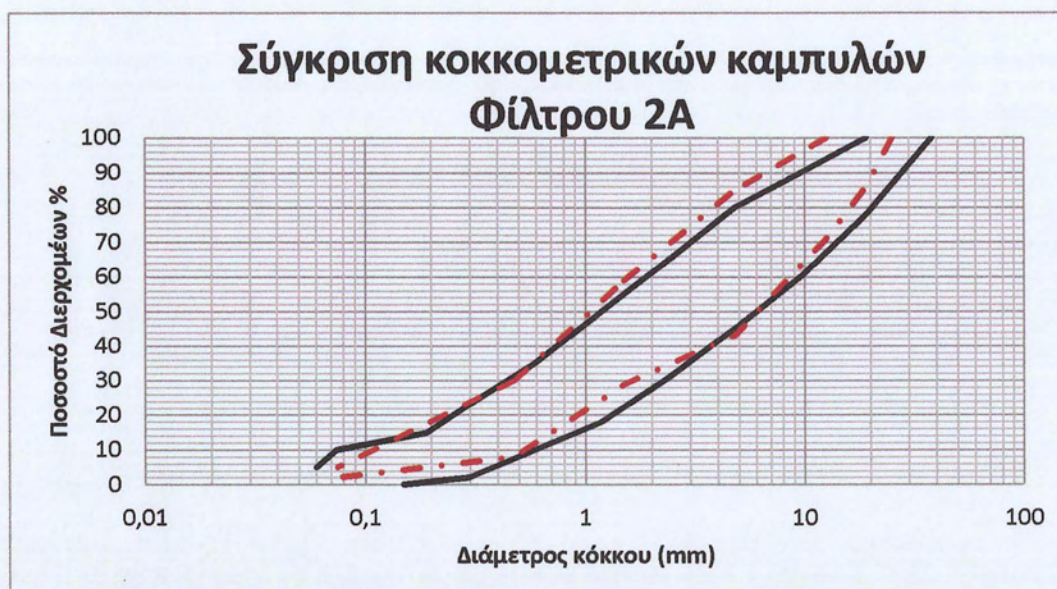
1. Το ποσοστό των λεπτόκοκκων ξεπερνάει το επιτρεπόμενο όριο 5% και ανέρχεται σε ποσοστό 10%-14%. Ενδεχομένως αυτό να οδηγήσει σε μειωμένη διαπερατότητα των φίλτρων και προβλήματα συγκόλλησης των κόκκων του φίλτρου. Ωστόσο, η ιστορία των φραγμάτων έχει δείξει ότι φίλτρα τα οποία περιείχαν μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων έως και 15% δεν έχουν εμφανίσει σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία τους (Fell, Geotechnical Engineering of Dams).
2. Ενώ το φίλτρο είναι καλά διαβαθμισμένο έτσι ώστε να τηρείται συντελεστής ομοιομορφίας μικρότερος του 5 σε όλες τις διαμέτρους μικρότερες του 60% το κλάσμα $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ παίρνει τιμές 16,13 και 25,67 για τη λεπτόκοκκη και χονδρόκοκκη καμπύλη των φίλτρων αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος μεταξύ των μικρών και των μεγάλων διαστάσεων ενός κοκκώδους υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση διαχωρισμού.

Ο Ν.Ι. Μουτάφης, προτείνει στις σημειώσεις του, Τεχνολογία Γεωφραγμάτων, τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες για τα φίλτρα ζώνης 2Α.



Σχήμα 2.9 Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες φίλτρου ζώνης 2 όπως προτείνονται από τον καθηγητή Ν.Ι. Μουτάφη.

Τέλος συγκρίνουμε τις καμπύλες των φίλτρων που προτείνει ο καθηγητής Μουτάφης (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) στις σημειώσεις του με τις ήδη υπάρχουσες καμπύλες των φίλτρων του φράγματος Σμοκόβου (μαύρη γραμμή) .



Σχήμα 2.10 Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών του φίλτρου του φράγματος με τις προτεινόμενες από τον Ν.Ι. Μουτάφη καμπύλες φίλτρου.

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των φίλτρων του φράγματος βρίσκονται πολύ κοντά με τις προτεινόμενες καμπύλες. Διαφοροποιούνται σε δύο σημεία, περιέχουν περισσότερα λεπτόκοκκα (διερχόμενα από το κόσκινο Νο 200 έως 14%- ποσοστό απαγορευτικό για φίλτρα) και ο μέγιστος κόκκος είναι της τάξης των 38.1mm.

2.3.2.2 Φίλτρο 2B

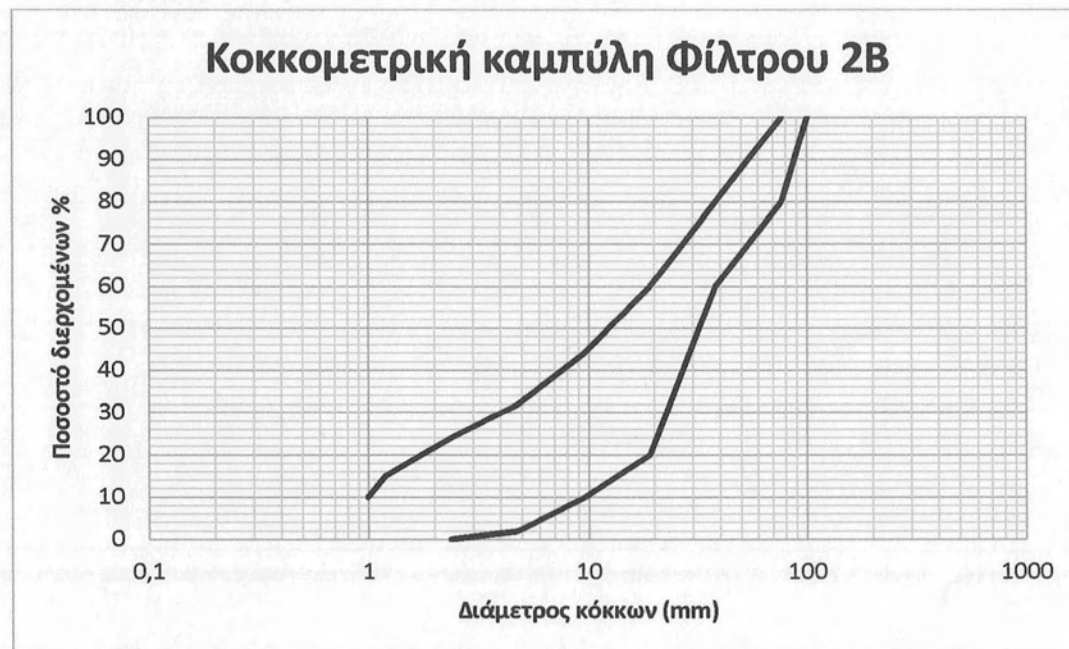
2.3.2.2.α Περιγραφή Φίλτρου Ζώνης 3 (2B)

Όπως και για τη Ζώνη 2, το υλικό Ζώνης 3 λήφθηκε από υγιή και καθαρά αμμοχάλικα της κοιλάδας Παπούσας. Μετά το πλύσιμο και το κοσκίνισμά του γινόταν εργαστηριακός έλεγχος κοκκομετρικής διαβάθμισης και εμπλουτισμός του σε τυχόν απαιτούμενα κλάσματα.

Για την κατασκευή του φίλτρου της ζώνης 3 χρησιμοποιήθηκε υλικό με την εξής κοκκομετρική διαβάθμιση:

Πίνακας 2.7 Πίνακας ορίων κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 3) φράγματος Σμοκόβου.

Φίλτρο 2B	Dmax		Dmin	
	D _{100F}	100	D _{100F}	76,2
D _{80F}	76,2	D _{80F}	38,1	
D _{60F}	38,1	D _{60F}	19,1	
D _{20F}	19,1	D _{44F}	9,52	
D _{10F}	9,52	D _{32F}	4,76	
D _{2F}	4,76	D _{24F}	2,38	
0	2,37	D _{15F}	1,19	
		D _{10F}	0,99	



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου (Ζώνη 3) φράγματος Σμοκόβου

2.3.2.2.β Έλεγχος επάρκειας φίλτρου 2B

✓ Κριτήριο συγκράτησης υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό φίλτρου περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 15% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA-SCS (ICOLD Bulletin 95,1994) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4A. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15F} \leq 4 * D_{85b}$$

Όπου D_{15F} : η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 15% του φίλτρου 2B, εν προκειμένω $D_{15F}=10.5\text{mm}$

D_{85b} : η διάσταση κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% της λεπτόκοκκης περιβάλλουσας του φίλτρου 2A, εν προκειμένω $D_{85b}=2.9\text{mm}$.

Πρέπει επομένως $D_{15F} \leq 4 * 2.9 \Rightarrow D_{15F} \leq 11.6\text{mm}$, το οποίο ικανοποιείται.

✓ Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi είναι:

$$D_{15F}/D_{15b} \geq 4 \text{ ή } 5$$

Όπου D_{15F} : η ελάχιστη διάσταση κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% του φίλτρου 2B, εν προκειμένω $D_{15F}=1.19\text{mm}$

D_{15b} : η διάσταση κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15% της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας του φίλτρου 2A, εν προκειμένω $D_{15b}=1\text{mm}$.

Το κριτήριο διαπερατότητας δεν ικανοποιείται. Θα έπρεπε $D_{15F} \geq 4\text{mm}$.

2.3.2.2.γ Εκ νέου σχεδιασμός Φίλτρου 2B

Η διαδικασία είναι η ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό του λεπτόκοκκου φίλτρου ζώνης 2 (2A).

1. Το υλικό βάσης είναι το λεπτόκοκκο φίλτρο 2A της ζώνης 2, το οποίο κατατάσσεται σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3 ως υλικό κατηγορίας 4A.
2. Ομοίως, για τον σχεδιασμό του φίλτρου 2B χρησιμοποιείται η λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του υλικού βάσης (φίλτρο 2A), καθώς αυτή είναι η δυσμενέστερη κοκκομετρία. Η καμπύλη προσαρμόστηκε ώστε να ληφθεί υπόψη μόνο το διερχόμενο κλάσμα από το κόσκινο Νο 4 (4.75mm). Η προσαρμοσμένη καμπύλη φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Σχήμα 2.12 Διορθωμένη κοκκομετρική καμπύλη φίλτρου ζώνης 2, η οποία λαμβάνεται ως καμπύλη υλικού βάσης για τον σχεδιασμό του φίλτρου ζώνης 3.

3. Για υλικό κατηγορίας 4A προκύπτει η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος κόκκου για ποσοστό διερχομένων 15%, από τον πίνακα. $D_{15F} \leq 4 * D_{85b}$, όπου D_{85b} : η διάσταση κόκκου για ποσοστό διερχομένων 85% του προς συγκράτηση υλικού, στη συγκεκριμένη περίπτωση, D_{85} της προσαρμοσμένης λεπτόκοκκης περιβάλλουσας του φίλτρου 2A. Οπότε:
 $D_{15F} \leq 4 * D_{85b} \Rightarrow D_{15F} \leq 4 * 2.9 \Rightarrow D_{15F} \leq 11.6 \text{mm}$.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ελάχιστη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 15%, μέσω της τήρησης του κριτηρίου διαπερατότητας. Πρέπει $D_{15F}/D_{15b} \geq 4$ ή $5 \Rightarrow \text{Min } D_{15F} \geq 4 \text{mm}$.

Η απαίτηση για ελάχιστη διάμετρο τα 0.1mm υπερκαλύπτεται.

4. Για λόγους ομοιομορφίας του μείγματος πρέπει να τηρείται συντελεστής ≤ 6 μεταξύ των ποσοστών των διερχομένων διαμέτρων. Η κοκκομετρική καμπύλη δηλαδή πρέπει να έχει κλίση περίπου 6. Υπολογίζουμε με αυτόν τον τρόπο τη μέγιστη και ελάχιστη διάμετρο για ποσοστό διερχομένων 10% και προκύπτουν οι τιμές:

$$\text{Min } D_{10F} = 3.3 \text{mm} \text{ και } \text{max } D_{10F} = 9.6 \text{mm}$$

5. Στη συνέχεια λόγω της απαίτησης $\frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 6$ υπολογίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη διάμετρος για ποσοστό διερχομένων 60% και προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές:

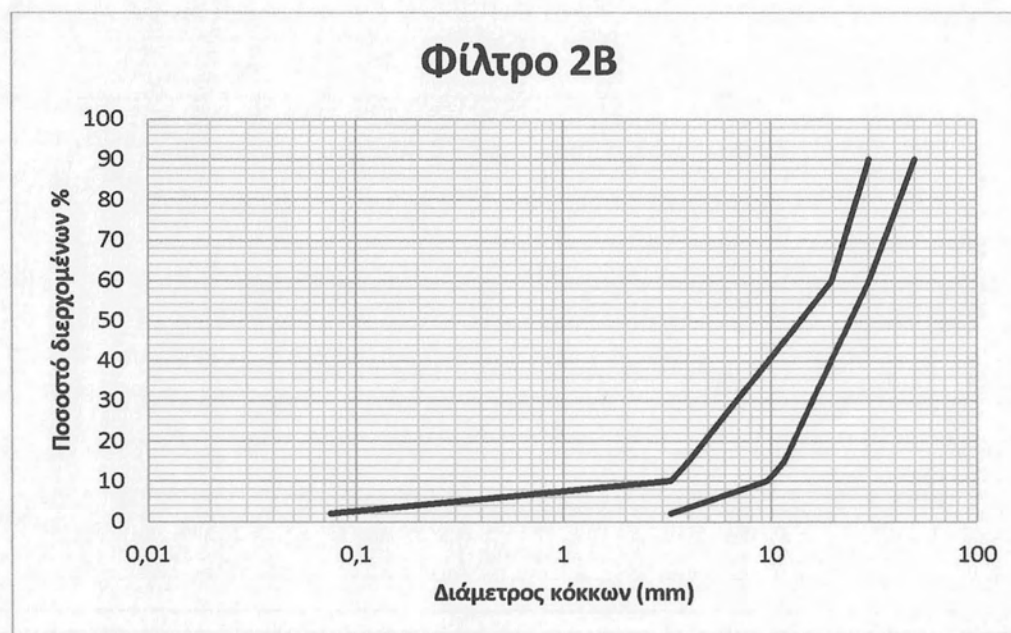
Min $D_{60F}=19.8\text{mm}$ και max $D_{60F}=57.6\text{mm}$

6. Για τον υπολογισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης διαμέτρου D_{90F} χρησιμοποιούμε το πίνακα λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρο για ποσοστό διερχομένων 10%, $D_{10F}=9.8\text{mm}$. Οπότε προκύπτει **max $D_{90F} = 50\text{mm}$** .
7. Τέλος, πρέπει να συνυπολογίσουμε ότι το μέγιστο ποσοστό λεπτόκοκκων (διερχόμενα από κόσκινο No 200) είναι 5% και ότι η μέγιστη διάμετρος κόκκου που επιτρέπεται για την κατασκευή φίλτρων ζώνης 2Α κυμαίνεται μεταξύ 76 και 100mm.

Έτσι καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα και τις περιβάλλουσες καμπύλες του φίλτρου:

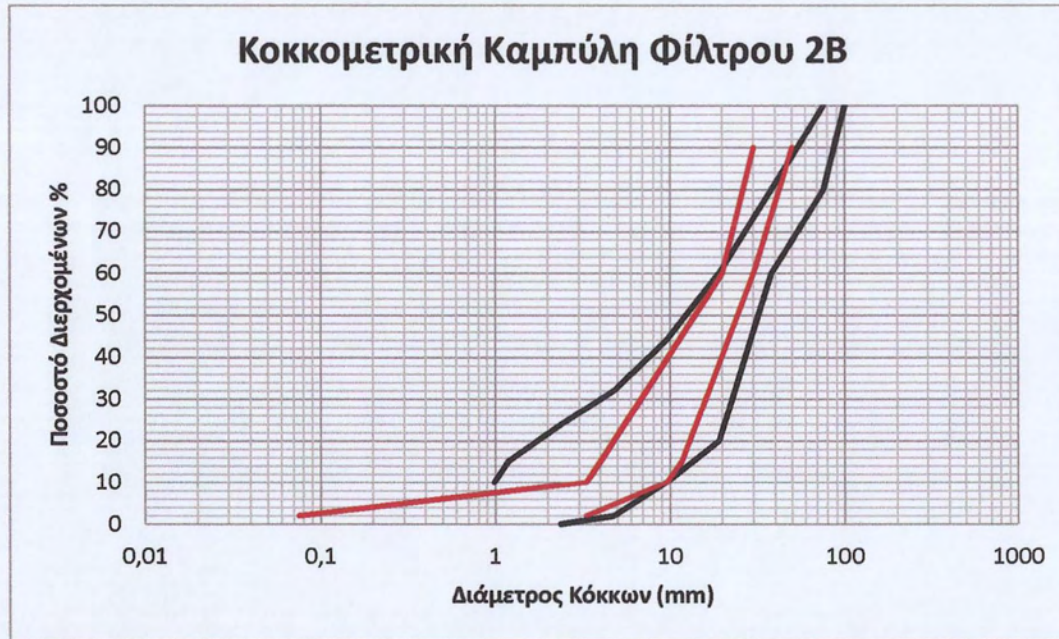
Πίνακας 2.8 Πίνακας κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου Ζώνης 3 (2B) όπως εκ νέου υπολογίστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα της διεθνούς βιβλιογραφίας

	Dmax		Dmin	
	90	75	90	50
2B	60	45	60	19.8
	15	11.6	15	4
	10	9.6	10	3.3
	2	10	2	0,075



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού φίλτρου ζώνης 3 όπως εκ νέου σχεδιάστηκε.

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του φίλτρου που σχεδιάσαμε (κόκκινη γραμμή) με το ήδη υπάρχον χονδρόκοκκο φίλτρο του φράγματος (μαύρη γραμμή).

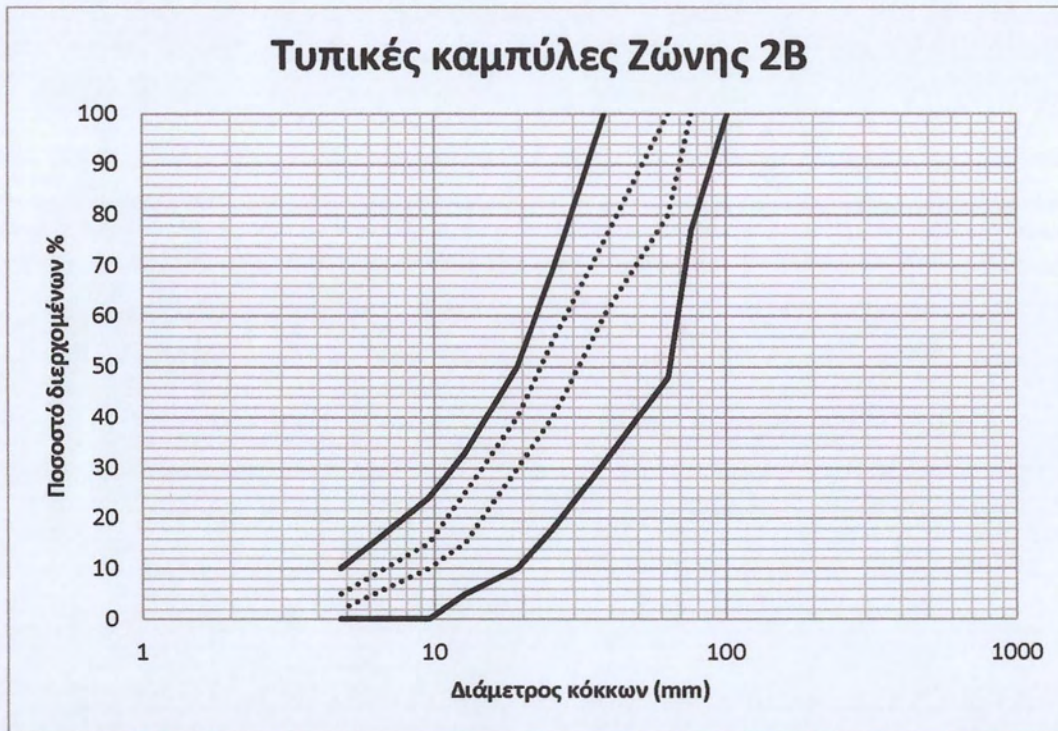


Σχήμα 2.14 Σύγκριση των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης του φίλτρου ζώνης 3 του φράγματος με το φίλτρο που εκ νέου σχεδιάστηκε.

Το υπάρχον φίλτρο φαίνεται να διαφοροποιείται στα εξής σημεία:

1. Στην ελάχιστη επιτρεπόμενη διάσταση για διερχόμενο ποσοστό 15% D_{15F} . Το υπάρχον φίλτρο έχει πολύ μικρότερη διάσταση σε σχέση με τη διάσταση που προκύπτει ώστε το φίλτρο να ικανοποιεί το κριτήριο της διαπερατότητας.
2. Για μέγιστη διάμετρο κόκκου $D_{10}=9.56\text{mm}$, σύμφωνα με το κριτήριο ομοιομορφίας, για την αποφυγή διαχωρισμού προτείνεται μέγιστη διάσταση κόκκου $D_{90}=50\text{mm}$, ενώ για το συγκεκριμένο φίλτρο χρησιμοποιείται $D_{90}=90\text{mm}$.

Τέλος συγκρίνουμε τις καμπύλες του φίλτρου 2B του φράγματος με τις προτεινόμενες από τον Ν.Ι. Μουτάφη καμπύλες. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες που προτείνει ο καθηγητής Μουτάφης στις σημειώσεις του «Τεχνολογία Γεωφραγμάτων» για το φίλτρο 2B, ενώ στο επόμενο γίνεται η σύγκριση των προτεινόμενων κοκκομετριών με τις υπάρχουσες κοκκομετρίες του φίλτρου του φράγματος.



Σχήμα 2.15 Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες φίλτρου ζώνης 3 (2B) όπως προτείνονται από τον καθηγητή Ν.Ι. Μουτάφη.



Σχήμα 2.16 Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών του φίλτρου του φράγματος με τις προτεινόμενες από τον Ν.Ι. Μουτάφη καμπύλες φίλτρου.

Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή φαίνονται οι περιβάλλουσες του φίλτρου που προτείνει ο Μουτάφης, ενώ με μαύρη γραμμή οι περιβάλλουσες του φίλτρου 2B του φράγματος. Παρατηρούμε ότι η λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του φίλτρου απέχει πολύ από την προτεινόμενη κυρίως για ποσοστά διερχομένων μικρότερα του 60%.

2.3.3 Κατασκευή των σωμάτων στήριξης

2.3.3.1 Γενικά

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής των σωμάτων στήριξης πρέπει να ληθφούν υπόψη τα εξής :

- ✓ **Το είδος του βράχου και ο βαθμός αποσάρθρωσης**
- ✓ **Το πάχος της στρώσης και τη μέγιστη διάμετρο κόκκου.**
Το πάχος στρώσης συμπίκνωσης είναι το ίδιο όσο η διάμετρος του μέγιστου κόκκου της λιθορριπής, και εξαρτάται από τη ζώνη και το είδος της λιθορριπής και την αντοχή.
- ✓ **Την κοκκομετρική διαβάθμιση της λιθορριπής και τον περιορισμό των λεπτόκοκκων υλικών.** Ιδανικά, η λιθορριπή πρέπει να είναι καλά διαβαθμισμένη και με πυκνή δομή ώστε να μπορεί να συγκρατεί το ανάχωμα, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να εμφανίζει υψηλή διαπερατότητα. Κατά τη συμπίκνωση όμως δημιουργούνται προβλήματα, καθώς οι βράχοι σπάνε και θρυμματίζονται. Έτσι, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το διερχόμενο ποσοστό κόκκων με διάμετρο 1.18mm να μην ξεπερνάει το 10%-15%, και κατά τη διαβροχή να μην σχηματίζονται λάκκοι με νερά στο ανώτερο τμήμα της στρώσης συμπίκνωσης.
- ✓ **Κατά την τοποθέτηση,** οι μεγαλύτεροι βράχοι πρέπει να τοποθετηθούν στο εξωτερικό τμήμα του αναχώματος. Ιδιαίτερα στο τμήμα επαφής με τη ζώνη του φίλτρου 2B πρέπει να αποφεύγεται η εναπόθεση μεγάλων λίθων προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα διαχωρισμού και να μην επηρεαστεί η κοκκομετρία του φίλτρου.
- ✓ **Η συμπίκνωση πρέπει να γίνεται με τουλάχιστον 4 διελεύσεις του δονητικού οδοστρωτήρα.**
- ✓ **Τη διαβροχή.** Η διαβροχή της λιθορριπής κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να διευκολύνεται η συμπίκνωση. Συνήθως η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται υπολογίζεται ως ποσοστό του όγκου της στρώσης.
- ✓ **Η πυκνότητα και ο λόγος κενών.** Κοινή απαίτηση σχεδιασμού αποτελεί η λιθορριπή να εμφανίζει πυκνότητα της τάξης των 2.1-2.2 tonnes/m³.

2.3.3.2 Περιγραφή της Λιθορριπής Ζώνη 4

Για τα σώματα στήριξης χρησιμοποιήθηκαν οι περιδοτίτες που βρίσκονται στα αντερείσματα γύρω από το φράγμα. Οι τεχνικές προδιαγραφές προέβλεπαν δύο ζώνες λιθορριπής 4a με μέγιστη διάμετρο κόκκου 0.9m και 4b με μέγιστη διάμετρο κόκκου το 1.5m. Τελικά, κατασκευάστηκε ενιαία ζώνη με τα ακόλουθα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Διάσταση	Ποσοστό διερχομένων κ.β.
25mm	<30%
10mm	<15%
0.75mm	<5%

Οι ανάντη και οι κατάντη παρειές των σωμάτων στήριξης κατασκευάστηκαν από τα ισχυρότερα τεμάχια περιδοτίτη και ασβεστόλιθου. Τα τεμάχια αυτά προβλεπόταν να είναι μεγέθους μεγαλύτερου από 0.8m. Πιο συγκεκριμένα η ανάντη παρεία επενδύθηκε με ογκόλιθους 1m για την προστασία του φράγματος από τους κυματισμούς του ταμιευτήρα και από τις αποπλύσεις λόγω μεταβολής της στάθμης του.

Η συμπύκνωση έγινε σε στρώσεις του 1m, με 4 διελεύσεις δονητικού οδοστρώτηρα και προσθήκη νερού σε αναλογία 200 l/m³.

Για τις αναλύσεις του φράγματος μπορούν αν χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι παράμετροι.

- Ξηρό ειδικό βάρος : $\gamma=25\text{KN/m}^2$
- Συνοχή : $c'=0$
- Γωνία Τριβής : $\varphi'=42^\circ$
- Διαπερατότητα : $k=2.67 \cdot 10^{-1} \text{ cm/sec}$
- Πυκνότητα : 2.53 t/m^3

Από τα δεδομένα του μητρώου υλικών του φράγματος προκύπτει ότι η λιθορριπή έχει ευρεία κοκκομετρική διαβάθμιση και πληρωμένη δομή. Πληροί πλήρως τις προδιαγραφές και είναι πολύ καλής ποιότητας.

2.4 Απόκριση του έργου κατά την κατασκευή και πρώτη πλήρωση.

2.4.1 Πιέσεις πόρων

Κατά την κατασκευή του έργου και μέχρι ονομαστική πίεση υπερκειμένων 1500kN/m^2 δεν αναπτύχθηκαν πιέσεις πόρων, πράγμα που οφείλεται πιθανότατα σε χαμηλό βαθμό κορεσμού κατά τη διάστρωση του πυρήνα, ενώ από πίεση υπερκειμένων 1500kN/m^2 και άνω παρατηρήθηκε αύξηση των πιέσεων πόρων, οι οποίες στη συνέχεια εκτονώθηκαν με αργό ρυθμό, λόγω στερεοποίησης του πυρήνα, που υποδεικνύει χαμηλή υδροπερατότητα.

Κατά την κατάκλυση, στους πρώτους τέσσερις μήνες δεν παρουσιάστηκε μεταβολή στα πιεσόμετρα του πυρήνα, ενώ στη συνέχεια τα πιεσόμετρα κοντά στο επίπεδο θεμελίωσης παρουσίασαν άνοδο των πιέσεων πόρων, ακολουθώντας με κάποια υστέρηση τις αυξομειώσεις της στάθμης του ταμιευτήρα, χωρίς να επηρεαστούν τα πιεσόμετρα των ανώτερων στοιβάδων. Η υστερημένη απόκριση των πιεσομέτρων κοντά στη στάθμη θεμελίωσης οφείλεται στο χαμηλό βαθμό κορεσμού του πυρήνα και τη διείδυση μετώπου υγρασίας σε αυτόν. Οι ενδείξεις των οργάνων στη θεμελίωση είναι συμβατές με την ανάπτυξη μακροχρόνιου δικτύου ροής.

Στα πιεσόμετρα του κατάντη φίλτρου δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές, όπως αναμενόταν.

Η συμπεριφορά, λοιπόν, του πυρήνα κρίθηκε φυσιολογική χωρίς να υποδεικνύονται προβλήματα.

Τα πιεσόμετρα της θεμελίωσης κατέγραψαν μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε πιεσομετρική στάθμη 20 με 30m χαμηλότερη από αυτή του ταμιευτήρα. Παρά το γεγονός ότι οι συνθήκες δεν είναι ομοιόμορφες, έλεγχοι στις πιέσεις της θεμελίωσης έδειξαν συμβατότητα με το αναμενόμενο δίκτυο ροής.

2.4.2 Παραμορφώσεις

Τα μηκυνσιόμετρα έδειξαν μικρές εφελκυστικές παραμορφώσεις κατά την κατασκευή και την περίοδο ανάπαυσης του αναχώματος, με τάση σταθεροποίησης πριν την έναρξη της κατάκλυσης. Κατά την έναρξή της και μέχρι την πλήρωση του ταμιευτήρα σημειώθηκε αύξηση των τιμών των εφελκυστικών παραμορφώσεων της τάξεως περίπου του 0,1%.

Τα βάθρα ελέγχου επιφανειακών μετακινήσεων έδειξαν μετά το πέρας της κατασκευής καθίζηση στη στέψη και πλευρική εξάπλωση εγκάρσια στον άξονα

του φράγματος. Η μέγιστη καθίζηση στη στέψη από το πέρας της κατασκευής μέχρι και τον Οκτώβριο του 2004, ήταν 50cm.

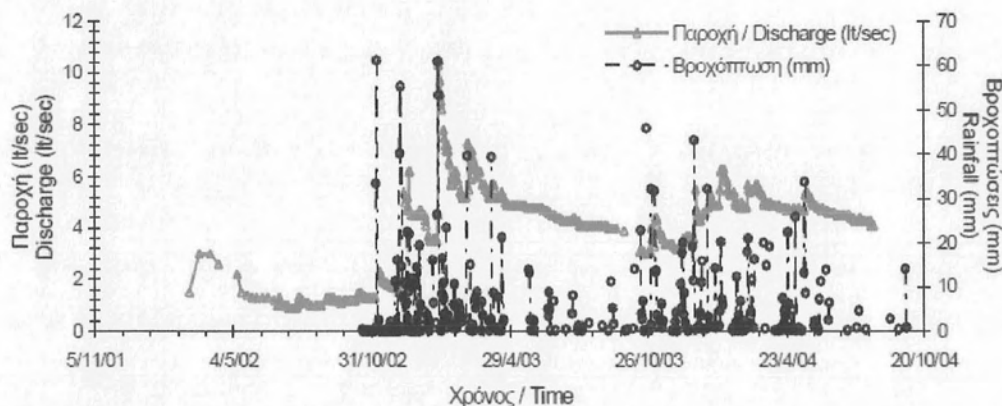
Όσον αφορά την πλευρική εξάπλωση, η κατάντη πλευρά κινήθηκε προς τα κατάντη κατά 7cm μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, ενώ στην ανάντη πλευρά παρατηρήθηκε μικρή μετακίνηση κάποιων βάθρων προς τα ανάντη και κάποιων άλλων προς τα κατάντη. Κατά τα 2 έτη πλήρωσης του ταμιευτήρα σημειώθηκε μετακίνηση των ανάντη βάθρων της στέψης 5cm προς τα ανάντη και των κατάντη βάθρων 6cm προς τα ανάντη.

Η συνολική καθίζηση που έχει υποστεί το ανάχωμα του φράγματος ανέρχεται στο 0,5% του συνολικού ύψους του. Η υπερύψωση που έχει κατασκευαστεί για την αντιμετώπιση των καθιζήσεων είναι το 2% του ύψους του φράγματος.

2.4.3 Διηθήσεις

Για την μέτρηση των διηθήσεων, κατασκευάστηκε διάταξη συλλογής και μέτρησης των συνολικών διηθήσεων δια μέσου του φράγματος και της θεμελίωσης λίγο κατάντη του πόδα του φράγματος.

Από τις μετρήσεις που έγιναν, φαίνεται ότι η παροχή παρουσιάζει διακύμανση ανάλογη των βροχοπτώσεων, δεδομένου ότι στη διάταξη καταλήγουν και τα στραγγίσματα των αντρεισμάτων. Τον Οκτώβριο του 2003 η παροχή που μετρήθηκε ήταν 3.2 lt/sec. Οι παροχές που μετρήθηκαν θεωρήθηκαν απολύτως φυσιολογικές για το μέγεθος του φράγματος.



Σχήμα 2.17 Διάγραμμα μετρήσεων διηθήσεων στον πόδα του φράγματος σε συσχέτιση με τη βροχόπτωση. (Πηγή: http://library.tee.gr/digital/m2134/m2134_dounias5.pdf)

Κατά την επίσκεψη που πραγματοποιήθηκε στο φράγμα για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής εργασίας έγινε εκ νέου μέτρηση των διηθήσεων και η παροχή που υπολογίστηκε ήταν 4.4 lt/sec. Η λεκάνη όμως συλλογής των

διηθήσεων έχει φραχτεί από βλάστηση και φερτά υλικά, οπότε η μέτρηση δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.



Σχήμα 2.18 Εκόνα από τη διάταξη μέτρηση διαρροών στον πόδα του φράγματος στην τωρινή της κατάσταση.

Το φράγμα βρίσκεται σε λειτουργία εδώ και 12 χρόνια, από τον Ιούλιο του 2002 οπότε και ξεκίνησε η κατάκλυση του ταμιευτήρα. Σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις των Γ. Καραβοκύρης και Γ. Ντουνιάς σχετικά την συμπεριφορά του αναχώματος κατά την πρώτη πλήρωση και δύο χρόνια μετά αυτής, το φράγμα συμπεριφέρθηκε ικανοποιητικά.

2.5 Ευστάθεια Πρανών

2.5.1 Γενικά

Ο έλεγχος ευστάθειας πρανών γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Οριακής Ισορροπίας (Limit Equilibrium Analysis). Η μέθοδος της οριακής ισορροπίας μελετά την ισορροπία μάζας σώματος η οποία τείνει να κινηθεί υπό την επίδραση μαζικών δυνάμεων ή/και εξωτερικών φορτίων. Θεωρείται επιφάνεια αστοχίας κυκλική ή μη-κυκλική και ο συντελεστής ασφαλείας F προκύπτει ως ο λόγος της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης προς την αντοχή που ενεργοποιείται λόγω της φόρτισης από το ίδιο βάρος του εδάφους και των εξωτερικών φορτίων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευκολίας των υπολογισμών και του μειωμένου αριθμού παραγόντων που χρειάζονται για την ανάλυση. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Η τοπογραφία και η γεωμετρία του πρανούς
- Η γεωλογία και οι γεωτεχνικοί παράγοντες μηχανικής αντοχής του εδάφους
- Τα στατικά και δυναμικά φορτία
- Και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα-ανάπτυξη πιέσεων πόρων στο εσωτερικό του πρανούς.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται ενιαίος για όλο το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι συντοριακές συνθήκες του προβλήματος και η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

Υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, οι πιο διαδεδομένες είναι αυτές του Fellenius και του Bishop, λόγω της ευκολίας των υπολογισμών. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι πιο γνωστές μεθοδολογίες και τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 2.9 Σύγκριση μεθόδων Οριακής Ισορροπίας για την ευστάθεια πρανών

Μέθοδος	Χαρακτηριστικά
Μέθοδος Λωρίδων κατά Fellenius	Δεν λαμβάνει υπόψη της τις εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας μεταξύ των λωρίδων και στηρίζεται αποκλειστικά στον περιορισμό των ροπών ανατροπής.
Απλοποιητική Μέθοδος Bishop	Θεωρεί τις εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας μηδέν. Η λύση προέρχεται από ισορροπία κατακόρυφων δυνάμεων και ισορροπία ροπών, ενώ δεν ικανοποιείται η ισορροπία οριζόντων δυνάμεων. Μπορεί να εφαρμοστεί για

	κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης μόνο.
Γενικευμένη μέθοδος Janbu	Ικανοποιεί όλες τις εξισώσεις ισορροπίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιασδήποτε γεωμετρίας επιφάνεια ολίσθησης.
Μέθοδος των Morgenstern και Price	Ικανοποιεί όλες τις εξισώσεις ισορροπίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιασδήποτε γεωμετρίας επιφάνεια ολίσθησης.
Μέθοδος Spencer	Ικανοποιεί όλες τις εξισώσεις ισορροπίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιασδήποτε γεωμετρίας επιφάνεια ολίσθησης.

2.5.2 Έλεγχος Ευστάθειας Χωμάτινου Φράγματος

Η ευστάθεια του φράγματος ελέγχεται με τη μελέτη ευστάθειας πρανών (ανάντη και κατάντη), λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές συνθήκες καταπόνησης, από το ίδιο βάρος των υλικών, τα εξωτερικά φορτία νερού, τις εσωτερικές πιέσεις πόρων και τέλος από τα δυναμικά φορτία πιθανής σεισμικής δραστηριότητας. Συνήθως ελέγχεται μόνο η μέγιστη διατομή εκτός και αν διαφοροποιείται η θεμελίωση του αναχώματος μεταξύ κοίτης και αντρεϊσμάτων, οπότε απαιτείται ο έλεγχος διατομών κοντά στα αντρεϊσμάτα.

Η διερεύνηση της ευστάθειας του φράγματος καλύπτει τις ακόλουθες συνθήκες καταπόνησης:

- Πέρασ της κατασκευής του αναχώματος
- Σταθερή ροή διήθησης νερού στον πυρήνα του φράγματος
- Απότομο καταβιβασμό στάθμης του ταμιευτήρα, από μέγιστη σε ελάχιστη.

Συνθήκη Πέρατος Κατασκευής

Η συνθήκη πέρατος κατασκευής αναφέρεται στην κατάσταση που εμφανίζεται μετά την ολοκλήρωση κατασκευής τους φράγματος και πριν αρχίσει η πλήρωση του ταμιευτήρα. Κρίσιμο σημείο σε αυτή την περίπτωση αποτελούν οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στο πυρήνα από το βάρος των υπερκειμένων υλικών. Συνήθως γίνεται η παραδοχή ότι οι πιέσεις πόρων στον πυρήνα αναπτύσσονται χωρίς αποστράγγιση και στερεοποίηση του υλικού κατά τη διάρκεια κατασκευής. Αναλύσεις ευστάθειας γι αυτήν την κατάσταση δεν πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

Σταθερή Ροή Διήθησης (Πλήρης Ταμιευτήρας)

Για τις αναλύσεις ευστάθειας υπό σταθερή ροή διήθησης διαμέσου του πυρήνα του φράγματος, θεωρείται ότι οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια κατασκευής στον πυρήνα έχουν αποσβεστεί και ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως δίκτυο ροής, σε ολόκληρη την επιφάνεια διατομής του πυρήνα.

Το ανάντη πρανές διερευνάται για την Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας καθώς και για ενδιάμεσες στάθμες νερού. Συνήθως ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας προκύπτει για στάθμη ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στα 2/3 του μέγιστου ύψους νερού. (Μουτάφης)

Το κατόντη πρανές ελέγχεται με στάθμη νερού στο κατόντη κέλφος που αντιστοιχεί σε χαμηλή στάθμη νερού κατόντη. Και τα δύο πρανή ελέγχονται σε σεισμό.

Απότομος Καταβιβασμός της Στάθμης

Η συνθήκη αυτή αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία η στάθμη του ταμιευτήρα καταβιβάζεται απότομα από την μέγιστη στάθμη λειτουργίας του στην ελάχιστη (στάθμη εκκενωτή πυθμένα). Οι έλεγχοι ευστάθειας περιορίζονται μόνο στο ανάντη πρανές του αναχώματος.

Κατά τη διερεύνηση της ευστάθειας σε συνθήκες απότομου καταβιβασμού της στάθμης λαμβάνεται η κατανομή των πιέσεων πόρων που αντιστοιχεί σε συνθήκες σταθερής ροής διήθησης για την ανώτατη στάθμη ταμιευτήρα, καθώς λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του υλικού πυρήνα δεν είναι δυνατόν να ακολουθήσει την πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα.

Συνήθως δεν εξετάζεται η σεισμική επιβάρυνση, καθώς θεωρείται ουσιαστικά απίθανο να συμπίσει χρονικά σεισμικό φαινόμενο με απότομο καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα.

2.5.3 Ανάλυση Ευστάθειας Χωμάτινου φράγματος σε Σεισμό

2.5.3.1 Γενικά

Για την ανάλυση ευστάθειας φραγμάτων σε σεισμό υπάρχει μεγάλο εύρος μεθόδων που κυμαίνονται από απλές αναλύσεις οριακής ισορροπίας έως αριθμητικά μοντέλα αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση ευστάθειας μπορεί να γίνει:

- Με ψευδοστατική ανάλυση
- Απλουστευμένη εκτίμηση μετατοπίσεων πρανών
- Αριθμητική ανάλυση ολικών ή ενεργών τάσεων

Οι τρεις μέθοδοι διαφέρουν σημαντικά ως προς την ακρίβεια προσομοίωσης της εδαφικής συμπεριφοράς και κατ' επέκταση της απόκρισης του φράγματος. Η πιο ακριβής είναι η αριθμητική μέθοδος τάσεων παραμορφώσεων η οποία γίνεται με τη χρήση δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος επιδιώκει να προσομοιώσει τη μη γραμμική συμπεριφορά του φράγματος κατά το σεισμό χρησιμοποιώντας πολύπλοκα καταστατικά προσομοιώματα των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών. Οι άλλες δύο μέθοδοι είναι λιγότερο ακριβείς, ωστόσο η ευκολία των υπολογισμών τις καθιστά εύχρηστες. Σε περιπτώσεις που ο η ευστάθεια δεν εξασφαλίζεται με τη χρήση της ψευδοστατικής ανάλυσης ή της μεθόδου των μονίμων μετακινήσεων απαιτείται ο έλεγχος του αναχώματος του φράγματος με την αριθμητική μέθοδο. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ο έλεγχος ευστάθειας του αναχώματος σε σεισμό έγινε με τη χρήση της ψευδοστατικής ανάλυσης.

2.5.3.2 Ψευδοστατική ανάλυση

Στόχος της ψευδοστατικής ανάλυσης είναι ο υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας έναντι σεισμικής αστοχίας του πρανούς. Η καταπόνηση του φράγματος αναπαριστάται με τη χρήση εσωτερικών αδρανειακών δυνάμεων (ψευδοστατικές δυνάμεις) που ασκούνται στο κέντρο βάρους του πρανούς. Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Οι αδρανειακές δυνάμεις (S) προκαλούνται από τη σεισμική δόνηση και ισούνται με το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας (W) επί ένα σεισμικό συντελεστή (ε).

$$F_v = \frac{a_v * W}{g} * \varepsilon_v$$

$$F_h = \frac{a_h * W}{g} * \varepsilon_h$$

Όπου:

F_v : Η κατακόρυφη ψευδοστατική δύναμη

a_v : η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής επιτάχυνσης

ε_v : ο σεισμικός συντελεστής για την κατακόρυφη διεύθυνση

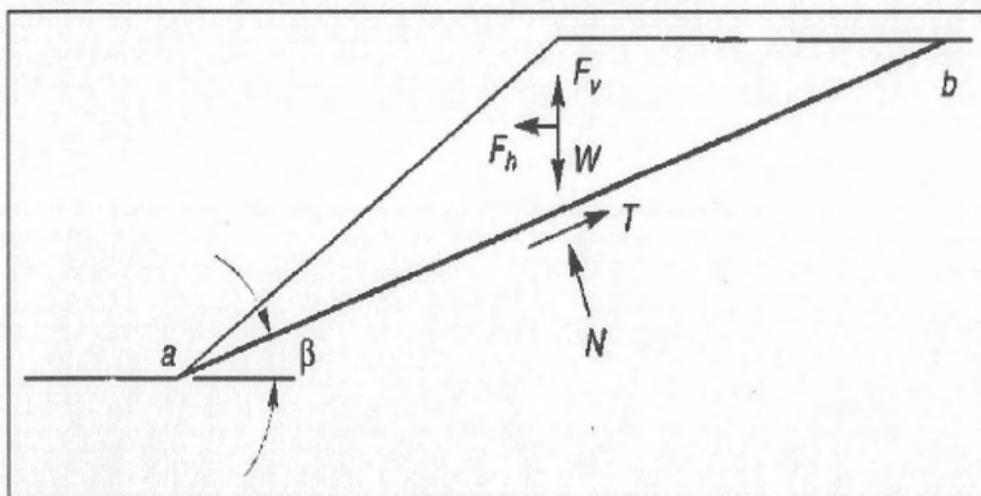
F_h : Η οριζόντια ψευδοστατική δύναμη

a_h : η οριζόντια συνιστώσα της εδαφικής επιτάχυνσης

ε_h : ο σεισμικός συντελεστής για την οριζόντια διεύθυνση

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

W : το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας



Ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται κατ' αντιστοιχία με τον στατικό συντελεστή ως:

$$FS = \frac{\text{δύναμη αντίστασης έναντι ολίσθησης}}{\text{δύναμη ολίσθησης}}$$

Λαμβάνοντας υπόψη μας το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi'$$

Ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει ως εξής:

$$FS = \frac{c * L_{ab} + [(W - F_v) * \cos \beta - F_h * \sin \beta] * \tan \varphi}{(W - F_v) * \sin \beta + F_h * \cos \beta}$$

Όπου L_{ab} : το μήκος της επιφάνειας αστοχίας

Από την παραπάνω σχέση εύκολα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της οριζόντιας ψευδοστατικής δύναμης, F_h , οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ασφαλείας, και ότι η κατακόρυφη δύναμη δεν έχει την ίδια επίδραση με την οριζόντια, καθώς επιδρά ισόποσα στις δυνάμεις αντίστασης και ολίσθησης. Κατά συνέπεια, μπορεί να αγνοηθεί χωρίς να υπάρχουν συνέπειες για την ανάλυση.

Σημαντικό ρόλο, τέλος, παίζει ο σεισμικός συντελεστής που θα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ψευδοστατικών δυνάμεων, καθώς θα πρέπει να αντικατοπτρίζει πλήρως την ταλάντωση της ολισθαίνουσας μάζας για το σεισμό σχεδιασμού. Αν η ολισθαίνουσα μάζα ήταν άκαμπτη η τιμή του σεισμικού συντελεστή θα μπορούσε να συσχετισθεί με τη μέγιστη επιτάχυνση a_{max} . Η ολισθαίνουσα μάζα, όμως, δεν είναι άκαμπτη και τα σημεία της δεν ταλαντώνονται σε φάση, οπότε προτείνεται να επιλέγονται μικρότερες τιμές του σεισμικού συντελεστή που κυμαίνονται μεταξύ 33% και 50% της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ενώ το τμήμα Corps of Engineers προτείνει και την

παράλληλη μείωση των τιμών αντοχής των υλικών κατά 20% λόγω αύξησης της πίεσης πόρων κατά τη διάρκεια του σεισμού.

Για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής ο σεισμικός συντελεστής που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με τη χρήση της ψευδοστατικής ανάλυσης είναι $\xi=0.15$. Λόγω έλλειψης στοιχείων, δεν υπήρχε η δυνατότητα εκ νέου υπολογισμού του σεισμικού συντελεστή και έτσι επιλέχθηκε η τιμή που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις ευστάθειας κατά την κατασκευή του έργου.

Ελέγχθηκαν το ανάντη και κατόντη πρανές για συνθήκες πλήρους ταμιευτήρα.

2.5.4 Συντελεστής ασφαλείας

Ως συντελεστής ασφαλείας για μια δεδομένη επιφάνεια ολίσθησης ορίζεται ο λόγος της διαθέσιμης προς την ενεργοποιημένη διατμητική αντοχή του υλικού κατά μήκος της επιφάνειας και συμβολίζεται ως FS(Factor of Safety). Η επιφάνεια που δίνει το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας.

Ο συντελεστής ασφαλείας θεωρείται ότι παρέχει τα απαραίτητα περιθώρια ασφάλειας για πιθανές ανακρίβειες των υπολογισμών ευστάθειας, του προσδιορισμού της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και των εκτιμήσεων για την αντοχή των υλικών του πρανούς.

Οι ελάχιστες αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες συνθήκες ελέγχου των πρανών χωμάτινων φραγμάτων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.10 Αποδεκτές τιμές συντελεστή ασφαλείας για τις διάφορες καταστάσεις ελέγχου της ευστάθειας των πρανών φράγματος.

Συνθήκη	Ελάχιστος αποδεκτός FS χωρίς σεισμό	Ελάχιστος αποδεκτός FS με σεισμό
Πέρασ κατασκευής	1.3	1.00
Σταθερή ροή διήθησης(Πλήρης Ταμιευτήρας)	1.5	1.00
Απότομος Καταβιβασμός Στάθμης	1.2	1.00

2.5.5 Αναλύσεις Ευστάθειας Φράγματος Σμοκόβου υπό στατικές φορτίσεις

Για τις αναλύσεις ευστάθειας του αναχώματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Slide 6.0 της Rocscience. Πρόκειται για πρόγραμμα που εκτελεί αναλύσεις ευστάθειας φυσικών ή τεχνητών πρανών δύο διαστάσεων με τη μέθοδο της Οριακής Ισορροπίας. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε έναν αριθμό διαθέσιμων μεθοδολογιών, καθώς και τη μορφή της επιφάνειας αστοχίας.

Στο πρόγραμμα χαράχθηκε η γεωμετρία της μεσαίας, και μεγαλύτερης, διατομής του φράγματος, εφόσον δεν κρίθηκε απαραίτητο να ελεγχθούν και άλλες διατομές, και ορίστηκαν τα υλικά της διατομής και οι ιδιότητές τους. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που προτείνονται στο μητρώο καταγραφής των υλικών του φράγματος και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.11 Μηχανικές ιδιότητες των υλικών του φράγματος που χρησιμοποιούνται κατά τις αναλύσεις.

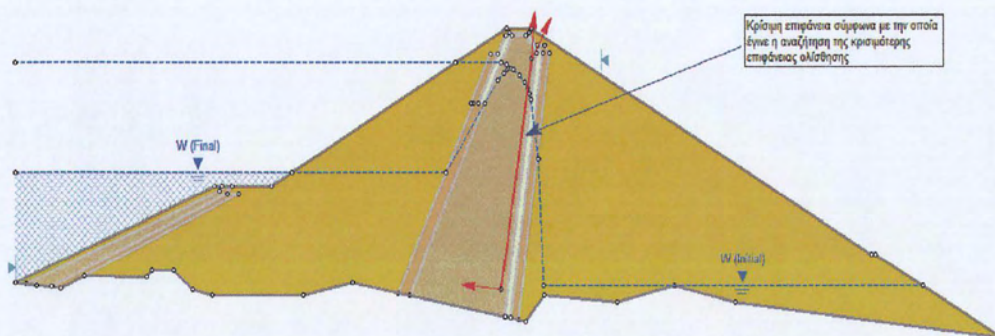
Ζώνη	Ξηρό φαινόμενο Βάρος γ_s (KN/m ³)	Συνοχή c(KN/m ²)	Γωνία Τριβής ϕ
Πυρήνας	16,95	10	25°
Λεπτόκοκκο Φίλτρο	22,5	0	38°
Χονδρόκοκκο Φίλτρο	22,5	0	38°
Λιθορριπή	25	0	42°

2.5.5.1 Ανάντη πρανές

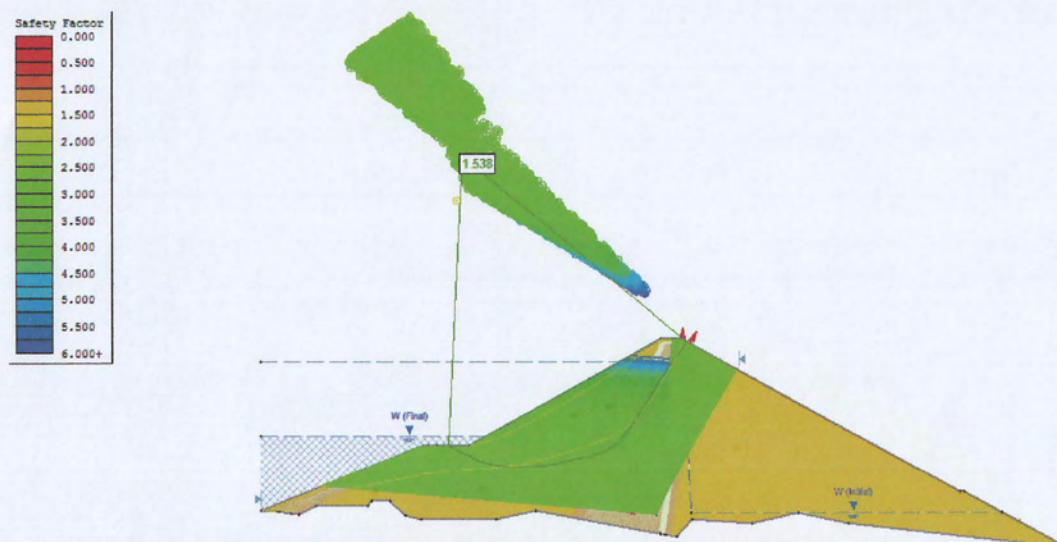
Το ανάντη πρανές ελέγχθηκε σε συνθήκες απότομου καταβιβασμού της στάθμης και σε συνθήκες σταθερής ροής διήθησης διαμέσου του πυρήνα του φράγματος. Για τη συνθήκη σταθερής ροής διήθησης το πρανές ελέγχθηκε για πλήρη ταμειυτήρα. Στην περίπτωση των αναλύσεων για απότομο καταβιβασμό της στάθμης το πρανές ελέγχθηκε για πτώση νερού από τα +375m (Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας) στα +322m (Στάθμη εκκενωτή πυθμένα) σε απόλυτα υψόμετρα.

Λόγω της κλίσης του πυρήνα προς τα ανάντη επιλέχθηκε η ανάλυση ευστάθειας να γίνει για μη-κυκλικές επιφάνειες αστοχίας παράλληλες προς την κλίση του πυρήνα. Για σύγκριση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων η ανάλυση έγινε με τη χρήση των μεθοδολογιών Spencer, Morgenstern & Price και Janbu. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το ανάντη πρανές φαίνονται παρακάτω.

2.5.5.1.α Συνθήκη Απότομου καταβιβασμού της στάθμης

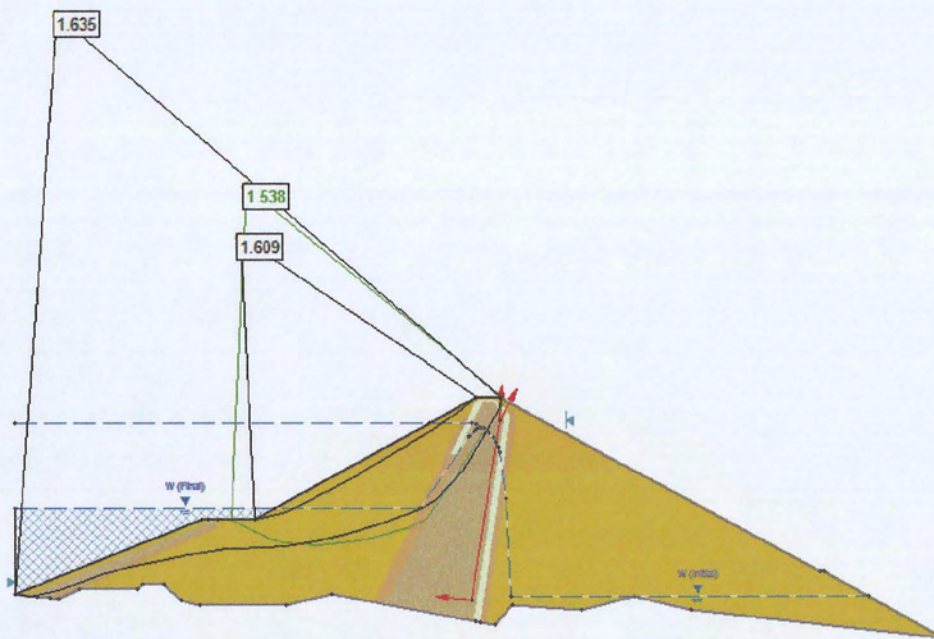


Σχήμα 2.19 Διατομή A-A του φράγματος η οποία χρησιμοποιείται στους ελέγχους ευστάθειας



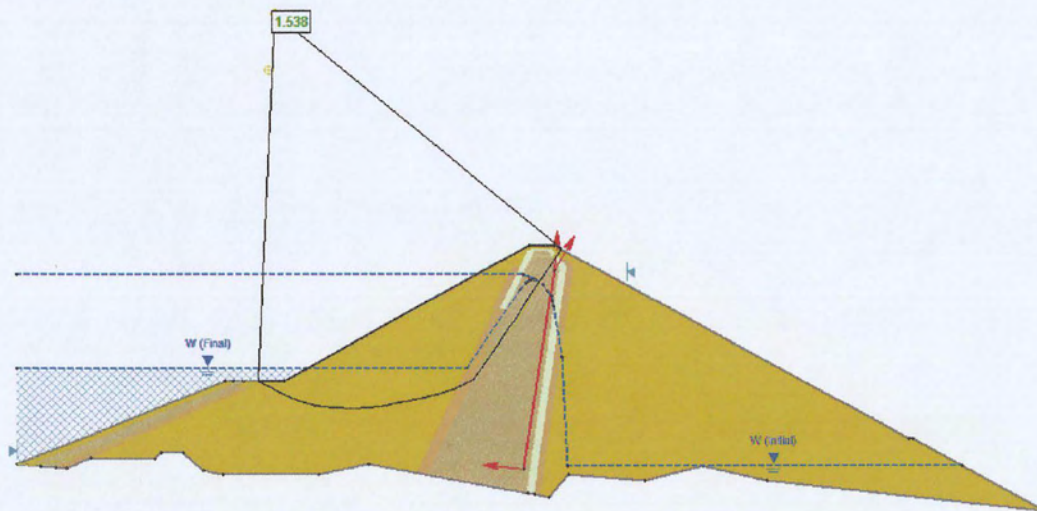
Σχήμα 2.20 Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και λοιπές επιφάνειες

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται όλες οι πιθανές επιφάνειες αστοχίας που ελέγχθηκαν. Με πράσινο χρώμα φαίνονται όσες επιφάνειες έχουν συντελεστή ασφαλείας από 2 έως 3. Υπάρχουν μόνο 3 επιφάνειες ολίσθησης που παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του δύο (2) και φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 2.21 Οι κρίσιμότερες επιφάνειες αστοχίας με τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας.

Ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε έχει τιμή $FS=1.53$ τιμή οριακά αποδεκτή. Οι άλλες δύο επιφάνειες δίνουν συντελεστή ασφαλείας $FS=1.609$ (αντιστοιχεί μάλιστα σε επιφανειακό κύκλο αστοχίας) και $FS=1.635$ αντίστοιχα.



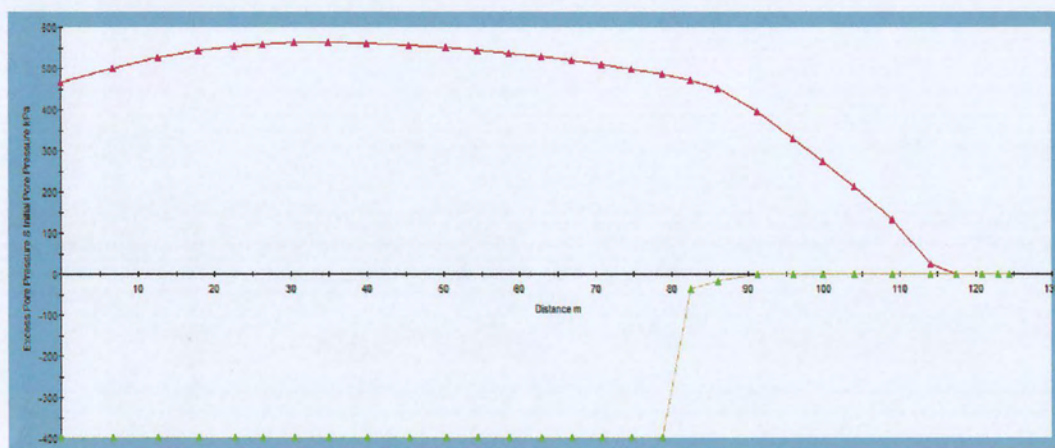
Σχήμα 2.22 Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας

Για τις ανάγκες της ανάλυσης τα υλικά των ζωνών του πυρήνα, του φίλτρου και η λιθορριπή για στραγγιζόμενες συνθήκες (ενεργές τάσεις). Ο υπολογισμός των πιέσεων πόρων του πρανούς έγινε με βάση την απόσταση από τη φρεάτια

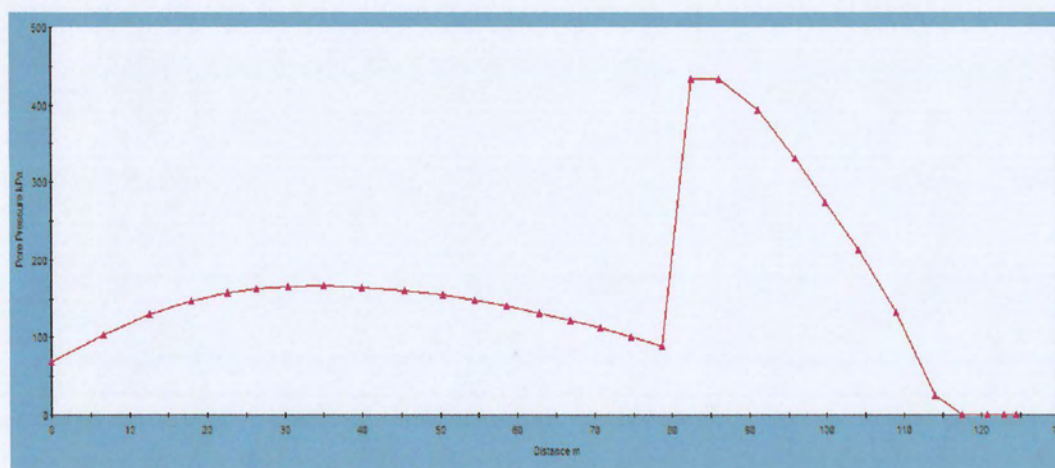
επιφάνεια, και οι μεταβολές των πιέσεων υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του συντελεστή B κατά Skempton (1954) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta u = B * \Delta \sigma_v$$

Για το πυρήνα του φράγματος η τιμή του B, έχει προσδιοριστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών και έχει τιμή $B=0.45$. Οι τελική τιμή των πιέσεων πόρων υπολογίζεται ως το άθροισμα των αρχικών πιέσεων με τις πιέσεις που προκύπτουν λόγω μεταβολής της στάθμης. Στη συνέχεια φαίνονται τα διαγράμματα πιέσεων πόρων για την κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης.



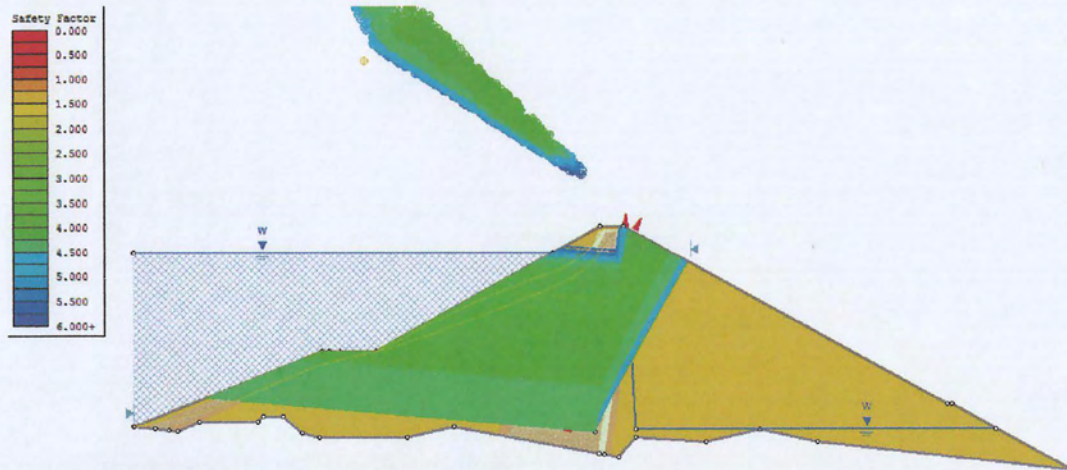
Σχήμα 2.23 Πιέσεις πόρων κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας. Στο πάνω διάγραμμα φαίνονται οι μεταβολές τους κατά το καταβιβασμό της στάθμης και στο κάτω οι αρχικές πιέσεις πόρων.



Σχήμα 2.24 Αρχικές πιέσεις πόρων κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας

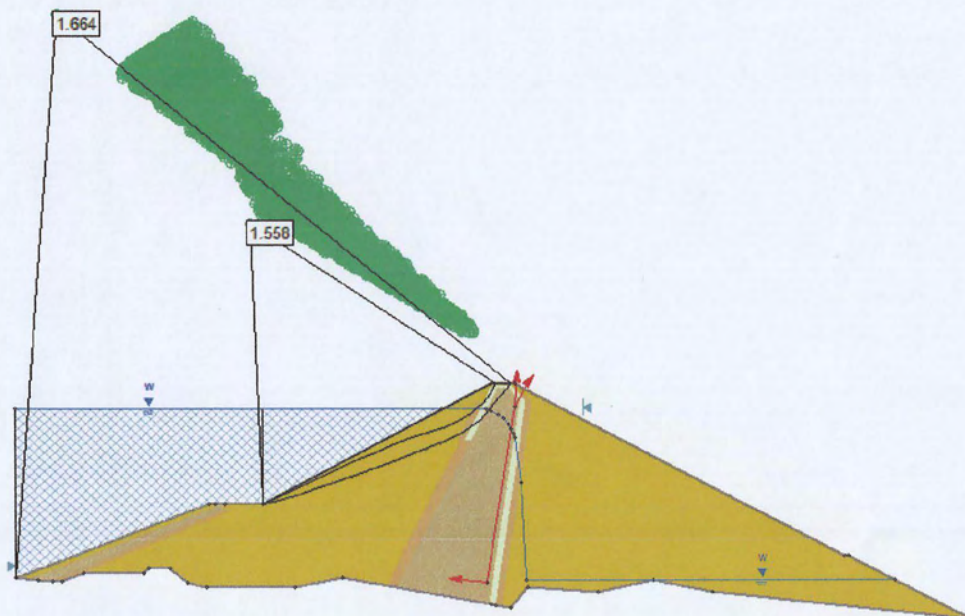
2.5.5.1.β Συνθήκη Σταθερής Ροής Διήθησης

Για συνθήκες σταθερής ροής διήθησης το ανάντη πρανές ελέγχθηκε για πλήρη ταμειυτήρα, στάθμη νερού ίση με την Ανώτερη Στάθμη Λειτουργίας +375m απόλυτο υψόμετρο. Η ανάλυση έγινε σε ενεργές τάσεις.



Σχήμα 2.25 Συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν για συνθήκες λειτουργίας πλήρους ταμειυτήρα.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, με εξαίρεση δύο επιφάνειες που εμφανίζουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του δύο, οι υπόλοιπες επιφάνειες δίνουν συντελεστές ασφαλείας μεγαλύτερους του τέσσερα (4).



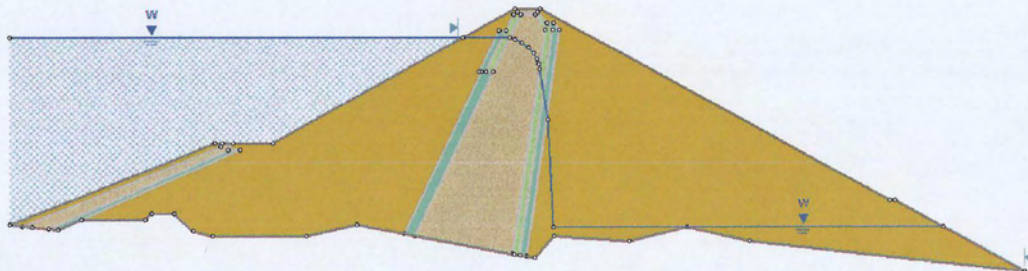
Σχήμα 2.26 Κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας και οι αντίστοιχοι συντελεστές για συνθήκες πλήρους ταμειυτήρα

Παραπάνω φαίνονται οι δύο επιφάνειες ολίσθησης που δίνουν τους χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας $FS=1.558$ και $FS= 1.664$ αντίστοιχα, συντελεστές αποδεκτοί για την κατάσταση που εξετάζεται.

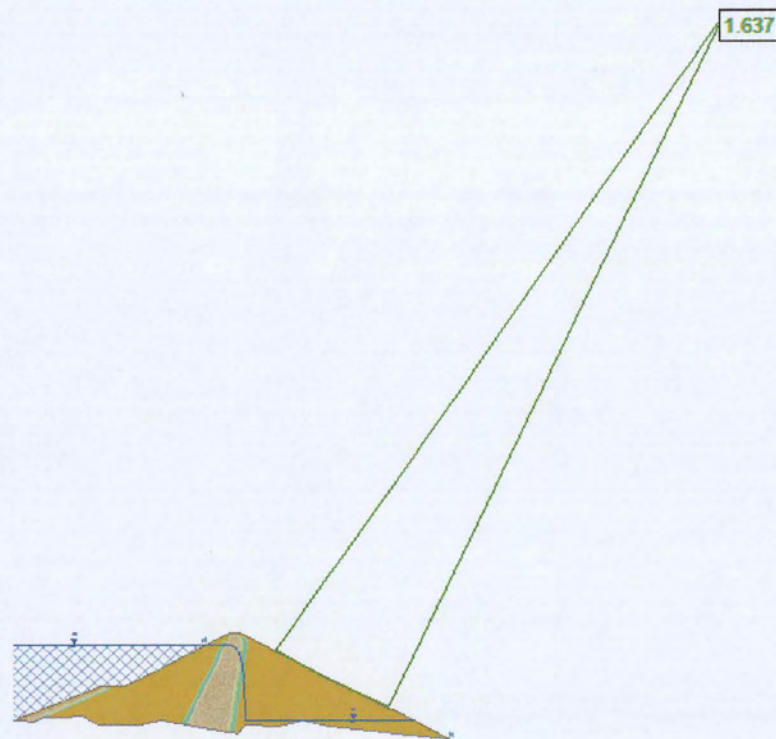
2.5.5.2 Κατάντη πρανές

Το κατάντη πρανές ελέγχθηκε σε συνθήκες σταθερής ροής διήθησης διαμέσου του πυρήνα για στάθμη νερού ίση με την Ανώτατη Στάθμη λειτουργίας, +375m απόλυτο υψόμετρο. Οι αναλύσεις έγιναν για κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης και χρησιμοποιήθηκαν οι μεθοδολογίες των Janbu και Bishop. Η ανάλυση έγινε σε ενεργές τάσεις.

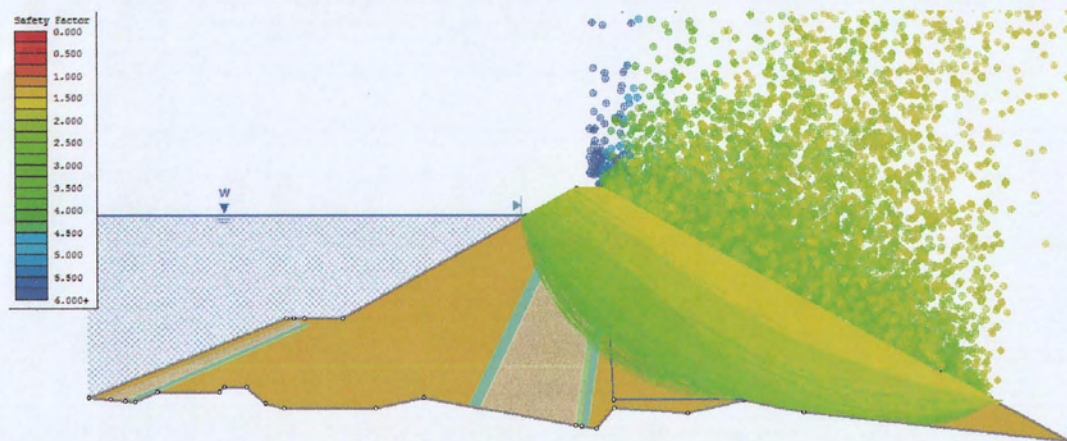
Στα επόμενα σχήματα φαίνονται η γεωμετρία και η διατομή η οποία ελέγχθηκε και τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 2.27 Γεωμετρία διατομής A-A η οποία χρησιμοποιήθηκε για τους ελέγχους ευστάθειας του κατάντη πρανούς.



Σχήμα 2.28 Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας για το κατάντη πρανές για συνθήκες πλήρους ταμειυτήρα



Σχήμα 2.29 Όλες οι επιφάνειες ολίσθησης και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας του κατάντη πρανούς για συνθήκες πλήρους ταμειυτήρα.

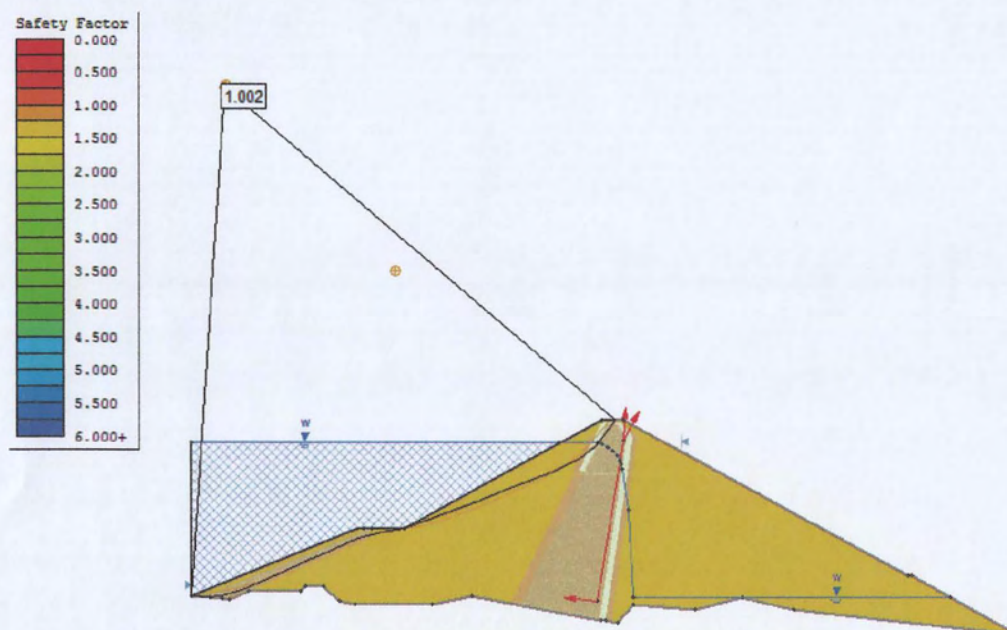
Όπως προκύπτει ο μικρότερος συντελεστής ασφαλείας αντιστοιχεί σε επιφανειακό κύκλο αστοχίας και έχει τιμή $FS=1.637$. Οι υπόλοιπες επιφάνειες ολίσθησης δίνουν συντελεστές ασφαλείας μεγαλύτερους του 1.6 όπως φαίνεται και παραπάνω.

2.5.6 Αναλύσεις Ευστάθειας φράγματος Σμοκόβου υπό σεισμικό φορτίο

Σε σεισμό ελέγχθηκαν και τα δύο πρανή, για συνθήκες πλήρους ταμιευτήρα. Ο σεισμικός συντελεστής που επιλέχθηκε ήταν $\varepsilon=0.15$.

2.5.6.α Ανάντη πρανές

Κατά την ανάλυση του ανάντη πρανούς σε σεισμό προέκυψε συντελεστής ασφαλείας ίσος με τη μονάδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

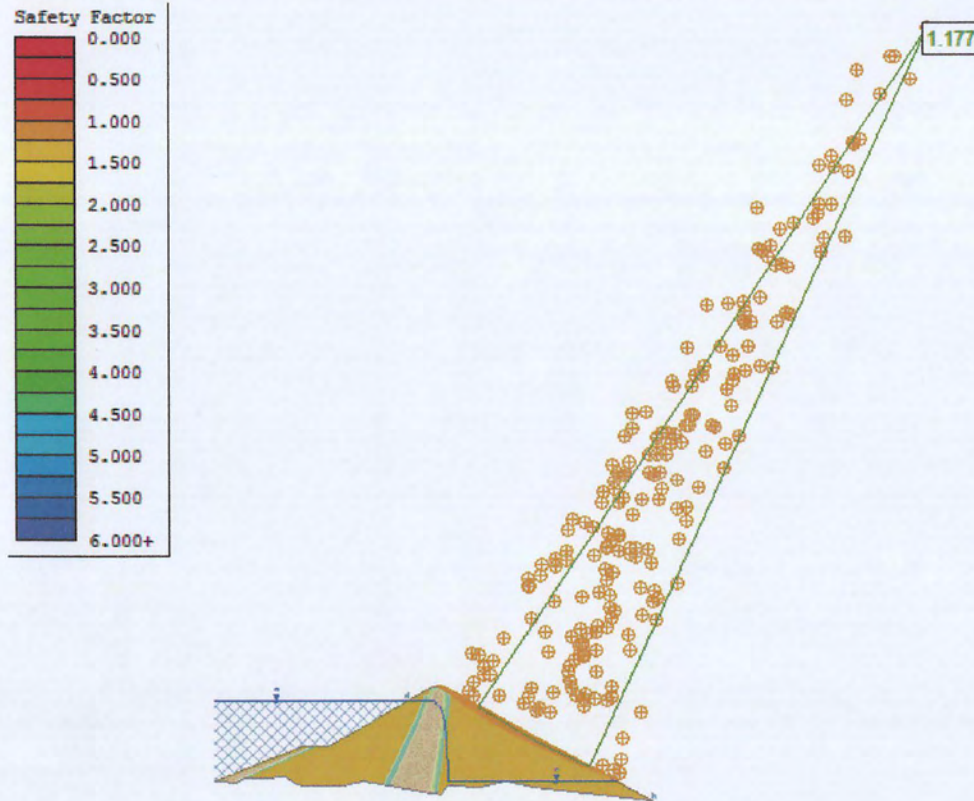


Σχήμα 2.30 Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και συντελεστής ασφαλείας υπό σεισμικό φορτίο για το ανάντη πρανές

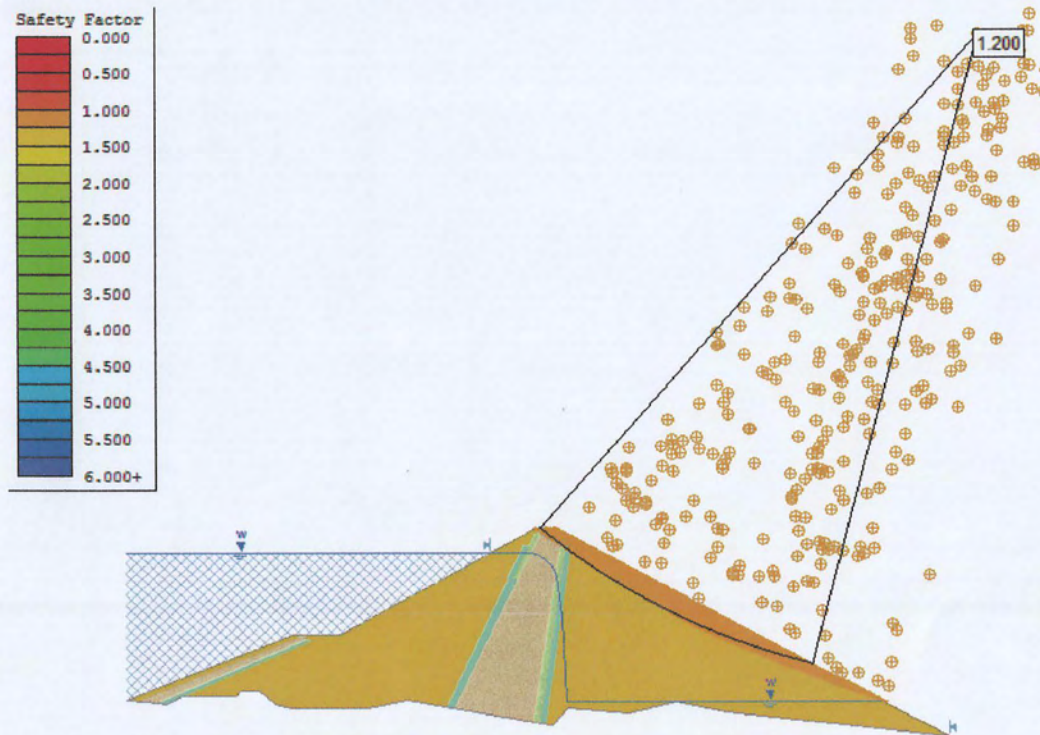
Το αποτέλεσμα που προκύπτει καταδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω ανάλυσης του πρανούς, με τη χρήση δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για να υπολογιστεί το εύρος των μετακινήσεων του πρανούς σε περίπτωση σεισμού. Αυτό, όμως, δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής.

2.5.6.β Κατάντη πρανές

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε αντιστοιχεί σε επιφανειακή επιφάνεια αστοχίας και ισούται με $FS=1.17$. Στο συνέχεια, φαίνονται οι επιφάνειες ολίσθησης με συντελεστές ασφαλείας $1.1 < FS < 1.2$. Κύκλοι πιο βαθιά στο πρανές εμφανίζουν μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας της τάξης του 1.3 έως 1.4.



Σχήμα 2.31 Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας και αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας για το κατάντη πρηνές υπό σεισμικό φορτίο.



Σχήμα 2.32 Επιφάνειες αστοχίας για το κατάντη πρηνές υπό σεισμικό φορτίο.

2.5.7 Συμπεράσματα

1. Η κλίση του πυρήνα προς τα ανάντη ευνοεί την ευστάθεια του κατάντη πρανούς, επιβεβαιώνεται άλλωστε από τους συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν, καθώς το κατάντη πρανές δίνει μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας, ενώ ταυτόχρονα επιδρά δυσμενώς στην ευστάθεια του ανάντη πρανούς.
2. Τα πρανή έχουν καλούς συντελεστές ασφαλείας παρά τις απότομες κλίσεις(1:1.8), πράγμα που οφείλεται στην ποιότητα της λιθορριπής (καλή γωνία τριβής 42°) και στην καλή συμπίκνωση των σωμάτων στήριξης.
3. Οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν για στατικές συνθήκες είναι αποδεκτοί από τους κανονισμούς.
4. Για σεισμικό φορτίο ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει για το κατάντη πρανές είναι αποδεκτός, ενώ για το ανάντη πρανές είναι οριακά αποδεκτός.

Κεφάλαιο 3^ο

Ενόργανη Παρακολούθηση (Monitoring) και Επιτήρηση Φραγμάτων στα πλαίσια εξασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας τους.

3.1 Ορισμοί

Ενόργανη Παρακολούθηση (Monitoring): Η καταγραφή και η παρακολούθηση των μετρήσεων από τις οποίες είναι δυνατόν να αξιολογηθεί η επιτελεστικότητα και η συμπεριφορά του φράγματος και των συνοδευτικών έργων. (ANCOLD 1976,2003)

Επιτήρηση Φράγματος: Η συνεχής διερεύνηση των συνθηκών λειτουργίας του φράγματος και των συνοδευτικών έργων, και η επισκόπηση της λειτουργίας, συντήρησης και καταγραφής δεδομένων, με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και έγκαιρη διάγνωση εν δυνάμει επικίνδυνων αλλαγών της συμπεριφοράς του φράγματος. (ANCOLD 1976,2003)

3.2 Γενικά

Κατά την κατασκευή φραγμάτων ο Μηχανικός καλείται να αντιμετωπίσει πλήθος αβεβαιοτήτων που αφορούν κυρίως την κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών και των μηχανικών ιδιοτήτων τους συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του υπόγειου ύδατος και τις μεταβολές της στάθμης του στην περιοχή της θεμελίωσης του φράγματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των ανασφαλειών υιοθετείται η ενοργάνωση, δηλαδή η τοποθέτηση διατάξεων οργάνων για την παρακολούθηση της απόκρισης του έργου. Τα όργανα μέτρησης προσφέρουν ουσιαστικά μια ασφαλιστική δικλείδα, αφού μέσω αυτών μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά του εδάφους και να επιβεβαιωθούν οι παραδοχές που έγιναν κατά το στάδιο σχεδιασμού του έργου.

Η παρακολούθηση των οργάνων και η καταγραφή των μετρήσεων τους χρησιμοποιούνται ως ένα σύστημα προειδοποίησης μιας επικείμενης αστοχίας και επιτρέπουν την λήψη έκτακτων μέτρων. Περαιτέρω, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς φραγμάτων τα οποία δεν έχουν κατασκευαστεί με σύγχρονα κριτήρια καθώς και για τη βελτίωση της επιστημονικής γνώσης στον τομέα του σχεδιασμού και την αξιολόγηση νέων τεχνολογιών.

Η ανάγκη για την ενοργάνωση και την παρακολούθηση των φραγμάτων προκύπτει τόσο από τον αριθμό των αστοχιών και των ατυχημάτων, όσο και από τις καταστροφικές συνέπειες που επιφέρει η αστοχία τους.

3.3 Πρόταση της ΕΕΜΦ για νομική κατοχύρωση της υποχρέωσης παρακολούθησης Μεγάλων Φραγμάτων του Ελληνικού χώρου

Αφουγκραζόμενη την ανάγκη για παρακολούθηση των φραγμάτων και την πρόληψη καταστάσεων που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο περιουσίες και ανθρώπινες ζωές, η Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (GCOLD) έχει προχωρήσει στη σύσταση Διοικητικής Αρχής Φραγμάτων (ΔΑΦ) και τη σύνταξη προσχέδιου προεδρικού διατάγματος με σκοπό την υποχρεωτική παρακολούθηση των μεγάλων φραγμάτων της Ελλάδας.

Πιο συγκεκριμένα, υπό επιτήρηση καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης και λειτουργίας τους έως και την αποδόμηση/εγκατάλειψή τους τα εξής έργα:

- Φράγματα των οποίων το ύψος του σώματός τους, μετρούμενο στον άξονά του και από το χαμηλότερο σημείο του φυσικού εδάφους έως τη στέψη, είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 10m.
- Φράγματα των οποίων το ύψος του σώματός τους, όπως αυτό ορίζεται παραπάνω, είναι από 5m έως 10m και ο ταμιευτήρας που δημιουργείται έχει χωρητικότητα μεγαλύτερη ή ίση των 100.000m³.
- Φράγματα των οποίων τα χαρακτηριστικά δεν ανήκουν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, αλλά η ΔΑΦ κρίνει ότι τυχόν αστοχία του συνεπάγεται κινδύνους απώλειας ανθρώπινων ζωών ή οικονομικές ζημιές.

Πιο συγκεκριμένα τα φράγματα κατατάσσονται στις εξής τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση των φραγμάτων του Ελληνικού χώρου σύμφωνα με την ΕΕΜΦ

Κατηγορία φράγματος	Περιγραφή
I	Ύψος Φράγματος $H \geq 40m$ ή Όγκος ταμιευτήρα $\geq 10.000.000m^3$, ανεξαρτήτως του ύψους του φράγματος
II	Ύψος φράγματος $40m \geq H \geq 20m$ ή Όγκος ταμιευτήρα $\geq 1.000.000m^3$, ανεξαρτήτως του ύψους του φράγματος
III	Φράγματα που δεν εντάσσονται στις κατηγορίες I & II

Σύμφωνα με το προσχέδιο νόμου που έχει κατατεθεί, για τα φράγματα που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες, ο φορέας λειτουργίας του φράγματος υποχρεούται κατά το στάδιο λειτουργίας του έργου να επιβεβαιώνει ότι υφίσταται συμμόρφωση με τους κανόνες ασφαλείας, να ελέγχει τη συμπεριφορά του, να αποκαθιστά τις βλάβες και να το συντηρεί σύμφωνα με γενικά αποδεκτούς κανόνες οι οποίοι ορίζονται από την μελέτη κατασκευής και τους ισχύοντες κανόνες και διατάξεις.

Οι διάφοροι έλεγχοι που υποχρεούται να διενεργεί ο φορέας λειτουργίας του έργου, διαφέρουν ως προς την σημασία τους και για κάθε κατηγορία φράγματος και είναι οι ακόλουθοι:

- **Συνήθεις Επιθεωρήσεις:** Γενικοί και ταχείς έλεγχοι, οι οποίοι έχουν στόχο την έγκαιρη επισήμανση τυχόν προβλημάτων στο Φράγμα και περιλαμβάνουν απαραίτητα οπτική επισκόπηση του έργου, λήψη των μετρήσεων των οργάνων και καταγραφή των αποτελεσμάτων στο Μητρώο του φράγματος.
- **Τακτικές Επιθεωρήσεις:** Πραγματοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του φράγματος, περιλαμβάνουν οπτική επιθεώρηση του φράγματος καθώς και καταγραφή, επεξεργασία και αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές.
- **Επιθεωρήσεις Ασφαλείας:** Ενδελεχείς έλεγχοι προκειμένου να πιστοποιείται η ασφαλής λειτουργία του φράγματος. Περιλαμβάνουν κατ' ελάχιστο:
 - Λεπτομερή οπτική επισκόπηση του έργου

- Επεξεργασία και αξιολόγηση των μετρήσεων των οργάνων του φράγματος
- Έλεγχο συμφωνίας της συμπεριφοράς του φράγματος με τις προβλέψεις της Μελέτης σχεδιασμού
- Ειδικούς τεχνικούς ελέγχους κάποιου τμήματος του έργου, αν απαιτείται
- Αξιολόγηση κάθε άλλης πληροφορίας η οποία μπορεί να συνεισφέρει στην αποφυγή αστοχίας του φράγματος.
- Έλεγχος οργάνωσης και επάρκειας του προσωπικού που εμπλέκεται σε θέματα ασφάλειας του φράγματος.
- **Έκτακτες Επιθεωρήσεις:** Διενεργούνται μετά από κάποιο περιστατικό όπως για παράδειγμα:
 - Ο ολικός ή σημαντικού μεγέθους απότομος καταβιβασμός της στάθμης του ταμιευτήρα.
 - Μετρήσεις οργάνων που αποκλίνουν πολύ από τις αναμενόμενες τιμές.
 - Η μακροχρόνια και πέραν τον προβλέψεων της Μελέτης παραμονή του ταμιευτήρα στη μέγιστη στάθμη.
 - Δυσλειτουργίες του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, οι οποίες δεν μπορούν άμεσα να αποκατασταθούν και οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία του φράγματος.
- **Έλεγχοι παραμέτρων σχεδιασμού και μεθόδων ανάλυσης:** Έχουν ως στόχο αφενός την επιβεβαίωση της ασφαλούς λειτουργίας του φράγματος, αφετέρου δε τον έλεγχο της κατάστασης των επηρεαζόμενων από το φράγμα περιοχών μετά από μακρό διάστημα λειτουργίας του φράγματος. Οι έλεγχοι αυτοί περιλαμβάνουν την επανεξέταση της συμπεριφοράς του φράγματος με χρήση όλων των στοιχείων που προέκυψαν από την παρακολούθηση και με εφαρμογή των πλέον πρόσφατων κανονιστικών διατάξεων και εργαλείων ανάλυσης.

Η συχνότητα εκτέλεσης των διαφόρων ελέγχων και επιθεωρήσεων για κάθε κατηγορία φράγματος, όπως προτείνεται στο προσχέδιο διάταγμα, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2 Πίνακας συχνότητας επιθεωρήσεων για όλες τις κατηγορίες φραγμάτων

Συχνότητα Επιθεωρήσεων	Κατηγορία Φράγματος		
	I	II	III
Συνήθειες Επιθεωρήσεις	Ανά ημέρα	Ανά εβδομάδα	Ανά μήνα
Τακτικές Επιθεωρήσεις	Ανά 1 έτος	Ανά 2 έτη	Ανά 5 έτη
Επιθεωρήσεις Ασφαλείας	3 έτη μετά τη Έκθεση πρώτης πλήρωσης και ακολουθως σε χρονικά διαστήματα ≤ 5 ετών.	6 έτη μετά τη Έκθεση πρώτης πλήρωσης και ακολουθως σε χρονικά διαστήματα ≤ 10 ετών.	10 έτη μετά τη Έκθεση πρώτης πλήρωσης και ακολουθως σε χρονικά διαστήματα ≤ 20 ετών.
Έκτακτες Επιθεωρήσεις	Όποτε απαιτηθεί		
Έλεγχοι παραμέτρων σχεδιασμού και μεθόδων ανάλυσης	≤ 30 ετών	≤ 60 ετών	Εάν απαιτηθεί

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το φράγμα Σμοκόβου ανήκει στην **κατηγορία I**. Στο φράγμα θα πρέπει να διενεργούνται **καθημερινές επισκέψεις και οπτικοί έλεγχοι** της κατάστασης του φράγματος, ενώ **ανά έτος** θα πρέπει να καταγράφονται, να επεξεργάζονται και να αξιολογούνται οι μετρήσεις των οργάνων. Ανά πενταετία, απαιτούνται ενδελεχείς επιθεωρήσεις ασφαλείας και τέλος, μετά από τριάντα χρόνια συνολικής λειτουργίας του φράγματος απαιτείται έλεγχος παραμέτρων σχεδιασμού.

3.4 Πρόγραμμα Ενόργανης παρακολούθησης Φράγματος

Στόχος του προγράμματος ενόργανης παρακολούθησης είναι η συλλογή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με τις συνθήκες κατασκευής και την επιρροή τους σε παραμορφώσεις και μικρομετακινήσεις κατά μήκος του έργου και γενικότερα την αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής.

Οι πληροφορίες αυτές αξιολογούνται με απώτερο σκοπό:

- ✓ Την έγκαιρη προειδοποίηση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας του έργου, προκειμένου να είναι εφικτή η άμεση επέμβαση και εφαρμογή διορθωτικών μέτρων για την αποφυγή βλαβών καθώς και την προστασία του εργατικού προσωπικού και τρίτων.

- ✓ Την καταγραφή της επίδρασης διορθωτικών παρεμβάσεων τόσο στο ίδιο το έργο όσο και στις κατασκευές εντός της ζώνης επιρροής του, προκειμένου να αξιολογείται συνεχώς η ασφάλεια του έργου.
- ✓ Τη συσχέτιση παραδοχών και προβλέψεων σχεδιασμού με την απόκριση του έργου κατά την κατασκευή και την πλήρωση του ταμιευτήρα.

Η παρακολούθηση και ενοργάνωση ενός φράγματος θα πρέπει να διενεργούνται από εξειδικευμένο προσωπικό και σε συνεργασία με τους υπεύθυνους Μηχανικούς σχεδιασμού και κατασκευής. Τα μετρήσιμα μεγέθη που χρήζουν παρακολούθησης είναι τα εξής:

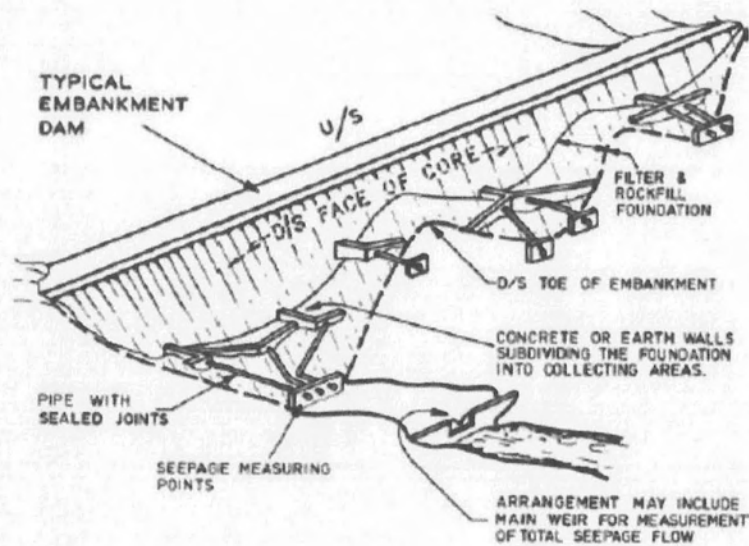
- Διηθήσεις νερού από το ανάχωμα του φράγματος και από τη θεμελίωση.
- Οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση μετρούμενη από επιφανειακά σημεία στο ανάχωμα και τα αντερείσματα.
- Πιέσεις πόρων
- Στάθμη του ταμιευτήρα και βροχοπτώσεις.
- Εσωτερικές παραμορφώσεις του αναχώματος
- Σεισμικές κινήσεις του εδάφους με τη χρήση επιταχυνσιογράφων.

3.4.1 Μέτρηση και παρακολούθηση των διαρροών

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από την παρακολούθηση και τη μέτρηση του διηθούμενου διαμέσου του αναχώματος και της θεμελίωσης νερού και ιδιαίτερα οι μεταβολές αυτών των μετρήσεων, αποτελούν πολύ αντιπροσωπευτικές ενδείξεις για την συμπεριφορά του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της ποσότητας και της ποιότητας των διαρροών, μπορούμε να προΐδαστούμε για προβλήματα όπως εσωτερική διάβρωση και ξέπλυμα του πυρήνα και ανάπτυξη πιέσεων πόρων στη θεμελίωση και το ανάχωμα.

Σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, είναι προτιμότερο το διηθούμενο νερό να συλλέγεται στα κατάντη του αναχώματος και σε κοντινή απόσταση από το φράγμα, καθώς επίσης για μεγάλα φράγματα προτείνεται η απομόνωση του διηθούμενου νερού του πυρήνα ώστε οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από τα διηθούμενα δια μέσου της λιθορριπής νερά.

Η μέτρηση των διηθούμενων νερών μέσω της διάταξης V-notch.



NOTE : —

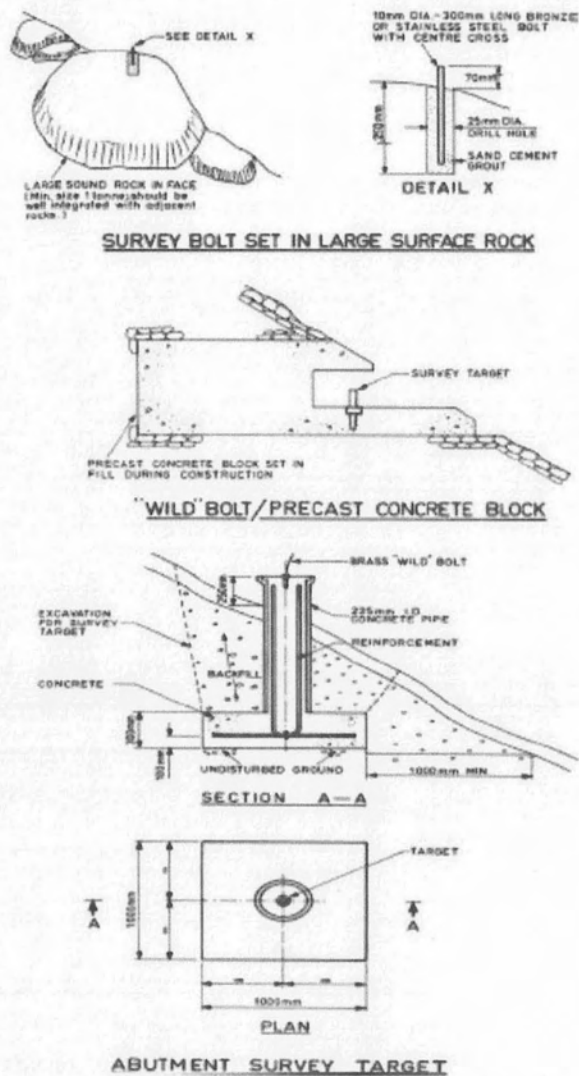
SEEPAGE MEASUREMENT POINTS ARE INSPECTION POINTS FOR REGULAR VISUAL INSPECTION OF DAMS

Σχήμα 3.1 Διάταξη μέτρησης διαρροών (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

3.4.2 Επιφανειακές Μετακινήσεις

Μέσω της παρακολούθησης των επιφανειακών μετακινήσεων του αναχώματος συλλέγονται χρήσιμες πληροφορίες για την επιβεβαίωση των προβλέψεων του σχεδιασμού. Οι μετρήσεις των επιφανειακών μετακινήσεων αποτελούν καλή πηγή ενδείξεων εσωτερικών παραμορφώσεων λόγω χαλάρωσης των υλικών ή εσωτερικής διάβρωσης και διασωλήνωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να μετρούνται τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες μετακινήσεις προκειμένου να προσδιορίζεται η κατεύθυνση των διανυσμάτων μετακίνησης.

Είναι πολύ σημαντική η επιλογή των σημείων όπου θα τοποθετηθούν οι δείκτες για τις μετρήσεις. Για τον σωστό υπολογισμό των μετακινήσεων οι δείκτες πρέπει να τοποθετηθούν κεντρικά κατά μήκος του άξονα της στέψης πάνω από τον πυρήνα, στα άκρα της στέψης ανάντη και κατάντη, καθώς και σε διάφορα σημεία του ανάντη και κατάντη πρανούς.



Σχήμα 3.2 Λεπτομέρειες βάθρων μέτρησης επιφανειακών μετακινήσεων (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

3.4.3 Πιέσεις Πόρων

Η πίεση του νερού των πόρων αποτελεί καθοριστική παράμετρο της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους. Η μέτρηση των πιέσεων πόρων λόγω της παρουσίας νερού στο ανάχωμα και τη θεμελίωση μπορεί να παρέχει ζωτικής σημασίας πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ευστάθειας του αναχώματος. Πολύ υψηλές τιμές πίεσης πόρων είναι συνήθως προάγγελος φαινομένων διάβρωσης και διασωλήνωσης.

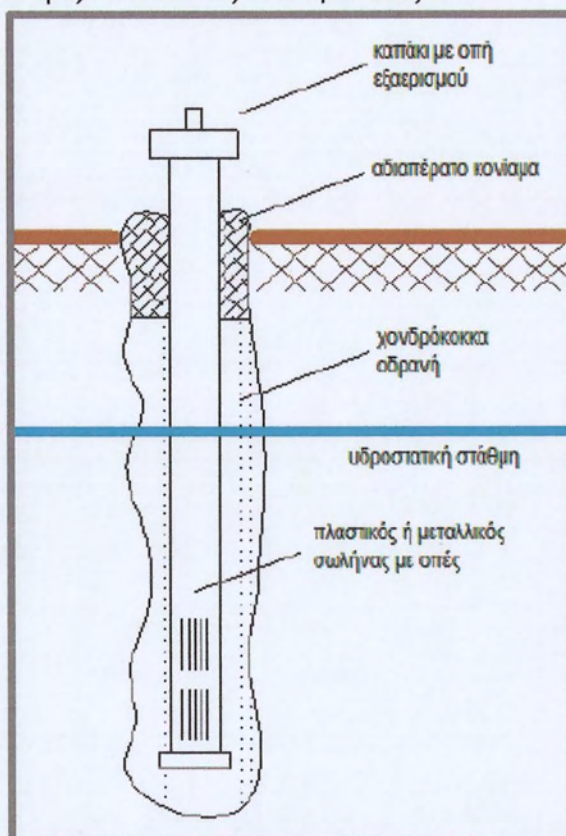
Η μέτρηση των πιέσεων πόρων γίνεται με τη χρήση πιεζομέτρων. Υπάρχουν πιεζόμετρα ανοιχτού και κλειστού τύπου. Για την παρακολούθηση των μεταβολών των πιέσεων πόρων στο Φράγμα Σμοκόβου χρησιμοποιήθηκαν

ηλεκτρικά πιεζόμετρα κυττάρου δονούμενης χορδής (κλειστού τύπου), και πιεζομετρικά φρέατα παρατήρησης στάθμης υπογείων υδάτων.

3.4.3.α Φρέαρ Παρατήρησης (observation well)

Τα φρέατα παρατήρησης προσφέρουν με εύκολο και φθηνό τρόπο πληροφορίες για το ύψος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και τις διακυμάνσεις του.

Για την κατασκευή τους, διανοίγεται γεώτρηση και τοποθετείται στο εσωτερικό της μεταλλικός ή πλαστικός σωλήνας, ο οποίος φέρει οπές, ώστε να επιτρέπεται η είσοδος του νερού σε αυτόν. Ανάμεσα στον σωλήνα και τη γεώτρηση τοποθετούνται διαπερατά χονδρόκοκκα αδρανή ώστε να διευκολύνεται η διέλευση του νερού και επιφανειακά τοποθετείται αδιαπέρατο κονίαμα ώστε να αποτρέπεται η εισχώρηση των βρόχινων νερών στη γεώτρηση. Ο καθορισμός της στάθμης στην οπή γίνεται με τη χρήση βολίδας, η οποία παράγει ηχητικό σήμα μόλις εισέρχεται στο νερό.



Σχήμα 3.3 Λεπτομέρεια φρέατος παρατήρησης υπογείου ύδατος

Βασικό μειονέκτημα των φρεάτων παρατήρησης είναι ότι η απόκρισή τους καθυστερεί σε σχέση με τη ηλεκτρικά και τα πνευματικά πιεζόμετρα.

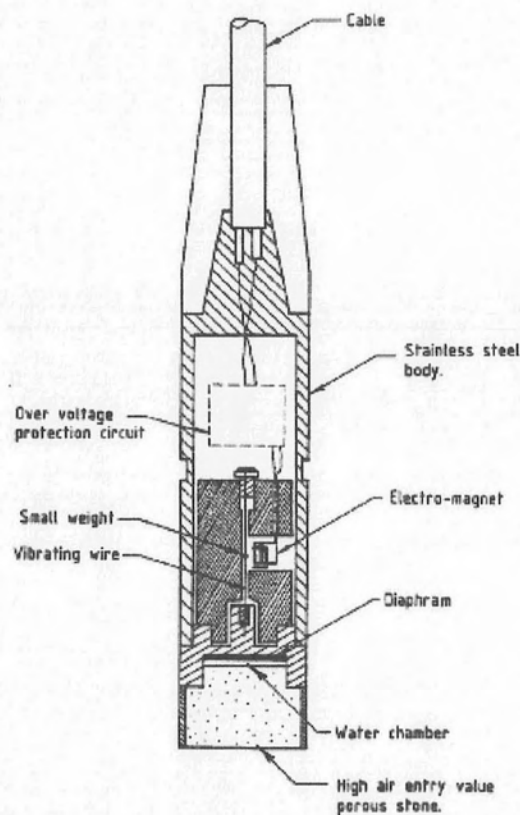
3.4.3.β Ηλεκτρικά πιεζόμετρα με κύτταρο δονούμενης χορδής

Είναι συσκευές κλειστού κυκλώματος και χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ταχείας μεταβολής των πιέσεων πόρων. Η απόκριση αυτού του τύπου των πιεσομέτρων είναι άμεση, καθώς το σύστημα δεν απαιτεί ροή του νερού προκειμένου να δώσει αποτελέσματα.

Στο κάτω μέρος του πιεζομέτρου υπάρχει πορώδης λίθος, οποίος διευκολύνει την εισροή του νερού. Το νερό πιέζει το μεταλλικό διάφραγμα και αυτό με τη σειρά του εντίνει χορδή, η οποία πάλλεται εντός μαγνητικού πεδίου. Η

υδροστατική πίεση που ασκείται στο διάφραγμα αλλάζει την ιδιοσυχνότητα δόνησης της χορδής και με κατάλληλη εργοστασιακή βαθμονόμηση συνδέεται η πίεση πόρων με την συχνότητα συντονισμού της χορδής.

Σύμφωνα με τον Fell προτείνεται τα πιεζόμετρα να μην τοποθετούνται στο εσωτερικό πυρήνων γεωφραγμάτων διότι αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης διάβρωσης και διασώληνωσης. Στην περίπτωση που η τοποθέτηση των πιεζομέτρων κρίνεται απαραίτητα από τους μελετητές Μηχανικούς, προτείνεται να μην τοποθετούνται κοντά στην ανάντη παρειά του πυρήνα



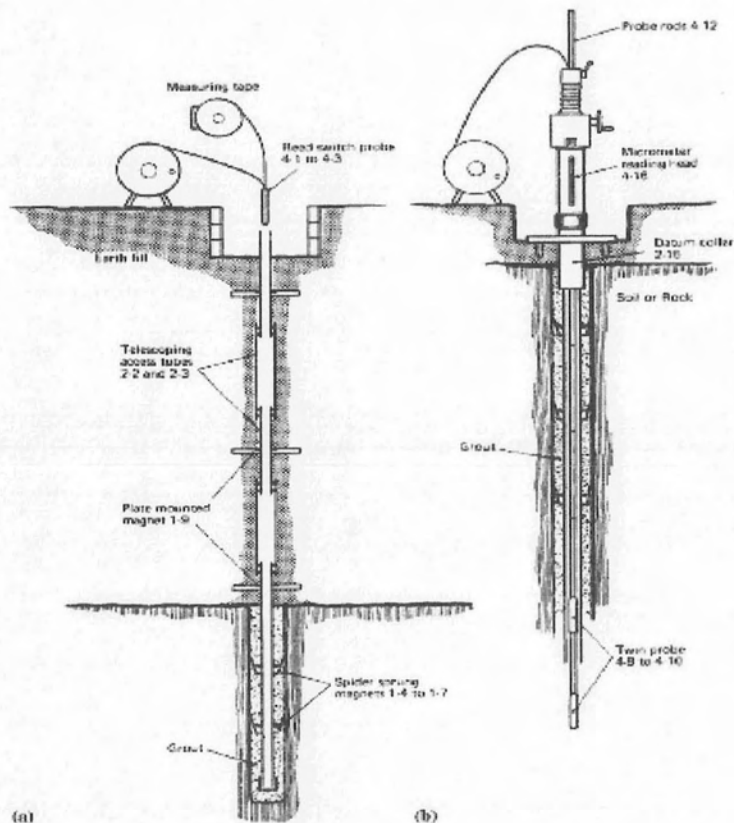
Σχήμα 3.4 Λεπτομέρεια διάταξης ηλεκτρικού πιεσομετρικού κυττάτρου δονούμενης χορδής(Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

3.4.4 Μετακινήσεις και παραμορφώσεις εδάφους

Οι εσωτερικές παραμορφώσεις του αναχώματος παρακολουθούνται κυρίως σε μεγάλα λιθόρριπτα με κεντρικό πυρήνα φράγματα και σε φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRD). Έτσι επιτρέπεται η επιβεβαίωση των προβλέψεων σχεδιασμού σχετικά με τις καθιζήσεις στερεοποίησης του πυρήνα και της θεμελίωσης και τις παραμορφώσεις την πλάκας σκυροδέματος στα CFRD.

3.4.4.α Όργανα μέτρησης κατακόρυφης μετακίνησης

Η μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης του εδάφους γίνεται με τη βοήθεια μηχανικών συσκευών, οι οποίες τοποθετούνται στο ανάχωμα κατά την κατασκευή του ή σε γεωτρήσεις. Πρόκειται για κατακόρυφες διατάξεις που επιτρέπουν τη μέτρηση της μετακίνησης παράλληλα στον άξονά τους.



Σχήμα 3.5 Λεπτομέρεια οργάνων μέτρησης οριζόντιας μετακίνησης (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

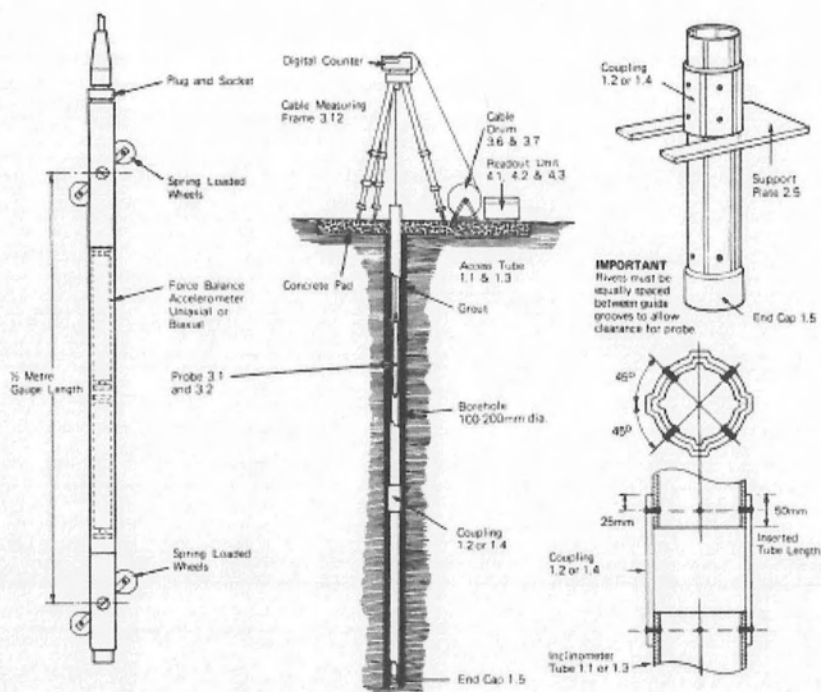
3.4.4.β Όργανα μέτρησης οριζόντιας παραμόρφωσης

➤ Κλισιόμετρα (inclinometers)

Πρόκειται για διατάξεις υψηλής ακρίβειας των οποίων η εγκατάσταση αποσκοπεί στην καταγραφή της μετακίνησης εγκάρσια στον άξονά τους. Η διάταξή τους τοποθετείται κατακόρυφα ή υπό κλίση. Είναι πολύ χρήσιμα όργανα για τον προσδιορισμό πλάγιων μετακινήσεων, οι οποίες πιθανόν προκαλούνται από σημαντική διατμητική παραμόρφωση του υλικού, και ενδέχεται να προκαλέσει αστάθεια πρανών.

Η τοποθέτησή τους γίνεται κατά την κατασκευή του αναχώματος σε γεώτρηση, στην οποία τοποθετείται το στέλεχος του κλισιομέτρου. Στα δύο άκρα του

στελέχους τοποθετούνται σερβο-επιταχυνσιόμετρα. Από την στρεπτική επιτάχυνση που καταγράφεται κατά την κάθοδο (ή γενικά τη μετακίνηση) του στελέχους προσδιορίζεται η αλλαγή κλίσης κατά μήκος του σωλήνα.

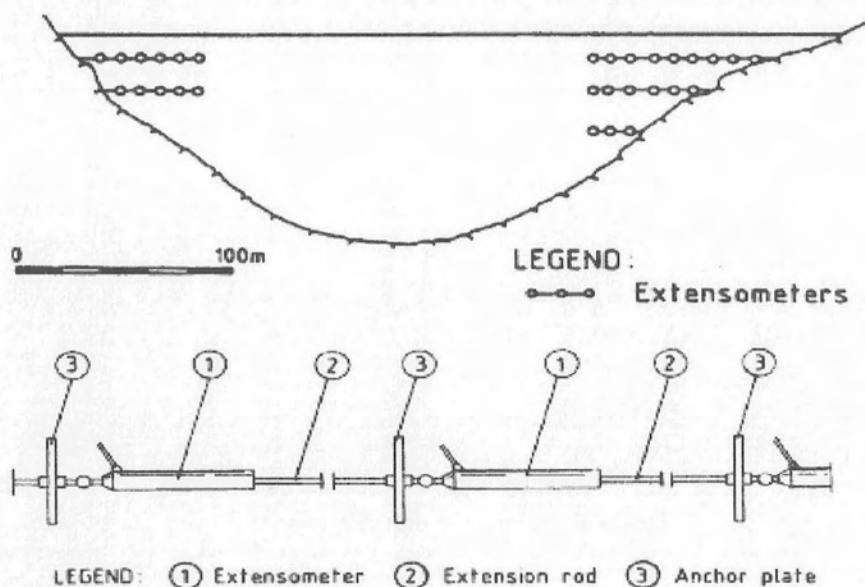


Σχήμα 3.6 Λεπτομέρεια κλισιομέτρου (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

➤ **Μηκυσιόμετρα πολλαπλών σημείων τύπου ράβδου (extensometers)**

Τα μηκυσιόμετρα πολλαπλών σημείων αποτελούνται από έως και έξι (6) ράβδους τοποθετημένες στην ίδια γεώτρηση και παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής της μετατόπισης πολλών σημείων.

Για την μέτρηση των πλευρικών μετακινήσεων στα αντερείσματα, το πρηνές εξόδου του εκχειλιστή και το πρηνές εξόδου της σήραγγας εκτροπής του εκκενωτή πυθμένα τοποθετήθηκαν μηκυσιόμετρα πολλαπλών σημείων με ράβδους.



Σχήμα 3.7 Λεπτομέρεια μηκυσιομέτρου με πολλαπλές ράβδους (Πηγή: Geotechnical Engineering of Dams, Robin Fell)

3.5 Ενοργάνωση Φράγματος Σμοκόβου

Κατά το στάδιο κατασκευής του αναχώματος του φράγματος τοποθετήθηκαν τα παρακάτω όργανα μετρήσεων:

- Σημεία τριγωνισμού, (T1-T6), 6 τεμάχια
- Σημεία ελέγχου επιφανειακής μετακίνησης, (S1-S55), 55 τεμάχια
- Συσκευές ελέγχου πλευρικής μετακίνησης, (L1-L6), 6 τεμάχια
- Όργανα μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης (L+IS1-L+IS5), 5 τεμάχια
- Γραμμικά μηκυσιόμετρα, (ELS1-ELS5), 5 τεμάχια
- Φρέατα παρατήρησης στάθμης υπόγειων υδάτων, (PW1-PW16), 16 τεμάχια
- Ηλεκτρικό πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής, (Pz1-Pz30), 30 τεμάχια
- Ηλεκτρικό πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής στη θεμελίωση, (Pzf1-Pzf6), 6 τεμάχια
- Επιταχυνσιογράφοι καταγραφής ισχυρής δόνησης, (SM1-SM3), 3 τεμάχια
- Μηκυσιόμετρο βράχου πολλαπλών σημείων με ράβδους, (R1-R10), 10 τεμάχια

Στο σώμα του φράγματος τοποθετήθηκαν συνολικά τριάντα **πιεσομετρικά κύτταρα δονούμενης χορδής (Pz)**, εκ των οποίων τα οκτώ τοποθετήθηκαν στο κατάντη φίλτρο και τα υπόλοιπα στον πυρήνα. Επιπλέον έξι ηλεκτρικά πιεσόμετρα τοποθετήθηκαν στην θεμελίωση του φράγματος (Pzf) και επτά ακόμη στην αποστραγγιστική σήραγγα.

Δεκαέξι φρέατα παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων (PW) τοποθετήθηκαν στα πρανή πάνω από την είσοδο του υπερχειλιστή, στα αντερείσματα και στον κατάντη πόδα του φράγματος.

Για τον έλεγχο ανάπτυξης τυχόν εφελκυσμού στον πυρήνα τοποθετήθηκαν μηκυνσιόμετρα (ELS) παράλληλα προς τον άξονα του φράγματος κοντά στην επαφή του πυρήνα με τα αντερείσματα.

Εγκαταστάθηκαν πέντε στήλες πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης (L+IS) και έξι κλισιόμετρα (L) στα αντερείσματα. Τα όργανα όμως αυτά εμφάνισαν πρόβλημα έμφραξης και δεν απέδωσαν αξιολογήσιμες μετρήσεις.

Για τον έλεγχο των επιφανειακών μετακινήσεων τοποθετήθηκαν πενήντα πέντε βάρθρα μέτρησης επιφανειακής μετακίνησης (S), στην στέψη, στο ανάντη και κατάντη πρανές, στο αριστερό αντέρεισμα και στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής.

Τρεις επιταχυνσιογράφοι καταγραφής ισχυρής δόνησης τύπου SSA2 τοποθετήθηκαν στη στέψη, στον πόδα και στο αριστερό αντέρεισμα.

Τέλος, κατασκευάστηκε διάταξη συλλογής και μέτρησης των συνολικών διηθήσεων αμέσως κατάντη του φράγματος και στην έξοδο της αποστραγγιστικής σήραγγας του αριστερού αντερείσματος.

3.5.1 Διάταξη των οργάνων

Η κατανομή των οργάνων στο ανάχωμα του φράγματος φαίνεται στους παρακάτω πίνακες. Στον πρώτο πίνακα φαίνεται η γενική διάταξη όλων των οργάνων και στον επόμενο πιο αναλυτικά η διάταξη και οι θέσεις των πιεσομέτρων και των οργάνων μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης.

Πίνακας 3.3 Διάταξη των οργάνων μέτρησης του φράγματος Σμοκόβου

Περιγραφή	Αριθμοί Σήμανσης	Θέση
Σημείο Τριγωνισμού	T1 – T2	Αριστερό Αντέρεισμα
	T3 – T6	Δεξιό Αντέρεισμα
Σημείο Ελέγχου Επιφανειακής Μετακίνησης	S1 – S8	Ανάντη Πρανές Φράγματος
	S9 – S22	Στέψη Φράγματος
	S23 – S45	Κατάντη Πρανές Φράγματος
	S46 – S48	Αριστερό Αντέρεισμα
	S49	Περιοχή εξόδου εκχειλιστή
	S50 – S53	Περιοχή εξόδου σήραγγας εκτροπής
	S54 – S55	Δεξιό αντέρεισμα
Συσκευή ελέγχου πλευρικής μετακίνησης (κλισιόμετρο)	L1 – L2	Αριστερό Αντέρεισμα
	L3	Πρανή εκσκαφής εξόδου εκχειλιστή
	L4	Περιοχή εξόδου σήραγγας εκτροπής
	L5 – L6	Δεξιό Αντέρεισμα
Όργανο μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης	L+IS1 – L+IS5	Φράγμα
Γραμμικό μηκυσιόμετρο	ELS1 – ELS5	Φράγμα
Πιεσομετρικό φρέαρ παρατήρησης στάθμης υπογείων υδάτων	PW1 – PW5	Αριστερό Αντέρεισμα
	PW6	Πρανή εκσκαφής εξόδου εκχειλιστή

	PW7 – PW10	Κατάντη πόδι του φράγματος
	PW11	Περιοχή εξόδου σήραγγας εκτροπής
	PW11 – PW16	Δεξιό Αντέρεισμα
Ηλεκτρικό πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής	Pz1 – Pz30	Φράγμα
Ηλεκτρικό πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής στη θεμελίωση	Pzf1 – Pzf6	Θεμελίωση Φράγματος
Επιταχυνσιογράφος καταγραφής ισχυρής δόνησης	SM1	Στέψη Φράγματος
	SM2	Κατάντη Πόδι Φράγματος
	SM3	Δεξιό Αντέρεισμα
Μηκυσιόμετρο βράχου πολλαπλών σημείων με ράβδους	R1 – R10	Πρανή εκσκαφής-Φυσικά Πρανή

Πίνακας 3.4 Θέσεις των ηλεκτρικών πιεσομετρικών κυττάρων και των οργάνων μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετατόπισης.

Όργανο	Αριθμός Σήμανσης	Τομή	Ζώνη Φράγματος
Ηλεκτρικό Πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής	Pz1 – Pz4	D – D	Πυρήνας
	Pz5 – Pz18	A – A	Κατάντη φίλτρο
	Pz19 – Pz30	F – F	Κατάντη φίλτρο
Ηλεκτρικό πιεσομετρικό κύτταρο δονούμενης χορδής στη θεμελίωση	Pzf 1 – Pzf 2	D – D	Θεμελίωση
	Pzf 3 – Pzf 4	A – A	
	Pzf 5 – Pzf 6	F – F	
Όργανο μέτρησης πλευρικής και κατακόρυφης μετακίνησης	L+IS 1 – L+IS 3	A – A	Κατάντη Κέλυφος
	L+IS 4 – L+IS 5	F – F	

Οι θέσεις όλων των οργάνων φαίνονται αναλυτικά στα σχέδια που υπάρχουν στο Παράρτημα Σχεδίων.

Κεφάλαιο 4^ο Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει σειρά ελέγχων και μετά από επιτόπου επισκόπηση του φράγματος Σμοκόβου, μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή και εποικοδομητικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του φράγματος και την υφιστάμενη κατάστασή του.

4.1 Υλικά Κατασκευής

4.1.1 Πυρήνας

Ο πυρήνας του φράγματος αποτελείται από 20%-59% λεπτόκοκκα (διερχόμενα από το κόσκινο Νο 200, 0.075mm). Πρόκειται για αποδεκτό υλικό πυρήνα, αν και συνήθως προτιμώνται υλικά πιο πλούσια σε λεπτόκοκκο κλάσμα. Ωστόσο ο οικονομικός σχεδιασμός επιτάσσει την αξιοποίηση διαθέσιμων στη γύρω περιοχή υλικών και ο πυρήνας εμφανίζει καλές ιδιότητες ως προς την διαπερατότητα. Πρόβλημα μπορεί να παρουσιαστεί στην περίπτωση που κατά την κατασκευή του πυρήνα έχουν δημιουργηθεί στρώσεις με υλικό χαμηλότερο σε λεπτόκοκκα, οπότε θα αποτελούν ζώνες με υψηλότερη διαπερατότητα. Είναι σημαντικό κατά τη διάστρωση το υλικό του πυρήνα να είναι κατά το δυνατόν ομοιογενές προκειμένου να εξασφαλίζεται η στεγανότητα του φράγματος.

Αν το φράγμα κατασκευαζόταν τη σημερινή ημέρα, ίσως να δινόταν μεγαλύτερη προσοχή κατά τη διάστρωση και τη συμπύκνωση του πυρήνα, καθώς διαπιστώθηκε ότι έχει κατασκευαστεί με μεγάλες αποκλίσεις της υγρασίας από τη βέλτιστη και όχι με απόκλιση $\pm 2\%$ - 3% όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία. Επίσης, στη θεμελίωση, όπου για λόγους συνεργασιμότητας του υλικού του πυρήνα με το βράχο της θεμελίωσης και την αποφυγή διάνοιξης ρωγμών απαιτείται ο πυρήνας να είναι πιο πλάστιμος και άρα να κατασκευαστεί με υψηλότερα επίπεδα υγρασίας, ο πυρήνας κατασκευάστηκε με υγρασία χαμηλότερη της βέλτιστης.

4.1.2 Φίλτρα

Τα φίλτρα αποτελούν τις κυριότερες ζώνες του φράγματος καθώς εξασφαλίζουν τόσο τη στήριξη του πυρήνα, και την αποτόνωση το πιέσεων ύδατος πόρων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του, όσο και την αποφυγή δημιουργίας φαινομένων διασωλήνωσης και διάβρωσης του υλικού του. Είναι εύλογο λοιπόν ότι η σωστή λειτουργία ενός φράγματος στηρίζεται στην αποτελεσματικότητα των φίλτρων του, γι αυτό άλλωστε και δίνεται τόσο μεγάλη προσοχή και λεπτομέρεια στο σχεδιασμό τους.

Έχοντας ελέγξει προσεκτικά τα δύο φίλτρα του φράγματος μπορούμε να επισημάνουμε ότι εμφανίζουν αποκλίσεις από τις προτεινόμενες προδιαγραφές και δεν ικανοποιούνται τα εξής κριτήρια:

1. **Κριτήριο συγκράτησης υλικού πυρήνα.** Προκειμένου να είναι σε θέση το φίλτρο να στηρίζει τον πυρήνα και να αποτρέπει τη μετακίνηση του υλικού του προς τα κατάντη, απαιτείται να έχει μέγιστη διάμετρο κόκκου για διερχόμενο ποσοστό 15% τα 0.7mm. Το φίλτρο που βρίσκεται σε επαφή με τον πυρήνα έχει μέγιστη διάμετρο κόκκου για διερχόμενο ποσοστό 15% το 1mm. Η τιμή δεν αποκλίνει πολύ από την απαιτούμενη. Τέτοια περιστατικά αστοχιών όμως που οφείλονται στην ανεπαρκή ικανότητα του φίλτρου να συγκρατήσει το υλικό του πυρήνα έχουν καταγραφεί. Βέβαια σε εκείνες τις περιπτώσεις το φίλτρο εμφανιζόταν να αποτελείται από πολύ πιο χονδρόκοκκο υλικό σε σχέση με το υλικό του πυρήνα.
2. **Κριτήριο κατάρρευσης.** Στην περίπτωση που εμφανιστούν ρωγμές στον πυρήνα οι οποίες πληρούνται από νερό, το φίλτρο καλείται να «καταρρέει», δηλαδή να χάνει την αρχική του δομή και να εισχωρεί στην ρωγμή προκειμένου να την κλείσει τουλάχιστον στο σημείο επαφής του πυρήνα με τη ζώνη του φίλτρου. Προκειμένου να εμφανίσει αυτή τη συμπεριφορά το φίλτρο, πρέπει να μην περιέχει ποσοστό λεπτοκόκκων μεγαλύτερο του 5%, διότι τα λεπτόκοκκα προσδίδουν συνοχή στο υλικό του φίλτρου που δεν είναι επιθυμητή. Η απαίτηση για το ελάχιστο αυτό ποσοστό λεπτοκόκκων στο υλικό του φίλτρου καλύπτει και την ανάγκη το φίλτρο να εμφανίζει υψηλή διαπερατότητα. Το ποσοστό των λεπτοκόκκων στο φίλτρο του φράγματος Σμοκόβου φτάνει σε ποσοστό έως και 15%. Παρά το γεγονός ότι πρόκειται για μη αποδεκτή τιμή, πολλές είναι περιπτώσεις φραγμάτων που έχουν κατασκευαστεί με περισσότερα λεπτόκοκκα στα φίλτρα και ωστόσο έχουν εμφανίσει πολύ καλή συμπεριφορά χωρίς να έχουν δημιουργηθεί προβλήματα στη λειτουργία τους.

4.1.3 Λιθορριπή

Η λιθορριπή εμφανίζεται να τηρεί όλα τα κριτήρια σχεδιασμού και προδιαγραφών. Πρόκειται για υψηλής αντοχής λιθορριπή, με πληρωμένη δομή.

4.2 Ευστάθεια Φράγματος

Οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν για στατικές συνθήκες, για όλες τις καταστάσεις της λειτουργίας του φράγματος, και για τα δύο πρηνή, είναι αποδεκτοί.

Οριακός εμφανίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του ανάντη πρηνούς, υπό σεισμικό φορτίο, για συνθήκες πλήρους ταμειυτήρα. Θεωρούμε ότι στο πρόβλημα λαμβάνουν χώρα και άλλα φαινόμενα, όπως κυματισμός λόγω του σεισμού και δυναμικές πιέσεις ύδατος πόρων λόγω σεισμού, τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη από τη ψευδοστατική ανάλυση και το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, γι αυτό και δεν πιστεύουμε πώς τίθεται λόγος ανησυχίας. Επίσης, ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει για επιφανειακό κύκλο αστοχίας, που είναι λογικό να εμφανίζουν χαμηλότερους συντελεστές. Προτείνεται, ωστόσο, η περαιτέρω διερεύνηση του αναχώματος σε σεισμό, με τη χρήση

δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να σκιαγραφηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η απόκριση του φράγματος.

Το κατάντη πρηνές εμφανίζει συντελεστές ασφαλείας αποδεκτούς από σεισμικά φορτία.

4.3 Παρακολούθηση του φράγματος

Μετά από επίσκεψη και επιτόπου αυτοψία του φράγματος διαπιστώθηκε η καλή κατάσταση και ομαλή λειτουργία του.

Εντούτοις παρατηρήθηκε ότι το φράγμα σχεδόν εγκαταλείφθηκε μετά και την ολοκλήρωση της πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα μετρήσεις των οργάνων δεν έχουν καταγραφεί εδώ και 10 χρόνια περίπου από το καλοκαίρι του 2004, οπότε και ολοκληρώθηκε η πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος, έως και σήμερα.

Δεδομένου ότι το φράγμα βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς πέρα από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται κατά τη θερινή περίοδο για άρδευση, είναι πολύ σημαντικό ο Κύριος του έργου να μεριμνήσει για την παρακολούθησή του.

Τα όργανα μέτρησης δεν έχουν συντηρηθεί και η τωρινή τους κατάσταση δεν είναι γνωστή. Προτείνεται να γίνει καταγραφή των εν λειτουργία οργάνων και να καταγράφονται οι μετρήσεις τους, καθώς επίσης να διενεργηθούν οι απαραίτητοι έλεγχοι και να γίνουν κινήσεις προς τη συντήρηση και αποκατάσταση των οργάνων αυτών.

Σε πρώτο στάδιο, δεδομένου ότι παρεμβάσεις τέτοιου είδους σε εν λειτουργία φράγματα θεωρούνται κρίσιμες και δεν προτείνονται εκτός και αν πρόκειται για κρίσιμες καταστάσεις όπου διακυβεύεται η ασφάλεια του φράγματος, καλό θα ήταν στο φράγμα να διενεργούνται συχνοί οπτικοί έλεγχοι σε συνδυασμό με παρακολούθηση των διαρροών. Η μέτρηση των διαρροών και η συσχέτισή τους με τη στάθμη του ταμιευτήρα και τις βροχοπτώσεις αποτελούν πολύ καλές ενδείξεις της σωστής και ασφαλούς ή μη λειτουργίας του φράγματος.

Με αυτόν τον τρόπο, θα εξασφαλισθεί η βιωσιμότητα και η ασφαλής λειτουργία του έργου και αποκαθίσταται το αίσθημα δημοσίας ασφαλείας. Πρόκειται για ένα έργο το οποίο χρήζει ευμενούς μεταχείρισης καθώς εξυπηρετεί το δημόσιο καλό και την ευημερία της περιοχής της Καρδίτσας.

Βιβλιογραφία

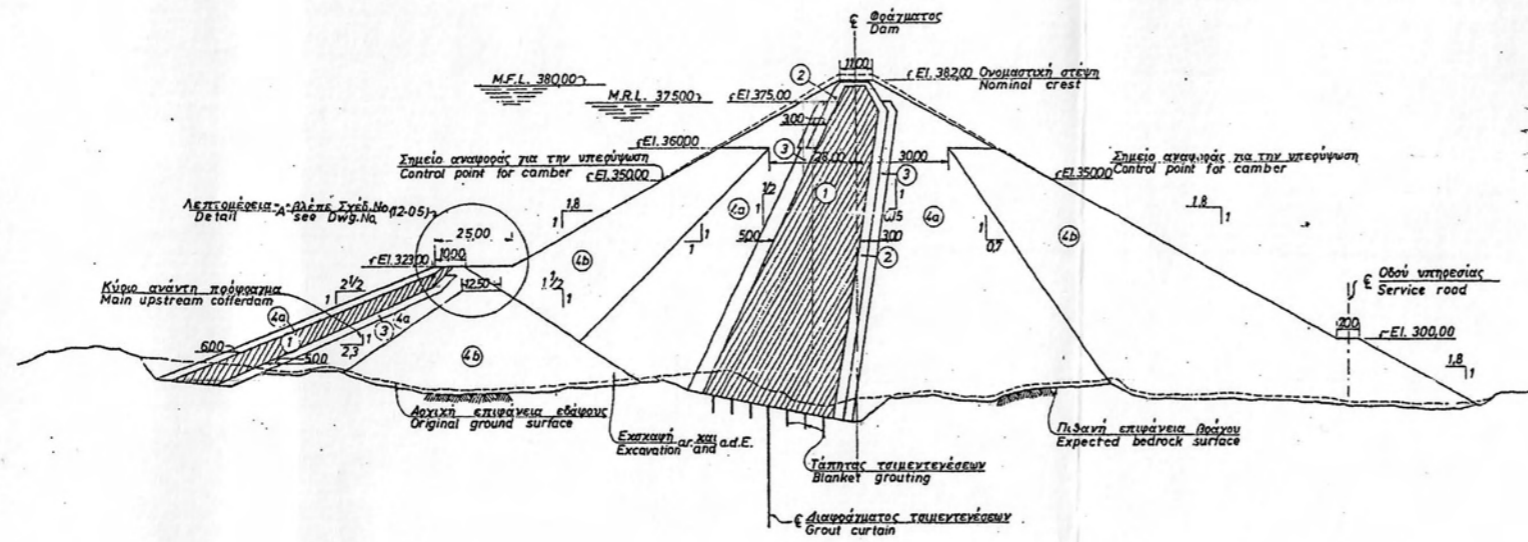
- [1] **Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99** GICB ICOLD, Paris , 1995.
- [2] **Geotechnical Engineering of Dams** Robin Fell et al. , London , A.A. Balkema Publishers Leiden, The Netherlands, Taylor & Francis Group , 2005.
- [3] **Improvement of Existing Dam Monitoring- Recomendations and case studies, Bulletin 87** , CIGB ICOLD , Paris , 1992.
- [4] **Αστοχίες και ατυχή Συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων** , Μουτάφης Ι. Ν.
- [5] **Βελτιωμένη Μεθοδολογία Εκτίμησης Σεισμικών Συντελεστών για τη Ψευδο-Στατική Ανάλυση Ευστάθειας Πρανών Χωμάτινων Φραγμάτων**
Παπαδημητρίου Α., Μπουκοβάλας Γ. , Αναστασόπουλος Κ. - 3ο Πανελλήνιο
Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας , 2008.
- [6] **Γενικές Αρχές για τη σύνταξη Γενικού Κανονισμού Ασφαλείας Φραγμάτων** Τσικνάκου Γ. , Λάρισα, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων , 2008.
- [7] **Η Συμπεριφορά του Φράγματος Σμοκόβου** Ντουνιάς Γ. , Ξάνθη , 5ο Πανελλήνιο συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής , 2006.
- [8] **Ολοκλήρωση και πρώτη πλήρωση του φράγματος Σμοκόβου** , Ι.Γ. Καραβοκύρης, Γ.Ντουνιάς, Δ.Νικολάου, Α.Καστούδης, Γ. Ανδριώτης.
- [9] **Τεχνολογία Γεωφραγμάτων**, Μουτάφης Ι. Ν. , Αθήνα , 2009.
- [10] **Φράγματα της Ελλάδας** , ΕΕΜΦ GCOLD. 2013.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΩΝ

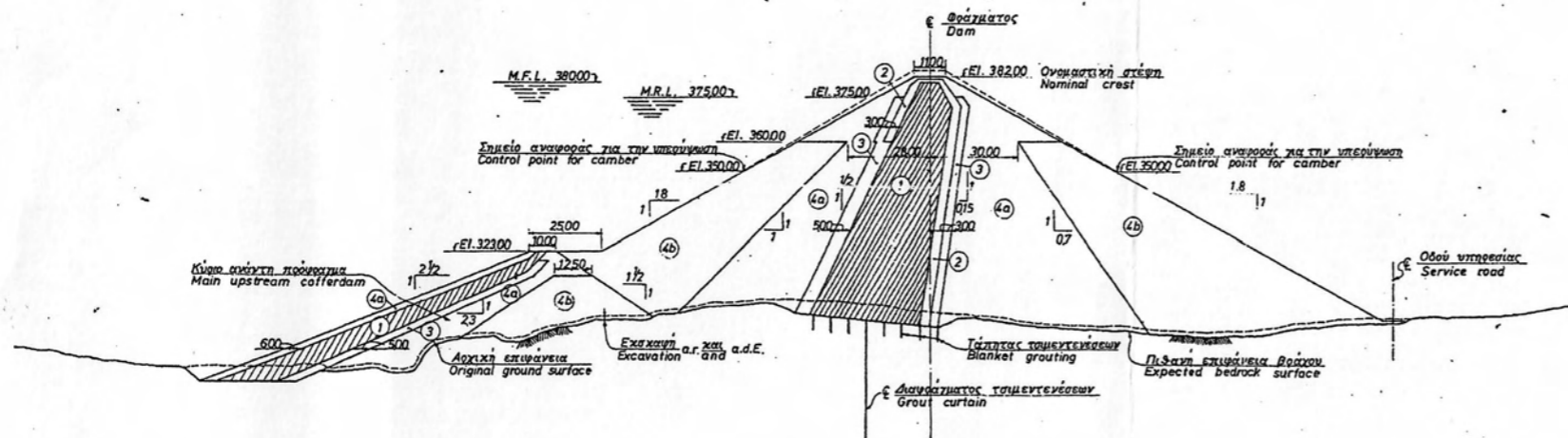
Τα σχέδια που ακολουθούν αποτελούν τα αυτούσια σχέδια από το Μητρώο του φράγματος Σμοκόβου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και για την κατασκευή του.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΖΩΝΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ
LEGEND FOR DAM ZONES

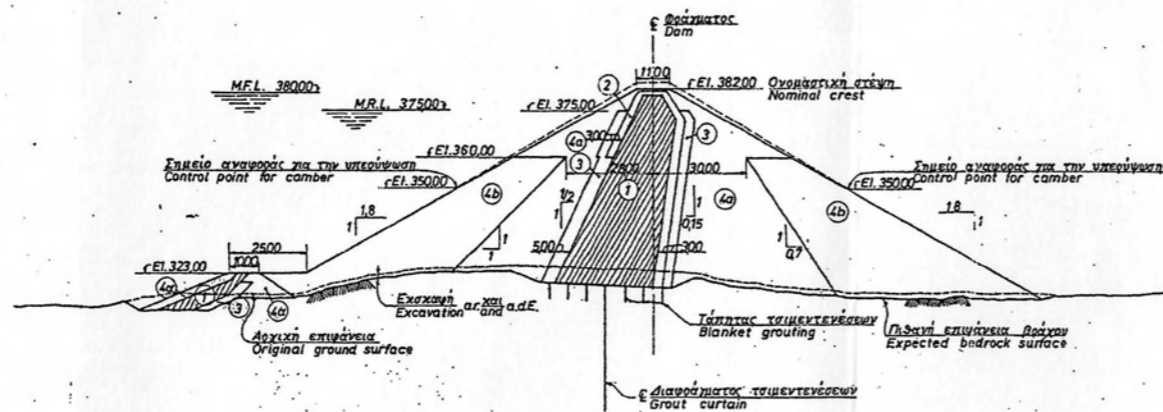
ΑΡ. ΖΩΝΗΣ No.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΖΩΝΗΣ ZONE DESCRIPTION	ΥΛΙΚΟ MATERIAL	ΠΑΧΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΕΝΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (M) COMPACTED LAYER THICKNESS (M)
1	Αδιαπέρατος πυρήνας. Imperious core.	Αδιαπέρατα εδαφικά υλικά από δανειοδαλμάσιους. Imperious earthfill materials from borrow areas.	0,15
2	Λεπτό φίλτρο. Fine filter.	Θραυστό βραχώδες υλικό από λατομείο ή επεξεργασμένο υλικό από δανειοδαλμάσιους αμμοχάλικου, max. μέγεθος 37,5mm. Grushed rock from quarry or processed gravel material from borrow areas finer than 37,5mm.	0,45
3	Χονδρόκοκκο φίλτρο. Coarse filter.	Θραυστό βραχώδες υλικό από λατομείο ή επεξεργασμένο υλικό από δανειοδαλμάσιους αμμοχάλικου max. μέγεθος 75,0 mm. Crushed rock from quarry or processed gravel material from borrow areas finer than 75,0mm.	0,45
4a	Σώμα στήριξης. Εσωτερική ζώνη. Shell, Inner zone.	Λιθορριπή από λατομείο max. μέγεθος 90cm. Rockfill from quarry max. particle size 90 cm.	1,00
4b	Σώμα στήριξης. Εξωτερική ζώνη. Shell, Outer zone.	Λιθορριπή από προϊόντα εκσκαφής ή από λατομείο max. μέγεθος 1,50 m. Rockfill from required excavations or from quarry, max. particle size 1,50m.	2,00
5	Βάση δρόμου. Road base course.	Θραυστό βράχος όπως προδιαγράφεται για το υλικό βάσης στο Κεφ. 10 των Τεχν.Προσ. Crushed rock as specified for base course in Section 10 of the Tech. Spec.	0,10



ΤΟΜΗ SECTION A-A



ΤΟΜΗ SECTION B-B



ΤΟΜΗ SECTION C-C

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ
NOTE

Το Σχέδιο αυτό να σχετίζεται με τα Dwg. Nos 12-03 και 12-05
Work this Drawing with Dwg. Nos. 12-03 and 12-05

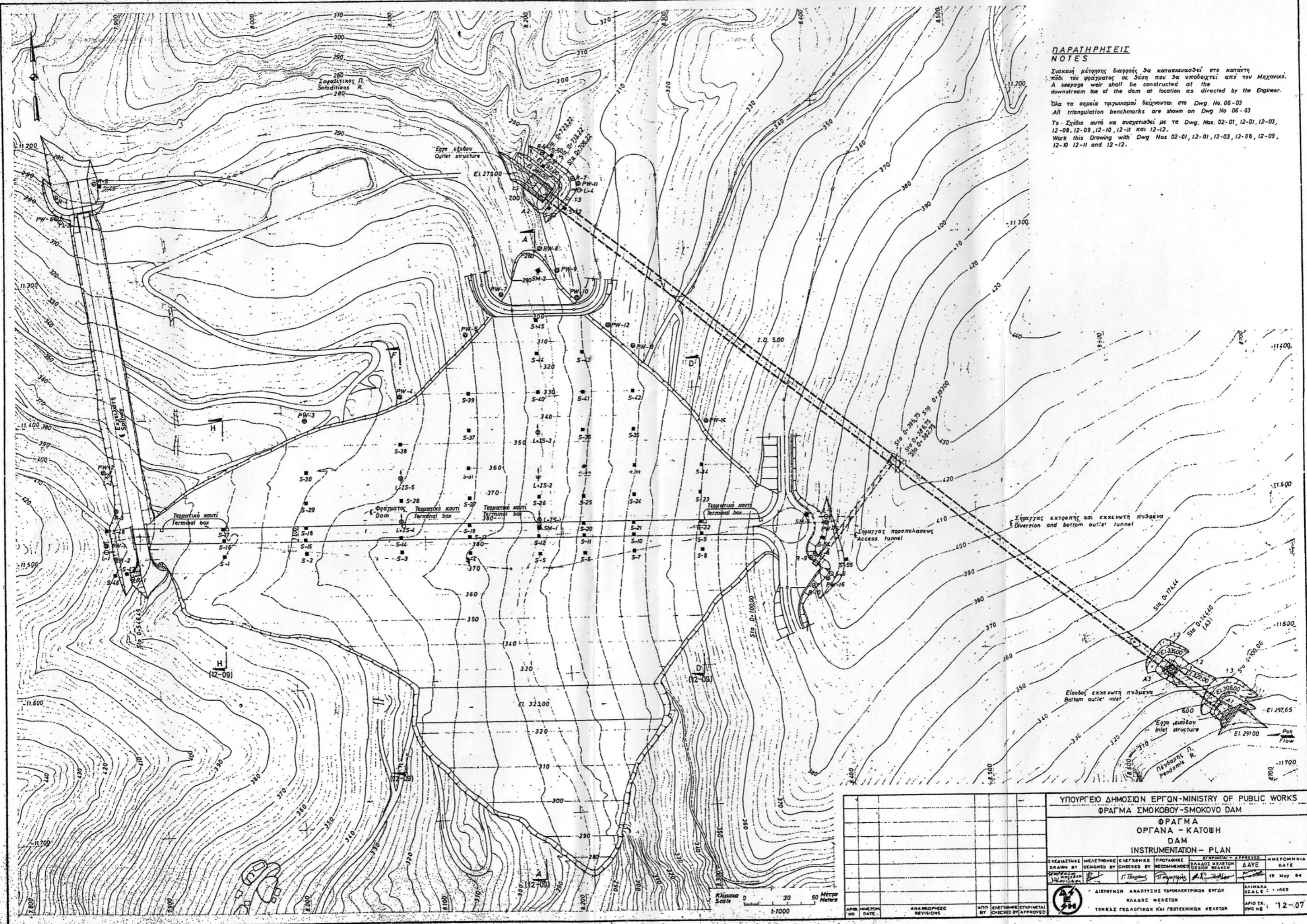
ΑΡΙΘ. ΗΜΕΡΩΝ No	ΑΝΑΒΕΒΑΙΝΟΥΣΙΣ REVISIONS	ΑΠΟ ΕΛΕΓΧΟΝΤΕΣ/ΕΓΓΡΗΓΗΤΑΙ CHECKED BY/APPROVED

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ - MINISTRY OF PUBLIC WORKS
ΦΡΑΓΜΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ - SMOKOVO DAM
ΤΟΜΟΣ ΦΥΛΛΟ 1
DAM
SECTIONS SHEET 1

ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΣ DRAWN BY	ΜΕΛΕΤΗΝΙΚΟΣ DESIGNED BY	ΕΛΕΓΧΟΝΤΗΣ CHECKED BY	ΠΡΟΒΑΘΝΗΣ RECOMMENDED	ΕΓΓΡΗΓΗΤΗΣ APPROVED	ΚΛΑΔΟΣ ΜΕΛΕΤΩΝ DESIGN BRANCH	Δ.Α.Υ.Ε. DATE	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ DATE
							18 MAY 1984

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΚΛΑΔΟΣ ΜΕΛΕΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

ΚΑΙΜΑΚΑ
SCALE: 1:1000
ΑΡΙΘ. ΣΧ. ΔΩΓ. ΝΕ 12-04



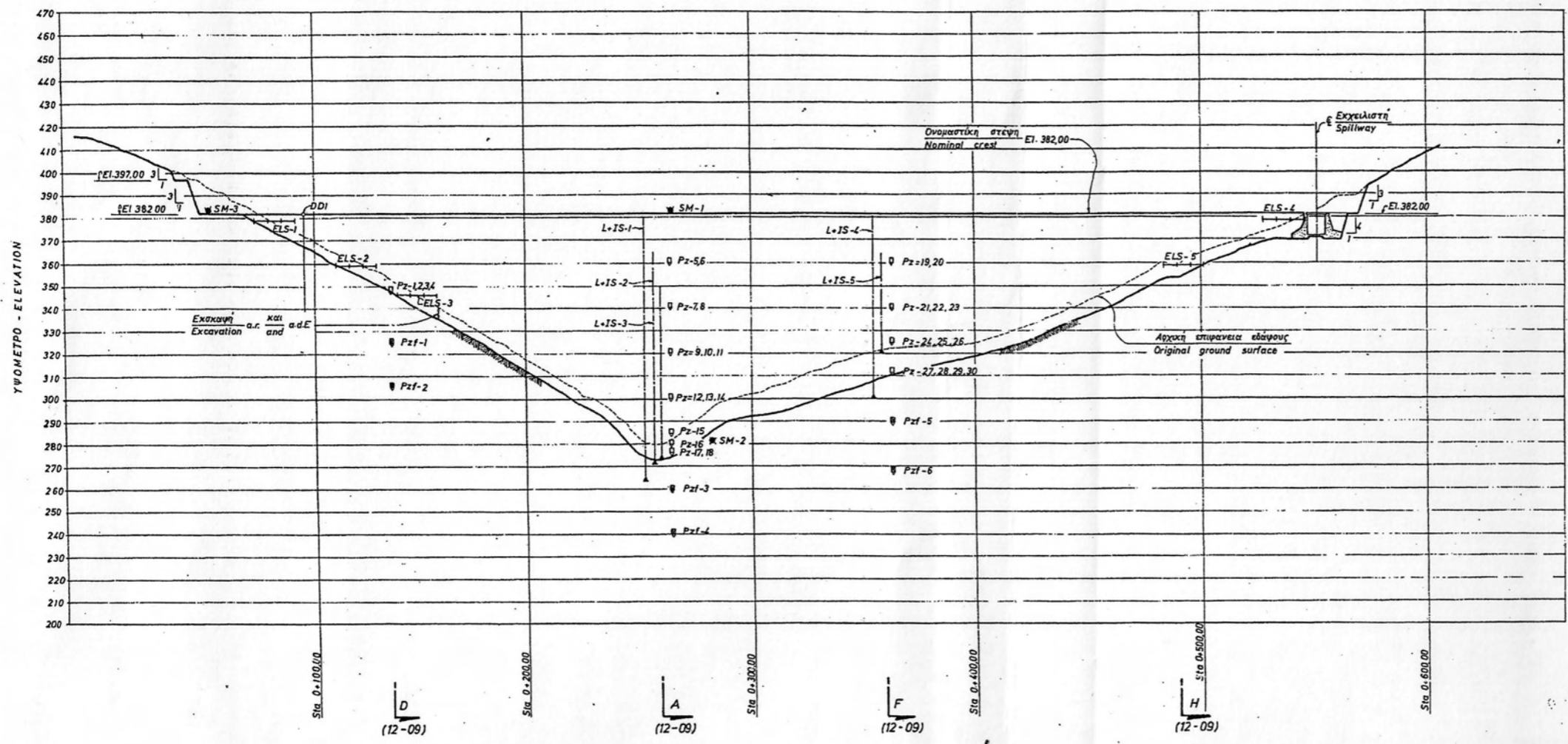
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
NOTES

Συσκευή μέτρησης διαφοράς θα κατασκευασθεί στο κατώτερο πόδι του φραγματος α δέση που θα υποδειχτεί από τον Μηχανικό.
 A sarge weir shall be constructed at the downstream toe of the dam at location as directed by the Engineer.

Όλα τα σημεία τριγωνισμού δείχνονται στο Dwg. No. 06-03
 All triangulation benchmarks are shown on Dwg No 06-03

Το Σχέδιο αυτό να σχετίζεται με τα Dwg. Nos. 02-01, 12-01, 12-03, 12-08, 12-09, 12-10, 12-11 και 12-12.
 Work this Drawing with Dwg Nos 02-01, 12-01, 12-03, 12-08, 12-09, 12-10, 12-11 and 12-12.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ-MINISTRY OF PUBLIC WORKS			
ΦΡΑΓΜΑ ΣΙΜΟΚΟΒΟΥ-ΣΜΟΚΟΒΟ DAM			
ΦΡΑΓΜΑ ΟΡΓΑΝΑ - ΚΑΤΩΣΗ DAM			
INSTRUMENTATION - PLAN			
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΣ DRAWN BY	ΜΕΛΕΤΗΘΗΣ DESIGNED BY	ΕΛΕΓΧΘΗΣ CHECKED BY	ΠΡΟΤΑΘΗΣ RECOMMENDED
ΚΑΛΩΣ ΜΕΛΕΤΩΝ DESIGN BRANCH	Δ. Τσιγγιάνης	Π. Τσιγγιάνης	Α. Τσιγγιάνης
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ DATE	Δ.Α.Υ.Ε.	Δ.Α.Υ.Ε.	Δ.Α.Υ.Ε.
	18 May 84		
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΛΩΣ ΜΕΛΕΤΩΝ			ΚΑΙΜΑΚΑ SCALE: 1:1000
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ			ΑΡΙΘ. ΤΣ. Dwg No: 12-07
ΑΡΙΘ. ΗΜΕΡΩΝ DATE	ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΙΣ REVISIONS	ΑΠΟ ΕΛΕΓΧΘΗΣ ΕΓΚΡΙΝΕΤΑΙ BY CHECKED BY APPROVED	



ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ - ΚΑΤΑΝΤΗ ΟΨΗ
 PROFILE ALONG & DAM - LOOKING UPSTREAM

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
 NOTES**

Τα καλώδια των γραμμικών μηχανομετρών ELS-1 και ELS-4 θα διαστρωθούν στη ζώνη 1 σε τάφρους κάθετες προς τον άξονα του φράγματος στα υψόμετρα τοποθέτησης των οργάνων και μέχρι τη ζώνη 2 καταντή και από το σημείο αυτό, μέσα από κυματοειδείς σωλήνες "ARMCO" τοποθετημένες στη ζώνη 2, θα οδηγηθούν σε τερματικές κοιλίες στη στέγη του φράγματος. (βλ. αντίστοιχη λεπτομέρεια για το ELS-5 στην τομή H-H Dwg. No. 12-09).

The cables of linear strain meters ELS-1 and ELS-4 will be laid in zone 1 in trenches perpendicular to the dam axis, at the elevation where the instrument is installed, terminating at zone 2 downstream, and from this point, through corrugated "ARMCO" pipes placed in zone 2, to terminal boxes at the dam crest. (see relative detail for ELS-5 at section H-H Dwg. No. 12-09).

Τα καλώδια του γραμμικού μηχανομέτρου ELS-3 θα οδηγηθούν στη στέγη του φράγματος μέσα από την τάφρο καλωδίων πιεζομετρών και τον κυματοειδή σωλήνα "ARMCO" στη διατομή D-D.

The cables of linear strain meter ELS-3 shall be directed to the dam crest through the piezometer cable trench and the corrugated "ARMCO" pipe at section D-D.

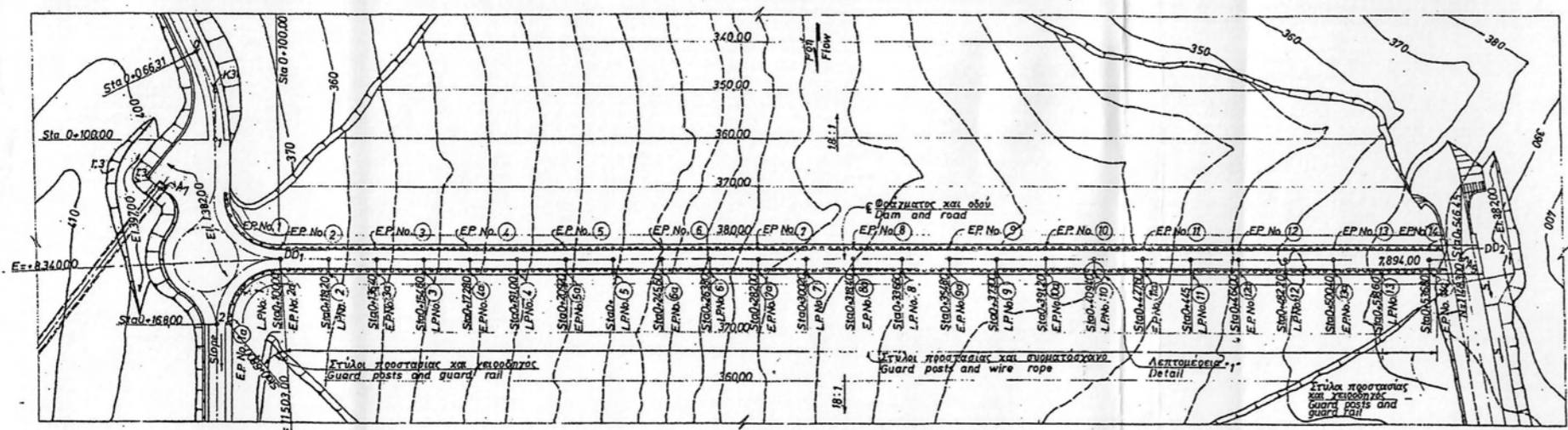
Όλα τα όργανα που δείχνονται στο Σχέδιο αυτό είναι τοποθετημένα στο επίπεδο των τομών D-D, A-A και F-F και μόνο για σχεδιαστικούς λόγους δείχνονται σχηματικά εκτός του όγκου των τομών.

All instruments shown on this Drawing are located on the plane of sections D-D, A-A and F-F and for drafting purposes only the instruments are shown schematically outside the line of the sections.

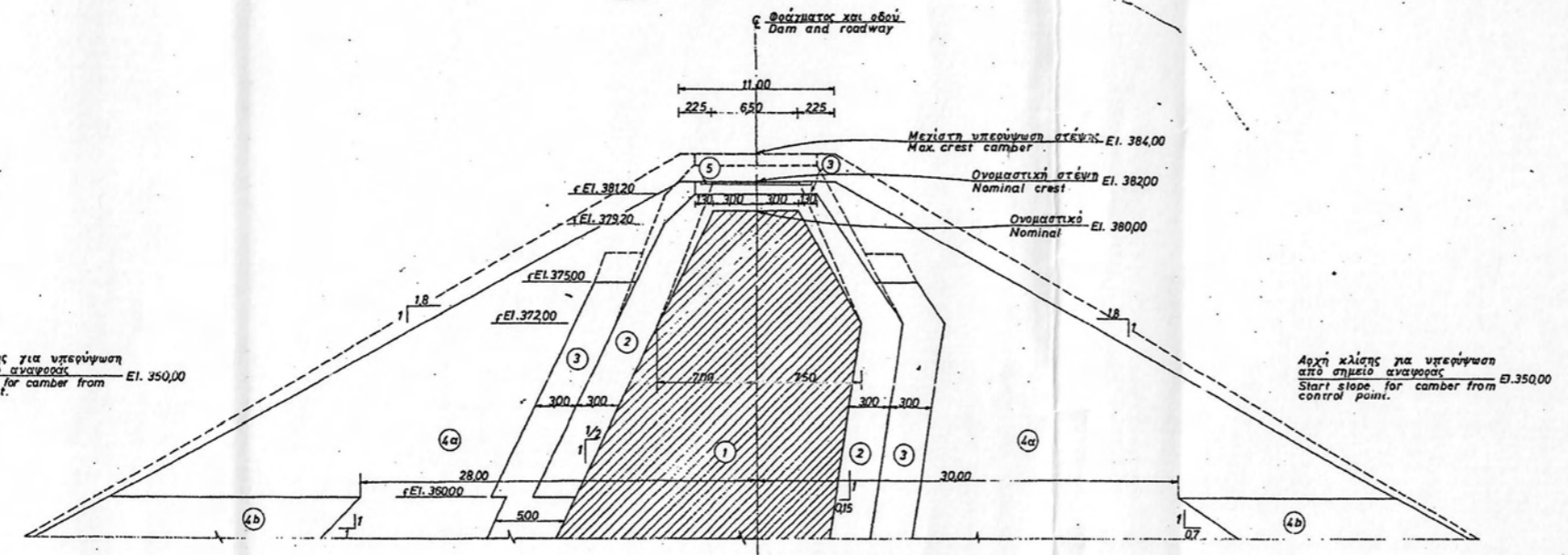
Το Σχέδιο αυτό να συσχετισθεί με τα Dwg. Nos. 02-01, 12-01, 12-03, 12-07, 12-09, 12-10, 12-11 και 12-12.

Work this Drawing with Dwg Nos 02-01, 12-01, 12-03, 12-07, 12-09, 12-10, 12-11 and 12-12.

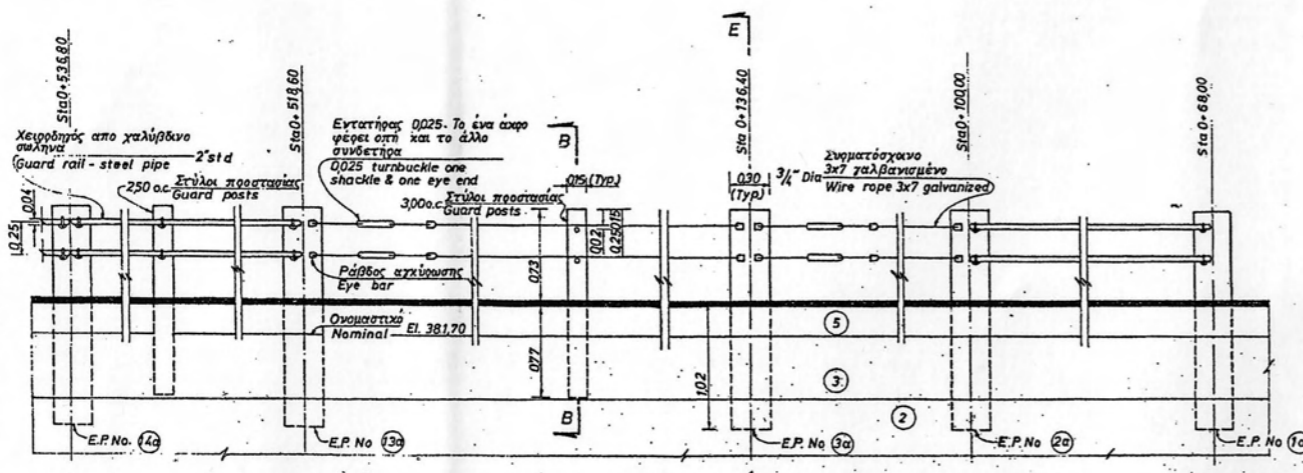
ΑΡΙΘ. ΗΜΕΡΑΣ NO DATE		ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΕΙΣ REVISIONS		ΑΠΟ ΕΛΕΓΧΟΝΤΕΣ/ΕΓΚΡΙΝΕΤΑΙ BY CHECKED BY/ APPROVED	
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ - MINISTRY OF PUBLIC WORKS ΦΡΑΓΜΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ - SMOKOVO DAM					
ΦΡΑΓΜΑ ΟΡΓΑΝΑ - ΜΗΚΟΤΟΜΗ DAM INSTRUMENTATION - PROFILE					
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΣ DRAWN BY	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ DESIGNED BY	ΕΛΕΓΧΟΝΤΗΣ CHECKED BY	ΠΡΟΤΑΒΗΣ RECOMMENDED BY	ΕΓΚΡΙΝΕΤΑΙ DESIGN BRANCH	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ DATE
ΚΑΜΑΚΑ	ΚΑΜΑΚΑ	ΚΑΜΑΚΑ	ΚΑΜΑΚΑ	ΚΑΜΑΚΑ	18 May 84
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΛΑΔΟΣ ΜΕΛΕΙΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΔΑΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΛΕΙΩΝ					ΚΑΜΑΚΑ SCALE: 1:1000 ΑΡΙΘ. ΕΚ. DWS. NO: 12-08



ΚΑΤΩΗ ΣΤΕΨΗΣ
CREST PLAN
Κλίμακα 1:1000
Scale

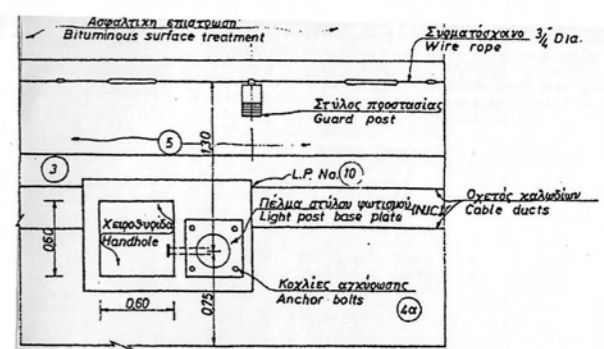


ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΣΤΕΨΗΣ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ
CREST DETAIL AT MAXIMUM CAMBER OF DAM
Κλίμακα 1:200
Scale

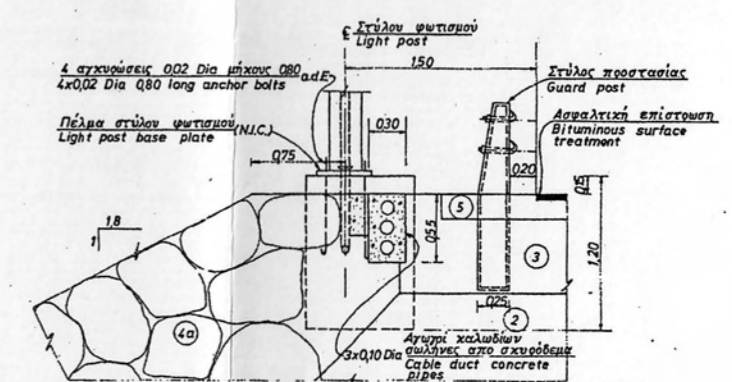


ΤΟΜΗ SECTION A-A
Κλίμακα 1:25
Scale

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΡΑΒΔΟΥ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ
EYE BAR DETAIL
Εκτός κλίμακας
Not to scale



ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ 1'
DETAIL
Κλίμακα 1:25
Scale

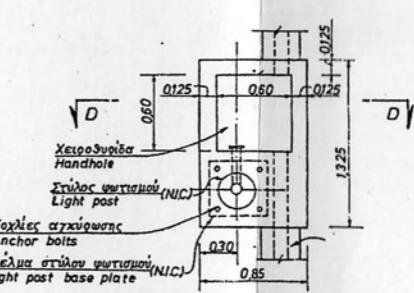


ΤΟΜΗ SECTION C-C
Κλίμακα 1:25
Scale

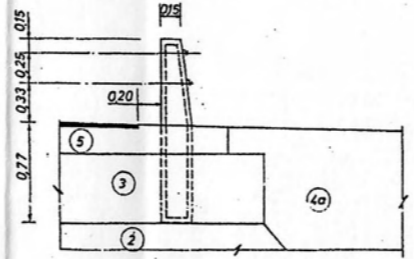
ΥΠΟΜΝΗΜΑ
LEGEND
EP: Στόλος πέρατος
LP: Στόλος φωτισμού
Lamp post

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
NOTES

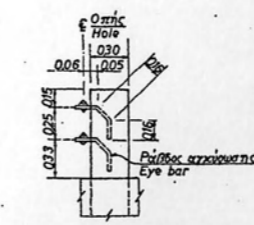
Το Σχέδιο αυτό να συσχετισθεί με το Dwg. No. 12-01.
Work this Drawing with Dwg. No. 12-01.
Για γενικές παρατηρήσεις και σχετικά Σχέδια βλέπε Dwg. Nos. 12-01 και 12-03.
For general notes and reference Drawing see Dwg. Nos. 12-01 and 12-03.



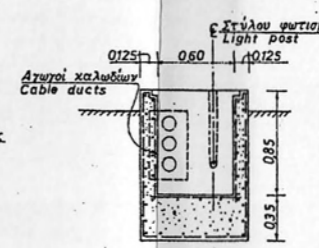
ΚΑΤΩΗ ΣΤΥΛΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ
PLAN OF LIGHT POST
Κλίμακα 1:25
Scale



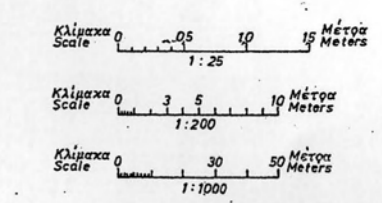
ΤΟΜΗ SECTION B-B
Κλίμακα 1:25
Scale



ΤΟΜΗ SECTION E-E
Κλίμακα 1:25
Scale



ΤΟΜΗ SECTION D-D
Κλίμακα 1:25
Scale



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ - MINISTRY OF PUBLIC WORKS			
ΦΡΑΓΜΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ - SMOKOVO DAM			
ΦΡΑΓΜΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ DAM MISCELLANEOUS DETAILS			
ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΣ DRAWN BY	ΜΕΛΕΤΗΝΤΗΣ DESIGNED BY	ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ CHECKED BY	ΠΡΟΤΑΞΗ RECOMMENDED
ΚΑΡΑΪΩΤΗΣ KARAIOTIS	Δ. ΑΥΓΕ D. AUGE	ΚΑΡΑΪΩΤΗΣ KARAIOTIS	Δ. ΑΥΓΕ D. AUGE
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ DATE			18 May 1984
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΛΑΔΟΣ ΜΕΛΕΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΩΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ			ΚΑΛΩΝΟΣ KALONOS
ΑΠΟ. ΕΣ. DWS.HB			12-06

