



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Φίλτρα γεωφραγμάτων: σχεδιασμός και συμπεριφορά υλικών.

Embankment dam filters: design and material behavior.



Διπλωματική εργασία: **Μπιρμπίλης Γεώργιος**

Επιβλέπων καθηγητής: Καββαδάς Μιχαήλ

Αθήνα, Ιούλιος 2012



## **Ευχαριστίες**

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την συμβολή και βοήθεια ανθρώπων, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Καββαδά Μιχαήλ για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την καθοδήγηση και βοήθειά του, κάθε φορά που χρειαζόταν.

Ακόμα, ιδιαίτερες είναι οι ευχαριστίες μου στην ΕΕΜΦ και κυρίως στον κ. Κωνσταντίνο Αναστασόπουλο, για την καθημερινή δίμηνη συνεργασία μας. Χωρίς το ενδιαφέρον του και τη συμβολή του, η εργασία αυτή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Αυτή η εργασία σηματοδοτεί και το τέλος του προπτυχιακού κύκλου σπουδών μου. Δεν θα μπορούσα, λοιπόν, να παραλείψω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την υλική και ηθική υποστήριξη, που ήταν η βάση της προσπάθειας αυτών των χρόνων. Τέλος, θα ήθελα να κάνω ιδιαίτερη αναφορά στους φίλους με τους οποίους μοιράστηκα αυτή τη διαδρομή.



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της μηχανικής και χημικής συμπεριφοράς των φίλτρων των γεωφραγμάτων. Απαραίτητη αρχικά είναι μια περιήγηση στα είδη των φραγμάτων, την χρησιμότητά τους, και την ανάλυση της λειτουργίας και σημασίας των ζωνών φιλτραρίσματος και στράγγισης σε αυτά. Ακολούθως, γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση στο σχεδιασμό των φίλτρων από αδρανή υλικά και η γνωριμία με μεγάλο μέρος της -έως τώρα- βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο για την κατανόηση των μηχανισμών και προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Αμέσως επόμενο στάδιο της εργασίας είναι ένα πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η σύγχρονη έρευνα πάνω στα φίλτρα, αυτό της επίδρασης της χημείας του νερού του ταμιευτήρα στις μηχανικές ιδιότητες των φίλτρων από ανθρακικά αδρανή. Συγκεκριμένα, εξετάζεται ο μηχανισμός της τοπικής διάλυσης των ανθρακικών αδρανών από το «επιθετικό» νερό και η αντίστροφη διαδικασία της εναπόθεσης υλικού με συνέπεια της δημιουργία δεσμών συνεκτικότητας στο φίλτρο, γεγονός το οποίο καθιστά το φίλτρο μη λειτουργικό. Στην προσπάθεια μεταφοράς του θεωρητικού φαινομένου που περιγράφηκε, στις φυσικές συνθήκες πεδίου και της δημιουργίας χρήσιμων εργαλείων για το μηχανικό, στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε μετρήσεις και δοκιμές που μπορούν να βαθμονομήσουν και να αξιολογήσουν την χημική συμπεριφορά των υλικών και την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Οι δοκιμές εστιάζουν στην αξιολόγηση κυρίως της μεταβολής της συνοχής του υλικού. Αφετηρία είναι σειρές δοκιμών που έχουν πραγματοποιηθεί ήδη από άλλους ερευνητές και γίνονται τροποποιητικές προτάσεις για την βελτίωσή τους. Σκοπός είναι η διατύπωση εργαστηριακών διαδικασιών για την αξιολόγηση του υλικού ως προς την ανάπτυξη συνοχής σαν αποτέλεσμα της εναπόθεσης υλικού ανάμεσα στους κόκκους. Τέλος, υπάρχει αναφορά στον άλλο μεγάλο τομέα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ρόλο του φιλτραρίσματος, στα γεωυφάσματα. Τα γεωυφάσματα αποτελούν μια χρήσιμη εναλλακτική επιλογή, για αυτό παρουσιάζονται οι κατηγορίες τους και αναλύεται η σχεδιαστική φιλοσοφία τους.



## **Abstract**

The main objective of this study is the evaluation of embankment dam filters in terms of chemical and mechanical behavior. The introduction works as a presentation of dam types, their uses and functions, and the identification of the importance of both filter and drainage zones. Then, follows a literature review on criteria for filters made of aggregate materials in order to clarify the mechanisms in filters and enter the reader in recent research considerations. The next chapter is an attempt to deal with a recent challenge in filters research, the interaction between water's chemistry and carbonate aggregates. This phenomenon is the result of the combination of two sides of the same mechanism. These two sides are: firstly, the dissolution process of carbonate rocks that form the aggregates from the influence of "aggressive" water, and secondly the precipitation effect that creates cohesion bonds between soil grains and makes the filter non-functional. After the description of the theoretical model, in the fourth chapter follows the transition to field conditions and there is an attempt to propose different measurements and tests that can be a useful tool for a dam engineer. The main goal of those tests is to accomplish an approach to a possible rating system of several materials characteristics and properties, not only in quality terms but also in a calibrated scale. In the present paper, creation of cohesion is the principal factor that concerns our point of view through experiments of others researchers not only in dam's engineering sector but also in other relevant ones that refers to equivalent materials and mechanisms. In conclusion, there is a presentation of another alternative available type of filters, geotextiles. Since the 1970's with the advance in geosynthetics technology in many cases geotextiles are preferred in filter zones and have several characteristics that can make them a reliable solution.





## Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Φράγματα .....	1
1.1.1 Σκοπός και προσφορά των φραγμάτων .....	1
1.1.2 Ασφάλεια.....	2
1.2 Τύποι φραγμάτων.....	4
1.2.1 Τα φράγματα από σκυρόδεμα .....	4
1.2.2 Γεωφράγματα .....	6
1.3 Φίλτρα.....	12
1.3.1 Γενικά .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΙΛΤΡΩΝ .....	15
2.1 Τύποι φίλτρων.....	15
2.1.1 Κρίσιμα και μη κρίσιμα φίλτρα .....	16
2.2 Φίλτρα, χρήσιμες έννοιες και φιλοσοφία σχεδιασμού .....	19
2.2.1 Εσωτερική διάβρωση.....	21
2.3 Εργαστηριακές δοκιμές .....	26
2.4 Ιστορική αναδρομή.....	28
2.4.1 Terzaghi (1922) .....	28
2.4.2 Η μέθοδος της USBR (1977) .....	29
2.4.3 Vaughan και Soares (1982) .....	30
2.4.4 Sherard και Dunnigan (1984) .....	34
2.4.5 Kenney και Lau (1985).....	36
2.4.6 Lafleur et al. (1989, 1993) .....	38
2.4.7 Foster και Fell (1999) .....	39
2.5 Άλλοι παράγοντες καθοριστικοί στο σχεδιασμό φίλτρων .....	41
2.5.1 Κριτήρια αντιμετώπισης της εσωτερικής αστάθειας.....	41

2.5.2 Περατότητα .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ .....	47
3.1: Κατηγορίες προέλευσης του υλικού .....	47
3.2 Ανθρακικά υλικά κατασκευής .....	49
3.2.1 Φίλτρα από ανθρακικά υλικά .....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	63
4.1 Μετρήσεις ιδιοτήτων του νερού .....	63
4.1.1 Περιεκτικότητα σε ιόντα .....	64
4.1.2 Ποιοτική δοκιμή Van Aardt & Fulton .....	65
4.1.3 Δείκτης κορεσμού ή Langelier .....	65
4.2 Μετρήσεις των ιδιοτήτων των αδρανών .....	67
4.2.1 Δοκιμή Los Angeles .....	67
4.2.2 Δοκιμή ισοδύναμου άμμου .....	69
4.2.3 Προσδιορισμός ειδικών βαρών και υδροαπορροφητικότητας αδρανών υλικών .....	72
4.2.4 Αντοχή σε αποσάθρωση .....	74
4.3 Εργαστηριακές δοκιμές υλικού .....	75
4.3.1 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης με χρήση ασβέστου .....	75
4.3.2 Δοκιμή κατάρρευσης .....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΦΙΛΤΡΑ .....	87
5.1 Εισαγωγή .....	87
5.2 Λειτουργία και ιδιότητες .....	90
5.3 Σχεδιασμός .....	92
5.3.1 Προσδιορισμός μεγέθους πόρων .....	94
5.3.2 Κριτήρια σχεδιασμού .....	98
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	115

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 119



## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κατανομή φραγμάτων σε σχέση με το σκοπό λειτουργίας τους.( Πηγή: ICOLD).....	1
Σχήμα 1.2: Η υδροδότηση της πρωτεύουσας γίνεται με νερό που κατακρημνίζεται στην δυτική Ελλάδα .....	2
Σχήμα 1.3: Moiry dam , Ελβετία.....	4
Σχήμα 1.4: Claerwen Dam στην, Ουαλία και μια χαρακτηριστική του διατομή.....	5
Σχήμα 1.5: Bartlett dam, ΗΠΑ.....	5
Σχήμα 1.6: Παραδείγματα γεωφραγμάτων (Πηγή: Καββαδάς, 2005).....	6
Σχήμα 1.7:Τυπική διατομή φράγματος ΛΑΠΣ (Πηγή: Μουτάφης, 2009).....	8
Σχήμα 1.8: Σχηματική διατομή ομογενούς φράγματος (Πηγή: Καββαδάς,2005)....	10
Σχήμα 1.9: Χαραριστική διατομή φράγματος κατά ζώνες. Bjelke-Petersen dam (Πηγή: Επιτροπή Υδάτινων Πόρων του Queensland).....	11
Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση συνθηκών ροής στα φίλτρα(Πηγή: Fell, 2005).....	15
Σχήμα 2.2: Λειτουργίες φίλτρων (Πηγή: ICOLD, 1986).....	16
Σχήμα 2.3: Κίνηση του υλικού του πυρήνα μέσα από το φίλτρο σε περίπτωση διάβρωσης (Πηγή: S. Shahab Yasrobi και Ali Azad, Tarbiat Modares University )....	19
Σχήμα 2.4: (a) αυτό-φιλτράρισμα καλώς διαβαθμισμένου υλικού, (b) κακώς διαβαθμισμένο υλικό που δεν μπορεί να αυτό-φιλτραριστεί. (Πηγή: Fell, 2005)...	20
Σχήμα 2.5: Εδάφη επιρρεπή σε εσωτερική διάβρωση λόγω της βαθμωτής κοκκομετρικής διαβάθμισης τους (Πηγή: Fell, 2005).....	20
Σχήμα 2.6: Έναρξη, συνέχεια και εξάπλωση αντίστροφης διώρωσης σε φράγμα (Πηγή: Foster and Fell, 1999b).....	22

Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση διάβρωσης μέσω συγκεντρωμένης διαρροής (Πηγή: Foster and Fell, 1999b).....	23
Σχήμα 2.8: Πειραματική δοκιμή από την οποία προκύπτει σύγκριση της διάβρωσης από εσωτερική αστάθεια (αριστερά) και ανάστροφη διάβρωση (δεξιά) (Πηγή: Garner 2010).....	25
Σχήμα 2.9: Εργαστηριακή διάταξη no erosion filter test της USSCS (Πηγή: ICOLD 1994).....	26
Σχήμα 2.10: Πειραματική διάταξη Bakker για συνθήκες παράλληλης ροής (Πηγή:ICOLD, 1994) .....	27
Σχήμα 2.11: Σχηματική διατομή και καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικών του φράγματος Balderhead (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982).....	31
Σχήμα 2.12: Σχεδιασμός φίλτρου του φράγματος Cow Green (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982).....	31
Σχήμα 2.13: Σχέση μεγέθους κόκκου που περνά ή συγκρατείται σε σχέση με την περατότητα του φίλτρου (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982).....	32
Σχήμα 2.14 : Εργαστηριακή διάταξη της USSCS (Πηγή: ICOLD 1994).....	34
Σχήμα 2.15: Γραμμική παρεμβολή για εδάφη με ποσοστό λεπτόκοκκων (μικρότερων των 0,075 mm) (Πηγή : Sherard και Dunnigan 1985).....	35
Σχήμα 2.16: Σχηματοποιημένο διάγραμμα ροής της μεθόδου Lafleur et al. 1993 (Πηγή: Fell 2005).....	39
Σχήμα 2.17: Μορφή της δομής και αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη για τρία είδη εδαφών.Clast-supported stable( αριστερά), clast-supported unstable (στη μέση) και matrix-supported (δεξιά). (Πηγή: Bartsch, 1995).....	41
Σχήμα 2.18: Μεθοδολογία Kenny and Lau (Πηγή: Kenney and Lau, 1985).....	43

Σχήμα 2.19: Κοκκομετρικές καμπύλες των υλικών που χρησιμοποίησαν οι Kenney and Lau (1985). Αριστερά τα ασταθή εδάφη και δεξιά τα ευσταθή (Πηγή: Kenney and Lau, 1985).....	44
Σχήμα 2.20: Διάγραμμα τις μεθόδου Burenkova (1993). Οι ζώνες I,III είναι ασταθείς, η ζώνη II είναι σταθερή και η ζώνη IV αντιστοιχεί σε τεχνητά εδάφη. (Πηγή: Fell, 2005).....	45
Σχήμα 3.1: Διαδικασία παραγωγής του λεπτόκοκκου φίλτρου. (Πηγή: Σωμάκος Λάμπρος, 2011).....	48
Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης.....	52
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα του ρυθμού διάλυσης $\text{CaCO}_3$ με αυξανόμενη μερική πίεση του $\text{CO}_2$ και παρουσία BCA. Έχει προκύψει από πειραματική διαδικασία των Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt (1997). Οι κύκλοι αντιστοιχούν σε μεγάλες ταχύτητες ροής και τα τετράγωνα σε μικρές. Τα κενά σχήματα είναι τα πειραματικά δεδομένα χωρίς BCA, ενώ τα χρωματισμένα με την παρουσία BCA.(Πηγή: Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt (1997)).....	55
Σχήμα 3.4: Μοντελοποίηση ροής σε κυλινδρικό μοντέλο πόρου διαμέτρου και μήκους 100μm με στρωτή ροή όξινου pH 5 με τοιχώματα ασβεστίτη. (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).....	57
Σχήμα 3.5: (a) Ροή Poiseuille (b) καλά αναμεμειγμένο διάλυμα (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).....	58
Σχήμα 3.6: Σύγκριση ρυθμού διάλυσης για ροή Poiseuille ( $R_{2D}$ ) και για πλήρως αναμεμειγμένο διάλυμα ( $R_M$ ) σε διάφορες ταχύτητες ροής. Το πράσινο πλαίσιο σηματοδοτεί την περιοχή ταχυτήτων που συναντώνται σε κοκκώδη φίλτρα. (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).....	59
Σχήμα 3.7: Σχηματική απεικόνιση αλληλεμπλοκής των κόκκων κάτω από υψηλές πιέσεις.(Το μωβ χρώμα υποδηλώνει το υλικό που εναποτίθεται δημιουργώντας την νέα επαφή. (Πηγή: Eric Twelker, 2006).....	60
Σχήμα 3.8: Ακόμη μια σχηματική απεικόνιση της αλληλεμπλοκής των κόκκων λόγω διάλυσης εξαιτίας της πίεσης αιχμών. (Πηγή: Eric Twelker, 2006).....	60

Σχήμα 4.1: Η μηχανή Los Angeles (Πηγή:www.teicrete.gr).....	68
Σχήμα 4.2: Πειραματική διάταξη δοκιμής ισοδύναμου άμμου (Πηγή: www.teicrete.gr) .....	71
Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της συνοχής του υλικού με την πάροδο του χρόνου.(Πηγή: McClellan, 2001).....	78
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της συνοχής και της γωνίας τριβής του υλικού που προκύψαν από την τριαξονική δοκιμή.(Πηγή: McClellan, 2001)....	78
Σχήμα 4.5: Διαβαθμίσεις υλικών (α) ομογενών $U_c = 1.2-2.4$ και (b) ευρέως διαβαθμισμένων $U_c = 3.4-30$ (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi-Hiroyuki Satoh, 2003).....	83
Σχήμα 4.6: Αύξηση της γωνίας κατάρρευσης με την αύξηση του μέγιστου κόκκου. (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003).....	85
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα με τις τιμές της διαφοράς $AOR_{air}-AOR_{SC}=($ angle of repose in air- angle of repose in sandcastle test) για κάθε διαβάθμισης στα υλικά Β και C. (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003).....	86
Σχήμα 5.1: Η πρώτη εφαρμογή γεωφάσματος σε φράγμα, στην Γαλλία στο φράγμα Valcros το 1970. (Πηγή: O. Artières, K. Oberreiter and F. Aschauer).....	87
Σχήμα 5.2: Πορομετρικές καμπύλες δύο γεωφασμάτων με το ίδιο μέγεθος πόρων $O_{95}$ (Πηγή: Prapaharan et al, 1989).....	93
Σχήμα: 5.3: Πορομετρικές καμπύλες μετά την διεξαγωγή πειραμάτων προσδιορισμού με διάφορες μεθόδους (Πηγή: Fischer et al. ,1996).....	97
Σχήμα 5.4: Γραμμικός συντελεστής ομοιομορφίας (Πηγή: Giroud,2008).....	100
Σχήμα 5.5: Σχηματισμός φίλτρου με χρήση γεωφάσματος (Πηγή: Koerner,1990).....	102
Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση των εδαφικών δομών για $C_u$ με τιμές μικρότερες και μεγαλύτερες του 3. (Πηγή: Giroud, 2008).....	102



Σχήμα 5.7: Αυτόματη επιλογή μόνο του ομοιόμορφου λεπτόκοκκου κλάσματος εδάφους με $C_u > 3$ (Πηγή: Giroud, 2008).....	103
Σχήμα 5.8: Σχηματική απεικόνιση εδαφικής δομής. (a) Χαλαρή δομή και άνοιγμα ίσο με το μέγεθος κόκκου, (b) Πυκνή δομή και άνοιγμα ίσο με το άνοιγμα μεγέθους κόκκου, (c) Πυκνή δομή και άνοιγμα διπλάσιο του μεγέθους κόκκου. (Πηγή: Giroud,2008).....	104
Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση των κριτηρίων (Πηγή: Giroud, 2008).....	105
Σχήμα 5.10: Σχηματική απεικόνιση του περιορισμού που δημιουργούν οι ίνες του φίλτρου(αριστερά) και των διαδρομών που μπορούν να ακολουθήσουν μέσα στο φίλτρο (δεξιά) (Πηγή:Giroud, 2008) .....	110
Σχήμα 5.11: Καμπύλες διαβάθμισης χαρακτηριστικού μεγέθους κενών (κόκκινο), και περιορισμών (μπλε) (Πηγή: Giroud, 2008).....	111
Σχήμα 5.13: Καμπύλη διαβάθμισης περιορισμών (μπλε) και διάφορες περιπτώσεις (φίλτρο απείρου πάχους, παχύ, λεπτό, μηδενικού πάχους) πορομετρικών καμπύλων (κόκκινο) με μεταβαλλόμενο το πάχος του φίλτρου. (Πηγή: Giroud, 2008).....	112
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση της σχέσης 5.21 για διάφορες τιμές n. (Πηγή: Giroud,2008).....	113



## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Κρίσιμα και μη κρίσιμα φίλτρα σύμφωνα με την ICOLD (1986).....	17
Πίνακας 2.2: Παρουσίαση κριτηρίων Sherard και Dunnigan (Πηγή: ICOLD 1994)..	36
Πίνακας 2.3: Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων των δοκιμών των Foster και Fell 1999a,2001, Foster 1999 τα αντιστοιχα προτεινόμενα κριτήρια (Πηγή: Fell 2005).....	40
Πίνακας 2.4: Πίνακας κριτηρίων Isotomina (1957).....	42
Πίνακας 4.1: Παράδειγμα πίνακα ανάλυσης περιεκτικότητας νερού σε ιόντα (Πηγή:ICOLD, 1989).....	64
Πίνακας 4.2: Πίνακας σφαιρών της δοκιμής Los Angeles (Πηγή:www.teicrete.gr).	68
Πίνακας 4.3: Στοιχεία σειράς δειγμάτων των δοκιμών (Πηγή: McClellan,2001).....	76
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής της σειράς δειγμάτων (Πηγή: McClellan, 2001).....	77
Πίνακας 4.5: Τύποι Δοκιμών κατάρρευσης.....	82
Πίνακας 4.6: Ιδιότητες υλικών: Material A=στρογγυλεμένοι κόκκοι, Material B=γωνιώδεις κόκκοι, Material C=υλικό από φράγμα. (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003).....	84
Πίνακας 5.1: Κριτήρια συγκράτησης για φίλτρα από γεωφάσματα (Πηγή: Παναγιωτίδη, 2005).....	93
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά γνωρίσματα μεθόδων προσδιορισμού μεγέθους πόρων γεωφασμάτων. (Πηγή:Fischer et al.,1996) .....	95
Πίνακας 5.3: Συνοπτική παρουσίαση κριτηρίων συγκράτησης γεωφασμάτων (Πηγή: Christopher and Fisher,1992).....	107
Πίνακας 5.4: Συνοπτική παρουσίαση κριτηρίων περατότητας γεωφασμάτων (Πηγή: Christopher and Fisher,1992).....	108



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Φράγματα

#### 1.1.1 Σκοπός και προσφορά των φραγμάτων

Η τεράστια σημασία του νερού για τον άνθρωπο από νωρίς τον έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης και αποθήκευσης του. Τα πιο χαρακτηριστικά έργα αυτή της προσπάθειας είναι τα φράγματα. Τα φράγματα είναι κατασκευές που παρεμβάλλονται στις φυσικές συνθήκες ροής του νερού για την εκμετάλλευσή του με σκοπό την ύδρευση, την άρδευση, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τον έλεγχο πλημμύρων, την εκτροπή της υδατικής ροής και τον έλεγχο της ιζηματοπόθεσης.

Το νερό είναι καθοριστικό για την ύπαρξη ζωής στο πλανήτη. Με τον παγκόσμιο πληθυσμό να αυξάνεται με ρυθμό 90 εκατομμύρια το χρόνο, η παγκόσμια ζήτηση υδάτινων πόρων θα αυξάνεται για την επόμενη δεκαετία με ρυθμό 2-3 % ετησίως (ICOLD). Μάλιστα, με το γλυκό νερό να είναι άνισα κατανεμημένο τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά, η συνολική χωρητικότητα των φραγμάτων η οποία ανέρχεται στα 6000 km<sup>3</sup> παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότερη και πιο δίκαιη κατανομή του υδάτινου αγαθού.

Μέχρι σήμερα τα πιο πολλά φράγματα είχαν ένα μόνο σκοπό λειτουργίας (π.χ. μόνο ύδρευση, ή μόνο παραγωγή ενέργειας), ωστόσο πλέον αυξάνεται ο αριθμός των φραγμάτων που λειτουργούν με πολλαπλό σκοπό. Για τα φράγματα που λειτουργούν με ένα συγκεκριμένο σκοπό, η αναλογία είναι η ακόλουθη.

Σκοπός	Ποσοστό %
Άρδευση	48
Παραγωγή ενέργειας	17
Ύδρευση	13
Έλεγχος πλημμύρων	10
Άλλοι σκοποί	12

#### Σκοπός φραγμάτων



- Άρδευση
- Παραγωγή ενέργειας
- Ύδρευση
- Έλεγχος πλημμύρων
- Άλλοι σκοποί

Σχήμα 1.1: Κατανομή φραγμάτων σε σχέση με το σκοπό λειτουργίας τους. (Πηγή: ICOLD)

## Εισαγωγή

Για την Ελλάδα η θέση των φραγμάτων στην διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι επίσης καθοριστική λόγω της μεγάλης ανισοκατανομής των υδατικών πόρων μεταξύ δυτικής και ανατολικής Ελλάδας εξαιτίας της οροσειράς της Πίνδου. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η υδροδότηση της Αθήνας από τους ταμιευτήρες των χωμάτων φραγμάτων του Εύηνου και του Μόρνου, οι οποίοι βρίσκονται στην δυτική Ελλάδα σε απόσταση μεγαλύτερη των 150 km από την άνυδρη πρωτεύουσα.



Σχήμα 1.2: Η υδροδότηση της πρωτεύουσας γίνεται με νερό που κατακρημνίζεται στην δυτική Ελλάδα.

### 1.1.2 Ασφάλεια

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη την μέγιστη σημασία της ύπαρξης φραγμάτων γίνεται σαφές ότι πρέπει να εξασφαλισθεί η απόλυτη ασφάλεια κατά την κατασκευή και λειτουργία των υπαρχόντων και των μελλοντικών φραγμάτων, καθώς η πιθανή αστοχία τέτοιων μεγάλων έργων που παρεμβαίνουν στην αρχική ισορροπία της υδατικής ροής μπορεί να προκαλέσει ανυπολόγιστες ανθρώπινες, περιβαλλοντικές και οικονομικές καταστροφές. Παραδείγματα τέτοιων καταστροφών έχουν συμβεί στο παρελθόν. Χαρακτηριστική είναι η αστοχία του Teton dam στην πολιτεία του Idaho στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1976 με 11 θανάτους και κόστος ζημιών που ξεπέρασαν πλέον των 10 φορές το κόστος κατασκευή του φράγματος.

Τα πιο συνηθισμένα αίτια αστοχίας φράγματος είναι η υπερχειλίση του φράγματος που προέρχεται από αδυναμία του υπερχειλιστή να παραλάβει μια μεγάλη

πλυμμηρική παροχή, η γεωτεχνική αστοχία στην θεμελίωση ή στα ανάντη και κατάντη πρανή, η διασωλήνωση (δηλαδή η εσωτερική διάβρωση του αδιαπέρατου υλικού από την ροή του διηθούμενου νερού) και η ανεπαρκής αντίδραση στις επιβαλλόμενες μετατοπίσεις μετά από σεισμό.

Σε πολλές χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Πορτογαλία και η Νορβηγία υπάρχει σαφές κανονιστικό πλαίσιο που εξασφαλίζει την ασφάλεια κατά την κατασκευή και τη λειτουργία των φραγμάτων. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμα (2011), αντίστοιχο κανονιστικό πλαίσιο αλλά έχουν αρχίσει προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση από την ΕΕΜΦ (Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων φραγμάτων).

## 1.2 Τύποι φραγμάτων

Τα φράγματα είναι ιδιαίτερες κατασκευές, καθώς κάθε ένα είναι μοναδικό, προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις του έργου και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η επιλογή του τύπου φράγματος που θα κατασκευαστεί εξαρτάται από τους συγκεκριμένους παράγοντες κάθε έργου όπως τα διαθέσιμα υλικά, οι αντοχές των μαζών θεμελίωσης, το σχήμα της κοιλάδας που θα φραγεί και άλλα.

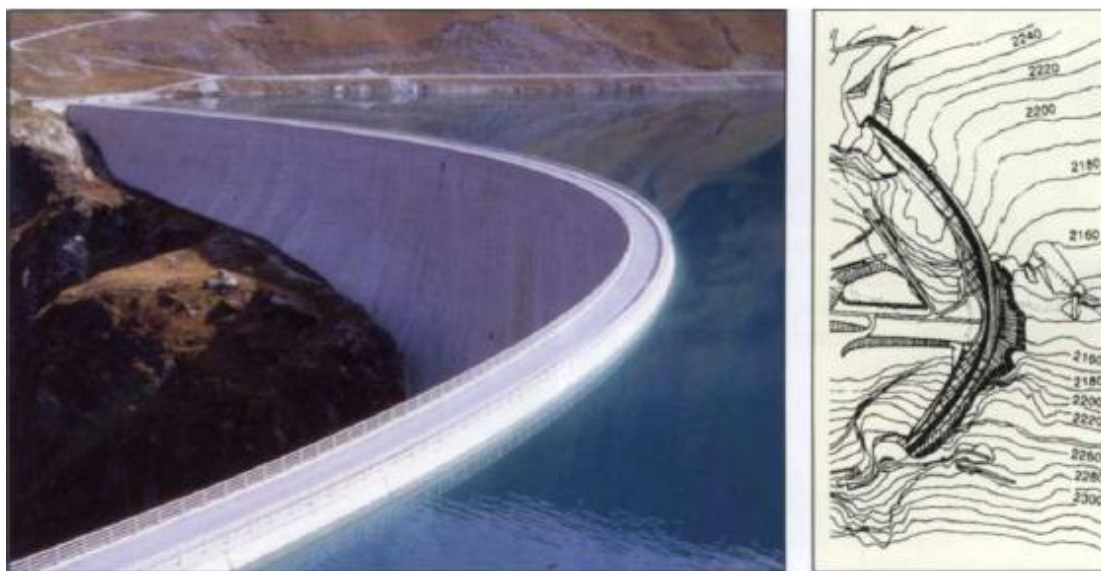
Με βάση τα υλικά κατασκευής τους τα φράγματα χωρίζονται σε 2 μεγαλύτερες κατηγορίες:

- Τα φράγματα από σκυρόδεμα (άκαμπτα)
- Τα γεωφράγματα (εύκαμπτα)

### 1.2.1 Τα φράγματα από σκυρόδεμα

Τα φράγματα αυτά μεταξύ τους διαφοροποιούνται στον τρόπο ανάληψης και μεταβίβασης των φορτίων (παράγοντας ο οποίος καθορίζει και τη μορφή τους) σε:

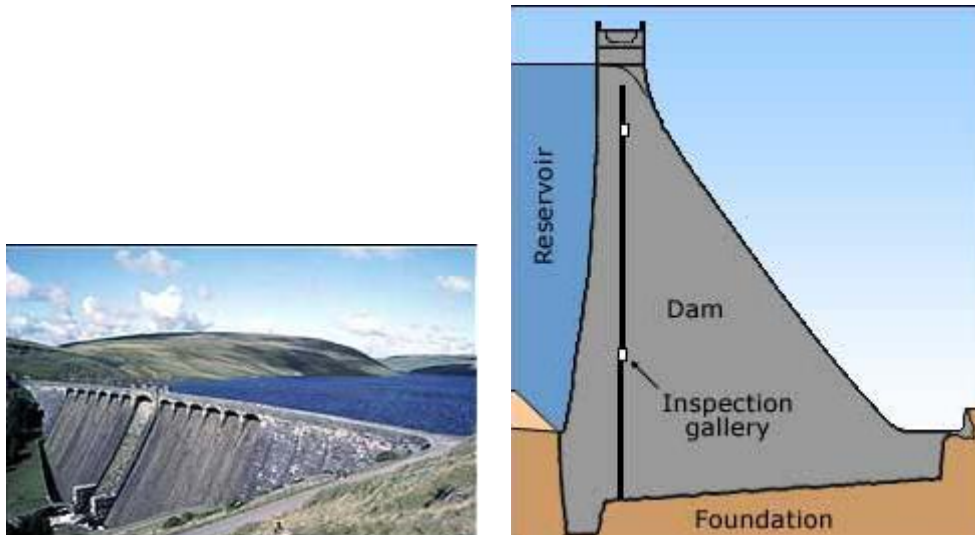
- Τοξωτά: έχουν μορφή τοξοειδή, μικρό πάχος, απλή ή διπλή καμπυλότητα και λειτουργούν ως αμφίπακτα τόξα μεταβιβάζοντας τις πιέσεις του νερού στα πλευρά της κοιλάδας με τη μορφή οριζόντιων δυνάμεων.



Σχήμα 1.3: Moiry dam , Ελβετία



- Βαρύτητας: οι πιέσεις του νερού αναλαμβάνονται πλήρως από την θεμελίωση, η οποία πρέπει να είναι ικανοποιητικών αντοχών. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις υποπιέσεις του νερού κάτω από το φράγμα οι οποίες αυξάνουν τη ροπή ανατροπής. Για οικονομία υλικών πολλές φορές στα φράγματα βαρύτητας χρησιμοποιούνται διάκενα στα σώμα του φράγματος.



Σχήμα 1.4: Claerwen Dam στην, Ουαλία και μια χαρακτηριστική του διατομή

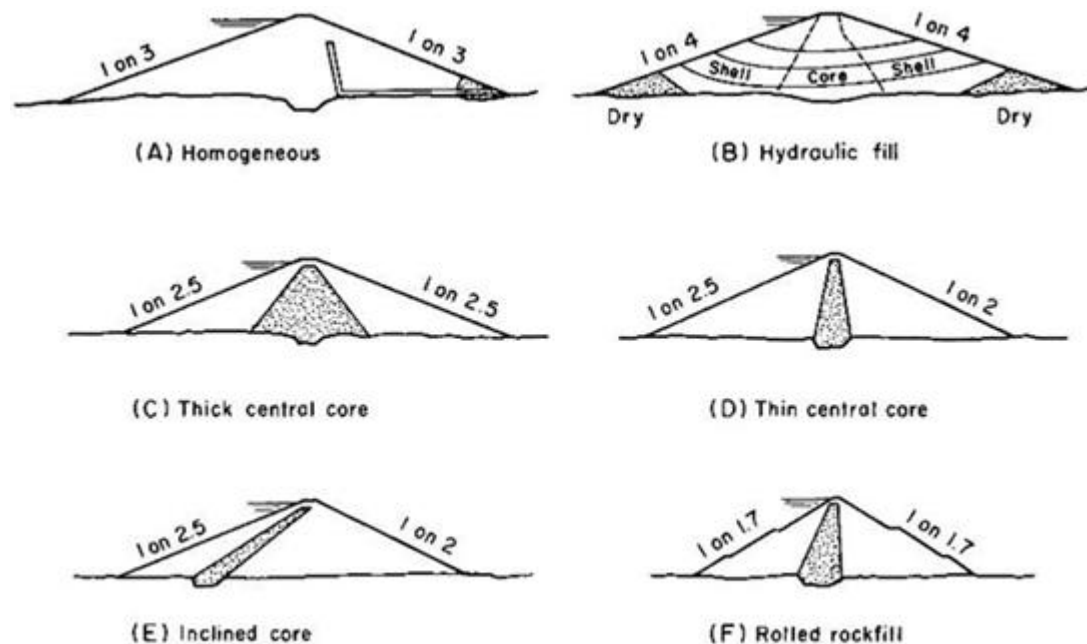
- Αντηριδωτά: τα αντηριδωτά φράγματα αποτελούνται από ένα λεπτό καμπύλο κάλυμμα κάθετα στον άξονα του ρεύματος κεκλιμένο ως προς την κατακόρυφο το οποίο μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση στην αντηρίδα.



Σχήμα 1.5: Bartlett dam, ΗΠΑ

### 1.2.2 Γεωφράγματα

Τα γεωφράγματα έχουν ως βασική αρχή ότι 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 στεγάνωση.



Σχήμα 1.6: Παραδείγματα γεωφραγμάτων (Πηγή: Καββαδάς, 2005 )

Χαρακτηριστικές απαιτήσεις κατασκευής γεωφραγμάτων είναι :

- 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.

- Χρήση εδαφικών υλικών μικρής διαπερατότητας, ώστε να συγκρατούν το νερό του ταμιευτήρα. Τέτοια υλικά είναι τα αργιλικά.
- 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).
- Τέλος, χρήση υλικών που είναι επιτόπου διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες. Συνεπώς, χρήση των υλικών των αναγκαίων εκσκαφών (π.χ. υλικά εκσκαφών για τον υπερχειλιστή), χρήση υλικών από τον ταμιευτήρα (αύξηση του όγκου του), μικρές απαιτήσεις χρήσης υλικών εκτός ταμιευτήρα (περιβαλλοντικοί όροι και κόστος μεταφοράς)

Τα γεωφράγματα είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος φράγματος καθώς αποτελούν το 75% επί του συνόλου των φραγμάτων παγκοσμίως (ICOLD) και κατασκευάζονται από τα κατά τόπους διαθέσιμα υλικά και σκοπός τους είναι η εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών των υλικών για να αποκτήσει το φράγμα τις ιδιότητες της αντοχής και της στεγανότητας. Η αντοχή βασίζεται στην τοποθέτηση των υλικών, τον συντελεστή εσωτερικής τριβής και την συνοχή τους. Η στεγανότητα επιτυγχάνεται από τη μη διαπερατότητα συγκεκριμένων τμημάτων. Σε αντίθεση με τα φράγματα από σκυρόδεμα το μεγάλο χαρακτηριστικό των γεωφραγμάτων είναι ότι συνιστούν μια εύκαμπτη μάζα, ανεκτική στις εδαφικές υποχωρήσεις. Το χαρακτηριστικό αυτό μετατρέπεται σε μεγάλο πλεονέκτημα στην περίπτωση θεμελιώσεων σε ασθενή εδάφη και σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

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

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

### ***Λιθόρριπτα φράγματα***

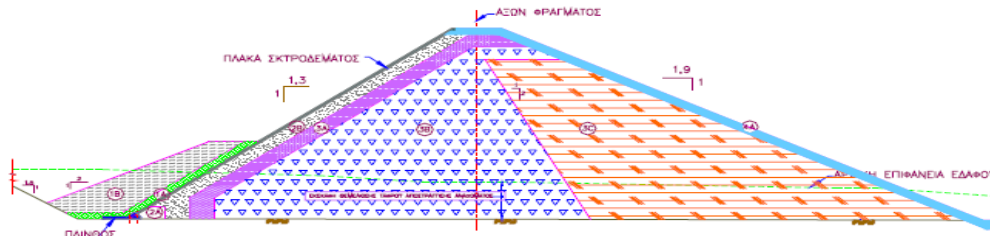
Τα λιθόρριπτα φράγματα κατασκευάζονται από βραχώδη υλικά, τα οποία είναι προϊόντα εκσκαφών βράχου ή προϊόντα λατομείου.

Οι τύποι των λιθόρριπτων φραγμάτων είναι:

## Εισαγωγή

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

### Φράγμα ΛΑΠΣ - Τυπική διατομή



Ζώνη 1Α – Ιλυώδες υλικό	Ζώνη 3Α – Μεταβατική ζώνη λιθορριπής
Ζώνη 1Β – Οτιδήποτε υλικό	Ζώνη 3Β – Λιθορριπή (υψηλή συμπίκνωση)
Ζώνη 2Α – Λεπτόκοκκο φίλτρο	Ζώνη 3C – Λιθορριπή (μέτρια συμπίκνωση)
Ζώνη 2Β – Φίλτρο Διαβαθμισμένο υλικό	Ζώνη 6 – Κατάντη ζώνη προστασίας Λίθοι ή κροκάλες

Σχήμα 1.7: Τυπική διατομή φράγματος ΛΑΠΣ (Πηγή: Μουτάφης, 2009)

## Χωμάτινα φράγματα

### Γενικά

Τα χωμάτινα φράγματα κατασκευάζονται από γαιώδη υλικά όπως είναι τα αργιλικά, τα αμμοχάλικα ποταμών, ο αποσαθρωμένος βράχος, τα πλευρικά κορήματα και υλικά λατομείου. Ένα χωμάτινο φράγμα κατασκευάζεται από επάλληλες στρώσεις που συμπυκνώνονται με μηχανικά μέσα. Το υλικό εκσκάπτεται από δανειοθαλάμους όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση του έργου για λόγους οικονομικούς και κατασκευαστικούς, πάντα όμως με περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Είναι σαφές ότι ο τύπος και γενικότερα ο σχεδιασμός του χωμάτινου φράγματος καθορίζονται από τα διαθέσιμα υλικά στην περιοχή. Η συμπίκνωση του υλικού γίνεται σε στρώσεις μικρού πάχους (30 με 50 εκατοστά) στην κατάλληλη υγρασία και γίνεται με τη χρήση οδοστρωτήρων, κατσκοπόδαρων και αυτοκινούμενων δονητών.

Υπάρχουν τρία είδη χωμάτινων φραγμάτων:

- Με διάφραγμα
- Ομογενή
- Ετερογενή ή κατά ζώνες

#### Χωμάτινα φράγματα με διάφραγμα

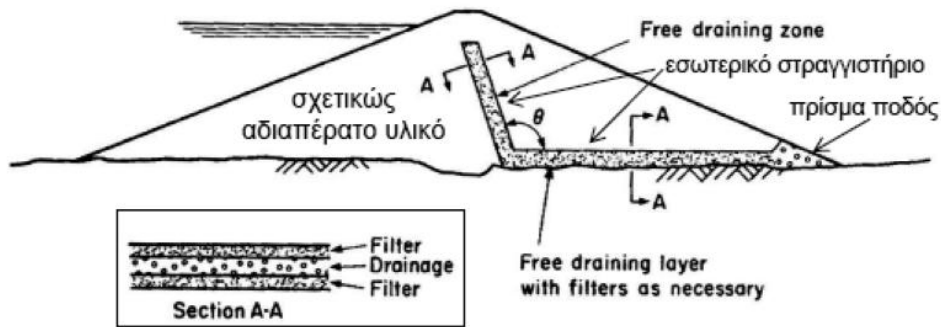
Τα φράγματα αυτού του τύπου κατασκευάζονται με διαπερατά υλικά (άμμο, χαλίκια, πέτρες, βράχους) και μια λεπτή μεμβράνη από αδιαπέρατο υλικό ( άργιλος, σκυρόδεμα ή ασφαλτοσκυρόδεμα). Το διάφραγμα αυτό στεγανοποίησης έχει πάχος μικρότερο των 3 m, καθώς σε διαφορετική περίπτωση το φράγμα εντάσσεται στο τύπο του ετερογενούς φράγματος.

Μεγάλη αδυναμία του φράγματος με διάφραγμα είναι η ευαισθησία των υλικών της αδιαπέρατης μεμβράνης στις μετατοπίσεις. Η λύση του φράγματος με διάφραγμα συνήθως επιλέγεται λόγω της έλλειψης αργλικού υλικού για την κατασκευή κανονικού αργλικού πυρήνα.

#### Ομογενή χωμάτινα φράγματα

Τα ομογενή χωμάτινα φράγματα κατασκευάζονται σε όλο σχεδόν τον όγκο τους από ένα είδος υλικού (εκτός από την προστασία πρανών και τα στραγγιστήρια) που πρέπει να χαρακτηρίζεται από ελάχιστη διαπερατότητα -πρακτικά μηδενική- (της τάξης του  $10^{-7}$  m/s). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί πρώτον με τη χρησιμοποίηση υλικού του οποίου η καμπύλη της κοκκομετρικής του διαβάθμισης είναι πλατιά και δεύτερον με μικρή κλίση πρανών (για να επιτευχθεί σταθερότητα σε περιπτώσεις απότομης πτώσης της στάθμης για το ανάντη πρανές και σε περιπτώσεις διήθησης όταν η στάθμη του ταμιευτήρα είναι υψηλή για το κατάντη πρανές).

Η μείωση του όγκου ενός ομογενούς φράγματος γίνεται με την τοποθέτηση στραγγιστηρίων με στόχο την εφαρμογή μεγαλύτερων κλίσεων.



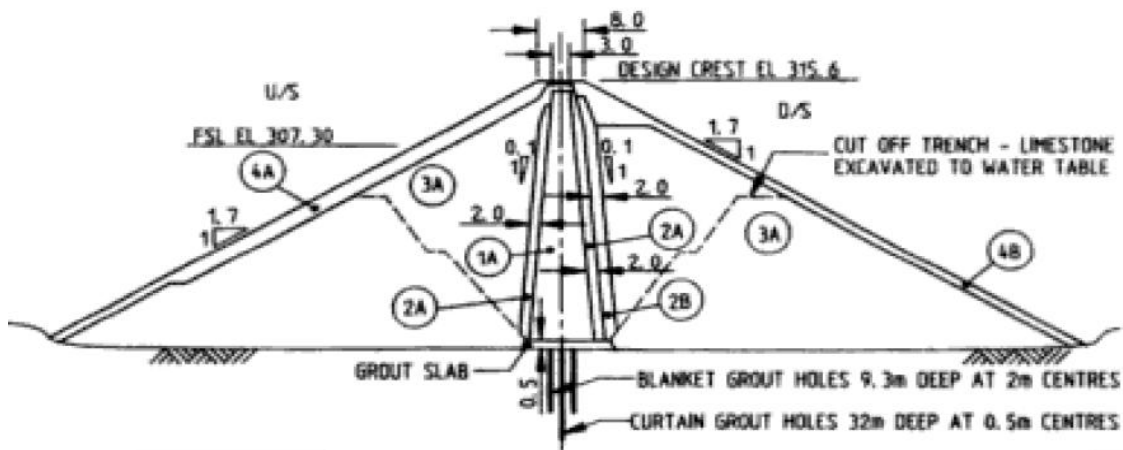
Σχήμα 1.8: Σχηματική διατομή ομογενούς φράγματος (Πηγή: Καββαδάς,2005)

Η κατασκευή των ομογενών χωμάτινων φραγμάτων δεν γίνεται κατά συνεχείς οριζόντιες στρώσεις, μέθοδος που θα διευκόλυne την κατασκευή, αλλά κατά ανισοϋψείς ζώνες για την αποφυγή δημιουργίας διαπερατών στρώσεων.

#### Ετερογενή φράγματα

Ο πιο συνηθισμένος τύπος γεωφράγματος είναι τα ετερογενή ή κατά ζώνες. Μια χαρακτηριστική διατομή αυτού του τύπου αποτελείται από μια ζώνη αδιαπέρατου υλικού (πυρήνας) η οποία ανάντη και κατόντη προστατεύεται από ημιπερατές μεταβατικές ζώνες (φίλτρα), ενώ το σώμα αντιστήριξης αποτελούν διαπερατά υλικά υψηλότερων αντοχών (κελύφη). Τα τμήματα αυτά λέγονται κελύφη ή στηρίγματα, γιατί συγκρατούν ουσιαστικά το αδιαπέρατο τμήμα του φράγματος και το προστατεύουν ανάμεσά τους.

Η λύση των διαζωνισμένων χωμάτινων φραγμάτων έχει προκύψει από το συνδυασμό των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών για την αδιαπερατότητα και την αντοχή τους φράγματος. Αν κατασκευαζόταν μόνο το αδιαπέρατο τμήμα ακόμα και με μικρό πάχος το νερό δεν θα μπορούσε να περάσει, ωστόσο το πάχος που θα καθοριζόταν πλέον από την γωνία τριβής του υλικού θα ήταν πολύ μεγάλο για να επιτευχθεί η ευστάθεια του έργου. Σπανίως, υπάρχει αυτή η διαθεσιμότητα σε αργιλικά υλικά και πολλές φορές ακόμα και αν υπάρχει το έργο γίνεται ανοικονομικό. Την κάλυψη του παράγοντα της ευστάθειας αναλαμβάνει το υλικό των σωμάτων αντιστήριξης, το οποίο είναι σαφώς πιο χονδρόκοκκο (μέχρι μεγέθους πέτρας και βράχων).



Ζώνη	Περιγραφή
1A	Πυρήνας
2A	Λεπτόκκοκο φίλτρο
2B	Χονδρόκκοκο φίλτρο (σταγγοστήριο)
3A	Σώμα στήριξης
4A	Ανάτη λιθορριπή προστασίας (rip-rap)
4B	Κατάτη λιθορριπή προστασίας (rip-rap)

Σχήμα 1.9: Χαρακτηριστική διατομή φράγματος κατά ζώνες. Bjelke-Petersen dam

(Πηγή: Επιτροπή Υδάτινων Πόρων του Queensland)

## 1.3 Φίλτρα

### 1.3.1 Γενικά

Η σημασία του φίλτρου σε ένα γεωφράγμα είναι καθοριστική για την ασφαλή λειτουργία του. Είναι ο συνδετικός κρίκος του στοιχείου στεγανοποίησης του φράγματος (πυρήνας) με τα σώματα αντιστήριξης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η έλλειψη απαραίτητων φίλτρων ή σφραγιστηρίων είναι υπεύθυνη για αστοχίες φραγμάτων ή για δυσλειτουργία τους. Μάλιστα, η ICOLD ( International Commission of Large Dams), ο μεγαλύτερος φορέας παγκοσμίως για την μελέτη και κυρίως την παρακολούθηση των μεγάλων φραγμάτων επισημαίνει ότι το 30% με 50% των αστοχιών που συμβαίνουν στα γεωφράγματα είναι συνδεδεμένο με φαινόμενα δυσλειτουργίας των φίλτρων (φαινόμενα διασωλήνωσης ή ανεπαρκής περατότητα). (ICOLD, 1994)

Στη δεκαετία που διανύουμε πολλά φράγματα περνούν σε ηλικίες που καθιστούν πεδίο αμφισβήτησης την σωστή λειτουργία τους και ανάγκη τον έλεγχο της κατάστασης των φίλτρων τους. Η ανάγκη παρακολούθησης της μεταβολή των ιδιοτήτων των φίλτρων συναρτήσει του χρόνου είναι έκδηλη με σκοπό την διατήρηση της ασφάλειας των γεωφραγμάτων σε υψηλές στάθμες παρά την αύξηση της ηλικίας τους.

Αυτό απαιτεί επιτόπου παρέμβαση για τη διαπίστωση των μηχανισμών λειτουργίας των φίλτρων και την κατάσταση, μηχανική και χημική, των υλικών τους. Επιπλέον περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι ανοίγουν το δρόμο για την έρευνα στον τομέα των υλικών που είναι κατάλληλα για χρήση ως φίλτρα.

Η βιβλιογραφία στον τομέα σχεδιασμού των φίλτρων είναι πλούσια με την προσφορά των μηχανικών του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Ωστόσο, τώρα είναι η ώρα αξιολόγησης της με βάση την μακροχρόνια λειτουργία των φίλτρων και η ώρα για την βελτιστοποίηση πάντα με την ταυτόχρονη διαβεβαίωση όλων των συνθηκών ασφαλείας του φράγματος.



Φίλτρα σε ένα φράγμα είναι οι μεταβατικές ζώνες, οι οποίες λειτουργούν με δύο σκοπούς. Πρώτον να εμποδίζουν την εσωτερική διάβρωση του εδαφικού υλικού (**λειτουργία συγκράτησης**) που προστατεύουν και δεύτερον να επιτρέπουν την υδατική ροή διαμέσω τους (**λειτουργία διαπερατότητας**). (Fell, 2005)

Αυτοί οι δύο ρόλοι καθορίζουν και το μέγεθος των κόκκων του φίλτρου καθώς πρέπει να είναι τόσο λεπτόκοκκο -σε σχέση με το υλικό το οποίο προστατεύει (υλικό του πυρήνα)- ώστε να καλύπτεται ο πρώτος σκοπός, και με κενά πόρων αρκετά μεγάλα ώστε να επιτρέπουν την υδατική ροή και να αποφεύγεται η ανάπτυξη υπερπιέσεων του νερού των πόρων.

Για να επιτυγχάνεται η διττή αυτή λειτουργία σύμφωνα με την ICOLD (1994) πρέπει να εξασφαλίζονται τα εξής:

- Να μην διαχωρίζεται κατά την επεξεργασία, την απόθεση, την διάστρωση και την συμπύκνωση.
- Να μην αλλάζει η κοκκομετρική του διαβάθμιση κατά την επεξεργασία, την απόθεση, την διάστρωση και την συμπύκνωση, ούτε με την πάροδο του χρόνου (π.χ μετά από μεταβολές συνθηκών ροής και θερμοκρασιών).
- Να μην παρουσιάζει συνεκτικότητα ή να μην συγκολλούνται οι κόκκοι μετά από φυσικο-χημικές, βιολογικές αντιδράσεις ώστε το υλικό να παρουσιάζει καταρρευσιμότητα και να κλείνει τις ρωγμές που μπορεί να εμφανιστούν.
- Να είναι εσωτερικά σταθερό, δηλαδή οι ίδιοι οι κόκκοι του φίλτρου να μην παρασύρονται από την υδατική ροή.
- Να έχει την απαιτούμενη διαπερατότητα (και αν πρόκειται για στραγγιστήριο και το απαιτούμενο πάχος) ώστε να καλύπτει τις παροχές ροής με τις οποίες δεν παρατηρείται ανάπτυξη υπερπιέσεων.
- Να έχει την ικανότητα να ελέγχει και να σταματά συγκεντρωμένη διαρροή από διάβρωση του πυρήνα.

Τα φίλτρα κατασκευάζονται από κοκκώδη υλικά ή από γεωφάσματα. Και τα δύο πρέπει να πληρούν τα δύο βασικά κριτήρια της συγκράτησης και της διαπερατότητας. Τα γεωφάσματα βέβαια δημιουργούν επιπλέον απαιτήσεις

## Εισαγωγή

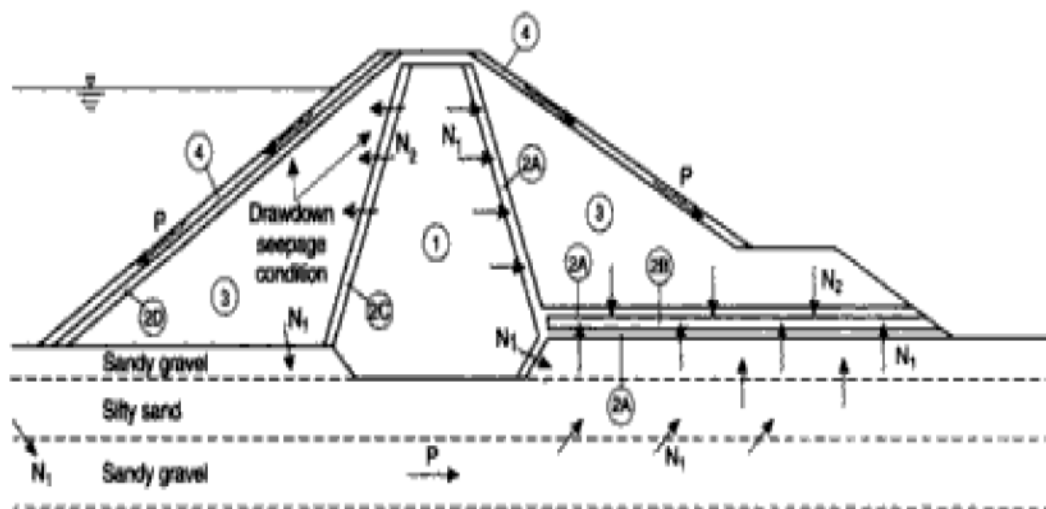
καθώς παρουσιάζουν ευαισθησία κατά την τοποθέτηση και την συντήρηση τους. Η πλειονότητα των φίλτρων είναι από κοκκώδη υλικά, καθώς η επιλογή των γεωφραγμάτων ήρθε πολύ αργότερα γύρω στην δεκαετία του 1970. Από τότε υπάρχει ανάπτυξη της χρήσης των γεωφασμάτων ως τύπος φίλτρου αλλά ακόμη ο πιο συνήθης τύπος είναι αυτός των κοκκώδων εδαφών λόγω τις τεράστιας τεχνογνωσίας και εμπειρίας που έχει αναπτυχθεί. Βέβαια, η απόφαση για τον τύπο φίλτρου σε κάθε περίπτωση έργου είναι συνάρτηση του κόστους, του διαθέσιμου εξοπλισμού και της τεχνογνωσίας των κατασκευαστών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΙΛΤΡΩΝ

### 2.1 Τύποι φίλτρων

Σε ένα φράγμα συναντιούνται διάφορα φίλτρα τα οποία χαρακτηρίζονται από τη λειτουργία και τη θέση τους.

Πριν όμως την παρουσίαση των κατηγοριών φίλτρων, σκόπιμο θα ήταν να αναφερθούν οι συνθήκες ροής που επικρατούν σε αυτά.



Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση συνθηκών ροής στα φίλτρα (Πηγή: Fell,2005)

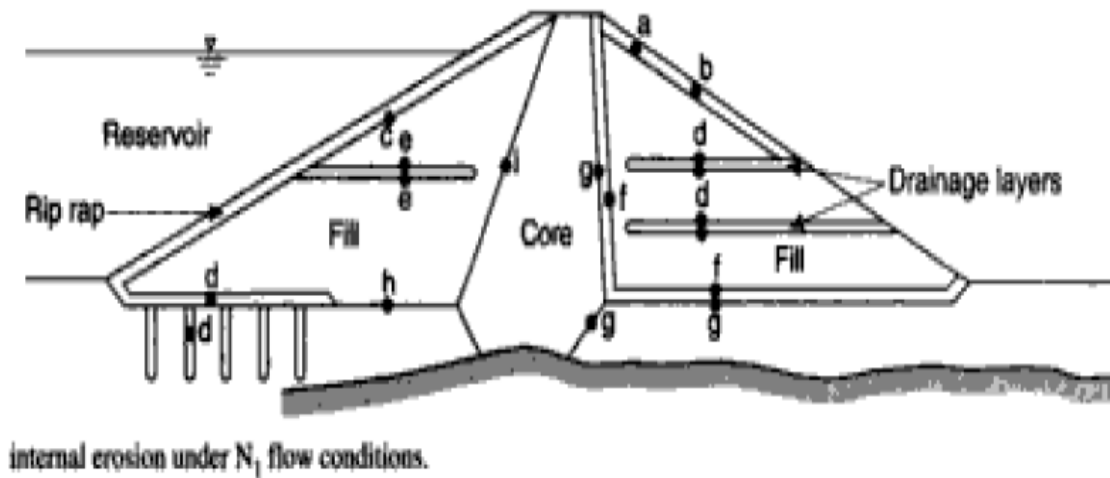
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι βασικές συνθήκες ροής μεταξύ φίλτρων και των υπόλοιπων σχηματισμών του φράγματος κυρίως του αργιλικού πυρήνα.

- $N_1$  : ροή κάθετη στην διεπιφάνεια των δύο στρώσεων με πιθανά μεγάλη υδραυλική κλίση. Το είδος αυτό ροής παρατηρείται μεταξύ πυρήνα-κατάντη φίλτρου, θεμελίωσης-στραγγιστηρίων και μεταξύ στρώσεων της θεμελίωσης.
- $N_2$  : ροή κάθετη στη διεπιφάνεια δύο στρώσεων με χαμηλή υδραυλική κλίση. Παρατηρείται μεταξύ πυρήνα και ανάντη φίλτρου σε περίπτωση υποβιβασμού της υδατικής στάθμης του ταμιευτήρα και σε περιπτώσεις αποστράγγισης του σώματος αντιστήριξης στα στραγγιστήρια.

- P: ροή παράλληλη στη διεύθυνση του φίλτρου. Κατά μήκος της επένδυσης προστασίας (rip-rap) και κατά μήκος των στρωμάτων θεμελίωσης.

### 2.1.1 Κρίσιμα και μη κρίσιμα φίλτρα

Στα φίλτρα στα οποία η υδραυλική κλίση είναι μεγάλη οι συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές για φαινόμενα διάβρωσης, αντίθετα με τα σημεία όπου το νερό κινείται κυρίως υπό την επίδραση της βαρύτητας. Σε περίπτωση που υπάρξει αστοχία στα πρώτα φίλτρα η πιθανότητα διασωλήνωσης είναι αυξημένη και η αστοχία ολόκληρου του φράγματος είναι πιθανή. Αυτά ονομάζονται **κρίσιμα** (critical) φίλτρα και σχεδιάζονται και κατασκευάζονται υπό αυστηρά κριτήρια για να αποφευχθεί πιθανότητα διάβρωσης. Αντίθετα, υπάρχουν **μη κρίσιμα** φίλτρα στα οποία η οποία αστοχία είναι επιδιορθώσιμη ή μπορεί να έχει προκληθεί μόνο λόγω λάθους στην κατασκευή.



Σχήμα 2.2: Λειτουργίες φίλτρων (Πηγή: ICOLD, 1986)

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μια σειρά από φίλτρα που μπορούν να εφαρμοστούν στα φράγματα και στον επόμενο πίνακα οι ιδιότητές τους όπως η θέση τους μέσα στην διατομή του φράγματος, την λειτουργία τους, τις συνθήκες ροής, την κρισιμότητά τους και την δυνατότητα επισκευής τους μετά από αστοχία.

Θέση φίλτρου	Σκοπός	Είδος ροής	Κρισιμότητα φίλτρου	Πρόσβαση για επισκευή
<b>a. Προστασία κατάντη πρανούς</b>	Έλεγχος διάβρωσης από το νερό της βροχής	P- περιστασιακή επιφανειακή ροή	Μη κρίσιμο	Εύκολη
<b>b. Κατάντη επιφανειακά στραγγιστήρια</b>	Αποστράγγιση επιφανειακής ροής	P- συνεχής ή περιστασιακή ροή	Μη κρίσιμο. Πιθανή τοπική επανεμφάνιση υγρών περιοχών	Εύκολη, δυνατή
<b>c. Ανάντη προστασία πρανούς</b>	Έλεγχος της διάβρωσης από τα κύματα της λίμνης και από την ροή λόγω απότομου υποβιβασμού της στάθμης	P- ανακυκλική ροή λόγω της κυματικής δράσης N <sub>2</sub> -μικρή ροή λόγω υποβάθμισης στάθμης	Συνήθως μη κρίσιμο	Δυνατή αλλά μάλλον δύσκολη
<b>d. Προσωρινή εσωτερική στραγγισση</b>	Αποτόνωση των υπερπείσεων πόρων	N <sub>2</sub> -Προσωρινή ροή, περιορισμένη με μικρή μεταφορά λεπτόκοκκων επιτρεπτή αν δεν μπλοκάρουν τα σταγγιστήρια	Μη κρίσιμη. Αστοχία μπορεί να προκαλέσει αστάθεια κατά την κατασκευή ή καθυστερήσεις	Καμία
<b>e. Ανάντη φίλτρο σώματος</b>	Εμποδίζει την μη αποδεκτή μετακίνηση λεπτόκοκκων προς τα ανάντη	N <sub>2</sub> - Παροδική και μικρή ροή κατά την διάρκεια υποβιβασμού της στάθμης	Μη κρίσιμη. Σημαντική μόνο η ροή υλικού είναι μεγάλη και συνεχής	Καμία
<b>f. Κατάντη εσωτερικό σταγγιστήριο</b>	Εμποδίζει την μεταφορά λεπτόκοκκων στα στραγγιστήρια	N <sub>2</sub> - ροή μόνο λόγω φιλτραρίσματος των νερών της βροχής και όχι από τον ταμιευτήρα ή την θεμελίωση	Κρίσιμα, μα μόνο όταν η διάβρωση είναι μεγάλη και συνεχής	Καμία

<b>g. Κατάντη φίλτρο προστασίας πυρήνα ή θεμελίωσης</b>	Προστασία από εσωτερική διάβρωση του πυρήνα συμπεριλαμβανομένης της συγκεντρωμένης ροής σε ρωγμές	N <sub>1</sub> - Συνεχής ροή από τον ταμιευτήρα πιθανώς μεγάλη και αυξανόμενη σε περιπτώσεις διάβρωσης	Κρίσιμα	Καμία
<b>h. Ανάντη διεπιφάνεια μεταξύ φράγματος και θεμελίωσης</b>	Προστασία του πυρήνα από διάβρωση προς την θεμελίωση	N <sub>1</sub> - Συνεχής ροή από τον ταμιευτήρα πιθανώς μεγάλη και αυξανόμενη σε περιπτώσεις διάβρωσης	Κρίσιμα	Καμία
<b>i. Ανάντη εσωτερικό όριο πυρήνα</b>	Προστασία από την μετακίνηση λεπτόκοκκου υλικού από τον πυρήνα	N <sub>2</sub> -συνήθως πλησιάζει την N <sub>1</sub> για αντλιοταμιευτήρες	Κρίσιμα, μα μόνο για μεγάλη και συνεχή διάβρωση	Καμία

Πίνακας 2.1 : Κρίσιμα και μη κρίσιμα φίλτρα σύμφωνα με την ICOLD (1986)

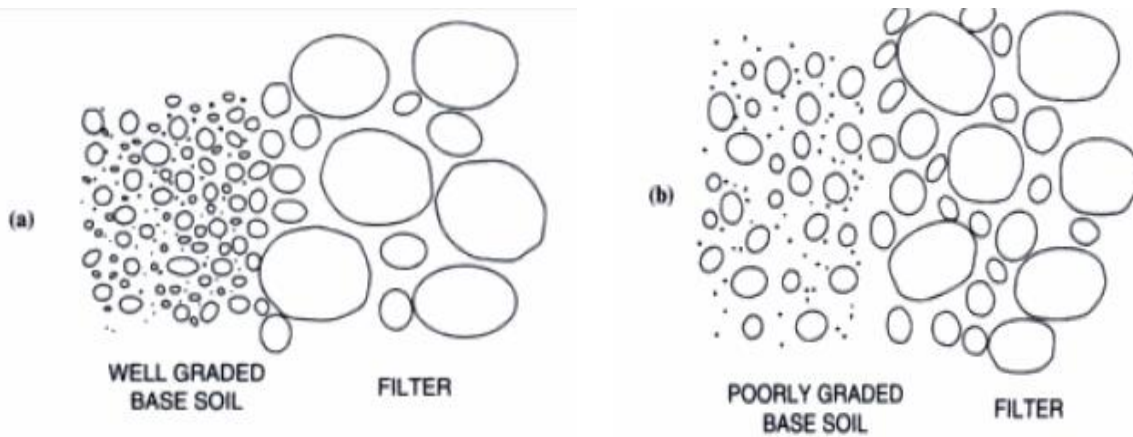
## 2.2 Φίλτρα, χρήσιμες έννοιες και φιλοσοφία σχεδιασμού

Ο βασικός σκοπός του φίλτρου είναι να εμποδίσει την μεταφορά λεπτόκοκκου υλικού από τον πυρήνα. Για αυτό το λόγο η κοκκομετρική του διαβάθμιση πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα κενά πόρων που προκύπτουν να είναι τόσο μικρά που να μην επιτρέπουν τη διάβρωση.



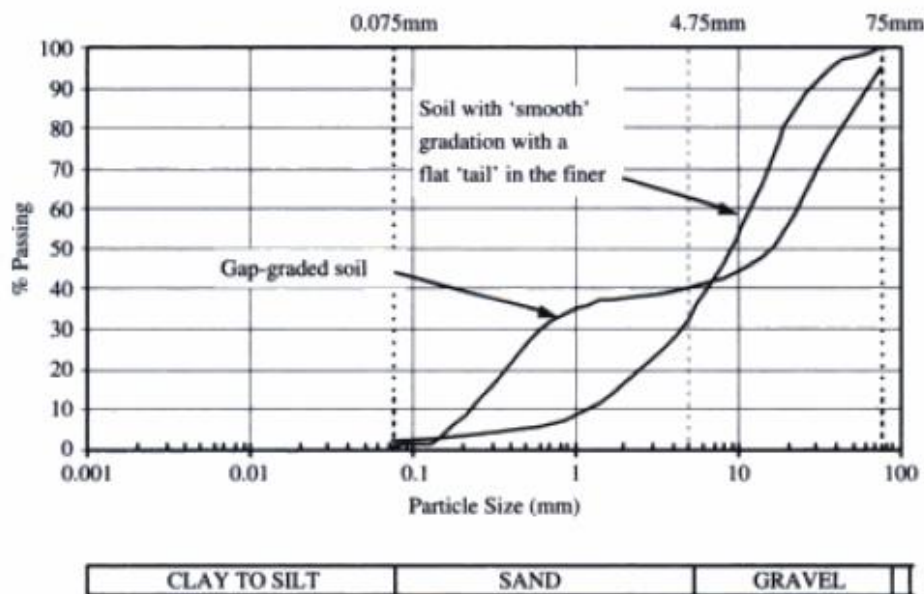
Σχήμα 2.3: Κίνηση του υλικού του πυρήνα μέσα από το φίλτρο σε περίπτωση διάβρωσης (Πηγή: S. Shahab Yasrobi και Ali Azad, Tarbiat Modares University )

Το μέγεθος των κενών για τα φίλτρα ελέγχεται από τα πιο λεπτά σωματίδια, και συνήθως για να καθοριστεί χρησιμοποιείται το μέγεθος  $D_{15F}$ , δηλαδή η διάμετρος κόκκου την οποία δεν ξεπερνά το 15% κατά βάρος του υλικού του φίλτρου. Έχει δειχθεί ότι για τα κοκκώδη εδάφη το μέγεθος των πόρων μεταξύ των κόκκων παίρνει περίπου την τιμή  $O_E = D_{15}/9$  (Sherard, 1984α) και επιβεβαιώθηκε αργότερα από τον Foster (1999). Ένας δεύτερος μηχανισμός πολύ χρήσιμος ενάντια στη διάβρωση είναι το αυτό-φιλτράρισμα (self-filtering) του υλικού του πυρήνα. Οι μεγάλοι κόκκοι του υλικού του πυρήνα εμποδίζουν τους μεσαίου μεγέθους κόκκους και αυτοί με τη σειρά τους, τους μικρούς κόκκους. Αυτό συμβαίνει όταν το υλικό του πυρήνα είναι καλά διαβαθμισμένο. Αντίθετα, όταν το υλικό δεν είναι καλά διαβαθμισμένο (υπάρχουν «πλατό» στην κοκκομετρική του καμπύλη) υπάρχει έλλειψη σε μεσαίου μεγέθους κόκκους και η λειτουργία του αυτό-φιλτραρίσματος δεν είναι εφικτή, με



Σχήμα 2.4: (a) αυτό-φιλτράρισμα καλώς διαβαθμισμένου υλικού, (b) κακώς διαβαθμισμένο υλικό που δεν μπορεί να αυτό-φιλτραριστεί. (Πηγή: Fell, 2005)

αποτέλεσμα την εσωτερική διάβρωση (internal erosion). Σε αυτήν την περίπτωση το φίλτρο με την κοκκομετρία του καλείται να σταματήσει το λεπτόκοκκο υλικό που παρασύρεται από τη ροή.



Σχήμα 2.5: Εδάφη επιρρεπή σε εσωτερική διάβρωση λόγω της βαθμωτής κοκκομετρικής διαβάθμισης τους (Πηγή: Fell, 2005)



Μεγέθη χαρακτηριστικά για τη διάμετρο κόκκων του πυρήνα στην βιβλιογραφία είναι τα  $D_{85B}$ ,  $D_{95B}$ ,  $D_{50B}$  με πιο διαδεδομένο το  $D_{85B}$ . Άλλος συμβολισμός συνήθης στην βιβλιογραφία είναι ο  $d_{85}$ .

### 2.2.1 Εσωτερική διάβρωση

Αναλυτικότερα, εσωτερική διάβρωση (internal erosion) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο γίνεται η απεμπλοκή σωματιδίων του υλικού από τα γειτονικά τους και η μεταφορά τους με την βοήθεια της υδατικής ροής μέσω των κενών των πόρων. Η απεμπλοκή ενός σωματιδίου γίνεται όταν κάποια δύναμη (υδατική πίεση) μπορέσει να υπερβεί την δύναμη που ασκούν τα γειτονικά του σωματίδια και η μεταφορά του προϋποθέτει την ύπαρξη μιας δύναμης ανύψωσης της τάξης του υπό άνωση βάρους του κόκκου. Είναι σαφές λοιπόν ότι η εξάπλωση της εσωτερικής διάβρωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- η ευπάθεια του υλικού ( αδυναμία να σταματήσει την εσωτερική διάβρωση λόγω πχ εσωτερικής αστάθειας, ή ασυμβατότητας διαβάθμισης πυρήνας και φίλτρου)
- ένα κρίσιμο υδραυλικό φορτίο (μεγάλες ταχύτητες και υδραυλικές κλίσεις)
- κρίσιμες συνθήκες φόρτισης (χαμηλές τάσεις ή επενέργεια τασικών θόλων)

Η μορφή της εξάπλωσης της διάβρωσης καθορίζεται από το συνδυασμό των τριών αυτών παραγόντων (Garner and Fannin, 2010).

Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα στάδια της εσωτερικής διάβρωσης είναι τα ακόλουθα: έναρξη, συνέχεια, εξάπλωση και τελικά πλήρης διάβρωση (ξέπλυμα του υλικού) (Fell and Fry, 2007)

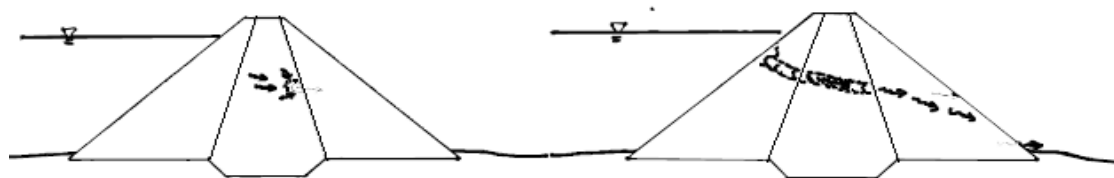
Η *έναρξη* της εσωτερικής διάβρωσης μπορεί να εκδηλωθεί μέσω τριών μορφών:

- ανάστροφη διάβρωση και διασωλήνωση
- διάβρωση λόγω συγκεντρωμένης διαρροής
- διάβρωση λόγω εσωτερικής αστάθειας του υλικού

Η εσωτερική διάβρωση γενικά μπορεί να αρχίσει για διάφορους λόγους, αλλά το πιο σύνηθες αίτιο είναι η επιδεκτικότητα του υλικού σε διάβρωση. Αυτή οφείλεται στην διαβάθμιση του υλικού ή κατά την κατασκευή και τον σχεδιασμό του έργου (πχ διαχωρισμός, χαμηλές τάσεις λόγω φαινομένου θόλου ή ρωγμών, ασυμβατότητα πυρήνα και φίλτρου) (Garner and Fannin (2010), Nilsson and Rönqvist (2004)).

Η *συνέχεια* της διάβρωσης μπορεί να εμποδιστεί από την ικανότητα του υλικού να αυτό-φιλτράρεται ή από την παρουσία του κατάλληλου φίλτρου κατάντη το οποίο θα συγκρατήσει το υλικό. Επίσης, και το ανάντες φίλτρο παίζει ρόλο στην εμπόδιση της διάβρωσης καθώς η ιδιότητα του υλικού του φίλτρου να κλείνει τα κενά και τις ρωγμές που αναπτύσσονται μπορούν να λειτουργήσουν καταλυτικά. Σε περίπτωση που δεν λειτουργήσουν αυτοί οι αμυντικοί, ως προς τη διάβρωση, μηχανισμοί η διάβρωση θα συνεχιστεί. Μάλιστα σύμφωνα με τον Sherard (1979) όταν ο όγκος του διαβρωμένου λεπτόκοκκου υλικού είναι μεγαλύτερος από τον όγκο των κενών μεταξύ των χονδροκόκκων μπορεί να συμβεί προοδευτική κατάρρευση.

Η ανάστροφη διάβρωση είναι μορφή έναρξης της διάβρωσης όπου έχουμε αποκόλληση υλικού από ελεύθερη επιφάνεια που δεν φιλτράρεται σωστά (πχ διεπιφάνεια πυρήνα-κατάντη υπερβολικά χονδροκόκκου φίλτρου, ή υλικό δίπλα στο στραγγιστήριο του πόδα για τα ομογενής φράγματα) και εξάπλωση της διάβρωσης προς τα ανάντη προς την πηγή της υδατικής ροής. Για να δημιουργηθούν συνθήκες αντίστροφης διάβρωσης απαιτείται υψηλή υδραυλική κλίση εξόδου προς την ελεύθερη επιφάνεια (Fell *et al.*, 2007).

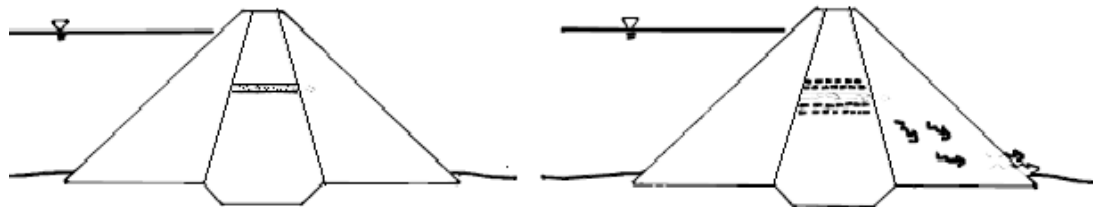


Σχήμα 2.6: Έναρξη, συνέχεια και εξάπλωση αντίστροφης διώβρωσης σε φράγμα

(Πηγή: Foster and Fell, 1999b)

Ο συνήθης χρόνος ανάπτυξης του φαινομένου είναι της τάξης μηνών ή χρόνων, ωστόσο μπορεί να γίνει και πολύ πιο γρήγορα (πχ ώρες ή μέρες) όταν πρόκειται για συγκεντρωμένη διαρροή. Η ασυμβατότητα των διαβαθμίσεων του πυρήνα και του φίλτρου και το πορώδες του πυρήνα είναι παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο χρόνο ανάπτυξης του φαινομένου (Wörman and Olafsdottir, 1992). Η ταυτόχρονη συνεχής υδατική ροή στα κενά που ανοίγει η διάβρωση οδηγεί στη διασωλήνωση του φράγματος (Garner and Fannin, 2010).

Διάβρωση λόγω συγκεντρωμένης διαρροής συμβαίνει σε σχηματισμένες ρωγμές όπου διαβρώνεται το υλικό ή σε περατές συνεχείς ζώνες χονδρόκοκκου ή μη σωστά συμπυκνωμένου υλικού (Fell and Fry, 2007). Για να γίνει έναρξη της συγκεκριμένης διάβρωσης χρειάζεται οι υδατικές πιέσεις να υπερνικήσουν την διατμητική αντοχή του υλικού. Ανεξάρτητα από το πόσο χονδρόκοκκο είναι το υλικό ή ποιά είναι η υδραυλική κλίση, ο Sherard (1979) υποστηρίζει ότι τα λεπτόκοκκα είναι ουσιαστικά αδύνατον να «ξεπλυθούν» από ένα πυρήνα αν δεν υπάρχει συγκεντρωμένη διαρροή καθώς οι κανονικές συνθήκες ροής δεν διαθέτουν την απαραίτητη ενέργεια.



Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση διάβρωσης μέσω συγκεντρωμένης διαρροής

(Πηγή: Foster and Fell, 1999b)

Η συγκεντρωμένη διαρροή μπορεί να οφείλεται σε αστοχίες κατά την κατασκευή, σε ασυνέχειες οφειλόμενες στην υδατική πίεση, σε ρωγμές λόγω διαφορικών καθιζήσεων, κατά μήκος της θεμελίωσης, ενσωματωμένων κατασκευών από σκυρόδεμα (Sherard *et al.*, 1984a), ή ακόμα και σε στρώσεις πάγου που έχουν δημιουργηθεί κατά την διάστρωση του υλικού (Vuola *et al.*, 2007).

Ο Sherard *et al.* (1984a) ορίζει ως στοιχεία ύπαρξης συγκεντρωμένης διαρροής σε φράγμα τα εξής:

- Υδατική παροχή στα κατάντη ομογενούς φράγματος λίγο μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα.
- Υψηλή πιεζομετρική γραμμή κατάντη του αδιαπέρατου πυρήνα σε φράγματα με ζώνες
- Εμφανείς ροή στον πόδα φραγμάτων με κεντρικό πυρήνα

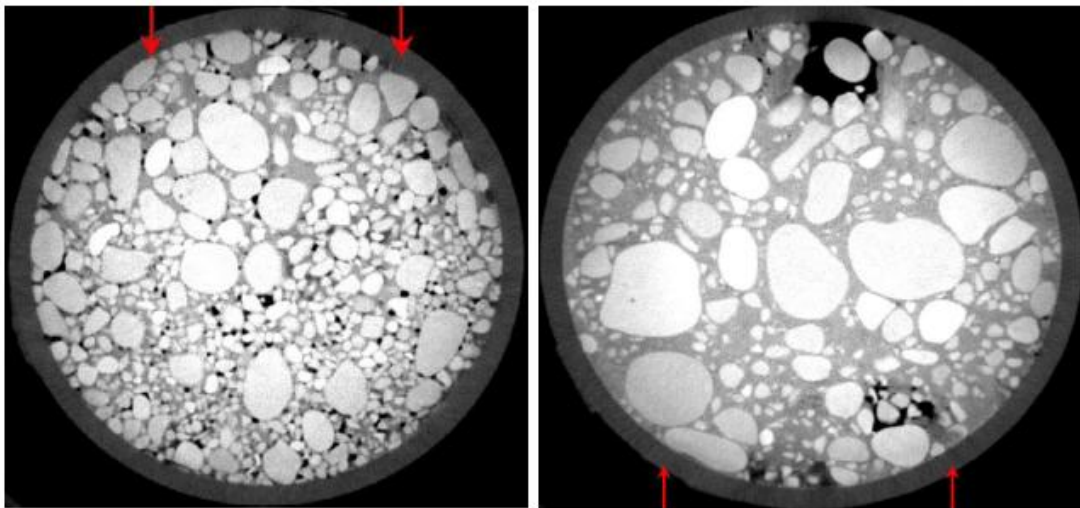
Ένα ακόμη πρόβλημα που δημιουργεί μια συγκεντρωμένη διαρροή είναι ότι το υλικό που παρασύρεται συσσωρεύεται στην επιφάνεια του φίλτρου σχηματίζοντας μια «κρούστα» (filter skin) εμποδίζοντας την σωστή αποστράγγιση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων (Peck 1990).

Ο μηχανισμός μιας συγκεντρωμένης διαρροής περιγράφεται από τον Sherard (1983):

1. Η διαρροή αναπτύσσεται και μεταφέρει σωματίδια όλων των μεγεθών προς το φίλτρο
2. Οι κόκκοι άμμου εγκλωβίζονται στα κενά του φίλτρου ενώ τα λεπτόκοκκα προχωρούν μέσα στο φίλτρο, σφραγίζοντάς το σιγά σιγά
3. Με το φίλτρο να μην λειτουργεί έχουμε ανάπτυξη υπερπιέσεων και η πιεζομετρική γραμμή ανεβαίνει στο ύψος της στάθμης του ταμιευτήρα
4. Δημιουργούνται υψηλές υδραυλικές κλίσεις στον πυρήνα με ροή προς παραπλήσια σημεία του φίλτρου που δεν έχουν σφραγιστεί
5. Η διαρροή οδηγείται από την υψηλή υδραυλική πίεση προς τη νέα κατεύθυνση παρακάμπτοντας την αρχική διαρροή
6. Επαναλαμβάνεται το άνωθεν σενάριο μετά από κάθε περιοχή που σφραγίζεται από υλικό

Αν το φίλτρο δεν μπορεί να αντέξει μεγάλες υδατικές πιέσεις η επαναλαμβανόμενη αυτή διαδικασία ουσιαστικά καταστρέφει τον πυρήνα και σφραγίζει το φίλτρο σε μεγάλες περιοχές.

Εσωτερική αστάθεια είναι ένας ακόμη πιθανός μηχανισμός έναρξης της εσωτερικής διάβρωσης, επιλεκτικής αυτή τη φορά, καθώς παρασύρει τα λεπτόκοκκα υλικά αφήνοντας πίσω ένα εδαφικό σκελετό από τα χονδροκόκκα (Fell and Fry, 2007) . Οι Garner and Fannin (2010) έδειξαν ότι το ξεκίνημα της αστάθειας προκαλείται από την αύξηση της υδραυλικής κλίσης, η οποία είναι επακόλουθο της αλληλεπίδρασης της ευπάθειας του υλικού και του κρίσιμου υδραυλικού φορτίου που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Μετά από δοκιμές ο Li (2008) απέδωσε την αστάθεια στην κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού σε συνδυασμό με τις ενεργές τάσεις και την υδραυλική κλίση. Οι Garner and Fannin (2010) συνέδεσαν την εσωτερική αστάθεια με την επιρροή του χρόνου και ο Fell *et al.*(2003) υπολόγισε ότι ο χρόνος ανάπτυξης του φαινομένου είναι της τάξης μηνών ή χρόνων.

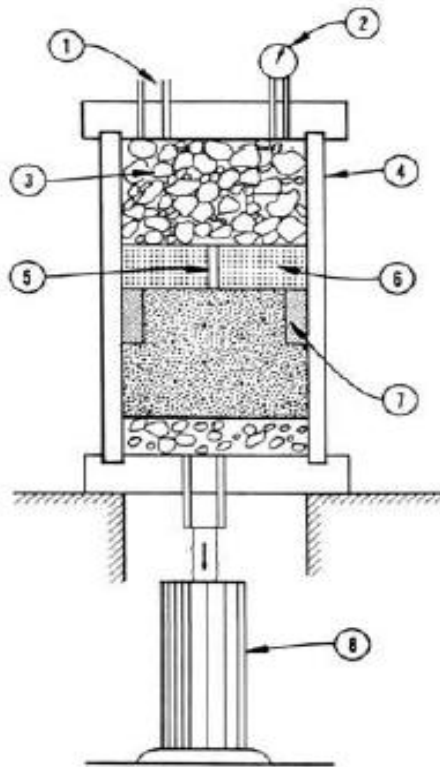


Σχήμα 2.8: Πειραματική δοκιμή από την οποία προκύπτει σύγκριση της διάβρωσης από εσωτερική αστάθεια (αριστερά) και ανάστροφη διάβρωση (δεξιά) (Πηγή:

Garner 2010)

### 2.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι κατάλληλες καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης προέκυψαν μετά από πειραματικές δοκιμές όπως η επόμενη που αναπτύχθηκε από την U.S Soil Conservation Service.



Σχήμα 2.9: Εργαστηριακή διάταξη no erosion filter test της USSCS (Πηγή: ICOLD 1994)

- 1) Παροχή νερού με υψηλή πίεση
- 2) Μετρητής πίεσης
- 3) Καθαροί χάλικες
- 4) Πλαστικός κύλινδρος (100 mm για λεπτόκοκκα και 280 mm για χονδρόκοκκα εδάφη)
- 5) Προσηματισμένη οπή στο υλικό πυρήνα (1 mm διάμετρος για λεπτόκοκκα και 5 με 10 mm για χονδρόκοκκα εδάφη)
- 6) Συμπυκνωμένο μη περατό δείγμα υλικού πυρήνα ( 25 mm πάχος για λεπτόκοκκα και 100 mm για χονδρόκοκκα)
- 7) Πλευρικό υλικό (άμμος λεπτότερη από αυτή του

φίλτρου)

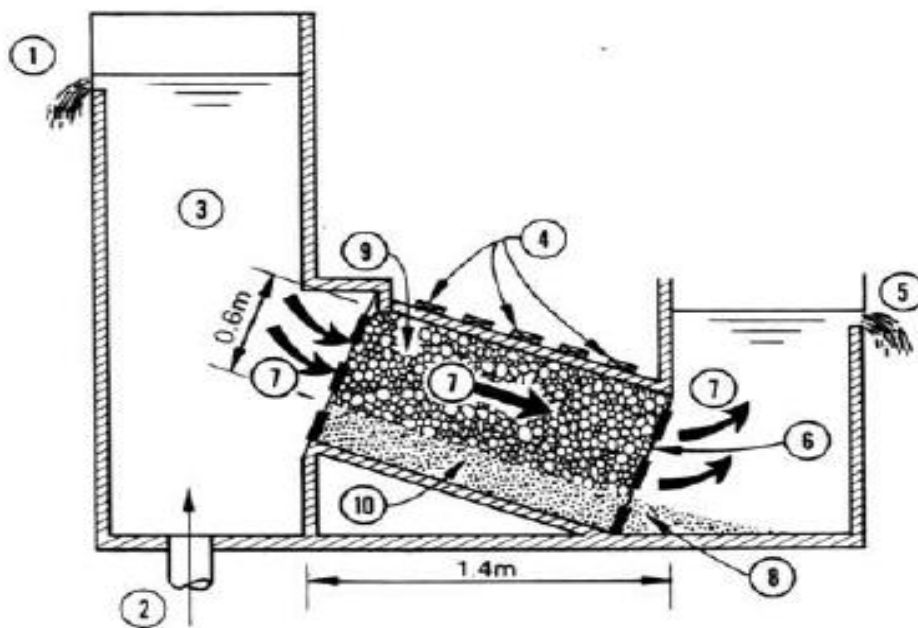
- 8) Διαβαθμισμένος κύλινδρος για μέτρηση του ρυθμού ροής

Μετά από άδεια της ASCE η δοκιμή πραγματοποιήθηκε ξανά το 1985 από τους Sherard και Dunnigan.

Στην παραπάνω διάταξη το υλικό του πυρήνα έχει διατηρηθεί στο κέντρο του, με την προσηματισμένη οπή να παίρνει το ρόλο της συγκεντρωμένης διαρροής στις συνθήκες του φράγματος. Κάτω από την πίεση του νερού (μεγάλη υδραυλική κλίση), το φίλτρο καλείται να συγκρατήσει το υλικό που παρασύρεται και να εμποδίσει την διάβρωση ή να την κρατήσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Οι επαναλήψεις αυτού του τύπου πειραμάτων έδωσαν τις ενδεικνυόμενες

κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης για το υλικό του φίλτρου. Βέβαια η παραπάνω διάταξη αφορά συνθήκες ροής κάθετης στην διεπιφάνεια πυρήνα-φίλτρου.

Για συνθήκες ροής παράλληλες στον διεύθυνση του φίλτρου αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Delft από τον Bakker (1990) η ακόλουθη διάταξη



Σχήμα 2.10: Πειραματική διάταξη Bakker για συνθήκες παράλληλης ροής (Πηγή:ICOLD, 1994)

## 2.4 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση φίλτρων, κυρίως ομοιόμορφων, ήταν γνωστή στους μηχανικούς ήδη από τον 19ο αιώνα με βασική χρήση τον καθαρισμό του νερού (Baylis, 1959). Στον τομέα των φραγμάτων το 1910 ο Bligh πρότεινε εμπειρικούς κανόνες σχεδιασμού, ωστόσο, η βάση της λογικής σχεδιασμού των φίλτρων μπήκε από τον Terzaghi το 1922 με τα πασίγνωστα κριτήριά του, που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.

### 2.4.1 Terzaghi (1922)

Ο Terzaghi ασχολήθηκε με τους μηχανισμούς αστοχίας, με όρους γεωτεχνικής μηχανικής χρησιμοποιώντας τα δίκτυα ροής, την ανάπτυξη υπερπιέσεων στον κατάντη πόδα της κατασκευής και τα φαινόμενα διασωλήνωσης. Προχώρησε στην διατύπωση των κριτηρίων και εξήγησε το ρόλο των φίλτρων στη συγκράτηση του υλικού του πυρήνα και την ταυτόχρονη αποτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων.

Με τα κριτήριά του έδωσε μορφή αναλογίας στις δύο βασικές λειτουργίες του φίλτρου, αυτήν της συγκράτησης για την οποία πρέπει να ισχύει:

$$D_{15F}/d_{85B} < 4$$

και αντίστοιχα αυτήν της διαπερατότητας για την οποία πρέπει να ισχύει:

$$D_{15F}/d_{15B} > 4$$

όπου  $D_{\alpha}$ : το μέγεθος κόκκου του υλικού από το οποίο το  $\alpha\%$  ποσοστό κατά βάρος είναι μικρότερο.

Οι αναλογίες του Terzaghi έχουν εξετασθεί πειραματικά και θεωρητικά μέχρι σήμερα και παραμένουν ακόμα ένας χρήσιμος κανόνας σχεδιασμού, με διαφοροποιήσεις βέβαια ανάλογα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Άλλωστε, οι αναλογίες αυτές έχουν προκύψει από πειράματα και θεωρητικές σκέψεις του Terzaghi σε ομοιόμορφα εδάφη (Cassagrande, 1937).



### 2.4.2 Η μέθοδος της USBR (1977)

Το U.S Bureau of Reclamation, ο μεγαλύτερος φορέας υδραυλικών έργων στις δυτικές πολιτείες των ΗΠΑ, ανέπτυξε την ακόλουθη μέθοδο σχεδιασμού εκφραζόμενη με πέντε κριτήρια:

- 1) (a)  $D_{15F}/D_{15B} = 5$  έως 40 δεδομένου ότι (b) το φίλτρο περιέχει το πολύ 5% λεπτόκοκκα (περνούν το κόσκινο των 0.075 mm), τα οποία δεν είναι συνεκτικά
- 2)  $D_{15F}/D_{85B} \leq 5$
- 3) η κοκκομετρική καμπύλη του φίλτρου να είναι ελαφρώς παράλληλης της καμπύλης του πυρήνα
- 4) ο μέγιστος κόκκος να είναι 75mm για την αποφυγή του φαινομένου του διαχωρισμού κατά την κατασκευή
- 5) σε υλικό πυρήνα το οποίο περιέχει και μεγάλους χάλικες η κοκκομετρική ανάλυση πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη το υλικό κάτω του μεγέθους των 4,7mm

(Πηγή: Fell, 2005)

Η αναλογία  $D_{15F}/D_{15B} \geq 5$  εξασφαλίζει ότι το φίλτρο θα είναι πιο περατό από τον πυρήνα, ενώ το δεύτερο και το τρίτο κριτήριο καθώς και το χαμηλό μη συνεκτικό ποσοστό λεπτόκοκκων διασφαλίζουν τον έλεγχο πιθανής διάβρωσης.

Η μέχρι τώρα εμπειρία πάνω στην μέθοδο έχει δείξει ότι η μέθοδος εφαρμόζεται ικανοποιητικά όταν το υλικό πυρήνα είναι αργιλώδεις άμμοι ή αμμώδεις άργιλοι, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ αργιλικά υλικά με περιεκτικότητα ιλύος.

Μάλιστα:

- Το τρίτο κριτήριο (ελαφρώς παράλληλη καμπύλη διαβάθμισης) δεν μπορεί να ακολουθηθεί (Sherard and Dunnigan, 1985) και
- το κριτήριο 1b σχεδόν πάντα υπερیشύει του 1a, κάτι που γίνεται αποδεκτό (Fell 2005)

Γενικότερα, πλέον η μέθοδος δεν ακολουθείται ούτε από το USBR πλέον.

### 2.4.3 Vaughan και Soares (1982)

Η έρευνα πάνω στα φίλτρα από τους δύο ερευνητές ξεκίνησε με αφορμή την αστοχία στο φράγμα του Balderhead και ενόψει της κατασκευής ενός νέου φράγματος με παρόμοια υλικά, του φράγματος Cow Green.

*Φράγμα Balderhead:* το φράγμα δύο μήνες μετά από την πλήρωσή του, τον Απρίλιο του 1967, εμφάνισε απότομο καταβιβασμό της στάθμης του κατά 9 m. Η έρευνα έδειξε ότι πριν την πλήρωση ακόμα, είχε δημιουργηθεί ρωγμή στον πυρήνα και σαν αποτέλεσμα της συνεχούς μετακίνησης υλικού μέσω της ροής ήταν το φαινόμενο της πλήρους διασωλήνωσης. Η υδραυλική κλίση δεν ήταν τόσο μεγάλη ώστε να παρασύρει χονδρόκοκκο υλικό και συνεχώς η ρωγμή γέμιζε με λεπτόκοκκη άργιλο. Το υλικό του πυρήνα που χρησιμοποιήθηκε ήταν άργιλος και μοραίνη (morain) (διαθέσιμα στην περιοχή) και για το φίλτρο χρησιμοποιήθηκαν θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή. Το φίλτρο λειτουργούσε ικανοποιητικά για συνθήκες άρρηκτου πυρήνα, αλλά δεν μπόρεσε να αντιμετωπίσει την συγκεντρωμένη διαρροή υλικού που λόγω της ρωγμής.

Ο Vaughan και ο Soares με αρχή την κατασκευή του φράγματος Cow Green με παρόμοια υλικά πυρήνα στράφηκαν στην έρευνα προτείνοντας την έννοια του «τέλειου φίλτρου». Η βασική ιδέα της προσπάθειας αυτής είναι το φίλτρο να μπορεί να εμποδίζει ακόμα και το μικρότερο σωματίδιο που ελευθερώνεται από την διάβρωση του υλικού.

Οι δυο ερευνητές έλαβαν υπόψη τους στα πειράματά τους την χημεία του νερού, η οποία καθορίζει το μέγεθος του μικρότερου σωματιδίου. Η κοκκομετρικές καμπύλες προέκυψαν μετά από τη χρήση υδρόμετρου (χωρίς αραιωτικές ουσίες) για την μέτρηση των μικρότερων αργιλικών κροκίδων.

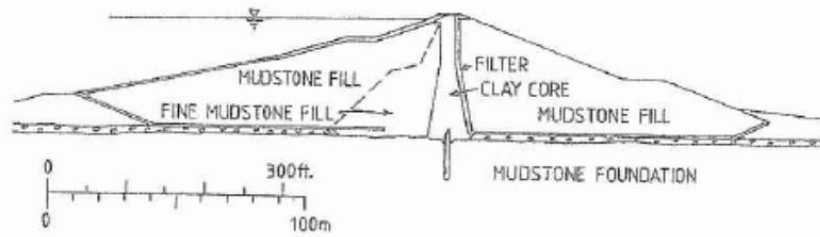


FIG. 1.—Balderhead Dam: Cross-Section

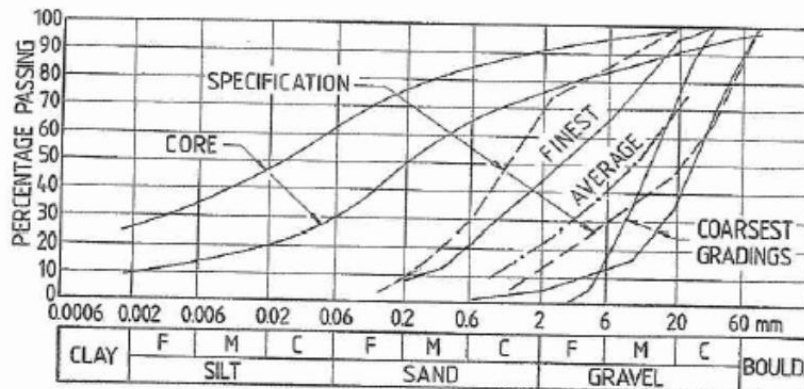
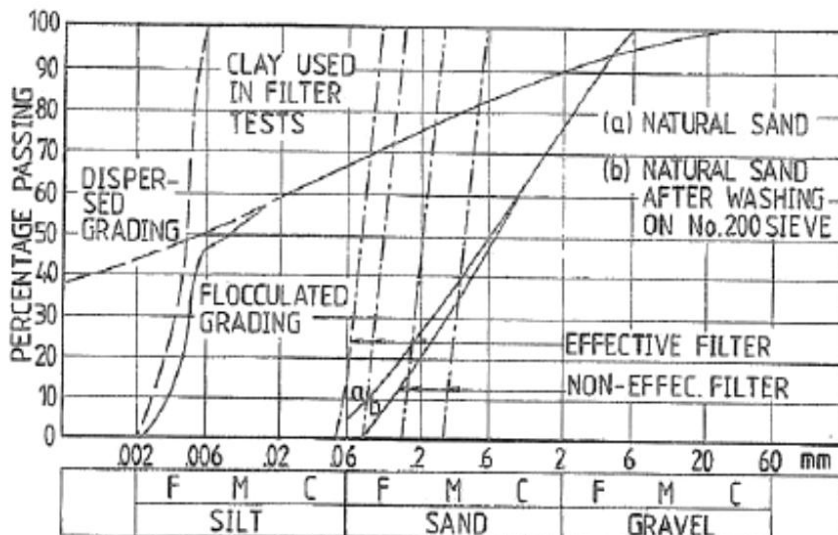


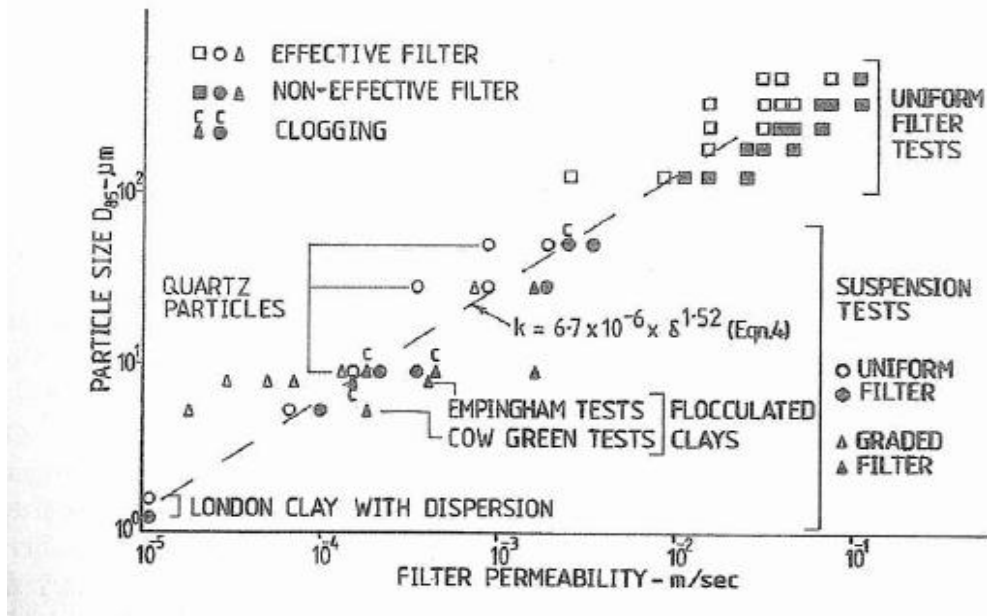
FIG. 2.—Balderhead Dam: Core and Filter Gradings

Σχήμα 2.11: Σχηματική διατομή και καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικών του φράγματος Balderhead (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982)



Σχήμα 2.12: Σχεδιασμός φίλτρου του φράγματος Cow Green (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982)

Τα εδάφη που εξετάστηκαν ήταν κροκιδωμένες αλλά και ομοιόμορφες άργιλοι και βασικός παράγοντας που λειτούργησε ως κριτήριο επιτυχίας ή αποτυχίας του υλικού ήταν η περατότητα. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η σχέση μεταξύ του μεγέθους των κόκκων που περνούν ή συγκρατούνται από το φίλτρο και της περατότητας για τα τρία είδη εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν (άργιλοι του Λονδίνου και των φραγμάτων Empingham και Cow Green).



Σχήμα 2.13: Σχέση μεγέθους κόκκου που περνά ή συγκρατείται σε σχέση με την περατότητα του φίλτρου (Πηγή: Design of filters for clay dams of dams, Vaughan and Soares, 1982)

Με βάση σειρά πειραμάτων συνδέθηκε η περατότητα με το μέγεθος του μικρότερου σωματιδίου που συγκρατείται με σχέσεις της μορφής

$$k = A * \delta^n$$

όπου  $k$ : περατότητα σε m/s

$A$ : συντελεστής που εξαρτάται από το είδος εδάφους

$\delta$ : διάμετρος μικρότερου σωματιδίου που συγκρατείται

$n$ : συντελεστής εξαρτώμενος από την πυκνότητα της κροκίδας ή του

κόκκου

Έχοντας την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού του πυρήνα προχώρησαν στο σχεδιασμό των φίλτρων με πειραματικές διατάξεις μορφής κλειστού κυλινδρικού σωλήνα διαμέτρου 50mm και μήκους 450mm. Μια στρώση πάχους περίπου 75mm προκορεσμένου και συμπυκνωμένου υλικού σχηματιζόταν στον πάτο του σωλήνα ο οποίος τοποθετούνταν σε κατακόρυφη θέση. Η συσκευή συνδεόταν με υδατική παροχή νερού με την εξεταζόμενη χημεία και όταν αποκαθιστόταν η ισορροπία μεταξύ νερού και υλικού του φίλτρου εισάγονταν η κροκιδωμένη άργιλος σε μορφή διαλυτού αιωρήματος στο νερό. Η συσκευή ανατροφοδοτούνταν από το νερό που έβγαине από το φίλτρο και διάφοροι ρυθμοί ροή δοκιμάζονταν κατά την διάρκεια του πειράματος. Αν στο το νερό που έβγαине από το φίλτρο ήταν βρώμικο και ο ρυθμός ροής μειωνόταν λίγο και έμενε έπειτα σταθερός ήταν φανερό ότι το φίλτρο είχε αποτύχει.

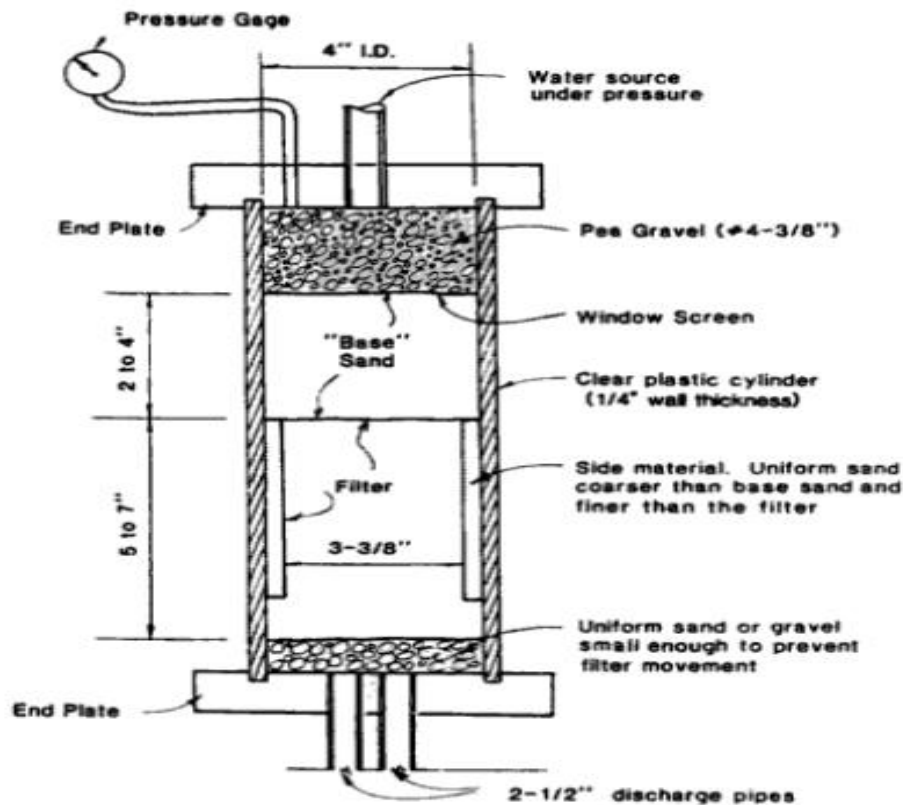
Για τα κροκιδωμένα εδάφη το μικρότερο σωματίδιο θεωρούνταν η κροκίδα και με βάση αυτό ακολουθούσε ο σχεδιασμός του φίλτρου.

Η μέθοδος που πρότειναν οι Vaughan και Soares είναι συντηρητική από την ίδια της την βάση καθώς καλύπτει την συγκράτηση και του μικρότερου σωματιδίου, αλλά όπως υποστηρίζουν οι δύο ερευνητές στους επικριτές τους, όπως αποδείχτηκε στην περίπτωση του φράγματος Balderhead, το αυτοφιλτράρισμα του υλικού του πυρήνα δεν μπορεί να μας εξασφαλίσει στην περίπτωση συγκεντρωμένης διαρροής.

Ακόμη, μια δοκιμή που πρότειναν στη μελέτη τους ήταν η δοκιμή κατάρρευσης (Sandcastle test), που είχε μεγάλη πρακτική εφαρμογή, καθώς είναι μια πολύ διαδεδομένη εργοταξιακή δοκιμή. Το υλικό του φίλτρου συμπυκνώνεται σε κατάλληλο κυλινδρικό στέλεχος και τοποθετείται σε βαθύ δίσκο ο οποίος πληρούται με νερό με αργό ρυθμό. Αν το υλικό καταρρεύσει σχηματίζοντας την γωνία τριβής του, βγαίνει το συμπέρασμα ότι είναι μη συνεκτικό και άρα κατάλληλο για φίλτρο. Το υλικό του φίλτρου πρέπει να είναι καταρρεύσιμο για να μπορεί να κλείνει της ρωγμές που δημιουργούνται στον πυρήνα συμπληρώνοντάς τες με υλικό.

#### 2.4.4 Sherard και Dunnigan (1984)

Οι Sherard και Dunnigan χρησιμοποιώντας την εργαστηριακές διατάξεις της USSCS (U.S Soil Conservation Service) (Σχήμα 2.14) έκαναν δοκιμές για να ελέγξουν κριτήρια για τα φίλτρα υπό την περίπτωση συγκεντρωμένης διαρροής σε φράγμα.



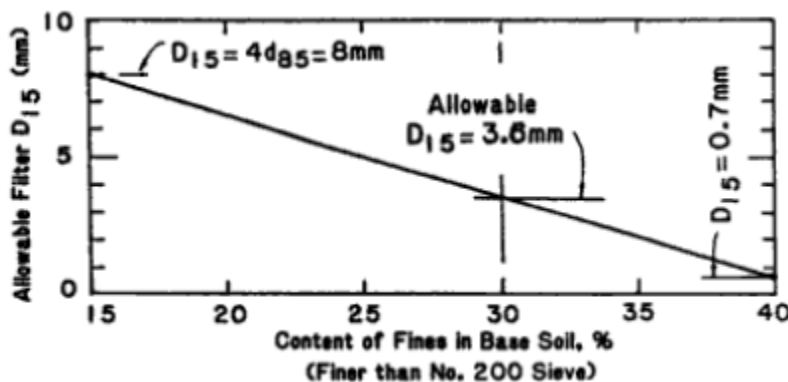
Σχήμα 2.14 : Εργαστηριακή διάταξη της USSCS (Πηγή: ICOLD 1994)

Χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη για υλικά πυρήνα από λεπτόκοκκα έως πιο χονδρόκοκκα ( $D_{15B} = 0,075\text{mm}$  έως  $2,36\text{mm}$ ). Έκαναν δοκιμές σε αργιλικά και λυώδη εδάφη με αποδοχή ως ικανοποιητικού μόνο μικρού βαθμού διάβρωσης. Στην δοκιμή μη διάβρωσης (no erosion test) έθεσαν ως απαίτηση σε ένα φίλτρο να μην υπάρχει ορατή διεύρυνση της οπή διαρροής και να συλλέγεται ελάχιστο υλικό από την τυχούσα διάβρωση.

Από τις δοκιμές αυτές οι δύο ερευνητές κατέληξαν στα ακόλουθα:

- 1) για εδάφη που περιέχουν χονδρόκοκκα ο σχεδιασμός των φίλτρων θα γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το υλικό κάτω από  $4,75\text{mm}$

- 2) *Αδιαπέρατα εδάφη Ομάδα 1* (λεπτόκοκκοι άργιλοι και ιλεις):για το είδος αυτό των εδαφών που έχουν πάνω από 85% κατά βάρος λεπτότερα των 0.075 mm το κριτήριο σχεδιασμού πρέπει να είναι  $D_{15F} \leq 9D_{85B}$
- 3) *Αδιαπέρατα εδάφη Ομάδα 2* (αμμώδεις άργιλοι και ιλεις, αργιλώδεις και ιλυώδεις άμμοι): για αμμώδη εδάφη με λεπτόκοκκο ποσοστό (κάτω των 0.075 mm) μεταξύ 40-85% κατά βάρος (το ποσοστό προκύπτει επί του υλικού κάτω των 4.75 mm) το κριτήριο είναι  $D_{15F} \leq 0,7 \text{ mm}$
- 4) *Αδιαπέρατα εδάφη Ομάδα 3* (για αμμώδεις και χαλικιώδεις έδαφος με μικρά ποσοστά λεπτόκοκκων): για αυτό το είδος εδαφών με λεπτόκοκκο ποσοστό (κάτω των 0.075 mm) κάτω του 15% κατά βάρος το κριτήριο γίνεται  $D_{15F} \leq 4D_{85B}$  όπου το  $D_{85B}$  υπολογίζεται από όλο τη διαβάθμιση του υλικού, ακόμα και πάνω από 4,75mm
- 5) *Αδιαπέρατα εδάφη Ομάδα 4* : Για εδάφη με ποσοστά λεπτόκοκκων ανάμεσα σε 15-40% , δηλαδή ανάμεσα στις ομάδες 2 και 3 το κριτήριο για το  $D_{15F}$  προκύπτει με γραμμική παρεμβολή.



Σχήμα 2.15: Γραμμική παρεμβολή για εδάφη με ποσοστό λεπτόκοκκων (μικρότερων των 0,075 mm) (Πηγή : Sherard και Dunnigan 1985)

- 6) Για να ισχύουν τα κριτήρια για τις ομάδες 1 και 2 πρέπει το υλικό άνω των 4,75 να μην ξεπερνά το ποσοστό του 60% κατά βάρος της συνολικής μάζας και ο μέγιστος κόκκος να είναι 50 mm
- 7) Τα άνωθεν κριτήρια μπορούν να εφαρμοστούν στα εδάφη των ομάδων 1 και 2 ανεξάρτητα των καμπύλων κοκκομετρικής διαβάθμισης. Αντίθετα, για τα εδάφη των ομάδων 3 και 4 τα κριτήρια ισχύουν για καλά διαβαθμισμένα υλικά. Σε περίπτωση καμπύλων που παρουσιάζουν πλατώ (gap-graded) θα ήταν

προτιμότερο να σχεδιαστεί το φίλτρο για το λεπτόκοκκο τμήμα της καμπύλης ή να διεξαχθούν σειρές δοκιμών “No erosion test “ για το σχεδιασμό του κατάλληλου φίλτρου.

Base Soil Category	Base Soil Description, and Percent Finer than No. 200 (0.075 mm) sieve (1)	Filter Criteria (2)
1	Fine silts and clays; more than 85 % finer	$D_{15} \leq 9 \times d_{85}$ (3)
2	Sands, silts, clays and silty and clayey sands; 40 to 85 % finer	$D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	Silty and clayey sands and gravels; 15 to 39 % finer	$D_{15} \leq \frac{40 - A}{40 - 15} (4 \times d_{85} - 0.7 \text{ mm}) + 0.7 \text{ mm}$ (4) (5)
4	Sands and gravels; less than 15 % finer	$D_{15} \leq 4 \times d_{85}$ (6)

Πίνακας 2.2: Παρουσίαση κριτηρίων Sherard και Dunnigan (Πηγή: ICOLD 1994)

Οι δύο ερευνητές υποδεικνύουν ότι τα κριτήρια εμπεριέχουν συντελεστές ασφάλειας. Δεν αναφέρεται κάποιος ιδιαίτερος περιορισμός για το ποσοστό λεπτόκοκκων του φίλτρου γιατί ακολουθείται το 5% μη συνεκτικών λεπτόκοκκων της μεθόδου USBR.

Η μέθοδος των Sherard και Dunnigan (1985,1989) είναι ευρέως αποδεκτή από USBR (1987), USDA-SCS (1994) και από τους μηχανικούς της Αυστραλίας.(Fell 2005)

#### 2.4.5 Kenney και Lau (1985)

Οι Kenney και Lau δούλεψαν πάνω στα φίλτρα βγάζοντας κριτήρια και για συνεκτικά και μη συνεκτικά εδάφη (Kenney et al. 1985, Kenney and Lau 1985)

(α) *Φίλτρα για υλικά πυρήνα μη-συνεκτικά:* Kenney (Kenney et al 1985) ανέπτυξε την έννοια ενός μεγέθους χαρακτηριστικού του δικτύου πόρων στο φίλτρο του  $D_c^*$  το οποίο ισοδυναμεί με την διάμετρο του μεγαλύτερου σωματιδίου που μπορεί να



μεταφερθεί μέσω της ροής στο φίλτρο. Για αυτό αποδείχτηκαν ότι ισχύουν οι κάτωθι σχέσεις:

$$D_C^* \leq 0,25 D_{5F}$$

και

$$D_C^* \leq 0,20 D_{15F}$$

Βρέθηκε ότι το  $D^*$  εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των μικρότερων κόκκων του φίλτρου και όχι ιδιαίτερα από την μορφή της καμπύλης διαβάθμισης του φίλτρου.

Η διάταξη των δοκιμών ήταν παρόμοια αυτής της USSCS (εικόνα 2.8) με την διαφορά ότι η υδραυλική κλίση κυμαινόταν μεταξύ 3 και 50. Ακόμη το δοκίμιο υποβλήθηκε σε δόνηση, με αποτέλεσμα όπως είναι αναμενόμενο τα σωματίδια του πυρήνα να ξεμπλοκάρουν και να εισχωρούν ευκολότερα στο φίλτρο.

Για να καλυφθεί η απαίτηση ο συντελεστής ομοιομορφίας να είναι μικρότερος του 6 για τα μη συνεκτικά υλικά του πυρήνα και του φίλτρου προτάθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$D_{5F} < 4D_{50B}$$

και

$$D_{15F} < 5D_{50B}$$

*Φίλτρα για συνεκτικά εδάφη:* Η δουλειά των ερευνητών πάνω στα συνεκτικά εδάφη ήταν αναλυτική, με προσωπική εμπειρία από πυρήνες δύο φραγμάτων από ευρέως διαβαθμισμένο υλικό

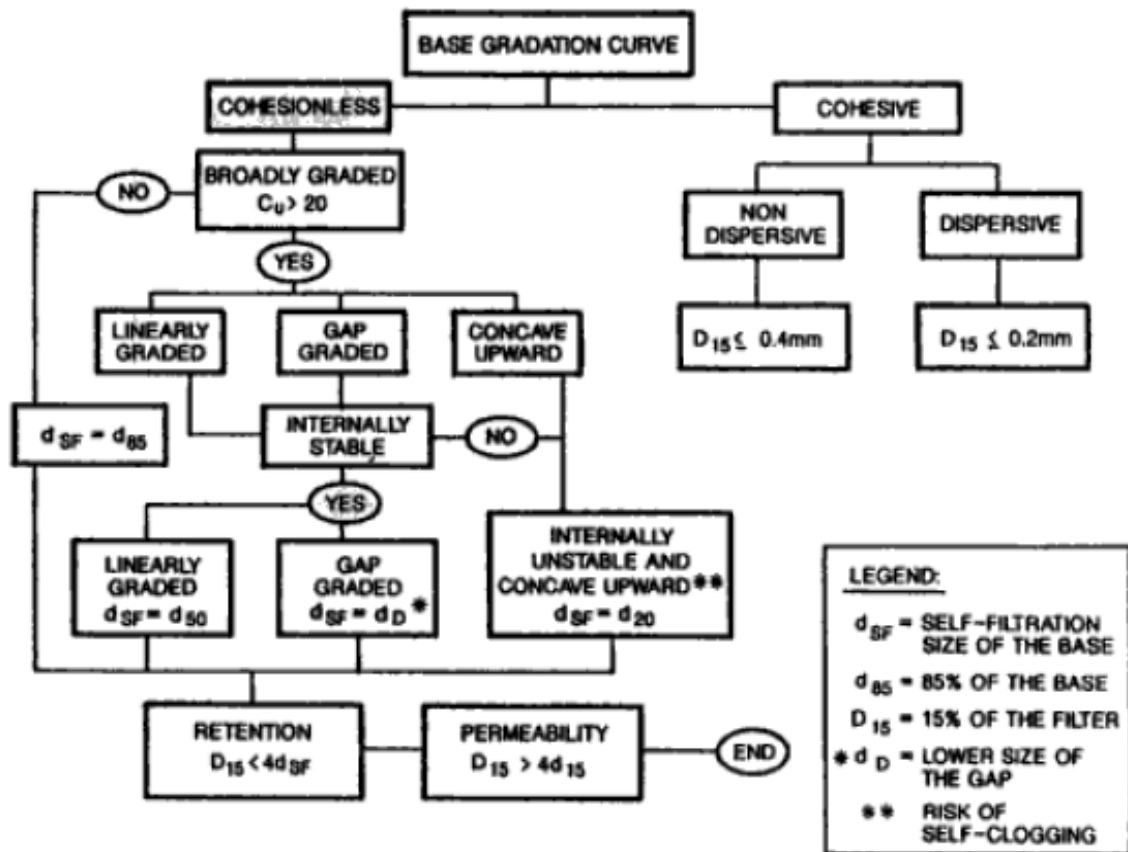
μοραίνη με μεγέθη κόκκων από χάλικες μέχρι αργιλικά σωματίδια, όπου τα λεπτόκοκκα (κάτω των 0,075 mm) παρασύρονται από τη ροή και το φίλτρο δεν μπορεί τελικά να τα συγκρατήσει. Όπως έχει παρατηρηθεί ξανά στη βιβλιογραφία (Vaughan 1982) για αυτό ευθύνονται οι χαμηλές ταχύτητες ροής οι οποίες δεν μπορούν να επηρεάσουν πιο χονδρόκοκκα σωματίδια. Για αυτό πρότειναν πάλι τις σχέσεις  $D_C^* \leq 0,25 D_{5F}$  και  $D_C^* \leq 0,20 D_{15F}$

Οι απαιτήσεις για το φίλτρο με βάση αυτή τη λογική σχεδιασμού έχουν σαν αποτέλεσμα ένα φίλτρο πιο λεπτόκοκκο από αυτό των Sherard και Dunnigan και πιο χονδρόκοκκο από των Vaughan και Soares (Fell 2005).

#### **2.4.6 Lafleur et al. (1989, 1993)**

Η προσέγγιση αυτής της μελέτης ήταν σε όρους χαρακτηριστικού μεγέθους ανοίγματος πόρου φίλτρου  $O_E$  και της σχέσης του με ένα ενδεικτικό μέγεθος κόκκου αυτο-φιλτραρίσματος  $d_{5F}$  του πυρήνα. Αν ο λόγος  $R_R = O_E / d_{5F}$  είναι σημαντικά μεγαλύτερος της μονάδας, τότε η διάβρωση θα είναι έντονη και συνεχής. Αν από την άλλη πλευρά είναι πολύ μικρότερος της μονάδας τότε παρατηρείται το φαινόμενο της έμφραξης των πόρων πάνω από την διεπιφάνεια πυρήνα-φίλτρου κάτι που συνεπάγεται ανάπτυξη των πιέσεων πόρων. Η έμφραξη είναι ιδιαίτερο πρόβλημα για εδάφη επιρρεπή σε εσωτερική διάβρωση όπου τα λεπτόκοκκα συσσωρεύονται και κλείνουν τους πόρους ανάντι του φίλτρου, χωρίς να μπορεί να γίνει αποστράγγιση.

Στο επόμενη σχήμα φαίνεται ένα διάγραμμα ροής της μεθόδου Lafleur et al. (1993)



Σχήμα 2.16: Σχηματοποιημένο διάγραμμα ροής της μεθόδου Lafleur et al. 1993

(Πηγή: Fell 2005)

#### 2.4.7 Foster και Fell (1999)

Οι Foster και Fell πραγματοποίησαν εκτενή πειράματα (no-erosion test) χρησιμοποιώντας παρόμοια διάταξη με του Sherard (1984a,b) ανανεώνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών της USSCS. Στην δουλειά τους έδειξαν ότι προτιμότερο όριο μεταξύ των ομάδων εδαφών 2 και 4 είναι το ποσοστό λεπτόκοκκων 35 και όχι 40% σύμφωνα με Sherard και Dunnigan (1989).

Base soil group	Fines content (a)	Design criteria of Sherard and Dunnigan (1989)	Range of DF15 for no erosion boundary $D_{85B}$	Criteria for no erosion boundary
1	$\geq 85\%$	$D_{15F} \leq 9D_{85B}$	$6.4-13.5D_{85B}$	$D_{15F} \leq 9D_{85B}$ (b)
2A	35-85%	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$	0.7-1.7 mm	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$ (b)
3	$< 15\%$	$D_{15F} \leq 4D_{85B}$	$6.8-10D_{85B}$	$D_{15F} \leq 7D_{85B}$
4A	15-35%	$D_{15F} \leq (40-pp\% \times 0.075 \text{ mm}) \times (4D_{85B}-0.7)/25 + 0.7 \text{ mm}$	1.6 $D_{15F}$ -2.5 $D_{15F}$ of Sherard and Dunnigan design criteria	$D_{15F} \leq 1.6D_{15Fd}$ , where $D_{15Fd} = (35-pp\% \times 0.075 \text{ mm}) \times (4D_{85B}-0.7)/20 + 0.7 \text{ mm}$

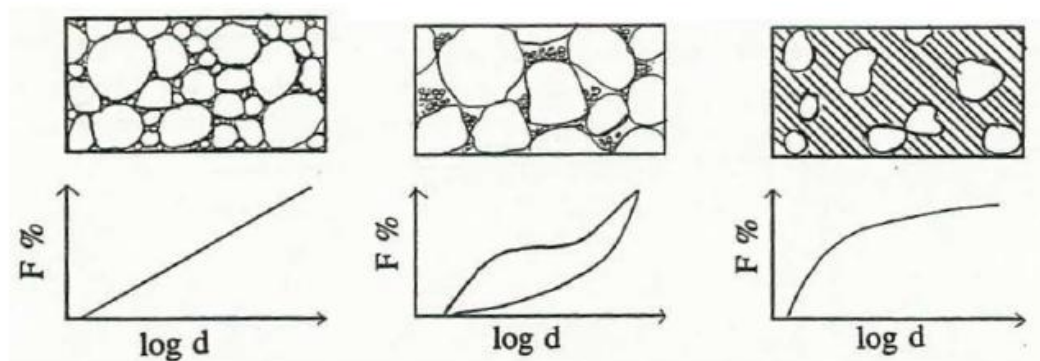
Πίνακας 2.3: Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων των δοκιμών των Foster και Fell 1999a,2001, Foster 1999 τα αντιστοιχα προτεινόμενα κριτήρια (Πηγή: Fell 2005)

## 2.5 Άλλοι παράγοντες καθοριστικοί στο σχεδιασμό φίλτρων

### 2.5.1 Κριτήρια αντιμετώπισης της εσωτερικής αστάθειας

Για την ανάπτυξη κριτηρίων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης λόγω εσωτερικής αστάθειας προηγήθηκε η φιλοσοφία διαχωρισμού των εδαφών σε αυτά που έχουν μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων τα οποία γεμίζουν τα κενά μεταξύ των μεγάλων κόκκων οι οποίοι με τη σειρά τους αναλαμβάνουν μεγάλο μέρος του φορτίου (clast-supported soils), και σε αυτά που έχουν μεγάλα ποσοστά λεπτόκοκκων και επικρατούν χαμηλές τάσεις σε μεγάλο αριθμό μικρότερων σωματιδίων (matrix supported soils).

Τα πρώτα (clast-supported) μπορεί να είναι ασταθή όταν η κοκκομετρική τους καμπύλη εμφανίζει πλατώ (gap-graded), όπως στην Εικόνα 2.16 (στη μέση), ενώ δομή τους είναι σταθερή όταν η κοκκομετρική τους καμπύλη είναι ελαφρώς γραμμική, με όλα τα μεγέθη κόκκων να γεμίζουν τα κενά μεταξύ των χονδρόκοκκων, όπως στο Σχήμα 2.16 (αριστερά).



Σχήμα 2.17: Μορφή της δομής και αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη για τρία είδη εδαφών. Clast-supported stable (αριστερά), clast-supported unstable (στη μέση) και matrix-supported (δεξιά). (Πηγή: Bartsch, 1995)

**USACE (1953)**

Η U.S. Army Corps of Engineers πρότεινε ότι για να συμβεί διάβρωση σε μη συνεκτικό υλικό φίλτρου πρέπει να υπάρχουν συνθήκες τυρβώδους ροής, μια υδραυλική κλίση μεγαλύτερη του 5 και ένας συντελεστής ομοιομορφίας  $C_u > 20$ . Οι προτάσεις βασίστηκαν σε μια σειρά πειραμάτων με διάφορες αναλογίες ποσοστών άμμου και χαλίκων ώστε να επιτευχθεί ένας σωστός συνδυασμός όσο αναφορά την εσωτερική αστάθεια και την περατότητα.

Αργότερα (2004b), οι Wan και Fell μετά από σειρά πειραμάτων σε 20 δείγματα εδαφών χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της USACE (1953) οδηγήθηκαν σε αποτελέσματα με μεγάλη διασπορά και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο περιορισμός  $C_u > 20$  είναι πολύ συντηρητικός. Επίσης, με τη χρήση δεδομένων από υλικών από πυρήνες φραγμάτων από μωραίνη (Rönnqvist, 2008b) προέκυψε ότι ο συντελεστής ομοιομορφίας ( $C_u$ ) δεν είναι αντιπροσωπευτικό μέγεθος για την αξιολόγηση ενός υλικού όσο αναφορά την επιρρέπειά του σε εσωτερική διάβρωση.

**Isotomina (1957)**

Ένα κριτήριο παρόμοιο του προηγούμενου, καθώς υποστηρίζει τις σχέσεις:

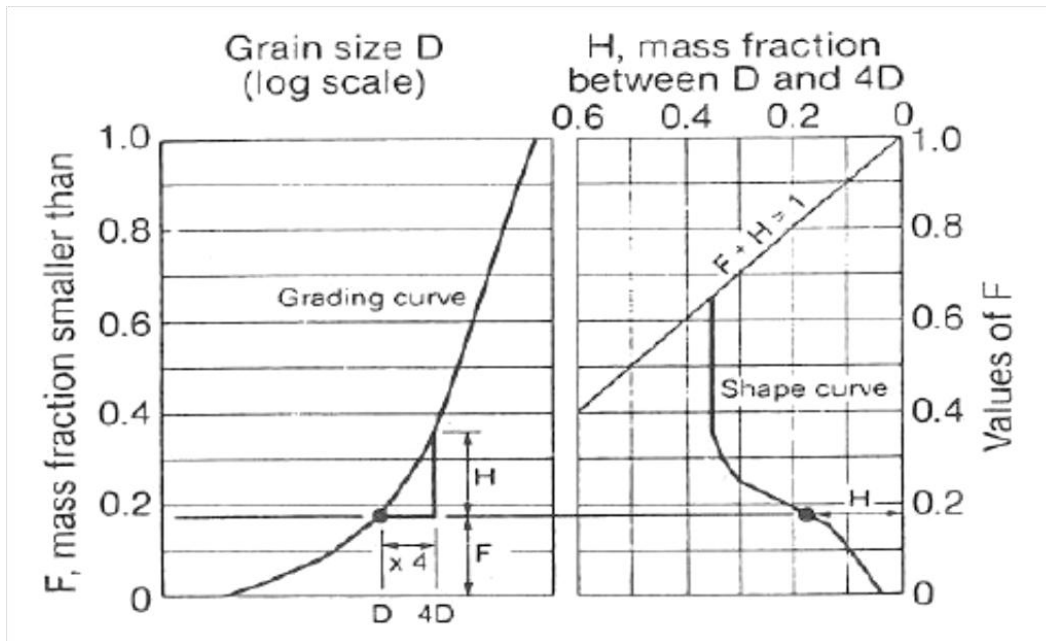
$C_u \leq 10$	Μη διάβρωση
$10 \leq C_u \leq 20$	Μεταβατική περιοχή
$C_u \geq 20$	Επιρρεπές σε διάβρωση

Πίνακας 2.4: Πίνακας κριτηρίων Isotomina (1957)

**Kenny and Lau (1985)**

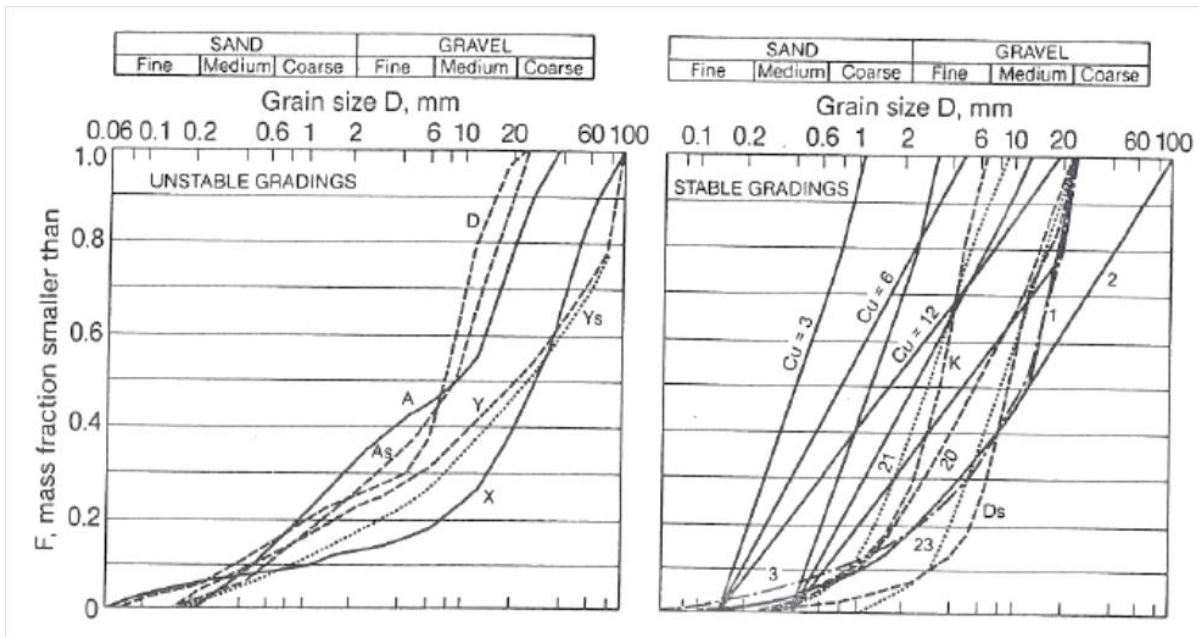
Οι Kenny και Lau παρουσίασαν μια νέα μέθοδο αξιολόγησης της πιθανότητας ενός εδάφους να παρουσιάσει αστάθεια. Αρχή της σκέψης τους ήταν ότι υπάρχει ένας αρχικός ιστός σωματιδίων, ο οποίος είναι ο φέρων ιστός του τασικού περιβάλλοντος και τα υπόλοιπα σωματίδια που βρίσκονται γύρω από αυτόν τον ιστό είναι χαλαρά και η μετακίνησή τους σχετίζεται με το μέγεθος των κενών. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν κοκκώδη εδάφη σε ροής στην διεύθυνση της βαρύτητας και με τη χρήση δόνησης.

Για την αξιολόγηση της εσωτερικής ευστάθειας εισήγαγαν την έννοια της «καμπύλης H:F», όπου H: είναι το ποσοστό μάζας υλικού μεταξύ ενός μεγέθους κόκκου D και 4D, και F το ποσοστό μάζας με μέγεθος μικρότερο από D. Αν υπάρχει έλλειψη υλικού μεγέθους μεταξύ D και 4D, το υλικό που είναι πιο λεπτόκοκκο από D θα μπορούσε να διαβρωθεί.



Σχήμα 2.18: Μεθοδολογία Kenny and Lau (Πηγή: Kenney and Lau, 1985)

Ο συντελεστής 4 για το διαφορά μεγέθους κόκκου που εξετάζεται βασίζεται στη λογική ότι ένα σωματίδιο για να περάσει από έναν άνοιγμα μεταξύ χονδρόκοκκων πρέπει να έχει περίπου διάμετρο ίση με το  $\frac{1}{4}$  των χονδρόκοκκων (Kenny and Lau, 1985). Το όριο μεταξύ σταθερής και ασταθούς μορφής είχε οριστεί αρχικά από τους δύο μελετητές στο  $H=1.3F$  και αργότερα αναθεωρήθηκε από τους ίδιους το  $H=F$  (Kenny and Lau, 1986) μετά από συμβουλές των Ripley (1986) και Milligan (1986). Μετά από πειράματα σε 14 είδη μη συνεκτικών εδαφών τα 4 παρουσίασαν αστάθεια.



Σχήμα 2.19: Κοκκομετρικές καμπύλες των υλικών που χρησιμοποίησαν οι Kenney and Lau (1985). Αριστερά τα ασταθή εδάφη και δεξιά τα ευσταθή (Πηγή: Kenney and Lau, 1985)

Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται ότι υλικά όπως το A και το D με κανονικές καμπύλες διαβάθμισης μπορούν να υποστούν ξέπλυμα υλικού (X το υλικό του ξεπλύθηκε κατά το πείραμα). Έτσι, υπολογίστηκε ότι το μέγιστο ποσοστό «χαλαρού» υλικού μπορεί να είναι  $F=0,3$  για απότομες κοκκομετρικές καμπύλες και  $F=0,2$  για τα ευρέως διαβαθμισμένα υλικά ( $C_u > 3$ ).

### **Burenkova (1993)**

Ο Burenkova πραγματοποίησε πειράματα με ροή, και αντίθετα και κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας, με κοκκώδες υλικό με μεγέθη κόκκου μέχρι και 100mm και συντελεστή ομοιομορφίας  $C_u$  με τιμή 200 με τα οποία πρότεινε μια μέθοδο χαρακτηρισμού της αστάθειας των εδαφών με χαρακτηριστικές διαμέτρους κόκκου τις  $D_{90}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{15}$ .

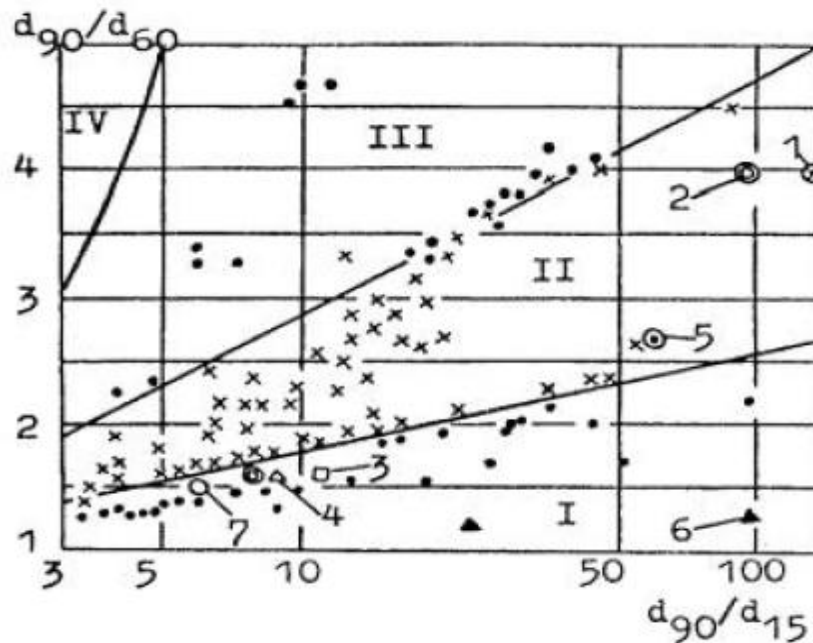
Το κριτήριο του Burenkova (1993) προτείνει ότι ένα έδαφος είναι εσωτερικά σταθερό όταν :

$$0.76 \log(h'') + 1 < h' < 1.86 \log(h'') + 1$$



όπου  $h' = d_{90}/d_{60}$  και  $h'' = d_{90}/d_{15}$ .

Όσο πιο πού μεγαλώνουν οι λόγοι  $h'$ ,  $h''$  τόσο πιο ευρέως διαβαθμισμένο είναι το υλικό. Ο Li (2008) σε πειράματά του σε πειράματα περατότητας σε έξη ευρέως διαβαθμισμένα υλικά βρήκε την μέθοδο λιγότερο συντηρητική από όσο θα έπρεπε, ενώ οι Wan και Fell (2004b) σε πειράματα σε ευρέως διαβαθμισμένα εδάφη με ποσοστά ιλύς, άμμου και χαλίκων έκριναν το κριτήριο ικανοποιητικό.



Σχήμα 2.20: Διάγραμμα της μεθόδου Burenkova (1993). Οι ζώνες I, III είναι ασταθείς, η ζώνη II είναι σταθερή και η ζώνη IV αντιστοιχεί σε τεχνητά εδάφη. (Πηγή: Fell, 2005)

### 2.5.2 Περατότητα

Το θέμα της περατότητας έχει ληφθεί υπόψη από τον περιορισμό  $D_{15F}/D_{15B} < 4$  ή  $5$ , το οποίο εξασφαλίζει περατότητες 15 και 20 φορές μεγαλύτερες από αυτήν του πυρήνα. Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό είναι το ποσοστό λεπτόκοκκων να συγκρατείται σε χαμηλά ποσοστά και να μην υπάρχουν πλαστικά συστατικά στο φίλτρο.

Παγκοσμίως, το σύνηθες όριο λεπτόκοκκων δεν ξεπερνά το 5% (μη πλαστικά). Ωστόσο, πολλοί παρουσιάζονται πολύ πιο επιφυλακτικοί και συστήνουν 2% μη πλαστικά (Fell, 2005). Μικρότερο ποσοστό λεπτόκοκκων πετυχαίνεται με ξέπλυμα των παραγώγων των σπαστήρων, μια επιπλέον διαδικασία η οποία επιβαρύνει με χρόνο και κόστος την φάση κατασκευής, αλλά είναι συνήθως χρήσιμη καθώς η διαφορά λεπτόκοκκων από το 2% στο 5% αντιστοιχεί σε διαφορά περατότητας δύο τάξεων μεγέθους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

### 3.1: Κατηγορίες προέλευσης του υλικού

Στα χωμάτινα φράγματα στα οποία επιλέγεται το φίλτρο να είναι από κοκκώδες υλικό, δύο είναι οι κατηγορίες των υλικών που χρησιμοποιούνται ως προς την προέλευσή τους. Η μία λύση είναι η χρήση **ποτάμιων αλλούβιων** κοκκωδών υλικών, η οποία ήταν η πιο διαδεδομένη επιλογή μέχρι την προηγούμενη δεκαετία και η δεύτερη, η οποία πλέον τείνει σε μονόδρομο είναι η χρήση **θραυστών αδρανών** από βραχώμαζες παραπλήσιες στην θέση κατασκευής.

*Αλλούβια* είναι τα εδάφη που έχουν προκύψει από την αποσάθρωση πετρωμάτων και έχουν παρασυρθεί από την αρχική τους θέση μέσω της υδατικής ροής ή του ανέμου (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2007). Στις εξόδους χειμάρρων και ποταμών (πιθανές θέσεις φράγματος) η ταχύτητα του νερού μειώνεται με αποτέλεσμα την απόθεση των χονδροκόκκων υλικών από κροκάλες μέχρι άμμους. Είναι σαφές ότι αυτή η τάξη μεγέθους κοκκομετρίας είναι κατάλληλη για την χρήση ως φίλτρο μετά από κάποια επεξεργασία (καθαρισμός, διαβάθμιση στα επιθυμητά όρια). Ο μικρός βαθμός επεξεργασίας όπως και η απουσία μεταφορικών διαδικασιών (το υλικό βρίσκεται στη περιοχή του έργου) αποτελεί για το έργο οικονομία από πλευρά κόστους και χρόνου. Επίσης, χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι το στρογγυλεμένο σχήμα τους εξαιτίας της μακρόχρονης δράσης του νερού πάνω τους.

Ωστόσο, εδώ και μια δεκαετία η χρήση τέτοιου τύπου υλικών έχει μειωθεί δραματικά λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών, αλλά και λόγω του γεγονότος ότι σε αρκετές θέσεις κατασκευής φραγμάτων υπάρχει έλλειψη τέτοιων υλικών (π.χ. φράγματα στα ελληνικά νησιά). Η επιλογή λοιπών των σχεδιαστών είναι να καταφύγουν σε θραυστά αδρανή σχηματισμών διαθέσιμων κοντά στη θέση του



Σχήμα 3.1: Διαδικασία παραγωγής του λεπτόκοκκου φίλτρου. (Πηγή: Σωμάκος Λάμπρος, 2011)

έργου ή και από λατομεία από άλλες περιοχές. Το υλικό του φίλτρου προκύπτει από συνήθως δύο βαθμίδες θραύσης και καθαρισμό του υλικού από ανεπιθύμητα σωματίδια.

Στην Ελλάδα η πληθώρα των κατασκευασμένων φραγμάτων έχει φίλτρα από ποτάμια υλικά, με εξαίρεση κάποια φράγματα των τελευταίων χρόνων.

Και οι δύο κατηγορίες σχεδιάζονται με βάση τα ίδια κριτήρια που έχουν προαναφερθεί.

### 3.2 Ανθρακικά υλικά κατασκευής

Αυτό που αλλάζει τον σχεδιασμό είναι η ορυκτολογική σύσταση των υλικών και ο βαθμός αλληλεπίδρασής του με το νερό.

Τα πιο επιρρεπή πετρώματα στην επίδραση του νερού είναι γνωστό, από τα έργα μηχανικού, ότι είναι τα ανθρακικά πετρώματα. *Ανθρακικά* ονομάζονται τα πετρώματα τα οποία αποτελούνται από μεγάλα ποσοστά ανθρακικών ορυκτών, δηλαδή ορυκτών που σχηματίζονται από την ένωση ανιόντων της ανθρακικής ρίζας  $(\text{CO}_3)^{-2}$  με διάφορα μέταλλα. Τα πιο συνηθισμένα ανθρακικά ορυκτά είναι ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ), ο δολομίτης ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), ο αραγωνίτης ( $\text{CaCO}_3$  ορθορομβικό) και ο μαγνησίτης ( $\text{MgCO}_3$ ).

Τα ανθρακικά πετρώματα αποτελούν το 25% του συνόλου των ιζηματογενών πετρωμάτων στην επιφάνεια της γης και η ηλικία τους φτάνει μέχρι 2,7 δισεκατομμύρια χρόνια. Σ' αυτά περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι, τα μάρμαρα και οι δολομίτες που αποτελούν σπουδαίο κεφάλαιο του ορυκτού πλούτου της Ελλάδας, αφού έχουν πολλές εφαρμογές και χρήσεις και μεγάλη συχνότητα εμφάνισης. (Ηλιάδου Σ., Τσιραμπίδης Α., Κασώλη – Φουρναράκη Α. και Μιχαηλίδης Κ., 2004).

Τα ανθρακικά πετρώματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες

(α) *Γεωλογικά νέα ανθρακικά πετρώματα (Category Y)*: Πετρώματα αυτής της κατηγορίας είναι της Τριτογενούς Περιόδου ή και νεώτερα. Συνήθως, είναι πετρώματα χαλαρά, πορώδη και μειωμένων αντοχών. Τα ανθρακικά ορυκτά που περιέχουν είναι κυρίως αραγωνίτης και μαγνησιούχο ασβεστίτης (Molenaar and Venmans (1993), Prothero and Schwab (1996)). Αυτά τα δύο είναι ορυκτά τα οποία σχηματίστηκαν αρχικά από θαλάσσιες ανθρακικές ιζήματα και σχηματίζονται ακόμα και σήμερα. Με πάροδο του χρόνου και την παράλληλη έκθεση σε παράγοντες όπως το νερό, η συμπίεση και η κρυστάλλωση μετατρέπουν τα δύο ορυκτά σε ασβεστίτη και το πέτρωμα περνά στην κατηγορία O.

(β) *Γεωλογικά παλαιά ανθρακικά πετρώματα (Category O)*: Τα πετρώματα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι του Μεσοζωικού αιώνα ή και ακόμα

παλαιότερα. Χαρακτηρίζονται από την μεγάλη πυκνότητά τους, δεν είναι πορώδη και οι αντοχές του είναι από μεγάλες έως πολύ μεγάλες. Τα κύρια ορυκτά από τα οποία αποτελούνται είναι ασβεστίτης και δολομίτης. Σε αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και τα μάρμαρα.

Μεγάλο πρόβλημα των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η επίδραση της διάλυσης πάνω τους. Η διάλυση είναι χημική διαδικασία διάβρωσης που επιδρά σε όλα τα είδη πετρωμάτων. Ωστόσο, στα ανθρακικά είναι πολύ έντονη. Αυτό οφείλεται στη σύστασή τους. Τα ανθρακικά πετρώματα είναι πλούσια σε ορυκτά όπως ο ασβεστίτης και ο δολομίτης, επιρρεπή στη διάλυση από όξινα νερά. Η διαδικασία της διάλυσης θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω. Γνωστή πλευρά αυτού του φαινομένου είναι η καρστικοποίηση, δηλαδή η δημιουργία κοιλοτήτων μέσα στην βραχώμαζα λόγω της διάλυσης. Η εργασία αυτή, ωστόσο, εξετάζει την διαδικασία της διάλυσης όπως αυτή εμφανίζεται όταν το πέτρωμα είναι σε μορφή αδρανών.

### **3.2.1 Φίλτρα από ανθρακικά υλικά**

Τα φίλτρα αποτελούνται από καλά διαβαθμισμένα αδρανή (άμμοι μέχρι χάλικες με μικρά ποσοστά λεπτόκοκκων ή και χωρίς λεπτόκοκκα). Συμπυκνώνονται σε σχετικές πυκνότητες 60-70 %. Οι υδατικές συνθήκες ποικίλουν ανάλογα με τη θέση του φίλτρου. Ακόμη, υπάρχουν περίοδοι που το φίλτρο ή το στραγγιστήριο είναι σε ξηρές συνθήκες, άλλες περίοδοι με συνθήκες ροής, και τέλος περίοδοι με μέρη του φίλτρου σε κορεσμό. Συνεπώς, το υλικό είναι εκτεθειμένο στη χημεία του νερού. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα φίλτρα από ανθρακικά αδρανή είναι η αλλαγή των μηχανικών και χημικών τους ιδιοτήτων με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση του υδατικού, πιθανώς όξινου παράγοντα. Η διεθνής εμπειρία μέχρι τώρα δεν αναφέρει διαπιστωμένα προβλήματα, ωστόσο υπάρχουν ελάχιστες παρεμβάσεις και δοκιμές που να αποδεικνύουν και το αντίθετο. Η χρήση ανθρακικών υλικών για φίλτρα χωμάτινων φραγμάτων ωστόσο είναι διαδεδομένη και κυρίως σε χώρες πλούσιες σε ασβεστολιθικά πετρώματα, όπως είναι και η Ελλάδα, αλλά και γεωγραφικές περιοχές όπως η Βόρεια Αφρική και η Αυστραλία (ΕΕΜΦ, 2011). Το σίγουρο πάντως είναι η ευπάθεια των ανθρακικών πετρωμάτων, με έμφαση τα ασβεστολιθικά στην χημεία του νερού.

Τρεις είναι οι κύριες πιθανές επιπτώσεις στα ανθρακικά αδρανή λόγω της επίδρασης του νερού (Fell, 2005):

- Αλλαγή της κοκκομετρίας του υλικού λόγω διάλυσης
- Μερική διάλυση και εναπόθεση του υλικού
- Αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διάλυσης εξαιτίας πίεσης αιχμών των κόκκων

Και οι τρεις σχετίζονται με το φαινόμενο της διάλυσης. Οι δύο τελευταίες συνδέονται και με το φαινόμενο της εναπόθεσης.

### ***Αλλαγή της κοκκομετρίας***

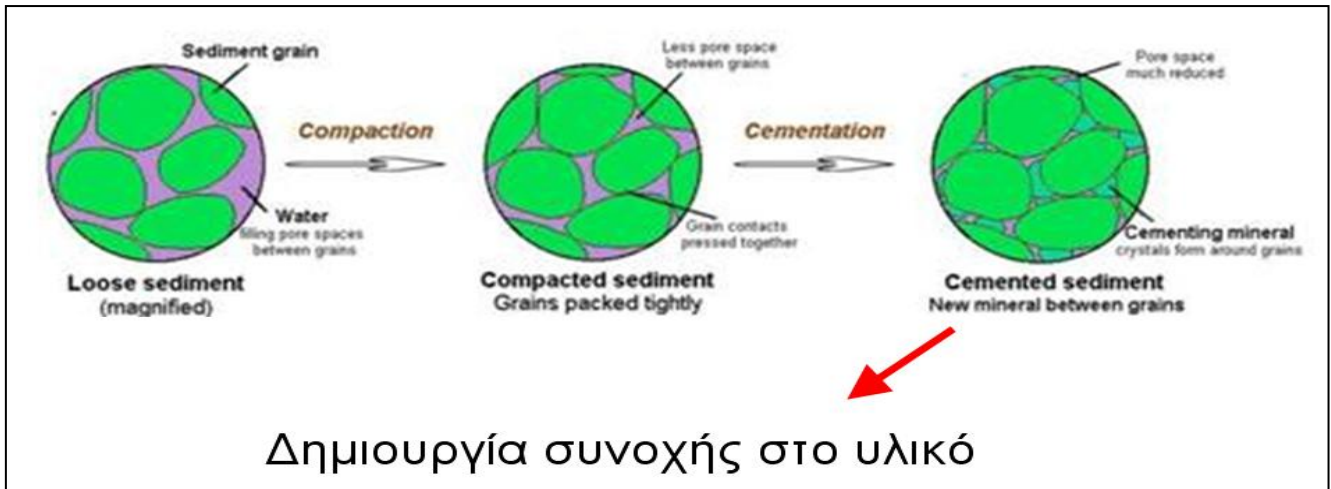
Η κοκκομετρία του υλικού του φίλτρου λόγω της διάλυσης (η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο) μειώνεται και αυξάνονται τα ποσοστά λεπτόκοκκων του φίλτρου. Ακόμη, όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό τόσο πιο επιρρεπές είναι στη διάλυση. Στο χρόνο λειτουργίας του φίλτρου αυτά τα αυξανόμενα ποσοστά λεπτόκοκκων μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα στην λειτουργία του φίλτρου.

### ***Διάλυση και εναπόθεση***

#### Φυσικό φαινόμενο

Το φαινόμενο αρχίζει με τον εμπλουτισμό του νερού του ταμιευτήρα με CO<sub>2</sub> είτε από τον ατμοσφαιρικό αέρα, είτε από τα υπόγεια νερά τα οποία περνούν από εδάφη με αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα λόγω της αποσύνθεσης φυτικών περιεχομένων. Τα νερά ενός ταμιευτήρα μπορούν να έχουν ένα pH από 5,5 έως 7 εξαιτίας της διάλυσης CO<sub>2</sub> στο νερό. Τιμές pH κάτω του 4 υποδεικνύει την ύπαρξη ελεύθερων ισχυρών οξέων (ICOLD, 1989). Με την αύξηση της πίεσης το CO<sub>2</sub> αντιδρά με το νερό και σχηματίζει το ανθρακικό οξύ (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), το οποίο με τη σειρά του αντιδρά με τον ασβεστόλιθο (CaCO<sub>3</sub>) σχηματίζοντας το ασταθές όξινο ανθρακικό άλας (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), στην πραγματικότητα ιόντα ασβεστίου (Ca<sup>2+</sup>) διαλυμένα στο νερό. Στην συνέχεια, με την πορεία της ροής του νερού σε θέσεις χαμηλότερης πίεσης αρχίζει η αντίστροφη διαδικασία της εναπόθεσης CaCO<sub>3</sub>. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η ανά θέσεις διάλυση και εναπόθεση υλικού. Στην πρώτη περίπτωση αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα του διαχωρισμού του υλικού (segregation) και στη δεύτερη της συγκόλλησης (cementation), η οποία

εμφανίζεται με την παρουσία συνοχής κάτι που καθιστά το φίλτρο δυσλειτουργικό καθώς ακυρώνεται η καταρρευσιμότητά του.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης

Ο όρος τσιμεντοποίηση που πολλές φορές χρησιμοποιείται για την περιγραφή του φαινομένου και προκύπτει ως άμεση μετάφραση του αγγλικού όρου cementation λειτουργεί αρκετά συγκεκριμένα, παραπέμποντας σε διάφορες διαδικασίες από τη γεωλογική διαδικασία της διαγένεσης μέχρι ηλεκτροχημικές διαδικασίες μετάλλων. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο πιο περιγραφικός όρος συγκόλληση. Άλλωστε, ο όρος τσιμεντοποίηση είναι άμεσα συνδεδεμένος (κυρίως από την τεχνολογία αδρανών οδοποιίας) με την αύξηση της αντοχής, ενώ η οπτική γωνία η οποία εξετάζει την συμπεριφορά ενός φίλτρου είναι πρωτίστως η εμφάνιση συνοχής.

Το φαινόμενο της διάλυσης παρατηρείται θεωρητικά σε όλα τα ανθρακικά υλικά καθώς αποτελούνται από ορυκτά ανθρακικά άλατα μετάλλων. Ωστόσο, δεν είναι όλα τα ανθρακικά ορυκτά το ίδιο διαλυτά. Για παράδειγμα ο ασβεστόλιθος (κυρίως  $\text{CaCO}_3$ ) είναι έχει μεγαλύτερο ρυθμό διάλυσης από τον δολομίτη (κυρίως  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Zaihua Liu, Daoxian Yuan, Wolfgang Dreybrodt, 2005). Φυσικά, σημασία έχει και η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος στην δραστηριότητά του με όξινο υδατικό περιβάλλον.

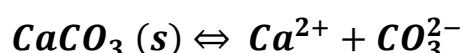
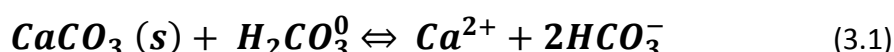
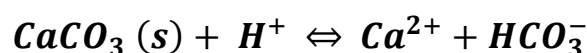


Χημικές διαδικασίες

Το φυσικό φαινόμενο της συγκόλλησης, πραγματοποιείται από τον συνδυασμό διάλυσης και εναπόθεσης  $\text{CaCO}_3$  σε διαφορετικές περιοχές ενός πορώδους μέσου. Οι διαδικασίες διάλυσης-εναπόθεσης είναι οι δύο κατευθύνσεις της ίδιας χημικής αντίδρασης. Οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν ποια από της δύο διαδικασίες επικρατεί είναι η αρχικές συγκεντρώσεις των χημικών ενώσεων του διαλύματος, η πίεση, η ταχύτητα ροής και η θερμοκρασία.

Οι ρυθμοί διάλυσης-εναπόθεσης καθορίζονται από: **(α)** το ρυθμό της χημικής αντίδρασης του  $\text{CaCO}_3$ , **(β)** την αργή αντίδραση του  $\text{CO}_2$  με το νερό και **(γ)** την μεταφορά μάζας στην επιφάνεια του αντιδρώντος  $\text{CaCO}_3$  (Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt, 1997):

(α) Ο ρυθμός της διάλυσης του  $\text{CaCO}_3$ : Η χημική αντίδραση είναι ουσιαστικά η μετατροπή στερεού ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) σε διαλυμένα ιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{2+}$ ) και αντίστροφα. Αυτή η αντίδραση γίνεται σε 3 ταυτόχρονα στάδια :



(προς τα δεξιά πραγματοποιείται η διαδικασία της διάλυσης και προς τα αριστερά της εναπόθεσης)

Η χημική αντίδραση αυτή έχει μελετηθεί πλήρως και υπάρχουν μοντέλα που την περιγράφουν. Το πιο διαδεδομένο είναι αυτό των Busenberg, Plummer, and co-workers (Plummer *et al.*, 1978 Busenberg and Plummer, 1986) γνωστό ως PWP equation, το οποίο δίνει το ρυθμό της αντίδρασης R (σε mmole /cm<sup>2</sup> /s) :

$$R = k_1[\text{H}^+] + k_2[\text{H}_2\text{CO}_3^0] + k_3[\text{H}_2\text{O}] - k_4[\text{Ca}^{2+}][\text{HCO}_3^-] \quad (3.2)$$

Οι συντελεστές  $k_i$  είναι χημικές σταθερές εξαρτώμενες από την θερμοκρασία. (Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt, 1997)

(β) Η αργή αντίδραση του  $CO_2$  με το νερό: Ένας περιοριστικός παράγοντας στο ρυθμό διάλυσης είναι η ταχύτητα αντίδρασης του  $CO_2$  με το νερό

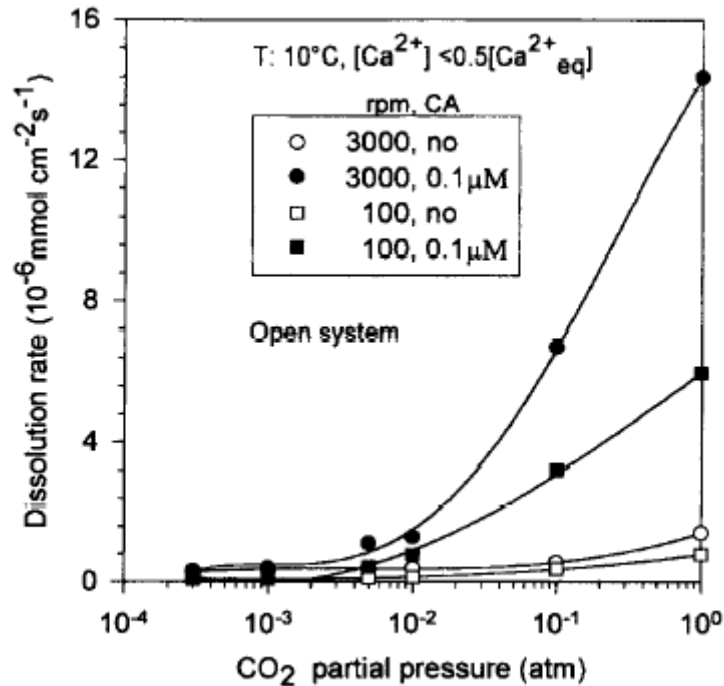


Αντίδραση  $CO_2$  για το σχηματισμό ανθρακικού οξέος

Από τη στοιχειομετρία της σχέσης (3.1) για να απελευθερωθεί 1 ιόν ασβεστίου ( $Ca^+$ ) πρέπει να έχει αντιδράσει 1 μόριο  $CO_2$  προς σχηματισμό  $H^+ + HCO_3^-$ . Γίνεται λοιπόν εμφανής ο περιοριστικός ρόλος της αντίδρασης της σχέσης (3.3)

Παράγοντες που δρουν καταλυτικά για την σχέση 3.3 είναι η αύξηση της πίεσης, αλλά και η παρουσία ενός ένζυμου-καταλύτη, του βόειου ανθρακικού ανυδρίτη (bovine carbonic anhydrase- BCA), το οποίο αυξάνει το ρυθμό αντίδρασης 2 τάξεις μεγέθους (Stryer (1988), Dreybrodt et al. (1996a,b)). Το ένζυμο αυτό χρησιμοποιείται στην ιατρική, οπότε δεν είναι ιδιαίτερα δυσεύρετο, ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι δρα καταλυτικά μόνο για την διαδικασία της διάλυσης, αφού αποτέλεσμα της δράσης του είναι η παραγωγή ενός οξέος ( $HCO_3^-$ ), και όχι για την εναπόθεση.

Στο επόμενο γράφημα απεικονίζεται η καταλυτική δράση των δύο παραγόντων πίεσης και του BCA.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα του ρυθμού διάλυσης  $CaCO_3$  με αυξανόμενη μερική πίεση του  $CO_2$  και παρουσία BCA. Έχει προκύψει από πειραματική διαδικασία των Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt (1997). Οι κύκλοι αντιστοιχούν σε μεγάλες ταχύτητες ροής και τα τετράγωνα σε μικρές. Τα κενά σχήματα είναι τα πειραματικά δεδομένα χωρίς BCA, ενώ τα χρωματισμένα με την παρουσία BCA. (Πηγή: Zaihua Liu and Wolfgang Dreybrodt (1997)).

(γ) Η μεταφορά μάζας στην επιφάνεια του αντιδρώντος  $CaCO_3$ : Η επιφάνεια στην οποία γίνεται η αντίδραση είναι το στερεό όριο της επιφάνειας του ασβεστόλιθου, συνεπώς είναι καθοριστική για το ρυθμό διάλυσης η μεταφορά των λοιπών αντιδρώντων στην επιφάνεια αυτή για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Σε αυτή τη διαδικασία παρεμβάλλονται τα φαινόμενα της διασποράς και της διάχυσης. Η μεταγωγή του διαλύματος  $H^+ + HCO_3^-$  διαμέσου του πορώδους μέσου γίνεται με δύο μηχανισμούς. Πρώτον, την μηχανική διασπορά, η οποία αντικατοπτρίζει την συμβολή της ταχύτητας ροής του υδατικού μέσου και δεύτερον, της μοριακής διάχυσης που οφείλεται στην ακανόνιστη μετακίνηση των μορίων στο υγρό και εκδηλώνεται με την διαφορά συγκεντρώσεων μέσα στο διάλυμα. Η ταυτόχρονη δράση των δύο αυτών μηχανισμών ονομάζεται υδροδυναμική διασπορά. Ο τρόπος και το μέγεθος με

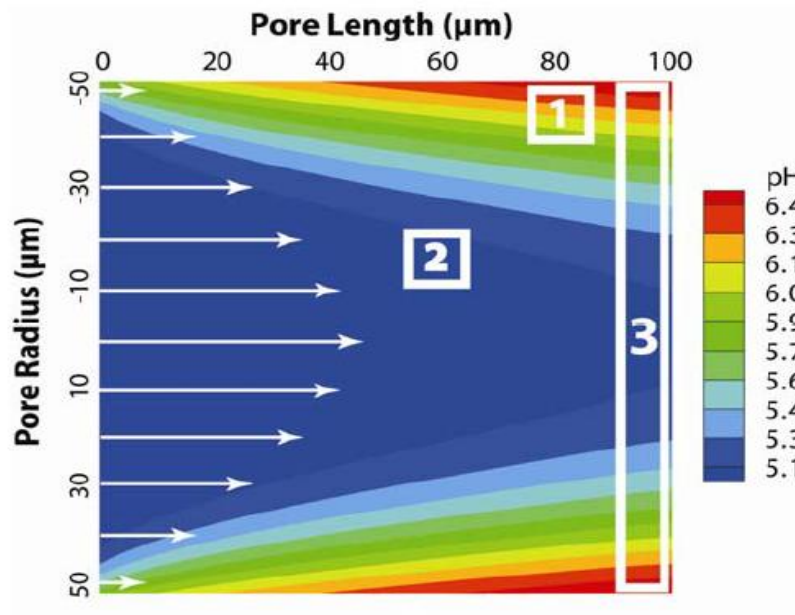
τον οποίο συμβάλλει ο κάθε μηχανισμός στην μεταφορά των αντιδρώντων εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα ροής.

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.4)$$

Εξίσωση μεταφοράς λόγω μεταγωγής-διάχυσης/διασποράς= υδροδυναμικής διασποράς

#### *Μια αναγωγή στο επίπεδο των εδαφικών πόρων*

Η επίδραση των στερεών ορίων στην διάλυση των αδρανών εξετάζεται και παρουσιάζεται ενδελεχώς από τους Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007). Στην εργασία τους παρουσίασαν μοντέλα ροής σε κλίμακα πόρου και την επίδρασή τους στην διάλυση του ασβεστίτη. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό CrunchFlow, ένα αριθμητικό κώδικα για την μοντελοποίηση ροής και της μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονες χημικές διαδικασίες, παρουσίασαν τη δράση όξινου διαλύματος σε τοιχώματα ασβεστίτη. Ο εδαφικός πόρος προσομοιώθηκε με κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου της τάξης 10-1000 μm, αντιπροσωπεύοντας κενά πόρων για υλικά από λεπτόκοκκες άμμους και αργιλικά εδάφη μέχρι χονδρόκοκκα αμμώδη υλικά. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη χημική σχέση 3.1 και τους ρυθμούς διάλυσης του Plummer et al. (1978). Ακόμη, η μοριακή διάχυση στο λογισμικό εκφράζεται ως συνδυασμός του νόμου του Fick για τη διάχυση και της ηλεκτροχημικής διάχυσης (Newman (1991) Oelkers (1996), Lasaga (1998), Maher et al. (2006), Steefel (2007)). Το κυλινδρικό μοντέλο πόρου διαμέτρου και μήκους 100μm υποβλήθηκε σε ροή ελαφρώς όξινου διαλύματος NaCl συγκέντρωσης 0,01 mM σε ισορροπία με διαλυμένο ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub>. Το pH του διαλύματος που προκύπτει είναι 5 και η ταχύτητα ροής ορίζεται στα 0,1 cm/s.



Σχήμα 3.4: Μοντελοποίηση ροής σε κυλινδρικό μοντέλο πόρου διαμέτρου και μήκους 100μm με στρωτή ροή όξινου pH 5 με τοιχώματα ασβεστίτη. (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).

Σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ροής του Poiseuille για ροή σε κλειστό κυλινδρικό αγωγό με παραβολική κατανομή ταχυτήτων κατά πλάτος του αγωγού.

$$u(r) = 2U \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (\text{Daugherty and Franzini, 1965}) \quad (3.5)$$

όπου  $r$  η ακτινική θέση του σημείου

$u(r)$  η σημειακή ταχύτητα

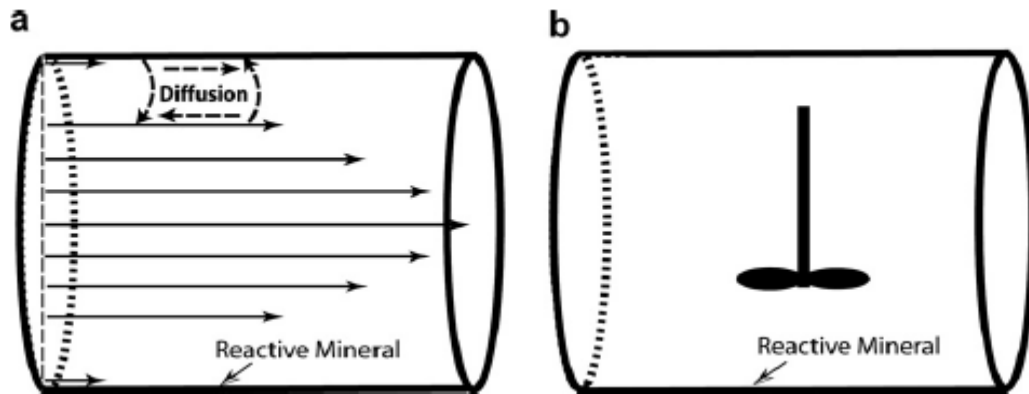
$U$  η μέση ταχύτητα ροής

$R$  η ακτίνα του αγωγού

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 το pH στα τοιχώματα ανεβαίνει, ως απόδειξη την απελευθέρωσης ιόντων  $\text{Ca}^+$ . Λόγω του φαινομένου της μοριακής διάχυσης οι περιοχές με συγκεντρώσεις διαλυμένου ασβεστίου αποκτούν μεγαλύτερο πλάτος κατά μήκος του κυλινδρικού αγωγού.

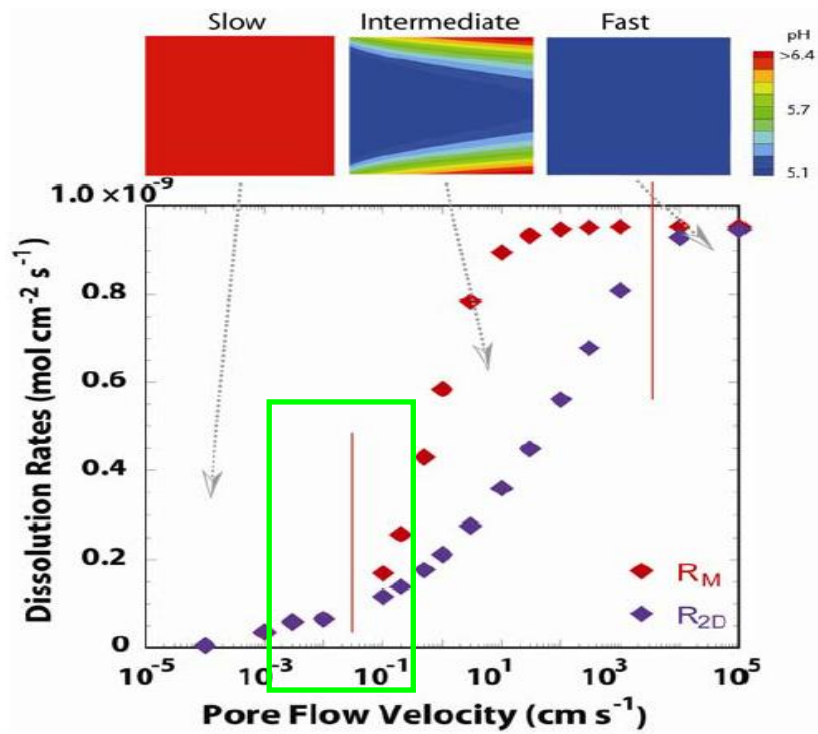
Σε δεύτερη φάση, ωστόσο, για να αξιολογηθεί κατά πόσο η κατανομή συγκεντρώσεων που προκύπτει λόγω της κατανομής ταχυτήτων και της διάχυσης επηρεάζει το ρυθμό διάλυσης του ορυκτού θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ενός

καλά αναμεμειγμένου διαλύματος που εξασφαλίζει ότι σε κάθε σημείο του πόρου η μικροσυγκέντρωση είναι σταθερή. Αυτό απαλλάσσει το ρυθμό διάλυσης από περιορισμούς λόγω μεταφοράς των αντιδρώντων στα τοιχώματα.



Σχήμα 3.5: (a) Ροή Poiseuille (b) καλά αναμεμειγμένο διάλυμα (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).

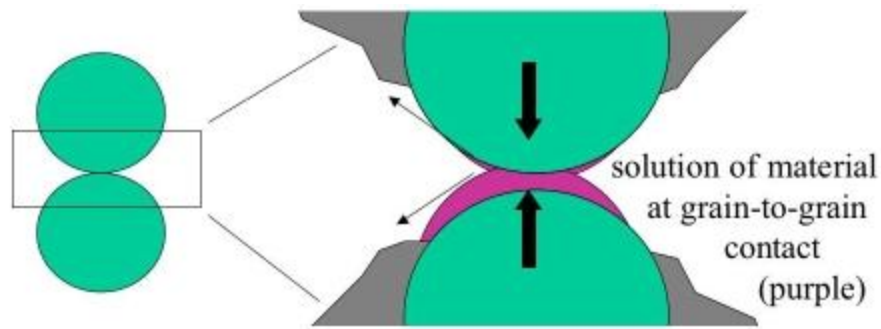
Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για ένα μεγάλο εύρος τιμών διαμέτρων πόρων (10- έως 1000 $\mu\text{m}$ ) και ταχυτήτων ροής ( $10^{-5}$  έως  $10^5$  cm/s) καλύπτοντας ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος συνθηκών ροής λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων υλικών. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα όλης της σειράς των πειραμάτων και πάνω από το διάγραμμα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται ο μηχανισμός της διάλυσης. Φαίνεται παραστατικά ότι για της ταχύτητες ροής που συναντούνται στα φίλτρα η μεταφορά των αντιδρώντων στα τοιχώματα των πόρων που δημιουργούνται ανάμεσα στα αδρανή ευνοείται κάνοντας πιο επιρρεπή τα ασβεστιτικά ορυκτά.



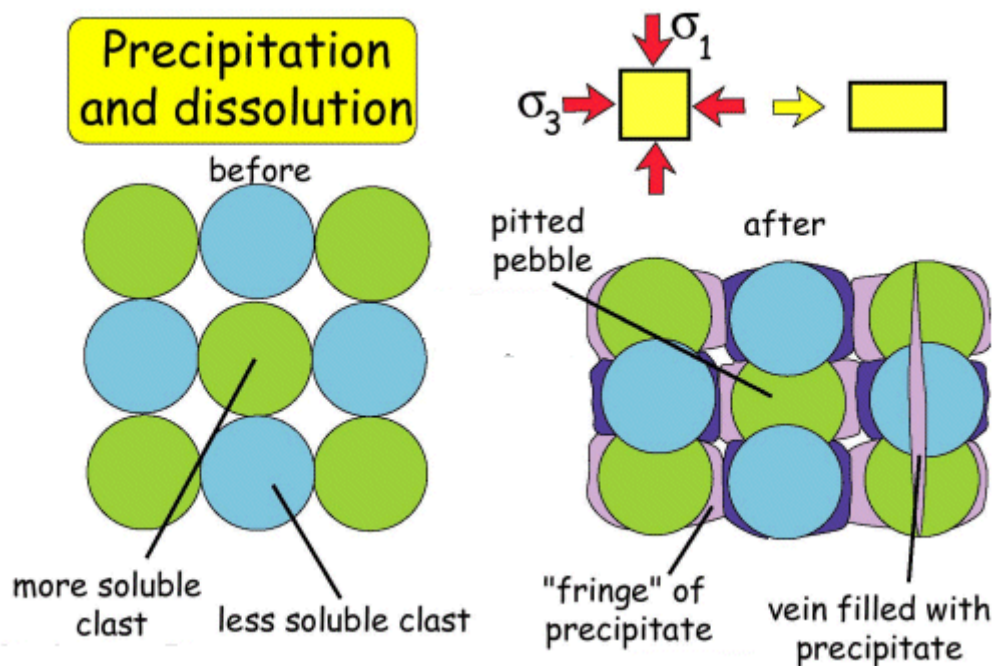
Σχήμα 3.6: Σύγκριση ρυθμού διάλυσης για ροή Poiseuille ( $R_{2D}$ ) και για πλήρως αναμεμειγμένο διάλυμα ( $R_M$ ) σε διάφορες ταχύτητες ροής. Το πράσινο πλαίσιο σηματοδοτεί την περιοχή ταχυτήτων που συναντώνται σε κοκκώδη φίλτρα. (Πηγή: Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2007)).

### ***Αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διάλυσης εξαιτίας της πίεσης αιχμών των κόκκων***

Σε κορεσμένο υλικό όπου οι τάσεις μεταξύ των κόκκων είναι υψηλές, το υλικό στα σημεία των αιχμών γίνεται διαλυτό και μεταφέρεται σε διπλανές θέσεις. Εκεί που η πίεση είναι αρκετά χαμηλότερη το υλικό εναποτίθεται πάλι δημιουργώντας επαφή μεταξύ των κόκκων. Αυτές οι επαφές έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής, αλλά το δυσμενέστερο για την λειτουργία των φίλτρων είναι το γεγονός ότι αποδίδουν συνοχή στο υλικό κάνοντάς το μη καταρρεύσιμο. Το φαινόμενο περιγράφεται στην διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο *pressure solution*.



Σχήμα 3.7: Σχηματική απεικόνιση αλληλεμπλοκής των κόκκων κάτω από υψηλές πιέσεις. (Το μωβ χρώμα υποδηλώνει το υλικό που εναποτίθεται δημιουργώντας την νέα επαφή. (Πηγή: Eric Twelker, 2006)



Σχήμα 3.8: Ακόμη μια σχηματική απεικόνιση της αλληλεμπλοκής των κόκκων λόγω διάλυσης εξαιτίας της πίεσης αιχμών. (Πηγή: Eric Twelker, 2006)

Το φαινόμενο της διάλυσης λόγω πίεσης δεν παρατηρείται μόνο στα ασβεστολιθικά υλικά, αλλά γενικότερα στα ιζηματογενή όπως επίσης και στα μεταμορφωμένα πετρώματα και εξηγεί την ανάπτυξη συνεκτικότητας σε αλληλεπίδραση με το νερό σε υλικά που δεν θα δικαιολογούσαν αυτή την



συμπεριφορά από τα χημικά τους χαρακτηριστικά (Fell, 2005). Τέτοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε συμπυκνωμένες άμμους σε έργα οδοποιίας (Hazell, 2003).

Η μέχρι τώρα αντιμετώπιση του προβλήματος ανάπτυξης συνεκτικότητας στα φίλτρα κυρίως εντασσόταν στην πρακτική να χρησιμοποιούνται χαμηλά ποσοστά λεπτόκοκκων 2%, το μέγιστο 5% και πάντα μη πλαστικά. Το μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων συνεπάγεται μικρότερη ενεργή επιφάνεια και άρα διαλυτότητα. Επίσης είναι πιο δύσκολο να κρατηθούν δεσμοί αιχμών σε μεγαλύτερου μεγέθους κόκκους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η χημική και γεωλογική σύσταση όλων των υλικών και η μεταβολή τους στο χρόνο και στη χημική συμπεριφορά του περιβάλλοντος είναι πολύ σημαντική. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν δοκιμές και μετρήσεις που σκοπό έχουν να βοηθήσουν το μηχανικό να αποκτήσει πλήρη εικόνα για την συμπεριφορά των υλικών του. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές από τις επόμενες μεθόδους αναπτύχθηκαν κυρίως για την μελέτη της επίδρασης του επιθετικού νερού στο σκυρόδεμα, καθώς δεν έχουν αναπτυχθεί μελέτες για την επίδραση του φίλτρα από ανθρακικά αδρανή.

### 4.1 Μετρήσεις ιδιοτήτων του νερού.

Το βασικό αντιδρόν με τα αδρανή υλικά του φίλτρου στοιχείο είναι το νερό του ταμιευτήρα. Σε υπάρχοντα έργα είναι απλό να ληφθούν δείγματα από τον ήδη υπάρχοντα ταμιευτήρα, ή και μέσω γεωτρήσεων από το σώμα του φράγματος, και να γίνουν οι μετρήσεις για τον έλεγχο της χημείας του νερού. Αντίθετα, σε φάση σχεδιασμού του έργου οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν σε υδατικούς φορείς που θα γίνουν οι τροφοδότες του μελλοντικού ταμιευτήρα, όπως ποταμούς και πηγές της λεκάνης απορροής με την πρόβλεψη όμως της πλήρους γεωλογίας του ταμιευτήρα. Ένα παράδειγμα, θα μπορούσε να κάνει την τελευταία πρόταση πιο κατανοητή. Αν σε ένα μελλοντικό ταμιευτήρα ο προσδιορισμός της υδατικής χημείας γίνει στον ποταμό που θα πληρώσει τον ταμιευτήρα και σε άλλο σημείο του ταμιευτήρα υπάρχουν οργανικές αποθέσεις, οι μετρήσεις δεν θα χαρακτηρίζουν το νερό του ταμιευτήρα που θα σχηματιστεί και θα πρέπει να γίνει θεωρητική ή πειραματική επέκταση αυτών από τους μηχανικούς.

Η χημική ανάλυση του νερού θα γίνει γύρω από ιδιότητες όπως το pH, η αλκαλικότητα, η σκληρότητα, ο δείκτης κορεσμού σε CO<sub>2</sub>, η θερμοκρασία και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Πολλοί από τους δείκτες είναι ισοδύναμοι. Ακολουθεί

στις επόμενες παραγράφους η περιγραφή των μεθόδων και διεργασιών για τον προσδιορισμό των υδατικών ιδιοτήτων.

#### 4.1.1 Περιεκτικότητα σε ιόντα

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος θα ήταν μια αναλυτική χημική ανάλυση που θα δίνει την περιεκτικότητα του νερού σε όλα τα κύρια ιόντα που είναι διαλυμένα σε αυτό συνήθως σε mg/l ή ppm (parts per million) ή στα ισοδύναμα e\*mg/l σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Ion	mg/l	e·mg/l	e·CaCO <sub>3</sub> (mg/l)
Calcium .....	20.020	0.999	50.050
Magnesium .....	2.190	0.180	8.975
Sodium .....	9.660	0.420	
Potassium .....	3.900	0.100	
Iron .....	1.000	0.036	
Total cations .....		1.735	
Chloride .....	21.500	0.606	
Sulphate .....	0.960	0.020	
Nitrate .....	1.310	0.021	
Nitrite .....	0.030	0.001	
Bicarbonate .....	65.854	1.079	54.000
Total anions .....		1.727	
Total dissolved solids .....	126.424		

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα πίνακα ανάλυσης περιεκτικότητας νερού σε ιόντα

(Πηγή:ICOLD, 1989)

Μια τέτοια ανάλυση περιέχει ακόμη πληροφορίες για το *pH*, δηλαδή τον αρνητικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου του διαλύματος. Το *pH* είναι ένας δείκτης χαρακτηρισμού του διαλύματος ως όξινο ( $pH < 7$ ), βασικού ( $pH > 7$ ), ή ουδέτερου ( $pH = 7$ ). Σε λεκάνες απορροής σε ορεινές περιοχές συνήθως το *pH* δεν είχε πολύ μεγάλη διακύμανση από την τιμή του καθαρού νερού, δηλαδή το 7.Κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 8. Τιμές χαμηλότερες του 5 υποδηλώνουν την ύπαρξη ισχυρών οξέων (ICOLD 1989).

Καταλληλότερος δείκτης επιθετικότητας του νερού για τα ανθρακικά αδρανή κυρίως είναι η αλκαλικότητα ή οξύτητα. *Αλκαλικότητα* είναι η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει οξέα και αντίστοιχα *οξύτητα* η ικανότητα του νερού να

εξουδετερώνει βάσεις. Σε όρους  $\text{CO}_2$  η αλκαλικότητα εκφράζεται ως ισοδύναμο ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{e CaCO}_3$ ). Δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ pH και αλκαλικότητας.

Ένας ακόμη δείκτης που χρησιμοποιείται είναι και η *σκληρότητα* του νερού, η οποία είναι το άθροισμα της προσωρινής και της μόνιμης σκληρότητας (temporary and permanent hardness). Η πρώτη οφείλεται στο διοξείδιο του μαγνησίου και του ασβεστίου και μπορεί να αναιρεθεί με το βρασμό, ενώ η δεύτερη γνωστή και ως μη-ανθρακική σκληρότητα οφείλεται στα θειϊκά και στα χλωρίδια του ασβεστίου και του μαγνησίου. Το άθροισμά τους, η συνολική σκληρότητα μετρείται σε  $\text{e CaCO}_3$  (mg/l).

#### 4.1.2 Ποιοτική δοκιμή Van Aardt & Fulton

Οι Van Aardt και Fulton (1977) πρότειναν μια πολύ απλή μέθοδο για ένα ποιοτικό προσδιορισμό της επιθετικότητας ή μη του νερού.

Πρώτο βήμα είναι η λήψη ενός δείγματος A του νερού που μας ενδιαφέρει και ο προσδιορισμός του pH και της αλκαλικότητάς του. Επόμενο βήμα είναι σε μια ποσότητα από το νερό του δείγματος A, η προσθήκη καθαρού ανθρακικού ασβεστίου σε μεγάλη ποσότητα σε σχέση με αυτήν του νέου δείγματος (μια κουταλιά σε διάλυμα 150ml) και με ανακάτεμα για να διαλυθεί το ανθρακικό ασβέστιο προκύπτει το διάλυμα B. Ακολούθως, γίνεται η σύγκριση της αλκαλικότητας ή του pH των διαλυμάτων A και B. Αν η αλκαλικότητα ή το pH του B:

- (i) είναι μικρότερα από το A, τότε το A ήταν ήδη υπερκορεσμένο σε  $\text{CaCO}_3$
- (ii) είναι ίσα με το A, το A βρίσκεται σε χημική ισορροπία με το  $\text{CaCO}_3$
- (iii) είναι μεγαλύτερα από το A, το A δεν είναι κορεσμένο σε  $\text{CaCO}_3$  και συνεπώς είναι πιθανώς επιθετικό για τα ανθρακικά αδρανή.

#### 4.1.3 Δείκτης κορεσμού ή Langelier

Ήδη από το 1936 ο Langelier είχε προτείνει τη χρήση ενός δείκτη κορεσμού που να λαμβάνει υπόψη το pH, τη θερμοκρασία, τη σκληρότητα, την αλκαλικότητα και τα συνολικά διαλυμένα στερεά για τον προσδιορισμό της επιθετικότητας του νερού. Ο Morton (1977) έκφρασε το δείκτη αυτόν με ένα εύχρηστο αλγόριθμο:

$$LI = pH + \log C + \log A + 0,025T - 0,011S^{0,5} - 12,30 \quad (4.1)$$

όπου: LI: ο δείκτης Langelier

pH: τιμή του pH

C: συνολική σκληρότητα εκφρασμένη σε e.CaCO<sub>3</sub> (mg/l)

A: η αλκαλικότητα (με χρήση ως δείκτη της ηλιανθίνης(Methyl Orange)) εκφρασμένη σε e.CaCO<sub>3</sub> (mg/l)

T: θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου, πάντα μεταξύ 0° και 25°

S: συνολικά διαλυμένα στερεά <1000 mg/l

Αν ο δείκτης LI που θα προκύψει είναι αρνητικός, τότε το νερό χαρακτηρίζεται ως επιθετικό και μάλιστα για τιμές πέρα του -1,5 πολύ επιθετικό. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν πιθανή εναπόθεση ασβεστίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την μείωση της θερμοκρασίας αυξάνεται η επιθετικότητα.

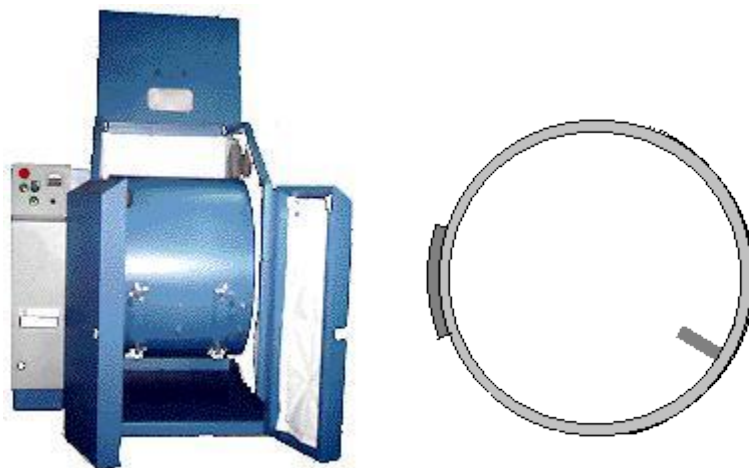
## 4.2 Μετρήσεις των ιδιοτήτων των αδρανών

### 4.2.1 Δοκιμή Los Angeles

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της αντοχής των αδρανών υλικών σε τριβή και κρούση με τη μηχανή Los Angeles. Η δοκιμή αυτή, που επινοήθηκε και σχεδιάστηκε στο Εργαστήριο Δομικών της πόλης Los Angeles, θεωρείται η πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό της σκληρότητας, δυσθραυστότητας και ποσοστού μαλακών τεμαχίων των αδρανών υλικών από οποιαδήποτε άλλη δοκιμή για τους παρακάτω λόγους:

- Η δράση επί των αδρανών είναι πολύ ισχυρή, ώστε να αποκαλύπτεται οποιαδήποτε αδυναμία του υλικού.
- Είναι κατάλληλη τόσο για τα θραυστά όσο και για τα φυσικά αδρανή.
- Η δοκιμή είναι αρκετά σύντομη.
- Δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του ειδικού βάρους των αδρανών, εξ αιτίας της μεγάλης χωρητικότητας του κυλίνδρου της μηχανής.
- Περιορίζεται σημαντικά η επίδραση αυτού που εκτελεί τη δοκιμή. Η δοκιμή που περιγράφεται παρακάτω είναι σύμφωνη με το πρότυπο A.S.T.M C 131, πρότυπο στο οποίο παραπέμπουν οι ισχύοντες ελληνικοί κανονισμοί.

Η μηχανή Los Angeles αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο, κλειστό στις βάσεις του, εσωτερικής διαμέτρου 710 mm και μήκους 510 mm. Η μηχανή στηρίζεται κατάλληλα ώστε να μπορεί να περιστρέφεται οριζόντια. Στην πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει θυρίδα από την οποία εισάγεται το δείγμα και η οποία κλείνει αεροστεγώς. Η θυρίδα είναι σχεδιασμένη έτσι που να διατηρεί την ίδια καμπυλότητα του κυλίνδρου. Στη εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει χαλύβδινη προεξοχή μήκους όσο και αυτό του κυλίνδρου, πλάτους 89 mm η οποία έχει την διεύθυνση της ακτίνας του κυλίνδρου.



Σχήμα 4.1: Η μηχανή Los Angeles (Πηγή:www.teicrete.gr)

Εντός της μηχανής εισάγονται χαλύβδινες σφαίρες διαμέτρου περίπου 47,5 mm και βάρους 390 - 445 gr η κάθε μία. Ο αριθμός καθώς και το συνολικό βάρος των σφαιρών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από τη διαβάθμιση του πρὸς δοκιμή υλικού και δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Διαβάθμιση	Αριθμός σφαιρών	Βάρος φορτίου σφαιρών (gr)
A	12	5.000
B	11	4.584
Γ	8	3.330
Δ	6	2.500
E	12	5.000
Z	12	5.000
H	12	5.000

Πίνακας 4.2: Πίνακας σφαιρών της δοκιμής Los Angeles (Πηγή:www.teicrete.gr)



Το προς δοκιμή δείγμα επιλέγεται από καθαρό αδρανές υλικό, αφού ξηραθεί αυτό στους 105 - 110 °C μέχρι σταθερού βάρους. Η ποσότητα του δείγματος όπως και η κατάλληλη διαβάθμιση επιλέγεται από τον πίνακα που ακολουθεί. Πρέπει δε η διαβάθμιση αυτή να είναι η πλησιέστερη του προς εξέταση αδρανούς.

Το δείγμα μαζί με τον αντίστοιχο αριθμό σφαιρών εισάγονται στη μηχανή Los Angeles. Η μηχανή μπαίνει σε κίνηση με ταχύτητα 30 - 33 στροφών ανά λεπτό. Για τις διαβαθμίσεις Α, Β, Γ και Δ απαιτούνται 500 στροφές συνολικά, ενώ για τις Ε, Ζ και Η 1000 στροφές. Όταν συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός στροφών παραλαμβάνεται το υλικό, το οποίο στη συνέχεια κοσκινίζεται από το κόσκινο Νο 12. Το συγκρατούμενο στο Νο 12 υλικό πλένεται, ξηραίνεται και ζυγίζεται με ακρίβεια 1 gr.

*Υπολογισμοί:* Η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του τελικού βάρους του δείγματος εκφρασμένη σε ποσοστό % του αρχικού βάρους δίνει το ποσοστό φθοράς του υπό εξέταση αδρανούς υλικού.

Η % φθορά υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (4.2)$$

όπου:

W = η ζητούμενη φθορά

A = αρχικό βάρος του δείγματος

B = συγκρατούμενο βάρος στο κόσκινο Νο 12.

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ένα αδρανές υλικό ως σκληρό, μαλακό ή ενδιάμεσης σκληρότητας.

#### 4.2.2 Δοκιμή ισοδύναμου άμμου

Η δοκιμή του ισοδύναμου άμμου ( sand equivalent ) εκτελείται στο εργαστήριο ή το εργοτάξιο επί όλων των αδρανών υλικών. Η δοκιμή αυτή γίνεται για να διαπιστωθεί η παρουσία επιβλαβών ποσοτήτων αργίλου στα αδρανή υλικά. Η παρουσία αργίλου στα αδρανή είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί διόγκωση μετά από κορεσμό του

αδρανούς με νερό. περιβάλλει τους κόκκους του αδρανούς με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως λιπαντικό και δίνει συνοχή και πλαστικότητα στα φίλτρα, γεγονός ανεπιθύμητο. Η δοκιμή γίνεται σε δείγμα υλικού διερχόμενο από το κόσκινο No 4 (άμμος) και υπολογίζεται η κατ' όγκον σχέση της ποσότητας της αργίλου προς την ποσότητα των κόκκων της άμμου.

Η συσκευή αποτελείται από τα παρακάτω όργανα: **1.** Διαφανή πλαστικό σωλήνα, εσωτερικής διαμέτρου 1 1/4 in, βαθμολογημένο μέχρι τις 15 in. **2.** Ορειχάλκινο λεπτό σωλήνα που καταλήγει σε κωνική απόληξη που φέρει δύο οπές. **3.** Πλαστική φιάλη χωρητικότητας 3,785 lt. ( 1 US gal ) **4.** Πλαστικό λεπτό σωλήνα που συνδέει την φιάλη με τον ορειχάλκινο σωλήνα. **5.** Πιεστικό στέλεχος που αποτελείται από μεταλλική ράβδο που στη μια άκρη καταλήγει σε βάση κωνικού σχήματος και στην άλλη σε κυλινδρικό βαρύδι συνολικού βάρους 1 kg. **6.** Μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο χωρητικότητας 85 ±5 cm<sup>3</sup>. **7.** Πλαστικό χωνί.

*Αντιδραστήρια:* Το υδατικό διάλυμα που χρησιμοποιείται περιέχει: - άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο. - γλυκερίνη. - φορμαλδεΐδη. Το χλωριούχο ασβέστιο και η γλυκερίνη προστίθενται στο διάλυμα για να επιταχύνουν την καθίζηση των κόκκων της αργίλου, ενώ η φορμαλδεΐδη προστίθεται για αποστείρωση του διαλύματος.

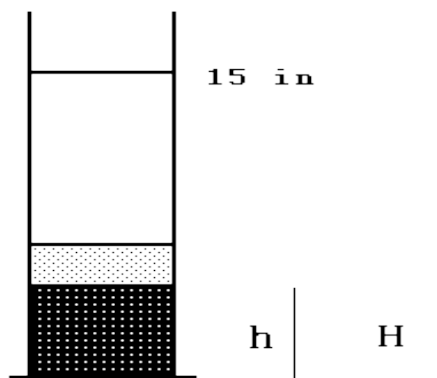
Το προς δοκιμή υλικό παίρνεται από το διερχόμενο από το κόσκινο No 4, το οποίο έχει προηγουμένως ξηρανθεί στους 105 °C περίπου.

*Διαδικασία:* Αφού γεμίσουμε την πλαστική φιάλη με το διάλυμα δοκιμής και την τοποθετήσουμε στη βάση της (σε ύψος 90 cm από το τραπέζι εργασίας) , μεταφέρουμε με σιφωνισμό στον ογκομετρικό σωλήνα υγρό μέχρι την χαραγή των 4 in. Στη συνέχεια γεμίζουμε με το δείγμα το μεταλλικό δοχείο και το μεταφέρουμε στον σωλήνα με την βοήθεια του χωνιού. Κατόπιν, κτυπούμε με τα χέρια ελαφριά τον πυθμένα του σωλήνα ώστε να φύγουν τυχόν φυσαλίδες που έχουν εγκλωβιστεί και να διαβραχεί πλήρως το δείγμα. Αφήνουμε το σωλήνα με το δείγμα σε ηρεμία για 10 λεπτά. Αφού κλείσουμε τον σωλήνα με το ελαστικό πώμα τον τοποθετούμε στην ειδική συσκευή η οποία εκτελεί 90 παλινδρομικές κινήσεις σε 30 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια εισάγουμε στον κύλινδρο τον ορειχάλκινο σωλήνα

προσέχοντας αυτός να φτάσει μέχρι τον πυθμένα του κυλίνδρου. Ανοίγοντας τη στρόφιγγα αφήνουμε να τρέξει το διάλυμα δοκιμής το οποίο ξεπλένει την άμμο από το αργιλώδες υλικό, το οποίο ανεβαίνει προς τα πάνω. Συνεχίζουμε την παραπάνω διαδικασία, προσέχοντας να ξεπλυθεί πλήρως η άμμος, μέχρι η στάθμη του υγρού να φτάσει στη χαραγή των 15 in. Ακολούθως αφήνουμε το σωλήνα σε ηρεμία για 20 min. Μετά την παρέλευση των 20 λεπτών διαβάζουμε το ύψος της αργίλου H. Εισάγουμε με προσοχή το πιεστικό στέλεχος και διαβάζουμε το ύψος της άμμου h.

*Υπολογισμοί:* Το Ισοδύναμο άμμου ( S.E.) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S.E = \frac{h}{H} * 100 \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.2: Πειραματική διάταξη δοκιμής ισοδύναμου άμμου (Πηγή:

[www.teicrete.gr](http://www.teicrete.gr))

Όταν το πηλίκο της διαίρεσης είναι δεκαδικός αριθμός, στρογγυλοποιείται στον προς τα πάνω ακέραιο αριθμό. Συνήθως η δοκιμή εκτελείται σε 3 δείγματα και ως τιμή του Ισοδύναμου Άμμου λαμβάνεται ο μέσος όρος των τριών δοκιμών, στρογγυλεμένος στον προς τα πάνω ακέραιο αριθμό. Υψηλή τιμή του Ισοδύναμου

άμμου σημαίνει υλικό με ελάχιστη περιεκτικότητα σε άργιλο. π.χ. άμμος ποταμού ή θαλάσσης.

### **4.2.3 Προσδιορισμός ειδικών βαρών και υδροαπορροφητικότητας αδρανών υλικών**

Σκοπός της άσκησης είναι ο προσδιορισμός των ειδικών βαρών και της υγρασίας απορρόφησης των χονδρόκοκκων αδρανών.

*Ορισμοί:*

*Φαινόμενο ειδικό βάρος (apparent specific gravity):* είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς προς τον όγκο συμπαγούς υλικού και των αδιαπέρατων κενών (κλειστών πόρων).

*Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (bulk specific gravity):* είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς προς τον συνολικό φαινόμενο όγκο (όγκο συμπαγούς υλικού, διαπερατών και αδιαπέρατων πόρων, όχι όμως και των κενών μεταξύ των πόρων).

*Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου υλικού επιφανειακά ξηρού (bulk specific gravity / Saturated - Surface - Dry):* είναι ο λόγος του συνολικού βάρους του αδρανούς και του νερού που προσροφήθηκε προς το συνολικό φαινόμενο όγκο .

*Υδροαπορροφητικότητα % (absorption) :* είναι η ποσότητα του νερού που απορροφάται από 100 gr του υλικού σε ορισμένο χρόνο και θερμοκρασία.

*Σ υ σ κ ε υ ή :1)* Ζυγός ακριβείας 0,05% του βάρους του προς εξέταση δείγματος και ικανότητας 5 kg τουλάχιστον. Ο ζυγός πρέπει να φέρει διάταξη ανάρτησης καλαθιού στο κάτω μέρος του. **2)** Συρμάτινο καλάθι κυλινδρικού σχήματος κατασκευασμένο από ανοξείδωτο πλέγμα Νο 6 διαμέτρου 20 cm και ύψους 20cm. - Δοχείο νερού που να επιτρέπει ανεμπόδιστα την βύθιση του καλαθιού σ ' αυτό.

*Ε κ τ έ λ ε σ η :*

1. Βάζουμε το δείγμα σε δοχείο με νερό για 24 ώρες και σε θερμοκρασία περίπου 20 °C.
2. Βγάζουμε το δείγμα από το νερό, το σκουπίζουμε προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί για να διώξουμε την επιφανειακή υγρασία και το ζυγίζουμε ( B ). Το δείγμα, σ' αυτή την κατάσταση είναι κορεσμένο και επιφανειακά ξηρό.
3. Στην συνέχεια τοποθετούμε το δείγμα σε συρμάτινο καλάθι που είναι συνδεδεμένο με το ζυγό και αφού βυθίσουμε το καλάθι μέσα στον κύλινδρο με το νερό ξαναζυγίζουμε.(Γ). Λόγω της άνωσης το δείγμα μέσα στο νερό ζυγίζει λιγότερο, τόσο όσο και η άνωση. Η άνωση,  $A=V*\rho_{\nu}$ , όπου  $\rho_{\nu} = 1 \text{ gr/cm}^3$  - η πυκνότητα του νερού- ισοδυναμεί με την διαφορά B - Γ.
4. Ξηραίνουμε το δείγμα στο φούρνο στους 105 °C περίπου και το ζυγίζουμε.(Δ)

Υπολογισμοί:

$$\text{μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος} = \frac{\Delta}{B-\Gamma} \quad (4.4\alpha)$$

$$\text{μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος, κορεσμ. & επιφ. ξηρό} = \frac{B}{B-\Gamma} \quad (4.4\beta)$$

$$\text{φαινόμενο ειδικό βάρος} = \frac{\Delta}{\Delta-\Gamma} \quad (4.4\gamma)$$

$$\text{υδροαπορροφητικότητα}\% = \frac{B-\Delta}{\Delta} * 100 \quad (4.4\delta)$$

Καταγράφουμε τα αποτελέσματα των ειδικών βαρών με δύο δεκαδικά ψηφία και της υδροαπορροφητικότητας στο πλησιέστερο 0,1%.

Ο προσδιορισμός του όγκου ενός υλικού για τον υπολογισμό των ειδικών βαρών μπορεί να γίνει και σε ογκομετρικό κύλινδρο από τον όγκο του νερού που εκτοπίζει. Παρατηρήσεις : α) Κατά τον υπολογισμό της άνωσης των σκύρων πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την άνωση που οφείλεται στο συρμάτινο καλάθι. β) Όταν το προς δοκιμή δείγμα χωρίζεται σε δύο ή περισσότερα κλάσματα το μέσο ειδικό βάρος του δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$G = 1/(P1/100G1 + P2/100G2 + \dots + Pn/100Gn)$$

όπου: G = το μέσον ειδικό βάρος

G1, G2, ..., Gn : ειδικά βάρη κλασμάτων.

P1, P2, ... Pn : το ποσοστό συμμετοχής κάθε κλάσματος.

#### **4.2.4 Αντοχή σε αποσάθρωση**

Η δοκιμή υγείας για τον καθορισμό της ανθεκτικότητας των αδρανών σε αποσάθρωση λόγω επαναλαμβανόμενης έκθεσης αυτών σε διάλυμα θειικού μαγνησίου εκτελείται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1367-2, ή σύμφωνα με τις Αμερικάνικες προδιαγραφές AASHTO T 104.

### 4.3 Εργαστηριακές δοκιμές υλικού

#### 4.3.1 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης με χρήση ασβέστου

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει αναφορά πειραματικών αποπειρών για την επίδραση της εναπόθεσης υλικού σε δοκιμές σε αδρανή οδοποιίας. Εκεί λόγω των μεγάλων πιέσεων συναντιέται συχνά το φαινόμενο της συγκόλλησης των κόκκων με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και την εμφάνιση συνοχής. Μια τέτοια αναφορά κάνει ο McClellan (2001) σε δοκιμές του σε ανθρακικά αδρανή με σκοπό την διερεύνηση του φαινομένου σε συνθήκες συναφείς αυτών του φυσικού πεδίου. Οι δοκιμές αυτές αποτελούν μια προσπάθεια του ερευνητή να αναπτύξει και να αξιολογήσει μια μορφή δοκιμών για το χαρακτηρισμό των ανθρακικών αδρανών με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες και όχι περιορισμένα χημικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά. Προσπάθεια που συγχρονίζεται με το αντικείμενο της παρούσας εργασία και γενικότερα αποτελεί σημείο έρευνας για τους μηχανικούς φραγμάτων.

Μια σειρά δοκιμών υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικά ορυκτά υποβλήθηκε στις δοκιμές: Limerock Bearing Ratio (LBR) (δοκιμή αντίστοιχη της δοκιμής Proctor), μονοτονική τριαξονική φόρτιση, κυκλική τριαξονική φόρτιση, στρεπτική διάτμηση, δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη. Κάθε δοκιμή έγινε δύο φορές για κάθε δείγμα. Μία με την προσθήκη ασβέστου (1% κατά βάρος) για την επιτάχυνση του φαινομένου της συγκόλλησης και μια χωρίς. Οι δοκιμές έγιναν σε ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα σε σειρές με διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας ανθρακικών ορυκτών και σε διαφορετικές υγρασίες.

Οι αναλύσεις που ακολούθησαν ήταν πολυπαραμετρικές ( $\phi, c, E, G, \gamma_s$ ) ανάλογα με την δοκιμή που πραγματοποιήθηκε. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατό να προκύψει μια δυνατή, άμεση συσχέτιση μεταξύ της προσθήκης ασβέστου και της αύξησης της αντοχής. Ωστόσο, προέκυψαν κάποιες παρατηρήσεις που μπορούν να φανούν χρήσιμες για προβληματισμό.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά περιεκτικότητας σε ανθρακικά ορυκτά, τα ποσοστά χονδρόκοκκου και λεπτόκοκκου υλικού και τα ποσοστά υγρασίας. Είναι φανερό ότι τα δείγματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαβάθμιση των ιδιοτήτων τους και αντιπροσωπεύουν μια μεγάλη γκάμα υλικών.

PIT NO.	PERCENT CARBONATES	% PASSING 4.75 mm	% RETAINED 4.75 mm	OPTIMUM MOISTURE CONTENT (%)	
				Untreated	Treated
36-246	98	82	18	10.0	11.0
56-465	77	74	26	8.0	9.0
12-008	70	49	51	7.0	8.0
87-090	70	66	34	6.0	7.0
17-091	52	80	20	8.0	9.0
93-406	47	73	27	7.0	7.0
93-406	40	64	36	7.0	8.0
70-279	40	78	22	7.0	7.0

Πίνακας 4.3: Στοιχεία σειράς δειγμάτων των δοκιμών (Πηγή: McClellan,2001)

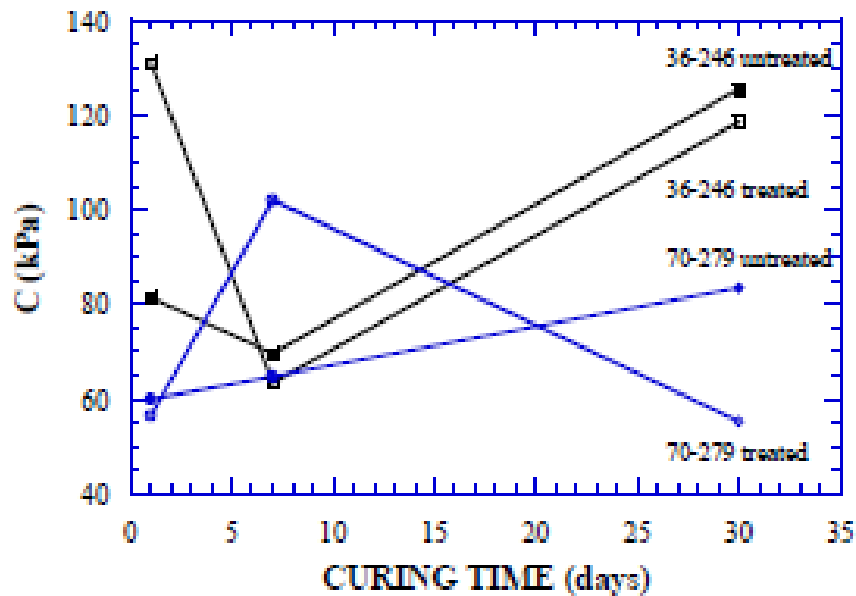
Για την τριαξονική δοκιμή, η οποία θα σχολιαστεί ακολούθως, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές αδρανών, μια με μεγάλη περιεκτικότητα (36-246) σε ανθρακικά ορυκτά και μια με μικρή (70-279). Το υλικό κάθε σειράς χωρίστηκε ένα μέρος με καθαρό υλικό και ένα άλλο στο οποίο έχει προστεθεί 1% κατά βάρος άσβεστος. Από κάθε μέρος σχηματίστηκαν έξι δοκίμια με τη τροποποιημένη δοκιμή Proctor τα οποία μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (1,7,30 μέρες) υποβλήθηκαν σε τριαξονική φόρτιση.



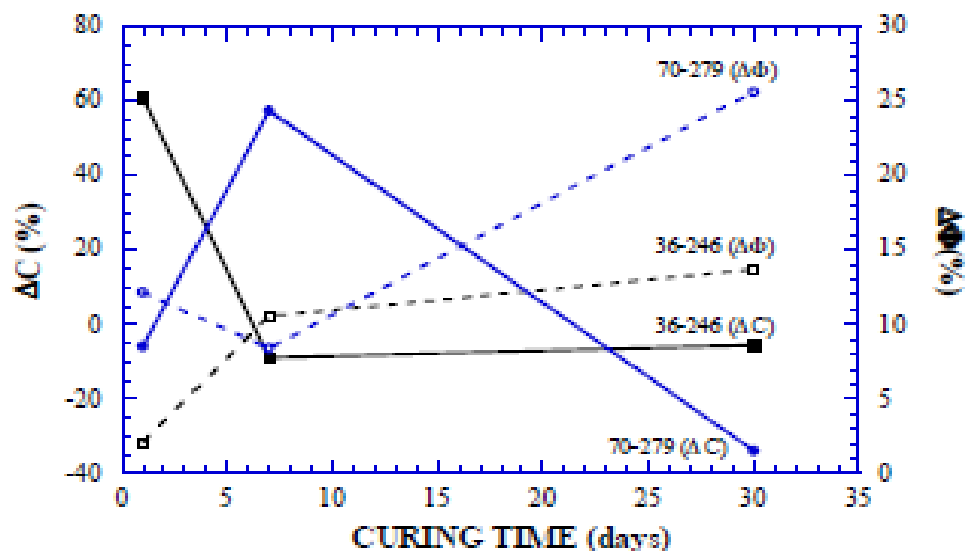
PIT NO./ CONDITION	AGE (days)	MOISTURE CONTENT w %	DRY DENSITY $\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	SHEAR STRENGTH PARAMETERS	
				C (kPa)	$\Phi$ (degrees)
36-246/untreated	1	10.0	1899		
	1	10.3	1890	81.4	48.0
	7	10.4	1893		
	7	10.2	1893	69.6	46.2
	30	10.4	1866		
	30	10.4	1882	125.5	46.9
	Mean	10.3	1887	92.2	47.0
36-246/treated	1	10.0	1869		
	1	10.2	1856	131.0	49.0
	7	10.2	1857		
	7	10.1	1866	63.4	51.1
	30	10.1	1860		
	30	9.9	1861	118.6	53.3
	Mean	10.1	1861	104.3	51.1
Change (%)	1	---	---	60.9	2.1
	7	---	---	-8.9	10.6
	30	---	---	-5.5	13.7
	Mean	---	-1.4	13.12	8.7
70-279/untreated	1	7.1	2022		
	1	7.1	2026	60.0	42.5
	7	7.1	2036		
	7	7.1	2026	64.8	45.0
	30	7.2	2039		
	30	7.0	2036	83.4	39.4
	Mean	7.1	2031	69.4	42.3
70-279/treated	1	7.0	2053		
	1	7.2	2049	56.5	47.7
	7	7.1	2043		
	7	7.2	2042	102.0	48.8
	30	7.2	2037		
	30	7.2	2042	55.2	49.5
	Mean	7.2	2044	71.2	48.7
Change (%)	1	---	---	-5.8	12.2
	7	---	---	57.4	8.4
	30	---	---	-33.8	25.6
	Mean	---	0.6	2.6	15.1

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής της σειράς δειγμάτων (Πηγή: McClellan, 2001)

Στο επόμενο σχήμα δίδεται πιο παραστατικά η διακύμανση της συνοχής του υλικού, που είναι και το μέγεθος που μας ενδιαφέρει πιο πολύ στην περίπτωση του υλικού των φίλτρων.



Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της συνοχής του υλικού με την πάροδο του χρόνου. (Πηγή: McClellan, 2001)



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της συνοχής και της γωνίας τριβής του υλικού που προκύψαν από την τριαξονική δοκιμή. (Πηγή: McClellan, 2001)

Η επιλογή αυτής της δοκιμής για την διεξαγωγή συμπερασμάτων έγινε γιατί δίνει μεγέθη συνεκτικότητας (τιμές συνοχής C). Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι η προσθήκη ασβέστου σε μέσο όρο αύξησε την συνοχή των δειγμάτων αλλά σε μικρά ποσοστά. Ωστόσο, αυτή η μικρή έστω αύξηση δεν περιγράφεται σε όλα τα δείγματα ούτε σε όλες στις χρονικές στιγμές. Για παράδειγμα, στο δείγμα υψηλού ανθρακικού ποσοστού (36-246) η αύξηση με την προσθήκη ασβέστου την πρώτη μέρα είναι της τάξης 60%, ενώ στο δείγμα χαμηλού ανθρακικού ποσοστού (70-279) η προσθήκη ασβέστου συνοδεύεται από μείωση γύρω στο 5%. Επιπλέον, στις επόμενες δοκιμές στις 7 και 30 ημέρες υπάρχουν αυξομειώσεις που δεν μπορούν να οδηγήσουν σε συγκεκριμένο συμπέρασμα.

Μπορούν να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις στην διαδικασία των δοκιμών που ίσως μπορούν να εξηγήσουν τις αποκλίσεις από ένα σταθερό συμπέρασμα. Η προσθήκη της ασβέστου έγινε από την αρχή στο ξηρό δείγμα των αδρανών και μετά ακολούθησε η συμπύκνωση κατά Proctor. Συνεπώς, η συνεισφορά της υγρασίας κατά την συμπύκνωση είναι πιθανό να μην επηρέασε την ποσότητα ασβέστου του δείγματος με τρόπο παρόμοιο με τη φυσική διαδικασία. Επιπλέον, ο μηχανισμός εναπόθεσης υλικού από το θεωρητικό μοντέλο ανάγεται σε συνθήκες ροής μικρών ταχυτήτων ή κορεσμού του υλικού όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3 και όχι σε μερικό κορεσμό του υλικού όπως στο πείραμα αυτό της βέλτιστης υγρασίας. Ακόμα, η επιρροή του χρόνου επίσης δεν απεικονίστηκε από ένα καθαρό συμπέρασμα. Σε αυτό το σημείο ένας παράγοντας προβληματισμού θα ήταν η επίδραση του χρόνου στην υγρασία των συμπυκνωμένων δειγμάτων. Βέβαια η σειρά πειραμάτων έγινε με ελαφρώς διαφορετικό προσανατολισμό από αυτό που μας ενδιαφέρει στην περίπτωση φίλτρων. Ερώτημα ήταν η αύξηση ή όχι της αντοχής, και όχι μόνο της συνεκτικότητας του υλικού, κάτι που όντως υποδείχτηκε όχι μόνο από την τριαξονική, αλλά και από τις άλλες δοκιμές. Ωστόσο, από την εμπειρία αυτής της δοκιμής μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για την αξιολόγηση της τιμής συνοχής και των μεταβολών της μια ανάλογη διαδικασία δεν θα ήταν αποτελεσματική.

Η δοκιμή της τριαξονικής φόρτισης, παρόλα, αυτά μπορεί να φανεί χρήσιμη για τον προσδιορισμό της μεταβολής της συνοχής καθώς δίνει τιμές συνοχής. Αυτό που

μπορεί να αλλάξει είναι οι συνθήκες του δοκιμίου πριν την δοκιμή. Καταρχήν, η προσθήκη της ασβέστου θα ήταν πιο σωστό να γίνει κατευθείαν στο νερό που θα χρησιμοποιηθεί για να δωθεί η βέλτιστη υγρασία στο δείγμα. Όπως έχουμε δει η εναπόθεση είναι αποτέλεσμα καταρχήν του κορεσμού του διαλύματος σε ιόντα ασβεστίου. Έτσι, θα ήταν πιο κοντά στον θεωρητικό μηχανισμό να δημιουργηθεί πρώτα ένα κορεσμένο διάλυμα και έπειτα να εισαχθεί στο υλικό. Ακόμα, οι δοκιμές μπορούν να γίνουν σε ξηρό, μερικώς κορεσμένο και κορεσμένο υλικό για να βγουν συμπεράσματα. Όπως έχει αναφερθεί ξανά οι συνθήκες ροή στα φίλτρα έχουν μεγάλες διακυμάνσεις σε συνάρτηση με το χρόνο. Αντίστοιχες διακυμάνσεις ενδεχομένως, λοιπόν, να ακολουθεί και η επίδρασή τους. Για παράδειγμα, ένα δοκίμιο που προκύπτει από αρχικά κορεσμένο δείγμα που στραγγιζόμενο ελεύθερα έχει αποκτήσει ένα χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας, και όχι απαραίτητα τη βέλτιστη, είναι μια περίπτωση συνθηκών κοντά σε αυτήν του φυσικού πεδίου. Βέβαια αυτές δεν είναι συνθήκες απόλυτα ελεγχόμενες, ώστε χρησιμοποιηθούν για βαθμονόμηση υλικού, αλλά είναι ένας τύπος πειράματος που μπορεί να επιβεβαιώσει την επίδραση του φαινομένου.

#### 4.3.2 Δοκιμή κατάρρευσης

Η δοκιμή που κατά βάση χαρακτηρίζει ένα υλικό σε σχέση με την καταρρευσιμότητά του, συσχετίζοντάς την με συνεκτικότητά του είναι η δοκιμή κατάρρευσης (Sandcastle test). Η δοκιμή κατάρρευσης που χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως εργοταξιακά και είναι ουσιαστικά η δοκιμή του Vaughan μπορεί με κάποιες παρεμβάσεις να μετατραπεί από καθαρά ποιοτική που είναι, σε δοκιμή που μπορεί να δώσει και ποσοτικά χαρακτηριστικά σχετικά με την ανεπιθύμητη δημιουργία συνεκτικότητας. Οι παρεμβάσεις έχουν σαν στόχο την εξέταση πρώτον της επίδρασης του φαινομένου αλληλεπίδρασης νερού-ανθρακικών αδρανών και δεύτερον μια μορφή βαθμονόμησης των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων.

Με την κλασική δοκιμή κατάρρευσης γίνεται μια αξιολόγηση για την συνεκτικότητα του υλικού. Μια συγκριτική δοκιμή του ίδιου υλικού σε συνθήκες κορεσμού σε ιόντα ασβεστίου, δηλαδή σε συνθήκες ευνοϊκές για εναπόθεση

υλικού, θα ήταν ενδιαφέρουσα για την αποτύπωση της επιρροής της εναπόθεσης ως δημιουργία δεσμών συνοχής.

Αντίστοιχα με την προηγούμενη παράγραφο, πάλι μια αντίστοιχη τροποποίηση με την προσθήκη κορεσμένου διαλύματος θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί. Φυσικά, για να μπορεί να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων πρέπει να ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία στο υλικό με ή χωρίς προσθήκη ασβέστου. Στην δοκιμή κατάρρευσης, λοιπόν, σε γενικές γραμμές (δεν ακολουθείται επίσημα πατενταρισμένη δοκιμή, αλλά διάφορες μεθοδολογίες με την ίδια λογική συνθηκών) συμπυκνωμένα δοκίμια τοποθετούνται σε μια μικρή δεξαμενή, η οποία σιγά σιγά γεμίζει με νερό. Αν το υλικό καταρρεύσει σχηματίζοντας την γωνία εσωτερικής τριβής (angle of repose), τότε το θεωρούμε μη συνεκτικό. Στην διαδικασία της συμπύκνωσης εισάγεται ποσότητα νερού για να επιτευχθεί η βέλτιστη υγρασία. Σε αυτήν την ποσότητα νερού μπορεί να γίνει η προσθήκη ασβεστίου για να είναι αποτελεσματική ή τουλάχιστον να εξεταστεί αν προκαλεί μεταβολή στον συνοχή και συνεπώς στην καταρρευτικότητα του υλικού.

Ξανά όμως, γεννάται η ανάγκη μετατροπής του ποιοτικού χαρακτηρισμού της δοκιμής (το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι ο χαρακτηρισμός καταρρεύσιμο ή μη υλικό) σε ποσοτικοποιημένο, βαθμοποιημένο. Μια τέτοια προσπάθεια έχει καταγραφεί από την βιβλιογραφία από τους Tadahiko Sakamoto, Yoshikazu Yamaguchi, Hiroyuki Satoh (2003).

Στο άρθρο τους "Identification of Non-cohesive Filters to Prevent Migration of Impervious Materials for Embankment Dams due to Large Earthquakes (fault movement)" με αφετηρία την κρισιμότητα της καταρρευτικότητας των φίλτρων για τα φράγματα σε μια σεισμογενή περιοχή όπως η Ιαπωνία, γίνεται μια διερεύνηση για τη δυνατότητα αύξησης των ποσοστών λεπτόκοκκων (κάτω από το νόμμερο 200) πάνω από το 5%, προτεινόμενο όριο της ICOLD που γενικά ακολουθείται σε παγκόσμια κλίμακα (USBR, 1977). Η σκέψη ήταν η σύγκριση της γωνίας  $\theta$  (όπου  $\theta = \arctan(2H/D)$  όπου  $H$ =ύψος,  $D$ =διάμετρος σχηματιζόμενου κώνου υλικού) της κλασικής δοκιμής του Vaughan με την γωνίας  $\theta$  κάποιων άλλων δοκίμων κατάρρευσης υλικού. Οι τύποι των δοκιμών που έγιναν ήταν οι εξής:

Τύπος δοκιμής	Δοκιμή A	Δοκιμή B	Δοκιμή C
	Στον αέρα	Στο νερό	Κλασική Vaughan
<b>Περιγραφή</b>	Ξηρό υλικό αφήνεται από μικρό ύψος να πέσει και να σχηματίσει ένα σταθερό κώνο υλικού. Μετρούνται τα H,D και προσδιορίζεται το D για 4 θέσεις στην κωνική επιφάνεια και επιλέγεται ο μέσος όρος τους. Το πείραμα επαναλαμβάνεται 3 φορές για το ίδιο υλικό και αν δεν έχουμε μεγάλες διαφοροποιήσεις κρατάμε το μέσο όρο τους.	Ξηρό υλικό αφήνεται από τη στάθμη επιφάνειας του υγρού μέσα σε μια μικρή δεξαμενή και ακολουθείται η διαδικασία της δοκιμής A	Σχηματίζεται συμπτυκνωμένο δοκίμιο 170mm*150mm μέσα σε στέλεχος, το οποίο βυθίζεται μέσα σε δεξαμενή με νερό, πολύ αργά αφαιρείται το στέλεχος και δημιουργείται κωνικός σωρός του οποίου η γωνία θ.

Πίνακας 4.5: Τύποι Δοκιμών κατάρρευσης

Η λογική της σύγκρισης των τριών δοκιμών είναι η σύγκριση της γωνίας που σχηματίζει το υλικό με την φυσική γωνία τριβής (angle of repose) για την εξαγωγή βαθμονομημένου, σε όρους γωνίας, αποτελέσματος.

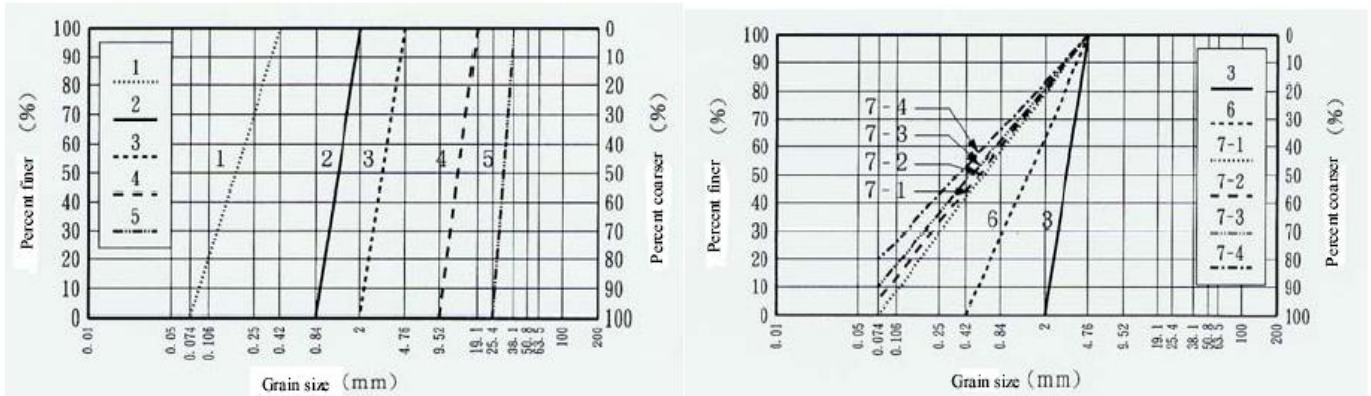
Προσδιορίστηκε πειραματικά ότι οι Δοκιμές A και B δεν παρουσιάζουν σοβαρές διαφορές και αποκλίσεις, συνεπώς για την σύγκριση με τα αποτελέσματα της Δοκιμής C χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα της A.

Χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο εύρος διαβαθμίσεως σε κυρίως 3 τύπους υλικών:

- Το υλικό A που αποτελείται από στρογγυλεμένους κόκκους
- Το υλικό B που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους (θραυστό υλικό)
- Το υλικό C που είναι υλικό που αφαιρέθηκε φίλτρο υπάρχοντος φράγματος

Ακόμα, έγιναν δοκιμές σε άμμους Τογουγα και υαλοσφαιρίδια.

Οι διαβαθμίσεις παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα και είναι δύο κατηγοριών: για ομοιόμορφα φίλτρα (Case 1) με συντελεστή ομοιομορφίας  $U_c=1,2-2,4$  και για ευρέως διαβαθμισμένα (Case 2) με  $U_c=3,4-30$ .



(a) Uniform filters for Case 1

(b) Broadly graded filters for Case 1

Σχήμα 4.5: Διαβαθμίσεις υλικών (α) ομογενών  $U_c = 1.2-2.4$  και (β) ευρέως διαβαθμισμένων  $U_c = 3.4-30$  (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi-Hiroyuki Satoh, 2003).

Μέγιστο μέγεθος κόκκου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 38,1mm λόγω του περιορισμού της διαμέτρου της μήτρας συμπίεσης που ήταν 150mm. Επίσης για την επίτευξη των διαβαθμίσεως της περίπτωσης 2 (Case 2) προστέθηκαν λεπτόκοκκα στα υλικά Β,Σ.

Filters	Gradation #	G <sub>s</sub>	G <sub>b</sub>	Q(%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>p</sub>
Toyoura sands	①	2.645	—	—	—	—	—
	②	2.510	—	—	—	—	—
Glass beads	④	—	2.507	—	—	—	—
	⑤	—	—	—	—	—	—
Material A	②	2.647	—	—	—	—	—
	③	2.659	—	—	—	—	—
	④	—	2.596	0.895	—	—	—
	⑤	—	2.599	0.908	—	—	—
Material B	②	2.709	—	—	—	—	—
	③	2.717	—	—	—	—	—
	④	—	2.649	1.030	—	—	—
	⑤	—	2.689	0.584	—	—	—
	⑥	2.700	—	—	—	—	—
	⑦-1	2.709	—	—	NP	NP	NP
	⑦-2	2.709	—	—	NP	NP	NP
	⑦-3	2.711	—	—	16.0	13.2	2.8
⑦-4	2.712	—	—	20.9	12.8	8.1	
Material C	①	2.750	—	—	—	—	—
	②	2.699	—	—	—	—	—
	③	2.714	—	—	—	—	—
	④	—	2.634	1.370	—	—	—
	⑤	—	2.651	0.890	—	—	—
	⑥	2.716	—	—	—	—	—
	⑦-1	2.730	—	—	NP	NP	NP
	⑦-2	2.730	—	—	NP	NP	NP
	⑦-3	2.729	—	—	18.9	15.7	3.2
	⑦-4	2.728	—	—	26.6	18.8	7.8

G<sub>s</sub> = Specific gravity of soil particle, G<sub>b</sub> = Specific gravity of gravel, Q = Water absorption, w<sub>L</sub> = Liquid limit, w<sub>P</sub> = Plastic limit, I<sub>p</sub> = Plasticity index, NP = Non plastic.

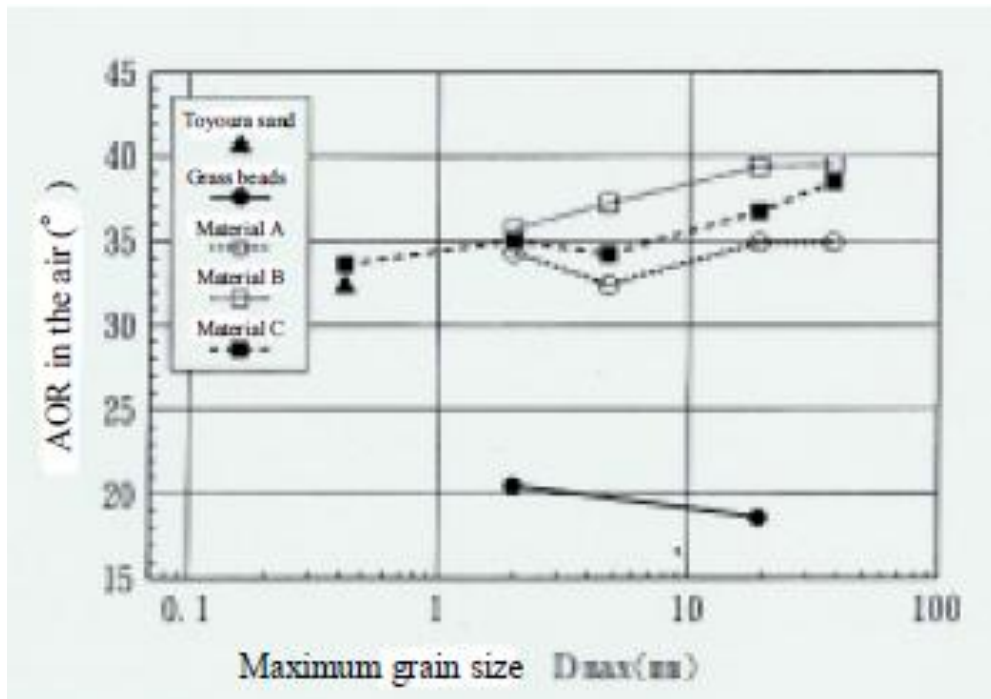
Πίνακας 4.6: Ιδιότητες υλικών: Material A=στρογγυλεμένοι κόκκοι, Material B=γωνιώδεις κόκκοι, Material C=υλικό από φράγμα. (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003).

Από την εκτέλεση των δοκιμών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα στοιχεία που μπορούν να είναι οδηγός για την καθιέρωση μια δοκιμής που θα αξιολογεί την γωνία κατάρρευσης του υλικού ως βαθμονόμηση της συνεκτικότητας του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε, οι δύο πρώτες δοκιμές στις οποίες αφήνεται το υλικό είτε στον αέρα είτε στο νερό να σχηματίσει κωνικό σωρό δεν διαφέρουν ουσιαστικά στα αποτελέσματά τους, οπότε για την αξιολόγηση τις τρίτης δοκιμής μπορεί να



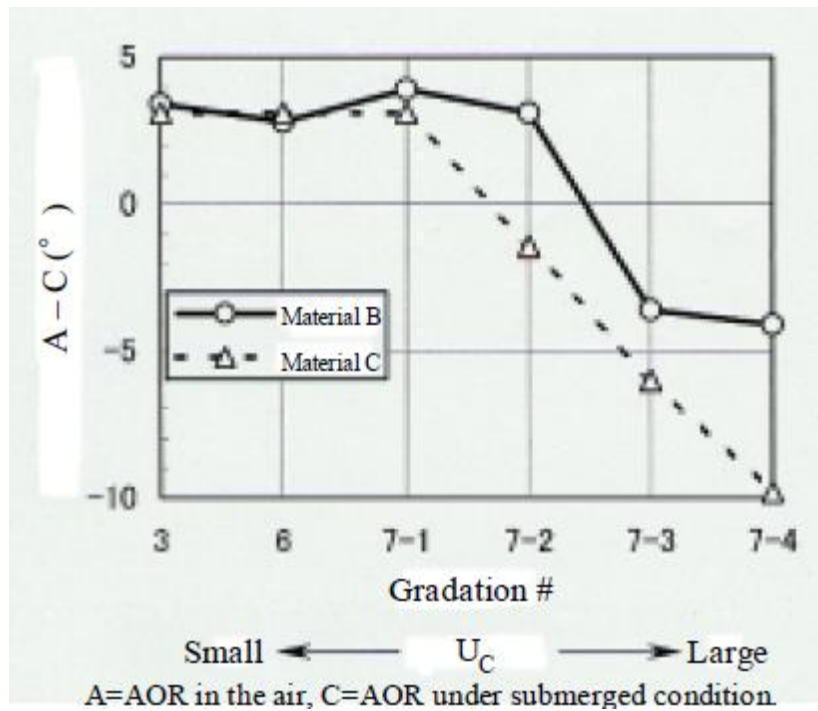
επιλεγεί μία από τις δύο. Ωστόσο, αυτό που μπορεί να επηρεάσει την γωνία που θα σχηματίσει το υλικό είναι το μέγεθος των κόκκων, καθώς όσο αυξάνει το μέγεθος του μέγιστου κόκκου μεγαλώνει η γωνία τριβής. Μάλιστα αυτό γίνεται πιο έντονο στην περίπτωση των γωνιωδών κόκκων λόγω του τρόπου διάταξης των κόκκων.



Σχήμα 4.6: Αύξηση της γωνίας κατάρρευσης με την αύξηση του μέγιστου κόκκου. (Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003)

Το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι τα φίλτρα που παρουσιάζουν συνοχή (οι διαβαθμίσεις 7-3,7-4 για τα υλικά Β και C) είναι αυτά για τα οποία παίρνει αρνητική τιμή η διαφορά  $AOR_{air} - AOR_{SC} = (\text{angle of repose in air} - \text{angle of repose in sandcastle test})$  (βλ. σχήμα 4.7). Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.6 οι συγκεκριμένοι συνδυασμοί διαβαθμίσεων και υλικών περιέχουν ποσοστό πλαστικών πράγμα που είναι ένδειξη συνοχής και αποφεύγεται στον σχεδιασμό των φίλτρων.

Έτσι, η διαφορά αυτή που εκφράζει τη μεταβολή γωνίας κατάρρευσης, δηλαδή τη απόκλιση της γωνίας που δημιουργείται από το Sandcastle test (δοκιμή C) από την φυσική γωνία κατάρρευσης (δοκιμή A) και η αρνητική τιμή της διαφοράς μπορεί να αποτελέσει δείκτη συνοχής.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα με τις τιμές της διαφοράς  $AOR_{air}-AOR_{SC}$  (= angle of repose in air- angle of repose in sandcastle test) για κάθε διαβάθμισης στα υλικά B και C.

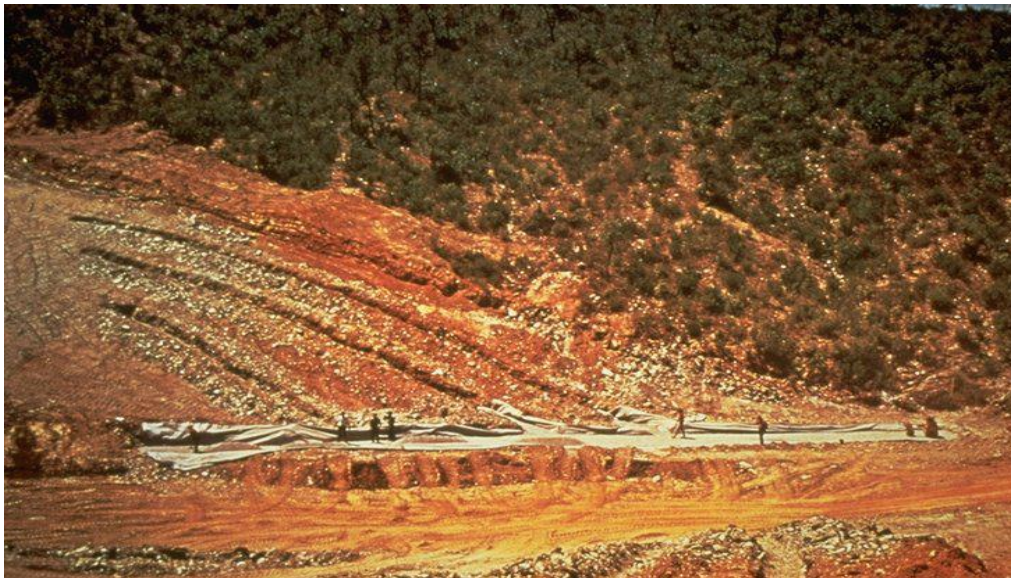
(Πηγή: Tadahiko Sakamoto-Yoshikazu Yamaguchi- Hiroyuki Satoh, 2003)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΦΙΛΤΡΑ

### 5.1 Εισαγωγή

*« Γεωύφασμα είναι ένα ύφασμα (συνήθως συνθετικό) το οποίο χρησιμοποιείται σε έδαφος, βράχο ή άλλο γεωτεχνικά συσχετιζόμενο υλικό για να βελτιώσει την απόδοση ή να μειώσει το κόστος μιας ανθρώπινης κατασκευής, προϊόντος, ή συστήματος». (Koerner 1986).*

Τα γεωυφάσματα εισήχθησαν στα έργα φραγμάτων ως κατασκευαστικό υλικό τη δεκαετία του 1970 και από τότε έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία τους και έχει αυξηθεί η χρήση τους. Η ονομασία «γεωυφάσματα» υποδηλώνει την συνθετική δομή τους και την χρήση τους με γεωυλικά. Τα γεωυφάσματα αποτελούν την μεγαλύτερη κατηγορία γεωσυνθετικών υλικών και χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής όπου επιτελούν λειτουργίες φίλτρου, στράγγισης, διαχωρισμού εδαφών και ενίσχυσης ή οπλισμού εδαφών.



Σχήμα 5.1: Η πρώτη εφαρμογή γεωυφάσματος σε φράγμα, στην Γαλλία στο φράγμα Valcros το 1970. (Πηγή: O. Artières, K. Oberreiter and F. Aschauer)

Τα γεωυφάσματα στην λειτουργία τους ως φίλτρα πρέπει να ικανοποιούν και αυτά όπως και τα κοκκώδη φίλτρα ταυτόχρονα τις λειτουργίες της συγκράτησης του υλικού και της διαπερατότητας. Επιπλέον, πρέπει να αποφεύγεται η φραγή τους και να εξασφαλίζεται η κανονική λειτουργία τους για όλο το χρόνο λειτουργίας του έργου. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την τοποθέτησή τους στο πεδίο, ώστε να μην προκληθούν ζημιές που θα επηρεάσουν την λειτουργία τους.

Στο εμπόριο υπάρχει μεγάλη ποικιλία γεωυφασμάτων (παγκοσμίως πάνω από 400 προϊόντα γεωυφασμάτων (R. D. Holtz, 2003) και οι διαφορές μεταξύ τους συνήθως σχετίζονται με τις διαφορετικές πρώτες ύλες, τους τύπους νημάτων και τον τρόπο κατασκευής τους. Οι πρώτες ύλες είναι πολυμερή όπως το πολυπροπυλένιο(PP), ο πολυεστέρας, το πολυαμίδιο (nylon). Το πολυπροπυλένιο κυριαρχεί σε ποσοστό χρήσης για γεωυφάσματα (κοντά στο 80% του χρησιμοποιούμενου όγκου) και ακολουθεί ο πολυεστέρας (στο 15%) (Jagielski (1991a) και (1991b), GFR 2002). Η αρχική μορφή των πρώτων υλών πριν την επεξεργασία είναι κοκκώδης. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή μορφή ίνας τον υλικό τήκεται, υποβάλλεται σε διέλαση μέσω διάτρητης κεφαλής και ψύχεται. Είτε κατά την διάρκεια της ψύξης είτε μετά από αυτή οι ίνες υποβάλλονται σε εφελκυσμό, με σκοπό να μειωθεί η διάμετρός τους και να γίνει πιο ομοιόμορφη η διάταξη των μακρομορίων του πολυμερούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των ινών, καθώς και την μείωση της επιμήκυνσης τους κατά την αστοχία. Αυτές οι μεγάλοι μήκους ίνες είναι τα μονόκλωνα νήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεωυφασμάτων. Επίσης, τα μονόκλωνα νήματα συνδυάζονται στο σχηματισμό πολύκλωνων νημάτων. Μια άλλης μορφής νήματα που χρησιμοποιούνται είναι λεπτές ίνες μικρού μήκους (25mm έως 100mm) που μπορούν να ονομαστούν κλωστές. Ο τελευταίος τύπος νήματος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή γεωυφασμάτων είναι ορθογωνικής διατομής και ονομάζεται ταινία. Παράγεται από ένα συνεχές λεπτό φύλλο πολυμερούς και κόβεται σε ταινίες με κατάλληλα μαχαίρια ή φλέβες πεπιεσμένου αέρα.

Ο τύπος γεωυφάσματος καθορίζεται από τη μέθοδο κατασκευής του. Οι τρεις κατηγορίες γεωυφασμάτων είναι τα υφασμένα, τα μη υφασμένα και τα πλεκτά. Το μεγαλύτερο ποσοστό παραγόμενων γεωυφασμάτων αντιστοιχεί στα υφασμένα

(60%) και το ποσοστό αυτό γίνεται ακόμα υψηλότερο (80%) στον τομέα των πωλήσεων. Τα **υφασμένα** προϊόντα αποτελούνται από δύο κάθετες μεταξύ σειρές νημάτων που συνδέονται μεταξύ τους συστηματικά με μηχανικό τρόπο (υφαντουργικές μηχανές). Τα **πλεκτά** προϊόντα, αντίθετα, αποτελούνται από μονό νήμα που πλέκεται συστηματικά. Αυτή η μέθοδος έχει πλέον σχεδόν αποχωρήσει από τον τομέα παραγωγής. Στα **μη υφασμένα** προϊόντα προκύπτουν πρώτα από την διαμόρφωση του ιστού τους και ακολούθως από την συγκόλληση των ινών. Αποτελούνται από ίνες ή νήματα με τυχαίο προσανατολισμό και κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή. Η μεγάλη πλειοψηφία τους έχει ως υλικό των ινών το πολυπροπυλένιο. Η σύνδεση των ινών γίνεται θερμικά, χημικά ή μηχανικά. Στην θερμική μέθοδο συγκόλλησης οι ίνες συγκολλούνται στις θέσεις διασταύρωσης μέσω τήξης με τη χρήση φούρνου ή θερμαινόμενων κυλίνδρων με αντίθετη φορά περιστροφής ο καθένας. Η χημική επεξεργασία περιλαμβάνει ψεκασμό ή εμποτισμό του υλικού με ακρυλική ρητίνη και πιθανώς κυλινδρισμό. Είναι συνηθισμένη η χρήση ξηρού αέρα για να στεγνώσει το υλικό να διανοιχτούν οι πόροι του. Τέλος, μέσω της μηχανικής μεθόδου σύνδεσης των ινών τα προϊόντα που παράγονται (βελονοδιάτρητα), διαμορφώνονται με τη χρήση ομάδων αγκαθωτών βελόνων που εκτελούν παλινδρομική κίνηση κάθετα προς τον ιστό. Η πυκνότητα των βελόνων και η ταχύτητα της κίνησης του ιστού στο μηχάνημα καθορίζουν το πάχος και την πυκνότητα του τελικού υφάσματος.

## 5.2 Λειτουργία και ιδιότητες

Η σωστή λειτουργία του γεωυφάσματος εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του σωστού τύπου του για την εφαρμογή στο πεδίο και το έργο που μας ενδιαφέρει. Τα γεωυφάσματα στην χρήση τους σε συνεργασία με εδαφικά υλικά έχουν τέσσερις κύριες επιθυμητές λειτουργίες: τον *διαχωρισμό* , τον *οπλισμό-ενίσχυση*, το *φιλτράρισμα* και την *στράγγιση*. Η λειτουργία του **διαχωρισμού** είναι η αρχή της λειτουργίας ενός φίλτρου. Με την παρεμβολή του γεωυφάσματος μεταξύ λεπτόκοκκου (πυρήνας ή θεμελίωση) και χονδρόκοκκου (σώμα αντιστήριξης) αποφεύγεται η μετακίνηση υλικού και βελτιώνονται οι λειτουργίες των δύο υλικών. Η **ενίσχυση** του εδαφικού στοιχείου στο οποίο παρεμβάλλεται γεωύφασμα εξασφαλίζεται με 3 μηχανισμούς: το μηχανισμό μεμβράνης, το μηχανισμό διάτμησης και το μηχανισμό αγκύρωσης. Το γεωύφασμα λειτουργεί ως μεμβράνη όταν εδράζεται σε παραμορφώσιμο έδαφος και φορτίζεται κάθετα. Αποτέλεσμα της κάθετης φόρτισης είναι η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο γεωύφασμα. Διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια εδάφους- γεωυφάσματος όταν το σύνθετο υλικό φορτίζεται και παραμορφώνεται. Σαν αγκύριο λειτουργεί όταν αναπτύσσονται φορτία που τείνουν να το εξολκεύσουν. Η λειτουργία του **φιλτραρίσματος** επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του νερού κάθετα στο επίπεδό του γεωυφάσματος χωρίς να επιτρέπει την μετακίνηση εδαφικών κόκκων και αντίστοιχα η λειτουργία της **στράγγισης** επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του νερού μέσα από το σώμα του φίλτρου και παράλληλα με τη διεύθυνσή του, χωρίς την μετακίνηση εδαφικών κόκκων. Τα περισσότερα γεωυφάσματα μπορούν να διατελέσουν την λειτουργία της στράγγισης, αλλά είναι σαφές ότι πλεονεκτούν τα μη υφασμένα γεωυφάσματα λόγω του μεγαλύτερου πάχους τους.

Στη χρήση των γεωυφασμάτων ως φίλτρα χωμάτινων φραγμάτων οι κρίσιμες λειτουργίες που πρέπει να καλύπτουν είναι του διαχωρισμού, του φιλτραρίσματος και της στράγγισης. Βέβαια, και η λειτουργία της ενίσχυσης είναι απαραίτητη, καθώς μια ζώνη μειωμένων αντοχών μέσα σε ένα φράγμα θα ήταν καταστροφική.

Οι ιδιότητες ενός γεωυφάσματος είναι οι αποτύπωση της συμπεριφοράς τους σε σχέση με της ζητούμενες λειτουργίες τους και διακρίνονται σε φυσικές, υδραυλικές και μηχανικές, ανθεκτικότητας στο χρόνο και αποδόμησης. Οι φυσικές ιδιότητες

σχετίζονται με τη γεωμετρία και το βάρος των υλικών, με πιο χαρακτηριστικές την ανά μονάδα επιφάνειας μάζα και το πάχος. Οι υδραυλικές ιδιότητες εξαρτώνται από την κατανομή των κενών στον όγκο τους και συνεπώς μπορούν να επηρεαστούν από την συμπιεστότητα του γεωυφάσματος και από τη συσσώρευση υλικών στα κενά τους. Χαρακτηριστικές υδραυλικές ιδιότητες είναι το φαινόμενο μέγεθος κενών, η διαπερατότητα και το πορώδες. Οι μηχανικές ιδιότητες είναι ενδεικτικές της αντίστασης που παρουσιάζει το υλικό σε μηχανική καταπόνηση από επιβαλλόμενα φορτία και περιλαμβάνουν τη συμπιεστότητα, το μονοαξονικό εφελκυσμό, την αντοχή συρραφής, την κόπωση, την αντοχή σε διάρρηξη, την αντοχή σε σχίσσιμο, την αντοχή σε δυναμική διάτρηση, την αντοχή σε διάτρηση και την αλληλεπίδραση γεωυφάσματος-άλλου υλικού. Μεγάλος όγκος εφαρμογών απαιτεί για το σχεδιασμό τη γνώση των τιμών της αντοχής σε εφελκυσμό. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες ιδιοτήτων που αφορούν ιδιότητες του υλικού όπως παράγεται ή όπως παραλαμβάνεται, οι ιδιότητες ανθεκτικότητας στο χρόνο αφορούν τη συμπεριφορά του υλικού σαν συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή κατά το χρόνο λειτουργίας του στο πεδίο και αναφέρονται κυρίως σε ερπυσμό, αντίσταση σε απόξεση και φραγή. Τέλος, οι ιδιότητες αποδόμησης αναφέρονται στην επίδραση που έχουν διάφοροι παράγοντες του περιβάλλοντος στη δομή των πολυμερών και συνεπώς στις ιδιότητες των γεωυφασμάτων και περιλαμβάνουν κυρίως την αντίσταση σε χημικά, την αντίσταση σε θερμότητα και την αντίσταση σε υπεριώδη ακτινοβολία και καιρικές συνθήκες.

### 5.3 Σχεδιασμός

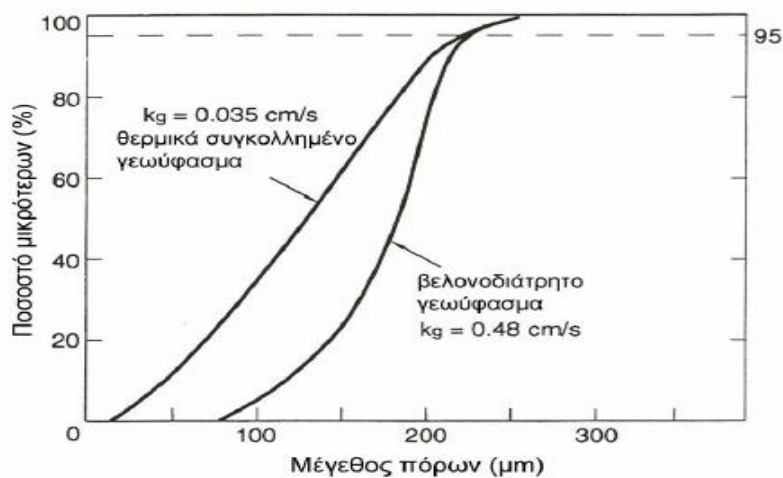
Ο σχεδιασμός έργων με τη χρήση γεωυφάσματος ως φίλτρα προσανατολίζεται στον προσδιορισμό των απαιτούμενων τιμών για μια ή περισσότερες ιδιότητες του γεωυφάσματος. Η διαφοροποίηση με την χρήση των κοκκώδων φίλτρων είναι ότι στην περίπτωση των κοκκώδων γίνεται η κατασκευή του φίλτρου σύμφωνα με τις επιθυμητές ιδιότητες με βάση τα διαθέσιμα υλικά, ενώ με τα γεωυφάσματα καθορίζονται αρχικά οι επιθυμητές ιδιότητες και έπειτα οι κατασκευαστές απευθύνονται στο εμπόριο για τα διαθέσιμα προϊόντα ανάλογων ιδιοτήτων που εκπληρώνουν τα απαιτούμενα κριτήρια ασφαλείας, πάντα βέβαια με ταυτόχρονη προσπάθεια για οικονομική βελτιστοποίηση. Στην εφαρμογή ως φίλτρα τα γεωυφάσματα επιλέγονται ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια της συγκράτησης και της διαπερατότητας, να αποφεύγεται η φραγή των πόρων τους για τον χρόνο λειτουργίας του έργου και να μην υφίστανται φθορές ή βλάβες στο στάδιο της τοποθέτησής τους πεδίο ή κατά την διάρκεια λειτουργίας τους. Στα κριτήρια σχεδιασμού των φίλτρων ή σταγγιστηρίων από γεωμεμβράνη, σε αντιδιαστολή με το χαρακτηριστικό μέγεθος κόκκου που χρησιμοποιείται στα κοκκώδη φίλτρα, χρησιμοποιείται ένα χαρακτηριστικό **μέγεθος πόρου (O)** και οι σχέσεις του με τους κόκκους του εδάφους. Για παράδειγμα το  $O_{95}$  δηλώνει το μέγεθος πόρου που είναι μεγαλύτερο από το 95% των πόρων του γεωυφάσματος. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούν ένα μέγεθος πόρου θεωρούνται γενικά ικανοποιητικά, ωστόσο βελτιώνονται με τη χρήση της πλήρους πορομετρικής καμπύλης. Πολλά κριτήρια σχεδιασμού καθορίζουν το μέγεθος πόρου  $O_{95}$  (πχ ASTM D4751-προσδιορισμός του φαινόμενου μεγέθους πόρων γεωυφάσματος) και άλλα προσδιορίζουν τον σχεδόν μεγαλύτερο πόρο με μέγεθος πόρου  $O_{90}$  με διαφορετική ωστόσο μέθοδο προσδιορισμού. Οι Christopher και Holtz (1985) και Fischer et al (1990) έχουν προτείνει την χρήση μικρότερων πόρων στα κριτήρια σχεδιασμού. Άλλωστε, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 μπορεί δύο γεωυφάσματα με ίδιο  $O_{95}$  να έχουν διαφορετική κατανομή μεγεθών πόρων και διαφορετικά χαρακτηριστικά διαπερατότητας.



Κριτήριο		Πηγή
$O_{95} < 0,60 \text{ mm}$ (κοσκ. # 30) αν $d_{50} > 0,074 \text{ mm}$ (κοσκ. # 200) $O_{95} < 0,297 \text{ mm}$ (κοσκ. # 50) αν $d_{50} < 0,074 \text{ mm}$ (κοσκ. # 200)		AASHTO (1990) H.P.A.
Σχετική πυκνότητα	$1 < CU < 3$ $3 < CU$	Giraud (1982) τροποποίηση από Koerner (1990)
$D_r < 50\%$ $50\% < D_r < 80\%$ $80\% < D_r$	$O_{95} < CU \cdot d_{50}$ $O_{95} < 1,5 \cdot CU \cdot d_{50}$ $O_{95} < 2 \cdot CU \cdot d_{50}$	$O_{95} < 9 d_{50} / CU$ $O_{95} < 13,5 d_{50} / CU$ $O_{95} < 18 d_{50} / CU$
$d_{50} > 0,074 \text{ mm}$ (κοσκ. # 200) $d_{50} < 0,074 \text{ mm}$ (κοσκ. # 200)		Christopher and Holtz (1985)
Ροή με σταθερή κατεύθυνση		
$2 \leq CU \leq 4$ $O_{95} \leq 0,5 \cdot CU \cdot d_{85}$ $4 \leq CU \leq 8$ $O_{95} \leq 8 d_{85} / CU$ $8 < CU$ ή $CU < 2$ $O_{95} \leq d_{85}$	Υφασμένο $O_{95} \leq d_{85}$ Μη υφασμένο $O_{95} \leq 1,8 d_{85}$	
Ροή με αναστρεφόμενη κατεύθυνση		
$O_{50} \leq 0,5 d_{85}$ Δυναμική φόρτιση εδάφους $O_{95} \leq d_{15}$		$O_{50} \leq 0,5 d_{85}$
Μη συνεκτικά εδάφη		Fisher et al (1990)
$O_{50} \leq 0,8 d_{85}$ $O_{15} \geq 0,8 d_{15}$ αν $CU < 4$ $O_{15} \geq 1,2 d_{15}$ αν $CU \geq 4$ $O_{50} \leq \delta^* \cdot \delta_{15}$ $b_1^* \cdot d_{50} \leq O_{50} \leq b_2^* \cdot d_{50}$ * οι τιμές των συντελεστών είναι συναρτήσεις του CU		

- CU: συντελεστής ομοιομορφίας του εδάφους
- $d_{10}, d_{15}, d_{40}, d_{50}, d_{85}, d_{90}$  : μέγεθος κόκκων εδάφους
- $i$  : υδραυλική κλίση στο έδαφος κοντά στο γεωφάσμα
- $O_{95}$ : μέγεθος πόρων γεωφάσματος
- $O_{50}$ : μέσο μέγεθος πόρων γεωφάσματος

Πίνακας 5.1: Κριτήρια συγκράτησης για φίλτρα από γεωφάσματα (Πηγή: Παναγιωτίδη, 2005)



Σχήμα 5.2: Πορομετρικές καμπύλες δύο γεωφασμάτων με το ίδιο μέγεθος πόρων  $O_{95}$  (Πηγή: Prapaharan et al, 1989)

### 5.3.1 Προσδιορισμός μεγέθους πόρων

Σύμφωνα με τους Fischer et al (1996) τα μεγέθη πόρων και οι πορομετρικές καμπύλες των γεωυφασμάτων μπορούν να διακριθούν σε τουλάχιστον 4 κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο προσδιορισμού τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- Μεγέθη που ο προσδιορισμός τους βασίζεται στην πιθανότητα ένας κόκκος συγκεκριμένης διαμέτρου να διαπεράσει το γεωύφασμα κατά τη διάρκεια δόνησης συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας ή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου αριθμού κύκλων βύθισης σε νερό.
- Μεγέθη που υπολογίζονται θεωρητικά (γεωμετρικά) και προσδιορίζονται με βάση με συγκεκριμένες ιδιότητες των γεωυφασμάτων.
- Μεγέθη που προκύπτουν από την καταμέτρηση του αριθμού ίσων πόρων (ή ίσων στενώσεων των πόρων) στο γεωύφασμα.
- Μεγέθη που προκύπτουν από το ποσοστό του συνολικού όγκου ίσων μεγεθών πόρων ως προς το συνολικό όγκο των πόρων του γεωυφάσματος.

Οι μέθοδοι που έχουν διερευνηθεί για τον προσδιορισμό των μεγεθών πόρων των γεωυφασμάτων είναι ποικίλες και πολλές φορές με διαφορετική φιλοσοφία. Οι μέθοδοι που έχουν διερευνηθεί συμπεριλαμβάνουν το ξηρό κοσκίνισμα με έδαφος ή με γυάλινα σφαιρίδια ( Αμερικανικό πρότυπο ASTM D4751), το υγρό κοσκίνισμα (Ευρωπαϊκό πρότυπο EN ISO 12956), το υδροδυναμικό κοσκίνισμα (Καναδική, Γαλλική και Ιταλική μέθοδος), την αναρρόφηση υγρού, τη διείσδυση υδραργύρου (Prapaharan et al. 1989), την αφαίρεση υγρού, την ροή σε τριχοειδές (π.χ. πρότυπο ASTM D6767), την ελάχιστη αντίσταση από επιφανειακή τάση (Miller et al., 1986) και την ανάλυση εικόνας (Prapaharan et al. 1989). Εκτός από πειραματικές μεθόδους προσδιορισμού και θεωρητικά μοντέλα έχουν προταθεί σαν εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού του μεγέθους πόρων των γεωυφασμάτων (Giroud 1996, Faure et al. 1986).

Μέθοδος	Σχετικό μέγεθος δείγματος	Τύπος πόρου που προσδιορίζεται	Δυνατότητα προσδιορισμού πορομετρικής καμπύλης	Σχετικός χρόνος δοκιμής	Σχετικό κόστος δοκιμής
Ξηρό κοσκίνισμα	μεγάλο	δείκτης μεγέθους πόρου	όχι	μεγάλος	χαμηλό
Υγρό κοσκίνισμα	μεγάλο	δείκτης μεγέθους πόρου	όχι	μεγάλος	χαμηλό
Υδροδυναμικό κοσκίνισμα	μεγάλο	δείκτης μεγέθους πόρου	ναι	μεγάλος	υψηλό
Αναρόφηση υγρού	μεγάλο	όγκος πόρου	ναι	μικρός	μέτριο
Διείσδυση υδραργύρου	μικρό	όγκος πόρου	ναι	μικρός	μέτριο
Αφαίρεση υγρού	μικρό	όγκος πόρου	ναι	μικρός	υψηλό
Ροή σε τριχοειδή	μικρό	εμβαδόν των στενώσεων πόρων	ναι	μικρός	μέτριο
Ελάχιστη αντίσταση από επιφανειακή τάση	μικρό	αριθμός των στενώσεων πόρων	όχι	μεγάλος	υψηλό
Ανάλυση εικόνας	μικρό	διάσταση πόρου	ναι	μεγάλος	υψηλό
Θεωρητικές μέθοδοι	-	διάσταση πόρου	ναι	μικρός	μέτριο

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά γνωρίσματα μεθόδων προσδιορισμού μεγέθους πόρων γεωυφασμάτων. (Πηγή:Fischer et al.,1996)

Τρία είναι τα πιο διαδεδομένα έως καθιερωμένα πρότυπα παγκοσμίως:

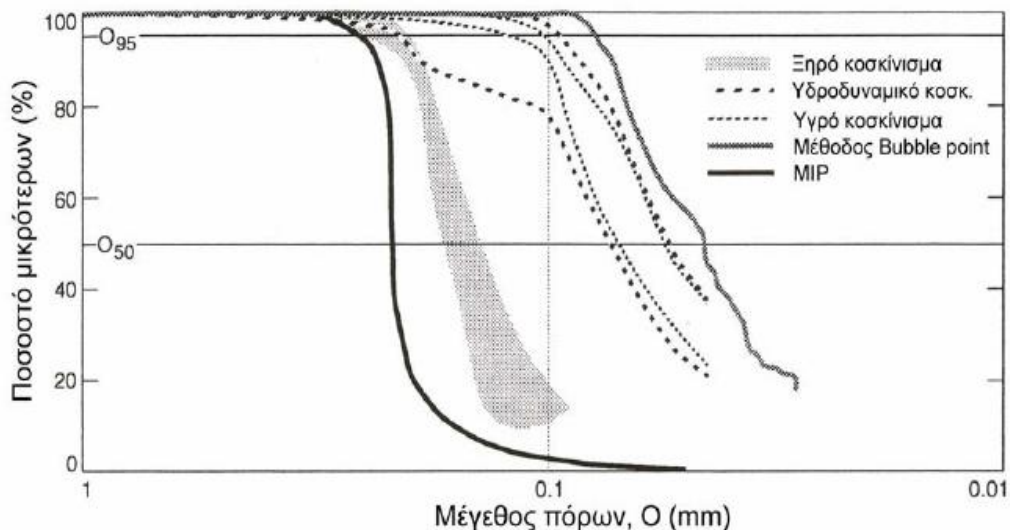
- 1) *ASTM D4751: Πρότυπη μέθοδος για τον Προσδιορισμό του Φαινόμενου Μεγέθους Πόρων των Γεωυφασμάτων* ( έναρξη ισχύος 1993). Στην μέθοδο προσδιορισμού αυτού του προτύπου ακολουθείται διαδικασία ξηρού κοσκίνισματος υλικού. Το υλικό είναι γυάλινα σφαιρίδια χωρισμένα σε κλάσματα. Κάθε κλάσμα αποτελείται από σφαιρίδια ίσου μεγέθους. Η μέθοδος αρχίζει με το κοσκίνισμα των σφαιριδίων της μικρότερης διαμέτρου και σε κάθε βήμα ακολουθεί η αμέσως μεγαλύτερη διάμετρος. Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους πόρου  $O_{95}$  , δηλαδή με το

κοσκίνισμα των σφαιριδίων μέσα από το γεωύφασμα στόχος είναι να προσδιοριστεί το μέγεθος των σφαιριδίων των οποίων το 5% ή λιγότερο διαπερνά το γεωύφασμα. Όπως φαίνεται από τη διαδικασία προκύπτει ένα μέγεθος πόρου (σχεδόν του μεγαλύτερου), το  $O_{95}$ . Ωστόσο, υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της μεθόδου, ώστε να προκύψει και καμπύλη κατανομής πόρων του γεωυφάσματος.

- 2) EN ISO 12956: Γεωυφάσματα και Συναφή προς Γεωυφάσματα Προϊόντα, Προσδιορισμός του Χαρακτηριστικού Μεγέθους Πόρων (έναρξη ισχύος 1998). Στο πρότυπο αυτό γίνεται προσδιορισμός του μεγέθους  $O_{90}$ , χρησιμοποιώντας την αρχή του υγρού κοσκίνισματος. Το υλικό το οποίο υποβάλλεται σε κοσκίνισμα είναι εδαφικό. Σύμφωνα με το πρότυπο προσδιορίζεται η κοκκομετρική σύνθεση του κλάσματος ενός πρότυπου κοκκώδους υλικού (εδαφικού υλικού) που διαπερνά το γεωύφασμα μετά από υγρό κοσκίνισμα. Το μέγεθος των πόρων του γεωυφάσματος προσδιορίζεται με βάση τη θεώρηση ότι η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού αντιστοιχεί στην πορομετρική καμπύλη του γεωυφάσματος. Η μέθοδος που ορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 12956 οδηγεί και αυτή στον προσδιορισμό ενός μεγέθους του  $O_{90}$ , που αντιστοιχεί σε διάμετρο  $d_{90}$  του εδαφικού υλικού, ωστόσο υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της μεθόδου ώστε να ώστε να προκύπτει καμπύλη κατανομής πόρων.
- 3) ASTM D6767: Πρότυπη Μέθοδος για τον Προσδιορισμό των Χαρακτηριστικών των Μεγεθών Πόρων των Γεωυφασμάτων με έλεγχο Ροής σε τριχοειδή ( έναρξη ισχύος 2002). Η μέθοδος που ορίζεται από το πρότυπο ASTM D6767 βασίζεται στο γεγονός ότι ένα κορεσμένο πορώδες υλικό μορφής δίσκου θα επιτρέψει σε αέρα υπό πίεση να το διαπεράσει όταν η πίεση του αέρα ξεπεράσει την αντίσταση που αναπτύσσεται λόγω επιφανειακής τάσης στους μεγαλύτερους πόρους (Miller et al. 1986). Σταδιακή αύξηση της πίεσης του αέρα προκαλεί διάνοιξη όλο και μικρότερων πόρων. Θεωρώντας ότι η πίεση του αέρα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των πόρων, προσδιορίζεται η πορομετρική καμπύλη

του γεωυφάσματος ή για ορισμένους ερευνητές (Fischer et al. 1996 and Aydilek, Oguz and Edil 2005) η καμπύλη κατανομής των μεγεθών των στενώσεων των πόρων του γεωυφάσματος. Η κύρια παραδοχή που κάνει η μέθοδος που ορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D6767 είναι ότι οι πόροι του γεωυφάσματος έχουν κυλινδρική διατομή συγκεκριμένης.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές που ακολουθούν διαφορετικές μεταξύ τους πρότυπες διαδικασίες είναι πολύπλοκη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κάθε μεθοδολογία είναι αρκετά διαφορετική σε υλικά διεργασίες και συνθήκες από τις άλλες. Συνεπώς, υπεισέρχονται σε αυτές διάφορες παράμετροι και υποθέσεις οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν.



Σχήμα: 5.3: Πορομετρικές καμπύλες μετά την διεξαγωγή πειραμάτων προσδιορισμού με διάφορες μεθόδους (Πηγή: Fischer et al. ,1996)

Από σειρά πειραμάτων που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3 φαίνεται ότι οι καμπύλες κατανομής πόρων που προσδιορίζονται από διαφορετικές μεθόδους καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος τιμών ακόμη και για το ίδιο γεωύφασμα. Το μέγεθος πόρων  $O_{95}$  που παρέχουν οι μέθοδοι που ορίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D6767, EN ISO 12956 και ASTM D4751 διαφέρει κατά ένα συντελεστή ίσο με 3, ενώ το μέγεθος πόρων  $O_{50}$  κατά ένα συντελεστή ίσο με 5.

### 5.3.2 Κριτήρια σχεδιασμού

Μαζί με την εμφάνιση των γεωυφασμάτων την δεκαετία του 1970 άρχισαν να προτείνονται και τα πρώτα κριτήρια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το επόμενο:

$$k_F > k_s \quad (5.1.1)$$

$$0,150\text{mm} > O_F > d_{85s} \quad (5.1.2)$$

$$4\% < A_R < 36\% \quad (5.1.3)$$

όπου  $k_F$ =περατότητα του φίλτρου

$k_s$ =περατότητα του εδάφους που συγκρατείται

$O_F$ = χαρακτηριστικό μέγεθος πόρου

$A_R$ =σχετική επιφάνεια κενών ( $= \frac{\text{επιφάνεια των κενών}}{\text{συνολική επιφάνεια του γεωυφάσματος}}$ )

Οι περιορισμοί 5.1.2 και 5.1.3 ουσιαστικά απαγόρευαν την χρήση μη υφασμένων γεωυφασμάτων ως φίλτρα. Σταδιακά, ο αποκλεισμός αυτός των μη υφασμένων γεωυφασμάτων ξεπεράστηκε και τα κριτήρια πήραν νέα μορφή:

$$k_F > k_s \quad (5.2.1)$$

$$O_F > d_{85s} \quad (5.2.2)$$

$$A_R > 4\% \quad (5.2.3)$$

Ωστόσο, και με την νέα μορφή τα κριτήρια δεν κρίνονταν ως ικανοποιητικά.

Η χρήση των γεωυφασμάτων ως φίλτρα υπαγορεύει την συμμόρφωση με τις απαιτήσεις συγκράτησης και περατότητας του Terzaghi. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί τύποι γεωυφασμάτων που δεν είναι κατάλληλοι για φίλτρα. Συνεπώς, πρέπει να υπάρχουν σαφή κριτήρια που να υποδεικνύουν στο μηχανικό την καταλληλότητα ή όχι ενός γεωυφάσματος ως φίλτρο.

Τα δύο βασικά κριτήρια που πρέπει να εκπληρούνται για να λειτουργεί το γεωύφασμα ως φίλτρο είναι αυτό της συγκράτησης και της περατότητας.

### **Κριτήριο Συγκράτησης**

Γενικά η μορφή των κριτηρίων που παρουσιάστηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία ήταν τις μορφής

$$O_{95}/d_{85} < \lambda_R \quad (5.3)$$

όπου  $\lambda_R$ : ένας συντελεστής συγκράτησης που προκύπτει πειραματικά ή αναλυτικά.

Το  $O_{95}$  σε κάποια κριτήρια εκφράζεται ως AOS (Apparent Opening Size) που προκύπτει από δοκιμές του γεωυφάσματος από ξηρό κοσκίνισμα και ως FOS (Filtration Opening Size) για υγρό κοσκίνισμα.

Η βασική λειτουργία και ο πρωταρχικός σκοπός ενός φίλτρου είναι η συγκράτηση του υλικού που προστατεύει (υλικό πυρήνα στην περίπτωση των φραγμάτων). Η συμπεριφορά της συγκράτησης εξαρτάται από την πυκνότητα του εδαφικού υλικού και την κοκκομετρική του διαβάθμιση. Δυο από τους δείκτες με τους οποίους εξετάζονται οι δύο προηγούμενες ιδιότητες είναι οι σχετική πυκνότητα και ο συντελεστής ομοιομορφίας όπως ορίζονται παρακάτω:

#### **σχετική πυκνότητα:**

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (5.4)$$

όπου:  $e=0$  δείκτης πόρων του εδαφικού υλικού

$e_{max}$ = ο μέγιστος δείκτης πόρων του εδαφικού υλικού

$e_{min}$ = ο ελάχιστος δείκτης πόρων του εδαφικού υλικού

#### **συντελεστής ομοιομορφίας:**

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (5.5)$$

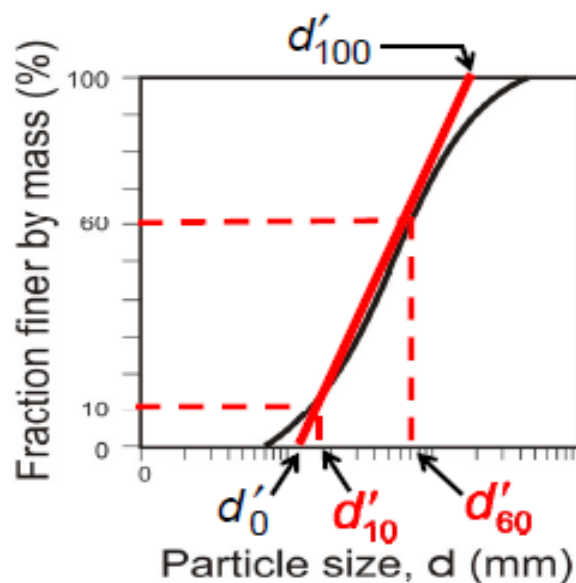
όπου:  $d_{10}$ = το μέγεθος κόκκου από τον οποίο το 10% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος

$d_{60}$ = το μέγεθος κόκκου από τον οποίο το 60% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος

ακόμα ορίζεται από τον Giroud ο **γραμμικός συντελεστής ομοιομορφίας**:

$$C'_u = \frac{d'_{60}}{d'_{10}} \quad (5.6)$$

όπου  $d'_x$  είναι το μέγεθος του κόκκου της γραμμικής προσέγγισης του μεσαίου σταθερής κλίσης τμήματος της κοκκομετρικής καμπύλης



Σχήμα 5.4: Γραμμικός συντελεστής ομοιομορφίας (Πηγή: Giroud,2008)

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η λογική σχεδιασμού ακολούθησε την πεπατημένη και τις απαιτήσεις που όρισε ο Terzaghi. Συνεπώς, μια προσέγγιση κριτηριακή είναι η μετατροπή τις κοκκομετρικής σχέσης του Terzaghi (5.7) για την συγκράτηση υλικού σε σχέση πόρου γεωυφάσματος με την κοκκομετρία του υλικού (5.9).



$$d_{15F} \leq 5d_{85s} \quad (5.7)$$

Η μετατροπή αυτή έγινε με βάση τη σχέση (5.8) των Silveira, Wittmann, Witt, Kenney με βάση πειραματικά δεδομένα που προσδιορίζει ένα χαρακτηριστικό μέγεθος πόρου για κοκκώδη υλικά. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές διακυμάνσεις στο συντελεστή που χρησιμοποιείται και βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα και θεωρητικές προσεγγίσεις. Η επιλογή της σχέσης (5.8) γίνεται και για λόγους ευχρηστίας της σχέσης (5.9) που προκύπτει.

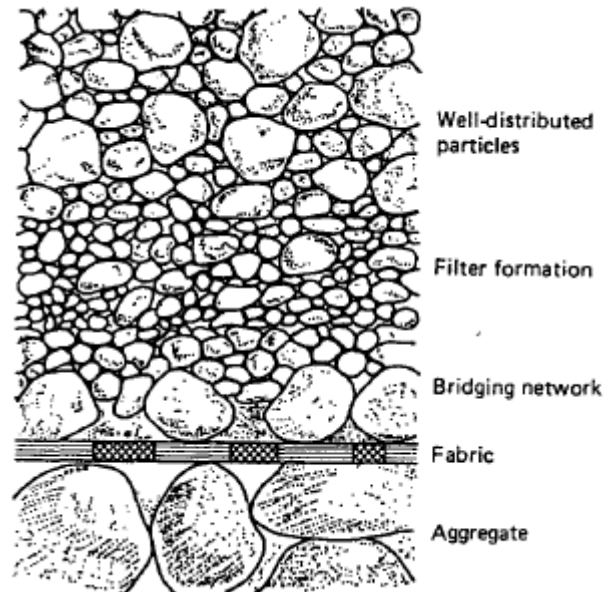
$$O_F \approx 5d_{15F} \quad (5.8)$$

Συνεπώς προκύπτει:

$$O_{F \leq} d_{85s} \quad (5.9)$$

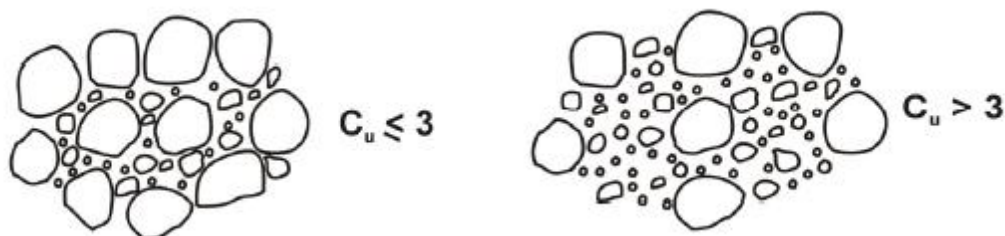
Το ερώτημα που προκύπτει λοιπόν, είναι αν όντως μπορεί να προσαρμοστεί επιτυχημένα και για τα γεωυφάσματα. Η ανισότητα του Terzaghi εξασφαλίζει την συγκράτηση αρκετά μεγάλων κόκκων. Για τα εσωτερικά ασταθή εδάφη αυτό μπορεί να είναι ένα μεγάλο πρόβλημα, επειδή τα μικρότερα σωματίδια που είναι χαλαρά μπορούν να αποκολληθούν και να μην συγκρατηθούν από τα μεγάλα κενά του φίλτρου. Για τα κοκκώδη φίλτρα μια λύση στο πρόβλημα αυτό έρχεται από το μεγάλο πάχος των φίλτρων. Το υλικό που παρασύρεται μέσα στο φίλτρο σιγά σιγά μειώνει το μέγεθος των πόρων και έρχεται σε μια νέα πορομετρική ισορροπία. Από την άλλη μεριά τα γεωυφάσματα έχουν πολύ μικρό πάχος, συνεπώς δεν έχουμε την ίδια λειτουργία και θα έπρεπε να συνεχιστεί ο σχεδιασμός τους από μια νέα σκοπιά.

Στην περίπτωση ενός εσωτερικά ασταθούς υλικού το φίλτρο πρέπει να συγκρατεί τα σωματίδια που αποτελούν τον εδαφικό σκελετό, καθώς αν γίνεται αυτό σίγουρα θα συγκρατούνται και τα μεγαλύτερα από αυτά σωματίδια, αλλά και σταδιακά τα πιο λεπτά που θα «παγιδεύονται» από τα σωματίδια του εδαφικού σκελετού. Συνεπώς, τα επόμενα στάδια σχεδιασμού προσανατολίζονται στο ποιο είναι το μέγεθος του εδαφικού σκελετού ενός υλικού και ποια θα είναι η πορομετρία του γεωυφάσματος που θα το συγκρατήσει.



Σχήμα 5.5: Σχηματισμός φίλτρου με χρήση γεωυφάσματος (Πηγή: Koerner, 1990)

Ο Giroud στο θεωρητικό του μοντέλο ανέπτυξε την ακόλουθη ιδέα. Καταρχήν, ταξινόμησε τα εδαφικά υλικά με βάση τον συντελεστή ομοιομορφίας τους σε εσωτερικά ευσταθή όσα έχουν τιμές  $C_u \leq 3$  και σε χαλαρά και ασταθή όσα έχουν  $C_u > 3$ .



Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση των εδαφικών δομών για  $C_u$  με τιμές μικρότερες και μεγαλύτερες του 3. (Πηγή: Giroud, 2008)

Για εδάφη με  $C_u > 3$  μόνο το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα λαμβάνεται υπόψη στα κριτήρια σχεδιασμού που θα παρουσιαστούν.

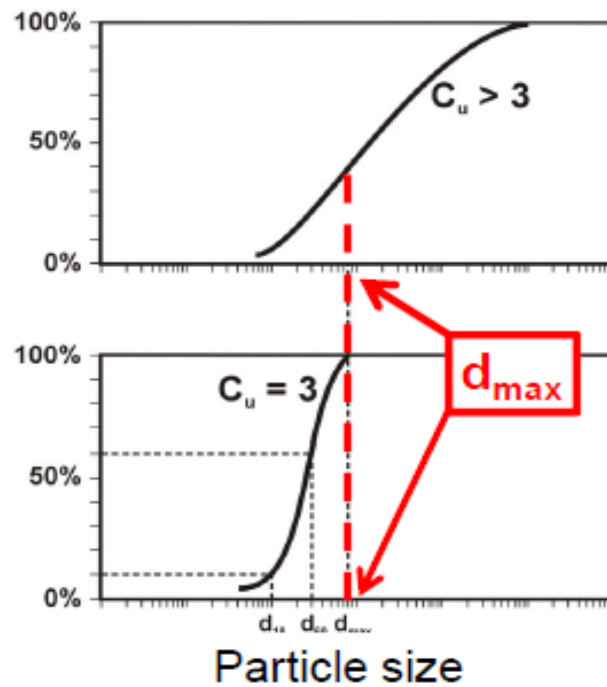
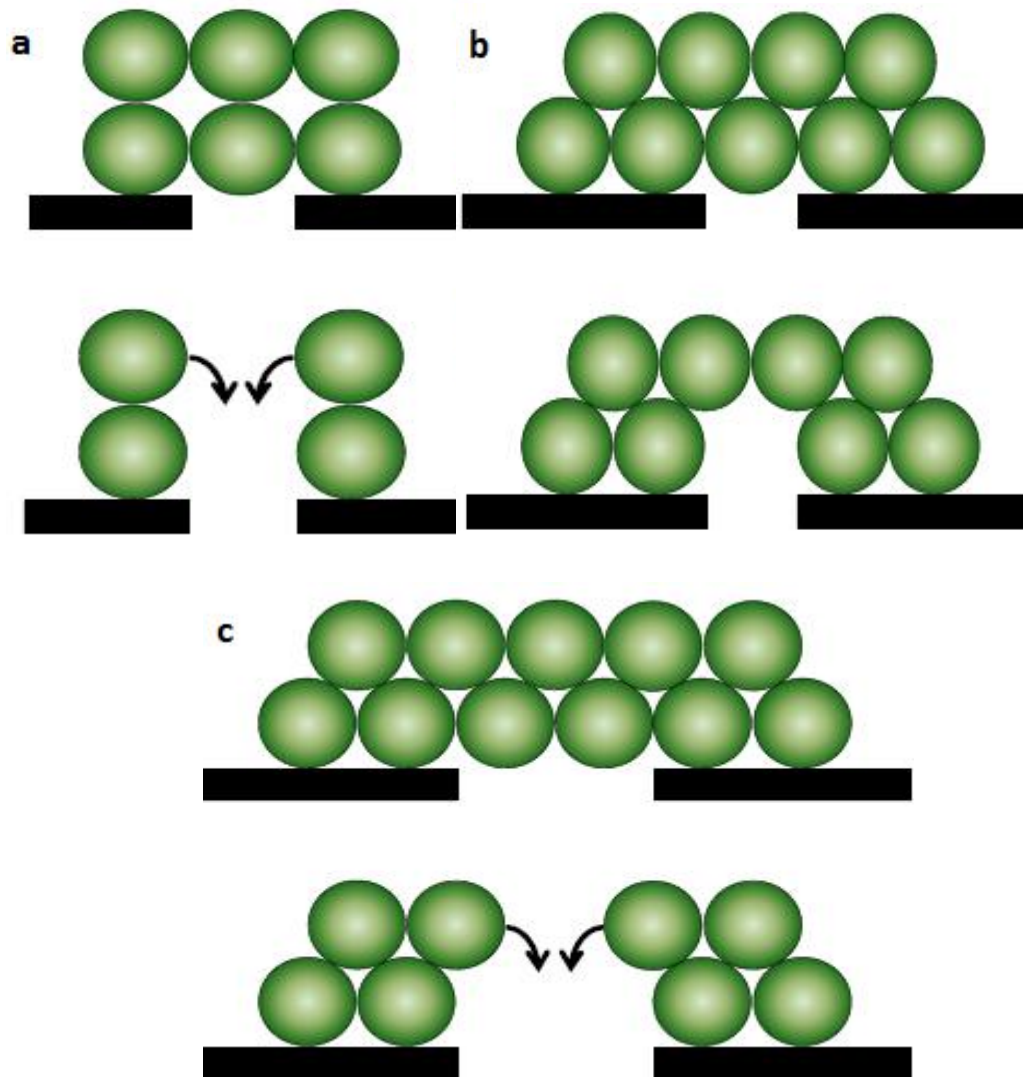


Figure 8. Automatic truncation of the particle size distribution curve of a soil with a coefficient of uniformity greater than 3.

Σχήμα 5.7: Αυτόματη επιλογή μόνο του ομοιόμορφου λεπτόκοκκου κλάσματος εδάφους με  $C_u > 3$  (Πηγή: Giroud, 2008)

Έτσι σαν μέγεθος των κόκκων του εδαφικού σκελετού για τα ασταθή υλικά θα μπορούσε να ληφθεί το  $d_{85}$  του πιο λεπτόκοκκου κλάσματος του εδάφους.

Στο ερώτημα ποιο άνοιγμα πόρου θα συγκρατούσε τον χαρακτηριστικό κόκκο του εδαφικού υλικού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και μια δεύτερη παράμετρο. Η σχετική πυκνότητα του εδαφικού υλικού. Αυτό παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα όπου γίνεται γεωμετρική αντιμετώπιση της πιθανής ή όχι συγκράτησης υλικού:



Σχήμα 5.8: Σχηματική απεικόνιση εδαφικής δομής. (a) Χαλαρή δομή και άνοιγμα ίσο με το μέγεθος κόκκου, (b) Πυκνή δομή και άνοιγμα ίσο με το άνοιγμα μεγέθους κόκκου, (c) Πυκνή δομή και άνοιγμα διπλάσιο του μεγέθους κόκκου. (Πηγή: Giroud,2008)

Στο σχήμα 5.8(a) που η χαλαρή δομή απεικονίζεται με την τετραγωνική διάταξη τα πιο πολλά σωματίδια περνούν από το κενό, ενώ στο σχήμα (b) με την εξαγωνική διάταξη δημιουργείται «γέφυρα» συγκράτησης. Ωστόσο, όταν το άνοιγμα γίνεται διπλάσιο του μεγέθους του κόκκου σχεδόν όλα τα σωματίδια θα καταρρεύσουν, σχήμα (c) . Ο Giroud δεν αρκέστηκε στην ποιοτική αυτή εξήγηση του φαινομένου και με μαθηματικές αναλυτικές αναλύσεις κατέληξε στα επόμενα κριτήρια:

για  $C_u \leq 3$ :

$$O_F \leq (C'_u)^{0,3} d'_{85S} \quad \text{για χαλαρά εδάφη } (I_D < 35\%) \quad (5.10)$$

$$O_F \leq 1,5(C'_u)^{0,3} d'_{85S} \quad \text{για μεσαίας πυκνότητας εδάφη } (35\% < I_D < 65\%) \quad (5.11)$$

$$O_F \leq 2(C'_u)^{0,3} d'_{85S} \quad \text{για πυκνά εδάφη } (I_D > 65\%) \quad (5.12)$$

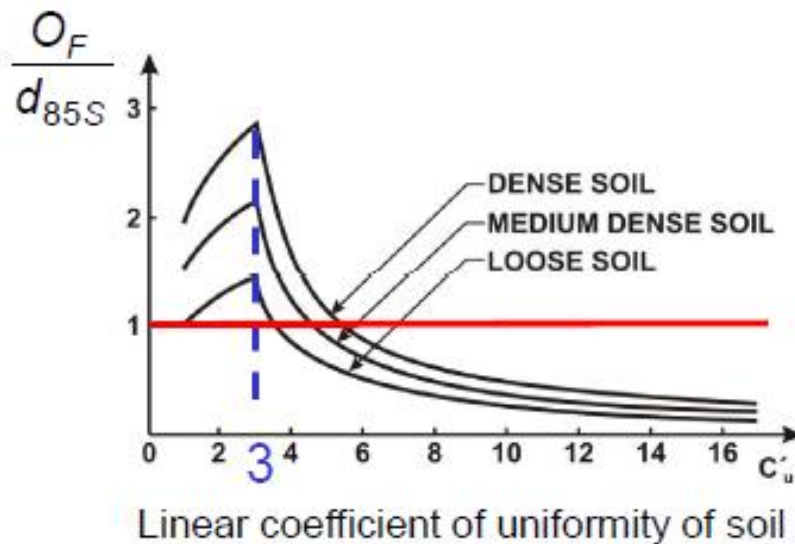
για  $C_u > 3$ :

$$O_F \leq \frac{9 d'_{85S}}{(C'_u)^{1,7}} \quad \text{για χαλαρά εδάφη} \quad (5.13)$$

$$O_F \leq \frac{13,5 d'_{85S}}{(C'_u)^{1,7}} \quad \text{για μεσαίας πυκνότητας εδάφη} \quad (5.14)$$

$$O_F \leq \frac{18 d'_{85S}}{(C'_u)^{1,7}} \quad \text{για πυκνά εδάφη} \quad (5.15)$$

Παρατηρείται ότι στους τύπους χρησιμοποιείται ο γραμμικός συντελεστής ομοιομορφίας. Αυτό γίνεται γιατί με τη χρήση του ισοδύναμου αυτού δείκτη προκύπτουν πιο εύχρηστοι τύποι.



Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση των κριτηρίων (Πηγή: Giroud, 2008)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9 τα κριτήρια του Giroud για εδάφη με χαμηλές τιμές  $C_u$  επιτρέπουν πόρους μεγαλύτερους από αυτούς του κριτηρίου του Terzaghi. Πράγμα

που σημαίνει ότι σε περίπτωση που ακολουθηθεί το κριτήριο Terzaghi υπάρχει περίπτωση έμφραξης του φίλτρου. Αντίθετα, στην περίπτωση μεγάλων συντελεστών ομοιομορφίας υπάρχει ο κίνδυνος διασωλήνωσης καθώς τα κενά που ορίζει η σχέση του Terzaghi είναι μεγαλύτεροι των κόκκων του σκελετού. Αξίζει να τονιστεί ότι στην περίπτωση έντονα βαθμωτά διαβαθμισμένου υλικού η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Ακολουθεί πίνακας που συνοψίζει τα διάφορα κριτήρια συγκράτησης για γεωυφάσματα.

Ερευνητής	Κριτήριο	Λεπτομέρειες
<b>USFHWA (1986)</b>	$AOS/D_{85} \leq B$	$B=1$ (για $C_u \leq 2$ ή 8), $B=0,5C_u$ (για $2 \leq C_u \leq 4$ ), $B=8/C_u$ (για $4 \leq C_u \leq 8$ ), για εδάφη των οποίων $\leq 50\%$ περνά από το κόσκινο No 200
	$AOS/D_{85} \leq B$	$B=1,8$ για μη υφαντά, $B=1$ για υφασμένα, για εδάφη των οποίων $\leq 50\%$ περνά από το κόσκινο No 200
<b>CFEM (1992)</b>	$FOS/D_{85} < 1,5$	Για ομοιόμορφα εδάφη, όχι βαθμωτά διαβαθμισμένα
	$FOS/D_{85} < 3$	Για καλά και όχι βαθμωτά διαβαθμισμένα
<b>Ontario Ministry of Transportation</b>	$FOS < 1,0D_{85}$ και $40\mu\text{m}$ ή $0,5D_{85} < FOS$	Μη υφασμένα ή υφασμένα, με ιδιαίτερη προτίμηση στα υφασμένα
<b>Calhoun (1972)</b>	$O_{95}/D_{85} \leq 1$	Υφασμένα, για εδάφη με $\leq 50\%$ να περνά από το κόσκινο No 200
	$O_{95} \leq 0,2 \text{ mm}$	Υφασμένα, για συνεκτικά εδάφη
<b>Zitscher (1975)</b>	$O_{50}/D_{50} \leq 1,7-2,7$	Υφασμένα, για εδάφη με $C_u \leq 2$ , $D_{50} = 0,1-0,2 \text{ mm}$
<b>Rankilor (1981)</b>	$O_{50}/D_{50} \leq 25-37$	Μη υφασμένα συνεκτικά εδάφη
<b>Ogink (1975)</b>	$O_{90}/D_{90} \leq 1$	Υφασμένα
	$O_{90}/D_{90} \leq 1,8$	Μη υφασμένα
<b>Sweetland (1977)</b>	$O_{15}/D_{85} \leq 1$	Μη υφασμένα με $C_u = 1,5$
	$O_{15}/D_{15} \leq 1$	Μη υφασμένα με $C_u = 4$
<b>Rankilor (1981)</b>	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Μη υφασμένα με $0,02 \leq D_{85} \leq 0,25 \text{ mm}$
	$O_{15}/D_{15} \leq 1$	Μη υφασμένα με $D_{85} \geq 0,25 \text{ mm}$
<b>Millar (1980)</b>	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Υφασμένα και μη υφασμένα
<b>Giroud (1982)</b>	$O_{95}/D_{50} \leq (9-18)C_u$	Εξαρτάται στο συντελεστή ομοιομορφίας του εδάφους
<b>Carroll (1983)</b>	$O_{95}/D_{85} \leq 2-3$	Υφασμένα και μη

<b>FCGG (1986)</b>	$O_F / D_{85} \leq 0,38-12,5$	Εξαρτάται στον τύπο εδάφους, την συμπίεση, υδραυλική κλίση και συνθήκες εφαρμογής
<b>Fisher et al (1990)</b>	$O_{50} / D_{85} \leq 0,8$ $O_{50} / D_{15} \leq 1,8-7$ $O_{50} / D_{50} \leq 0,8-2,0$	Εξαρτάται από την πορομετρική καμπύλη του γεωυφάσματος και στην ομοιομορφία του εδάφους
<b>Bhatia (1990)</b>	$FOS / D_{85} \leq 3,0$	Βασισμένο σε μακροχρόνιες δοκιμές σε βαθμωτά διαβαθμισμένα εδάφη
<b>Faure et al (1986)</b>	$FOS / D_{85} < 1,0-1,2$ $FOS / D_{85} < 1,5-2,0$	Για κρίσιμες συνθήκες Για λιγότερο κρίσιμες Βασισμένο σε δοκιμές φιλτραρίσματος

Πίνακας 5.3: Συνοπτική παρουσίαση κριτηρίων συγκράτησης γεωυφασμάτων (Πηγή: Christopher and Fisher, 1992)

### **Κριτήριο Περατότητας**

Η βασική λογική των κριτηρίων περατότητας είναι αρκετά απλή, με κύριο άξονα η περατότητα του γεωυφάσματος να είναι μεγαλύτερη από αυτής του εδάφους ώστε να μην έχουν ανάπτυξη υπερπιέσεων. Ειδικότερα, οι Carroll (1983) και Christopher and Holtz (1985) επισήμαναν ότι η περατότητα των κρίσιμων φίλτρων θα έπρεπε να πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 10.

Έτσι η γενική μορφή των κριτηρίων γίνεται:

$$k_g > \lambda_p k_s \quad (5.16)$$

όπου:  $k_g$ =η περατότητα του γεωυφάσματος

$\lambda_p$ =συντελεστής συγκράτησης

$k_s$ = περατότητα του εδάφους

Ερευνητές	Κριτήριο	Λεπτομέρειες
USFHWA (1985), Calhoun (1972), Wates (1980), Carroll (1983), Haliburton et al (1982)	$k_g > k_s$	Σταθερές συνθήκες ροής, εφαρμογή σε μη κρίσιμες συνθήκες
USFHWA (1985), Carroll (1982)	$k_g > 10k_s$	Εφαρμογή σε κρίσιμες συνθήκες
CFEM (1992)	$k_g > k_s$	για συγκράτηση καθαρών μεσαίων έως χονδρόκοκκων άμμων
	$k_g > 10k_s$	για συγκράτηση λεπτόκοκκων
FCGG (1986)	$\psi > 10^\alpha k_s$	για κρίσιμα $\alpha=5$ , για λιγότερο κρίσιμα $\alpha=4$ , για καθαρές άμμους $\alpha=3$
Giroud (1982)	$k_g > 0,1k_s$	χωρίς συντελεστή ασφαλείας
Koerner (1990)	$\psi_{\text{επιτρ}} > FS \times \psi_{\text{ασφαιτ}}$	ο FS εξαρτάται από τις συνθήκες εφαρμογής

Πίνακας 5.4: Συνοπτική παρουσίαση κριτηρίων περατότητας (Πηγή: Christopher and Fisher, 1992)

### **Κριτήριο απέναντι στην έμφραξη του φίλτρου (κριτήριο πορώδους)**

Στα γεωυφάσματα το νερό ακολουθεί διαδρομές όπως και στα εδαφικά υλικά κατά την ροή μέσα από αυτά. Ωστόσο σε ένα εδαφικό υλικό ο αριθμός των διαδρομών αυτών είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στο αντίστοιχο σύμφωνα με τα κριτήρια φίλτρο (Giroud, 2008) και έτσι η ροή διανέμεται καλύτερα στην επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, στα γεωυφάσματα αν δεν υπάρξει μέριμνα για τον ανά μονάδα επιφάνειας αριθμό των διαδρομών που θα δημιουργηθούν θα υπάρχει ανισοκατανομή της ποσότητας της ροής και αποτέλεσμα την έμφραξη του φίλτρου ανά περιοχές λόγω της συσσώρευσης λεπτόκοκκου υλικού.

Είναι σαφές ότι ο αριθμός διαδρομών είναι ανάλογος των κενών ανά μονάδα επιφάνειας του φίλτρου και άρα συνάρτηση του πορώδους τους. Για τα κοκκώδη εδάφη ο αριθμός κενών ανά μονάδα όγκου δίνεται από στη σχέση



$$N_o \approx \frac{0,1}{O_F^2} \quad (5.17)$$

όπου  $O_F$ : χαρακτηριστικό μέγεθος κενού

ο αντίστοιχος για τα υφασμένα γεωυφάσματα είναι:

$$N_o \approx \frac{A_R}{O_F^2} \quad (5.18)$$

όπου  $A_R$ :  $\frac{\text{επιφάνεια κενών}}{\text{συνολική επιφάνεια}}$

Συνεπώς είναι προφανής η μορφή ενός κριτηρίου για τα υφασμένα γεωυφάσματα, από την οπτική ότι αυτά θέλουμε να συμπεριφέρονται σαν τα αντίστοιχα κοκκώδη φίλτρα:

$$A_R \geq 0,1 \quad (5.19)$$

Στα μη υφασμένα ο υπολογισμός του  $N_o$  δεν είναι τόσο εύκολη υπόθεση. Προκύπτουν κάποια άνω και κάτω όρια μέσα στα οποία μπορεί να κυμανθεί:

$$\frac{(1-\sqrt{1-n})^2}{O_F^2} \leq N_o \leq \frac{4(1+0,4n-\sqrt{1-n})^2}{\sqrt{3}O_F^2} \quad (5.20)$$

για να προσαρμοστεί ο  $N_o$  στον αντίστοιχο των κοκκώδων υλικών και μετά από δοκιμές διάφορων τιμών  $n$  προτείνεται η συντηρητική βέβαια τιμή  $n \geq 0,55$ .

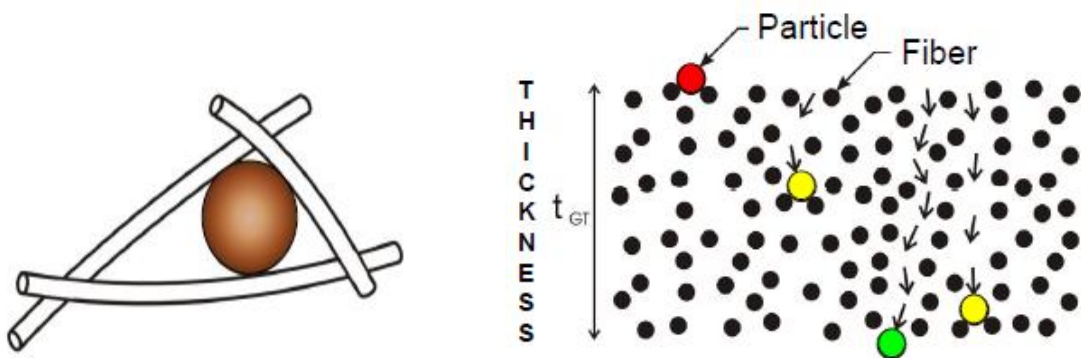
Ο συντελεστής  $A_R$  είναι ουσιαστικά η έκφραση του πορώδους σε όρους επιφανειών. Η διαφορά αυτή των δύο τιμών των συντελεστών οφείλεται στην στο γεγονός ότι στα μεν υφασμένα η ροή γίνεται από όλο σχεδόν τον όγκο κενών τα οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα ανά επιφάνεια του φίλτρου, ενώ στα μη υφασμένα από ένα μόνο τμήμα των συνολικών κενών. Στα κοκκώδη υλικά δεν χρησιμοποιείται κάποιο αντίστοιχο κριτήριο πορώδους γιατί οι τιμές του  $n$  έχουν ένα μικρό εύρος διακύμανσης  $n \sim 20-30\%$ . Αντίθετα, στα γεωυφάσματα το πορώδες μπορεί να πάρει τιμές από 0,01 για τα υφασμένα έως 0,92 για τα μη υφασμένα. Γίνε, λοιπόν, σαφής η αναγκαιότητα κριτηρίου σχετικό με το πορώδες του υλικού.

### Κριτήριο πάχους του φίλτρου

Στα φίλτρα από κοκκώδες εδαφικό υλικό δεν συναντάται αντίστοιχο κριτήριο. Εκεί το πάχος σχετίζεται με την παροχή που μπορεί να εξυπηρετήσει το φίλτρο ή στραγγιστήριο και καθορίζεται κυρίως από κατασκευαστικούς περιορισμούς με συνήθη διάσταση αυτή των 2-3 m. Στα γεωυφάσματα ωστόσο γιατί δημιουργείται η ανάγκη για ένα τέτοιο κριτήριο;

Καταρχήν το κριτήριο αυτό αφορά μόνο τα μη υφασμένα γεωυφάσματα, καθώς στα υφασμένα δεν υπάρχει αντίστοιχη ανάγκη.

Για να γίνει εμφανής η αναγκαιότητα ενός ελάχιστου απαιτούμενου πάχους, πρέπει να υποδειχθεί πως περνούν τα εδαφικά σωματίδια μέσα από ένα φίλτρο. Ένα σωματίδιο για να προχωρήσει μέσα στο γεωύφασμα πρέπει να περάσει ανάμεσα σε χωρικούς περιορισμούς (constrictions) που δημιουργούνται από τις ίνες του υφάσματος (Σχήμα 5.10)

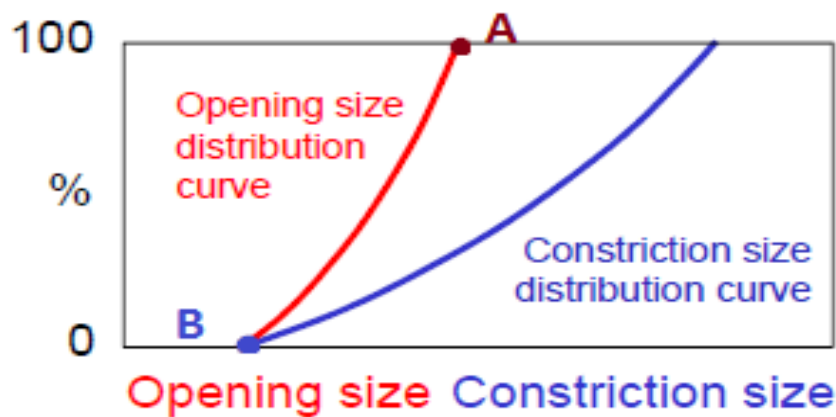


Σχήμα 5.10: Σχηματική απεικόνιση του περιορισμού που δημιουργούν οι ίνες του φίλτρου(αριστερά) και των διαδρομών που μπορούν να ακολουθήσουν μέσα στο φίλτρο (δεξιά) (Πηγή:Giroud, 2008) .

Το σωματίδιο μέσα στο φίλτρο ακολουθεί μια διαδρομή όπως άλλωστε γίνεται και με την ροή. Για να σταματήσει πρέπει ο περιορισμός (το άνοιγμα) των ινών να είναι μικρότερο από τη διάμετρο του σωματιδίου. Ακόμα, σε κάθε διαδρομή υπάρχουν πολλά μεγέθη περιορισμών και αυτό που καθορίζει την κάθε διαδρομή είναι το μικρότερο. Στα υφασμένα γεωυφάσματα κάθε διαδρομή έχει ένα μέγεθος

περιορισμού και για αυτό όπως θα δούμε το πάχος δεν είναι κρίσιμος παράγοντας για τα υφασμένα γεωυφάσματα.

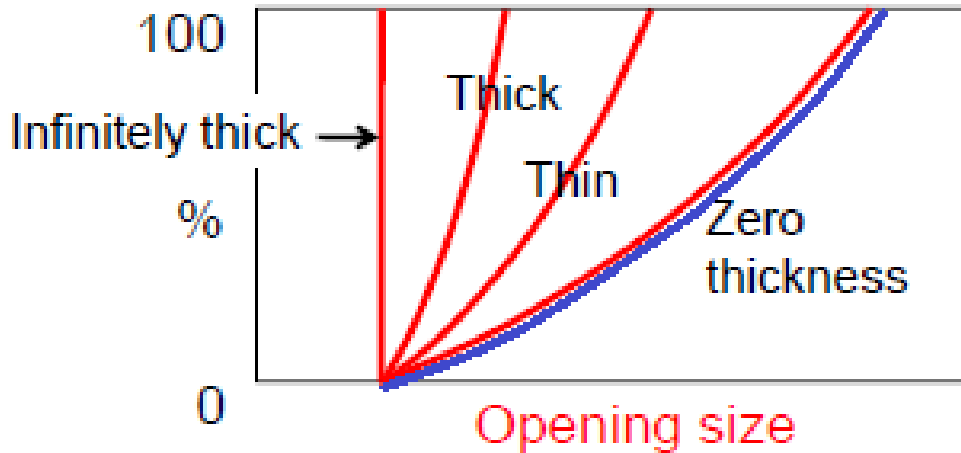
Σε αυτό το σημείο πρέπει να ορισθούν δύο καμπύλες απαραίτητες για τον χαρακτηρισμό του φίλτρου. Καταρχήν, μια καμπύλη που χαρακτηρίζει το **υλικό** του γεωυφάσματος και όχι το γεωύφασμα είναι η καμπύλη διαβάθμισης των περιορισμών (constriction size distribution curve). Το γεωύφασμα χαρακτηρίζεται από την καμπύλη διαβάθμισης χαρακτηριστικού μεγέθους κενών.



Σχήμα 5.11: Καμπύλες διαβάθμισης χαρακτηριστικού μεγέθους κενών (κόκκινο), και περιορισμών (μπλε) (Πηγή: Giroud, 2008)

Σε κάθε διαδρομή είναι διαφορετικό το μέγεθος του μικρότερου περιορισμού και συνεπώς είναι διαφορετικό το χαρακτηριστικό μέγεθος ανοίγματος της διαδρομής. Για αυτό χρησιμοποιείται η καμπύλη χαρακτηριστικών κενών, της οποίας η κορυφή (σημείο A στο σχήμα 5.11) είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος πόρου του γεωυφάσματος, ενώ το σημείο B που είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος της διαδρομής με τον μικρότερο περιορισμό είναι ο μικρότερος χωρικός περιορισμός στο φίλτρο. Ακόμα, όμως δεν έχει γίνει σαφής ο ρόλος του πάχους του φίλτρου. Πρέπει να τονιστεί, επιπλέον, ότι σε κάθε φίλτρο, είτε κοκκώδες είτε γεωύφασμα, ο αριθμός διαδρομών ανά  $m^2$  είναι της τάξης του εκατομμυρίου και ο αριθμός των περιορισμών σε κάθε διαδρομή για τα μη υφασμένα γεωυφάσματα είναι 10-100

λόγω του μικρού τους πάχους. Είναι πιο εύκολο να τονιστεί ο ρόλος του πάχους παρουσιάζοντας τα θεωρητικά όρια μέσα στα οποία μπορεί αυτό να κινηθεί.



Σχήμα 5.13: Καμπύλη διαβάθμισης περιορισμών (μπλε) και διάφορες περιπτώσεις (φίλτρο απείρου πάχους, παχύ, λεπτό, μηδενικού πάχους) πορομετρικών καμπύλων (κόκκινο) με μεταβαλλόμενο το πάχος του φίλτρου. (Πηγή: Giroud, 2008).

Αρχικά, αν ένα γεωύφασμα έχει μηδενικό πάχος, τότε σε κάθε διαδρομή υπάρχει ένας περιορισμός και η πορομετρική καμπύλη συμπίπτει με αυτή των περιορισμών. Αν πάλι ένα φίλτρο έχει άπειρο πάχος, τότε η πιθανότητα μια διαδρομή να έχει το μικρότερο μέγεθος περιορισμού είναι 100% και η πορομετρική καμπύλη είναι η κατακόρυφος που περνά από το μικρότερο μέγεθος περιορισμού. Ακόμα, στο σχήμα 5.13 παρουσιάζονται και οι ενδιάμεσες θέσεις ενός φίλτρου μεγάλου πάχους και ενός λεπτού.

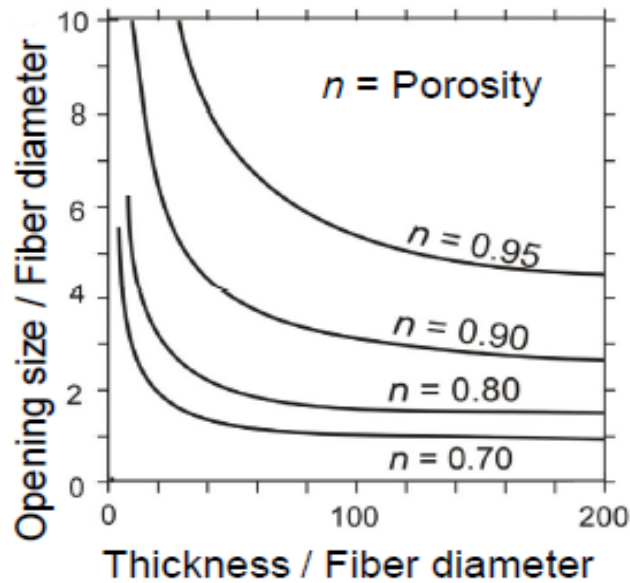
Εκτός από την ποιοτική παραπάνω εξήγηση, μπορούν να γίνουν και αριθμητικοί υπολογισμοί των παραπάνω

$$\frac{O_F}{d_f} \approx \frac{1}{\sqrt{1-n}} - 1 + \frac{10n}{(1-n)t_{GT}/d_f} \quad (5.21)$$

όπου:  $O_F$ : μέγιστο μέγεθος πόρου μη υφασμένου φίλτρου

$d_f$ : διάμετρος της ίνας του γεωυφάσματος

$t_{GT}$ : πάχος μη υφασμένου



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση της σχέσης 5.21 για διάφορες τιμές  $n$ . (Πηγή: Giroud, 2008)

Όπως φαίνεται για δεδομένη τιμή πορώδους με την αύξηση του πάχους το μέγεθος πόρου του φίλτρου μειώνεται.

Ο αριθμός των περιορισμού ενός γεωυφάσματος, από την άλλη μπορεί να δοθεί από τον τύπο:

$$N_{constr} \approx \frac{\mu_{GT}}{\rho_f d_f \sqrt{1-n}} \quad (5.22)$$

Με παραμετρική ανάλυση ο Giroud κατέληξε στο ότι αν ένα φίλτρο έχει πάνω από 25 περιορισμούς το πάχος δεν επηρεάζει το μέγεθος πόρου και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί απείρου πάχους.

Το κριτήριο συνεπώς είναι οι περιορισμοί να είναι πάνω από 25. Το κριτήριο χρησιμοποιεί το μέγεθος των περιορισμών για να μπορεί να είναι ανεξάρτητο από το πορώδες και τη διάμετρο των ινών. Το κριτήριο αυτό χρησιμοποιείται από την ASTM στο πρότυπο D 7178.

Το μέγεθος πόρου του γεωυφάσματος όπως είδαμε υπολογίζεται από την σχέση 5.1 και από την ίδια σχέση μπορεί να προκύψει το μέγεθος του μικρότερου περιορισμού του γεωυφάσματος θεωρώντας άπειρος το πάχος του:

$$\frac{C_{smallest}}{d_f} = \frac{O_{Fsmallest}}{d_f} \approx \frac{1}{\sqrt{1-n}} - 1 \quad (5.23)$$

όπου:  $C_{smallest}$ : ο μικρότερος περιορισμός

$O_{Fsmallest}$ : το μικρότερο μέγεθος πόρου

Τα τέσσερα κριτήρια σχεδιασμού είναι μια σημαντική σφαιρική βοήθεια για το σχεδιασμό έργων που χρησιμοποιούν γεωυφάσματα ως φίλτρα. Ωστόσο, δεν εξασφαλίζουν την ασφαλή και ικανοποιητική εφαρμογή των φίλτρων χωρίς την απόφαση και κρίση του μηχανικού. Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες για παράδειγμα που δεν λαμβάνονται υπόψη στα κριτήρια αυτά ,όπως για παράδειγμα το σχήμα των κενών. Για τα κοκκώδη φίλτρα με την σχεδόν τυχαία σωματιακή δομή τους τον σχήμα των κενών δεν είναι ούτε αποφασιστικός, ούτε καν συγκεκριμένος παράγοντας. Αντίθετα, σε κάποια υφασμένα φίλτρα μπορεί να επηρεάζει την λειτουργία τους.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν η συγκέντρωση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα φίλτρα γεωφραγμάτων και η κριτική αντιμετώπιση διάφορων προβλημάτων που συναντιόνται σήμερα κατά την κατασκευή και το σχεδιασμό φίλτρων κυρίως σε σχέση με την αλληλεπίδραση του υλικού τους με το νερό.

Αφετηρία ήταν η ανάγκη που εκφράζεται στον έλεγχο των υπαρχόντων φραγμάτων και στον σχεδιασμό νέων, για την σωστή λειτουργία των φίλτρων τα οποία εξυπηρετούν κρίσιμους μηχανισμούς για την ασφαλή λειτουργία και ευστάθεια των έργων. Αυτή η εργασία μπορεί να αποτελέσει, αφενός ένα μέσο γνωριμίας με το αντικείμενο των φίλτρων καθώς συγκεντρώνει μεγάλο μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, και αφετέρου μια προσπάθεια στην κατεύθυνση της ανάπτυξης της έρευνας πάνω στον τομέα.

Από την απόπειρα αυτή μελέτης του αντικειμένου μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα:

1. Καταρχήν, με μια τόσο ανεπτυγμένη βιβλιογραφία πάνω στο αντικείμενο το επόμενο βήμα που θα διασφάλιζε την συμπύκνωση της γνώσης και της εμπειρίας που υπάρχει, θα μπορούσε να είναι η δημιουργία κανονιστικού πλαισίου. Όπως φάνηκε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η έρευνα καθορίστηκε από τα προβλήματα που αντιμετώπισαν οι μηχανικοί κατά την δημιουργία έργων γεωφραγμάτων. Σήμερα, η αξιοποίηση αυτής της εμπειρίας θα ήταν αποτελεσματικότερη με την καταγραφή και την αξιολόγηση των πρακτικών σχεδιασμού και κατασκευής σε μορφή κανονιστικής νόρμας. Όχι σε ρόλο δεσμευτικού πλαισίου, γιατί όπως αναφέρθηκε τα φράγματα είναι κάθε φορά μοναδικά έργα με ιδιαίτερες απαιτήσεις λόγω της ξεχωριστών κάθε φορά συνθηκών, υλικών και σκοπού, αλλά σε συμβουλευτικό ρόλο για το μηχανικό. Τέτοιες προσπάθειες έχουν γίνει ήδη από μεγάλους φορείς κρατών (π.χ. U.S. Army Corps of Engineers, U.S Bureau of Reclamation) παλαιότερα και από πιο σύγχρονα συγγραφικά

## Συμπεράσματα

έργα ερευνητών (π.χ. Fell, 2005). Μια κίνηση κανονιστικής απεικόνισης της μέχρι τώρα έρευνας από επίσημο κρατικό ή διεθνή φορέα θα κινούταν προς την αύξηση της ασφάλειας στον τομέα των φραγμάτων

2. Από το κεφάλαιο 3, στο οποίο γίνεται αναφορά στην επίδραση της χημείας του νερού στα ανθρακικά υλικά, τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται ως υλικό φίλτρων και ιδίως στην Ελλάδα, προκύπτει ότι ο θεωρητικός μηχανισμός που οδηγεί στην πιθανή αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του φίλτρου (απόκτηση συνεκτικότητας) είναι υπαρκτός. Δημιουργείται, συνεπώς, το ερώτημα πόσο αυτός ο μηχανισμός μπορεί να επηρεάσει στην διάσταση ενός πραγματικού έργου. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί στα υπάρχοντα έργα με την παρέμβαση και παρακολούθηση της συμπεριφοράς των φίλτρων (π.χ. αφαίρεση υλικού και υποβολή του σε δοκιμές για την σύγκριση των σημερινών ιδιοτήτων του με της αρχικές). Αντίστοιχα, στα νέα έργα γίνεται σαφής η ανάγκη για λεπτομερέστερη εγκατάσταση οργάνων (πιεζόμετρων για παρακολούθηση της πιεζομετρικής γραμμής ανάντη και κατόντη του φίλτρου για την παρακολούθηση της λειτουργίας του).
3. Σε επέκταση αυτής της λογικής θα ήταν πολύ χρήσιμη η ανάδειξη της αξιολόγησης των υποψήφιων για το φίλτρο υλικών, μέσω ποιοτικών και ποσοτικών δεικτών και δοκιμών. Συνήθως, η αξιολόγηση της καταλληλότητας των υλικών και μάλιστα των ανθρακικών βασίζεται στην εμπειρία του μελετητή-κατασκευαστή και σε περιορισμούς, όπως το 5% για τα μη πλαστικά λεπτόκοκκα του φίλτρου (για την αποφυγή συνεκτικότητας). Μετρήσεις και δοκιμές όπως αυτές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4 μπορούν να δώσουν πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των υλικών. Στην διεθνή - σχετιζόμενη με τα φίλτρα γεωφραγμάτων- έρευνα οι αναφορές σε τέτοιες προσπάθειες είναι περιορισμένες, για αυτό και σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται αντίστοιχες προσπάθειες από άλλους τομείς όπως αυτόν της οδοποιίας. Γίνονται, λοιπόν, προτάσεις ως προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης δοκιμών για την βαθμονόμηση και αξιολόγηση του υλικού με σκοπό την προσθήκη νέων εργαλείων στο μηχανικό.
4. Τέλος, παρουσιάζεται η εναλλακτική λύση των γεωφασμάτων ως φίλτρα με παρουσίαση των ιδιοτήτων τους και της σχεδιαστικής φιλοσοφίας τους. Η



επιλογή των γεωφασμάτων επηρεάζεται βέβαια, εκτός από τις ιδιότητες που προσφέρουν στον μηχανικό, και από τον οικονομικό σχεδιασμό του έργου. Φυσικά, μπορεί να επιτευχθεί μια βελτιστοποίηση με τον συνδυασμό φίλτρων και στραγγιστηρίων με αδρανή υλικά και με γεωφάσματα.

## Συμπεράσματα

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Allen, T.M., Bathurst, R.J., Lee, W. F., Holtz, R. D., and Walters, D.L. (2003), "A New Working Stress Method for Prediction of Reinforcement Loads in Geosynthetic Reinforced Soil Walls", accepted for publication in Canadian Geotechnical Journal.
- Angel Araoz Sanchez-Albornoz (1992), *Cimentación de presas en terrenos terciarios con disolución de evaporitas y erosión interna en la cuenca del Ebro*, Confederacion Hidrografica del Ebro
- Appelo C.A.J (1994), "Cation and proton exchange, pH variations, and carbonate reactions in a freshening aquifer", Water resources research vol. 30, No. 10, pages 2793-2805
- Artières, Oberreiter and Aschauer, "Geosynthetic systems for earth dams – 35 years of experience".
- Baumann J., Buhmann D., Dreybrodt W., and Schulz H. D. (1985), "Calcite dissolution kinetics in porous media", Chem. Geol.53 219-228
- Baylis J.R (1959), "Review of filter bed design and methods of washing", Journal AWWA, 1433-1454, November
- Bhatia S.K., Smith J.L. and Christopher B.R (1996), "Geotextile Characterization and Pore Size Distribution: Part III. Comparison of Methods and Application to Design", *GEOSYNTHETICS INTERNATIONAL* 1996, VOL. 3, No. 3
- Buhmann D. and Dreybrodt W. ( 1987), "Calcite dissolution kinetics in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CaCO<sub>3</sub> with participation of foreign ions", *Chem. Geol.* 64, 89-102.
- Casagrande, A. (1937), "Seepage through dams", Boston Soc. Civ. Eng. Cont. to Soilmech.
- Côté Alain, Carrier Benoît, Gervais Richard, Noël Pierre (2009), "Water Seepage Detection and Localization at the Péribonka Dam using Optical Fiber", International Workshop on Internal Erosion in Dams St-Petersburg, Russia

## Βιβλιογραφία

- Daugherty R. L. and Franzini J. B. (1965), *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. McGraw-Hill
- Dreybrodt W. and Buhmann D. (1991) A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion. *Chem. Geol.* 90, 107-122.
- Dreybrodt et al., W. Dreybrodt, L. Eisenlohr, B. Madary and S. Ringer, (1996b): Precipitation kinetics of calcite in the system  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ : The conversion to  $\text{CO}_2$  by the slow process  $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- > \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  as a rate limiting step. *Geochim. Cosmochim. Acta*.
- Dreybrodt W., Lauckner J., Liu Z. H., Svensson U., and Buhmann D. (1996a) The kinetics of the reaction  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$  as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ . *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 3375-3381.
- Duckworth and Martin (2004), "Dissolution rates and pit morphologies of rhombohedral carbonate minerals", *American Mineralogist*, Volume 89, pages 554–563, 2004
- Faure, Y. H., Gourc, J. P., Millot, F., and Sunjoto S. (1986), "Theoretical and Experimental Determination of the Filtration Opening Size of Geotextiles Proceedings of the 3d International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, Vol. IV, pp.1275-1280.
- Faure, Y. H., Gourc, J. P. and Gendrin, P. (1990), "Structural Study of Porometry and Filtration Opening Size of Geotextiles Geosynthetics: Microstructure and Performance, ASTM STP 1076, I. D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 102-119
- Fell R, Foster MA, Wan CF. (2007), "A framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations", *Internal Erosion of Dams and their Foundations*, Taylor and Francis, pp. 65-70
- Fell R, Fry JJ. (eds.) (2007), *Internal erosion of dams and their foundations*. Taylor & Francis/Balkema
- Fell, MacGregor, Stapledon and Bell (2005). "Geotechnical Engineering of Dams". Balkema

- Fell, R., C. F. Wan, and M. Foster (2004), "Methods for Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping - Piping Through the Embankment", UNICIV Report No. R428, The University of New South Wales.
- Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J, Foster M. (2003), Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *J. of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(4), pp. 307-314.
- 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*.
- Fowler A.C and Xinshe Yang (1999), "Pressure solution and viscous compaction in sedimentary basins", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 104, NO. B6, pages 12,989-12,997, JUNE 10, 1999
- Fry J.J. (2009), "Geotextiles Filters Construction Considerations", ICOLD IWG Internal Erosion 2009 Saint-Petersbourg
- Fry J.J (2010), "Internal Erosion and Filters: Update and new technical Bulletins, 2010 Grenada EWG of ICOLD boletines técnicos
- Garner SJ, Fannin RJ. (2010). Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event. *Intl. Journal on Hydropower and dams*.17(3), pp. 93-98
- Giroud, J.P, (1982), "Filter Criteria for Geotextiles", Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, *Vol. 1*, Las Vegas, NV, USA, August 1982, pp. 103-108.
- Giroud J. (1996). "Granular Filters and Geotextile Filters", Proc. Geofilters '96, Comptes Rendus Proceedings, Lafleur & Rollin (Eds.), *Bitech Publications*, Canada, pp. 565-680.
- Giroud, J.P. (2004), "Criteria for Granular and Geotextile Filters", *IGS News*, Vol. 20, No. 3, November 2004, pp. 12-14.
- Giroud (2008), Development of criteria for geotextile and granular filters, *Consulting engineer*, JP GIROUD, INC., USA

## Βιβλιογραφία

- Golder Associates (1999), Technical Memorandum B4-10 Version 4 Zone 2B filter and stability test Antamina project Contract TSC-001 Document #513
- Goldsworthy (1990), "Filter tests-direct or indirect?", *Geotechnique* 40, No. 2, 281-284
- 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 (1989), Exposure of dam concrete to special aggressive waters – Guidelines, *Bulletin 71* International Commission on Large Dam
- ICOLD (1994). Embankment dams: granular filters and drain, *Bulletin 95*. International Commission on Large Dam, Paris.
- ICOLD EUROPEAN CLUB (2004), Working Group on Uplift Pressures under Concrete Dams- Final Report
- 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
- Jagielski, K. (1991a), "Lining Systems Show Growth", *Geotechnicals Fabrics Report*, Vol. 9, No. 6, pp. 26-28
- Jagielski, K. (1991b), "Western European Geotextile Market Report", *Geotechnicals Fabrics Report*, Vol. 9, No. 7, pp. 24-25
- James, A.N. and Lupton, A.R.R. 1985: *Further studies of the dissolution of soluble rocks* . *Géotechnique* 35, 205-10
- Kevin, Richards, Krishna, Reddy (2007), Critical appraisal of piping phenomena in earth dams, *Bull Eng Geol Environ* (2007) 66:381–402
- Koerner R.M. (1986), *Designing With Geosynthetics*, Prentice-Hall, New Jersey
- Korkut Eyüp Nafiz (2003), "Geotextiles as Biofilm Attachment Baffles for Wastewater Treatment", Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University
- Kutay, M. E. & Aydilek, A. H. (2004). "Retention performance of geotextile containers confining geomaterials", *Geosynthetics International*, 11, No. 2, 100–113
- Lasaga A. C. (1998), *Kinetic theory in the earth sciences*. Princeton University Press

- Lebron and Suarez (1996), "Calcite nucleation and precipitation kinetics as affected by dissolved organic matter at 25°C and pH>7,5", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 15, pp. 2765-2776, 1996
- Lebron and Suarez (1997), "Kinetics and mechanisms of precipitation of calcite as affected by PCO<sub>2</sub> and organic ligands at 25°C", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 62, No. 3, pp. 405–416, 1998
- Lee, S., and P. L. Bourdeau (2006), "Filter Performance and Design for Highway Drains", Publication FHWA/IN/JTRP-2005/01. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana
- Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang , "Mineral Dissolution Kinetics at the Pore Scale", Earth Sciences Division Lawrence Berkeley National Laboratory, Department of Energy's (DOE)
- Li Li, Carl I. Steefel, Li Yang (2008), "Scale dependence of mineral dissolution rates within single pores and fractures", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (2008) 360–377
- Maher K., Steefel C. I., DePaolo D. J., and Viani B. E. (2006) The mineral dissolution rate conundrum: Insights from reactive transport modeling of U isotopes and pore fluid chemistry in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70(2), 337-363
- McClellan G.(2001) , Evaluation of aggregates for base course construction- Final report, Department of Geology College of Liberal Arts and Science and Engineering & Industrial Experiment Station College of Engineering University of Florida
- Miligan (2003), Greek Report on earth dams
- Molenaar N. and Venmans A.A.M (1993), Calcium carbonate cementation of sand: a method for producing artificially cemented samples for geotechnical testing and a comparison with a natural cementation process, *Engineering Geology*, Vol. 35, 103-122
- Newman J. S. (1991) *Electrochemical systems*. Prentice Hall
- Nilsson Å, Rönqvist H. (2004) Measures to strengthening embankment dams in order to stop or control a possible through-flow process. Proc. of

## Βιβλιογραφία

- Stability and Breaching of Embankment Dams. Oslo, Norway, 21-22 Oct 2004
- Oelkers E. H. (1996), Physical and chemical properties of rocks and fluids for chemical mass transport calculations. In *Reactive Transport in Porous Media*, Vol. 34 (ed. C. I. S. P. C. Lichtner, and E. H. Oelkers), pp. 131-191. The Mineralogical Society of America
- Palmeira, E.M. and Gardoni, M.G. (2000), "The Influence of Partial Clogging and Pressure on the Behaviour of Geotextiles in Drainage Systems", *Geosynthetics International*, Vol. 7, Nos. 4-6, Special Issue on Liquid Collection Systems, pp. 403-431.
- Peck R. (1990), Interface between core and downstream filter, *Proceedings of the H. Bolton Seed Memorial Symposium*. Vol. 2, pp. 237-251
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L. and Parkhurst, D.L. (1978) The Kinetics of Calcite Dissolution in CO<sub>2</sub> – Water Systems at 5 to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub>. *American Journal of Science*
- Prapaharan, S., Holtz, R. D., and Luna, J. D. (1989), [Pore size distribution of nonwoven geotextiles] *Geotechnical Testing Journal*, 12(4), pp.261-268.
- Prothero D.R. and Schwab, F. (1996), "Sedimentary Geology, W.H. Freeman and Co.
- Radzicki Krzysztof, Bonelli Stephane, Beck Yves-Laurent and Cunat Pierre (2009), "Leakage and erosion processes identification by temperature measurements, in the downstream part of earth hydraulic works using the impulse response function analysis method", *International Workshop on Internal*, 26-29 april 2009 StPetersburg
- Rönnqvist, H. (2010) Predicting Surfacing Internal Erosion in Moraine Core Dams, KTH. TRITA-LWR Lic Thesis 2050
- Rutter E.H. and Elliott D. (1976), " The Kinetics of Rock Deformation by Pressure Solution", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 283, No. 1312, A Discussion on Natural Strain and Geological Structure(Oct. 12, 1976), pp. 203-219



- Sherard J.L. (1983), Discussion of: Design of filters for clay cores of dams. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 109(9), pp. 1195-1197
- Sherard J.L. (1979), Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils. 13th ICOLD Congress. India, Vol. II, pp. 25-35
- 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.
- Silveira, A. Peixoto Jr. T.L. and Nogueira, J.B. 1975. On void-size distribution of granular materials. Proc. 5th Panam. Conference Soil mechanic Fdn. Engng, Buenos Aires, Vol.3.
- Steeffel C. I. (2007a), *CrunchFlow User’s Manual*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Steeffel C. I. (2007b), Geochemical kinetics and transport In *Kinetics of Water-Rock Interaction* (ed. J. Kubicki. S. Brantley, A. White), Springer (in press)
- Tadahiko SAKAMOTO, Yoshikazu YAMAGUCHI and Hiroyuki SATOH (2003), Identification of Non-cohesive Filters to Prevent Migration of Impervious Materials for Embankment Dams due to Large Earthquakes (fault movement), *JSPS Project report*
- UEBO K., YAMAZAKI R. & YOSHIDA K. (1991), Precipitation mechanism of calcium carbonate fine particles in a three-phase reactor, *Advanced Powder Technol.*, Vol. 3, No1, pp 71-79, Japan
- U.S. Army Corps of Engineers, USACE, (1953), “Investigation of filter requirements for underdrains.” Tech.memo. No. 3-360, U.S.
- U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency (2004), “Engineering use of geotextiles”- Unified Facilities Criteria UFC 3-220-08FA
- U.S. Bureau of Reclamation, USBR, (1963). *Earth manual*, First Edition (revised), US Govt. Printing Office, Washington D.C., 751p.

## Βιβλιογραφία

- USSD (2007), *Strength of Materials for Embankment Dams*, United States Society on Dams
- USSD (2011), *Materials for Embankment Dams*, United States Society on Dams
- 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.
- Vuola P, Konrad JM, Bartsch M. (2007), *Effects of frost and thaw on dams, Assessment of the risk of internal erosion of water retaining structures. Intermediate report of the European working group of internal erosion*, Freising, Germany
- Yasrobi<sup>1</sup> and Azad (2006), *Assessment of Granular Filter Functioning in Embankment Dams*", Tarbiatmodares University, Tehran, Iran
- Yong Liang, Donald R. Baer, James M. McCoy, James E. Amonetie, and J. P. Lafemina (1996), "Dissolution kinetics at the calcite-water interface", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 23, pp. 4883-4887, 1996
- 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
- Weyl, P.K. (1958): The solution kinetics of calcite. *J. Geol.* 66:163-176
- Wittman, L. (1980) *Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien. Veröffentlichung des Inst. F. Bodenmech. u.Felsmech., Universität Karlsruhe, Heft 86.*
- Witt, K.J., Brauns, J. (1984), The influence of parameter variation on the reliability of the filters. *Proc. of the international conference on safety of dams*, University of Coimbra.
- Witt, K.J. (1993) Reliability study of granular filters. *Filters in Geotechnical and hydraulic engineering*, Brauns, Heibaum & Schuler. Balkema, Rotherdam, The Netherlands, 35-41.
- Wörman A, Olafsdottir R. (1992), Erosion in a granular medium interface. *J. of Hydraulic Research.* 30(5), pp. 639-655.

- Zaharin Aris , Abdullah M. Harun, Kim K. Woong and Praveena S. Mangala (2008), “Compositional Change of Groundwater Chemistry in the Shallow Aquifer of Small Tropical Island Due to Seawater Intrusion”, 20th Salt Water Intrusion Meeting
- Zaihua Liu, Daoxian Yuan, Wolfgang Dreybrodt (2005), “Comparative study of dissolution rate-determining mechanisms of limestone and dolomite”, *Environ Geol.* 49 274–279
- Zaihua Liu & Dreybrodt W. (1997), Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> solutions in turbulent flow: The role of the diffusion boundary layer and the slow reaction  $H_2O + CO_2 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$ , *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 61, No. 14, pp. 2879-2889
- Zaihua Liu and Dreybrodt Wolfgang (2001), “Kinetics and rate-limiting mechanisms of dolomite dissolution at various CO<sub>2</sub> partial pressures”, *Science in China (series B)* Vol. 44 No. 5
- Αντωνόπουλος Ανάργυρος (2011), «Αδρανή Υλικά»-Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών μηχανικών ΕΜΠ
- Ατματζίδης, Χρυσίκος, Παναγιωτίδη, Σκάρα (2006), « Μέγεθος Πόρων μη Υφασμένων Γεωυφασμάτων», 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006
- Βούλγαρη Χρυσούλα (2011), Φίλτρα φραγμάτων- Καταγραφή στοιχείων από ελληνικά φράγματα, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα
- Εξαδάκτυλος Γ. (2011), « Μερικές σημειώσεις Μηχανικής των αμμωδών υλικών με παραδείγματα»
- Καββαδάς (1991), Στοιχεία Εδαφομηχανικής
- Καββαδάς (2005) Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα- Γεωτεχνική των φραγμάτων
- Καββαδάς, Πανταζίδου (2007), Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου
- Νικολαΐδης Α. (1996), Οδοποιία: Οδοστρώματα-Υλικά-Έλεγχος Ποιότητας. Μ. Τριανταφύλλου & Σια, Θεσσαλονίκη, σελ. 831.

## Βιβλιογραφία

- Μουτάφης (2008), Αστοχίες και Ατυχή Συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων, 1ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, (ΤΕΕ, ΤΕΕ – Τμ. Κεντρ. & Δυτικής Θεσσαλίας, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα)
- Μπλατζούκας Θ. (2006), «Προστασία Γεωμεμβρανών με Γεωυφάσματα: Διερεύνηση Συνθηκών Ελέγχου κατά EN 13719», Διατριβή για Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών- Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- Παναγιωτίδη (2005), Πρότυπες μέθοδοι προσδιορισμού της πορομετρικής καμπύλης μη υφασμένων γεωυφασμάτων, διατριβή για μεταπτυχιακό δίπλωμα ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Στάμου, Α. (2008). Εφαρμοσμένη Υδραυλική: Τεύχος Α. Ροή υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Σωμάκος Λ. (2011), «Κατασκευή φράγματος αποσελέμη-Λεπτόκοκκο φίλτρο από θραυστά υλικά ασβεστολιθικού λατομείου», Ύδρευση Ηρακλείου και Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη
- Σωτηριάδης (2011), Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θειϊκών ιόντων, διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών μηχανικών ΕΜΠ
- Τσούτσικα Π., Σολδάτος Τ., Τσιραμπίδης Α. και Κορωνάιος Α. (2005), Συσχέτιση πετρογραφικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων αδρανών πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία, 2<sup>ο</sup> Συνέδριο της Επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας & Γεωχημείας ΣΕΛ.377-386

Ιστοσελίδες:

<http://www.eemf.gr>

<http://www.erictwelker.com>

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

<http://www.icold-cigb.org>

<http://www.teicrete.gr>