



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

*«Φίλτρα φραγμάτων -
Καταγραφή στοιχείων από ελληνικά
φράγματα»*

Εκπόνηση εργασίας: **Βούλγαρη Χρυσούλα**

Επιβλέπων: **Μουτάφης Νικόλαος**

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της.

Πρώτα από όλα θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Νικόλαο Μουτάφη, για την πολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Η συμβολή του δεν περιορίστηκε στην απλή μετάδοση γνώσεων, αλλά και στην ουσιαστική βοήθεια και την υπομονή του σε κάθε στάδιο της εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ τους συναδέλφους Μπέσιου Βασιλική και Ρόπη Κωνσταντίνο, οι οποίοι έχοντας εμπειρία εργασιών σε παρόμοια θέματα συνέβαλαν αρκετά με τις γνώσεις και τις πληροφορίες τους στην συλλογή των απαραίτητων δεδομένων που χρειάστηκαν για την εργασία.

Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους, πλέον και συναδέλφους Λίνα και Λευτέρη που ήταν μαζί μου σε κάθε εξεταστική και στην εκπόνηση όλων των εργασιών κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών αλλά και των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Θα ήταν παράληψη, να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους τους φίλους μου που με στηρίζουν και είναι δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
1.2. ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	4
1.2.1. Φράγματα από σκυρόδεμα	4
1.2.2. Γεωφράγματα	5
ΦΙΛΤΡΑ	11
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	11
2.2. ΡΟΛΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ	13
2.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΗΘΗΣΗ.....	15
2.4. ΥΔΑΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	17
2.5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	19
2.6. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΦΙΛΤΡΩΝ ΣΕ ΦΡΑΓΜΑ	22
2.6.1. Λειτουργία κατάντη φίλτρου	23
2.6.2. Λειτουργία ανάντη φίλτρου.....	24
2.7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ.....	26
2.8. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ	27
2.8.1. Μέθοδος Ισοδύναμου Άμμου	27
2.8.2. Μέθοδος με κόσκινα	28
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	30
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	30
3.2. ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	31
3.2.1. NEF test - Sherard & Dunnigan (1989)	32
3.2.2. CEF test - Foster & Fell (1999)	34
3.2.3. Άλλες μελέτες.....	35
3.3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΦΙΛΤΡΩΝ.....	39
ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	44
4.1. ΓΑΔΟΥΡΑ	44
4.1.1. Υλικό πυρήνα.....	45
4.1.2. Υλικό φίλτρου.....	47
4.1.3. Υλικό στραγγιστηρίου.....	49
4.2. ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΛΑΜΩΤΗΣ	52
4.2.1. Υλικό Πυρήνα	52
4.2.2. Υλικό φίλτρου.....	52
4.2.3. Υλικό στραγγιστηρίου.....	55
4.3. ΚΑΛΥΒΑ	57

4.3.1. Υλικό Πυρήνα	57
4.3.2. Υλικό Φίλτρου	58
4.3.3. Υλικό Στραγγιστηρίου.....	60
4.4. ΜΕΣΟΒΟΥΝΟ	63
4.4.1.Υλικό Πυρήνα	63
4.4.2. Υλικό Φίλτρου	64
4.4.3. Υλικό Στραγγιστηρίου.....	66
4.5. ΣΕΤΤΑ - ΜΑΝΙΚΙΑ.....	69
4.5.1. Υλικό Πυρήνα	70
4.5.2. Υλικό Φίλτρου	72
4.5.3. Υλικό Στραγγιστηρίου.....	75
4.6. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑ	77
4.6.1. Υλικό Πυρήνα	77
4.6.2.Υλικό Φίλτρου	78
4.6.3. Υλικά στραγγιστηρίου.....	81
4.7. ΦΑΝΕΡΩΜΕΝΗ	83
4.7.1. Υλικό Πυρήνα	83
4.7.2. Υλικό Φίλτρου	83
4.7.3.Υλικό Στραγγιστηρίου.....	87
4.8. ΛΕΥΚΟΓΕΙΩΝ	90
4.8.1.Υλικό Πυρήνα	91
4.8.2. Υλικό Φίλτρου	91
4.8.3.Υλικό Στραγγιστηρίου.....	92
4.9. ΘΗΣΑΥΡΟΣ.....	93
4.9.1.Υλικό Πυρήνα	93
4.9.2.Υλικό Φίλτρου	94
4.9.3.Υλικό Στραγγιστηρίου.....	95
4.10. ΣΜΟΚΟΒΟ	96
4.10.1.Υλικό Πυρήνα	96
4.10.2.Υλικό Φίλτρου	97
4.10.3.Υλικό Στραγγιστηρίου.....	97
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
5.1. ΠΥΡΗΝΕΣ.....	99
5.2. ΦΙΛΤΡΑ	101
5.3. ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΡΙΑ	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.	Φράγμα Sadd el-Kafara (Πηγή: www.planete-tp.com).....	3
Εικόνα 1.2.	Φράγμα Αρχαίας Αλυζίας (Πηγή: Ζαρκαδούλας, 2005).	3
Εικόνα 1.3.	Τοξωτό φράγμα βαρύτητας στην Ισπανία (Aldeadánvila Dam).....	4
Εικόνα 1.4.	Αντιρηδωτό φράγμα βαρύτητας στον Καναδά (Daniel - Johnson dam).....	5
Εικόνα 1.5.	Παραδείγματα διαφόρων τύπων γεωφραγμάτων (Πηγή: http://www.geo.auth.gr)	5
Εικόνα 1.6.	Τυπική μορφή φράγματος ΛΑΠΣ (Πηγή: Μουτάφης, 2009)	7
Εικόνα 1.7.	Διατομή ομοιογενούς χωμάτινου φράγματος (Πηγή: http://www.geo.auth.gr)	8
Εικόνα 1.8.	Διατομή χωμάτινου διαζωνισμένου φράγματος (Πηγή: Μουτάφης, 2009).....	8
Εικόνα 2.1.	Σχηματισμός των φίλτρων Terzaghi (Πηγή: Prinz, 1982).....	14
Εικόνα 2.2.	Αστοχίες από διασωλήνωση (Πηγή: Foster and Fell, 1999)	20
Εικόνα 2.3.	Τυπική διατομή φράγματος και θέση τοποθέτησης του φίλτρου (Πηγή: Raut, 2006)	22
Εικόνα 2.4.	Σχέση μεταξύ D_{15} - d_{85} (Πηγή: Μπέσιου, 2008)	23
Εικόνα 2.5.	Κριτήριο Κατάρρευσης -Λεπτόκοκκη καμπύλη (Πηγή: Μουτάφης, 2009).....	25
Εικόνα 3.1.	Συσκευή δοκιμής NEF (Πηγή: Sherard, 1989).....	33
Εικόνα 3.2.	Συσκευή δοκιμής CEF (Πηγή: Foster & Fell, 1999).....	34
Εικόνα 3.3.	Πρόβλημα διασωλήνωσης φράγματος Ochocco	37
Εικόνα 3.4.	Κριτήρια φίλτρων με βάση την αναλογία D_{15} / d_{85} (Πηγή Terzaghi et al. 1996).....	41
Εικόνα 4.1.	Τυπική διατομή φράγματος Γαδουρά (Πηγή: Μαρίνος, 2008).....	45
Εικόνα 4.2.	Χάρτης πλαστικότητας Casagrande (Πηγή: Σακελλαρίου, 2003)	46
Εικόνα 4.3.	Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών δανειοθαλάμων υλικού πυρήνα	46
Εικόνα 4.4.	Περιβάλλουσες υλικού Ζώνης 1 (πυρήνας) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού Ζώνης 2 (φίλτρο) και Ζώνης 3 (στραγγιστηρίο)	49
Εικόνα 4.5.	Κοκκομετρικές καμπύλες πυρήνα (ζώνη 1), φίλτρου (ζώνη 2Α) και στραγγιστηρίου (ζώνη 2Β).....	55
Εικόνα 4.6.	Κοκκομετρικές καμπύλες πυρήνα (ζώνη 1)	57

Εικόνα 4.7.	Περιβάλλουσες υλικού Ζώνης 1 (πυρήνα φράγματος) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού Ζώνης 2 (φίλτρου) και Ζώνης 3 (στραγγιστηρίου).....	60
Εικόνα 4.8.	Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών πυρήνα και καμπύλες δειγμάτων ομάδων	64
Εικόνα 4.9.	Περιβάλλουσες υλικού Ζώνης 1 (πυρήνα φράγματος) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού Ζώνης 2 (φίλτρου) και Ζώνης 3 (στραγγιστηρίου)	67
Εικόνα 4.10.	Τυπική διατομή φράγματος Σέττα - Μανίκια (Πηγή: Μουτάφης, 2008).....	69
Εικόνα 4.11.	Κοκκομετρικές καμπύλες υλικού πυρήνα - Ζώνη 1	71
Εικόνα 4.12.	Περιβάλλουσες υλικού πυρήνα φράγματος και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού ζώνης φίλτρου και στραγγιστηρίου	75
Εικόνα 4.13.	Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών υλικού πυρήνα	78
Εικόνα 4.14.	Όρια κοκκομετρικών καμπυλών Ζώνης 2 - Φίλτρο	80
Εικόνα 4.15.	Διάγραμμα περιβαλλουσών Ζωνών 2 και 3	82
Εικόνα 4.16.	Τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες περιβαλλουσών υλικού πυρήνα	84
Εικόνα 4.17.	Περιβάλλουσες υλικού πυρήνα φράγματος (C) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού ζώνης φίλτρου (FN) και στραγγιστηρίου (D).....	87
Εικόνα 4.18.	Τυπική διατομή φράγματος Λευκογείων (Πηγή: Υπουργείο αγροτικής ανάπτυξης και τροφίμων, 1986)	90
Εικόνα 4.19.	Τυπική διατομή φράγματος Θησαυρού (Πηγή: ΔΕΗ, 1993).....	93
Εικόνα 4.20.	Τυπική διατομή φράγματος Σμοκόβου (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων 1997))	96

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1.	Περιγραφή ζωνών φράγματος.	9
Πίνακας 2.1.	Πάχος συρμάτων κόσκινων (Πηγή: Παπαχαρήσης, 1999).....	29
Πίνακας 3.1.	Κριτήρια φίλτρων.....	40
Πίνακας 3.2.	Κριτήρια συγκράτησης φίλτρων (ICOLD, 1994).....	42
Πίνακας 3.3.	Σχέση διαστάσεων D_{10} και D_{90} (φίλτρου) που μειώνουν τον κίνδυνο διαχωρισμού	43
Πίνακας 4.1.	Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Γαδουρά ..	45
Πίνακας 4.2.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	48
Πίνακας 4.3.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	50
Πίνακας 4.4.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	54
Πίνακας 4.5.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	56
Πίνακας 4.6.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	59
Πίνακας 4.7.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	61
Πίνακας 4.8.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	66
Πίνακας 4.9.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	68
Πίνακας 4.10.	Ζώνες φράγματος Σέττα - Μανίκια (Πηγή: Μουτάφης, 2008).....	70
Πίνακας 4.11.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης Ζώνης 2.....	74
Πίνακας 4.12.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	76
Πίνακας 4.13.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	80
Πίνακας 4.14.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	82
Πίνακας 4.15.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	86
Πίνακας 4.16.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	89
Πίνακας 4.17.	Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Λευκογείων	90
Πίνακας 4.18.	Υλικά πυρήνα.....	91
Πίνακας 4.19.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	92
Πίνακας 4.20.	Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Θησαυρού.....	93
Πίνακας 4.21.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	94
Πίνακας 4.22.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	95

Πίνακας 4.23.	Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Σμοκόβου.....	96
Πίνακας 4.24.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου	97
Πίνακας 4.25.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου	98
Πίνακας 5.1.	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης των φίλτρων.....	102

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φράγματα αποτελούν μία από τις πρώτες τεχνικές κατασκευές του ανθρώπου, αφού η κατασκευή των πρώτων φραγμάτων ανάγεται στα προϊστορικά χρόνια, όταν ο άνθρωπος στην προσπάθειά του να καλύψει τις ανάγκες του για νερό κατασκεύασε τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Το φράγμα είναι ένα τεχνητό έργο με σκοπό τη δημιουργία ταμιευτήρα για αποθήκευση νερού ή συγκράτηση φερτών υλικών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φραγμάτων, στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα χωμάτινα φράγματα και πιο συγκεκριμένα τα φίλτρα που τοποθετούνται σε αυτά.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το πρώτο είναι ένα εισαγωγικό κομμάτι που περιγράφει γενικά τα φράγματα και τους τύπους φραγμάτων που υπάρχουν. Στο κεφάλαιο δύο, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα φίλτρα των φραγμάτων, το ρόλο που έχουν μέσα στο ανάχωμα, τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και τα κριτήρια επιλογής των κατάλληλων υλικών για φίλτρα. Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στα κριτήρια φίλτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν, καθώς και προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί σε φράγματα. Ακολουθεί το κεφάλαιο τέσσερα, όπου γίνεται καταγραφή στοιχείων για φίλτρα φραγμάτων από την Ελλάδα. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται στοιχεία για τα φράγματα: Γαδουρά, Καλαμωτής, Καλυβά, Μεσόβουνο, Σέττα - Μανίκια, Τριανταφυλλιά, Φανερωμένη, Λευκογείων, Θησαυρός και Σμόκοβο. Τέλος, στο κεφάλαιο πέντε, καταγράφονται ορισμένα συμπεράσματα που αφορούν στα υλικά του πυρήνα, των φίλτρων και των στραγγιστηρίων του χωμάτινου φράγματος.

ABSTRACT

Dams are one of the first human -made structures. The construction of the first dams dates back to prehistoric times when man, in his attempt to cover his needs for water, built the first earth dams. The dam is an artificial structure, which aims in the formation of a reservoir used for water storage and / or sediment retention. There are various types of dams. In the present thesis the earth dams and more specifically the filters installed in them, are being described.

The thesis consists of five chapters. The first is an introductory piece, that describes in general the dams and the types of dams available. Chapter two, focuses on the filters of the dams, the role they have within the embankment, how they operate and the selection criteria of appropriate materials. In the third chapter there is a brief review of the literature regarding the filter criteria used in the past, as well as problems that occurred in certain dams. Chapter four is following, with data recordings from dam filters in Greece. These include data from the dams of: Gadoura, Kalamoti, Kaliva, Mesovouno, Setta - Manikia, Triadafillia, Faneromeni, Lefkogion, Thesaurus and Smokovo. Finally, chapter five consists of conclusions related to the core material, filters and drains of the earth dams.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water management has always been a major problem for engineers. Since water is important for human survival and water resources are not endless. In addition, in many countries, such as in Greece, where the distribution of water resources depends on the season.

The most important structures used to store surface waters are dams.. The construction of the first dams dates back to prehistoric times when man, in his attempt to cover his need for water, built the first earth dams. The dam is an artificial structure, which aims in the formation of a reservoir used for water storage and / or sediment retention. Dams are also built for hydropower generation. In Figure 0. There are shown Sadd el – Kafara dam in Egypt (a) and Ancient Alizia's dam in Greece (b).

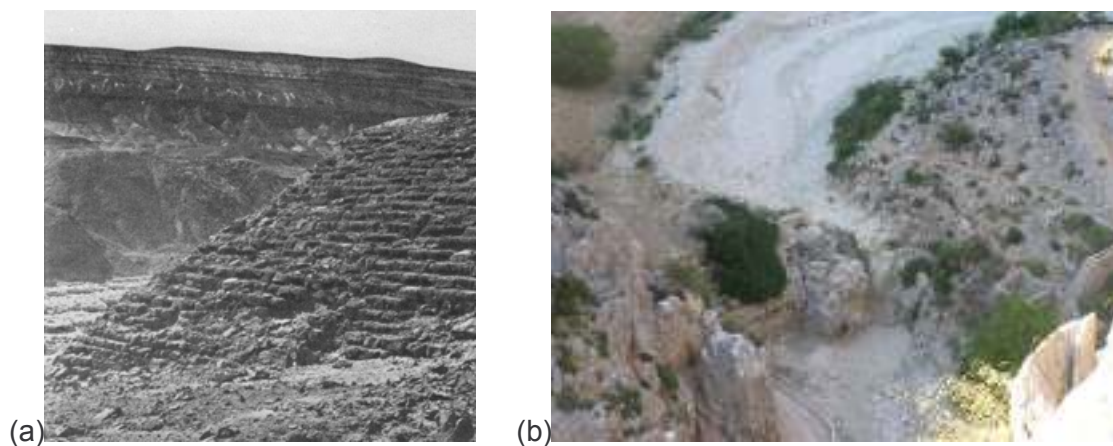


Figure 0. (a). Sadd el – Kafara (b). Ancient Alizia's dam

Depending on the materials used for the construction of the dams and the way that they are designed, there are the following dams' categories:

- Earthfill dams
- Embankment or rockfill dams
- Gravity dams
- Concrete Arch
- Buttress dam

Filters

When constructing a dam, a filter is designed to protect base soil from erosion due to seepage. As water flows through the soil, fine particles can be washed out, leading to internal erosion and eventually to the failure of the dam. A correctly designed filter retains loose soil particles in order to prevent erosion. On the other hand, it allows unobstructed seepage, preventing build-up of detrimental pore pressure. A filter is usually a natural or manufactured well-graded sand and gravel.

Filters are necessary in several locations within an embankment dam, but the most critical one is placed downstream of the core.

There are a number of factors affecting the filtration ability of filters, these factors can be termed in geometric, physical, hydraulic, chemical and biological factors. Filters are used in many structures such as embankment dams, agriculture drainage works, road pavements, retaining walls, canal linings, coastal protection works etc.

Nowadays, there are two types of filters being used, granular filters and geotextile. Granular filters have been in use for more than 100 years, whereas geotextile filters are a recent technological development and are in use for about 30 years. In this thesis, only the granular filters are studied.

Filters have to ensure that the dams core will not fail, because failure of the core might lead to failure of the dam. When important structures, such as embankment dams, fail the consequences are often enormous. For this reason, a well designed filter is necessary.

Literature Review

In order to understand better the filtrations mechanisms and the criteria used for filter design, a brief literature review has been conducted.

First time in 1920, it was Terzaghi, who suggested two filter design criteria through laboratory investigations on uniform sands. These criteria involved ratios of some specific sizes of filter and base materials. Most subsequent studies ended up either investigating validity of or extending these criteria to other soil types. Current professional guidelines are still empirical and based on particle sizes.

Most studies, have considered the particle size distribution curve of the base soils and filters as the most important parameters when designing a filter (Sherard and Dunnigan, 1985).

Dams in Greece

In this thesis the following dams have been studied: Gadoura, Kalamoti, Kaliva, Mesovouno, Setta - Manikia, Triadafillia, Faneromeni, Lefkogion, Thesaurus and Smokovo. All of the dams that were studied were earth dams with impermeable core. The data given in this thesis, concern core and filters particle size.

The particle size distributions and the maximum particle size of the filters of the dams that were studied are given on Table 0.

Conclusions

In most cases filters are well graded sand and gravel that can be found in the riverbed. Filter design is directly depended on base soil material.

All the dams that were studied have impermeable core and the maximum particle size of the filter varied from 19 mm to 38 mm.

The percentage of the fine particles in the filters of the dams that were studied was about 10%.

When there is much fine soil available, it is preferable to use it for the construction of the core, because of the increased demands on impermeability.

Filters should minimise internal erosion by retaining particles eroded from the core and control the seepage flow by forming a drainage layer.

Table 0. Particle size distribution

Sieve	Passing rate %									
	Gadoura	Kalamoti	Kaliva	Mesovouno	Setta - Manikia	Triantafillia	Faneromeni	Lefkogion	Thesaurus	Smokovo
1 1/2 inch									100	100
1 inch	100				100		100	75 - 100	78 - 100	78 - 100
3/4 inch	90 - 100	100	100	100	90 - 100		86 - 100		60 - 90	60 - 90
1/2 inch		88 - 100	86 - 100	89 - 100	80 - 100	100	71 - 100	56 - 90	45 - 80	45 - 80
3/8 inch	72 - 100		80 - 100	81 - 100	76 - 95	90 - 100	61.5 - 100	44 - 70	31 - 65	31 - 65
No 4	58 - 88	80 - 100	63 - 90	63 - 89	55 - 78	67 - 96	43 - 85	32 - 55	18 - 50	18 - 50
No 10	40 - 70	60 - 80	43 - 73	42 - 71	39 - 62	40 - 71	29 - 59	20 - 42	10 - 35	10 - 35
No 40	13 - 39	57 - 40	12 - 43	5 - 37	13 - 32	5 - 29	8 - 30	13 - 32	2 - 23	2 - 23
No 100	0 - 23	5 - 22	0 - 22	0 - 17		0 - 12		3 - 20	0 - 15	0 - 15
No 200	< 5	< 5	< 10	< 3	< 5	≤ 5	< 5	0 - 12	0 - 10	0 - 10
Max	19mm	20mm	19mm	19mm	25mm	25mm	19mm		1 1/2 ίντσες	1 1/2 ίντσες

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η διαχείριση του νερού, από την αρχαιότητα έως σήμερα, αποτελεί μείζον θέμα μηχανικούς, καθώς αφενός πρόκειται για αγαθό απαραίτητο για την επιβίωση και εξυπηρέτηση του ανθρώπου και αφετέρου τα υδατικά αποθέματα είναι εξαντλήσιμα.

Είναι γνωστό ότι στον ελληνικό χώρο παρουσιάζεται γεωγραφική και χρονική ανισοκατανομή των υδατικών πόρων, με την ύπαρξη των περισσότερων από αυτών στο δυτικό τμήμα της χώρας (Δυτική Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος και Ήπειρος), ενώ σε άλλες περιοχές υπάρχουν ελάχιστα υδατικά αποθέματα (π.χ. Κυκλάδες, Δωδεκάνησα). Η γεωγραφική ανισοκατανομή οφείλεται σε γεωγραφικούς παράγοντες, αλλά και στο γεγονός ότι οι περισσότερες και εντονότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται στη Δυτική Ελλάδα

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη έργων ταμίευσης των επιφανειακών υδάτων. Τα σημαντικότερα από τα έργα αυτά είναι τα και τα φράγματα, τα χρησιμεύουν στην αποθήκευση των επιφανειακών υδάτων και στη διαχείρισή τους προς όφελος του ανθρώπου.

Οι ταμιευτήρες είναι υδραυλικά έργα που κατασκευάζονται με σκοπό τον έλεγχο και τη ρύθμιση της παροχής των υδατορευμάτων. Ανάλογα με το μέγεθός τους καλούνται δεξαμενές, λιμνοδεξαμενές ή τεχνητές λίμνες. Η κατασκευή ενός ταμιευτήρα γίνεται γενικά μέσα στην κοίτη ενός ποταμού, με κατασκευή φράγματος σε σημείο όπου δημιουργείται

φυσική στένωση της κοιλάδας, ώστε να ελαχιστοποιείται το κατασκευαστικό κόστος του φράγματος.

Το φράγμα αποτελεί ένα τεχνητό έργο με το οποίο δημιουργείται κοιλότητα στην κοίτη ενός ποταμού, για αποθήκευση νερού ή συγκράτηση φερτών υλικών. Στόχος του μπορεί να είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παροχή άρδευσης ή ύδρευσης, ακόμα και η συγκράτηση πλημμυρών. Η λειτουργία ενός φράγματος είναι ζωτικής σημασίας για τις περιοχές που επωφελούνται από αυτή και ο σχεδιασμός του πρέπει να γίνεται μεθοδικά και προσεκτικά καθώς μια πιθανή αστοχία μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες.

Η επιλογή του σχεδιασμού του φράγματος γίνεται βάσει των αναγκών και των προοπτικών ανάπτυξης της περιοχής και μετά από μια σειρά μελετών, επιλέγεται ο τύπος και η διάταξη του έργου. Στη μελέτη σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη στοιχεία της τοπογραφίας και της γεωλογίας του περιβάλλοντος χώρου, της υδρολογίας και της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στη συνέχεια γίνεται φυσικά γεωτεχνική και στατική μελέτη και επιλέγεται η βέλτιστη τεχνοοικονομική λύση.

Τα φράγματα είναι από τις πρώτες τεχνικές κατασκευές του ανθρώπου, αφού η κατασκευή των πρώτων φραγμάτων ανάγεται στα προϊστορικά χρόνια, όταν ο άνθρωπος στην προσπάθειά του να καλύψει τις ανάγκες του για νερό κατασκεύασε τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Από τα παλιότερα φράγματα, αναφέρονται εκείνα του ποταμού Ιορδάνη και του Τίγρη. Περίπου 4.000 χρόνια π.Χ., κατασκευάστηκε φράγμα στον ποταμό Νείλο της Αιγύπτου, το οποίο διατηρήθηκε περίπου 4.500 χρόνια. Από τα αρχαιότερα, επίσης, θεωρείται το φράγμα Sadd el-Kafara (Εικόνα 1.1) που κατασκευάστηκε στην Αίγυπτο την περίοδο 2.950 - 2.750π.Χ. Η Ελλάδα παρουσίασε το πρώτο της φράγμα στα παράλια της δυτικής Αιτωλοακαρνανίας, στην αρχαία Αλυζία (Εικόνα 1.2). Το φράγμα χρονολογείται από τον 1ο π.Χ. αιώνα και δίνει μαθήματα σταθερής κατασκευής εφόσον διατηρείται ως επισκέψιμο μνημείο έως σήμερα.



Εικόνα 1.1. Φράγμα Sadd el-Kafara (Πηγή: www.planete-tp.com)



Εικόνα 1.2. Φράγμα Αρχαίας Αλυζίας (Πηγή: Ζαρκαδούλας, 2005)

1.2. ΤΥΠΟΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Ένα φράγμα μπορεί να κατασκευαστεί από σκυρόδεμα ή διάφορα γεωυλικά. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής, τα φράγματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Φράγματα από σκυρόδεμα (άκαμπτα) και
- Γεωφράγματα (εύκαμπτα).

1.2.1. Φράγματα από σκυρόδεμα

Τα φράγματα που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, ως προς τον τρόπο ανάληψης των φορτίων χωρίζονται με τη σειρά τους σε:

1. Τοξωτά φράγματα
2. Φράγματα βαρύτητας
3. Αντηριδωτά φράγματα,

καθώς και συνδυασμός των παραπάνω.

Παραδείγματα φραγμάτων φαίνονται στις Εικόνες 1.3 και 1.4.



Εικόνα 1.3. Τοξωτό φράγμα βαρύτητας στην Ισπανία (Aldeadávila Dam)

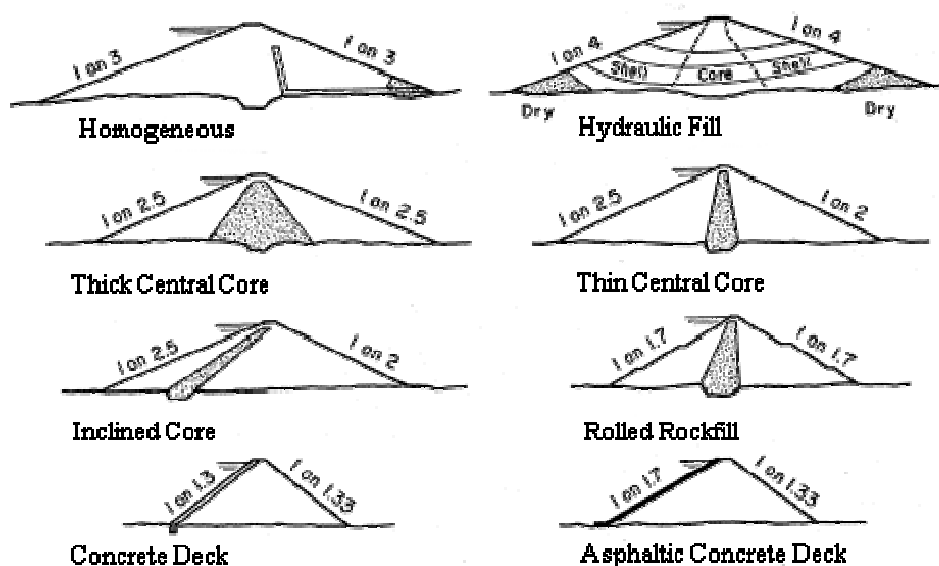


Εικόνα 1.4. Αντιρηδωτό φράγμα βαρύτητας στον Καναδά (Daniel - Johnson dam)

1.2.2. Γεωφράγματα

Τα γεωφράγματα έχουν ως βασική αρχή να κατασκευάζονται με τα επιτόπου διαθέσιμα υλικά, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος. Συνεπώς, ο τύπος και ο σχεδιασμός τους εξαρτώνται άμεσα από τα διαθέσιμα υλικά, το ύψος, την χρήση τους, την επιθυμητή ασφάλεια, τις επιπτώσεις πιθανής αστοχίας κλπ.

Τα γεωφράγματα μπορεί να είναι ομοιογενή, πολλαπλών ζωνών με αργιλικό πυρήνα ή με ειδική στεγανωση.



Εικόνα 1.5. Παραδείγματα διαφόρων τύπων γεωφραγμάτων (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr>)

Οι βασικές αρχές κατασκευής των γεωφραγμάτων συνοψίζονται στα παρακάτω (Μουτάφης, 2009):

1. Χρήση εδαφικών υλικών υψηλής διατμητικής αντοχής, ώστε να έχουν ικανοποιητική ευστάθεια με απότομες κλίσεις πρανών (μικρός όγκος φράγματος, και συνεπώς μικρό κόστος). Τέτοια υλικά είναι τα αμμοχάλικα και οι λιθορριπές.
2. Χρήση εδαφικών υλικών μικρής διαπερατότητας, ώστε να συγκρατούν το νερό του ταμιευτήρα. Τέτοια υλικά είναι τα αργιλικά.
3. Έδραση και πλευρικά αντερείσματα σε εδάφη μικρής διαπερατότητας (ώστε να μην συμβαίνουν διαφυγές νερού του ταμιευτήρα) και σχετικώς υψηλής αντοχής (ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης του φράγματος). Τέτοια υλικά για αντοχή είναι τα αμμοχάλικα και οι βραχώδεις σχηματισμοί και για διαπερατότητα οι αργιλικοί σχηματισμοί (άρα αντίθετες απαιτήσεις).
4. Τέλος, χρήση υλικών που είναι επιτόπου διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες.

Συνεπώς, πρέπει να γίνεται χρήση των υλικών των αναγκαίων εκσκαφών (π.χ. υλικά εκσκαφών για τον υπερχειλιστή) καθώς και υλικών μέσα από τον ταμιευτήρα (αύξηση του όγκου του), ενώ οι απαιτήσεις για χρήση υλικών εκτός ταμιευτήρα είναι μικρές (περιβαλλοντικοί όροι και κόστος μεταφοράς).

Ως πλεονεκτήματα των γεωφραγμάτων έναντι των άλλων τύπων φραγμάτων διακρίνονται τα παρακάτω:

- Λόγω κατασκευής με επιτόπου διαθέσιμα υλικά έχουν σχετικώς χαμηλό κόστος
- Λόγω μεγάλου εύρους βάσης μπορούν να κατασκευασθούν σε εδάφη θεμελίωσης και αντερεισμάτων χαμηλών απαιτήσεων αντοχής και παραμορφωσιμότητας
- Ως εύκαμπτες κατασκευές έχουν μεγάλες ανοχές καθιζήσεων (και διαφορικών καθιζήσεων), ιδίως εάν κατασκευασθούν με ευρύ αργιλικό πυρήνα συμπυκνωμένο με σχετικά υψηλή υγρασία και εάν έχουν επαρκή φίλτρα.

Τέλος, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τα γεωφράγματα ταξινομούνται ως:

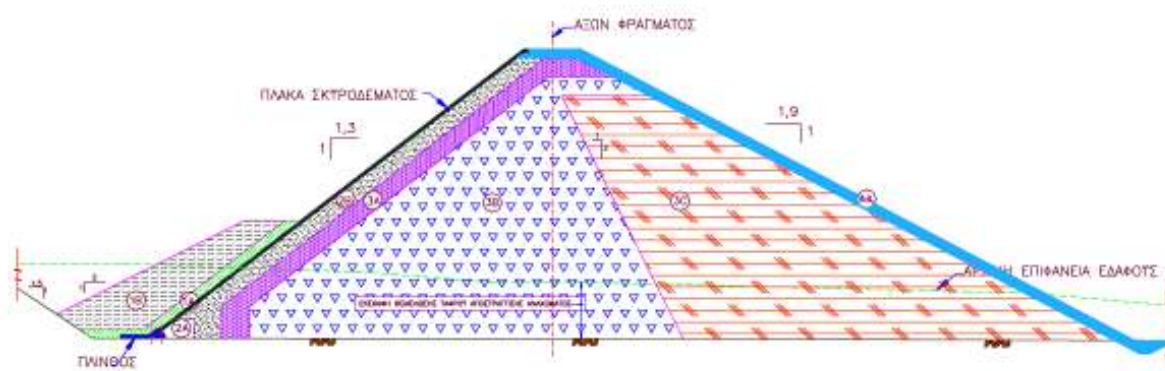
- Λιθόρριπτα (rock -fill dams) και
- Χωμάτινα (earth -fill dams)

Λιθόρριπτα Φράγματα

Τα λιθόρριπτα χωμάτινα φράγματα κατασκευάζονται από βραχώδη υλικά, τα οποία είναι προϊόντα εκσκαφών βράχου ή προϊόντα λατομείου.

Οι τύποι των λιθόρριπτων φραγμάτων είναι:

- Λιθόρριπτα με αργιλικό πυρήνα
- Λιθόρριπτα με ανάντη πλάκα Σκυροδέματος (ΛΑΠΣ)
- Λιθόρριπτα με ανάντη ασφαλτικό τάπητα
- Λιθόρριπτα με κεντρικό ασφαλτικό διάφραγμα



Εικόνα 1.6. Τυπική μορφή φράγματος ΛΑΠΣ (Πηγή: Μουτάφης, 2009)

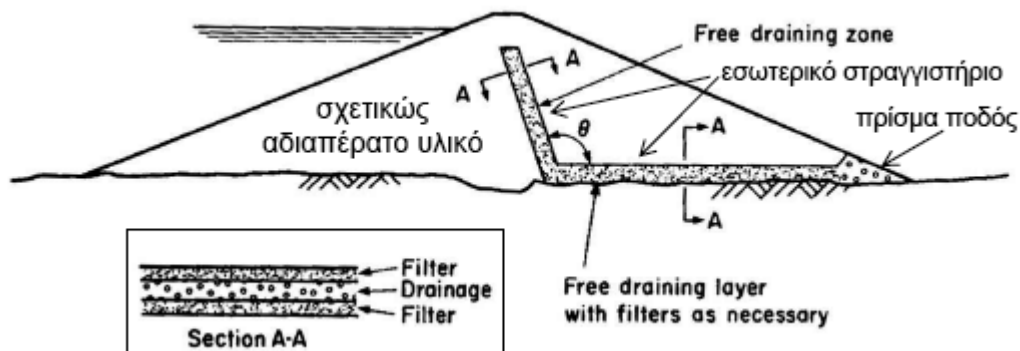
Χωμάτινα Φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά όπως είναι τα αργιλικά, τα αμμοχάλικα ποταμών, ο αποσαθρωμένος βράχος, τα πλευρικά κορήματα κλπ. Οι βασικότεροι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι τα ομοιογενή και τα διαζωνισμένα χωμάτινα φράγματα, ενώ υπάρχουν και άλλες κατηγορίες όπως φράγματα υδραυλικής πλήρωσης, με διάφραγμα ή με πέτρινη τοιχοποιία.

Ομοιογενή χωμάτινα φράγματα

Τα ομοιογενή χωμάτινα φράγματα αποτελούν τεχνολογία για την κατασκευή χαμηλών φραγμάτων (έως $\approx 20\text{m}$ χωρίς στραγγιστήριο, έως $\approx 50\text{m}$ με στραγγιστήριο). Κατασκευάζονται κυρίως στην περίπτωση που δεν διατίθεται ποικιλία υλικών για την

κατασκευή φράγματος πολλαπλών ζωνών (π.χ. με αργιλικό πυρήνα), αλλά μόνο ένα υλικό στην περιοχή (σχετικώς αδιαπέρατο).

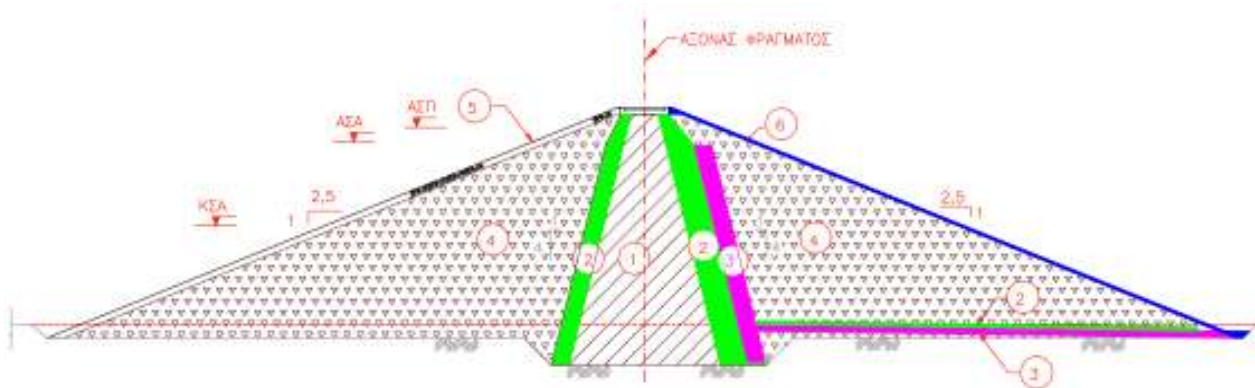


Εικόνα 1.7. Διατομή ομοιογενούς χωμάτινου φράγματος (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr>)

- Η χρήση εσωτερικού στραγγιστηρίου βελτιώνει την ευστάθεια του κατόντη πρανούς
- Η χρήση στραγγιστικού πρίσματος ποδός αποφεύγει τον κίνδυνο υδραυλικής διάβρωσης (από την υδραυλική κλίση του εξερχόμενου νερού)
- Οι αποστραγγιστικές στρώσεις περιβάλλονται με φίλτρα για την αποφυγή διάβρωσης του λεπτοκόκκου υλικού προς το στραγγιστήριο.

Διαζωνισμένα ή με πολλαπλές ζώνες

Στην Εικόνα 1.8 παρουσιάζεται μία τυπική διατομή ενός χωμάτινου φράγματος και στη συνέχεια στον Πίνακα 1.1 γίνεται περιγραφή των ζωνών του φράγματος.



Εικόνα 1.8. Διατομή χωμάτινου διαζωνισμένου φράγματος (Πηγή: Μουτάφης, 2009)

Πίνακας 1.1. Περιγραφή ζωνών φράγματος

	Περιγραφή
1	Πυρήνας - Αδιαπέρατα υλικά
2	Φίλτρο - Διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό
3	Στραγγιστήριο - Διαβαθμισμένο χαλικώδες υλικό
4	Κελύφη - Αμμοχάλικα, κορήματα, διαβαθμισμένος βράχος
5	Ανάντη ζώνη προστασίας - Ογκόλιθοι, Τρόχμαλοι
6	Κατάντη ζώνη προστασίας - Λίθοι, κροκάλες

Ζώνη 1 - Πυρήνας

Ζώνη εδαφικού υλικού χαμηλής διαπερατότητας ($< 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$), που εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος. Η χαμηλή διαπερατότητα προσδίδεται στο υλικό από το ποσοστό του λεπτόκοκκου κλάσματος, δηλαδή το ποσοστό διερχόμενο στο πρότυπο κόσκινο No. 200 (0.076mm), όταν το ποσοστό αυτό υπερβαίνει το 15%. Λόγω του σχετικά υψηλού κόστους κατασκευής της ζώνης πυρήνα (υψηλές απαιτήσεις συμπίκνωσης του υλικού σε στρώσεις μικρού πάχους, που είναι χρονοβόρος εργασία) επιδιώκεται μείωση του όγκου της ζώνης πυρήνα στο ελάχιστο απαραίτητο. Φυσικά, σε έργα όπου υπάρχει αφθονία υλικού κατάλληλου για πυρήνα και παράλληλη έλλειψη υλικών για τα κελύφη του φράγματος, ο όγκος του πυρήνα μεγιστοποιείται.

Ζώνη 2 - Φίλτρα

Ζώνες προστασίας του πυρήνα του φράγματος, από διάπλυση υλικού λόγω διήθησης νερού. Υλικά αμμώδη, διαβαθμισμένα (δηλαδή κοκκομετρικής διαβάθμισης μέσα σε σαφώς καθορισμένα όρια), ώστε να μπορούν να συγκρατούν το υλικό του πυρήνα.

Ζώνη 3 - Στραγγιστήρια ή Μεταβατικές Ζώνες

Ζώνες υψηλής διαπερατότητας, από καθαρά χαλίκια και κροκάλες, που έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν από το ανάχωμα του φράγματος οποιαδήποτε διηθούμενα νερά, ώστε να μην είναι δυνατή η ανάπτυξη πιέσεων.

Ζώνη 4 - Κελύφη

Ζώνες στήριξης της ζώνης πυρήνα. Κατά κανόνα είναι υλικά με αντοχή υψηλότερη από τα υλικά πυρήνα, π.χ. αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα, προϊόντα εκσκαφών, προϊόντα ανάπτυξης λατομείων (λιθορριπές).

Ζώνη 5 - Λιθορριπή Προστασίας Ανάντη Πρανούς

Ζώνη προστασίας του ανάντη πρανούς του αναχώματος από τη διαβρωτική καταπόνηση των κυματισμών που αναπτύσσονται στο ταμιευτήρα. Για την κατασκευή της ζώνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν λίθοι κατάλληλων διαστάσεων (απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης), ώστε να μην μετακινούνται από τις ωθήσεις των κυματισμών.

Ζώνη 6 - Ζώνη Προστασίας Κατάντη Πρανούς

Ζώνη προστασίας του κατάντη πρανούς του αναχώματος, από την διαβρωτική ενέργεια του νερού της βροχής και κυρίως των ρυακίων που σχηματίζονται. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν κροκάλες ή λίθοι με απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης, καθώς και στρώση φυτοκάλυψης.

2

ΦΙΛΤΡΑ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στη γεωτεχνική μηχανική, το φίλτρο αποτελεί ένα σχηματισμό, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει το έδαφος από εσωτερική διάπλυση λόγω διήθησης (διασωλήνωση). Καθώς το νερό διαπερνάει έναν εδαφικό σχηματισμό, προκαλεί τη διάπλυση στοιχείων του και αυτό οδηγεί στην εσωτερική διάβρωση και τελικά στην αστοχία του σχηματισμού. Ένα καλά σχεδιασμένο φίλτρο συγκρατεί τα σωματίδια του εδαφικού σχηματισμού, εμποδίζοντας τη διάβρωση, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διήθηση του νερού, ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη υψηλών πιέσεων του νερού των πόρων.

Το υλικό του φίλτρου πρέπει να έχει πέντε βασικές ιδιότητες, ώστε να ανταποκρίνεται επιτυχώς στο ρόλο του για προστασία του πυρήνα. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι παρακάτω (Μουτάφης, 2009):

1. Να συγκρατεί το υλικό του πυρήνα ώστε να μην παρασύρεται με τη διήθηση του νερού: **κριτήριο συγκράτησης** του υλικού.
2. Να παροχετεύει άμεσα το διηθούμενο νερό από τον πυρήνα, ώστε να μην αναπτύσσονται πιέσεις: **κριτήριο διαπερατότητας**.
3. Να μην διαχωρίζει κατά την απόθεση, ώστε να μην μεταβάλλεται η κοκκομετρική του διαβάθμιση: **κριτήριο ομοιομορφίας**.
4. Να καταρρέει όταν βυθίζεται σε νερό, ώστε να μην διατηρεί ανοικτές ρωγμές που μπορεί να αναπτυχθούν: **κριτήριο κατάρρευσης**.

5. Να μην μεταβάλλεται με τον χρόνο η κοκκομετρική του διαβάθμιση, (βαθμιαίας συγκόλλησης, διάπλυση των κόκκων του υλικού): **κριτήριο σταθερότητας.**

Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται σε μία σειρά από τεχνικά έργα όπως είναι τα φράγματα, τα έργα αποστράγγισης, οι τοίχοι αντιστήριξης, τα έργα προστασίας παράκτιας ζώνης κ.α. Πρώτος ο Terzaghi στις αρχές του 1920 πρότεινε μετά από εργαστηριακές έρευνες σε αμμώδες υλικό ομοιόμορφης κατανομής, δύο κριτήρια σχεδιασμού για τα φίλτρα. Τα κριτήρια αυτά περιλάμβαναν αναλογίες μεγεθών και υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φίλτρων. Οι περισσότερες μεταγενέστερες μελέτες ασχολήθηκαν κυρίως με τη μελέτη της εγκυρότητας των παραπάνω κριτηρίων ή με την επέκτασή τους σε περισσότερα εδαφικά υλικά.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο τύποι φίλτρων, τα κοκκώδη και τα γεωφάσματα. Τα κοκκώδη φίλτρα αποτελούνται συνήθως από καλά διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό και χρησιμοποιούνται σχεδόν έναν αιώνα. Τα γεωφάσματα είναι ένα συνθετικό υφασμάτινο υλικό, που αποτελεί πρόσφατη τεχνολογική εξέλιξη και χρησιμοποιείται τα τελευταία τριάντα χρόνια περίπου.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένας έντονος προβληματισμός αντικατάστασης των κοκκωδών φίλτρων με γεωφάσματα, εξαιτίας της οικονομικότερης τοποθέτησης και καλύτερης ποιότητάς τους. Υπάρχουν παραδείγματα φραγμάτων στα οποία έγινε χρήση γεωφάσματος ως φίλτρο και τριάντα χρόνια μετά δεν έχουν παρουσιάσει προβλήματα (Faure et al., 1996). Εξακολουθεί να υπάρχει, όμως ανησυχία για τη μακροχρόνια απόδοση των γεωφασμάτων, αφού τα φράγματα σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 100 χρόνια. Επειδή υπάρχουν ακόμα οι παραπάνω προβληματισμοί, τα κοκκώδη φίλτρα προτιμώνται και σήμερα στις περιπτώσεις μεγάλων έργων, η αστοχία των οποίων μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες, όπως είναι τα φράγματα.

2.2. ΡΟΛΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ

Τα φίλτρα και τα στραγγιστήρια επιτρέπουν την κίνηση του νερού μέσα από αυτά πιο γρήγορα από ότι συμβαίνει μέσα στον πυρήνα. Έτσι, το υλικό του φίλτρου πρέπει να έχει μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου από τον πυρήνα. Όμως το φίλτρο δεν πρέπει να επιτρέπει την κίνηση των κόκκων του πυρήνα μέσα από αυτό. Η κίνηση αυτή θα θέσει σε κίνδυνο το ανάχωμα. Λόγω της απώλειας του υλικού, θα υπάρχει αστοχία του πυρήνα και στη συνέχεια του αναχώματος. Επίσης, αν το υλικό του πυρήνα πληρώσει τα κενά του φίλτρου τότε θα καταστραφεί το φίλτρο, αφού η λειτουργία του να αφήνει το νερό να περνάει μέσα από αυτό θα πάψει να ισχύει.

Ο ρόλος του φίλτρου μέσα σε ένα φράγμα είναι πολύ κρίσιμος, αφού παρά την απλή του λειτουργία αποτελεί μία από τις κύριες ζώνες του αναχώματος. Το φίλτρο εξασφαλίζει το ανάχωμα από διάβρωση, αντιμετωπίζει τη διαφυγή νερού και σφραγίζει ανεπιθύμητες ρωγμές του αδιαπέρατου πυρήνα.

Το σύνηθες υλικό των αδιαπέραστων πυρήνων στα φράγματα είναι αργιλικά εδάφη, τα οποία μπορούν να αντιστέκονται αποτελεσματικά στην πίεση του νερού στα ανάντη του φράγματος. Ωστόσο, η εμφάνιση δυσμενών ρωγμών δεν μπορεί να αποφευχθεί. Στην περίπτωση αυτή, το φίλτρο με μια απλή λειτουργία μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία του πυρήνα και να προστατεύσει το φράγμα από τη διάβρωση. Ως εκ τούτου, η επιλογή ενός ορθού φίλτρου για ένα ορισμένο υλικό πυρήνα είναι απαραίτητη.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα διαρροών στον πυρήνα φραγμάτων (Sherard and Dunnigan 1985). Οι διαρροές αυτές οφείλονται κυρίως σε αστοχίες λόγω διαφορετικών υλικών, σεισμικών δονήσεων, συμπύκνωσης του υλικού ή υδραυλικών λειτουργιών. Ένα ορθά μελετημένο φίλτρο κατάντη του πυρήνα του φράγματος είναι ικανό να συγκρατήσει τα υλικά του πυρήνα και να σφραγίσει τη διαρροή.

Το 1922 ο Terzaghi πρώτος ανέπτυξε κριτήρια για το σχεδιασμό κοκκωδών φίλτρων και πρότεινε τις παρακάτω δύο συνθήκες για το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού φίλτρου.

- Το φίλτρο πρέπει να είναι ικανό να αποτρέψει τη διάβρωση του εδαφικού σχηματισμού και το φαινόμενο της διασωλήνωσης. Για το σκοπό αυτό ο Terzaghi πρότεινε το κριτήριο συγκράτησης:

$$D_{15} / d_{85} \leq 4 - 5 \quad (2.1)$$

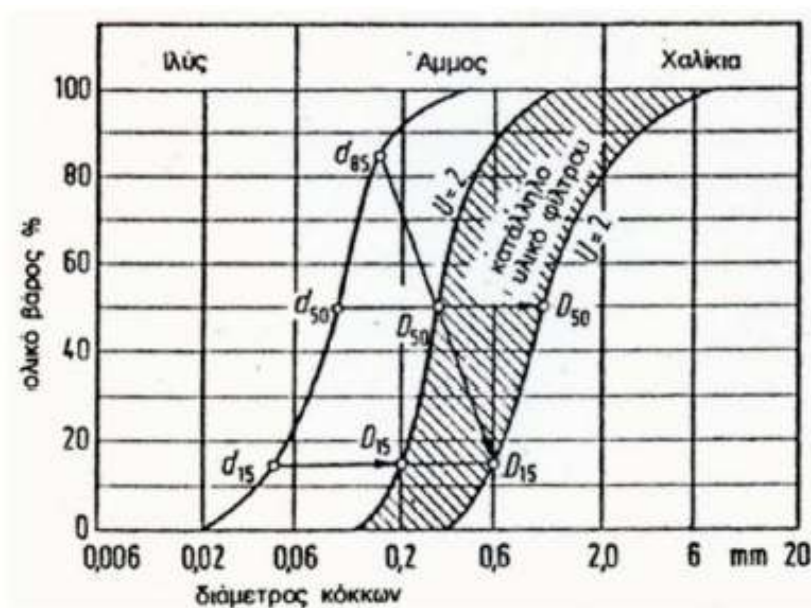
- Το φίλτρο πρέπει να είναι διαπερατό τόσο ώστε να αντιμετωπίσει τις υψηλές πιέσεις του νερού των πόρων που αναπτύσσονται μέσα στο φράγμα. Για το σκοπό αυτό ο Terzaghi πρότεινε το κριτήριο διαπερατότητας:

$$D_{15} / d_{15} > 4 \quad (2.2)$$

Σημείωση: Όπου D συμβολίζει το μέγεθος των κόκκων του φίλτρου, ενώ το d συμβολίζει το μέγεθος των κόκκων του πυρήνα.

Ο Terzaghi, δηλαδή πρότεινε ότι ένα φίλτρο πρέπει να είναι αρκετά λεπτόκοκκο ώστε να συγκρατεί το εδαφικό υλικό του πυρήνα και αρκετά χονδροκόκκο, ώστε να επιτρέπει την αποστράγγιση του νερού μέσα από αυτό. Ως τέτοια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμμοι, χαλίκια και κροκάλες με $d < 0.08\text{mm}$ σε ποσοστό μικρότερο από το 5%. Για τα εδαφικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στα φράγματα και στις γεωτρήσεις χρησιμοποιείται ως βάση το λεπτομερέστερο υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στο έργο (π.χ. αργιλικό υλικό πυρήνα) ή θα συναντηθεί κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης (π.χ. λεπτή άμμος).

Η σύνθεση του φίλτρου Terzaghi και η διαβάθμισή του περιορίζεται ανάμεσα στις δύο καμπύλες με συντελεστή $U = 2.0$.



Εικόνα 2.1. Σχηματισμός των φίλτρων Terzaghi (Πηγή: Prinz, 1982)

2.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΗΘΗΣΗ

Οι τρεις ιδιότητες ενός φίλτρου, δηλαδή η διατήρηση των σωματιδίων, η επαρκής διαπερατότητα ώστε να επιτρέπεται η διαρροή και η μη συνεκτικότητα, αποτελούν αντικρουόμενες απαιτήσεις για τη διαστασιολόγηση του φίλτρου. Για το σχεδιασμό ενός κατάλληλου φίλτρου, ώστε να εκπληρούνται όλες οι παραπάνω απαιτήσεις, χρειάζονται γνώσεις της αλληλεπίδρασης του εδαφικού υλικού του πυρήνα με αυτό του φίλτρου σε συνθήκες ροής.

Η αλληλεπίδραση των κοκκωδών υλικών οδηγεί σε μια πολύ σύνθετη διαδικασία μεταφοράς των σωματιδίων σε ένα πορώδες υλικό. Οι παράγοντες αυτοί είναι γεωμετρικοί, φυσικοί, υδραυλικοί, χημικοί και βιολογικοί και εξηγούνται παρακάτω.

- Οι *γεωμετρικοί παράγοντες* καθορίζουν και την κατανομή του μεγέθους των κόκκων του φίλτρου και πυρήνα, καθώς επίσης και την δομή του φίλτρου (μέγεθος και κατανομή των πόρων). Σε όλες τις εμπειρικές προσεγγίσεις, η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του πυρήνα και του φίλτρου θεωρείται το σημαντικότερο βήμα και, ως εκ τούτου, συχνά το μόνο παράγοντα που εξετάζεται στο εργαστήριο.
- Οι *φυσικοί παράγοντες* μπορούν να περιλαμβάνουν την τριβή και την συνοχή μεταξύ των κόκκων, την τραχύτητα της επιφάνειας των κόκκων, την πυκνότητα του φίλτρου, το ειδικό βάρος των κόκκων κ.α. Τα φυσικά χαρακτηριστικά της διαρροής περιλαμβάνουν το ιξώδες, την πυκνότητα και τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας.
- Οι *υδραυλικοί παράγοντες* περιλαμβάνουν το συνολικό φορτίο, την υδραυλική κλίση του νερού που διαρρέει και τις αντίστοιχες ταχύτητες των κόκκων και την παροχή μάζας. Αν ληφθούν υπόψη τα υδραυλικά φορτία μπορεί να επιτραπεί μια ελαστικότητα στα κριτήρια σχεδιασμού των φίλτρων (de Groot et al. 1993).
- Οι *χημικοί παράγοντες* που επηρεάζουν το μέγεθος των κόκκων (διασπορά ή κροκίδωση) και τα χαρακτηριστικά της ροής σχετίζονται τόσο με το νερό όσο με τη χημεία του εδάφους. Είναι γνωστό ότι η χημεία του νερού των ταμιευτήρων σε ασβεστολιθικά εδάφη έχει ευεργετική επίδραση που οδηγεί σε πιο οικονομικό σχεδιασμό των φίλτρων (Indraratna et al. 1997).
- Οι *βιολογικές επιπτώσεις* έχουν να κάνουν γενικά με την αλλαγή στο πορώδες των φίλτρων λόγω ανάπτυξης βακτηρίων και μυκήτων.

Λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων και της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών, είναι αναγκαία η απλοποίηση του προβλήματος και η επικέντρωση μόνο σε ορισμένες συμπεριφορές του φίλτρου.

2.4. ΥΔΑΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Όλα τα εδαφικά υλικά είναι διαπερατά, αφού οι πόροι τους επικοινωνούν και σχηματίζουν συνεχείς διόδους. Οι διαφορές που εμφανίζουν τα διάφορα εδαφικά υλικά ως προς τη διαπερατότητά τους είναι καθαρά ποσοτικές, δηλαδή άλλα υλικά έχουν μεγάλη διαπερατότητα (π.χ. χαλίκια και χονδρόκοκκη άμμος), ενώ άλλα έχουν πολύ μικρή διαπερατότητα (π.χ. άργιλος).

Ορισμένα από τα προβλήματα, στα οποία υπεισέρχεται η ανάλυση της υδατικής ροής σε εδαφικά υλικά, είναι η υδατική ροή διαμέσου του σώματος του φράγματος καθώς και ο βαθμός σφράγισης (στεγάνωσης) των ταμιευτήρων.

Η υδατική ροή διαμέσου του εδάφους μπορεί να έχει ποικίλα χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση της πρώτης πλήρωσης του ταμιευτήρα που δημιουργείται με την κατασκευή ενός φράγματος, το νερό διεισδύει στους πόρους του υλικού του φράγματος και βαθμιαία εκτοπίζει τον αέρα από τους πόρους. Συγχρόνως, όμως, η στάθμη του ταμιευτήρα ανέρχεται, οι υδατικές πιέσεις στο φράγμα αυξάνονται και ταυτόχρονα αυξάνονται οι ποσότητες του διηθούμενου νερού. Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο για τους ακόλουθους λόγους (Καββαδάς, 1991):

- Λόγω της άγνωστης και χρονικά μεταβαλλόμενης θέσης της ελεύθερης υδατικής επιφάνειας ροής στο εσωτερικό του φράγματος.
- Λόγω της αποθήκευσης νερού στο εσωτερικό του φράγματος (στους πόρους), με συνέπεια το νερό που εξέρχεται από την κατάντη παρειά του φράγματος να είναι λιγότερο από αυτό που διηθείται από τον ταμιευτήρα προς το εσωτερικό του φράγματος.
- Λόγω της άγνωστης κατανομής των υδατικών πιέσεων στο εσωτερικό του φράγματος. Οι πιέσεις προσαρμόζονται διαρκώς στις χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής στο εσωτερικό του φράγματος και στις ανάντη συνοριακές συνθήκες (μεταβαλλόμενη στάθμη ταμιευτήρα).
- Με τη μεταβολή των υδατικών πιέσεων στο εσωτερικό του φράγματος (χωρίς να μεταβάλλονται πάντοτε εξίσου και οι ολικές τάσεις), μεταβάλλονται οι ενεργές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του φράγματος. Η μεταβολή των ενεργών τάσεων προκαλεί ογκομετρικές παραμορφώσεις του υλικού του φράγματος (διόγκωση ή συμπίεση), δηλαδή μεταβολές του όγκου των πόρων του εδαφικού υλικού, με συνέπεια

την πρόσθετη αποθήκευση νερού (ή τη μείωση του αποθηκευμένου όγκου νερού) στους πόρους του υλικού του φράγματος.

- Λόγω της εναλλαγής πολύ διαπερατών με λιγότερο διαπερατές εδαφικές στρώσεις, της παρουσίας διόδων του νερού μέσα από ρωγμές στο εσωτερικό του φράγματος, της δημιουργίας φαινομένων διασωλήνωσης (ripping) στο κατάντη πρσανές του φράγματος κ.λπ.

Από όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφής η πολυπλοκότητα του προβλήματος της υδατικής ροής διαμέσου του εδάφους και η ανάγκη απλοποιητικών παραδοχών για την ανάλυσή του. Η κυριότερη παραδοχή που γίνεται συνήθως, είναι η μονιμότητα της ροής, δηλαδή ότι η ταχύτητα της υδατικής ροής σε οποιοδήποτε σημείο του εδάφους δεν μεταβάλλεται χρονικά. Η κατάσταση της μόνιμης ροής είναι αρκετά συνήθης στη φύση, αν οι συνοριακές συνθήκες παραμείνουν αμετάβλητες για αρκετό χρονικό διάστημα, η υδατική ροή στο έδαφος βαθμιαία θα προσεγγίσει ικανοποιητικά τις συνθήκες μόνιμης ροής (ιδιαίτερα στην περίπτωση ροής χωρίς ελεύθερη επιφάνεια η προσαρμογή στις συνθήκες μόνιμης ροής είναι ταχεία).

2.5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ιστορικά, σχεδόν 1 στα 50 (περίπου το 2%) φράγματα, τα οποία είναι μεγαλύτερα από 15m σε ύψος έχει υποστεί διαρροές μέσω του ανάχωματος ή της θεμελίωσης του (FEMA, 2002). Μέσα στο παραπάνω ποσοστό περιλαμβάνονται και οι περιπτώσεις διαρροών σε φράγματα που δεν οδήγησαν σε αστοχία του έργου. Όμως, το ένα τρίτο περίπου των αναφερθέντων περιστατικών οδήγησε τελικά σε αστοχία του φράγματος.

Από όλα τα αναφερθέντα συμβάντα, η διαρροή στο περίπου 50% συνέβη στο ανάχωμα, στο 40% συνέβη στη θεμελίωση και στο 10% συνέβη από το ανάχωμα στη θεμελίωση. Ένα μικρότερο ποσοστό διαρροών που συμβαίνουν στη θεμελίωση και ιδιαίτερα από το ανάχωμα προς τη θεμελίωση οδηγεί σε αστοχία του έργου σε σχέση με τις διαρροές που συμβαίνουν μέσα στο ανάχωμα. Σχεδόν το 50% των αστοχιών των έργων σημειώθηκαν κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα, ενώ το 64% συνέβη εντός των πρώτων πέντε ετών λειτουργίας του.

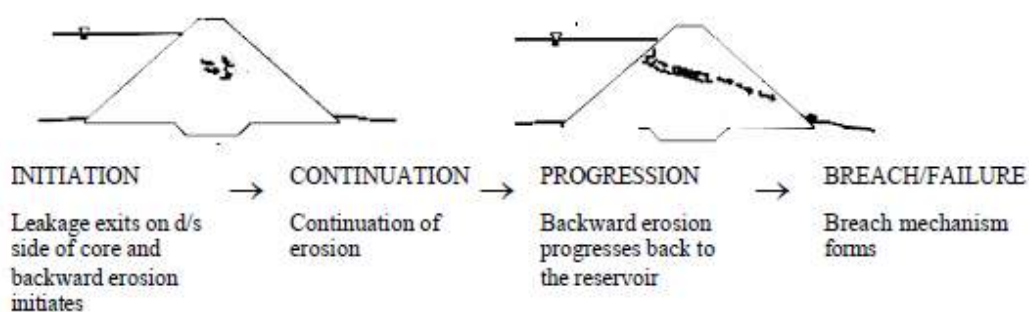
Για τις περιπτώσεις των αστοχιών, όπου είναι γνωστή η στάθμη του ταμιευτήρα κατά την αστοχία, οι αστοχίες συνέβησαν για στάθμες ίσες ή μεγαλύτερες από τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα (85% των περιπτώσεων) ή κατά 1m λιγότερο από τη μέγιστη στάθμη (15% των περιπτώσεων).

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού διάβρωσης, χωρίζεται η διαδικασία σε τέσσερις φάσεις:

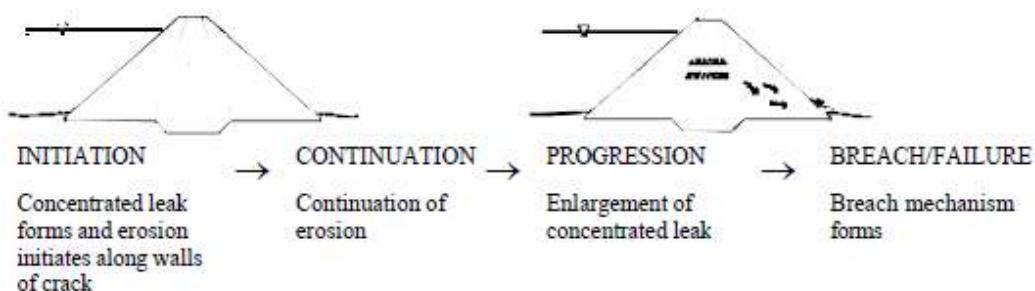
- 1) την έναρξη,
- 2) τη συνέχιση της διάβρωσης,
- 3) την εξέλιξη της σε μορφή σωλήνα,
- 4) τη διαμόρφωση του ρήγματος.

Στην Εικόνα 2.2 περιγράφονται οι μηχανισμοί αστοχίας, η οποία μπορεί να προκύψει από διαρροή μέσα στο ανάχωμα (a, b), από διασωλήνωση μέσα στη θεμελίωση του φράγματος (c) καθώς και διασωλήνωσης και διάβρωσης από το ανάχωμα προς τη θεμελίωση (d).

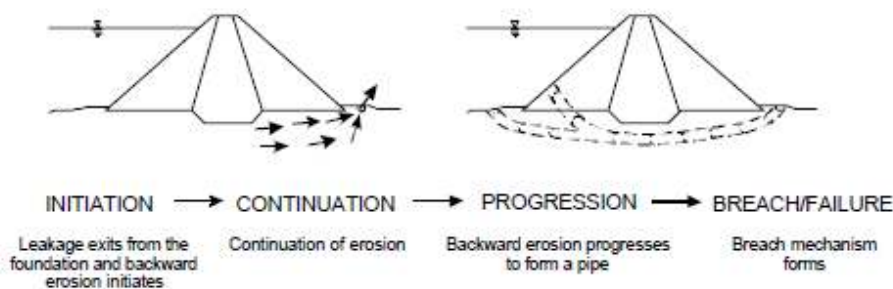
Η αλληλουχία των γεγονότων που οδηγούν τελικά στην αστοχία είναι ουσιαστικά η ίδια, αλλά οι μηχανισμοί στα αρχικά στάδια ανάπτυξης διαφέρουν.



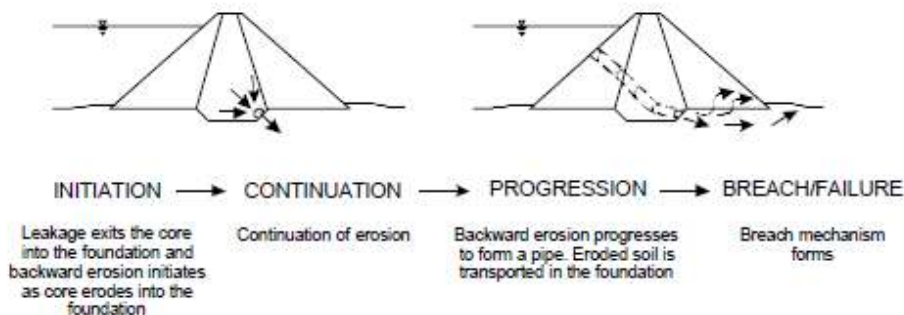
(a) Backward erosion piping in the embankment



(b) Concentrated leak piping in the embankment



(c) PIPING IN THE FOUNDATION



(d) PIPING FROM THE EMBANKMENT TO FOUNDATION

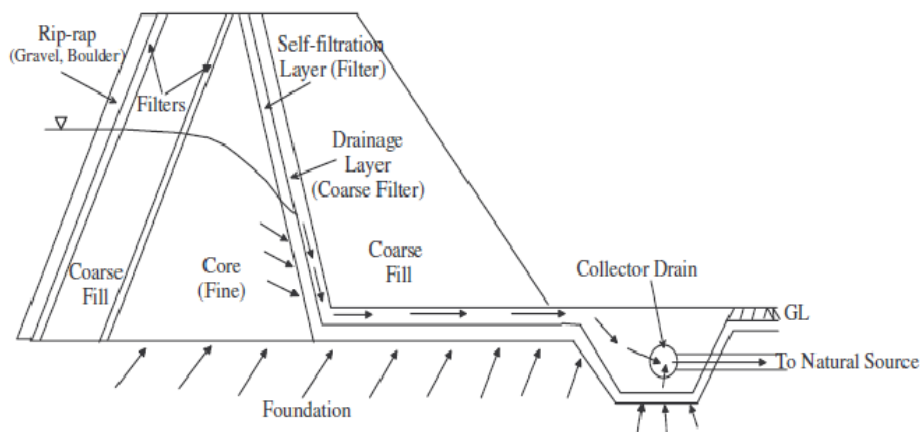
Εικόνα 2.2. Αστοχίες από διασωλήνωση (Πηγή: Foster and Fell, 1999)

Η πρακτική που ακολουθείται σήμερα για την αντιμετώπιση του φαινομένου της διαρροής και της εσωτερικής διάβρωσης σε νέα φράγματα ή σε φράγματα που επισκευάζονται είναι να περιλαμβάνονται τα φίλτρα και ζώνες υψηλής διαπερατότητας μέσα στο σώμα του φράγματος. Η διάβρωση από το ανάχωμα μέσα στο έδαφος θεμελίωσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους, πχ. με σκυρόδεμα. Η διάβρωση εντός των θεμελίων μπορεί να είναι πιο δύσκολο να ελεγχθεί, αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατασκευή φίλτρων, όπου θα είναι επιτρεπτή η ροή του νερού.

2.6. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΦΙΛΤΡΩΝ ΣΕ ΦΡΑΓΜΑ

Τα φίλτρα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3, τοποθετούνται σε διάφορα σημεία μέσα στο σώμα του φράγματος. Πολύ βασικό ρόλο έχει το φίλτρο που τοποθετείται ακριβώς κατάντη του πυρήνα του φράγματος. Η λειτουργία αυτού του φίλτρου, είναι η ελαχιστοποίηση της εσωτερικής διάπλυσης του πυρήνα, ελέγχοντας ταυτόχρονα τη ροή του νερού και δημιουργώντας ένα στρώμα αποστράγγισης του νερού, ώστε να αποφευχθεί ο κορεσμός στο κατάντη κέλυφος του αναχώματος. Το φίλτρο αυτό συνεχίζει και στο κάτω μέρος μεταξύ του κατάντη αναχώματος και του εδάφους, ώστε να αποφευχθεί η μεταφορά υλικού του εδάφους θεμελίωσης στο ανάχωμα και το αντίστροφο και να συνεχιστεί η ροή του νερού μέχρι την έξοδό του από το σώμα του φράγματος.

Η εσωτερική διάβρωση (διάπλυση) του πυρήνα μπορεί να οδηγήσει σε απότομη αστοχία του φράγματος μέσω της διασωλήνωσης, για το λόγο αυτό η σωστή λειτουργία του φίλτρου είναι κρίσιμη.



Εικόνα 2.3. Τυπική διατομή φράγματος και θέση τοποθέτησης του φίλτρου (Πηγή: Raut, 2006)

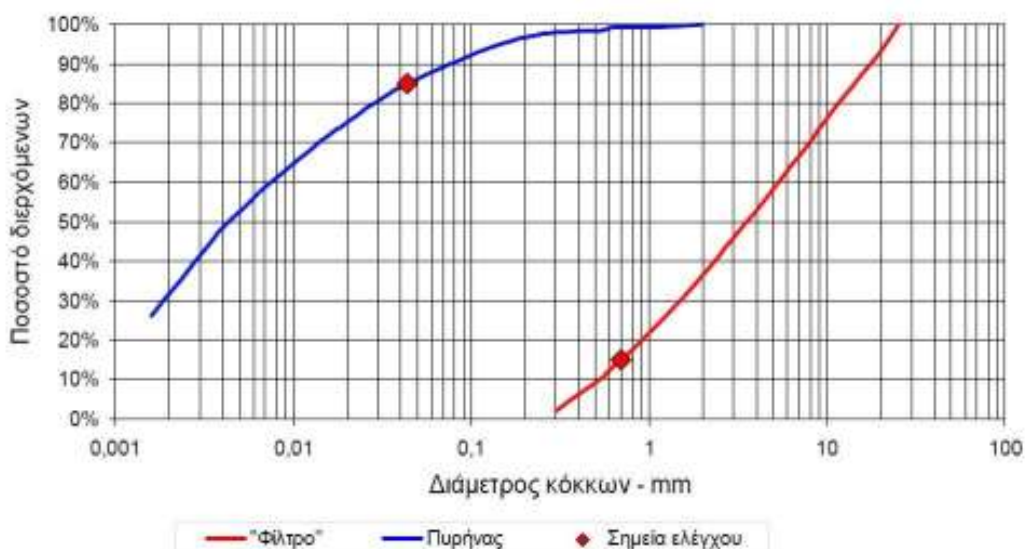
Μέσα στο σώμα του φράγματος, το φίλτρο τοποθετείται, επίσης και κάτω από τη στρώση προστασίας του ανάντη πρανούς. Η τοποθέτηση του φίλτρου στη θέση αυτή κρίνεται χρήσιμη για την προστασία του ανάντη πρανούς στην περίπτωση που κατέβει η στάθμη του νερού στον ταμειευτήρα.

2.6.1. Λειτουργία κατάντη φίλτρου

Το κατάντη φίλτρο προστασίας του πυρήνα πρέπει να είναι αρκετά πιο διαπερατό από το υλικό του πυρήνα (και συνεπώς αρκετά χονδρόκοκκο), ώστε να επιτυγχάνει ελεύθερη διήθηση (στράγγιση) του νερού που κινείται διαμέσου του πυρήνα του φράγματος προς τα κατάντη. Πρέπει, επίσης, να είναι αρκετά λεπτόκοκκο ώστε να εμποδίζει τους κόκκους του υλικού του πυρήνα να μετακινηθούν προς τα κατάντη παρασυρόμενα από το διηθούμενο νερό (υδραυλική διάβρωση). Γνωρίζοντας λοιπόν την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού του πυρήνα να επιλέξουμε τη βέλτιστη διάμετρο του υλικού των φίλτρων ώστε να ικανοποιεί τις συνθήκες που ορίσαμε παραπάνω.

Χαρακτηριστικά φίλτρων (κατά Terzaghi):

1. $D_5 > 0.075\text{mm}$ (κόσκινο No200), δηλαδή το φίλτρο να έχει το πολύ 5% λεπτόκοκκο υλικό, και το όποιο λεπτόκοκκο υλικό να είναι μη πλαστικό (ιλύς) - Απαίτηση για ικανοποιητική στράγγιση
2. $D_{15} > 5 * d_{15}$ - Απαίτηση για ικανοποιητική στράγγιση
3. $D_{15} < 40 * d_{15}$ - Απαίτηση για αποφυγή υδραυλική διάβρωσης
4. $D_{15} < 5 * d_{85}$ - Απαίτηση για αποφυγή υδραυλική διάβρωσης
5. Οι κοκκομετρικές καμπύλες φίλτρου (D) και πυρήνα (d) να είναι περίπου παράλληλες (απαίτηση για ικανοποιητική στράγγιση και αποφυγή υδραυλική διάβρωσης).



Εικόνα 2.4. Σχέση μεταξύ D_{15} - d_{85} (Πηγή: Μπέσιου, 2008)

Για κατασκευαστικούς λόγους, το ελάχιστο πάχος κάθε φίλτρου είναι 2.5 - 3m, ενώ το σύνηθες πάχος του είναι 3 - 4m. Οι προηγούμενες απαιτήσεις φίλτρων (κριτήρια Terzaghi) είναι υπερβολικά συντηρητικές για ορισμένους τύπους εδαφών όπως είναι οι πλαστικές άργιλοι και τα αργιλώδη αμμοχάλικα με καλή κοκκομετρική διαβάθμιση (τα υλικά αυτά έχουν αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση λόγω συνοχής).

Τα φίλτρα δε χρειάζονται ιδιαίτερη συμπύκνωση. Είναι αρκετή η συμπύκνωση από την κίνηση των ελαστικοφόρων αυτοκινήτων μεταφοράς και διάστρωσης του φίλτρου, επειδή με τη συμπύκνωση μειώνεται η διαπερατότητά τους και επιπλέον θρυμματίζονται οι κόκκοι τους με αποτέλεσμα την αύξηση του λεπτοκόκκου κλάσματος, κάτι που δεν είναι επιθυμητό.

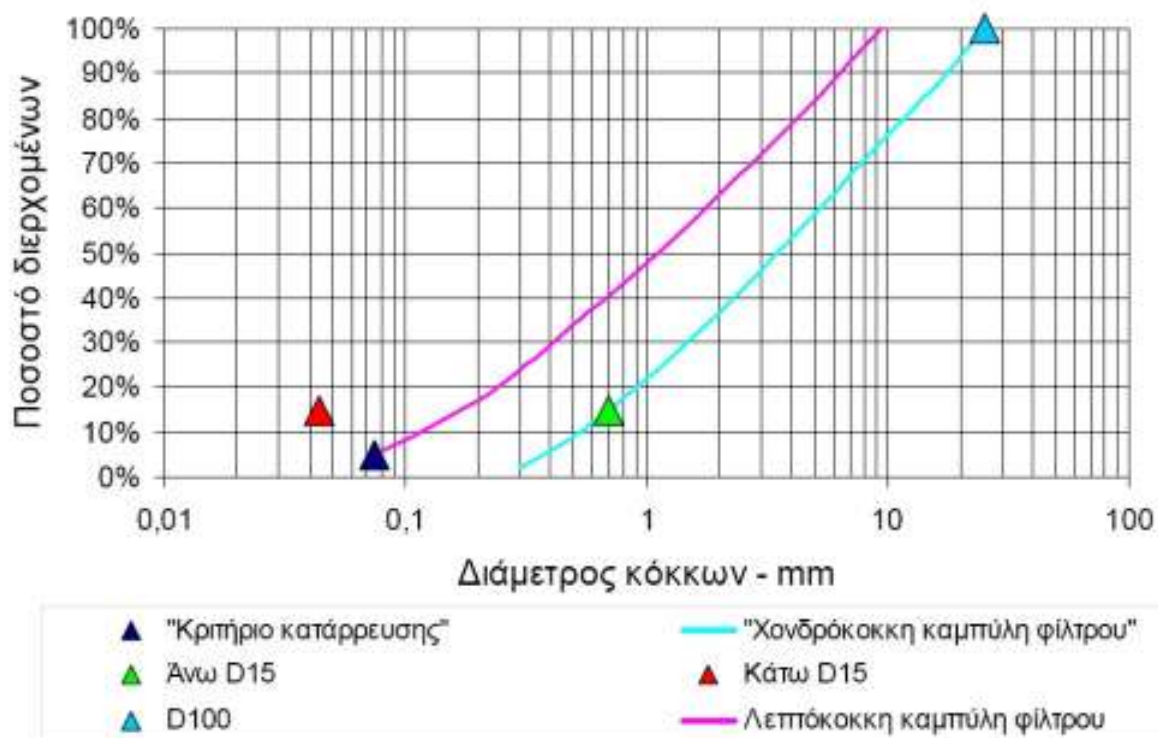
Κατά την κατασκευή, υπάρχει κίνδυνος έμφραξης των φίλτρων από λεπτόκοκκο υλικό του πυρήνα σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης. Για το λόγο αυτό, τα φίλτρα διατηρούνται σε υψηλότερη στάθμη από ότι ο παρακείμενος πυρήνας και το σώμα στήριξης. Στα χονδρόκοκκα φίλτρα (και στραγγιστήρια) από καλώς διαβαθμισμένα υλικά, υπάρχει κίνδυνος απόμιξης κατά τη διάστρωση (π.χ. με ανατροπή) οπότε το πλέον χονδρόκοκκο υλικό 'κυλάει' μακρύτερα.

2.6.2. Λειτουργία ανάντη φίλτρου

Σκοπός του ανάντη φίλτρου είναι η δυνατότητα έμφραξης τυχόν αναπτυσσόμενων ρωγμών του πυρήνα για την αποφυγή ροής νερού διαμέσου του πυρήνα από το ανάντη σώμα στήριξης. Η κατάσταση αυτή είναι επικίνδυνη επειδή κατά την διήθηση, το νερό παρασύρει υλικό του πυρήνα προς τα κατόντη διαβρώνοντας τον πυρήνα.

Όσον αφορά στις απαιτήσεις του ανάντη φίλτρου αυτό θα πρέπει να είναι αρκετά λεπτόκοκκο ώστε να μπορεί να εισέλθει σε λεπτές ρωγμές του πυρήνα και να τις φράξει και να μην είναι συνεκτικό, ώστε να μην μπορεί να διατηρήσει το ίδιο ρωγμές. Συνεπώς, το φίλτρο κατά την διαβροχή θα πρέπει να καταρρέει.

Έτσι το ανάντη φίλτρο πρέπει να ικανοποιεί τα ανωτέρω κριτήρια Terzaghi, και επιπλέον, να μην έχει συμπυκνωθεί ώστε να μην έχει συνοχή για να 'καταρρέει' κατά την διαβροχή. Υλικά με αξιόλογο ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος, ιδίως όταν συμπυκνωθούν, αποκτούν συνοχή και δεν καταρρέουν.



Εικόνα 2.5. Προσδιορισμός της λεπτόκοκκης περιβάλλουσας του φίλτρου με βάση το ποσοστό λεπτόκοκκων στο υλικό φίλτρου (Πηγή: Μουτάφης, 2009)

2.7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Το φαινόμενο της διασωλήνωσης μέσα σε ένα εδαφικό σχηματισμό προέρχεται από τρεις βασικές διαδικασίες. Το υλικό των πυρήνων γεωφραγμάτων περιέχει κατά κανόνα υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών (διερχόμενων από το κόσκινο Νο200), που του προσδίδει και την ιδιότητα της ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας. Η μικρή διάσταση των κόκκων - πλακιδίων του υλικού, κάνει τον πυρήνα ευάλωτο σε διάπλυση όταν:

- βρεθεί υπό υδραυλική κλίση,
- αναπτυχθούν υψηλές ταχύτητες ροής
- υπάρχει η δυνατότητα μετακίνησης του λεπτόκοκκου κλάσματος του υλικού προς τα κατάντη.

Μία λύση θα ήταν να διατηρείται η υδραυλική κλίση αρκετά χαμηλή, σε όλες τις περιοχές του πυρήνα, π.χ. με αποφυγή έντονων διαφοροποιήσεων της διαπερατότητας της θεμελίωσης (διαφράγματα ή πετάσματα τσιμεντενέσεων που τοπικά αυξάνουν την υδραυλική κλίση), ή με αύξηση του πλάτους του πυρήνα, ώστε με τη μείωση της υδραυλικής κλίσης να μειώνεται και ο κίνδυνος διάπλυσης. Δυστυχώς σε όλα τα φράγματα αναπτύσσονται ρωγμές στον πυρήνα, κυρίως εγκάρσιες στον άξονα τους, λόγω παραμορφώσεων υπό το ίδιο βάρος του υλικού και προσαρμογής του στην μορφολογία της θεμελίωσης. Επομένως δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί η διατήρηση χαμηλών υδραυλικών κλίσεων στον πυρήνα. Υπάρχουν μάλιστα παρατηρήσεις εμφάνισης πλήρους υδροστατικής πίεσης ταμειυτήρα μέσα στον πυρήνα και σε μικρή απόσταση από την κατάντη παρειά του.

Επομένως, για λόγους ασφαλούς σχεδιασμού του φράγματος, θεωρείται ότι ο πυρήνας μπορεί να βρεθεί υπό συνθήκες υψηλής υδραυλικής κλίσης και υψηλών ταχυτήτων ροής και κατά συνέπεια επιβάλλεται η πρόβλεψη προστασίας του από διάπλυση του υλικού και διάβρωση.

Η προστασία αυτή παρέχεται με την παρεμβολή υλικού κατάλληλης διαβάθμισης (υλικό φίλτρου) μεταξύ του πυρήνα και του κατάντη κελύφους. Η ζώνη του φίλτρου, λόγω της διαβάθμισής της, μπορεί να συγκρατεί τους κόκκους του πυρήνα και να εμποδίζει την μετακίνηση τους με τη ροή του νερού. Εάν λόγω της κοκκομετρίας του κατάντη κελύφους (π.χ. παρουσία πολλών και μεγάλων κενών μεταξύ των κόκκων, όπως σε περιπτώσεις λιθορριπής) δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί η διάπλυση του υλικού με μία ζώνη φίλτρου (γιατί και το ίδιο υλικό φίλτρου μπορεί να κινδυνεύει με διάπλυση προς το κατάντη

κέλυφος), προβλέπεται η κατασκευή και άλλων πρόσθετων ζωνών, ώστε κάθε ζώνη να είναι ασφαλής από τον κίνδυνο διάπλυσης.

Σε κάθε περίπτωση η κοκκομετρία του υλικού φίλτρου θα εξαρτάται από την κοκκομετρία του προς συγκράτηση υλικού.

2.8. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων ενός χαλαρού πετρώματος αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στη διάκρισή τους, που μαζί με το σχήμα τους παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς τους. Τα μεγέθη τους κατανέμονται σε ομάδες που διαχωρίζονται με την κοκκομετρική ανάλυση.

Η κοκκομετρική ανάλυση είναι μία από τις πλέον βασικές μεθόδους κατάταξης των εδαφών και χρησιμοποιείται διεθνώς. Η καταλληλότητα ενός εδάφους ως υλικού θεμελίωσης ή ως δομικού υλικού εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή από τον προσδιορισμό της συμμετοχής των διαμέτρων των κόκκων, ως ποσοστά, στο συνολικό όγκο του θεωρούμενου εδάφους (Σακελλαρίου, 2003).

Οι πληροφορίες που παίρνουμε από την κοκκομετρική ανάλυση διευκολύνουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εδαφών, όσον αφορά στην αντοχή και στην παραμόρφωση, της δυνατότητα κίνησης του υπόγειου νερού (διήθηση) μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων καθώς και στην εκτίμηση της επιρροής του παγετού στο έδαφος.

Η κοκκομετρική ανάλυση χωρίζεται σε δύο επιμέρους αναλύσεις. Σε αυτήν που χρησιμοποιεί κόσκινα για το διαχωρισμό των επιμέρους μεγεθών κόκκων του εδάφους, που συγκρατείται από το κόσκινο No10 και σε αυτή της ιλύος που διαχωρίζει τα λεπτόκοκκα μερίδια του εδάφους με διάμετρο κάτω από τα 0.063mm που συγκρατείται από το κόσκινο No200 σε αναλογία βάρους > 30% του συνολικού δείγματος.

Για να διαπιστώσουμε το ποσοστό ύπαρξης λεπτόκοκκου υλικού (ιλύς, άργιλος) σε αδρανή υλικά χρησιμοποιούμε μια σύντομη και απλή μέθοδο, τη μέθοδο ισοδύναμου άμμου.

2.8.1. Μέθοδος Ισοδύναμου Άμμου

Για την πραγματοποίηση της μεθόδου ισοδύναμου άμμου, υπολογίζεται η σχέση όγκου μεταξύ των λεπτόκοκκων υλικών και της άμμου που υπάρχει σε υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No4. Η δοκιμή εκτελείται σε ειδική συσκευή ανατάραξης με διαφανή ογκομετρικό

κύλινδρο 1000ml που περιέχει ειδικό διάλυμα. Στη συνέχεια το διάλυμα ηρεμεί για 20min, όπου και σημειώνονται οι όγκοι των λεπτόκοκκων συστατικών και της άμμου που έχουν καθιζάνει στον πυθμένα του κυλίνδρου.

Η δοκιμή διαρκεί περίπου 40min και απαιτεί απλά όργανα.

Το ισοδύναμο της άμμου (S.E.) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S.E. = H / h * 100 (\%) \quad (2.3)$$

Όπου: h = η υποδιαίρεση του ύψους της άμμου

H = η υποδιαίρεση του ύψους της σε αιώρηση αργίλουκαι χρησιμοποιείται για αδρανή υλικά.

2.8.2. Μέθοδος με κόσκινα

Χρησιμοποιείται στην κοκκομετρική ανάλυση χονδροκόκκων δειγμάτων εδαφών. Στην ανάλυση χρησιμοποιείται μια σειρά κοσκίνων και διάφορες περιεκτικότητες δειγμάτων. Έτσι για λεπτή έως μέση άμμο απαιτούνται 100 έως 200gr, για χονδρή άμμο μέχρι λεπτά χαλίκια 500gr και για χοντρά χαλίκια 5000gr.

Πίνακας 2.1. Πάχος συρμάτων κόσκινων (Πηγή: Παπαχαρήσης, 1999)

κόσκινο N°	άνοιγμα mm	άνοιγμα in	πάχος σύρματος mm
4	4.76	0.187	1.14 ÷ 1.68
5	4.00	0.157	1.00 ÷ 1.47
6	3.36	0.132	0.87 ÷ 1.32
7	2.83	0.111	0.80 ÷ 1.20
8	2.38	0.0937	0.74 ÷ 1.10
10	2.00	0.0787	0.68 ÷ 1.00
12	1.68	0.0661	0.62 ÷ 0.90
14	1.41	0.0555	0.56 ÷ 0.80
16	1.19	0.0469	0.50 ÷ 0.70
18	1.00	0.0394	0.43 ÷ 0.62
20	0.84	0.0331	0.38 ÷ 0.55
25	0.71	0.0280	0.33 ÷ 0.48
30	0.59	0.0232	0.29 ÷ 0.42
35	0.50	0.0197	0.26 ÷ 0.37
40	0.42	0.0165	0.23 ÷ 0.33
45	0.35	0.0138	0.20 ÷ 0.29
50	0.297	0.0117	0.170 ÷ 0.253
60	0.250	0.0098	0.149 ÷ 0.220
70	0.210	0.0083	0.130 ÷ 0.187
80	0.177	0.0070	0.117 ÷ 0.154
100	0.149	0.0059	0.096 ÷ 0.125
120	0.125	0.0049	0.079 ÷ 0.123
140	0.105	0.0041	0.063 ÷ 0.087
170	0.088	0.0035	0.054 ÷ 0.073
200	0.074	0.0029	0.045 ÷ 0.061

Το δείγμα ξηραίνεται στους 105°C και αφού ξηραθεί ζυγίζεται με ακρίβεια 0.5%. Τοποθετείται στο αρχικό άνω κόσκινο και κοσκινίζεται με ηλεκτρικό δονητή. Το υλικό περνάει τα κατώτερα κόσκινα και συγκεντρώνεται σε κάθε ένα από αυτά ανάλογα με τη διάμετρο των κόκκων του. Το υλικό που έχει μείνει σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και μετατρέπεται σε % του συνολικού βάρους του δείγματος. Από τα αποτελέσματα κατασκευάζεται η αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη (Δημόπουλος, 2005).

3

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Καθώς ακόμη και σήμερα τα κριτήρια του Terzaghi χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μικρών απαιτήσεων φίλτρων, εκτεταμένες έρευνες παρέχουν πολλές γνώσεις για το αντικείμενο. Οι εργαστηριακές παρατηρήσεις σε διάφορα εδαφικά υλικά, πολλές φορές οδήγησαν ερευνητές να προτείνουν εμπειρικές σχέσεις για σταθερούς και αξιόπιστους συνδυασμούς υλικού πυρήνα και φίλτρου (Sherard και Dunnigan 1985).

Όμως τα εμπειρικά αυτά κριτήρια μπορούν να είναι αξιόπιστα μόνο για τα υλικά τα οποία έχουν δοκιμαστεί εργαστηριακά και έχουν αρκετούς περιορισμούς εξαιτίας των διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται, των συνθηκών που επικρατούν κάθε φορά στο εργαστήριο κ.λπ. Τα περισσότερα εμπειρικά κριτήρια δεν παρέχουν στον μελετητή μία επαρκή εικόνα για την κατάσταση που επικρατεί μέσα στο σώμα του φράγματος, ούτε για το επίπεδο ασφαλείας που παρέχουν. Με την αύξηση της χρήσης του ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι ερευνητές πλέον επικεντρώνονται σε πιο εξειδικευμένες και ακριβείς μεθόδους.

Στη σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί, γίνεται προσπάθεια καταγραφής των μελετών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τα φίλτρα και να εξαχθούν συμπεράσματα για τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται.

3.2. ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι αναλογίες του μεγέθους των κόκκων αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των φίλτρων. Ο Terzaghi ανέπτυξε τα δύο κριτήρια σχεδιασμού που αναφέρονται παραπάνω, τα οποία βασίζονται εν μέρει σε εργαστηριακές παρατηρήσεις αλλά και σε θεωρητικά δεδομένα (ICOLD 1994). Αν και τα κριτήρια αυτά, αναπτύχθηκαν με τη χρήση άμμου ομοιόμορφης κατανομής στο φίλτρο και στον πυρήνα, αρχικά χρησιμοποιούνταν αδιακρίτως και σε άλλους τύπους εδάφους.

Από τότε έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες εμπειρικές έρευνες για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του φίλτρου ή οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διήθηση. Τα περισσότερα πειράματα διεξάγονται με τη χρήση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού σωλήνα που ονομάζεται διαπερατόμετρο. Το ύψος του κυλίνδρου είναι περίπου 150 - 300mm και έχει διάμετρο 100 - 250mm. Οι Indaragana και Locke το 2000 χρησιμοποίησαν μεγαλύτερο διαπερατόμετρο (διαμέτρου 500mm και ύψους 1000mm), με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των μεγαλύτερων πόρων που αναπτύσσονται επάνω στα τοιχώματα του διαπερατόμετρου. Οι Sherard et al. το 1984 περιγράφουν μια χαρακτηριστική μέθοδο, το πείραμα περιλαμβάνει κάθετη ροή του νερού μέσω του υλικού του πυρήνα και του φίλτρου. Τα νερά συλλέγονται για τη μέτρηση της ροής και την ποσότητα του υλικού πυρήνα μέσα σε αυτά. Συχνά εφαρμόζεται μια σειρά από υδραυλικές κλίσεις, οι οποίες ποικίλλουν από 0.5 έως και 50. Αυτό γίνεται για να εξεταστεί η επίδραση των διαφόρων πιέσεων νερού και να εξασφαλιστούν όλες οι δυνατές υδραυλικές συνθήκες που μπορεί να αναπτυχθούν μέσα σε ένα φράγμα.

Οι περισσότεροι ερευνητές έχουν εφαρμόσει παρόμοιες πειραματικές μεθόδους, ωστόσο, έχουν ορίσει ελαφρώς διαφορετικά κριτήρια για την επιτυχία και την αποτυχία στις δοκιμές. Σε γενικές γραμμές, τα κριτήρια περιλαμβάνουν:

- μακροσκοπική εξέταση - εάν το υλικό του πυρήνα σταδιακά σφραγίζει τα κενά του φίλτρου ή διέρχεται μέσα από το φίλτρο
- τη μέτρηση των μεταβολών διαπερατότητας κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- τη μέτρηση της μεταβολής της μάζας τόσο του πυρήνα όσο και του φίλτρου, το οποίο δίνει μια ποσοτική μέτρηση της κίνησης των κόκκων των υλικών
- τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής των υλικών πριν και μετά τη δοκιμή και

- τη μέτρηση της μεταβολής της θολερότητας του εξερχόμενου ρευστού ως ένδειξη της διάβρωσης του υλικού του πυρήνα.

Μια κοινή εναλλακτική μέθοδος είναι η δοκιμή υδαρότητας (Sherard et al. 1984, Indraratna et al., 1996). Στη δοκιμή αυτή, το φίλτρο συμπιέζεται σε συσκευή φιλτραρίσματος, και στη συνέχεια υλικό του πυρήνα τοποθετείται δίπλα στο φίλτρο υπό υψηλή πίεση ώστε να εξετάσει κατά πόσο κόκκοι του υλικού του πυρήνα μεταφέρονται μέσα στο φίλτρο. Το φίλτρο κρίνεται ακατάλληλο στην περίπτωση που το υλικό του πυρήνα διέρχεται μέσα από αυτό.

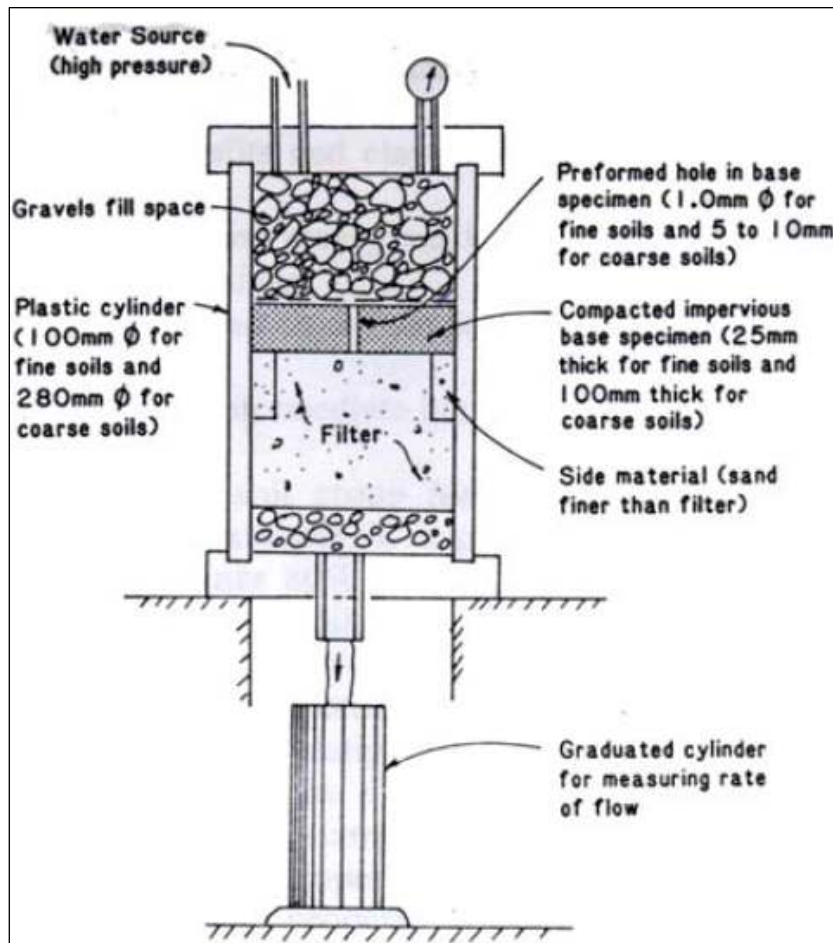
Στα γεωτεχνικά έργα, οι περισσότερες μελέτες έχουν εξετάσει τη καμπύλη κατανομής του μεγέθους των κόκκων του πυρήνα και των φίλτρων ως τις σημαντικότερες παραμέτρους (Sherard και Dunnigan 1985). Ορισμένες μελέτες έχουν επίσης συμπεριλάβει ένα απλό μοντέλο των υδραυλικών και των φυσικών ιδιοτήτων (Indraratna και Vafai 1997, Indraratna και Locke 2000, Locke et al. 2001) για τη μοντελοποίηση τη συμπεριφοράς φίλτρων μέσα στο χρόνο.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα κάποιων ερευνών.

3.2.1. NEF test - Sherard & Dunnigan (1989)

Οι Sherard και Dunnigan διαπίστωσαν ότι διαδικασία δοκιμής που περιγράφεται παραπάνω, δεν ήταν κατάλληλη για την εξέταση της διήθησης λεπτόκοκκων συνεκτικών εδαφών, ιδιαίτερα όταν το υλικό έχει ρηγματωθεί. Μετά από δέκα χρόνια μελέτης επάνω στα φίλτρα πρότειναν μια νέα εργαστηριακή δοκιμή, γνωστή ως 'No erosion filter test' (NEF), για να καθορίζονται οι συνδυασμοί των υλικών των φίλτρων και του πυρήνα στην περίπτωση συνεκτικών εδαφών.

Η δοκιμή περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1. Συσκευή δοκιμής NEF (Πηγή: Sherard, 1989)

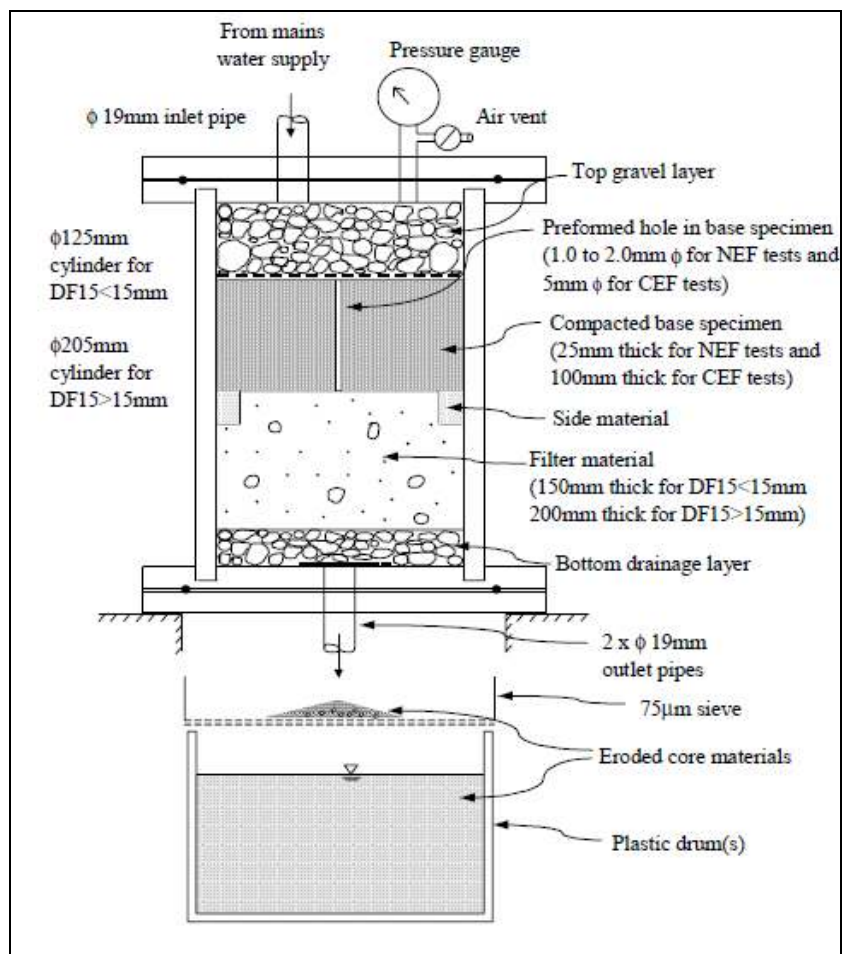
Η συσκευή της δοκιμής NEF αποτελείται από έναν πλαστικό κύλινδρο, ο οποίος διαθέτει οπές στο επάνω και κάτω μέρος του ώστε να επιτρέπεται η εισροή και εκροή του νερού. Μέσα στον κύλινδρο τοποθετούνται διαδοχικά οι στρώσεις στραγγιστηρίου, πυρήνα και φίλτρου. Στη συνέχεια, δημιουργείται μία οπή 1mm (για συνεκτικά εδάφη) στο υλικό που αντιπροσωπεύει τον πυρήνα για να προσομοιώσει τις ενδεχόμενες ρωγμές του πυρήνα.

Μετά από την παραπάνω διαδικασία, εφαρμόζεται στο σύστημα πίεση 4.2Kpa από το νερό. Η υψηλή αυτή πίεση μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του υλικού του πυρήνα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής προέρχονται από το νερό που εξέρχεται, τη θολότητά του και τη διάμετρο της οπής μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής. Από τα παραπάνω, βγαίνει το συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα του φίλτρου να εμποδίσει τη δάβρωση του υλικού του πυρήνα.

3.2.2. CEF test - Foster & Fell (1999)

Κατά τη διάρκεια πειραματικών μελετών για την εκτίμηση των φίλτρων που δεν πληρούν τα κριτήρια σχεδιασμού, οι Foster και Fell το 1999 διαπίστωσαν ότι υπάρχει ένα άλλο όριο πριν από το οποίο τα φίλτρα μπορούν να σταματήσουν της διάβρωση, ενώ μετά από αυτό αστοχούν. Αυτό το όριο μπορεί να βρεθεί με μια νέα δοκιμή τη CEF (Continuing Erosion Filter) που είναι μια τροποποιημένη έκδοση της δοκιμής NEF.

Η συσκευή της δοκιμής CEF περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2. Συσκευή δοκιμής CEF (Πηγή: Foster & Fell, 1999)

3.2.3. Άλλες μελέτες

Οι Fischer και Holtz το 1996, με βάση στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων προηγούμενων ερευνών πρότειναν ότι ο δείκτης D_{15} / d_{75} μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τη συγκράτηση του υλικού, ανεξάρτητα από το συντελεστή ομοιομορφίας του πυρήνα και του φίλτρου. Ωστόσο, δεν υπάρχει φυσική αιτιολογία για την υιοθέτηση του d_{75} να εκπροσωπεί το υλικό του πυρήνα.

Οι Sherard et al. το 1984 υπολόγισαν τους περιορισμούς στις διαστάσεις των φίλτρων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του 'λιωμένου κεριού' (Molten Wax technique), όπου ένα πυκνά συμπιεσμένο φίλτρο γεμίζει με καυτό λειωμένο κεριό και διαλύεται μετά από ψύξη. Η διάσταση των μικρότερων καναλιών ροής που είχαν σχηματιστεί, βρέθηκε να διαφέρουν από $0.09 * D_{15}$ μέχρι $0.18 * D_{15}$ (δηλαδή οι μεγαλύτεροι κόκκοι υλικού πυρήνα που θα μπορούσαν να διέρθουν μέσα από το φίλτρο ήταν της τάξης του $0.18 * D_{15}$). Ομοίως, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη διάσταση των καναλιών ροής κυμαινόταν περίπου από $0.1 * D_{15}$ μέχρι $0.6 * D_{15}$. Ωστόσο, δεν υπήρξαν σημεία όπου η μέγιστη διάσταση να υπερβαίνει τα 6mm.

Ο λόγος D_{50} / d_{50} , ή παρόμοια ποσοστά έχουν προταθεί από ορισμένους ερευνητές συμπεριλαμβανομένων των US Army Corps of Engineers (USACE, 1971) και Kargoff (1955). Ο συνδυασμός του λόγου αυτού με έναν άλλο (π.χ. τον D_{15} / d_{15}) είχε στόχο τον ακριβέστερο της κοκκομετρικής καμπύλης των υλικών. Ωστόσο, οι μελέτες όπως των Sherard και Dunnigan (1985), Honjo και Veneziano (1989) και Fischer και Holtz (1996) πρότειναν ότι ο δείκτης αυτός δεν συσχετίζεται με την απόδοση των φίλτρων και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό τους.

Ένας άμεσος περιορισμός του συντελεστή ομοιομορφίας, C_u , μπορεί να είναι χρήσιμος για υλικά μεγάλης διαβάθμισης. Οι περισσότερες από τις δοκιμές που πραγματοποίησε ο Kargoff (1955) υλικά πυρήνα και φίλτρων καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης με C_u μεγαλύτερο από 6 και διαπίστωσε ότι πολλές δοκιμές με D_{15} / d_{85} μικρότερο από 9 απέτυχαν. Ωστόσο, οι Sherard et al. (1984) διαφώνησαν με τα αποτελέσματα αυτά, τα οποία υιοθετήθηκαν αργότερα από την USBR, θεωρώντας ότι τα κριτήρια αστοχίας του Kargoff (1955) ήταν πάρα πολύ συντηρητικά και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι και οι 7 δοκιμές της USBR που αστόχησαν στην πραγματικότητα ήταν επιτυχείς.

Με στατιστικές αναλύσεις πολλών δημοσιευμένων δεδομένων οι Honjo και Veneziano (1989) πρότειναν ότι αν και ορισμένες από τις περιπτώσεις που ο Kargoff έκρινε ως

‘αποτυχίες’ θα μπορούσαν να έχουν επιτύχει, οι περισσότερες από αυτές θα ήταν πολύ κοντά στην κρίσιμη κατάσταση.

Ο λόγος D_{15} / d_{15} , γνωστός και ως δείκτης διαπερατότητας, έχει χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει τόσο το κριτήριο διαπερατότητας όσο και το κριτήριο διατήρησης. Για παράδειγμα, η U. S. Army Corps of Engineers (1971) πρότεινε την ακόλουθη σχέση για αποτελεσματικά φίλτρα.

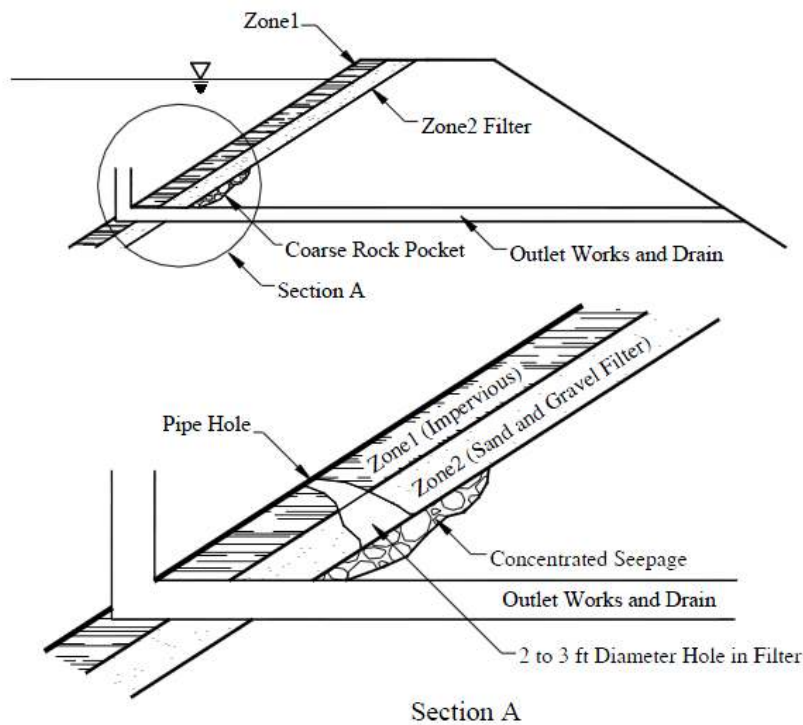
$$5 < D_{15} / d_{15} < 20 \quad (3.1)$$

Οι Sherard et al. (1984), πρότειναν ότι το d_{15} δεν έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες συγκράτησης που χρειάζεται το φίλτρο. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι η διαπερατότητα του φίλτρου είναι αρκετά μεγαλύτερη από την διαπερατότητα του πυρήνα για την αποστράγγιση του πυρήνα και την πρόληψη της δημιουργίας υψηλών πιέσεων πόρων. Ωστόσο, θα πρέπει να υπάρχει μια άμεση σχέση διαπερατότητας, π.χ. διαπερατότητα φίλτρου μεγαλύτερη 20 φορές από τη διαπερατότητα του πυρήνα και όχι μόνο έμμεση σχέση ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων (ICOLD 1994). Ως εκ τούτου, η χρήση του d_{15} δεν συνιστάται να εκπροσωπεί την απόδοση φίλτρου, ιδιαίτερα της ικανότητας συγκράτησης.

Το 1984 οι Sherard et al. επέκτειναν λίγο τα κριτήρια του Terzaghi για συνεκτικά εδάφη. Έτσι, υπάρχουν τα κριτήρια για τα φίλτρα που θα είναι ικανά να συγκρατήσουν τη διαρροή ακόμα και στις δυσκολότερες συνθήκες, όπου το εδαφικό υλικό του πυρήνα ρηγματώνεται και η διαρροή συμβαίνει μέσα από τις ρωγμές.

Εκτός από τα κριτήρια μεγέθους των κόκκων που εξασφαλίζουν τη συγκράτηση του υλικού του πυρήνα, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση του νερού, το φίλτρο πρέπει να είναι έτσι διαβαθμισμένο ώστε να αποφεύγεται η ρηγμάτωση του ίδιου του φίλτρου. Για να εξασφαλιστεί ότι τα φίλτρα δε θα ρηγματωθούν τα πιο πρόσφατα κριτήρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του φίλτρου απαιτούν λιγότερο από 5% του υλικού του φίλτρου να διέρχεται από κόσκινο No200, καθώς επίσης και τα λεπτόκοκκα υλικά του φίλτρου να μην έχουν υψηλό δείκτη πλαστιμότητας.

Ωστόσο είναι αμφίβολο κατά πόσο το παραπάνω κριτήριο επαρκεί, στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ρωγμή του φίλτρου στο φράγμα Ochocco, που είχε σχεδιαστεί με ποσοστό < 3% διερχόμενο από κόσκινο No200.



Εικόνα 3.3. Πρόβλημα διασωλήνωσης φράγματος Ochocco (Πηγή: Youngjin Park, 2003)

Εγκάρσιες ρωγμές στο σώμα του φράγματος μπορούν να αναπτυχθούν από καθιζήσεις κατά την κατασκευή του (Hsu, 1981) ή εξαιτίας σεισμικών παραμορφώσεων (USCOLD, 1992). Παρόμοιες ρωγμές μπορεί να σχηματιστούν μεταξύ του χωμάτινου φράγματος και πλάκας σκυροδέματος.

Ο Hsu το 1981 αναφέρει διασωλήνώσεις κατά την κατασκευή από εγκάρσιες ρωγμές σημειώθηκαν στα φράγματα Arishapa (1923), Stockton (1950), Cougar (1963), Round Butte (1964), Yard's Creek (1963), matahina (1966), και Viddalsvatn (1971). Στα φράγματα Yard's Creek, matahina και Viddalsvatn οι ρωγμές προεκτάθηκαν και μέσα στα φίλτρα, καθώς και στον πυρήνα, διότι τα φίλτρα περιείχαν υπερβολικές ποσότητες λεπτόκοκκων (Hsu, 1981).

Το USCOLD το 1992 αναφέρει δύο περιπτώσεις εγκάρσιων ρωγμών σε φράγματα που προκύπτουν από παραμορφώσεις λόγω σεισμού. Στο φράγμα matahina στη Νέα Ζηλανδία που υπέστη καθιζήσεις και ρηγματώσεις ως αποτέλεσμα σεισμού 6.3 ρίχτερ στις 2 Μαΐου 1987. Οι ρωγμές ήταν ρηχές και ότι δεν εκτείνονταν κατά μήκος του πυρήνα. Τα ρήγματα εκτείνονταν σε μία μεγάλη κοιλότητα και πιστεύεται ότι σχετίζονταν με προηγούμενες

ρηγματώσεις του πυρήνα, διήθηση και εσωτερική διάβρωση. Το ποσοστό της διήθησης μέσω του φράγματος αυξήθηκε ως αποτέλεσμα των συνεπειών από το σεισμό.

Επιπλέον, το φράγμα Austrian στην Καλιφόρνια υπέστη παραμορφώσεις και ρωγμές, ως αποτέλεσμα σεισμού 6.9 ρίχτερ, στις 17 Οκτωβρίου 1989. Μία εγκάρσια ρωγή εντοπίστηκε 30 πόδια κάτω από το αριστερό αντέρεισμα, και εγκάρσιες ρωγμές διαχωρισμός του αναχώματος από τον υπερχειλιστή σημειώθηκαν σε βάθος 23 ποδιών στο δεξί αντέρεισμα. Τα επίπεδα του νερού στο ανάχωμα αυξήθηκε ως αποτέλεσμα των συνεπειών του σεισμού.

Κοινή είναι η πεποίθηση ότι τα φίλτρα κατάντη του πυρήνα σε φράγματα θα αποτρέψουν τη διάβρωση και τη διασωλήνωση μέσα από εγκάρσια ρήγματα στα φράγματα (Shepard και Dunnigan, 1989). Η παραδοχή αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι το φίλτρο δεν θα είναι τόσο συνεκτικό ώστε να υποστηρίξει μια ρωγή. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τις παρατηρήσεις στα φράγματα Yard's Creek, Matahina και Viddalsvatn αυτό δεν συμβαίνει πάντοτε.

Η ικανότητα ενός φίλτρου να παρέχει μια αξιόπιστη γραμμή άμυνας κατά της διάβρωσης και της διασωλήνωσης εξαρτάται από τα ψαθυρά υλικά του φίλτρου, και την ανικανότητά της να υποστηρίξουν μία ρωγή. Το ίδιο ισχύει και για τα φίλτρα που τοποθετούνται ανάντη του πυρήνα, που έχουν σχεδιαστεί ώστε να πληρώσουν τις ρωγμές. Αν υπάρχει ρωγή στον πυρήνα και τα υλικά του φίλτρου δεν διαπλυθούν ώστε να την πληρώσουν, τότε δεν επιτυγχάνουν τη λειτουργία τους.

3.3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΦΙΛΤΡΩΝ

Η ιστορία της έρευνας σχετικά με τα κριτήρια των φίλτρων για χωμάτινα φράγματα εκτείνεται σχεδόν εδώ και 100 χρόνια. Σχεδιαστικές παράμετροι για τα φίλτρα δημοσιεύθηκαν ήδη από το 1910 (Hsu, 1981). Ωστόσο, η βάση για τα κριτήρια σχεδιασμού του φίλτρου μπορεί να αποδοθούν στην έρευνα του Terzaghi το 1920 και του Casagrande το 1930 (Arulanandan και Perry, 1983 / Hsu, 1981). Εδραιώθηκε από τότε ότι ένα φίλτρο πρέπει να εκτελέσει δύο χωριστές λειτουργίες:

- Θα πρέπει να εμποδίζει την μετακίνηση του υλικού του πυρήνα σε άλλες ζώνες του φράγματος
- Θα πρέπει να διαθέτουν ένα αρκετά μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα έτσι ότι να μην αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις του νερού των πόρων εντός του φράγματος και η ροή να διοχετεύεται προς συγκεκριμένες θέσεις του φράγματος.

Τα κριτήρια που προτείνονται από τον Terzaghi, τα οποία εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε παρόμοια μορφή και σήμερα, βασίστηκαν στη διαβάθμιση του εδάφους ή του υλικού του πυρήνα που πρέπει να προστατευθεί. Για να πληρείται το πρώτο από τα παραπάνω κριτήρια πρέπει:

$$D_{15} / d_{85} < 4 \quad (3.2)$$

Ενώ για να πληρείται το δεύτερο από τα παραπάνω κριτήρια πρέπει:

$$D_{15} / d_{15} > 4 \quad (3.3)$$

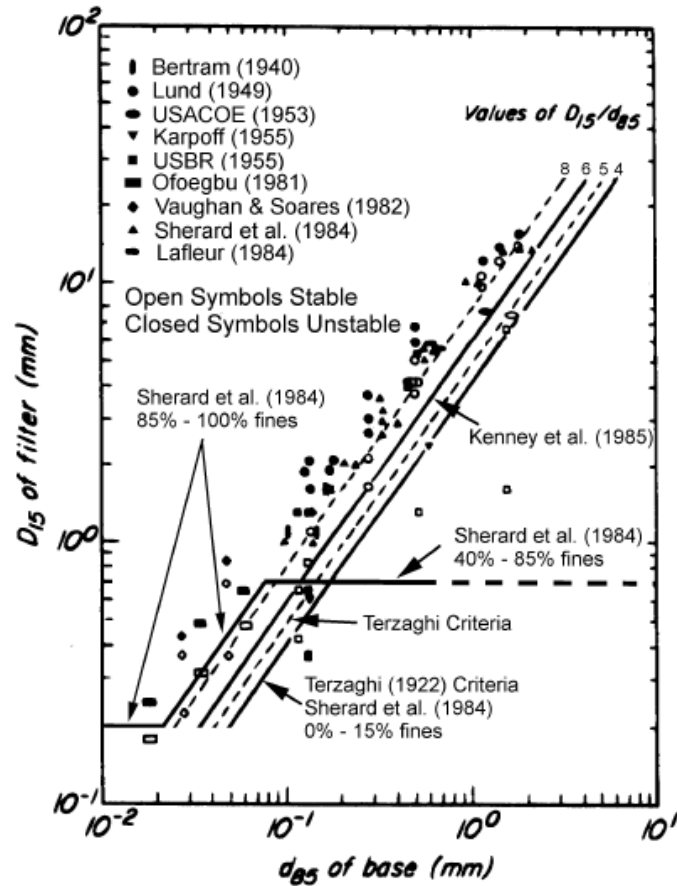
Το πρώτο κριτήριο προβλέπει το πιο χονδρόκοκκο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ενώ το δεύτερο παρέχει πληροφορίες για το πιο λεπτόκοκκο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για το φίλτρο.

Τα αρχικά κριτήρια Terzaghi έχουν υποβληθεί σε αυστηρό έλεγχο κατά τα τελευταία 70 χρόνια. Οι εργαστηριακές δοκιμές και η θεωρητική ανάλυση έχουν εξετάσει την εγκυρότητα της εκλογής του μεγέθους των κόκκων για τις ελάχιστες και τις μέγιστες αναλογίες των δύο κριτηρίων. Μια καλή σύνοψη των αυτών των κριτηρίων παρουσιάστηκε από τον Hsu το 1981 όπως φαίνεται στον Πίνακα που ακολουθεί, μαζί με συμπληρωματικά κριτήρια που αναπτύχθηκαν από τον Hsu.

Πίνακας 3.1. Κριτήρια φίλτρων

Συγγραφέας	Σχόλια	Κριτήρια
Terzaghi (1922)		$D_{15}/d_{85} \leq 4$ $D_{15}/d_{15} \geq 4$
Bertram (1940)	Άργιλος ή λεπτόκοκκη άμμος	$D_{15}/d_{85} \leq 6$ $D_{15}/d_{15} \leq 9$
Hurley and Newton (1940)	Άμμος καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης	$D_{15}/d_{85} \leq 32$ $D_{15}/d_{50} \leq 15$
U.S. Army Corps of Engineers (1941-1955)	Λεπτόκοκκη και χονδροκόκκη άμμος	$4 \leq D_{15}/d_{15} \leq 20$, $D_{50}/d_{50} \leq 25$ $D_{15}/d_{85} \leq 5$
	Συνεκτικό υλικό	$D_{15}/d_{15} > 5$, $D_{50}/d_{50} \leq 25$ $D_{15}/d_{85} \leq 5$
USBR (1947-1974)	Φυσικά, στρογγυλεμένα, ομοιόμορφα υλικά	$5 \leq D_{50}/d_{50} \leq 10$
	Φυσικά διαβαθμισμένα φίλτρα	$12 \leq D_{50}/d_{50} \leq 58$ $12 \leq D_{15}/d_{15} \leq 40$
	Θραύσματα πετρωμάτων	$9 \leq D_{50}/d_{50} \leq 30$ $6 \leq D_{15}/d_{15} \leq 18$
Sherard and Dunnigan (1985)	85 - 100% λεπτόκοκκα	$D_{15}/d_{85} \leq 9$
	40 - 85% λεπτόκοκκα	$D_{15} \leq 0.7\text{mm}$
	0 - 15% λεπτόκοκκα	$D_{15}/d_{85} \leq 4$
	15 - 40% λεπτόκοκκα	Ανάμεσα στα δύο προηγούμενα, ανάλογα με το λεπτόκοκκο υλικό
Honjo and Veneziano (1989)	Εδαφικό υλικό με $D_{95}/d_{75} \leq 7$	$D_{15}/d_{85} \leq 5.5 - 0.5 * D_{95}/d_{75}$

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.1, τα περισσότερα κριτήρια φίλτρων βασίζονται στο λόγο D_{15} / d_{85} . Τοποθετώντας σε διάγραμμα τους λογαρίθμους των D_{15} προς το λογάριθμο του d_{85} είναι δυνατή μια καλύτερη οπτική σύγκριση των κριτηρίων, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.4. Κριτήρια φίλτρων με βάση την αναλογία D_{15} / d_{85}
(Πηγή Terzaghi et al. 1996)

Τα κριτήρια φίλτρων από έκδοση του ICOLD, 1994, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως και σήμερα φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Κριτήρια συγκράτησης φίλτρων (ICOLD, 1994)

Base soil category	Percent finer than 0.074 mm (#200 sieve)	Base soil description	Filter criteria
1	> 85	Fine silts and clays	$D_{15F} \leq 9 \times D_{85B}$
2	40 – 85	Sands, silts, clays, and silty and clayey sands	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	15 – 39	Silty and clayey sands and gravels	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm} + \frac{(40 - A) * 4 \times D_{85B} - 0.7 \text{ mm}}{25}$
4	< 15	Sands and gravels	$D_{15F} \leq 4 \times D_{85B}$

Σημειώσεις: Τα φίλτρα πρέπει να έχουν μέγιστο μέγεθος κόκκου 2 ίντσες (50mm) και μέγιστο ποσοστό διερχόμενο από κόσκινα Νο200, 5% μετά από συμπύκνωση, με δείκτη πλαστιμότητας των λεπτόκοκκων ίσο με το μηδέν.

Όταν το γινόμενο $9 * D_{85B}$ είναι μικρότερος από 0.2mm, χρησιμοποιείται η τιμή 0.2mm, το ίδιο ισχύει όταν το γινόμενο $4 * D_{85B}$ είναι μικρότερο από 0.7mm και χρησιμοποιείται η τιμή 0.7mm.

A= το ποσοστό που διέρχεται από κόσκινο Νο200.

Για την κατηγορία 4, το D_{85B} μπορεί να καθοριστεί από την αρχική κοκκομετρική καμπύλη χωρίς τροποποιήσεις.

Το ICOLD προτείνει επίσης τη συσχέτιση της διάστασης D_{90} (ενδεικτική του μεγέθους των μεγάλων κόκκων) με τη διάσταση D_{10} (ενδεικτική του μεγέθους των μικρών κόκκων), σύμφωνα με τον Πίνακα, ώστε να περιορίζεται η τάση διαχωρισμού των κόκκων, κατά την τοποθέτηση του φίλτρου.

Πίνακας 3.3. Σχέση διαστάσεων D_{10} και D_{90} (φίλτρου) που μειώνουν τον κίνδυνο διαχωρισμού

Ελάχιστη D_{10} (mm)	Μέγιστη D_{90} (mm)
< 0.5	20
0.5 - 1.0	25
1.0 - 2.0	30
2.0 - 5.0	40
5.0 - 10	50
10 - 50	60

4

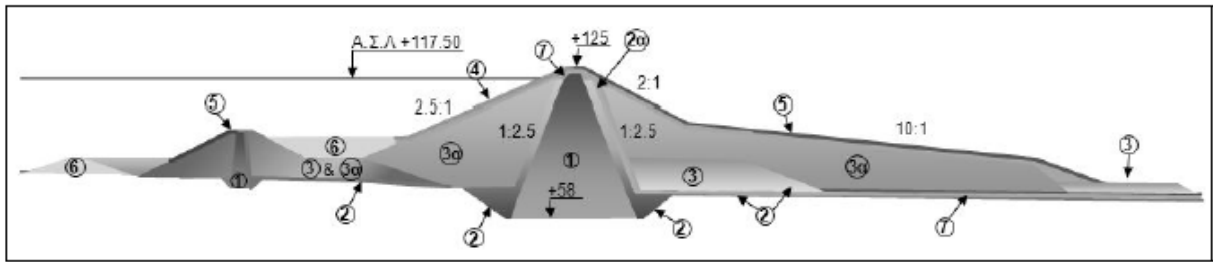
ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα αποτελεί μία χώρα, η μορφολογία της οποίας επιτρέπει την κατασκευή φραγμάτων. Στον νέο Κατάλογο Μεγάλων Ελληνικών Φραγμάτων της Ελληνικής Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων αναφέρονται περισσότερα από 165 φράγματα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται καταγραφή των στοιχείων για τα υλικά των φίλτρων για ορισμένα από τα φράγματα που υπάρχουν στην Ελλάδα.

4.1. ΓΑΔΟΥΡΑ

(Στοιχεία για το φράγμα του Γαδουρά προέρχονται από τη Γενική Γραμματεία Δημόσιων Έργων)

Το φράγμα Γαδουρά βρίσκεται σε απόσταση περίπου 40km νότια της πόλης της Ρόδου και απέχει περίπου 6.5km δυτικά από τη γέφυρα Γαδουρά της παλιάς Εθνικής Οδού Ρόδου - Λίνδου. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα, σώματα στήριξης από αμμοχάλικα κοίτης και ημιπερατά κροκαλοπαγή. Οι μεταβατικές ζώνες αποτελούνται από διαβαθμισμένα υλικά κοίτης. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται μία τυπική διατομή του φράγματος Γαδουρά και στον Πίνακα 4.1 συνοπτική περιγραφή της διαζώνισης του φράγματος.



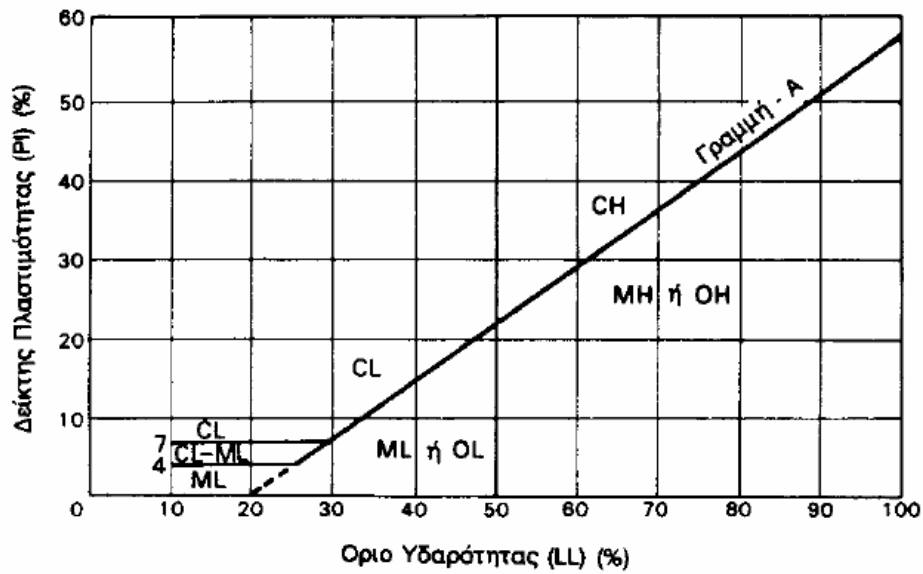
Εικόνα 4.1. Τυπική διατομή φράγματος Γαδουρά (Πηγή: Μαρίνος, 2008)

Πίνακας 4.1. Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Γαδουρά

Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
2	Φίλτρο (διαβαθμισμένο αμμοχάλικο)
2α	Λεπτόκοκκο στραγγιστήριο
3	Κελύφη (αμμοχάλικα ποταμού)
3 α	Κελύφη (κροκαλοπαγή)
4	Προστασία ανάντη πρανών (λιθορριπή λατομείου)
5	Προστασία κατόντη πρανών (κροκάλες)
6	Αναβαθμίδες (τυχαία υλικά)
7	Στραγγιστήριο (διαβαθμισμένο αμμοχάλικο)

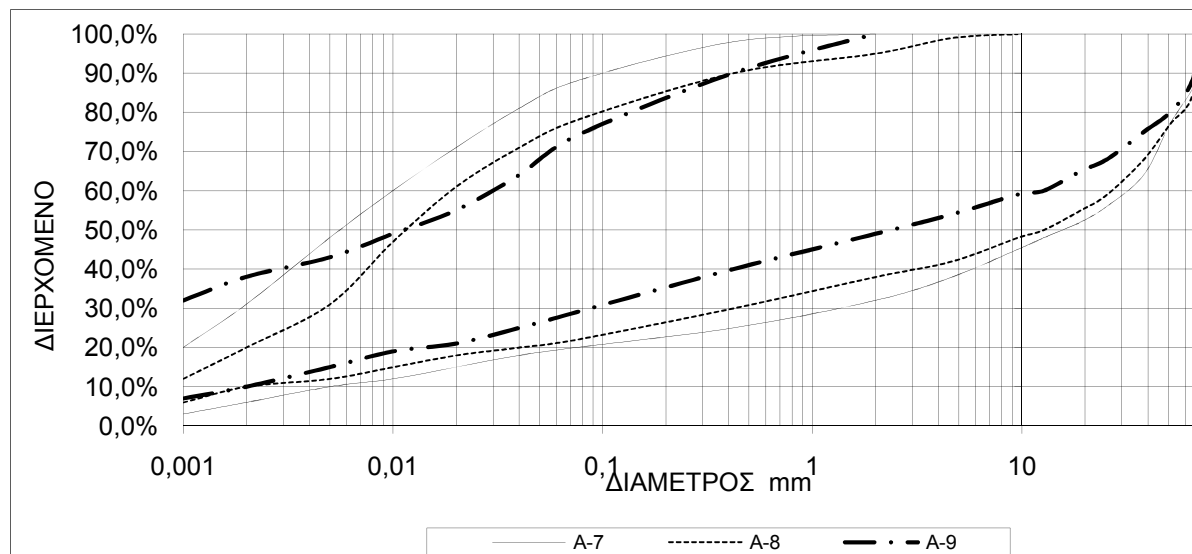
4.1.1. Υλικό πυρήνα

Από την περιοχή των δανειοθαλάμων υλικού πυρήνα, θεωρούνται κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1) υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα, διερχόμενο από το κόσκινο Νο200, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% κατά βάρος και κλάσμα διερχόμενο στο κόσκινο Νο4 μεγαλύτερο του 40%. Επίσης, τα υλικά θα πρέπει να ταξινομούνται στην ομάδα CL στο χάρτη πλαστικότητας (Εικόνα 4.2) και δεν πρέπει να περιέχουν οργανικές ουσίες.



Εικόνα. 4.2. Χάρτης πλαστικότητας Casagrande (Πηγή: Σακελλαρίου, 2003)

Οι περιβάλλουσες των κοκκομετρικών καμπυλών των δανειοθαλάμων του υλικού του πυρήνα φαίνονται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3. Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών δανειοθαλάμων υλικού πυρήνα

Θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί φίλτρο (Ζώνη 2) στις παρειές του πυρήνα με στόχο τη συγκράτηση των κόκκων του υλικού από διάπλυση. Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης 2, γίνεται με βάση τη λεπτόκοκκη περιβάλλουσα (αριστερά) του

υλικού πυρήνα και με θεώρηση μόνο του κλάσματος που είναι μικρότερο από το κόσκινο Νο4. Η μέγιστη διάσταση κόκκου που μπορεί να ενσωματωθεί στον πυρήνα είναι 10cm.

4.1.2. Υλικό φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η κοκκομετρική καμπύλη της λεπτόκοκκης περιβάλλουσας του υλικού του πυρήνα (Εικόνα 4.3) δίνει ποσοστό διερχόμενο στο κόσκινο Νο200 μεγαλύτερο από 85% και σύμφωνα με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό ανήκει στην Κατηγορία 1 της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, 1994 - Πίνακας 3.2). Επομένως λαμβάνεται:

$$D_{15} \leq 9 * d_{85}$$

Από το διάγραμμα της Εικόνας 4.3 προκύπτει $d_{85} = 0.055\text{mm}$.

Για $d_{85} = 0.055\text{mm} \Rightarrow D_{15} \leq 0.5\text{mm}$.

Επιπλέον, λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 19\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων το κόσκινο Νο200, μικρότερο από 5%.

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.02\text{mm}$ της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.1\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$0.1\text{mm} < D_{15} \leq 0.5\text{mm}$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού του φίλτρου, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

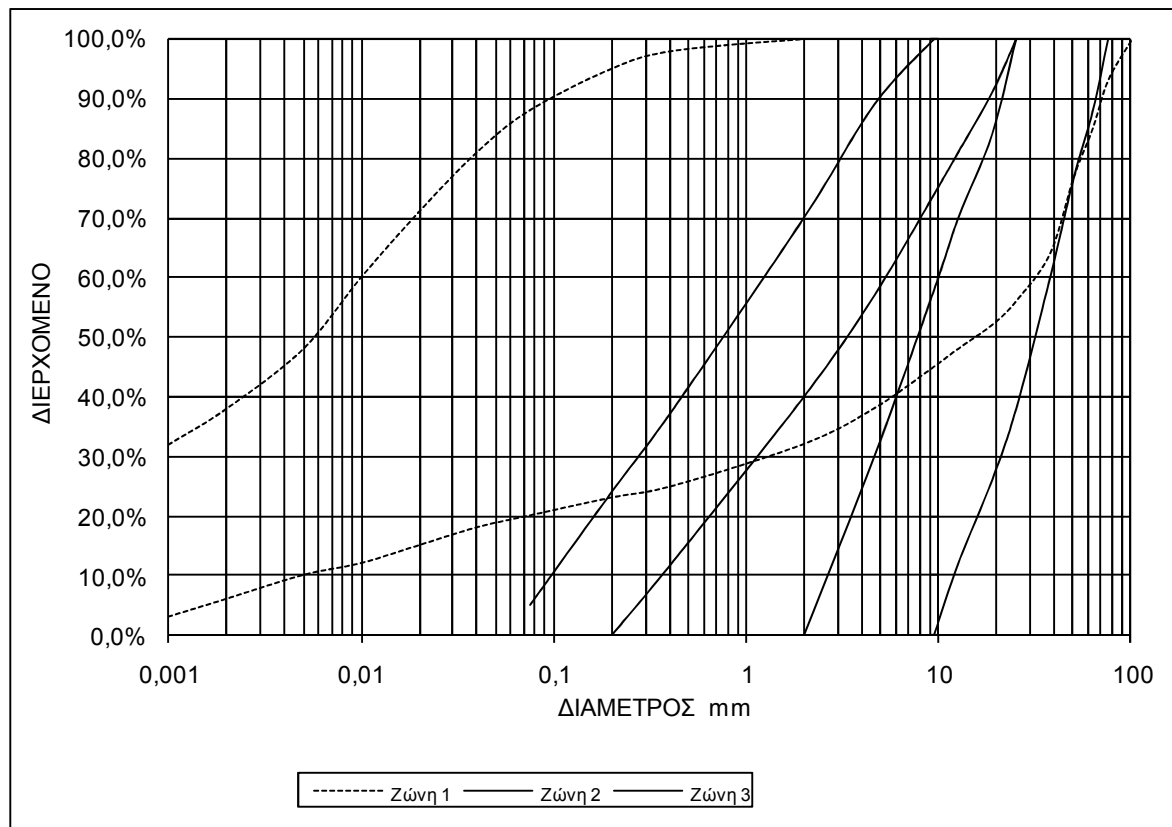
Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
1 ίντσας	100
3/4 ίντσας	90 - 100
3/8 ίντσας	72 - 100
No 4	58 - 88
No 10	40 - 70
No 40	13 - 39
No 100	0 - 23
No 200	< 5

Για την παραπάνω κοκκομετρική διαβάθμιση του φίλτρου προκύπτει συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού $C_u = 6 < 20$. Με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20 και μέγιστο κόκκο μικρότερο από 19mm, εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα διαχωρίζεται κατά την απόθεση και διάστρωση του στο ανάχωμα του φράγματος.

Διάστρωση και Συμπύκνωση Υλικού Φίλτρου

Το ελάχιστο πλάτος της Ζώνης 2, κατάντη του πυρήνα του φράγματος, που είναι απαραίτητο για τη συγκράτηση των κόκκων του πυρήνα, είναι σχετικά μικρό και επομένως το πλάτος της ζώνης καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού θεμελίωσης, από τη σεισμικότητα της περιοχής και από τις απαιτήσεις της κατασκευής. Επειδή η απόθεση του υλικού θα γίνεται με εκφόρτωση (πτώση) από φορτηγό, το ελάχιστο οριζόντιο πλάτος της ζώνης ορίζεται στα 2.50m. Κατά τη μεταφορά, απόθεση και διάστρωση του φίλτρου, το υλικό θα είναι ελαφρώς υγρό, ώστε να ελαχιστοποιείται ο διαχωρισμός των χονδρών κόκκων.

Το κατακόρυφο ύψος κάθε στρώσης υλικού φίλτρου, δεν θα υπερβαίνει τα 50cm μετά τη συμπύκνωση. Προκειμένου να εξασφαλίζεται το ελάχιστο πλάτος της ζώνης, η απόθεση και διάστρωση του φίλτρου θα προηγείται των παρακειμένων ζωνών του πυρήνα και του στραγγιστηρίου.



Εικόνα 4.4. Περιβάλλουσες υλικού Ζώνης 1 (πυρήνας) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού Ζώνης 2 (φίλτρο) και Ζώνης 3 (στραγγιστήριο)

4.1.3. Υλικό στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό (Ζώνη 2) περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 5% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, 1994, Πίνακας 3.2) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

Για το υλικό της Ζώνης 2, η διάσταση $d_{85} = 3.5\text{mm}$ και επομένως για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} \leq 14\text{mm}.$$

Επιπλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 76\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων στο κόσκινο Νο10: 0%.

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.5\text{mm}$ της κάτω περιβάλλουσας της Ζώνης 2, η παραπάνω σχέση δίνει για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} > 2.5\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$2.5\text{mm} < D_{15} \leq 14\text{mm}.$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης 3 που φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	100
1 ½ ίντσας	55 - 100
¾ ίντσας	35 - 90
½ ίντσας	8 - 68
¼ ίντσας	0 - 42
No 4	0 - 30
No 10	0

Επάρκεια Ζωνών Φίλτρου και Στραγγιστηρίου

Οι διαστάσεις των ζωνών φίλτρου και στραγγιστηρίου τόσο στο κεκλιμένο όσο και στο παρα-οριζόντιο τμήμα, σε συνδυασμό με τη διαπερατότητα του υλικού, πρέπει να είναι σε θέση να παροχετεύσουν με ασφάλεια προς τα κατόντη το σύνολο των νερών που μπορεί

να προέλθουν από τον πυρήνα του φράγματος (είτε από κανονική διήθηση είτε ως έκτακτες παροχές λόγω διασωλήνωσης του υλικού ή διαφορικών καθιζήσεων), από τη θεμελίωση του αναχώματος (αντερείσματα και κοίτη του ποταμού) και τέλος από διείσδυση των νερών της βροχής στο κατάντη σώμα του φράγματος.

4.2. ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΛΑΜΩΤΗΣ

(Στοιχεία για το φράγμα της Καλαμωτής προέρχονται από τη Νομαρχία Χίου)

Το φράγμα της Καλαμωτής βρίσκεται σε απόσταση 1.50km βόρεια του χωριού Καλαμωτή της Χίου.

4.2.1. Υλικό Πυρήνα

Κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος θεωρούνται υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα, διερχόμενο στο κόσκινο Νο200, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30% κατά βάρος και μικρότερο του 65%. Ο περιορισμός του άνω ποσοστού λεπτόκοκκων (< 60%) προτείνεται να μην εφαρμόζεται, γιατί στην κατασκευή πυρήνα φραγμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν υλικά με πολύ υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος.

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών (Εικόνα 4.5) και τις κοκκομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι το υλικό εμφανίζει:

- υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος, μεγαλύτερου από 70% διερχόμενο στο πρότυπο κόσκινο Νο200.
- υψηλό δείκτη πλασιμότητας.
- φυσική υγρασία πλησίον της βέλτιστης.

Το υλικό κρίνεται κατάλληλο για την κατασκευή του πυρήνα του φράγματος.

4.2.2. Υλικό φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Σύμφωνα με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό ανήκει στην Κατηγορία 2 της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, 1994, Πίνακας 3.2).

Τα υλικά των δειγμάτων Ζώνης 1 ανήκουν στην κατηγορία 2 και με την προσαρμογή της αδρομερούς καμπύλης στο 100% διερχόμενο στο κόσκινο Νο4 (4.75mm), όπως ορίζεται σε υποσημείωση του πίνακα. Για υλικά που εμπίπτουν στην Κατηγορία 2, η διάσταση D_{15} του φίλτρου καθορίζεται από τη σχέση:

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

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

Για $d_{15} < 0.01\text{mm}$ (κατ' εκτίμηση), της πλέον αδρομερούς καμπύλης του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.05\text{mm}.$$

Κριτήριο Ομοιομορφίας

Κατά την εκφόρτωση και διάστρωση του υλικού φίλτρου είναι απαραίτητο να αποφεύγεται ο διαχωρισμός του αδρομερούς κλάσματος του υλικού. Η αποφυγή διαχωρισμού επιτυγχάνεται με την αποφυγή χρήσης φίλτρων από καλά διαβαθμισμένα υλικά, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / D_{10}$), να είναι κατά προτίμηση μικρότερος από 6 και οπωσδήποτε μικρότερος από 20.

Επιπλέον η μέγιστη διάσταση D_{90} σχετίζεται με την ελάχιστη διάσταση D_{10} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2.

Για $D_{10} < 0.5\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 20\text{mm}$, ενώ για $0.5 < D_{10} < 1.0\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 25\text{mm}$.

Θεωρείται $D_{90} < 20\text{mm}$ και λαμβάνεται $D_{100} = 20\text{mm}$.

Θεωρώντας ομαλή διαβάθμιση μεταξύ του $D_{15} = 0.7\text{mm}$ και $D_{100} = 20\text{mm}$, προκύπτει:

$$D_{60} = 4.5\text{mm} \text{ και } D_{10} = 0.58\text{mm}$$

Για τις τιμές αυτές ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / D_{10}$) ισούται με 7.7, που είναι αποδεκτός.

Προκειμένου να καθορισθεί το λεπτόκοκκο όριο του φίλτρου, θεωρείται ότι $C_u < 20$ για τη δυσμενέστερη κλίση κοκκομετρικής καμπύλης, δηλαδή λαμβάνοντας D_{60} από την αδρομερή καμπύλη και D_{10} από τη λεπτόκοκκη. Για $D_{60A}=4.5\text{mm}$ και $C_u=20$, προκύπτει:

$$D_{10\Lambda} > 0.22\text{mm}.$$

Κριτήριο Κατάρρευσης

Η παρουσία λεπτόκοκκου κλάσματος στο υλικό φίλτρου, του προσδίδει συνοχή, που συγκρατεί το υλικό και δεν το αφήνει να καταρρεύσει όταν είναι βυθισμένο σε νερό. Το

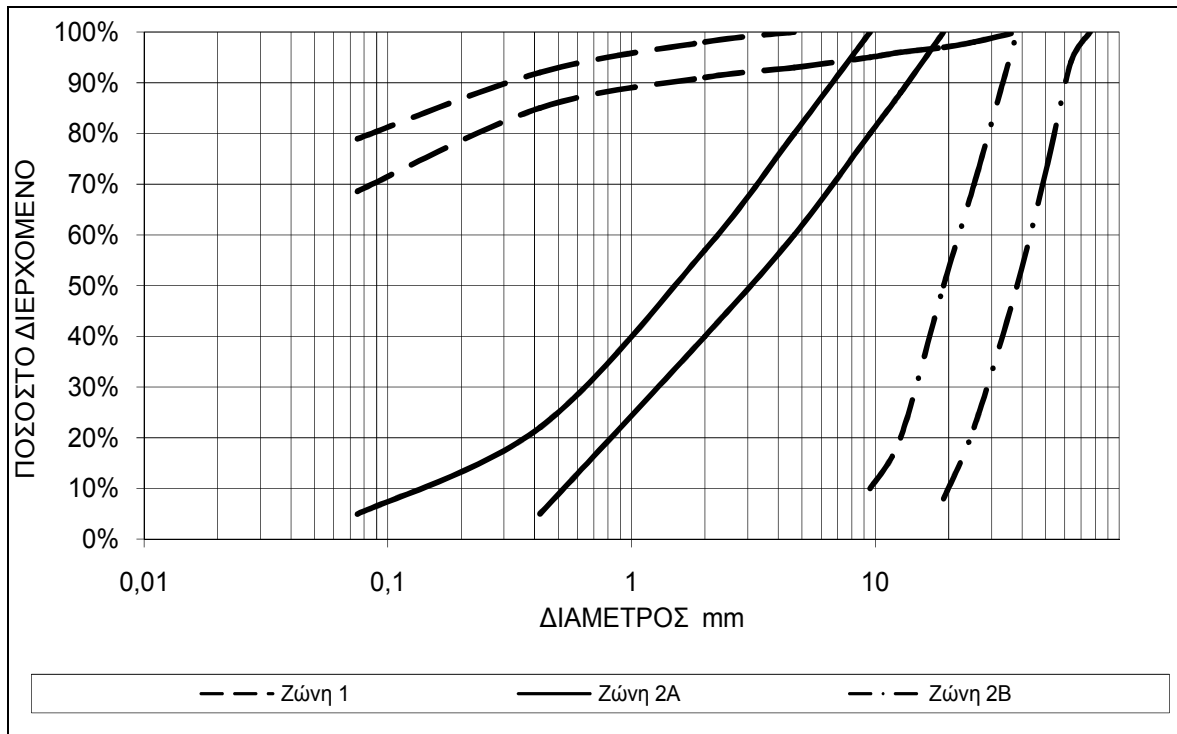
υλικό φίλτρου πρέπει να καταρρέει βυθισμένο σε νερό, ώστε να μην διατηρούνται ανοικτές οι ρωγμές που αναπόφευκτα αναπτύσσονται στο ανάχωμα του φράγματος από τις παραμορφώσεις του. Από δοκιμές προέκυψε ότι το υλικό φίλτρου καταρρέει εύκολα όταν το ποσοστό του λεπτόκοκκου κλάσματος (διερχόμενα στο κόσκινο Νο200) είναι μικρότερο από 5% κατά βάρος.

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} ($0.05\text{mm} < D_{15} \leq 0.7\text{mm}$), τις απαιτήσεις για αποφυγή διαχωρισμού $D_{100} = 20\text{mm}$ και διαβάθμιση του υλικού με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του αδρομερούς ορίου του υλικού του φίλτρου. που δίνονται στον Πίνακα 4.4 και στην Εικόνα 4.5.

Πίνακας 4.4. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3/4 ίντσας	100
1/2 ίντσας	88 - 100
3/8 ίντσας	80 - 100
No 4	60 - 80
No 10	57 - 40
No 40	5 - 22
No 200	< 5



Εικόνα 4.5. Κοκκομετρικές καμπύλες πυρήνα (ζώνη 1), φίλτρου (ζώνη 2A) και στραγγιστηρίου (ζώνη 2B)

4.2.3. Υλικό στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό φίλτρου περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 5% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, 1994, Πίνακας 3.2) για φίλτρα ανήκει στην Κατηγορία 4.

Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

όπου 'D' αναφέρεται στο στραγγιστήριο και 'd' στο προς συγκράτηση φίλτρο.

Για το λεπτόκοκκο όριο της Ζώνης 2A, η διάσταση $d_{85} = 5.4\text{mm}$ και επομένως για τη Ζώνη 2B.

$$D_{15} \leq 21.6\text{mm}.$$

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.7\text{mm}$ της αδρομερούς καμπύλης φίλτρου, η παραπάνω σχέση δίνει για το στραγγιστήριο:

$$D_{15} > 3.5\text{mm}.$$

Κριτήριο Ομοιομορφίας

Η μέγιστη διάσταση D_{90} σχετίζεται με την ελάχιστη διάσταση D_{10} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 (ICOLD, 1994). Λαμβάνοντας $D_{10} = 20\text{mm}$, προκύπτει $D_{90} = 60\text{mm}$. Λαμβάνεται $D_{100} = 75\text{mm}$. Ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / D_{10}$) προκύπτει ίσος με 3 που είναι αποδεκτός. Το λεπτόκοκκο όριο της Ζώνης 2B προκύπτει από εφαρμογή συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερου από 6, στη δυσμενέστερη καμπύλη, δηλαδή για $D_{60A} = 60\text{mm}$ προκύπτει $D_{10A} = 10\text{mm}$.

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου που φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακα 4.5. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

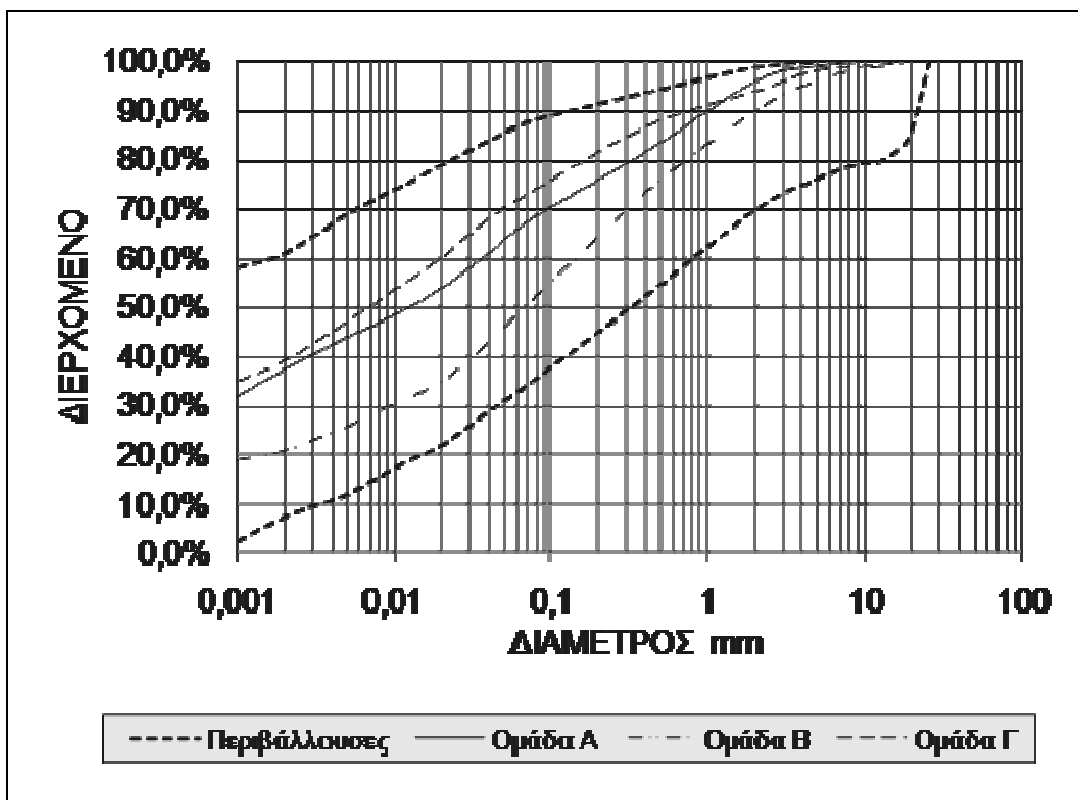
Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	100
2 ½ ίντσες	94 - 100
2 ίντσες	74 - 100
1 ½ ίντσα	50 - 100
1 ίντσα	22 - 70
¾ ίντσας	8 - 50
½ ίντσα	< 20
3/8 ίντσας	< 10
No 4	< 5

4.3. ΚΑΛΥΒΑ

(Στοιχεία για το φράγμα Καλυβά προέρχονται από τη Διεύθυνση Ελέγχου Κατασκευής έργων - ΔΕΚΕ)

4.3.1. Υλικό Πυρήνα

Από την περιοχή των δανειοθαλάμων υλικού πυρήνα, θεωρούνται κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1) υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο στο κόσκινο Νο200), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% κατά βάρος και κλάσμα διερχόμενο στο κόσκινο Νο4 μεγαλύτερο του 60%, θα ταξινομούνται στην ομάδα CL στο χάρτη πλασιμότητας και δεν θα περιέχουν οργανικές ουσίες. Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων σε δείγματα υλικού και οι περιβάλλουσες των κοκκομετρικών καμπυλών.



Εικόνα 4.6. Κοκκομετρικές καμπύλες πυρήνα (ζώνη 1)

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι το υλικό είναι καλά διαβαθμισμένο. Για λεπτόκοκκα υλικά που είναι καλά διαβαθμισμένα, όπως στην παρούσα περίπτωση και προορίζονται για πυρήνα φράγματος, είναι απαραίτητος, ο έλεγχος ικανότητας του υλικού να αυτοσυγκρατείται (να αυτοφιλτράρεται), δηλαδή ο έλεγχος ικανότητας του χονδρόκοκκου κλάσματος του υλικού να συγκρατεί το λεπτόκοκκο κλάσμα (ICOLD, 1994). Η αυτοσυγκράτηση του υλικού επιτυγχάνεται όταν:

$$d_{15\chi} < 5 * d_{85\lambda}$$

όπου οι δείκτες «χ» και «λ» αναφέρονται στο χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο κλάσμα, αντίστοιχα. Οι έλεγχοι των κοκκομετρικών καμπυλών έδειξαν ότι η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται, επομένως το υλικό κατασκευής του πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί ως αυτοσυγκρατούμενο.

Ανεξάρτητα από την παραπάνω θετική διαπίστωση, θεωρείται σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί φίλτρο (Ζώνη 2) στις παρειές του πυρήνα, για συγκράτηση των κόκκων του υλικού. Η μέγιστη διάσταση κόκκου που μπορεί να ενσωματωθεί στη Ζώνη 1 είναι 10cm.

4.3.2. Υλικό Φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η κοκκομετρική καμπύλη της κάτω περιβάλλουσας του υλικού πυρήνα (Εικόνα 4.6) δίνει ποσοστό διερχόμενο στο κόσκινο No200 περίπου 87% και σύμφωνα με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό στην Κατηγορία 1 της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, 1994, Πίνακας 3.2). Η κοκκομετρική καμπύλη των υλικών των Ομάδων Α, Β και Γ ανήκει στην Κατηγορία 2 της ίδιας ταξινόμησης. Συνεκτιμώντας τα διαθέσιμα στοιχεία, θεωρείται η καμπύλη της κάτω περιβάλλουσας για τον προσδιορισμό του φίλτρου, ως δυσμενέστερη. Επομένως λαμβάνεται:

$$D_{15} \leq 9 * d_{85} \Rightarrow D_{15} \leq 0.45\text{mm}.$$

Επιπλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 19\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων το κόσκινο No 200, μικρότερο από 10%.

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.07\text{mm}$ της άνω περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.03\text{mm}$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

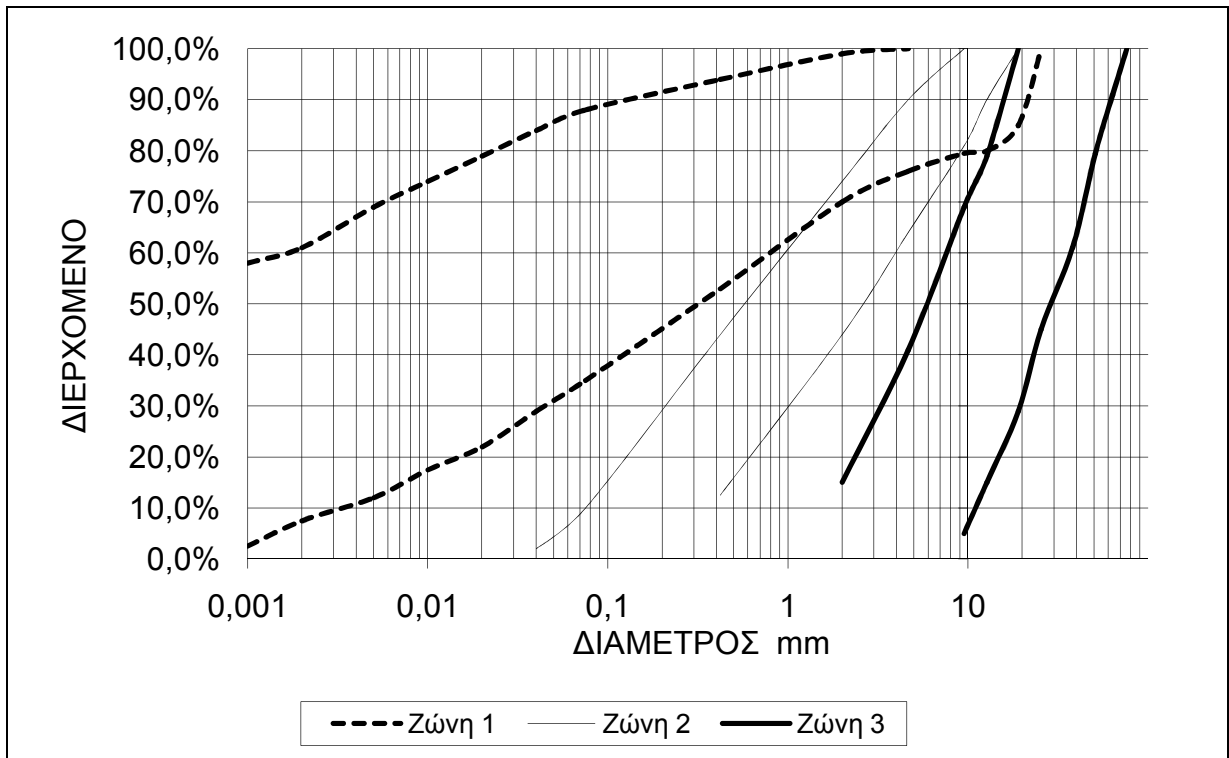
$$0.03\text{mm} < D_{15} \leq 0.45\text{mm}$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού του φίλτρου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 και στην Εικόνα 4.7.

Για την κοκκομετρική διαβάθμιση του φίλτρου προκύπτει συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού $C_u = 6 < 20$. Με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20 και μέγιστο κόκκο μικρότερο από 19mm, εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα διαχωρίζεται κατά την απόθεση και διάστρωσή του στο ανάχωμα του φράγματος.

Πίνακας 4.6. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3/4 ίντσας	100
1/2 ίντσας	86 - 100
3/8 ίντσας	80 - 100
No 4	63 - 90
No 10	43 - 73
No 40	12 - 43
No 100	0 - 22
No 200	< 10



Εικόνα 4.7. Περιβάλλουσες υλικού Ζώνης 1 (πυρήνα φράγματος) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού Ζώνης 2 (φίλτρου) και Ζώνης 3 (στραγγιστηρίου).

4.3.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό (Ζώνη 2) περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 10% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, 1994 - Πίνακας 3.2) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

Για το υλικό της Ζώνης 2, η διάσταση $d_{85} = 3.2\text{mm}$ και επομένως για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} \leq 12.8\text{mm}.$$

Επιπλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου $D_{100} = 76\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο No10: 0%.

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.45\text{mm}$ της άνω περιβάλλουσας της Ζώνης 2, η παραπάνω σχέση δίνει για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} > 2.0\text{mm}$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$2.0\text{mm} < D_{15} \leq 12.8\text{mm}.$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα παρακάτω όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του στραγγιστηρίου στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	100
1 ½ ίντσες	61 - 100
¾ ίντσας	29 - 100
½ ίντσα	15 - 78
¼ ίντσας	0 - 54
No 4	0 - 40
No 10	0 - 15

Επάρκεια Ζώνης Στραγγιστηρίου

Οι διαστάσεις της ζώνης στραγγιστηρίου τόσο στο κεκλιμένο αλλά κυρίως στο υπο-οριζόντιο τμήμα, σε συνδυασμό με τη διαπερατότητα του υλικού, πρέπει να είναι σε θέση

να παροχετεύσουν με ασφάλεια προς τα κατόντη το σύνολο των νερών που μπορεί να προέλθουν από τον πυρήνα του φράγματος (είτε από κανονική διήθηση είτε ως έκτακτες παροχές λόγω διασωλήνωσης του υλικού ή διαφορικών καθιζήσεων), από τη θεμελίωση του αναχώματος (αντερείσματα και κοίτη του ποταμού), μέσα από το διαφραγματικό τοίχο και τέλος από διείσδυση των νερών της βροχής στο κατόντη σώμα του φράγματος.

4.4. ΜΕΣΟΒΟΥΝΟ

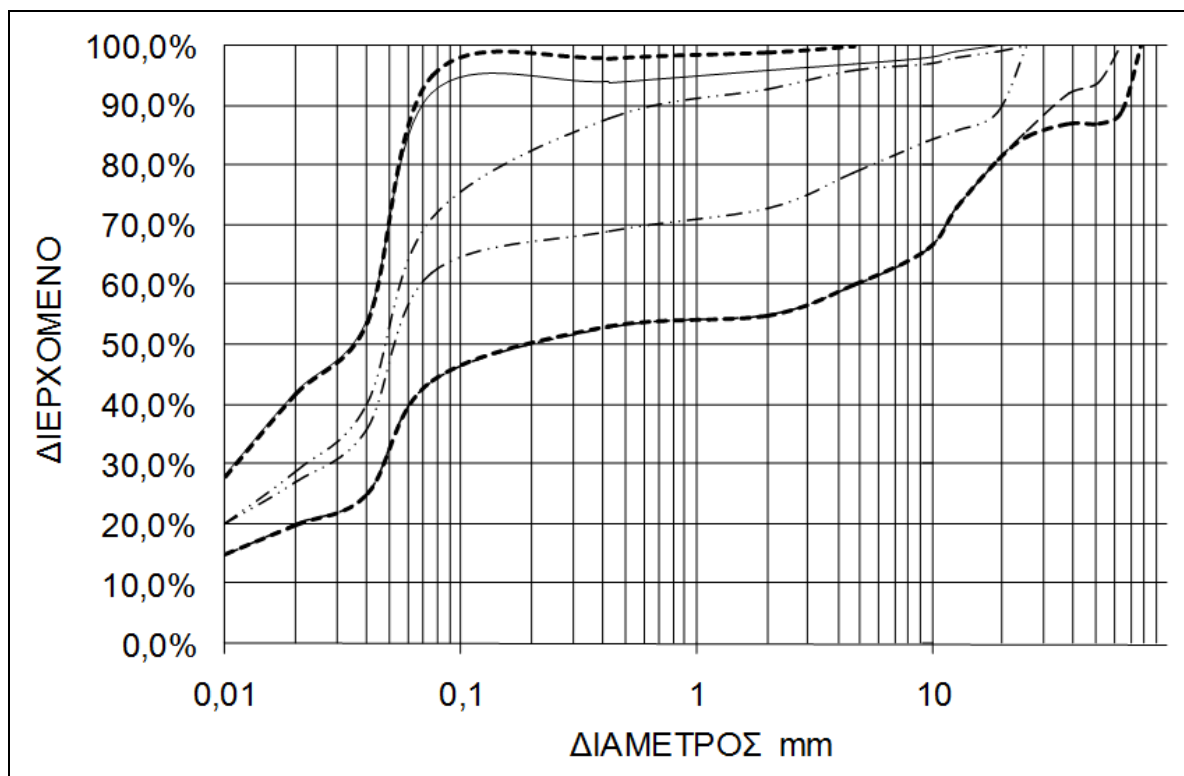
(Στοιχεία για το φράγμα Μεσόβουνου προέρχονται από τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Κοζάνης)

Το φράγμα Μεσόβουνου βρίσκεται σε υψόμετρο 1568.00m, στη Δυτική πλευρά του όρους Βέρμιο και σε απόσταση 5km Βόρειο - Ανατολικά του οικισμού Μεσόβουνου.

Το ανάχωμα του κυρίως φράγματος έχει καμπύλο άξονα με στέψη στα +1568.00m και με μήκος στέψης τα 187m. Το μέγιστο ύψος του από τη στάθμη του φυσικού εδάφους είναι 28.5m. και από το κατώτερο σημείο της θεμελίωσης του πυρήνα 34.5m. Το ανάχωμα του κυρίως φράγματος κατασκευάστηκε με κεκλιμένο αδιαπέρατο πυρήνα, τοποθετήθηκαν φίλτρα και στραγγιστήρια από θραυστά υλικά λατομείου και σώματα στήριξης από λιθορριπή.

4.4.1. Υλικό Πυρήνα

Από την περιοχή των δανειοθαλάμων υλικού πυρήνα, θεωρούνται κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1) υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο στο κόσκινο No200), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30% κατά βάρος και κλάσμα διερχόμενο στο κόσκινο No4 μεγαλύτερο του 60%, θα ταξινομούνται στην ομάδα CL στο χάρτη πλασιμότητας (Εικόνα 4.2) και δεν θα περιέχουν οργανικές ουσίες.



Εικόνα 4.8. Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών πυρήνα και καμπύλες δειγμάτων ομάδων

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, για την επίτευξη της αυτοσυγκράτησης του υλικού πρέπει $d_{15\chi} < 5 * d_{85\lambda}$. Το υλικό κατασκευής του πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί ως οριακά αυτοσυγκρατούμενο και επομένως θεωρείται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί φίλτρο (Ζώνη 2) στις παρειές του πυρήνα, για συγκράτηση των κόκκων του υλικού. Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης 2, κρίνεται σκόπιμο να γίνει με βάση την κάτω περιβάλλουσα του υλικού πυρήνα, και για το σύνολο του υλικού, δηλαδή χωρίς θεώρηση μόνο του κλάσματος του υλικού του διερχόμενου από το κόσκινο Νο4 (4.75mm).

Η μέγιστη διάσταση κόκκου που μπορεί να ενσωματωθεί στη Ζώνη 1 είναι 10cm.

4.4.2. Υλικό Φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η κοκκομετρική καμπύλη της κάτω περιβάλλουσας του υλικού πυρήνα δίνει ποσοστό διερχόμενο στο κόσκινο Νο200 περίπου 94% και σύμφωνα με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό ανήκει στην Κατηγορία 1 της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, 1994 - Πίνακας 3.2). Η κοκκομετρική καμπύλη των υλικών των Ομάδων 2, 3 και 4 ανήκει στην Κατηγορία 2 της ίδιας ταξινόμησης.

Συνεκτιμώντας τα διαθέσιμα στοιχεία, χρησιμοποιείται η καμπύλη της κάτω περιβάλλουσας, για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης του φίλτρου, ως δυσμενέστερη. Επομένως, για $d_{85} = 0.068$, λαμβάνεται:

$$D_{15} \leq 9 * d_{85} \Rightarrow D_{15} \leq 0.61\text{mm}.$$

Επιπλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 19\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο No200, μικρότερο από 3%.

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} < 0.01\text{mm}$, της άνω περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.05\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$0.05\text{mm} < D_{15} \leq 0.63\text{mm}$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, προκύπτουν τα παρακάτω όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού Ζώνης 2 και φαίνονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3/4 ίντσας	100
1/2 ίντσας	89 - 100
3/8 ίντσας	81 - 100
No 4	63 - 89
No 10	42 - 71
No 40	5 - 37
No 100	0 - 17
No 200	< 3

Για την παραπάνω κοκκομετρική διαβάθμιση του φίλτρου προκύπτει συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού $C_u = 6 < 20$. Με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20 και μέγιστο κόκκο μικρότερο από 19mm, εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα διαχωρίζεται κατά την απόθεση και διάστρωσή του στο ανάχωμα του φράγματος.

4.4.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό (Ζώνη 2) περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 3% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, 1994) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

Για το υλικό της Ζώνης 2, η διάσταση $d_{85} = 3.2\text{mm}$ και επομένως για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} \leq 12.8\text{mm}.$$

Επιπλέον, λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου $D_{100} = 76\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο No10: 0%

προκύπτουν τα παρακάτω όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης 3 και φαίνονται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

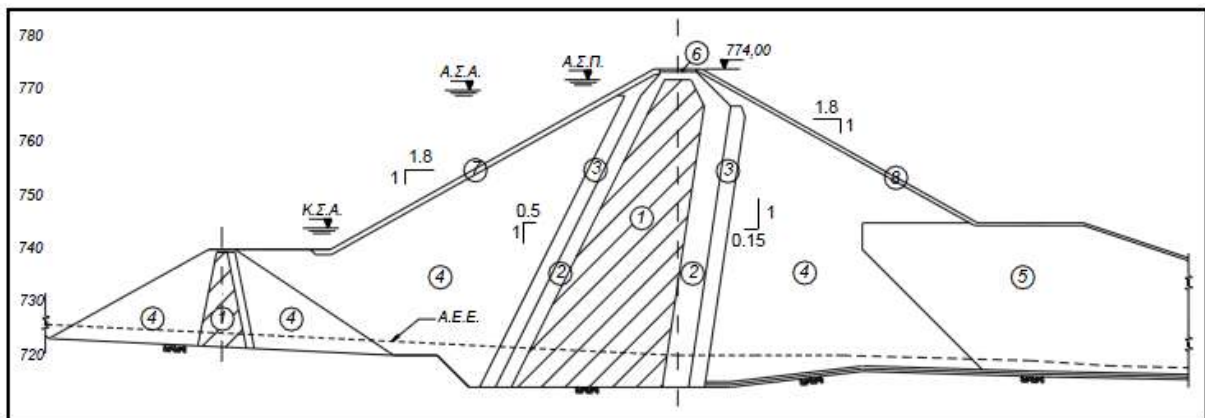
Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	100
1 ½ ίντσες	60 - 100
1 ίντσα	38 - 100
¾ ίντσας	22 - 100
½ ίντσα	4 - 80
¼ ίντσας	0 - 46
No 4	0 - 32
No 8	0

4.5. ΣΕΤΤΑ - ΜΑΝΙΚΙΑ

(Στοιχεία για το φράγμα Σέττα - Μανίκια προέρχονται από τη Διεύθυνση Ελέγχου Κατασκευής έργων - ΔΕΚΕ)

Το φράγμα Σέττα - Μανίκια βρίσκεται στο κεντρικό - ανατολικό τμήμα του Ν. Εύβοιας, περίπου 40km Β - ΒΒΑ του Δήμου Αμάρυνθου και βόρεια των οικισμών Κάτω Σέττα και Μανίκια.

Το φράγμα είναι λιθόρριπτο με κεκλιμένο πυρήνα, ύψους 60m από το βαθύτερο σημείο της θεμελίωσης του, ζώνες φίλτρων και στραγγιστηρίων σε αμφότερες τις παρειές, τον πυρήνα και τα κελύφη από προϊόντα εκσκαφών και υλικά λατομείου. Ο άξονας του προφράγματος, το οποίο έχει ύψος 20m βρίσκεται σε απόσταση 80m περίπου ανάντη του άξονα του φράγματος. Οι ζώνες προστασίας των εξωτερικών πρανών του αναχώματος σχηματίζονται με λίθους λατομείου κατάλληλων διαστάσεων. Τυπική διατομή του φράγματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10 και η περιγραφή των ζωνών δίνεται στον Πίνακα 4.10. Η στέψη του φράγματος διαμορφώνεται στο υψόμετρο 774m και κατά συνέπεια το όλο έργο βρίσκεται σε περιοχή χαμηλών χειμερινών θερμοκρασιών.



Εικόνα 4.10. Τυπική διατομή φράγματος Σέττα - Μανίκια (Πηγή: Μουτάφης, 2008)

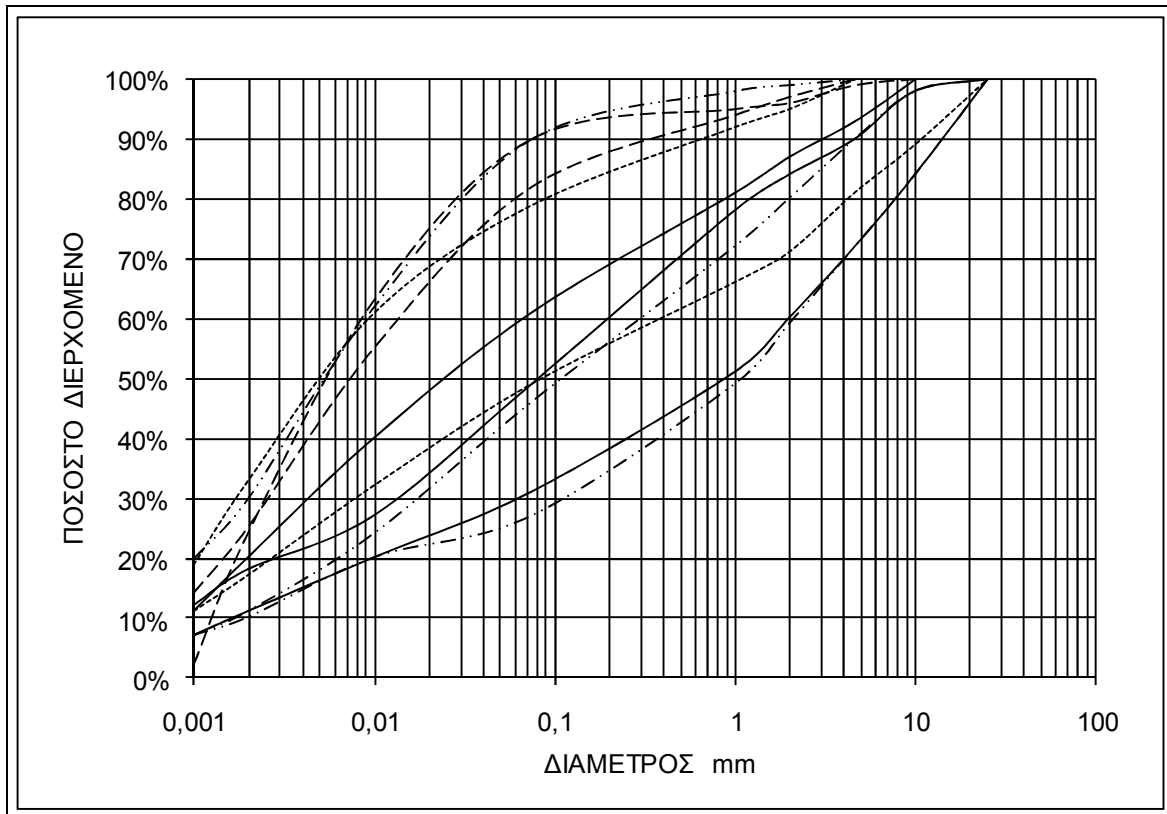
Πίνακας 4.10. Ζώνες φράγματος Σέττα - Μανίκια (Πηγή: Μουτάφης, 2008)

Ζώνες	Ζώνη	Υλικό	Πάχος στρώσης-[m]	Μέγιστη διάσταση-[m]
1	Πυρήνας	Λεπτόκοκκο	0.15	0.10
2	Φίλτρα	Διαβαθμισμένο	0.45	0.019
3	Στραγγιστήρια	Διαβαθμισμένο	0.45	0.076
4	Κελύφη	Λιθορριπή	1.00	1.00
5	Τμήμα κατάντη κελύφους	Προϊόντα εκσκαφών	1.00	0.35
6	Ζώνες οδοποιίας	Τ.Π. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.	-	-
7	Κυματοπροστασία	Λίθοι	-	0.5
8	Προστασία κατάντη πρηνούς	Λίθοι	-	0.2

4.5.1. Υλικό Πυρήνα

Κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1) θεωρούνται υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% κατά βάρος και τουλάχιστον 70% διερχομένα στο κόσκινο Νο 4.

Μερικά από τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων στα δείγματα υλικού, σχεδιάστηκαν σε ενιαίο διάγραμμα (Εικόνα 4.11), από το οποίο προκύπτουν και οι περιβάλλουσες των κοκκομετρικών καμπυλών.



Εικόνα 4.11. Κοκκομετρικές καμπύλες υλικού πυρήνα - Ζώνη 1

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι το υλικό είναι μέτρια έως καλά διαβαθμισμένο, ενώ παρατηρείται σημαντικό εύρος διακύμανσης των καμπυλών. Για λεπτόκοκκα υλικά που είναι καλά διαβαθμισμένα και προορίζονται για πυρήνα φράγματος, είναι απαραίτητος, ο έλεγχος ικανότητας του υλικού να αυτοσυγκρατείται. Η αυτοσυγκράτηση του υλικού επιτυγχάνεται όταν $d_{15\chi} < 5 * d_{85\lambda}$. Οι έλεγχοι των κοκκομετρικών καμπυλών, με διαχωρισμό του λεπτόκοκκου και χονδρόκοκκου κλάσματος στη διάσταση 1mm, έδειξαν ότι η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται μόνο κατά περίπτωση. Επομένως το υλικό κατασκευής του πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί ως μη αυτοσυγκρατούμενο και επομένως θεωρείται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί φίλτρο στις παρειές του πυρήνα, για συγκράτηση των κόκκων του υλικού.

Προβλέπεται ζώνη φίλτρου (Ζώνη 2) ανάντη και κατόντη του πυρήνα, με ποσοστό λεπτόκοκκων (κόσκινο Νο200) μικρότερο από 5%. Η επιλογή του ορίου 5% θεωρείται ικανοποιητική. Προτείνεται, όπως περιγράφεται παρακάτω, η επιλογή της 1 ίντσας (25mm) ως μέγιστη διάσταση κόκκου.

Η επιλογή των ορίων των επιτρεπτών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων της Ζώνης 2, θα γίνει με βάση τη δυσμενέστερη λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του υλικού πυρήνα, για το κριτήριο συγκράτησης του υλικού και με βάση την χονδροκοκκη περιβάλλουσα για το κριτήριο διαπερατότητας του υλικού.

4.5.2. Υλικό Φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η μελέτη του υλικού φίλτρου βασίζεται στις εργασίες του Sherard και τις σχετικές οδηγίες του US Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA - SCS), 1986, όπως περιγράφονται στη σχετική έκδοση της ICOLD (ICOLD, 1994).

Οι κοκκομετρικές καμπύλες των δειγμάτων υλικού πυρήνα (Εικόνα 4.10) δίνουν ποσοστό διερχόμενο στο κόσκινο No200 μεταξύ 25 και 95%, ενώ η μέγιστη διάσταση λίθου που μπορεί να ενσωματωθεί στον πυρήνα είναι 10cm.

Η μελέτη επάρκειας του φίλτρου βασίζεται στις τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες του προς συγκράτηση υλικού, που περιλαμβάνουν μόνον το ποσοστό το διερχόμενο από το κόσκινο No4. Στην παρούσα περίπτωση δεν είναι απαραίτητη αυτή η τροποποίηση των καμπυλών, εφόσον η λεπτόκοκκη περιβάλλουσα (στην οποία γίνεται ο έλεγχος συγκράτησης) βρίσκονται εξ ολοκλήρου κάτω από το όριο του κόσκινου No4 (4.65mm).

Σύμφωνα λοιπόν με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό ανήκει είτε στην Κατηγορία 1, όταν περιέχει λεπτόκοκκα διερχόμενα στο No200 περισσότερο από 85%, είτε στην Κατηγορία 2, όταν περιέχει λεπτόκοκκα διερχόμενα στο No200, μεταξύ 40 και 85 %, της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, Bulletin '95, 1994 - Πίνακας 3.2), που καθορίζει:

$$\text{Κατηγορία 1: } D_{15} \leq 9 * d_{85} \text{mm}$$

$$\text{Κατηγορία 2: } D_{15} \leq 0.7 \text{mm,}$$

Για την ακραία περίπτωση του $d_{85} = 0.045 \text{mm} \Rightarrow D_{15} \leq 0.4 \text{mm}$.

Λαμβάνεται $D_{15} \leq 0.5 \text{mm}$.

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

Για $d_{15} = 0.01\text{mm}$, της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.05\text{mm}.$$

Κριτήριο Ομοιομορφίας

Κατά την εκφόρτωση και διάστρωση του υλικού φίλτρου είναι απαραίτητο να αποφεύγεται ο διαχωρισμός του χονδρόκοκκου κλάσματος του υλικού. Η αποφυγή διαχωρισμού επιτυγχάνεται με την αποφυγή χρήσης φίλτρων από καλά διαβαθμισμένα υλικά, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / D_{10}$), να είναι κατά προτίμηση μικρότερος από 16 και οπωσδήποτε μικρότερος από 20.

Για την χονδρόκοκκη περιβάλλουσα: $D_{15} \leq 0.4\text{mm} \Rightarrow D_{10} \approx 0.30\text{mm} \Rightarrow D_{60} \leq 6\text{mm}$.

Λαμβάνεται $D_{60} = 5\text{mm}$.

Για την λεπτόκοκκη περιβάλλουσα: $D_5 \geq 0.076\text{mm} \Rightarrow D_{10} \approx 0.10\text{mm} \Rightarrow D_{60} \geq 2\text{mm}$.

Λαμβάνεται $D_{60} = 2\text{mm}$.

Επιπλέον η μέγιστη διάσταση D_{90} (για την χονδρόκοκκη περιβάλλουσα), σχετίζεται με την ελάχιστη διάσταση D_{10} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 (ICOLD, 1994).

Για $D_{10} < 0.4\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 20\text{mm}$.

Λαμβάνεται $D_{90} = 20\text{mm} \Rightarrow D_{100} = 25\text{mm}$

Κριτήριο Κατάρρευσης

Το υλικό φίλτρου απαιτείται να έχει ουσιαστικά μηδενική συνοχή, ώστε όταν βρίσκεται βυθισμένο και υποστεί ρηγμάτωση, το υλικό να καταρρέει και να μην συγκρατεί ανοιχτή τη ρωγμή. Εργαστηριακές δοκιμές έχουν δείξει ότι αυτό επιτυγχάνεται όταν το λεπτόκοκκο κλάσμα του υλικού (διερχόμενο στο κόσκινο No 200) είναι μικρότερο από 5 %.

Κριτήριο Συγκόλλησης

Δεν υπάρχουν ενδείξεις υψηλών ποσοτήτων αλάτων στο νερό του ποταμού που να υποβοηθά τη συγκόλληση των κόκκων του διαβαθμισμένου υλικού φίλτρου.

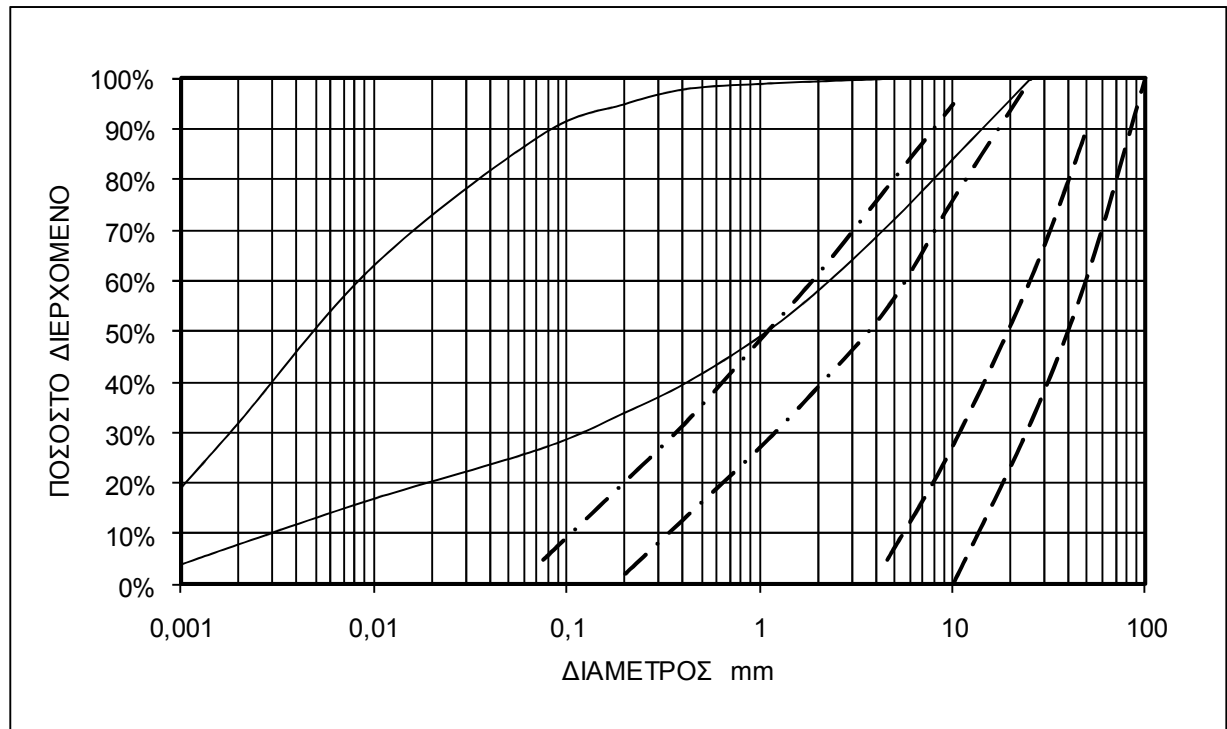
Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} ($0.06\text{mm} < D_{15} \leq 0.4\text{mm}$) και τις απαιτήσεις για αποφυγή διαχωρισμού (διαβάθμιση του υλικού με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20), το ποσοστό λεπτόκοκκων μικρότερο του 5 % και τη μέγιστη κόκκου 25mm, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού Ζώνης 2 που δίνονται στον Πίνακα 4.11 και στην Εικόνα 4.12.

Το υλικό του φίλτρου θα πρέπει κατά την εκφόρτωση και διάστρωσή του να είναι ελαφρά υγρό, ώστε να μειώνεται η τάση διαχωρισμού.

Πίνακας 4.11. Όρια διακύμανσης κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκιο	Ποσοστό Διερχόμενο %
1 ίντσα	100
3/4 ίντσας	90 - 100
1/2 ίντσας	80 - 100
3/8 ίντσας	76 - 95
No 4	55 - 78
No 10	39 - 62
No 40	13 - 32
No 200	< 5



Εικόνα 4.12. Περιβάλλουσες υλικού πυρήνα φράγματος και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού ζώνης φίλτρου και στραγγιστηρίου

4.5.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό φίλτρου (Ζώνη 2) περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 5% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, 1994 - Πίνακας 3.2) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4.

Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

όπου 'D' αναφέρεται στο στραγγιστήριο και 'd' στο προς συγκράτηση υλικό του φίλτρου.

Για το λεπτόκοκκο όριο της Ζώνης 2, η διάσταση $d_{85} = 6.5\text{mm}$ και επομένως για τη ζώνη στραγγιστηρίου (Ζώνη D):

$$D_{15} \leq 26\text{mm}.$$

Επί πλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 100\text{mm}$.

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.4\text{mm}$ της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας της Ζώνης 2, η παραπάνω σχέση δίνει για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} > 2\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$2\text{mm} < D_{15} \leq 26\text{mm}.$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του στραγγιστηρίου (Ζώνη 3) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
4 ίντσες (101mm)	100
3 ίντσες (76mm)	86 - 100
2 ½ ίντσες (63.5mm)	73 - 100
2 ίντσες (51mm)	61 - 100
1 ½ ίντσα (38mm)	48 - 78
1 ίντσα (25mm)	33 - 58
¾ ίντσας (19mm)	22 - 49
½ ίντσα (12mm)	3 - 30
3/8 ίντσας (9.5mm)	0 - 27
No 4 (4.65mm)	< 5

Ανθεκτικότητα Υλικών Φίλτρου και Στραγγιστηρίου

Τα υλικά του φίλτρου και του στραγγιστηρίου πρέπει να αποτελούνται από σκληρούς, ανθεκτικούς και υγιείς κόκκους θραυσμένου βράχου. Ο έλεγχος καταλληλότητας των υλικών θα γίνεται με τις τυποποιημένες Δοκιμές Εκτριβής (Los Angeles) και Δοκιμές Υγείας. Κατά τη Δοκιμή Εκτριβής η φθορά του υλικού πρέπει να είναι μικρότερη από 40%, ενώ κατά τη Δοκιμή Υγείας η φθορά πρέπει να είναι μικρότερη από 14% για το κλάσμα του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No 4.

Επάρκεια Ζώνης Στραγγιστηρίου

Οι διαστάσεις της ζώνης στραγγιστηρίου τόσο στο κεκλιμένο αλλά κυρίως στο υπο-οριζόντιο τμήμα του κατάντη κελύφους, σε συνδυασμό με τη διαπερατότητα του υλικού της ζώνης, πρέπει να είναι σε θέση να παροχετεύσουν με ασφάλεια προς τα κατάντη το σύνολο των νερών που μπορεί να προέλθουν από τον πυρήνα του φράγματος, από τη θεμελίωση του αναχώματος (αντερείσματα και κοίτη του ποταμού), μέσα από το πέτασμα τσιμεντενέσεων και τέλος από διείσδυση των νερών της βροχής στο κατάντη κέλυφος.

Λαμβάνεται πλάτος στραγγιστήριου στην κοίτη: 20m.

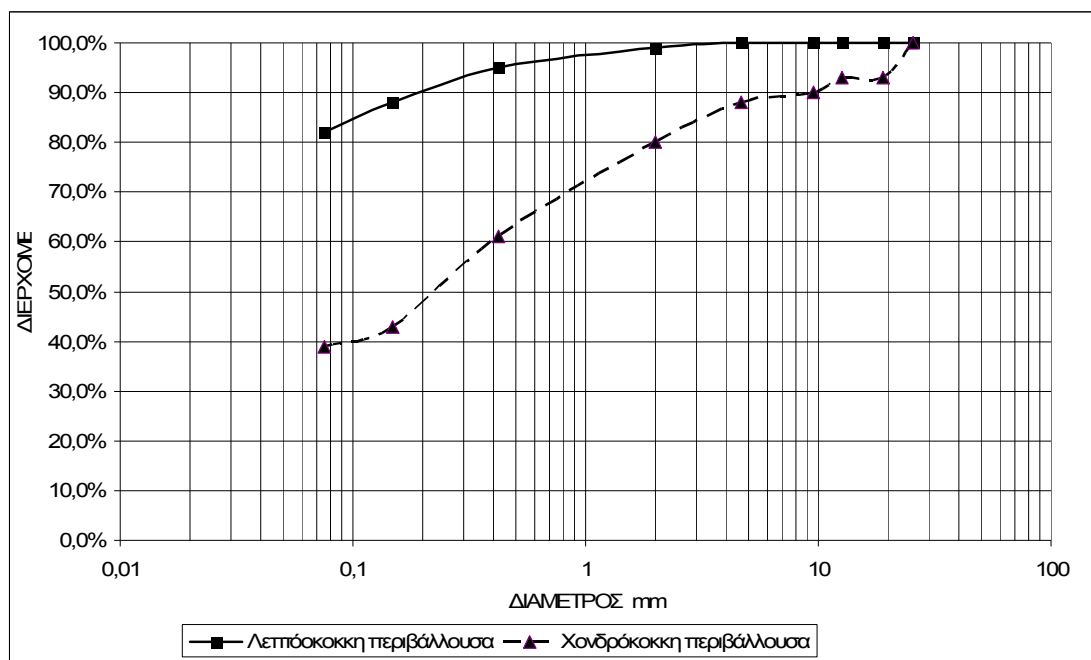
4.6. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑ

(Στοιχεία για το φράγμα της Τριανταφυλλιάς προέρχονται από τη Νομαρχία Φλώρινας)

Το φράγμα της Τριανταφυλλιάς βρίσκεται στο νομό Φλώρινας.

4.6.1. Υλικό Πυρήνα

Κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος (Ζώνη 1) θεωρούνται υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο στο κόσκινο No 200), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% κατά βάρος, κλάσμα διερχόμενο στο κόσκινο No. 4 μεγαλύτερο του 60% και ταξινομούνται στις κατηγορίες CL, SC ή SM στο χάρτη πλαστικότητας.



Εικόνα 4.13. Περιβάλλουσες κοκκομετρικών καμπυλών υλικού πυρήνα

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι το υλικό είναι καλά διαβαθμισμένο.

4.6.2. Υλικό Φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η μελέτη του υλικού φίλτρου (Ζώνη 2) βασίζεται στις εργασίες του Sherard και τις σχετικές οδηγίες του US Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA - SCS), 1986, όπως περιγράφονται στη σχετική έκδοση της ICOLD (ICOLD, 1994). Το βασικό σκεπτικό είναι η χονδρόκοκκη περιβάλλουσα του φίλτρου να μην απέχει πολύ από τη λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του πυρήνα. Εκτεταμένες έρευνες έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ της d_{85} (του πυρήνα) και της D_{15} (του φίλτρου) είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της μέγιστης 'απόστασης' μεταξύ των δύο περιβαλλουσών.

Το ποσοστό λεπτόκοκκων (<No200) στον πυρήνα κυμαίνεται ομοιόμορφα μεταξύ 40 και 80% και σύμφωνα λοιπόν με τα κριτήρια φίλτρων USDA - SCS (ICOLD, Bulletin '95, 1994 - Πίνακας 3.2) το προς συγκράτηση υλικό ανήκει στην Κατηγορία 2 της ταξινόμησης, που καθορίζει:

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

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} < 0.01\text{mm}$, της άνω περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.05\text{mm}.$$

Κριτήριο Ομοιομορφίας

Κατά την εκφόρτωση και διάστρωση του υλικού φίλτρου είναι απαραίτητο να αποφεύγεται ο διαχωρισμός του χονδροκόκκου κλάσματος του υλικού. Η αποφυγή διαχωρισμού επιτυγχάνεται με την αποφυγή χρήσης φίλτρων από καλά διαβαθμισμένα υλικά, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / d_{10}$), να είναι κατά προτίμηση μικρότερος από 6 και οπωσδήποτε μικρότερος από 20.

Επιπλέον η μέγιστη διάσταση D_{90} σχετίζεται με την ελάχιστη διάσταση D_{10} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2, ICOLD, Bulletin '95, 1994.

Για $D_{10} < 0.5\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 20\text{mm}$ και κατά συνέπεια μπορεί να ληφθεί $D_{100} \leq 25\text{mm}$.

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

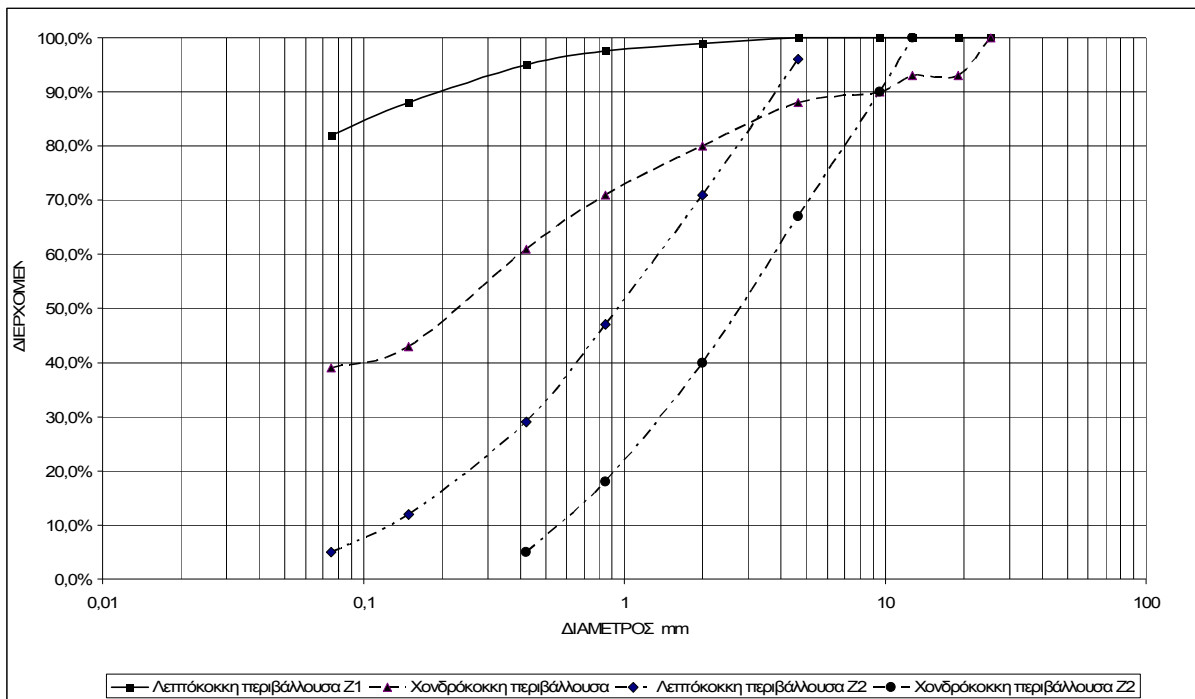
Λαμβάνοντας υπόψη για τη διάσταση D_{15} τον περιορισμό:

$$0.05\text{mm} < D_{15} \leq 0.07\text{mm}$$

και τις απαιτήσεις για αποφυγή διαχωρισμού (διαβάθμιση του υλικού με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20), προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού Ζώνης 2 που δίνονται στον Πίνακα 4.13 και Εικόνα 4.14.

Πίνακας 4.13. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
½ ίντσα	100
3/8 ίντσας	90 - 100
No 4	67 - 96
No 10	40 - 71
No 40	5 - 29
No 100	0 - 12
No 200	≤ 5



Εικόνα 4.14. Όρια κοκκομετρικών καμπυλών Ζώνης 2 - Φίλτρο

Για την προτεινόμενη κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού φίλτρου προκύπτει συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού για την χονδρόκοκκη περιβάλλουσα $C_u = 6.8$ και για την λεπτόκοκκη περιβάλλουσα $C_u = 8$. Ενδιάμεση καμπύλη με $D_{10} \approx 0.12$ και $D_{60} \approx 2.5$ δίνει

συντελεστή ομοιομορφίας περί το 20, που είναι αποδεκτός. Με τους περιορισμούς αυτούς εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα διαχωρίζεται κατά την απόθεση και διάστρωσή του στο ανάχωμα του φράγματος.

4.6.3. Υλικά στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό φίλτρου (Ζώνη 2) περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 5% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, Bulletin '95, 1994 - Πίνακας 3.2) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4. Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

Για το υλικό της Ζώνης 2, η διάσταση $d_{85} = 3.1\text{mm}$ και επομένως για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} \leq 12.4\text{mm}.$$

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.7\text{mm}$ της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας της Ζώνης 2, η παραπάνω σχέση δίνει για τη Ζώνη 3:

$$D_{15} > 3.5\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

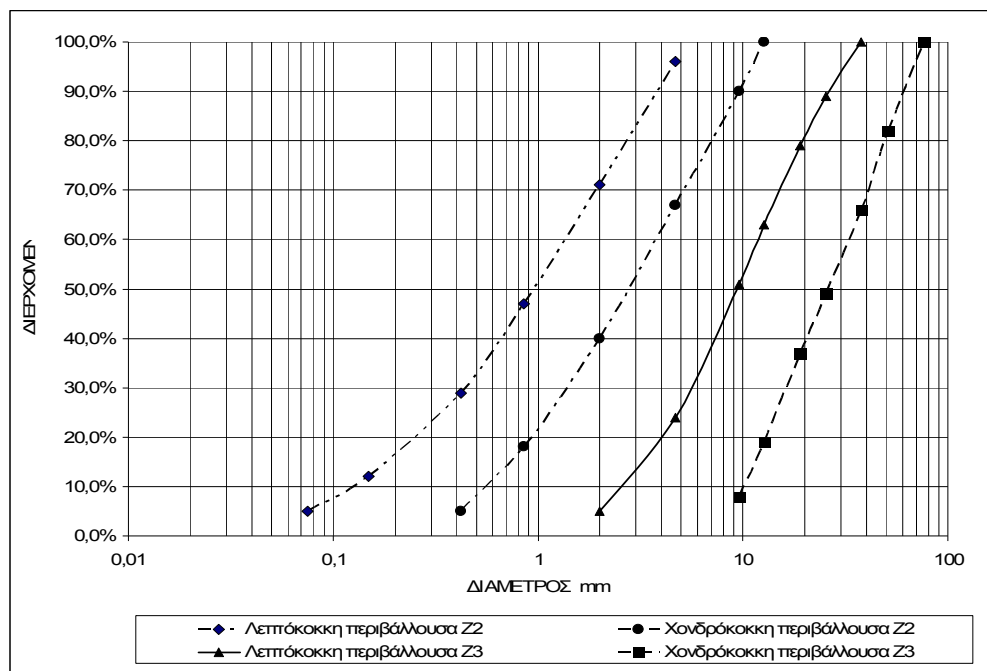
Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$3.5\text{mm} < D_{15} \leq 12.4\text{mm}.$$

Και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 6, προκύπτουν τα παρακάτω όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του στραγγιστηρίου (Ζώνη 3), που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14 και Εικόνα 4.15.

Πίνακας 4.14. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	100
2 ίντσες	82 - 100%
1 ½ ίντσα	66 - 100%
1 ίντσα	49 - 89%
¾ ίντσας	37 - 79%
½ ίντσα	19 - 63%
3/8 ίντσας	8 - 51%
No 4	< 24%
No 10	< 5%



Εικόνα 4.15. Διάγραμμα περιβαλλουσών Ζωνών 2 και 3

4.7. ΦΑΝΕΡΩΜΕΝΗ

(Στοιχεία για το φράγμα της Φανερωμένης προέρχονται από την Περιφέρεια Κρήτης)

Το φράγμα Φανερωμένης Κρήτης κατασκευάστηκε στην ομώνυμη περιοχή στο νομό Ηρακλείου στην Κρήτη.

4.7.1. Υλικό Πυρήνα

Κατάλληλα για τοποθέτηση στον πυρήνα του φράγματος θεωρούνται υλικά που περιέχουν λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο στο κόσκινο Νο 200 - 0.075mm), σε ποσοστό μεγαλύτερο του 40% κατά βάρος.

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι το υλικό είναι καλά διαβαθμισμένο. Για λεπτόκοκκα υλικά που είναι καλά διαβαθμισμένα (όπως στην παρούσα περίπτωση) και προορίζονται για πυρήνα φράγματος, είναι απαραίτητος, ο έλεγχος ικανότητας του υλικού να αυτοσυγκρατείται, δηλαδή ο έλεγχος της συνθήκης $d_{15\chi} < 5 * d_{85\lambda}$.

Οι έλεγχοι των κοκκομετρικών καμπυλών, με διαχωρισμό του λεπτόκοκκου και χονδροκόκκου κλάσματος στη διάσταση 1mm, έδειξαν ότι η παραπάνω συνθήκη δεν ικανοποιείται. Επομένως το υλικό κατασκευής του πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί ως μη αυτοσυγκρατούμενο και επομένως θεωρείται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί φίλτρο στις παρειές του πυρήνα, για συγκράτηση των κόκκων του υλικού.

Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης του φίλτρου, θα γίνει με βάση την δυσμενέστερη λεπτόκοκκη περιβάλλουσα του υλικού πυρήνα, για το κριτήριο συγκράτησης του υλικού και με βάση την χονδροκόκκη περιβάλλουσα για το κριτήριο διαπερατότητας του υλικού. Οι τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες περιβαλλουσών υλικού πυρήνα φαίνονται στην Εικόνα 4.16.

4.7.2. Υλικό Φίλτρου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Η μελέτη του υλικού φίλτρου βασίζεται στις εργασίες του Sherard και τις σχετικές οδηγίες του US Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA - SCS), 1986, όπως περιγράφονται στη σχετική έκδοση της ICOLD (ICOLD, 1994).

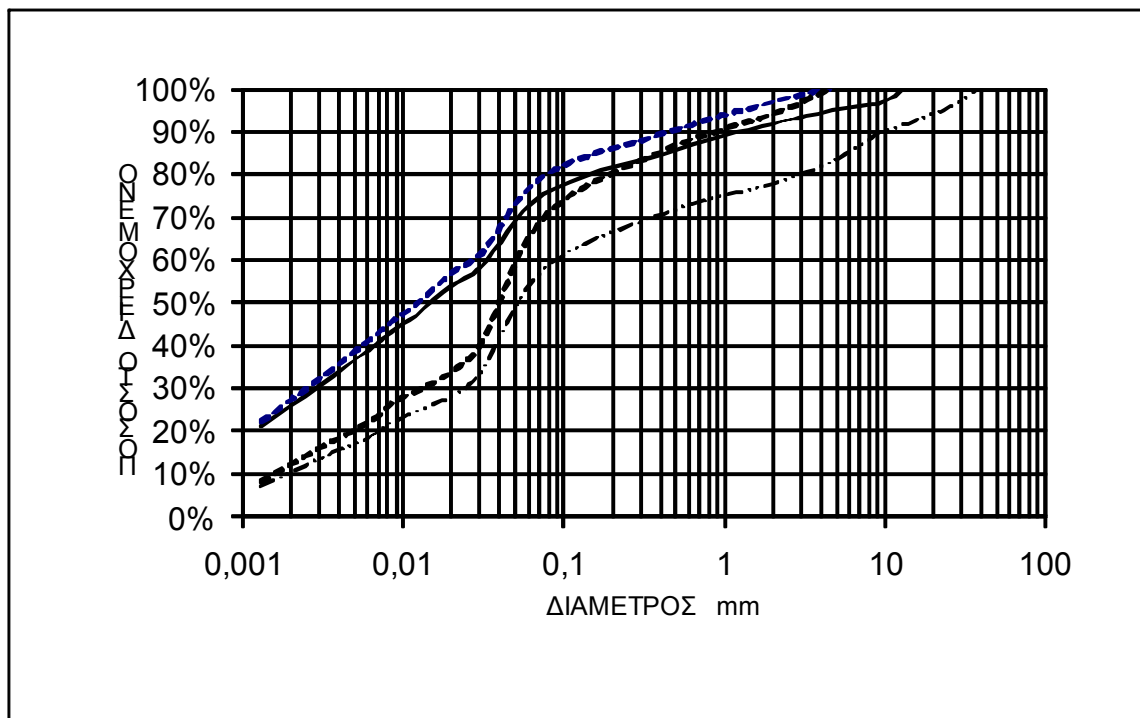
Οι κοκκομετρικές καμπύλες των δειγμάτων υλικού πυρήνα δίνουν ποσοστό διερχόμενο στο κόσκινο Νο200 μεταξύ 50 και 75%, ενώ η μέγιστη διάσταση λίθου που μπορεί να ενσωματωθεί στον πυρήνα είναι 10cm.

Η μελέτη επάρκειας του φίλτρου βασίζεται στις τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες του προς συγκράτηση υλικού (Εικόνα 4.16), που περιλαμβάνουν μόνον το ποσοστό το διερχόμενο από το κόσκινο Νο4. Για τις καμπύλες αυτές το ποσοστό των λεπτόκοκκων κυμαίνεται μεταξύ 60% και 80%.

Σύμφωνα λοιπόν με τα κριτήρια φίλτρων, το προς συγκράτηση υλικό ανήκει στην Κατηγορία 2 της ταξινόμησης USDA - SCS (ICOLD, Bulletin '95, 1994 - Πίνακας 3.2), που καθορίζει:

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

Επιπλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 19\text{mm}$ και ποσοστό διερχομένων το κόσκινο Νο 200, μικρότερο από 5%.



Εικόνα 4.16. Τροποποιημένες κοκκομετρικές καμπύλες περιβαλλουσών υλικού πυρήνα

Κριτήριο Διαπερατότητας

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

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

όπου 'D' αναφέρεται στο φίλτρο και 'd' στο προς συγκράτηση υλικό του πυρήνα.

Για $d_{15} < 0.004\text{mm}$, της χονδρόκοκκης περιβάλλουσας του προς συγκράτηση υλικού, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 0.02\text{mm}.$$

Κριτήριο Ομοιομορφίας

Κατά την εκφόρτωση και διάστρωση του υλικού φίλτρου είναι απαραίτητο να αποφεύγεται ο διαχωρισμός του χονδρόκοκκου κλάσματος του υλικού. Η αποφυγή διαχωρισμού επιτυγχάνεται με την αποφυγή χρήσης φίλτρων από καλά διαβαθμισμένα υλικά, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας ($C_u = D_{60} / d_{10}$), να είναι κατά προτίμηση μικρότερος από 6 και οπωσδήποτε μικρότερος από 20.

Επιπλέον η μέγιστη διάσταση D_{90} σχετίζεται με την ελάχιστη διάσταση D_{10} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 (ICOLD, 1994).

Για $D_{10} < 0.6\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 20\text{mm}$, ενώ για $0.5 < D_{10} < 1.0\text{mm} \Rightarrow D_{90} \leq 25\text{mm}$.

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Υλικού Φίλτρου

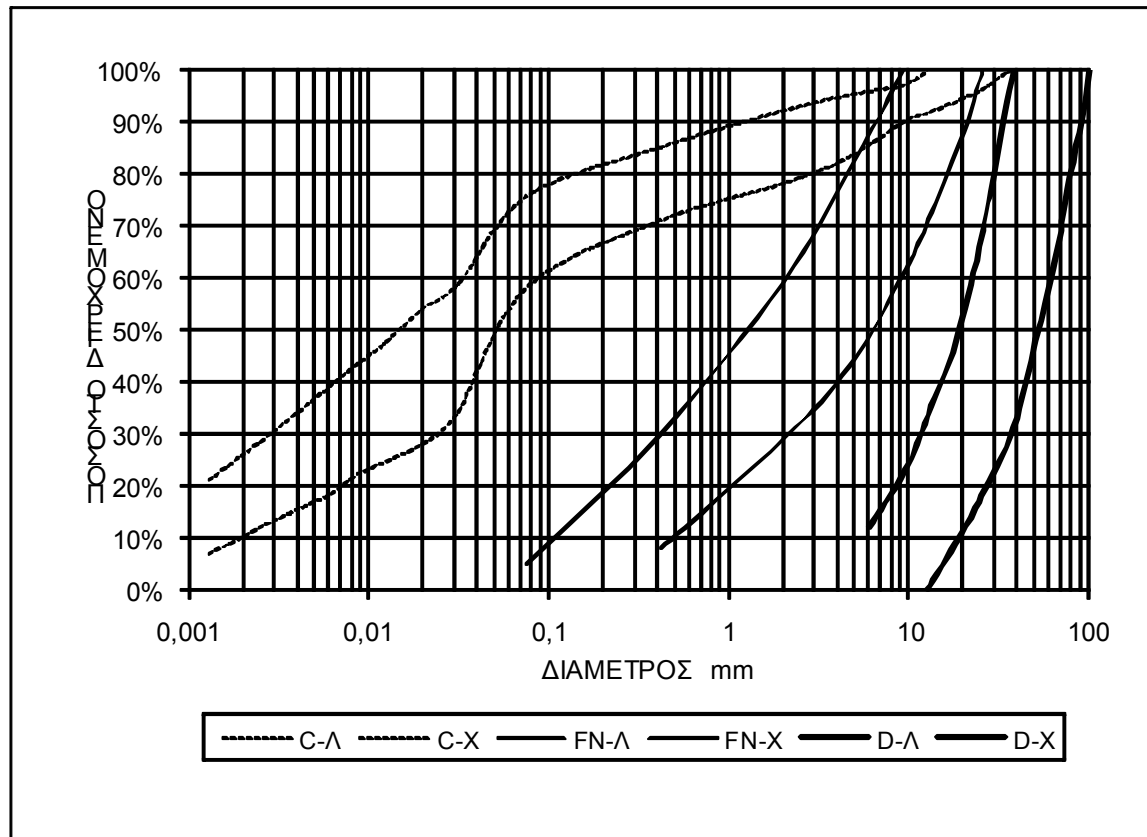
Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} ($0.02\text{mm} < D_{15} \leq 0.7\text{mm}$) και τις απαιτήσεις για αποφυγή διαχωρισμού (διαβάθμιση του υλικού με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20), προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού Ζώνης 3 που δίνονται στον Πίνακα 4.15 και Εικόνα 4.16.

Πίνακας 4.15. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
1 ίντσα	100
3/4 ίντσας	86 - 100
1/2 ίντσας	71 - 100
3/8 ίντσας	61.5 - 100
No 4	43 - 85
No 10	29 - 59
No 40	8 - 30
No 200	< 5

Για την προτεινόμενη κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού φίλτρου προκύπτει συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού για την χονδρόκοκκη περιβάλλουσα $C_u = 18$ και για την λεπτόκοκκη περιβάλλουσα $C_u = 20$. Με συντελεστή ομοιομορφίας μικρότερο από 20 και μέγιστο κόκκο μικρότερο από 25mm, εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα διαχωρίζεται κατά την εκφόρτωση και διάστρωσή του στο ανάχωμα του φράγματος.

Επί πλέον το υλικό πρέπει να είναι ελαφρά υγρό, ώστε να μειώνεται η τάση διαχωρισμού κατά την εκφόρτωση και διάστρωση.



Εικόνα 4.17. Περιβάλλουσες υλικού πυρήνα φράγματος (C) και όρια διακύμανσης κοκκομετρικών καμπυλών, υλικού ζώνης φίλτρου (FN) και στραγγιστηρίου (D)

4.7.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Κριτήριο Συγκράτησης Υλικού

Το προς συγκράτηση υλικό φίλτρου περιέχει λεπτόκοκκα σε ποσοστό μικρότερο από 5% και επομένως σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης του USDA - SCS (ICOLD, Bulletin '95, 1994 - Πίνακας 3.2) για φίλτρα, ανήκει στην Κατηγορία 4.

Για την κατηγορία αυτή το κριτήριο συγκράτησης του υλικού είναι:

$$D_{15} \leq 4 * d_{85}$$

όπου 'D' αναφέρεται στο στραγγιστήριο και 'd' στο προς συγκράτηση υλικό του φίλτρου.

Για το λεπτόκοκκο όριο της Ζώνης FN, η διάσταση $d_{85} = 5.5\text{mm}$ και επομένως για τη ζώνη στραγγιστηρίου:

$$D_{15} \leq 22\text{mm}.$$

Επί πλέον λαμβάνεται μέγιστη διάσταση κόκκου: $D_{100} = 101\text{mm}$.

Κριτήριο Διαπερατότητας

Το κριτήριο διαπερατότητας κατά Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$D_{15} / d_{15} > 4 \text{ ή } 5$$

και για $d_{15} = 0.7\text{mm}$ της χονδροκόκκης περιβάλλουσας της Ζώνης D, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$D_{15} > 3.5\text{mm}.$$

Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στραγγιστηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς για τη διάσταση D_{15} :

$$3.5\text{mm} < D_{15} \leq 22\text{mm}$$

και τη βασική απαίτηση για καλά διαβαθμισμένο υλικό μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου κόκκου, ώστε ο συντελεστής ομοιομορφίας (D_{60} / D_{10}) να είναι μικρότερος από 20, προκύπτουν τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ζώνης 4 που δείχνονται στον Πίνακα 4.16. Δεν υπάρχει περιορισμός στη διαβάθμιση του υλικού, κάτω από το No4.

Πίνακας 4.16. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστήριου

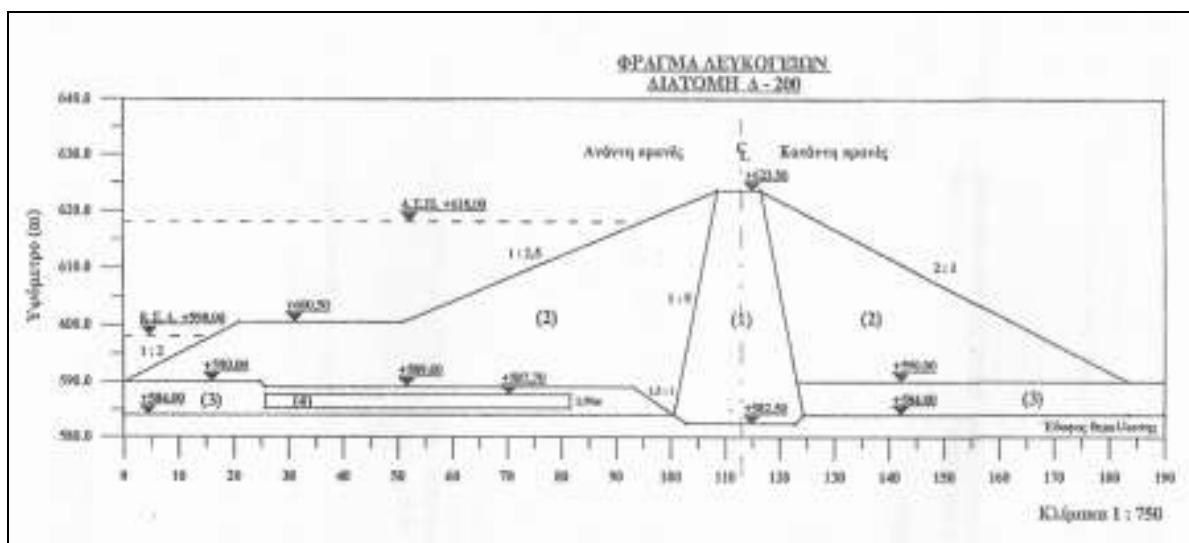
Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
4 ίντσες	100
3 ίντσες	77 - 100
2 ½ ίντσες	62 - 100
2 ίντσες	48 - 100
1 ½ ίντσα	31 - 100
1 ίντσα	18 - 69
¾ ίντσας	10 - 50
½ ίντσα	< 33
3/8 ίντσας	< 24
No 4	< 10

Λαμβάνεται πλάτος στραγγιστήριου στην κοίτη: 25m.

4.8. ΛΕΥΚΟΓΕΙΩΝ

(Στοιχεία για το φράγμα Λευκογείων προέρχονται από το Υπουργείο αγροτικής ανάπτυξης και τροφίμων)

Το φράγμα Λευκογείων βρίσκεται στο Νομό Δράμας. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα με κεντρικό αργιλικό πυρήνα, έχει ύψος 41m, μήκος στέψης 563m και πλάτος στέψης 8m. Οι εξωτερικές κλίσεις των πρανών είναι 2.5:1 ανάντη και 2:1 κατόντη.



Εικόνα 4.18. Τυπική διατομή φράγματος Λευκογείων
(Πηγή: Υπουργείο αγροτικής ανάπτυξης και τροφίμων, 1986)

Πίνακας 4.17. Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Λευκογείων

Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
2	Κελύφη
3	Φίλτρο
4	Στραγγιστήριο

4.8.1. Υλικό Πυρήνα

Για την κατασκευή του πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν 4 ομάδες υλικών τα οποία αναμίχθηκαν. Οι 4 ομάδες υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.18.

Πίνακας 4.18. Υλικά πυρήνα

Ομάδα 1	Αμμώδης ισχνή άργιλος με αμμοχάλικο
Ομάδα 2	Αμμώδης ισχνή άργιλος με λίγα χαλίκια
Ομάδα 3	Αμμώδης ισχνή άργιλος χωρίς χαλίκια
Ομάδα 4	Αμμώδης ιλύς

Ο όγκος των υλικών που προέκυψαν ήταν περίπου 230.000m³.

Τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου των υλικών είχαν ως εξής, το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι 10cm και το ποσοστό υλικού διερχόμενο από κόσκινο Νο200, είναι 47.8%.

4.8.2. Υλικό Φίλτρου

Οι ζώνες των φίλτρων κατασκευάστηκαν από φυσικό αμμοχάλικο ποταμού, το οποίο σύμφωνα με τη μελέτη του φράγματος έπρεπε να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Πίνακας 4.19. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3/4 ίντσας	75 - 100
3/8 ίντσας	56 - 90
No 4	44 - 70
No 10	32 - 55
No 20	20 - 42
No 40	13 - 32
No 100	3 - 20
No 200	0 - 12

Επίσης η μελέτη προέβλεπε τη διάστρωση της Ζώνης 3 (φίλτρα) με μέγιστο πάχος στρώσης 30cm και χωρίς ιδιαίτερη συμπύκνωση, η απαίτηση ήταν για μία διέλευση του συμπυκνωτικού μηχανήματος.

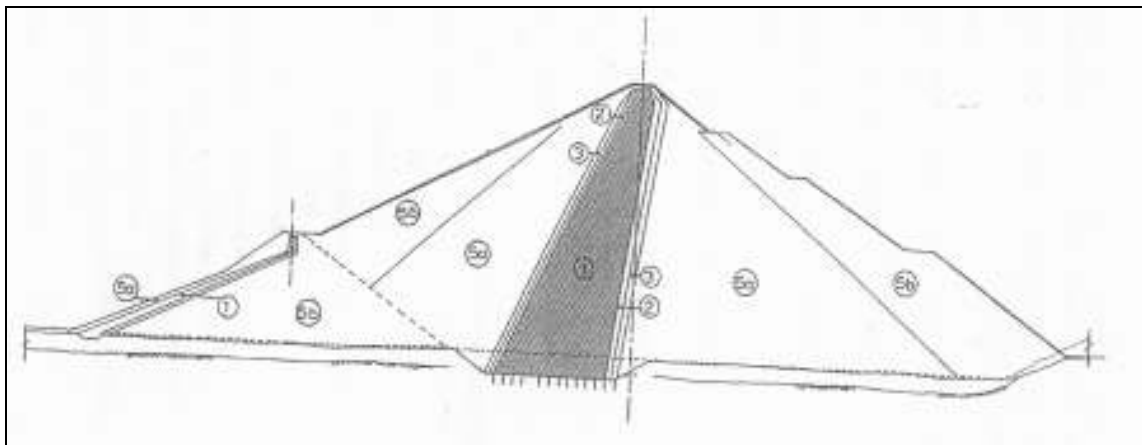
4.8.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Το υλικό του σταγγιστηρίου είναι ιλυοάργιλος. Η Ζώνη 4 (στραγγιστήριο) είναι τοποθετημένη μέσα στο ανάντη οριζόντιο φίλτρο. Ο συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού για το στραγγιστήριο είναι $C_u = 30 \text{ kN/m}^2$.

4.9. ΘΗΣΑΥΡΟΣ

(Στοιχεία για το φράγμα του Θησαυρού προέρχονται από τη Δ.Ε.Η.)

Το φράγμα του Θησαυρού βρίσκεται στο Ν. Δράμας 25km βορειοδυτικά του Παρανεστίου Δράμας. Αποτελεί ένα λιθόριπτο φράγμα με αδιαπέρατο κεντρικό, κεκλιμένο πυρήνα. Έχει ύψος 172m και μήκος στέψης 520m.



Εικόνα 4.19. Τυπική διατομή φράγματος Θησαυρού (Πηγή: ΔΕΗ, 1993)

Πίνακας 4.20. Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Θησαυρού

Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
1α	Τμήμα ζώνης 1 σε επαφή με τη βραχώδη επιφάνεια
2	Φίλτρο από λεπτόκοκκο υλικό
3	Φίλτρο από τραχείς κόκκους (στραγγιστήριο)
5α	Εσωτερική ζώνη υποστήριξης
5b	Εξωτερική ζώνη υποστήριξης

4.9.1. Υλικό Πυρήνα

Οι ζώνες 1 και 1α αποτελούν τον πυρήνα του φράγματος. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για να προσδιοριστεί εάν η διαβάθμιση του υλικού, η περιεχόμενη υγρασία και το ποσοστό

συμπύκνωσης είναι σε συμφωνία με τις τεχνικές προδιαγραφές. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στις ζώνες αυτές έδειξαν ποσοστό διερχόμενο από το Νο4 ίσο με 89% και ποσοστό διερχόμενο από το Νο200 ίσο με 37%. Μέγιστη διάσταση κόκκου 15cm.

4.9.2. Υλικό Φίλτρου

Η κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα για να προσδιοριστεί η διαβάθμιση του υλικού της ζώνης αυτής πρέπει να συμφωνεί με τις παρακάτω προδιαγραφές.

Πίνακας 4.21. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
1 ½ ίντσας	100
3/4 ίντσας	78 - 100
3/8 ίντσας	60 -90
No 4	45 - 80
No 8	31 - 65
No 16	18 - 50
No 30	10 - 35
No 50	2 - 23
No 100	0 - 15
No 200	0 - 10

Ήταν επιθυμητό η κοκκομετρική καμπύλη να είναι ομαλή και να μην έχει κενά στη διαβάθμιση. Επίσης έπρεπε να ικανοποιηθούν τα κριτήρια συμβιβαστότητας με τις Ζώνες 1 και 3. Η Ζώνη 2 που βρίσκεται ανάμεσα στις ζώνες 1 και 3 αποτελεί το φίλτρο για τη Ζώνη 1 και βάση για τη Ζώνη 3. Τα κριτήρια αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

$$D_{15} \text{ φίλτρου} / D_{15} \text{ βάσης} \geq 4$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο λόγος πρέπει να είναι μικρότερος από 20

$$D_{15} \text{ φίλτρου} / D_{85} \text{ βάσης} \leq 4$$

$$D_{50} \text{ φίλτρου} / D_{50} \text{ βάσης} \leq 25$$

Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $1 \frac{1}{2}$ ίντσες. Από τα αποτελέσματα των ελέγχων προέκυψε ο συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού $C_u = 26 \text{ kN/m}^2$. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις της Ζώνης αυτής έδειξαν ποσοστό διερχόμενο από κόσκινο No4 ίσο με 58% και ποσοστό διερχόμενο από κόσκινο No200 ίσο με 9%.

4.9.3. Υλικό Στραγγιστηρίου

Στη ζώνη αυτή πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα ώστε να προσδιοριστεί η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, η οποία έπρεπε να πληροί τις παρακάτω προδιαγραφές.

Πίνακας 4.22. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	80 - 100
$1 \frac{1}{2}$ ίντσας	60 - 100
$\frac{3}{4}$ ίντσας	20 - 80
$\frac{3}{8}$ ίντσας	10 - 60
No 4	2 - 44
No 8	0 - 32
No 16	0 - 24
No 30	0 - 15
No 50	-

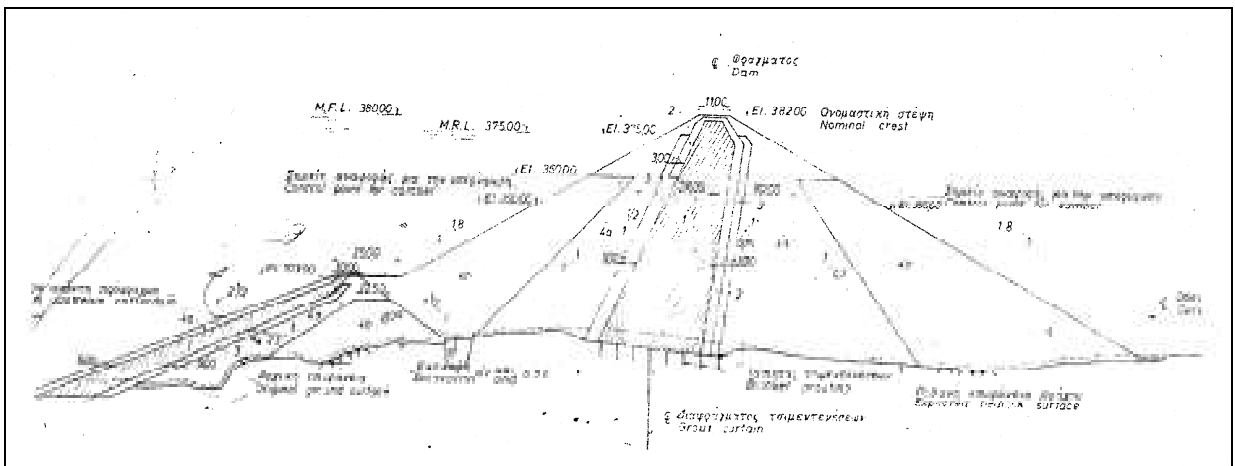
Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στη ζώνη αυτή έδειξαν ποσοστό διερχόμενο από κόσκινο No4 ίσο με 16% και ποσοστό διερχόμενο από κόσκινο No200 ίσο με 1%.

Παρότι η μελέτη δεν προέβλεπε την ύπαρξη λεπτόκοκκων υλικών, διερχόμενων από το πρότυπο κόσκινο No200, η τελική κοκκομετρική ανάλυση του υλικού έδειξε ότι τελικά χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό ποσοστό το οποίο όμως δεν επηρεάζει τη διαπερατότητα της ζώνης.

4.10. ΣΜΟΚΟΒΟ

(Στοιχεία για το φράγμα του Σμοκόβου προέρχονται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων)

Το φράγμα του Σμοκόβου βρίσκεται στο Νομό Καρδίτσας. Είναι ένα λιθόριπτο φράγμα με κεκλιμένο πυρήνα, όγκου $3.500.000\text{m}^3$. Το φράγμα έχει κατασκευαστεί στην περιοχή Λουτροπηγής και Κτιμένης, στη συμβολή παραποτάμων του Ονόχωνου.



Εικόνα 4.20. Τυπική διατομή φράγματος Σμοκόβου

(Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων 1997)

Πίνακας 4.23. Συνοπτική περιγραφή διαζώνισης τυπικής διατομής φράγματος Σμοκόβου

Ζώνη	Περιγραφή
1	Αδιαπέρατος πυρήνας
2	Φίλτρο από λεπτόκοκκο υλικό
3	Φίλτρο από χονδρόκοκκο υλικό (στραγγιστήριο)
4	Σώμα στήριξης

4.10.1. Υλικό Πυρήνα

Το αδιαπέρατο υλικό της Ζώνης 1 που λήφθηκε από τις κοιλάδες του Πενδάμη και της Παπούσας, ελέγχθηκαν εργαστηριακά ώστε να περιέχει τουλάχιστον 15% κατά βάρος

λεπτόκοκκα διερχόμενα από το πρότυπο κόσκινο Νο200 και τουλάχιστον 60% κατά βάρος υλικά διερχόμενα από το κόσκινο Νο4. Τα τεμάχια των υλικών μεγαλύτερα των 10cm απομακρύνθηκαν.

4.10.2.Υλικό Φίλτρου

Το υλικό της Ζώνης 2 λήφθηκε από υγιή και καθαρά αμμοχάλικα της κοιλάδας Παπούσας. Ο έλεγχος της κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού και μετά από εμπλουτισμό του σε απαιτούμενα κλάσματα ικανοποιεί τις παρακάτω προδιαγραφές.

Πίνακας 4.24. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης φίλτρου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
1 ½ ίντσας	100
¾ ίντσας	78 - 100
3/8 ίντσας	60 -90
No 4	45 - 80
No 8	31 - 65
No 16	18 - 50
No 30	10 - 35
No 50	2 - 23
No 100	0 - 15
No 200	0 - 10

Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι 1 ½ ίντσας. Η διάστρωση έγινε σε ομοιόμορφες περίπου οριζόντιες στρώσεις, πάχους 30cm και η συμπύκνωση του έγινε με δύο διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα.

4.10.3.Υλικό Στραγγιστηρίου

Το υλικό της ζώνης αυτής λήφθηκε επίσης από υγιή και καθαρά αμμοχάλικα της κοιλάδας Παπούσας. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών του στραγγιστηρίου ικανοποιούσαν πάντα τα κριτήρια του Πίνακα 4.25.

Πίνακας 4.25. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης στραγγιστηρίου

Κόσκινο	Ποσοστό Διερχόμενο %
3 ίντσες	80 - 100
1 ½ ίντσας	60 - 100
¾ ίντσας	20 - 80
3/8 ίντσας	10 - 60
No 4	2 - 44
No 8	0 - 32
No 16	0 - 24
No 30	0 - 15

Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι 3 ίντσες. Η διάστρωση έγινε σε ομοιόμορφες περίπου οριζόντιες στρώσεις, πάχους 30cm και η συμπύκνωση του έγινε με δύο διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα.

5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χαρακτηριστική ιδιότητα των εδαφικών υλικών είναι η κοκκομετρική τους σύνθεση, η οποία επιβάλλει ορισμένα άνω και κάτω όρια κόκκου στις διάφορες κατηγορίες υλικών. Για την κατασκευή χωμάτινου φράγματος, ο πυρήνας κατασκευάζεται από λεπτόκοκκα υλικά, κυρίως αργιλικά και οι ζώνες εκατέρωθεν του πυρήνα κατασκευάζονται από πιο χονδροκόκκα υλικά, όπως η άμμος.

5.1. ΠΥΡΗΝΕΣ

Οι πυρήνες γενικά κατασκευάζονται από αδιαπέρατα υλικά ή και από προϊόντα έντονης αποσάθρωσης βράχου. Η διάστρωση των υλικών γίνεται με στρώσεις των 15 - 30cm ανάλογα με την ποιότητα των υλικών αλλά και το είδος και το βάρος του συμπυκνωτικού μηχανήματος. Στις επαφές του πυρήνα με τη θεμελίωση και το βράχο η διάστρωση πραγματοποιείται σε μικρότερα πάχη ώστε να επιτυγχάνεται καλή συμπύκνωση.

Η κοκκομετρική καμπύλη των υλικών του πυρήνα πρέπει να είναι συνεχής και ομαλή. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην παρουσία λεπτόκοκκων υλικών (διερχόμενων από το πρότυπο κόσκινο Νο200), καθώς αυτά προσφέρουν στον πυρήνα της ιδιότητα της χαμηλής διαπρατότητας (της τάξης του 10^{-6} cm/sec). Το υλικό του πυρήνα θεωρείται αδιαπέρατο όταν το ποσοστό των λεπτόκοκκων είναι μεγαλύτερο από 15 - 20%, αλλά όπως προκύπτει από τα παραπάνω χρησιμοποιούνται αρκετά μεγαλύτερα ποσοστά που φτάνουν το 50%. Η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου ποσοστού λεπτόκοκκων δε διαφοροποιεί σημαντικά τη διαπερατότητα του πυρήνα και εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα των υλικών στην περιοχή.

Σημαντικός παράγοντας επίσης θεωρείται το διερχόμενο ποσοστό από κόσκινο Νο4, το οποίο δείχνει την ποσότητα της άμμου στον αδιαπέρατο πυρήνα. Η συνήθης απαίτηση των μελετών είναι το ποσοστό αυτό να είναι μεγαλύτερο από 60%. Στα παραπάνω φράγματα η συνθήκη αυτή ικανοποιείται.

Όσον αφορά στη μέγιστη χρησιμοποιούμενη διάσταση κόκκου για την κατασκευή του πυρήνα συνήθως ορίζεται σε 10cm, με εξαίρεση το φράγμα του Θησαυρού, όπου χρησιμοποιήθηκε μέγιστη διάσταση κόκκου πυρήνα 15cm.

5.2. ΦΙΛΤΡΑ

Τα φίλτρα συνήθως κατασκευάζονται από διαβαθμισμένα αμμοχάλικα της κοίτης του ποταμού ή εάν αυτά δεν είναι διαθέσιμα χρησιμοποιούνται θραυστά προϊόντα λατομείου, τα οποία αποτελούν μία πιο ακριβή λύση. Η χρησιμοποίηση του υλικού γίνεται σύμφωνα με τα κριτήρια προσαρμογής με τον πυρήνα (κριτήριο συγκράτησης) και τα στραγγιστήρια (κριτήριο διαπερατότητας). Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλογής του υλικού των φίλτρων ακολουθείται σε όλα τα φράγματα που περιγράφονται παραπάνω.

Η κοκκομετρική καμπύλη των υλικών, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φίλτρων πρέπει να είναι ομαλή και καλά διαβαθμισμένη. Το σύνολο των γεωφραγμάτων, με αδιαπέρατο πυρήνα, που έχουν κατασκευαστεί στον Ελληνικό χώρο έχουν μέγιστη διάσταση κόκκου μεταξύ $\frac{3}{4}$ ίντσας (19mm) και 1.5 ίντσα (38mm). Αυτό συμβαίνει μεταξύ άλλων και για να αποφεύγεται το φαινόμενο του διαχωρισμού των υλικών κατά τη μεταφορά τους από τους δανειοθαλάμους στο φράγμα.

Οι απαιτήσεις των φίλτρων για λεπτόκοκκα υλικά, σύμφωνα με τις μελέτες, είναι σχετικά μικρές (3 - 5% διερχόμενο ποσοστό από το πρότυπο κόσκινο Νο200), κυρίως γιατί τα υλικά αυτά είναι ακριβά και είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται στον πυρήνα του φράγματος. Στα παραπάνω φράγματα, οι ποιοτικοί έλεγχοι έδειξαν παρουσία λεπτόκοκκου υλικού στα φίλτρα σε ποσοστό κοντά στο 10%.

Όταν υπάρχει αυξημένο ποσοστό λεπτόκοκκων διαθέσιμο για την κατασκευή φίλτρων, αυτό συνήθως τοποθετείται στο ανάντη φίλτρο και κοντά στον πόδα του αναχώματος, γιατί η περιοχή αυτή θεωρείται κρίσιμη για τη στράγγιση και έχει υψηλότερες απαιτήσεις υλικού.

Τα φίλτρα παρουσιάζουν αυξημένη διαπερατότητα σε σχέση με τον πυρήνα του φράγματος. Σε καμία περίπτωση όμως δε μπορούν να χαρακτηριστούν πλήρως διαπερατά.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα όρια των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων για τα δέκα φράγματα που αναφέρονται παραπάνω.

Πίνακας 5.1. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης των φίλτρων

ΚΟΣΚΙΝΟ	ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ											ΣΜΟΚΟΒΟ	
	ΓΑΛΟΥΡΑ	ΚΑΛΑΜΩΤΗΣ	ΚΑΛΥΒΑ	ΜΕΣΟΒΟΥΝΟ	ΣΕΠΤΑ - ΜΑΝΙΚΙΑ	ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑ	ΦΑΝΕΡΩΜΕΝΗ	ΛΕΥΚΟΓΕΙΩΝ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ				
1 ^{1/2} ίντσας												100	100
1 ίντσας	100				100						100	78 - 100	78 - 100
3/4 ίντσας	90 - 100	100	100	100	90 - 100						86 - 100	60 - 90	60 - 90
1/2 ίντσας		88 - 100	86 - 100	89 - 100	80 - 100	100					71 - 100	45 - 80	45 - 80
3/8 ίντσας	72 - 100		80 - 100	81 - 100	76 - 95	90 - 100	61.5 - 100				44 - 70	31 - 65	31 - 65
No 4	58 - 88	80 - 100	63 - 90	63 - 89	55 - 78	67 - 96	43 - 85				32 - 55	18 - 50	18 - 50
No 10	40 - 70	60 - 80	43 - 73	42 - 71	39 - 62	40 - 71	29 - 59				20 - 42	10 35	10 35
No 40	13 - 39	57 - 40	12 - 43	5 - 37	13 - 32	5 - 29	8 - 30				13 - 32	2 - 23	2 - 23
No 100	0 - 23	5 - 22	0 - 22	0 - 17		0 - 12					3 - 20	0 - 15	0 - 15
No 200	< 5	< 5	< 10	< 3	< 5	≤ 5	< 5				0 - 12	0 - 10	0 - 10
ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ	19mm	20mm	19mm	19mm	25mm	25mm	19mm					1 ½ ίντσες	1 ½ ίντσες

5.3. ΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΡΙΑ

Η μεταβατική ζώνη μεταξύ πυρήνα και κελύφους είναι απαραίτητη για την αποφυγή αποπλύσεων του υλικού του πυρήνα μέσα στο κέλυφος. Τα στραγγιστήρια επίσης τοποθετούνται για τον έλεγχο της ροής μέσα από το φράγμα.

Τοποθετούνται εξωτερικά του φίλτρου και οριζόντια κάτω από το κατάντη κέλυφος, όταν το υλικό του φίλτρου δεν είναι συμβατό με το υλικό του κελύφους του φράγματος. Τις περισσότερες φορές κατασκευάζονται από χονδρόκοκκα αμμοχάλικα και κροκάλες που συνήθως είναι υλικά που απομένουν από την επεξεργασία των φίλτρων.

Το κοινό χαρακτηριστικό των υλικών των στραγγιστηρίων είναι η μικρή παρουσία λεπτόκοκκου κλάσματος, αφού το στραγγιστήριο πρέπει να εξασφαλίσει μεγάλη διαπερατότητα.

Βιβλιογραφία

- Bertram, G. E. (1940). "An experimental investigation of protective filters" *Report*, Harvard Graduate School of Engineering, Publication No. 267, Vol.6.
- Casagrande, A. (1937): Seepage through dams. Boston Soc. Civ. Eng. Cont. to Soilmech.
- de Grootm., Bakker K., Verheij H. (1993). "Design of Geometrically Open Filters in Hydraulic Structures", Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Brauns, Heibaum & Schuler (eds.), 1993 Balkema, Rotterdam, pp.143-154.
- Faure Y., Farkouth B., Delmas P., and Nancey A. (1996) "Valcros Dam: Summary of Tests and Analysis of Filter Criteria" Geofilters '96, Comptes Rendus Proceedings, Lafleur & Rollin (Eds.), Bitech Publications, Canada.
- FEMA (2002), "The national dam safety Program, Research needs workshop: Research through Embankment dams".
- Fischer G. and Holtz R. (1996). "A Critical Review of Granular Soil Filter Retention Criteria", Proc. Geofilters '96, Comptes Rendus Proceedings, Lafleur & Rollin, Bitech Publications, Canada. pp. 409-418.
- Foster m. and Fell R. (1999), "Assessing Embankment Dam Filters Which Do Not Satisfy Design Criteria", UNICIV Report No. R-376.
- Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, pp. 17-31.
- Gilboy (1940):mechanics of hydraulic-fill dams -Boston. Soc. Civ. Eng. Contr. To Soilmech.
- Giroud J. (1996). "Granular Filters and Geotextile Filters", Proc. Geofilters '96, Comptes Rendus Proceedings, Lafleur & Rollin (Eds.), Bitech Publications, Canada, pp. 565-680.
- Honjo Y. and Veneziano D. (1989). "Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp 75-94.
- ICOLD (1994), "Embankment Dams Granular Filters and Drains», Bulletin No. 95.
- Indaratna B., Raut A.K., Khabba H. (2007), "Constriction based retention criterion for granular filter design", University of Wollongong.

Indraratna B. and Raut A.K. (2006), "Enhanced Criterion for Base Soil Retention in Embankment Dam Filters", University of Wollongong.

Indraratna B., Dilema E., and Nutalaya P. (1990), "Design of granular filters for a lateritic residual soil." *Dam Engineering*, 1(3), 201-220.

Indraratna B., Vafai F. (1997), "Analytical model for Prediction Particle Migration within a Soil - Filter System", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(2), 100 -109.

Indraratna, B., and Locke, M. (2000), "Analytical modeling and experimental verification of granular filter behaviour." Keynote paper, filters and drainage in geotechnical and geoenvironmental engineering, W. Wolski and J. Mlynarek eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 3-26.

Karpoff K. / USBR (1955). "The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filter", *Proc. 58th Annual Meeting ASTM*, pp. 1183-1198.

Locke, M., Indraratna B., Cummins, Philips, and Adikari, Gamini (2000). "Embankment Dam Rehabilitation", *ANCOLD 2000 Conference on Dams*.

Prinz H. (1982): *Abriss der Ingenieurgeologie*, Stuttgart (Enke).

Raut A. K. (2006), "Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design", University of Wollongong.

Shahab Yasrobi S., Azad Ali (2006), "Assessment of Granular Filter Functioning in Embankment Dams", *Tarbiat Modares University, Tehran, Iran*

Sherard J. L., Dunnigan L.P. (1985), "Filters and leakage control in embankment dams", *Proceedings, Symposium on seepage and leakage from dams and impoundments*, Edit by Volpe R.L. and Kelly W.E., ASCE pp1-30.

Sherard J.L, Dunnigan, L.P. (1989), "Critical Filters for Impervious Soils», *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(7), 927-947

Sherard J.L., Dunnigan L., Talbot J. (1984), "Basic properties of sand and gravel filters." *J. Geotechnical Engineering*, 110(6), 684-700.

Taylor (1948), *Fundamentals of soil mechanics*, Wiley & Sons, New York.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, 2nd ed.: John Wiley & Sons, New York..

U.S. Bureau of Reclamation, USBR, (1963). Earthmanual, First Edition (revised), US Govt. Printing Office, Washington D.C., 751p.

United States Army Corps of Engineers, USACE, (1971). "Dewatering and Groundwater Control for Deep Excavations", Technical memorandum No. 5-818-5 (April), Office of Chief of Engineers, US Army, Washington D.C.

United States Army Corps of Engineers, USACE, (1953), "Investigation of filter requirements for underdrains." Tech.memo. No. 3-360, U.S.

Vaughan P. (2000) "Filter Design for dam cores of clay, a retrospect" Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Wolski & Mlynarek Eds., Balkema, Rotterdam, pp. 189-196.

Vaughan P. and Soares H. (1982). "Design of Filters for Clay Cores of Dams", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. 1, January 1982, pp. 17-31.

Youngjin Park (2003), "Investigation of the ability of filters to stop erosion through cracks in dams", Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Zhao Xiao Xi, "Flow through granular dam filters and modeling of particle migration", School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, China & School of Civil Engineering, Queensland University of Technology, Australia.

Γενική Γραμματεία Δημόσιων Έργων (2005), Φράγμα Γαδουρά, Τεχνική Έκθεση.

Δ.Ε.Η. - Διεύθυνση αναπτύξεως υδροηλεκτρικών έργων (1993), Hydroelectric projects of Nestos river. Quality control laboratory tests results for civil engineering works. Final report.

Δημόπουλος Γ. (2005), Σημειώσεις μαθήματος Τεχνικής Γεωλογίας Ι, Η θέση της τεχνικής γεωλογίας ανάμεσα στις άλλες γεωτεχνικές επιστήμες και η συμβολή της στα τεχνικά έργα.

Ζαρκαδούλας Νίκος (2005), "Τεκμηρίωση αρχαίου φράγματος Αλυζίας", Διπλωματική εργασία, Αθήνα.

Καβαδάς Μ. (1991), Στοιχεία Εδαφομηχανικής.

Καβαδάς Μ. (2005), Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα - Γεωτεχνική Φραγμάτων.

Λιάκουρης, Δ. (1995), Η γεωλογία και τα φράγματα της Δ.Ε.Η. - Τύπος Φως Ε.Π.Ε., Αθήνα.

Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., Κοτσώνης Α., Σωμάκος Λ., Πετλέρος Β., Λαζαρίδου Σ. (2008), Γεωλογικά και Γεωτεχνικά θέματα κατά την κατασκευή του φράγματος Γαδουρά Ρόδου - Τεχνικά στοιχεία του έργου. 1^ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ-Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου 2008: Λάρισα.

Μουτάφης Ν.Ι. (2009), Τεχνολογία Γεωφραγμάτων - Σημειώσεις.

Μουτάφης Ν.Ι., Εμμανουηλίδης Γ., Φώτη Σ. (2008), Φράγμα Σέτα-Μανίκια Ν. Ευβοίας. Ιδιαιτερότητες Έργου. 1^ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ-Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου 2008: Λάρισα.

Μπέσιου Βασιλική (2008), "Διερεύνηση της ευστάθειας των πρηνών χωμάτινου φράγματος με πρόγραμμα οριακής ισορροπίας - Το φράγμα του Αποσελέμη", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Νομαρχία Φλώρινας, Φράγμα Τριανταφυλλιάς, Τεχνική Έκθεση.

Νομαρχία Χίου (2006), Φράγμα Καλαμωτής - Κατράρη, Τεχνική Έκθεση.

Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Κοζάνης, Φράγμα Μεσόβουνου, Τεχνική Έκθεση.

Παπαχαρίσης Ν., Μάνου-Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος, Ι. (1999): Γεωτεχνική Μηχανική - Εκδόσεις Αφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.

Περιφέρεια Κρήτης, Γενική Διεύθυνση Περιφέρειας, Διεύθυνση Δημόσιων Έργων, Τμήμα Εγγείων Βελτιώσεων (2002), Φράγμα Φανερωμένης Μεσσάρας, Γεωτεχνική Μελέτη.

Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, (ΔΕΚΕ), Φράγμα Καλύβα - Κομαρών Ν. Έβρου, Τεχνική Έκθεση.

Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, Διεύθυνση Ελέγχου Κατασκευής έργων (ΔΕΚΕ), (2003) Φράγμα Σέττα - Μανίκια, Τεχνική Έκθεση.

Ρόπης Κωνσταντίνος (2002), "Τεχνικά χαρακτηριστικά ελληνικών γεωφραγμάτων", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Σακελλαρίου Μ., Φερεντίνου Μ., Ανδρισάκης Ι., Ντούλης Γ. (2003), Εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Υπουργείο αγροτικής ανάπτυξης και τροφίμων (1986), Φράγμα Λευκογείων Ν. Δράμας, 1^η Τεχνική έκθεση.

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων (1997), Φράγμα Σμοκόβου Β φάση. Κατασκευή κυρίως φράγματος, μητρώο έργου.

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

<http://www.britishdams.org/>

<http://www.eemf.gr/>

<http://www.fema.gov/>

<http://www.geo.auth.gr>

<http://www.michigan.gov/deq/>

<http://www.planete-tp.com/en/>