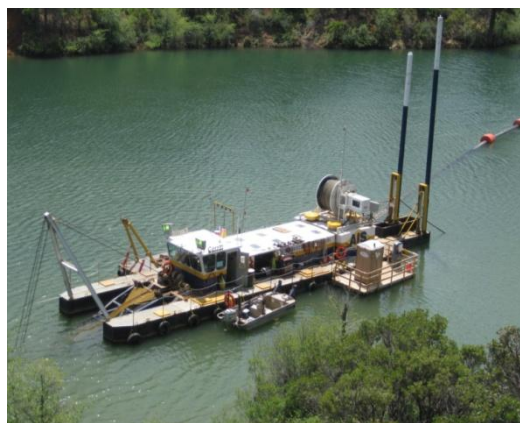
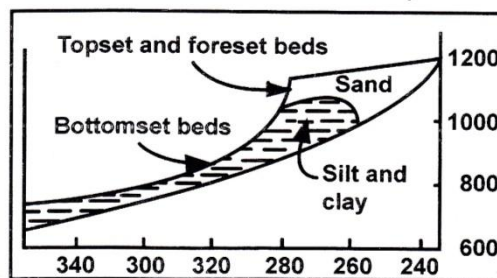
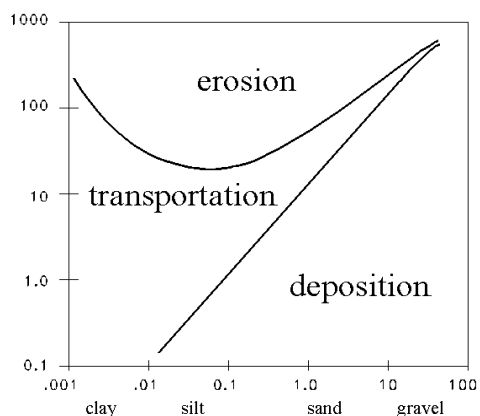




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ

ΚΥΡΙΑΚΙΔΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ



Επιβλέπων : Dr.N.I.Μουτάφης,Λέκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Είκονες εξωφύλλου:

1)διάγραμμα Hjulstrom [(Hjulstrom, 1935)]

2)δέλτα αποθέσεων [(ASCE Task Committee, 2008)]

3)έξοδος έκπλυσης σε λειτουργία [<http://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/3796-Muddy-waters>]

4)βυθοκόρος ταμιευτήρα σε λειτουργία [http://steepslopesandmud.blogspot.com/2010_07_01_archive.html]

*στον πατέρα μου
Ιωσήφ,εκεί
ψηλά...
και στην μητέρα
μου Στέλλα.*

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική εργασία αλλά και τον κύκλο των σπουδών στο Πολυτεχνείο νιώθω την ανάγκη να αποδώσω κάποιες ευχαριστίες.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω των καθηγητή μου κύριο Μουτάφη για την βοήθειά του και την καθοδήγησή του στην δημιουργία αυτής της διπλωματικής.

Θέλω επίσης να δηλώσω ευτυχής για την ευκαιρία που είχα να σπουδάσω στο ΕΜΠ και να γνωρίσω και να διδαχθώ από τους καθηγητές του, οι οποίοι στην πλειοψηφία τους υπήρξαν υπόδειγμα για το ήθος τους, τη σκληρή δουλειά τους και την προσπάθεια που καταβάλλουν να παράσχουν εκπαιδευτικό έργο υψηλής ποιότητας σε δύσκολες πολλές φορές συνθήκες.

Για τους φίλους και συνάδελφους τους οποίους γνώρισα κατά τη διάρκεια αυτών των πέντε χρόνων, η βοήθεια τους στην διεκπεραίωση των εκπαιδευτικών υποχρεώσεων, η συναναστροφή τους μαζί μου στην κοινωνική ζωή αλλά και η βοήθεια και στήριξή τους σε δύσκολες στιγμές, ήταν για μένα απαραίτητα για τη συνέχιση της πορείας μου αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Πίνακας εικόνων.....	11
Εισαγωγή.....	15
Κεφάλαιο 1.....	16
1.1. Εισαγωγικά.....	16
1.2. Εξέλιξη κατασκευής φραγμάτων.....	16
1.3. Απώλεια ωφέλιμου όγκου από αποθέσεις φερτών υλών.....	17
1.4. Βιώσιμη διαχείριση.....	19
1.5. Σύνοψη-Συμπεράσματα.....	20
Κεφάλαιο 2.....	21
Στοιχεία Υδραυλικής Μεταφοράς Φερτών Υλών.....	21
2.1. Εισαγωγικά.....	21
2.2. Ροή σε κανάλι με μη σταθερό-φυσικό πυθμένα.....	21
2.3. Ιδιότητες Φερτών Υλών.....	22
2.3.1. Κοκκομετρία των φερτών υλών-χαρακτηρισμοί.....	23
2.3.2. Σχήμα φερτών υλών.....	24
2.3.3. Ειδικό βάρος σωματιδίων.....	25
2.3.4. Ταχύτητα καθίζησης.....	25
2.4. Υγρή φάση του μείγματος.....	26
2.5. Ροή του μείγματος.....	27
2.6. Είδη μεταφοράς.....	27
2.7. Το πρόβλημα της απόθεσης και της διάβρωσης.....	29
2.7.1. Κρίσιμη ταχύτητα απόθεσης U_D	30
2.7.2. Κρίσιμη ταχύτητα επανεκκίνησης-έναρξης διάβρωσης.....	31
2.8. Υπολογισμός της στερεοπαροχής των διαφόρων ειδών μεταφερόμενων υλικών.....	33
2.8.1. Φορτίο κοίτης με σύρση, q_{sb}	33
2.8.1.1. Προστατευμένος πυθμένας.....	34

2.8.2.	Μεταφορά ως φορτίο σε αιώρηση.....	35
2.8.2.1.	Καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής	35
2.8.3.	Στερεομεταφορά ολικού φορτίου.....	36
2.8.3.1.	Πεδίο εφαρμογής και ακρίβεια των μεθόδων υπολογισμού στερεομεταφοράς	37
2.8.4.	Φορτίο Απόπλυσης	38
2.9.	Εκτίμηση κοκκομετρικής διαβάθμισης μεταφερόμενων υλικών	39
2.10.	Συμπεράσματα-Σχολιασμος.....	41
	Κεφάλαιο 3	43
	Απόθεση Φερτών Υλών σε Ταμειυτήρες.....	43
3.1.	Εισαγωγή.....	43
3.2.	Βαθμός Κατακράτησης Φερτών Υλών	44
3.3.	Μορφές αποθεσών	46
3.4.	Θέσεις αποθέσεων φερτών υλών	48
3.5.	Αποθέσεις στα ανάντη λιμνάζοντα νερά	48
3.6.	Αποθέσεις στο Δέλτα	49
3.7.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δελταϊκών αποθέσεων	53
3.8.	Κλίση του ανάντη πρानούς.....	53
3.9.	Κλίση του κατόντη πρानούς	55
3.10.	Αποθέσεις κατόντη του δέλτα	55
3.11.	Πυκνότητα φερτών υλών	56
3.12.	Εκτίμηση κατανομής αποθέσεων φερτών υλών	58
3.13.	Εμπειρικές μέθοδοι.....	58
3.14.	Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης.....	59
3.15.	Συμπεράσματα	59
	Κεφάλαιο 4	60
	Μέθοδοι απομάκρυνσης φερτών υλών από ταμειυτήρες	60
4.1.	Εισαγωγή.....	60
4.2.	Μέθοδοι διαχείρισης φερτών υλικών	60

4.2.1.	Διαχείριση λεκάνης απορροής	60
4.2.2.	Παράκαμψη του ταμιευτήρα.....	61
4.2.3.	Κατασκευές κατακράτησης φερτών υλών	61
4.2.4.	Διαρροή ρευμάτων πυκνότητας(density current venting)	61
4.2.5.	Μείωση κατακράτησης φερτών υλών με ταπείνωση της στάθμης (sluicing)	62
4.2.6.	Έκπλυση(flushing).....	62
4.2.7.	Μηχανική απομάκρυνση	62
4.3.	Αποδόμηση του φράγματος	63
4.4.	Σύνοψη-Συμπεράσματα	63
	Κεφάλαιο 5.....	65
	Υδραυλική Έκπλυση	65
5.1.	Εισαγωγή.....	65
5.2.	Περιγραφή-Μηχανισμός	65
5.3.	Παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή και την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης.....	67
5.3.1.	Υδραυλικές συνθήκες	68
5.3.2.	Ποσότητα νερού διαθέσιμου για έκπλυση	68
5.3.3.	Κοκκομετρία φερτών υλικών	69
5.3.4.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα	70
5.3.5.	Επιπτώσεις κατάντη του ταμιευτήρα	70
5.3.6.	Οικονομικά σκοπιμότητα.....	70
5.3.7.	Γεωγραφικές περιοχές και καταλληλότερο κλίμα για επιτυχή έκπλυση... ..	70
5.4.	Εκτίμηση αποτελεσματικής εφαρμογής της έκπλυσης.....	71
5.4.1.	Ισοζύγιο φερτών υλών	72
5.4.1.1.	Υπολογισμός του ρυθμού απομάκρυνσης φερτών υλών κατά τη διάρκεια της έκπλυσης.....	73
5.4.1.1.1.	Υπολογισμός του πλάτους του καναλιού έκπλυσης W	75
5.4.2.	Παραμένον ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα	76
5.4.2.1.	Κλίση των πρανών του καναλιού διάβρωσης	78

5.4.3.	Μερική ταπείνωση στάθμης.....	80
5.4.4.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	80
5.4.5.	Δείκτης κοκκομετρίας.....	82
5.4.6.	Αξιολόγηση κριτηρίων.....	84
5.4.7.	Οικονομική βιωσιμότητα ταμειυτήρα με εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης φερτών υλών	85
5.4.8.	Βιωσιμότητα και κοκκομετρία αποθέσεων – μοτίβο εξέλιξης της αποκατάστασης της αποθηκευτικότητας ταμειυτήρα.....	87
5.5.	Δημιουργία καναλιού έκπλυσης και συντήρηση.....	89
5.6.	Διαδικασία έκπλυσης.....	91
5.7.	Γεωμετρία καναλιού έκπλυσης σε λεπτόκοκκες αποθέσεις.....	92
5.8.	Κώνος διάβρωσης.....	93
5.9.	Επιλογή χρονικής στιγμής εκκένωσης ταμειυτήρα σχετικά με την περίοδο πλημμυρών	94
5.10.	Διαδικασίες διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της έκπλυσης.....	95
5.10.1.	Πλαστική ροή συντριμμάτων στην έξοδο του φράγματος	95
5.10.2.	Αστοχία πρανών	95
5.10.3.	Διάβρωση προοδευτικά μετακινούμενη προς τα ανάντη.....	95
5.10.4.	Ομοιόμορφη διάβρωση	98
5.11.	Έξοδοι έκπλυσης.....	98
5.12.	Βοηθητικά μέτρα έκπλυσης.....	99
5.12.1.	Διάβρωση στην κατά πλάτος διεύθυνση.....	99
5.12.2.	Διάβρωση στην κατά μήκος διεύθυνση-άξονας ανάντη-κατάντη.....	100
5.12.2.1.	Εκτροπή της ροής στα παράλληλα κανάλια	101
5.12.3.	Μηχανικώς υποβοηθούμενη έκπλυση.....	102
5.13.	Προσομοίωση με αριθμητικά μοντέλα.....	102
5.14.	Έκπλυση και παραπλήσιες υδραυλικές μέθοδοι.....	103
5.14.1.	Διαρροή ρεύματος πυκνότητας	103
5.14.2.	Μερική ταπείνωση στάθμης	104

5.15.	Συμπεράσματα	106
	Κεφάλαιο 6	109
	Εκσκαφή αποθέσεων εν υγρώ-βυθοκόρηση	109
6.1.	Εισαγωγικά	109
6.2.	Γενική χρησιμότητα	109
6.3.	Είδη βυθοκόρων	109
6.3.1.	Μηχανικής λειτουργίας βυθοκόροι	110
6.3.1.1.	Βυθοκόρος αρπάγης	110
6.3.1.2.	Αλυσίδα κάδων	114
6.3.1.3.	Βυθοκόρος με υδραυλικό βραχίονα	118
6.3.2.	Υδραυλικές βυθοκόροι	121
6.3.2.1.	Απλή βυθοκόρος αναρρόφησης	121
6.3.2.2.	Βυθοκόρος αναρρόφησης με κεφαλή κοπής	124
6.3.2.2.1.	Τροχός κάδων	126
6.3.2.3.	Βυθοκόρος με ρυμουλκούμενη αναρρόφηση με χοάνη	127
6.3.3.	Συνοπτικά	129
6.3.4.	Ειδικές κατασκευές βυθοκόρησης	129
6.3.4.1.	Τεχνητή δημιουργία ρεύματος πυκνότητας	129
6.3.4.2.	Βυθοκόρηση με αξιοποίηση του υδραυλικού φορτίου του ταμιευτήρα	130
6.3.5.	Κατάλληλη μέθοδος βυθοκόρησης για απομάκρυνση αποθέσεων σε ταμιευτήρα	133
6.4.	Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βυθοκόρησης	133
6.4.1.	Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου βυθοκόρησης	133
6.4.1.1.	Επιρροή αποθέσεων φερτών υλών	134
6.4.1.2.	Επιρροή υδραυλικών παραγόντων	135
6.4.1.3.	Περιβαλλοντικοί περιορισμοί	135
6.4.1.4.	Καιρικές συνθήκες	136
6.4.1.5.	Γενικές συνθήκες	136
6.4.2.	Μεταφορά φερτών υλών στον τόπο απόρριψης	136

6.4.3.	Τρόποι απόρριψης υλικού	138
6.4.3.1.	Απόρριψη αμέσως κατόντη του ταμιευτήρα.....	138
6.4.3.2.	Μεταφορά στον νεκρό όγκο του ταμιευτήρα	139
6.4.3.3.	Απόθεση στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα	139
6.4.3.4.	Απόρριψη σε χώρο κατόντη του ταμιευτήρα.....	141
6.4.3.5.	Περιοχή εκτός του εγγύ χώρου στον ταμιευτήρα	142
6.5.	Οικονομικά στοιχεία	142
6.5.1.	Κόστος μονάδας	143
6.5.2.	Βυθοκόρηση και βιώσιμη διαχείριση	144
6.6.	Σύνοψη-Συμπεράσματα	145
	Κεφάλαιο 7	146
	Σύνοψη-Συμπεράσματα	146
7.1.	Ανάγκη υιοθέτησης πολιτικών διαχείρισης ταμιευτήρων.....	146
7.2.	Τρόποι μετακίνησης φερτών υλών	146
7.3.	Τρόπος απόθεσης φερτών υλών.....	147
7.4.	Τρόποι διαχείρισης φερτών υλών.....	147
7.5.	Έκπλυση φερτών υλών από ταμιευτήρες	147
7.6.	Βυθοκόρηση φερτών υλών.....	148
7.7.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	148
	Βιβλιογραφία	150

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1-1:Αριθμός φραγμάτων κατασκευασμένων τις τελευταίες δεκαετίες στις ΗΠΑ. (ASCE Task Committee, 2008)	17
Εικόνα 1-2:Αύξηση του παγκόσμιου ωφέλιμου όγκου ταμιευτήρων αλλά και απώλειες λόγω αποθέσεων φερτών. (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001).....	18
Εικόνα 2-1:Αλληλεπίδραση πυθμένα ροής ανάλογα με την κρισιμότητα της ροής(Graf W. H., 1998).....	22
Εικόνα 2-2:Διάγραμμα διαμέτρου κόκκου-ταχύτητας καθίζησης ανάλογα με την μέθοδο υπολογισμού. (ASCE Task Committee, 2008)	26
Εικόνα 2-3:Σχηματική αναπαράσταση των ειδών μεταφερόμενων υλικών(Graf W. H., 1998).....	28
Εικόνα 2-4:Είδη στερεομεταφοράς που αποτελούν το συνολικό φορτίο στερεών (Graf W. H., 1998).....	29
Διάγραμμα 2-5:Διάγραμμα Hjulstrom στο οποίο δίνονται οι ταχύτητες διάβρωσης(U_E) και απόθεσης(U_D)(Graf W. H., 1998).....	31
Εικόνα 2-6:Σύγκριση υπολογιζόμενων εισροών φερτών υλών σε ταμιευτήρες με πραγματικά μετρημένες(Killingtveit & Saelthun, 1995).....	38
Εικόνα 2-7:Ολικό φορτίο φερτών υλών ως προς το φορτίο κοίτης ανάλογα με το λόγο u_* προς v_{ss} . (ASCE Task Committee, 2006)	41
Εικόνα 3-1:Διαγράμματα εκτίμησης βαθμού κατακράτησης φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα από Brown. (Sloff, 1991).....	45
Εικόνα 3-2:Βαθμός κατακράτησης φερτών υλών σε ταμιευτήρα από Brune.(ASCE Task Committee, 2006)	45
Εικόνα 3-3:Βαθμός κατακράτησης κατά Churchill.(ASCE Task Committee, 2006) ...	46
Εικόνα 3-4:Μοτίβα αποθεσιμμένων φερτών υλών αποθέσεις δελταϊκές,κωνικές,σφηνοειδής και ομοιόμορφες.(Morris & Fan, 1998).....	47
Εικόνα 3-5:Τυπική κίνηση φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα	48
Εικόνα 3-6:Αποθέσεις φερτών υλών σε ταμιευτήρα και προοδευτική μετακίνησή τους σε πλημμυρικό γεγονός (Morris & Fan, 1998).....	50
Εικόνα 3-7:Μηχανισμός υπερπήδησης βυθισμένου καναλιού (Sloff, 1991)	51
Εικόνα 3-8:Ενδεικτικό πραγματικό προφίλ προοδευτικά μετακινούμενου Δέλτα αποθέσεων. (ASCE Task Committee, 2008)	52
Εικόνα 3-9:Διαδικασία πλήρωσης ταμιευτήρα από περισσότερα του ενός δέλτα λόγω εισροών από περισσότερες της μιας μισγάγγειας. (Sloff, 1991).....	52

Εικόνα 3-10:Κλίση ανάντη πρανούς αποθέσεων συναρτήσει της αρχικής κλίσης του καναλιού. (Morris & Fan, 1998)	54
Εικόνα 5-1:Άποψη διατομής διαβρωθέντος καναλιού σε αποθέσεις ταμιευτήρα κατόπιν έκπλυσης. (Morris & Fan, 1998).....	66
Εικόνα 5-2:Στιγμιότυπα απομάκρυνσης φερτών υλών κατά την έκπλυση υπό πίεση. (Morris & Fan, 1998)	67
Εικόνα 5-3:Διάγραμμα της μεθόδου TUM με τα δεδομένα αξιολόγησής της.(White, 2001).....	74
Εικόνα 5-4:Δεδομένα βάσει των οποίων εξήχθη ο τύπος για τον υπολογισμό του W.(Atkinson, 1996).....	75
Εικόνα 5-5:Σχηματικά η πορεία υπολογισμού του LTCR.(Atkinson, 1996)	77
Εικόνα 5-6:Κλίση πρανών του καναλιού διάβρωσης (Atkinson, 1996).....	79
Εικόνα 5-7:Διατομές καναλιών έκπλυσης για πλατύ και στενό ταμιευτήρα. (Morris & Fan, 1998).....	82
Εικόνα 5-8:Το κριτήριο του Basson.Σημειώνονται οι περιοχές με τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001)	86
Εικόνα 5-9:Το όριο του Palmieri για την οικονομική βιωσιμότητα εφαρμογής έκπλυσης σε ταμιευτήρα.Εκφράζεται από τη γραμμή ABCD. (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001).....	87
Εικόνα 5-10:Καμπύλες αποθήκευσης-μεταβολή της χωρητικότητας ταμιευτήρα σε βάθος χρόνου. (Palmieri, A.; Shah, F.; Dinar, A., 1998)	88
Εικόνα 5-11:Διαδικασία ταπείνωσης στάθμης κατά τη διάρκεια έκπλυσης και κίνηση αποθέσεων μέσα στον ταμιευτήρα. (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)	90
Εικόνα 5-12:Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας έκπλυσης σε περίπτωση της πρώτης έκπλυσης και της έκπλυσης συντηρήσεως. (Morris & Fan, 1998).....	92
Εικόνα 5-13:Διαδικασία έκπλυσης και δημιουργία καναλιού διάβρωσης. (Morris & Fan, 1998).....	93
Εικόνα 5-14:Δημιουργία κώνου διάβρωσης κατά την έκπλυση υπό πίεση. (Morris & Fan, 1998).....	94
Εικόνα 5-15:Διαδικασία εξέλιξης διάβρωσης μετακινούμενης προς τα ανάντη. (Morris & Fan, 1998)	97
Εικόνα 5-16:Θέση εξόδου έκπλυσης σχετικά με την υδροληψία του φράγματος. (Morris & Fan, 1998)	98
Εικόνα 5-17:Πρόταση για εκτροπή του καναλιού διάβρωσης εντός του ταμιευτήρα. (Morris & Fan, 1998)	99

Εικόνα 5-18:Διάβρωση κατά πλάτος με εκσκαφή επικουρικών καναλιών στην κάθετη διεύθυνση. (Morris & Fan, 1998)	100
Εικόνα 5-19:Διάβρωση σε διεύθυνση ανάντη-κατάντη με χρήση παράλληλων καναλιών. (Morris & Fan, 1998).....	101
Εικόνα 5-20:Διαρροή ρεύματος πυκνότητας από έξοδο στο φράγμα. (Morris & Fan, 1998).....	104
Εικόνα 5-21:Καμπύλη λειτουργίας πραγματικού φράγματος για αποφυγή απόθεσης φερτών υλών. (ASCE Task Committee, 2008)	105
Εικόνα 5-22:Διάγραμμα λειτουργίας ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια πλημμύρας με ταπείνωση της στάθμης. (ASCE Task Committee, 2008)	106
Εικόνα 6-1:Σκαρίφημα βυθοκόρου με αρπάγη.(Vlasblom, 2003).....	110
Εικόνα 6-2:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με αρπάγη.(Vlasblom, 2003).....	111
Εικόνα 6-3:Περιοχή εκσκαφής σε βυθοκόρο αρπάγης σε κάθε θέση. (Vlasblom, 2003).....	112
Εικόνα 6-4:Αρπάγη και σύστημα καλωδίων με το οποίο ανοίγει και κλείνει. (Vlasblom, 2003).....	113
Εικόνα 6-5:Σκαρίφημα βυθοκόρου με σειρά βαγονιών-κουβάδων. (Vlasblom, 2003)	114
Εικόνα 6-6:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με βαγονέτο,όπου διακρίνεται η αλυσίδα των κάδων. (Vlasblom, 2003).....	114
Εικόνα 6-7:Τοποθέτηση και κίνηση της βυθοκόρου κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. (Vlasblom, 2003)	116
Εικόνα 6-8:Είδη κάδων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν (Vlasblom, 2003).....	117
Εικόνα 6-9:Σκαρίφημα βυθοκόρου με υδραυλικό βραχίονα. (Vlasblom, 2003).....	118
Εικόνα 6-10:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου όπου διακρίνεται ο υδραυλικός βραχίονας. (Vlasblom, 2003)	119
Εικόνα 6-11:Τρόποι εκσκαφής βυθοκόρου με υδραυλικό βραχίονα. (Vlasblom, 2003)	119
Εικόνα 6-12:Περιοχή αποδοτικής εκσκαφής συναρτήσει του βήματος μετακίνησης. (Vlasblom, 2003)	120
Εικόνα 6-13:Σκαρίφημα βυθοκόρου με απλή αναρρόφηση. (Vlasblom, 2003).....	121
Εικόνα 6-14:Διαδρομή εκσκαφής της βυθοκόρου αναρρόφησης (Vlasblom, 2003)	122
Εικόνα 6-15:Σάρωτρο εκσκαφής για την απλή βυθοκόρο αναρρόφησης.(Turner, 1996).....	123
Εικόνα 6-16:Σκαρίφημα βυθοκόρου με κεφαλή κοπής. (Vlasblom, 2003)	124
Εικόνα 6-17:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου αναρρόφησης με κεφαλή κοπής. (Vlasblom, 2003)	124

Εικόνα 6-18:Μοτίβο εκσκαφής της κεφαλής κοπής. (Vlasblom, 2003)	125
Εικόνα 6-19:Εικόνες κεφαλών κοπής. (Vlasblom, 2003).....	126
Εικόνα 6-20:Τροχός κάδων. (Vlasblom, 2003).....	127
Εικόνα 6-21:Σκαρίφημα της βυθοκόρου.Φαίνεται το στόμιο αναρρόφησης το οποίο ρυμουλκείται. (Vlasblom, 2003)	127
Εικόνα 6-22:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με συρόμενη αναρρόφηση. (Vlasblom, 2003).....	128
Εικόνα 6-23:Οι δύο περιπτώσεις βυθοκόρησης με εκμετάλλευση του υδραυλικού φορτίου του ταμιευτήρα.α)Το υδραυλικό σιφώνι.β)παράκαμψη ταμιευτήρα.	131
Εικόνα 6-24 :Μήκος και διάμετρος αγωγού συναρτήσει του υδραυλικού ύψους(Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)	132
Εικόνα 6-25:Παραγωγικότητα του συστήματος βυθοκόρησης συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού.(Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)	132
Εικόνα 6-26:Μεταφορά φερτών υλών με αγωγό. (Basson & Rooseboom, 1999)...	137
Εικόνα 6-27:Σειρά κάδων για μεταφορά φερτών υλών μέσα από το νερό. (Vlasblom, 2003).....	138
Εικόνα 6-28 :Απόρριψη και αποθήκευση φερτών υλών για αποστράγγιση. (Morris & Fan, 1998).....	141
Εικόνα 6-29:Σύγκριση τιμών βυθοκόρησης από ταμιευτήρες στην Ν.Αφρική με χρησιμοποίηση Ντίζελ ή ηλεκτρικού ρεύματος (Basson & Rooseboom, 1999)	144

Εισαγωγή

Από τη στιγμή που δημιουργήθηκε το πρώτο φράγμα και ο πρώτος ταμιευτήρας αναπόφευκτα δημιουργήθηκε το πρόβλημα της συσσώρευσης φερτών υλών στους ταμιευτήρες.

Οι φερτές ύλες συσσωρεύονται στον ταμιευτήρα δεσμεύοντας ωφέλιμο όγκο και δημιουργώντας και άλλα προβλήματα όπως φθορά των υδροληψιών, αλλαγές του τοπίου γύρω από τον ταμιευτήρα.

Με ένα μεγάλο μέρος των σύγχρονων φραγμάτων να έχει φθάσει πια κοντά στη συμπλήρωση του χρόνου ζωής του αλλά και αρκετά φράγματα να αντιμετωπίζουν πλέον προβλήματα με τις αποθέσεις των φερτών υλών ανακύπτει το ζήτημα της συντήρησης των φραγμάτων

Κρίνεται απαραίτητο για φράγματα τα οποία αντιμετωπίζουν προβλήματα φερτών υλών να γίνει μελέτη σχεδίου διαχείρισης φερτών υλών για την επαναφορά της λειτουργικότητάς τους.

Αλλά και στο μέλλον τα νέα φράγματα τα οποία θα αντιμετωπίσουν προβλήματα με τη συσσώρευση φερτών υλών θα πρέπει να συνοδεύονται από μελέτη διαχείρισης φερτών υλών για την εξασφάλιση της λειτουργίας τους στο χρόνο ζωής τους αλλά και την εξασφάλιση ότι το έργο μετά το πέρας του χρόνου ζωής του θα παραμείνει αξιοποιήσιμο.

Η δημοφιλέστερη μέθοδος καθαρισμού φερτών υλών και από ταμιευτήρες είναι η έκπλυση των φερτών υλών από τους ταμιευτήρες από εξόδους έκπλυσης στο φράγμα.

Εναλλακτικά μπορούν να εξεταστούν αρκετές μέθοδοι. Μία εξ αυτών είναι η μηχανική βυθοκόρηση και κυρίως η υδραυλική βυθοκόρηση.

Στην διπλωματική εξετάστηκαν βιβλιογραφικά οι δύο αυτοί τρόποι με έμφαση στις συνθήκες εφαρμογής τους και τις ιδιαιτερότητες που μπορούν να εμφανιστούν.

Τέλος γίνεται η παρατήρηση πως η διπλωματική αυτή εργασία έγινε με στόχο την διερεύνηση ενός ζητήματος με το οποίο λίγη μελέτη έχει γίνει προς το παρόν στον ελλαδικό χώρο αλλά και με γνώμονα την περαιτέρω ενημέρωση και εντρύφηση του γράφοντα σε ζητήματα άγνωστα προς αυτόν.

Κεφάλαιο 1

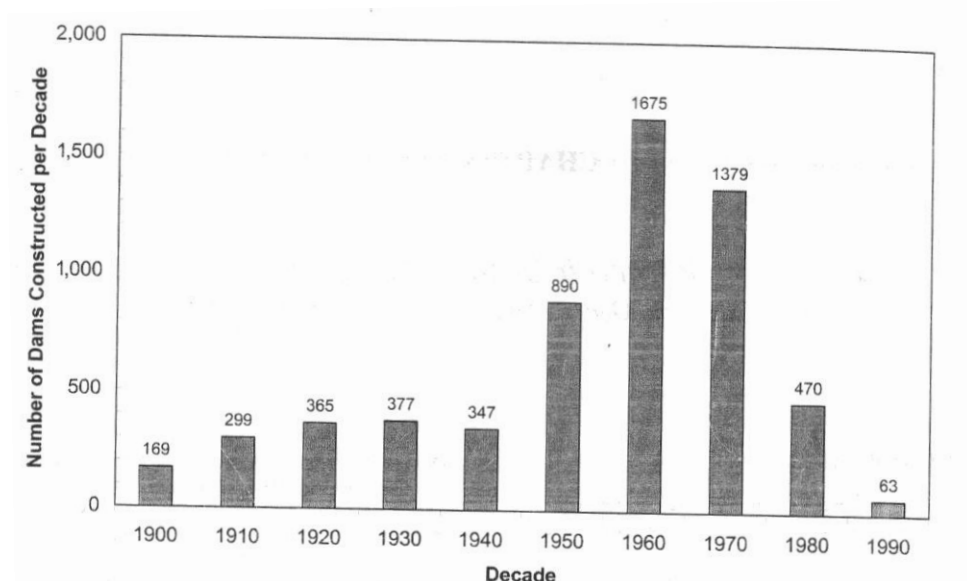
Το πρόβλημα των φερτών υλών στους ταμιευτήρες

1.1. Εισαγωγικά

Όταν ένας ποταμός ρέει ελεύθερος ο πυθμένας του βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία και μέσω αυτού μεταφέρονται υλικά μετακινούμενα από τη ροή προς τα κατάντη. Με την κατασκευή ενός φράγματος στη ροή του ποταμού διαταράσσεται αυτή η ισορροπία και πλέον μαζί με το νερό το οποίο συσσωρεύεται στον ταμιευτήρα παρεμποδίζεται η μετακίνηση των φερτών υλών και συσσωρεύονται και αυτές στον ταμιευτήρα. Αυτή η αναπόφευκτη διαδικασία οδηγεί στη συνεχή συσσώρευση υλικών σε κάθε ταμιευτήρα με βέβαιη κατάληξη την πλήρωση του ταμιευτήρα από φερτές ύλες και κατά συνέπεια την αχρήστευση του ταμιευτήρα.

1.2. Εξέλιξη κατασκευής φραγμάτων

Η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων φαίνεται πως γνώρισε την περίοδο 1940-1980 μεγάλη άνθηση και ύστερα άρχισε να φθίνει. Χαρακτηριστικά τις δεκαετίες 1950-1970 κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ 4000 μεγάλα φράγματα, περισσότερα δηλαδή από όσα έχουν κατασκευαστεί όλο τον υπόλοιπο 20^ο αιώνα. Στην εικόνα φαίνεται το αξιοσημείο αυτό στατιστικό.



Εικόνα 1-1:Αριθμός φραγμάτων κατασκευασμένων τις τελευταίες δεκαετίες στις ΗΠΑ.(ASCE Task Committee, 2008)

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας δικαιολογεί την αλματώδη ανάπτυξη της κατασκευής μεγάλων φραγμάτων τη δεκαετία του '40, όμως μετά το '80 αυτή περιορίζεται και δείχνει την δεκαετία του '90 να περιορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Το γιατί υπήρξε αυτή η συρρίκνωση της κατασκευής μεγάλων φραγμάτων θα πρέπει να την αναζητήσει κανείς στην αύξηση και αυστηριοποίηση των μέτρων ασφαλείας στην κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων-εξάλλου το 1960 υπάρχουν σοβαρές αστοχίες σε μεγάλα φράγματα στην Ευρώπη (Vajont-Malpasset). Ακόμη υπάρχει και αύξηση των περιβαλλοντικών ευαισθησιών και περιορισμών κατά την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων. Οι παράγοντες αυτοί φαίνεται πως θέτουν εμπόδια στην κατασκευή νέων μεγάλων φραγμάτων και περιορίζουν τις διαθέσιμες πιθανές θέσεις κατασκευής νέων φραγμάτων.

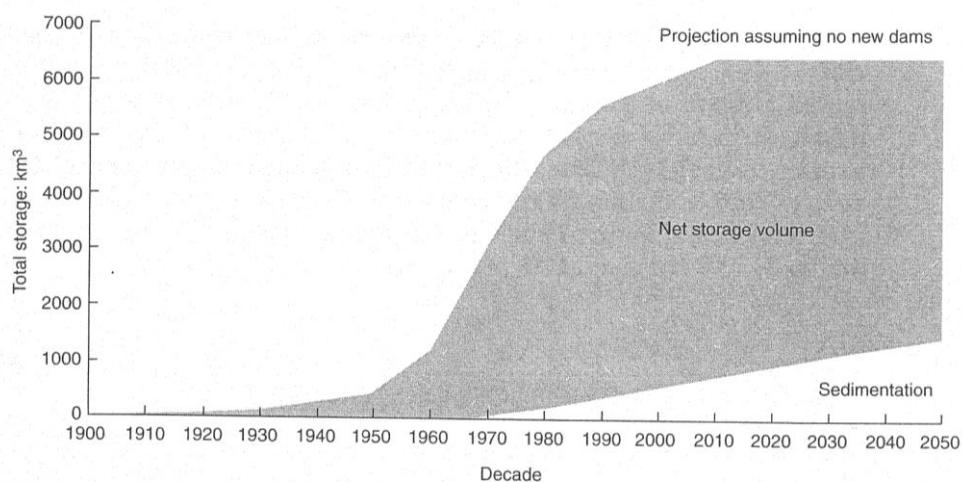
1.3. Απώλεια ωφέλιμου όγκου από αποθέσεις φερτών υλών

Όπως ήδη αναφέρθηκε η διαδικασία συσσώρευσης φερτών υλών στους ταμιευτήρες είναι αναπόφευκτη. Έτσι αναπόφευκτη είναι και η μείωση του διαθέσιμου συνολικού ωφέλιμου όγκου αποθηκευμένου νερού σε ταμιευτήρες. Μελετητές έχουν εκτιμήσει την παγκόσμια απώλεια ωφέλιμου όγκου αποθήκευσης νερού στο 1-2% (Mahmood, 1987) το χρόνο.

Location	Percent sedimentation rate	Source
World	1%	Mahmood (1987)
Tunisia	2.3%	Abdelhadi (1995)
China	2.3%	Morris and Fan (1998)
Turkey	1.2%	Morris and Fan (1998)
Morocco	0.7%	Abdelhadi (1995)
India	0.5%	Morris (1995)
USA	0.22%	Crowder (1987)

Πίνακας 1-1:Εκτιμήσεις απώλειας ωφέλιμου όγκου σε όλο τον κόσμο.(Shen, 1999)

Η συμβατική αντιμετώπιση του προβλήματος είναι ο σχεδιασμός του ταμιευτήρα με μεγαλύτερο όγκο,ο οποίος υπολογίζει ο μελετητής ότι στη διάρκεια ζωής του έργου (50 ή 100 χρόνια) θα γεμίσει με φερτές ύλες.Όμως οι φερτές ύλες αφενός μεν δεν αποτίθενται εντός του νεκρού όγκου κοντά στο φράγμα αλλά κυρίως στον ωφέλιμο στα ανάντη,αφετέρου δε οι μέθοδοι υπολογισμού της συσσώρευσης των φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα καθώς και η κατανομή τους εντός του ταμιευτήρα δεν είναι ακόμη αρκετά αξιόπιστοι με αποτέλεσμα να γίνονται υπερδιαστασιολογήσεις και συνεπώς σπατάλη διαθέσιμου όγκου είτε υποδιαστασιολογήσεις και ο ταμιευτήρας να αστοχεί πρακτικά πριν την ολοκλήρωση του χρόνου ζωής του.



Εικόνα 1-2:Αύξηση του παγκόσμιου ωφέλιμου όγκου ταμιευτήρων αλλά και απώλειες λόγω αποθέσεων φερτών.(White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

Οι αδυναμίες λοιπόν του συμβατικού σχεδιασμού,το πλήθος των παλιών φραγμάτων τα οποία έχουν γεμίσει φερτές ύλες και έχουν χάσει πλέον τη χρησιμότητά τους αλλά

και η ανάγκη κατασκευής φραγμάτων σε άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές όπου η ετήσια συσσώρευση φερτών υλών είναι πολύ μεγάλη και δεν επιτρέπει το σχεδιασμό φραγμάτων με ικανό χρόνο ζωής οδηγούν στην αναζήτηση εναλλακτικών. Δεδομένης της αυξανόμενης δυσκολίας να ευρεθούν νέες κατάλληλες θέσεις για κατασκευή φράγματος ώστε να αποκατασταθεί ο χαμένος ωφέλιμος όγκος γίνεται προσπάθεια να εξευρεθούν λύσεις για την αποκατάσταση των γεμάτων ταμιευτήρων αλλά και να επιμηκυνθεί ο χρόνος ζωής των ταμιευτήρων.

Η λύση για κάθε ταμιευτήρα μπορεί να δωθεί με την υιοθέτηση πρακτικών διαχείρισης φερτών υλών στον ταμιευτήρα. Δηλαδή σχεδίαση του ταμιευτήρα με διερεύνηση του ισοζυγίου φερτών υλών του και σχεδίαση τρόπου μείωσης των αποθέσεων σε αυτόν.

1.4. Βιώσιμη διαχείριση

Η φιλοσοφία της βιώσιμης διαχείρισης επιβάλλει την ανάπτυξη κατασκευών οι οποίες ικανοποιούν τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να δεσμεύουν τις δυνατότητες κάλυψης αναγκών του μέλλοντος.

Υπό αυτό το πρίσμα η σχεδίαση ενός ταμιευτήρα με χρόνο ζωής 50 ή 100 χρόνια και νεκρό όγκο οδηγεί σε κατασκευή μη βιώσιμου έργου διότι όταν ο ταμιευτήρας γεμίσει με αποθέσεις θα έχει χάσει πλέον την χρησιμότητά του αλλά θα είναι πλέον αδύνατο να την ανακτήσει.

Η σχεδίαση των ταμιευτήρων πρέπει να γίνεται υπό το πρίσμα της βιωσιμότητας και αυτό μπορεί να γίνει μόνο εφαρμόζοντας πρακτικές διαχείρισης φερτών υλών εξασφαλίζοντας ότι ο ταμιευτήρας θα μπορεί να διατηρεί σε μόνιμη βάση ένα ποσοστό του ωφέλιμου όγκου του εξασφαλίζοντας έτσι την χρησιμότητά του και την ικανότητα να ικανοποιεί ανάγκες μόνιμως.

Τα ερωτήματα που θα πρέπει να απαντηθούν πριν την εφαρμογή μιας πολιτικής διαχείρισης φερτών υλών είναι:

- Είναι τεχνικά εφικτή;
- Είναι οικονομικά συμφέρουσα για το χρόνο ζωής του έργου (100 χρόνια);
- Οδηγεί σε ανανεώσιμη-βιώσιμη λύση σε βάθος χρόνου (1000 χρόνια);

1.5. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Οι ταμιευτήρες συσσωρεύουν συνεχώς φερτές ύλες με αποτέλεσμα να είναι βέβαιο ότι κάποια στιγμή θα γεμίσουν φερτές ύλες και θα χάσουν την χρησιμότητά τους.

Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η εφαρμογή στο σχεδιασμό μεγάλων φραγμάτων τεχνικών διαχείρισης φερτών υλών οι οποίες θα εξασφαλίζουν βιωσιμότητα στον ταμιευτήρα.

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία Υδραυλικής Μεταφοράς Φερτών Υλών

Professor H.A.Einstein talked about his late father, the great Albert Einstein, who had advised his son to to choose research topics in which success was not impossible: in the son's field of interest, the mechanics of fluids, the two 'impossible' areas were turbulence and sediment transport. The son drily commented that he had naturally chosen one of these, sediment transport, in order to prove his father wrong.

(Graf & Acaroglu, 1968)

2.1. Εισαγωγικά

Για τη μελέτη αυτού του κεφαλαίου θεωρούνται γνωστές οι βασικές γνώσεις της εφαρμοσμένης υδραυλικής (Δημητρίου, 2005) για αυτό και δεν θα αναλυθούν εκτενώς. Σε αυτό το κεφάλαιο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει διερεύνηση στη θεωρία υδραυλικής μεταφοράς φερτών υλών προκειμένου να αποσαφηνιστούν και να γίνουν αντιληπτά ζητήματα όπως ο προσδιορισμός των κρίσιμων ταχυτήτων ροής για την απόθεση και επανεκκίνηση μεταφοράς φερτών υλών διαφόρων διαμετρημάτων.

2.2. Ροή σε κανάλι με μη σταθερό-φυσικό πυθμένα

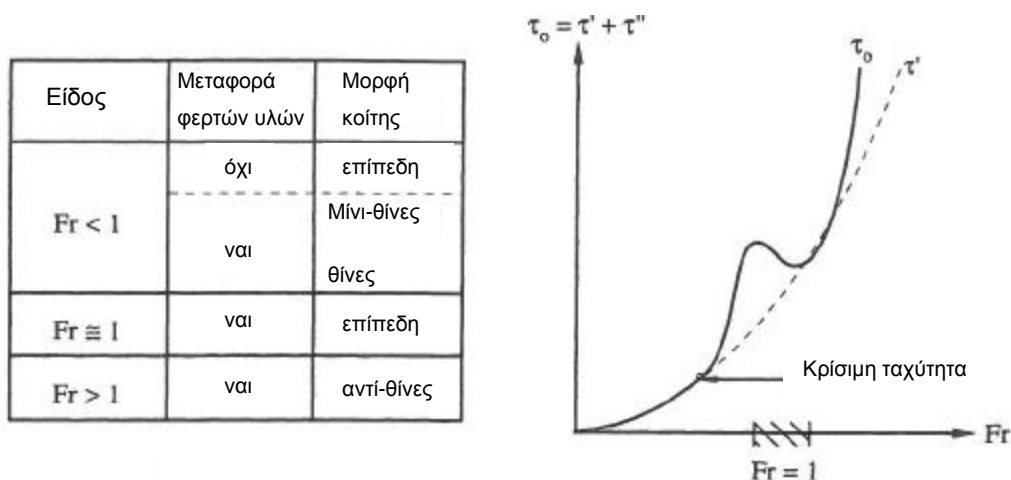
Κατά τη ροή νερού σε κανάλι με φυσικό πυθμένα, δηλαδή μη σταθερό αποτελούμενο από φυσικά υλικά, η ροή μπορεί να παρασύρει ή να αποθέσει φερτές ύλες από το ένα σημείο στο άλλο αλλάζοντας τη μορφή του πυθμένα.

Συγκεκριμένα, προκύπτει η ικανότητα μεταφοράς φερτών υλών της ροής και εάν η ικανότητα μεταφοράς είναι μεγαλύτερη από την παροχή φερτών υλών τότε αναμένεται σε αυτή την περιοχή να υπάρξει διάβρωση, αντίθετα εάν η ικανότητα μεταφοράς είναι μικρότερη από την στερεοπαροχή τότε θα υπάρξει απόθεση φερτών υλών. Μόνο στην περίπτωση ίσης στερεοπαροχής με την ικανότητα μεταφοράς η διατομή θα βρεθεί σε ισορροπία. Υπάρχει και η περίπτωση κοίτης θωρακισμένης από

στρώμα χονδρόκοκκης ύλης το οποίο δεν έχει παρασύρθει σε νωρίτερο χρόνο από τη ροή και εμποδίζει επιπλέον υλικά κάτω από αυτό να παρασυρθούν από τη ροή.

Ένα ακόμα στοιχείο του τρόπου αλληλεπίδρασης ροής-στερεών υλικών πυθμένα αναφέρεται(Graf W. H., 1998)σε σχέση με την κρισιμότητα της ροής.Συγκεκριμένα εάν η ροή χαρακτηρίζεται ως υποκρισίμη(αριθμός Froude μικρότερος της μονάδας) η επιφάνεια του πυθμένα παραμένει επίπεδη.Όσο η ροή τείνει να γίνει κρίσιμη αρχίζουν να εμφανίζονται μικρές θίνες.Όταν η ροή γίνει κρίσιμη οι θίνες ξεπλένονται και ο πυθμένας γίνεται πάλι επίπεδος.Με τη μετάβαση της ροής στην υπερκρίσιμη φάση η στερεομεταφορά είναι σημαντική και εμφανίζονται πλέον σχηματισμοί παρόμοιοι με θίνες οι οποίοι όμως μετακινούνται ανάντη της ροής και όχι κατάντη.

Η δημιουργία των σχηματισμών των θινών στον πυθμένα προσθέτει επιπλέον αντίσταση στη ροή και αυξάνει τη διατμητική τάση του ορίου(ουσιαστικά την ταχύτητα τριβής u^*)



Εικόνα 2-1:Αλληλεπίδραση πυθμένα ροής ανάλογα με την κρισιμότητα της ροής(Graf W. H., 1998)

Συνεπώς η ροή του ρευστού είναι ροή μείγματος δύο φάσεων,νερού και φερτών υλών οι οποίες αλληλεπιδρούν μηχανικά μεταξύ τους η πρόβλεψη του τελικού αποτελέσματος αποτελεί δυσχερή διαδικασία με πληθώρα θεωριών να εμπλέκεται σε αυτή.

2.3. Ιδιότητες Φερτών Υλών

Οι διαδικασίες της υδραυλικής συμπαράσυρσης,της μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών δεν εξαρτώνται μόνο από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής αλλά

και από τα χαρακτηριστικά των φερτών υλών οι οποίες είναι και ποιο δύσκολο να κατηγοριοποιηθούν με κριτήριο τις περιπτώσεις υδραυλικής μεταφοράς τους.

Η στερεή φάση χαρακτηρίζεται συνεπώς από(Graf W. H., 1998):

- το μέγεθος των κόκκων των φερτών υλών που δίδεται από την κοκκομετρική καμπύλη
- το σχήμα των κόκκων
- την πυκνότητα των σωματιδίων ρ_s ή το ειδικό βάρος γ_s
- την ταχύτητα καθίζησης των αιωρούμενων σωματιδίων ,επηρεάζεται άμεσα από τους δύο προηγούμενους παράγοντες, v_{ss}
- πιθανώς την συνοχή μεταξύ των σωματιδίων

2.3.1. Κοκκομετρία των φερτών υλών-χαρακτηρισμοί

Τα γεωυλικά όπως οι φερτές ύλες χαρακτηρίζονται από την κοκκομετρία τους η οποία αποτυπώνεται στην κοκκομετρική καμπύλη. Διαχωρίζονται ως υλικά με φτωχή διαβάθμιση και καλή διαβάθμιση ανάλογα με το αν περιλαμβάνονται κλάσματα με από όλο το φάσμα των διαμέτρων ή όχι. Τα υλικά με κακή διαβάθμιση είναι πιο ομοιόμορφα και δεν περιλαμβάνουν ποικιλία στις διαμέτρους αντίθετα με τα καλώς διαβάθμισμένα. Ποσοτικό μέτρο διαχωρισμού μπορεί να είναι ο λόγος d_{60}/d_{10} . Υλικά με $d_{60}/d_{10} < 5$ χαρακτηρίζονται ως ομοιόμορφα και το αντίθετο για τιμές του λόγου μεγαλύτερες του 5.

Αντιπροσωπευτικά μπορεί να χαρακτηρίσουν τα φερτά υλικά από κάποια κατάλληλη διάμετρο ανάλογα την περίπτωση. Διάμετροι τις κοκκομετρικής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα είναι οι d_{50}, d_{90}, d_{35} .

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται από (ASCE Task Committee, 2006) μία ταξινόμηση των διαφόρων φερτών υλών ανάλογα με το μέγεθός τους της οποίας την ονοματολογία ακολουθεί αυτή η εργασία.

Χαρακτηρισμός	Μέγεθος Κόκκων	
	Χιλιοστά [mm]	Ίντσες
Πολύ μεγάλοι ογκόλιθοι	4.096-2.048	160-80
Μεγάλοι ογκόλιθοι	2.048-1.024	80-40
Μεσαίοι ογκόλιθοι	1.024-512	40-20
Μικροί ογκόλιθοι	512-256	20-10

Μεγάλες κροκάλες	256-128	10-5
Μικρές κροκάλες	128-64	5-2,5
Πολύ χονδρό χαλίκι	64-32	2,5-1,3
Χονδρό χαλίκι	32-16	1,3-0,6
Μεσαίο χαλίκι	16-8	0,6-0,3
Λεπτό χαλίκι	8-4	0,3-0,16
Πολύ λεπτό χαλίκι	4-2	0,16-0,08
Πολύ χοντρή άμμος	2-1	
Χονδρή άμμος	1-0,5	
Μεσαία άμμος	0,5-0,25	
Λεπτή άμμος	0,25-0,125	
Πολύ λεπτή άμμος	0,125-0,062	
Χονδρή Ιλύς	0,062-0,031	
Μεσαία Ιλύς	0,031-0,016	
Λεπτή ιλύς	0,016-0,008	
Πολύ λεπτή ιλύς	0,008-0,004	
Χονδρή άργιλος	0,004-0,002	
Μεσαία άργιλος	0,002-0,001	
Λεπτή άργιλος	0,001-0,0005	
Πολύ λεπτή άργιλος	0,0005-0,00024	

Πίνακας 2-1:Κατάταξη φερτών υλών σύμφωνα με το μέγεθός τους(ASCE Task Committee, 2006)

Συνοπτικά δίνεται ο διαχωρισμός από την Αμερικάνικη Γεωφυσική Ένωση (AGU) σε πέντε κλάσεις.

Ογκόλιθοι-Κροκάλες (400-6,4cm)	Χαλίκια (6,4-0,2cm)	Άμμος (0,2cm-62μm)	Ιλύς (62-4μm)	Άργιλος (4-0,24μm)
-----------------------------------	------------------------	-----------------------	------------------	-----------------------

Πίνακας 2-2:Συνοπτική παρουσίαση κατάταξης φερτών υλών(Μιμίκου, 2006)

2.3.2. Σχήμα φερτών υλών

Επειδή η κοκκομετρία των φερτών υλών δεν επαρκεί για την περιγραφή τους έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός συστημάτων κατηγοριοποίησης των σωματιδίων φερτών υλών ανάλογα με το σχήμα τους.Πιο συγκεκριμένα η εργασία του (Wadell, 1935) δίνει εκφράσεις εκτίμησης της σφαιρικότητας και της καμπυλότητας της επιφάνειας στερεού σωματιδίου.

Σε εργασίες υπολογισμού της ταχύτητας καθίζησης χρησιμοποιείται συνήθως ένας παράγοντας σχήματος με έκφραση:

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{1.1}$$

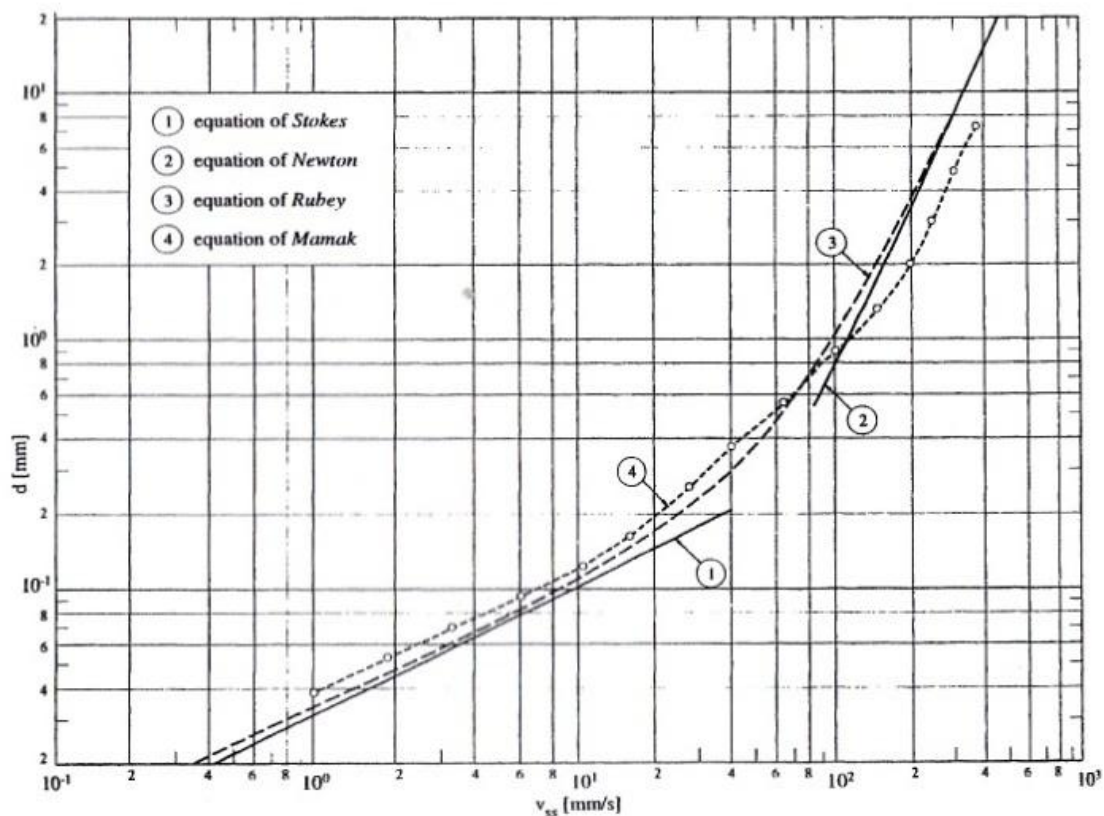
Όπου a, b και c είναι αντίστοιχα η τα μήκη της μικρότερης της μεγαλύτερης και της μέσης διαμέτρου ενός σωματιδίου

2.3.3. Ειδικό βάρος σωματιδίων

Αναφέρεται στο ειδικό βάρος μεμονωμένων σωματιδίων-κόκκων ως υλικών όπου αναμένεται το ειδικό βάρος να προσεγγίζει το ειδικό βάρος του μητρικού πετρώματος για πιο χονδρόκοκκα υλικά και όσο πιο λεπτά είναι αυτά να προσεγγίζει το ειδικό βάρος του συγκεκριμένου υλικού από το οποίο αποτελείται ο κόκκος. Μία συνήθης τιμή αποτελεί το ειδικό βάρος κρυστάλλων χαλαζία (quartz) από το οποίο αποτελείται συνήθως η λεπτή άμμος και έχει τιμή 2,65. Ενώ ένα σύννηθες πεδίο τιμών πυκνότητας είναι μεταξύ 2,5 με 5,0.

2.3.4. Ταχύτητα καθίζησης

Η ταχύτητα καθίζησης στο νερό είναι η ταχύτητα πτώσης του κόκκου μέσα στο νερό με σταθερή ταχύτητα και εξαρτάται από την επιτάχυνση της βαρύτητας, g , την φαινόμενη διάμετρο, d , της μορφής του κόκκου, της πυκνότητας του κόκκου, ρ_s , της πυκνότητας του νερού, ρ_w , και της κινηματικής συνεκτικότητας του νερού, ν . Ακόμα η συγκέντρωση των στερεών και η τύρβη είναι άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα καθίζησης. Γενικώς λόγω των πολλών παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η ταχύτητα καθίζησης υπάρχουν αρκετά διαγράμματα και μέθοδοι υπολογισμού αυτής στην διαθέσιμη βιβλιογραφία. Το πιο διαδεδομένο και συχνά συναντώμενο στη βιβλιογραφία είναι το διάγραμμα από την εργασία του (Rouse, 1938).



Εικόνα 2-2: Διάγραμμα διαμέτρου κόκκου-ταχύτητας καθίζησης ανάλογα με την μέθοδο υπολογισμού. (ASCE Task Committee, 2008)

2.4. Υγρή φάση του μείγματος

Για την υγρή φάση του μείγματος ρευστού-φερτών υλών είναι πιο σαφής οι παράγοντες που τη χαρακτηρίζουν:

- η πυκνότητά της ρ
- το ιξώδες μ
- η μέση ταχύτητα της ροής
- η ταχύτητα τριβής u^*

2.5. Ροή του μείγματος

Η ροή μείγματος ρευστού-φερτών υλών η οποία εξετάζεται μπορεί να γίνει ο εξής διαχωρισμός των χαρακτηριστικών της ροής (Graf W. H., 1998):

A) Το μείγμα θεωρείται Νευτώνειο υγρό εάν η περιεκτικότητά του κατόγκον σε στερεά σωματίδια είναι πολύ μικρή, πολύ μικρότερη του 1% και συνεπώς το μείγμα έχει μικρή διαφορά (αύξηση) της πυκνότητάς του από το καθαρό ρευστό-νερό. $\Delta\rho < 16 \text{ kg/m}^3$.

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσεται η μεταφορά φερτών υλών ως φορτίο κοίτης και φορτίο σε αιώρηση, η οποία είναι και η συνήθης στις περιπτώσεις στερεομεταφοράς σε λεκάνες απορροής.

B) Η περίπτωση το μίγμα να συμπεριφέρεται ως οιονεί Νευτώνειο υγρο. Σε αυτή την περίπτωση η συγκέντρωση κατόγκον αιωρούμενων σωματιδίων παραμένει μικρή, μικρότερη του 8% και η αύξηση της πυκνότητας του μείγματος είναι $\Delta\rho < 130 \text{ kg/m}^3$.

Είναι η περίπτωση μεταφοράς φερτών υλών με ρεύματα τύρβης.

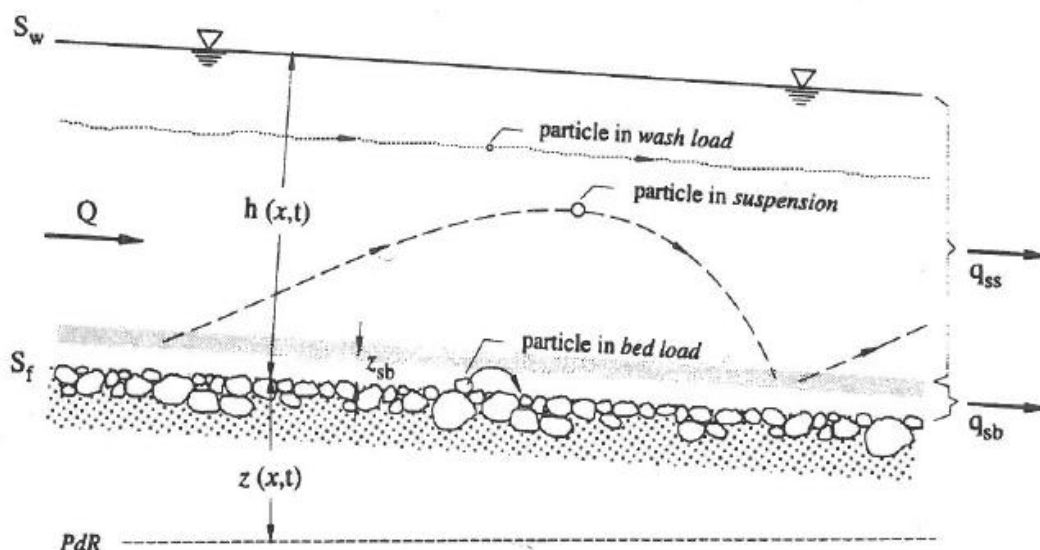
Γ) Το μείγμα συμπεριφέρεται ως μη Νευτώνειο υγρό όταν η περιεκτικότητα κατόγκον ξεπερνά το 8% και η πυκνότητα του μείγματος είναι περισσότερο από 130 kg/m^3 από το καθαρό ρευστό.

Πρόκειται για ροές με χαρακτηριζόμενες ως υπερκορεσμένες σε αιωρούμενες φερτές ύλες.

Είναι προφανές πως ο παραπάνω διαχωρισμός με τα όρια που αναφέρονται δεν είναι απόλυτα και οι κατηγορίες μπορεί να αλληλοκαλύπτονται.

2.6. Είδη μεταφοράς

Οι φερτές ύλες (η στερεά φάση) που μεταφέρονται υδραυλικά κατηγοριοποιούνται (όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-3: Σχηματική αναπαράσταση των ειδών μεταφερόμενων υλικών) σε διάφορα είδη ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς τους.



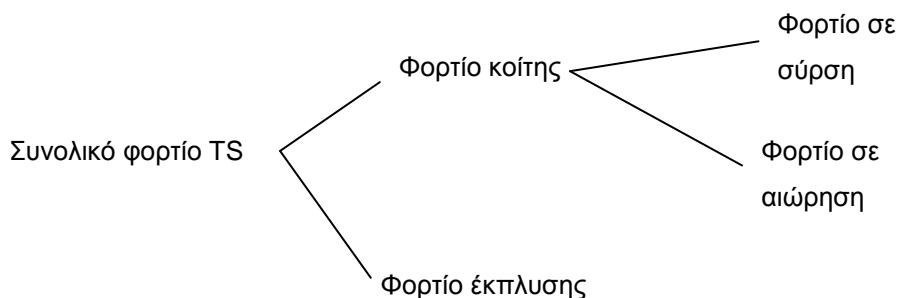
Εικόνα 2-3: Σχηματική αναπαράσταση των ειδών μεταφερόμενων υλικών (Graf W. H., 1998)

i) Ως φορτίο κοίτης σε σύρση, q_{sb} , όταν οι κόκκοι βρίσκονται σε στενή επαφή με τον πυθμένα του καναλιού και η μεταφορά γίνεται με σύρση, κύλιση ή μικρές αναπηδήσεις. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κυρίως μεγαλύτερους κόκκους. Μετρείται σε όγκο μεταφερόμενων υλικών προς μονάδα πλάτους πυθμένα [m^3/m]

ii) Ως φορτίο κοίτης σε αιώρηση, q_{ss} , όταν οι κόκκοι έρχονται περιστασιακά σε επαφή με τον πυθμένα και η μεταφορά γίνεται με μικρές οι μεγαλύτερες αναπηδήσεις. Ανάφερεται σχετικώς μικρότερες διαμέτρους υλικών.

Οι δύο ανωτέρω κατηγορίες αποτελούν το συνολικό φορτίο κοίτης, q_s .

iii) Ως φορτίο απόπλυσης, q_{sw} , όπου οι κόκκοι δεν έρχονται ποτέ σε επαφή με τον πυθμένα και τα σωματίδια μεταφέρονται μέσω της ροής. Τα πιο λεπτόκοκκα ιζήματα μεταφέρονται με αυτόν τον τρόπο.



Εικόνα 2-4:Είδη στερεομεταφοράς που αποτελούν το συνολικό φορτίο στερεών(Graf W. H., 1998)

Αν και ανακριβές είναι χρήσιμο να δωθούν ενδεικτικά όρια(συναρτήση της διατμητικής ταχύτητας τριβής u^* και της ταχύτητας καθίζησης v_{ss}) για το διαχωρισμό του είδους της μεταφοράς(Graf W. H., 1971).

Για:

$$\frac{u^*}{v_{ss}} > 0,10 \quad \text{αρχίζει η μεταφορά του φορτίο κοίτης σε σύρση}$$

$$\frac{u^*}{v_{ss}} > 0,40 \quad \text{αρχίζει η μεταφορά ως φορτίο κοίτης σε αιώρηση}$$

2.7. Το πρόβλημα της απόθεσης και της διάβρωσης

Το πρόβλημα της απόθεσης των φερτών υλών και της επανεκκίνησης τους είναι πρωτεύον για την κατανόηση και την ποιοτική περιγραφή των αποθέσεων σε ένα ταμιευτήρα κυρίως ως προς το μέγεθος και το σημείο απόθεσης.Για αυτό και θα γίνει αναφορά στις κρίσιμες τιμές της συρτικής τάσης για επανεκκίνηση και απόθεση μεταφερόμενων υλικών,πρωτού γίνει μια περιγραφή των θεωριών υπολογισμού της στερεοπαροχής ανάλογα με το είδος της.

Οι κόκκοι των μεταφερόμενων υλικών διαβρώνονται και μετακινούνται από τη ροή λόγω των δυνάμεων που τους ασκεί αυτή.Κρίσιμο λοιπόν μέγεθος για το εάν ένας κόκκος υλικού θα κινηθεί από τη ροή ή θα αποτεθεί λόγω βαρύτητας είναι η δύναμη που του ασκεί η ροή και συγκεκριμένα η διατμητική συρτική τάση τ_0 .

Η διατμητική τάση εκφράζεται ως:

$$\tau_0 = \gamma R_h S_f \quad (1.2)$$

Όπου γ το ειδικό βάρος του νερού R_h η υδραυλική ακτίνα και S_f η υδραυλική κλίση του καναλιού.

Επειδή όμως η διατμητική τάση εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής είναι σύνηθες και πιο κατανοητό εφόσον αναφερόμαστε σε ροή να χρησιμοποιείται ως κριτήριο η ταχύτητα ροής, είτε η μέση ταχύτητα ροής U είτε η ταχύτητα στο στερεό όριο-πυθμένα u_b .

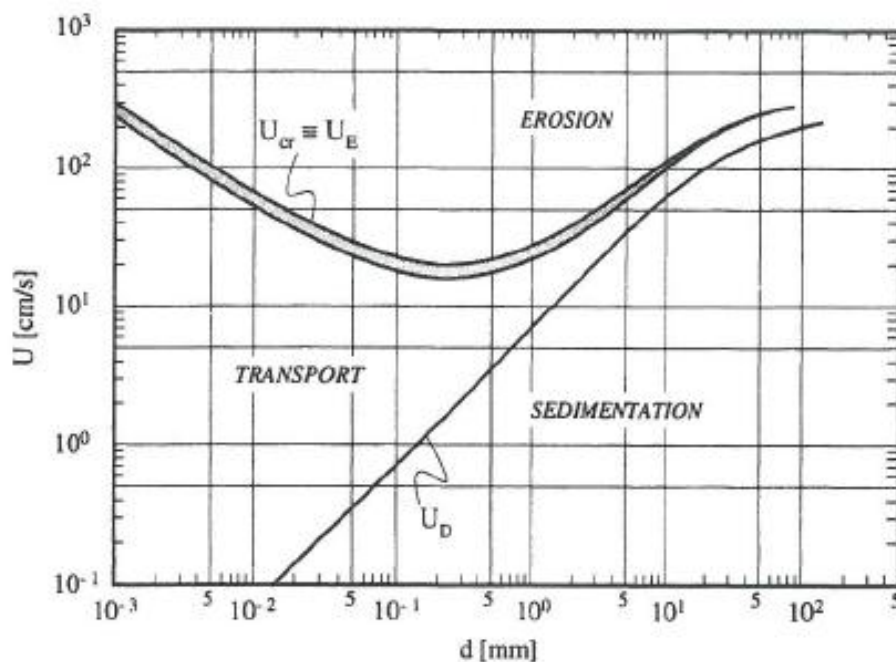
Διακρίνονται δύο κρίσιμες τιμές:

1) Η ταχύτητα στην οποία αρχίζει η διάβρωση και η μεταφορά, U_E . Είναι η απαιτούμενη ταχύτητα την οποία πρέπει να έχει η ροή προκειμένου να αρχίσουν να μετακινούνται οι ήδη αποθεθειμένοι κόκκοι.

2) Η ταχύτητα στην οποία σταματάει η μεταφορά, U_D . Είναι το όριο της ταχύτητας στο οποίο από εκεί και κάτω οι κόκκοι δε μπορούν να μεταφερθούν και αποτίθενται.

2.7.1. Κρίσιμη ταχύτητα απόθεσης U_D

Για την ταχύτητα απόθεσης (όπως και για την ταχύτητα επανεκκίνησης που θα ακολουθήσει) πιο δημοφιλής είναι η εργασία που έγινε από τον (Hjulstrom, 1935) η οποία συνοψίζεται στο Διάγραμμα 2-5) Αναφέρεται στην μέση ταχύτητα η οποία δίνεται συναρτήσει της διαμέτρου d ομοιόμορφα κατανεμημένων μεταφερόμενων υλικών.



Διάγραμμα 2-5: Διάγραμμα Hjulstrom στο οποίο δίνονται οι ταχύτητες διάβρωσης (U_E) και απόθεσης (U_D) (Graf W. H., 1998)

Ακόμα προτείνεται ως εύρος τιμών το διάστημα 0,25-0,9 [m/s] (Chow, 1959) με την μικρότερη τιμή να αναφέρεται σε λεπτόκοκκα ιζήματα και τη μεγαλύτερη σε πιο χονδρόκοκκα.

2.7.2. Κρίσιμη ταχύτητα επανεκκίνησης-έναρξης διάβρωσης

Για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ταχύτητας διάβρωσης υπάρχει πληθώρα θεωριών και μεθόδων. Εδώ θα αναφερθούν οι τρεις κύριες που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία οι οποίες προτάθηκαν από τους Hjulstrom, Neil και Shields. (Hjulstrom, 1935),

Το κριτήριο του Hjulstrom για την κρίσιμη ταχύτητα διάβρωσης φαίνεται στο διάγραμμα (Διάγραμμα 2-5). Να υπογραμμισθεί ότι αναφέρεται σε ομοίμορφα υλικά και σε μέση ταχύτητα ροής U . Μπορεί να εκτιμηθεί η ταχύτητα κοντά στον πυθμένα ως εξής: $u_b = 0,4U$.

Παρατηρήσεις πάνω στο διάγραμμα Hjulstrom:

Φαίνεται πως η λεπτή άμμος ($d=0,1\text{mm}$) είναι εύκολα διαβρώσιμη, ενώ η ιλύς ($d=0,01\text{mm}$) πιο δύσκολα διαβρώσιμη κάτι που αποδίδεται στην συνοχή που εμφανίζει.

Για μέσες διαμέτρους κόκκου μεγαλύτερες του 1mm(χονδρή άμμος) οι διαφορές μεταξύ U_D και U_E είναι αμελητέες.

Για διαμέτρους υλικών μικρότερες του 0,1mm(πολύ λεπτή άμμος) ενώ χρειάζεται η ταχύτητες της ροής να πέσουν σε πολύ μικρά νούμερα(1cm/s και κάτω) ώστε αυτές τελικά να αποτεθούν γίνεται όλο και πιο δύσκολο,(λόγω συνοχής και στερεοποίησης αργιλικών υλικών) αφού γίνουν οι απόθεσεις, τα υλικά αυτά να βρεθούν και πάλι σε αιώρηση και μετακίνηση(ταχύτητες από 20cm/s και πάνω-μέχρι και 200cm/s για πιο λεπτά ιζήματα)

Μέθοδος Neil:

Για ομοιόμορφες αποθέσεις μεγάλης διαμέτρου,εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\rho U_{cr}^2}{gd(\rho_s - \rho)} = 2,5 \left(\frac{d}{D_h} \right)^{-0,2} \quad (1.3)$$

$$\text{Με } 0,01 < \left(\frac{d}{D_h} \right) < 1,0.$$

Κριτήριο Shields:

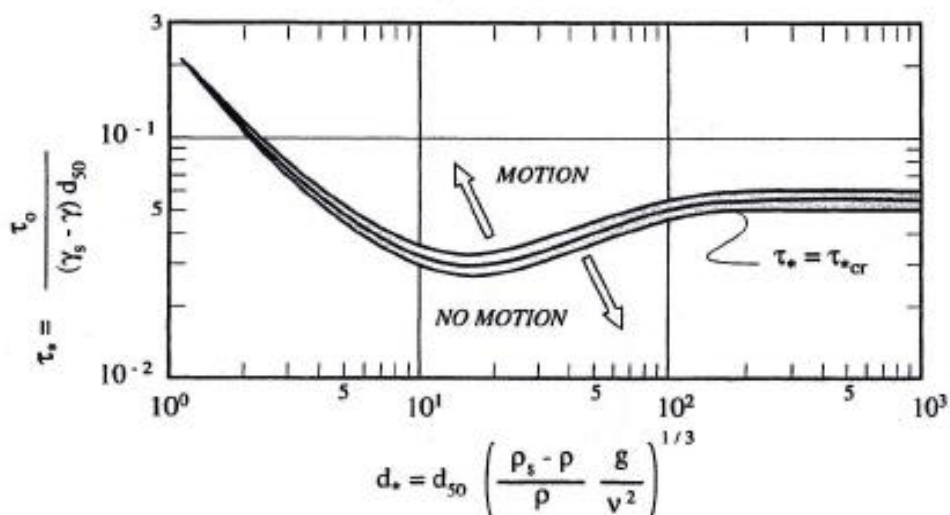
Το κριτήριο του Shields δίνει την κρίσιμη τάση τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds.Επειδή όμως θα ήταν απαραίτητες επαναληπτικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της τάσης ο Yalin(1972) μετασχημάτισε τη σχέση του προτείνοντας τελικά τον προσδιορισμό της κρίσιμης τάσης διάβρωσης τ_{cr}^* αδιαστατοποιημένης με τη σχέση:

$$\tau_{cr}^* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (1.4)$$

Χρησιμοποιώντας ως παράμετρο μία αδιαστατοποιημένη έκφραση της διαμέτρου του υλικού.

$$d^* = d \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

Και τελικώς το κριτήριο δίνεται με τη μορφή του παρακάτω διαγράμματος:



Διάγραμμα 2-1:Κριτήριο Shields για την κρίσιμη συρτική δύναμη έναρξης διάβρωσης(Graf W. H., 1998)

2.8. Υπολογισμός της στερεοπαροχής των διαφόρων ειδών μεταφερόμενων υλικών

Για την καλύτερη κατανόηση του είδους των εισερχόμενων υλικών σε έναν ταμιευτήρα είναι σκόπιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στις μεθόδους οι οποίες προτείνονται για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής-και συγκεκριμένα της καμπύλης στερεοπαροχής-παροχής ενός καναλιού-.

Ο υπολογισμός και η πρόβλεψη φορτίου φερτών υλών με τις μεθόδους που παρουσιάζονται,είναι θεωρητικός και ισχύει όταν υπάρχουν διαθέσιμα υλικά προς μεταφορά.Αν τα στερεά υλικά που διατίθενται στο κανάλι λόγω διάβρωσης του εδάφους καθώς και τα διαβρώσιμα υλικά της κοίτης είναι λιγότερα από τα φορτία που προκύπτουν θεωρητικά τότε το πραγματικό φορτίο θα είναι το διαθέσιμο και μόνο,ανεξαρτήτως της ικανότητας του ποταμού να μεταφέρει μία ποσότητα υλικών.Μάλιστα αναφέρεται (Annandale, 1987) πως σε πραγματικά προβλήματα συνήθως οι διατιθέμενες φερτές ύλες από διάβρωση είναι λιγότερες από αυτές που μπορεί να μεταφέρει η ροή.

2.8.1. Φορτίο κοίτης με σύρση, q_{sb}

Όπως έχει προαναφερθεί το φορτίο κοίτης σε σύρση πρόκειται για κυρίως χονδρόκοκκα υλικά των οποίων η μεταφορά λαμβάνει χώρα κοντά στον πυθμένα και γίνεται με σύρση,κύλιση ή αναπηδήσεις.

Υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων για την πρόβλεψη της στερεοπαροχής του φορτίου κοίτης κυρίως εμπειρικής φύσης και συναρτώμενες από αδιαστατοποιημένους παράγοντες οι οποίες όμως είναι αρκετά πολύπλοκες.

Για τη θεωρητική τεκμηρίωση της πρόβλεψης της στερεοπαροχής του φορτίου σε σύρση γίνονται οι παραδοχές ότι ο πυθμένας του καναλιού είναι επίπεδος και μη σταθερός και αποτελείται από κόκκους ενιαίου μεγέθους χωρίς συνοχή, ενώ η ροή θεωρείται ομοιόμορφη και μόνιμη.

Το πρόβλημα είναι πρόβλημα ισορροπίας της δύναμης που ασκεί η ροή στα σωματίδια του πυθμένα και της δύναμης 'τριβής' και αλληλεμπλοκής που αυτά αντιστέκονται.

Θα αναφερθούν κάποιες από τις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού.

Η μέθοδος του Schoklitsch βασιζόμενη στην κρίσιμη δύναμη διάβρωσης.

Η μέθοδος των Meyer Peter et al στηριζόμενη στον αριθμό Froude.

Και τέλος η μέθοδος του Einstein η οποία αποτελεί ένα πιθανοτικό μοντέλο.

2.8.1.1. Προστατευμένος πυθμένας

Με τις μαθηματικές μεθόδους υπολογισμού υπολογίζεται η ικανότητα της ροής να μεταφέρει μία ποσότητα στερεών υλικών εφόσον είναι διαθέσιμη. Σημείο με ιδιαιτερότητα στο πρόβλημα της ροής και μεταφοράς φερτών υλών σε φυσικό κανάλι καθώς και αίτιο αποτυχίας των μεθόδων είναι το πρόβλημα του 'ωπλισμένου' πυθμένα.

Σε ένα φυσικό κανάλι η ροή μεταφέρει από τον πυθμένα συνεχώς τα πιο λεπτόκοκκα και ευκολότερα να μετακινηθούν υλικά με αποτέλεσμα να μένουν τα πιο χονδρόκοκκα υλικά τα οποία δημιουργούν ένα στρώμα στον πυθμένα του καναλιού ανθεκτικό στη διάβρωση. Το στρώμα αυτό προστατεύει τα λεπτόκοκκα υλικά των κατωτέρω στρωμάτων 'κρύβοντάς' τα από την δύναμη της ροής. Έτσι η διάβρωση περιορίζεται και μόνο αν έρθει μία δυνατή πλημμύρα με μεγάλες παροχές και ταχύτητες να παρασύρει το χονδρόκοκκο στρώμα θα ξαναρχίσει η διάβρωση των κατωτέρω στρωμάτων.

2.8.2. Μεταφορά ως φορτίο σε αιώρηση

Τα σωματίδια που μεταφέρονται με αιώρηση κάνουν μεγάλες αναπηδήσεις και βρίσκονται σε θέσεις όπου περιβάλλονται από νερό σε όλη την επιφάνειά τους. Για αυτό και θεωρητική προσέγγιση στην πρόβλεψη του φορτίου είναι διαφορετική από του φορτίου σε σύρση.

Θεωρητικώς περιγράφεται από τη θεωρία και τις εξισώσεις διάχυσης και διάδοσης σε ρευστό μέσο. Αναφέρεται πως κυρίαρχο ρόλο παίζει η διαδοσιμότητα και η συνεκτικότητα του νερού λόγω τυρβώδους ροής.

Η πιο δημοφιλής μέθοδος πρόβλεψης του φορτίου σε αιώρηση είναι η μέθοδος του Einstein.

2.8.2.1. Καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής

Ουσιαστικά είναι το ζητούμενο όμως επειδή η καμπύλη q_{ss} - Q έχει τη μορφή:

$$q_{ss} = \alpha Q^b \quad (1.6)$$

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρόβλεψη της στερεοπαροχής σε αιώρηση σε περίπτωση όπου λόγω έλλειψης στοιχείων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι (Μιμίκου, 2006). Έτσι μία λύση είναι να γίνει η πρόβλεψη χρησιμοποιώντας εντοπικές μεθόδους εκτίμησης των παραμέτρων α, b και χρησιμοποίηση των στοιχείων της παροχής του νερού.

Για τις παραμέτρους α, b βρέθηκε πως παρουσιάζουν συσχετίσεις με διάφορα μορφοκλιματικά χαρακτηριστικά ενώ ο εκθέτης παίρνει συγκεκριμένες τιμές. Πιο συγκεκριμένα οι παράγοντες είναι εποχιακά κυμαινόμενοι, έχουν άλλες τιμές για την ξηρή και άλλες για την υγρή περίοδο, διότι την ξηρή περίοδο αναμένεται μεγαλύτερη στερεοπαροχή για ίδια παροχή νερού λόγω της μεγαλύτερης διαβρωτικότητας της βροχής.

Ειδικά για την Ελλάδα βρέθηκε (Μιμίκου, 2006) πως ο εκθέτης b κυμαίνεται μεταξύ 2,5-3,5 για την υγρή και 2,0-3,0 για την ξηρή περίοδο ενώ η σταθερά α συσχετίζεται ως προς την b με τις εξής σχέσεις:

Υγρή περίοδος:

$$b = 1,2335 - 0,4041 \log \alpha \quad (1.7)$$

Ξηρή Περίοδος:

$$b = 1,5441 - 0,4151 \log \alpha \quad (1.8)$$

Ενώ ειδικά για την Β και ΒΔ Ελλάδα έγιναν (Μιμίκου, 2006) μελέτες εντοπιότητας και βρέθηκαν οι παρακάτω σχέσεις ως καλώς συσχετισμένες:

Υγρή περίοδος:

$$\begin{aligned} \alpha (\times 10^6) &= 1,1222 \times 10^{33} P^{-7,9628} A^{-2,0601} H^{-0,3753} \\ b &= 0,0464 P^{0,04940} A^{0,0819} H^{0,0132} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Ξηρή περίοδος:

$$\begin{aligned} \alpha (\times 10^4) &= 8,2770 \times 10^{14} P^{-2,9099} A^{-1,2885} H^{0,3749} \\ b &= 1,9413 P^{0,01660} A^{0,0100} H^{-0,1560} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Όπου P η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης σε χιλιοστά

A η επιφάνεια της λεκάνης απορροής σε τετραγωνικά χιλιόμετρα

H η υψομετρική πτώση σε χιλιόμετρα

2.8.3. Στερεομεταφορά ολικού φορτίου

Ολικό φορτίο είναι το αθροίσμα του φορτίου μεταφερόμενου με σύρση και το φορτίο σε αιώρηση και πιθανώς το φορτίο απόπλυσης:

$$q_s = q_{sb} + q_{ss} + q_{sw} \quad (1.11)$$

Πάλι υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι για την πρόβλεψη του q_s .

Αυτές χωρίζονται σε μεθόδους που προβλέπουν με έμμεσο τρόπο, ουσιαστικά αθροίζοντας τα δύο διαφορετικά είδη μεταφοράς (q_{sb} και q_{ss}) και υπάρχουν και μέθοδοι που άμεσα προσπαθούν να προβλέψουν το q_s χωρίς να διαχωρίζουν τα είδη.

Οι δύο μέθοδοι του Einstein που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν εφόσον συνδυαστούν να δώσουν μία μέθοδο πρόβλεψης του ολικού φορτίου χωρίς όμως να

περιλαμβάνει το φορτίο απόπλυσης. Η μέθοδος κρίνεται ως πλήρης από υδραυλική άποψη (Graf W. H., 1998) αλλά πολύπλοκη η εφαρμογή της.

Ακόμα δύο διαφορετικές προτεινόμενες μέθοδοι άμεσης πρόβλεψης υπάρχουν από τους (Graf & Acaroglu, 1968) και από τους (Ackers & White, 1973).

2.8.3.1. Πεδίο εφαρμογής και ακρίβεια των μεθόδων υπολογισμού στερεομεταφοράς

Αν και δεν παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι μέθοδοι πρόβλεψης στερεοπαροχής θα δοθούν συνοπτικά οι παραδοχές και οι τιμές των παραμέτρων για τις οποίες προτείνονται οι ανωτέρω μέθοδοι.

Μέθοδος	Διάμετροι, d [mm]	Κλίση πυθμένα, Sf	Ισοδύναμη διάμετρος για μη ομοιόμορφα υλικά
Schoklitsch	0,3-7,0	0,003-0,1	d_{40}
Meyer-Peter et al	3,1-28,6	0,0004-0,020	$d_m(d_{50})$
Einstein	0,8-28,6	-	d_{35}
Graf et Acaroglu	0,3-1,7	-	d_{50}
Ackers et White	0,04-4,0	$Fr < 0,8$	d_{35}

Πίνακας 2-3: Όρια εφαρμογής για τις μεθόδους υπολογισμού στερεομεταφοράς (Graf W. H., 1998)

Τέλος ο White (1973) έκανε μία διερεύνηση της αξιοπιστίας των μεθόδων πρόβλεψης ολικού φορτίου συγκρίνοντας τις προβλεπόμενες τιμές με τις πραγματικά μετρήσιμες και προέκυψαν ποσοστά επιτυχίας:

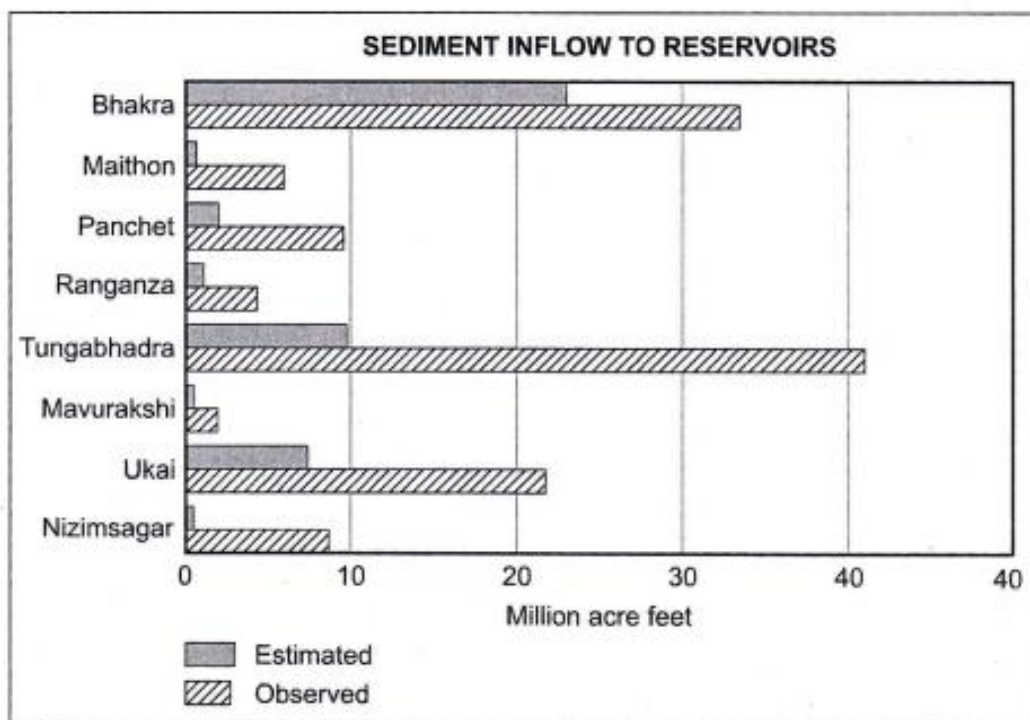
Einstein (1950): 44%

Graf et Acaroglu: 40%

Ackers et White: 64%

Ερευνητές όπως ο (Bathurst, 2007) εκτιμούν πως οι μέθοδοι υπολογισμού του φορτίου κοίτης υπερεκτιμούν μέχρι και δύο τάξεις μεγέθους τις πραγματικές στερεοπαροχές κοίτης.

Τα δεδομένα αυτά δίνονται για να γίνει σαφές πόσο αξιόπιστες είναι οι προβλέψεις που δίνουν οι θεωρητικές και εμπειρικές μέθοδοι στα ζητήματα υπολογισμού στερεοπαροχών και πόσο σημαντική είναι η κρίση του μηχανικού στην επιλογή των σωστών παραμετρών και στην επεξεργασία και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των εξισώσεων.



Εικόνα 2-6: Σύγκριση υπολογιζόμενων εισροών φερτών υλών σε ταμιευτήρες με πραγματικά μετρημένες (Killingtveit & Saelthun, 1995)

2.8.4. Φορτίο Απόπλυσης

Το φορτίο απόπλυσης, q_{sw} , αποτελείται από όλα εκείνα τα σωματίδια τα οποία δεν έρχονται ποτέ σε επαφή με την κοίτη του καναλιού και μετακινούνται υπό την επίδραση των υδροδυναμικών δυνάμεων της τυρβώδους ροής. Αποτελείται από τις πιο λεπτές κοκκομετρίες των μεταφερόμενων υλικών.

Το φορτίο απόπλυσης είναι προϊόν διάβρωσης στην λεκάνη απορροής του καναλιού σε αντίθεση με το φορτίο κοίτης το οποίο είναι υλικό πυθμένα το οποίο έχει αποθεθεί και μετακινείται εκ νέου.

Ο Einstein προτείνει ότι η κοκκομετρία του φορτίου απόπλυσης είναι το 10% της κοκκομετρίας του υλικού πυθμένα. Μία άλλη πρόταση εκτιμά ότι το φορτίο έκπλυσης είναι υλικά με διάμετρο κόκκου μικρότερη των 0,06mm (πολύ λεπτή ιλύς).

Επειδή λοιπόν δεν υπάρχει αναλυτική μεθοδος υπολογισμού του φορτίου κοίτης προτείνονται να γίνονται μετρήσεις πεδίο για εκτίμηση της στερεοπαροχής σε αιώρηση και του φορτίου απόπλυσης μαζί($q_{ss}+q_{sw}$) και χρησιμοποιώντας μία από τις μεθόδους υπολογισμού του q_{ss} να γίνεται τελικά έμμεσα η εκτίμηση του q_{sw} .

Υπάρχουν περιπτώσεις λεκανών απορροής με φορτίο απόπλυσης μεγαλύτερο του φορτίου σε αιώρηση.

Το ολικό φορτίο σε αιώρηση εάν είναι πολύ μεγάλο μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά της ροής(δες και παράγραφο 2.5).

2.9. Εκτίμηση κοκκομετρικής διαβάθμισης μεταφερόμενων υλικών

Διαφαίνεται από την πληθώρα και την αβεβαιότητα των θεωριών πόσο δύσκολη και μη αξιόπιστη είναι η πρόβλεψη των στερεοπαροχών,άρα και της κοκκομετρικής σύστασης των μεταφερόμενων υλικών και συνεπώς της φύσης του υλικού των αποθέσεων που θα δημιουργηθούν στα προβλήματα απόθεσης φερτών υλικών ενός ταμειυτήρα ο οποίος εξετάζεται.

Δεδομένου και της πληθώρας στοιχείων τα οποία είναι απαραίτητα για να 'δουλέψουν' οι υπολογισμοί τα οποία πολλές φορές είναι δυσεύρετα ή απλώς άγνωστα λόγω απουσίας σχετικών μετρήσεων και βάσεων δεδομένων, κρίνεται σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις,ή τουλάχιστον να υπάρχουν κάποια όρια στις εκτιμήσεις στερεοπαροχών.

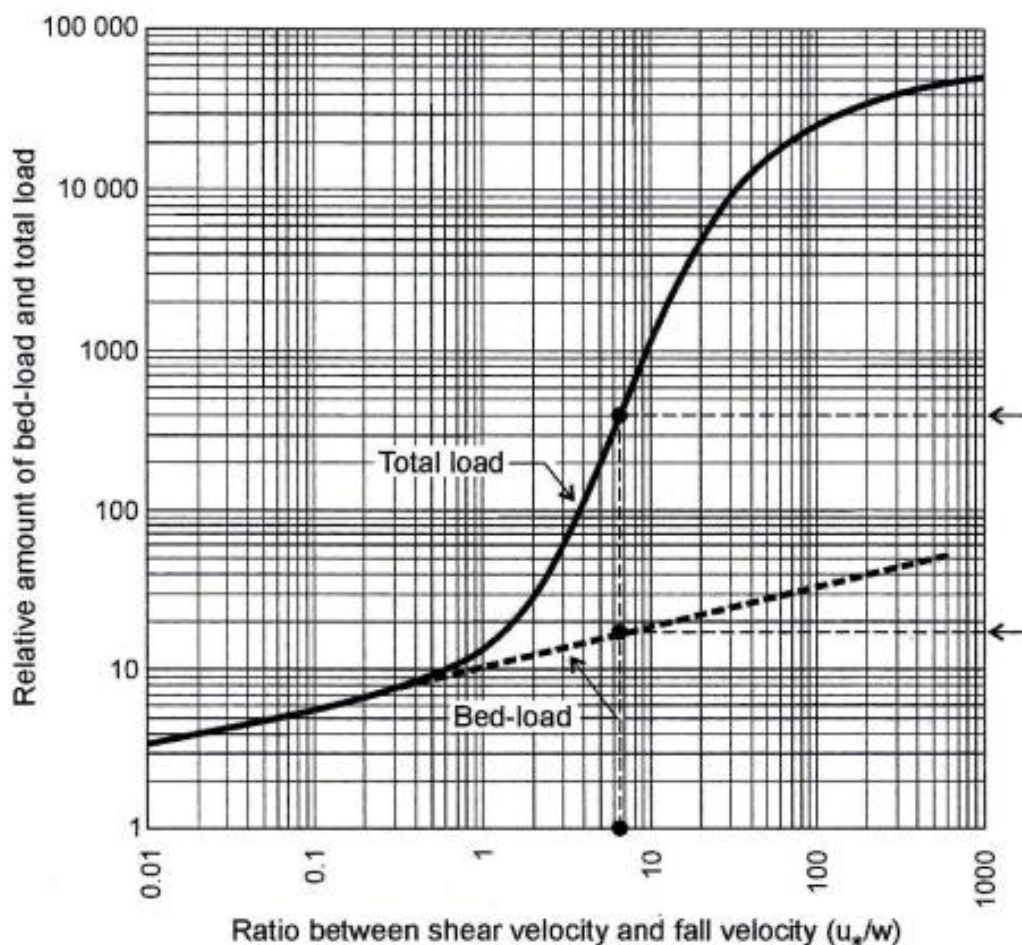
Έγινε προσπάθεια κυρίως στο να μπορεί να υπάρχει μία αίσθηση του ποσοστού του φορτίου κοίτης σε σύρση ως προς το συνολικό φορτίο στερεών ή το φορτίο σε αιώρηση το οποίο δίνει εν τέλει και μία εκτίμηση της κοκκομετρικής διαβάθμισης των μεταφερόμενων υλικών ή ακόμα και των ποσοτήτων αποτεθειμένων φερτών υλών στο χώρο σε ένα ταμειυτήρα,μιας και τα διαφορετικά είδη μεταφοράς αποτελούν και κριτήριο της κοκκομετρίας τους.

Κυρίως ο(Maddock, 1969) έκανε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης για τον προσδιορισμό του φορτίου πυθμένα σε σύρση η οποία συνοψίζεται στον κατωτέρω πίνακα.

Συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών σε ppm	Είδος υλικού του καναλιού	Υφή του υλικού σε αιώρηση	Φορτίο πυθμένα σε σύρση, ως ποσοστό του φορτίου σε αιώρηση
Λιγότερα από 1000	Άμμος	Παρόμοιο με το υλικό κοίτης	25-150%
Λιγότερα από 1000	Χαλίκια, βράχος ή στερεοποιημένη άργιλος	Μικρό ποσό άμμου	5-12%
1000-7500	Άμμος	Παρόμοιο με το υλικό κοίτης	10-35%
1000-7500	Χαλίκια, βράχος ή στερεοποιημένη άργιλος	25% άμμος ή και λιγότερο	5-12%
Πάνω από 7500	Άμμος	Παρόμοιο με το υλικό κοίτης	5-15%
Πάνω από 7500	Χαλίκια, βράχος ή στερεοποιημένη άργιλος	25% άμμος ή και λιγότερο	2-8%

Πίνακας 2-4: Κατηγοριοποίηση του είδους των μεταφερόμενων υλικών ανάλογα τη συγκέντρωση και το υλικό πυθμένα του καναλιού. (ASCE Task Committee, 2008)

Υπάρχουν επίσης εκτιμήσεις ερευνητών όπως του (Scheuerlein H. , 1990) οι οποίοι θέτουν ως λογική τιμή το 10-20% φορτίο κοίτης ως προς το φορτίο σε αιώρηση. Ο Annandale προτείνει 5% (Annandale, 1987) (Rooseboom, 1975).



Εικόνα 2-7:Ολικό φορτίο φερτών υλών ως προς το φορτίο κοίτης ανάλογα με το λόγο u_* προς v_{ss} .(ASCE Task Committee, 2006)

2.10. Συμπεράσματα-Σχολιασμος

Το πρόβλημα της ροής νερού σε ανοιχτό αγωγό περιπλέκεται όταν θεωρείται πυθμένας μη σταθερός από υλικά δυνητικά μεταφερόμενα. Στο σύνθετο πρόβλημα τίθεται το ζήτημα του προσδιορισμού του πυθμένα και των μεταβολών του στο χρόνο.

Επίσης η ροή είναι ροή μείγματος στερεών υλικών και νερού. Τίθεται το ζήτημα του προσδιορισμού της περιεκτικότητας των στερεών της ροής, της στερεοπαροχής, το οποίο προϋποθέτει την εξέταση των χαρακτηριστικών της υγρής και της στερεής φάσης. Η στερεοπαροχή χωρίζεται σε είδη ανάλογα με τους μηχανισμούς που μεταφέρουν τα υλικά, φορτίο κοίτης σε σύρση, φορτίο σε αιώρηση, φορτίο απόπλυσης.

Για να γίνει ποιοτική τουλάχιστον περιγραφή των συνθηκών απόθεσης ή διάβρωσης γίνεται προσδιορισμός της αναγκαίας συνθήκης για την έναρξη της διάβρωσης ή την

απόθεση υλικών, ήτοι των ορίων της συρπτικής δύναμης στον πυθμένα από τη ροή. Αναφέρθηκε και αναλύθηκε κυρίως η εργασία του Hjulstrom και του Shields.

Όσων αφορά τις μεθόδους προσδιορισμού της στερεοπαροχής ανά είδος, οι οποίες δεν αναλύθηκαν εκτενώς, διευκρινίζεται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της στερεοπαροχής που προκύπτει σε πρόβλημα μεταφοράς φερτών υλών σε κανάλι με την προϋπόθεση ότι θα υπάρχει επάρκεια διαθέσιμων υλικών προς μεταφορά, ειδάλλως προσδιορίζουν την ικανότητα μεταφοράς υλικών από τη ροή χωρίς απαραίτητα αυτή να είναι και η πραγματική. Εάν η δυνατότητα μεταφοράς είναι μεγαλύτερη από τα μεταφερόμενα υλικά τότε λαμβάνει χώρα διάβρωση, εάν η δυνατότητα είναι μικρότερη τότε λαμβάνει χώρα απόθεση.

Γίνεται σαφές ότι το πρόβλημα είναι αρκετά πολύπλοκο στη θεωρητική θεμελίωση, οι μέθοδοι προσδιορισμού είναι ως επί το πλείστον εμπειρικοί, ενώ την δυσκολία αυξάνει η απαίτηση προσδιορισμού χαρακτηριστικών των γαιο-υλικών. Έτσι προκύπτει αξιολόγηση ικανοποιητικά ακριβούς πρόβλεψης γύρω στο 45%.

Όλα τα ανωτέρω προκύπτουν πρωτίστως από θεώρηση ροής σε ανοικτούς αγωγούς και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε εφαρμογή σε ταμειυτήρες.

Όσων αφορά την κοκκομετρία των φορτίων στερεοπαροχής μόνο ποιοτικά και με μεγάλη επιφύλαξη θα μπορούσε να απαντήσει κάποιος γενικώς, χρησιμοποιώντας κυρίως τον Πίνακα 2-4: Κατηγοριοποίηση του είδους των μεταφερόμενων υλικών ανάλογα τη συγκέντρωση και το υλικό πυθμένα του καναλιού.

Γενικώς πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό και με αρκετές αβεβαιότητες πρόβλημα και ο σκοπός μας ήταν η διευρεύνηση των βασικών αρχών και της λογικής που το διέπει για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της απόθεσης των φερτών υλών σε ένα ταμειυτήρα αλλά και του μηχανισμού έκπλυσης αυτού.

Κεφάλαιο 3

Απόθεση Φερτών Υλών σε Ταμιευτήρες

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της διερεύνησης του τρόπου με τον οποίο ένας ταμιευτήρας γεμίζει με φερτές ύλες δηλαδή το ζήτημα της απόθεσης των φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα. Ήδη έχουν εξεταστεί στο κεφάλαιο 2 οι μηχανισμοί υδραυλικής μεταφοράς των φερτών υλικών και της απόθεσης τους. Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται ζητήματα όπως ο ρυθμός αύξησης των αποθέσεων καθώς και τα σημεία στα οποία γίνονται οι αποθέσεις, όπως και η μορφή τους και η κοκκομετρία των υλικών που τις αποτελούν.

Σε ένα ταμιευτήρα ο χρόνος ζωής του καθορίζεται από το ρυθμό αύξησης των αποθέσεων και αν αυτές συγκεντρώνονται κυρίως στον ωφέλιμο ή στο νεκρό όγκο αυτού. Όμως οι αβεβαιότητες στις ποσότητες των εισερχόμενων υλικών, οι δυσκολίες προσδιορισμού του πεδίου ροής στον υδατικό όγκο ενός ταμιευτήρα, η περιορισμένη γνώση των μηχανισμών μεταφοράς των στερεών υλικών καθώς και η έντονη χρονική μεταβλητότητα των συνθηκών κάνει την κατανόηση και την πρόβλεψη του προβλήματος εξαιρετικά δυσχερή.

Οι ποταμοί μεταφέρουν στερεά φερτά γεωυλικά που προκύπτουν κυρίως από τις διαδικασίες διάβρωσης της επιφάνειας των λεκανών απορροής και του πυθμένα του καναλιού αυτών. Τα φερτά υλικά των ποταμών διοχετεύονται με την εισροή των ποταμών στους ταμιευτήρες είτε φυσικούς είτε τεχνητούς. Όταν ο ποταμός συναντήσει τον κύριο υδατικό όγκο του ταμιευτήρα τότε η ταχύτητα της ροής θα μειωθεί αρκετά ή και θα μηδενιστεί. Έτσι το κυρίως μέρος μεταφερόμενων υλικών θα αποτεθεί στην είσοδο του ταμιευτήρα σχηματίζοντας ένα δέλτα αποθέσεων. Αυτά είναι τα πιο χονδρόκοκκα υλικά τα οποία λόγω απώλειας της συρτικής τάσης μεταφοράς τους παύουν την κίνησή τους. Οι υπόλοιπες πιο λεπτόκοκκες φερτές ύλες, που βρίσκονται σε αιώρηση, μεταφέρονται με ρεύματα πυκνότητας στο κυρίως σώμα του ταμιευτήρα και μπορεί μέρος αυτών ακόμα και να εξέλθει μέσω του υπερχειλιστή.

3.2. Βαθμός Κατακράτησης Φερτών Υλών

Σε ένα ταμιευτήρα δεν συγκρατείται το σύνολο των φερτών υλών και είναι απαραίτητο να υπάρχει μία εκτίμηση της ποσότητας των φερτών υλών που κατακρατείται.

Παράγοντες που επηρεάζουν το ποσοστό κατακράτησης φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα είναι ο χρόνος παραμονής των φερτών υλών στον ταμιευτήρα, η 'ηλικία', το σχήμα και ο σκοπός λειτουργίας του ταμιευτήρα, οι διαστάσεις και οι θέσεις των θυρίδων του φράγματος καθώς και το μέγεθος των κόκκων των φερτών υλών.

Λόγω λοιπόν της πολυπλοκότητας του προβλήματος είναι δύσκολο να υπάρξει αναλυτική σχέση. Έχουν προταθεί εμπειρικές σχέσεις και διαγράμματα για τον προσδιορισμό του ποσοστού κατακράτησης.

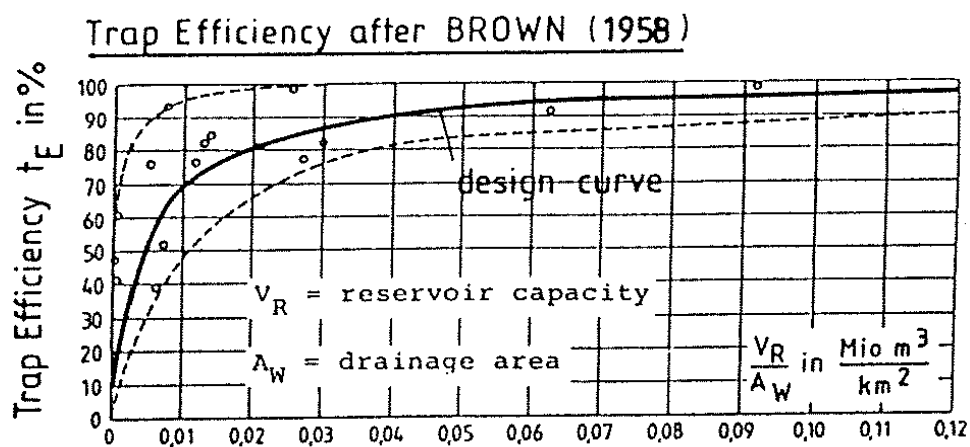
Το πιο δημοφιλές είναι το διάγραμμα του (Brune, 1953) που δίνει το ποσοστό κατακράτησης συναρτήσει του λόγου χωρητικότητας ταμιευτήρα προς το μέσο ετήσιο όγκο νερού που εισρέει στον ταμιευτήρα. Ο λόγος εκφράζει έμμεσα τον χρόνο παραμονής φερτών υλών στον ταμιευτήρα και είναι ο λόγος βάσει του οποίου κρίνεται το υδρολογικό μέγεθος ενός ταμιευτήρα (C:I). Το διάγραμμα προέκυψε μετά από μελέτη 40 κανονικών (δεν υπάρχει προσπάθεια απαγωγής φερτών) ταμιευτήρων στις ΗΠΑ. Η σχέση ενδείκνυται για ταμιευτήρες αποθήκευσης όπου δεν γίνεται προσπάθεια απομάκρυνσης των φερτών υλών. Ο λόγος C:I ενδείκνυται να έχει τιμές από 0.0016 έως 4.65.

Ο Gill συμπλήρωσε τις καμπύλες του Brune για μεγάλο, μικρό και μεσαίο μέγεθος κόκκων με εμπειρικές εξισώσεις.

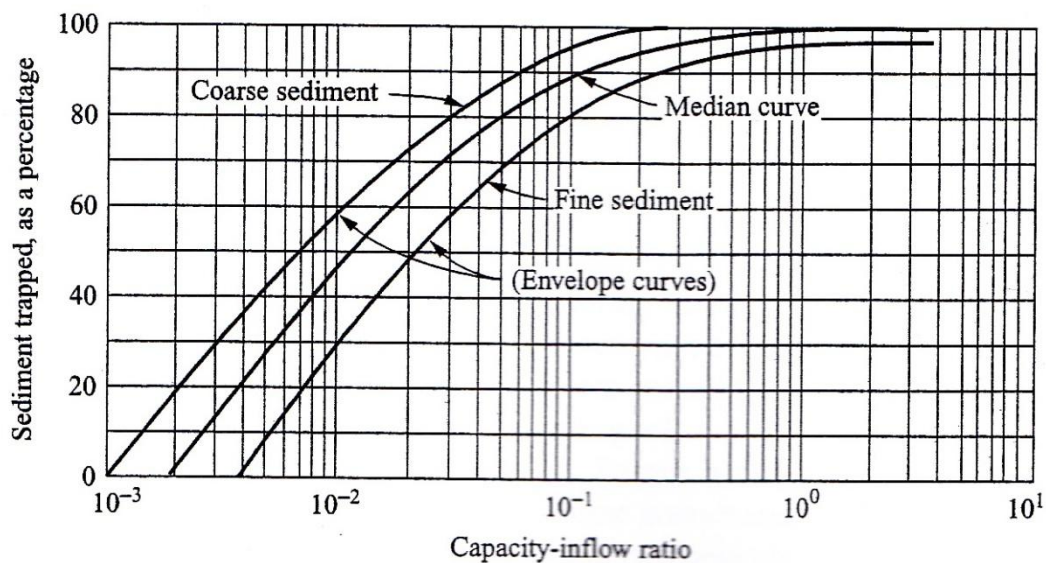
Ο (Churchill, 1948) κατασκεύασε βάσει στοιχείων της 'Tennessee Valley Authority' γράφημα του ποσοστού κατακράτησης φερτών συναρτήσει του λόγου του χρόνου παραμονής του ταμιευτήρα προς τη μέση ταχύτητα ροής του ταμιευτήρα (sediment index). Η καμπύλη του Churchill ενδείκνυται για ταμιευτήρες αντιπλημμυρικής προστασίας και παγίδες άμμου.

Γνωστή είναι και η καμπύλη του (Brown, 1943) βασιζόμενη σε δεδομένα 15 ταμιευτήρων. Δίνει το ποσοστό κατακράτησης συναρτήσει του λόγου χωρητικότητας ταμιευτήρα σε m^3 προς την επιφάνεια της λεκάνης απορροής σε km^2 . Ο Heinemann βελτίωσε την καμπύλη για ταμιευτήρες με λεκάνη απορροής μικρότερη των $40 km^2$.

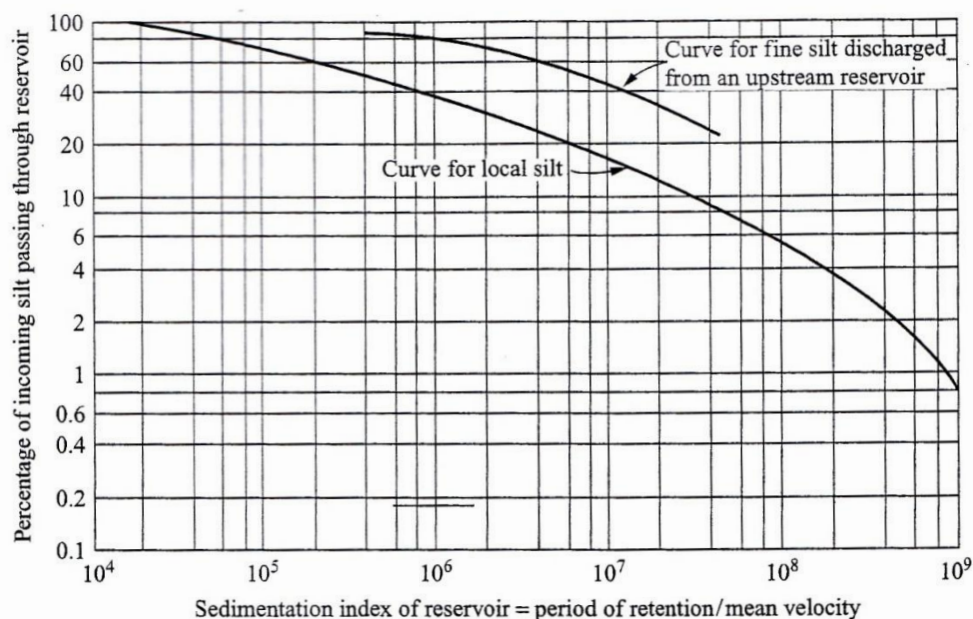
Ακόμη ο (Borland, 1971) επιβεβαίωσε την ορθότητα της μεθόδου του Churchill και έκρινε ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη μέθοδο του Brune.



Εικόνα 3-1: Διαγράμματα εκτίμησης βαθμού κατακράτησης φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα από Brown. (Sloff, 1991)



Εικόνα 3-2: Βαθμός κατακράτησης φερτών υλών σε ταμιευτήρα από Brune. (ASCE Task Committee, 2006)



Εικόνα 3-3:Βαθμός κατακράτησης κατά Churchill.(ASCE Task Committee, 2006)

3.3. Μορφές αποθεσών

-Αποθέσεις δελταϊκής μορφής

Αποτελούνται από το χονδρόκοκκο μέρος του φορτίου των φερτών υλών το οποίο αποτίθεται σε διατομή σχήματος τριγώνου-δέλτα. Κατάντη του δέλτα βρίσκονται τα λεπτότερα υλικά.

-Αποθέσεις μορφής σφήνας

Έχουν μεγαλύτερο πάχος κοντά στο φράγμα και λεπτότερο ανάντη. Αυτή η μορφή προκύπτει κυρίως από λεπτόκοκκα υλικά μεταφερόμενα με ρεύματα πυκνότητας. Εμφανίζεται σε μικρούς ταμιευτήρες με μεγάλες εισροές και σε μεγάλους ταμιευτήρες οι οποίοι δουλεύουν κατά τη διάρκεια των πλημμυρών σε χαμηλό ύψος νερού με αποτέλεσμα οι αποθέσεις να συγκεντρώνονται κοντά στο φράγμα.

-Αποθέσεις κωνικής μορφής

Το πάχος των αποθεσών γίνεται προοδευτικά λεπτότερο καθώς πλησιάζουμε στο φράγμα. Αποτελεί τυπική μορφή για μακρούς ταμιευτήρες που λειτουργούν σε ψηλό επίπεδο.

-Ομοιόμορφες αποθέσεις

Ασυνήθιστη μορφή. Μπορεί να συμβεί σε στενούς ταμιευτήρες με συχνές διακυμάνσεις της στάθμης και μικρό φορτίο φερτών υλών.

Οι Zangh και Qian κατατάσσουν τη μορφή των αποθέσεων σε δύο κατηγορίες δίνοντας ποσοτικά κριτήρια διαχωρισμού των κατηγοριών:

-Αποθέσεις δελταϊκής μορφής: Ισχύει: $V/S_{\Delta t} > 2$ και $\Delta h/h_0 < 0.15$

-Αποθέσεις μορφής σφήνας: $V/S_{\Delta t} < 2$ και $\Delta h/h_0 > 0.15$

Όπου:

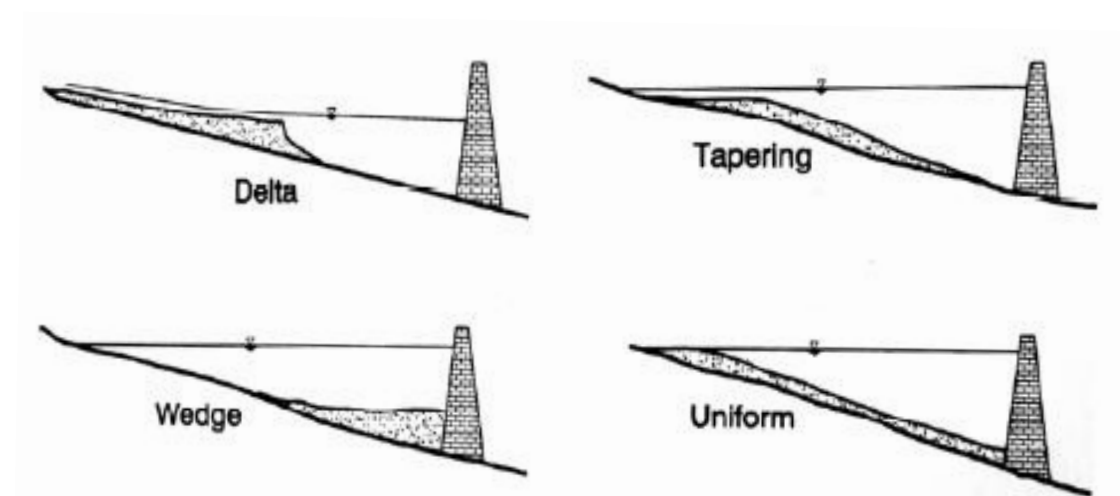
V είναι η μέση χωρητικότητα του ταμιευτήρα στο χρονικό διάστημα Δt

$S_{\Delta t}$ είναι το εισερχόμενο φορτίο φερτών υλών σε χρόνο Δt

h_0 είναι το μέσο βάθος μετρημένο από τη βάση της εξόδου ανάντη του φράγματος στο χρονικό διάστημα Δt

Δh είναι η διακύμανση της στάθμης στο χρονικό διάστημα Δt

Ο λόγος $V/S_{\Delta t}$ εκφράζει μία εκτίμηση του αντίστροφου ρυθμού με τον οποίο ο ταμιευτήρας γεμίζει με φερτές ύλες, ενώ ο λόγος $\Delta h/h_0$ είναι ο βαθμός διακύμανσης των εισροών. Εάν λοιπόν ο ταμιευτήρας έχει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τις εισερχόμενες φερτές ύλες και δεν υπάρχουν πολύ έντονες διαφοροποιήσεις στην ροή του ποταμού τότε οι αποθέσεις στην είσοδό του είναι μορφής δέλτα. Το αντίθετο οδηγεί σε αποθέσεις σχήματος 'σφήνας'. Το σχήμα δέλτα ή σφήνα αναφέρεται στο σχήμα που εμφανίζει η κατά μήκος τομή των αποθέσεων.

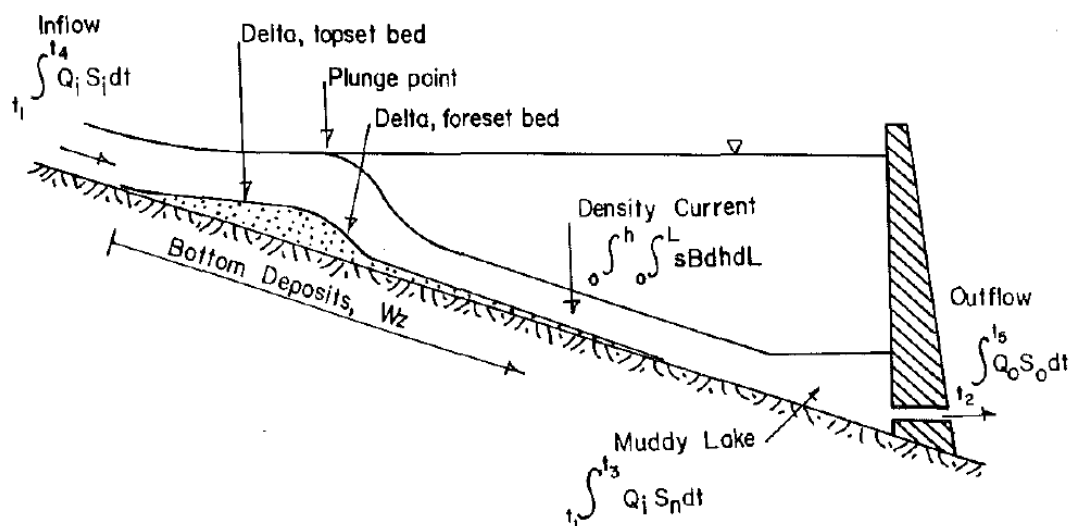


Εικόνα 3-4:Μοτίβα αποθεθειμένων φερτών υλών αποθέσεις δελταϊκές,κωνικές,σφηνοειδής και ομοιόμορφες.(Morris & Fan, 1998)

3.4. Θέσεις αποθέσεων φερτών υλών

Με την εισροή ενός ποταμού σε λιμνάζοντα ύδατα ενός ταμιευτήρα η ταχύτητα της ροής θα αρχίσει να μειώνεται. Έτσι αρχίζουν να αποτίθενται τα πιο χονδρόκοκκα υλικά. Η απόθεση των χονδρόκοκκων υλών, μεγέθους άμμου και μεγαλύτερες (>6mm) γίνεται λοιπόν μέχρι κάποια απόσταση εντός του ταμιευτήρα. Από εκεί και πέρα οι λεπτότερες ύλες, ιλύς και πηλός, μεταφέρονται μακρύτερα εντός του ταμιευτήρα και αποτίθενται θεωρητικά ομοιόμορφα. Τα αιωρούμενα στερεά σχηματίζουν ρεύματα πυκνότητας (turbidity current) τα οποία μπορούν να μεταφέρουν τα υλικά μέχρι και το φράγμα σχηματίζοντας μία λασπώδη λίμνη. Η ακριβής κατανομή απόθεσής τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το σχήμα του ταμιευτήρα, τη μορφολογία του εδάφους, τη χημική σύσταση των ιζημάτων και των διαλυμένων στο νερό ουσιών. Μπορούμε να χωρίσουμε τις αποθέσεις σε αποθέσεις:

- στα ανάντη λιμνάζοντα νερά
- στο δέλτα του ποταμού (χονδρόκοκκα υλικά)
- στον πυθμένα του ταμιευτήρα (λεπτόκοκκα υλικά)



Εικόνα 3-5: Τυπική κίνηση φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα

3.5. Αποθέσεις στα ανάντη λιμνάζοντα νερά

Είναι οι αποθέσεις οι οποίες βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του ταμιευτήρα. Είναι ήδη αποτεθειμένα υλικά, κυρίως άμμος και χαλίκι. Θεωρητικά οι αποθέσεις αυτές θα έπρεπε να αυξάνονται συνεχώς και στην περιοχή του ταμιευτήρα

αλλά και του υδατορεύματος. Στην πράξη η ροή του ποταμού ρυθμίζεται μέσα από τις αποθέσεις, αλλάζει την πορεία του αφαιρώντας μαιάνδρους και μορφώνεται κανάλι με την καλύτερη αναλογία πλάτους-βάθους, επιτρέποντας έτσι στον ποταμό να μεταφέρει φερτές ύλες.

Οι μικρότεροι ταμιευτήρες με μικρότερη διακύμανση της στάθμης έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο πλημμύρας σε αυτή την περιοχή διότι οι αποθέσεις μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της στάθμης του νερού. Οι μεγαλύτεροι ταμιευτήρες που παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις της στάθμης για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα δεν κινδυνεύουν από πλημμύρες εκτός κι εάν ο ταμιευτήρας έχει γεμίσει με μεγάλες ποσότητες φερτών υλών. Συνίσταται λοιπόν, εάν αυτό είναι δυνατόν, να απομακρύνονται ποσότητες φερτών υλών σε περιόδους που η στάθμη του ταμιευτήρα είναι χαμηλά και αφήνει εκτεθειμένες τις αποθέσεις.

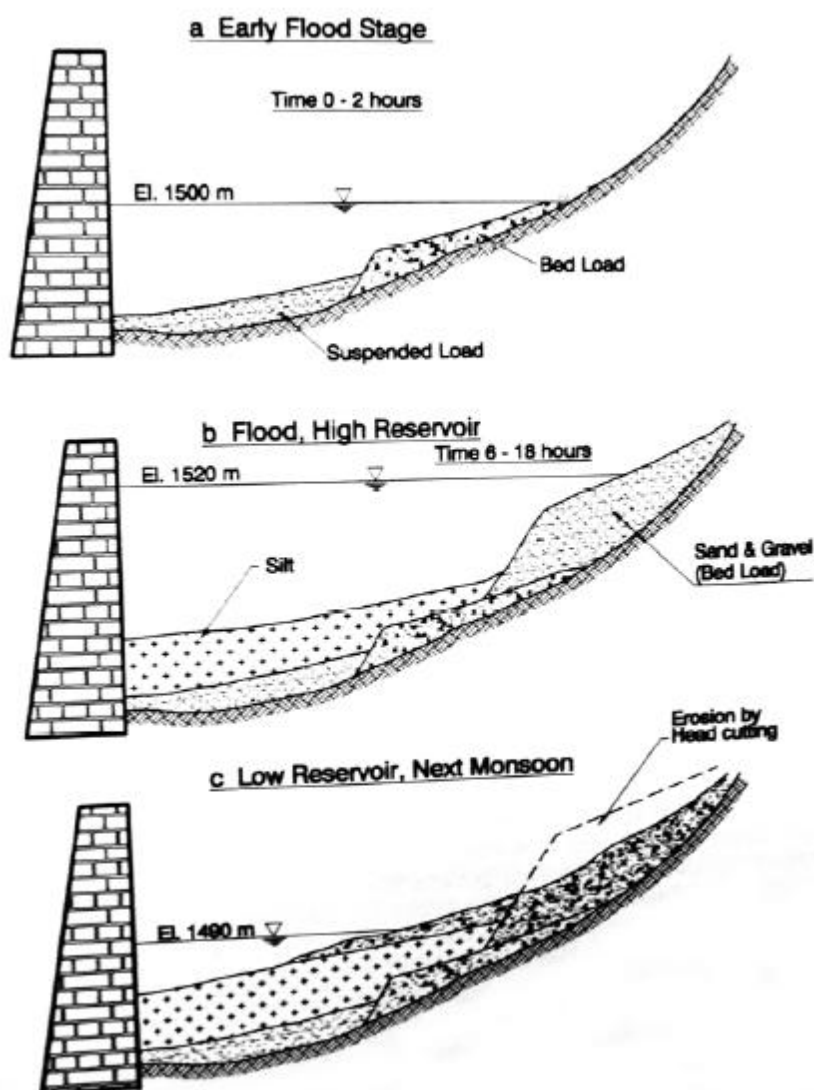
Ακόμα προβλήματα μπορεί να προκληθούν από την ανάπτυξη φυτών στις περιοχές των αποθέσεων τα οποία μεγαλώνουν γρήγορα και ευνοούν την αύξηση των αποθέσεων, παρεμποδίζοντας τη ροή και συγκρατώντας τις μεταφερόμενες στερεές ύλες.

3.6. Αποθέσεις στο Δέλτα

Φερτές ύλες μεγέθους μεγαλύτερου της άμμου θα αποτεθούν αμέσως μόλις η ροή εισέλθει στον ταμιευτήρα, εξαιτίας της αλλαγής των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής. Η αποθέσεις των φερτών υλών δε θα γίνουν ομοιόμορφα.

Το σχήμα και το σημείο της απόθεσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την κλίση της κοιλάδας, το μήκος του ταμιευτήρα, το λόγω χωρητικότητας-ετήσιων εισροών, το είδος του ταμιευτήρα, τον όγκο των είδη αποθεθειμένων υλικών, το σχήμα

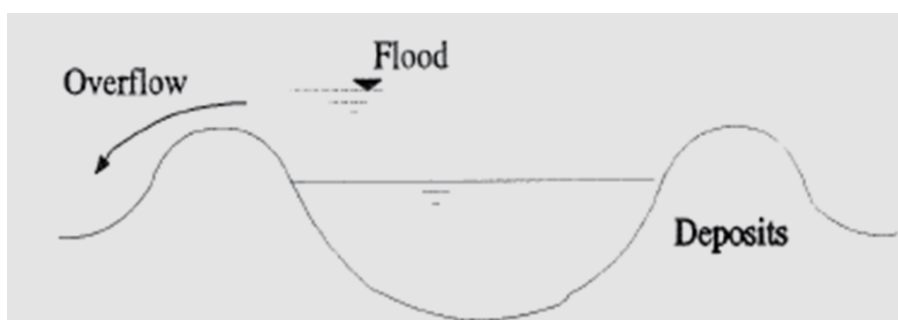
του ταμιευτήρα και πιθανά εμπόδια-κατασκευές εντός αυτού.



Εικόνα 3-6:Αποθέσεις φερτών υλών σε ταμιευτήρα και προοδευτική μετακίνησή τους σε πλημμυρικό γεγονός(Morris & Fan, 1998)

Οι αποθέσεις στην είσοδο του ταμιευτήρα διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν ο ταμιευτήρας χαρακτηρίζεται ως στενός ή πλατύς. Έτσι σε ένα στενό ταμιευτήρα οι αποθέσεις απλώνονται σε όλο το πλάτος του ταμιευτήρα. Σε ένα πλατύ ταμιευτήρα η ροή εισέρχεται σε αυτόν σα πίδακας, ρεύμα δηλαδή εντός του ταμιευτήρα το οποίο διατηρεί την αρχική του ορμή, και συνεχίζεται σε αρκετή απόσταση εντός του ταμιευτήρα σχηματίζοντας ένα ανάχωμα αποθέσεων κατά μήκος της γραμμής της ροής του ρεύματος. Το ανάχωμα των αποθέσεων έχει συνήθως λίγο μεγαλύτερο πλάτος από το πλάτος του εισερχόμενου καναλιού. Έτσι πάνω στο ανάχωμα εμφανίζεται ένα υποβρύχιο κανάλι το οποίο αναπτύσσεται μέχρι την επιφάνεια του

ταμιευτήρα και επεκτείνεται σε μεγάλη απόσταση, ακόμα και χιλιομέτρων, εντός του ταμιευτήρα. Η ανάπτυξη φυτών ευνοεί την περαιτέρω ανάπτυξη του αναχώματος. Αμμώδεις αποθέσεις δημιουργούνται στις δύο πλευρές του αναχώματος με υλικό που μεταφέρεται από το τέλος του καναλιού πίσω στην δεξαμενή με αντίστροφη περιδίνηση. Ευνοείται η ροή από τα πλάγια του καναλιού η οποία μεταφέρει υλικό λόγω της τριβής της, μέχρι που οι όχθες υπερπηδούνται, αποκολλάται υλικό και πλέον δημιουργείται ένα νέο κανάλι στην παράπλευρη ρηχή περιοχή. Έτσι δημιουργείται νέο δέλτα πάνω από τις αμμώδεις αποθέσεις.

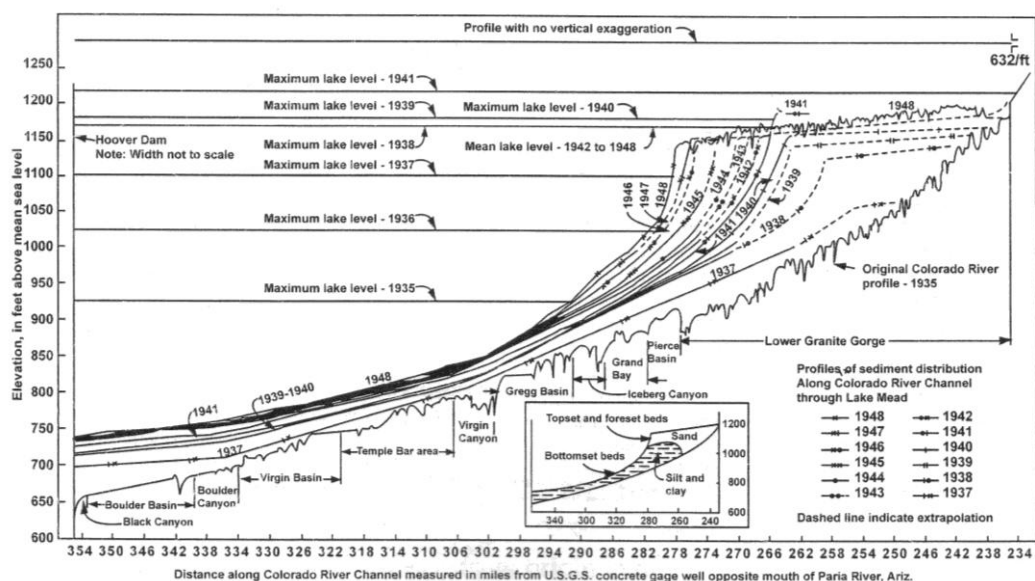


Εικόνα 3-7: Μηχανισμός υπερπήδησης βυθισμένου καναλιού (Sloff, 1991)

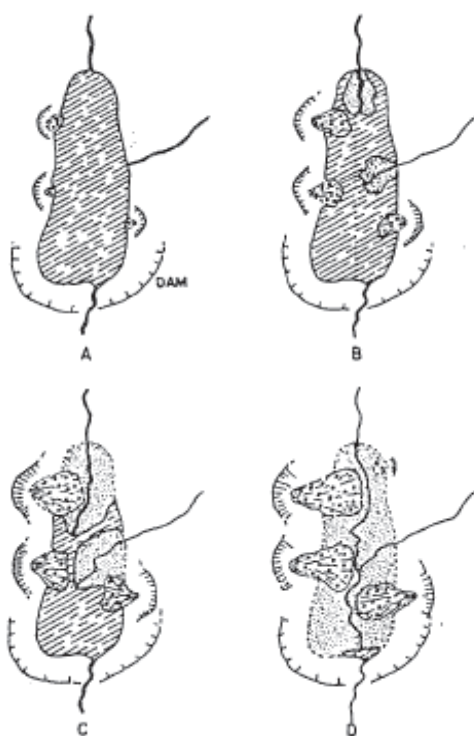
Ο Chang έδειξε πως δεν είναι απαραίτητη η αποκόλληση κομματιού της όχθης και η υπερπήδηση αυτής για να δημιουργηθούν διακλαδώσεις στον ποταμό και ότι μεγάλες παροχές οδηγούν στη δημιουργία από το ποτάμι ενός καναλιού χωρίς διακλαδώσεις. Όμως στις αποθέσεις δέλτα αυτού του τύπου το κανάλι δημιουργεί συνήθως, όπως αναφέρθηκε, πολλαπλές διακλαδώσεις. Αυτές δημιουργούνται όταν η στάθμη του νερού ανέβει, η παροχή αυξηθεί, το ποσό των φερτών υλών αυξηθεί, η διάμετρος των κόκκων αυξηθεί ή εάν επιμηκυνθεί το κανάλι. Ένα μονό κανάλι είναι αποτέλεσμα βαθιάς χάραξης του καναλιού ή αποδόμησης του εδάφους. Κυρίως δύο περιπτώσεις οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα. Από τη μία η πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα οδηγεί στη διάβρωση μίας χαράδρας από τον ποταμό, ενώ οι αργιλώδεις περιοχές στερεοποιούνται και δημιουργούνται ρηγματώσεις. Καθώς η στάθμη του ταμιευτήρα ανεβεί ξανά οι αποθέσεις γεμίζουν τις χαράδρες και τις ρωγμές με λεπτό αμμώδες υλικό. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη δημιουργία πολύ πυκνών αποθέσεων μίγματος χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. (Breusers, Klaasen, Brakel, & Van Roode, 1982)

Η συγκεκριμένη διαδικασία απόθεσης οδηγεί τελικά στη δημιουργία ενός εκτεταμένου δέλτα αποτελούμενο από λεπτόκοκκες φερτές ύλες και στρώματα άμμου, συνήθως και με ένα αριθμό παγιδευμένων μικρών λιμνών. (ομοιάζει με το 'γνωστό' δέλτα στις εκβολές μεγάλων ποταμών στη θάλασσα) Το αποτέλεσμα έχει συχνά τη μορφή ενός ανεπιθύμητου βάλτου. Τελικώς εφόσον η δυσκολία πρόβλεψης του λεπτόκοκκου

ποσοστού ιζήματος είναι δύσκολη σε συνδυασμό με την πολύπλοκη διαδικασία δημιουργίας του δέλτα τέτοιου τύπου καθιστά την πρόβλεψη της ανάπτυξης του δέλτα σε κάποια δεδομένη μελλοντική στιγμή απίθανο να επιτευχθεί.



Εικόνα 3-8:Ενδεικτικό πραγματικό προφίλ προοδευτικά μετακινούμενου Δέλτα αποθέσεων.(ASCE Task Committee, 2008)



Εικόνα 3-9:Διαδικασία πλήρωσης ταμιευτήρα από περισσότερα του ενός δέλτα λόγω εισροών από περισσότερες της μιας μισγάγγειας.(Sloff, 1991)

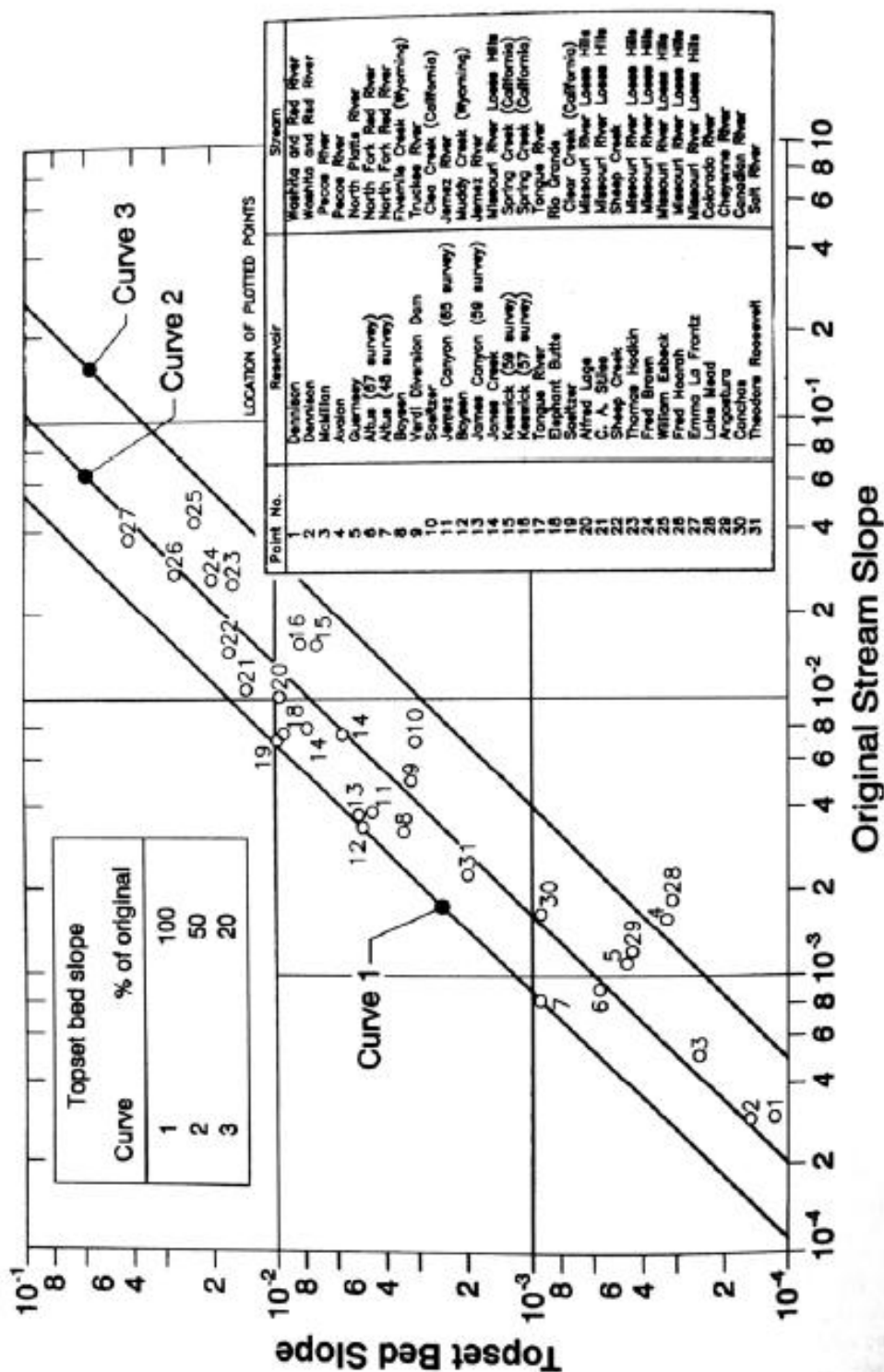
3.7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δελταϊκών αποθέσεων

Γνωρίζοντας την κλίση του ανάντη και του κατόντη πρανούς του δέλτα των αποθέσεων μπορεί να γίνει και μία εκτίμηση της έκτασης του δέλτα. Οι αποθέσεις οι οποίες έχουν κατά μήκος σχήμα δέλτα εμφανίζουν ένα σημείο στην κορυφή του τριγώνου το οποίο διαχωρίζει την ανάντη κλίση του πρανούς με την κατόντη κλίση. Στην περίπτωση ταμιευτήρων πληρωμένους με ιζήματα, όπως λεκάνες συντριμμίων, όπου οι αποθέσεις φτάνουν μέχρι το φράγμα το σημείο αλλαγής της κλίσης προσδιορίζεται από τον υπερχειλιστή.

3.8. Κλίση του ανάντη πρανούς

Η κλίση του δέλτα είναι βασικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του μήκους των αποθέσεων καθώς και του διαθέσιμου όγκου για την αποθήκευση των απόθέσεων.

Η πιο συχνή περίπτωση είναι η κλίση του ανάντη πρανούς του δέλτα να είναι περίπου η μισή της κλίσης του ποταμού (Borland, 1971) και συνήθως αυτή χρησιμοποιείται ως τυπική τιμή. Καλύτερη στατιστική ανάλυση από δεδομένα αποθέσεων σε ταμιευτήρες στις ΗΠΑ έδειξαν όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Strand & Pemberton, 1987) ότι η κλίση του ανάντη πρανούς κυμαίνεται από το ρηχό 20% της αρχικής κλίσης του ποταμού μέχρι και σε 100% αυτής.



Εικόνα 3-10:Κλίση ανάτη πρανούς αποθέσεων συναρτήσει της αρχικής κλίσης του καναλιού.(Morris & Fan, 1998)

3.9. Κλίση του κατάντη πρανούς

Η κλίση του κατάντη πρανούς μπορεί να προσδιοριστεί με εμπειρικές σχέσεις οι οποίες, όπως και όλες οι εμπειρικές σχέσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή και σε περιπτώσεις που οι συνθήκες ομοιάζουν με τις συνθήκες των περιπτώσεων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της σχέσης.

Οι Strand and Pemberton(1987) παρατηρούν ότι η μέση κατάντη κλίση των ταμιευτήρων που καταγράφονται στο Bureau of Reclamation είναι 6.5 φορές η κλίση του ανάντη πρανούς, αν και μερικοί ταμιευτήρες έχουν κλίση μεγαλύτερη κατά μία τάξη μεγέθους από αυτή την τιμή. Η κατάντη κλίση του δέλτα της λίμνης Mead είναι 100 φορές η ανάντη κλίση του. Ταμιευτήρες στην Κίνα, αντίθετα, με μεγάλο ποσοστό ιλύος έχουν κατάντη κλίση 1,6 φορές την αρχική κλίση του ποταμού. Γενικώς παρατηρείται πως τα πρανή με χονδρόκοκκα γωνιώδη υλικά έχουν μεγαλύτερη κλίση από τα πρανή με περισσότερα λεπτόκοκκα υλικά.

3.10. Αποθέσεις κατάντη του δέλτα

Οι αποθέσεις κατάντη του δέλτα είναι λεπτόκοκκες αποθέσεις πηλού και ιλύος οι οποίες αποτίθενται πιο ομοιόμορφα σε ολόκληρο τον πυθμένα του ταμιευτήρα. Σχηματίζουν στρώματα τα οποία τείνουν να στερεοποιηθούν και να σχηματίσουν μία πυκνή δύσκολα διαβρώσιμη μάζα. Η μεταφορά αυτών των υλικών εξαρτάται κυρίως από την κυκλοφορία των νερών. Η κυκλοφορία των νερών αναφέρεται κυρίως σε ρεύματα πυκνότητας τα οποία επηρεάζονται από την εισροή του ποταμού και την στρωματοποίηση του ταμιευτήρα.

Τα ρεύματα του νερού καθώς και τα κύματα μπορούν σε μεγάλους ταμιευτήρες να θέσουν σε αιώρηση αποτεθειμένα υλικά σε ρηχά σημεία και να τα επαναποθέσουν σε άλλο σημείο. Σε πολύ μεγάλους ταμιευτήρες τα ρεύματα τείνουν να εκτρέπονται στο βόρειο ημισφαίριο δεξιόστροφα λόγω της Κοριόλιου επιτάχυνσης.

Το σχήμα του στρώματος εξαρτάται και από τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της μεταφερόμενης αργίλου. Οι ταξινόμηση των αργίλων γίνεται σε τρεις ομάδες: μοντοριλλονίτες και μπετονίτες, μαρμαρυγίες(ιλλίτες) και καολινίτες. Εάν ο συνδυασμός της αργίλου με τα διαλυμένα άλατα του νερού ευνοεί την κροκίδωση, τότε τα ιζήματα αργίλου καθιζάνουν σχετικά γρήγορα. Έτσι οι αποθέσεις συγκεντρώνονται κοντά στον πόδα του δέλτα και είναι πιο πυκνές.

Άλλη περίπτωση αποτελεί η περίπτωση όπου ορισμένοι συνδυασμοί ορυκτών αλάτων και αργίλου οδηγούν στην απόθεση σχεδόν αμέσως υπό τη μορφή μιας θιξοτροπικής μάζας(gel). Το υλικό αυτό έχει μικρή πυκνότητα, ομοιάζει με 'gel' και ρέει με την άσκηση δύναμης πάνω της, ενώ συμπεριφέρεται σαν στερεό εάν δεν εφαρμόζεται πάνω της κάποια δύναμη. Η μάζα αυτή διατηρεί μία κλίση επιφάνειας πάνω από την στάθμη του νερού ίση με 0,0002. Κάτω από την επιφάνεια του νερού έχει κλίση μεταξύ 0,0028-0,0034. Οι διακυμάνσεις της στάθμης του νερού ωθούν τη μάζα να κυλίσει κατά την ταπείνωση της στάθμης και επιτρέπουν επιπλέον απόθεση πάνω στα πρώτα στρώματα όταν αυτή ανέβει.

Μία τάξη μεγέθους των μικρών πυκνοτήτων που εμφανίζονται θα μπορούσε να είναι από $80\text{kg}/\text{m}^3$ (800kPa ειδικό βάρος) σε λεπτότερες αποθέσεις μέχρι $240\text{kg}/\text{m}^3$ ($2,4\text{MPa}$ ειδικό βάρος).

Για στερεοποιημένες λεπτόκοκκες αποθέσεις οι (Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation, 1997) εκτιμούν πως οι αποθέσεις ιλύος και πυλού στους ταμιευτήρες έχουν πυκνότητα που κυμαίνεται από $1100-1700\text{kg}/\text{m}^3$ και συνεκτικότητα μεγαλύτερη των 10kPa .

3.11. Πυκνότητα φερτών υλών

Συνήθως τα δεδομένα στερεοπαροχής έχουν μονάδες μάζας σε μονάδα χρόνου. Για να έχουν αξία όμως αυτές οι τιμές θα πρέπει να μπορεί να εκτιμηθεί ο όγκος ο οποίος θα καταληφθεί από τις τελικές αποθέσεις. Πρέπει λοιπόν να υπάρχει τρόπος εκτίμησης της πυκνότητας των φερτών υλών όταν αποτίθενται. Η εκτίμηση αυτή είναι δύσκολη διότι ο όγκος που θα καταλαμβάνει μια δεδομένη μάζα αποτεθιμένων φερτών υλών εξαρτάται από τα ποσοστά άμμου, ιλύος, αργίλου των υλικών, από το βάθος της απόθεσης, τα ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά των μεταφερόμενων αργίλων αλλά και τα χαρακτηριστικά του νερού, την διακύμανση της στάθμης ιδιαίτερα όταν οι αποθέσεις εναλλασσόμενα βυθίζονται και εκτίθενται στην ατμόσφαιρα.

Για την εκτίμηση του ειδικού βάρους των εναποτιθέμενων φερτών υλών οι (Lara & Pemberton, 1963) πρότειναν την εξής μέθοδο:

Ο ταμιευτήρας κατατάσσεται σε μία από τις 4 κατηγορίες:

Χαρακτηριστικά λειτουργίας ταμιευτήρα	Τύπος
Το φερτό υλικό είναι πάντα ή σχεδόν πάντα βυθισμένο κάτω από την στάθμη του ταμιευτήρα	I
Μέτριες έως σημαντικές πτώσεις της στάθμης	II
Ταμιευτήρες κανονικά άδειοι (π.χ. αντιπλημμυρικοί)	III
Ταμιευτήρες με φερτές ύλες κοίτης (φορτίο πυθμένα μόνο)	IV

Έτσι με την εκτίμηση του τύπου του ταμιευτήρα από τον πίνακα το μοναδιαίο βάρος δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma = W_c P_c + W_m P_m + W_s P_s \tag{2.1}$$

Όπου

γ το αρχικό ειδικό βάρος των αποτιθέμενων υλών σε lb/ft³ (λίμπρες ανά κυβικά πόδια)

W_c, W_m, W_s συντελεστές για άργιλο, ιλύ και άμμο αντίστοιχα

P_c, P_m, P_s τα ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου αντίστοιχα

Τύπος ταμιευτήρα	W_c	W_m	W_s	Φ_c	Φ_m	Φ_s
I	26	70	97	0	5.7	16
II	35	71	97	0	1.8	8.4
III	40	72	97	0	0	0
IV	60	73	97	-	-	-

Πίνακας 3-1: Τιμές συντελεστών για την εφαρμογή της μεθόδου εκτίμησης μοναδιαίου βάρους.

Η επιρροή του χρόνου δίνεται από τον τύπο:

$$W = \gamma + K \log_{10}(T) \tag{2.2}$$

Όπου:

W το ειδικό βάρος μετά από χρόνο T και K συντελεστής μέσω του οποίου εκφράζεται η επιρροή της στερεοποίησης και έχει τιμή:

$$K = \Phi_c P_c + \Phi_m P_m + \Phi_s P_s \tag{2.3}$$

Στον πίνακα δίδονται μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές πυκνότητας για αποθέσεις ταμιευτήρων είτε βυθισμένες είτε εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα.

Dominant grain size	Always	
	Submerged	Aerated
Clay	0.64–0.96	0.96–1.28
Silt	0.88–1.20	1.20–1.36
Clay-silt mixture	0.64–1.04	1.04–1.36
Sand-silt mixture	1.20–1.52	1.52–1.76
Sand	1.36–1.60	1.36–1.60
Gravel	1.36–2.00	1.36–2.00
Poorly sorted sand and gravel	1.52–2.08	1.52–2.08

Πίνακας 3-2:Τιμές πυκνότητας αποθέσεων φερτών υλών.(ASCE Task Committee, 2008)

3.12. Εκτίμηση κατανομής αποθέσεων φερτών υλών

Λόγω της πολυπλοκότητας των διαδικασιών που επηρεάζουν την απόθεση των φερτών υλών είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εμπειρικών μεθόδων και αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης για την ικανοποιητική πρόβλεψη-εκτίμηση της κατανομής των αποτιθέμενων φερτών υλών.

Οι μέθοδοι χωρίζονται σε εμπειρικές μεθόδους και σε μαθηματικά μοντέλα

3.13. Εμπειρικές μέθοδοι

Υπάρχει μία πληθώρα εμπειρικών μεθόδων η οποία στηρίζεται σε ανάλυση δεδομένων υπαρχόντων ταμιευτήρων.

Η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η 'Εμπειρική μέθοδος μείωσης της επιφάνειας' (Empirical area reduction method) η οποία έχει αναπτυχθεί από τους (Strand & Pemberton, 1987)

Άλλες εμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί από τους Graf,Bruk,(Annandale, 1987),Zhang and Qian.

Ακόμα εκτίμηση μπορεί να γίνει με αξιοποίηση της εργασίας του Pemberton(1980) όπου εξετάζεται η ανάντη κλίση του δέλτα των αποθέσεων.

3.14. Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης

Τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης. Τα μαθηματικά μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να κάνουν ακριβέστερη προσομοίωση και μάλιστα σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Όμως και πάλι η πολυπλοκότητα των φαινομένων καθώς και ο τρισδιάστατος χαρακτήρας της ροής δεν καθιστά εφικτή την πλήρως μαθηματική προσομοίωση μίας τέτοιας διαδικασίας αλλά ακόμα και αν ήταν εφικτό θα ήταν ανεπιθύμητο λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου που θα προέκυπτε.

Κυρίως αυτά τα μοντέλα είναι μονοδιάστατης ροής και προφανώς και συνεπώς εκφράζουν καλύτερα ταμιευτήρες με μεγάλο μήκος σε σχέση με το πλάτος και το βάθος τους.

3.15. Συμπεράσματα

Η πρόβλεψη της κατανομής των αποθέσεων των φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα είναι διαδικασία περίπλοκη και δυσχερής αναλυτικά. Μπορούν όμως να γίνουν ποιοτικές περιγραφές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα.

Ένας ταμιευτήρας δεν δεσμεύει απαραίτητα το σύνολο των φερτών υλών που εισέρχονται σε αυτόν. Μεγάλοι υδρολογικά ταμιευτήρες δεσμεύουν μεγαλύτερο ποσοστό μέχρι και 100%.

Τίθεται ζήτημα γενικής αξιολόγησης του σχεδιασμού ενός ταμιευτήρα εφόσον οι φερτές ύλες τείνουν να αποτίθενται κυρίως στα ανάντη του ταμιευτήρα μέσα στον ωφέλιμο όγκο και όχι στον νεκρό όγκο κοντά στο φράγμα.

Έχουν προταθεί συσχετίσεις της ανάντη κλίσης του πρανούς των αποθέσεων στο δέλτα από την αρχική κλίση του πυθμένα του καναλιού, αλλά και τιμές της κλίσης του κατόντη πρανούς. Τα όρια αυτά έχουν χρησιμότητα σε περιπτώσεις πρόβλεψης του όγκου του δέλτα απόθεσης σε ένα ταμιευτήρα με καθαρά γεωμετρικές θεωρήσεις.

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος επιτρέπει μόνο μεθόδους εκτίμησης εμπειρικής φύσης με μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης ή εργαστηριακά ομοιώματα για διάφορες περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 4

Μέθοδοι απομάκρυνσης φερτών υλών από ταμιευτήρες

4.1. Εισαγωγή

Η συσσώρευση φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα είναι διαδικασία η οποία δεν μπορεί να αποφευχθεί. Ο υπολογισμός είναι δύσκολος και οι ερευνητές διαφωνούν όμως εκτιμάται πως κάθε χρόνο χάνεται 1-2% της παγκόσμιας ωφέλιμης χωρητικότητας ταμιευτήρων εξαιτίας της απόθεσης φερτών υλικών. Η απόθεση φερτών υλών μπορεί να μη μπορεί να εξαιρεθεί πλήρως, μπορεί όμως να περιοριστεί, να ποσοτικοποιηθεί και να ενταχθεί στον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός τέτοιου έργου εξασφαλίζοντας μία λειτουργία 'διαχείρισης φερτών υλών' και αειφόρο σχεδιασμό στον ταμιευτήρα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν οι βασικές μέθοδοι οι οποίοι μπορούν να υιοθετηθούν κατά τη διαχείριση των φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα.

4.2. Μέθοδοι διαχείρισης φερτών υλικών

Ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: α) μέθοδοι ελαχιστοποίησης της εισροής φερτών υλικών, β) μέθοδοι ελαχιστοποίησης της απόθεσης φερτών υλικών, γ) μέθοδοι μεγιστοποίησης της εκροής φερτών υλικών.

4.2.1. Διαχείριση λεκάνης απορροής

Λήψη μέτρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής για την ελαχιστοποίηση της διάβρωσης και του ποσοστού απόδοσης των υλικών στον ταμιευτήρα, με μεθόδους όπως δένδροφυτεύσεις, φράγματα συντριμμίων, κατασκευές εμποδίων στη ροή και κατακράτησης φερτών υλών. Ο (Mahmood, 1987) αμφισβήτησε την αποτελεσματικότητα της πολιτικής αυτής όσον αφορά την απόθεση υλικών σε ταμιευτήρα διότι οι υπολεκάνες απορροής αποθηκεύουν μέχρι και το 90% των διαβρωμένων υλικών τα οποία έπειτα έχουν τη δυνατότητα να επανεισαχθούν στη

ροή.Γενικώς σε μεγάλες λεκάνες η μέθοδος αυτή δεν φαίνεται να μειώνει την τελική απόθεση φερτών υλικών στον ταμιευτήρα.

Ειδικά για τη συγκράτηση χονδρόκοκκων υλικών χρησιμοποιούνται σε ορεινές περιοχές φράγματα συντριμμιάτων.Στην περίπτωση αυτή τα υλικά που συγκρατούνται θα πρέπει περιοδικά να απομακρύνονται.Η λύση μπορεί να είναι εφικτή μόνο όταν η πρόσβαση στο φράγμα συντριμμιών είναι εύκολη και υπάρχει τρόπος επαναχρησιμοποίησης των χονδρόκοκκων υλικών(π.χ αδρανή).Σε άλλη περίπτωση γενικώς κρίνεται ως φθηνότερη η εξασφάλιση επιπλέον χώρου στον ταμιευτήρα.

4.2.2. Παράκαμψη του ταμιευτήρα

Εξετάζεται η περίπτωση ο ταμιευτήρα να μπορεί να παρακαμφεί (reservoir by-pass) με κατάλληλες κατασκευές(π.χ σήραγγα εκτροπής) κατά τις περιόδους μεγάλης φόρτισης σε φερτές ύλες.Τέτοια αντιμετώπιση μπορεί να είναι εφικτή μόνο υπό ευνοϊκές μορφολογικές συνθήκες,δηλαδή στροφές και μαιάνδρους στον ποταμό.Ιδιαιτερότητα αποτελεί η αντοχή σε διάβρωση που θα πρέπει να έχει η κατασκευή εκτροπής και τα πιθανά κόστη συντήρησής της.

Άλλη περίπτωση είναι παρόμοια με την ανωτέρω είναι να μπορεί να κατασκευαστεί ταμιευτήρας εκτός της κύριας ροής και να εκτρέπονται σε αυτόν ροές νερού με χαμηλές ποσότητες μεταφερόμενων υλικών.

4.2.3. Κατασκευές κατακράτησης φερτών υλών

Κατασκευές όπως δεξαμενές καθίζησης ή εξαμμωτές με σκοπό να προστατεύσουν τις κατασκευές εισαγωγής νερού ή μικρούς ταμιευτήρες με ποιοτικούς περιορισμούς στην ποσότητα μεταφερόμενων υλικών,λόγω χρήσης.

4.2.4. Διαρροή ρευμάτων πυκνότητας(density current venting)

Στους ταμιευτήρες σχηματίζονται πολλές φορές ρεύματα πυκνότητας που μεταφέρουν φερτά υλικά κοντά στο φράγμα.Τα ρεύματα αυτά έχουν τη μορφή μίγματος λεπτόκοκκων υλικών και νερού βαρύτερο από το νερό το οποίο κινείται με τη βαρύτητα εντός του υδάτινου στάσιμου όγκου του νερού του ταμιευτήρα.Με αυτόν

τον τρόπο οι φερτές ύλες μπορούν να δρομολογηθούν και να φτάσουν κοντά στο φράγμα. Υπάρχει δυνατότητα με κατάλληλες εξόδους στο φράγμα τα ρεύματα αυτά με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά υλικά να απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι απαραίτητη η ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα.

4.2.5. Μείωση κατακράτησης φερτών υλών με ταπείνωση της στάθμης (sluicing)

Είναι μέθοδος δρομολόγησης κατά την οποία καταβιβάζεται η στάθμη του ταμιευτήρα για κάποιο χρονικό διάστημα με σκοπό να μειωθεί η ικανότητα παγίδευσης του ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας κατά τη διάρκεια της περιόδου των πλημμυρών λειτουργεί σε χαμηλότερη στάθμη, έτσι διατηρείται η ικανότητα μεταφοράς λεπτόκοκκων φερτών υλών από τη ροή και αυτές απομακρύνονται μέσω της ροής χωρίς να αποτεθούν στον ταμιευτήρα. Μετά την περίοδο πλημμυρών η στάθμη του ταμιευτήρα μπορεί να ανέβει και αυτός να γεμίσει με σχετικά καθαρό νερό. Ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα μειώνεται καθώς και ο χρόνος λειτουργίας του. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου συνήθως εξαρτάται από την ποσότητα των πλημμυρικών παροχών, τη διάμετρο των μεταφερόμενων υλικών και την μορφολογία του ταμιευτήρα.

4.2.6. Έκπλυση (flushing)

Κατά την έκπλυση ταμιευτήρα ταπεινώνεται η στάθμη του κατά τη διάρκεια της περιόδου των πλημμυρών και οι αυξημένες ταχύτητες της ροής επανεκκινούν τις αποθέσεις φερτών υλών και τις απομακρύνουν από χαμηλές εξόδους. Η έκπλυση πολλές φορές χρησιμοποιείται σε συνδυασμό ή εναλλακτικά με ταπείνωση της στάθμης (βλέπε 4.2.5). Στο επόμενο κεφάλαιο θα διερευνηθεί διεξοδικά η μέθοδος της έκπλυσης.

4.2.7. Μηχανική απομάκρυνση

Οι φερτές ύλες στους ταμιευτήρες θα μπορούσαν να απομακρυνθούν με μηχανικά μέσα με τον ταμιευτήρα να βρίσκεται σε λειτουργία. Ένας τρόπος είναι η βυθοκόρηση και η μηχανική αναρρόφηση (dredging) των αποθεθειμένων υλικών από τον πυθμένα του ταμιευτήρα, κάτω από το νερό. Χαρακτηριστικό των μηχανικών μεθόδων είναι το μεγάλο κόστος. Το κόστος της συμβατικής υδραυλικής αναρρόφησης είναι γενικώς

πιο μεγάλο από το κόστος εύρεσης επιπλέον ωφέλιμου όγκου με κατασκευή άλλου φράγματος. Οικονομικά εφικτός μπορεί να είναι ένας συνδυασμός μεθόδων εφαρμογής απομάκρυνσης φερτών υλών με αναρρόφηση με άλλες μεθόδους. Άλλο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το πρόβλημα διάθεσης των απομακρυνόμενων υλικών.

Μηχανική απομάκρυνση μπορεί να γίνει εν ξηρώ, αδειάζοντας τον ταμιευτήρα κατά την ξηρή περίοδο και απομακρύνοντας τα αποθεμιμένα υλικά. Το κόστος είναι πολύ μεγάλο και τέτοιες πρακτικές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε μικρούς ταμιευτήρες. Αποτελεί όμως και την μόνη ουσιαστικά λύση για περιπτώσεις πληρωμένων ταμιευτήρων με χονδρόκοκκα υλικά.

4.3. Αποδόμηση του φράγματος

Δεν αποτελεί τεχνική διαχείρισης φερτών υλών σε ταμιευτήρες είναι όμως επιλογή σε περίπτωση όπου δεν ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της απόθεσης των φερτών υλών με αποτέλεσμα ο ταμιευτήρας να γεμίσει.

Εάν συμβεί αυτό μπορούν να εξεταστούν δύο ενδεχόμενα.

Το πρώτο να διατηρηθεί το φράγμα ως έχει λαμβάνοντας απαραίτητα μέτρα για την ασφαλή διατήρησή του.

Το δεύτερο να αποδομηθεί πλήρως το φράγμα και επαναφορά της φυσικής ροής του ποταμού. Θα πρέπει να εξασφαλισθεί η ασφαλής διάβρωση των αποθέσεων από τη ροή τηρώντας τους περιβαντολλογικούς περιορισμούς.

4.4. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφία εμφανίζει πληθώρα προτεινόμενων λύσεων για την ανάκτηση του χαμένου ωφέλιμου όγκου σε ένα ταμιευτήρα. Μπορεί να εφαρμοστεί αμιγώς μία μέθοδος αλλά και συνδυασμός αυτών ώστε να επιτευχθεί μία μακροχρόνια βιώσιμη λύση. Οι ιδιαιτερότητες κάθε έργου και η πληθώρα των παραγόντων που επηρεάζουν καθιστούν τις λύσεις που δίνονται μη άμεσα εφαρμόσιμες σε άλλες περιπτώσεις. Είναι δύσκολη η γενίκευση για την δυνατότητα (τεχνική και οικονομική) εφαρμογής μίας μεθόδου και μπορούν μόνο γενικά και ποιοτικά να περιγράψουν τα κριτήρια και οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εκπόνηση μίας μελέτης διαχείρισης φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα.

Η πιο δημοφιλής μέθοδος στη διαθέσιμη βιβλιογραφία είναι σαφώς η μέθοδος της υδραυλικής έκπλυσης σε ένα ταμειυτήρα.

Κεφάλαιο 5

Υδραυλική Έκπλυση

5.1. Εισαγωγή

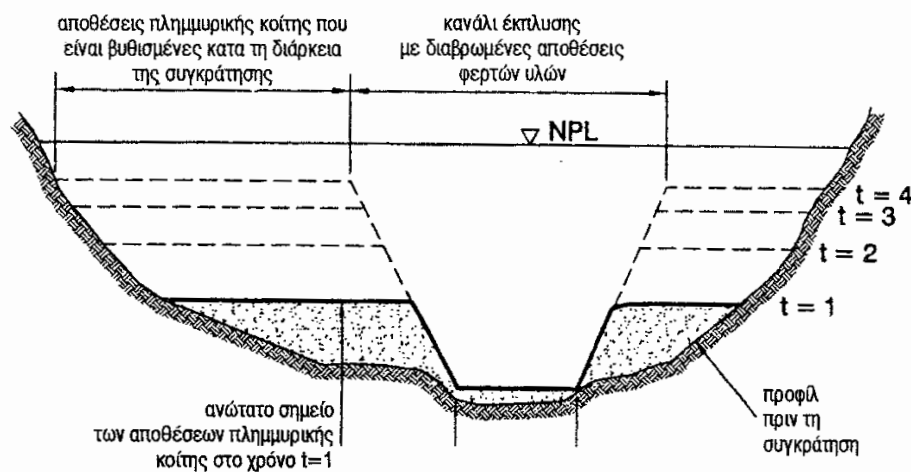
Η πιο δημοφιλής μέθοδος,στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, καθαρισμού ταμιευτήρων από φερτές ύλες είναι η έκπλυση.Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει προσπάθεια να δοθούν οι βασικές αρχές που διέπουν τη μέθοδο,οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία,καθώς και τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν.

5.2. Περιγραφή-Μηχανισμός

Η έκπλυση φερτών υλών είναι υδραυλική μέθοδος,η επαναιώρηση,μετακίνηση και τελικώς η απομάκρυνση των αποτεθειμένων φερτών υλικών επιτυγχάνεται με τις αυξημένες ταχύτητες ροής και τις συρτικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται.

Η υδραυλική έκπλυση εφαρμόζεται με τον εξής τρόπο.Θεωρείται πως ο ταμιευτήρας βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο πλήρωσης από φερτά υλικά,τα οποία βρίσκονται πλέον πολύ κοντά στο φράγμα.Προγραμματίζεται λοιπόν η ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα μέχρι τον πυθμένα,με στόχο να αποκατασταθούν συνθήκες ποτάμιας ροής στον ταμιευτήρα.Η ροή του ποταμού πλέον γίνεται μέσα από τις λεπτόκοκκες αποθέσεις των φερτών υλικών,παρασέρνοντας υλικά προς τις εξόδους και διαβρώνοντας ένα κανάλι μέσα στον ταμιευτήρα και στις αποθέσεις φερτών υλών.Η διάβρωση του καναλιού ξεκινάει από την εγγύς περιοχή του φράγματος,όπου αναμένονται να παρατηρηθούν και οι μεγαλύτερες ταχύτητες, και προχωράει προοδευτικά προς τα ανάντη μέχρι και το χονδρόκοκκο δέλτα του ποταμού.Το κανάλι έχει την τάση να βαθύνει μέχρι τον παλιό πυθμένα του ταμιευτήρα.Μετά το εκ νέου γέμισμα του ταμιευτήρα με νερό το κανάλι παραμένει βυθισμένο και συντηρείται με επαναλαμβανόμενες επόμενες εφαρμογές της διαδικασίας όπου απομακρύνονται οι νέες αποθέσεις εντός του καναλιού.Η διαδικασία της απόθεσης των φερτών υλών συνεχίζεται στον πυθμένα έτσι οι όχθες αναμένεται να συνεχίσουν να ανυψώνονται ενώ το κανάλι παραμένει σταθερό.Ακόμη αναμένεται μεγαλύτερος όγκος νέων αποθέσεων στον πυθμένα του καναλιού από τις όχθες του.Στην εικόνα δίνεται μία άποψη της μορφής των αποθέσεων στον ταμιευτήρα μετά την πρώτη έκπλυση και τη

δημιουργία του καναλιού, όπου φαίνεται η διατομή του καναλιού και οι νέο διαμορφωθείσες όχθες του ήπιας κλίσης καθώς και η αναμενόμενη ανύψωσή τους.

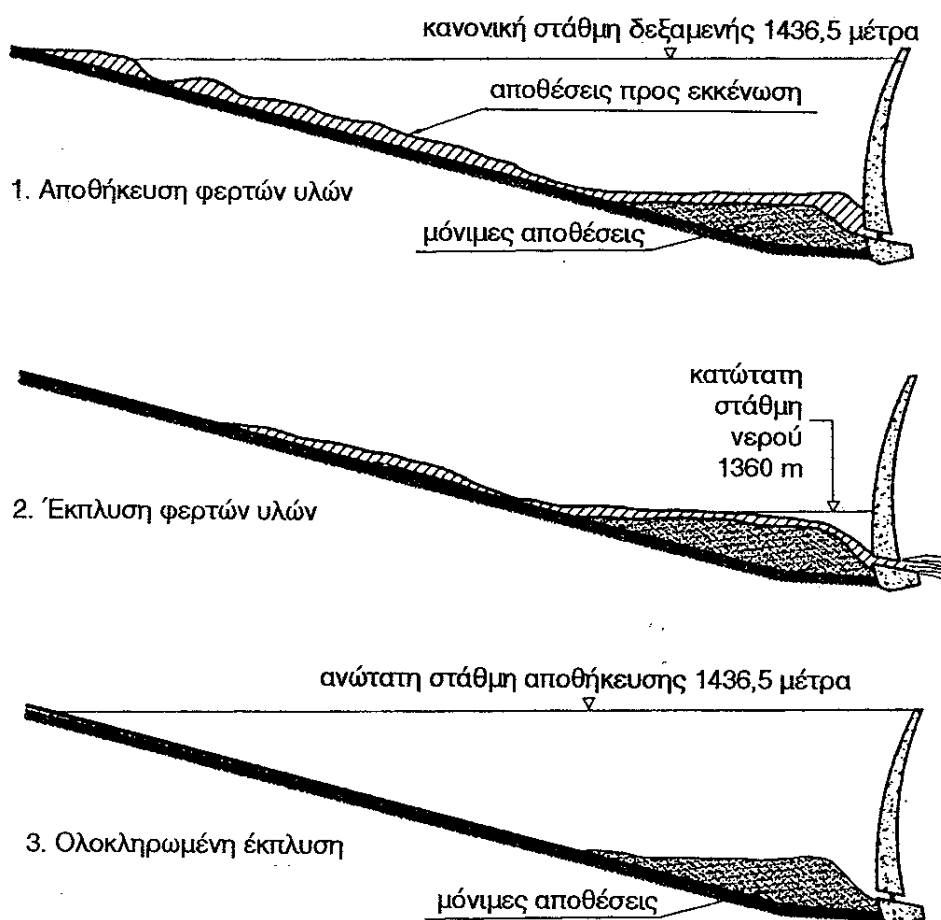


Εικόνα 5-1: Άποψη διατομής διαβρωθέντος καναλιού σε αποθέσεις ταμιευτήρα κατόπιν έκπλυσης. (Morris & Fan, 1998)

Ήδη είναι δυνατό να κατανοήσει κανείς κάποιες πρώτες προϋποθέσεις καθώς και προβλήματα που είναι δυνατό να προκύψουν κατά τη διαδικασία εφαρμογής μίας επιτυχημένης έκπλυσης. Για παράδειγμα είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων εξόδων σε μεγάλο βάθος για την απομάκρυνση των παροχών έκπλυσης καθώς και του μεγάλου φορτίου στερεών υλικών που θα μεταφέρουν, κατασκευές οι οποίες είτε θα έχουν προβλεφθεί κατά την αρχική κατασκευή του έργου είτε θα πρέπει να κατασκευαστούν σε περιπτώσεις υπάρχοντος έργου. Ακόμα θα πρέπει κατά το χρόνο της έκπλυσης να υπάρχουν οι απαραίτητες παροχές ώστε να γίνει η διάβρωση των υλικών ενώ σαφώς πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαδικασία στον προγραμματισμό της λειτουργίας του ταμιευτήρα.

Λόγω διαφόρων περιορισμών, π.χ. μικρό βάθος εξόδων έκπλυσης, δυσκολία διατήρησης ποτάμιων συνθηκών λόγω διακυμάνσεως των εισροών ή και αδυναμία πλήρους εκκένωσης ταμιευτήρα για λειτουργικούς λόγους, είναι δυνατό η έκπλυση να πραγματοποιηθεί με διατήρηση στάθμης ανάντη του φράγματος και ροή στην περιοχή του φράγματος υπό πίεση. Τότε η διάβρωση των αποθέσεων θα έχει τη μορφή ενός κώνου στην περιοχή των εξόδων στο κομμάτι που παραμένει βυθισμένο, ενώ απομακρύνονται και υλικά από τις ανάντη εκτεθειμένες περιοχές στα κατάντη. Γενικώς η παραλλαγή κρίνεται ως λιγότερο αποτελεσματική από την έκπλυση με πλήρη ταπείνωση της στάθμης διότι απομακρύνονται αποθέσεις κυρίως από την περιοχή του κώνου ενώ οι αποθέσεις από τα ανάντη μεταφέρονται αρχικά

προς τα κατάντη και έπειτα απομακρύνονται. Στην εικόνα δίνεται άποψη των αποθέσεων που αναμένεται να απομακρυνθούν στην περίπτωση όπου γίνεται έκπλυση υπό πίεση.



Εικόνα 5-2:Στιγμιότυπα απομάκρυνσης φερτών υλών κατά την έκπλυση υπό πίεση.(Morris & Fan, 1998)

5.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή και την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης

Για να είναι εφικτή η εφαρμογή υδραυλικής έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα με πρόβλεψη διαχείρισης φερτών υλών πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι θα γίνει προσπάθεια να συνοψισθούν παρακάτω.

5.3.1. Υδραυλικές συνθήκες

Για να εφαρμοστεί επιτυχώς η έκπλυση θα πρέπει να δημιουργηθούν εντός του ταμιευτήρα συνθήκες ποτάμιας ροής για επαρκές χρονικό διάστημα, ενώ η στάθμη του ταμιευτήρα θα πρέπει να παραμείνει σε χαμηλό ύψος με μικρές διακυμάνσεις.

Εκτιμάται (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001) ότι για να επιτευχθεί αυτό:

- Είναι απαραίτητη η ύπαρξη εξόδων εκκένωσης σε μεγάλο βάθος για την παροχέτευση της ροής έκπλυσης.

- Θα πρέπει η παροχτευτικότητα της εξόδου εκκένωσης να είναι επαρκής για ώστε να διατηρηθεί η στάθμη του ταμιευτήρα σταθερή και σε χαμηλό υψόμετρο κατά τη διάρκεια της έκπλυσης.

- Οι απαραίτητες παροχές έκπλυσης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιες της μέσης ετήσιας παροχής.

- Ο συνολικός όγκος νερού διαθέσιμου προς έκπλυση θα πρέπει να εκτιμάται σε τουλάχιστον 10% του μέσου ετήσιου εισρέοντος όγκου.

Οι δύο τελευταίοι περιορισμοί τίθενται για την εξασφάλιση της απαραίτητης ποσότητας νερού για την διάβρωση των αποθέσεων κατά την έκπλυση.

5.3.2. Ποσότητα νερού διαθέσιμου για έκπλυση

Σε συνέχεια των ανωτέρω, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι μπορούν να υπάρξουν διαθέσιμες αρκετά μεγάλες παροχές και για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί η διάβρωση, η μετακίνηση και η απομάκρυνση των αποτεθειμένων φερτών υλών.

Επιπλέον ζητούμενο είναι οι επιπτώσεις στην λειτουργία του ταμιευτήρα λόγω της εφαρμογής της έκπλυσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερες. Η διαθεσιμότητα συνεπώς του νερού προς έκπλυση προκύπτει από πρόβλεψη και εξισορρόπηση της ζήτησης νερού για την ορθή λειτουργία του ταμιευτήρα και της ζήτησης του νερού για την έκπλυση των φερτών υλικών.

Οι υδρολογικώς μικροί ταμιευτήρες όπου η ετήσια η εισροή είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τον όγκο τους είναι καταλληλότεροι για έκπλυση, διότι το νερό που θα καταναλωθεί κατά τη διαδικασία θα είναι ένα κλάσμα των ετήσιων εισροών του και

συνεπώς αναμένεται η έκπλυση να είναι εφικτή δίχως μεγάλες διαταραχές στη λειτουργία του ταμιευτήρα. Ο λόγος του ωφέλιμου όγκου προς τον ετήσιο όγκο εισροών εκτιμάται ότι πρέπει να είναι το πολύ 0,3.

Επίσης ευνοούνται οι ταμιευτήρες που παρουσιάζουν κανονικό περιοδικό κύκλο εισροών με διακριτή περίοδο πλημμυρικών παροχών. Για παράδειγμα ταμιευτήρες σε περιοχές που επηρεάζονται από μουσώνες και ταμιευτήρες όπου εμφανίζονται πλημμυρικές εισροές λόγω του ετήσιου λιώσιμου των πάγων την άνοιξη και το καλοκαίρι. Η γνώση του χρόνου των πλημμυρών ευνοεί των προγραμματισμό της λειτουργίας του έργου αλλά και κάνει εφικτή την εφαρμογή της έκπλυσης των φερτών υλικών λόγω των αυξημένων παροχών κατά την περίοδο αυτή. Η ταπείνωση της στάθμης και η εφαρμογή της έκπλυσης ευνοείται να γίνει κατά τις αρχές της περιόδου πλημμυρών ώστε να εξασφαλίζονται παροχές ικανές να διαβρώσουν τις αποθέσεις, να απομακρύνονται οι πλημμυρικές παροχές με μεγάλο φορτίο στερεών και να υπάρχει το περιθώριο ο ταμιευτήρας να ξαναγεμίσει προς το τέλος της περιόδου με σχετικά πιο καθαρό νερό από άποψη στερεών φερτών υλικών.

5.3.3. Κοκκομετρία φερτών υλικών

Η κοκκομετρία των αποθεθειμένων φερτών υλών είναι βασικός παράγοντας που κρίνει το κατά πόσο η ποσότητα του διαθέσιμου νερού προς έκπλυση είναι ικανή να μεταφέρει την ποσότητα των αποθεθειμένων υλικών.

Τα χονδρόκοκκα υλικά απομακρύνονται πιο δύσκολα-χρειάζονται μεγαλύτερες ταχύτητες- από τα λεπτόκοκκα. Τα χονδρόκοκκα υλικά αποτίθεται από τα ανάντη προς τα κατόντη και πλησιάζουν το φράγμα. Γι αυτό και είναι επιθυμητό να υπάρχουν λιγιστά χονδρόκοκκα φερτά υλικά.

Είναι ευνοϊκό το ποσοστό εισερχόμενου φορτίου κοίτης σε σχέση με το εισερχόμενο στον ταμιευτήρα φορτίο σε αιώρηση να είναι μικρό. Να εισέρχονται δηλαδή κατά το δυνατόν λιγότερα χονδρόκοκκα υλικά. Τέτοιες συνθήκες αναφέρονται συνήθως σε χαλικώδεις ποταμούς με καλή διαβάθμιση στο υλικό κοίτης. Σε μεγάλα ποτάμια ίδιες συνθήκες υπάρχουν για μικρές κλίσεις πυθμένα, έστω 0,002-0,001 ή για μικρά ποτάμια για 0,002-0,005.

Αν λάβουμε υπόψη μας μόνο το μέγεθος των κόκκων των αποθέσεων, τα δέλτα αποθέσεων που αποτελούνται από λεπτή άμμο και χονδρή ιλύ είναι πιθανότερο να απομακρυνθούν επιτυχώς, διότι τα χονδρότερα υλικά είναι δυσκολότερο να

απομακρυνθούν και λεπτότερα αποτίθενται έξω από το κανάλι έκπλυσης και γίνεται πλέον αδύνατο να απομακρυνθούν.

5.3.4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα

Η έκπλυση στους ταμιευτήρες οι οποίοι προσεγγίζουν περισσότερο το κανάλι έκπλυσης είναι πιθανότερο να είναι επιτυχημένη. Δηλαδή ταμιευτήρες σχήματος χαράδρας, μεγάλου μήκους και σχετικώς στενοί.

5.3.5. Επιπτώσεις κατάντη του ταμιευτήρα

Η έκπλυση ταμιευτήρα η οποία θα διαρκέσει από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες παροχετεύει νερό με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις φερτών υλών, μεγαλύτερες των 100g/L η ακόμα και των 1000g/L. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα σε πιθανές κατάντη εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού ή να βουλώσουν κανάλια και αγωγούς. Ακόμα να οδηγήσουν σε αποθέσεις σε κατάντη κανάλια αυξάνοντας τον μελλοντικό κίνδυνο πιθανών πλημμυρών η ακόμα και την δυνατότητα πλεύσης σε αυτά.

Ακόμη δέσμευση είναι και οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις στερεών μπορούν να προκαλέσουν ανοξικές συνθήκες και να οδηγήσουν στην απώλεια της χλωρίδας και της πανίδας του ποταμού.

5.3.6. Οικονομικά σκοπιμότητα

Θα πρέπει η οικονομική μελέτη του έργου να καθιστά οικονομικά εφικτή τη χρήση έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα. Θα πρέπει οι ωφέλειες από τη διατήρηση του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα να αντισταθμίζουν τις απώλειες λόγω της διατάραξης της λειτουργίας του και μάλιστα σε φιλοσοφία αιεφόρου ανάπτυξης δηλαδή χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο των κατά το σύνηθες 50 με 100 χρόνων ζωής.

5.3.7. Γεωγραφικές περιοχές και καταλληλότερο κλίμα για επιτυχή έκπλυση

Δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν επακριβώς οι περιοχές στις οποίες οι συνθήκες ευνοούν την εφαρμογή της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα (White R. , Report opt184, 2000).

Από υδρολογικής και υδραυλικής άποψης πιο ευνοϊκές είναι οι περιοχές σε υγρό τροπικό και ξηρό τροπικό κλίμα. Επίσης περιοχές όπου το ετήσιο λιώσιμο των ορεινών πάγων επιτρέπει την πρόβλεψη ετήσιας περιόδου υψηλών πλημμυρικών παροχών.

Λαμβάνοντας υπόψη τις περιοχές όπου επικρατούν τέτοιες κλιματικές συνθήκες οι περιοχές οι οποίες έχουν περισσότερες πιθανότητες να είναι κατάλληλες για έκπλυση στους ταμιευτήρες τους είναι (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001) i) τμήματα της κεντρικής Αμερικής και κομμάτι της νότιας Αμερικής, ii) περιοχές της βόριας και νότιας Αμερικής των οποίων τα ποτάμια πηγάζουν από τις Άνδεις και τα Βραχώδη Όρη, iii) τμήματα της κεντρικής Αφρικής από την Ακτή Ελεφαντοστού έως το Σουδάν, iv) περιοχές στην κεντρική Ασία των οποίων τα ποτάμια πηγάζουν από τα Ιμαλάια (Πακιστάν, Ινδία, Νεπάλ), περιοχές της Ασίας (Καμπότζια, Βιετνάμ, Ταϊλάνδη).

5.4. Εκτίμηση αποτελεσματικής εφαρμογής της έκπλυσης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή εφαρμογή της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα είναι πολλοί και εμπεριέχουν αρκετές αβεβαιότητες. Ουσιαστικά τίθενται δύο ερωτήματα, πρώτον το κατά πόσον είναι τεχνική εφικτή η εφαρμογή της τεχνικής της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα και δεύτερον και κατά πόσον η εφαρμογή της έκπλυσης μπορεί να δώσει οικονομικά βιώσιμη λύση (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001). Είναι μάλλον αδύνατο να θεσπιστεί ένα σύνολο κανόνων που θα εξασφαλίζουν εάν η εφαρμογή της έκπλυσης θα είναι εφικτή σε ένα ταμιευτήρα καθώς και οικονομικά βιώσιμη. Ο (Atkinson E. , 1996) κατέγραψε ένα σύνολο ποσοτικών παραγόντων και αξιολόγησε με σύγκριση σε υπαρκτούς ταμιευτήρες την αξιοπιστία τους όσον αφορά την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας της εφαρμογής της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα.

Για να κριθεί ως εφικτή και οικονομικά βιώσιμη η εφαρμογή της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα θα πρέπει συνοπτικά να συντρέχουν δύο συνθήκες.

- Σε βάθος χρόνου θα πρέπει να δημιουργείται ισορροπία στο ισοζύγιο των φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα. Θα πρέπει δηλαδή να εξασφαλίζεται ότι όσες φερτές ύλες εισέρχονται είναι δυνατόν να εξέλθουν κατά την έκπλυση.

- Δεδομένου ότι σε βάθος χρόνου δε θα είναι εφικτή η πλήρης διατήρηση του ωφέλιμου όγκου ενός ταμιευτήρα θα πρέπει ο ωφέλιμος όγκος που θα διατηρηθεί με

την αποκατάσταση της ισορροπίας στο ισοζύγιο των φερτών υλών να δικαιολογεί οικονομικά τη διατήρηση του ταμιευτήρα με εφαρμογή της έκπλυσης.

5.4.1. Ισοζύγιο φερτών υλών

Με την ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα, τη δημιουργία ποτάμιων συνθηκών ροής και την διάβρωση του καναλιού έκπλυσης από τις υψηλές ταχύτητες ροής ζητούμενο είναι να προκύψει ισορροπία στο ισοζύγιο των αποτεθειμένων φερτών υλών σε βάθος χρόνου. Συμβολικά μπορεί να γραφεί:

$$SBR = \frac{\text{μάζα φερτών υλών που εκπλένεται}}{\text{μάζα φερτών υλών που αποτίθεται πριν την έκπλυση}} \quad (4.1)$$

Όπου SBR (sediment balance ratio) λόγος ισορροπίας φερτών υλών.

Η μάζα φερτών υλών που απομακρύνεται με υδραυλική έκπλυση εκφράζεται ως το γινόμενο του ρυθμού απομάκρυνσης φερτών υλών κατά τη διάρκεια του γεγονότος επί το χρόνο της έκπλυσης. Ενώ η μάζα που αποτίθεται ανάμεσα σε δύο γεγονότα έκπλυσης (συνήθως ετήσια) μπορεί να εκφραστεί ως ένας μέσος ρυθμός εισροής φερτών υλών επί το χρόνο, επί το ποσοστό κατακράτησης φερτών υλών από τον ταμιευτήρα.

Δηλαδή συμβολικά:

$$SBR = \frac{Q_s T_f}{N M_{in} T E} \quad (4.2)$$

Όπου:

Q_s είναι η παροχή φερτών υλών που απομακρύνονται κατά τη διάρκεια του γεγονότος της έκπλυσης [tonnes/s]

T_f είναι η διάρκεια του γεγονότος της έκπλυσης [sec]

N είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο εφαρμογές της έκπλυσης [sec]

M_{in} είναι ο ρυθμός εισροής φερτών υλών στον ταμιευτήρα [tonnes/sec]

TE είναι ο βαθμός παγίδευσης (trapping efficiency) φερτών από τον ταμιευτήρα σε ποσοστό. Μπορεί να εκτιμηθεί από τις καμπύλες του (Brune, 1953) ή και του (Churchill, 1948) ή με άλλες αναλυτικότερες μεθόδους εάν είναι δυνατόν.

Στον υπολογισμό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η πραγματική ταπείνωση της στάθμης. Για να επέλθει ισορροπία στο ισοζύγιο φερτών υλών του ταμειυτήρα θα πρέπει το SBR να εκτιμάται τουλάχιστον σε 1.

5.4.1.1. Υπολογισμός του ρυθμού απομάκρυνσης φερτών υλών κατά τη διάρκεια της έκπλυσης

Για τον υπολογισμό του Q_s η πιο δημοφιλής εμπειρική μέθοδος υπολογισμού της περιεκτικότητας σε φερτές ύλες των ροών έκπλυσης αποδίδεται στο (Tsinghua University (Sedimentation Research Laboratory) and North-West Institute of Hydrotechnical Research, 1979) και συναντάται ως T.U.M. συντομογραφικά.

Το Q_s εκφράζεται ως:

$$Q_s = \Psi \frac{Q_f^{1,6} S^{1,2}}{W^{0,6}} \quad (4.3)$$

Όπου:

Q_s είναι η παροχή φερτών υλών που απομακρύνονται κατά τη διάρκεια του γεγονότος της έκπλυσης [tonnes/sec]

S η κλίση του πυθμένα κατά μήκος του καναλιού έκπλυσης-γίνεται η παραδοχή της ομοιόμορφης ροής όπου η κλίση της γραμμής ενέργειας και της ροής ταυτίζονται.

Q_f η παροχή της έκπλυσης [m^3/s]

W το πλάτος πυθμένα του καναλιού έκπλυσης [m]

Ψ είναι σταθερά εξαρτώμενη από τον τύπο των φερτών υλών

Οι τιμές που προτείνονται (Atkinson E. , 1996) για την σταθερά Ψ είναι:

1600 για λασπώδης χαλαρές αποθέσεις

650 για άλλα φερτά με μέση διάμετρο κόκκου μικρότερη από 0.1mm

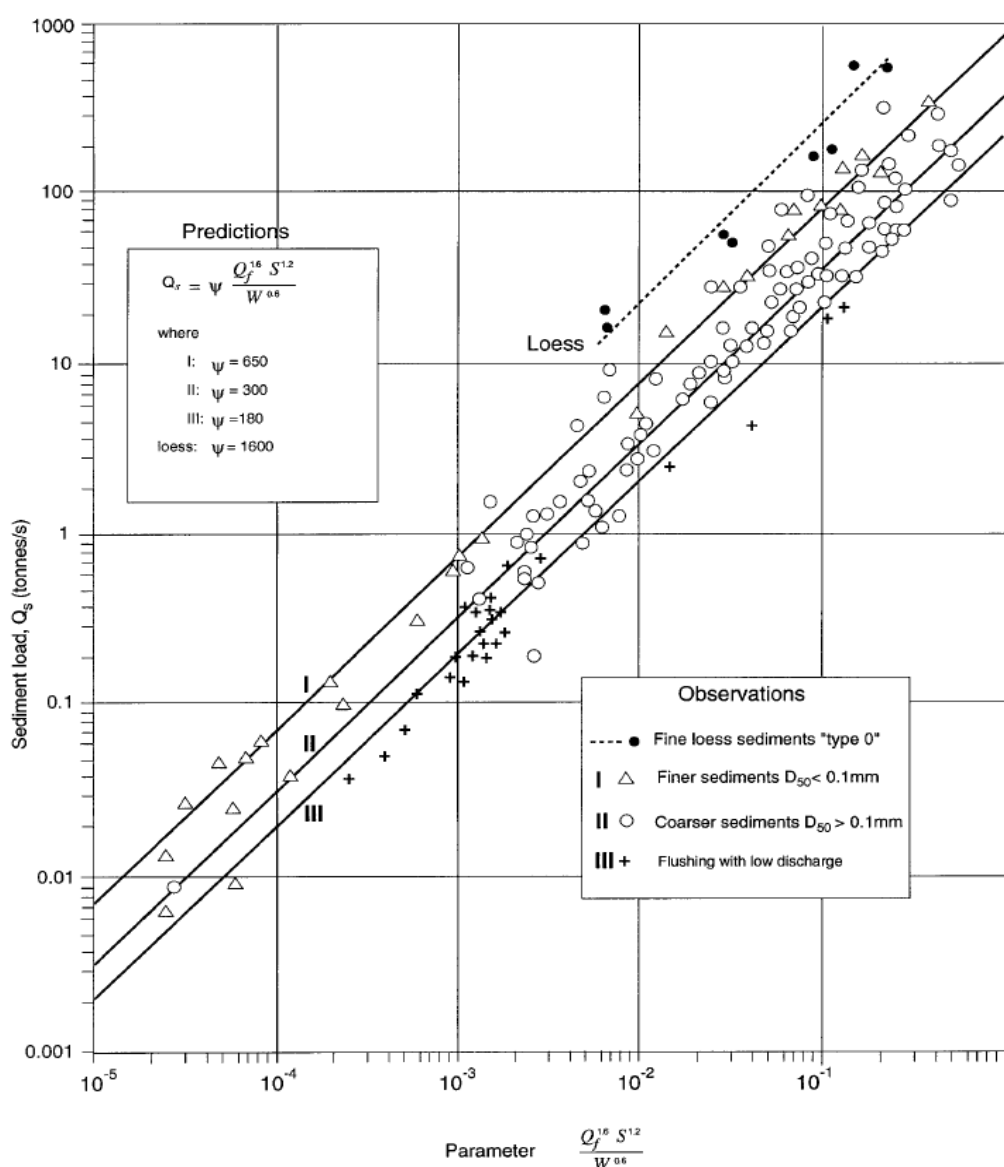
300 για φερτά με μέση διάμετρο κόκκου μεγαλύτερη από 0.1mm

180 για έκπλυση με χαμηλές φορτίσεις

Ο παράγοντας Ψ εκφράζει την επιρροή του είδους των φερτών υλών. Συγκεκριμένα για πιο λεπτόκοκκες αποθέσεις έχει μεγαλύτερη τιμή από τις πιο χονδροκόκκες. Γενικώς όσο πιο ευνοϊκές είναι οι συνθήκες απομάκρυνσης φερτών υλών τόσο πιο μεγάλη τιμή έχει το Ψ .

Η μέθοδος έχει βασισθεί σε στοιχεία από ταμιευτήρες στην Κίνα. Αυτό βέβαια σημαίνει πως μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική για ταμιευτήρες με χαρακτηριστικά πολύ διαφορετικά. Η έκπλυση στην Κίνα πραγματοποιείται ετησίως οπότε οι φερτές ύλες δεν έχουν προλάβει να στερεοποιηθούν. Η αξιολόγηση που έκανε ο (Atkinson E. , 1996) τον οδήγησε στην εκτίμηση πως ο τύπος υπερεκτιμά το Q_s κατά τρεις ή και περισσότερες φορές για ταμιευτήρες που δεν εφαρμόζεται η έκπλυση ετησίως και δεν εμφανίζει μεγάλες διαφορές για ταμιευτήρες με αποθέσεις μέσου κόκκου μεγαλύτερου του 0,1mm.

Να σημειωθεί πως οι (Morris & Fan, 1998) θεωρούν ως αξιόπιστο τον τύπο για τιμές του Q_s από 0,0006 μέχρι 777tonnes/sec και Q_f από 0,1 μέχρι 5730tonnes/sec.



Εικόνα 5-3: Διάγραμμα της μεθόδου TUM με τα δεδομένα αξιολόγησής της. (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

Ακόμη οι (Morris & Fan, 1998) έχουν εξάγει και προτείνουν στηριζόμενοι σε διάβρωση λεπτής άμμου στον ταμιευτήρα Sanmexia την εξής σχέση:

$$Q_s = 3,5 \times 10^{-3} Q_f^{1,2} (S \times 10^4)^{1,8} \quad (4.4)$$

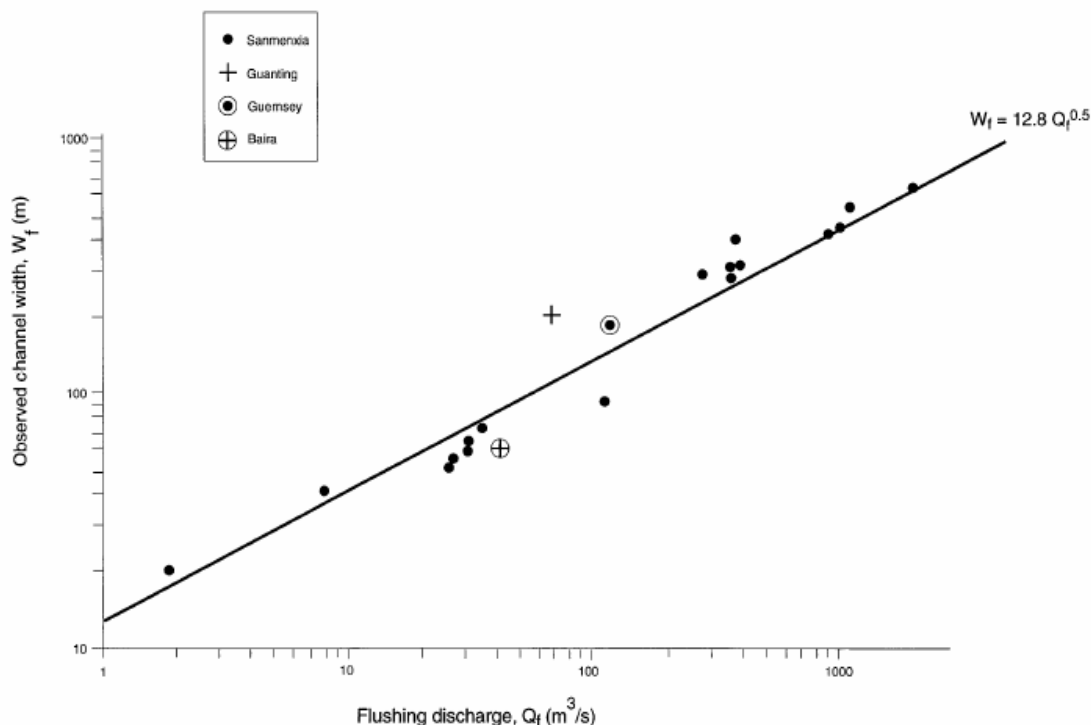
Συναρτήσει μόνο της παροχής έκπλυσης Q_f και της κλίσης ενέργειας S .

5.4.1.1.1. Υπολογισμός του πλάτους του καναλιού έκπλυσης

W

Για τον υπολογισμό του πλάτους του καναλιού έκπλυσης W που διαβρώνεται μέσα στις αποθέσεις, εάν δεν υπάρχει δυνατότητα λεπτομερούς υδραυλικής μελέτης προτείνεται από (Atkinson E. , 1996) και (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001) ο εξής τύπος:

$$W = 12,8 Q_f^{0,5} \quad (4.5)$$



Εικόνα 5-4: Δεδομένα βάσει των οποίων εξήχθη ο τύπος για τον υπολογισμό του W . (Atkinson E. , 1996)

5.4.2. Παραμένων ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα

Κατά τη διαδικασία της έκπλυσης με καταβιβασμό της στάθμης διαβρώνεται ένα κεντρικό κανάλι έκπλυσης στον ταμιευτήρα μέχρι τον αρχικό πυθμένα του ταμιευτήρα ή μέχρι το υψόμετρο της εξόδου της έκπλυσης. Γίνεται η παραδοχή ότι θα διατηρηθεί η κλίση του αρχικού πυθμένα. Ανάλογα τη γεωμετρία του ταμιευτήρα και κυρίως το πλάτος του, το κανάλι μπορεί να αντιπροσωπεύει σχεδόν το σύνολο του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα ο οποίος με την επαναλαμβανόμενη έκπλυση συντήρησης του καναλιού θα μπορεί πλέον να διατηρηθεί. Εάν όμως ο ταμιευτήρας είναι αρκετά πλατύς ώστε να ευνοεί της αποθέσεις φερτών υλών πέρα από τη ζώνη επιρροής του καναλιού τότε με τη συνεχή συντήρηση του καναλιού έκπλυσης το κανάλι θα διατηρήσει το βάθος του κοντά στον αρχικό πυθμένα του ταμιευτήρα ενώ οι όχθες με τις συνεχείς αποθέσεις δε θα διαβρώνονται αλλά θα ανυψώνονται συνεχώς. Το αποτέλεσμα είναι πως μετά από ικανό χρονικό διάστημα με τη μέθοδο της έκπλυσης θα μπορεί να διατηρηθεί ένα μόνο ποσοστό του αρχικού ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα.

Συμβολικά γράφεται:

$$LTCR = \frac{\text{διατηρούμενη χωρητικότητα ταμιευτήρα}}{\text{αρχική χωρητικότητα ταμιευτήρα}} \quad (4.6)$$

Όπου LTCR (long term capacity ratio) ο λόγος της διατηρούμενης χωρητικότητας του ταμιευτήρα σε βάθος χρόνο λόγω της εφαρμογής της έκπλυσης προς την αρχική χωρητικότητα του ταμιευτήρα.

Για την εκτίμηση του λόγου LTCR προτείνεται η εξής μεθοδολογία:

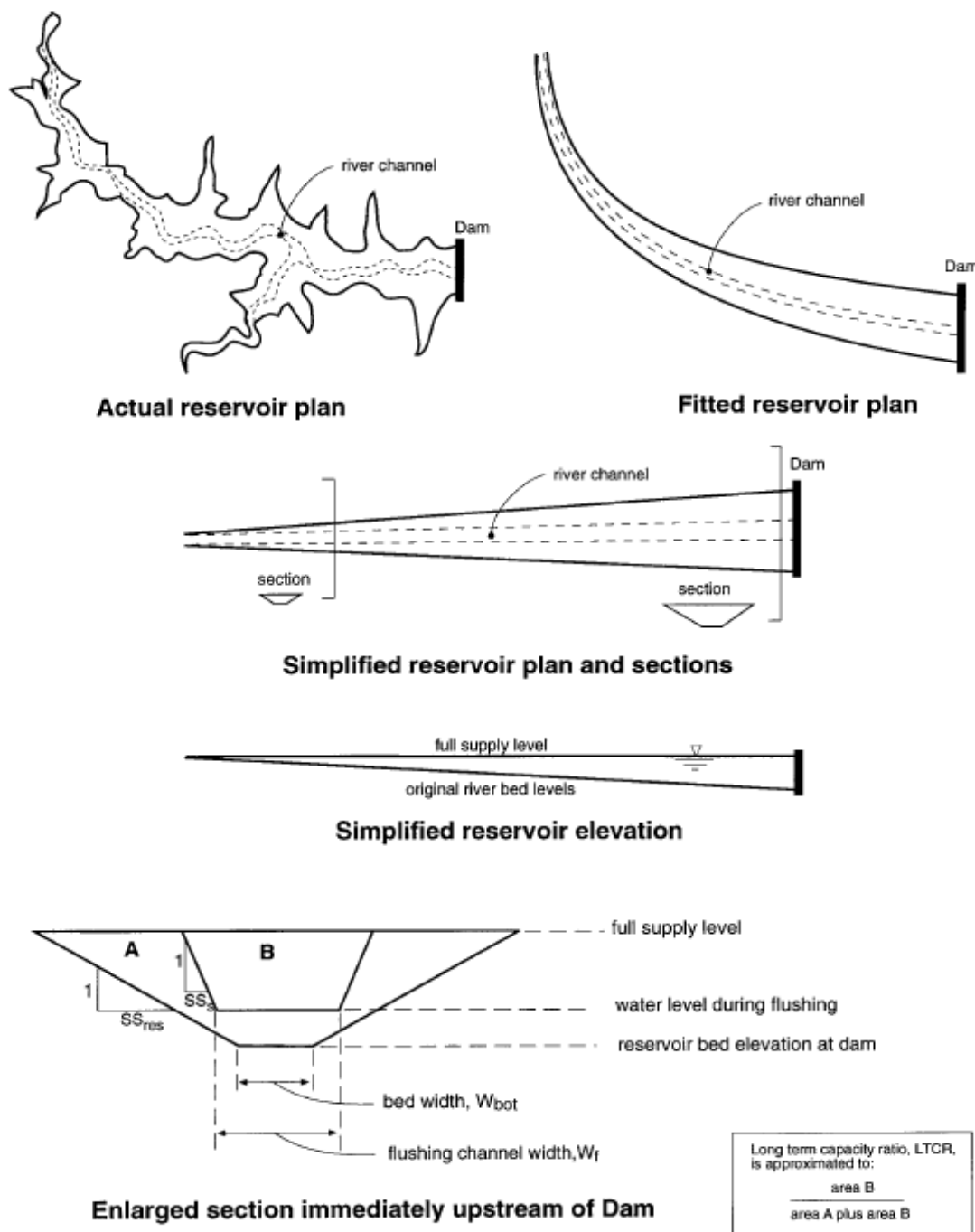
-Ο ταμιευτήρας και το κανάλι έκπλυσης απλοποιούνται σε 'κανάλια' τραπεζοειδούς διατομής.

-Αν και όλες οι διατομές και η σχετική θέση των δύο 'καναλιών' πρέπει να ληφθεί υπόψιν μία καλή εκτίμηση προκύπτει από την αμέσως ανάντη διατομή του φράγματος. (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

-Για τον ταμιευτήρα εκτιμάται από την τοπογραφία μία μέση κλίση πρανών και μία και μέση κλίση του καναλιού.

-Για το κανάλι έκπλυσης το ύψος του πυθμένα του βρίσκεται στο ύψος των εξόδων έκπλυσης. Για την κλίση των πρανών πρέπει να βρεθεί η γωνία απόθεσης για βυθισμένες αποθέσεις. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τις ιδιότητες των φερτών, το βαθμό στερεοποίησης, το ύψος των αποθέσεων ακόμα και τη

διακύμανση της στάθμης του καναλιού έκπλυσης (κυρίως για αμμώδεις αποθέσεις). Έτσι η κλίση των πρανών μπορεί να πάρει τιμές από τελείως κατακόρυφα πρανή για πλήρως στερεοποιημένες αποθέσεις μέχρι και πολύ ήπιες κλίσεις της τάξης του 2.5% για ελαφρώς ή καθόλου στερεοποιημένες αποθέσεις.



Εικόνα 5-5: Σχηματικά η πορεία υπολογισμού του LTCR. (Atkinson E. , 1996)

Για τον παράγοντα LTCR προτείνεται ως αποδεκτή τιμή το 0.5. Εάν δηλαδή η προκαταρκτική μελέτη δείξει ότι με τη μέθοδο της έκπλυσης είναι δυνατόν στον ταμειυτήρα να διατηρηθεί σε βάθος χρόνου πάνω από το μισό ωφέλιμο όγκο του τότε το πιθανότερο είναι πως από άποψη οικονομική στον ταμειυτήρα μπορεί να εφαρμοστεί έκπλυση.

5.4.2.1. Κλίση των πρανών του καναλιού διάβρωσης

Η κλίση των πρανών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι ιδιότητες των φερτών, ο βαθμός στερεοποίησης, το ύψος των αποθέσεων ακόμα και η διακύμανση της στάθμης του καναλιού έκπλυσης (κυρίως για αμμώδεις αποθέσεις). Έτσι η κλίση των πρανών μπορεί να πάρει τιμές από τελείως κατακόρυφα πρανή για πλήρως στερεοποιημένες αποθέσεις μέχρι και πολύ ήπιες κλίσεις της τάξης του 2.5% για ελαφρώς ή καθόλου στερεοποιημένες αποθέσεις. Στο διάγραμμα φαίνεται η πρόβλεψη της κλίσης συναρτήσει της ξηρής πυκνότητας των αποθέσεων.

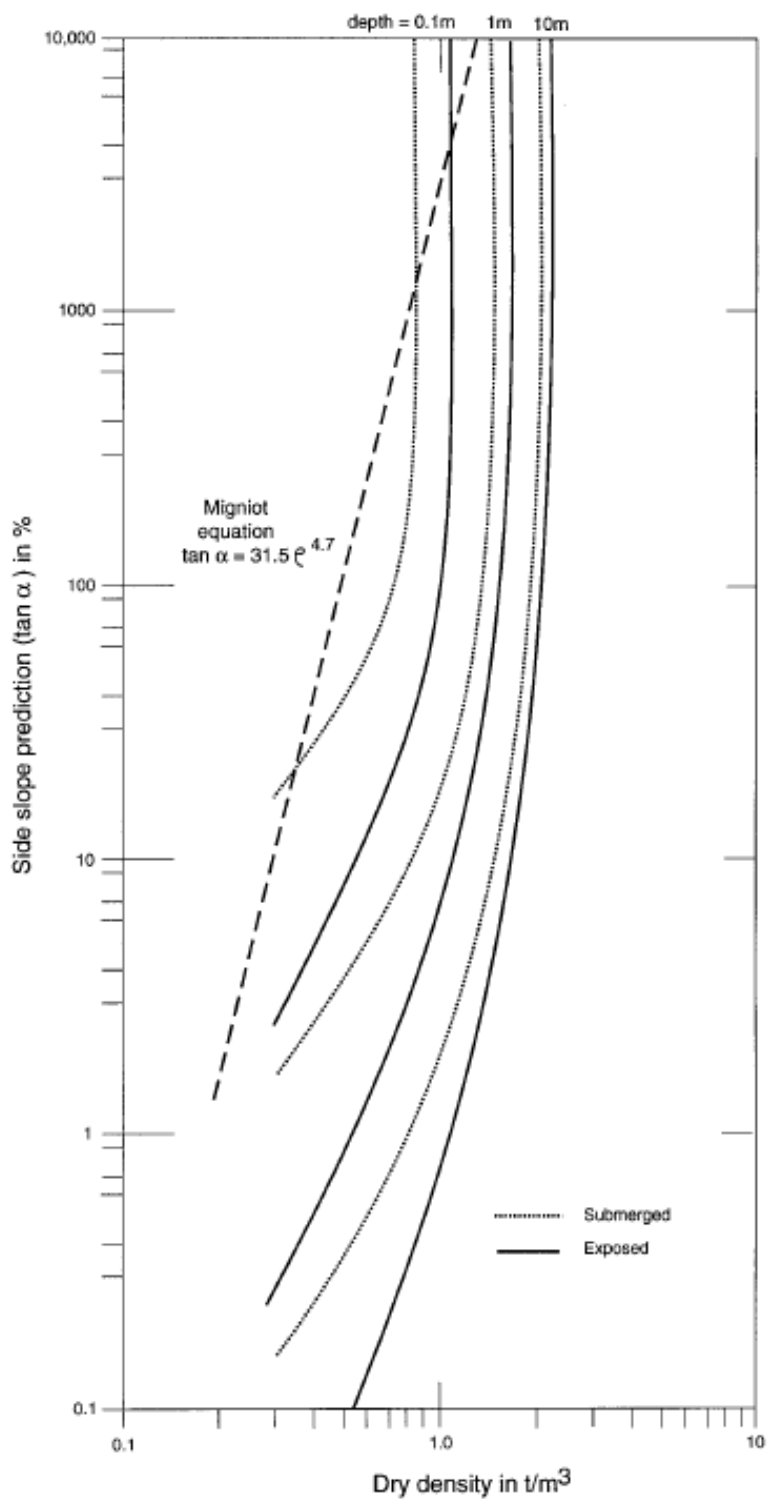
Ο Migniot πρότεινε την εξής σχέση για τον υπολογισμό της κλίσης των πρανών του καναλιού διάβρωσης:

$$\tan \alpha = \frac{31,5}{5} \rho^{4,7} \quad (4.7)$$

Όπου

$\tan \alpha$ η κλίση του παράπλευρου πρανούς του καναλιού διάβρωσης

ρ η ξηρή πυκνότητα των αποθέσεων σε $[t/m^3]$



Εικόνα 5-6:Κλίση πρανών του καναλιού διάβρωσης(Atkinson E. , 1996)

5.4.3. Μερική ταπείνωση στάθμης

Είναι σύνηθες να μην είναι δυνατόν να γίνει πλήρη ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα. Η μερική ταπείνωση μειώνει την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Το ποσοστό του καταβιβασμού της στάθμης του ταμιευτήρα συναρτήσσει του ολικού ύψους του φράγματος εκφράζεται συμβολικά ως:

$$DDR = 1 - \frac{\text{βάθος νερού κατά την έκπλυση}}{\text{βάθος νερού σε κανονική λειτουργία}} \quad (4.8)$$

Η έκπλυση κρίνεται (Atkinson E. , 1996) ως ανεπαρκής για DDR μικρότερο του 0,7. Η μερική ταπείνωση της στάθμης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του SBR.

5.4.4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Το κανάλι της έκπλυσης αναμένεται προκειμένου η έκπλυση να κριθεί ικανοποιητική να έχει παρόμοιο πλάτος με το πλάτος του ταμιευτήρα. Πολύ πλατύς ταμιευτήρας εμφανίζει περιοχές εκτός του καναλιού διάβρωσης στις οποίες συνεχίζεται η απόθεση των φερτών υλών. Πολύ στενός ταμιευτήρας εμποδίζει τη δημιουργία του καναλιού έκπλυσης και συνεπώς θέτει περιορισμούς στην έκπλυση.

Συμβολικά:

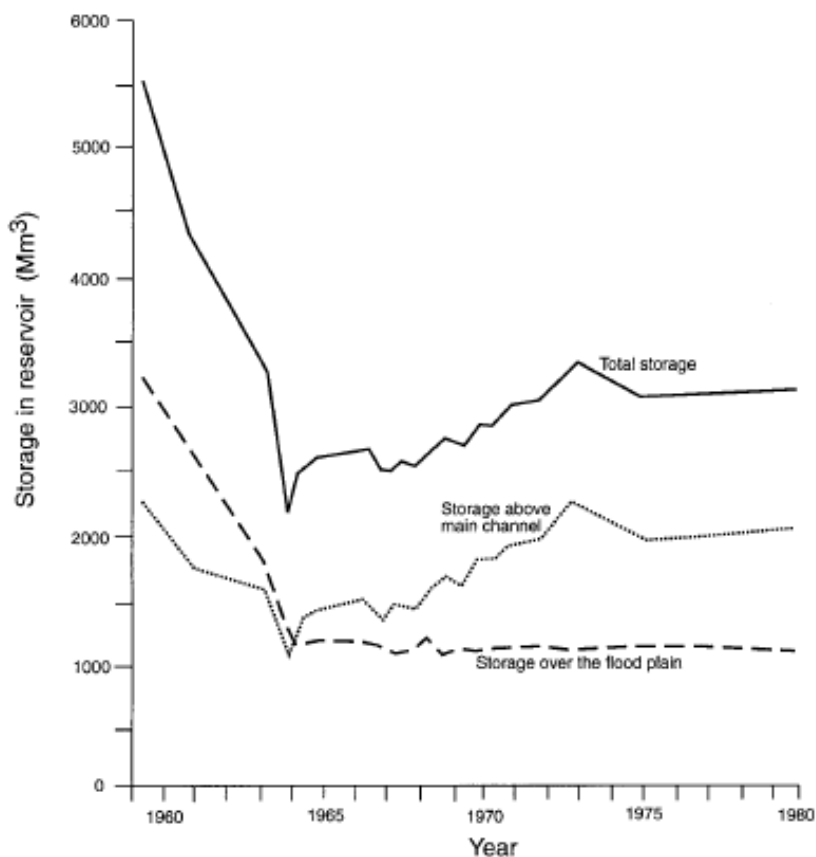
$$FWR = \frac{\text{πλάτος καναλιού έκπλυσης}}{\text{πλάτος πυθμένα ταμιευτήρα}} \quad (4.9)$$

Εάν το FWR είναι μεγαλύτερο της μονάδας θα πρέπει να θεωρηθεί δεσμευτικό ως προς την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης, ο ταμιευτήρας είναι πολύ στενός και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη του καναλιού έκπλυσης. Υπάρχει μία εξαίρεση σε περίπτωση που τα πρηνή των αποθέσεων είναι πολύ ήπια.

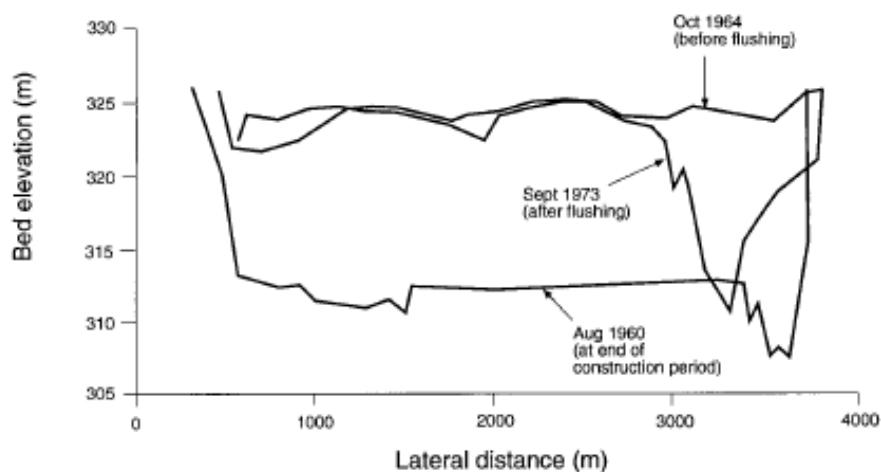
Συμβολικά:

$$TWR = \frac{\text{πλάτος καναλιού στην στέψη του καναλιού έκπλυσης}}{\text{πλάτος ταμιευτήρα στη στέψη του καναλιού έκπλυσης}} \quad (4.10)$$

Εάν ο ταμιευτήρας είναι πολύ πλατύς σε σχέση με το κανάλι έκπλυσης τότε η έκπλυση μπορεί να κριθεί ακατάλληλη διότι στις περιοχές εκτός του καναλιού έκπλυσης θα συνεχίσουν να αποτίθενται φερτές ύλες και δύσκολα θα διατηρηθεί το απαιτούμενο ποσοστό του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα. Έτσι κρίνεται ως απαραίτητο $TWR > 1$. Εάν μάλιστα $TWR > 2$ τότε το πλάτος του ταμιευτήρα στο βάθος του καναλιού (FWR) δεν αποτελεί δέσμευση.



(a) Storage changes



(b) Bed elevations at a cross section

Εικόνα 5-7: Διατομές καναλιών έκπλυσης για πλατύ και στενό ταμιευτήρα. (Morris & Fan, 1998)

5.4.5. Δείκτης κοκκομετρίας

Η αποτελεσματικότητα της έκπλυσης εξαρτάται από το μέγεθος των φερτών υλών που έχουν αποθεθεί. Το μέγεθος του καναλιού έκπλυσης δεν επηρεάζεται από τις

αποθέσεις, επηρεάζεται όμως ο ρυθμός απομάκρυνσης φερτών υλών κατά την έκπλυση, δεδομένου ότι τα πιο χονδρόκοκκα υλικά είναι και πιο δύσκολο να απομακρυνθούν.

Η εργασία του (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001) μελέτησε τον λόγο της μέσης διαμέτρου των υλικών που μεταφέρονται προς τον ταμιευτήρα (D_{50T}) προς τη μέση διάμετρο του υλικού του πυθμένα του ποταμού (D_{50B}).

Ο πυθμένας των ποταμών αποτελείται από υλικό με ευρεία κοκκομετρική διαβάθμιση, όμως το κλάσμα της άμμου είναι πιο εύκολα μεταφέσιμο και για αυτό οι κοκκομετρία των υλικών που αποτίθενται σε ένα ταμιευτήρα είναι πιο λεπτόκοκκη και πιο εύκολα μετακινήσιμη. Ο λόγος D_{50T} προς D_{50B} εκφράζει το πόσο πιο πολλά είναι τα λεπτόκοκκα υλικά που περιλαμβάνονται στις φερτές ύλες σε ένα ταμιευτήρα και όσο πιο μικρός είναι τόσο πιο ευνοϊκές συνθήκες για επιτυχή έκπλυση υπάρχουν. Ο (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001) θέτει ως όριο το 0,03 για να είναι η έκπλυση επιτυχής.

Ακόμη όσο μικρότερος ο λόγος τόσο λιγότερες ημέρες διατήρησης της έκπλυσης χρειάζονται, διότι τα υλικά είναι πιο εύκολο να μετακινηθούν και να παρασυρθούν από τη ροή.

Για την επιρροή του ποσοστού χονδρόκοκκων υλικών έγινε μελέτη από τον (Atkinson E. , 1998). Επειδή τα πιο χονδρόκοκκα υλικά αποτίθενται στα ανάντη του ταμιευτήρα στο δέλτα των αποθέσεων το κανάλι έκπλυσης μπορεί να δημιουργηθεί εντός του δέλτα και κατά την έκπλυση συντήρησης να απομακρυνθούν νέες αποθέσεις υλικών εντός του καναλιού. Όμως κοντά στο φράγμα τα λεπτότερα υλικά αποτίθενται σε όλη την περιοχή του ταμιευτήρα και είναι πιο δύσκολο να απομακρυνθούν με τη δημιουργία του καναλιού. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αύξηση της διάρκειας ζωής ενός ταμιευτήρα με πιο χονδρόκοκκα υλικά ακόμα και αν δεν υπάρχει μεγάλος παραμένων όγκος σε μακροχρόνια κλίμακα. Το συμπέρασμα απεικονίζει καλύτερα στον παρακάτω πίνακα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης έκπλυσης με διάρκεια 30 ημέρες, σε τρεις διαφορετικούς ταμιευτήρες, με δύο διαφορετικές παροχές, για διαφορετικά ποσοστά χονδρόκοκκης άμμου. Το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται είναι πόσες φορές μεγαλώνει ο χρόνος ζωής του ταμιευτήρα για κάθε περίπτωση.

Proportion of coarse sediment	$Q_{flushing}/Q_{mean}$	Factor by which reservoir life is extended		
		Tarbela	Tungabhadra	Rooiport
0.2	1	1.9	1.4	1.4
0.4	1	2.5	1.8	1.8
0.6	1	3.8	2.7	2.7
0.8	1	7.6	5.4	5.5
0.9	1	15.2	10.8	11.0
0.2	2	2.7	1.6	1.6
0.4	2	3.6	2.1	2.1
0.6	2	5.4	3.2	3.1
0.8	2	10.9	6.3	6.2
0.9	2	21.7	12.7	12.5

Πίνακας 5-1:Επιρροή του ποσοστού χονδρόκοκκων υλικών στην επέκταση της ζωής του ταμιευτήρα με χρήση της έκπλυσης.(White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

5.4.6. Αξιολόγηση κριτηρίων

Οι παραπάνω δείκτες και τα αποδεκτά όρια που δίνονται αξιολογήθηκαν από τον(Atkinson E. , 1996) με διερεύνηση 14 ταμιευτήρων και κρίθηκαν ως αξιόπιστοι.Συγκεκριμένα διερευνήθηκαν 14 ταμιευτήρες στους οποίους εφαρμόζεται η έκπλυση επιτυχώς και ανεπιτυχώς και παρατηρήθηκε ότι στους ταμιευτήρες στους οποίους δοκιμάστηκε η έκπλυση ανεπιτυχώς τουλάχιστον ένα κριτήριο δεν ικανοποιείτο,ενώ στους ταμιευτήρες με επιτυχή έκπλυση όλα τα κριτήρια ικανοποιούνταν.Στον πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα στοιχεία.

Reservoir	Country	DDR value	SBR _d value	FWR value	TWR value
Reservoirs flushed successfully					
Baira	India	0.68	24	3.4	1.6
Gebidem	Switzerland	0.93	20	6.7	1.5
Gmünd	Austria	0.89	58	5.2	1.3
Hengshan	China	0.77	Approx. 4	0.1	7.1
Palagnedra	Switzerland	1.00	33	1.4	1.0
Santo Domingo	Venezuela	1.00	11	1.4	1.8
Reservoirs flushed unsuccessfully					
Guanting	China	0.81	0.3	0.04	0.5
Guernsey	USA	0.44	3.2	1.4	0.26
Helsonglin	China	0.77	Approx. 1	0.06	0.8
Ichari	India	0.31	33	9.9	1.4
Ouchi-Kurgan	Former USSR	0.14	110	Approx. 2	Approx. 0.3
Sanmenxia	China	0.75	4.8	0.26	0.9
Sefid-Rud	Iran	0.96	4.3	0.3	0.1
Shulcaozi	China	0.37	15	1.0	2.1

Πίνακας 5-2:Εφαρμογή των κριτηρίων σε υπάρχοντες ταμιευτήρες.(White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

5.4.7. Οικονομική βιωσιμότητα ταμιευτήρα με εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης φερτών υλών

Όπως αναφέρθηκε ήδη είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρξει καθολικό κριτήριο για το εάν μπορεί να γίνει βιώσιμη λειτουργία σε ένα ταμιευτήρα και για το εάν είναι τεχνικά δυνατόν να εφαρμοστεί η τεχνική της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα.

Στην εργασία του (Basson G. , 1997) γίνεται επεξεργασία 177 υπαρκτών έργων-ταμιευτήρων και με βάση δύο κριτήρια προτείνεται μία προκαταρκτική εκτίμηση για το εάν είναι οικονομικότερη η εφαρμογή της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα από την αναζήτηση νέου ωφέλιμου όγκου.

Το κριτήριο στηρίζεται σε δύο παραμέτρους:

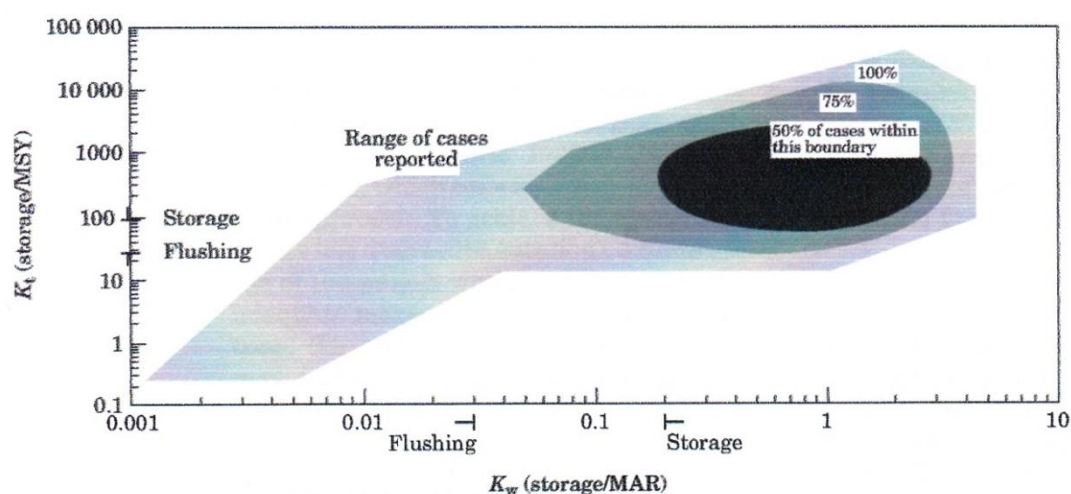
$$K_w = \frac{\text{χωρητικότητα ταμιευτήρα}}{\text{μέσος ετήσιος εισρέων ογκος νερού}} \tag{4.11}$$

Και

$$K_i = \frac{\text{χωρητικότητα ταμειυτήρα}}{\text{μέσος ετήσιος εισρεών όγκος φερτών}} \quad (4.12)$$

Ο πρώτος παράγοντας μετράει την ποσότητα του νερού ενώ ο δεύτερος την ποσότητα των φερτών υλών. Η έκπλυση γίνεται πιο ευνοϊκή όταν υπάρχει αφθονία νερού, δηλαδή για όλο και μικρότερο K_w και μεγάλος ρυθμός απόθεσης φερτών υλών, μικρότερο K_i .

Ο (Basson G. , 1997) προτείνει ότι για τιμές του K_w μεγαλύτερες του 0,2 δεν είναι δυνατόν να γίνει έκπλυση, ενώ για τιμές μικρότερες του 0,03 η έκπλυση είναι απαραίτητη. Αντίστοιχα για το K_i προτείνεται το 100 και κάτω ως απαραίτητη τιμή για μπορεί να εξεταστεί το ενδεχόμενο της έκπλυσης και το 30 ως τιμή κάτω από την οποία η έκπλυση κρίνεται υποχρεωτική. Τα όρια φαίνονται και στην εικόνα σε λογαριθμικούς άξονες μαζί με τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία.

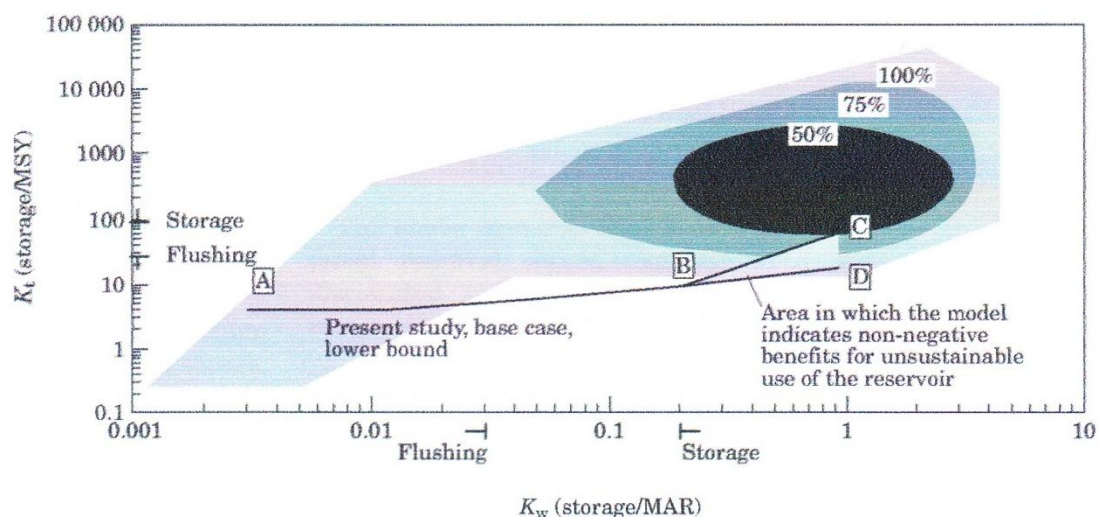


Εικόνα 5-8: Το κριτήριο του Basson. Σημειώνονται οι περιοχές με τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001)

Ο (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001) στηριζόμενος στα όρια που έθεσε ο Basson ανέπτυξε ένα οικονομικό μοντέλο προσομοίωσης επικεντρώνοντας κυρίως στο ζήτημα της οικονομικής βιωσιμότητας

Λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη κατασκευής και συντήρησης του φράγματος και τον λοιπών κατασκευών, τα έσοδα από την ‘πώληση’ του νερού, το κέρδος σε όγκο νερού από την εφαρμογή της έκπλυσης καθώς και το επιτόκιο προέκυψε από την εργασία του Palmieri το όριο που φαίνεται στην Εικόνα 5-9. Το όριο εκφράζεται από τη

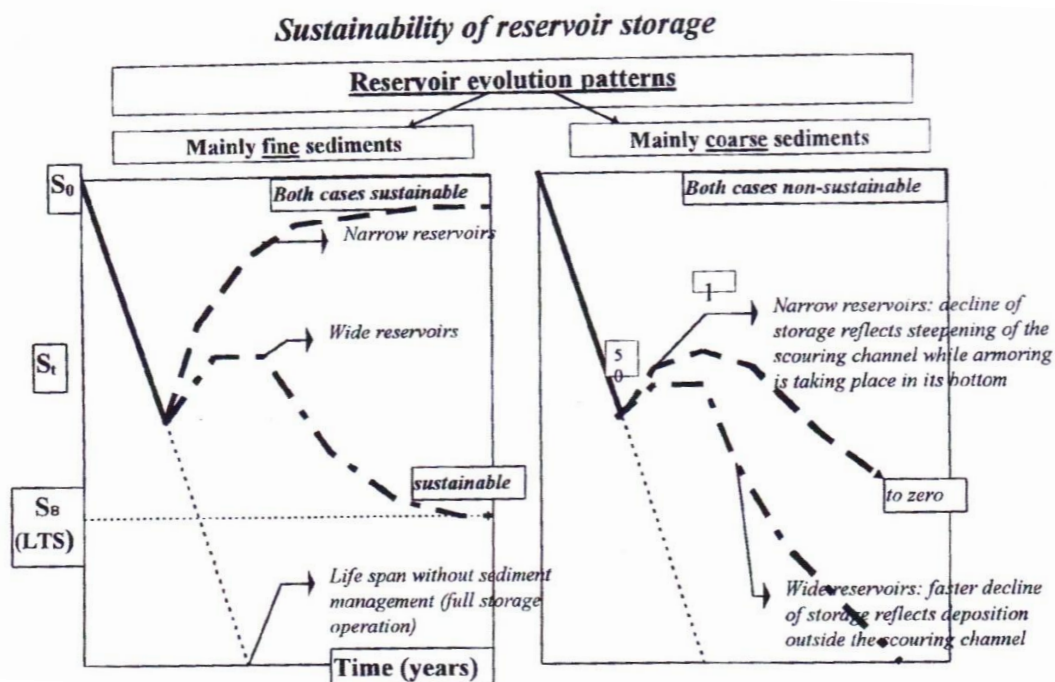
γραμμή ABDC. Οι συνδυασμοί κάτω από τη γραμμή ABD αποτελούν περιπτώσεις με ζημιές, ενώ οι συνδυασμοί πάνω από τη γραμμή ABC αποτελούν περιπτώσεις όπου προκύπτει βιώσιμη λύση. Οι συνδυασμοί στο τριγωνάκι CBD είναι λύσεις όπου παρουσιάζεται κέρδος μεν αλλά δεν είναι βιώσιμες.



Εικόνα 5-9: Το όριο του Palmieri για την οικονομική βιωσιμότητα εφαρμογής έκπλυσης σε ταμιευτήρα. Εκφράζεται από τη γραμμή ABCD. (Palmieri, Shah, & Dinar, 2001)

5.4.8. Βιωσιμότητα και κοκκομετρία αποθέσεων – μοτίβο εξέλιξης της αποκατάστασης της αποθηκευτικότητας ταμιευτήρα

Για να είναι βιώσιμη η εφαρμογή της έκπλυσης σε ένα ταμιευτήρα θα πρέπει να διατηρείται ένα μέρος του ωφέλιμου όγκου σε βάθος χρόνου. Οι λεπτόκοκκες φερτές ύλες διαβρώνονται πιο εύκολα από τις χονδρόκοκκες και απομακρύνονται κατά την έκπλυση, εξασφαλίζοντας ένα κομμάτι του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα ελεύθερο από αποθέσεις. Τα χονδρόκοκκα υλικά είναι πιο δύσκολο και συνήθως αδύνατο να απομακρυνθούν. Σε ένα ταμιευτήρα θα υπάρχει σίγουρα κάποια συσσώρευση χονδρόκοκκων υλικών. Εάν λοιπόν το ποσό των αποτιθέμενων χονδρόκοκκων υλικών είναι αρκετά μεγάλο τότε αυτό οδηγεί τον ταμιευτήρα σε συνεχή συσσώρευση υλικών τα οποία θα είναι αδύνατο να απομακρυνθούν. Ταμιευτήρες όπου αποτίθενται κυρίως χονδρόκοκκα υλικά είναι δύσκολο με εφαρμογή της έκπλυσης να είναι βιώσιμοι. Παρουσιάζεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα 5-10.



Εικόνα 5-10: Καμπύλες αποθήκευσης-μεταβολή της χωρητικότητας ταμιευτήρα σε βάθος χρόνου. (Palmieri, A.; Shah, F.; Dinar, A., 1998)

Οι εικόνες αποτελούν γενικευμένες καμπύλες ιστορικού της αποθηκευτικότητας ταμιευτήρα που ξεκίνησε να υποβάλλεται σε έκπλυση αφού έχασε το μέρος της αποθηκευτικότητας του. Τα μακροχρόνια αποτελέσματα της έκπλυσης εξαρτώνται από τον ωφέλιμο όγκο στα κανάλια έκπλυσης, την απόθεση χονδρόκοκκων υλικών που δεν απομακρύνονται με την έκπλυση και τον ρυθμό απόθεσης υλικών στις περιοχές του ταμιευτήρα εκτός των καναλιών έκπλυσης.

Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται καμπύλες όπου όλο το φορτίο χονδρόκοκκων υλικών απομακρύνεται με την έκπλυση. Η καμπύλη για το στενό ταμιευτήρα, δηλαδή ταμιευτήρα στον οποίο το κανάλι έκπλυσης καταλαμβάνει όλο το πλάτος του, δείχνει πως με την έκπλυση μπορεί, όπως αναμενόταν, να έχουμε 100% μακροχρόνια αποκατάσταση της αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα, εφόσον δεν υπάρχει συσσώρευση χονδρόκοκκων αποθέσεων. Η αποκατάσταση γίνεται με γρήγορους ρυθμούς στην αρχή μετά τις πρώτες εφαρμογές της έκπλυσης και συνεχίζει με συνεχώς μειώμενους ρυθμούς αποκατάστασης. Στην περίπτωση πιο πλατύ ταμιευτήρα υπάρχει μία βελτίωση του αποθηκευτικού όγκου του ταμιευτήρα μετά τις πρώτες εφαρμογές της έκπλυσης, μετά όμως η καμπύλη δείχνει πως ο αποθηκευτικός όγκος συνεχίζει να χάνεται μέχρι το ποσοστό του όγκου ισορροπίας που μπορεί να διατηρήσει ο ταμιευτήρας ανάλογα με το πλάτος του και το μέγεθος του καναλιού έκπλυσης.

Η δεύτερη εικόνα απεικονίζει γενικευμένες καμπύλες για περιπτώσεις ταμιευτήρων που υπάρχει συσσώρευση χονδρόκοκκων αποθέσεων οι οποίες δεν απομακρύνονται με την έκπλυση. Στην περίπτωση του αρκετά στενού ταμιευτήρα ώστε το πλάτος του καναλιού έκπλυσης να καταλαμβάνει όλο τον όγκο του η καμπύλη εμφανίζει αύξηση του όγκου του μετά τις πρώτες εκπλύσεις όμως η συσσώρευση των χονδρόκοκκων αποθέσεων τελικά οδηγεί σε συνεχή μείωση του αποθηκευτικού όγκου μέχρι μηδενισμού αυτού. Με σαφές όμως χρονικό όφελος. Στην περίπτωση πιο ευρέων ταμιευτήρων η κατάσταση είναι αντίστοιχη αν και ολοκληρώνεται με πιο γοργούς ρυθμούς.

5.5. Δημιουργία καναλιού έκπλυσης και συντήρηση

Διακρίνονται δύο φάσεις κατά την έκπλυση ταμιευτήρα.

Πρώτη φάση είναι η δημιουργία του καναλιού. Στην πρώτη φάση οι αποθέσεις διαβρώνονται για να δημιουργηθεί το κυρίως κανάλι έκπλυσης και τα τυχόν διαμήκη ή εγκάρσια βοηθητικά κανάλια. Σε αυτή τη φάση μέρος της αρχικής αποθηκευτικότητας του ταμιευτήρα ανακτάται. Ανάλογα τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα η δημιουργία του καναλιού μπορεί να απαιτήσει επαναλαμβανόμενες εκπλύσεις για αρκετά χρόνια.

Δεύτερη φάση είναι η συντήρηση του καναλιού. Στη δεύτερη φάση τα κανάλια έκπλυσης βρίσκονται σε ισορροπία και μόνο πρόσφατες αποθέσεις εντός των καναλιών απομακρύνονται. Οι εκπλύσεις συντήρησης συνήθως εφαρμόζονται σε ετήσια βάση, αν και έχουν δοκιμαστεί και μικρότερα ή και μεγαλύτερα διαστήματα. Οι εκπλύσεις συντήρησης πρέπει να επαναλαμβάνονται επ'άοριστον για να διατηρηθεί η ισορροπία.

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας οι εισερχόμενες λεπτόκοκκες ύλες αποτίθενται κυρίως στα χαμηλότερα σημεία της κάθε διατομής, ειδικά στις περιπτώσεις έντονων ρευμάτων πυκνότητας. Έτσι, κατά τη διάρκεια της συντήρησης του καναλιού έκπλυσης, ευνοείται η απόθεση νέων αποθέσεων στο κανάλι έκπλυσης κι η μετέπειτα απομάκρυνση τους. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ταμιευτήρα Cachi όπου το κανάλι έκπλυσης καλύπτοντας μόνο το 9.5% της συνολικής επιφάνειας του ταμιευτήρα συγκεντρώνει το 71% της συνολικής φόρτισης μεταφερόμενων στερεών.

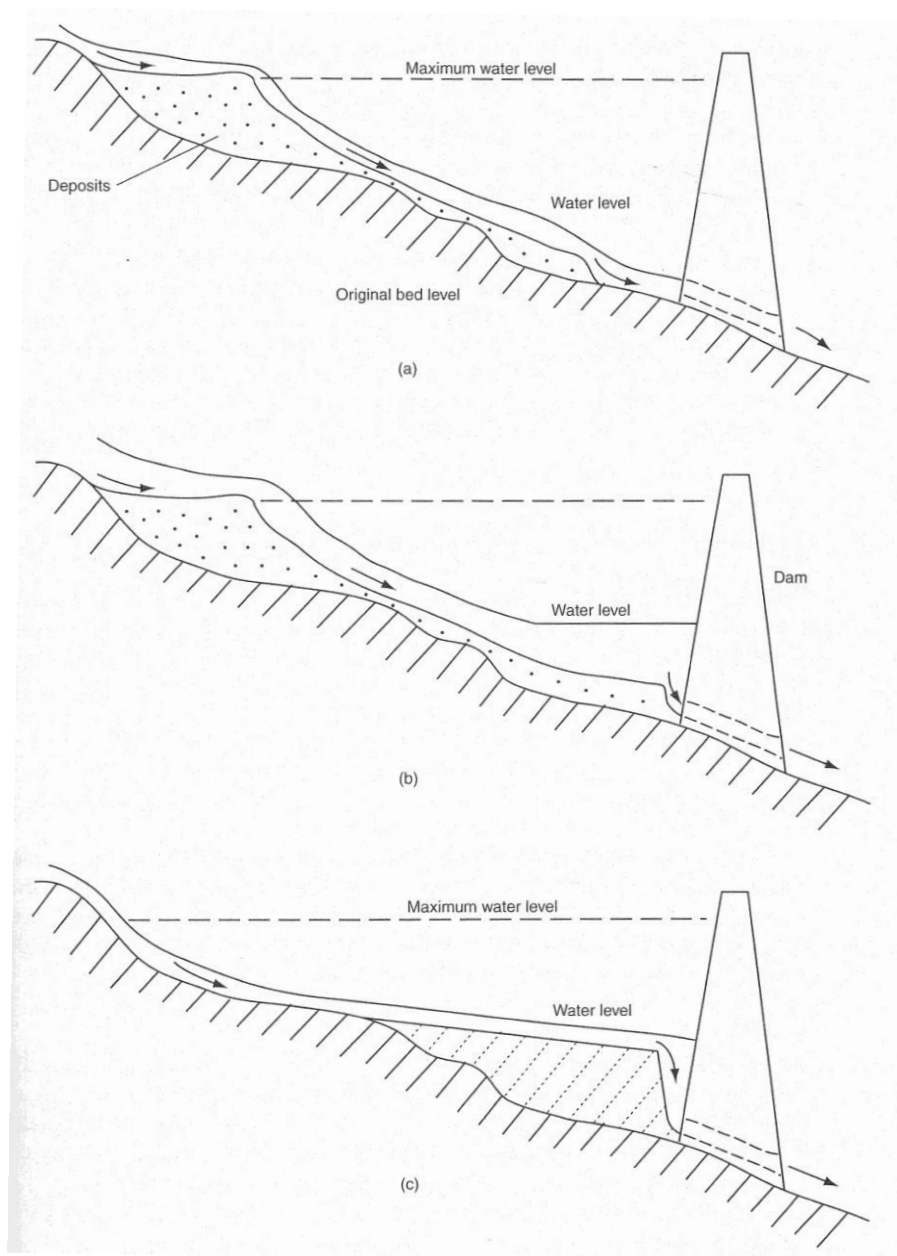
Φερτές ύλες απομακρύνονται από το κανάλι με τους εξής τρόπους.

-παλαιά αποτεθειμένα υλικά

-υλικά που εισέρχονται στον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της έκπλυσης δρομολογούνται κατά μήκος του καναλιού έκπλυσης και εξέρχονται από τις εξόδους (δρομολόγηση).

-νέες αποθέσεις εντός του καναλιού

-η ύπαρξη του καναλιού έκπλυσης 'καθοδηγεί' τα ρεύματα πυκνότητας προς το φράγμα όπου ευνοείται η απομάκρυνση τους από τις εξόδους του.



Εικόνα 5-11: Διαδικασία ταπείνωσης στάθμης κατά τη διάρκεια έκπλυσης και κίνηση αποθέσεων μέσα στον ταμιευτήρα. (White R. , Evacuation of sediments from reservoirs, 2001)

5.6. Διαδικασία έκπλυσης

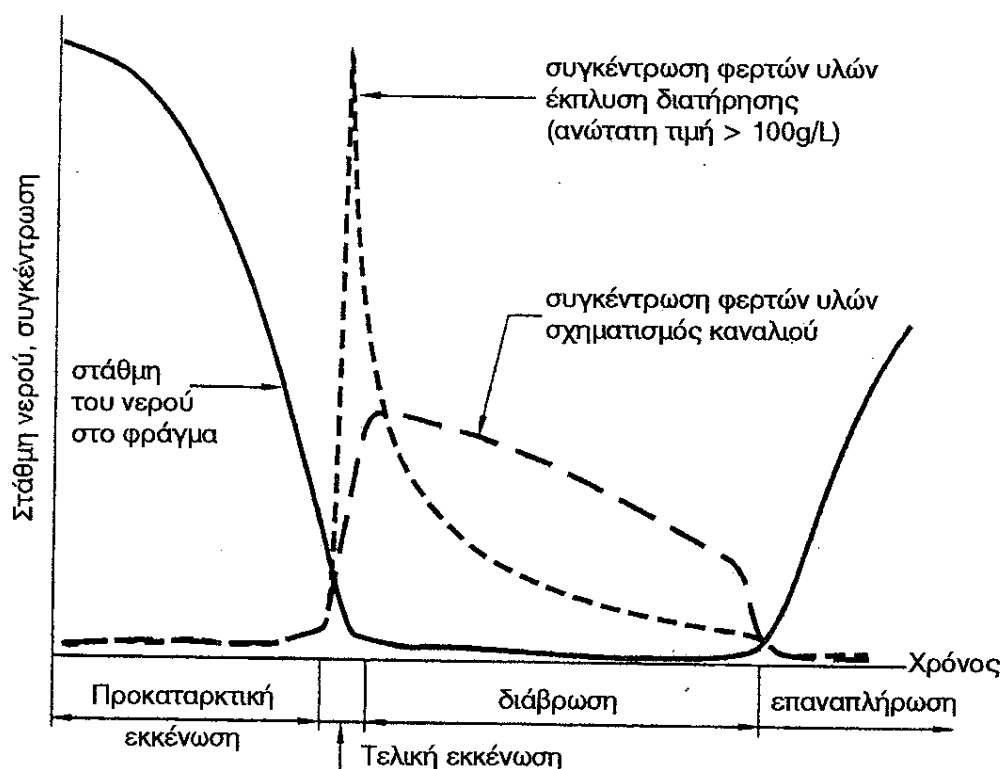
Σε κάθε εφαρμογή της έκπλυσης διακρίνονται τυπικά τρεις φάσεις: Η ταπείνωση της στάθμης, η φάση της διάβρωσης και η επαναπλήρωση του ταμιευτήρα.

Αρχικά στην ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα μπορούμε να διακρίνουμε την προκαταρκτική ταπείνωση της στάθμης όπου η στάθμη του ταμιευτήρα κατεβαίνει στην ελάχιστη στάθμη λειτουργίας χρησιμοποιώντας τις εξόδους του σταθμού και παρέχοντας νερό σε ύδρευση και άρδευση. Εφαρμόζοντας δηλαδή τις τυπικές λειτουργίες του φράγματος σε διάστημα ημερών ή και εβδομάδων. Έπειτα ακολουθεί η τελική ταπείνωση της στάθμης όπου η στάθμη κατεβαίνει κάτω από την ελάχιστη στάθμη λειτουργίας και ο ταμιευτήρας αδειάζει ταχέως με χρήση των εξόδων έκπλυσης. Η διαδικασία τελικής εκκένωσης του ταμιευτήρα διαρκεί τυπικά μικρό χρονικό διάστημα, μέχρι και μερικές ώρες για μικρούς ταμιευτήρες.

Στο στάδιο της τελικής ταπείνωσης της στάθμης ξεκινάει ουσιαστικά η φόρτιση του νερού με στερεές φερτές ύλες. Επιπλέον πολύπλοκες διαδικασίες μεταφοράς φερτών υλών συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ταπείνωσης της στάθμης. Κυρίως φερτές ύλες από τα ανάντη θέτονται σε κίνηση και μετακινούνται κατάντη σε χαμηλότερες περιοχές. Ακόμα είναι δυνατή η δημιουργία ρεύματος πυκνότητας από τα διαβρωμένα υλικά.

Η φάση της διάβρωσης ξεκινάει όταν δημιουργηθούν ποτάμιες συνθήκες ροής με μεγάλες ταχύτητες ροής ικανές να διαβρώσουν λεπτόκοκκες αποθέσεις ιζημάτων και να τις μεταφέρουν έξω από τον ταμιευτήρα. Στην περίπτωση της πρώτης έκπλυσης και της δημιουργίας του καναλιού έκπλυσης έχουμε φόρτιση του νερού με στερεές φερτές ύλες και απομάκρυνση αυτών από την αρχή και κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας. Στις περιπτώσεις έκπλυσης για λόγους συντήρησης του καναλιού όπου υπάρχει πολύ υψηλή απότομη φόρτιση σε στερεά φερτά υλικά στην αρχή της διαδικασίας και γρήγορη πτώση αυτής προς το τέλος. Η φάση της διάβρωσης μπορεί να κρατήσει από μερικές μέρες έως και εβδομάδες ανάλογα με το μέγεθος του ταμιευτήρα. Αναμένονται μεγαλύτεροι χρόνοι σε περιπτώσεις υψηλών φορτίσεων σε φερτά ή χαμηλών υδραυλικών φορτίσεων.

Τέλος με το κλείσιμο των εξόδων έκπλυσης ξεκινάει η φάση της επαναπλήρωσης του ταμιευτήρα με την στάθμη του να ανεβαίνει προς τη στάθμη λειτουργίας ώστε να επανέλθει ο ταμιευτήρας σε κανονική λειτουργία.

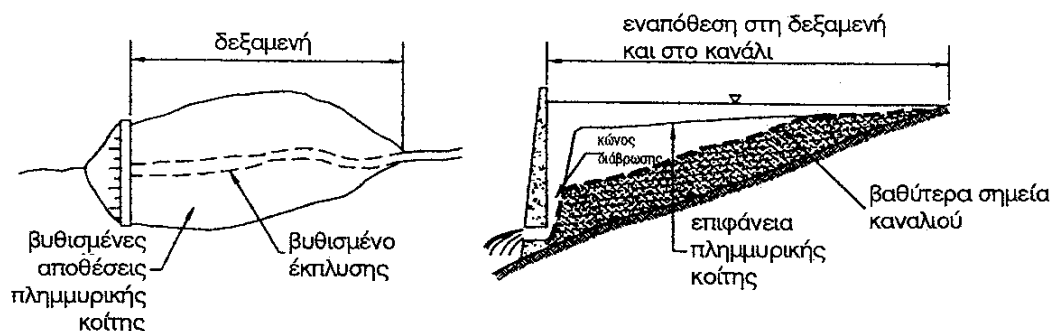


Εικόνα 5-12: Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας έκπλυσης σε περίπτωση της πρώτης έκπλυσης και της έκπλυσης συντηρήσεως. (Morris & Fan, 1998)

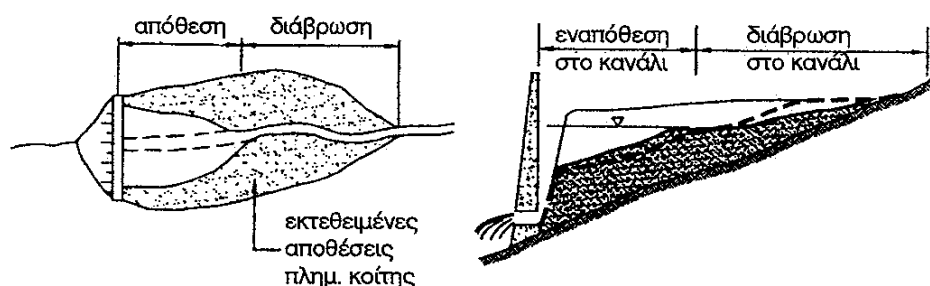
5.7. Γεωμετρία καναλιού έκπλυσης σε λεπτόκοκκες αποθέσεις

Κατά την έκπλυση διαβρώνεται ένα κυρίως κανάλι μέσα στα λεπτόκοκκα ιζήματα (Εικόνα 5-13). Το κανάλι και οι υπόλοιπες αποθέσεις παραμένουν βυθισμένες κατά την κανονική λειτουργία και ενώ το κανάλι διατηρείται οι αποθέσεις δεξιά και αριστερά αυξάνουν σε ύψος. Το πλάτος του πυθμένα του καναλιού υπολογίζεται από υδραυλικές συνθήκες και η κλίση των πρανών του από τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων. Σε αποθέσεις λεπτόκοκκων ιζημάτων το κυρίως κανάλι συνήθως ακολουθεί την αρχική πορεία του ποταμού.

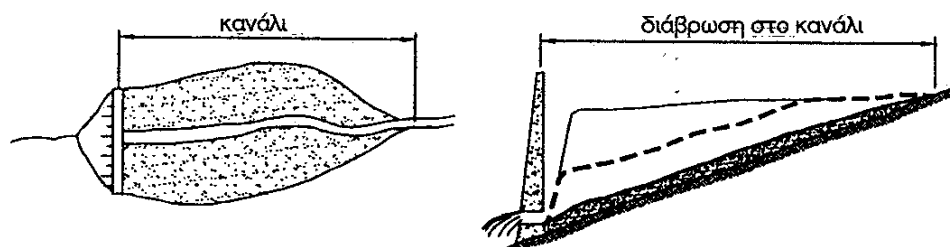
(Α) Συγκράτηση



(Β) Εκκένωση με ροή υπο πίεση



(C) Διάβρωση σε κενό ταμειυτήρα

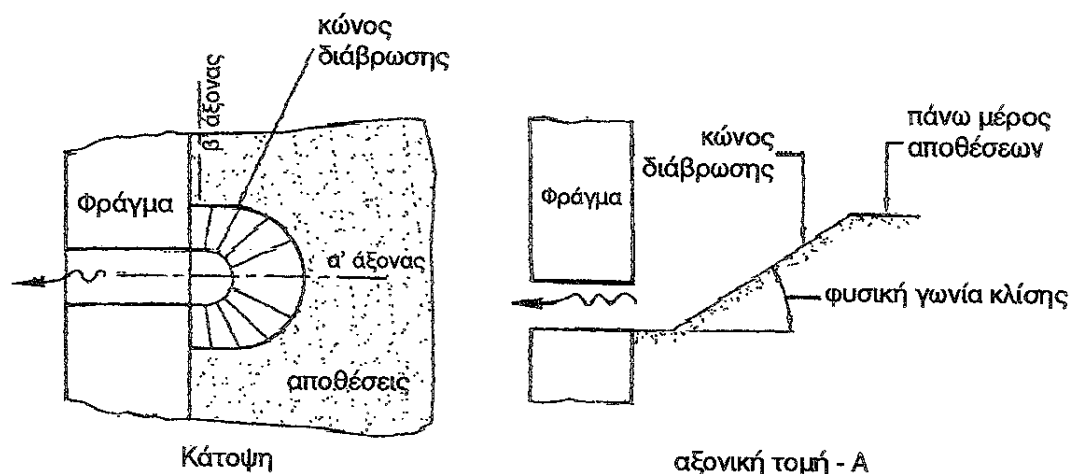


Εικόνα 5-13: Διαδικασία έκπλυσης και δημιουργία καναλιού διάβρωσης. (Morris & Fan, 1998)

5.8. Κώνος διάβρωσης

Η πιο αποτελεσματική πρακτική κατά την έκπλυση είναι η πλήρης ταπείνωση της στάθμης. Εάν όμως αυτό δεν είναι δυνατό και η έκπλυση πραγματοποιηθεί υπό πίεση με ανάντη στάθμη τότε δημιουργείται ανάντη ένας κώνος διάβρωσης.

Προσεγγιστικά αποτελεί τμήμα κώνου με τη βάση του να είναι ίση με την είσοδο του αγωγού έκπλυσης, αν και στην πραγματικότητα η διάβρωση θα είναι λίγο μεγαλύτερη. Τα πρανή θα έχουν κλίση αντίστοιχη της γωνίας απόθεσης για βυθισμένα υλικά με την κατά μήκος διεύθυνση να έχει μικρότερη κλίση από την κατά πλάτος.



Εικόνα 5-14: Δημιουργία κώνου διάβρωσης κατά την έκπλυση υπό πίεση. (Morris & Fan, 1998)

Ο κώνος διάβρωσης προσφέρεται για πειραματικές διερευνήσεις βιβλιογραφία εμφανίζει μία ποικιλία τέτοιων αναφορών. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των (Emamgholizadeh, Bina, Fathimoghadam, & Ghomeyshi, 2006) και (Meshkati, Dehgani, Naser, Emamgholizadeh, & Mosaedi, 2009).

5.9. Επιλογή χρονικής στιγμής εκκένωσης ταμιευτήρα σχετικά με την περίοδο πλημμυρών

Για το χρόνο έκπλυσης μπορεί να επιλεγεί η αρχική περίοδος των πλημμυρών. Το πλεονέκτημα είναι ότι κατά την έκπλυση στην αρχή των πλημμυρών οι πλημμυρικές παροχές με την μεγάλη φόρτιση σε φερτές ύλες περνάνε μέσα από τον ταμιευτήρα χωρίς να υπάρχει μεγάλη συγκράτηση αυτών από τον ταμιευτήρα. Ενώ χρησιμοποιούνται οι αυξημένες πλημμυρικές παροχές, κατά το τέλος της πλημμυρικής περιόδου, για την γρηγορότερη επαναπλήρωση του ταμιευτήρα. Η διαδικασία ουσιαστικά είναι μία μείξη δρομολόγησης φερτών και έκπλυσης.

Μπορεί να υπάρξει πετυχημένη έκπλυση και σε εκτός πλημμυρών περιόδους. Θα αναμένεται βεβαίως μεγαλύτερος χρόνος έκπλυσης κυρίως λόγω των μικρών υδραυλικών φορτίσεων. Επίσης αναμένεται αυξημένη συγκράτηση χονδρόκοκκων κυρίως λόγω των χαμηλότερων παροχών αλλά και λόγω της μη δρομολόγησης των πλημμυρικών στερεοπαροχών. Αλλά αναμένεται και μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης του ύψους των εκτός καναλιού αποθέσεων λόγω της μη δρομολόγησης των πλημμυρικών στερεοπαροχών εντός του καναλιού έκπλυσης.

Μία ακόμα επιλογή εποχιακής έκπλυσης έχει να κάνει με τη χρήση του ταμιευτήρα. Σε περιπτώσεις μικρών ταμιευτήρων οι οποίοι δουλεύουν κάποια συγκεκριμένη περίοδο του χρόνου, είναι δυνατόν κατά την υπόλοιπη διάρκεια ο ταμιευτήρας να αδειάσει και υπάρχει ελεύθερη ροή διαμέσου εξόδων έκπλυσης.

5.10. Διαδικασίες διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της έκπλυσης.

Κατά τη διάρκεια της έκπλυσης οι φερτές ύλες που μεταφέρονται και απομακρύνονται με τη ροή προκύπτουν κυρίως από διάβρωση των αποθέσεων στον ταμιευτήρα. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν ποιοτικά βασικοί μηχανισμοί διάβρωσης στην περίπτωση της έκπλυσης με τους οποίους οι αποθέσεις επανατίθενται σε κίνηση και απομακρύνονται με τη ροή.

5.10.1. Πλαστική ροή συντριμμάτων στην έξοδο του φράγματος

Με τη συγκέντρωση μη στερεοποιημένων αργιλικών αποθέσεων ανάντη του αγωγού έκπλυσης κατά την έναρξη της έκπλυσης αναμένεται, στην περιοχή της εξόδου, αστοχία πρανών, ρευστοποίηση και πλαστική ροή των αποθέσεων μέσα από το φράγμα.

5.10.2. Αστοχία πρανών

Η δημιουργία λόγω διάβρωσης του καναλιού έκπλυσης οδηγεί στη δημιουργία ασταθών πρανών στις όχθες του. Το κυρίως κανάλι έκπλυσης μπορεί να βαθύνει μέχρι τον σκληρό πυθμένα της παλαιάς κοίτης του ποταμού. Από εκεί και πέρα ο κύριος μηχανισμός διαπλάτυνσης του καναλιού είναι οι αστοχίες των πρανών του.

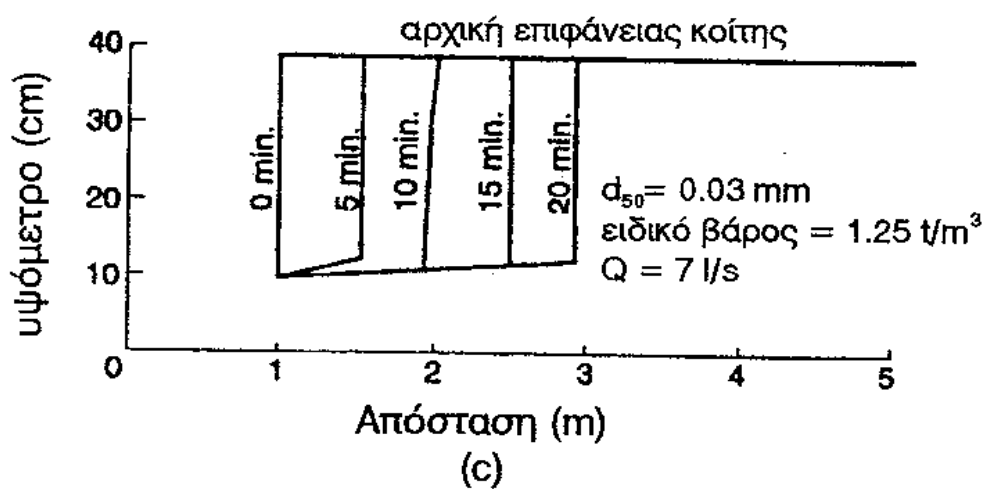
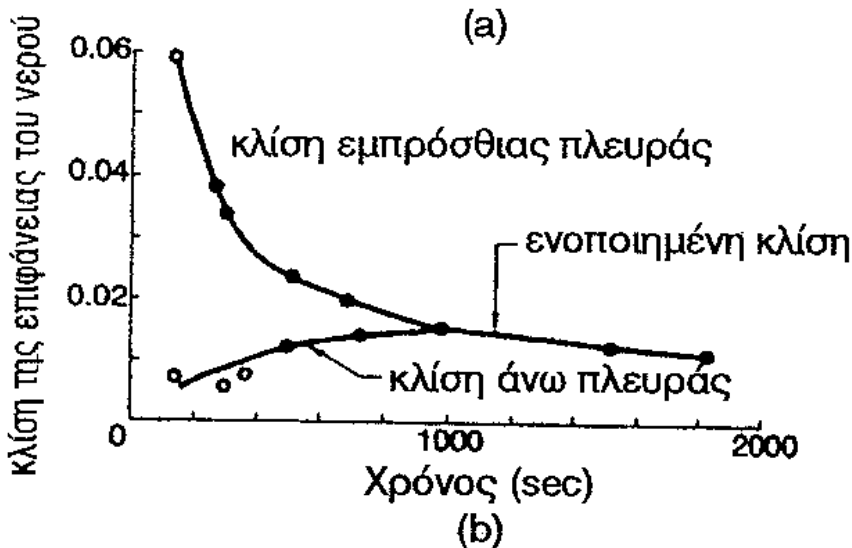
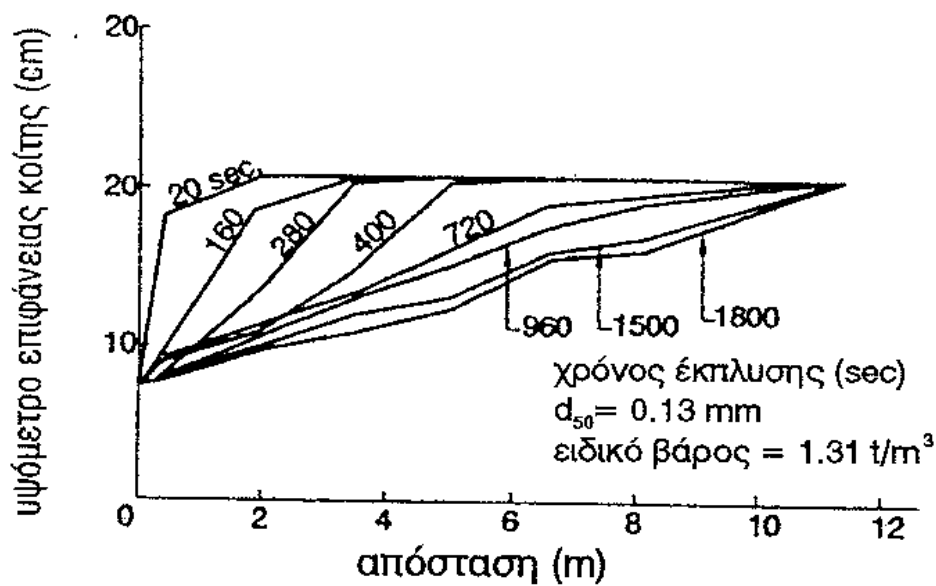
5.10.3. Διάβρωση προοδευτικά μετακινούμενη προς τα ανάντη

Πρόκειται για διάβρωση καναλιού η οποία χαρακτηρίζεται από μία ζώνη υψηλής κλίσης και από ταχέως μετακινούμενη διάβρωση προς τα ανάντη κατά μήκος ενός καναλιού που έχει ηπιότερη κλίση και χαμηλότερους ρυθμούς διάβρωσης. Ο υψηλότερος ρυθμός διάβρωσης εμφανίζεται στο απότομο πρανές στο κατάντη άκρο των αποθέσεων. Έτσι η περιοχή αυτή μετακινείται ανάντη με συνεχή αποκοπή της

κεφαλής των αποθέσεων. Εμφανίζεται έτσι και ένα σημείο αλλαγής της κλίσης των αποθέσεων το οποίο προχωράει προς τα ανάντη. Ο μηχανισμός της προοδευτικά μετακινούμενης διάβρωσης είναι ουσιαστικά αποτέλεσμα της αλλαγής της υδραυλικής κλίσης εξαιτίας του ανομοιόμορφου προφίλ των αποθέσεων. Δεν εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των κόκκων. Μπορεί να δημιουργηθεί σε λεπτόκοκκες από συνεκτικά υλικά και σε χονδροκόκκες αποθέσεις σε δέλτα ποταμού.

Σε μη συνεκτικές και μη στερεοποιημένες αποθέσεις το μέτωπο της μετακινούμενης διάβρωσης προχωράει υπό κλίση ενώ σε στερεοποιημένες αργιλώδης αποθέσεις το μετακινούμενο μέτωπο διάβρωσης μπορεί να είναι ακόμα και κατακόρυφο. Καθώς το μέτωπο διάβρωσης προχωράει προς τα ανάντη η κλίση του τείνει βαθμιαία να μειωθεί ενώ η ήπια κλίση του κυρίως σώματος των αποθέσεων γίνεται ελαφρώς πιο απότομη. Η διαδικασία προχωράει μέχρι οι δύο κλίσεις να ενοποιηθούν σε μία σε όλο το μήκος του καναλιού. Τότε ουσιαστικά σταματάει η μετακίνηση της διάβρωσης και γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του καναλιού.

Ο μηχανισμός αυτός της διάβρωσης παίζει τον κύριο ρόλο στη δημιουργία του καναλιού έκπλυσης. Η λειτουργία των εξόδων έκπλυσης δημιουργεί ροή επάνω στις αποθέσεις με ήπια κλίση, φτάνει όμως σε απότομη πτώση στο πιο κατάντη άκρο της. Έτσι εκκινεί από το κατάντη άκρο διάβρωση προς τα ανάντη.



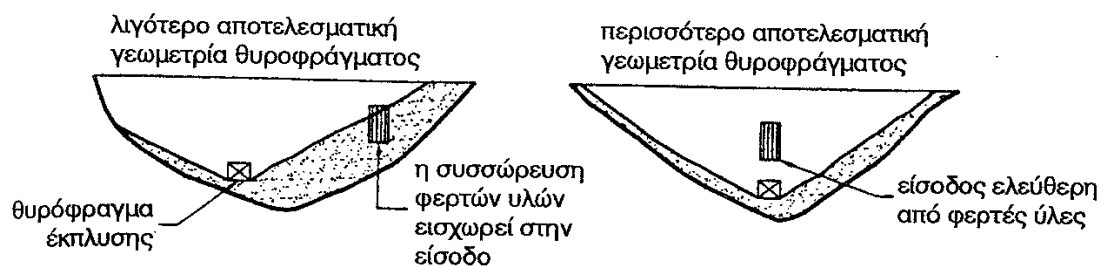
Εικόνα 5-15: Διαδικασία εξέλιξης διάβρωσης μετακινούμενης προς τα ανάντη. (Morris & Fan, 1998)

5.10.4. Ομοιόμορφη διάβρωση

Η διάβρωση στο κανάλι η οποία συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του καναλιού. Σε αντίθεση με την ανωτέρω περίπτωση σε ένα σημείο στο κατάντη άκρο του καναλιού. Όταν η συγκέντρωση των φερτών υλών σε αιώρηση είναι μικρότερη από την μεταφορική ικανότητα του νερού σε ροή τότε η ροή του νερού παρασέρνει φερτές ύλες από τον πυθμένα του καναλιού. Όταν καθαρό νερό ρέει σε περιοχή με διαβρώσιμες ύλες με ενιαία κλίση και μέγεθος κόκκου τότε παρασέρνει προοδευτικά υλικό διαβρώνοντας τις αποθέσεις. Στην αρχή ο ρυθμός διάβρωσης θα είναι πολύ μεγάλος όμως καθώς το νερό προχωράει προς τα κατάντη και παρασέρνει περισσότερα υλικά η διαβρωτική του ικανότητα μειώνει μέχρι που μηδενισμός. Συνεπώς μπορεί να δημιουργηθεί αυξημένη διάβρωση στα ανάντη σημεία του καναλιού και μικρότερη στα πιο κατάντη σημεία.

5.11. Έξοδοι έκπλυσης

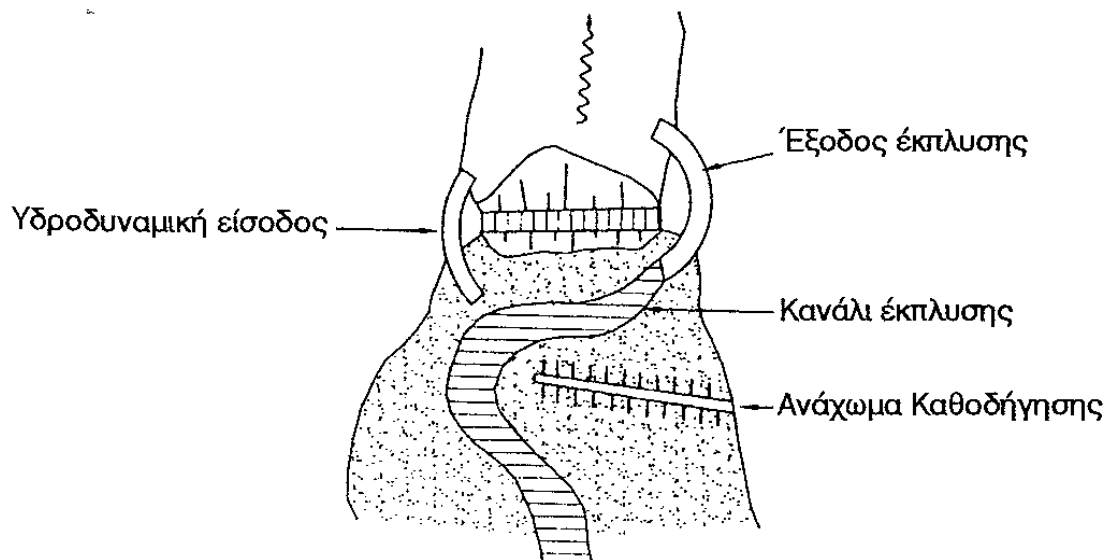
Οι έξοδοι έκπλυσης θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να εξασφαλίζουν την ταπεινώση της στάθμης και τη σταθερή διατήρηση της και την ελεύθερη ροή του ποταμού και μάλιστα συνήθως σε συνθήκες πλημμύρας. Γενικώς πρέπει να σχεδιάζονται όσο πιο βαθιά γίνεται και όσο πιο πλατιές γίνεται. Επίσης είναι προτιμότερο να είναι δίπλα δίπλα παρά η μία κάτω από την άλλη διότι έτσι θα υπάρχει μικρότερο ύψος ροής ανάντη.



Εικόνα 5-16: Θέση εξόδου έκπλυσης σχετικά με την υδροληψία του φράγματος. (Morris & Fan, 1998)

Για την τοποθέτηση των εξόδων σε σχέση με τις υδροληψίες του φράγματος επιδιώκεται οι έξοδοι έκπλυσης να βρίσκονται κάτω από τις υδροληψίες προκειμένου να επιτυγχάνεται καθαρισμός της περιοχής της υδροληψίας. Εάν για

κατασκευαστικούς λόγους αυτό δεν είναι δυνατόν προτείνεται η κατασκευή καθοδηγητικού φράγματος μικρού ύψους ώστε να εκτρέπει το κανάλι έκπλυσης προς τις υδροληψίες και να εξασφαλίζεται η λειτουργία τους χωρίς προβλήματα από αποθέσεις φερτών.



Εικόνα 5-17: Πρόταση για εκτροπή του καναλιού διάβρωσης εντός του ταμιευτήρα. (Morris & Fan, 1998)

Από τις εξόδους έκπλυσης απομακρύνεται μείγμα νερού με φερτές ύλες με μεγάλες ταχύτητες. Επιβάλλεται συνεπώς οι αγωγοί των εξόδων έκπλυσης και οι κατασκευές των θυροφραγμάτων να σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν σε αυτές τις συνθήκες.

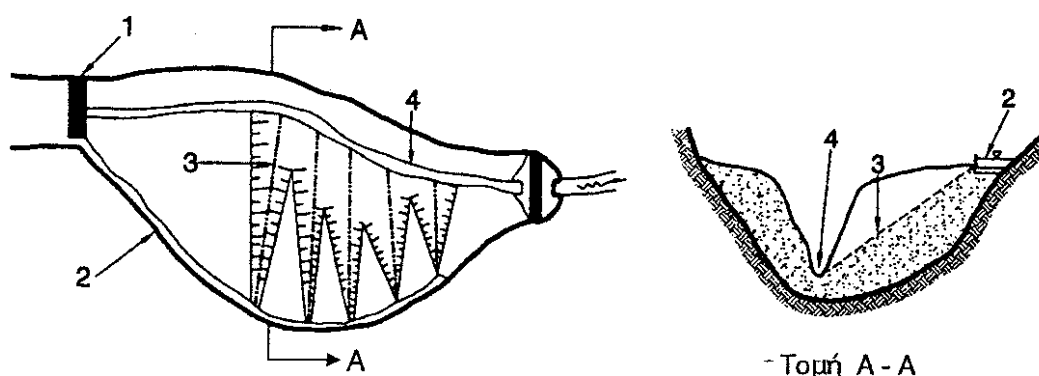
5.12. Βοηθητικά μέτρα έκπλυσης

Εάν ο ταμιευτήρας είναι πολύ πλατύς ώστε να μην μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά η έκπλυση μπορεί να εφαρμοστούν επικουρικά μέτρα με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η διάβρωση και στις περιοχές οι οποίες είναι απρόσιτες στην κυρίως ροή.

5.12.1. Διάβρωση στην κατά πλάτος διεύθυνση

Για να μεγιστοποιηθεί η διάβρωση στην κατά πλάτος διεύθυνση είναι δυνατό να εκσκαφθούν κατάλληλα κανάλια-οδηγοί από τα οποία το νερό ρέει κάθετα στο κυρίως κανάλι διαβρώνοντας τις αποθέσεις εκτός του κυρίως καναλιού διάβρωσης.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εκτροπή της ροής από το κυρίως κανάλι σε περιμετρικό γύρω από τον ταμιευτήρα από το οποίο ελεγχόμενα θα αφήνεται να φύγει νερό σε συγκεκριμένα σημεία,σε μικρά κανάλια-οδηγούς, και να ρεύσει στην κατά πλάτος διεύθυνση μέσα στο κυρίως κανάλι διάβρωσης.Με την κατάλληλη εκσκαφή των μικρών καναλιών-οδηγών γίνεται κι ο προγραμματισμός της διάβρωσης και της διαδρομής που θα ακολουθήσει.Οι εκσκαφές μπορούν να γίνουν είτε εν ξηρώ σε περίοδο προηγούμενης έκπλυσης είτε εν υγρώ με χρήση κατάλληλων βυθοκόρων(dredgers).Μάλιστα δεν είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των χωματισμών,αρκεί η απόθεσή τους δίπλα στα κανάλια διότι θα απομακρυνθούν τελικώς και αυτοί με την τελική έκπλυση και την κατάρρευση των όχθων.Η μέθοδος δρα συμπληρωματικά αφού έχει αρχικά δημιουργηθεί το κυρίως κανάλι έκπλυσης.Στην εικόνα 5-18 μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή η φιλοσοφία της μεθόδου.



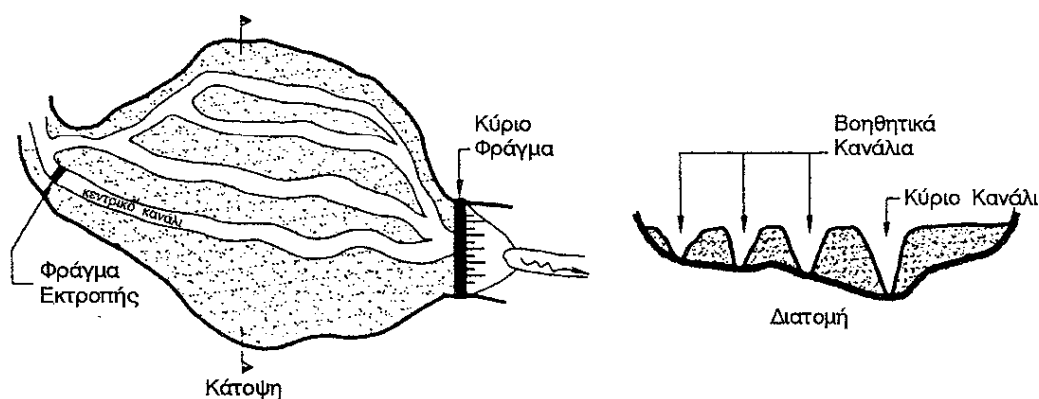
Εικόνα 5-18:Διάβρωση κατά πλάτος με εκσκαφή επικουρικών καναλιών στην κάθετη διεύθυνση.(Morris & Fan, 1998)

Το πλεονέκτημα της κατά πλάτος διάβρωσης είναι ότι επειδή χρησιμοποιούνται σχετικά μικρά κανάλια με μεγάλες κλίσεις μεταξύ των δύο καναλιών,του καναλιού εκτροπής και του κυρίως καναλιού έκπλυσης,η απομάκρυνση των αποθέσεων μπορεί να επιτευχθεί με μικρότερες παροχές,ειδικά σε ιλυώδεις αποθέσεις.

5.12.2. Διάβρωση στην κατά μήκος διεύθυνση-άξονας ανάντη-κατάντη

Παρόμοια η φιλοσοφία της μεθόδου και στην κατά μήκος διεύθυνση.Η ροή κατά τη διάρκεια της έκπλυσης εκτρέπεται στην είσοδο του καναλιού έκπλυσης σε παράλληλες διευθύνσεις όπου έχουν εκσκαφθεί κανάλια-οδηγοί της ροής.Τα

παράλληλα κανάλια μπορεί να είναι περισσότερα από ένα. Η ροή του νερού μέσα από τα κανάλια-οδηγούς δημιουργεί, διαβρώνοντας τις αποθέσεις ένα οι περισσότερα κανάλια έκπλυσης αντίστοιχα του κύριου. Τα κανάλια-οδηγοί είναι απαραίτητα προκειμένου να ακολουθηθεί η επιθυμητή διαδρομή της ροής και να διατηρηθεί η απαραίτητη οριζόντια απόσταση μεταξύ των καναλιών ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος ενοποίησής τους. Η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να περιλαμβάνει ολόκληρο σύστημα τέτοιων καναλιών με προγραμματισμό της ροής έκπλυσης να περνάει από διαφορετικό κανάλι ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην εικόνα 5-19 γίνεται κατανοητή η συγκεκριμένη πρόταση.



Εικόνα 5-19: Διάβρωση σε διέυθυνση ανάντη-κατόντη με χρήση παράλληλων καναλιών. (Morris & Fan, 1998)

Η μέθοδος αν και προτείνει λύση σε περιπτώσεις έκπλυσης σχετικά πλατύτερων ταμειυτήρων δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα-τουλάχιστο σε πλήρη ανάπτυξη με πολλά παράλληλα κανάλια έκπλυσης. Στα μειονεκτήματα εντάσσεται το ότι χρειάζεται προσεκτικό προγραμματισμό και εφαρμογή κυρίως στο ζήτημα της μη διασταύρωσης καναλιών λόγω αστοχίας της όχθης, μετακίνηση καναλιού ή υπερπήδηση καναλιού λόγω ανεπαρκούς παροχτευτικότητας των καναλιών-οδηγών

5.12.2.1. Εκτροπή της ροής στα παράλληλα κανάλια

Για την εφαρμογή των ανωτέρω μεθόδων θα πρέπει να γίνει εκτροπή της ροής στην είσοδο του καναλιού έκπλυσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατασκευή χωμάτινου πρόφραγματος. Το πρόφραγμα είναι σχεδιασμένο ώστε να εκτρέπει το σύνολο των παροχών έκπλυσης ενώ κατά την κανονική λειτουργία του ταμειυτήρα παραμένει

βυθισμένο. Τοποθετείται όσο το δυνατό πιο ανάντη χωρίς όμως να κινδυνεύει να καλυφθεί από το δέλτα των χονδροκόκκων αποθέσεων.

Το κυριότερο πρόβλημα που εμφανίζεται και πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η αποτροπή των ρευμάτων μεταφοράς από το να εισέλθουν στο βυθισμένο κανάλι έκπλυσης και να περιοριστεί η απόθεση των φερτών υλών εντός του καναλιού έκπλυσης.

5.12.3. Μηχανικώς υποβοηθούμενη έκπλυση

Μεγιστοποίηση της διάβρωσης και βελτιστοποίηση της έκπλυσης είναι δυνατών να γίνει επικουρικά με μηχανικά μέσα. Μπορεί να επιτευχθεί είτε με μετακίνηση υλικού εντός του καναλιού είτε με υποβοήθηση κατάρρευσης των όχθων του καναλιού έκπλυσης, ακόμα και με πιθανή χρήση εκρηκτικών μεθόδων. Έτσι επιτυγχάνεται η απομάκρυνση αποθέσεων μεγαλύτερου όγκου και σε μεγαλύτερη επιφάνεια από την φυσική διάβρωση. Χαρακτηριστικό είναι σίγουρα το αυξημένο κόστος.

5.13. Προσομοίωση με αριθμητικά μοντέλα

Για να γίνει ακριβής μελέτη σε συγκεκριμένο έργο προτείνεται να γίνουν αριθμητικές αναλύσεις με μοντέλα προσομοίωσης. Σε αυτή την περίπτωση θα χρειαστούν αρχικά λεπτομερέστερα στοιχεία, όπως λεπτομερής τοπογραφία του πυθμένα του ταμειυτήρα, λεπτομερής μελέτη των μελλοντικών εισροών φερτών υλών, λεπτομερής μελέτη των μελλοντικών εισροών, λεπτομέρειες της κίνησης των φερτών υλών εντός του ταμειυτήρα.

Η ανάλυση μπορεί να γίνει σε μονοδιάστατη προσομοίωση αν και έχουν προταθεί και δυσδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα. Όμως επειδή οι αναλύσεις θα πρέπει να καλύψουν μία χρονική περίοδο 50 ή 100 χρόνων με χρονικό βήμα ημερήσιο το μονοδιάστατο μοντέλο φαντάζει ως το καταλληλότερο.

Μονοδιάστατα μοντέλα έχουν προταθεί από (White & Bettess, 1984) και (Basson & Olesen, Modelling flood flushing, 1997) με το πρώτο να συνδυάζεται με λογισμικό τοπογραφικής ανάλυσης ταμειυτήρα και να αποτελεί το λογισμικό RESSASS.

5.14. Έκπλυση και παραπλήσιες υδραυλικές μέθοδοι

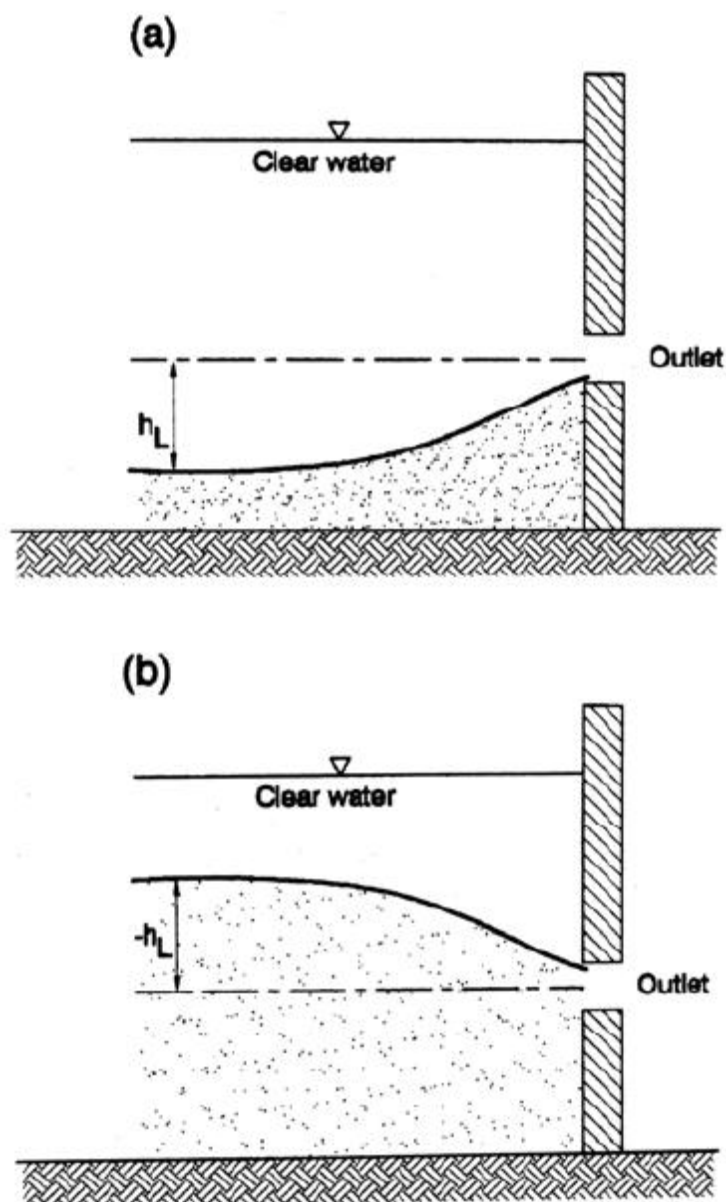
Υδραυλικές μέθοδοι απομάκρυνσης φερτών υλών είναι και οι μέθοδοι δρομολόγησης των φερτών υλών μέσα από τον ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα η διαρροή ρευμάτων πυκνότητας μέσα από τον ταμιευτήρα καθώς και η ταπείνωση της στάθμης για αποφυγή απόθεσης των φερτών υλών.

5.14.1. Διαρροή ρεύματος πυκνότητας

Εντός του ταμιευτήρα το μίγμα των λεπτόκοκκων φερτών υλών και νερού κινείται ως ρεύμα πυκνότητας. Δηλαδή κινείται ως υγρό με διαφορετική πυκνότητα από τον ταμιευτήρα οδηγούμενο από τη βαρύτητα. Με αυτόν τον τρόπο οι φερτές ύλες διανέμονται μέσα στον ταμιευτήρα και φθάνουν ως το φράγμα όπου δημιουργείται μία βυθισμένη λασπώδης λίμνη.

Με το κατάλληλο άνοιγμα εξόδων σε μεγάλο βάθος είναι δυνατό να απομακρυνθεί μεγάλο μέρος των φερτών υλών που έρχεται ως ρεύμα πυκνότητας. Ακριβής υπολογισμός της ροής του κύματος πυκνότητας είναι πολύ δύσκολο να γίνει διότι επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις των εισροών, τις διακυμάνσεις της στάθμης, τον τοπογραφία του πυθμένα του ταμιευτήρα. Έτσι αποτελεσματική εφαρμογή γίνεται συνήθως με μετρήσεις επί τόπου.

Αν και χρησιμοποιούνται έξοδοι στο φράγμα δεν θα πρέπει η τεχνική να συγχέεται με την έκπλυση, με βασική διαφορά ότι στην έκπλυση απομακρύνονται υλικά τα οποία έχουν ήδη αποτεθεί και μετακινούνται εκ νέου, ενώ με τη διαρροή του ρεύματος πυκνότητας απομακρύνονται υλικά τα οποία εισέρχονται στον ίδιο χρόνο. Επιπλέον η έκπλυση προγραμματίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα με την πρώτη εφαρμογή της να γίνεται το πιθανότερο μετά από αρκετά χρόνια από την κατασκευή του φράγματος. Η διαρροή του ρεύματος πυκνότητας γίνεται κατόπιν μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο όταν έρχεται το ρεύμα και σταματάει όταν σταματάει και η ροή του ρεύματος.



Εικόνα 5-20: Διαρροή ρεύματος πυκνότητας από έξοδο στο φράγμα. (Morris & Fan, 1998)

Στην εικόνα φαίνεται ακόμα και το πρόβλημα της κατάλληλης τοποθέτησης καθ' ύψος της εξόδου ώστε να μην απομακρύνεται και καθαρό νερό.

5.14.2. Μερική ταπείνωση στάθμης

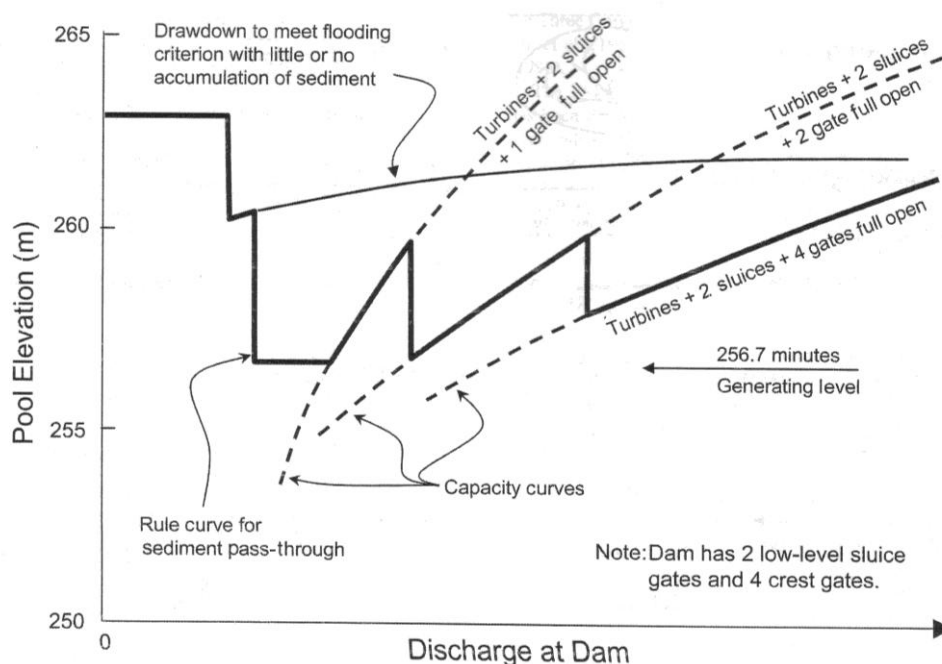
Οι υψηλές εισροές σε ένα ταμιευτήρα συνεπάγονται και αυξημένες εισροές φερτών υλών. Έτσι κατά τη διάρκεια των πλημμυρών γίνεται ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα στη χαμηλότερη στάθμη λειτουργίας μειώνοντας έτσι τον όγκο του αποθηκευμένου νερού αλλά και την ικανότητα παγίδευσης φερτών υλών του ταμιευτήρα.

Οι μεγάλο ποσοστό των φερτών υλών που εισέρχονται απομακρύνεται από τους υπερχειλιστές και έτσι μειώνεται το ποσό των φερτών υλών που κατακρατούνται από τον ταμιευτήρα.

Η διαδικασία ταπείνωσης της στάθμης μπορεί να γίνεται είτε με βάση κανόνα λειτουργίας, συναρτήσε της στάθμης του ταμιευτήρα, είτε με βάση πρόβλεψης της εισόδου των αυξημένων παροχών, είτε σε περιοδική-εποχική βάση.

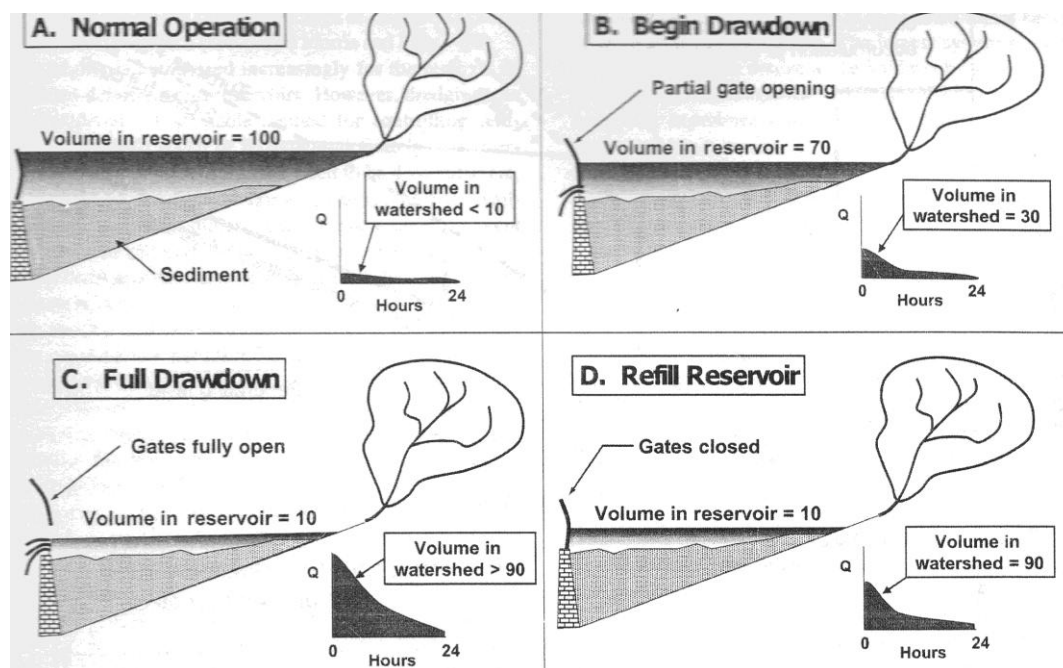
Στα θετικά της μεθόδου ότι η απόδοση των φερτών υλών γίνεται με φυσιολογικό τρόπο ακολουθώντας ως ένα βαθμό την φυσιολογική φόρτιση σε φερτές ύλες του κατάντη ποταμού προτού κατασκευαστεί το φράγμα.

Στην πρώτη εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα λειτουργίας ταμιευτήρα με πρόβλεψη στην καμπύλη λειτουργίας του ταπείνωσης στάθμης λειτουργώντας κατάλληλα τις υδροηλεκτρικές μονάδες του και ανοίγωντας τις εξόδους στο φράγμα.



Εικόνα 5-21:Καμπύλη λειτουργίας πραγματικού φράγματος για αποφυγή απόθεσης φερτών υλών.(ASCE Task Committee, 2008)

Στη δεύτερη εικόνα φαίνεται παράδειγμα λειτουργίας ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της πλημμύρας.Ο ταμιευτήρας καταβιβάζει τη στάθμη του πριν έρθει η πλημμύρα και έπειτα αφού διέλθει ο μεγαλύτερος όγκος των αυξημένων εισροών και των φερτών η στάθμη του ταμιευτήρα ανεβαίνει γεμίζοντας με σχετικά καθαρό νερό.



Εικόνα 5-22: Διάγραμμα λειτουργίας ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια πλημμύρας με ταπείνωση της στάθμης. (ASCE Task Committee, 2008)

Η μέθοδος της ταπείνωσης της στάθμης του ταμιευτήρα για μείωση της κατακράτησης των φερτών υλών είναι η μέθοδος η οποία συγγέεται περισσότερο με την έκπλυση. Οι δύο διαδικασίες δεν διαχωρίζονται απολύτως και πολλές φορές ένας ταμιευτήρας που σχεδιάζεται με εξόδους έκπλυσης δεν είναι ξεκάθαρο πια τεχνική θα ακολουθήσει αποκλειστικά ή αν θα χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός έκπλυσης και μείωσης της κατακράτησης.

Αν και γενικώς κατά την έκπλυση στόχος είναι να απομακρυνθούν φερτές ύλες οι οποίες έχουν ήδη αποθεθεί, κατά τη διάρκεια της έκπλυσης απομακρύνονται και φερτές ύλες οι οποίες εισέρχονται εκείνη την ώρα, ειδικά εάν η έκπλυση λαμβάνει χώρα στην περίοδο των πλημμυρών.

5.15. Συμπεράσματα

Η έκπλυση φερτών υλών από ταμιευτήρες είναι μέθοδος απομάκρυνσης αποθέσεων σε ένα ταμιευτήρα.

Κατά την έκπλυση στόχος είναι να ταπεινωθεί η στάθμη του ταμιευτήρα σε όσο μεγαλύτερο βαθμό γίνεται ώστε οι ροές του ποταμού να διαβρώσουν ένα κανάλι μέσα στις αποθέσεις του ταμιευτήρα και να παρασύρουν υλικά απομακρύνοντας τα. Κοντά στο φράγμα όπου θα υπάρχει στάθμη νερού, έκπλυσης γίνεται υπό πίεση

και η διάβρωση έχει σχήμα κώνου. Μετά την πρώτη έκπλυση, η οποία γίνεται όταν ο ταμιευτήρας γεμίσει με υλικά ή όταν υπάξουν προβλήματα εξαιτίας των αποθέσεων, η έκπλυση επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ετήσια, για την απομάκρυνση των επιπλέον αποθέσεων και τη συντήρηση του καναλιού έκπλυσης.

Μετά τη δημιουργία του καναλιού έκπλυσης αυτό παραμένει βυθισμένο και δρα ευνοϊκά. Οι καινούριες αποθέσεις έχουν την τάση να συγκεντρώνονται μέσα στο κανάλι, λόγω του μεγαλύτερου βάθους και των μικρότερων ταχυτήτων ροής εντός αυτού αλλά και λόγω του ότι τα ρεύματα πυκνότητας έχουν την τάση να ρέουν και άρα να αποθέτουν φερτές ύλες εντός αυτού.

Η έκπλυση για να είναι τεχνικά εφαρμόσιμη θα πρέπει να συντρέχουν λόγοι:

-Αφθονία παροχών κατά τη διάρκεια της έκπλυσης

-Ύπαρξη ή εκ των υστέρων δυνατότητα κατασκευής εξόδων έκπλυσης

-Φερτά αποτεθειμένα υλικά κυρίως λεπτόκοκκα, δηλαδή μετακινήσιμα από τη ροή. Επιπλέον ένας ταμιευτήρας με αποθέσεις κυρίως από χονδροκόκκα υλικά έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής που προκύπτει από τη συνεχή συγκέντρωση χονδροκόκκων υλικών που δεν μπορούν να απομακρυνθούν κατά την έκπλυση.

Η έκπλυση για να είναι οικονομικά εφικτή θα πρέπει:

-Να υπάρχει διαθέσιμο νερό για την έκπλυση ώστε να μη διαταραχθεί η ικανότητα του ταμιευτήρα να ικανοποιεί τη ζήτηση. Ο όγκος του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι αρκετά μικρότερος των ετήσιων εισροών.

-Θα πρέπει ο όγκος που διατηρείται να δικαιολογεί την εφαρμογή της έκπλυσης. Ο όγκος αυτός είναι ο όγκος του καναλιού έκπλυσης. Γεωμετρικά λοιπόν ευνοούνται ταμιευτήρας με παρόμοιο σχήμα με το κανάλι έκπλυσης, σε σχήμα φαραγγιού δηλαδή.

Ο (Atkinson E. , 1996) έθεσε και αξιολόγησε κριτήρια εκτίμησης επιτυχημένης τεχνικά και οικονομικά έκπλυσης.

Διαδικασίες διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα κατά την έκπλυση είναι η ροή η υλικού, η κατάρρευση των πρηνών του καναλιού έκπλυσης, η προοδευτικά μετακινούμενη διάβρωση προς τα ανάντη και έπειτα η ομοιόμορφη διάβρωση σε όλο το μήκος του καναλιού. Η αστοχία των πρηνών είναι η κύρια διαδικασία διαπλάτυνσης του καναλιού έκπλυσης και η ομοιόμορφη διάβρωση είναι η κύρια διαδικασία εκβάθυνσης του καναλιού.

Μπορούν να γίνουν επικουρικές εργασίες για να ευνοηθούν οι διαδικασίες διάβρωσης του καναλιού, να απομακρυνθούν περισσότερα υλικά και να προκύψει μεγαλύτερο κανάλι διάβρωσης.

Κεφάλαιο 6

Εκσκαφή αποθέσεων εν υγρώ-βυθοκόρηση

6.1. Εισαγωγικά

Η απομάκρυνση των αποθέσεων σε ένα ταμιευτήρα είναι δυνατόν να γίνει με την χρήση κάποιου εκσκαπτικού μηχανήματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα να γίνει αυτό κάτω από το νερό ώστε να μην διαταραχθεί πολύ η λειτουργία του ταμιευτήρα. Να αναφερθεί πως η απομάκρυνση φερτών υλών με τη χρήση μηχανημάτων κάτω από το νερό (βυθοκόρηση) δίδεται στην ξένη βιβλιογραφία με τον όρο 'dredging'.

6.2. Γενική χρησιμότητα

Η βυθοκόρηση είναι πρακτική η οποία χρησιμοποιείται ήδη εδώ και χιλιετίες (Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999) και εφαρμόζεται ευρέως στην εκσκαφή λιμανιών, πλωτών ποταμών, επανάκτηση γης, απομάκρυνση μολυσμένων εδαφών.

Η τεχνολογία έχει αναπτύξει μία πληθώρα μηχανημάτων και τεχνικών για την εκσκαφή ανάλογα την κάθε χρήση και τις συνθήκες.

6.3. Είδη βυθοκόρων

Όπως αναφέρθηκε τα μηχανήματα τα οποία μπορούν να εκτελέσουν εργασίες απομάκρυνσης υλικών κάτω από το νερό (dredgers), στο εξής θα αναφέρονται ως βυθοκόροι, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ανάλογα το είδος της δουλειάς για την οποία είναι κατάλληλα και της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν.

Μπορούν να διαχωρισθούν σε συμβατικά μηχανήματα και εξειδικευμένα. Στα συμβατικά εντάσσονται τα μηχανικής λειτουργίας και τα υδραυλικής λειτουργίας. Με τα πρώτα να χρησιμοποιούν καθαρά μηχανικές μεθόδους απομάκρυνσης των

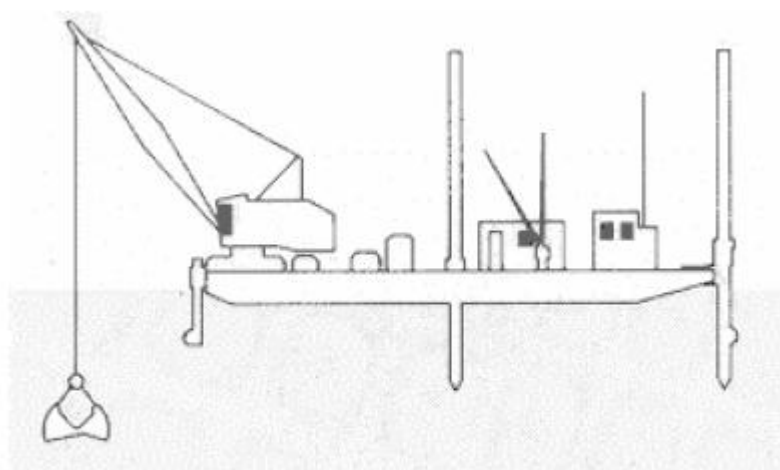
υλικών, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούν τις αρχές της υδραυλικής και τις δυνάμεις του νερού για την απομάκρυνση (απορροφητήρες).

6.3.1. Μηχανικής λειτουργίας βυθοκόροι

Μηχανικής λειτουργίας βυθοκόροι είναι:

- αρπάγης (grapple/grap)
- με υδραυλικό βραχίονα (dipper/backshovel)
- με αλυσίδα κάδων (bucket-ladder)

6.3.1.1. Βυθοκόρος αρπάγης



Grab dredge

Εικόνα 6-1:Σκαρίφμα βυθοκόρου με αρπάγη.(Vlasblom, 2003)

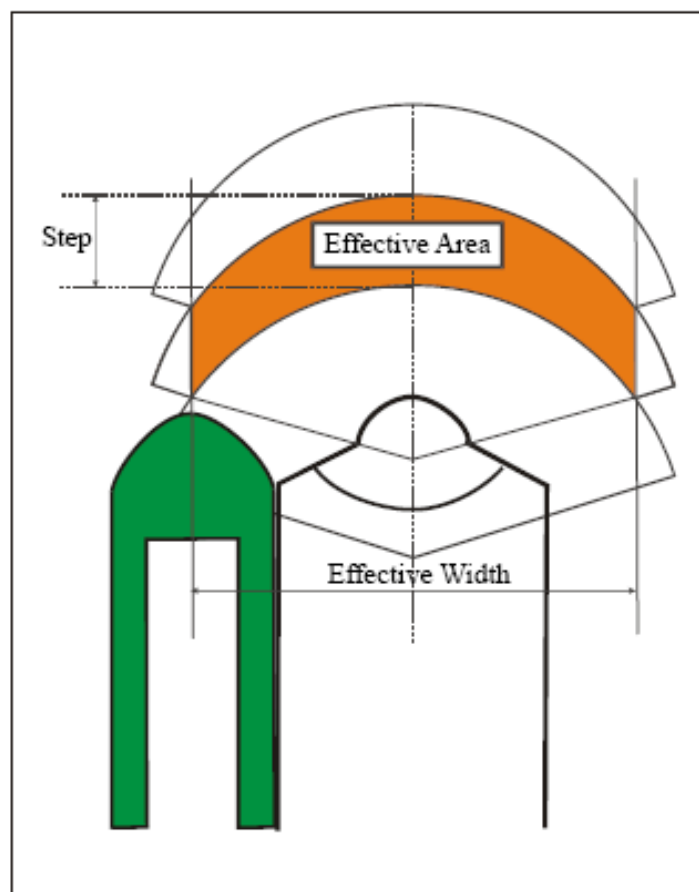
Η βυθοκόρος αρπάγης είναι η πιο συνήθης βυθοκόρος, αποτελείται από ένα γερανό πάνω σε μία πλατφόρμα ακινητοποιημένη είτε με άγκυρες είτε με στήλους. Από το γερανό κρέμεται μία αρπάγη η οποία με κατάλληλο σύστημα καλωδίων μπορεί να κλείσει και να ανοίξει.



Εικόνα 6-2: Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με αρπάγη. (Vlasblom, 2003)

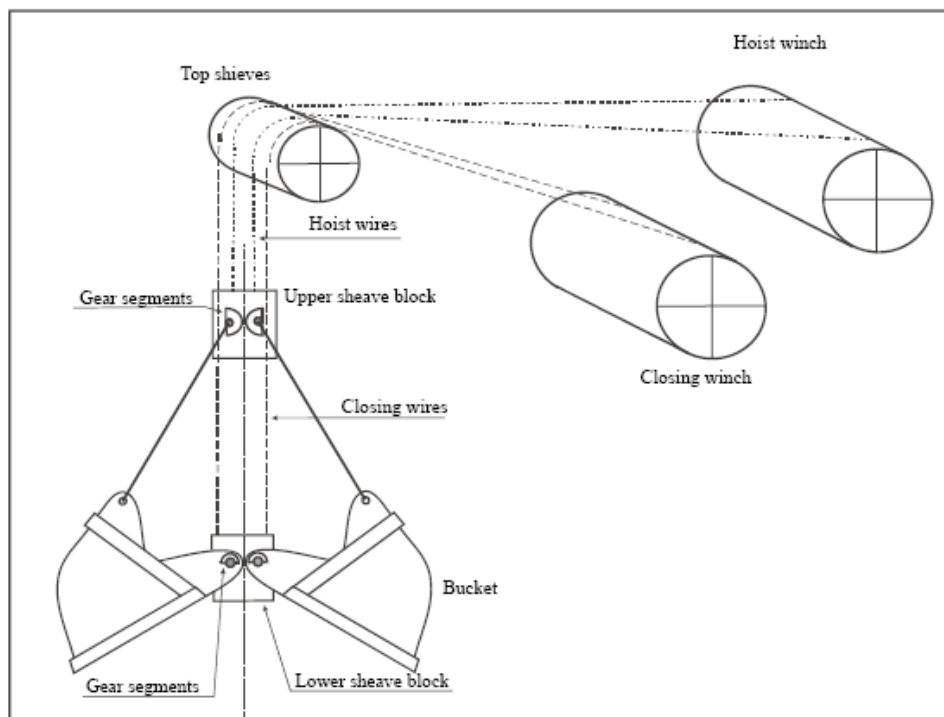
Η εκσκαφή γίνεται κατεβάζοντας την αρπάγη ανοικτή μέχρι τον πυθμένα, εκεί κλείνει κόβοντας υλικό του πυθμένα και έπειτα ανεβαίνει και η μεταφορά γίνεται είτε με φορηγίδες είτε με χοάνες αποθήκευσης πάνω στο πλεούμενο. Η κίνηση σε κάθε θέση γίνεται σε περιφέρεια κύκλου που διαγράφει ο βραχίονας του γερανού, και είναι πολύ σημαντικό για την αποτελεσματικότητα της εκσκαφής να γίνεται ακριβής γεωγραφική καταγραφή του κάθε κύκλου εκσκαφής, ώστε να μπορεί το κάθε ρίξιμο της αρπάγης να γίνεται δίπλα στο άλλο.

Η πλατφόρμα συνήθως ακινητοποιείται είτε από σύστημα αγκυρών είτε από σύλους. Σε κάθε θέση γίνεται εκσκαφή σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια. Η βυθοκόρηση γίνεται σε μία περιοχή κύκλου. Η γωνία της κυκλικής περιοχής επηρεάζει και την αποτελεσματικότητα της βυθοκόρησης. Στην εικόνα φαίνεται η περιοχή στην οποία γίνεται η εκσκαφή και πως αυτή μετακινείται σε κάθε θέση.



Εικόνα 6-3: Περιοχή εκσκαφής σε βυθοκόρο αρπάγης σε κάθε θέση. (Vlasblom, 2003)

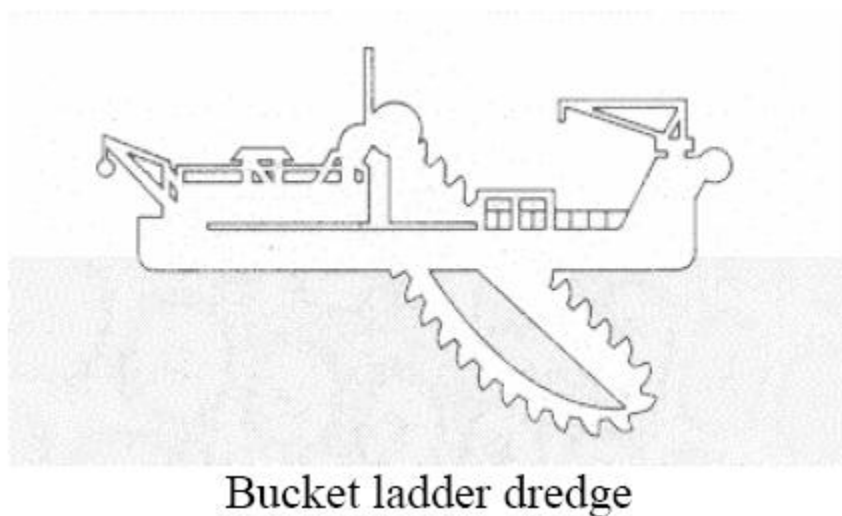
Υπάρχει ποικιλία στο μέγεθος το βάρος και το είδος της αρπάγης ανάλογα και το είδος των αποθέσεων που εκσκάπτονται. Για παράδειγμα εκσκαφή αποθέσεων μαλακής ιλύος χρειάζεται ελαφρύτερη αρπάγη με μεγαλύτερο όγκο και το αντίθετο για αποθέσεις με μεγάλη συνεκτικότητα και κομμάτια βράχων. Πάντως το μέγεθος της αρπάγης κυμαίνεται από 1 μέχρι 200m³.



Εικόνα 6-4:Αρπάγη και σύστημα καλωδίων με το οποίο ανοίγει και κλείνει. (Vlasblom, 2003)

Οι μεγαλύτερες βυθοκόροι αρπάγης χρησιμοποιούνται σε μαζικές βυθοκορήσεις ενώ οι μικρότερες μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές μικρότερες εργασίες. Η βυθοκόρος αρπάγης είναι πιο κατάλληλη για μαλακές αποθέσεις ιλύος και άμμου. Ενώ μπορεί ο μόνος περιορισμός βάθους προκύπτει από το μήκος του συρματοσχοινίου και για αυτό η βυθοκόρος αρπάγης μπορεί να κάνει εκσκαφές σε μεγάλο βάθος-από 30 έως και 150m. Να σημειωθεί πως με την αύξηση του βάθους μειώνεται η ακρίβεια.

6.3.1.2. Αλυσίδα κάδων



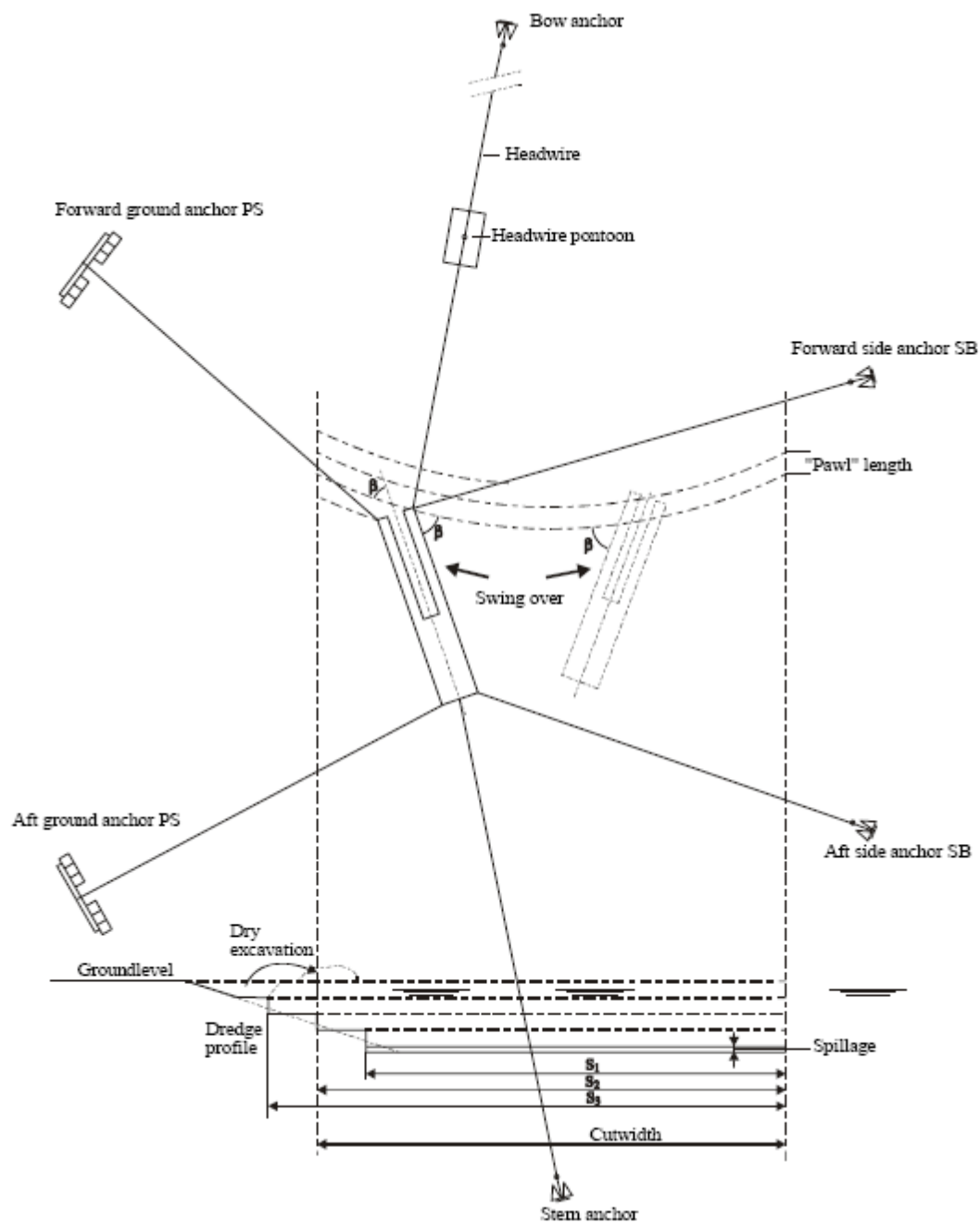
Εικόνα 6-5:Σκαρίφημα βυθοκόρου με σειρά βαγονιών-κουβάδων. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος αποτελείται από μια σειρά κάδων προσαρμοσμένων σε μια αλυσίδα τα οποία γυρνάνε συνεχώς,σκάβουν το υλικό του πυθμένα και το αποθέτουν στην κορυφή σε μια χοάνη.Από τη χοάνη υπάρχουν πλευρικά κεκλιμένα επίπεδα από τα οποία το υλικό γλιστράει σε φορηγίδες.Η μεταφορά μπορεί και γίνει και με συνεχόμενο τρόπο με χρήση μεταφορικών ιμάντων.



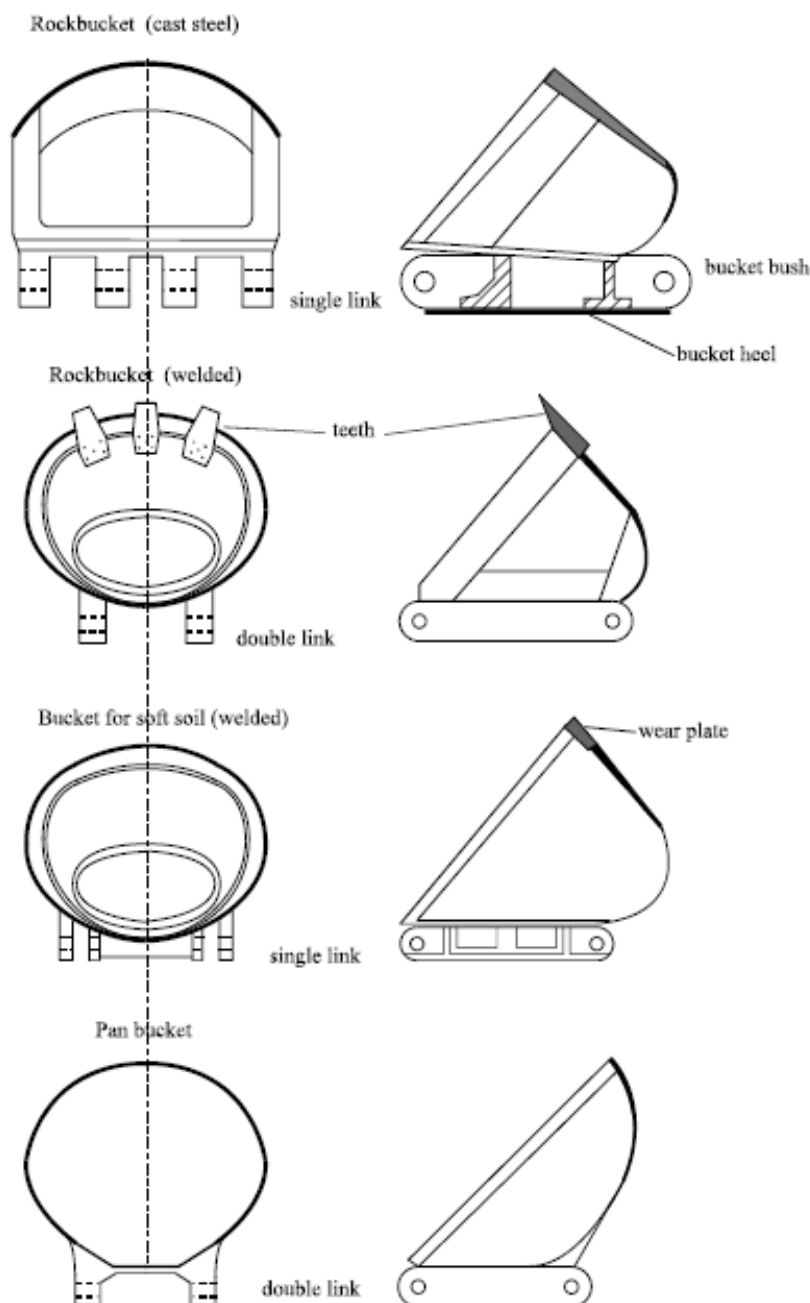
Εικόνα 6-6:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με βαγονέτο,όπου διακρίνεται η αλυσίδα των κάδων. (Vlasblom, 2003)

Ένα από τα μειονεκτήματα της βυθοκόρου είναι η μεγάλη επιφάνεια η οποία χρειάζεται για να λειτουργήσει. Η βυθοκόρος ακινητοποιείται με ένα σύστημα 6 αγκυρών. Η κίνηση της κατά την εκσκαφή ακολουθεί τμήμα κύκλου συγκρατημένη από το συρματόσχοινο της άγκυρας της πλώρης το οποίο μπορεί να φτάσει σε μήκος μέχρι και τα 1-2 χιλιόμετρα. Είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα έτσι ώστε η το μακρύ συρματόσχοινο να μην 'βρίσκει' στον πυθμένα αλλά και να μην θέτει σε κίνδυνο την ναυσιπλοΐα των άλλων σκαφών όπως των φορηγίδων που θα βρίσκονται γύρω.



Εικόνα 6-7: Τοποθέτηση και κίνηση της βυθοκόρου κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. (Vlasblom, 2003)

Οι κάδοι ποικίλουν σε σχήμα και μέγεθος ανάλογα με το είδος των αποθέσεων το οποίο σκάβεται, την ευκολία αδειάσματος στην κορυφή, τον όγκο υλικών που μπορούν να μεταφέρουν και το κόστος τους. Σε περιπτώσεις εκσκαφής βράχου χρησιμοποιούνται δύο σειρές αλυσίδων με κάδους. Η χωρητικότητα του κάδου μπορεί να κυμανθεί από 50 μέχρι και 1200 λίτρα.



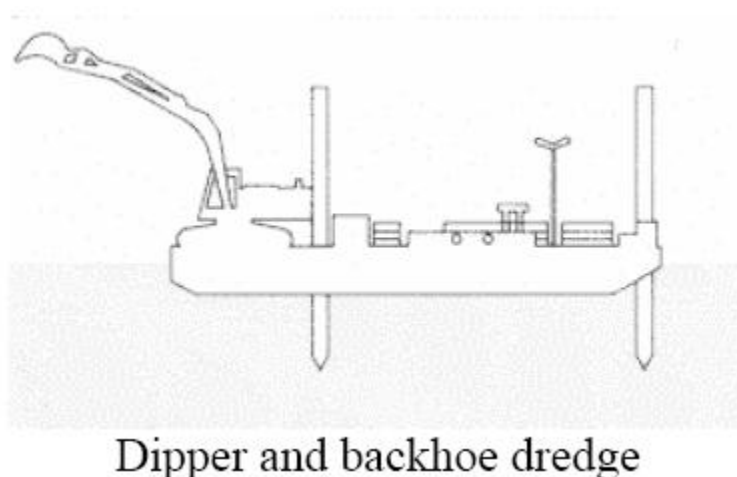
Εικόνα 6-8:Είδη κάδων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος με τη σειρά κάδων έχει μεγαλύτερη παραγωγικότητα από τις βυθοκόρους αρπάγης και τις βυθοκόρους με βραχίονα λόγω της συνεχής λειτουργίας της αλλά έχει και μεγαλύτερο κόστος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκσκαφή σε σχεδόν όλα τα είδη αποθέσεων από μαλακή ιλύ μέχρι και μαλακό βράχο. Σε πολύ συνεκτικά εδάφη πέφτει η αποτελεσματικότητά της. Το βάθος εκσκαφής κυμαίνεται από 3-4m το ελάχιστο μέχρι και 25-30m το μέγιστο.

Η χρήση της έχει περιοριστεί αρκετά πλέον από τις υδραυλικές βυθοκόρους αναρρόφησης. Σε περιπτώσεις ρηχών νερών μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρώτα οι κάδοι για να γίνει μία πρώτη εκβάθυνση ώστε να μπορεί να έρθει η κύρια βυθοκόρος.

Εξαιτίας του υψηλού θορύβου υπάρχει περιορισμός στη χρήση της σε αστικές περιοχές.

6.3.1.3. Βυθοκόρος με υδραυλικό βραχίονα

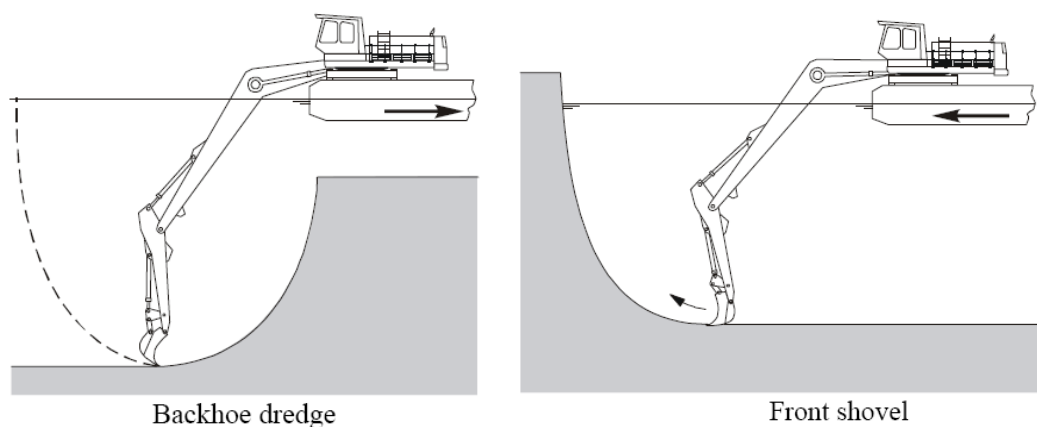


Εικόνα 6-9: Σκαρίφημα βυθοκόρου με υδραυλικό βραχίονα. (Vlasblom, 2003)

Υπάρχουν δύο είδη βυθοκόρου με υδραυλικό βραχίονα. Η κουτάλα του βραχίονα μπορεί είτε να σπρώχνει είτε να τραβάει το υλικό. Η πρώτη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση ρηχών εδαφών όπου η πλατφόρμα δεν μπορεί να προσεγγίσει.

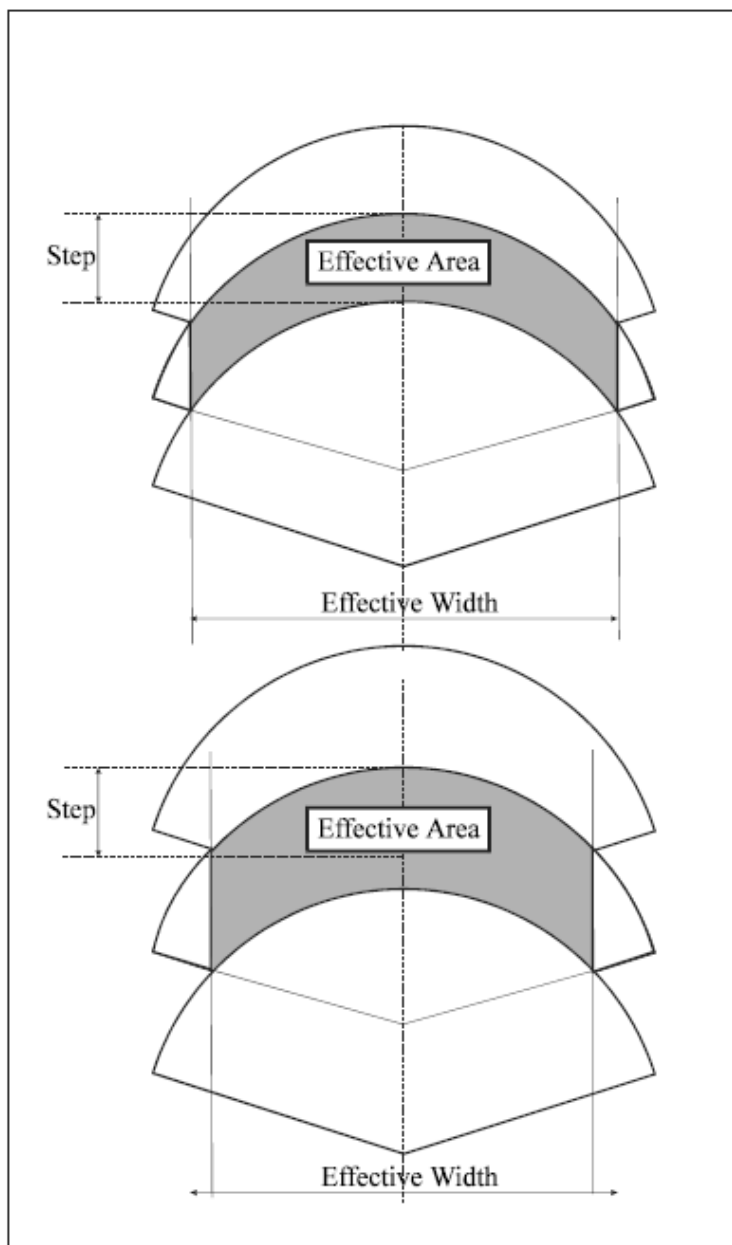


Εικόνα 6-10:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου όπου διακρίνεται ο υδραυλικός βραχίονας. (Vlasblom, 2003)



Εικόνα 6-11:Τρόποι εκσκαφής βυθοκόρου με υδραυλικό βραχίονα. (Vlasblom, 2003)

Η πλατφόρμα της βυθοκόρου ακινητοποιείται με σταθεροποιητικούς στύλους. Δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα από τους κυματισμούς. Σε κάθε θέση εκσκαφής η περιοχή στην οποία γίνεται αποδοτική εκσκαφή εξαρτάται από το βήμα κατά το οποίο μετακινήθηκε το μηχάνημα. Μεγάλο βήμα δίνει περιοχή με μεγάλο πάχος και μικρό εύρος και το αντίθετο για μικρότερο βήμα, όμως το συνολικό εμβαδό παραμένει περίπου το ίδιο.



Εικόνα 6-12: Περιοχή αποδοτικής εκσκαφής συναρτήσει του βήματος μετακίνησης. (Vlasblom, 2003)

Το μέγεθος του κάδου κυμαίνεται από μερικά m^3 μέχρι και $20m^3$. Ενώ το κατακόρυφο εύρος της εκσκαφής ορίζεται από το μήκος του βραχίονα (μπούμα) και μπορεί να είναι από 10 μέχρι 20m.

Γενικώς το είδος των εκσκαφών τις οποίες μπορεί να δουλέψει το μηχάνημα είναι παρόμοιο με της βυθοκόρου αρπάγης. Δηλαδή άμμος και μαλακή άργιλο. Δεν ενδείκνυται για πολύ συνεκτικά εδάφη.

Το μέγιστο βάθος εκσκαφής μπορεί να φτάσει τα 25m.

6.3.2. Υδραυλικές βυθοκόροι

Βυθοκόροι υδραυλικής λειτουργίας είναι βυθοκόροι στις οποίες υγρό-νερό παίζει ρόλο σε μία εκ των διαδικασιών της επαναιώρησης των αποθέσεων, της εκσκαφής και της μεταφοράς τους στο τελικό σημείο απόθεσης.

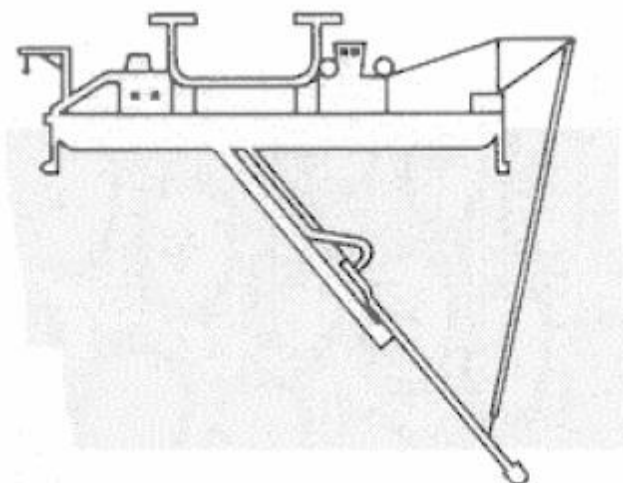
Στης υδραυλικές βυθοκόρους τα υλικά που απομακρύνονται πρώτα αναταράσσονται και ανακατεύονται με νερό είτε με τη χρήση κεφαλών κοπής είτε με τη χρήση πιδάκων νερού.

Η υδραυλική βυθοκόρος αφού κάνει την εκσκαφή του υλικού το μεταφέρει στο σημείο απόθεσης είτε με αγωγό είτε αρχικά το αποθέτει σε χοάνες οι οποίες μεταφέρονται στο τελικό σημείο απόθεσης.

Υδραυτικοί βυθοκόροι είναι:

- απλής αναρρόφησης (plain-suction)
- με κεφαλή κοπής και αναρρόφηση (cutter-suction)
- με χοάνη (trailing suction hopper)

6.3.2.1. Απλή βυθοκόρος αναρρόφησης



Plain suction dredge

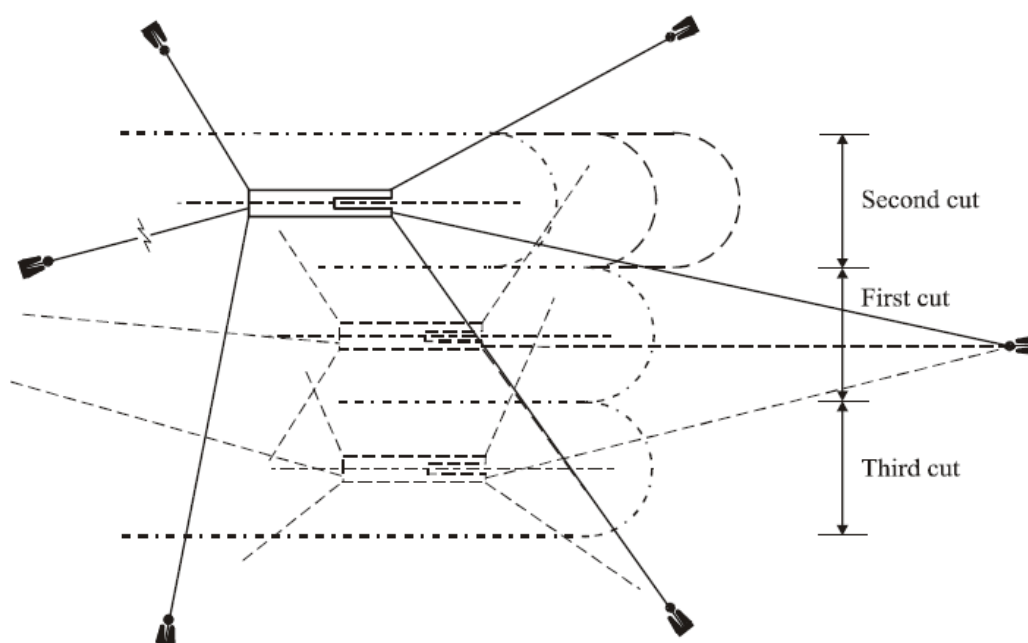
Εικόνα 6-13:Σκαρίφημα βυθοκόρου με απλή αναρρόφηση. (Vlasblom, 2003)

Η απλή βυθοκόρος αναρρόφησης διαθέτει τουλάχιστον μία αντλία αναρρόφησης. Τα φερτά υλικά περνάνε από έναν αγωγό ο οποίος κρέμεται και κατευθύνεται από συρματόσχοινα. Είναι σύνηθες να προσαρμόζεται στην άκρη του αγωγού μία αντλία η οποία εκτοξεύει πίδακα νερού για να αναταράξει τις αποθέσεις.

Η μεταφορά και η τελική διάθεση των υλικών μπορεί να γίνει είτε μέσω αγωγών είτε με μεταφορά από φορηγίδες.

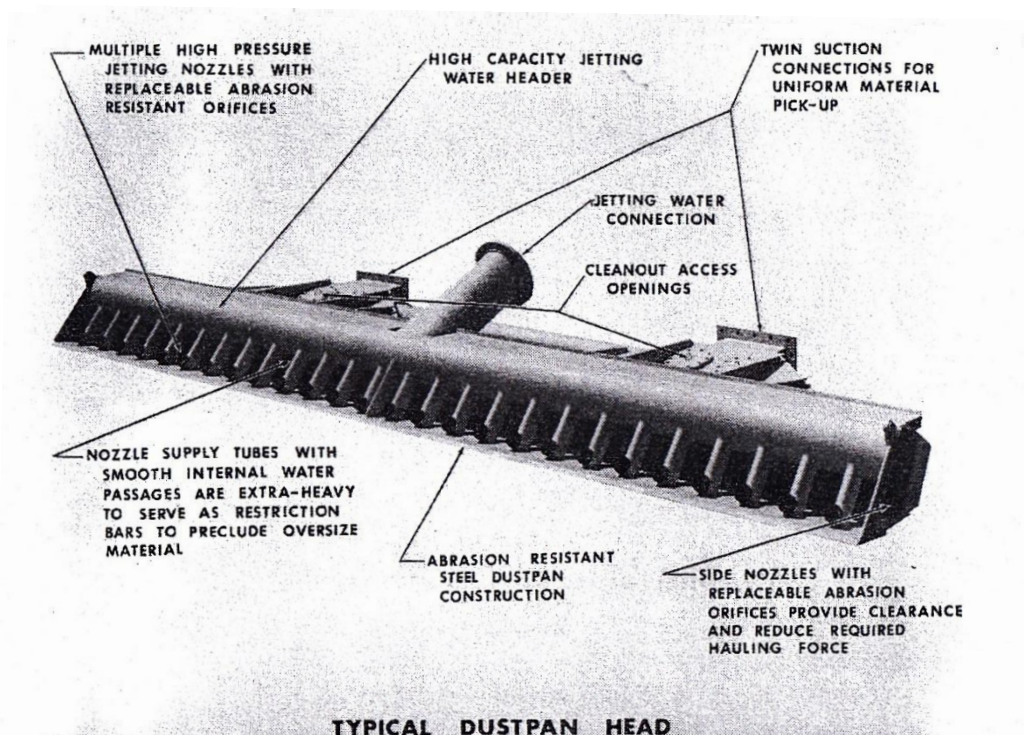
Η εκσκαφή γίνεται εξαιτίας της διάβρωσης που δημιουργούν οι αυξημένες ταχύτητες ροής λόγω της αναρρόφησης. Η διαδικασία προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως την περατότητά του και τη σχετική πυκνότητά του.

Η πλατφόρμα ακινητοποιείται και κινείται με ένα συνδυασμό αγκυρών.



Εικόνα 6-14: Διαδρομή εκσκαφής της βυθοκόρου αναρρόφησης (Vlasblom, 2003)

Η άκρη του αγωγού καταλήγει σε απλό στόμιο. Υπάρχει και το στόμιο σε σχήμα σαρώθρου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκσκαφή αποθέσεων με μικρό ύψος με υψηλή αποδοτικότητα.



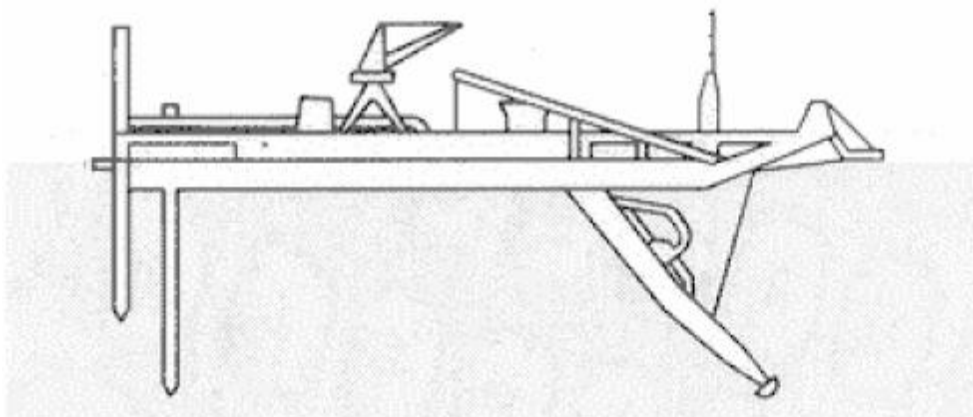
Εικόνα 6-15:Σάρωτρο εκσκαφής για την απλή βυθοκόρο αναρρόφησης.(Turner, 1996)

Επειδή η βυθοκόρος δε διαθέτει σύστημα κοπής μπορεί να σκάψει μόνο μη συνεκτικά υλικά.

Μπορεί να γίνει εκσκαφή μέχρι και βάθος 30m.Για μεγαλύτερα βάθη είναι δυνατό να γίνει εκσκαφή με αντλία η οποία βρίσκεται στον πυθμένα και όχι πάνω στην πλατφόρμα.Το ανώτερο βάθος εκσκαφής μπορεί να ξεπερνάει τα 100m ανάλογα το μέγεθος της αντλίας.

Επίσης η βυθοκόρος στερείται ακρίβειας στην εκσκαφή.

6.3.2.2. Βυθοκόρος αναρρόφησης με κεφαλή κοπής



Cutter dredge

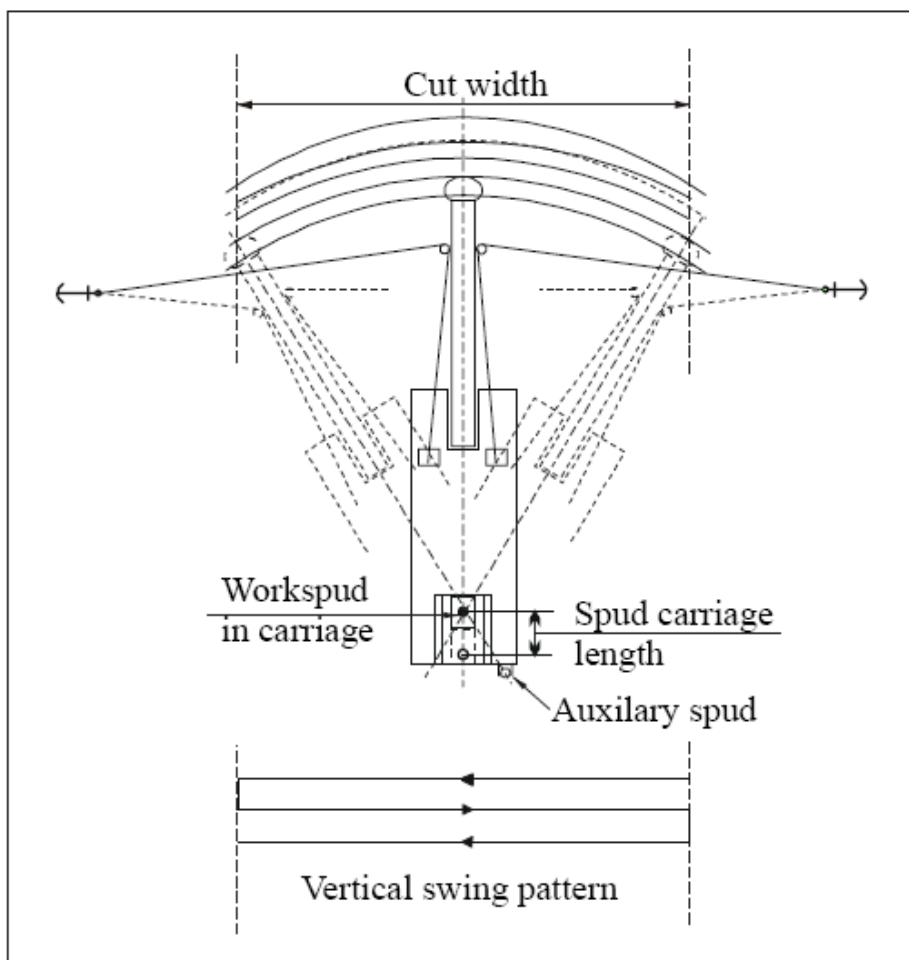
Εικόνα 6-16:Σκαρίφημα βυθοκόρου με κεφαλή κοπής. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος διαθέτει μία κεφαλή κοπής για την εκσκαφή των αποθέσεων πριν την αναρρόφησή τους από την αντλία βυθοκόρησης. Η τελική διάθεση των υλικών γίνεται είτε με υδραυλική μεταφορά σε αγωγούς με μέγιστη απόσταση τα 10km είτε με μεταφορά από φορηγίδες.

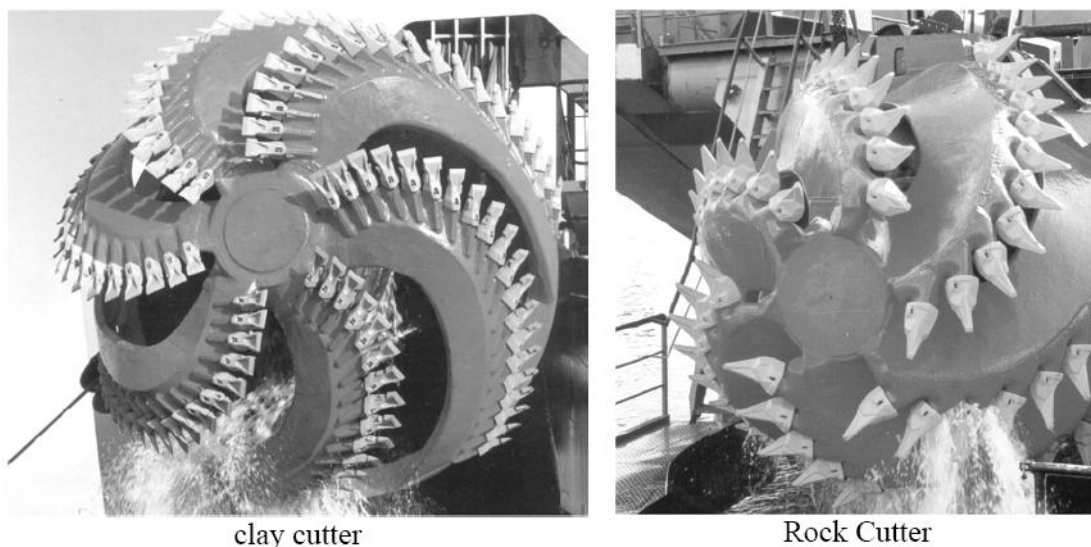


Εικόνα 6-17:Άποψη πραγματικής βυθοκόρου αναρρόφησης με κεφαλή κοπής. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος ακινητοποιείται από τρεις στύλους ακινητοποίησης και δουλεύει σε τμήμα κύκλου περιστρεφόμενη γύρω από τον ένα στύλο ανασηκώνοντας τους άλλους δύο ενώ κάνει και παράλληλα βήματα πλάτους 4-6m ανάλογα το έδαφος.



Εικόνα 6-18:Μοτίβο εκσκαφής της κεφαλής κοπής. (Vlasblom, 2003)



Εικόνα 6-19:Εικόνες κεφαλών κοπής. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος με την κεφαλή κοπής μπορεί να δουλέψει σε όλων των ειδών τα εδάφη ενώ μπορεί να κόψει ακόμα και βράχο. Η εκσκαφή έχει μεγάλη ακρίβεια. Ενώ σε ιδανικές συνθήκες ο λόγος νερού-φερτών μπορεί να φτάσει το 4:1 με 3:1.

Η εκσκαφή μπορεί να φτάσει τα 30m ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί βυθισμένη αντλία για μεγαλύτερα βάθη.

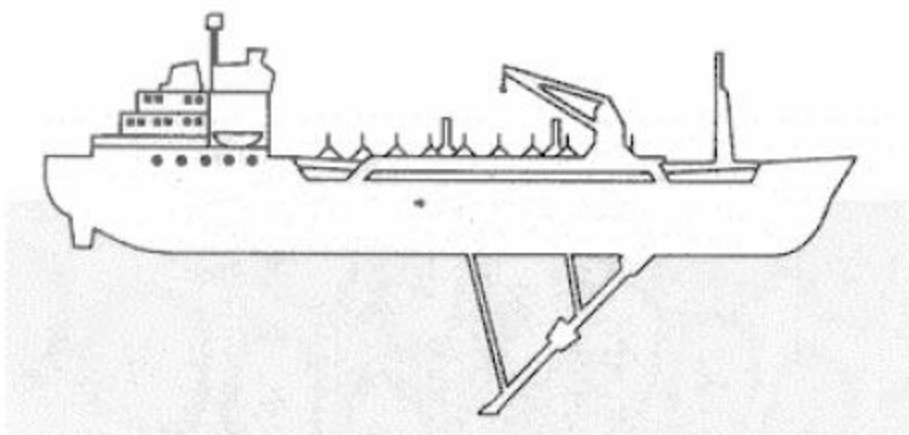
6.3.2.2.1. Τροχός κάδων

Ένας άλλος τύπος βυθοκόρου με κεφαλή κοπής είναι ο τροχός κάδων. Αποτελείται από ένα τροχό με κάδους χωρίς πάτο. Γυρίζοντας ο τροχός κόβει υλικό το οποίο περνάει μέσα από τους κάδους στο κέντρο του τροχού από όπου απομακρύνεται με αντλία. Είναι κατάλληλο για μαζική εκσκαφή χοντρών στρωμάτων αποθέσεων υλικών με μεγάλη συνεκτικότητα. Μπορεί να παράγει ανάλογα με το μέγεθος του από 150 μέχρι 1500m³/h με λόγο νερού-φερτών 3:1 με 2:1 υπό ευνοϊκές συνθήκες.



Εικόνα 6-20:Τροχός κάδων. (Vlasblom, 2003)

6.3.2.3. Βυθοκόρος με ρυμουλκούμενη αναρρόφηση με χοάνη



Trailing suction hopper dredge

Εικόνα 6-21:Σκαρίφημα της βυθοκόρου.Φαίνεται το στόμιο αναρρόφησης το οποίο ρυμουλκείται. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος ρυμούλκησης της αναρρόφησης με χοάνη αποτελείται από μία ή περισσότερες αντλίες βυθοκόρησης και αγωγούς αναρρόφησης οι οποίοι σύρονται πάνω στον πυθμένα. Από μία χοάνη αποθήκευσης όπου καθιζάνουν τα υλικά και από κατάλληλες κατασκευές για το άδειασμα της χοάνης.

Το μέγεθος της βυθοκόρου δίνεται από το μέγεθος της χοάνης και ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες m^3 έως $33000m^3$.



Εικόνα 6-22: Άποψη πραγματικής βυθοκόρου με συρόμενη αναρρόφηση. (Vlasblom, 2003)

Η βυθοκόρος είναι αυτόνομο σκάφος το οποίο σύρει τον αγωγό αναρρόφησης. Το υλικό αποθηκεύεται στην χοάνη όπου τα φερτά υλικά καθιζάνουν ενώ το νερό υπερχειλίζει. Όταν γεμίζει η χοάνη η βυθοκόρος μετακινείται στο σημείο διάθεσης των υλικών και τα αποθέτει είτε υδραυλικά με αγωγούς είτε ανοίγοντας τις πόρτες της χοάνης και αδειάζοντας το υλικό.

Υλικά που μπορούν να εκσκαφθούν είναι μαλακοί άργιλοι, ιλυώδης άμμοι και χαλίκια. Μπορούν να εκσκαφθούν και πυκνές άργιλοι αλλά δημιουργούνται προβλήματα μπλοκαρίσματος των στομιών αναρρόφησης είτε δημιουργούνται κανάλια μέσα στις σφιχτές αποθέσεις και πλέον τα στόμια αναρρόφησης γλιστράνε

μέσα στα κανάλια οδηγούς δυσκολεύοντας την εκσκαφή των υπόλοιπων αποθέσεων.

Το μέγιστο βάθος εκσκαφής είναι τα 20m είτε τα 40m με βυθισμένη αντλία στην κεφαλή.

6.3.3. Συνοπτικά

Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των βυθοκόρων που εξετάστηκαν.

	Bucket Dredger	Grab Dredger	Backhoe Dredger	Suction Dredger	Cutter Dredger	Trailer Dredger	Hopper Dredger
Dredging sandy materials	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Dredging clayey materials	yes	yes	yes	no	yes	yes	no
Dredging rocky materials	yes	no	yes	no	yes	no	no
anchoring wires	yes	yes	no	yes	yes	no	yes
Maximum dredging depth [m]	30	> 100	20	70	25	100	50
accurated dredging possible	yes	no	yes	no	yes	no	no
working under offshore conditions possible	no	yes	no	yes	no	yes	yes
Transport via pipeline	no	no	no	yes	yes	no	no
Dredging in situ densities possible	yes	yes	yes	no	limited	no	no

Πίνακας 6-1: Πίνακας με συνοπτική παρουσίαση των δυνατοτήτων των διαθέσιμων βυθοκόρων. (Vlasblom, 2003)

6.3.4. Ειδικές κατασκευές βυθοκόρησης

Υπάρχει μία πληθώρα κατασκευών και τεχνικών οι οποίοι δρουν επικουρικά στις διαδικασίες βυθοκόρησης είτε χρησιμεύουν στην βυθοκόρηση ταμειυτήρων. Θα γίνει μια προσπάθεια αναφοράς κάποιων εξ αυτών.

6.3.4.1. Τεχνητή δημιουργία ρεύματος πυκνότητας

Κατά την τεχνική βυθοκόρησης με 'ένεση' νερού (water injection) γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθεί ρεύμα πυκνότητας κατά μήκος του πυθμένα. Γίνεται εισροή πίδακα νερού στον πυθμένα του ταμειυτήρα ο οποίος ανακινεί τις φερτές ύλες, δημιουργείται τυρβώδης ροή και τελικά ρεύμα πυκνότητας το οποίο ρέει προς τα κατάντη μεγαλύτερα βάθη. Το ρεύμα πυκνότητας μεταφέρει φερτές ύλες προς το φράγμα όπου μπορεί είτε να εκπλυθεί από εξόδους έκπλυσης είτε απλά να μεταφέρει αποθέσεις από τα ανάντη και τον ωφέλιμο όγκο στα κατάντη και στον νεκρό όγκο. Πρόκειται για τεχνική χαμηλού κόστους, όμως αντιμετωπίζει προβλήματα όπως

τον έλεγχο του ρεύματος πυκνότητας και τη δυσκολία υγροποίησης των στερεοποιημένων αποθέσεων.

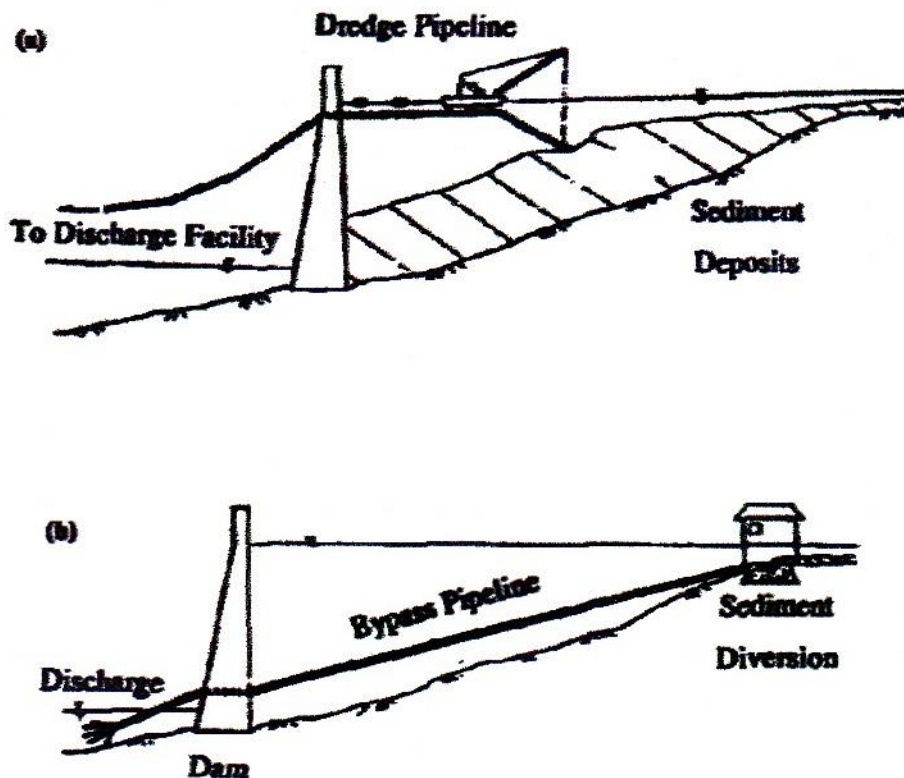
6.3.4.2. Βυθοκόρηση με αξιοποίηση του υδραυλικού φορτίου του ταμιευτήρα

Με αυτή την τεχνική γίνεται εκμετάλλευση της υψομετρικής διαφοράς της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα με τα κατάντη. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως 'βυθοκόρηση με σιφόνι' ή και ως 'υδραυλικού εισπνευστήρ'.

Υπάρχουν δύο τρόποι να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος.

Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει έναν εύκαμπτο αγωγό ο οποίος κρέμεται από πλατφόρμες βυθισμένος μέσα στο νερό και το στόμιό του κατευθύνεται από κάποιο πλεούμενο. Το άλλο άκρο είτε συνδέεται με εξόδους στο φράγμα είτε περνάει πάνω από το φράγμα και εκβάλλει στην κοίτη του ποταμού ή σε κατάλληλο χώρο απόθεσης. Το υδραυλικό φορτίο που προκύπτει στα δύο άκρα του αγωγού δημιουργεί ροή νερού μέσα από αυτών με μεγάλες ταχύτητες. Η ροή του νερού διαβρώνει τις αποθέσεις κοντά στην βυθισμένη είσοδο και έτσι αποτεθειμένα υλικά παρασέρνονται και απομακρύνονται μέσα από τον αγωγό. Το πλεούμενο καθοδηγεί την βυθοκόρηση σε όλα τα σημεία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κεφαλή κοπής ή εκτόξευση πίδακα νερού στο σημείο της βυθοκόρησης ώστε να γίνει αναταραχή των αποθέσεων.

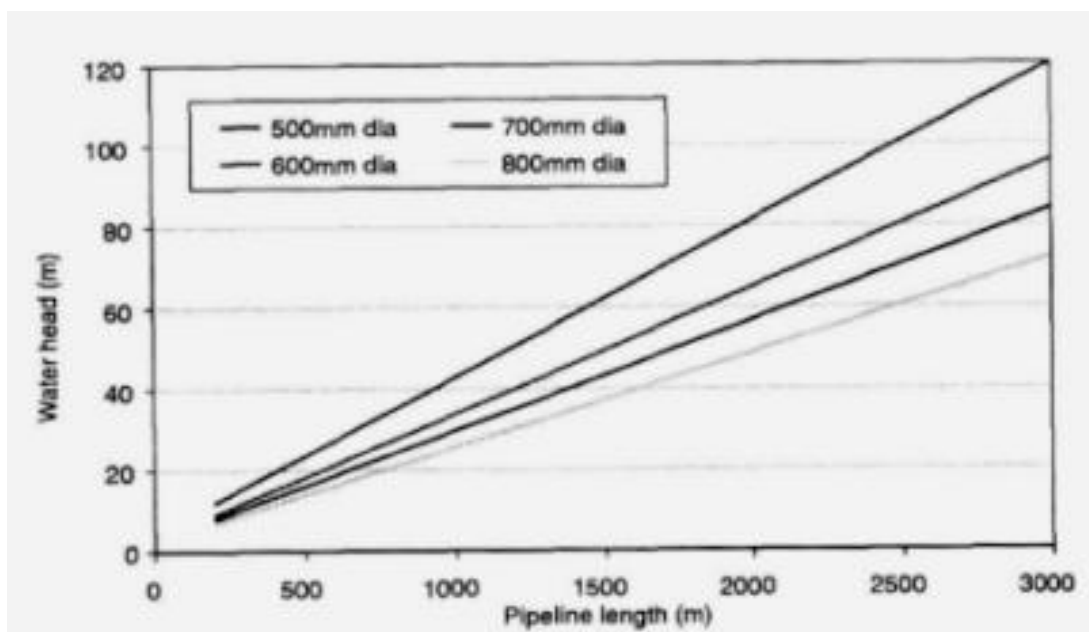
Η άλλη περίπτωση είναι ο αγωγός να είναι μόνιμος εγκατεστημένος. Αυτή η περίπτωση είναι ουσιαστικά μία περίπτωση παράκαμψης του ταμιευτήρα. Οι φερτές ύλες συγκρατούνται στα ανάντη από κάποιο πρόφραγμα και από κει με τον αγωγό μεταφέρονται σε εξόδους στο φράγμα.



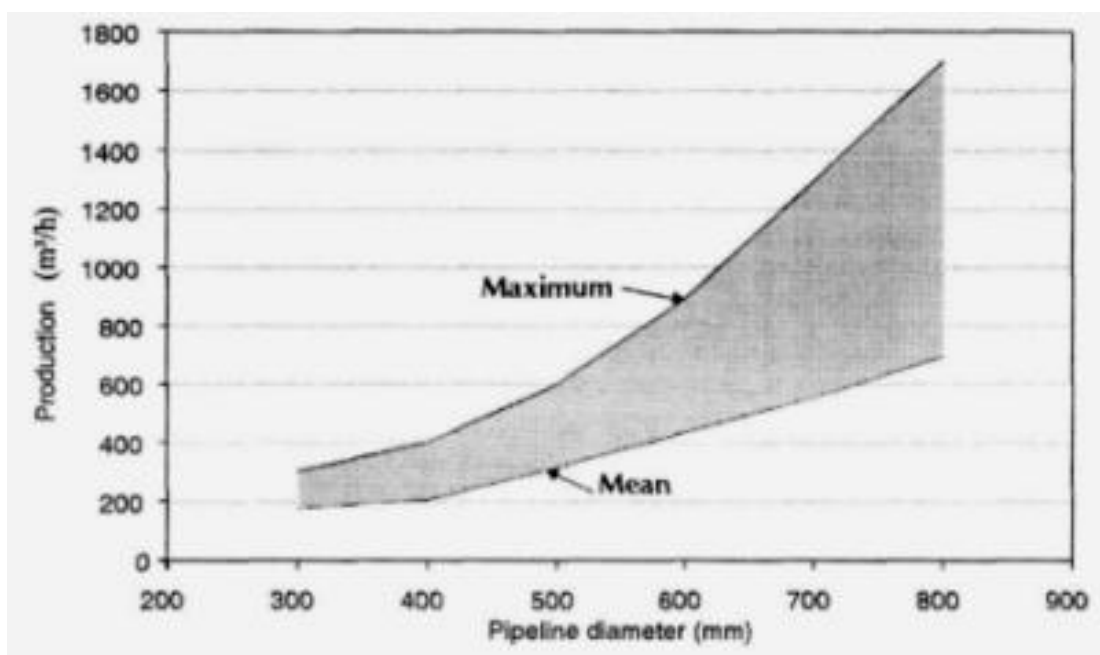
Εικόνα 6-23:Οι δύο περιπτώσεις βυθοκόρησης με εκμετάλλευση του υδραυλικού φορτίου του ταμιευτήρα.α)Το υδραυλικό σιφώνι.β)παράκαμψη ταμιευτήρα.

Τα πλεονεκτήματα της υδραυλικής βυθοκόρησης που περιγράφεται είναι κυρίως το χαμηλό κόστος της, η καλή ακρίβεια της βυθοκόρησης και η δυνατότητα χρησιμοποίησης του νερού σε άλλες χρήσεις όπως άρδευση. Τα μειονεκτήματα είναι ο σχετικά υψηλός λόγος φερτών-νερού που προκύπτει ο οποίος κυμαίνεται σε 1:2 για αργιλικό έδαφος και μέχρι 1:3 ή 1:4 για άμμο και χαλίκια.

Για την αποφυγή μπλοκαρίσματος του αγωγού απόθεσης είναι απαραίτητο να αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες ροής. Συγκεκριμένα 4 με 5m/s. Για να επιτευχθεί αυτό είναι επιθυμητό να υπάρχει υψηλό φράγμα, η διαδικασία να γίνεται με τον ταμιευτήρα πλήρη και οι αγωγοί να έχουν σχετικά μικρό μήκος. Για τον σχεδιασμό της απαιτούμενης διαμέτρου του αγωγού σε σχέση με το μήκος του και το υδραυλικό ύψος αλλά και την αποδοτικότητα που μπορεί να επιτευχθεί έχουν αναπτυχθεί δύο διαγράμματα.



Εικόνα 6-24 :Μήκος και διάμετρος αγωγού συναρτήσει του υδραυλικού ύψους(Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)



Εικόνα 6-25:Παραγωγικότητα του συστήματος βυθοκόρησης συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού.(Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)

Το σύστημα της υδραυλικής βυθοκόρησης δεν μπορεί να είναι αποδοτικό χωρίς την προσθήκη μίας κεφαλής κοπής που θα τεμαχίζει τις αποθέσεις των φερτών υλών.Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αντλία εκτόξευσης πίδακα νερού αλλά σε περιπτώσεις αργιλικών συνεκτικών αποθέσεων δεν είναι σίγουρο ότι θα είναι

αποδοτική διότι μπορεί μεγάλα κομμάτια υλικού να αποκολληθούν και να προχωρήσουν στον αγωγό με κίνδυνο να τον μπλοκάρουν.

Μία περιγραφή καθώς και μία οικονομική ανάλυση της μεθόδου μπορεί να βρεθεί στις εργασίες των (Huffaker & Hotchkiss, 2006) και (Hotchkiss & Huang, 1995).

6.3.5. Κατάλληλη μέθοδος βυθοκόρησης για απομάκρυνση αποθέσεων σε ταμειυτήρα

Η επιλογή της μεθόδου βυθοκόρησης σε ένα ταμειυτήρα είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία του εγχειρήματος. Η σωστή επιλογή δεν είναι εύκολη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Για περιπτώσεις στερεοποιημένης αργίλου σε μεγάλη έκταση σε ρηχές αποθέσεις, μέχρι 30m, καταλληλότερη είναι γενικώς η υδραυλική βυθοκόρος με κεφαλή κοπής ή ο τροχός κάδων.

Σε μεγαλύτερα βάθη σε περιορισμένη περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βυθοκόρος αρπάγης.

Ακόμα, το υδραυλικό σιφώνι μπορεί να αποτελέσει μία φθηνή λύση.

6.4. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βυθοκόρησης

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βυθοκόρησης σε ένα ταμειυτήρα περιλαμβάνει την επιλογή τρόπου εκσκαφής των αποθέσεων, μεταφοράς τους στο σημείο απόθεσης και τρόπο τελικής απόθεσης.

6.4.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου βυθοκόρησης

Το πρόβλημα είναι πολύπλοκο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ζητούμενο είναι να βρεθεί εφικτή τεχνικά και οικονομικά λύση για τον τρόπο εκσκαφής, για τον τρόπο μεταφοράς και τον τρόπο τελικής απομάκρυνσης.

Ζητούμενο είναι επίσης η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας της μεθόδου και η ελαχιστοποίηση του κόστους.

Παράγοντες που επηρεάζουν είναι τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων, οι υδραυλικές και υδρολογικές συνθήκες, ποιοτικές απαιτήσεις για το νερό, καιρικές συνθήκες, περιβαλλοντικές δεσμεύσεις και τοπογραφία.

6.4.1.1. Επιρροή αποθέσεων φερτών υλών

Η παραγωγικότητα και κατ'επέκταση η τιμή μονάδας και το κόστος της βυθοκόρησης εξαρτάται άμεσα από τις φερτές ύλες οι οποίες θα εκσκαφθούν. Συγκεκριμένα επηρεάζουν οι γεωτεχνικές ιδιότητες των υλικών, ο όγκος τους, η κατανομή τους στο χώρο, άλλα υλικά-αντικείμενα εντός των αποθέσεων που μπορεί να εμποδίσουν τη διαδικασία και πιθανή παρουσία επικινδύνων υλικών για το προσωπικό.

Οι λεπτόκοκκες αποθέσεις στους ταμιευτήρες, εφόσον στερεοποιηθούν, τείνουν να έχουν μεγάλες σχετικά πυκνότητες και υψηλή συνεκτικότητα (Basson & Rooseboom, *Dealing with reservoir sedimentation*, 1997). Συνεπώς κρίνεται δύσκολο να είναι εφικτή μία λύση βυθοκόρησης χωρίς μηχανικά μέσα διάβρωσης των αποθέσεων πριν την μεταφορά τους με υδραυλικό τρόπο.

Ακόμη τα πρηνή των στερεοποιημένων αποθέσεων στέκονται κατακόρυφα κάτι το οποίο σημαίνει πως με βυθοκόρηση με κεφαλή κοπής πρέπει να γίνει κατά στρώσεις και όχι εις βάθος λόγω του κινδύνου κατάρρευσης των πρηνών.

Μεγάλη σημασία στην τιμή μονάδος παίζει ο όγκος των αποθέσεων. Σε μεγάλης κλίμακας βυθοκορήσεις υλικών (μεγαλύτερες των 5.000.000m³) τα κόστη τελικής απόθεσης και αρχικής εγκατάστασης των μηχανημάτων είναι συγκριτικά μικρότερα και η τιμή μονάδας προκύπτει ελκυστικότερη. Το αντίθετο συμβαίνει σε μικρής κλίμακας έργα (μικρότερα του 1.000.000m³).

Μεγάλη σημασία έχει και το πάχος των αποθέσεων προς απομάκρυνση εφόσον μικρού πάχους αποθέσεις κατανεμημένες σε μεγάλη επιφάνεια ανεβάζουν το κόστος λόγω της ανάγκης μεγαλύτερων μετακινήσεων της βυθοκόρου.

Εάν υπάρχουν συντρίμματα, μεγάλοι βράχοι ή σκουπίδια ή δέντρα ή μεγάλες ρίζες μπορεί να καθυστερήσουν τη βυθοκόρο ή ακόμα και να μπλοκάρουν τους αγωγούς της αναρρόφησης. Μόνο μηχανικοί βυθοκόροι αρπάγης, κάδων μπορούν να σκάψουν συντρίμματα.

Σε περίπτωση μολυσμένων και επικινδύνων για την υγεία αποθέσεων πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις κατά τη βυθοκόρηση.

6.4.1.2. Επιρροή υδραυλικών παραγόντων

Οι υδραυλικοί παράγοντες έχουν να κάνουν κυρίως με ζητήματα ποσότητας απαιτούμενου νερού και επηρεάζουν κυρίως το κατά πόσο είναι εφαρμόσιμη μια λύση βυθοκόρησης. Ζητήματα προς εξέταση που ανακύπτουν είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού για βυθοκόρηση από τις άλλες χρήσεις του και η παρεμπόδιση της βυθοκόρησης από πιθανές πλημμύρες ή μεγάλη διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα.

Η βυθοκόρηση για να είναι εφικτή δε θα πρέπει να διαταράσσει σε μεγάλο βαθμό τις άλλες χρήσεις του ταμιευτήρα. Η βυθοκόρηση με υδραυλικές-αναρροφητικές μεθόδους καταναλώνει νερό σε λόγο φερτών-νερού περίπου στο 1:4. Εάν οι άλλες χρήσεις δεν ικανοποιούνται αυτό το ποσό του νερού είναι απαγορευτικό και μπορεί να είναι απαραίτητο η βυθοκόρηση να γίνει είτε σε περιόδους χαμηλής ζήτησης για άρδευση είτε όταν ο ταμιευτήρας βρίσκεται στη μέγιστη στάθμη. Μία λύση μπορεί να βρεθεί εάν η απόδοση του μίγματος φερτών-νερού γίνεται στα κατάντη και συνεπώς μέρος του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση.

Σε σχέση με τον περιορισμό του βάθους για τη βυθοκόρηση και τη διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα μία 'έξυπνη' πρακτική που μπορεί να εφαρμοστεί είναι η περιοχή βυθοκόρησης να ακολουθεί την κίνηση των νερών ώστε να μπορεί να γίνει βυθοκόρηση σε βαθύτερα σημεία. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να μπορεί να γίνει επαρκής πρόβλεψη της διακυμάνσης της στάθμης κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Ένας ακόμα περιορισμός σε σχέση με τη στάθμη του ταμιευτήρα είναι η περίπτωση του 'υδραυλικού σιφωνιού' όπου είναι απαραίτητο να υπάρχει αρκετό υδραυλικό ύψος στον ταμιευτήρα.

6.4.1.3. Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

Περιορισμοί που έχουν να κάνουν με την ποιότητα του νερού κατάντη αλλά και μέσα στον ταμιευτήρα θα πρέπει να ικανοποιούνται. Συνήθως έχουν να κάνουν με περιορισμό της τύρβης σε περιπτώσεις μολυσμένων αποθέσεων, της θολότητας αλλά και τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου εντός του ταμιευτήρα.

6.4.1.4. Καιρικές συνθήκες

Η βυθοκόρηση ταμιευτήρων σαν εργασία που γίνεται στην ύπαιθρο και μάλιστα πολλές φορές εν πλω μπορεί να επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες όπως έντονους κυματισμούς, βροχή, κακή ορατότητα.

6.4.1.5. Γενικές συνθήκες

Η βυθοκόρηση σε ταμιευτήρες λόγω της μη ύπαρξης πλωτής οδού απαιτεί τα μηχανήματα βυθοκόρησης να είναι αποσυναρμολογούμενα και να υπάρχει δυνατότητα μεταφοράς τους και συναρμολόγησής τους εντός του ταμιευτήρα.

Ζητούμενο επίσης είναι η δυνατότητα χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος και όχι ντίζελ για τη λειτουργία των μηχανών λόγω του μειωμένου κόστους. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται με γραμμές μέχρι την όχθη του ταμιευτήρα και από εκεί με επιπλέον καλώδιο. Επιπλέον μέτρα ασφαλείας πρέπει να ληφθούν σχετικά με την παροχή του ρεύματος. Γενικώς λόγω της ύπαρξης του φράγματος και συνήθως του υδροηλεκτρικού σταθμού η παροχή του ρεύματος δεν θα παρουσιάσει δυσκολίες.

6.4.2. Μεταφορά φερτών υλών στον τόπο απόρριψης

Η μεταφορά των φερτών υλών από των τόπο απόθεσης στον τελικό τόπο απόρριψης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Κυρίως με δύο τρόπους, υδραυλική μεταφορά με αγωγό είτε μηχανική με φόρτωση σε φορηγίδες, φορηγά ή μεταφορικές ταινίες.

Υδραυλική μεταφορά με αγωγούς χρησιμοποιούνται μαζί με χρήση υδραυλικών μεθόδων βυθοκόρησης. Ο αγωγός είναι εύκαμπτος και επιπλέει. Το υλικό των τμημάτων του είναι είτε χαλύβας είτε HDPE (σκληρό πλαστικό). Η διάμετρος ποικίλλει από 0,3-0,8m και το μήκος από 2-4km. Συνήθως είναι απαραίτητο να υπάρχουν ενδιάμεσα αντλιοστάσια για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Η ταχύτητα σχεδιασμού του αγωγού είναι 4-5m/s για αποφυγή απόφραξης.



Εικόνα 6-26:Μεταφορά φερτών υλών με αγωγό.(Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)

Μηχανική μεταφορά μπορεί να γίνει με μεταφορικούς ιμάντες,σειρές κάδων ή και με φορηγίδες και φορηγά.Η μηχανική μεταφορά είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις μηχανικής βυθοκόρησης όπου το υλικό λόγω μεγάλης πυκνότητας δεν είναι υδραυλικώς μεταφέσιμο.Είναι δυνατό οι ιμάντες μεταφοράς να επιπλέουν και να φτάνουν μέχρι την βυθοκόρο.

Τα κόστη μηχανικής μεταφοράς είναι αυξημένα κυρίως λόγω της ανάγκης χρησιμοποίησης επιπλέον μηχανημάτων για το ξεφόρτωμα των υλικών.



Εικόνα 6-27:Σειρά κάδων για μεταφορά φερτών υλών μέσα από το νερό.(Vlasblom, 2003)

6.4.3. Τρόποι απόρριψης υλικού

Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις για την τελική απόρριψη του υλικού.

- απόδοση στον ποταμό αμέσως κατάντη του ταμιευτήρα
- μεταφορά στο νεκρό όγκο του ταμιευτήρα
- εντός της λεκάνης απορροής
- σε διαθέσιμη περιοχή κατάντη του ταμιευτήρα
- σε άλλο κατάλληλο σημείο απόθεσης

6.4.3.1. Απόρριψη αμέσως κατάντη του ταμιευτήρα

Είναι η πιθανώς η πιο εύκολη και φθηνή επιλογή.

Συνήθως τα κατάντη ύδατα ρυθμίζονται ποιοτικά ως προς την συγκέντρωση στερεών και τη θολότητα θέτοντας ένα μέγιστο όριο για περιβαλλοντικούς λόγους. Η απόδοση των φερτών υλών αμέσως κατάντη μπορεί να μην είναι δυνατή για αυτό το λόγο ή να πρέπει να ληφθεί υπόψη ως προς το χρόνο στον οποίο θα γίνει η εκσκαφή.

Εάν η εκσκαφή γίνει σε περίοδο χωρίς πλημμύρες τότε οι φερτές ύλες θα αποτεθούν αμέσως κατάντη του φράγματος και οι περισσότερες θα μεταφερθούν κατά την περίοδο των υψηλών παροχών. Έτσι υπάρχει μικρή συγκέντρωση φερτών υλών την

περίοδο των χαμηλών παροχών και φυσιολογική συγκέντρωση κατά την περίοδο των υψηλών παροχών.

Στα θετικά της μεθόδου είναι ότι προκύπτει ένας τρόπος να αποκατασταθεί κατά το δυνατόν το ισοζύγιο των φερτών υλών κατάντη,ότι το νερό που απομακρύνεται με την βυθοκόρηση δε χάνεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση,αλλά και μπορεί να προσμετρηθεί στην οικολογική παροχή του φράγματος.

Σε περίπτωση που υπάρχουν αρδευτικές υδροληψίες με υδατοφράκτες κατάντη τότε αναμένεται οι φερτές ύλες να αποτεθούν στους υδατοφράκτες και να απομακρυνθούν με την επόμενη πλημμύρα.

6.4.3.2. Μεταφορά στον νεκρό όγκο του ταμιευτήρα

Οι φερτές ύλες οι οποίες εκσκάπτονται από τον ωφέλιμο όγκο ενός ταμιευτήρα μπορούν απλώς να μεταφερθούν και τελικά να επαναποτεθούν στον νεκρό όγκο εφόσον υπάρχει χώρος.

Η επιλογή αυτή δεν αποτελεί βιώσιμη πρακτική και μπορεί να εφαρμόζεται μέχρι την πλήρωση του νεκρού όγκου με φερτές ύλες.

6.4.3.3. Απόθεση στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα

Οι φερτές ύλες μπορούν να αποτεθούν σε περιοχή κοντά στον ταμιευτήρα εντός της λεκάνης απορροής του.Η απόθεση γίνεται σε χώρο περιτριγυρισμένο από αναχώματα για τη συγκράτηση του υδαρούς μίγματος φερτών νερού.

Στα θετικά της μεθόδου είναι ότι αφού ολοκληρωθεί η αποστράγγιση,η αποξήρανση και η στερεοποίηση των αποθεθειμένων υλικών οι αποθέσεις με την ανάπτυξη χλωρίδας εντάσσονται στο περιβάλλον ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αγροτικούς σκοπούς.Επιπλέον οι αποθέσεις είναι διαθέσιμες για πιθανή επανάχρηση.Τέλος το νερό που απομακρύνθηκε από τον ταμιευτήρα επιστρέφει πίσω με μόνες απώλειες την εξατμισοδιαπνοή που προκύπτει.

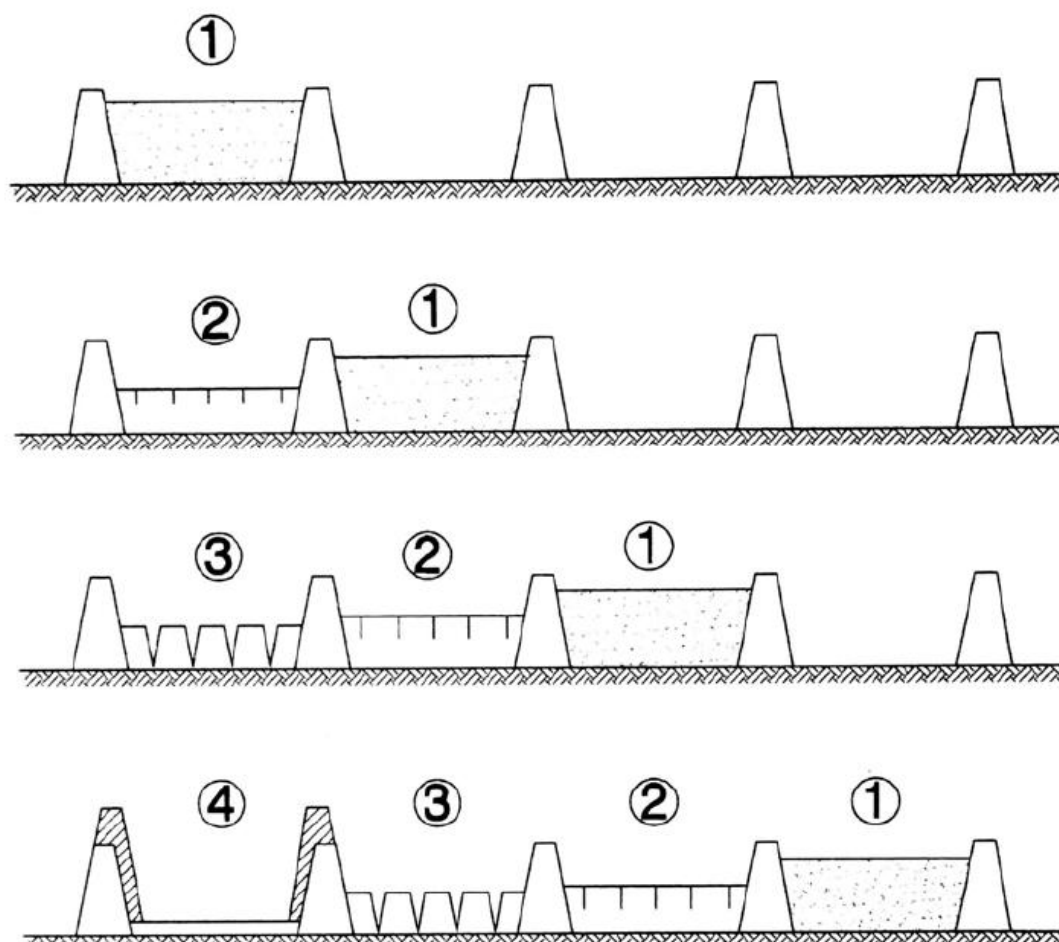
Η απόθεση γίνεται ανάμεσα σε αναχώματα μεγίστου ύψους 3m κατά στρώσεις 0,5-1,0m σε κατάλληλο χρόνο ώστε να προλάβει ενδιάμεσα να ολοκληρωθεί η αποστράγγισή τους.Ο χώρος αποθήκευσης εντός των αναχωμάτων θα πρέπει να έχει όγκο περίπου 2-3 φορές μεγαλύτερο από τον όγκο των αποθέσεων που

σκάβονται, ανάλογα και το είδος των αποθέσεων. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά μερικές τιμές συντελεστή επιπλήσματος για διάφορα είδη αποθέσεων.

Material	Sedimented dry bulk density, kg/m ³	Bulking factor		
		USAE	Huston	Others
Clay	480-1250	1.2-3.1	1.45	
Recent clay deposits				1.3
Silty clay				1.4-1.7
Sandy clay			1.25	
Clayey sand				1.3
Silt		1.1-1.4	2.0	1.3
Silty fine sand				1.1
Sand	1490	1.0-1.2	1.0	

Πίνακας 6-2: Συντελεστής επιπλήσματος για διάφορα είδη αποθέσεων. (Morris & Fan, 1998)

Μία τεχνική που έχει προταθεί (Morris & Fan, 1998) είναι η χρησιμοποίηση των αποθέσεων μετά την αποστράγγιση για υπερύψωση των αναχωμάτων ή κατασκευή νέων σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο θεωρητικά υπάρχει σε μόνιμη βάση χώρος για απόθεση νέων εκσκαφών. Στην εικόνα φαίνεται και περιγράφεται αυτός ο τρόπος.



Εικόνα 6-28 :Απόρριψη και αποθήκευση φερτών υλών για αποστράγγιση.(Morris & Fan, 1998)

- 1)Πλήρωση του χώρου με μίγμα νερού-φερτών.
- 2)αποστράγγιση.
- 3)αποξήρανση.
- 4)Υπερύψωση αναχωμάτων με το αποξηραμένο υλικό και επανέναρξη κύκλου.

Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την κατασκευή των αναχωμάτων, μπορούν να κατασκευαστούν εντός του πλημμυρικού πεδίου του ταμιευτήρα με κατάλληλη θωράκιση από κυματισμούς για την περίπτωση πλημμύρας.

6.4.3.4. Απόρριψη σε χώρο κατόντη του ταμιευτήρα

Η μεταφορά και απόρριψη των υλικών μπορεί να γίνει σε κατάλληλη διαθέσιμη περιοχή κατόντη του ταμιευτήρα εκτός του ποταμού..Το νερό που μεταφέρεται

μπορεί να συνυπολογιστεί πιθανώς στην κάλυψη αρδευτικών αναγκών και περιβαλλοντικής παροχής.

6.4.3.5. Περιοχή εκτός του εγγύς χώρου στον ταμιευτήρα

Οι αποθέσεις μπορεί να μεταφερθούν σε κατάλληλη περιοχή όπου να μπορεί να γίνει η διάθεσή τους. Εάν η απόσταση είναι μεγάλη και η μεταφορά γίνει με συμβατικό τρόπο προτείνεται, με κατάλληλη μέθοδο, να υπάρξει γρήγορη εν μέρει αποστράγγιση για μείωση του όγκου των μεταφερόμενων υλικών.

6.5. Οικονομικά στοιχεία

Η βυθοκόρηση μπορεί να αποτελέσει μέθοδο διαχείρισης φερτών υλών. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή της θα πρέπει να υπάρχει εφικτή τεχνικά λύση η οποία να είναι και η πιο οικονομική.

Η βυθοκόρηση θεωρείται ότι έχει σχετικά μεγάλο κόστος συγκρινόμενο με το κόστος να εξασφαλιστεί επιπλέον ωφέλιμος όγκος είτε με κατασκευή άλλου φράγματος είτε με υπερύψωση του ήδη υπάρχοντος.

Τα κατάλληλα σημεία για κατασκευή νέων φραγμάτων όλο και μειώνονται με την πάροδο του χρόνου. Ακόμα οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και οι περιορισμοί ασφαλείας κάνουν όλο και πιο δύσκολη την κατασκευή των νέων έργων. Έτσι το κόστος εξασφάλισης επιπλέον ωφέλιμου όγκου γίνεται όλο και μεγαλύτερο. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αύξηση της εμπειρίας στον χώρο της βυθοκόρησης, αυτή γίνεται όλο και ελκυστική λύση.

Όταν γίνεται προσπάθεια οικονομικής σύγκρισης βυθοκόρησης και άλλων πιθανών λύσεων, το κόστος της βυθοκόρησης δε θα πρέπει να υπολογίζεται (Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999) και να συγκρίνεται ως κόστος εκσκαφής ανά m^3 υλικού αλλά ως υδροηλεκτρικό όφελος που αποδίδεται με την ανάκτηση του ωφέλιμου όγκου. Με αυτή την προσέγγιση ο όγκος που ανακτάται με βυθοκόρηση αποδίδει μεγαλύτερο όφελος ανά m^3 σε σχέση με τον όγκο που μπορεί να δημιουργηθεί με νέες κατασκευές. Αυτό ισχύει διότι ο όγκος που ανακτάται με βυθοκόρηση βρίσκεται στον πυθμένα του ταμιευτήρα και δεν επηρεάζει καθόλου την επιφάνεια του άρα δεν αυξάνει απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής. Το αντίθετο συμβαίνει με τη δημιουργία νέου όγκου όπου σχεδόν πάντοτε θα υπάρχει αύξηση της επιφάνειας εξατμισοδιαπνοής του.

Επιπλέον χαρακτηριστικό της βυθοκόρησης το οποίο την κάνει οικονομικά ευέλικτη είναι ότι τα κόστη προκύπτουν κατανεμημένα μέσα στο χρόνο ικανοποιώντας όταν χρειάζεται τη ζήτηση, ενώ η περίπτωση ανέγερσης ενός νέου φράγματος απαιτεί άμεσα κεφάλαια τα οποία αποδίδονται πίσω σε βάθος χρόνου. Επιπλέον η βυθοκόρηση συντήρησης η οποία σε ετήσια βάση έχει σχετικά χαμηλότερο κόστος λόγω της εκσκαφής μη στερεοποιημένων αποθέσεων.

6.5.1. Κόστος μονάδας

Το κόστος της βυθοκόρησης εκφράζεται συνήθως σε τιμές ανά μονάδα όγκου υλικού. Δεν είναι δυνατό να γίνει μία γενική εκτίμηση-υπολογισμός του κόστους της βυθοκόρησης διότι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι εξαρτώνται από τη φύση του έργου.

Στο κόστος περιλαμβάνεται το κόστος εκσκαφής, μεταφοράς και απόρριψης του υλικού. Το κόστος απόρριψης μάλιστα μπορεί να αποτελέσει το 20%-40% του συνολικού κόστους.

Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος μονάδας:

-Το αρχικό κεφάλαιο για την χρησιμοποίηση, συναρμολόγηση της βυθοκόρου. Οι βυθοκόροι για ταμειυτήρες είναι σχετικά μικρού μεγέθους και αποτελούνται συνήθως από πλατφόρμες συνδεδεμένες με το μηχανολογικό εξοπλισμό. Με σωστή καταγραφή των απαιτούμενων εξαρτημάτων και σωστή εκτίμηση του προμηθευτή μπορεί να γίνει μείωση του κόστους. Θα πρέπει βέβαια να εξασφαλιστεί η συμβατότητα των τμημάτων μεταξύ τους.

-Η χρησιμοποίηση ηλεκτρικού ρεύματος ή ορυκτού καυσίμου-ντίζελ. Η χρησιμοποίηση ηλεκτρικού ρεύματος εφόσον είναι διαθέσιμη κρίνεται ως οικονομικότερη.

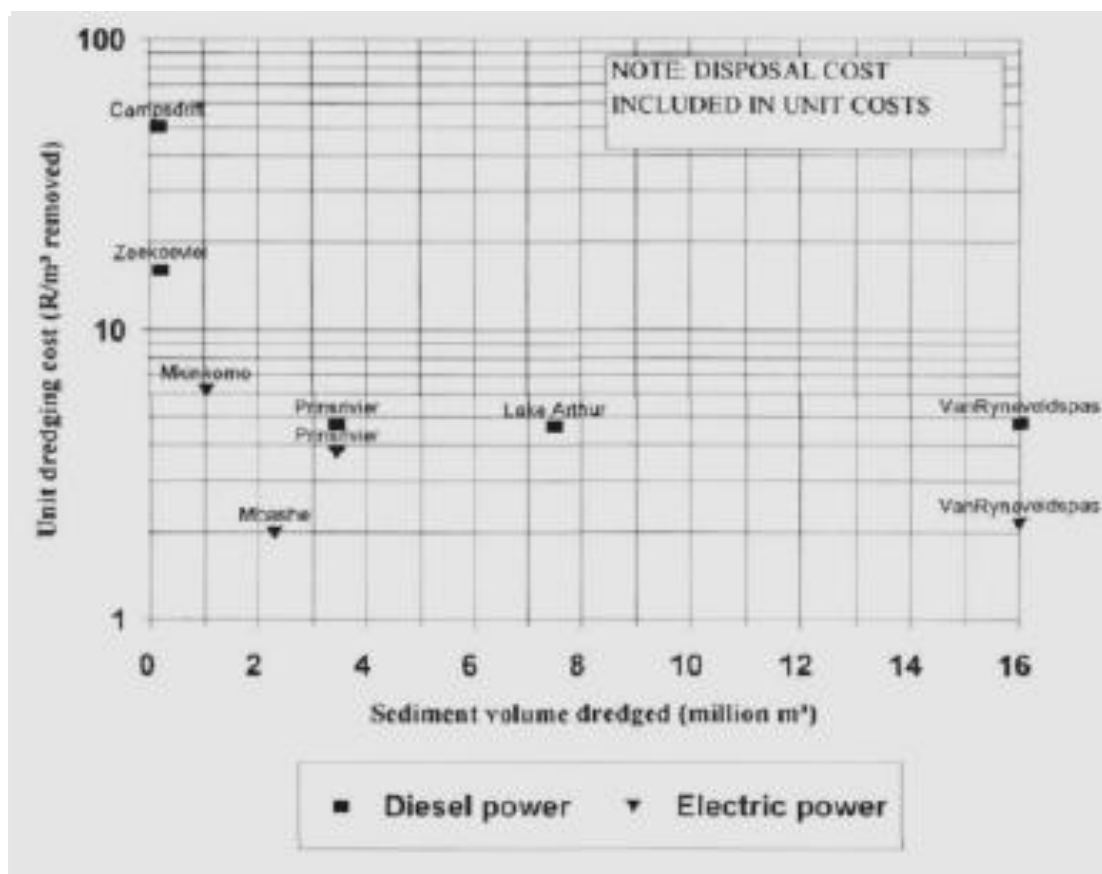
-Το πόσες ώρες τη μέρα και το πόσες μέρες την εβδομάδα γίνονται εργασίες. Λόγω του μεγάλου αρχικού κόστους της βυθοκόρου είναι πιο συμφέρον να υιοθετείται εντατικό πρόγραμμα.

-Αυτοματοποίηση. Η αύξηση της αυτοματοποίησης και μείωση της συμμετοχής ανθρώπινου δυναμικού οδηγεί σε μείωση του κόστους.

-Ο πραγματικός χρόνος παραγωγής έργου ως προς το χρόνο απασχόλησης του μηχανήματος. Κενά διαστήματα κατά τη διάρκεια των εργασιών τα οποία ωφείλονται

σε εκκινήσεις-σταματήματα των μηχανών, μετακινήσεις, κακό σχεδιασμό της διαδρομής βυθοκόρησης καθώς και καθυστερήσεις εξαιτίας επιλογής ακατάλληλης βυθοκόρου.

-Όγκος υλικών προς απομάκρυνση.



Εικόνα 6-29: Σύγκριση τιμών βυθοκόρησης από ταμιευτήρες στην Ν.Αφρική με χρησιμοποίηση Ντίζελ ή ηλεκτρικού ρεύματος (Basson & Rooseboom, Dealing with reservoir sedimentation-dredging, 1999)

6.5.2. Βυθοκόρηση και βιώσιμη διαχείριση

Για να είναι δυνατόν η βυθοκόρηση να χρησιμοποιηθεί ως βιώσιμη λύση στη διαχείριση των φερτών υλών θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρχει συνεχώς δυνατότητα απόρριψης των αποκρινόμενων υλικών σε κάποια περιοχή. Συνήθως για να ισχύσει αυτό θα πρέπει να υπάρξει μία πολιτική διαχείρισης των απορριπτέων υλικών και επαναχρησιμοποίησής τους.

6.6. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Η βυθοκόρηση φερτών υλών από ταμειυτήρες προσφέρει έναν ακόμα τρόπο απομάκρυνσης φερτών υλών.

Η τεχνολογία των βυθοκόρων προσφέρει μεγάλη ποικιλία μηχανημάτων και τεχνικών για εργασίες βυθοκόρησης σε ταμειυτήρες. Γενικώς ως καταλληλότεροι βυθοκόροι για απομάκρυνση φερτών υλών από ταμειυτήρες κρίνονται οι υδραυλικοί βυθοκόροι αναρρόφησης με κεφαλή κοπής, όπως ο τροχός κάδων, και για περιορισμένης έκτασης εργασίες οι μηχανικοί βυθοκόροι αρπάγης. Εάν οι συνθήκες το επιτρέπουν, αρκετά πλεονεκτήματα παρουσιάζει η λύση του 'υδραυλικού σιφωνιού', βυθοκόρηση δηλαδή με εκμετάλλευση του υδραυλικού ύψους του ταμειυτήρα.

Υδραυλική βυθοκόρηση μπορεί να γίνει μέχρι τα 30m, σε μεγαλύτερο βάθος είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί αντλία στην κεφαλή. Μηχανική βυθοκόρηση μπορεί να γίνει ανεξαρτήτως βάθους.

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη-Συμπεράσματα

7.1. Ανάγκη υιοθέτησης πολιτικών διαχείρισης ταμιευτήρων.

Ο συνολικός ωφέλιμος όγκος των ταμιευτήρων μειώνεται συνεχώς εξαιτίας των αποθέσεων φερτών υλών. Παράλληλα με την αύξηση του πληθυσμού αυξάνεται και η ζήτηση για επιπλέον ωφέλιμο όγκο αποθηκευμένου νερού. Επιπλέον οι διαθέσιμες πιθανές θέσεις κατασκευής νέων φραγμάτων έχουν κορεστεί.

Οι παραπάνω λόγοι σε συνδυασμό με την ανάγκη κατασκευής έργων βιώσιμων-ανανεώσιμων πηγών κάνει απαραίτητη την υιοθέτηση σχεδίου διαχείρισης φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα. Το σχέδιο οφείλει να εξασφαλίζει την οικονομική σκοπιμότητα του έργου αλλά και τη διατήρηση ωφέλιμου όγκου ικανού να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του έργου.

7.2. Τρόποι μετακίνησης φερτών υλών

Οι φερτές ύλες μετακινούνται μέσω της ροής από το ποτάμι και αποτίθενται εντός του ταμιευτήρα όπου οι ταχύτητες ροής είναι μικρές. Οι φερτές ύλες χωρίζονται σε φορτίο απόπλυσης, φορτίο κοίτης σε αιώρηση και φορτίο κοίτης σε σύρση.

Φορτίο απόπλυσης είναι λεπτές ύλες οι οποίες προέρχονται από τη διάβρωση των υλικών της λεκάνης απορροής. Φορτίο κοίτης σε αιώρηση είναι λεπτόκοκκο υλικό από τον πυθμένα του καναλιού και φορτίο κοίτης σε σύρση είναι το χονδρόκοκκο τμήμα του πυθμένα του καναλιού.

Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τρόποι υπολογισμού της στεροπαροχής ενός καναλιού οι οποίοι όμως ακόμα δεν εμφανίζουν ικανοποιητική αξιοπιστία.

7.3. Τρόπος απόθεσης φερτών υλών

Δεν κατακρατείται το σύνολο των αποθέσεων οι οποίες εισέρχονται στον ταμιευτήρα. Ο βαθμός κατακράτησης μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικά διαγράμματα τα οποία έχουν προταθεί από ερευνητές. Ωστόσο η αξιοπιστία των διαγραμμάτων αυτών είναι χαμηλή.

Οι φερτές ύλες δεν αποτίθενται ομοιόμορφα στον ταμιευτήρα. Δύο μοτίβα απόθεσης κυριαρχούν. Οι αποθέσεις δελταϊκής μορφής και η αποθέσεις μορφής σφήνας. Χαρακτηρίζονται από το σχήμα που παίρνει το προφίλ των αποθέσεων κατά μήκος.

Στα ανάντη του ταμιευτήρα, στο δέλτα αποθέσεων αποτίθενται τα πιο χονδρόκοκκα υλικά. Τα πιο λεπτόκοκκα αποτίθενται κατάντη του δέλτα. Πολύ λεπτές ύλες σε αιώρηση μπορούν να σχηματίσουν κύματα πυκνότητας τα οποία υπό την επιρροή της βαρύτητας μετακινούνται και αποθέτουν υλικό κοντά στο φράγμα.

7.4. Τρόποι διαχείρισης φερτών υλών

Υπάρχει πληθώρα τρόπων και φιλοσοφιών διαχείρισης των φερτών υλών. Προτείνονται μέθοδοι μείωσης της διάβρωσης στη λεκάνη απορροής, μέθοδοι μείωσης της απόθεσης στον ταμιευτήρα με εποχιακό καταβιβασμό της στάθμης, μέθοδοι απομάκρυνσης αποθεθειμένων υλικών με εφαρμογές υδραυλικής έκπλυσης του ταμιευτήρα και βυθοκόρησης.

7.5. Έκπλυση φερτών υλών από ταμιευτήρες

Η πιο δημοφιλής μέθοδος απομάκρυνσης φερτών υλών από ταμιευτήρες. Προγραμματίζεται εποχιακή πλήρη ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα με δημιουργία συνθηκών ποτάμιας ροής στον ταμιευτήρα. Με αυτόν τον τρόπο ο ποταμός διαβρώνει ένα κανάλι μέσα από της αποθέσεις. Με επαναλαμβανόμενες εκπλύσεις αυτό το κανάλι διατηρείται και εξασφαλίζει έναν ελάχιστο όγκο λειτουργίας για τον ταμιευτήρα.

Για την επιτυχή έκπλυση θα πρέπει να υπάρχουν άφθονες παροχές κατά τη διάρκεια της έκπλυσης αλλά και ο όγκος του ταμιευτήρα να είναι σχετικά μικρός με τον ετήσιο όγκο εισροών στον ταμιευτήρα, ώστε να ευνοείται η επαναπλήρωση του ταμιευτήρα

μετά την έκπλυση.Σημαντικό ρόλο παίζουν και τα είδη των αποθέσεων στον ταμιευτήρα.

Ερευνητές έδειξαν πως η μέθοδος υπό τις κατάλληλες συνθήκες μπορεί να δώσει βιώσιμη λύση

7.6. Βυθοκόρηση φερτών υλών

Η βυθοκόρηση των φερτών υλών προσφέρει μία ακόμα λύση για τη βιώσιμη διαχείριση των φερτών υλών.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στην τεχνολογία των βυθοκόρων.Οι βυθοκόροι υδραυλικής αναρρόφησης αλλά και οι μέθοδοι εκμετάλλευσης του υδραυλικού ύψους του ταμιευτήρα είναι οι περισσότερο πολλά υποσχόμενες.Για περιορισμένης έκτασης βυθοκόρηση προτείνεται και η χρήση μηχανικών βυθοκόρων

Η αποτελεσματικότητα της βυθοκόρησης εξαρτάται κυρίως από το είδος των αποθέσεων,την ανάμιξή τους με χονδρά σκουπίδια,το διαθέσιμο νερό και τους τοπογραφικούς περιορισμούς του ταμιευτήρα.

7.7. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας γίνεται η παρατήρηση πως το ζήτημα της βιώσιμης διαχείρισης των φερτών υλών είναι ένα ζήτημα με πολλές πτυχές,εξαρτώμενο από την κάθε περίπτωση και ζήτημα το οποίο άπτεται πολλών διαφορετικών επιστημονικών αντικειμένων.

Για περαιτέρω διερεύνηση της κίνησης των φερτών υλών σε κανάλια αλλά και ταμιευτήρες προτείνεται:

-Καλύτερη επιστημονική διερεύνηση των σχετικών θεωριών

-Διερεύνηση με αριθμητικό μοντέλο περιπτώσεων κίνησης φερτών υλών

Για την διερεύνηση της απόθεσης των φερτών υλών περαιτέρω διερεύνηση με αριθμητικό μοντέλο διαφόρων περιπτώσεων μπορεί να προσφέρει στον μελλοντικό ερευνητή.Ακόμα θα ήταν ενδιαφέρουσα και κάποια διερεύνηση ιστορικών αποθέσεων σε πραγματικές περιπτώσεις.

Για το ζήτημα της τεχνικής της έκπλυσης των φερτών υλών προτείνεται:

- Διερεύνηση με αριθμητικό μοντέλο περιστατικών έκπλυσης σε ταμιευτήρα
 - Διερεύνηση στον οικονομικό τομέα των δυνατοτήτων βιώσιμης διαχείρισης με τεχνικές έκπλυσης.
 - Διερεύνηση ιστορικών περιστατικών έκπλυσης και οικονομικών αποτελεσμάτων τους
 - Διερευνήσεις κινδύνου των μεθόδων έκπλυσης
- Για το ζήτημα της βυθοκόρησης των φερτών υλών προτείνεται:
- Διερεύνηση των δυνατοτήτων της βιώσιμης διαχείρισης της έκπλυσης
 - Διερεύνησης ευνοϊκότερων για τον κύριο του έργου τρόπων συμφωνίας-συμβολαίων με τις εταιρείες βυθοκόρησης.
 - Διερευνήσεις κινδύνου των μεθόδων βυθοκόρησης.

Βιβλιογραφία

- Ackers, P., & White, W. (1973). Sediment Transport:new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division , Vol.99*.
- Alam, S. (1999). The influence and management of sediment at hydro projects. *Hydropower and Dams , 3*, σσ. 54-57.
- Annandale, G. W. (1987). *Reservoir Sedimentation*. Amsterdam-Oxford-N.York-Tokyo: Rand Afrikaans University.
- ASCE Task Committee. (2006). *Sedimentation Engineering*. USA: American Society of Civil Engineers.
- ASCE Task Committee. (2008). *Sedimentation Engineering:Processes,Measurements,Modeling and Practice*. Reston,Virginia,USA: American Society of Civil Engineers.
- Atkinson, E. (1998). Reservoir operation to control sedimentation:techniques for assessment. *Proceedings of the conference of the British Dams society*. Bangor.
- Atkinson, E. (1996). *The Feasibility of flushing sediment from Reservoirs*. HR Wallingford.
- Basson, G. (1997). Hydraulic measures to deal with reservoir sedimentation:Flood flushing,sluicing and density current venting. *South African Water Research Commision*.
- Basson, G., & Olesen, W. (1997). Modelling flood flushing. *International water power and dam construction , 49*.
- Basson, G., & Rooseboom, A. (1997). *Dealing with reservoir sedimentation*. South African Water Research Commision.
- Basson, G., & Rooseboom, A. (1999). *Dealing with reservoir sedimentation-dredging*. Water Research Commission.
- Basson, G., & Rooseboom, A. (1999). *Dealing with reservoir sedimentation-dredging*. Water Research Commission.
- Bathurst, J. C. (2007, November). Effect of coarse surface layer on bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering .*

Borland, W. (1971). *Reservoir Sedimentation*. Fort Collin,USA: River mechanics,water resources publication.

Bouchard, J.-P. (n.d.). Optimization of flushing conditions;forecasting of efficiency and impact.

Breusers, H., Klaasen, G., Brakel, J., & Van Roode, F. (1982). Environmental impact and control of reservoir sedimentation. *14th Congress on Large Dams* (σσ. pp.353-372). Rio de Janeiro: ICOLD.

Brown, C. (1943, August). The control of reservoir silting. *U.S Department of Agriculture , n 521*.

Brune, G. (1953). Trap Efficiency of Reservoirs. *Trans. Am. Geoph. Union , Vol.34*.

Chadwick, A., & Morfett, J. (1998). *Hydraulics in civil and environmental engineering*. New York: E & FN Spon.

Chang, F.-J., Lai, J.-S., & Kao, L.-S. (2003). Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir. *Hydrological Processes , 17*.

Chow, T. V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Churchill, M. (1948). Discussion of "analysis and use of reservoir sedimentation data". *Proc. of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. Jan.1948*, σσ. p.139-140. Washington DC.: by L.C Gottchalk.

Dagfinn, L. K., Brian, G., Haakon, S., & Einar, T. (2003). *Hydraulic Design*. Trondheim: Tapir Uttrykk,Trondheim,Norway.

Easterbrook, D. J. (1999). *Surface Processes and Landforms-2nd edition*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.

Emamgholizadeh, S., Bina, M., Fathimoghadam, M., & Ghomeyshi, M. (2006). Investigation and evaluation of the pressure flushing throught storage reservoir. *ARPJ Journal of engineering and applied sciences , Vol.1*.

Fan, J., & Morris, G. (1992). Reservoir sedimentation I:Delta and density current deposits. *Journal of Hydraulic Engineering , 18*.

Fan, J., & Morris, G. (n.d.). Reservoir sedimentation II: Reservoir desiltation and long-term storage capacity. *Journal of Hydraulic Engineering* , 118.

Graf, W. H. (1998). *Fluvial Hydraulics-Flow and transport processes in channels of simple geometry*. Lausanne, Suisse: John Wiley and Sons Ltd.

Graf, W. H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Graf, W., & Acaroglu, E. (1968). Sediment transport in conveyance systems. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* , vol.14.

Hjulstrom, F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin, Geological Institute of Upsalla* , vol.25.

Hotchkiss, R. H., & Huang, X. (1995, June). Hydrosuction sediment-removal systems(HSRS): Principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering* , σσ. 479-489.

Huffaker, R., & Hotchkiss, R. (2006). Economic dynamics of reservoir sedimentation: Optimal control with singularly perturbed equations of motion. *Journal of Economic Dynamics and Control* , 30, σσ. 2553-2575.

Killingtveit, A., & Saelthun, N. R. (1995). *Hydropower development-Hydrology*. Trondheim: Norwegian Institute of Technology.

Kinori, B. (1978). *Υδραυλική των ανοικτών αγωγών*. (Η. Π. Βασιλόπουλος, Μεταφρ.) Αθήνα: Μ.Γκιούρδας.

Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: A new perspective*. London and New York: Arnold.

Krishan, S. P., & Durgunoglu, A. (1990, January). Economic reservoir design and storage conservation by reduced sedimentation. *Journal of Water Resources Planning and Management* , Vol.116.

Lara, J. M., & Pemberton, E. L. (1963). Initial unit weight of deposited sediments. *Proc. of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference* (σσ. Agricultural Research Service pp. 818-845). U.S. Department of Agriculture.

Maa, J. P.-Y., Kwon, J.-I., Hwang, K.-N., & Ha, H.-K. (2008, December). Critical Bed Shear Stress for Cohesive Sediment Deposition under Steady Flows. *Journal of Hydraulic Engineering* .

Maddock, T. (1969). The behavior of straight open channels with movable beds. *Professional paper 622-A* .

Mahmood, K. (1987). Reservoir sedimentation-Impact, extent and mitigation. *World Bank Technical Paper Number 71* .

Merritt, W., Letcher, R., & Jakeman, A. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental modelling and software* , 18, σσ. 761-799.

Meshkati, M., Dehgani, A., Naser, G., Emamgholizadeh, S., & Mosaedi, A. (2009). *Evolution of developing flushing cone during the pressurized flushing in reservoir storage*. World Academy of Science, Engineering and Technology.

Mohammadzadeh-Habili, J., & Manouchehr, H. (2010). New Empirical Method for Prediction of Sediment Distribution in Reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering* .

Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Palmieri, A., Shah, F., & Dinar, A. (2001). Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of environmental management* , 61, σσ. 149-163.

Palmieri, A.; Shah, F.; Dinar, A. (1999). *Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs (RESCOM)*. Washington DC: World Bank Research Committee.

Palmieri, A.; Shah, F.; Dinar, A. (1998). *Economic aspects of sustainable dam management*. Washington DC: World Bank.

Raudkivi, A. J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. Rotterdam: A.A.Balkema, Netherlands.

Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., & Champagne, J. (2008). Bed Load Transport Flume experiments on Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* (September).

Rooseboom, A. (1975). *Sediment transport in rivers and reservoir basins. (In Afrikaans)*. Pretoria. South Africa: D.Sc.(Eng.) thesis presented to the University of Pretoria.

Rouse, H. (1938). Experiments on the mechanics of sediment suspension. *Proceedings, 5th International Congress for Applied Mechanics*. vol.55, σσ. 550-554. N.York: John Wiley and Sons.

Scheuerlein, H. (1990). Removal of sediment deposits in reservoirs by means of flushing. *Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990. no.194*. Lausanne: IAHS.

Scheuerlein, H. (1989). Sediment sluicing in mountain reservoirs. *International Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain regions*. Trent.

Schleiss, A., Cesare, G., & Althaus, J. (2008). Reservoir sedimentation and sustainable development. *Workshop Erosion, Transport and Deposition of Sediments*.

Shen, W. (1999). Flushing sediment through reservoir. *Journal of Hydraulic Research* , 37, σσ. 743-757.

Sloff, C. (1991). *Reservoir Sedimentation: A literature survey*. Delft University of Technology, Faculty of civil engineering.

Strand, R., & Pemberton, E. (1987). Reservoir sedimentation. *Design of small dams* .

Takahashi, T. (1991). *Debris Flow*. Rotterdam: A.A Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Talebeydokhti, N., & Naghshineh, A. (2004). Flushing sediment through reservoirs. *Iranian Journal of Science and Technology* , 28.

Tsinghua University (Sedimentation Research Laboratory) and North-West Institute of Hydrotechnical Research. (1979). Reservoir Sedimentation. *Water Conservancy and Electric Power Press (in Chinese)* .

Turner, T. M. (1996). *Fundamentals of hydraulic dredging*. ASCE.

Vlasblom, W. (2003). *Lecture Notes on Dredging Equipment and Technology by Prof. Wim Vlasblom*. TU Delft.

Wadell, H. (1935). Volume, Shape and Roughness of Quartz Particles. *Journal of Geology* , 40, σσ. 310-331.

Wang, Z.-y., & Hu, C. (2009). Strategies for managing reservoir sedimentation. *International Journal of sediment research* .

White, R. (2001). *Evacuation of sediments from reservoirs*. London: Thomas Telford Publishing.

White, R. (2000). *Flushing of sediments from reservoirs*. HR Wallingford.

White, W. (1990). Reservoir sedimentation and flushing. *Hydrology in mountainous regions* .

White, W., & Bettess, R. (1984). The feasibility of flushing sediments through reservoirs. *Proceedings of the symposium 'Challenges in African Hydrology and Water Resources'*. Harare.

Yalin, M. (1963). An expression for bed load transportation. *Journal of the Hydraulic division* , vol.89.

Zarris, E., Lykoudi, D., & Koutsoyiannis, D. (2002). Sediment yield estimation from a hydrographic survey: a case study from the Kremasta reservoir basin, Greece. Στο e. b. Tsakiris (Επιμ.), *Proceedings of the 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"* (σσ. 338–345). Athens: European Water Resources Association.

Δημητρίου, Ι. (2005). *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*. Αθήνα: Εκδοση Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Ζάρρης, Δ., Λυκούδη, Ε., & Κουτσογιάννης, Δ. (2001). *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες*. ΓΓΕΤ και ΔΕΗ. Αθήνα: ΕΜΠ.

Μιμίκου, Μ. Α. (2006). *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Α.Παπασωτηρίου.

Παπακωνσταντίνου, Α., & Μπουρουτζή, Α. (2000). *Βιβλιογραφική και πειραματική διερεύνηση έκπλυσης φερτών υλών από ταμιευτήρες*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Σταχούλης, Σ., & Ντόβας, Χ. (1995). *Αποθέσεις φερτών υλών σε ταμιευτήρες*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Χρύσανθος, Β. (1989). Συσσωρευση φερτών υλών σε ταμιευτήρες. *Τεχνικά Χρονικά* , 9 (4).