

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Έργα Διαχείρισης Φερτών Υλικών σε Ταμιευτήρες

Δαγτζή Χριστίνα

Επιβλέπων Καθηγητής

Μαμάσης Νικόλαος

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το τέλος της διπλωματικής αυτής εργασίας, θα ήθελα πρώτα απ' όλους να ευχαριστήσω τον κύριο Νίκο Μαμάση, Επιβλέποντα Καθηγητή της εργασίας και Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για τη συνέπειά του απέναντί μου και την απλόχερη βοήθεια που μου προσέφερε όλον αυτό τον καιρό. Δύο ακόμη πολύ σημαντικά πρόσωπα στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής είναι ο Επίκουρος Καθηγητής του Ε.Μ.Π. κύριος Ιωάννης Στεφανάκος και η βοηθός του, Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. Άννα Χαζάπη. Τους ευχαριστώ θερμά για τη βοήθειά τους και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για να εμπλουτίσουν τις λιγοστές γνώσεις μου πάνω σε τεχνικά και κατασκευαστικά ζητήματα.

Μιας και το τέλος της διπλωματικής μου εργασίας φέρνει και το τέλος της φοιτητικής μου ζωής στο Ε.Μ.Π., θα ήθελα με την ευκαιρία να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τους γονείς μου Γιάννη και Ιωάννα, τον αδερφό μου Μιχάλη, καθώς και την αξιαγάπητη γιαγιά μου Ελένη για την στήριξη και τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν με τόση υπομονή. Τέλος, θα ήταν αδύνατο να μην πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Φίλιππο Κλιάφα και όλους τους φίλους που με στήριξαν αυτά τα χρόνια και μοιράστηκαν μαζί μου, όχι μόνο χαρές αλλά και λύπες, κάνοντας ξεχωριστές τις ξέγνοιαστες φοιτητικές στιγμές που ζήσαμε μαζί.

Σας ευχαριστώ όλους και χωρίς εσάς τίποτα δε θα ήταν δυνατό.

Χριστίνα Δαγτζή

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από την αρχαιότητα ακόμα, ο άνθρωπος έψαχνε τρόπους να εκμεταλλευτεί τον τεράστιο όγκο των υδατικών πόρων προς όφελός του. Παροχή πόσιμου νερού, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και αργότερα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μερικές μόνο από τις ανάγκες που καλύφθηκαν με τον εγκλωβισμό νερού μέσω των φραγμάτων. Με το πέρασμα των χρόνων ωστόσο, γίνεται όλο και πιο ογκώδες το βασικό εμπόδιο: η απώλεια μεγάλου μέρους του ωφέλιμου όγκου των ταμιευτήρων, λόγω της συσσώρευσης φερτών υλικών σε αυτούς. Παράλληλα, λόγω της περιβαλλοντικής προσέγγισης που έχουν οι τοπικές κοινωνίες τα τελευταία χρόνια, πρέπει να αντιμετωπισθεί και το φαινόμενο της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, το οποίο προκύπτει από την κατασκευή ενός φράγματος και λαμβάνει χώρα κατάντη αυτού. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση των μηχανισμών, οι οποίοι οδηγούν στη γέννησή τους. Στην υπό εξέταση, κάθε φορά, λεκάνη απορροής λαμβάνει χώρα η διάβρωση του εδάφους, εν συνεχεία η μεταφορά των υλικών και τέλος η απόθεσή τους μέσα στον ταμιευτήρα. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί λειτουργούν διαδοχικά και τέλος συμβάλλουν, ο καθένας σε διαφορετικό βαθμό, στην απώλεια του ωφέλιμου όγκου.

Η εύρεση μιας αποτελεσματικής μεθόδου αντιμετώπισης των προβλημάτων είναι στο στόχαστρο της επιστημονικής κοινότητας. Οι μέθοδοι διαχείρισης των φερτών υλικών μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, με την πλέον αποτελεσματική και εφαρμόσιμη να θεωρείται αυτή της υδραυλικής έκπλυσης. Σύμφωνα με την εμπειρία και γνώση που έχει αποκτηθεί από την εφαρμογή της μεθόδου παγκοσμίως, πιστεύεται πως είναι αυτή που μπορεί να οδηγήσει σε επαναφορά έως και 100% του όγκου του ταμιευτήρα. Φυσικά, οι προϋποθέσεις για την αποτελεσματική εφαρμογή της είναι σχετικά αυστηρές, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως ικανοποιούνται σε μικρό αριθμό ταμιευτήρων.

Μία ακόμη λύση στο πρόβλημα της συσσώρευσης φερτών υλικών είναι η κατασκευή ενός συστήματος εκτροπής του ταμιευτήρα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κατασκευή μιας σήραγγας εκτροπής, δυστυχώς όμως δεν βρίσκει ευρεία εφαρμογή λόγω του αυξημένου κόστους, τόσο της κατασκευής όσο και της συντήρησής της. Ωστόσο, μετά από τη μελέτη και το σχεδιασμό ενός συστήματος εκτροπής σε ένα υπό μελέτη ταμιευτήρα στην Ελλάδα, αποδείχθηκε πως το κόστος της μεθόδου είναι όντως υψηλό, δε ξεπερνά όμως ένα μικρό μόνο ποσοστό του συνολικού κόστους κατασκευής του φράγματος. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί πως ο υπό μελέτη ταμιευτήρας είναι ειδικού σκοπού και δεν αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό των κατασκευασμένων ταμιευτήρων. Πρόκειται επομένως, για μία σχετικά απλοποιημένη περίπτωση.

Το πρόβλημα της συσσώρευσης των φερτών υλικών είναι το πλέον σοβαρό και σημαντικό πρόβλημα που σχετίζεται με την εκμετάλλευση των υδατικών πόρων. Επομένως, είναι εξίσου σημαντική και αναγκαία η εύρεση μια ευρέως εφαρμόσιμης λύσης. Μετά την μελέτη του συστήματος εκτροπής που προαναφέρθηκε, υπάρχει πλέον η αίσθηση πως ακόμη και

στην Ελλάδα, το πρόβλημα μπορεί να βρει μία οικονομικά εφαρμόσιμη λύση, ανοίγοντας μία νέα σελίδα στην καταπολέμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής ενός νέου φράγματος και παράλληλα της απώλειας του ωφέλιμου όγκου των ταμιευτήρων.

ABSTRACT

From the antiquity still, man searched for ways to exploit the enormous volume of the aquatic resources to his profit. Water supply, irrigation, flood control and later, hydropower production are only a few of the needs that were covered with the hemming of water via the dams. Over the years however, the basic obstacle becomes only bulkier: the loss of the biggest part of reservoirs' beneficial volume, due to the accumulation of sediments in them. Furthermore, because of the environmental approach that local communities have over the past years, the phenomenon of environmental degradation, resulting from the construction of a dam and occurring downstream of the reservoir, must be resolved as well. For the confrontation of the problem, the complete comprehension of the mechanisms, which lead to his birth, is essential. In the basin under review, soil erosion first takes place, then follows the transport of the eroded materials and finally the deposition of them in the reservoir. Those three mechanisms function in succession and contribute, each one in a different degree, in the loss of the reservoir's beneficial volume.

The finding of an effective method of confronting the problem is in the foresight of the scientific community. The methods of managing the sedimentation can be separated in three categories, with the most effective and applicable to be considered that of hydraulic flushing. According to the experience and knowledge that has been acquired by the application of the method worldwide, it is believed that this is the one that can lead to an reintroduction up to 100% of the volume of a reservoir. The conditions, of course, for its effective application are relatively strict, without however this meaning that they can only be satisfied in a small number of reservoirs worldwide.

Another solution in the problem of the accumulation of sediments is the construction of a reservoir bypass system. This method is based on the construction of a bypass tunnel, but unfortunately does not find wide application due to its increased cost, as well as the high cost of its maintenance. However, after studying and planning such a system in an under-study reservoir in Greece, it was proved that the cost of this method is indeed increased, but at the same time does not exceed only but a small percentage of the total cost of the construction of the dam. It is worth, of course, to be marked that the under-study reservoir is of a special purpose and does not represent the biggest percentage of the constructed reservoirs. It is consequently, a relatively simplified case.

The problem of the accumulation of sediments is the most serious and important problem that is related with the exploitation of the aquatic resources. Consequently, it is equally important and necessary for a widely applicable solution to be found. After the study of the reservoir bypass system that was mentioned before, there is a sense that even in Greece, the problem can finally find an economically applicable solution, opening a new page in the combating of the environmental impacts, following the construction of a new dam, and the loss of the reservoirs' beneficial volume at the same time.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vii
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Ρόλος των φραγμάτων	2
1.2 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων	2
1.3 Σκοποί ταμιευτήρων.....	4
1.4 Διαταραχές	5
1.5 Διαχείριση φερτών υλικών.....	7
1.6 Βιώσιμη ανάπτυξη.....	9
2.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥΣ	11
2.1 Περιγραφή φερτών υλικών	11
2.2 Ταξινόμηση φερτών υλικών	12
2.2.1 Ταξινόμηση του μεγέθους	12
2.2.2 Σφαιρικότητα και στρογγυλότητα	12
2.2.3 Κατηγοριοποίηση φερτών υλικών	14
2.3 Το φαινόμενο της διάβρωσης	15
2.3.1 Επιφανειακή διάβρωση	20
2.3.2 Αυλακωτή διάβρωση	23
2.3.3 Χαραδρωτική διάβρωση	24
2.3.4 Διάβρωση καναλιού	27
2.3.5 Αστοχία κλίσης.....	28
2.3.6 Τιμή της διάβρωσης και μέθοδοι εκτίμησής της.....	28
2.3.7 Μοντέλα U.S.L.E. και R.U.S.L.E.....	34
2.3.8 Συντελεστής στερεοαπορροής	36
2.3.9 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση	38
2.4 Το φαινόμενο της μεταφοράς φερτών υλικών	45
2.5 Το φαινόμενο της απόθεσης φερτών υλικών	48
2.5.1 Γενικές μορφές αποθέσεων.....	48
2.5.2 Δελταϊκές αποθέσεις	52
2.5.3 Συντελεστής απελευθέρωσης και εγκλωβισμού.....	55
2.5.4 Το βάρος των αποθέσεων	56

2.5.5 Ρεύματα πυκνότητας	58
3.ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....	61
3.1 Μέτρα προστασίας από την απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρες	61
3.1.1 Παρεμπόδιση της εισροής φερτών υλικών στον ταμιευτήρα.....	61
3.1.2 Απομάκρυνση των φερτών υλικών από τους ταμιευτήρες.....	64
3.1.3 Καθοδήγηση των φερτών υλικών ώστε να μην εισέρχονται στους ταμιευτήρες.	67
3.2 Υδραυλική Έκπλυση.....	68
3.2.1 Είδη και στάδια έκπλυσης	69
3.2.2 Διαδικασίες διάβρωσης κατά την έκπλυση.....	74
3.2.3 Ζητήματα της διαδικασίας.....	82
3.2.4 Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης	87
4.ΠΑΡΑΚΑΜΨΗ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ - RESERVOIR BYPASS	99
4.1 Μέρη του συστήματος εκτροπής	100
4.2 Προσδιορισμός της παροχής σχεδιασμού	103
4.3 Το πρόβλημα της τριβής.....	103
4.4 Συστήματα εκτροπής ανά τον κόσμο	104
5.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ	113
5.1 Επιλογή θέσης εισόδου και κορμού της σήραγγας	114
5.2 Επίτευξη κλίσης	116
5.3 Διαστάσεις σήραγγας.....	117
5.4 Κριτήριο ταχύτητας στο τμήμα επιτάχυνσης.....	119
5.5 Θέση φράγματος εκτροπής και ογκομέτρηση	120
5.6 Κατασκευή καταστροφής της ενέργειας.....	123
5.7 Κόστος κατασκευής συστήματος εκτροπής	126
5.7.1 Κόστος κατασκευής φράγματος εκτροπής	127
5.7.2 Κόστος εκσκαφής σήραγγας εκτροπής.....	127
5.7.3 Κόστος σκυροδέτησης σήραγγας εκτροπής	127
5.7.4 Κόστος εσχάρας εισόδου	128
5.7.5 Κόστος επένδυσης σήραγγας	129
5.7.6 Κόστος κατασκευής λεκάνης ηρεμίας	130
5.7.7 Κόστος εκσκαφής των συσσωρευμένων υλικών.....	131
5.7.8 Συνολικό κόστος.....	131

6.ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	133
6.1 Κρισιμότητα διαχείρισης των φερτών υλικών σε ένα ταμειυτήρα	133
6.2 Κατηγοριοποίηση φερτών υλικών	133
6.3 Το φαινόμενο της διάβρωσης	134
6.4 Το φαινόμενο της μεταφοράς	134
6.5 Το φαινόμενο της απόθεσης	135
6.6 Επισκόπηση διατάξεων	135
6.7 Υδραυλική έκπλυση	136
6.8 Δημιουργία συστήματος εκτροπής	137
6.9 Μελέτη και σχεδιασμός συστήματος εκτροπής	138
6.10 Συμπεράσματα	138
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	141
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	151

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τη στιγμή που ο άνθρωπος σχεδίασε τους τρόπους εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, με σκοπό την παροχή νερού για την ικανοποίηση διαφόρων αναγκών, τα φράγματα βρίσκονται στο επίκεντρο της προσοχής. Αυτό συμβαίνει διότι είναι η υδραυλική κατασκευή με το μεγαλύτερο εκτόπισμα, ενώ παράλληλα έχει και μόνιμο χαρακτήρα. Μαζί με την κατασκευή των φραγμάτων ήρθε και η μελέτη των επιπτώσεών της. Τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας κεντρίζει η απώλεια του ωφέλιμου όγκου των ταμιευτήρων, λόγω της συσσώρευσης των φερτών υλικών σε αυτούς.

Το ζήτημα της εισροής φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα, που οδηγεί στη συσσώρευσή τους, είναι αποτέλεσμα των διαδικασιών της διάβρωσης, της μεταφοράς και της απόθεσης. Μεγάλος όγκος υλικών διαβρώνεται από τη λεκάνη απορροής, κάτω από την επίδραση δυνάμεων που προκαλούνται, μεταξύ άλλων, από τη βροχόπτωση και τους ανέμους. Το βασικό στοιχείο σχετικά με το φαινόμενο που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η τιμή της διάβρωσης, η οποία είναι κρίσιμη για τον υπολογισμό του ωφέλιμου όγκου που θα καταληφθεί. Τα υλικά που έχουν διαβρωθεί, στη συνέχεια εισέρχονται στο σύστημα ροής και οδηγούνται στον ταμιευτήρα, όπου λόγω έντονης μείωσης των ταχυτήτων ροής, εναποτίθενται στον πυθμένα του.

Με το πέρασμα των χρόνων, σχεδιάζονται και μελετώνται όλο και περισσότερα έργα διαχείρισης του προβλήματος. Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, φαίνεται να έχει η διαδικασία της υδραυλικής έκπλυσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κατασκευάζονται στο φράγμα έξοδοι χαμηλής στάθμης, οι οποίες ασφαρίζονται με θύρες. Κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών περιόδων οι θύρες ανοίγουν, και η φορτισμένη ροή παροχετεύεται στα κατάντη, μέσω των εξόδων. Υπάρχουν πολλά ζητήματα προς μελέτη εδώ, όπως για παράδειγμα ο προγραμματισμός της διαδικασίας, το μέγεθος των εξόδων κ.ά, όμως η μέθοδος φαίνεται να βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε χώρες που αντιμετωπίζουν έντονα το φαινόμενο της απώλειας ωφέλιμου όγκου, όπως για παράδειγμα η Κίνα.

Μία άλλη μέθοδος, η οποία δεν βρίσκει τόσο ευρεία εφαρμογή, είναι η παράκαμψη του ταμιευτήρα μέσω μιας σήραγγας εκτροπής. Με τον τρόπο αυτό, η φορτισμένη ροή δεν εισέρχεται στον ταμιευτήρα, αλλά εκτρέπεται με τη βοήθεια ενός φράγματος εκτροπής προς τη σήραγγα, μέσω της οποίας παροχετεύεται απευθείας κατάντη αυτού. Φυσικά και πάλι εδώ η σήραγγα κατασκευάζεται με ένα θυρόφραγμα, ώστε η ροή να εκτρέπεται μόνο κατά τις πλημμυρικές περιόδους έντονης απορροής. Η περιορισμένη κατασκευή συστημάτων εκτροπής παγκοσμίως, οφείλεται κυρίως στο αυξημένο οικονομικό κόστος, το οποίο είναι ουσιαστικός περιοριστικός παράγοντας. Ωστόσο, έγινε μια προσπάθεια μελέτης ενός τέτοιου συστήματος εκτροπής σε έναν υπό μελέτη φράγμα στην Ελλάδα, και προέκυψε το συμπέρασμα πως το κόστος να μην είναι υψηλό, αλλά όχι και απαγορευτικό.

1.1 Ρόλος των φραγμάτων

Από την αρχαιότητα, τα φράγματα κατασκευάζονταν για την κάλυψη των δύο πιο βασικών αναγκών σε νερό: της ύδρευσης και της άρδευσης. Με την ανάπτυξη του πολιτισμού όμως, επιπλέον με αυτές, δημιουργήθηκε και η ανάγκη ελέγχου των πλημμυρών, επίτευξης καλύτερης ποιότητας του νερού, πλοήγησης, και κυρίως παραγωγής ενέργειας. Ο ρόλος των φραγμάτων επομένως, απέκτησε μεγαλύτερο εύρος. Ειδικά ένα φράγμα που θα εξυπηρετεί παραπάνω από ένας από αυτούς τους σκοπούς, είναι ένα άκρως σημαντικό έργο για μια αναπτυσσόμενη χώρα, καθώς ο πληθυσμός θα λαμβάνει τόσο πρακτικά όσο και οικονομικά οφέλη από μία μόνο επένδυση.

Πρωταρχικός σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος είναι η ύδρευση. Είναι πέρα πάσης αμφιβολίας, πως το νερό αποτελεί την πιο σημαντική πηγή, πέρα από τον αέρα και τη γη. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 χρόνων, η ποσότητα του νερού που αντλείται από τις πηγές γλυκού νερού έχει αυξηθεί κατά 35%. Με δεδομένο τον παγκόσμιο πληθυσμό των 7.3 δισεκατομμυρίων ανθρώπων, ο οποίος συνεχώς αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό περίπου 1%, αναμένεται αύξηση της ζήτησης του νερού κατά 1-2% το χρόνο για τις προσεχείς δεκαετίες. Το μεγάλο πρόβλημα στην κατάσταση αυτή, δημιουργείται από το γεγονός ότι οι πηγές γλυκού νερού είναι, όχι μόνο μη ομοιόμορφα κατανομημένες, αλλά πλέον και περιορισμένες. Στις ανεπτυγμένες χώρες, με πλούσιες πηγές και μεγάλες τεχνικές υποδομές, η ανακύκλωση και επανα-χρησιμοποίηση του νερού μπορεί να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση. Σε άλλες χώρες όμως, που το νερό είναι κρίσιμης και ζωτικής σημασίας για την κάλυψη των πιο βασικών ακόμη αναγκών, ο άνθρωπος δε μπορεί να παραβλέψει την τεράστια συνεισφορά των φραγμάτων και των ταμιευτήρων στην αξιοποίηση των υδατικών πόρων.

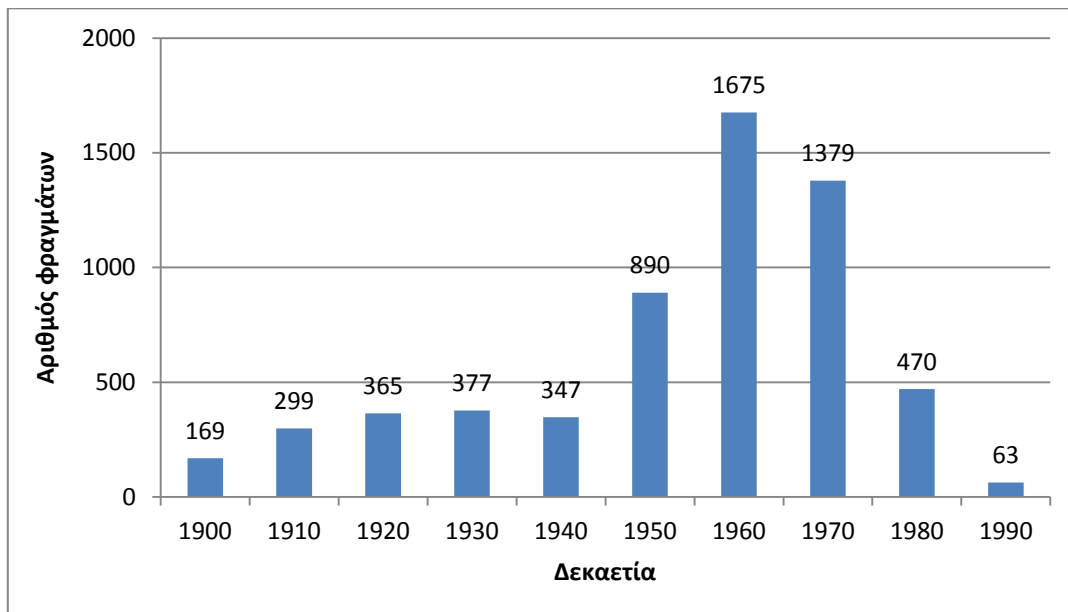
Μεγάλο πρόβλημα δημιουργείται επίσης, από τις κλιματικές διακυμάνσεις, με την εκδήλωση πλημμυρών ή περιόδων έντονης ξηρασίας με καταστροφικές συνέπειες. Για πάνω από 500 χρόνια, τα φράγματα έχουν διασφαλίσει την ομαλή και επαρκή παροχή νερού, εγκλωβίζοντας νερό κατά τις πλημμυρικές περιόδους και απελευθερώνοντάς το κατά τις περιόδους ξηρασίας.

Από τα παραπάνω είναι ξεκάθαρη η σημαντική συμβολή των φραγμάτων στη διαχείριση των πολύτιμων πλέον υδατικών πόρων.

1.2 Ιστορική εξέλιξη φραγμάτων

Στην επιστημονική κοινότητα, ως μεγάλο χαρακτηρίζεται ένα φράγμα το οποίο έχει ύψος μεγαλύτερο από 15 μέτρα ή ύψος μεγαλύτερο από 5 μέτρα και χωρητικότητα μεγαλύτερη από $3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το πρώτο μεγάλο φράγμα, λοιπόν, φαίνεται να έχει κατασκευασθεί το 130 μ.Χ. στην Ισπανία, με το όνομα Proserpina (ICOLD-General Synthesis of Oldest Dams). Ιδιαίτερα στην Αμερική, η κατασκευή φραγμάτων φαίνεται να παρουσίασε μεγάλη άνθηση την περίοδο 1950-1970, με 4 000 νέα μεγάλα φράγματα, περισσότερα απ' όσα είχαν

κατασκευασθεί συνολικά τον 20^ο αιώνα. Στο Γράφημα 1.1 αποτυπώνεται ακριβώς αυτή η έκρηξη της κατασκευής φραγμάτων.



Γράφημα 1.1 Ρυθμός κατασκευής μεγάλων φραγμάτων στην Αμερική ανά δεκαετία (ASCE Task Committee,2008).

Η άνθιση αυτή φυσικά οφείλεται, τόσο στην οικονομική ανάπτυξη, όσο και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας. Ωστόσο, μείωση του ρυθμού κατασκευής παρατηρείται από την αρχή της δεκαετίας του '80, με τη συρρίκνωση να έρχεται τη δεκαετία του '90. Βασική αιτία του φαινομένου, είναι σίγουρα τα αυστηρότερα μέτρα ασφαλείας, που ήρθαν μαζί με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας και με την παρατήρηση των ήδη κατασκευασμένων έργων. Σημαντικό ρόλο βέβαια, διαδραμάτισε και η περιβαλλοντική προσέγγιση της κατασκευής, η οποία θα αναφερθεί παρακάτω, όσο και η εξάντληση, με το χρόνο, των θέσεων κατάλληλων για την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων.

Αν και παγκοσμίως το πρώτο θέμα μελέτης σχετικά με τα φράγματα ήταν μέχρι πρότινος η ασφάλεια, δε προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι στο προσκήνιο πλέον είναι και το ζήτημα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι, έγινε η εμφάνιση διενέξεων μεταξύ μηχανικών και επιστημονικών περιβαλλοντικών ομάδων. Βασικό επιχείρημα των τελευταίων ήταν η προστασία του περιβάλλοντος και η διαφύλαξη της βιοποικιλότητας. Το θέμα αυτό συζητήθηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του συνεδρίου της ICOLD (International Commission On Large Dams) το 1973, ένα χρόνο μετά την πρώτη Σύνοδο των Ηνωμένων Εθνών σχετικά με το περιβάλλον, στη Στοκχόλμη. Η πρώτη Τεχνική Επιτροπή αφιερωμένη στο ζήτημα αυτό δημιουργήθηκε το 1977, ενώ το πρώτο Τεχνικό Δελτίο εμφανίστηκε το 1981 (ICOLD). Το 1997, ο ίδιος οργανισμός δημοσίευσε τη "Θέση σχετικά με τα φράγματα

και το περιβάλλον” (Position Paper on Dams and the Environment”), με σκοπό να παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση.

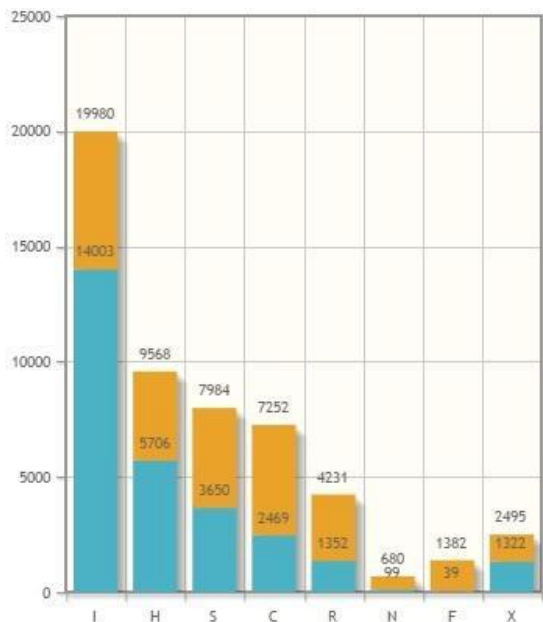
1.3 Σκοποί ταμιευτήρων

Οι ταμιευτήρες, στην πλειονότητά τους, εξυπηρετούν ένα μόνο σκοπό, με τον αριθμό αυτών που εξυπηρετούν πάνω από έναν ταυτόχρονα, να αυξάνεται. Αυτή τη στιγμή, είναι καταγεγραμμένα περίπου 58 266 μεγάλα φράγματα παγκοσμίως. Από αυτά, το 49.2% είναι ενός μόνο σκοπού και το 16.8% παραπάνω.

Με βάση την τελευταία δημοσίευση του Παγκόσμιου Μητρώου Φραγμάτων (World Register of Dams), οι ταμιευτήρες παγκοσμίως εξυπηρετούν τις εξής ανάγκες (ICOLD,1998a):

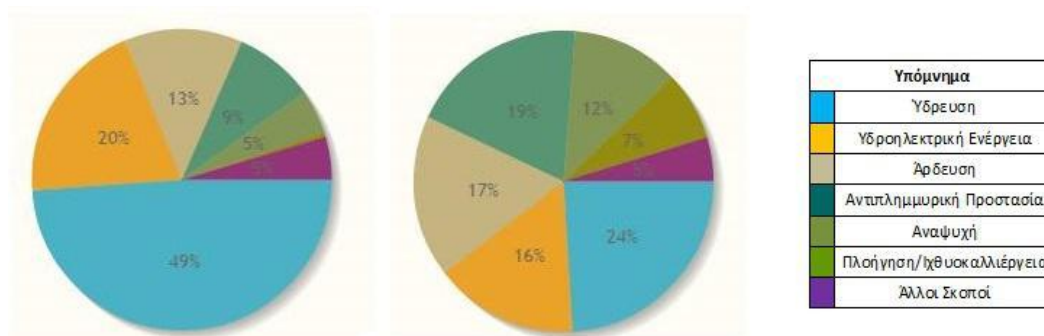
- Άρδευση, σε ποσοστό 48%
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε ποσοστό 17%
- Παροχή πόσιμου νερού, σε ποσοστό 13%
- Αντιπλημμυρική προστασία, σε ποσοστό 10%
- Αναψυχή, σε ποσοστό 5%
- Ιχθυοκαλλιέργεια και πλοήγηση, σε ποσοστό 1%

Στο Γράφημα 1.2, παρουσιάζεται η διανομή των φραγμάτων ανάλογα με τη χρήση τους για την κάθε κατηγορία με τη μορφή απόλυτων αριθμών, ενώ στο Γράφημα 1.3 με τη μορφή ποσοστών.



Υπόμνημα	
H (Hydropower)	Υδροηλεκτρική Ενέργεια
S (Water Supply)	Υδρευση
C (Flood Control)	Αντιπλημμυρική Προστασία
I (Irrigation)	Άρδευση
N (Navigation)	Πλοήγηση
R (Recreation)	Αναψυχή
F (Fish Breeding)	Ιχθυοκαλλιέργεια
X (Others)	Άλλοι λόγοι

Γράφημα 1.2 Πλήθος και σκοπός καταγεγραμμένων φραγμάτων. Με το πορτοκαλί χρώμα απεικονίζονται τα φράγματα πολλαπλών σκοπών και με το μπλε τα φράγματα ενός μόνο σκοπού (ICOLD).



Γράφημα 1.3 Διανομή φραγμάτων ενός μόνο σκοπού(αριστερά) και πολλαπλών σκοπών (δεξιά).

Όσο αφορά την κατανομή των φραγμάτων ανά τον κόσμο, τα ηνία κρατά η Κίνα με 23 842 καταγεγραμμένα μεγάλα φράγματα, αντιπροσωπεύοντας το 40,9% του συνόλου, με δεύτερες τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με 9 265 φράγματα. Η Ελλάδα βρίσκεται στην 28^η θέση με 164 φράγματα.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με την ICOLD (1994), κύριες λειτουργίες των φραγμάτων είναι, με σειρά σπουδαιότητας :

1. Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας
2. Ύδρευση
3. Άρδευση

Τα πρώτα φράγματα κατασκευάστηκαν στην αρχαιότητα, με χαρακτηριστικά τα φράγματα της Τίρυνθας το 12^{ος} αιώνα π.Χ. και της Αλυζίας τον 5^ο αιώνα π.Χ.. Στη σύγχρονη Ελλάδα, η κατασκευή φραγμάτων ξεκίνησε το 1920, με τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η. Α.Ε.) να παίρνει τη σκυτάλη το 1950, κατασκευάζοντας υδροηλεκτρικά φράγματα σκυροδέματος. Το 1960 η ίδια προχώρησε στην κατασκευή μεγάλων χωμάτινων φραγμάτων, οδηγώντας στη μεγάλη έκρηξη της κατασκευής διαφόρων τύπων φραγμάτων τη δεκαετία του 1990. Ο ρυθμός αυτός κατασκευής άρχισε να μειώνεται τα επόμενα χρόνια, φτάνοντας το 1/10 τη δεκαετία του 2010. Παράλληλα, άρχισαν να εμφανίζονται και οι πρώτες αντιδράσεις ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις μακροχρόνιες αρνητικές επιδράσεις τους, καθώς και το μείζον ερώτημα κατά πόσο αυτές υπερβαίνουν τα άμεσα οικονομικά οφέλη.

1.4 Διαταραχές

Η ζωή ενός ποταμού είναι στενά συνδεδεμένη με τη ροή του, η οποία συνεχώς μεταβάλλεται. Η διακοπή της μέσω ενός φράγματος, πυροδοτεί ένα πλήθος φυσικών και βιολογικών συνεπειών.

α) Με την κατασκευή του φράγματος οι φερτές ύλες κατακρατώνται στον ταμιευτήρα και καθιζάνουν. Άμεση συνέπεια είναι η μείωση του ωφέλιμου όγκου, με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης του λιμνάζοντος νερού, αλλά και την αύξηση του κινδύνου πλημμυρών. Συγκεκριμένα, η συσσώρευση των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες προκαλεί πολλά προβλήματα, μερικά από τα οποία είναι η έμφραξη αγωγών στη βάση του φράγματος, η δυσλειτουργία έργων διεξόδου, όπως των θυροφραγμάτων, η αύξηση της τραχύτητας στις επιφάνειες έργων εκτόνωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κραδασμών ή φαινομένων σπηλαιώσης και τέλος, προβλήματα ευστάθειας του φράγματος λόγω πιθανής υποσκαφής της θεμελίωσης, σε συνδυασμό με την πτώση της στάθμης κατάντη.

β) Η έλλειψη φερτών στην κοίτη κατάντη του ταμιευτήρα προκαλεί τη διάβρωσή της. Πρόκειται για μία σοβαρή επίπτωση, καθώς η διάβρωση θα προκαλέσει αλλαγές στη γεωμετρία της κοίτης, μέχρι και κατολισθήσεις. Επιπλέον, δημιουργείται ένα περιβάλλον φτωχό για την ανάπτυξη οργανισμών.

γ) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

i) Μεταβολή χλωρίδας. Παρατηρείται αλλαγή στις συνήθειες των ψαριών, τα οποία εκτίθενται τώρα σε αρπακτικά, λόγω της μη ύπαρξης νερού ή λιμναζόντων υδάτων.

ii) Χωρισμός ποταμού σε τμήματα. Το φράγμα χωρίζει το φυσικό ποτάμι σε δύο τμήματα, με αποτέλεσμα οι υδρόβιοι οργανισμοί να αδυνατούν να μεταναστεύσουν. Το πρόβλημα εντοπίζεται, κυρίως, τις περιόδους αναπαραγωγής και ωοτοκίας.

iii) Μεταβολή οικοσυστήματος. Ο διαχωρισμός του ποταμού διαταράσσει την ισορροπία, με αποτέλεσμα την εμφάνιση νέων πλημμυρικών περιοχών. Εκεί, κατακλύζεται η βλάστηση και προκαλείται αποσύνθεση.

iv) Τοξικά. Το λιμνάζον νερό του ταμιευτήρα καλύπτει την υπάρχουσα βλάστηση, προκαλώντας αποσύνθεση και εξαντλώντας το οξυγόνο. Τότε, αφενός παράγονται τοξικά, όπως υδράργυρος, αφετέρου παρατηρείται διαστρωμάτωση των υδάτος λόγω θερμοκρασιακών διαφορών.

δ) Εκτόπισμα φράγματος. Το υπό κατασκευή φράγμα έχει τέτοιο εκτόπισμα που προκαλεί μετακίνηση των ανθρώπων από περιοχές.

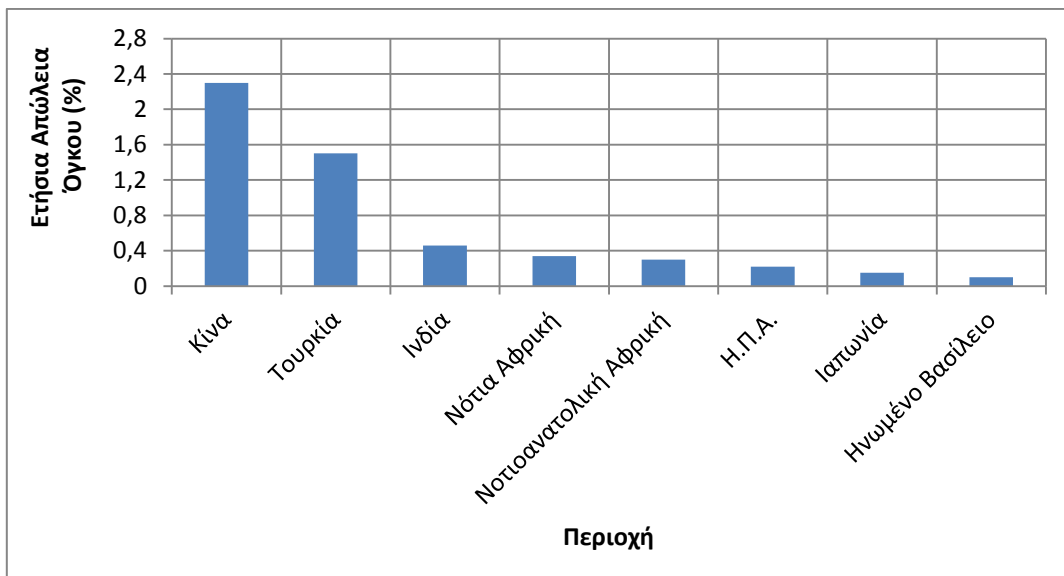
Φυσικά θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί και η θετική επίδραση των φραγμάτων. Πέρα από το σκοπό δημιουργίας του, ένα φράγμα συμβάλλει στη δημιουργία βιοτόπων, γεγονός πολύ σημαντικό κυρίως για τα πτηνά. Επιπλέον, παρέχει και οικονομικά οφέλη στις τοπικές κοινωνίες, αξιοποιώντας τις τεχνητές λίμνες για την ανάπτυξη ήπιας μορφής εκμετάλλευσης και αναψυχής.

Από τα παραπάνω είναι φανερό, πως πλέον στο στόχαστρο των μηχανικών δεν είναι μόνο οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες, αλλά και η διαχείριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την κατασκευή ενός φράγματος. Το μεγάλο εύρος των επιπτώσεων

από την εισροή και τη συσσώρευση των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες, καθιστά σαφή αλλά και αναγκαία την πρόβλεψη τόσο της ποσότητάς τους στη φάση του σχεδιασμού, όσο και των αναγκαίων μέτρων προστασίας των ταμιευτήρων από αυτά.

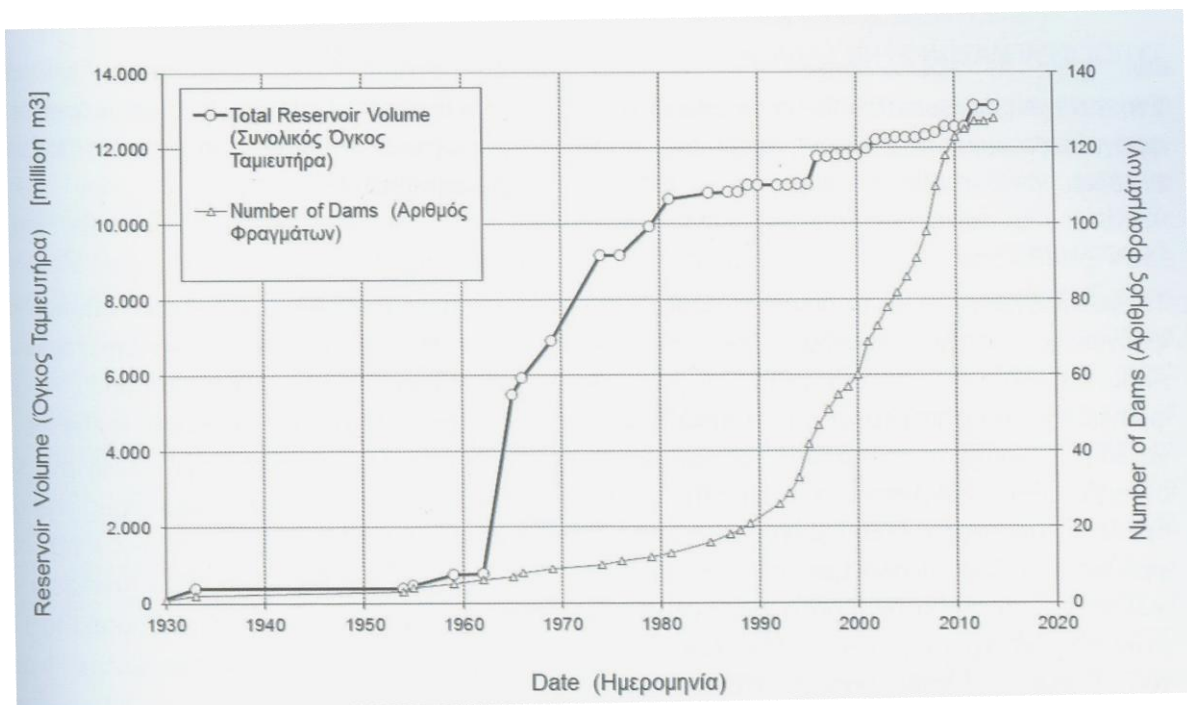
1.5 Διαχείριση φερτών υλικών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με την κατασκευή ενός φράγματος διαταράσσεται η ισορροπία του ποταμού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ μικρών ταχυτήτων ροής και τον εγκλωβισμό φερτών υλικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη συσσώρευση των τελευταίων στον ταμιευτήρα, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στη σταδιακή μείωση του ωφέλιμου όγκου του. Η λειτουργία ενός ταμιευτήρα θεωρείται ότι έχει υποστεί μεγάλη βλάβη, όταν τα φερτά έχουν καταλάβει το 50% του όγκου του. Ωστόσο, προβλήματα εμφανίζονται ακόμα και με την απώλεια ενός μικρού ποσοστού αυτού. Αυτή η φθίνουσα πορεία του ωφέλιμου όγκου, μειώνει και τέλος εξαλείφει την ικανότητα ρύθμισης της ροής, εμποδίζει την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ περιορίζει και την δυνατότητα ικανοποίησης των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί να εκτελεσθεί καμία λειτουργία του ταμιευτήρα, επομένως αυτός δεν έχει πια χρησιμότητα. Είναι πλήρως αντιληπτό λοιπόν, πως εάν ένας ταμιευτήρας προορίζεται για μακροχρόνια βιώσιμη χρήση, είναι απαραίτητη η διαχείριση, όχι μόνο του νερού του, αλλά και των φερτών υλικών του. Στο Γράφημα 1.4 φαίνεται η ετήσια απώλεια του ωφέλιμου όγκου ανά χώρα, κάνοντας φανερή την έκταση του προβλήματος.



Γράφημα 1.4 Ετήσια απώλεια ωφέλιμου όγκου ανά χώρα (Chaudhry and Rehman,2010).

Το πρόβλημα της συσσώρευσης φερτών υλικών στους ταμιευτήρες έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις ακόμη και στην Ελλάδα. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η εξέλιξη της συνολικής χωρητικότητας των ταμιευτήρων συναρτήσει του αριθμού μεγάλων φραγμάτων. Παρά την έντονη αύξηση του αριθμού των φραγμάτων από το 1990 και έπειτα, παρατηρείται ελάχιστη αύξηση του συνολικού όγκου των ταμιευτήρων. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ιδιαίτερα μεγάλη απώλεια όγκου και είναι σχεδόν δεδομένο πως το ισοζύγιο αυτό αναμένεται να γίνει αρνητικό, με μείωση της συνολικής χωρητικότητας των ταμιευτήρων τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη της συνολικής χωρητικότητας των ταμιευτήρων στην Ελλάδα, συναρτήσει του αριθμού μεγάλων φραγμάτων (Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2014).

Την τεράστια σημασία της διαχείρισης των φερτών υλικών αντιλαμβάνεται κανείς αναλογιζόμενος, επιπροσθέτως με τα παραπάνω, και το μέγεθος των ανθρώπινων και οικονομικών δραστηριοτήτων που στηρίζονται σε ένα ταμιευτήρα. Οι κοινωνίες άμεσα εξαρτώμενες από ταμιευτήρες, κυμαίνονται από τεχνολογικά ανεπτυγμένες αστικές και γεωργικές περιοχές της δυτικής Αμερικής, έως αρδευτικά χωριά της ινδικής χερσονήσου. Προκειμένου να αναπτυχθεί ο πληθυσμός και η οικονομία σε αυτές τις περιοχές λοιπόν, θα πρέπει να υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα για την εγκυρότητα των υπηρεσιών που προσφέρει ένα φράγμα με τον ταμιευτήρα του.

Η μετατροπή ενός ταμιευτήρα, ο οποίος αντιμετωπίζει το πρόβλημα της συσσώρευσης φερτών υλικών, σε μία βιώσιμη πηγή ενέργειας με μακροχρόνια οφέλη, απαιτεί αλλαγές

στον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας του. Απαραίτητη είναι πρωτίστως η διαχείριση των φερτών υλικών και εν συνεχεία, του διαθέσιμου νερού. Αυτή επιτυγχάνεται με τεχνικές όπως η ελεγχόμενη εισροή φερτών υλικών, η καθοδήγηση των φερτών πέρα από τον ταμιευτήρα, η απομάκρυνσή τους, η κατασκευή ενός ταμιευτήρα με υπερβολικά μεγάλο όγκο και η απόθεση των φερτών υλικών σε ελεγχόμενες περιοχές.

Από τις μεθόδους αυτές, μερικές είναι ξεπερασμένες, είτε λιγότερο αποτελεσματικές από άλλες. Στην παρούσα εργασία, πέρα από τους μηχανισμούς που σχετίζονται άμεσα με τη συσσώρευση φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα, θα μελετηθεί η μέθοδος της υδραυλικής έκπλυσης, που ανήκει στην κατηγορία της απομάκρυνσης των φερτών υλικών, καθώς και αυτή της παράκαμψης του ταμιευτήρα, που ανήκει στην κατηγορία της καθοδήγησης των φερτών υλικών.

1.6 Βιώσιμη ανάπτυξη

Η παγκόσμια υπεραλίευση, η εκτεταμένη υποβάθμιση της γης και των υδατικών πόρων, η απώλεια φυσικού περιβάλλοντος και βιολογικής ποικιλίας, η παγκόσμια κλιματική αλλαγή, καθώς και ο συνεχώς αυξανόμενος ανθρώπινος πληθυσμός είναι το βασικό πρότυπο ανάπτυξης παγκοσμίως, το οποίο όμως συνιστά και ένα πρότυπο μη βιώσιμης εκμετάλλευσης του πλανήτη. Οι διεργασίες αυτές ξεπερνούν σε μέγεθος τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους και σχεδόν βέβαια οδηγούν σε καταστάσεις εξαθλίωσης. Το πρόβλημα είναι τόσο έντονο, που σε βάθος χρόνου μόλις 30 ετών, προβλέπεται μία έντονη διαμάχη μεταξύ των ανθρώπινων πληθυσμών και των φυσικών οικολογικών συστημάτων.

Πολλοί προσπάθησαν να ορίσουν τη βιωσιμότητα, μεταξύ των οποίων ο Bruce (1992) και ο Weiss (1993). Ο τελευταίος υποστήριξε πως είναι υποχρέωση του ατόμου να παραλαμβάνει τον πλανήτη στην ίδια κατάσταση, στην οποία τον παρέλαβε και η προηγούμενη γενιά, να κληρονομή πόρους που χαρακτηρίζονται από βιοποικιλότητα και να έχει δίκαιη πρόσβαση στη χρήση και τα οφέλη του περιβαλλοντικού συστήματος. Τα τρία στοιχεία που πρότεινε ο Weiss είναι πρόσβαση, ποιότητα και διατήρηση των επιλογών και της βιοποικιλότητας. Όσο αφορά τη βιωσιμότητα των υδατικών πόρων, τα στοιχεία αυτά μπορούν να μετατραπούν σε ποσότητα, ποιότητα και ποικιλία, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Ποσότητα νερού. Οι ταμιευτήρες είναι σχεδιασμένοι και λειτουργούν με δεδομένο ότι η ζωή τους είναι πεπερασμένη. Η βιωσιμότητα απαιτεί να αντικατασταθεί η ιδέα της πεπερασμένης ζωής του ταμιευτήρα, από μία μακροπρόθεσμη ματιά βιώσιμης χρήσης του. Με άλλα λόγια, σκοπός είναι να εξασφαλιστεί πως ο ταμιευτήρας θα διατηρεί σε μόνιμη βάση ένα ποσοστό του ωφέλιμου όγκου του.

Ποιότητα νερού. Οι φερτές ύλες είναι η μεγαλύτερη πηγή μόλυνσης της απορροής, η οποία προκύπτει από τις διαταραγμένες περιοχές που καταλαμβάνονται από τον άνθρωπο. Πολλά από τα τοξικά υλικά των ρευμάτων, όπως μέταλλα, παρασιτοκτόνα και άλλες οργανικές

ουσίες, απορροφώνται σε μεγάλο βαθμό από τα φερτά υλικά (Meade and Parker,1984). Επομένως, ο τρόπος με τον οποίο αυτά διαχειρίζονται, επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του νερού, όχι μόνο μέσα στον ταμιευτήρα αλλά και αρκετά χιλιόμετρα κατάντη αυτού. Η διαχείριση των φερτών του ταμιευτήρα επηρεάζει επίσης και άλλα χαρακτηριστικά του νερού, όπως τη θερμοκρασία του, τα διαλυμένα θρεπτικά συστατικά του, καθώς και τα επίπεδα του οξυγόνου σε αυτό.

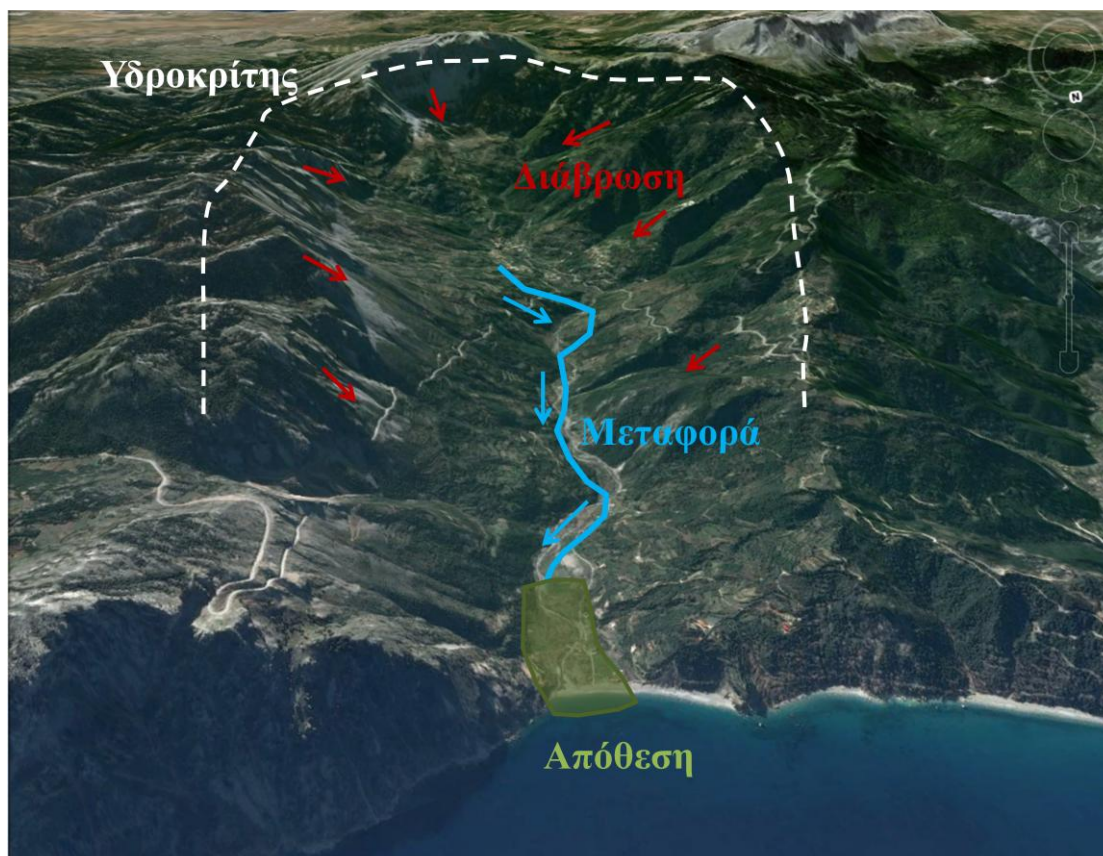
Ποικιλία. Η κατασκευή ενός φράγματος μετατρέπει την ελεύθερη ροή των ποταμών σε μία σειρά λιμνών. Με τον τρόπο αυτό, μεταβάλλεται το υδατικό περιβάλλον και η τροφική αλυσίδα, ενώ παράλληλα εξαλείφονται μεταναστευτικά είδη. Φυσικά, ένα φράγμα δεν είναι η μόνη απειλή στο φυσικό περιβάλλον, αποτελεί όμως την πιο σημαντική, λόγω του μεγέθους και της μονιμότητας των επιδράσεών του. Η διατήρηση της ποικιλίας δεν απαιτεί την αποφυγή της κατασκευής φραγμάτων, αλλά την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της υπερεκμετάλλευσης ορισμένων ποταμών από δραστηριότητες ανάπτυξης, όπως η κατασκευή ενός φράγματος, και της υποεκμετάλλευσης άλλων. Η έννοια της ποικιλίας περιλαμβάνει και την πολιτιστική πολυμορφία, καθώς η κατασκευή ενός ταμιευτήρα συχνά γίνεται η αιτία μετανάστευσης μεγάλων πληθυσμών, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μια πολιτισμική αποσύνθεση.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη των υδάτινων πόρων θεωρείται βιώσιμη, όταν δεν υποβαθμίζει σημαντικά ή σταδιακά την ποσότητα και την ποιότητα του νερού σε μακροπρόθεσμη βάση, και όταν διατηρεί την πολυμορφία του φυσικού περιβάλλοντος και οικοσυστήματος. Βασική αιτία των παραπάνω είναι η συσσώρευση φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα, επομένως δεν τίθεται ερώτημα γιατί είναι απαραίτητη η μελέτη και η διαχείριση του προβλήματος.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

2.1 Περιγραφή φερτών υλικών

Το πρώτο βήμα για την κατανόηση του προβλήματος της συσσώρευσης των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες, είναι η μελέτη της σύστασής τους και εν συνεχεία των μηχανισμών, κάτω από τους οποίους αυτά διαβρώνονται, μεταφέρονται και τέλος αποτίθενται. Η διαδρομή που ακολουθεί ένα εδαφικό σωματίδιο φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Η πορεία των φερτών υλικών σε μία λεκάνη απορροής και οι τρεις μηχανισμοί που επιδρούν σε αυτά (Μαμάσης κ.ά.,2015).

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν, θα γίνει αρχικά η περιγραφή των φερτών υλικών και εν συνεχεία θα μελετηθούν οι μηχανισμοί της διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης.

Τα φερτά υλικά παράγονται από τους βράχους και τα εδάφη που συνθέτουν την ξηρά. Το νερό συσσωρεύει και μεταφέρει υλικά, αρχικά από τη διαδρομή του πάνω στην ξηρά, και στη συνέχεια από τη ροή του στα ποτάμια ρεύματα. Όταν αυτό καταλήγει σε περιοχές όπου διακόπτεται η ροή και λιμνάζει, λόγω της σχεδόν μηδενικής ταχύτητας, το φορτίο του θα αποτεθεί στον πυθμένα. Έτσι δημιουργείται το πρόβλημα της συσσώρευσης των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες.

2.2 Ταξινόμηση φερτών υλικών

2.2.1 Ταξινόμηση του μεγέθους

Το μέγεθος των σωματιδίων των φερτών υλικών που μεταφέρονται με το νερό, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά τους μέσα σε αυτό. Η μορφή τους ποικίλλει από μεμονωμένα αργιλικά σωματίδια μέχρι μεγάλους ογκολίθους και το μέγεθός τους εμφανίζει συνήθως ένα εύρος μέχρι και επτά τάξεων μεγέθους. Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί η ταξινόμηση μεγέθους που προτάθηκε από την Αμερικάνικη Γεωφυσική Ένωση (American Geophysical Union), η οποία είναι μία γεωμετρική κλίμακα με μέγεθος αναλογίας 2 μεταξύ διαδοχικών μεγεθών (Lane, 1947). Η ταξινόμηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1, μαζί με το μέγεθος του κόσκινου, στο οποίο συγκρατούνται τα υλικά κάθε φορά. Με τον όρο χονδρόκοκκα υλικά, εννοείται συνήθως η άμμος και υλικά με σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, ενώ με τον όρο λεπτόκοκκα, συνήθως ιλεις και άργιλοι.

Τα σωματίδια των φερτών υλικών δεν είναι ποτέ ακριβώς σφαιρικά, επομένως ο όρος "διάμετρος" χρησιμοποιείται ως μια προσέγγιση του μεγέθους τους. Η διάμετρος των υλικών ορίζεται ως η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου, το οποίο μέσα στο ίδιο υγρό, έχει την ίδια ταχύτητα καθίζησης με το υπό εξέταση υλικό.

2.2.2 Σφαιρικότητα και στρογγυλότητα

Η σφαιρικότητα εκφράζεται με το συντελεστή σχήματος, shape factor, SF. Θεωρώντας a, b και c το μεγαλύτερο, ενδιάμεσο και μικρότερο άξονα αντίστοιχα ενός σωματιδίου, η σφαιρικότητα ορίζεται από τη Σχέση 2.1 :

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (2.1)$$

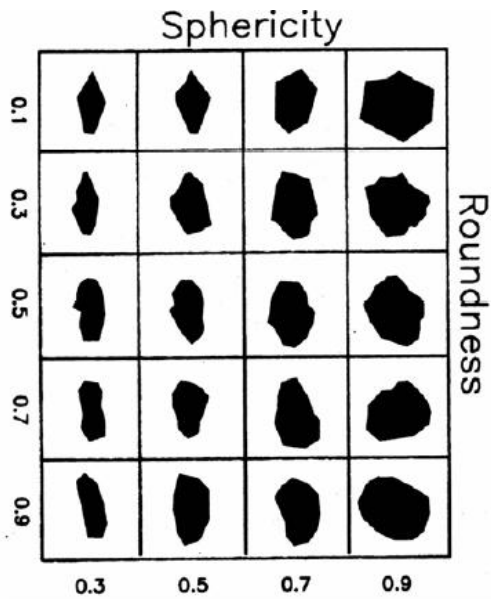
Ενδεικτικά, ο συντελεστής σχήματος μιας σφαίρας είναι 1, ενώ ενός σωματιδίου φυσικής άμμου 0.7 (Interagency Committee, 1957).

Με τον όρο στρογγυλότητα ορίζεται ο λόγος της μέσης ακτίνας των γωνιών και ακμών του σωματιδίου, προς την ακτίνα ενός κύκλου χαραγμένου στη μέση έκτασή του. Η στρογγυλότητα έχει ελάχιστη επίδραση στην υδραυλική συμπεριφορά του σωματιδίου, παίζει τεράστιο ρόλο όμως στην τραχύτητα που θα προκαλέσουν τα υλικά σε μία υδραυλική εγκατάσταση.

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση υλικών, με βάση τη διάμετρο των κόκκων τους (Lane,1947).

Size class	<u>Grain diameter, mm</u>		<u>Sieve size retained on</u>	
	Min.	Max.	Tyler	U.S. Standard
Boulders:				
Very large	2048	4096		
Large	1024	2048		
Medium	512	1024		
Small	256	512		
Cobbles:				
Large	128	256		
Small	64	128		
Gravel:				
Very coarse	32	64		
Coarse	16	32		
Medium	8	16		
Fine	4	8	5	5
Very fine	2	4	9	10
Sand:				
Very coarse	1	2	16	18
Coarse	0.5	1	32	35
Medium	0.25	0.5	60	60
Fine	0.125	0.25	115	120
Very fine	0.062	0.125	250	230
Silt:				
Coarse	0.031	0.062		
Medium	0.016	0.031		
Fine	0.008	0.016		
Very fine	0.004	0.008		
Clay:				
Coarse	0.002	0.004		
Medium	0.001	0.002		
Fine	0.0005	0.001		
Very fine	0.00024	0.0005		

Τα πρόσφατα διαβρωμένα υλικά έχουν έντονες γωνίες, οι οποίες όμως εξομαλύνονται με το χρόνο, λόγω της τριβής μεταξύ των σωματιδίων. Έτσι, για παράδειγμα, τα σωματίδια άμμου γίνονται όλο και λιγότερο τραχιά από την κοίτη του ποταμού προς τα κατάντη. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται μια απεικόνιση της σχέσης μεταξύ σφαιρικότητας και στρογγυλότητας.



Εικόνα 2.2 Απεικόνιση σφαιρικότητας και στρογγυλότητας σωματιδίων (Morris and Fan,1998).

2.2.3 Κατηγοριοποίηση φερτών υλικών

Ο πυθμένας ενός ταμειυτήρα αποτελείται από μετακινήσιμα φερτά υλικά της κοίτης του ποταμού. Τα υλικά αυτά μπορούν να ταξινομηθούν είτε βάσει του μεγέθους των κόκκων τους, είτε βάσει του τρόπου μεταφοράς τους. Με βάση το μέγεθος των κόκκων τους, τα φερτά υλικά χωρίζονται σε φορτίο απόπλυσης και φορτίο υλικού κοίτης. Ομοίως, με βάση τον τρόπο μεταφοράς τους σε ένα υδατόρευμα, κατατάσσονται σε φορτίο αιώρησης και φορτίο σε σύρση.

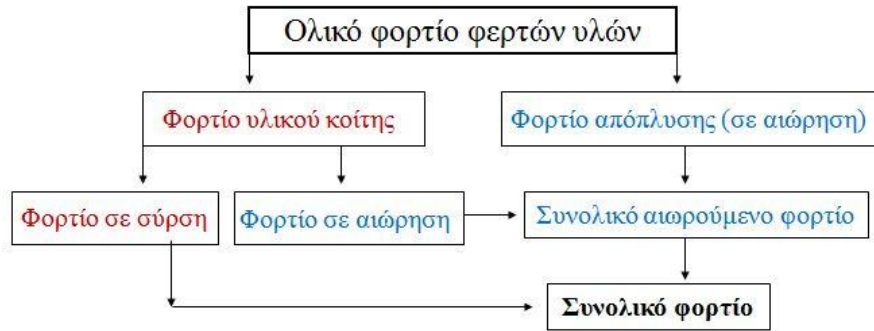
Φορτίο υλικού κοίτης (Bed Material Load) ορίζεται το φορτίο το οποίο ήδη βρίσκεται στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου και αποτελεί τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους. Προφανώς αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά.

Φορτίο απόπλυσης (Wash Load) ορίζεται το φορτίο το οποίο παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων και προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής. Οι κόκκοι του έχουν μέγεθος μικρότερο από αυτό της πλειονότητας του συνολικού φορτίου, πρόκειται λοιπόν για λεπτόκοκκα υλικά.

Φορτίο σε αιώρηση (Suspended Load) ορίζεται το φορτίο που μεταφέρεται με την τύρβη, χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Φορτίο σε σύρση (Bed Load) ορίζεται το φορτίο των χονδρόκοκκων υλικών το οποίο μετακινείται με συνεχή ή διακοπτόμενη επαφή με τον πυθμένα, αναπηδώντας ή σέρνοντας σε αυτόν.

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται συνοπτικά ο διαχωρισμός του συνολικού φορτίου των φερτών υλικών, σύμφωνα και με τα δύο κριτήρια.



Εικόνα 2.3 Ταξινόμηση φορτίου των φερτών υλικών. Το κόκκινο χρώμα αφορά τα χονδρόκοκκα υλικά, ενώ το γαλάζιο τα λεπτόκοκκα.

Το φορτίο σε αιώρηση συνήθως αποτελείται από άργιλο και ιλύ, ενώ τα χαλίκια και οι κροκάλες μεταφέρονται συνήθως με τη διαδικασία της σύρσης.

Στη μελέτη του φαινομένου της συσσώρευσης των φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η ποσότητα των υλικών που μεταφέρεται μέσω ενός ποταμού. Χαρακτηριστικά μεγέθη είναι η στερεοαπορροή και η στερεοπαροχή, που ορίζονται παρακάτω.

Στερεοαπορροή (Sediment Yield-Sy) είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή ενός ποταμού, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως, το μέγεθος αυτό είναι ανηγμένο ως προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής και τελικά εκτιμάται σε τόνους/μονάδα έκτασης/έτος, δηλαδή σε t/ha/yr ή t/km²/yr.

Στερεοπαροχή (Sediment Discharge-Qs) ορίζεται ο στιγμιαίος ρυθμός μεταφοράς φερτών υλών σε μια διατομή ενός ποταμού και εκτιμάται σε βάρος/χρόνο, δηλαδή σε kg/s.

Με το μέγεθος της στερεοαπορροής συνδέεται άμεσα ο συντελεστής στερεοαπορροής (Sediment Delivery Ratio), ο οποίος όμως θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

2.3 Το φαινόμενο της διάβρωσης

Η μεγαλύτερη ποσότητα των φερτών υλών εισέρχεται στον ταμιευτήρα, ως προϊόν της διάβρωσης του εδάφους και της μεταγενέστερης μεταφοράς μέσω των ποταμών. Επομένως, η επιτυχής μείωση της στερεοπαροχής απαιτεί την ανάπτυξη εύστοχων μοντέλων των διεργασιών της διάβρωσης και της μεταφοράς. Η διαδικασία της διάβρωσης μελετάται εδώ και πολλές δεκαετίες, με την επιθυμία για την επιστημονική έρευνα του φαινομένου να γεννιέται από το φαινόμενο των καταιγίδων και θυελλών σκόνης στην Αμερική, την περίοδο του 1930. Σήμερα, τα υπολογιστικά εργαλεία για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της διάβρωσης και της σχετικής διαδικασίας ροής υφίστανται ραγδαίες

αλλαγές, οι οποίες είναι αποτέλεσμα δεκαετιών έρευνας, συνδυασμένης με την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Αποσάθρωση είναι η χημική και μηχανική διαδικασία, με την οποία ο βράχος αλλάζει χαρακτήρα, αποσυντίθενται και τελικά θρυμματίζεται μέσα στο έδαφος. Η φυσική αποσάθρωση περιλαμβάνει τον κατακερματισμό των σωματιδίων και μπορεί να προκληθεί από τους παγετώνες, από βιολογικές διεργασίες, είτε λόγω τριβής κατά τη μεταφορά. Αντίστοιχα, η χημική αποσάθρωση περιλαμβάνει τη διάλυση του φλοιού της γης από το νερό, και επιταχύνεται όταν αυτό οξυνθεί λόγω της απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα, η οποία συμβαίνει κατά τη διαδικασία της αναπνοής τόσο της χλωρίδας, όσο και της πανίδας της περιοχής. Ο ρυθμός της χημικής αποσάθρωσης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διαθεσιμότητα του νερού και είναι ιδιαίτερα αργός και ατελής κάτω από ξηρές συνθήκες, αφήνοντας τότε τη φυσική αποσάθρωση να κυριαρχήσει. Συνεπώς, εδάφη που σχηματίστηκαν κάτω από ξηρές συνθήκες είναι πιο πιθανό να είναι χονδρόκοκκα. Αντίθετα, οι χημικές διεργασίες είναι πιο σημαντικές σε υγρές περιοχές, όπου επικρατούν αργιλώδη εδάφη. Ο χαλαζίας είναι το πιο σταθερό, χημικά, ορυκτό που βρίσκεται σε αφθονία σε βραχώδη εδάφη και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάλυση λόγω νερού. Πρόκειται για το πρωτεύων συστατικό στις περισσότερες άμμους και τα μορφολογικά τους αντίγραφα, όπως οι κοίτες χειμάρρων και οι παραλίες.

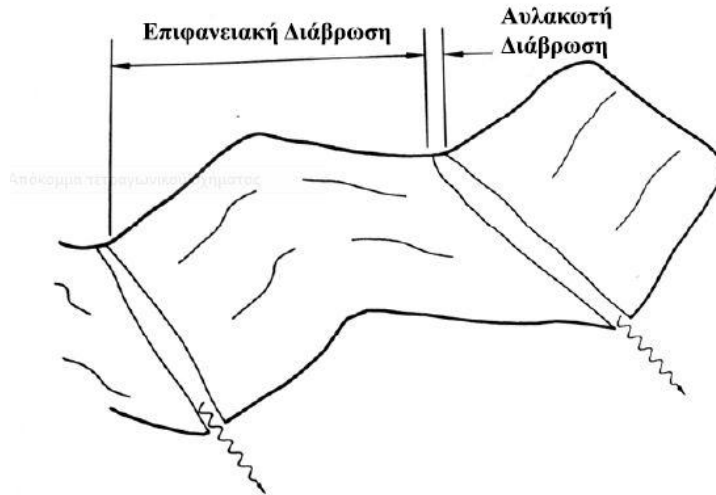
Διάβρωση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πετρώματα χαλαρώνουν ή διαλύονται και απομακρύνονται από την επιφάνεια της γης. Ενώ η αποσάθρωση περιλαμβάνει μόνο την διάσπαση του βράχου, η διάβρωση περιλαμβάνει επιπλέον την αποκοπή και τη μεταφορά του αποσαθρωμένου υλικού από το ένα μέρος στο άλλο, απογυμνώνοντας την επιφάνεια της γης και μεταφέροντας υλικά στο ποτάμιο σύστημα. Ένας θεμελιώδης ορισμός της διάβρωσης, την ορίζει ως την αποκοπή και τη μεταφορά σωματιδίων βράχων, που οφείλεται στο νερό ή άλλους γεωλογικούς παράγοντες, όπως ο άνεμος, τα κύματα ή ο πάγος (Mahmood,1987). Ένας ευρύτερος ορισμός, περιλαμβάνει επίσης και τη μεταγενέστερη μετακίνηση του υλικού που έχει αποθεθεί πρόσφατα σε κάποιο άλλο σημείο του ταμιευτήρα. Οι τιμές της διάβρωσης εκφράζονται γενικά σε μάζα που απομακρύνεται από μια συγκεκριμένη περιοχή, στη μονάδα του χρόνου. Με άλλα λόγια, η μέτρηση της διάβρωσης πραγματοποιείται με τη στερεοαπορροή, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί μετριέται σε $t/km^2/yr$ (White,2001). Με την ίδια λογική, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η στερεοπαροχή (kg/s). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων βέβαια, οι τιμές της στερεοαπορροής είναι πολύ μικρότερες των τιμών της διάβρωσης, γεγονός που οφείλεται στο ότι τα διαβρωμένα υλικά εναποτίθενται πάνω από μία φορές, προτού απομακρυνθούν από τον υδροκρίτη.

Η υπό εξέταση έκταση και το εν λόγω ποτάμιο σύστημα μπορούν να διαιρεθούν σε ζώνες, όπου διενεργούνται είτε διαβρωτικές ή αποθετικές διαδικασίες. Η διάβρωση κυριαρχεί σε ορεινές περιοχές, ενώ η απόθεση σε κοίτες και λεκάνες απορροής, αν και ουσιαστικά τα δύο φαινόμενα συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλα τα περιβάλλοντα.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η απογύμνωση της επιφάνειας της γης λόγω της χημικής αποσάθρωσης των βράχων από το νερό και άλλες βιολογικές διεργασίες, είναι πολύ σημαντικότερη από αυτή λόγω της φυσικής αποσάθρωσης. Η διάβρωση μπορεί να επιταχυνθεί μέχρι και τρεις τάξεις μεγέθους, σε σχέση με τη φυσική γεωλογική διάβρωση, λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Βασική αιτία είναι η καταστροφή της προστατευτικής φυτοκάλυψης του εδάφους, λόγω της οποίας καταστρέφεται η δομή του, με αποτέλεσμα η απορροή συγκεντρώνεται σε ρυάκια. Περίοδος επαναφοράς ονομάζεται το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η περιοχή για να αποκτήσει ξανά τη προηγούμενη βλάστηση και να σταθεροποιηθεί, ώστε ο ρυθμός διάβρωσης να επανέλθει σε πιο φυσικές τιμές.

Η ευαισθησία ενός εδάφους στη διάβρωση ονομάζεται διαβρωσιμότητα. Αυτή εξαρτάται, τόσο από το μέγεθος και τα φυσικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων που απαρτίζουν το έδαφος, όσο και από τη φύση των, οργανικών ή μη, υλικών που τα ενώνουν. Οι διαβρωτικές δυνάμεις που δρουν στο έδαφος καθορίζονται κυρίως από την ένταση της βροχής, τη γωνία κλίσης, το μήκος και τη φυτοκάλυψη, η οποία προστατεύει το έδαφος από τις συνέπειες της πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής σε αυτό.

Η διάβρωση μπορεί να ταξινομηθεί με βάση την αιτία γέννησής της (βροχή ή άνεμος), τον τρόπο που εκφράζεται (ρυάκι, ποτάμι, κλπ.) ή τη διαδικασία διάβρωσης (βροχόπτωση, κανάλι, κλπ.). Έτσι, με βάση τον τρόπο, παρατηρείται επιφανειακή, αυλακωτή και χαραδρωτική διάβρωση. Η επιφανειακή διάβρωση (interrill/sheet erosion) δημιουργείται από τη χωρικά και χρονικά ομοιόμορφη αποκόλληση εδαφικών υλικών, λόγω της βροχής και της μικρής επιφανειακής ροής. Η αυλακωτή διάβρωση (rill erosion) δημιουργεί μικρά αυλάκια, με βάθος έως και ένα μέτρο στην επιφάνεια του εδάφους, κατά την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Συνήθως, τα δύο αυτά είδη διάβρωσης αντιμετωπίζονται ως ένα, αφού τα ορατά αποτελέσματα του φαινομένου προκύπτουν από συνδυασμό των δύο. Ωστόσο, μπορούν να γίνουν αρκετά ευδιάκριτα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Μετρήσεις σε 56 εδάφη, χρησιμοποιώντας προσομοίωση βροχόπτωσης, έδειξαν ότι οι δύο βαθμοί διάβρωσης στο ίδιο έδαφος και για την ίδια βροχόπτωση συσχετίζονται ελάχιστα, ενώ πρόσφατες έρευνες εστιάζουν στον υπολογισμό του κάθε είδους ξεχωριστά (Laften et al, 1991b).



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης (Morris and Fan,1998).

Η χαραδρωτική διάβρωση (gully erosion) προκαλεί τη δημιουργία μεγάλων χαράδρων, με βάθος μεγαλύτερο του ενός μέτρου, κατά τη βασική διεύθυνση της ροής. Υπάρχει ακόμη ένα είδος διάβρωσης που συμβαίνει από αστοχία της κλίσης ή κινήσεις πλαγιών, καθώς και η λεγόμενη διάβρωση καναλιού, η οποία συμβαίνει κατά μήκος του πυθμένα και των όχθων ενός ρεύματος. Τέλος, υπάρχει και η διάβρωση λόγω ανέμου, που αναφέρεται σε μεταφορά σωματιδίων μέσω αυτού. Αυτό το είδος διάβρωσης είναι πιο σημαντικό σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές, όπου ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει σωματίδια από τις κορυφογραμμές στις πιο πεδινές περιοχές, από τις οποίες μπορούν μεταγενέστερα να μετακινηθούν μέσω της ροής (Rooseboom,1992).

Η ολική διάβρωση, προφανώς είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω μορφών, σε μία καθορισμένη λεκάνη απορροής. Η σημασία του κάθε τύπου διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Για παράδειγμα, η επιφανειακή διάβρωση κυριαρχεί σε απογυμνωμένες και διαταραγμένες περιοχές, όπως περιοχές βόσκησης ζώων ή εκτάσεις με κατασκευαστική δραστηριότητα. Ο Glymph (1957) συνέταξε δεδομένα μετρήσεων από 113 λεκάνες απορροής στις Η.Π.Α., έκτασης από 0.25 έως 1 132 km², και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επιφανειακή διάβρωση αποτελεί το 90% της στερεοαπορροής σε πάνω από τις μισές λεκάνες. Την περίοδο 1977-1979, η εθνική καταγραφή της διάβρωσης των μη ομοσπονδιακών περιοχών των Η.Π.Α., η οποία διενεργήθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πηγών εκτίμησε συνολική διάβρωση 4.8×10^9 t/yr. Οι περιοχές της διάβρωσης, με το ποσοστό της συμμετοχής τους, φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2. 2 Περιοχές διάβρωσης μη ομοσπονδιακών περιοχών των Η.Π.Α., τη χρονική περίοδο 1977-1979 (Holeman,1981).

Περιοχές διάβρωσης	Ποσοστό συνολικής διάβρωσης (%)
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	37.6
Λιβάδια	26.5
Όχθες καναλιών	10.6
Δάση	8.3
Βοσκοτόπια	6.6
Χαράδρες και κοίτες χειμάρρων	5.7
Δρόμοι	3.2
Εργοτάξια	1.5

Διάβρωση από μεγάλες δασικές περιοχές και περιοχές ομοσπονδιακής ιδιοκτησίας, οι οποίες αποτελούν περίπου το 22% της εθνικής εδαφικής έκτασης εξαιρουμένης της Αλάσκας, δε συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα. Παρόλο που οι εκτάσεις με κατασκευαστική δραστηριότητα συμμετέχουν σε μικρό ποσοστό στην ολική διάβρωση σε εθνικό επίπεδο, σε τοπικό επίπεδο είναι σημαντικές λόγω του μεγάλου βαθμού διάβρωσης ανά μονάδα εδαφικής έκτασης. Η χαραδρωτική διάβρωση επίσης, αναμένεται να έχει τη μεγαλύτερη συμβολή στη συνολική διάβρωση σε ασβεστώδη εδάφη και δασικές εκτάσεις. Η εθνική καταγραφή φυσικών πηγών του 1992 για τις Η.Π.Α. (Kellogg et al,1994) εκτίμησε το βαθμό διάβρωσης μη ομοσπονδιακών περιοχών. Λήφθηκαν υπόψη περίπου 800 000 επιλεγμένες τοποθεσίες, όπου ο υπολογισμός της επιφανειακής διάβρωσης (sheet and rill erosion) έγινε σύμφωνα με την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας, U.S.L.E. (Universal Soil Loss Equation), ενώ αυτή της διάβρωσης λόγω ανέμου με την Εξίσωση της Διάβρωσης λόγω Ανέμου, W.E.Q. (Wind Erosion Equation). Τα αποτελέσματα αυτής της καταγραφής φαίνονται στον Πίνακα 2.3. Στο χρονικό διάστημα 1982-1992, καταγράφηκε μία μείωση του βαθμού διάβρωσης σε ποσοστό περίπου 25%, η οποία οφειλόταν κυρίως σε δύο συνιστώσες:

1. Στις βελτιωμένες τεχνικές διατήρησης των καλλιεργήσιμων εκτάσεων.
2. Στη μετατροπή των μη καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε καλλιεργήσιμες, συμπεριλαμβανομένης της απόσυρσης ήδη διαβρωμένων εκτάσεων μέσω του Προγράμματος Διατήρησης Αποθεμάτων (Conservation Reserve Program), το οποίο αποτέλεσε κίνητρο ανάπτυξης των καλλιεργειών.

Πίνακας 2.3 Τιμές της διάβρωσης ανάλογα με τις χρήσεις της γης στις Η.Π.Α. (Natural Resources Conservation Service,1995).

Land use	<u>Land area. 10² km²</u>		<u>Erosion rate. t/km²/yr</u>		<u>Total erosion. 10⁹ t/yr</u>	
	1982	1992	1982	1992	1982	1992
Sheet and rill erosion						
Cropland	1.704	1.547	920	690	1.568	1.067
Pastureland	0.554	0.510	240	220	0.133	0.112
Rangeland	1.655	1.614	220	220	<u>0.364</u>	<u>0.355</u>
Subtotal					2.065	1.534
Wind erosion						
Cropland	Same	Same	740	560	1.261	0.866
Pastureland	Same	Same	22	22	0.012	0.011
Rangeland	Same	Same	1054	986	<u>1.744</u>	<u>1.591</u>
Subtotal					3.017	2.468
Combined erosion						
					5.082	4.002

*Excludes Alaska, includes Puerto Rico and U.S. Virgin Islands.
 Source: Natural Resources Conservation Service (1995).

Η ανάγκη μελέτης και κατανόησης του φαινομένου πηγάζει από τις εκτεταμένες επιπτώσεις του, όχι μόνο στο σημείο όπου συμβαίνει αλλά και στις κατάντη περιοχές. Δεν είναι τυχαίο ότι οι El-Swaify and Dangler (1982) αποκάλεσαν τη διάβρωση του την πιο σοβαρή αιτία υποβάθμισης της γης παγκοσμίως. Η διάβρωση προκαλεί την απώλεια του ανώτερου στρώματος του εδάφους, τη μείωση του βάθους του και την αποξήρασή του. Οι καταστάσεις αυτές με τη σειρά τους, οδηγούν σε μειωμένη παραγωγικότητα της κτηνοτροφίας, της βόσκησης των ζώων καθώς και των δασικών εκτάσεων. Η απώλεια του ανώτερου στρώματος του εδάφους μειώνει τη δυνατότητα διατήρησης της υγρασίας του εδάφους, γεγονός που ενισχύει την επιφανειακή απορροή, ακόμα και σε σημεία με μικρές κλίσεις (Sombroek,1985). Στα κατάντη των διαβρωμένων περιοχών τώρα, τα υλικά που συσσωρεύονται αυξάνουν το κόστος των αντιπλημμυρικών έργων. Παράλληλα υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού αυξάνοντας τη θολότητα, επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό τη βιομηχανία της αναψυχής (Clark,1985). Τα παραπάνω οδηγούν και πάλι σε οικονομική ζημία του κράτους. Είναι ξεκάθαρο λοιπόν, πως το εύρος των επιδράσεων της διάβρωσης είναι τεράστιο και επηρεάζει την καθημερινότητα.

2.3.1 Επιφανειακή διάβρωση

Η επιφανειακή διάβρωση συνεπάγεται δύο διακριτά στάδια: την αποκόλληση των εδαφικών σωματιδίων και τη μεταφορά τους. Η βασική αιτία της αποκόλλησης είναι δράση των δυνάμεων της βροχόπτωσης, η οποία μάλιστα γίνεται εντονότερη όταν η επιφάνεια στερείται προστατευτικής φυτοκάλυψης. Η πτώση μιας σταγόνας βροχής διασπά την κοκκώδη δομή του εδάφους και παράγει σωματίδια αρκετά μικρά για να μεταφερθούν

αφενός από τη ρηχή ροή και αφετέρου μέσω της διαδικασίας σύγκρουσης της σταγόνας στο έδαφος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 Επίπτωση της βροχόπτωσης στο έδαφος. Η δύναμη της πτώσης της σταγόνας αποσπά σωματίδια από τη δομή του εδάφους και τα μεταφέρει μέσω του λεγόμενου “πιτσουλίσματος” (Natural Resources Conservation Service)

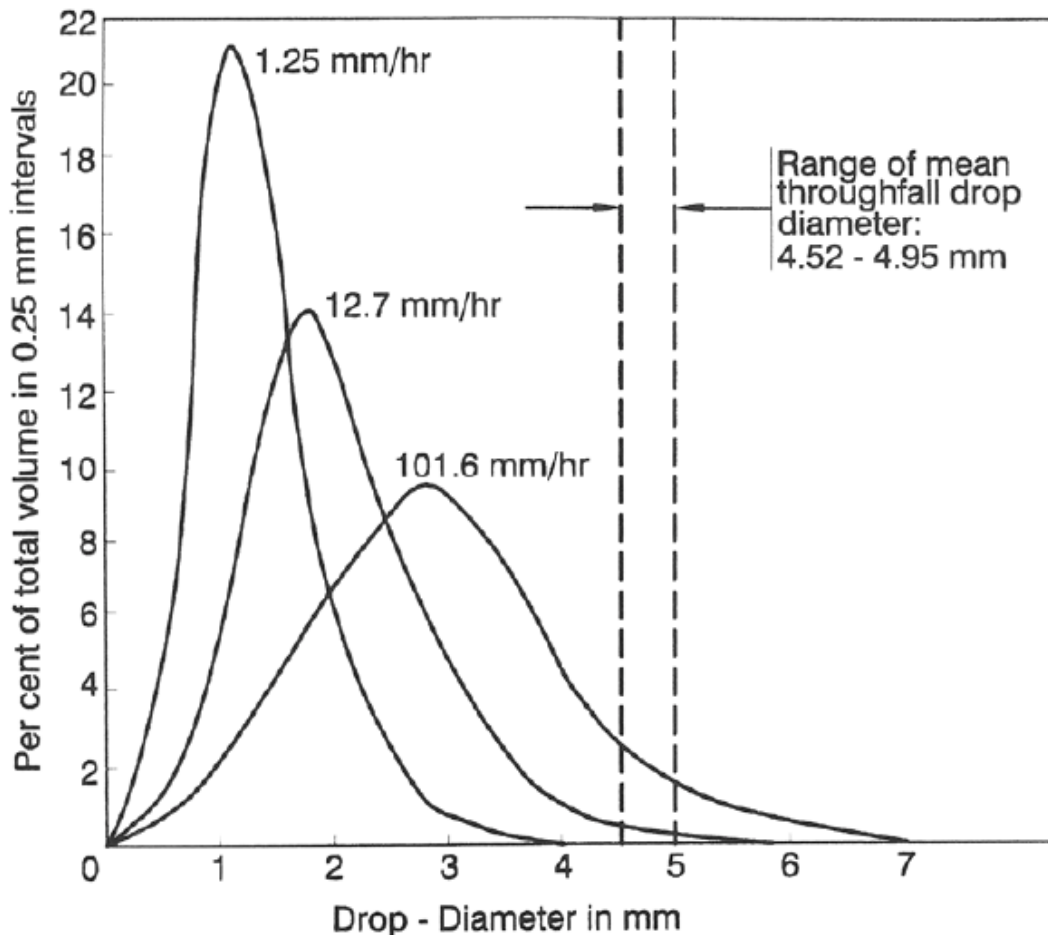
Η σύγκρουση μιας σταγόνας βροχής στο έδαφος μπορεί να μετακινήσει τα σωματίδια έως και μισό μέτρο μακριά από το σημείο που βρισκότουσαν. Διαδοχικές πτώσεις σταγόνων συνεχίζουν τη μετατόπιση και τη διαδικασία της μεταφοράς, έως ότου τα σωματίδια να σχηματίσουν ένα μικρό ρυάκι ρέοντος νερού, ή μέχρις ότου υπάρξει αρκετό νερό στο έδαφος, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία μεταφοράς με επιφανειακή ροή. Οι αποστάσεις της επιφανειακής μεταφοράς περιορίζονται κανονικά σε μερικά μέτρα, ή και λιγότερα σε αυλακωτές περιοχές, προτού η ροή συγκεντρωθεί σε ρυάκια. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που διασπώνται από τη βροχόπτωση αλλά δε μεταφέρονται μακριά, μπορούν να σχηματίσουν μία κρούστα εδάφους, η οποία σφραγίζει το έδαφος και έχει προστατευτική δράση. Η βλάστηση, οργανικά απορρίμματα ή ακόμη και σάπια φύλλα προστατεύουν το έδαφος έναντι της δύναμης της βροχόπτωσης, και συνεπώς μειώνουν κατά πολύ την πιθανότητα της μετατόπισης. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, επιφανειακές πέτρες μπορούν επίσης να προστατεύσουν το έδαφος από αυτή τη διάβρωση, αλλά οι πέτρες τείνουν παράλληλα να μειώνουν το ρυθμό διείσδυσης στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό, η ροή επικεντρώνεται σε κανάλια και δυνητικά ενισχύεται η δημιουργία καναλιών ροής και μεταφοράς.

Η ενέργεια που μεταδίδεται στο έδαφος, λόγω της βροχοπτώσης, εξαρτάται από το μέγεθος των σταγόνων, την ταχύτητα πτώσης τους και τη σφοδρότητα της βροχής. Το μέγεθος των σταγόνων, όπως είναι φυσικό, αυξάνεται ως συνάρτηση της σφοδρότητας της βροχής. Ορίζοντας τη μέση διάμετρο D_{50} , ως το μέγεθος σε χιλιοστά το οποίο αντιπροσωπεύει τα σωματίδια του μισού όγκου της βροχοπτώσης, περιέχοντας τόσο μικρότερες όσο και μεγαλύτερες διαμέτρους, μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση της σφοδρότητας της βροχής με την Εξίσωση 2.2 :

$$D_{50} = 1.24 I^{0.182} \quad (2.2)$$

με I : η σφοδρότητα της βροχοπτώσης, σε mm/h (Laws and Parsons,1943).

Αντιπροσωπευτικές διανομές μεγεθών των σταγόνων, φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Εκεί είναι φανερό πως όσο αυξάνεται η σφοδρότητα της βροχής κατά μία τάξη μεγέθους, τόσο αυξάνεται η μέση διάμετρος D_{50} , κατά μία μονάδα. Παράλληλα με τη μέση διάμετρο, αυξάνεται και το εύρος των τιμών των διαμέτρων.



Σχήμα 2.1 Ποσοστό του συνολικού όγκου των σταγόνων σε συνάρτηση της διαμέτρου τους για τρεις διαφορετικές τιμές σφοδρότητας βροχοπτώσης (Lars and Parsons,1943). Σύγκριση με το εύρος του μέσου μεγέθους της σταγόνας (Brandt,1990).

Με βάση τη διανομή του μεγέθους που καθορίστηκε από τους Laws and Parsons το 1943, και τις τελικές ταχύτητες πτώσης των σταγόνων, αναπτύχθηκε από τους Wischmeier and Smith (1958) μία εξίσωση που εκφράζει την ενέργεια της βροχόπτωσης ως συνάρτηση της σφοδρότητάς της. Η εξίσωση εκφράστηκε σε μονάδες του S.I. από τους Foster et al (1981). Η κινητική ενέργεια ανά μονάδα βροχόπτωσης, σε MJ/(ha×mm), για δεδομένη σφοδρότητα βροχής δοσμένη σε mm/h, υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.3 :

$$E_k = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad (2.3)$$

Υπολογισμοί για τρεις διαφορετικές τιμές σφοδρότητας βροχής συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4. Εκεί είναι φανερό η δραματική επίπτωση της σφοδρότητας της βροχόπτωσης στην ενέργεια. Αύξηση της σφοδρότητας κατά μία τάξη μεγέθους, προκαλεί αύξηση της κινητικής ενέργειας στη μονάδα του χρόνου επίσης κατά μία τάξη μεγέθους.

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης (Morris and Fan, 1998)

Είδος βροχόπτωσης	Σφοδρότητα (mm/h)	Μέση διάμετρος σταγόνας mm	Κινητική Ενέργεια J/m ²	
			ανά mm	ανά h
Ψιχάλα	2.5	1.5	15.4	38
Δυνατή βροχή	25	2.2	24.1	602
Νεροποντή	100	2.9	29.4	2940

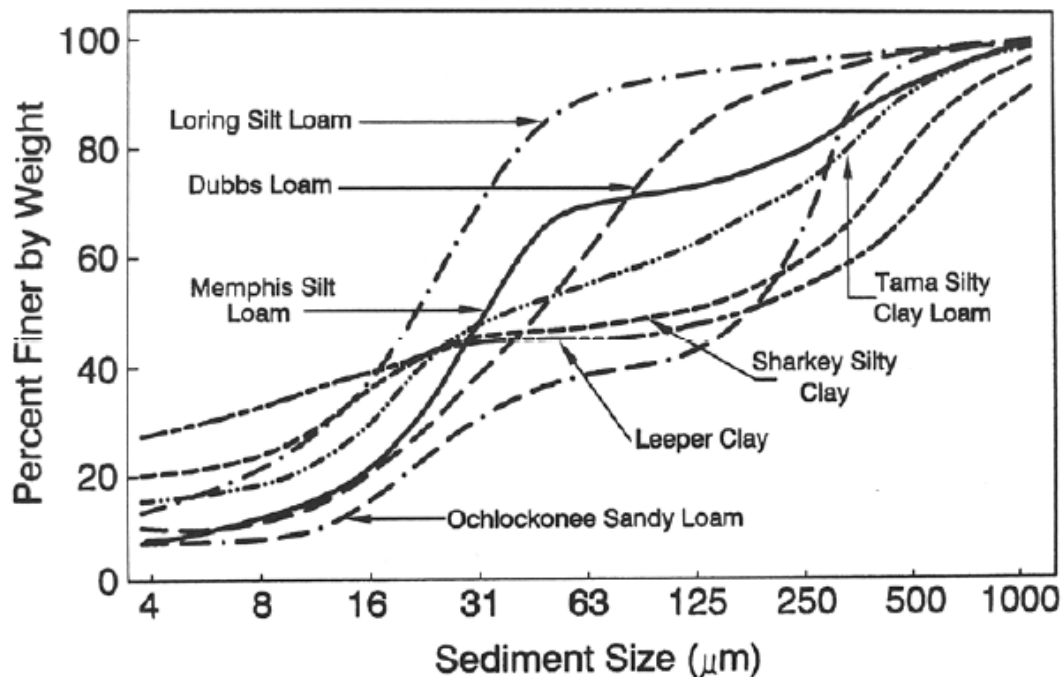
2.3.2 Αυλακωτή διάβρωση

Όταν η ροή συγκεντρώνεται σε αυλάκια, η ένταση που δημιουργείται στο έδαφος μπορεί να αποσπάσει εδαφικά σωματίδια. Με τον τρόπο αυτό, τα αυλάκια μπορούν να μεγαλώσουν, να εγκλωβίσουν μεγαλύτερη ροή, και εν τέλει να μεταμορφωθούν σε χαράδρες.

Μια σημαντική παράμετρος που ελέγχει την έναρξη και τη διατήρηση της μεταφοράς των φερτών υλικών είναι το μέγεθος των σωματιδίων. Λίγα είναι τα εδάφη που συμπεριφέρονται σαν μία χαλαρή συσσωμάτωση κόκκων, όπως η άμμος στην παραλία. Αντιθέτως, κόκκοι διαφορετικών μεγεθών σχηματίζουν μία μήτρα ή αλλιώς ένα καλούπι, που συγκρατείται από χημικούς και οργανικούς δεσμούς, ειδικά όταν το έδαφος έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο.

Ο Meyer, το 1985, χρησιμοποίησε προσομοιώματα βροχόπτωσης προκειμένου να αναλύσει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους των κόκκων της επιφάνειας του εδάφους και των διαβρωμένων φερτών που παράγονται από αυτό. Και για τους 17 τύπους εδάφους, τα διαβρωμένα υλικά έτειναν να είναι εμπλουτισμένα σε άργιλο, σε σύγκριση με το αρχικό

έδαφος. Λόγω της διαμόρφωσης του συνόλου των σωματιδίων, το 46% του βάρους των δύο αργιλικών εδαφών (κατά προσέγγιση) παρήγαγαν ένα σύνολο σωματιδίων σε μέγεθος άμμου (μεγαλύτερο από 0.062 mm). Αντίθετα μόνο το 18% του βάρους οκτώ δειγμάτων λασπώδους μάργας, παρήγαγαν κόκκους σε μέγεθος άμμου. Το μεγάλο μέγεθος των κόκκων των διαβρωμένων υλικών που προέρχονται από αργιλώδη εδάφη, σε σχέση με τα λασπώδη εδάφη, φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι λασπώδεις μάργες όχι μόνο παρήγαγαν τα μικρότερα σωματίδια από όλα τα εδάφη που δοκιμάστηκαν, αλλά ήταν και οι ευκολότερες να διαβρωθούν.



Σχήμα 2.2 Ταξινόμηση μεγέθους διαβρωμένων σωματιδίων. Φαίνεται ότι η συσσωμάτωση των κόκκων των συνεκτικών αργιλικών εδαφών τα κάνει να παράγουν πιο χονδρόκοκκα σωματίδια (μεγαλύτερα από 63 μm) απ' ό,τι τα λασπώδη εδάφη (Meyer,1985).

Αυτό το γενικό μοτίβο επιβεβαιώθηκε και από μεταγενέστερα εργαστηριακά πειράματα 21 εδαφών από όλη την έκταση των Η.Π.Α. (Rhoton and Meyer,1987). Από αυτά φάνηκε ότι απλές εργαστηριακές τεχνικές που πραγματοποιούνται για την διαστασιολόγηση των κόκκων δειγμάτων επιφανειακών εδαφών, μπορούν να παρέχουν μια καλή πρόβλεψη σχετικά με την ταξινόμηση του μεγέθους των κόκκων των διαβρωμένων υλικών.

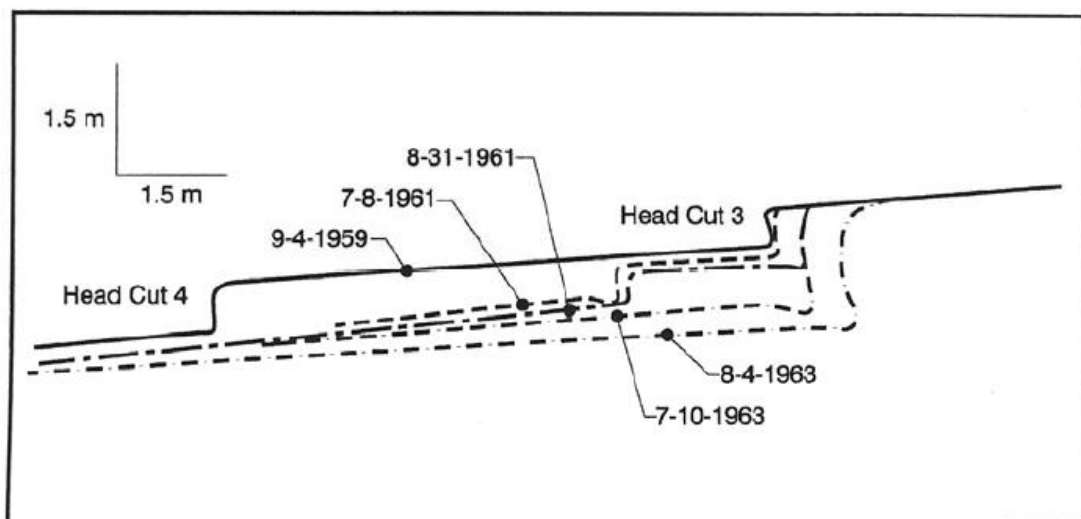
2.3.3 Χαραδρωτική διάβρωση

Μία χαράδρα είναι ένα διαβρωτικό κανάλι πολύ μεγάλο για να εξαλειφθεί με τις συνήθεις τεχνικές καλλιέργειας ή για να διασχισθεί από ένα τροχοφόρο όχημα. Οι ενεργές χαράδρες χαρακτηρίζονται από απότομες ή και σχεδόν κατακόρυφες πλαγιές, που έχουν τη μορφή γκρεμών. Αυτού του είδους η διάβρωση συμβαίνει όταν διαβρώσιμο έδαφος είναι

εκτεθειμένο σε συγκεντρωμένη απορροή, η οποία προέρχεται από βροχόπτωση ή λιώσιμο των πάγων. Αιτία δημιουργίας της μπορεί να είναι η μεγέθυνση ενός αυλακιού, όταν η ροή είναι συγκεντρωμένη λόγω μιας κατασκευής, όπως για παράδειγμα ένας δρόμος, ένα χαντάκι ή ένα αυλάκι αποστράγγισης ή ακόμα η αύξηση της απορροής, λόγω αλλαγής στη χρήση της ανάντη γης. Οι δρόμοι παρεμβάλλουν και συγκεντρώνουν τις κατερχόμενες ροές και συνεπώς, είναι οι πρωταρχικοί παράγοντες δημιουργίας χαράδρας. Ακόμα και τα οχήματα που δεν διέρχονται από τους δρόμους μπορούν να επιταχύνουν μία τέτοια μορφή διάβρωσης, αφού αφήνουν συνεχόμενα αποτυπώματα στο έδαφος. Αυτά με τη σειρά τους οδηγούν την επιφανειακή απορροή σε κανάλια κατά τη διάρκεια των καταιγίδων, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυλάκια και χαράδρες. Αν και οι χαράδρες συνδέονται με διαταραγμένες και ημι-άνυδρες περιοχές, συχνά εμφανίζονται και σε υγρές περιοχές, στην περίπτωση που απομακρύνεται η βλάστηση.

Το βύθισμα του νερού σε μία κοιλάδα με κατακόρυφο πρηνές δημιουργεί λιμνάζοντα ύδατα και διαβρώνει τον πόδα του πρηνούς. Το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση του πόδα και τη μετακίνησή του προς τα ανάντη, δημιουργώντας ένα μοτίβο διάβρωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6.

Περισσότερα σημεία απότομης αλλαγής της κλίσης (head cuts) μπορούν να προκαλέσουν επιπλέον διάβρωση του πυθμένα, με αποτέλεσμα την εκβάθυνσή του. Τα ύψη των πρηνών ποικίλλουν από μερικά εκατοστά ως και αρκετά μέτρα. Ωστόσο, κάποια στιγμή οι χαράδρες θα σταθεροποιηθούν, ενώ εκ νέου διάβρωση μπορεί να προκληθεί με την πτώση της στάθμης του πυθμένα. Τότε θα δημιουργηθούν νέα σημεία απότομης αλλαγής της κλίσης, με αποτέλεσμα να ξεκινήσει και η διαδικασία της παλινδρομικής διάβρωσης κατά μήκος του πυθμένα, εκβαθύνοντας και πλαταίνοντας την αρχική χαράδρα.



Εικόνα 2.6 Διαμήκης προφίλ ανάπτυξης χαράδρας (Heede,1975).

Οι χαράδρες μπορεί να είναι ασυνεχείς ή μπορεί να επεκτείνονται έως ότου δημιουργηθεί ένα δίκτυο συνεχών καναλιών και η ανάπτυξή τους μπορεί να είναι τακτική ή ακανόνιστη.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις και όχι μόνο, βγήκε το συμπέρασμα ότι η χαραδρωτική διάβρωση είναι μία διαδικασία αποτελούμενη από τα εξής δύο στάδια: α) την παραγωγή συντριμμίων και β) τη μεταφορά των φερτών υλικών.

Οι Schumm et al (1988) συμπέραναν πως όλες οι χαράδρες ακολουθούν την ίδια εξελικτική πορεία, καταλήγοντας σε μία ενδεχόμενη ανάπτυξη σχετικά σταθερών συνθηκών. Αποτύπωσαν, έτσι, την εξέλιξη των χαραδρών σε τέσσερα στάδια :

α) Στάδιο 1-Εκκίνηση. Το κανάλι σταδιακά τέμνει το έδαφος. Σε αυτό το στάδιο, τα μέτρα ελέγχου της διάβρωσης εφαρμόζονται αρκετά εύκολα.

β) Στάδιο 2-Δημιουργία κλίσεων και εκβάθυνση. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από μετακίνηση του μετώπου (σημείου απότομης αλλαγής της κλίσης) και της ρηχής λίμνης νερού, καθίζηση των πρηνών και εκβάθυνση των καναλιών, καθώς η χαράδρα διαβρώνει τα αδύναμα υλικά. Αυτό το στάδιο τελειώνει όταν το διαμήκες προφίλ σταθεροποιείται, λόγω ελέγχου της στάθμης του πυθμένα, και οι τιμές της διάβρωσης μειώνονται.

γ) Στάδιο 3-Αύξηση του πλάτους και “επούλωση”. Στο στάδιο αυτό, το πλάτος της κορυφής της χαράδρας αυξάνεται, τα πρηνή της μειώνονται λόγω της αποσάθρωσης και της απώλειας μάζας, ενώ λαμβάνει χώρα αναβλάστηση της περιοχής.

δ) Στάδιο 4-Σταθεροποίηση. Οι κλίση των πλαγιών, καθώς και η στάθμη του πυθμένα σταθεροποιούνται, ενώ τα εδάφη συσσωρεύονται και σχηματίζουν τραχιές επιφάνειες. Όταν τα πρηνή έχουν μία κλίση σχεδόν 45 μοιρών και έχουν αναπτύξει βλάστηση, η χαράδρα μπορεί να θεωρηθεί σταθεροποιημένη.

Αυτά τα τέσσερα στάδια μπορούν να εφαρμοστούν, τόσο σε ένα σύστημα χαράδρας, όσο και σε διαφορετικά σημεία μιας μόνο χαράδρας. Αναστροφή στις συνθήκες του σταδίου 2 και εκ νέου διάβρωση, μπορεί να συμβεί κατά τα στάδια 3 ή 4, λόγω καταβίβασμού της στάθμης του πυθμένα ή διατάραξης του συστήματος ανάντη.

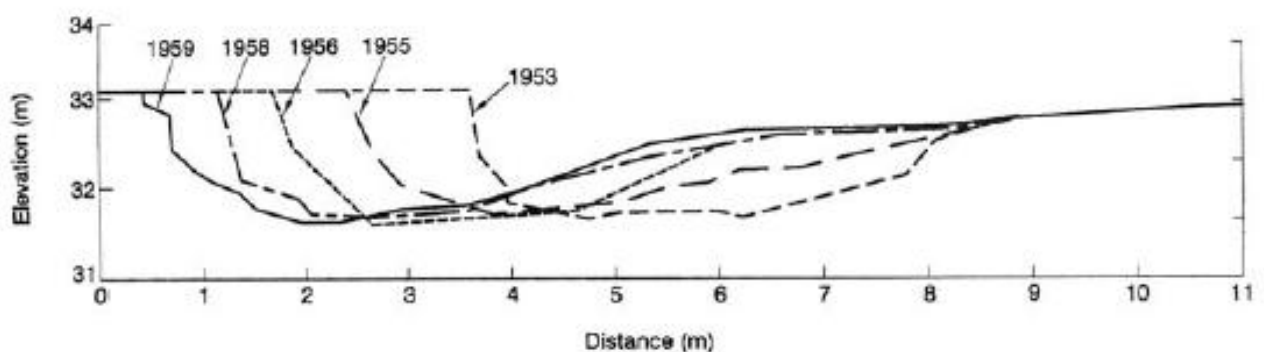
Η ανάπτυξη μια χαράδρας τείνει να είναι γρήγορη και άτακτη και τόσο ο ρυθμός ανάπτυξης, όσο και η διαμόρφωσή της, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το έδαφος και τις υδρολογικές συνθήκες. Δυστυχώς, δεν υπάρχει μία γενικευμένη μέθοδος πρόβλεψης των ρυθμών διαμόρφωσης και ανάπτυξης μιας χαράδρας. Οι εκτιμήσεις αυτές επομένως, θα πρέπει να βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου στην υπό εξέταση περιοχή. Ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας μια χρονοσειρά αεροφωτογραφιών για να καθοριστεί η τοπική έκταση και ανάπτυξη της χαράδρας. Παράλληλα, ο αριθμός των χαράδρων ανά μονάδα έκτασης, σε συνδυασμό με την αναγνώριση του εδάφους, χρειάζεται για να καθοριστεί το ύψος των πρηνών. Σε μεγαλύτερες περιοχές, η διάβρωση μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας τες ένα άθροισμα μικρότερων περιοχών.

Ο συνολικός όγκος των υλικών που διαβρώθηκαν από μια χαράδρα, επηρεάζεται από την ανάντη μετακίνηση των σημείων αλλαγής κλίσης, καθώς και από την αύξηση του πλάτους του πυθμένα της χαράδρας. Δε πρέπει να παραβλέπεται, ωστόσο, και ο ρυθμός προόδου των πρηνών. Κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά.

2.3.4 Διάβρωση καναλιού

Αυτό το είδος της διάβρωσης συμβαίνει κατά μήκος του πυθμένα του ταμιευτήρα και των όχθων των ρευμάτων. Οι όχθες που υφίστανται διάβρωση είναι συχνά σχεδόν κατακόρυφες με πρόσφατα εκτεθειμένες ρίζες, αφού η βλάστησή τους δε προσφέρει καμία προστασία όταν η διάβρωση πραγματοποιείται κάτω από την περιοχή αυτή. Η διάβρωση καναλιού σχετίζεται με τη φυσική διαδικασία της δημιουργίας μαιάνδρων(οφιοειδών καναλιών), καθώς και με την επιταχυνόμενη διάβρωση λόγω της τομής και της εκπλάτυνσης των καναλιών. Οι κατάντη επιπτώσεις του φαινομένου είναι αρκετά διακριτές.

Τα ποτάμια ρεύματα συνεχώς ελίσσονται, ξεπλύνοντας φερτά υλικά από την εξωτερική πλευρά του ελιγμού τους και επανατοποθετώντας ένα μέρος του φορτίου αυτού στα κατάντη, ενώ διατηρούν σταθερό πλάτος και διαμήκες προφίλ. Η Εικόνα 2.7 δείχνει πως το πλάτος και το βάθος τους παραμένουν πρακτικά σταθερά.



Εικόνα 2.7 Διαδικασία της μετανάστευσης των μαιάνδρων (Leopold et al,1964).

Η πλειονότητα των μέτρων προστασίας των όχθων παγκοσμίως, είναι προσανατολισμένη στην σταθεροποίηση τέτοιας μορφής ποταμών, ώστε να βελτιωθεί η πλοήγηση και να προστατευθούν ιδιοκτησίες και περιουσίες σε επιρρεπείς, σε διάβρωση, περιοχές. Η διαδικασία αυτή δίνει στα φυσικά ποτάμια ένα σταθερό χαρακτήρα, αφού ελέγχονται από μεγάλες κατασκευές, όπως χαντάκια και φράγματα.

Η υποβάθμιση μιας κοίτης προκαλεί διαπλάτυνση του καναλιού και καθιστά πιθανή την εξαγωγή μεγάλου όγκου φερτών υλικών. Αυτό οφείλεται στις υδραυλικές δυνάμεις που διαβρώνουν και μεταφέρουν φερτά, σε συνδυασμό με την αστοχία της κοίτης που ξεκινά

λόγω της διαπέρασης της ροής μέσα από αυτή. Η δημιουργία του καναλιού μπορεί να ξεκινήσει ή να επιταχυνθεί λόγω των εξής παραγόντων:

- Αυξημένες ροές αιχμής που προκαλούνται από αλλαγές στη χρήση της γης ανάντη.
- Βαθύτερη ροή λόγω κατασκευής αναχώματος.
- Μειωμένη προμήθεια υλικού κοίτης, λόγω εγκλωβισμού του σε ταμιευτήρες ανάντη.
- Μείωση της υδραυλικής τραχύτητας και αύξηση της κλίσης του καναλιού, λόγω ύπαρξης καναλιών στην όχθη.
- Απομάκρυνση βλάστησης της κοίτης και βλάβη των όχθων, λόγω κτηνοτροφίας.

Ο όγκος των φερτών υλικών που απομακρύνεται λόγω της διάβρωσης καναλιού μπορεί να υπολογιστεί μέσω της αλλαγής στη γεωμετρία του καναλιού σε βάθος χρόνου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να καταγραφεί μέσω αεροφωτογραφιών και μετρήσεων στο ύψος της όχθης, ή του προφίλ του ποταμού, και στο πλάτος τόσο του ενεργού καναλιού, όσο και της γειτονικής κοίτης. Οι τιμές της διάβρωσης μπορούν να μετρηθούν σε τόνους ανά χιλιόμετρο ανά έτος, ενώ μπορούν να πολλαπλασιαστούν με το συνολικό μήκος για να εκτιμηθεί η συνολική διάβρωση. Για να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος αυτό, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγάλες χρονικές περίοδοι, ομοίως και εκτάσεις, καθώς η διαδικασία αυτή ανταποκρίνεται στη παροδική και άτακτη φύση των υδρολογικών επεισοδίων. Εάν είναι διαθέσιμες αεροφωτογραφίες ή άλλα δεδομένα σε τακτά χρονικά διαστήματα, τότε η διάβρωση μπορεί να υπολογιστεί σε ετήσια βάση και να γραφικοποιηθεί σε συνάρτηση είτε της συνολικής απορροής, είτε της απορροής αιχμής.

2.3.5 Αστοχία κλίσης

Αντικείμενο μελέτης εδώ, είναι η αστοχία της κλίσης των πρηνών σαν πηγή φερτών υλικών στον ταμιευτήρα. Η αστοχία κλίσης περιλαμβάνει φαινόμενα κατολισθήσεων, βυθίσματος εδαφικών μαζών και ροής συντριμμίων. Τα επεισόδια αυτά μπορούν να παράγουν μεγάλο όγκο φερτών υλικών, ο οποίος όμως είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστεί, λόγω του άτακτου χαρακτήρα των επεισοδίων αυτών. Η συνεισφορά φερτών αυτού του είδους μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας αεροφωτογραφίες, προκειμένου να καθοριστεί η συχνότητα του φαινομένου και η περιοχή που επηρεάζεται από αυτό. Έντονες κατολισθήσεις σε μία περιοχή μπορούν να συσχετισθούν με τη διάρκεια και τη σφοδρότητα ιδιαίτερα έντονων βροχοπτώσεων.

2.3.6 Τιμή της διάβρωσης και μέθοδοι εκτίμησής της

Οι τιμές της διάβρωσης μετρούνται στην υπό εξέταση περιοχή αφενός για την παροχή των απαραίτητων δεδομένων για την κατασκευή και τη βαθμονόμηση των μοντέλων πρόβλεψης, καθώς και για τη δοκιμή της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών μέτρων ελέγχου του φαινομένου. Η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της διάβρωσης ακόμα, συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση των επιπτώσεών του από τα άμεσα ενδιαφερόμενα μέλη, όπως μηχανικοί, αγρότες και κάτοικοι.

Η τιμή της διάβρωσης εκφράζεται με τη μάζα του εδάφους που αποκολλάται στη μονάδα του χρόνου, με μονάδες μέτρησης t/km²/yr. Με άλλα λόγια, η διάβρωση εκφράζεται σε τιμές στερεοαπορροής. Μπορεί επίσης να εκφραστεί, ως ο ρυθμός απογύμνωσης της επιφάνειας της γης, μετρημένη σε εδαφικό βάθος στη μονάδα του χρόνου, με μονάδες μέτρησης mm/yr (χιλιοστά/έτος). Δώδεκα από τις 14 εκτιμήσεις του μέσου παγκόσμιου ρυθμού απογύμνωσης, που συνοψίστηκαν από τον Lal το 1994, ανήκαν στο εύρος 0.06-0.16 mm/yr.

Στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της γης, ο καθοριστικός παράγοντας της τιμής της διάβρωσης, είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι επιπτώσεις διαφόρων χρήσεων γης στις τιμές της εδαφικής διάβρωσης φαίνονται στον Πίνακα 2.5.

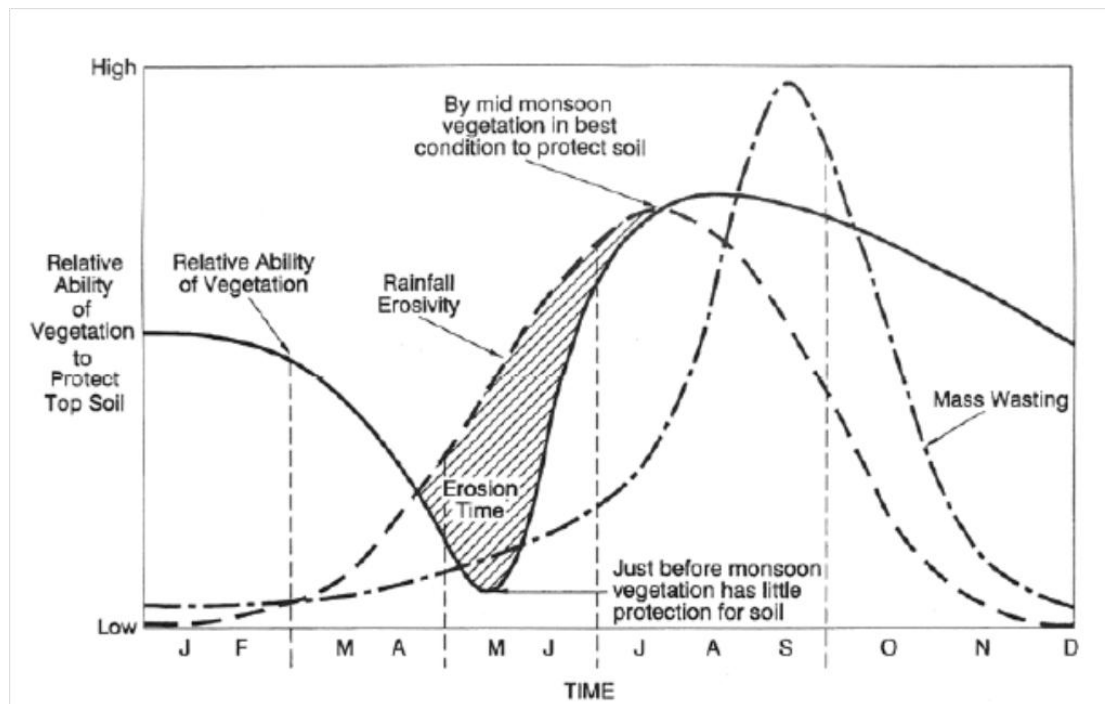
Πίνακας 2.5 Αντιπροσωπευτικές τιμές διάβρωσης από διάφορες περιοχές (Morris & Fan, 1998)

Χρήση γης	Τιμή διάβρωσης (t/km ² /yr)
Φυσικό δάσος	8
Βοσκοτόπια	84
Εγκαταλελειμμένα λατομεία	840
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	1 680
Δάση υπό εκμετάλλευση	4 200
Ενεργά λατομεία	16 800
Εργοτάξια	16 800

Αλλαγές στο είδος και την ένταση της χρήσης της γης επηρεάζουν τις μακροπρόθεσμες τιμές της διάβρωσης. Ο Trimble (1974) έδειξε ότι οι τιμές της διάβρωσης στην περιοχή Piedmont των νοτιοανατολικών Η.Π.Α., έφτασαν σε πολύ υψηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια περιόδων έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης το 19^ο και 20^ο αιώνα. Αντίθετα, από το 1930 και έπειτα, που υπήρξε εγκατάλειψη πολλών περιοχών και εφαρμογή μεθόδων διατήρησης του εδάφους σε άλλες, οι τιμές αυτές υποχώρησαν.

Μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις στις τιμές της διάβρωσης προκαλούνται από παράγοντες όπως, η αύξηση στην προμήθεια εύκολα διαβρώσιμων υλικών μετά από τις ξηρές περιόδους, αλλαγές στη φυτοκάλυψη του εδάφους, καθώς και εποχιακές διακυμάνσεις στη σφοδρότητα των βροχοπτώσεων. Η επιρροή της κάλυψης του εδάφους είναι ιδιαίτερα

εμφανής σε εποχιακώς ξηρά κλίματα, όπου η βλάστηση υπόκειται σε βόσκηση ή σε όργωμα πριν την εμφάνιση των βροχοπτώσεων. Η εποχικότητα της διάβρωσης, συγκεκριμένα για το Νεπάλ φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Εποχικότητα της διάβρωσης στο Νεπάλ (Morris & Fan,1998).

Είναι εμφανές πως το φαινόμενο της διάβρωσης λαμβάνει χώρα την περίοδο Μαΐου-Ιουνίου, ακριβώς πριν την εποχή των μουσώνων, όταν η διαβρωτικότητα της βροχής είναι εντονότερη από την προστατευτική δράση της βλάστησης. Παρατηρούνται επίσης υψηλές τιμές διάβρωσης κατά την έναρξη ισχυρών ανέμων, όταν η κάλυψη σε εκτάσεις που έχουν υποβληθεί σε υπερ-βόσκηση είναι περιορισμένη. Το επόμενο διάστημα, αναπτύσσεται η βλάστηση και η προμήθεια ευκόλως διαβρώσιμων φερτών εξαντλείται, με αποτέλεσμα οι τιμές να μειώνονται. Ωστόσο, η μεγαλύτερη υγρασία του εδάφους αυξάνει τις τιμές της αστοχίας της κλίσης.

Η εκτίμηση του όγκου των φερτών υλικών σε ένα ταμειυτήρα γίνεται ουσιαστικά με την εκτίμηση της τιμής της διάβρωσης σε αυτόν. Η εκτίμηση της διάβρωσης γίνεται με τους εξής τρόπους:

α) Με επιτόπου μετρήσεις της διάβρωσης

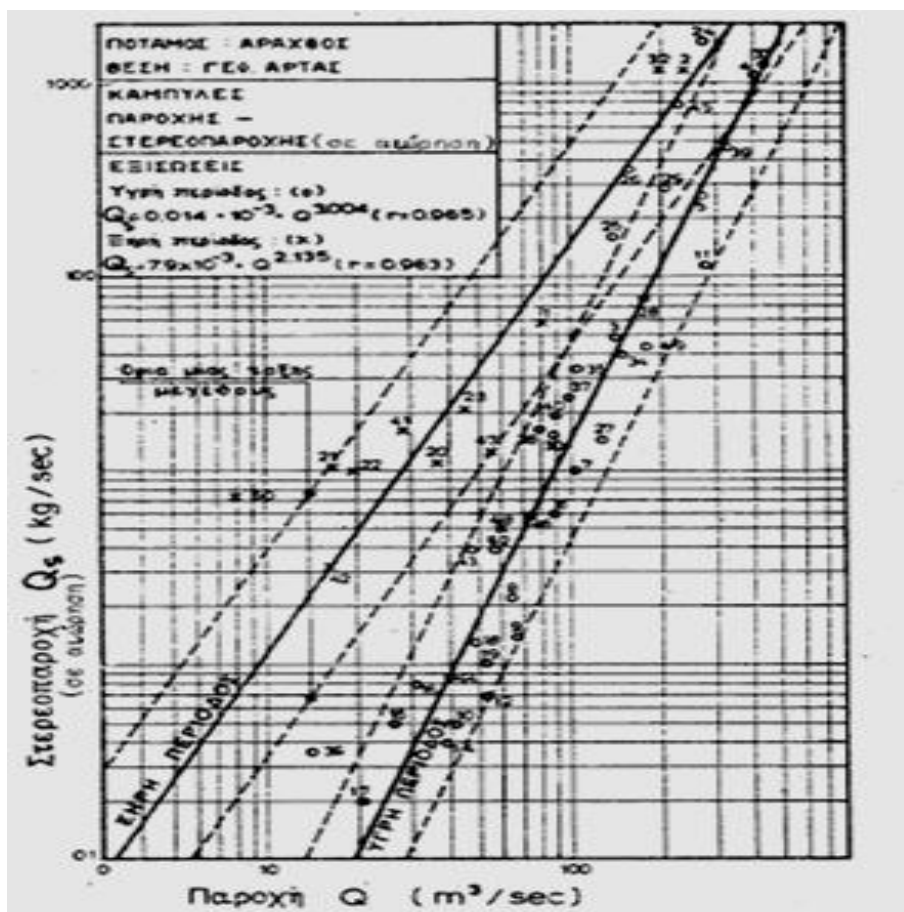
β) Με εμπειρικές και επαγωγικές μεθόδους, συνδέοντας την τιμή της διάβρωσης με υδρολογικά, γεωλογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας-U.S.L.E. (Universal Soil

Loss Equation), καθώς και η αναθεωρημένη μορφή της R.U.S.L.E. (Revised Universal Soil Loss Equation).

γ) Με εννοιολογικά μοντέλα, προσομοιώνοντας τη φυσική διαδικασία της διάβρωσης και λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διεργασίες της λεκάνης. Ενδεικτικά αναφέρονται τα μοντέλα EUROSEM, SEM, WEPP, SWAT.

Το ίδιο ακριβώς μέγεθος μπορεί να υπολογιστεί και από την εκτίμηση της στερεοαπορροής, αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η διάβρωση μετριέται σε όρους στερεοαπορροής. Η στερεοαπορροή μπορεί να εκτιμηθεί με τους εξής τρόπους:

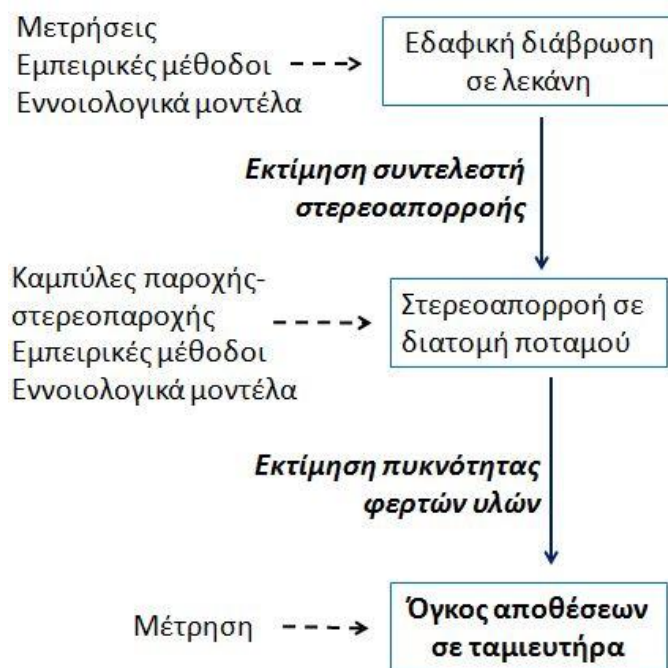
α) Με τη χρήση καμπυλών παροχής-στερεοπαροχής $Q-Q_s$ στη συγκεκριμένη θέση. Οι καμπύλες αυτές καταρτίζονται από συνδυασμό μετρήσεων σε μία συγκεκριμένη περιοχή και εκφράζονται με σχέσεις της μορφής $Q_s = a \times Q^b$, με a και b να αντιπροσωπεύουν σταθερές. Μία συστηματική μελέτη των παραμέτρων αυτών στη βορειοδυτική Ελλάδα (Μιμίκου, 1982), οδήγησε στο συμπέρασμα πως και οι δύο σταθερές είναι εποχιακά εξαρτώμενες, επηρεάζονται δηλαδή, από τη βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής και από ορισμένες τοπογραφικές παραμέτρους της. Για να καταπολεμηθεί το πρόβλημα της μεγάλης διασποράς των σημείων μιας τέτοιας καμπύλης, καταρτίστηκαν εποχιακές καμπύλες, που αφορούν είτε τη ξηρή, είτε την υγρή περίοδο. Ένα τέτοιο σύστημα εποχιακών καμπυλών που αφορά τον ποταμό Άραχθο, φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Καμπύλη Παροχής Q -Στερεοπαροχής Q_s για τον ποταμό Άραχθο (Κουτσογιάννης και Τάρλα,1987).

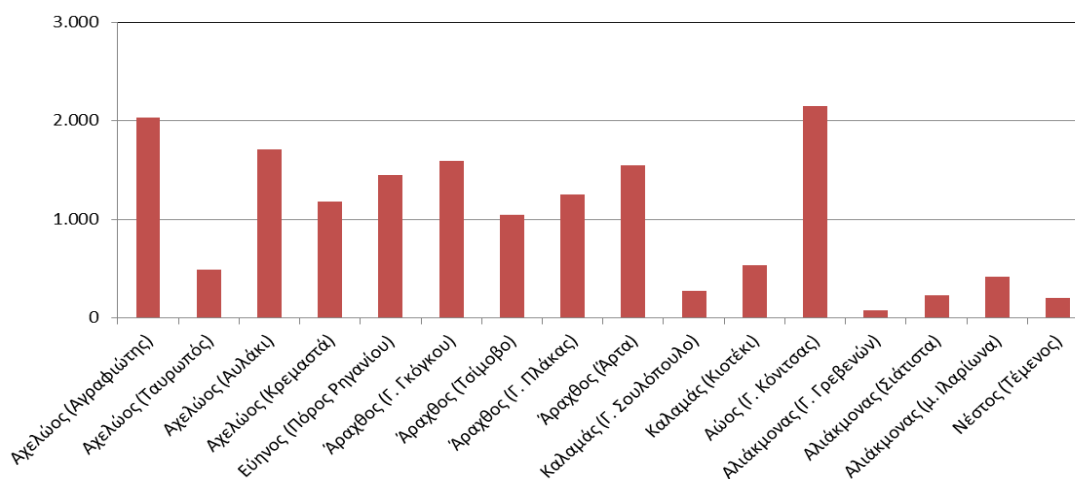
- β) Με τη χρήση του συντελεστή στερεοαπορροής SDR, γνωρίζοντας την εδαφική απώλεια.
- γ) Με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων.
- δ) Με τη χρήση εννοιολογικών μοντέλων.

Η διαδικασία που ακολουθείται γενικά, απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.8 Διαδικασία εκτίμησης του όγκου των αποθέσεων.

Στο Γράφημα 2.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές της στερεοαπορροής διάφορων ποταμών της Ελλάδας, όπως καταγράφηκαν από τους Ζαρρής κ.ά. (2001), ενώ στον Πίνακα 2.6 οι χαρακτηριστικές τιμές της στερεοαπορροής ανά τον κόσμο, όπως καταγράφηκαν από τους Walling and Webb (1996), μετά από συλλογή των αντίστοιχων βιβλιογραφικών στοιχείων.



Γράφημα 2.1 Μετρήσεις στερεοαπορροής t/km²/yr, στην Ελλάδα (Ζαρρής κ.ά.,2001).

Πίνακας 2.6 Μετρήσεις του αιωρούμενου φορτίου ανά τον κόσμο (Walling and Webb,1996).

Country	River	Drainage area (km ²)	Mean annual sediment yield (t km ⁻² year ⁻¹)	Source
China	Huangfuchuan	3 199	53 500	Yellow River Conservancy Commission (personal communication)
	Dali	187	21 700	Mou & Meng (1980)
China (Taiwan)	Erjenhsi	350	28 911	Hwang (1980)
	Tsengwen	1 000	28 000	Milliman & Meade (1983)
Kenya	Perkerra	1 310	19 520	Dunne (1975)
Java	Cilutung	600	12 000	Hardjowitjistro (1981)
	Cikeruh	250	11 200	Hardjowitjistro (1981)
New Guinea	Aure	4 360	11 126	Pickup <i>et al.</i> (1981)
North Island New Zealand	Waiapu	1 378	19 970	Griffiths (1982)
	Waingaromia	175	17 340	Griffiths (1982)
	Hikuwai	307	13 890	Griffiths (1982)
South Island New Zealand	Hokitika	352	17 070	Griffiths (1981)
	Cleddau	155	13 300	Griffiths (1981)
	Haast	1 020	12 736	Griffiths (1981)

2.3.7 Μοντέλα U.S.L.E. και R.U.S.L.E.

Η μοντελοποίηση της διάβρωσης είναι θεμελιώδους σημασίας στη διατήρηση των εδαφών. Αυτό συμβαίνει διότι επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών μεθόδων σε διαφορετικούς τύπους εδαφών, με σκοπό τον καθορισμό της αποτελεσματικότητάς τους στην πρόβλεψη της απώλειας του εδάφους. Ειδικά όταν συμπεριλαμβάνονται και οικονομικά δεδομένα του κόστους της κάθε μεθόδου, είναι δυνατή η αναγνώριση του πιο οικονομικού και αποδοτικού τρόπου ελέγχου της διάβρωσης. Το κλειδί της διαδικασίας είναι η προέκταση των τιμών της διάβρωσης που μετρήθηκαν σε επιλεγμένα μέρη και τοποθεσίες, σε ευρύτερες περιοχές. Οι επιπτώσεις σε μεγαλύτερα τοπία εκτιμώνται ως άθροισμα των τιμών της διάβρωσης σε μικρότερα, με την προσαρμογή της απαραίτητης αναλογίας.

Η έρευνα σχετικά με την εδαφική διάβρωση και τις επιπτώσεις της στη γεωργική παραγωγικότητα ξεκίνησε τη δεκαετία του '30. Κατά τη διάρκεια του 1940 και του 1950, η επιστημονική κοινότητα ξεκίνησε την ανάπτυξη μιας ποσοτικής διαδικασίας εκτίμησης της εδαφικής απώλειας στο Corn Belt των Η.Π.Α.. Πολλοί παράγοντες εισήχθησαν σε μία πρώιμη εξίσωση εδαφικής απώλειας, στην οποία λαμβάνονταν κυρίως υπόψη η κλίση του εδάφους. Τότε αναγνωρίστηκε η μεγάλη σημασία που θα είχε μία εξίσωση εδαφικής απώλειας στο γεωργικό σχεδιασμό και έτσι η εξίσωση Corn Belt βρήκε εφαρμογή και σε άλλες περιοχές. Το 1946, μία ομάδα ειδικών στη διάβρωση οργάνωσε ένα εργαστήριο στο Ohio, με σκοπό την επαναξιολόγηση των παραγόντων που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε.

Αποτέλεσμα ήταν η πρόσθεση ενός συντελεστή βροχόπτωσης στην αρχική εξίσωση. Το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α., με την Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας (Agricultural Research Service–ARS) καθιέρωσε το Κέντρο Δεδομένων Εθνικής Βροχόπτωσης και Εδαφικής Απώλειας στο πανεπιστήμιο Purdue το 1954, ώστε να εντοπίσει και να συναθροίσει όλα τα διαθέσιμα δεδομένα σε όλη την έκταση των Η.Π.Α.. Δεδομένα βάθους χρόνου μεγαλύτερο των δέκα ετών συλλέχθηκαν από συνολικά 49 τοποθεσίες.

Βασισμένοι σε αυτά τα δεδομένα και σε παλαιότερες μελέτες ο Wischmeier, ο Smith και άλλοι ανέπτυξαν την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας. Έχοντας την παγκόσμια αποδοχή, η U.S.L.E. είναι το βασικό εργαλείο σχεδιασμού που χρησιμοποιείται, όχι μόνο στις Η.Π.Α., αλλά και σε άλλες χώρες του κόσμου.

Έχοντας επιπρόσθετες έρευνες, δεδομένα και πειράματα, οι επιστήμονες δε σταματούν να βελτιώνουν την εξίσωση, οδηγώντας έτσι στην Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (R.U.S.L.E.) το 1997. Αυτή έχει την ίδια βάση με την προηγούμενη, μόνο που έχει επιδεχθεί αλλαγές σε καθοριστικούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν ανανεωμένους χάρτες διάβρωσης, μία χρονοεξαρτούμενη προσέγγιση του συντελεστή διαβρωσιμότητας, μία νέα εξίσωση που προσεγγίζει το μήκος της κλίσης κλπ. Η έκφραση της R.U.S.L.E. δίνεται με τη Σχέση 2.4 :

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.4)$$

με

- A: η μέση εκτιμώμενη ποσότητα εδαφικής απώλειας σε τόνους/στρέμμα/έτος (t/acre/yr).
- R: ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (rain-off erosivity factor), σε $MJ \times mm \times ha^{-1} \times h^{-1}$. Εξαρτάται από την ένταση και τη χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων. Αρχικά, εκτιμάται για κάθε επεισόδιο βροχής (απαιτούνται βροχογραφικά δεδομένα μεγάλου μήκους), ενώ ο ετήσιος συντελεστής προκύπτει ως το άθροισμα των συντελεστών των επιμέρους επεισοδίων βροχής κατά τη διάρκεια του έτους. Αν δεν διατίθενται δεδομένα βροχογράφου, χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που τον συσχετίζουν με τη βροχόπτωση σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες (ημερήσια, μηνιαία).
- K: ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (soil erodibility factor), σε $t \times h \times MJ^{-1} \times mm^{-1}$. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η δομή, η κοκκομετρία, η διαπερατότητα και το ποσοστό οργανικών υλικών που περιέχει.
- L: ο συντελεστής μήκους κλίσης (slope length factor), ο οποίος είναι αδιάστατος.
- S: ο συντελεστής έντασης κλίσης (slope steepness factor), ο οποίος είναι επίσης αδιάστατος. Αυτός, όπως και ο προηγούμενος συντελεστής, από κοινού αποτυπώνουν την επίδραση της γεωμορφολογίας και του ανάγλυφου του εδάφους και αναφέρονται και ως τοπογραφικοί συντελεστές.
- C: ο συντελεστής διαχείρισης-κάλυψης γης (cover-management factor), ο οποίος είναι αδιάστατος και λαμβάνει τιμές 0-1. Εκφράζει την επίδραση των καλλιεργειών και των σχετικών διαχειριστικών πρακτικών στο ρυθμό παραγωγής της εδαφικής

απώλειας. Οι τιμές του προκύπτουν μέσω μιας πολλαπλασιαστικής σχέσης πέντε άλλων αδιάστατων συντελεστών: πρότερης χρήσης γης (prior land use), φυτοκάλυψης (canopy cover), επιφανειακής κάλυψης (surface cover), εδαφικής τραχύτητας (surface roughness) και εδαφικής υγρασίας (soil moisture), οι οποίες επίσης κυμαίνονται από 0 έως 1.

- P: ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης (support practice factor), ο οποίος είναι επίσης αδιάστατος, εξάγεται από πίνακα, με εύρος και πάλι 0-1. Αυτός εκφράζει την επίδραση των καλλιεργητικών πρακτικών στην απομείωση της διάβρωσης. Τέτοιες πρακτικές είναι η καλλιέργεια παράλληλα με τις ισοϋψείς (0.6-0.9), οι λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών (0.3-0.45) και η χρήση αναβαθμών και μικρών αναχωμάτων, κάθετων στην κλίση του εδάφους (0.12-0.18).

Ένας άλλος παράγοντας των εδαφών ονομάζεται "ανεκτή απώλεια εδάφους" (tolerable soil loss) και συμβολίζεται με T. Δε χρησιμοποιείται άμεσα στη R.U.S.L.E., αλλά συνήθως παράλληλα με αυτή για το σχεδιασμό της διατήρησης του εδάφους. Η ανεκτή απώλεια εδάφους είναι η μέγιστη τιμή εδαφικής απώλειας σε τόνους ανά στρέμμα ανά έτος, που μπορεί να γίνει ανεκτή και παράλληλα να επιτρέπει, από οικονομική άποψη, ένα υψηλό επίπεδο παραγωγικότητας των καλλιεργειών.

2.3.8 Συντελεστής στερεοαπορροής

Τα μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω καθορίζουν τις τιμές της διάβρωσης σε μικρές περιοχές, αλλά αδυνατούν να υπολογίσουν τη συνολική ποσότητα του διαβρωμένου υλικού που όντως μεταφέρεται κατάντη. Ο συντελεστής στερεοαπορροής εκφράζει το λόγο των φερτών υλικών που μεταφέρθηκαν μέσω της επιφανειακής απορροής (στερεοαπορροή), προς αυτές που αποκολλήθηκαν από το έδαφος (εδαφική απώλεια). Εκφράζεται είτε σε δεκαδική μορφή είτε σε μορφή ποσοστού, ενώ οι τιμές του μπορούν να κυμαίνονται από ένα μικρό ποσοστό έως και σε 100% (Boyce, 1975). Γενικά, μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται σε μικρές κοίτες με πιο απότομες κλίσεις και περισσότερο λεπτόκοκκα υλικά.

Ο συντελεστής στερεοαπορροής δε μπορεί να μετρηθεί απευθείας, από τη στιγμή που η συνολική διάβρωση δε μπορεί να μετρηθεί απευθείας. Είναι στην ουσία λοιπόν, η αναλογία της στερεοαπορροής και της εκτιμώμενης διάβρωσης που προκύπτει από την R.U.S.L.E. ή κάποιο άλλο μοντέλο εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης. Τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες της μονάδας (ή του 100%) δείχνουν τη δυστοκία των μοντέλων πρόβλεψης να υπολογίσουν το συνολικό ποσό της διάβρωσης ανάντη του σημείου μέτρησης της στερεοαπορροής.

Ο καθορισμός του συντελεστή αυτού αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα στη μετατροπή των εκτιμήσεων της εδαφικής διάβρωσης μιας λεκάνης σε μία ποσοτικοποιημένη τιμή της στερεοαπορροής. Η εκτίμησή της είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε μεταβολές του συντελεστή, όπως φάνηκε από την έρευνα του Walling (1994). Αυτός χρησιμοποίησε δεδομένα από έξι κοίτες στη Νιγηρία, το Μάλι, και την Αλγερία. Οι τιμές της διάβρωσης κυμαίνονταν από 100 έως 1 500 t/km²/yr, ενώ οι μετρημένες τιμές της στερεοαπορροής κυμαίνονται γύρω στους

211 t/km²/yr, με μέγιστη τιμή τα 483 t/km²/yr. Ο συντελεστής στερεοαπορροής στις λεκάνες αυτές ήταν περίπου 10%, ενώ απόκλιση 1% σε αυτόν θα είχε τέτοια επίπτωση στην εκτίμηση του μεγέθους, όσο ένα λάθος 10% στην εκτίμηση της διάβρωσης.

Έξι βασικοί παράγοντες επηρεάζουν το μακροπρόθεσμο συντελεστή στερεοαπορροής σε μία λεκάνη, όπως περιγράφονται παρακάτω από τον Renfro (1975).

- α) Διαδικασία διάβρωσης. Ο συντελεστής θα είναι γενικά μεγαλύτερος όταν αναφέρεται σε φερτά υλικά που παράχθηκαν από διάβρωση καναλιού, η οποία τα διανέμει στα κύρια κανάλια του μεταφορικού συστήματος γρηγορότερα και πιο άμεσα, απ' ό,τι, για παράδειγμα, η επιφανειακή διάβρωση.
- β) Εγγύτητα στην έξοδο της λεκάνης. Η στερεοαπορροή επηρεάζεται από τη γεωγραφική διανομή των πηγών των φερτών υλικών μέσα στη λεκάνη και από τη σχέση τους με τις περιοχές απόθεσης. Τα φερτά από μία περιοχή κοντά στην έξοδο της λεκάνης είναι πιο πιθανό να εξαχθούν σε σχέση με αυτά από μια πιο μακρινή περιοχή. Αυτό συμβαίνει διότι τα τελευταία έχουν περισσότερες ευκαιρίες επανα-απόθεσης προτού φτάσουν την έξοδο.
- γ) Αποτελεσματικότητα αποστράγγισης. Ένα σύστημα καναλιών με μεγάλη πυκνότητα θα είναι πιο αποδοτικό στο να παροχετεύσει τα φερτά υλικά, σε σχέση με λεκάνες με μικρή πυκνότητα καναλιών, που χαρακτηρίζονται από μαιάνδρους μικρής κλίσης ή κανάλια που έχουν φραχθεί με συντρίμια. Συστήματα αποστράγγισης από σκυρόδεμα έχουν συντελεστή στερεοαπορροής κοντά στο 100%, εκτός κι αν περιλαμβάνουν και κατασκευές εγκλωβισμού των φερτών όπως για παράδειγμα, λεκάνες κατακράτησης φερτών.
- δ) Χαρακτηριστικά εδάφους και φυτοκάλυψης. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια τείνουν να μεταφέρονται με μεγαλύτερη ευκολία από τα χονδρόκοκκα, με αποτέλεσμα τα εδάφη με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αυτά να έχουν μεγαλύτερο συντελεστή στερεοαπορροής. Λόγω της δομής των υλικών, η ιλύς τείνει να είναι περισσότερο διαβρώσιμη από την άργιλο και συνεπώς οδηγεί σε μεγαλύτερο συντελεστή στερεοαπορροής.
- ε) Χαρακτηριστικά περιοχών απόθεσης. Η παρουσία περιοχών απόθεσης όπως λίμνες, ταμιευτήρες, και κοίτες θα μειώσει το συντελεστή. Το μεγαλύτερο μέρος των διαβρωμένων υλικών από μεγάλες λεκάνες θα επανα-αποτεθεί στη βάση των πλαγιών, κάτω από χαράδρες, σε κανάλια ή στις κοίτες. Οι Wilkins and Hebei (1982) υποστήριξαν ότι οι μη καλλιεργημένες περιοχές φυσικής βλάστησης, συνήθως προσφέρονται ως παγίδες φερτών με μεγάλη αποτελεσματικότητα. Αντιθέτως οι στενές, απότομες και ορεινές κοιλάδες με απότομες πλαγιές δεν παρέχουν πολλές ευκαιρίες για επανα-απόθεση των υλικών. Έτσι ο συντελεστής για τα λεπτόκοκκα υλικά, αφού αυτά εισαχθούν στο κανάλι, πλησιάζει τη μονάδα.

στ) Μέγεθος και κλίση λεκάνης. Μία μεγάλη λεκάνη με ομαλή κλίση θα έχει μικρότερο συντελεστή στεροαπορροής, σε σχέση με μία μικρότερη, με πιο απότομη κλίση, λεκάνη. Από μία εκτίμηση σε 252 τοποθεσίες της λεκάνης Anacostia, νότια της Washington D.C., οι Coleman and Scatena το 1986 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, ενώ η διάβρωση ελέγχεται μέσω της χρήσης της γης, η μεταφορά των φερτών από τις περιοχές διάβρωσης στα κανάλια ελέγχεται μέσω της τοπογραφίας και της ρυθμιστικής βλάστησης.

Ο συντελεστής στεροαπορροής μπορεί να εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις, τόσο σε μεγάλα όσο και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Μακροπρόθεσμες αλλαγές του αναμένονται ως αποτέλεσμα της αλλαγής στη χρήση της γης και της κατασκευής και λειτουργίας ανάντη ταμιευτήρων. Όσο ο ταμιευτήρας παγιδεύει φερτά υλικά, τόσο η κατάντη στεροαπορροή και συνεπώς και ο συντελεστής της, θα είναι μειωμένοι. Ωστόσο, όταν η λειτουργία του ταμιευτήρα αλλάξει για να απελευθερώσει φερτά, ή όσο η χωρητικότητά του μειώνεται λόγω της συσσώρευσης των φερτών, ο συντελεστής κατάντη θα αυξάνεται.

Μεγάλη διακύμανση εμφανίζεται και ανάμεσα στα διαφορετικά επεισόδια της ίδιας περιοχής, ακόμα κι αν είναι μικρή. Αυτό σημείωσαν οι Piest et al (1975b) μελετώντας δεδομένα επτά χρόνων δύο κοίτων της Iowa, έκτασης περίπου 30 εκταρίων. Η μέση ετήσια τιμή του συντελεστή στεροαπορροής κυμάνθηκε από 4% έως 67% στη μία και από 6% έως 61% στην άλλη.

Σε ορισμένες φυσιογραφικές περιοχές, μπορεί να αναπτυχθεί μία σχέση μεταξύ του συντελεστή στεροαπορροής και της έκτασης της λεκάνης, η οποία αναπαριστάται ως μια ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα. Για παράδειγμα, ο Renfro (1975) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της περιοχής Blackland Prairie του Texas, παρήγαγε την Εξίσωση 2.5 υπολογισμού του συντελεστή στεροαπορροής, για περιοχές έκτασης από ένα έως 250 km².

$$SDR = 62.1 \times (\text{area})^{-0.1419} \quad (2.5)$$

Ωστόσο, τέτοιες σχέσεις δε λαμβάνουν υπόψη τοπογραφικές, γεωλογικές, κλιματικές διαφορές, τον παράγοντα της χρήσης της γης, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής, τα οποία έχουν επιρροή πάνω του. Επομένως, απαιτείται προσοχή στην εφαρμογή σχέσεων σε περιοχές με έντονες διαφορές από αυτές, στις οποίες αυτές βασίστηκαν.

2.3.9 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση

Η διάβρωση ποικίλει ανάλογα με τις κλιματικές, γεωλογικές, τοπογραφικές και ανθρώπινες συνθήκες (White,2001). Οι παράγοντες που την επηρεάζουν άμεσα είναι οι εξής:

α) Κλίμα και βροχόπτωση. Η τιμή της διάβρωσης εξαρτάται από τη διαβρωτική δύναμη της βροχής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη σφοδρότητα, το μέγεθος των σταγόνων και τη συνολική ποσότητά της. Μεγάλη σφοδρότητα με μικρή διάρκεια βροχής

προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση, από ότι μεγάλη διάρκεια βροχής με μικρή σφοδρότητα. Ο Πίνακας 2.7 συγκεντρώνει στοιχεία από 183 επεισόδια, στο χρονικό διάστημα 1934-1942, τα οποία προκάλεσαν διάβρωση στη πόλη Zanesville του Ohio. Εκεί είναι ολοφάνερη η επίδραση της σφοδρότητας, αφού η μέση εδαφική απώλεια ανά επεισόδιο βροχής αυξάνεται με την ένταση της βροχής (Fournier,1972 reported by Morgan and Davidson,1986).

Οι εποχιακές μεταβολές στις τιμές της διάβρωσης εξαρτώνται προφανώς και από τις προγενέστερες μετεωρολογικές συνθήκες. Τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους και κατά συνέπεια, η δυνατότητα διείσδυσης σε αυτό, εξαρτώνται από τις προηγούμενες βροχοπτώσεις. Με τον τρόπο αυτό, θα επηρεαστεί η ποσότητα της απορροής και με τη σειρά της και η διάβρωση (Morgan and Davidson,1986).

Πίνακας 2.7 Σχέση μεταξύ της σφοδρότητας της βροχόπτωσης και της εδαφικής απώλειας (White,2001).

Μέγιστη ένταση ανά βροχόπτωση (mm/h)	Μέση εδαφική διάβρωση (kg/m ²)
0-25.4	0.37
25.5-50.8	0.6
50.9-76.2	1.18
76.3-101.6	1.14
101.7-127.0	3.42
127.1-152.4	3.63
152.5-177.8	3.87
177.9-254.0	4.79

Η σχέση μεταξύ της στερεοαπορροής και του μεγέθους της βροχόπτωσης έχει γίνει αντικείμενο μελέτης επί πολλά χρόνια. Παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι η μέγιστη στερεοαπορροή προκύπτει από μέση ετήσια βροχόπτωση μεγέθους περίπου 300 mm. Μεγαλύτερες τιμές βροχόπτωσης προκαλούν σημαντική αύξηση της βλάστησης, η οποία προστατεύει στην εδαφική επιφάνεια. Αντίθετα, σε ξηρές περιοχές, δεν υπάρχει αρκετή βροχόπτωση για να μετακινήσει το εδαφικό υλικό. Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συμβολή της βροχόπτωσης στη διάβρωση είναι οι εξής:

- i) Απορροή. Αποτέλεσμα ενός ακραίου γεγονότος βροχόπτωσης, είναι η ύπαρξη μιας μεγάλης ποσότητας νερού, διαθέσιμης να μεταφέρει τα προϊόντα της διάβρωσης.

Προφανώς, παράγοντες που ενισχύουν τη διήθηση του νερού στο έδαφος μειώνουν την απορροή, και κατά συνέπεια και την ποσότητα της διάβρωσης. Μικρές τιμές απορροής υποδεικνύουν ξηρασία, και αυτή με τη σειρά της φτωχή φυτοκάλυψη, σε σχέση με μεγάλες τιμές απορροής, που υποδεικνύουν πλεόνασμα νερού, άρα και πυκνή βλάστηση.

- ii) Θερμοκρασία. Η θερμοκρασία θα επηρεάσει την ανάπτυξη της βλάστησης, καθώς και τις τιμές της εξατμισοδιαπνοής. Στις περιοχές όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει εντονότερος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής και κατά συνέπεια απαιτείται εντονότερη βροχόπτωση για να υπάρξει διάβρωση. Υψηλές θερμοκρασίες επίσης προκαλούν πιο έντονο ρυθμό ανάπτυξης της βλάστησης, με τον οποίο θα μειωθεί ο ρυθμός απορροής και συνεπώς και διάβρωσης. Η σημασία της θερμοκρασίας εξαρτάται από την ποσότητα της βροχόπτωσης. Σε περιοχές με μεγάλη βροχόπτωση, η σημασία της θερμοκρασίας δεν είναι και τόσο μεγάλη.
- iii) Ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζει την κίνηση των εδαφικών σωματιδίων. Σε περιοχές με μεγάλες ταχύτητες ανέμου και έλλειψη προστατευτικής βλάστησης, είναι πιο πιθανή η εμφάνιση έντονης διάβρωσης. Αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό σε άνυδρες ή ήμι-άνυδρες περιοχές, αφού ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει τα υλικά από τις κορυφογραμμές στις κοιλάδες, απ' όπου αυτά μπορούν να μετακινηθούν με την απορροή.

β) Γεωλογία

- i) Είδος των πετρωμάτων. Η γεωλογία της περιοχής έχει έντονη επίδραση στο ρυθμό της διάβρωσης, καθώς καθορίζει την ευαισθησία των πετρωμάτων στη δράση των διαβρωτικών δυνάμεων. Στον Πίνακα 2.8 παριστάνονται οι τιμές της εδαφικής απώλειας, για διάφορους τύπους πετρωμάτων. Είναι φανερό πως, υπό τις ίδιες κλιματικές συνθήκες, η γεωλογία μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις έως και μίας τάξης μεγέθους (Dedkov and Moszherin,1992).

Πίνακας 2.8 Επίδραση της γεωλογίας στις τιμές της διάβρωσης (Jolly,1982).

Λιθολογία	Απώλεια φερτών: Utah ($m^3/km^2/yr$)	Απώλεια φερτών: New Mexico ($m^3/km^2/yr$)
Ανθεκτική: Κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθος και ανθεκτικός ψαμμίτης	143	95-143
Μέση: Σαθρός ψαμμίτης	571	523
Μαλακή: Σχιστόλιθος και γύψος	1237	761

- ii) Ηφαιστειακή και τεκτονική δραστηριότητα. Πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα επηρεάζει την ένταση της διάβρωσης, ειδικά σε ορεινές περιοχές. Για αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας κατά μία μονάδα, μπορούν να παρουσιαστούν έως και διπλάσιες τιμές διάβρωσης (Dedkov and Mozherin,1992). Αυξημένες τιμές παρατηρούνται επίσης σε περιοχές νέων βουνών, όπως για παράδειγμα τα Ιμαλάια ή η Νέα Ζηλανδία.

γ) Εδάφη

Τα εδάφη σε άνυδρα ή ημι-άνυδρα περιβάλλοντα με αραιή φυτοκάλυψη είναι πολύ διαφορετικά, από αυτά σε πιο υγρές περιοχές. Τα βασικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις τιμές της διάβρωσης είναι η υφή, η δομή, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η διατμητική αντοχή και η ικανότητα διήθησης.

- i) Υφή. Η υφή περιγράφει το μέγεθος και την αναλογία των σωματιδίων που συνθέτουν το έδαφος. Εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο είναι τραχιά, με μεγάλο ρυθμό διήθησης, μικρή απορροή και σχετικά μικρή δυνατότητα διάβρωσης. Εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο από την άλλη, είναι πιο λεπτόκοκκα, ενώ η άργιλος “δένει” καλύτερα τα σωματίδια και κάνει το έδαφος να αντιστέκεται στη διάβρωση. Περισσότερο διαβρώσιμα είναι τα εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκη άμμο και ιλύ και μικρή περιεκτικότητα σε άργιλο και οργανική ύλη. Αντίθετα, λιγότερο διαβρώσιμα είναι τα καλά στραγγιζόμενα, αμμώδη και βραχώδη εδάφη, καθώς τα μεγάλα σωματίδια απαιτούν και μεγάλες δυνάμεις για να τα μετακινήσουν (Goldman et al,1986).
- ii) Δομή του εδάφους. Η δομή περιγράφει ουσιαστικά τη διάταξη των σωματιδίων σε συσσωματώματα. Η ιδιότητα αυτή επηρεάζει την ικανότητα του εδάφους να απορροφά νερό. Όταν η επιφάνεια του εδάφους είναι συμπαγής ή έχει σχηματίσει ένα προστατευτικό στρώμα, το νερό τείνει να απορρέει και όχι να διηθείται. Η κοκκώδης δομή είναι η πιο επιθυμητή, καθώς ενθαρρύνει την απορρόφηση και συγκράτηση του νερού και συνεπώς την ανάπτυξη της βλάστησης, με αποτέλεσμα να μειώνει την απορροή, άρα και την διάβρωση (Goldman et al,1986).
- iii) Περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Η οργανική ύλη στο έδαφος βελτιώνει τη δομή του και αυξάνει την διαπερατότητά του. Συνεπώς, αυξάνεται, τόσο η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό, όσο και η γονιμότητά του (Goldman et al,1986). Η περιεκτικότητα σε άργιλο μπορεί να είναι μία ένδειξη της διαβρωσιμότητας, καθώς αυτή συνδυάζεται με την οργανική ύλη και διαμορφώνει συσσωματώματα. Η σταθερότητα αυτών των συσσωματωμάτων καθορίζει και την αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση. Εδάφη με περιεκτικότητα σε οργανική ύλη μικρότερη του 3.5% θεωρούνται ιδιαίτερα διαβρώσιμα.
- iv) Διατμητική αντοχή. Η διατμητική αντοχή αποτελεί ένα μέτρο μέτρησης της συνεκτικότητας του εδάφους και της αντίστασής του στις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται από τη βαρύτητα, τα κινούμενα υγρά και τα μηχανικά φορτία. Η αντοχή

του εδάφους πηγάζει από τις αντιστάσεις τριβής που αναπτύσσονται, όταν τα σωματίδια αναγκάζονται να ολισθήσουν μεταξύ τους ή να μετακινηθούν έξω από τις θέσεις σύμπλεξής τους. Όσο μεγαλύτερη διατμητική αντοχή έχει ένα έδαφος, τόσο περισσότερο αντιστέκεται στη διάβρωση (Morgan and Davidson,1986).

- v) Ρυθμός διήθησης και διαπερατότητα. Η ικανότητα διήθησης εκφράζει το μέγιστο βαθμό στον οποίο το έδαφος μπορεί να απορροφήσει νερό και επηρεάζεται από το μέγεθος των πόρων, τη σταθερότητά τους και τη μορφή του εδαφικού προφίλ. Τα εδάφη με σταθερά συσσωματώματα διατηρούν τα κενά των πόρων καλύτερα, ενώ εδάφη με άργιλο ή ορυκτά ασταθή στο νερό, τείνουν να έχουν μικρή ικανότητα διήθησης. Η υφή, η δομή και τα οργανικά υλικά συνεισφέρουν στη διαπερατότητα ενός εδάφους. Μεγάλες τιμές διάβρωσης παρατηρούνται εκεί που οι τιμές διήθησης είναι μικρές, με αποτέλεσμα να παράγεται μεγάλος όγκος απορροής.

δ) Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής

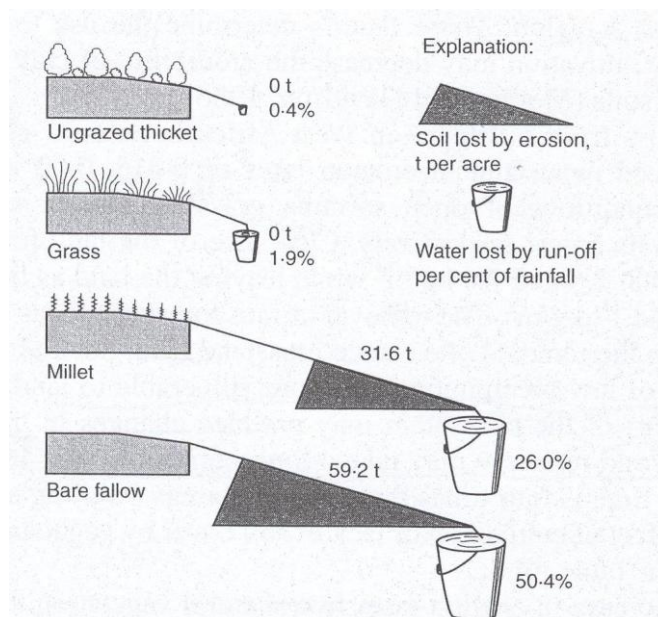
- i) Πλαγιά. Η κλίση και το μήκος της πλαγιάς επηρεάζουν άμεσα την ταχύτητα της απορροής, επομένως και την διαβρωσιμότητα του εδάφους. Η ενέργεια του ρέοντος νερού, άρα και η ικανότητά του να διαβρώνει, αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας (Goldman et al,1986). Μακριές, συνεχόμενες πλαγιές επιτρέπουν στην απορροή να αναπτύξει ορμή και έτσι η βάση της πλαγιάς εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία.
- ii) Προσανατολισμός της λεκάνης απορροής. Στο βόρειο ημισφαίριο, οι πλαγιές με νότιο προσανατολισμό διαβρώνονται με εντονότερους ρυθμούς, από αυτές που κοιτούν βόρεια. Αυτό συμβαίνει, διότι είναι πιο ζεστές και στεγνές, με λιγότερο πυκνή βλάστηση και αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη διακύμανση στη θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα. Οι πλαγιές αντίθετα που κοιτούν βόρεια είναι πιο κρύες και υγρές, με λιγότερη ηλιοφάνεια.
- iii) Περιοχή λεκάνης απορροής. Μία αντίστροφη σχέση έχει αποδειχθεί μεταξύ της στερεοαπορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής. Σε μεγάλης έκτασης λεκάνες, υπάρχει μικρότερη συνολική κλίση, μικρότερο ποσοστό διαβρώσιμων πετρωμάτων και μεγαλύτερη ευκαιρία των διαβρωμένων, από τις απότομες πλαγιές, υλικών για απόθεση (White,1982). Στην Κίνα, το 50% του φορτίου των φερτών υλών από το Γάγγη, παράγεται από το 13% των λεκανών απορροής, ενώ το 43% των φερτών υλών στον Κίτρινο Ποταμό, προέρχεται από το 7% της περιοχής. Οι Deedkov and Moszherin (1992) παρατήρησαν, πως εκεί όπου κυριαρχεί διάβρωση καναλιών, σε περιοχές με πυκνή βλάστηση δηλαδή, οι τιμές της διάβρωσης αυξάνονται. Επομένως, υπάρχει θετική σχέση με τη λεκάνη απορροής, λόγω της μεγαλύτερης παράσυρσης και μεταφοράς των φερτών. Αντίθετα, σε περιοχές με κυρίαρχη τη διάβρωση πλαγιών, αυτή συγκεντρώνεται στους παραπόταμους και ένα κλάσμα των κινούμενων φερτών θα αποτεθεί κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του δια μέσου του συστήματος. Υπάρχει, επομένως, αρνητική σχέση μεταξύ της στερεοαπορροής και της λεκάνης απορροής (Walling and Webb,1996).

- iv) Πυκνότητα αποστράγγισης. Η πυκνότητα αποστράγγισης αποτελεί μια έκφραση της διανομής των ρευμάτων στη λεκάνη απορροής. Πρόκειται για ένα δείκτη της απορροής, ο οποίος συχνά χρησιμοποιείται ως δείκτης της σοβαρότητας της διάβρωσης, αφού περιοχές με μεγάλη πυκνότητα αποστράγγισης σχετίζονται με υψηλούς δείκτες διάβρωσης. Ευρείες διακυμάνσεις στην πυκνότητα αποστράγγισης, σχετίζονται με διαφορές του κλίματος της περιοχής. Τοπικές διακυμάνσεις μπορούν να σχετίζονται με διαφορές στον όγκο της βροχόπτωσης, ωστόσο περιπλέκονται και με τη λιθολογία της περιοχής. Διαφορές μικροκλίμακας στο είδος του εδάφους και τη συχνότητα και τη σφοδρότητα στα μεμονωμένα καιρικά φαινόμενα είναι σημαντικές (Morgan and Davidson,1986).
- v) Βλάστηση. Η βλάστηση αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα περιορισμού της διάβρωσης. Είναι αυτή που διασκορπίζει την ενέργεια της βροχόπτωσης, αποτρέπει τις επιπτώσεις της στο έδαφος, αυξάνει τη διήθηση και ταυτόχρονα μειώνει τον όγκο και την ταχύτητα της επιφανειακής απορροής. Το είδος της φυτοκάλυψης εξαρτάται από τη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία, το είδος του εδάφους και την τοπογραφία της περιοχής. Αυτοί οι παράγοντες αλληλεπιδρούν και παράγουν διακριτές περιοχές, όπως για παράδειγμα τα δάση. Κλίματα με σχετικά ήπιες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και τακτικές, ομαλές βροχοπτώσεις ευνοούν την ανάπτυξη της βλάστησης. Ψυχρά και ξηρά κλίματα από την άλλη, είναι λιγότερο ευνοϊκά στην ανάπτυξη φυτών και συνεπώς περισσότερο ευαίσθητα στη διάβρωση (Goldman et al,1986).
- vi) Χρήση της γης. Η χρήση της γης σε μία περιοχή εξαρτάται από την τοπογραφία, τη γεωλογία, το είδος του εδάφους και φυσικά, το κλίμα της. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν τη χρήση στην οποία αυτή θα υποβληθεί από τον άνθρωπο. Η καλλιέργεια ίσως μειώσει τη διαβρωσιμότητα των αργιλικών εδαφών, αλλά θα αυξήσει αυτή των αμμωδών εδαφών (Morgan and Davidson,1986). Αλλαγές σε ένα μέρος του οικοσυστήματος προκαλούν αλλαγές στις συνθήκες ολόκληρης της λεκάνης. Περιοχές μικρής βροχόπτωσης είναι πιο ευάλωτες σε αλλαγές της χρήσης της γης και παράλληλα η αποκατάσταση αυτών είναι πολύ πιο χρονοβόρες. Σε ημι-άνυδρες περιοχές, ο χρόνος αποκατάστασης μπορεί να είναι έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερος αυτού των υγρών περιοχών (Walling and Kleo,1979).
- Η εδαφική απώλεια από τις πλαγιές των λόφων της Δυτικής Αφρικής, με κλίση από 0.3 έως 4 μοίρες, έφτασε τη μέση ετήσια τιμή του 0.015, 0.02 και 0.003 kg/m² κάτω από φυσικές συνθήκες λιβαδιών σαβάνας, πυκνής βλάστησης σαβάνας και τροπικού υγρού δάσους αντίστοιχα. Η εκκαθάριση της γης για γεωργία αύξησε τις παραπάνω τιμές σε 0.8, 2.6 και 9 kg/m², ενώ αφήνοντας το έδαφος γυμνό έδωσε τιμές 2, 3 και 17 kg/m² αντίστοιχα. Από το παράδειγμα αυτό φαίνεται η τεράστια επίδραση της χρήσης της γης στις τιμές της διάβρωσης.
- Στον Πίνακα 2.9 φαίνεται η επίδραση της ύπαρξης καλλιεργειών και της έλλειψής της στις τιμές της διάβρωσης.

Πίνακας 2.9 Ετήσιες τιμές της διάβρωσης, εκφρασμένες σε kg/m² (Morgan and Davidson,1986).

Χώρα	Φυσικό έδαφος	Καλλιεργημένο έδαφος	Γυμνό έδαφος
Κίνα	<0.2	15-20	28-36
Η.Π.Α.	0.003-0.3	0.5-17	0.4-9.0
Νιγηρία	0.05-0.1	0.01-3.5	0.3-15
Ινδία	0.05-0.1	0.03-2.0	1.0-2.0
Βέλγιο	0.01-0.05	0.3-3.0	0.7-8.2
Ηνωμένο Βασίλειο	0.01-0.05	0.03-0.3	1.0-4.5

Η αύξηση των τιμών της διάβρωσης και της απώλειας όγκου νερού, ως ποσοστό της βροχόπτωσης, από τις περιοχές με φυσική βλάστηση μέχρι αυτές με γυμνό έδαφος, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.9 Εδαφική διάβρωση στη Mpwanga, Tanzania

vii) Ανθρώπινη επίδραση. Δραστηριότητες όπως, η αποψίλωση των δασών, η αστικοποίηση και η γεωργία αυξάνουν τη διαβρωσιμότητα του εδάφους, με αποτέλεσμα οι τιμές της διάβρωσης να παρουσιάζουν αύξηση έως και 2.5 φορές

(White,2001). Με την μετατροπή των δασών σε γη γεωργικής εκμετάλλευσης, μπορεί να υπάρξει αύξηση της στεροαπορροής έως και 3.5 φορές (Mahmood,1987).

2.4 Το φαινόμενο της μεταφοράς φερτών υλικών

Η συσσώρευση φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα μεταβάλλει τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν, αλλάζοντας αμφότερες την εγκάρσια και διαμήκη τομή του με την απόθεση υλικών. Πρωταγωνιστικό ρόλο διαδραματίζει η συνθήκη έναρξης της κίνησης των υλικών. Αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική πρώτα απ' όλα για τον προσδιορισμό των συνθηκών κάτω από τις οποίες τα φερτά θα αποτεθούν ή θα ξεκινήσουν την κίνησή τους. Εν συνεχεία επηρεάζει το σχεδιασμό σταθερών καναλιών και προστατευτικής επένδυσης, τη μελέτη και το σχεδιασμό έργων αντιμετώπισης του φαινομένου της συσσώρευσης και τέλος χρησιμοποιείται σαν υπολογιστική παράμετρος στις εξισώσεις μεταφοράς των υλικών.

Πολλοί επιχειρήσαν να μελετήσουν το φαινόμενο και να εξάγουν ικανοποιητικές εξισώσεις μεταφοράς. Ο Yang (1996) δίνει μία επισκόπηση και μία σύγκριση της θεωρίας και των εξισώσεων μεταφοράς των φερτών υλικών. Ο Julien (1995) από τη μεριά του, προσφέρει μία ικανοποιητική κάλυψη των εξισώσεων και των εφαρμογών του φαινομένου, προσεγγίζοντάς το διαφορετικά από τον Yang, ενώ τέλος ο Chang (1988) συζητά το θέμα της μεταφοράς των φερτών δίνοντας έμφαση στην ποσοτική πτυχή των ποτάμιων διεργασιών και της μορφολογίας των προσχωματικών καναλιών.

Πολλές από τις υπολογιστικές μεθόδους που θα παρουσιαστούν εδώ στηρίζονται στην απλοποιητική παραδοχή της σταθερής ομοιόμορφης ροής σε πρισματικά κανάλια και έχουν αναπτυχθεί για να μελετούν τη μεταφορά μη συνεκτικών υλικών. Οι υπολογισμοί της μεταφοράς επίσης, υποθέτουν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ υγρού και πυθμένα έχει φτάσει τις συνθήκες ισορροπίας. Τέτοιες συνθήκες συχνά δεν υφίστανται στους ταμιευτήρες.

Κατά τη διάρκεια της συγκράτησης νερού, η εγκάρσια τομή του ταμιευτήρα δεν είναι πρισματική, αλλά αυξάνεται προς τα κατάντη. Η ροή επίσης, δεν είναι ομοιόμορφη. Τα ρεύματα που εισέρχονται σε ένα ταμιευτήρα αποθέτουν φερτά υλικά, επομένως παραβιάζουν την υπόθεση της ισορροπίας μεταξύ υγρού και πυθμένα. Σε πολλούς ταμιευτήρες, τα φερτά που έχουν αποτεθεί αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από συνεκτικά υλικά. Αυτό αποτελεί πρόβλημα από την άποψη της μεταφοράς τους, λόγω της μεγάλης δυσκολίας να χαρακτηριστεί η διαβρωσιμότητά τους, ειδικά από τη στιγμή που η ιδιότητα αυτή ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο, το βάθος και τους κανόνες λειτουργίας του ταμιευτήρα. Η εισροή σε ταμιευτήρες, οι οποίοι δέχονται τη ροή ενός μικρού και απότομου υδροκρίτη, μπορεί να είναι ιδιαίτερα ασταθής. Γενικά, παρατηρείται μία διαστρωμάτωση της ροής, με μεγάλο εύρος στο μέγεθος των κόκκων, με χαλίκια και άργιλο να διαβρώνονται και να μεταφέρονται ταυτόχρονα.

Επομένως, όπως αποδείχθηκε, οι συνθήκες μεταφοράς των φερτών σε ένα ταμιευτήρα είναι ιδιαίτερα περίπλοκες. Λεπτομερής ανάλυση πολλών προβλημάτων είναι υπεράνω της

σημερινής γνώσης και λόγω αυτού, μπορούν να παραχθούν μόνο ποιοτικές ή χονδρικά ποσοτικές σχέσεις. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται, ώστε να μην παραβιάζονται σε μεγάλο βαθμό οι αρχικές υποθέσεις, αλλά και να γνωρίζει οποιοσδήποτε εφαρμόζει αυτές τις υπολογιστικές σχέσεις την κατεύθυνση και το μέγεθος του ενδεχόμενου λάθους που υπεισέρχεται σε αυτούς.

Όπως είναι ήδη γνωστό, η κίνηση ενός υγρού κατά μήκος του πυθμένα προκαλεί την κίνηση και μεταφορά υλικού μαζί με αυτό. Κάτω από ορισμένες κρίσιμες συνθήκες, οι υδραυλικές δυνάμεις θα είναι πολύ μικρές για να μετακινήσουν τα υλικά, με αποτέλεσμα την απόθεσή τους στον πυθμένα. Αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας πάνω από ορισμένες τιμές, θα θέσει και πάλι σε κίνηση τα υλικά, με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους προς τα κατάντη. Οι κρίσιμες αυτές συνθήκες λέγονται συνθήκες έναρξης της κίνησης και υπολογίζονται είτε σε όρους κρίσιμης μέσης ταχύτητας ροής, είτε κρίσιμης διατμητικής τάσης του πυθμένα, γνωστή ως συρτική τάση. Όπως αναφέρθηκε από τους Lavelle and Mofjeld (1987), δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη κατώτατη τιμή που να χαρακτηρίζει την έναρξη της κίνησης. Ουσιαστικά, η μεταφορά των φερτών υλικών μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας. Η λεγόμενη “κρίσιμη τιμή” ορίζεται διαφορετικά από κάθε συγγραφέα.

Η συρτική τάση

Η συρτική τάση ορίζεται ως η δύναμη αντίστασης ή τριβής που ασκείται στο σύνορο μεταξύ του κινούμενου υγρού και του πυθμένα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η συρτική τάση δεν αφορά τη δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση ενός εδαφικού σωματιδίου, αλλά αυτή που ασκείται σε ένα μεγάλο τμήμα του πυθμένα. Για σχετικά μικρές κλίσεις του πυθμένα η συρτική τάση μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 2.6α:

$$\tau_0 = \gamma \times D \times S \quad (2.6\alpha)$$

με

- γ : το ειδικό βάρος του νερού
- d : το βάθος του νερού
- s : η κλίση του υδατορεύματος

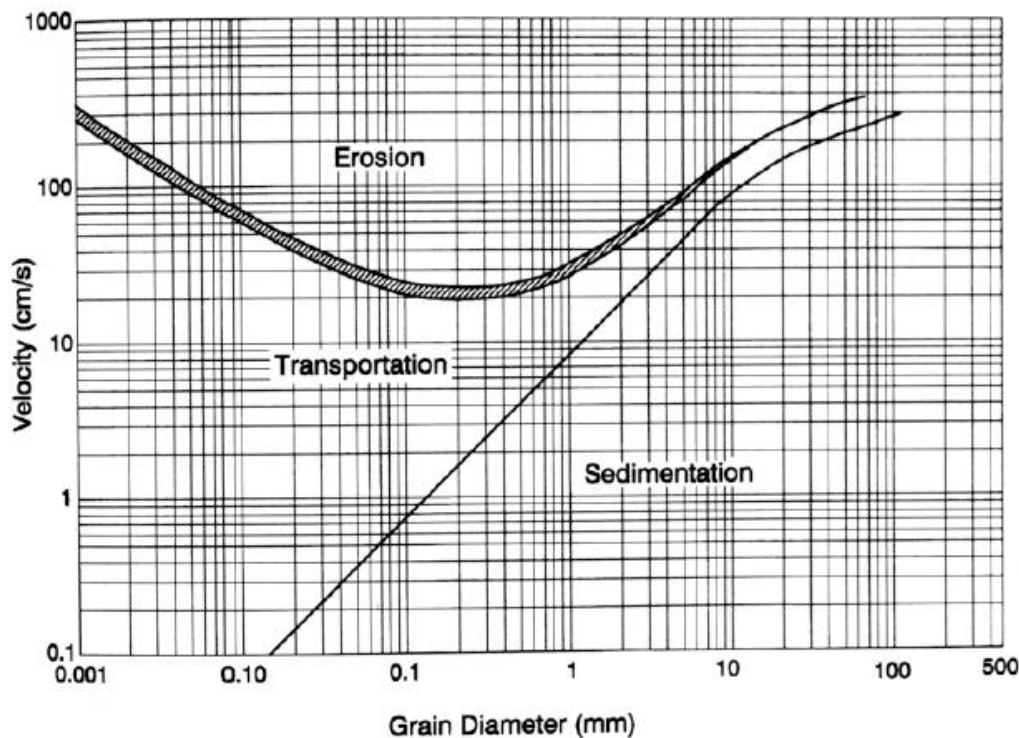
Σε μια γενικότερη έκφραση βέβαια, το βάθος αντικαθίσταται από την υδραυλική ακτίνα και η συρτική τάση εκφράζεται με την Εξίσωση 2.6β ως εξής:

$$\tau_0 = \gamma \times R \times S \quad (2.6\beta)$$

Για τον καθορισμό των συνθηκών έναρξης της κίνησης χρησιμοποιούνται πολλών ειδών μέθοδοι. Υπάρχουν προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογισμού της συρτικής τάσης, εμπειρικά κριτήρια που απεικονίζονται σε αντίστοιχα διαγράμματα (Lane, 1955), καθώς και το διάγραμμα Shields, το οποίο χρησιμοποιεί τον αριθμό Reynolds.

Κριτήρια ταχύτητας

Ο Yang (1973,1996) ισχυρίστηκε πως η μονάδα της δύναμης του καναλιού είναι καλύτερος δείκτης της έναρξης της κίνησης των σωματιδίων, από την παράμετρο του Shields. Επομένως, όρισε την αδιάστατη κρίσιμη ταχύτητα, ως το λόγο της ταχύτητας στις κρίσιμες συνθήκες προς την ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων, η οποία εκφράζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου των κόκκων τους.



Σχήμα 2.5 Κριτήριο ταχύτητας που αναπτύχθηκε από τον Hjulstrom (1935) και αφορά τα όρια των φαινομένων της διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλικών.

Υπάρχουν πολλοί ερευνητές που επιχείρησαν να ορίσουν το κριτήριο της έναρξης της κίνησης μέσω της ταχύτητας. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι ακόμα και κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, τα δεδομένα εμφανίζουν μεγάλη διασπορά, ενώ οι επί τόπου συνθήκες είναι ακόμα πιο περίπλοκες. Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να παρέχουν μόνο προσεγγιστικές εκτιμήσεις, εκτός κι αν είναι διαθέσιμη μια σωστή βαθμονόμηση των δεδομένων, γεγονός που είναι σπάνιο. Από τα παραπάνω, εύκολα κατανοεί κανείς την ανακρίβεια που αναμένεται στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Ακριβώς από την ανακρίβεια αυτή, πηγάζει η τεράστια σημασία της κρίσης των μηχανικών στην εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων, αλλά και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

2.5 Το φαινόμενο της απόθεσης φερτών υλικών

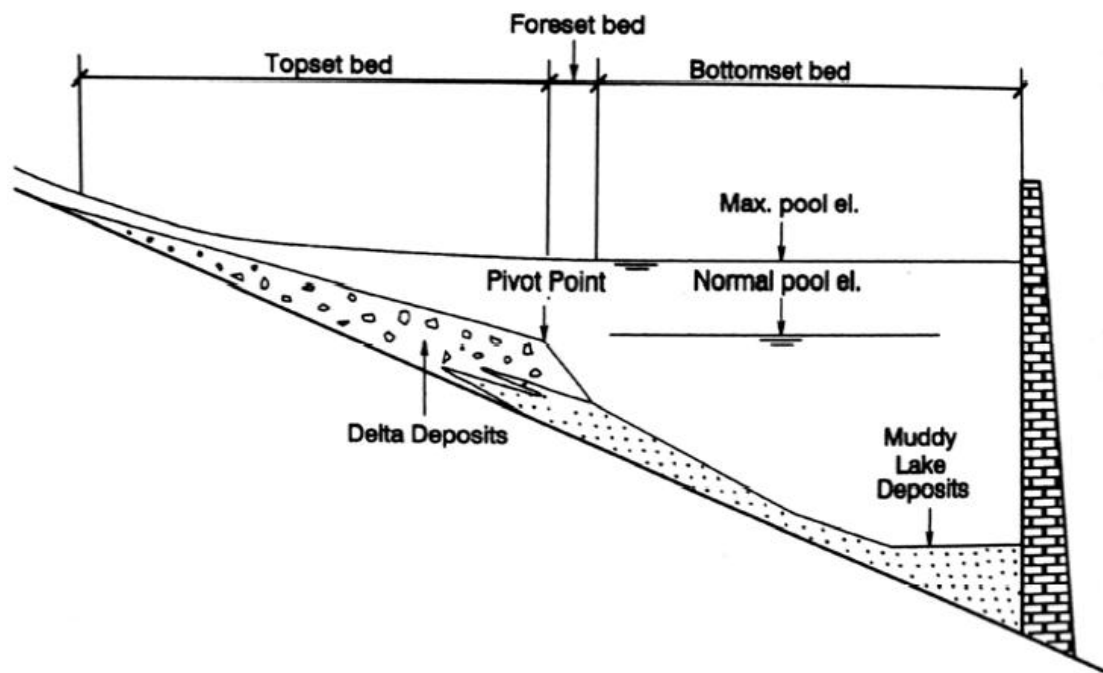
Η απόθεση των φερτών υλικών είναι το βασικό πρόβλημα που επηρεάζει τον ωφέλιμο χρόνο ζωής ενός ταμιευτήρα. Η γνώση αμφότερων, του ρυθμού και της μορφής των αποθέσεων, είναι απαραίτητη στην πρόβλεψη των δυσλειτουργιών που θα προκύψουν, του χρονικού περιθωρίου στο οποίο αυτές θα συμβούν, καθώς και των στρατηγικών που μπορούν να εφαρμοστούν. Η μορφή των αποθέσεων αντανακλά επίσης τις διαδικασίες μεταφοράς και μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διανομή και την κατανομή των φερτών υλικών, οι οποίες ίσως δε μπορούν να παρθούν από άλλα δεδομένα.

2.5.1 Γενικές μορφές αποθέσεων

Όταν ένα υδάτινο ρεύμα εισέρχεται σε έναν ταμιευτήρα, άμεση συνέπεια είναι η μείωση της ταχύτητας ροής, η οποία οδηγεί στην απόθεση του φορτίου του. Το φορτίο της κοίτης με τα χονδρόκοκκα υλικά του, εναποτίθενται αμέσως διαμορφώνοντας αποθέσεις δελταϊκής μορφής. Αντιθέτως, τα λεπτόκοκκα υλικά, με ταχύτητες απόθεσης πολύ μικρότερες, μεταφέρονται βαθύτερα μέσα στον ταμιευτήρα. Ένας ταμιευτήρας με ένα κύριο ρεύμα χωρίς σημαντικούς παραποτάμους, που λειτουργεί με σχεδόν σταθερή υψηλή στάθμη, θα παρουσιάσει ένα ενοποιημένο περιβάλλον αποθέσεων. Αυτό το σύστημα αντιπροσωπεύει την πιο απλή μορφή. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση αυτή, μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες διαφορές από ταμιευτήρα σε ταμιευτήρα, οι οποίες οφείλονται στη γεωμετρία του καθενός, στις διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες, καθώς και στο μέγεθος των κόκκων των φερτών υλικών. Σε ταμιευτήρες με μεταβαλλόμενη στάθμη ή σε άλλους που περιοδικά εκκενώνονται, οι προγενέστερες αποθέσεις θα διαβρωθούν και νέες θα αναπτυχθούν ξανά, από διαδικασίες όπως η δράση των κυμάτων, η αστοχία της κλίσης κλπ. Η όλη διαδικασία γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη όταν προστίθεται και το φορτίο αξιόλογων παραποτάμων.

Το μεγαλύτερο μέρος των φερτών υλικών μεταφέρεται στα σημεία απόθεσης μέσα σε ένα ταμιευτήρα, με τρεις διαδικασίες: α) με τη μεταφορά χονδρόκοκκων υλικών, ως φορτίο κοίτης στην κορυφή των δελταϊκών αποθέσεων, β) με τη μεταφορά λεπτόκοκκων υλικών, με τη στρωματοποιημένη ροή των ρευμάτων πυκνότητας και γ) με τη μεταφορά των λεπτόκοκκων υλικών, με μη στρωματοποιημένη ροή. Λόγω του ότι οι ταμιευτήρες έχουν συνήθως μεγάλη ακτογραμμή σε σχέση με την επιφάνειά τους, η διάβρωση της ακτογραμμής και η αστοχία κλίσης μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση σε ορισμένες θέσεις. Η μορφή των αποθέσεων που προκύπτει, αντικατοπτρίζει κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες. Η ερμηνεία της μορφής των αποθέσεων συνεισφέρει στον καθορισμό των μορφών μεταφοράς που είναι ενεργές, ειδικά στην περίπτωση των ρευμάτων πυκνότητας που μεταφέρουν επαρκή ποσότητα φερτών κοντά στο φράγμα, όπου παράγουν μία διακριτή σφηνοειδή λασπώδη λίμνη αποθέσεων.

Ένας τυπικός ταμιευτήρας στη διαμήκη έννοια, χωρίζεται σε τρεις ζώνες αποθέσεων, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10 Οι ζώνες απόθεσης σε ένα ταμιευτήρα (Morris & Fan, 1998).

- α) Topset bed ή αρχικό τμήμα, το οποίο αποτελείται από δελταϊκές φερτών υλικών που εναποτίθενται γρήγορα. Το κατάντη άκρο του τμήματος αυτού, αντιστοιχεί στο κατάντη όριο της μεταφοράς του φορτίου κοίτης του ταμιευτήρα.
- β) Foreset bed ή ενδιάμεσο τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από αύξηση της κλίσης και μείωση στο μέγεθος των κόκκων των υλικών.
- γ) Bottomset bed ή τελικό τμήμα, το οποίο αποτελείται από λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία εναποτίθενται μετά το δέλτα, μέσω των ρευμάτων πυκνότητας ή της μη στρωματοποιημένης ροής. Μπορεί ακόμη να περιλαμβάνει αυτόχθονα οργανικά υλικά που παράγονται από το φύκια ή από υδρόφυτα μέσα στον ταμιευτήρα.

Σε περιοχές όπου οι δελταϊκές αποθέσεις περιλαμβάνουν τόσο χονδρόκοκκα, όσο και λεπτόκοκκα υλικά, το τελικό τμήμα είναι κατά βάση λεπτόκοκκο. Ωστόσο, οι εισροές των παραποτάμων, ο καταβιβασμός της στάθμης του ταμιευτήρα, η αστοχία κλίσης ή ακόμα και οι ακραίες πλημμύρες, μπορούν να μεταφέρουν χονδρόκοκκα υλικά σε τυπικά λεπτόκοκκες ζώνες, με αποτέλεσμα τη στρωματοποίηση (layering) των αποθέσεων και τις τοπικές διακυμάνσεις του μεγέθους των κόκκων.

Οι διαμήκεις μορφές των αποθέσεων θα εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση από τον έναν ταμιευτήρα στον άλλο, καθώς επηρεάζονται από τη γεωμετρία του, τη λειτουργία του, την εκροή του, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του μεγέθους των κόκκων των εισερχόμενων

φερτών υλικών. Οι αποθέσεις μπορούν να εμφανίζουν τέσσερεις βασικούς τύπους μορφής, οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων φερτών και τη λειτουργία του ταμιευτήρα.

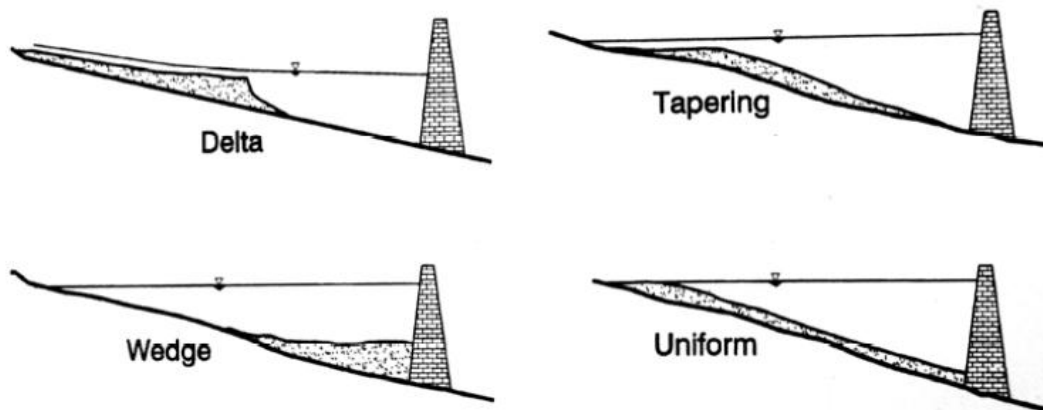
α) Δελταϊκές αποθέσεις (Delta deposits). Περιλαμβάνουν τα πιο χονδρόκοκκα υλικά, τα οποία εναποτίθεται γρήγορα στη ζώνη εισροής. Μπορεί να αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από τέτοια υλικά, με διάμετρο $d > 0.062$ mm, ή μπορεί να περιλαμβάνουν και μεγάλα ποσοστά πιο λεπτόκοκκων υλικών, όπως η ιλύς.

β) Σφηνοειδείς αποθέσεις (Wedge-shaped deposits). Οι σφηνοειδείς αποθέσεις προκαλούνται από τη μεταφορά λεπτόκοκκων υλικών μέσω των ρευμάτων πυκνότητας, γι' αυτό και έχουν μεγαλύτερο πάχος κοντά στο φράγμα και γίνονται όλο και λεπτότερες προς τα ανάντη. Αυτή η μορφή αποθέσεων μπορεί να παρατηρηθεί και σε μικρούς ταμιευτήρες με μεγάλη εισροή φερτών, όπως επίσης και σε μεγάλους ταμιευτήρες που λειτουργούν με χαμηλή στάθμη κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος των φερτών να μεταφέρεται στην περιοχή του φράγματος.

γ) Συγκλίνουσες αποθέσεις (Tapering deposits). Οι αποθέσεις αυτού του είδους μειώνονται σε πάχος καθώς πλησιάζουμε στην περιοχή του φράγματος. Πρόκειται για ένα σύνθετο είδος σε μακρείς ταμιευτήρες με υψηλή στάθμη λειτουργίας, το οποίο αντικατοπτρίζει την προοδευτική απόθεση λεπτόκοκκων υλικών προς το φράγμα.

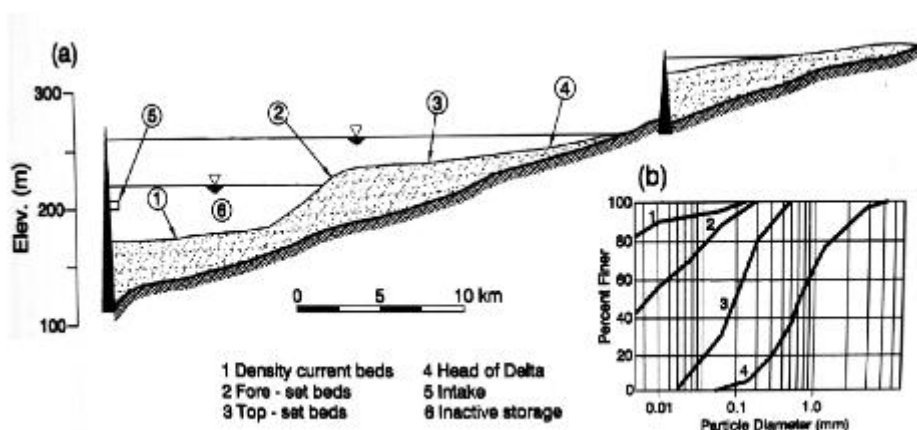
δ) Ομοιόμορφες αποθέσεις (Uniform deposits). Πρόκειται για μια μη συνήθη μορφή αποθέσεων. Στενοί ταμιευτήρες με συχνή διακύμανση της στάθμης τους και με μικρό φορτίο λεπτόκοκκων υλικών μπορούν να παράγουν ένα σχεδόν ομοιόμορφο σχηματισμό αποθέσεων.

Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται σχηματικά οι μορφές αποθέσεων που μόλις αναφέρθηκαν.



Εικόνα 2.11 Διαμήκειες μορφές αποθέσεων. Αποθέσεις διαφορετικού είδους μπορούν να παρατηρηθούν την ίδια στιγμή σε διαφορετικά σημεία του ίδιου ταμιευτήρα (Morris & Fan,1998).

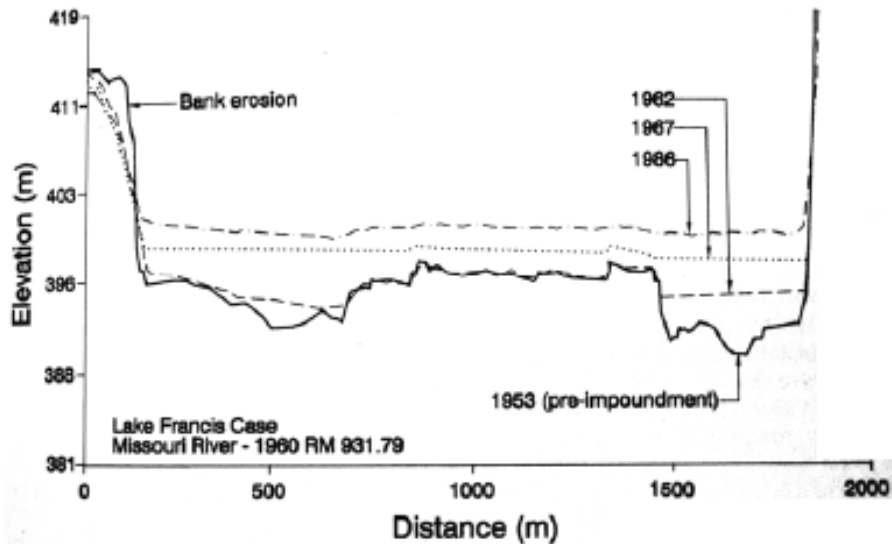
Οι ταμιευτήρες μπορούν να διαμορφώσουν διαφορετικές μορφές αποθέσεων σε διαφορετικές ζώνες, με αποτέλεσμα ένα πολύπλοκο προφίλ. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2.12, όπου αναπαριστάται ο ταμιευτήρας Sakuma της Ιαπωνίας, μετά από 24 χρόνια λειτουργίας. Αριστερά δίνεται το διαμήκες προφίλ των αποθέσεων, χωρισμένο σε περιοχές. Στην περιοχή 1, είναι οι αποθέσεις των ρευμάτων πυκνότητας, στην περιοχή 2 το ενδιάμεσο τμήμα (foreset bed), ενώ στην περιοχή 3 το αρχικό τμήμα (topset bed) των αποθέσεων και τέλος στην περιοχή 4, η αρχή των δελταϊκών αποθέσεων. Στο δεξί σχήμα δίνεται η διανομή του μεγέθους των κόκκων για κάθε μία από τις παραπάνω περιοχές.



Εικόνα 2.12 Διαμήκες προφίλ αποθέσεων στον ταμιευτήρα Sakuma της Ιαπωνίας (Okada and Baba,1982)

Κατά την εγκάρσια έννοια, η πλειονότητα των φερτών υλικών συγκεντρώνεται στο βαθύτερο τμήμα κάθε τομής του ταμιευτήρα, δημιουργώντας αποθέσεις με σχεδόν

οριζόντια επιφάνεια. Ένα τέτοιο προφίλ αποθέσεων φαίνεται στην Εικόνα 2.13, που αναφέρεται στη λίμνη Francis Case του ποταμού Missouri. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στα ρεύματα πυκνότητας, τα οποία μεταφέρουν και αποθέτουν υλικά κατά μήκος του φυσικού ποταμού.



Εικόνα 2.13 Η εξέλιξη των αποθέσεων των φερτών υλικών στην εγκάρσια τομή της λίμνης Francis Case (Stanley Consultants,1989).

Τα φερτά υλικά μεταφέρονται στον ταμιευτήρα από “εκρήξεις” καταιγίδων, μεταξύ των οποίων επικρατούν συνθήκες χαμηλής ροής. Αυτή η εκρηκτική φύση της συσσώρευσης των υλικών είναι ορατή σε ένα ταμιευτήρα από τα εναλλασσόμενα στρώματα λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αποθέσεων. Η στρωματοποίηση αυτή μπορεί να μην είναι ιδιαίτερα ορατή στις δελταϊκές αποθέσεις, ούτε στις σφηνοειδής αποθέσεις ανάντη του φράγματος, αλλά σίγουρα θα είναι παρούσα στο τμήμα ανάμεσα στα δύο προαναφερθέντα.

2.5.2 Δελταϊκές αποθέσεις

Οι δελταϊκές αποθέσεις αποτελούν την ορατή και πλέον συνήθη μορφή αποθέσεων των φερτών υλικών σε μικρούς υδρολογικά ταμιευτήρες, στους οποίους κυριαρχούν τα χονδρόκοκκα υλικά. Ωστόσο, ο όγκος τους συνήθως αποτελεί ένα μικρό μόνο κλάσμα του συνολικού όγκου των αποθέσεων. Ακόμα και μία μικρή ποσότητα τέτοιων αποθέσεων μπορεί να αποδειχθεί προβληματική από την άποψη της ανάντη πρόσχωσης, παρ’ όλο που οι δελταϊκές αποθέσεις συγκεντρώνονται στη ρηχή ανάντη έκταση του ταμιευτήρα.

Το δέλτα ενός ταμιευτήρα έχει τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά (Fan and Morris,1992a):

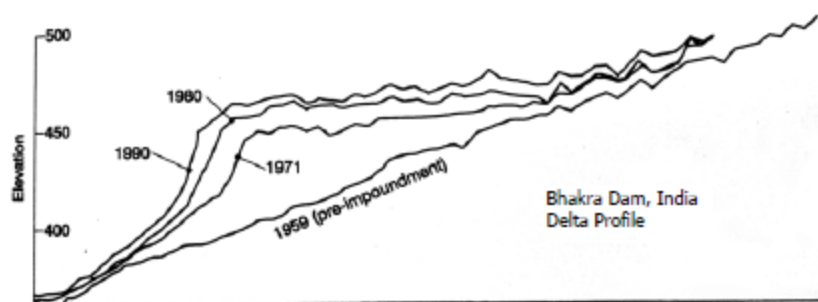
α) Παρατηρείται απότομη αλλαγή κλίσης ανάμεσα στο τμήμα της κορυφής (topset) και το ενδιάμεσο τμήμα (foreset) των αποθέσεων.

β) Τα σωματίδια των φερτών υλικών στο τμήμα της κορυφής των αποθέσεων είναι περισσότερο χονδρόκοκκα απ' ό τι στο ενδιάμεσο τμήμα, επομένως υπάρχει απότομη αλλαγή στη διάμετρο των σωματιδίων μεταξύ κορυφής και ενδιάμεσου τμήματος.

γ) Η στάθμη της ζώνης μετάβασης από την κορυφή στο ενδιάμεσο τμήμα, εξαρτάται από το καθεστώς λειτουργίας του ταμιευτήρα και τη στάθμη του.

Σε βαθείς ταμιευτήρες, οι οποίοι λειτουργούν κάτω από διαφορετικές στάθμες, μπορεί να έχουν διαμορφωθεί διακριτά δέλτα σε διαφορετικές στάθμες. Αντίθετα, σε μακρείς στενούς ταμιευτήρες, ακόμα κι αν δεν υπάρχει ξεκάθαρο δελταϊκό προφίλ, θα υπάρχει μία περιοχή που χαρακτηρίζεται από ταχεία αλλαγή του μεγέθους των κόκκων, σημειώνοντας το κατάντη όριο της απόθεσης χονδρόκοκκων υλικών.

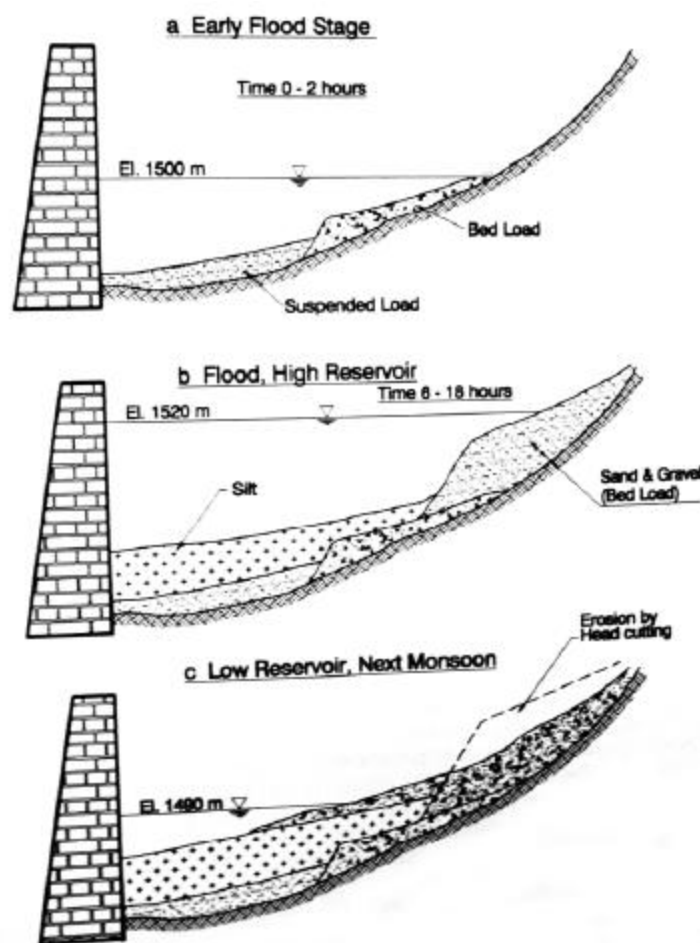
Τα δέλτα των ταμιευτήρων πάντα αναπτύσσονται προς τα κατάντη, ενώ σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και η κατακόρυφη ανάπτυξη προς τα ανάντη μπορεί να είναι σημαντική. Λόγω του ότι η ανάντη περιοχή είναι ρηχή και έχει μικρή χωρητικότητα, η διαμήκης ανάπτυξη του δέλτα μπορεί να είναι ιδιαίτερα ταχεία. Στον ταμιευτήρα Guanting της Κίνας, για παράδειγμα, το δέλτα αρχικά αναπτύχθηκε προς τα κατάντη με ρυθμό 3.0 km/yr, ενώ συγχρόνως προχώρησε και προς τα ανάντη με ρυθμό 2.6 km/yr. Καθώς το δέλτα προχωρά προς βαθύτερες και πλατύτερες περιοχές του ταμιευτήρα, ο ρυθμός της διαμήκου ανάπτυξής του μειώνεται. Αυτό το χρονικό μοτίβο φαίνεται στην Εικόνα 2.14, που αντιπροσωπεύει το φράγμα Bhakra της Ινδίας. Ο ρυθμός ανάπτυξης, όπως φαίνεται, μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω της γεωμετρίας του ταμιευτήρα, ο οποίος αυξάνεται σε βάθος και πλάτος στην κατάντη διεύθυνση.



Εικόνα 2.14 Χρονικό μοτίβο της ανάπτυξης του δέλτα στο φράγμα Bhakra της Ινδίας (Morris and Fan,1998)

Σημαντικοί όγκοι φερτών που αποτέθηκαν στην περιοχή του δέλτα κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, μπορούν να τεθούν ξανά σε κίνηση, κατά τη διάρκεια

επεισοδίων καταβιβασμού της στάθμης. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής, αποτελεί ο ταμιευτήρας Kulekhanī του Νεπάλ, που περιγράφηκε από τους Galay and Okaji (1995). Τον Ιούλιο του 1993, ο ταμιευτήρας δέχθηκε βροχόπτωση μεγέθους 540 mm σε μία μέρα, η οποία οδήγησε σε αστοχίες κλίσης σε όλη την έκτασή του. Η καταιγίδα διένειμε φερτά υλικά όγκου 4.8 Mm^3 , με ρυθμό διανομής $38\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ για μία μόνο μέρα. Τα χονδρόκοκκα υλικά, που περιλάμβαναν και ογκόλιθους, δημιούργησαν εκτεταμένες δελταϊκές αποθέσεις. Κατά τη διάρκεια του καταβιβασμού της στάθμης τη μετέπειτα περίοδο των μουσώνων, οι αποθέσεις αυτές τέθηκαν σε κίνηση προς τα κατάντη και επανα-αποτέθηκαν πάνω από τα λεπτόκοκκα φερτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15 Διεργασίες απόθεσης και επανεκκίνησης φερτών στον ταμιευτήρα Kulekhanī του Νεπάλ (Garay and Okaji, 1995)

Σημαντικό στοιχείο στη μελέτη των δελταϊκών αποθέσεων είναι η κλίση τους. Η γνώση της κλίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη της έκτασής τους και στην προκύπτουσα αύξηση της πλημμυρικής στάθμης. Αρχικά, η κλίση του δέλτα θα εκτείνεται ανάντη από το σημείο αλλαγής της κλίσης, από το τμήμα της κορυφής των αποθέσεων στο ενδιάμεσο

τμήμα (χρήσιμη η Εικόνα 2.10). Η κλίση αυτή είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει, τόσο το μήκος της ανάντη πρόσχωσης των δελταϊκών αποθέσεων, όσο και τον όγκο των φερτών που μπορούν να αποθηκευθούν.

Δεδομένα από ταμειυτήρες των Ηνωμένων Πολιτειών, έχουν δείξει ότι η κλίση των δελταϊκών αποθέσεων κυμαίνεται από σχετικά ήπια, περίπου 20% της αρχικής κλίσης του ρεύματος, έως σχεδόν 100% αυτής. Σε πολλούς ταμειυτήρες, η μέγιστη κλίση των αποθέσεων θα είναι περίπου η μισή της κλίσης της κοίτης (Borland,1971), κάτι που πλέον χρησιμοποιείται και σαν κανόνας. Ωστόσο, λόγω του ότι το εύρος των κλίσεων που μπορεί να εμφανισθούν είναι μεγάλο, το σώμα των μηχανικών του στρατού των Η.Π.Α. (U.S. Army Corps of Engineers,1989), προειδοποίησε να μη χρησιμοποιούνται κανόνες στην εκτίμηση τέτοιων τιμών. Εμπειρικές σχέσεις επιτρέπονται μόνο για ταμειυτήρες με παρόμοια γεωμορφικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν για τη θέσπισή τους. Πλέον ενδεδειγμένη είναι η μοντελοποίηση, ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος πρόβλεψης της κλίσης της κορυφής του δέλτα.

2.5.3 Συντελεστής απελευθέρωσης και εγκλωβισμού

Ο συντελεστής απελευθέρωσης φερτών (sediment release efficiency) ενός ταμειυτήρα εκφράζει την αναλογία της μάζας των απελευθερωμένων φερτών προς την ολική εισροή φερτών, σε μία δεδομένη χρονική περίοδο. Πρόκειται για το συμπλήρωμα του συντελεστή παγίδευσης (trap efficiency) και συνδέονται με τη Σχέση 2.7 :

$$\text{Release efficiency} = 1 - \text{Trap efficiency} \quad (2.7)$$

Ο Churchill (1948) βάσισε την εμπειρική του σχέση στην έννοια του συντελεστή απελευθέρωσης, ενώ ο Brune (1953) σε αυτή του συντελεστή παγίδευσης. Ωστόσο, από την οπτική της διαχείρισης των φερτών υλικών, περισσότερο χρήσιμη είναι η έννοια του συντελεστή απελευθέρωσης, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει τη διαδικασία της έκπλυσης. Με την εφαρμογή της έκπλυσης, απελευθερώνονται περισσότερα φερτά απ' όσα εισρέουν στον ταμειυτήρα, με αποτέλεσμα ο συντελεστής απελευθέρωσης να υπερβαίνει το 100%. Εάν η διαδικασία αυτή περιγραφεί με τιμές συντελεστή παγίδευσης, αυτός θα σχηματίσει αρνητικές τιμές, κάτι που είναι δύσκολο να το αντιληφθεί ο μέσος νους. Σημαντικό είναι να προσδιορίζεται πάντα και το χρονικό διάστημα, το οποίο αφορά ο εκάστοτε συντελεστής.

Αμφότερες οι σχέσεις του Churchill και του Brune χρησιμοποιούνται ευρέως και έχει αποδειχθεί ότι παράγουν εύλογες εκτιμήσεις των μακροπρόθεσμων συντελεστών. Ωστόσο ο Borland (1971), δηλώνει πως η μέθοδος του Churchill είναι περισσότερο εφαρμόσιμη στην εκτίμηση της κατακράτησης των φερτών υλικών σε ταμειυτήρες σχετικά ξηρού κλίματος. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην αναλογία του όγκου εισροής των φερτών, ενώ καμία από αυτές δε λαμβάνει σοβαρά υπόψη χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος των κόκκων των εισερχόμενων, στον ταμειυτήρα, υλικών ή η διαμόρφωση του ταμειυτήρα. Οι επιδράσεις

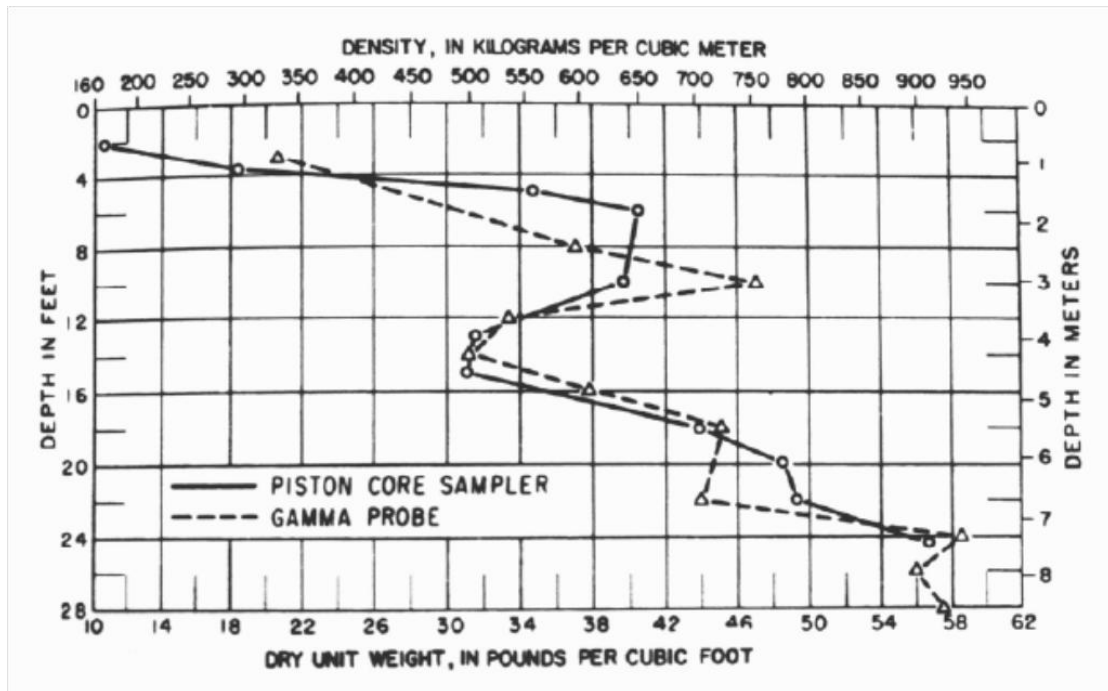
της λειτουργίας του ταμιευτήρα συμπεριλαμβάνονται μόνο στην επιλογή του όγκου του, που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς.

2.5.4 Το βάρος των αποθέσεων

Το εισερχόμενο φορτίο των υλικών στον ταμιευτήρα μετριέται σε μονάδες μάζας. Για να γίνει πρόβλεψη της μείωσης της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, αυτό θα πρέπει να μετατραπεί σε όγκο, με βάση την πυκνότητα των αποθέσεων. Αντιστρόφως, ο όγκος των φερτών που έχει μετρηθεί σε έναν ταμιευτήρα, θα πρέπει να μετατραπεί σε μάζα για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής του υδροκρίτη. Το ξηρό βάρος των αποθέσεων ανά μονάδα όγκου, ονομάζεται ειδικό βάρος ή γενικά ξηρή φαινόμενη πυκνότητα.

Το ειδικό βάρος καθορίζεται από το μέγεθος των κόκκων, το πάχος των αποθέσεων και από το κατά πόσο αυτές έχουν ξηρανθεί από την έκθεσή τους στον αέρα. Η στερεοποίηση είναι μία χρονοεξαρτούμενη διαδικασία, η οποία μπορεί να συμβαίνει για δεκάδες χρόνια, λόγω του ίδιου βάρους των υπερκείμενων αποθέσεων.

Τα σωματίδια των χονδρόκοκκων υλικών, μόλις εναποτίθενται, εφάπτονται μεταξύ τους. Ο κενός χώρος μεταξύ των κόκκων είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να μπορεί το νερό να διαφύγει εύκολα. Συνεπώς, τα χονδρόκοκκα υλικά φτάνουν την απόλυτη πυκνότητα μόλις εναποτίθενται, ενώ η ενδεχόμενη συμπίεση, άρα και αναδιάταξη των κόκκων, θα είναι αμελητέα. Η ιλύς και η άργιλος αντίθετα, εγκαθίστανται σε ένα χαλαρό καλούπι, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλου όγκου μικρών κενών γεμάτων με νερό. Καθώς δημιουργούνται επιπρόσθετα στρώματα αποτιθέμενων φερτών, εφαρμόζεται και επιπρόσθετη πίεση. Βέβαια, τα στρώματα αυτά έχουν και προστατευτική δράση, καθυστερώντας την κατακόρυφη διαφυγή του νερού, με αποτέλεσμα να παρατείνουν τη διαδικασία της συμπίεσης. Η μικρή διαπερατότητα της αργίλου μπορεί να προκαλέσει την επικάλυψη των αποθέσεων μικρής πυκνότητας από άλλες μεγάλης πυκνότητας, προκαλώντας μία αντίθετη εικόνα στην πορεία της πυκνότητας με το βάθος, όπως παρατηρήθηκε στη λίμνη Mead και φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Μεταβολές στη φαινόμενη πυκνότητα με το βάθος, μπορεί να προκαλέσει και η διακύμανση στο μέγεθος των κόκκων. Οι χονδρόκοκκες αποθέσεις στην περιοχή του δέλτα εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα, η οποία μειώνεται προς το φράγμα, αφού οι αποθέσεις γίνονται όλο και πιο λεπτόκοκκες.



Σχήμα 2.6 Σχέση μεταξύ ξηρής φαινόμενης πυκνότητας των φερτών και του βάθους, στη λίμνη Mead (Strand and Pemberton, 1987). Όπως είναι φανερό, η πυκνότητα δεν αυξάνεται πάντα με το βάθος, αλλά σε ορισμένα σημεία μειώνεται. Οι δύο διαφορετικές γραμμές αφορούν δύο διαφορετικές μεθόδους συλλογής του δείγματος.

Η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων φερτών θεωρείται κατά προσέγγιση $1.3-1.8 \text{ t/m}^3$. Η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα 1 129 δειγμάτων φερτών υλικών ταμειυτήρων, που αναφέρθηκαν από τους Lara and Pemberton (1963), κυμαίνονται από 1.8 ως 3.0 t/m^3 . Ο Πίνακας 2.10 που αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πηγών των Η.Π.Α. (U.S. Natural Resources Conservation Service), απεικονίζει το εύρος του ειδικού βάρους που συναντήθηκε σε διάφορους ταμειυτήρες, ως συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων και της διαδικασίας στερεοποίησης.

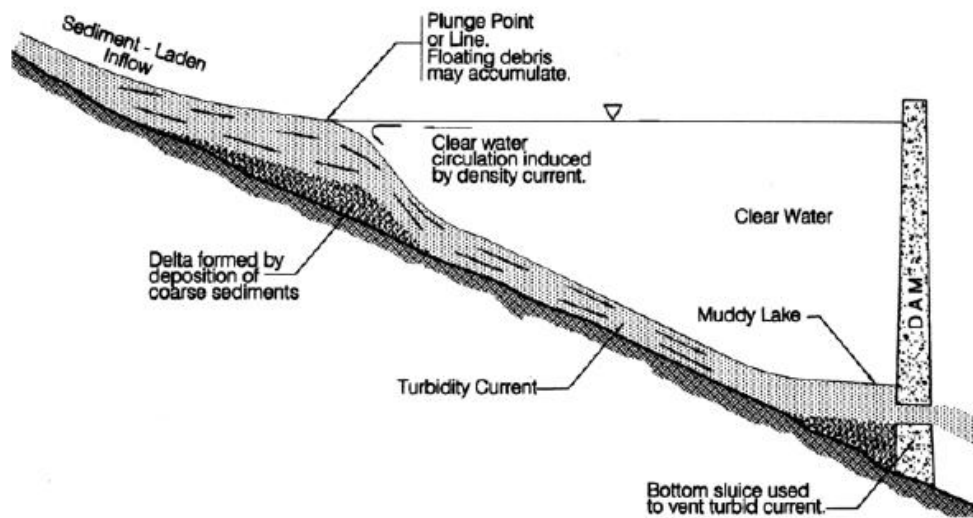
Πίνακας 2.10 Ειδικό βάρος φερτών υλικών από διάφορους ταμιευτήρες των Η.Π.Α.
(Geiger,1963)

Υλικό	Πυκνότητα (t/m ³ ή g/cm ³)	
	Πάντα βυθισμένο	Συχνά αναδυόμενο
Άργιλος	0.64-0.96	0.96-1.28
Ιλύς	0.88-1.20	1.20-1.36
Μίγμα αργίλου-ιλύος	0.64-1.04	1.04-1.36
Μίγμα άμμου-ιλύος	1.20-1.52	1.52-1.76
Άμμος	1.36-1.60	1.36-1.60
Χαλίκι	1.36-2.00	1.36-2.00
Άμμος και χαλίκι πτωχής διαβάθμισης	1.52-2.08	1.52-2.08

2.5.5 Ρεύματα πυκνότητας

Ως ρεύμα πυκνότητας ορίζεται η κίνηση ενός ρευστού, πάνω ή δια μέσω ενός άλλου ρευστού, η οποία προκαλείται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ τους. Στους ταμιευτήρες, η διαφορά πυκνότητας προκαλεί ζεστό νερό να ρέει ως ρεύμα στην επιφάνεια του ρευστού, δροσερό νερό να ρέει κατά μήκος της βάσης του προηγούμενου και κρύο, θολό νερό με μεγάλη πυκνότητα να ρέει κατά μήκος του πυθμένα. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην Εικόνα 2.16.

Ρεύματα πυκνότητας σχηματίζονται όταν νερό με φορτίο φερτών υλών εισέρχεται σε ένα ταμιευτήρα, βυθίζεται στο καθαρό νερό του και "ταξιδεύει" κατά μήκος του πυθμένα του. Καθώς αυτό ρέει προς τα κατάντη, το χονδρόκοκκο φορτίο του θα εναποτίθεται. Εάν χάσει μεγάλο μέρος του φορτίου του, εν τέλει το ρεύμα πυκνότητας θα διαχυθεί και δε θα φτάσει ποτέ ως το φράγμα. Στην περίπτωση τώρα, που ένα ρεύμα πυκνότητας φτάσει έως το φράγμα, το φορτίο του θα συσσωρευτεί εκεί, σχηματίζοντας μία λασπώδη λίμνη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.16. Ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτό, είναι η διάνοιξη εξόδων στη βάση του φράγματος, ώστε το ρεύμα να περάσει μέσω αυτών στα κατάντη.



Εικόνα 2.16 Σχηματική απεικόνιση της πορείας ενός ρεύματος πυκνότητας δια μέσου ενός ταμιευτήρα (Morris and Fan,1998).

Τα ρεύματα πυκνότητας μπορούν να σχηματίσουν δύο ειδών αποθέσεις, τις αποθέσεις του πυθμένα και τις οριζόντιες αποθέσεις. Από τη στιγμή που ένα ρεύμα πυκνότητας εισέρχεται σε ένα ταμιευτήρα, ξεκινά και η απόθεση των φερτών υλικών που αυτό μεταφέρει. Το φορτίο αυτό, πρώτα πληρώνει τα κενά του πυθμένα και έπειτα αρχίζει να σχηματίζει ένα στρώμα πάνω από αυτόν. Οι αποθέσεις συνήθως είναι παχύτερες και περιέχουν περισσότερα χονδρόκοκκα υλικά ακριβώς στο σημείο βυθίσματος του ρεύματος στον ταμιευτήρα, με το μέγεθος των κόκκων και το πάχος των αποθέσεων να μειώνεται, καθώς το ρεύμα κινείται προς τα κατάντη. Οι αποθέσεις αυτές επομένως, μπορούν να χαρακτηριστούν χονδρόκοκκες, αν και είναι αρκετά πιο λεπτόκοκκες από τις δελταϊκές αποθέσεις. Έρευνες των αποθέσεων στον ταμιευτήρα Guanting, έδειξαν πως ενώ οι δελταϊκές αποθέσεις είχαν κατά βάση διάμετρο μεγαλύτερη των 0.03 mm, τα ρεύματα πυκνότητας μετέφεραν υλικά με d_{90} από 0.01 έως 0.02 mm (Morris and Fan,1998). Στην περίπτωση που το ρεύμα πυκνότητας φτάνει στο φράγμα, θα σχηματίσει τη λασπώδη λίμνη που προαναφέρθηκε, δημιουργούνται και αποθέσεις που αποτελούνται από φερτά υλικά, τα οποία εκτείνονται σχεδόν οριζόντια ανάντη του φράγματος. Ακόμη κι αν ένα ρεύμα έχει πολύ μικρή συγκέντρωση σε φερτά υλικά, και πάλι θα σχηματίσει τέτοιου είδους αποθέσεις. Λόγω της ταχύτερης καθίζησης των χονδρόκοκκων υλικών, είναι πιθανό οι αποθέσεις να εμφανίζουν μια στρωματοποίηση, από τις χονδρόκοκκες στις λεπτόκοκκες, καθώς αυξάνεται η στάθμη σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η απουσία οριζόντιων αποθέσεων υποδηλώνει τη διάλυση του ρεύματος πυκνότητας προτού αυτό προλάβει να φτάσει το φράγμα.

Η απόθεση των φερτών υλικών προκαλεί αλλαγές στον ταμιευτήρα, οι οποίες μπορούν να μεταβάλλουν την ικανότητα ενός ρεύματος πυκνότητας να ταξιδέψει μέχρι το φράγμα. Οι αλλαγές αυτές είναι δύο ειδών, οι οποίες πηγάζουν από τα δύο είδη αποθέσεων. Αρχικά, οι αποθέσεις του πυθμένα τον αυξάνουν σε πλάτος και τον κάνουν πιο επίπεδο. Αυτό προκαλεί τη μείωση του πάχους και την αύξηση του πλάτους του ρεύματος. Εν συνεχεία, οι οριζόντιες αποθέσεις σχεδόν μηδενίζουν την κλίση του πυθμένα κοντά στο φράγμα, μειώνοντας έτσι και τις δυνάμεις που ωθούν το ρεύμα προς αυτό. Συχνή μέθοδος καταπολέμησης του φαινομένου, είναι η περιοδική έκπλυση του ταμιευτήρα, η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια, η κίνηση των ρευμάτων προς το φράγμα μπορεί να ενισχυθεί από τις δελταϊκές αποθέσεις. Αυτό συμβαίνει διότι οι αποθέσεις αυτές μειώνουν το μήκος του ταμιευτήρα και μετακινούν το σημείο βυθίσματος πιο κοντά στο φράγμα, μειώνοντας κατά συνέπεια και την απόσταση που πρέπει να διανύσουν τα ρεύματα για να φτάσουν σε αυτό.

Τα ρεύματα πυκνότητας μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στον ταμιευτήρα, τα οποία σχετίζονται με:

- α) Την έμφραξη εξόδων χαμηλής στάθμης. Τα ρεύματα πυκνότητας μπορούν να μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα φερτών υλών, οι οποίες τελικά θα αποτεθούν μπροστά στο φράγμα. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί εμπόδιο τόσο στη λειτουργία εξόδων χαμηλής στάθμης του φράγματος, όσο και στις εγκαταστάσεις υδροληψίας σε ταμιευτήρες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.
- β) Ρεύματα πυκνότητας σε συμβολή ποταμών. Πολλοί ταμιευτήρες είναι αποτέλεσμα της συμβολής ποταμών. Στην περίπτωση αυτή, απορροφή φορτισμένη με υλικά από τον ένα παραπόταμο μπορεί να δημιουργήσει ρεύματα πυκνότητας, τα οποία θα επηρεάσουν τον άλλο. Ένα ακραίο παράδειγμα αυτού του φαινομένου συνέβη στην εγκατάσταση υδροηλεκτρικής ενέργειας Liujiaxia, της Κίνας. Ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται από τον Κίτρινο Ποταμό, και βρίσκεται μόλις 1.6 km μετά την συμβολή του με τον παραποταμό Taoshe. Το πρόβλημα δημιουργείται όταν ρεύματα πυκνότητας από τον παραπόταμο βυθίζονται στον Κίτρινο Ποταμό και κυλούν τόσο ανάντη όσο και κατάντη, αφήνοντας το φορτίο τους πριν διασκορπιστούν. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα στρώμα άμμου που όλο και αυξάνεται, εμποδίζοντας την εκτροπή του νερού για παραγωγή ενέργειας, ενώ παράλληλα τα φερτά υλικά στα κατάντη, εισέρχονται στις εγκαταστάσεις υδροληψίας, προκαλώντας μεγάλες τριβές. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 15 χρόνων λειτουργίας του ταμιευτήρα, υπήρξαν δύο γεγονότα σημαντικής αύξησης των αποθέσεων στη συμβολή. Το πρώτο ήταν το 1973, όταν παρατηρήθηκαν αποθέσεις ύψους 14.7 μέτρων, με το δεύτερο να λαμβάνει χώρα 6 χρόνια αργότερα, με 15.6 μέτρα αποθέσεων να προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες.

3.ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

3.1 Μέτρα προστασίας από την απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρες

Μεγάλο πλήθος ταμιευτήρων παγκοσμίως αντιμετωπίζει το πρόβλημα της συσσώρευσης των φερτών υλικών, με τη μείωση του ωφέλιμου όγκου τους, η οποία αναπόφευκτα οδηγεί και στη μείωση του χρόνου ζωής τους. Οι νέοι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί, το υψηλό κόστος της κατασκευής, αλλά και η έλλειψη κατάλληλων χώρων για την κατασκευή νέων φραγμάτων, έχουν καταστήσει τη διατήρηση του ωφέλιμου όγκου των ήδη υπάρχοντων ταμιευτήρων ένα μείζον θέμα. Επομένως, δεν προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι με την πάροδο του χρόνου όλο και περισσότερες τεχνικές διαχείρισης των φερτών υλικών κεντρίζουν το ενδιαφέρον.

Προκειμένου να κριθεί αποτελεσματική η διαχείριση των φερτών υλικών, είναι απαραίτητη η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής διαχείρισης του προβλήματος, η οποία εξαρτάται από τον υπό εξέταση ταμιευτήρα.

Τα ζήτητα της διαχείρισης των φερτών στους ταμιευτήρες αντιμετωπίζεται με τρεις προσεγγίσεις:

- Μείωση της εισροής των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες(ελαχιστοποίηση εισροής).
- Απομάκρυνση των φερτών υλικών από τους ταμιευτήρες(μεγιστοποίηση της εκροής).
- Καθοδήγηση των φερτών υλικών, ώστε να μην εισέρχονται στους ταμιευτήρες(ελαχιστοποίηση της εισροής και της απόθεσης).

3.1.1 Παρεμπόδιση της εισροής φερτών υλικών στον ταμιευτήρα

Η μείωση της εισροής φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Πρώτον, με την καταπολέμηση της αιτίας του προβλήματος, δηλαδή της διάβρωσης, και δεύτερον με τη δημιουργία μίας μικρής λεκάνης ανάντη για τη συγκράτηση των υλικών.

α) Καταπολέμηση διάβρωσης. Μείωση του φαινομένου της διάβρωσης του εδάφους στην υδρολογική λεκάνη, μπορεί να επιτευχθεί με τις εξής μεθόδους:

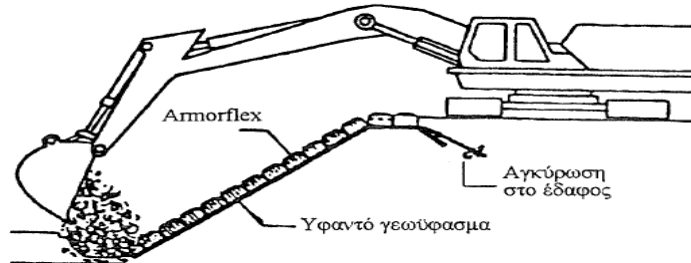
i) Με τη διατήρηση του εδάφους

Οι τεχνικές που στοχεύουν σε αυτό το αποτέλεσμα είναι συνήθως δαπανηρές και μακροχρόνιες. Η διατήρηση του εδάφους επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη καλλιεργειών, τη δημιουργία δασών και γενικότερα πυκνής βλάστησης. Επομένως, σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις η πρακτική αυτή δεν εφαρμόζεται.

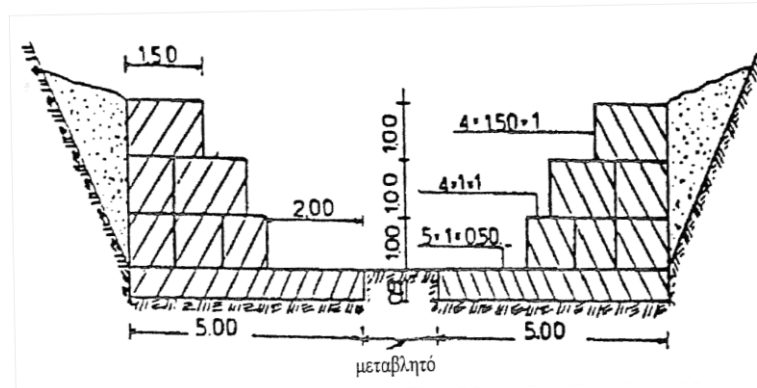
ii) Με μέτρα στο υδατικό δίκτυο

Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν στην πλήρη αποφυγή της εισροής φερτών υλικών στο δίκτυο. Έτσι, οι κατολισθήσεις κατά μήκος των ποταμών προλαμβάνονται από

ποτάμια έργα, ενώ η διάβρωση του ποταμού, τόσο σε βάθος, όσο και σε πλάτος, εμποδίζεται από φράγματα ελέγχου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φαίνονται στις Εικόνες 3.1 και 3.2.



Εικόνα 3.1 Προστασία όχθης με εύκαμπτα στρώματα στοιχείων σκυροδέματος



Εικόνα 3.2 Τοίχος αντιστήριξης όχθης με συρματοκιβώτια.

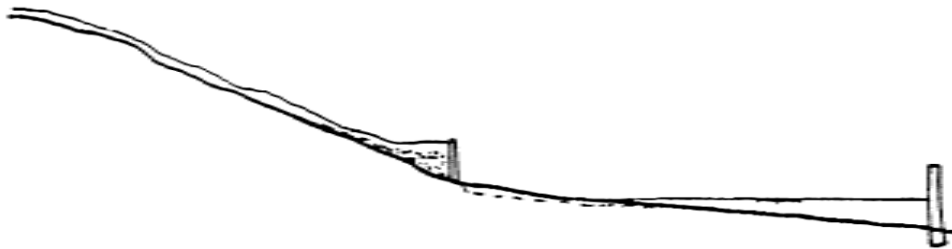
Ωστόσο πρόβλημα στη συγκεκριμένη μέθοδο δημιουργεί το γεγονός ότι όλα τα παραπάνω μέτρα αφορούν μόνο το φορτίο κοίτης. Το φορτίο σε αιώρηση δε μπορεί να συγκρατηθεί σε μία λεκάνη απορροής και σε οποιαδήποτε περίπτωση θα φτάσει στον ταμιευτήρα.

Τέτοια μέτρα εφαρμόστηκαν στις υδρολογικές λεκάνες των ταμιευτήρων Tungabhadra της Ινδίας και Elephant Butte των Η.Π.Α. (Vischer,1981).

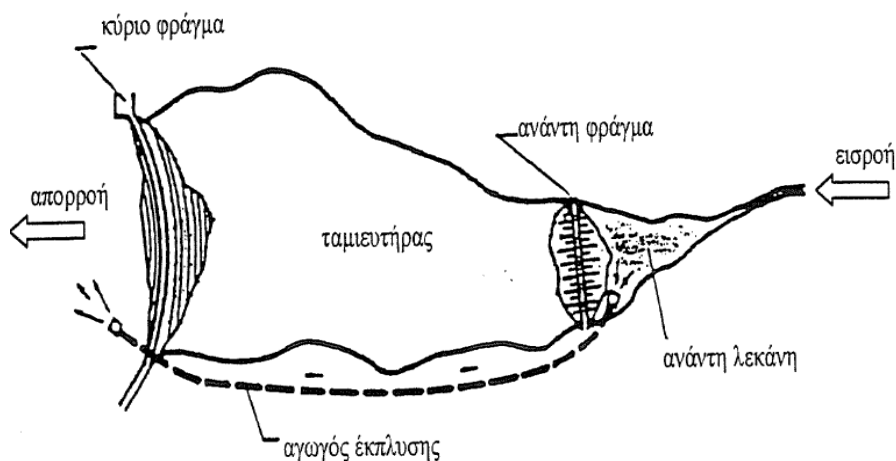
- β) Δημιουργία λεκάνης συγκράτησης ανάντη του ταμιευτήρα. Η λεκάνη χαλικιών δημιουργείται από ένα φράγμα ανάντη του ταμιευτήρα, το λεγόμενο ανάντη φράγμα, και σχεδιάζεται ως μία ζώνη αποθήκευσης. Το δευτερεύων αυτό φράγμα, είναι συνήθως πλήρως βυθισμένο κάτω από τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα και κατακρατά χονδρόκοκκα υλικά, όπως χαλίκια και άμμο, τα οποία μπορούν να καθιζάνουν αποτελεσματικά. Η κατακράτηση αυτή των υλικών, δημιουργεί ένα έλλειμμά τους στο

κατάντη τμήμα του ποταμού, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της κοίτης του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Επομένως, η αποτελεσματικότητά της μεθόδου σε βάθος χρόνου αμφισβητείται. Η εκκένωση της λεκάνης είναι δυνατή μέσω ενός αγωγού που παρακάμπτει τον ταμιευτήρα και εκβάλλει κατάντη αυτού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4 (Χρύσανθος,1989). Ο αγωγός αυτός είναι σε λειτουργία κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, με τις εφελκυστικές δυνάμεις να είναι τόσο μεγάλες, ώστε να εμποδίζουν την έμφραξή του από αποθέσεις κοκκώδους υλικού. Εναλλακτικά, η λεκάνη εκκενώνεται με μηχανική απομάκρυνση των υλικών.

Η λύση αυτή εφαρμόστηκε στους ταμιευτήρες Hushan της Βόρειας Κίνας, Tedzen της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και Amsteg της Ελβετίας (UNESCO,1985).



Εικόνα 3.3 Λεκάνη χαλικιών στην αλλαγή κλίσης ανάντη από τον ταμιευτήρα. Με διακεκομμένη συμβολίζεται πιθανή διάβρωση ποταμού κατάντη του ταμιευτήρα λόγω ελλείμματος φερτών υλικών.



Εικόνα 3.4 Ανάντη λεκάνη για συγκράτηση φορτίου κοίτης με αγωγό έκπλυσης

Για να είναι επομένως αποτελεσματική μια λεκάνη χαλικιών θα πρέπει:

- Ο ποταμός στην είσοδο του ταμιευτήρα να είναι ανθεκτικός σε μεγάλης κλίμακας διάβρωση.

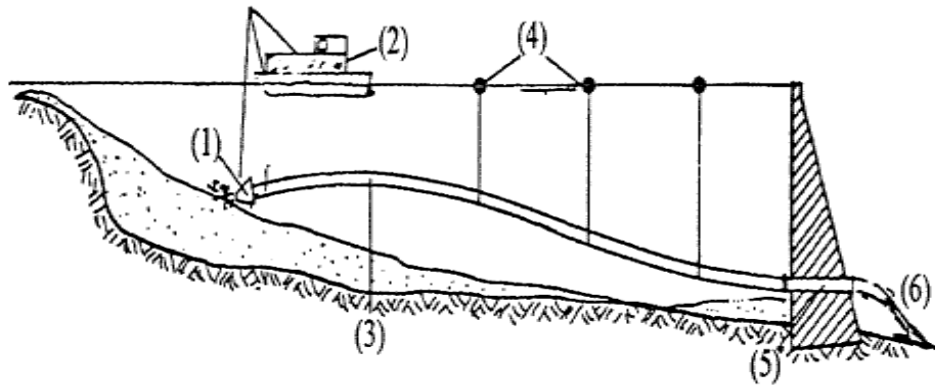
- Η διάβρωση κατάντη να μειώνεται με κατάλληλη προστασία.
- Η λεκάνη να είναι τοποθετημένη ακριβώς ανάντη του ταμιευτήρα.

3.1.2 Απομάκρυνση των φερτών υλικών από τους ταμιευτήρες

Τα μέτρα απομάκρυνσης των συσσωρευμένων υλικών από ένα ταμιευτήρα αφορούν, είτε τη διατήρηση του ωφέλιμου όγκου, είτε τη λειτουργικότητα των εξόδων και των εγκαταστάσεων υδροληψίας, είτε και τα δύο. Η απομάκρυνση αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με μηχανικό, είτε με υδραυλικό τρόπο.

α) Μηχανική απομάκρυνση. Η βυθοκόρηση (dredging) , όπως αποκαλείται η μέθοδος αυτή, πραγματοποιείται είτε από ένα πλοίο, είτε από τις όχθες του ταμιευτήρα. Η επιλογή κρίνεται με βάση το τοπικό βάθος, την ποιότητα των φερτών υλικών και τα συστήματα μεταφοράς. Ένα τέτοιο σύστημα εκσκαφής μπορεί να είναι αποτελεσματικό, με την προϋπόθεση ότι η στάθμη του ταμιευτήρα είναι σχεδόν σταθερή. Λόγω του ότι η συνοχή των υλικών που έχουν καθιζάνει είναι μεγάλη, δεν επαρκούν οι απλές συσκευές αναρρόφησης. Επομένως, η κεφαλή μιας τέτοιας συσκευής πρέπει να επεκτείνεται με ακροφύσια εκτόξευσης νερού ή με περιστρεφόμενη κεφαλή, με στόχο τη χαλάρωση του υλικού. Στην περίπτωση που το υλικό της βυθοκόρησης αποτελείται από φορτίο κοίτης, όπως χαλίκι, τότε αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί μελλοντικά για την εκπλήρωση δομικών σκοπών, όπως για παράδειγμα ως αδρανές υλικό για την παρασκευή σκυροδέματος ή για την κατασκευή/πλήρωση φραγμάτων. Στην αντίθετη περίπτωση όμως, που το υλικό αυτό αποτελείται κυρίως από φορτίο αιώρησης, όπως η ιλύς, τότε δημιουργούνται ζητήματα εκ νέου απόθεσής του, και η μέθοδος γίνεται ιδιαίτερα δαπανηρή. Μηχανική απομάκρυνση μπορεί να γίνει και εν ξηρώ, αδειάζοντας τον ταμιευτήρα κατά τη ξηρή περίοδο και απομακρύνοντας τα αποτιθέμενα υλικά. Και πάλι όμως το κόστος είναι αρκετά υψηλό και η τακτική είναι πρακτικά αδύνατη σε μεγάλους ταμιευτήρες.

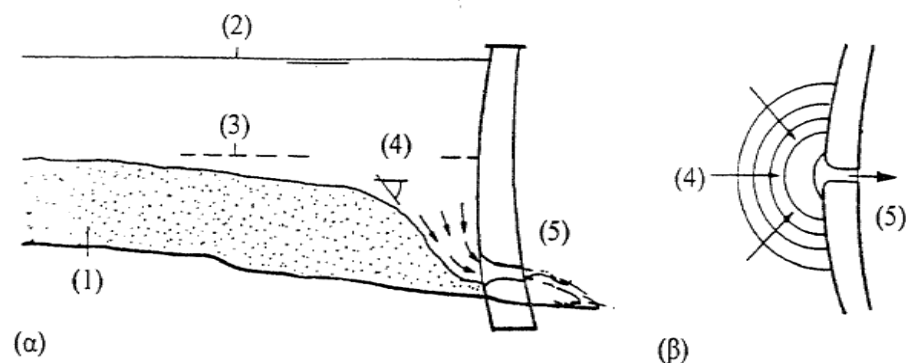
Μία ειδική λύση προτάθηκε στην Ιταλία για μικρές λίμνες (Roveri,1981). Εκεί, μία βυθοκόρος προσαρμοσμένη πάνω σε μία πλωτή εξέδρα συνδέεται με αγωγό, ο οποίος αποφορτίζει δια μέσου ενός στομίου στη βάση του φράγματος. Η βυθοκόρος δε χρειάζεται αντλίες, επειδή το υδραυλικό φορτίο μεταξύ της στάθμης του ταμιευτήρα και της εξόδου είναι επαρκές για την υδρομεταφορά. Η διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Απομάκρυνση φερτών με εκσκαφέα συνδεδεμένο με σφηνοειδή σωλήνα. 1)η κεφαλή του αγωγού, 2)η πλατφόρμα του εκσκαφέα, 3)ο αγωγός σύνδεσης, 4)οι πλωτήρες για την ανάρτηση του αγωγού, 5)ο αγωγός εξόδου και 6)τα νερά εκροής.

β) Υδραυλική απομάκρυνση. Η υδραυλική έκπλυση (flushing) γίνεται μέσω εξόδων στο σώμα του φράγματος. Διακρίνονται δύο τρόποι:

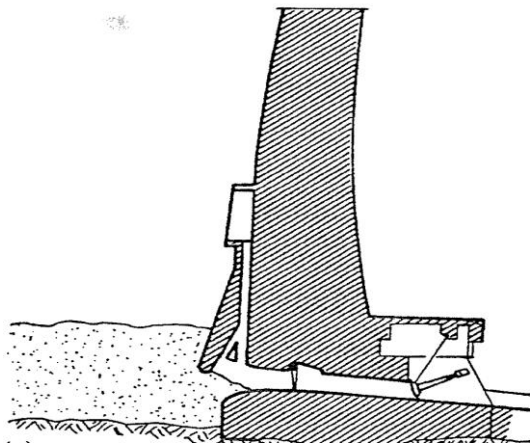
- i) Έκπλυση κάτω από πίεση, με μικρή μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα (pressure flushing). Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του υλικού που βρίσκεται ακριβώς ανάντη της εξόδου. Με τη διάνοιξή της και την έκπλυση του υλικού, δημιουργείται ένας κώνος, ο λεγόμενος κώνος έκπλυσης, που φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η απομάκρυνση ενός μικρού μόνο μέρους των αποθέσεων, γι' αυτό και η αποτελεσματικότητά της είναι περιορισμένη.



Εικόνα 3.6 Έκπλυση με μικρή μείωση της στάθμης του νερού σε α)τομή και β)κάτοψη. 1)οι αποθέσεις του ταμιευτήρα, 2)η μέγιστη στάθμη του, 3)η ελάχιστη στάθμη του, 4)κώνος έκπλυσης και 5)η έξοδος του φράγματος.

Λόγω του ότι η έξοδος δε βρίσκεται μόνιμα σε λειτουργία, μπορεί να φραχθεί λόγω της προοδευτικής κίνησης του μετώπου των φερτών ή λόγω κατολισθήσεων μέσα στον ταμιευτήρα. Η έμφραξη μπορεί επίσης να συμβεί από κορμούς δέντρων, χωρίς βέβαια αυτό να αποτελεί ένα σύνηθες φαινόμενο.

Στο Εικόνα 3.7 φαίνεται η γενική τομή της εξόδου του πυθμένα του ταμιευτήρα Gebidem της Ελβετίας.

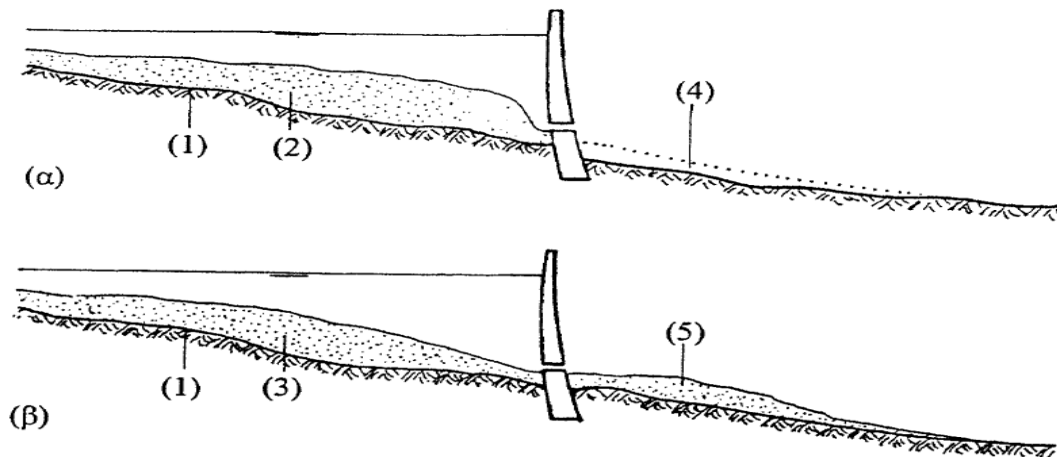


Εικόνα 3.7 Έξοδος πυθμένα Gebidem με θύρες έκπλυσης

- ii) Έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα (free flow flushing). Πρόκειται για μία τυπική διαδικασία, όπου η έκπλυση των φερτών υλικών γίνεται δια μέσου των υδάτων της εκροής, η οποία αναπτύσσεται με τη διάνοιξη εξόδων στη βάση του φράγματος. Οι συνθήκες που επικρατούν με την εκκένωση είναι όμοιες με αυτές του ποταμού που προϋπήρχε του ταμιευτήρα. Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η πραγματοποίηση διάβρωσης που μοιάζει με φαράγγι κατά μήκος του μέγιστου βάθους, ενώ είναι λιγότερο έντονη κατά μήκος των όχθων. Παρά το γεγονός ότι και σε αυτή τη μέθοδο υπάρχουν αρκετά ζητήματα προς μελέτη, η αποτελεσματικότητά της είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της προηγούμενης μεθόδου έκπλυσης.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, μεταξύ άλλων, στους ταμιευτήρες Gebidem της Ελβετίας και Hengshan του Σουδάν (UNESCO,1985).

Το βασικό πρόβλημα και των δύο μεθόδων της έκπλυσης είναι η απόθεση των υλικών που απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα ακριβώς κατάντη αυτού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3. 8 α)Εισροή φερτών υλικών σε ταμιευτήρα και β)Αποτελέσματα της έκπλυσης με την επαναπλήρωση του ταμιευτήρα. 1)Αρχική κοίτη, 2)Ζώνη απόθεσης φερτών υλικών, 3)Μειωμένη ζώνη απόθεσης μετά την έκπλυση, 4)Υποβάθμιση κατάντη του φράγματος λόγω έλλειψης φερτών και 5)Δημιουργία αποθέσεων κατάντη του φράγματος λόγω της έκπλυσης.

Όπως είναι φανερό, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης. Από τη μία πλευρά, έκπλυση μεγάλης διάρκειας με εκκένωση του ταμιευτήρα παρεμποδίζει τη λειτουργία του, από την άλλη, όμως, έκπλυση μικρής διάρκειας με μικρό καταβίβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα απομακρύνει ένα μικρό μόνο μέρος των αποθέσεων, μπροστά από τη βάση του φράγματος. Στην πράξη ωστόσο, όπως θα δούμε και παρακάτω, εφαρμόζεται κυρίως ο δεύτερος τρόπος.

3.1.3 Καθοδήγηση των φερτών υλικών ώστε να μην εισέρχονται στους ταμιευτήρες

α) Παράκαμψη του ταμιευτήρα (reservoir by-pass). Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ενδεχόμενο ο ταμιευτήρας να μπορεί να παρακαμφθεί με κατάλληλες κατασκευές, όπως για παράδειγμα με μία σήραγγα εκτροπής. Αυτό θα συμβεί κατά τη διάρκεια πλημμυρικών περιόδων, όπου παρατηρείται μεγάλη φόρτιση σε φερτά υλικά. Η σήραγγα θα οδηγήσει τη φορτισμένη ροή κατάντη του φράγματος, αποτρέποντας τη συσσώρευση υλικών στον ταμιευτήρα. Σημαντικό είναι η κατασκευή εκτροπής να έχει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένο κόστος συντήρησης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στον ταμιευτήρα Palagnedra της Ελβετίας (Vischer,1981). Μία άλλη λύση στην ίδια κατεύθυνση, αποτελεί η κατασκευή ταμιευτήρα εκτός κύριας ροής, στον οποίο θα εκτρέπονται ροές νερού με χαμηλές ποσότητες μεταφερόμενων υλικών.

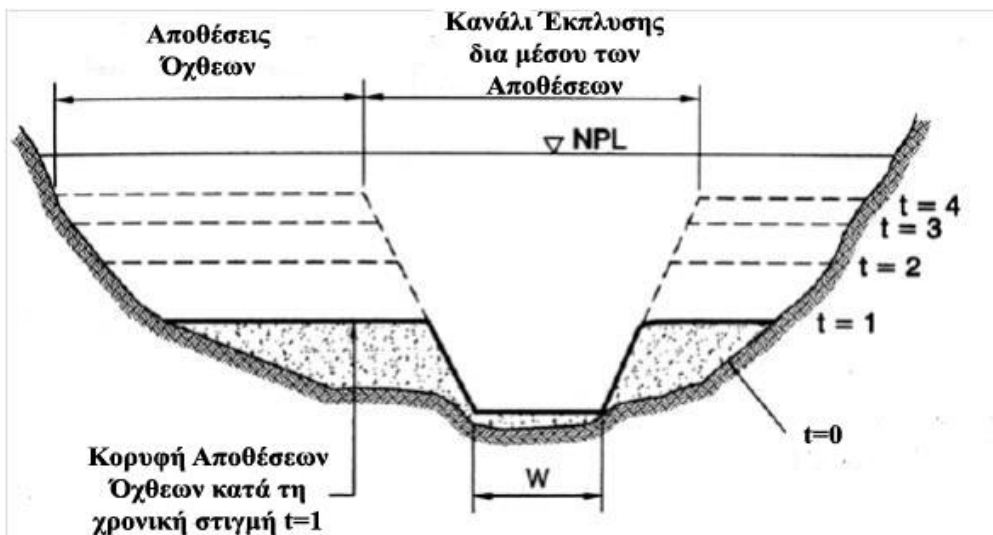
β) Διαρροή ρευμάτων πυκνότητας. Τα ρεύματα πυκνότητας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελούν ένα τρόπο με τον οποίο, οι φερτές ύλες μπορούν να δρομολογηθούν και να φτάσουν κοντά στο φράγμα. Προκειμένου τα μεταφερόμενα, με αυτό τον τρόπο, υλικά να μην συσσωρεύονται στην περιοχή του αλλά να απομακρύνονται, κατασκευάζονται κατάλληλες έξοδοι με σκοπό τη διαφυγή τους στα κατάντη. Πλεονέκτημα της μεθόδου

αποτελεί το γεγονός, ότι δεν είναι απαραίτητη η ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα.

3.2 Υδραυλική Έκπλυση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η έκπλυση στοχεύει στην απομάκρυνση από τον ταμιευτήρα του μεγαλύτερου όγκου των αποτιθέμενων φερτών υλικών. Το σημαντικότερο στοιχείο στην επίτευξη του στόχου αυτού, είναι η δημιουργία του καναλιού έκπλυσης. Η διαδικασία της έκπλυσης εφαρμόζεται σε δύο περιπτώσεις. Πρώτον, για τη διαμόρφωση του καναλιού και δεύτερον για τη συντήρησή του. Στην πρώτη φάση, οι υπάρχουσες αποθέσεις διαβρώνονται για να δημιουργηθεί το κανάλι έκπλυσης, μαζί με βοηθητικά πλευρικά ή διαμήκη κανάλια. Το πλάτος της κοίτης του καναλιού W , καθορίζεται από τις υδραυλικές συνθήκες, ενώ η κλίση των όχθων, από το ρυθμό των αποθέσεων. Σε περιοχές λεπτόκοκκων αποθέσεων, το κύριο κανάλι συνήθως ακολουθεί την πορεία του φυσικού ποταμού που προϋπήρχε. Σε αυτή τη φάση, ένα μέρος της χωρητικότητας του ταμιευτήρα μπορεί να ανακτηθεί. Κατά τη δεύτερη φάση, το κανάλι έκπλυσης έχει φτάσει το μέγεθος ισορροπίας και μόνο προσφάτως αποτιθέμενα φερτά μπορούν να απομακρυνθούν. Αντίθετα, οι αποθέσεις στις όχθες του συνεχώς θα αυξάνονται καθ' ύψος. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται συνήθως σε ετήσια βάση, αν και εκτελούνται και συχνότερες ή σπανιότερες επαναλήψεις. Μία τυπική τομή του καναλιού έκπλυσης δίνεται στην Εικόνα 3.9. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και την αναπτυσσόμενη ροή, μπορεί να χρειαστούν μακροχρόνιες επιχειρήσεις για να δημιουργηθεί το κύριο κανάλι. Το μόνο σίγουρο είναι ότι οι επαναλήψεις της διαδικασίας είναι απαραίτητες για να διατηρηθούν τα οφέλη της μεθόδου.

Κατά τις περιόδους κατακράτησης του νερού, το μεγαλύτερο μέρος των λεπτόκοκκων αποθέσεων που εισέρχονται στον ταμιευτήρα, τείνει να συσσωρεύεται στο χαμηλότερο σημείο κάθε εγκάρσιας τομής, δηλαδή μέσα στο υπάρχων κανάλι έκπλυσης. Έτσι με την επόμενη εφαρμογή έκπλυσης συντήρησης, το υλικό αυτό θα διαβρωθεί και θα απομακρυνθεί, επαναφέροντας το κανάλι στην αρχική του κατάσταση.



Εικόνα 3.9 Κανάλι έκπλυσης σε ένα φαρδύ ταμιευτήρα. Φαίνεται πως διατηρείται σταθερό με το χρόνο, σε αντίθεση με τις αποθέσεις στις παρειές του, που συνεχώς αυξάνονται καθ' ύψος

Υπάρχουν τέσσερις μηχανισμοί με τους οποίους η έκπλυση μπορεί να μειώσει τη συσσώρευση των φερτών :

- Με τη μετακίνηση των προγενέστερων αποθέσεων.
- Με την καθοδήγηση προς την έξοδο όσων υλικών εισέρχονται στον ταμιευτήρα.
- Με την απομάκρυνση των νέων αποτιθέμενων υλικών, που πραγματοποιείται με κάθε επανάληψη της μεθόδου.
- Με την κίνηση των ρευμάτων πυκνότητας προς το φράγμα, η οποία διευκολύνεται από τη γεωμετρία του καναλιού έκπλυσης.

3.2.1 Είδη και στάδια έκπλυσης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, υπάρχουν δύο είδη έκπλυσης: η έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα και αυτή με μερικό, μόνο, καταβιβασμό της στάθμης του.

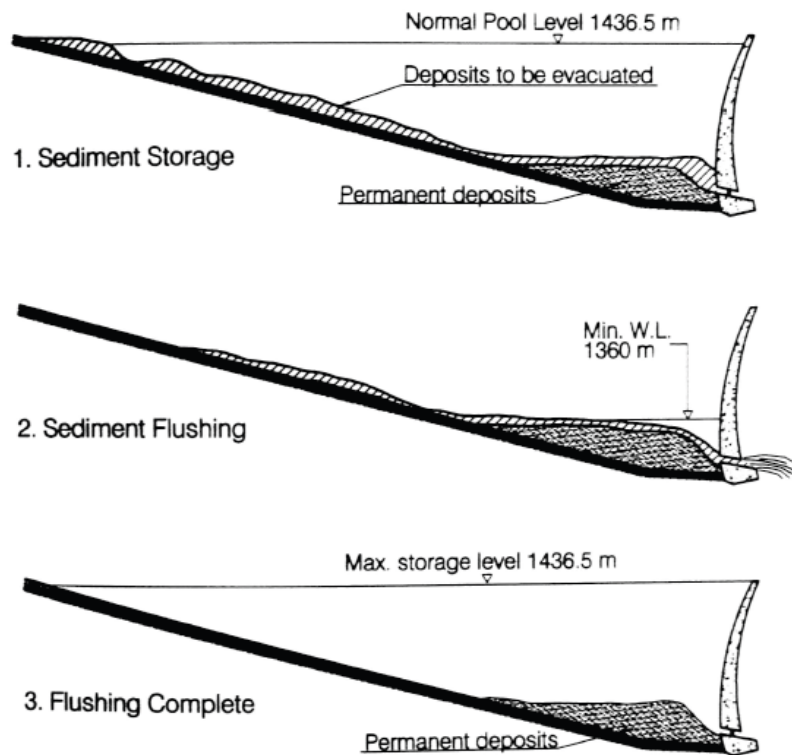
α) Έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα. Η εκκένωση του ταμιευτήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά τις πλημμυρικές περιόδους, είτε όχι. Στην πρώτη περίπτωση, ο ταμιευτήρας εκκενώνεται στο πρώτο μέρος της περιόδου, ενώ οι πρώτες πλημμύρες εισέρχονται σε αυτόν χωρίς να προκαλούν ιδιαίτερες αλλαγές. Η επαναπλήρωση συμβαίνει κατά το τελευταίο τμήμα της περιόδου. Οι ενδεχόμενες ανάγκες άρδευσης καλύπτονται από τη ροή που διαπερνά τον ταμιευτήρα. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης φερτών στο νερό που καταλήγει κατόπιν, τα κανάλια άρδευσης που υπάρχουν εκεί, θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν δεχόμενα υψηλές δυνάμεις τριβής, αλλά και εξίσου υψηλές ταχύτητες ροής. Δυνατή είναι επίσης η εκκένωση του ταμιευτήρα, όταν οι απαιτήσεις σε νερό δεν είναι μεγάλες. Στη δεύτερη περίπτωση, που ο

ταμιευτήρας εκκενώνεται κατά τις μη πλημμυρικές περιόδους, απαιτείται συνήθως μεγαλύτερος χρόνος έκπλυσης, λόγω της μικρότερης απορροής. Η μικρότερη απορροή προκαλεί την τάση συσσώρευσης των χονδρόκοκκων υλικών. Αναμένεται έτσι, μεγαλύτερη απόθεση στις όχθες του καναλιού.

β) Έκπλυση με μερικό καταβίβασμό της στάθμης. Η υδραυλική έκπλυση είναι περισσότερο αποτελεσματική στη διατήρηση της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, όταν οι έξοδοι τοποθετούνται στο επίπεδο της κοίτης και ο ταμιευτήρας εκκενώνεται πλήρως. Ωστόσο, πολλές φορές περιορισμοί εμποδίζουν είτε το μηδενισμό της στάθμης, είτε την τοποθέτηση των εξόδων σε χαμηλή στάθμη, οδηγώντας αναγκαστικά σε έκπλυση με μερικό καταβίβασμό της στάθμης των υδάτων. Υπάρχουν δύο παραδείγματα της μεθόδου αυτής, τα οποία θα αναλυθούν ακριβώς παρακάτω. Στο πρώτο, η στάθμη επανειλημμένως φτάνει το ελάχιστο όριο λειτουργικότητας του ταμιευτήρα και τα φερτά μεταφέρονται μέσω των εξόδων που βρίσκονται στη βάση του φράγματος, όπως στον ταμιευτήρα Gebidem της Ελβετίας. Στο δεύτερο, το νερό περνά μέσω εξόδων που βρίσκονται στο επίπεδο υδροληψίας ή πάνω από αυτό. Η μέθοδος αυτή σταματά τις πλημμυρικές περιόδους.

i) Έκπλυση από εξόδους στη βάση του φράγματος. Στη μέθοδο αυτή, η στάθμη πέφτει μέχρι ένα ελάχιστο επίπεδο λειτουργικότητας και τότε οι έξοδοι στη βάση του φράγματος ανοίγουν, δημιουργώντας κωνικής μορφής αποθέσεις στην περιοχή της εξόδου, το λεγόμενο κώνο έκπλυσης. Η μείωση της στάθμης προκαλεί τη μετακίνηση υλικών από το άνω άκρο του ταμιευτήρα προς τα κατόντη, δυνατότητα να εκπλυθούν όμως, έχουν μόνο όσα υλικά βρίσκονται στον κώνο έκπλυσης. Η Εικόνα 3.10 απεικονίζει ακριβώς αυτή τη διαδικασία.

Για παράδειγμα, στον ταμιευτήρα Gebidem της Ελβετίας, εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν πως ο κώνος έκπλυσης μπορεί να εκκενωθεί σε δύο με τρεις ώρες, θα χρειαστεί όμως 20 με 30 ώρες για να ξαναγεμίσει φερτά. Για να παροχετευθεί η ποσότητα των 400 000 με 500 000 m³/yr της εισερχόμενης ροής φερτών, θα χρειάζονταν 10 με 15 επαναλήψεις της διαδικασίας το χρόνο (Ullmann,1970). Είναι επομένως πλήρως κατανοητό πως μία τέτοια μέθοδος δεν είναι αποτελεσματική.



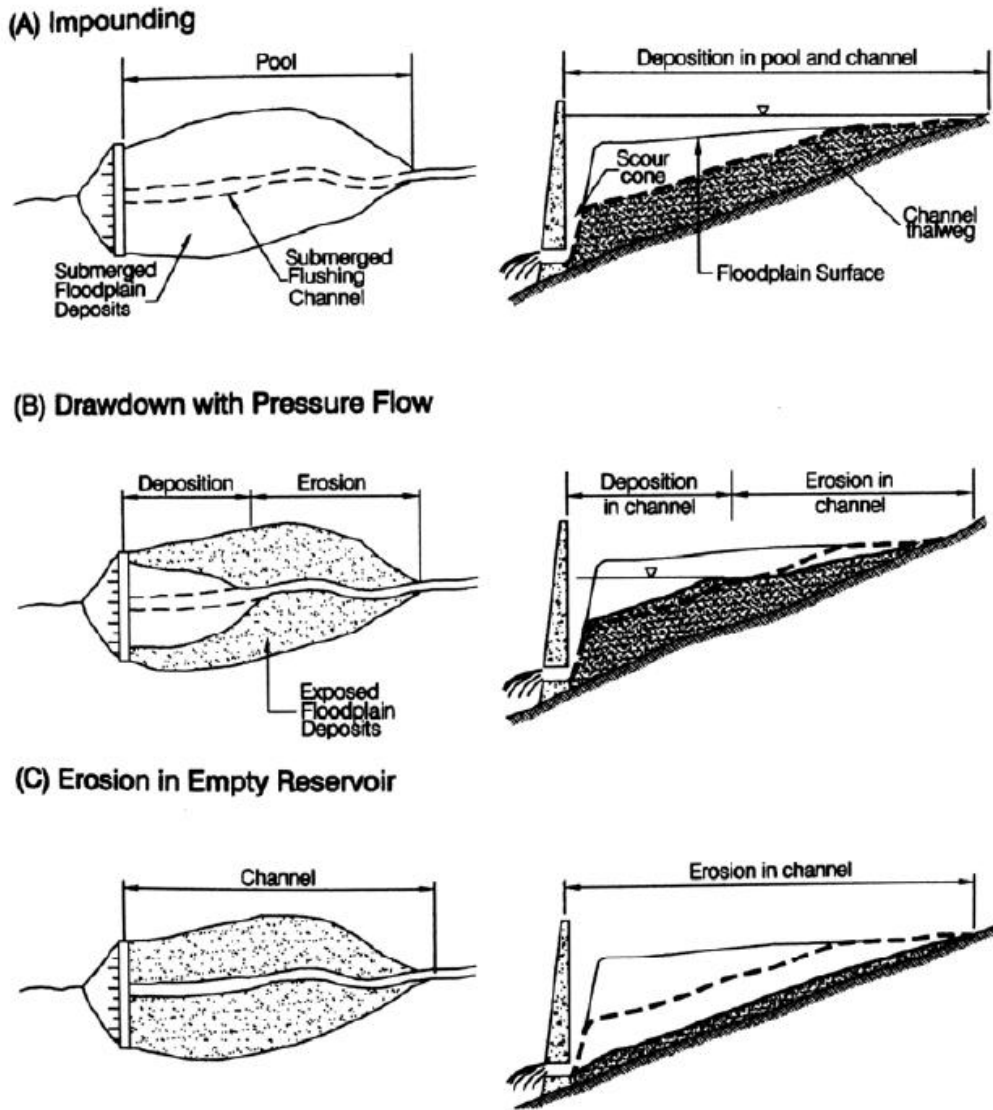
Εικόνα 3.10 Ακολουθία έκπλυσης υπό πίεση (Ullmann,1970). 1)Κατάσταση λειτουργίας του ταμιευτήρα. 2)Κατάσταση έκπλυσης. 3)Τέλος της διαδικασίας.

ii) Έκπλυση από εξόδους υψηλής στάθμης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της μεθόδου αυτής, είναι το φράγμα Tarbela του Πακιστάν. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα, που προορίζεται για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και παροχή νερού άρδευσης. Στο έργο μελετήθηκαν πολλές μέθοδοι διαχείρισης του προβλήματος των φερτών υλικών, προτού οι μηχανικοί καταλήξουν στη λύση της έκπλυσης μέσω ενός αγωγού παράκαμψης του ταμιευτήρα, ο οποίος θα κατασκευαστεί σε υψηλή στάθμη. Η μέθοδος κατατάσσεται στην κατηγορία της έκπλυσης και όχι σε αυτή της καθοδήγησης των φερτών υλικών, διότι περιλαμβάνει την προσωρινή αποθήκευση και έπειτα την επανακινητοποίηση των υλικών. Για την επιτυχή λειτουργία του αγωγού, κατασκευάστηκε και ένα ανάχωμα το οποίο εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Αφενός, προστατεύει τις εισόδους της υδροληψίας από τα φερτά υλικά κατά τον καταβίβασμό της στάθμης, και αφετέρου καθοδηγεί τη ροή προς τον αγωγό έκπλυσης.

Πολλοί ερευνητές μελέτησαν τη διαδικασία της έκπλυσης, μεταξύ των οποίων οι Morris and Fan(1998), Shen and Lai (1996), Albertson et al (1996). Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, κάθε επεισόδιο έκπλυσης έχει τρία διακριτά στάδια: τον καταβίβασμό της στάθμης, τη

διάβρωση, και την επαναπλήρωση του ταμιευτήρα, με τα δύο πρώτα να εξελίσσονται παράλληλα.

Σύμφωνα με τον Shen, η διαδικασία καταβιβασμού της στάθμης, θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο στάδια, κατά τη διάρκεια των οποίων απεικονίζεται ο ταμιευτήρας στην Εικόνα 3.10. Στο πρώτο στάδιο, η προκαταρκτική μείωση της στάθμης φέρνει τον ταμιευτήρα σε ένα ελάχιστο επίπεδο λειτουργικότητας, διαθέτοντας το νερό σε διάφορες χρήσεις. Τότε, η ταχύτητα στο άνω άκρο του ταμιευτήρα αυξάνεται, με αποτέλεσμα τα φερτά υλικά να διαβρώνονται από εκεί και να μεταφέρονται προς την έξοδο του φράγματος, όπου και επανα-αποτίθενται (Εικόνα 3.10(b)). Η φάση αυτή συνήθως διαρκεί μερικές μέρες ή εβδομάδες. Στο δεύτερο στάδιο, με την τελική μείωση της στάθμης ουσιαστικά εκκενώνεται ο ταμιευτήρας, χρησιμοποιώντας τις εξόδους στη βάση του φράγματος. Τότε η ταχύτητα γίνεται αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορούν να διαβρωθούν οι αποθέσεις σε όλο το μήκος του ταμιευτήρα (Εικόνα 3.10(a)). Η φάση αυτή διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα, συνήθως μερικές ώρες. Κατά τη μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα, μπορεί να παρατηρηθούν σύνθετα πρότυπα μεταφοράς των φερτών υλικών. Ο Shen υποστηρίζει πως το τελευταίο στάδιο είναι ικανό να αποκαταστήσει τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, αφού είναι αυτό που απομακρύνει τη μεγαλύτερη ποσότητα αποτιθέμενων υλικών



Εικόνα 3.11 Ανακατανομή φερτών κατά τη διαδικασία της έκπλυσης (Morris & Fan, 1998). Α) Περίοδος κατακράτησης νερού, με απόθεση υλικών τόσο στο κανάλι έκπλυσης, όσο και την κοίτη. Β) Έκπλυση με μερικό καταβιβασμό της στάθμης, με διάβρωση του άνω άκρου των αποθέσεων και επανατοποθέτησή του στην περιοχή του φράγματος. Γ) Έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα, με διάβρωση σε όλο το μήκος των αποθέσεων κάτω από συνθήκες ελεύθερης ροής.

Τέλος, η επαναπλήρωση ξεκινά με το κλείσιμο των εξόδων του φράγματος. Τότε, η στάθμη του ταμιευτήρα όλο και αυξάνεται, γεγονός που προκαλεί την απόθεση των φερτών υλικών μέσα στη λεκάνη. Σε αυτό το στάδιο, μπορεί να ελευθερωθεί από την έξοδο του φράγματος νερό με χαμηλότερη συγκέντρωση σε φερτά, ώστε να διαβρώσει τις αποθέσεις που έχουν ήδη δημιουργηθεί από το προηγούμενο στάδιο, ακριβώς κατάντη αυτού.

3.2.2 Διαδικασίες διάβρωσης κατά την έκπλυση

Κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου έκπλυσης, κυριαρχούν τέσσερα είδη διάβρωσης, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- α) Έντονη μείωση στάθμης στην περιοχή του φράγματος. Όταν μία έξοδος στη βάση του φράγματος ανοίγει για πρώτη φορά, και με την προϋπόθεση ότι λεπτόκοκκα υλικά έχουν συσσωρευθεί πάνω από αυτή, είναι δυνατό να παρατηρηθεί αστοχία της κλίσης στην περιοχή, λόγω της κατάπτωσης των αποθέσεων. Αυτό το βύθισμα φαίνεται στην Εικόνα 3.12 από το μικρό φράγμα Santa Maria στη Γουατεμάλα (Morris and Fan, 1998).



Εικόνα 3.12 Κατάπτωση των λεπτόκοκκων φερτών κοντά στο φράγμα. Αυτή επιταχύνθηκε και η μετακίνηση ενισχύθηκε κλείνοντας τις πύλες, ώστε προσωρινά να βυθιστούν οι αποθέσεις και ανοίγοντάς τες πάλι, αποστραγγίζοντας έτσι τον ταμιευτήρα για δεύτερη φορά.

Ένα παρόμοιο πρότυπο έχει επίσης παρατηρηθεί από τον Fan σε μικρούς ταμιευτήρες του Πουέρτο Ρίκο. Στη Νέα Ζηλανδία τώρα, στο έργο του Mangaho ποταμού, η έξοδος του φράγματος ήταν θαμμένη κάτω από 13 μέτρα ιλύος, αφού επί 25 χρόνια δεν είχε

πραγματοποιηθεί καμία επιχείρηση έκπλυσης. Την πρώτη μέρα διάνοιξης της εξόδου δεν παρατηρήθηκε ροή, κατά τη δεύτερη όμως, υλικό εξήλθε από την έξοδο, αδειάζοντας τον ταμιευτήρα. Τότε παρατηρήθηκε μία διαμόρφωση σχήματος κρατήρα μπροστά από την έξοδο (Jowett,1984).

β) Παλινδρομική διάβρωση. Η διάβρωση καναλιού, η οποία χαρακτηρίζεται από μία ζώνη μεγάλης κλίσης και ταχείας διάβρωσης και μετακινείται προς τα ανάντη κατά μήκος του, καλείται παλινδρομική διάβρωση. Η διάβρωση αυτή είναι η κύρια μέθοδος διαμόρφωσης του καναλιού έκπλυσης. Η διάνοιξη εξόδων σε μεγάλο βάθος καθιερώνει μία ροή δια μέσου των αποθέσεων με ήπια κλίση, η οποία καταλήγει σε απότομη πτώση-έως και καταρράκτη-στο κατάντη άκρο. Εκεί δημιουργείται ένα σημείο απότομης αλλαγής της κλίσης (nickpoint), το οποίο μπορεί να μετακινείται προς τα ανάντη γρήγορα, αναλόγως με τη φύση των αποθέσεων και τις διαβρωτικές δυνάμεις. Στον ταμιευτήρα Sanmenxia του Κίτρινου Ποταμού, για παράδειγμα, μία περιοχή μήκους 80 km ανάντη από το φράγμα επηρεάστηκε από την παλινδρομική διάβρωση κατά τη περίοδο Οκτώβριου-Νοέμβριου 1964, το μεγαλύτερο σε διάρκεια τέτοιο φαινόμενο. Το σημείο της απότομης αλλαγής κλίσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα εμφανές, όπως στις Εικόνα 3.13 και 3.14.



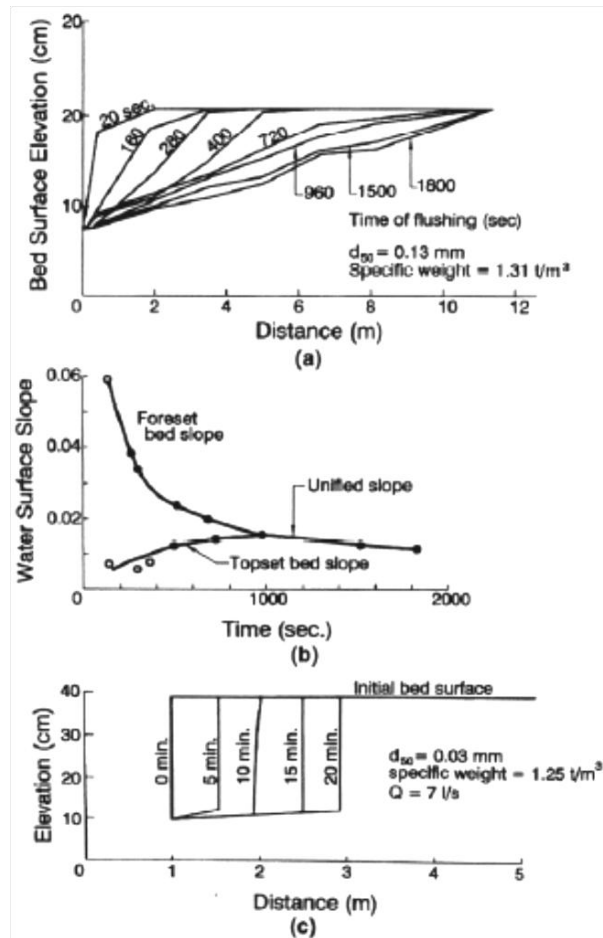
Εικόνα 3.13 Σημείο απότομης αλλαγής κλίσης (nickpoint) στον ταμιευτήρα Sefid-Rud του Ιράν (Tolouie,1993).

Αυτός ο τύπος διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της αλλαγής της υδραυλικής ενέργειας που προκαλείται από το ασυνεχές διαμήκες εδαφικό προφίλ και δεν εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων των αποθέσεων. Έτσι, παλινδρομική διάβρωση μπορεί να συμβεί στα χονδρόκοκκα φερτά υλικά σε ένα δέλτα ποταμού (Randle and Lyons,1995), όπως επίσης και στα λεπτόκοκκα και συνεκτικά υλικά αυτών. Ανάλογα με τη φύση των αποθέσεων βέβαια, αλλάζει η μορφή με την οποία αναπτύσσεται η διάβρωση.



Εικόνα 3.14 Σημείο απότομης αλλαγής κλίσης παλινδρομικής διάβρωσης, ταμιευτήρας Heisonglin, της Κίνας (Morris and Fan, 1998).

Στο Σχήμα 3.1, το οποίο είναι βασισμένο σε παρατηρήσεις σε ένα ρεύμα σε εργαστηριακό επίπεδο, φαίνονται τα δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Στο Σχήμα 3.1(a) παρουσιάζεται το εδαφικό προφίλ για μη στερεοποιημένα και μη συνεκτικά υλικά, ενώ στο Σχήμα 3.1(c) για στερεοποιημένα και συνεκτικά υλικά.



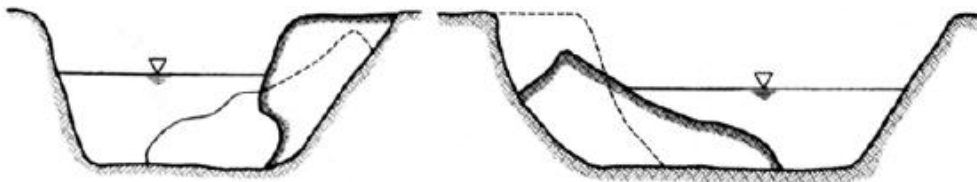
Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικά παλινδρομικής διάβρωσης από εργαστηριακές δοκιμές. α) Διαμήκες προφίλ σε μη στερεοποιημένες αποθέσεις, β) Μετάβαση σε μια ομοιόμορφη κλίση, γ) Διαμήκες προφίλ σε στερεοποιημένα εδάφη (Morris and Fan, 1998).

Κατά την έναρξη της διάβρωσης, παρατηρούνται διαφορετικά είδη κλίσεων, τα οποία μεταβαίνουν σταδιακά σε μια πιο ενοποιημένη κλίση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(β). Τη στιγμή που επιτυγχάνεται η ενοποιημένη αυτή κλίση, η παλινδρομική διάβρωση τελειώνει και η διαδικασία της διάβρωσης πλέον χαρακτηρίζεται προοδευτική.

γ) Προοδευτική Διάβρωση. Ο όρος προοδευτική διάβρωση χαρακτηρίζει τη διάβρωση καναλιού που συμβαίνει ομοιόμορφα ή προοδευτικά κατά μήκος του, αντί να είναι συγκεντρωμένη στο κατάντη άκρο του. Όταν η συγκέντρωση του ρέοντος νερού σε φερτά υλικά είναι μικρότερη από τη μεταφορική του ικανότητα, στη ροή θα εισαχθούν υλικά από τον πυθμένα του καναλιού. Αυτό συμβαίνει όταν καθαρό νερό εισέρχεται σε μία ζώνη διαβρώσιμων αποθέσεων, η οποία έχει ομοιόμορφη κλίση και εξίσου ομοιόμορφο μέγεθος υλικών. Ο ρυθμός της διάβρωσης του πυθμένα θα είναι εν τέλει γοργός, λόγω της μεγάλης μεταφορικής ικανότητας που έχει διαθέσιμη το καθαρό νερό. Καθώς η ροή μετακινείται προς τα κατάντη, εισάγοντας φερτά σε αυτή, η ικανότητα να

διαβρώνει και να μεταφέρει νέα υλικά θα μειώνεται, φτάνοντας τελικά σε μηδενική τιμή. Με αυτό τον τρόπο, η προοδευτική διάβρωση προκαλεί μεγάλο ρυθμό διάβρωσης του πυθμένα στο ανάντη άκρο των αποθέσεων και μικρότερο στο κατάντη. Αυτό το μοτίβο διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί αντιστάθμισμα στην τάση των αποθέσεων να είναι περισσότερο χονδρόκοκκες και λιγότερο διαβρώσιμες στο ανάντη άκρο.

δ) Αστοχία κλίσης. Η διάβρωση του καναλιού έκπλυσης δημιουργεί ασταθείς όχθες, οι οποίες πιθανότατα θα παρασυρθούν μέσα στο κανάλι, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.15 και 3.16. Η διαπλάτυνση αυτή του καναλιού, είναι η πρωταρχική αιτία της αστοχίας της όχθης. Το κύριο κανάλι έκπλυσης μπορεί να αυξάνεται σε πλάτος, έως ότου αντιμετωπίσει το θωρακισμένο πυθμένα του αρχικού ποταμού, αυτού δηλαδή που προϋπήρχε της δημιουργίας του ταμιευτήρα. Αφού συμβεί αυτό, περαιτέρω αύξηση του πλάτους μπορεί να συμβεί μόνο με αστοχία της όχθης. Το είδος της αστοχίας της κλίσης και η σταθερή γωνία ηρεμίας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των φερτών υλικών.



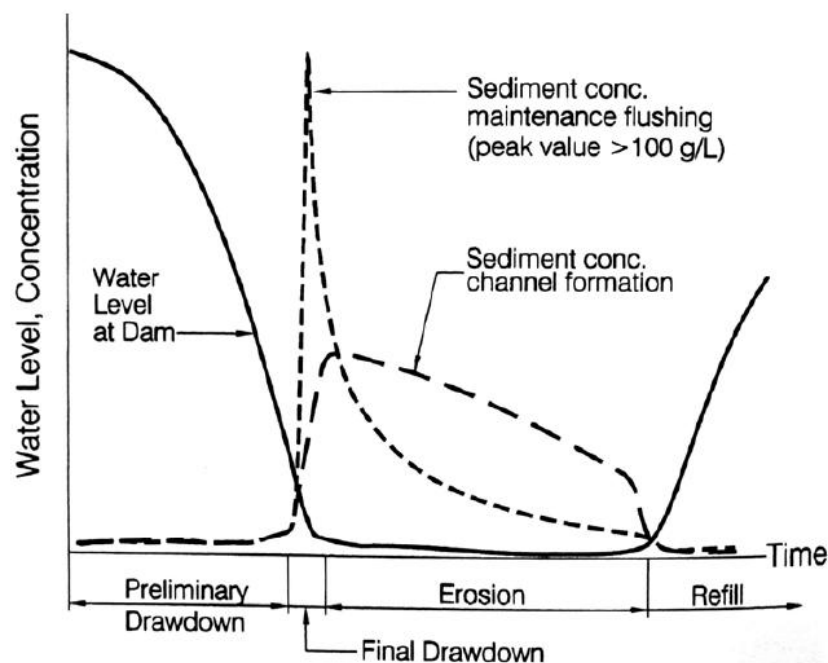
Εικόνα 3.15 Αστοχία όχθης, αποτελούμενης από στερεοποιημένα φερτά υλικά. Ταμιευτήρας Sefid-Rud (Tolouie,1993).



Εικόνα 3.16 Αστοχία όχθης, αποτελούμενη από μη στερεοποιημένη άργιλο και ιλύ. Ταμιευτήρας Sefid-Rud (Tolouie,1993).

Τα υλικά που απελευθερώνονται μέσω της έκπλυσης, τα οποία είναι προϊόντα της διάβρωσης που συμβαίνει στον ταμιευτήρα, χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση και μεγάλη ποικιλία τιμών.

Η πορεία της στάθμης του νερού του ταμιευτήρα και της συγκέντρωσης των φερτών υλικών κατά τη διάρκεια έκπλυσης με εκκένωση του ταμιευτήρα, φαίνονται στο Σχήμα 3.2. Στην περίπτωση της έκπλυσης διαμόρφωσης του καναλιού, υλικά που αποτέθηκαν τα προηγούμενα χρόνια ή ακόμα και δεκαετίες πριν, συνεχώς διαβρώνονται, παράγοντας συγκεντρώσεις φερτών που είναι αρχικά υψηλές και σταδιακά μειώνονται. Στην περίπτωση της έκπλυσης συντήρησης όμως, η μετάβαση από τον καταβιβασμό της στάθμης στην ποτάμια ροή χαρακτηρίζεται από μία δραματική αύξηση της συγκέντρωσης της εκροής σε φερτά υλικά. Αυτό συμβαίνει διότι τα μη στερεοποιημένα, προσφάτως αποθεθειμένα, λεπτόκοκκα υλικά του βυθισμένου καναλιού διαβρώνονται εύκολα και εκκενώνονται με έντονο ρυθμό από την περιοχή του φράγματος, δημιουργώντας συγκεντρώση εκατοντάδων γραμμαρίων ανά λίτρο. Η συγκέντρωση αυτή ωστόσο, διαρκεί για ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα, μιας και τα υλικά αυτά εξαντλούνται γρήγορα, λόγω της περιορισμένης ποσότητάς τους. Πέρα από το υλικό αυτό, η διάβρωση δεν έχει να προσφέρει κάτι άλλο, με αποτέλεσμα την απότομη μείωση της συγκέντρωσης.



Σχήμα 3.2 Πορεία στάθμης νερού του ταμιευτήρα και συγκέντρωσης σε φερτά υλικά, κατά τις τρεις φάσεις της έκπλυσης. Με διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται η καμπύλη της συγκέντρωσης, ενώ με συνεχή γραμμή αυτή της στάθμης του ταμιευτήρα. Παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκέντρωσης σε φερτά υλικά κατά την έκπλυση συντήρησης (τιμές μεγαλύτερες των 100 g/L).

Η έντονη μεταβλητότητα των τιμών της συγκέντρωσης παρατηρείται επίσης και στους ταμιευτήρες Sefid-Rud και Cachi, στον Πίνακα 3.1. Εκεί είναι φανερό πως οι συγκεντρώσεις αιχμής, κατά τη διάρκεια έκπλυσης συντήρησης στον ταμιευτήρα Sefid-Rud, είναι σχεδόν διπλάσιες των αντίστοιχων κατά τη διάρκεια της έκπλυσης σχηματισμού του καναλιού.

Πίνακας 3.1 Μεταβολές στην εκκένωση των φερτών υλικών και στη συγκέντρωσή τους, κατά τη διάρκεια των δύο φάσεων της έκπλυσης. Με αστερίσκο είναι οι συγκεντρώσεις που αφορούν το σχηματισμό του καναλιού έκπλυσης (Morris and Fan,1998).

Year	Cachi		Sefid-Rud	
	Peak Concentration, g/L	Sediment Removal 10 ⁶ t	Peak Concentration g/L	Sediment Removal 10 ⁶ t
1981		0.477	170*	24
1982		0.386	180*	12
1983		0.545	145*	52
1984		0.665	195	68
1985			344	142
1986			330	46
1987			292	27
1988	430	1.266	305	57
1989	170	0.482	398	54
1990	280	0.653	284	32

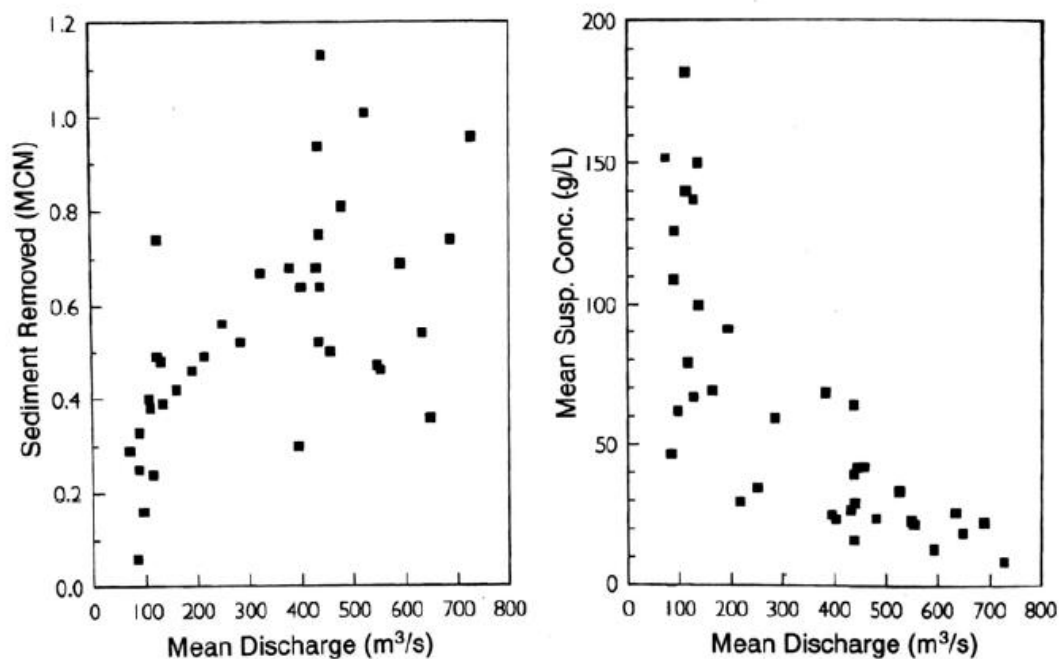
*Channel formation stage. All other events are maintenance flushing.

Source: Sefid-Rud data from Tolouie (1993); Cachf data from Ramirez and Rodriguez (1992).

Εντύπωση ακόμη προκαλεί η έντονη διακύμανση του όγκου των φερτών που εξέρχεται από τον ταμιευτήρα κατά τα γεγονότα έκπλυσης συντήρησης, στον ταμιευτήρα Cachi. Το μεγάλο φορτίο που εκκενώθηκε το 1988 αντικατοπτρίζει μεγάλη εισαγωγή φορτίου λόγω πλημμυρών και κατολισθήσεων (Jansson,1992a). Η μεγάλη μεταβλητότητα των παραπάνω τιμών παρατηρήθηκε όταν και οι δύο ταμιευτήρες λειτουργούσαν με ένα διαρκώς σταθερό τρόπο. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι οι μεταβολές αυτές οφείλονται σε φυσικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα, όπως οι πλημμύρες. Συνεπώς οι μετρήσεις αυτές δείχνουν τη μεγάλη δυσκολία να προβλέψει κανείς με ακρίβεια την ποσότητα φερτών που θα απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια των γεγονότων έκπλυσης.

Δεδομένα από 38 επεισόδια έκπλυσης με πλήρη καταβίβαση της στάθμης στο σταθμό παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας Zemo-Afchar, που είναι τοποθετημένος στην πρώην Σοβιετική Ένωση, καταγράφηκαν από τους Gnelessiani and Shimaltsel το 1968. Οι μετρήσεις αυτές και πάλι δείχνουν μεγάλη μεταβλητότητα. Κατά τα δύο πρώτα χρόνια της λειτουργίας του, ο ταμιευτήρας έχασε το 44% της χωρητικότητάς του, τα επόμενα οκτώ χρόνια έχασε 38% επιπλέον, ενώ τέλος, ακόμα 4% χάθηκε τα επόμενα 18 χρόνια (1937-1954). Πριν το

1939, ο ταμιευτήρας λειτουργούσε με επιχειρήσεις έκπλυσης με μερικό καταβιβασμό της στάθμης, οι οποίες όμως δε φάνηκαν αποτελεσματικές. Από το 1939 έως το 1966, πραγματοποιούνταν μόνο επιχειρήσεις εκκένωσης, με δεδομένα 36 εξ' αυτών να έχουν καταγραφεί. Η συχνότητα των επαναλήψεων κυμαίνεται από μία έως τέσσερις φορές το χρόνο. Η σχέση μεταξύ της μέσης συγκέντρωσης σε φερτά που εκπλένονται και της μέσης απορροής κάτω από το φράγμα, φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Έτσι είναι φανερό, πως μεγαλύτερες απορροές τείνουν να μετακινήσουν περισσότερα φερτά, έχοντας όμως μικρότερη μέση συγκέντρωση αυτών. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση συνδέεται με τη συντομότερη περίοδο έκπλυσης, αφού η μεγαλύτερη συγκέντρωση υλικών παρατηρείται στην αρχή κάθε γεγονότος, ενώ με το χρόνο αυτή μειώνεται. Υπάρχει μεγάλο εύρος διακύμανσης από το ένα γεγονός στο άλλο, λόγω παραγόντων όπως, η διάρκεια της έκπλυσης και η συσσώρευση των υλικών ανάμεσα στα γεγονότα. Ενδεικτικά, οι συγκεντρώσεις αιχμής της απορροής σε δύο γεγονότα καταγράφηκαν να είναι 270 και 340 g/L.



Σχήμα 3.3 Σχέσεις της απορροής έκπλυσης για 36 γεγονότα έκπλυσης στον ταμιευτήρα Zemo-Afchar. Η μέση απορροή αναφέρεται στη διάρκεια της έκπλυσης.

Οι Guo and Li (1984) ανέλυσαν την έκπλυση του ταμιευτήρα Hengshan της Κίνας, και συμπέραναν ότι μικρότερου μεγέθους απορροή, δημιουργεί ένα στενό βαθύ κανάλι έκπλυσης, ενώ ένα πιο πλατύ κανάλι μπορεί να δημιουργηθεί από μεγαλύτερη ροή. Στην ουσία, το κανάλι μπορεί να γίνει βαθύτερο από μεγαλύτερη ή μικρότερη ροή, την αύξηση του πλάτους όμως την πετυχαίνει μόνο η μεγαλύτερη. Στην Κίνα, αποδείχθηκε η υπόθεση ότι η επίδραση της έκπλυσης μεγιστοποιείται, όταν ο ταμιευτήρας εκκενώνεται ακριβώς πριν την έλευση της πλημμύρας. Έτσι, η πλημμυρική ροή μπορεί να ασκήσει τις διαβρωτικές

της δυνάμεις σε αποθέσεις που δεν είχαν την ευκαιρία να αφυδατωθούν πλήρως και να στερεοποιηθούν μετά την εκκένωση του ταμιευτήρα. Η φράση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα παραπάνω είναι “με τη μικρή ροή θα πετύχεις βάθος, με την πλημμυρική ροή θα πετύχεις πλάτος” (“deepen by small flow, widen by flood flow”). Το γεγονός ότι η μεγάλη ροή πλαταίνει το κανάλι παρατηρήθηκε και σε ταμιευτήρες με φερτά υλικά αργιλικής φύσης (Tolouie,1993), όπως επίσης και σε άλλους με χονδρόκοκκες και μη συνεκτικές δελταϊκές αποθέσεις (Randle and Lyons,1995).

3.2.3 Ζητήματα της διαδικασίας

Είναι εμφανές πως η έκπλυση είναι μια διαδικασία που αποφέρει μεγάλες και σημαντικές αλλαγές όχι μόνο στη λειτουργία ενός ταμιευτήρα, αλλά και στο περιβάλλον κατάντη αυτού. Επομένως, όλα τα ζητήματα που σχετίζονται με τη διαδικασία χρίζουν μελέτης και προσοχής.

α) Προγραμματισμός της έκπλυσης. Ο βέλτιστος προγραμματισμός της έκπλυσης μπορεί να δημιουργήσει λειτουργικές αντιθέσεις σε ένα ταμιευτήρα. Έτσι, η επιλογή ενός εφαρμόσιμου προγράμματος έκπλυσης θα είναι αποτέλεσμα μίας διαδικασίας συμβιβασμού. Το πρόγραμμα και οι διεργασίες της μεθόδου θα πρέπει να τροποποιούνται σύμφωνα με δεδομένα παρακολούθησης, ώστε να αποφεύγονται δυσμενείς επιπτώσεις και παράλληλα να επιτυγχάνονται οι σκοποί της διαχείρισης των φερτών υλικών. Τα δεδομένα παρακολούθησης θα πρέπει να περιλαμβάνουν τόσο συνέπειες στα κατάντη, όσο και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ίδιο τον ταμιευτήρα.

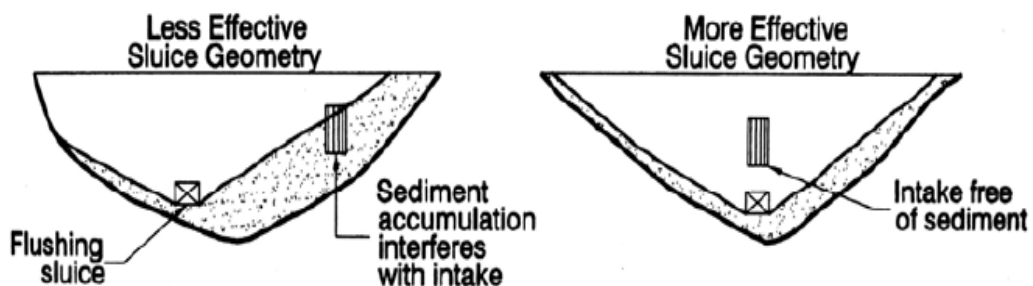
Σε πολλούς ταμιευτήρες της Κίνας, η έκπλυση ξεκινά στην αρχή της πλημμυρικής περιόδου, όπου είναι διαθέσιμες μεγάλες ροές, ενώ οι κατάντη απαιτήσεις άρδευσης μπορούν να ικανοποιηθούν από εκτροπές αυτής. Η χρήση καναλιών άρδευσης μεγάλων ταχυτήτων μπορεί να ελαχιστοποιήσει το πρόβλημα της απόθεσης των υλικών κατάντη του φράγματος, παρά τη μεγάλη συγκέντρωσή τους στη ροή έκπλυσης.

Σε ταμιευτήρες με φυσιολογικές εποχιακές μεταβολές στη στάθμη του νερού, η εκκένωση θα προγραμματιστεί για την εποχή της χαμηλής στάθμης του ταμιευτήρα, ώστε να πραγματοποιείται απώλεια του μικρότερου δυνατού όγκου νερού. Στον ταμιευτήρα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας Cachi της Κόστα Ρίκα, η έκπλυση διάρκειας 3 ημερών προσδιορίζεται μήνες πριν, για να συμπίπτει τόσο με την υγρή περίοδο, ώστε να γεμίζει ξανά ο ταμιευτήρας γρήγορα, όσο και με ένα σαββατοκύριακο εθνικής εορτής, όπου οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό είναι χαμηλές. Στο φράγμα Dashidaira της Ιαπωνίας, η έκπλυση επιλέχθηκε να γίνεται το χειμώνα για να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις της θολότητας του νερού στο ψάρεμα, την άρδευση και τον τουρισμό (Wada,1995). Είναι επίσης επιθυμητό να προγραμματιστεί με σκοπό την παροχή καθαρού νερού κατάντη, ώστε να αραιωθεί η υψηλή, σε φερτά υλικά, συγκέντρωση της ροής που έχει ήδη εκτονωθεί, όπως και έγινε σε ορισμένες τοποθεσίες στη Γαλλία.

Η έκπλυση μπορεί να μην πραγματοποιείται κάθε χρόνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ο ταμιευτήρας Hengshan, ο οποίος δημιουργήθηκε για αντιπλημμυρικούς και αρδευτικούς σκοπούς. Λόγω του ότι βρίσκεται σε μία ξηρή περιοχή και οι προμήθειες νερού είναι σπάνιες, η εκκένωση και έκπλυση καθυστερούν μέχρι το κύριο κανάλι να έχει γεμίσει με ένα στρώμα άμμου, κι έτσι επαναλαμβάνονται κάθε τρία με τέσσερα χρόνια. Παρά τη σχετικά αραιή εφαρμογή της έκπλυσης, αποδείχτηκε πως η μέθοδος ήταν αρκετά αποτελεσματική στην απομάκρυνση επαρκών ποσοτήτων συσσωρευμένων φερτών υλικών. Όπως ήταν αναμενόμενο βέβαια, κατά τη διάρκεια της αρχικής περιόδου ελεύθερης ροής, η συγκέντρωση της εκροής σε φερτά υλικά έφτανε τα 1 000 g/L, ενώ το 1974 ξεπέρασε την τιμή αυτή για 16 ώρες περίπου (Guo and Li,1984).

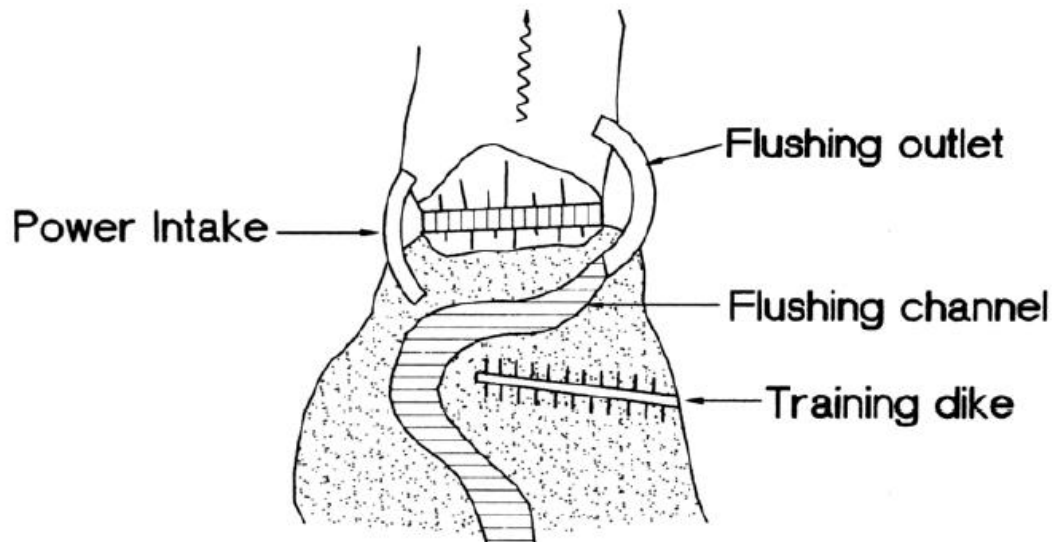
β) Μέγεθος και θέση των εξόδων. Γενικά οι εξοδοί θα πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατό πιο βαθιά και να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερες. Δύο εξοδοί τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη προτιμούνται σε σχέση με δύο άλλες τοποθετημένες σε διαφορετικές στάθμες, αφού ο προηγούμενος σχηματισμός θα παράγει λιγότερα στάσιμα νερά. Για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας, η έκπλυση δε θα πρέπει να γίνεται με τη μεγαλύτερη δυνατή απορροή (Paul and Dillon,1988). Οι εξοδοί θα πρέπει να σχεδιάζονται για να παρέχουν πλήρη μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα και συνθήκες ελεύθερης ροής. Λόγω του ότι οι ημερομηνίες της έκπλυσης συχνά καθορίζονται από λειτουργικούς περιορισμούς, η χωρητικότητα των εξόδων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα στάσιμα νερά, ακόμα και για τις μεγαλύτερες ροές που είναι δυνατό να παρουσιασθούν. Η επιλογή της χωρητικότητας σχεδιασμού κατά τη ροή σχεδιασμού καθορίζεται μέσω μοντελοποίησης. Στην περίπτωση που υπάρχουν εγκαταστάσεις υδροληψίας, η θέση των δύο εξόδων, θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να παραμένουν καθαρές από φερτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.17. Εάν οι εγκαταστάσεις δεν τοποθετηθούν στην περιοχή που παραμένει ελεύθερη από φερτά, τελικώς θα χρειαστεί μηχανική μετακίνηση αυτών.

Όταν γεωλογικές ή άλλες συνθήκες το καθιστούν αδύνατο, μπορεί να είναι εφικτό να εκτρέψουμε τη ροή έκπλυσης από την περιοχή των εγκαταστάσεων.



Εικόνα 3.17 Τοποθέτηση εξόδου κάτω από εγκατάσταση υδροληψίας, με σκοπό να αποφευχθεί η παρεμβολή στις λειτουργίες των εγκαταστάσεων από τη συσσώρευση φερτών.

Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας ένα ανάχωμα που να παρεμβαίνει στη ροή του καναλιού ανάντη του φράγματος, και συνεπώς την οδηγεί προς την επιθυμητή έξοδο. Το ανάχωμα αυτό προφανώς παραμένει βυθισμένο όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.18 Το χαντάκι οδηγεί τη ροή μακριά από τις εγκαταστάσεις υδροληψίας, ώστε να μένουν καθαρές από φερτές ύλες.

γ) Απελευθέρωση φερτών και συγκέντρωση. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η ποσότητα των φερτών υλικών που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της έκπλυσης, καθώς και η μέγιστη συγκέντρωση αυτών, είναι εξαιρετικά μεταβλητές. Προς το παρόν, δεν υπάρχει μία γενικά εφαρμόσιμη μέθοδος, η οποία να προβλέπει με ακρίβεια την τιμή της απελευθέρωσης των φερτών, τη διαμόρφωση του καναλιού ή τη μέγιστη συγκέντρωση αυτών κατά την έκπλυση. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί ορισμένες εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες εκτιμούν την απελευθέρωση των φερτών σε μερικούς ταμιευτήρες.

Οι Fan and Jiang (1980) ανέπτυξαν την ακόλουθη εξίσωση από δεδομένα πεδίου. Η Εξίσωση 3.1 αφορά την απορροή της λεπτόκοκκης άμμου ($d_{50}=0.06-0.09$ mm) στον ταμιευτήρα Sanmenxia, της Κίνας, λόγω της διάβρωσης, από το 1963 έως το 1964.

$$Q_s = 3.5 \times 10^{-3} \times Q^{1.2} (S \times 10^4)^{1.8} \quad (3.1)$$

Η στεροπαροχή Q_s (t/s) εξαρτάται από την απορροή του νερού Q (m^3/s) και την κλίση της επιφάνειας S .

Με βάση τα δεδομένα πεδίου ταμιευτήρων της Κίνας κατά τη διάρκεια περιόδων έκπλυσης με εκκένωση του ταμιευτήρα, αναπτύχθηκε η παρακάτω εμπειρική σχέση υπολογισμού της στεροπαροχής με παλινδρομική διάβρωση (Xia, 1983). Η Εξίσωση 3.2 είναι γνωστή ως Εξίσωση Tsinghua University (Tsinghua University Equation)

$$Q_s = \frac{E \times Q^{1.6} \times S^{1.2}}{B^{0.6}} \quad (3.2)$$

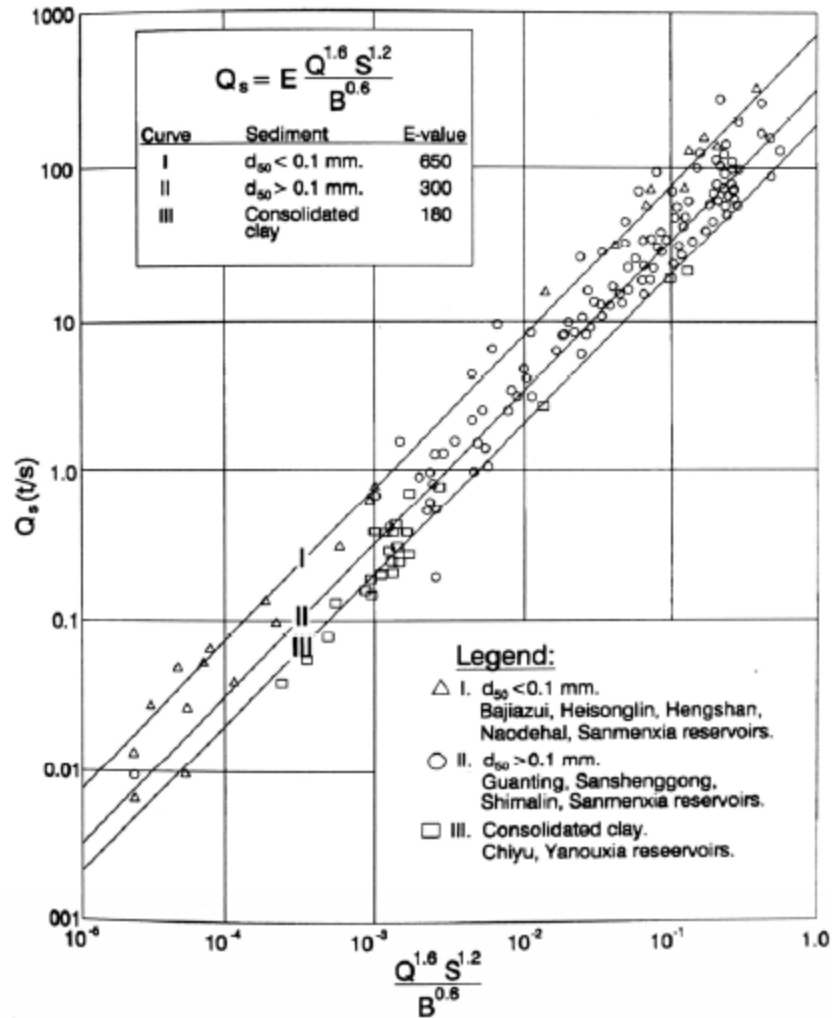
Στη σχέση αυτή, το εύρος των τιμών για κάθε μέγεθος είναι το εξής:

- Για τη στερεοπαροχή $Q_s=0.0006-777 \text{ t/s}$
- Για την παροχή του νερού $Q=0.1-5 \text{ 730 m}^3/\text{s}$
- Για την κλίση της επιφάνειας του νερού ή του πυθμένα $S=0.00006-0.016$
- Ε είναι ο συντελεστής διαβρωσιμότητας. Μεγάλη τιμή του συντελεστή αντιστοιχεί σε εύκολα διαβρώσιμα φερτά, ενώ μικρή τιμή αυτού αντιστοιχεί σε χονδρόκοκκες ή στερεοποιημένες αποθέσεις.

Ένα σχεδιάγραμμα δεδομένων πεδίου και αντιπροσωπευτικών τιμών του συντελεστή Ε φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Οι Lai και Shen(1996) επέκτειναν την καμπύλη III σε πειράματα σε εργαστηριακό αγωγό νερού, χρησιμοποιώντας χαλίκι ως φερτό υλικό.

Η εμπειρία του πεδίου δείχνει ότι η συγκέντρωση αιχμής των μεταφερόμενων υλικών, που εκπλένονται με εκκένωση του ταμιευτήρα, αναμένεται να υπερβαίνει τα 100 g/L, όταν αυτά αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από λεπτόκοκκα υλικά. Αντίστοιχα, πολύ μικρότερες τιμές αναμένονται όταν διαβρώνονται χονδρόκοκκα μη συνεκτικά υλικά.



Σχήμα 3. 4 Ρυθμός απελευθέρωσης φερτών κατά τη διάρκεια της παλινδρομικής διάβρωσης. Τιμές βασισμένες σε εμπειρικά δεδομένα από τους ταμιευτήρες της Κίνας κατά τη διάρκεια της έκπλυσης με εκκένωση (Xia,1983).

Το 1985 κατασκευάστηκε το φράγμα Dashidaira στον ποταμό Kurobe της Ιαπωνίας. Αυτό αποτελεί το πρώτο ιαπωνικό φράγμα που κατασκευάστηκε με μεγάλης κλίμακας εξόδους στη βάση του, με την πρώτη επιχείρηση έκπλυσης να λαμβάνει χώρα το 1992. Μέσω του φράγματος είχαν προβλεφθεί να εκπλυθούν φερτά υλικά όγκου $600\,000\text{ m}^3$ με μία επιχείρηση διάρκειας εννέα ημερών, παράγοντας συγκέντρωση σε εκκενωμένα υλικά $1\,200\text{ ppm}$ κατάντη, τιμή όχι μεγαλύτερη από τα επίπεδα αιχμής κατά τη διάρκεια των πλημμύρων. Ωστόσο, τα φερτά απελευθερώθηκαν με μεγαλύτερο από το διπλάσιο ρυθμό από αυτόν που είχε προβλεφθεί, με τη συγκέντρωσή τους κατάντη να φτάνει έως και τα $4\,400\text{ ppm}$, ενώ σκούρο γκρι θολό νερό με δυσάρεστη οσμή έφτασε στη θάλασσα, 36 km κατάντη του φράγματος. Η οσμή δημιουργήθηκε προφανώς από τη συσσώρευση και την αναερόβια αποσύνθεση των οργανικών υλικών των φερτών. Η επιχείρηση σταμάτησε μετά από τρεις ημέρες.

Η διάβρωση των συνεκτικών υλικών μοντελοποιήθηκε από τον Bouchard το 1995, ο οποίος επισήμανε ότι οι ιδιότητες των μη συνεκτικών υλικών είναι δύσκολο να αξιολογηθούν και η ολίσθηση των ασταθών οχθών μπορεί να είναι ένα σημαντικό φαινόμενο στην προμήθεια του καναλιού σε φερτά, σε σύγκριση με τη διάβρωση του καναλιού.

Κατά τη διάρκεια της έκπλυσης συντήρησης, η συνολική ποσότητα και η συγκέντρωση αιχμής των απελευθερωμένων φερτών καθορίζεται από παράγοντες όπως, η ποσότητα των φερτών που έχει συσσωρευτεί από το προηγούμενο γεγονός έκπλυσης και η κοκκομετρία τους, ο ρυθμός της ροής έκπλυσης, η διαδικασία του καταβιβασμού της στάθμης (π.χ. η απελευθέρωση ρευμάτων πυκνότητας κατά τη μείωση) και η στερεοποίηση των φερτών. Το μεγάλο εύρος τιμών έχει ήδη συζητηθεί ήδη παραπάνω, στην περίπτωση του ποταμού Cachi στον Πίνακα 3.1.

δ) Αποτελέσματα κατάντη. Ο παράγοντας αυτός είναι πολύ σημαντικός, αφού τα φερτά που απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα θα αποτεθούν σίγουρα σε κάποιο σημείο κατάντη αυτού: στο κανάλι ροής, σε κάποιο ταμιευτήρα, σε εγκαταστάσεις πρόσληψης και συστήματα διακίνησης νερού, στη θάλασσα κλπ. Η έκπλυση κρίνεται ανέφικτη σε πολλές τοποθεσίες, λόγω των αλλαγών που επιφέρει στην ποιότητα του νερού κατάντη του φράγματος. Σε πολλές περιπτώσεις λοιπόν, κρίσιμη στον καθορισμό των υδραυλικών απαιτήσεων της έκπλυσης, είναι η εκροή που απαιτείται για να αποφευχθεί μεγάλη τοπική συσσώρευση στην περιοχή αυτή, και όχι αυτή που είναι απαραίτητη για να γίνει η διάβρωση στον ταμιευτήρα. Προβλήματα που σχετίζονται με την επανα-απόθεση των φερτών στα κατάντη θα αναφερθούν και παρακάτω.

Ορισμένα ακόμη θέματα προς μελέτη είναι τα εξής:

1. Το σχήμα του ταμιευτήρα, το οποίο μπορεί να εμποδίσει τη διαμόρφωση του καναλιού έκπλυσης.
2. Η απορροή του καναλιού έκπλυσης, η οποία μπορεί να είναι ανεπαρκής για να μεταφέρει το μεγάλο φορτίο των υλικών.
3. Η μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα, η οποία μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη πρόβλεψης των επιπτώσεων της έκπλυσης, ώστε να μην τεθεί σε κίνδυνο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή οι προμήθεια άρδευσης.
5. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεταφερόμενων κατάντη του φράγματος υλικών, τα οποία έχουν παραμείνει στα λιμνάζοντα ύδατα του ταμιευτήρα για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

3.2.4 Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της έκπλυσης

Η επιτυχής έκπλυση είναι ένας συνδυασμός μείωσης της στάθμης του ταμιευτήρα και αύξησης της ταχύτητας ροής μέσα σε αυτόν. Από το σύνολο των καταγεγραμμένων μεγάλων φραγμάτων, η διαδικασία της έκπλυσης έχει εφαρμοστεί σε πολλές εκατοντάδες

από αυτά, ίσως και χιλιάδες. Δυστυχώς, προσβάσιμα αποδεικτικά στοιχεία υπάρχουν για περίπου 50 από αυτά, με σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα να είναι άμεσα διαθέσιμα μόνο για τα μισά. Με μεγάλη διαφορά, το μεγαλύτερο πλήθος περιπτώσεων εφαρμογής της έκπλυσης λαμβάνει χώρα στην Κίνα. Το γεγονός αυτό βέβαια δεν προκαλεί έκπληξη, λαμβάνοντας υπόψη την έκταση της χώρας, τον αριθμό των ταμιευτήρων σε αυτή, καθώς και τις μεγάλες τιμές στερεοαπορροής που παρατηρούνται, ειδικά στην περιοχή του Κίτρινου Ποταμού. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι τα περισσότερα περιστατικά εφαρμογής της μεθόδου βρίσκονται σε χώρες με μεγάλη στερεοαπορροή, όπως η Ελβετία και οι Η.Π.Α..

Στον Πίνακα 3.2 έχουν καταταχθεί οι ταμιευτήρες που πραγματοποιείται έκπλυση, ανάλογα με το σκοπό λειτουργίας τους (για όσους παρέχονται στοιχεία).

Πίνακας 3.2 Κατάταξη των ταμιευτήρων που έχουν υποβληθεί σε έκπλυση, ανάλογα με το σκοπό λειτουργίας τους.

Σκοπός	Πλήθος ταμιευτήρων
Υδροηλεκτρική ενέργεια	13
Υδροηλεκτρική ενέργεια και άρδευση	4
Υδροηλεκτρική ενέργεια, άρδευση και παροχή πόσιμου νερού	1
Άρδευση και αντιπλημμυρική προστασία	3
Αντιπλημμυρική προστασία	1
Παροχή πόσιμου νερού	2
Πολλαπλών σκοπών	1
Σύνολο	25

Μετά τη μελέτη των γεγονότων έκπλυσης στους παραπάνω ταμιευτήρες, βγήκε το συμπέρασμα ότι η διαδικασία και η αποτελεσματικότητα της έκπλυσης επηρεάζεται από έναν αριθμό παραγόντων, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

α) Υδρολογία. Η υδρολογία της λεκάνης απορροής πρέπει να μελετηθεί και να κατανοηθεί, ώστε να είναι γνωστά, τόσο τα πρότυπα της απορροής κατά τη διάρκεια του έτους, όσο και το εύρος της διακύμανσής της μέσα στο ίδιο έτος, αλλά και από έτος σε έτος. Εάν οι τοπικές μετρήσεις της ροής είναι ανεπαρκείς, τότε θα χρειασθούν επιπρόσθετες υδρολογικές εκτιμήσεις. Αυτές θα χρησιμοποιήσουν διεθνείς και τοπικές υδρολογικές

παραμέτρους, όπως το μέγεθος της λεκάνης απορροής, καθώς και παραμέτρους που σχετίζονται με τη χρήση της γης, όπως η αστικοποίηση ή η αποψύλωση των δασών. Για την εξασφάλιση επιτυχούς προγραμματισμού της έκπλυσης προτιμώνται ταμειυτήρες με τακτικό και διακριτό ετήσιο κύκλο πλημμυρών. Τέτοιοι βρίσκονται σε περιοχές μουςώνων ή σε περιοχές που η απορροή προκύπτει από λιώσιμο των πάγων. Επίσης, προτιμώνται ταμειυτήρες που έχουν μεγάλη απορροή για μικρό χρονικό διάστημα, παρά το αντίθετο, αφού τότε θα εξελιχθεί καλύτερα η διαδικασία της διάβρωσης.

β) Ιζηματολογία. Η συλλογή χρήσιμων δεδομένων σχετικά με τα φερτά υλικά είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό θέμα, καθώς από τη στιγμή που δε λαμβάνεται υπόψη η μεγάλη διακύμανση της συγκέντρωσής τους, γίνονται σοβαρά λάθη στην πρόβλεψη της ποσότητάς τους. Ένα σύνθετο πρόγραμμα συλλογής δεδομένων είναι ικανό να υποεκτιμήσει τη μεγάλη διανομή του ετήσιου φορτίου φερτών(φορτίου κοίτης και φορτίου σε αιώρηση), το οποίο προκύπτει από την ιδιαίτερα υψηλή απορροή. Επομένως, είναι σημαντικό, τα διαθέσιμα δεδομένα να συγκρίνονται με μετρήσεις της στερεοαπορροής της περιοχής, όπου φυσικά αυτό είναι δυνατό.

Ο σκοπός της μελέτης των φερτών είναι η απόκτηση αξιόπιστων τιμών για το μέσο ετήσιο φορτίο τους, καθώς και για το βαθμό της διακύμανσής τους από χρόνο σε χρόνο, σε συνδυασμό με τη διανομή του μεγέθους των κόκκων τους. Για παράδειγμα, οι αποθέσεις άμμου και ιλύος είναι πιο εύκολες να εκπλυθούν, σε αντίθεση με πιο χονδρόκοκκες αποθέσεις που είναι δύσκολο να μετακινηθούν. Σημαντική επίδραση σε αυτά έχουν και οι αλλαγές της λεκάνης απορροής. Για παράδειγμα, η δημιουργία ταμειυτήρων ανάντη προκαλεί μείωση του φορτίου που εισέρχεται στον ταμειυτήρα, όπως παρατηρήθηκε και στους ταμειυτήρες Guernsey, Gmund, Guanting.

γ) Μέγεθος ταμειυτήρα. Η βασική παράμετρος εδώ, είναι το υδρολογικό μέγεθος του ταμειυτήρα, το οποίο εκφράζεται από το λόγο της χωρητικότητάς του προς τη μέση ετήσια εισροή του. Η τιμή του 30% θεωρείται το όριο μεταξύ ενός υδρολογικά μεγάλου και μικρού ταμειυτήρα. Εάν ο λόγος είναι μικρότερος από 30%, τότε είναι πολύ πιθανό να υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού για να πραγματοποιείται η έκπλυση σε ετήσια βάση, με την αρχή της να γίνεται με την έναρξη της πλημμυρικής περιόδου, ώστε ο ταμειυτήρας να έχει πληρωθεί και πάλι με το τέλος της. Γενικά, όσο μικρότερος είναι ο λόγος τόσο πιο εφικτή είναι η έκπλυση, από τη σκοπιά των υδάτινων πόρων. Τιμές του λόγου μικρότερες του 5% επιτρέπουν ταχεία εκκένωση και μετέπειτα πλήρωση του ταμειυτήρα, επομένως η διαδικασία διαρκεί μικρές περιόδους. Στην περίπτωση τώρα που ο λόγος είναι μεγαλύτερος του 30%, γίνεται όλο και πιο δύσκολο να προγραμματιστεί ένα σύστημα έκπλυσης, το οποίο θα ικανοποιήσει το βασικό κανόνα της διαδικασίας, την επανα-πλήρωση, δηλαδή, του ταμειυτήρα. Ωστόσο υπάρχει παράδειγμα επιτυχούς έκπλυσης τέτοιου ταμειυτήρα, του Hengshan, ο οποίος όμως ευνοήθηκε από τη στενή, απότομη και μικρού μεγέθους κοιλάδα του.

Εάν ο λόγος πλησιάζει ή ακόμα και υπερβαίνει το 100%, είναι ξεκάθαρο πως ο ταμιευτήρας είναι σχεδιασμένος για την αποθήκευση του νερού, ώστε να παρέχει κάλυψη τις περιόδους ξηρασίας. Η ετήσια έκπλυση τέτοιων ταμιευτήρων είναι αδύνατη, ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μία φορά στη δεκαετία, εάν υπάρχει σοβαρός λόγος. Ίσως ακόμα μπορεί να πραγματοποιηθεί έκπλυση με μερικό καταβιβασμό της στάθμης στη ελάχιστη στάθμη λειτουργίας.

Με την επιφύλαξη άλλων περιορισμών, όπως η επάρκεια των εξόδων του φράγματος και η καταλληλότητα του σχήματος της λεκάνης, οι περισσότεροι μικροί ταμιευτήρες έχουν εκπλυθεί επιτυχώς. Ορισμένοι από αυτούς φαίνονται στον Πίνακα. Ωστόσο, ο παράγοντας αυτός δεν εξασφαλίζει την επιτυχία, εάν δεν καλύπτονται παράλληλα και άλλοι περιορισμοί, όπως για παράδειγμα συνέβη στους ταμιευτήρες Guernsey και Warsak.

δ) Δυνατότητα εναπόθεσης φερτών υλικών. Εκτός από τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας του ταμιευτήρα και της μέσης ετήσιας εισροής του, είναι απόλυτα σχετικό να μελετηθεί και ο ρυθμός απόθεσης των φερτών σε αυτόν. Ρυθμός απόθεσης της τάξης του 1-2% ανά έτος θεωρείται το όριο, μεταξύ των ταμιευτήρων στους οποίους η έκπλυση θα πρέπει να εφαρμοσθεί νωρίς και σε αυτούς, στους οποίους μπορεί να καθυστερήσει ακόμα και 20 χρόνια. Ρυθμός απόθεσης της τάξης του 5% ή μεγαλύτερος, σίγουρα σημαίνει κίνδυνο και απαιτεί τον πλήρη προγραμματισμό της έκπλυσης από τη φάση του σχεδιασμού ακόμα και την εφαρμογή της από εξόδους στη βάση του φράγματος. Οι υδρολογικά μεγάλοι ταμιευτήρες τείνουν να έχουν μικρούς ρυθμούς επικάθησης, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται να χρειασθούν τη διαδικασία της έκπλυσης κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής τους.

ε) Σχήμα ταμιευτήρα. Στενοί, με απότομες πλαγιές ταμιευτήρες επιδέχονται με μεγαλύτερη ευκολία αποτελεσματική έκπλυση, ειδικά όπου η διαμήκης κλίση είναι απότομη. Ως ένα βαθμό, αυτό είναι αντιστάθμισμα της μικρής κινητικότητας του χονδρόκοκκου φορτίου σε σύρση που είναι διαθέσιμο σε αυτούς. Περισσότερο φαρδείς ταμιευτήρες από την άλλη, είναι ευάλωτοι στην απόθεση των φερτών στις πλημμυρισμένες όχθες τους. Αυτό οδηγεί σε δύο προβλήματα σχετικά με την έκπλυση. Αφενός, όταν τα φερτά υλικά εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη διάρκεια της εκκένωσης του ταμιευτήρα, ξηραίνονται και στερεοποιούνται και αφετέρου δεν υπόκεινται σε σημαντική διάβρωση, αφού δεν βρίσκονται στην περιοχή που διαπερνάται από το κανάλι έκπλυσης. Επομένως, αναπτύσσονται μεγάλες περιοχές που δεν επηρεάζονται από τη διάβρωση του καναλιού και μετατρέπονται σε μόνιμες περιοχές απόθεσης.

Η κλίση του καναλιού διάβρωσης τώρα, το πλάτος του καθώς και η κλίση των πλαγιών του είναι συναρτήσεις των χαρακτηριστικών των φερτών, της κλίσης της κοιλάδας, καθώς και της απορροής έκπλυσης. Μπορούν βέβαια να περιοριστούν και από άλλα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας της λεκάνης. Οι ταμιευτήρες Guernsey, Naodehai, Heisonglin, Sefid-Rud είναι παραδείγματα ταμιευτήρων μεγάλου πλάτους, όπου η

γεωμετρία της λεκάνης αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της αποτελεσματικότητας της έκπλυσης.

στ) Έξοδοι χαμηλής στάθμης. Η βασική απαίτηση για να πραγματοποιηθεί έκπλυση με πλήρη εκκένωση του ταμιευτήρα, είναι η τοποθέτηση εξόδων στη βάση του φράγματος. Χωρίς αυτές δεν υπάρχει καμία πιθανότητα πραγματοποίησης τέτοιου είδους έκπλυσης. Ο βασικός κανόνας για επιτυχή έκπλυση είναι η παροχетеυτικότητα των εξόδων να είναι αρκετή για να τις διαπεράσει τουλάχιστον η διπλάσια της μέσης ετήσιας εισροής. Η συνθήκη επιτρέπει στα φερτά να εκπλυθούν επιτυχώς από το άνω άκρο του ταμιευτήρα, ενώ παράλληλα καθιστά σχεδόν βέβαιο πως η στάθμη θα διατηρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Είναι αναμενόμενο βέβαια, ένα μέρος των πιο χονδρόκοκκων υλικών να επανα-αποτεθεί στο άλλο μισό του.

Εάν ο υπό εξέταση ταμιευτήρας είναι υδρολογικά μικρός, με μικρή περίοδο έκπλυσης, το παραπάνω κριτήριο παροχетеυτικότητας ίσως ικανοποιείται ακόμη και για έκπλυση εκτός της πλημμυρικής περιόδου. Σε ένα μεγαλύτερο ταμιευτήρα, με μεγαλύτερη περίοδο έκπλυσης, η εν λόγω παροχетеυτικότητα ίσως είναι ανεπαρκής από λειτουργική άποψη, ακόμα και εντός της πλημμυρικής περιόδου. Για εκκένωση του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, η παροχетеυτικότητα των εξόδων πιθανώς να πρέπει να είναι ακόμα μεγαλύτερη από αυτή στον παραπάνω κανόνα.

ζ) Λειτουργικές εκτιμήσεις. Οι λειτουργικές εκτιμήσεις σχετικές με την έκπλυση, είναι αυτές που σχετίζονται με τη μείωση της στάθμης λειτουργίας του και κατ' επέκταση με την έλλειψη προμηθειών νερού. Για παράδειγμα, εάν ποσότητα του νερού στα κατάντη αντλείται για αρδευτικούς σκοπούς και το αρδευτικό σύστημα είναι σχεδιασμένο να δέχεται νερό με σημαντικές συγκεντρώσεις σε φερτά, τότε η έκπλυση όχι μόνο δεν προκαλεί προβλήματα, αλλά ίσα ίσα έχει οφέλη. Οι εποχιακές απαιτήσεις θα επηρεάσουν την κατάλληλη χρονική περίοδο για τη διεξαγωγή της έκπλυσης, καθώς και τη διάρκειά της και την ποσότητα του νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Φυσικά, οι εκτιμήσεις αυτές δεν μπορούν να αποτρέψουν την πραγματοποίηση της έκπλυσης, εφόσον αυτή θα εξασφαλίσει την παράταση της ζωής του ταμιευτήρα και θα ωφελήσει τις μελλοντικές γενιές.

η) Μείωση της στάθμης. Η μελέτη των περιστατικών έκπλυσης έχει δείξει πως η πλήρης μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα προτιμάται σε σχέση με τη μερική μείωσή του. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που η μέθοδος αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη, λόγω περιορισμών που επιβάλλονται από τις εγκαταστάσεις έκπλυσης ή από λειτουργικές εκτιμήσεις, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι διαθέσιμες έξοδοι μπορεί να αποτρέπουν την εκκένωση του ταμιευτήρα λόγω, είτε της στάθμης τους (ταμιευτήρες Guernsey, Shuicaozi, Warsak, Ichari), είτε της μειωμένης παροχетеυτικότητάς τους. Στη δεύτερη περίπτωση, ίσως είναι δυνατό να επιτευχθεί η έκπλυση με πλήρη εκκένωση του ταμιευτήρα κατά τις μη πλημμυρικές περιόδους, όπου η παροχетеυτικότητα θα είναι μικρότερη.

θ) Ενισχύσεις. Οι ενισχύσεις περιλαμβάνουν τη μηχανική ενίσχυση, τα διαμήκη κανάλια, τα πλευρικά κανάλια, τις σωληνώσεις για να προκληθεί πλευρική διάβρωση και τέλος τις διακυμάνσεις στη στάθμη του λιμνάζοντος νερού. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν ανθρώπινη επέμβαση. Έχει παρατηρηθεί ακόμη και η χρήση φορτηγών, ώστε να μετατοπίσουν τα φερτά υλικά προς το κύριο κανάλι έκπλυσης, χωρίς όμως να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική η μέθοδος. Στις περιπτώσεις ανάπτυξης καναλιών (πλευρικών ή διαμήκων) και σωληνώσεων οι ταμιευτήρες χαρακτηρίστηκαν υδρολογικά μεγάλοι (Heisonglin, Sefid-Rud) με μεγάλες περιοχές αποθέσεων στις όχθες των καναλιών έκπλυσης. Τα μέτρα ήταν απαραίτητα για να βελτιώσουν έστω και λίγο την κατάσταση του ωφέλιμου όγκου.

ι) Κατάντη επιπτώσεις. Είναι πλέον γνωστό, πως η διαδικασία της έκπλυσης έχει σημαντική επίπτωση στο υδάτινο περιβάλλον κατάντη του φράγματος, αφού η ροή με μεγάλη συγκέντρωση σε φερτά επηρεάζει το φυσικό περιβάλλον και την επιβίωση ψαριών και άλλων οργανισμών. Από την άποψη αυτή, σύντομες περίοδοι έκπλυσης αποδεικνύονται προβληματικές. Οι πιθανές δυσμενείς αυτές επιπτώσεις θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη και να αποτελούν έναυσμα εύρεσης εναλλακτικών λύσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εφαρμόζονται κανονιστικά όρια στο φορτίο των φερτών που θα παροχετευθεί στα κατάντη, τα οποία πρέπει να εφαρμόζονται σε κάθε επιχείρηση έκπλυσης. Ωστόσο, λόγω της μεταβλητής φύσης του φαινομένου, είναι αναπόφευκτη η περιστασιακή μη συμμόρφωση με τον κανόνα αυτό, εκτός κι αν εμπλέκεται σε μεγάλο βαθμό ο συντελεστής ασφάλειας με τη διάρκεια της έκπλυσης. Ένα μεγάλο μέρος των επιβλαβών επιδράσεων στα κατάντη μπορεί να περιοριστεί, εάν εφαρμόζεται διάλυση της συγκέντρωσης των φερτών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συμβολή με ένα μεγάλο ποταμό ή με τις εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας. Διάλυση της συγκέντρωσης μπορεί ακόμα να συμβεί με ελεγχόμενη εισροή των φερτών στον ταμιευτήρα, αν για παράδειγμα αυτή προέρχεται από άλλο ταμιευτήρα στα ανάντη. Η αυξημένη συγκέντρωση των απελευθερωμένων φερτών μπορεί ακόμη να προκαλέσει προβλήματα σε εγκαταστάσεις παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας ή υδροληψίας, στην αναψυχή, καθώς και σε άλλους ταμιευτήρες.

κ) Οικονομική Αξιολόγηση. Για να αξίζει η πραγματοποίηση της έκπλυσης, θα πρέπει η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των έργων να υπερβαίνει τις ζημιές της, όπως είναι η απώλεια σημαντικού υδάτινου όγκου και ενέργειας, καθώς και του οικονομικού κόστους της. Είναι απαραίτητη, επομένως, μία πλήρης οικονομική ανάλυση που θα περιλαμβάνει τα οφέλη και τα κόστη της κατασκευής ενός συστήματος έκπλυσης.

Προγενέστερες προσπάθειες θέσπισης αντικειμενικών κριτηρίων επιτυχούς έκπλυσης οδήγησαν στα εξής κριτήρια:

- Στο κατά πόσο θα υπάρξει τελικά ισορροπία μεταξύ εισροής και εκροής φερτών από τον ταμιευτήρα.

- Η μακροπρόθεσμη βιώσιμη χωρητικότητα στον ταμιευτήρα να είναι 40-50% της αρχικής.

Κριτήρια όπως τα παραπάνω ωστόσο, είναι αδικαιολόγητα περιοριστικά. Στην περίπτωση ενός μεγάλου ταμιευτήρα για παράδειγμα, ο οποίος μπορεί ετησίως να χάνει το 2% της χωρητικότητάς του, η μείωση της απώλειας στο 1% χαρακτηρίζει την έκπλυση επιτυχή. Ομοίως, μία μακροπρόθεσμη χωρητικότητα της τάξης του 20% της αρχικής μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή σε ένα ταμιευτήρα που δεν προορίζεται για έλεγχο πλημμυρών, προμήθεια νερού ή παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, αναπτύχθηκαν δύο συντελεστές προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας της έκπλυσης.

Συντελεστής αποτελεσματικότητας

Η αποτελεσματικότητα της έκπλυσης μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια του συντελεστή αποδοτικότητας, Fe (Flushing Efficiency). Αυτός ορίζεται από την αναλογία του όγκου των φερτών που απομακρύνθηκαν από τον ταμιευτήρα, S, με τον όγκο του νερού που καταναλώθηκε κατά την έκπλυση, W. Επομένως ισχύει η Εξίσωση 3.3 :

$$Fe = \frac{S}{W} \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής αυτός επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως, το σχήμα του ταμιευτήρα, η στάθμη των εξόδων του φράγματος, ο όγκος και η κοκκομετρία των αποτιθέμενων υλικών, η χρονική διάρκεια της έκπλυσης και η στερεοπαροχή κατά τη διάρκειά της.

Αποδοτικότητα έκπλυσης με μερικό καταβιβασμό της στάθμης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο καταβιβασμός της στάθμης στον ταμιευτήρα μπορεί να περιοριστεί από λειτουργικές απαιτήσεις ή από αναγκαστική ανύψωση των εξόδων του φράγματος, εάν δεν παρέχονται έξοδοι στη βάση αυτού. Όταν η ροή της έκπλυσης απελευθερώνεται από εξόδους που βρίσκονται σημαντικά πάνω από τη στάθμη των αποθέσεων, ο συντελεστής αποδοτικότητας είναι πολύ χαμηλός. Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται όλοι οι συντελεστές από ταμιευτήρες, στους οποίους η έκπλυση πραγματοποιήθηκε από εξόδους υψηλής στάθμης.

Πίνακας 3.3 Συντελεστές αποδοτικότητας για έκπλυση από εξόδους υψηλής στάθμης (Fan,1995)

Reservoir	Outflow situation	Years of operation	Discharge, m ³ /s	Duration	Flushing efficiency	Water:sediment ratio
Guernsey, U.S.A.	Overflow spillway	1960-1962	56.6 - 198	10-18 days	0.00017	5880
Warsak, Pakistan	Overflow spillway	1976-1979, 5 flushings	1410	Total 490.5 h	0.00169	592
Liujiaxia, China	Overflow and outlets; water level lowered = 4.4-7.8 m	1981,1984, 1985,1988	1660 - 2090	103 - 177 h	0.0023 - 0.0071	435-141
Shuicaozi China	Overflow spillway	1965,1966, 1974, 1978, 1980, 1981	21.4-230	3-4 days	0.012 - 0.043	83-23

Η έκπλυση υπό αυτές τις συνθήκες, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των ανάντη υλικών και επανα-απόθεση αυτών κοντά στο φράγμα. Στην περίπτωση που ανοίξουν έξοδοι χαμηλής στάθμης, ορισμένη ποσότητα από αυτά μπορεί να βρει διέξοδο μέσω των ρευμάτων πυκνότητας. Ωστόσο, ο τρόπος αυτός είναι μη αποδοτικός. Η μεταφορά των φερτών υλικών από εξόδους υψηλής στάθμης μπορεί να είναι αποδοτική μόνο στην περίπτωση που οι αποθέσεις έχουν φτάσει τη στάθμη των εξόδων, όπως και έγινε στο φράγμα Tarbela.

Το συγκεκριμένο είδος έκπλυσης δε χρησιμοποιείται πάντα για την απελευθέρωση των φερτών από τον ταμιευτήρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έκπλυση με μερική μείωση της στάθμης χρησιμοποιείται με σκοπό την ανακατανομή των φερτών υλικών μέσα στον ταμιευτήρα, μεταφέροντάς τα πιο κοντά στο φράγμα. Παράδειγμα της μεθόδου αυτής είναι ο ταμιευτήρας Guernsey στο Γουαϊόμινγκ της Αμερικής, όπου σκοπός ήταν η μεταφορά των λεπτόκοκκων υλικών σε ένα κανάλι άρδευσης στα κατάντη (Jarecki & Murphy,1963).

Αποδοτικότητα της έκπλυσης με εκκένωση του ταμιευτήρα

Οι συντελεστές αποδοτικότητας που υπολογίστηκαν μετά από εκκένωση των ταμιευτήρων σε διάφορες περιπτώσεις, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4 Συντελεστής αποδοτικότητας μετά από έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα (Fan,1995)

Reservoir	Years of Operation	Discharge, m ³ /s	Duration of Flushing	Flushing efficiency	Water:sediment ratio
Gebidem, Switzerland	1969-1994	35	35 h/yr	0.048-0.060	21-17
Barenburg, Switzerland	1985	90	20 h	0.06	17
Ferrera, Switzerland	1985			0.026	38
Gen-shan-pei, China	1958-1983		53 days/yr	0.0897	11
Santo Domingo, Venezuela	1978	8-10		0.09-0.13	11-8
Donfanghong, China	1984	51		0.056-0.083	18-12
Sefid-Rud, Iran	1980-1987		61-157 days	0.022-0.067	45-15
Zemo-Afchar, U.S.S.R	1939-1966	72-688	13-76 h	0.015-0.096	67-10
Chirurt, U.S.S.R.	1968	400-500	5 days	0.04	25

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν τις μέσες τιμές ολόκληρου του γεγονότος, συμπεριλαμβανομένων των πολύ έντονων μετακινήσεων των υλικών κατά την έναρξη της έκπλυσης και των αρκετά χαμηλών συγκεντρώσεων στο ακόλουθο διάστημα. Οι καταγεγραμμένες τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία και επηρεάζονται από τη διάρκεια της έκπλυσης, όπως επίσης και από το μέγεθος της εισροής φερτών κατά το προηγούμενο χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά, ο μεγάλος όγκος φερτών που διαβρώνεται με την έναρξη της διαδικασίας οδηγεί σε μεγάλο συντελεστή αποδοτικότητας, ο οποίος στη συνέχεια θα μειωθεί, λόγω της πιο ήπιας διάβρωσης που λαμβάνει χώρα στη συνέχεια.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως υψηλή τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας δε σημαίνει απαραίτητως και επιτυχή διαχείριση των φερτών υλικών. Προφανώς, ο εν λόγω συντελεστής θα είναι μικρότερος για μετακίνηση χονδρόκοκκων αποθέσεων απ' ότι για αυτή των λεπτόκοκκων. Επομένως, αν σε ένα τοπίο σκοπός είναι η μεγιστοποίησή του, τότε θα συσσωρεύονται συνεχώς χονδρόκοκκα υλικά. Υψηλές τιμές του συντελεστή μπορεί επίσης να οδηγούν σε ιδιαίτερα αυξημένες τιμές της συγκέντρωσης σε φερτά κατάντη του φράγματος, κάτι που από την περιβαλλοντική σκοπιά είναι μη επιθυμητό.

Μακροπρόθεσμη Αναλογία Χωρητικότητας

Η μακροπρόθεσμη αναλογία χωρητικότητας, LTCR (Long-Term Capacity Ratio), ορίζεται ως ο λόγος της χωρητικότητας του ταμιευτήρα που θα επανακτηθεί με την έκπλυση, προς την αρχική χωρητικότητά του.

Τιμές του συντελεστή μεγαλύτερες του 0.5 υποδηλώνουν μεγάλη πιθανότητα διατήρησης του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα μετά την έκπλυση. Επομένως η διαδικασία κρίνεται αποτελεσματική. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται ταμιευτήρες που υποβλήθηκαν σε επιτυχή ή μη έκπλυση, με τους αντίστοιχους συντελεστές.

Πίνακας 3.5 Αναλογία χωρητικότητας για ταμιευτήρες που εφαρμόστηκε έκπλυση (White,2001).

Reservoir	Country	Initial capacity: M.m ³	Long-term capacity ratio (LTCR)	
			Estimated from reservoir surveys	Calculated
Reservoirs flushed successfully				
Baira	India	9.6	0.85	0.85
Gebidem	Switzerland	9.0	Approx. 1.00	0.99
Gmünd	Austria	0.93	0.86	0.98
Hengshan	China	13.3	0.75	0.77
Palagnedra	Switzerland	5.5	1.00	1.00
Santo Domingo	Venezuela	3.0	0.97	1.00
Reservoirs flushed unsuccessfully				
Guanting	China	2270	Low	0.20
Guernsey	USA	91	Low	0.26
Heisonglin	China	8.6	0.23-0.35	0.30
Ichari	India	11.6	Approx. 0.35	0.36
Ouchi-Kurgan	Former USSR	56	Low	Approx. 0.10
Sanmexia	China	9640	0.31	0.39
Sefid-Rud	Iran	1760	<0.26	0.13
Shulcaozi	China	9.6	Low	0.39

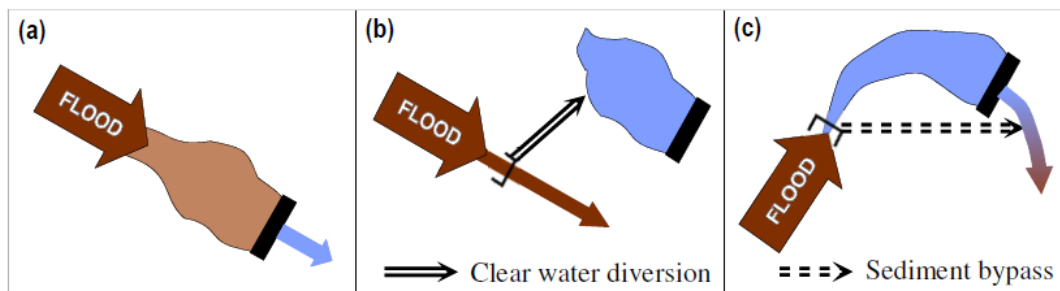
Είναι κατανοητό πως είναι σχεδόν αδύνατο να οριστούν επ' ακριβώς οι συγκεκριμένες περιοχές που παρέχουν κατάλληλες συνθήκες για επιτυχή έκπλυση. Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα φάσμα συνθηκών, οι οποίες κυμαίνονται από αυτές που είναι ιδανικές έως αυτές που είναι εντελώς ακατάλληλες για έκπλυση. Από υδραυλική και υδρολογική άποψη, οι κατάλληλες συνθήκες συναντώνται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται τροπικά υγρές και ξηρές, κατά την κατάταξη Κορρεν. Επιπλέον, υπάρχουν άλλες περιοχές που βρίσκονται λίγες μοίρες νότια ή βόρεια του ισημερινού, όπου η τήξη των πάγων την άνοιξη παρέχει σταθερή και προβλέψιμη ετήσια απορροή. Αυτές κρίνονται επίσης κατάλληλες.

Οι παραπάνω απαιτήσεις συναντώνται εν τέλει:

- Σε περιοχές από την Κεντρική έως και τη Νότια Αμερική.
- Σε περιοχές της Βόρειας και Νότιας Αμερικής, όπου τα ποτάμια τροφοδοτούνται από τις Άνδεις ή τα Βραχώδη Όρη.
- Τμήματα της Κεντρικής Αφρικής από την Ακτή Ελεφαντοστού στη δύση, μέχρι το Σουδάν στην ανατολή.
- Τμήματα της Κεντρικής Ασίας, όπου τα ποτάμια τροφοδοτούνται από τα Ιμαλάια, συμπεριλαμβανομένου του Πακιστάν, της Ινδίας και του Νεπάλ.
- Τμήματα της Ασίας, συμπεριλαμβανομένης της Καμπότζης, του Βιετνάμ και της Ταϊλάνδης.

4.ΠΑΡΑΚΑΜΨΗ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ - RESERVOIR BYPASS

Με το μέθοδο αυτή, ένα μέρος της, φορτισμένης με φερτές ύλες, ροής εκτρέπεται, με αποτέλεσμα να μην εισέρχεται ποτέ στον ταμιευτήρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Η ροή εκτρέπεται από ένα μικρού μεγέθους φράγμα ανάντη του ταμιευτήρα, προς μία σήραγγα μεγάλης χωρητικότητας, η οποία την οδηγεί κατάντη αυτού. Η εκτροπή των υδάτων επιτρέπεται συνήθως κατά τις πλημμυρικές περιόδους. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η ροή επιτρέπεται μέσα στον ταμιευτήρα.



Εικόνα 4.1 α) Συμβατικός ταμιευτήρας, ο οποίος εγκλωβίζει ύδατα μαζί με μεγάλη ποσότητα φερτών υλών. β) Δευτερεύων ταμιευτήρας, στον οποίο εκτρέπονται ύδατα μόνο κατά τις περιόδους με χαμηλή συγκέντρωση σε φερτά. γ) Σήραγγα εκτροπής, η οποία λειτουργεί κατά τις πλημμυρικές περιόδους.

Η παράκαμψη του ταμιευτήρα εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα από οικολογική άποψη. Με την απελευθέρωση των φορτισμένων υδάτων κατάντη του ταμιευτήρα, επιβραδύνεται η διάβρωση και η υποβάθμιση του πυθμένα της λεκάνης ή ακόμα και σταματά εντελώς. Επιπλέον, τα φερτά υλικά που φτάνουν κατάντη προέρχονται από το φυσικό ποτάμι, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται καθόλου από την ύπαρξη συσσωρευμένων υλικών στον ταμιευτήρα. Κρατούν, επομένως, το φυσικό χαρακτήρα τους και προσομοιώνουν τις συνθήκες ροής προ της κατασκευής του φράγματος, ευνοώντας τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου βέβαια, αποτελεί το υψηλό κόστος κατασκευής, αλλά και συντήρησης, της σήραγγας εκτροπής.

Ο αριθμός των συστημάτων εκτροπής που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως είναι αρκετά περιορισμένος. Το γεγονός αυτό, οφείλεται φυσικά στις υψηλές οικονομικές δαπάνες που προαναφέρθηκαν, καθώς και στην ιδιαίτερη μελέτη της σήραγγας που απαιτείται, λόγω των μεγάλων δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται και μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές. Ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό του συστήματος εκτροπής επομένως, απαιτείται στη μεταφορική ικανότητα της σήραγγας, η οποία θα πρέπει να υπερβαίνει αυτή του ταμιευτήρα, στην αντίσταση κατά της τριβής του δαπέδου της σήραγγας, καθώς και στη

θέση της εξόδου της, ώστε να αποφευχθεί η παρεμπόδιση της διαδικασίας από τυχόν αποθέσεις φερτών υλικών.

4.1 Μέρη του συστήματος εκτροπής

Σύμφωνα με τους Auel and Boes (2011), ένα σύστημα εκτροπής αποτελείται από πέντε τμήματα, τα οποία αναλύονται ως εξής:

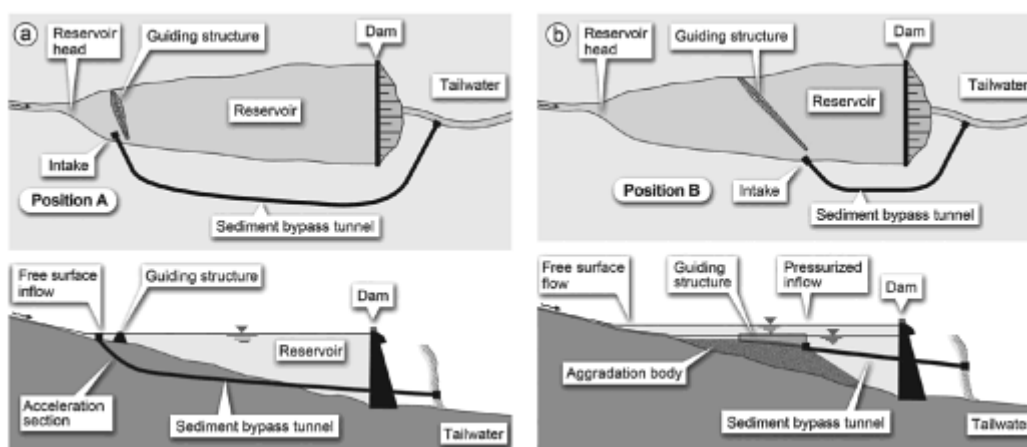
α) Κατασκευή καθοδήγησης, εγκατεστημένη στον ταμιευτήρα

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα φράγμα ελέγχου ή φράγμα εκτροπής, το οποίο οδηγεί τη ροή μαζί με τα φερτά υλικά προς τη σήραγγα. Στην πλειονότητα των υπαρχόντων συστημάτων εκτροπής, η κατασκευή αυτή είναι τοποθετημένη δίπλα στην είσοδο της σήραγγας, τέμνοντας τον ταμιευτήρα από το σημείο αυτό έως την απέναντι όχθη.

Κατά το σχεδιασμό του τμήματος αυτού, υπάρχουν ορισμένα θέματα που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Από τη μία πλευρά, το φράγμα εκτροπής δε θα πρέπει να καλύπτεται από τη ροή την περίοδο λειτουργίας της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό θα αποφευχθεί η συσσώρευση υλικών στον ταμιευτήρα. Από την άλλη, στην περίπτωση που η πλημμυρική παροχή υπερβαίνει την παροχή σχεδιασμού της σήραγγας, το φράγμα εκτροπής θα πρέπει να υπερχειλίζεται με ασφαλή τρόπο, ακόμη και με σχεδιασμό θυρών επί αυτού, ώστε η πλεονάζουσα ροή να οδηγείται προς το κυρίως φράγμα.

β) Είσοδος της σήραγγας, με θυρόφραγμα

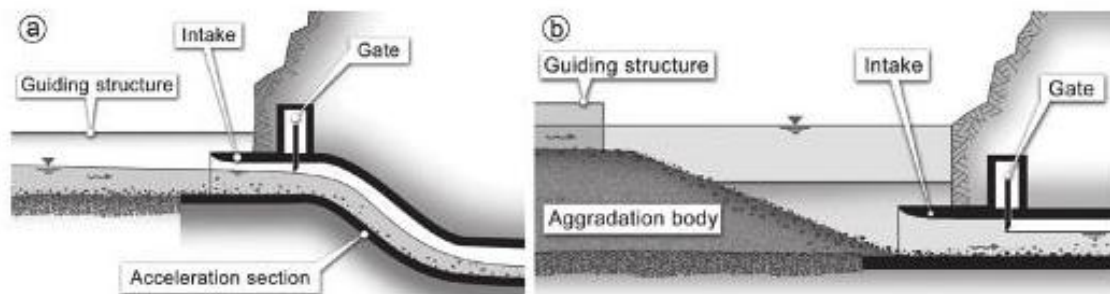
Για την κατασκευή της εισόδου της σήραγγας υπάρχουν δύο πιθανές θέσεις, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Οι δύο πιθανές θέσεις κατασκευής της εισόδου της σήραγγας.

Στην Εικόνα 4.2(a), η είσοδος της σήραγγας κατασκευάζεται στην αρχή του ταμιευτήρα, ενώ στην Εικόνα 4.2(b) σε μία ενδιάμεση θέση. Η θέση Α είναι η πιο συνηθισμένη. Βασικό πλεονέκτημά της αποτελεί το γεγονός ότι ο ταμιευτήρας δεν επηρεάζεται καθόλου από την παρουσία φερτών υλών. Επιπλέον, η στάθμη του είναι τελείως ανεξάρτητη από το ανάντη ποτάμι, κι έτσι δε χρειάζεται να καταβιβαστεί κατά τη λειτουργία της σήραγγας. Η θέση αυτή βέβαια υστερεί, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ της εισόδου της σήραγγας και της εξόδου της, κατάντη του φράγματος, η οποία συνεπάγεται ιδιαίτερα υψηλό κόστος κατασκευής. Ακόμη, για να επιτευχθούν οι συνθήκες ελεύθερης ροής απαιτείται ένα τμήμα επιτάχυνσης στην αρχή της σήραγγας, με χαρακτηριστικό τη μεγάλη κλίση του, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 4.3(a). Στο τμήμα αυτό θα παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση της ταχύτητας ροής, η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει πιθανώς σε εκτεταμένες βλάβες λόγω των δυνάμεων τριβής.

Η θέση Β τώρα, στα πλεονεκτήματά της προσμετρά τη μικρή απόσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της σήραγγας, γεγονός που την καθιστά περισσότερο οικονομική. Επιπλέον, η ροή στη σήραγγα πραγματοποιείται υπό πίεση, χωρίς να χρειάζεται το τμήμα επιτάχυνσης της σήραγγας που προαναφέρθηκε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3(b). Σημαντικό μειονέκτημα βέβαια, αποτελεί όχι μόνο το γεγονός πως μόνο το τμήμα του ταμιευτήρα κατάντη του φράγματος εκτροπής μένει καθαρό από φερτές ύλες, αλλά και ο απαραίτητος καταβιβασμός της στάθμης του ταμιευτήρα ανάντη της εισόδου, προκειμένου να διατηρηθεί η μεταφορική ικανότητα των φερτών υλών.



Εικόνα 4.3 Όψη της εισόδου της σήραγγας εκτροπής για τις δύο πιθανές θέσεις της.

Σε αμφότερες τις παραπάνω περιπτώσεις, η είσοδος περιλαμβάνει και ένα θυρόφραγμα. Κατά την περίοδο της φυσιολογικής λειτουργίας του ταμιευτήρα, το θυρόφραγμα παραμένει κλειστό, και η παροχετευτικότητα του ποταμού οδηγείται στον ταμιευτήρα. Κατά τις πλημμυρικές περιόδους όμως, αυτό ανοίγει και τότε η ροή περνά δια μέσου της σήραγγας εκτροπής. Στην περίπτωση της θέσης Α, όπου η ροή πραγματοποιείται υπό ελεύθερες συνθήκες, η είσοδος της σήραγγας κατασκευάζεται στο επίπεδο του πυθμένα. Κατάντη της εισόδου, ακολουθεί ένα τμήμα μεγάλης κλίσης για την επιτάχυνση της ροής και την επίτευξη συνθηκών ελεύθερης ροής. Αντίθετα, στην περίπτωση της θέσης Β, η

είσοδος μπορεί να κατασκευαστεί κάτω από τη στάθμη του πυθμένα. Με τον τρόπο αυτό, το μέτωπο της ροής έχει επαρκή ενέργεια και υψηλή ταχύτητα για την επίτευξη ροής υπό πίεση, χωρίς να χρειάζεται το τμήμα επιτάχυνσης. Ωστόσο, μετά την είσοδο της σήραγγας, η ροή γίνεται με ελεύθερες συνθήκες. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η σήραγγα εκτροπής Solis στην Ελβετία, η οποία είναι υπό κατασκευή (Auel et al, 2010).

γ)Σύντομο και με απότομη κλίση τμήμα επιτάχυνσης της σήραγγας

Σκοπός του τμήματος αυτού, όπως προαναφέρθηκε, είναι η μετατροπή της ροής από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη, καθώς οι υψηλές ταχύτητες είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση της επιθυμητής μεταφορικής ικανότητας σε φερτά υλικά. Ένα τυπικό εύρος κλίσεων στο τμήμα αυτό είναι μεταξύ 15-35%.

δ)Ηπιας κλίσης τμήμα της σήραγγας

Σύμφωνα με τους Sumi et al (2004), το μήκος μιας σήραγγας εκτροπής κυμαίνεται μεταξύ 250–4 300 μέτρων, με κλίσεις από 1 έως 4%. Η διατομή μιας τέτοιας σήραγγας συνηθίζεται να είναι πεταλοειδούς σχήματος ή σχήματος αψίδας. Οι κυκλικές διατομές σπανίζουν, καθώς παρατηρείται συγκέντρωση των τάσεων στο χαμηλότερο τμήμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων δυνάμεων τριβής.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ροή είναι υπερκρίσιμη για την εξασφάλιση της μεταφοράς φερτών υλών, καθώς και μίας όσο το δυνατόν περισσότερο οικονομικής διατομής για τη σήραγγα. Η επιλογή της κλίσης θα πρέπει να ικανοποιεί δύο αντικρουόμενες προϋποθέσεις. Από τη μία πλευρά, η κλίση πρέπει να είναι αρκετά απότομη, ώστε ακόμα και με την ελάχιστη παροχή να αναπτύσσονται επαρκείς διατμητικές δυνάμεις για τη μεταφορά των φερτών υλικών, χωρίς αυτά να αποτίθενται ή ακόμα χειρότερα να συσσωρεύονται μέσα στη σήραγγα. Από την άλλη πλευρά, όσο πιο απότομη είναι η κλίση, τόσο πιο υψηλές ταχύτητες αναπτύσσονται, με αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερες ζημιές λόγω της τριβής. Σε αυτό το σημείο επομένως, θα πρέπει να βρεθεί η απαραίτητη ισορροπία.

ε)Έξοδος της σήραγγας

Με την κατασκευή της εξόδου, η ροή μεταβαίνει κατάντη του φράγματος. Αρχικά, είναι απαραίτητο να αποφευχθεί η συσσώρευση υλικών στην περιοχή της εξόδου. Γι' αυτό και πρέπει να εξασφαλιστεί επαρκής μεταφορική ικανότητα της ροής που εξέρχεται από τη σήραγγα. Κάτι τέτοιο συνήθως δεν αποτελεί πρόβλημα, μιας και με τη σήραγγα εκτροπής προσομοιώνονται οι φυσικές συνθήκες της ποτάμιας ροής προ της κατασκευής του φράγματος, όπου δεν λάμβανε χώρα έντονη συσσώρευση υλικών. Επιπλέον, η έξοδος δε θα πρέπει να απελευθερώνει τη ροή κοντά στις κατασκευές εξόδου του φράγματος, ώστε και πάλι να αποφευχθεί η συσσώρευση υλικών, η οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

4.2 Προσδιορισμός της παροχής σχεδιασμού

Ο προσδιορισμός της παροχής σχεδιασμού εξαρτάται αφενός, από την κατάλληλη διάμετρο της σήραγγας από οικονομική άποψη και αφετέρου, από τις υδρολογικές συνθήκες του ταμιευτήρα. Σύμφωνα με τους Vischer et al (1997) και τους Sumi et al (2004), οι παροχές σχεδιασμού στις σήραγγες εκτροπής κυμαίνονται από την πλημμύρα του ενός έτους, έως και αυτή των δέκα ετών. Ωστόσο, ειδικά για ταμιευτήρες με μικρή λεκάνη απορροής, οι οποίοι δημιουργήθηκαν από χωμάτινο φράγμα, χρησιμοποιείται ακόμα και η πλημμύρα των 100 ετών. Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός, ότι η εκτροπή του συνόλου της ροής είναι δυνατή μόνο όταν αυτή φτάνει την παροχή της σήραγγας. Στην περίπτωση που υπάρχει πλεόνασμα στη ροή, αυτή θα οδηγηθεί στον ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση έστω και μικρής ποσότητας φερτών υλών. Επομένως, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μιας παροχής σχεδιασμού που να ανταποκρίνεται σε μία ιδιαίτερα έντονη πλημμύρα.

4.3 Το πρόβλημα της τριβής

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, ο συνδυασμός μεγάλων ταχυτήτων ροής και μεγάλης ποσότητας μεταφερόμενων φερτών υλικών δημιουργεί έντονα προβλήματα στις σήραγγες εκτροπής. Μελέτες στις υπάρχουσες σήραγγες εκτροπής της Ελβετίας και Ιαπωνίας, έχουν δείξει πως η ροή σε όλες χαρακτηρίζεται υπερκρίσιμη, με τιμή του αριθμού Froude κατά μέσο όρο 2.1 (Auel and Boes,2011).

Η επίδραση της τριβής σε μία σήραγγα εκτροπής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γεωλογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής και τον υδραυλικό σχεδιασμό της σήραγγας. Μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλαζία και μεγάλη μέση διάμετρος κόκκων συνδράμουν σε έντονες ζημιές, λόγω της τριβής. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος μεταφοράς των φερτών υλικών μέσα στη σήραγγα. Ανάλογα με την κλίση της σήραγγας και την ποσότητα των μεταφερόμενων υλικών, οι κόκκοι τους μπορούν να κυλίσουν, να ολισθήσουν ή να αναπηδήσουν. Οι τελευταίοι, όπως είναι φυσικό, απελευθερώνουν μεγαλύτερη ενέργεια, με αποτέλεσμα να οδηγήσουν σε εντονότερη διάβρωση (Sklar and Dietrich,2004). Στην περίπτωση που η ποσότητα των φερτών που μεταφέρονται είναι αρκετά μικρότερη από τη χωρητικότητα της σήραγγας, η τριβή είναι πολύ εντονότερη, αφού τα λίγα υλικά αναπηδούν και ασκούν έντονες δυνάμεις. Στην αντίθετη περίπτωση, η διάβρωση περιορίζεται, λόγω μικρής απόθεσης των φερτών υλικών στη σήραγγα (Turowski and Rickenmann,2009). Στο πρόβλημα της τριβής σημαντική επίδραση έχει το υλικό κατασκευής της σήραγγας. Τα φυσικά υλικά, όπως ο γρανίτης και ο βασάλτης, έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στις λειαντικές διατμητικές δυνάμεις, επομένως προτιμώνται όταν οι κόκκοι στη σήραγγα ολισθαίνουν ή κυλίσουν. Αντίθετα όμως, τα υλικά αυτά είναι περισσότερο εύθραυστα στα αναπηδόμενα σωματίδια. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται περισσότερο χάλυβας ή και τσιμέντο (HPC) και υψηλής αντοχής σκυρόδεμα, με προτιμότερο το τελευταίο λόγω μικρότερου κόστους. Τα περισσότερα

συστήματα εκτροπής είναι κατασκευασμένα από υψηλής αντοχής σκυρόδεμα, ενώ υπάρχουν και ορισμένα στην Ελβετία που έχουν επενδυθεί με πλάκες βασάλτη.

Από τα παραπάνω είναι πασιφανές πως ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας σήραγγας εκτροπής έχει δύο συνιστώσες, το βέλτιστο υδραυλικό σχεδιασμό της και την επιλογή βιώσιμων ανθεκτικών υλικών. Ο βέλτιστος υδραυλικός σχεδιασμός περιλαμβάνει, το είδος της διατομής της σήραγγας (πεταλοειδούς ή αψιδωτού σχήματος), την αποφυγή μεγάλων στροφών (για την αποφυγή κρουστικών και δευτερευόντων κυμάτων) και τέλος τη διατήρηση κατά το δυνατό σταθερής κλίσης σε όλο το μήκος της. Η επιλογή βιώσιμων υλικών εξαρτάται από τον τρόπο μεταφοράς των κόκκων των φερτών υλικών. Στην περίπτωση της κύλισης και της ολίσθησης, οι δυνάμεις είναι κατά βάση λειαντικές και προτιμώνται φυσικά υλικά σε πλάκες κυρίως γωνίες, ώστε οι αρμοί να μην είναι παράλληλοι στη ροή. Στην περίπτωση της αναπήδησης, οι δυνάμεις είναι προσκρουσικές και απαιτείται χρήση χάλυβα ή σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Κρίσιμη παράμετρος για το τελευταίο είναι η διαδικασία της σκλήρυνσής του, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή προσοχή.

4.4 Συστήματα εκτροπής ανά τον κόσμο

Η Ελβετία και η Ιαπωνία είναι οι κυρίαρχες χώρες στην εφαρμογή της παράκαμψης του ταμειυτήρα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4. 1 Ταμιευτήρες της Ιαπωνίας και Ελβετίας, στους οποίους πραγματοποιήθηκε παράκαμψη του ταμιευτήρα (Vischer et al,1997 και Auel et al,2010).

Όνομα Φράγματος ¹	Έτος	Σχήμα διατομής	Διαστάσεις διατομής (HxB(m))	Μήκος ² (m)	Κλίση ³ %	Παροχή σχεδιασμού (m ³ /s)	Ταχύτητα σχεδιασμού (m/s)	Συχνότητα λειτουργίας
Nunobiki (J)	1908	Αψιδωτό	2.9x2.9	-/258	-/1.3	39	-	-
Asahi (J)	1998	Αψιδωτό	3.8x3.8	12/2 350	20/2.9	140	11.4	13 μέρες/έτος
Miwa (J)	2004	Πεταλοειδές	7x7.8	-/4 308	-/1	300	10.8	-
Matsukawa (J)	Υ.Κ. ⁴	Αψιδωτό	5.2x5.2	-/1 417	-/4	200	15	-
Egschi (S)	1976	Κυκλικό	D=2.8	20/360	21/2.6	74	9	10 μέρες/έτος
Palagnedra (S)	1974	Κυκλικό	D=6.2	50/1 760	29.6/2	250	10	2-5 μέρες/έτος
Pfaffensprung (S)	1922	Πεταλοειδές	5.23x4.70 A=21 m ²	25/282	35/3	220	10	200 μέρες/έτος
Rempen (S)	1983	Πεταλοειδές	3.4x3.5	22/450	25/4	80	14	1-5 μέρες/έτος
Runcahez (S)	1962	Αψιδωτό	4.27x3.8	85/572	25/1.4	110	9	4 μέρες/έτος

Στο φράγμα βαρύτητας Miwa της Ιαπωνίας, το 2004 (45 χρόνια μετά την κατασκευή του) κατασκευάστηκε ένα φράγμα ελέγχου, με σκοπό να συγκρατεί τα χονδρόκοκκα φερτά υλικά. Κατάντη αυτού, τοποθετήθηκε το φράγμα εκτροπής, με σκοπό να εκτρέπει τη ροή στη σήραγγα εκτροπής και από εκεί αυτή να οδηγείται κατάντη του ταμιευτήρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.

¹ Με J εννοείται η Ιαπωνία(Japan) και με S η Ελβετία(Switzerland)

² Η πρώτη τιμή αναφέρεται στο μήκος του τμήματος επιτάχυνσης, ενώ η δεύτερη στο μήκος του τμήματος ήπιας κλίσης.

³ Ομοίως με το μήκος, η πρώτη τιμή αναφέρεται στην κλίση του τμήματος επιτάχυνσης, ενώ η δεύτερη στην κλίση του ήπιου τμήματος.

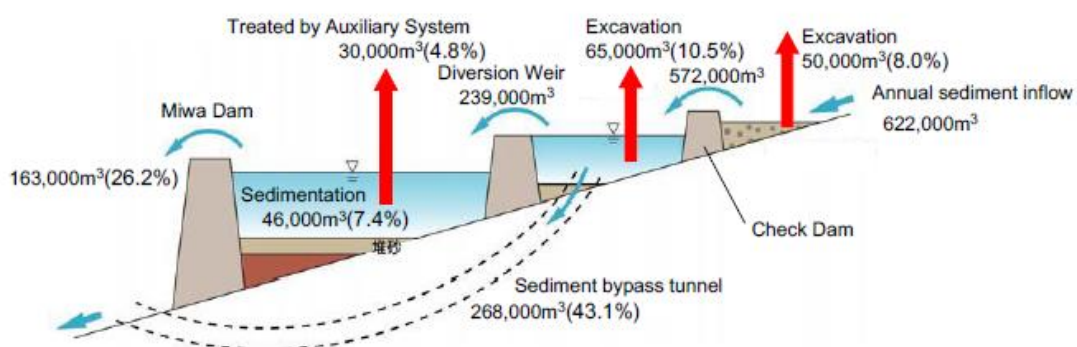
⁴ Υ.Κ.= Υπό Κατασκευή



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση του συστήματος εκτροπής του ταμιευτήρα Μίβα της Ιαπωνίας (Sumi et al,2004).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύστημα εκτροπής λειτουργεί κατά τις πλημμυρικές περιόδους. Όταν η ροή είναι μειωμένη, η είσοδος της σήραγγας κλείνει, με αποτέλεσμα να αποθηκεύεται νερό με χαμηλή συγκέντρωση φερτών. Όπως είναι φυσικό, κατάντη του ταμιευτήρα φτάνει κατά βάση φορτίο απόπλυσης, ενώ το φορτίο της κοίτης εγκλωβίζεται στο φράγμα ελέγχου, από το οποίο απομακρύνεται μηχανικά και διατίθεται σαν δομικό υλικό. Μηχανική απομάκρυνση υφίστανται επίσης, όσα υλικά εγκλωβίζονται στο φράγμα εκτροπής.

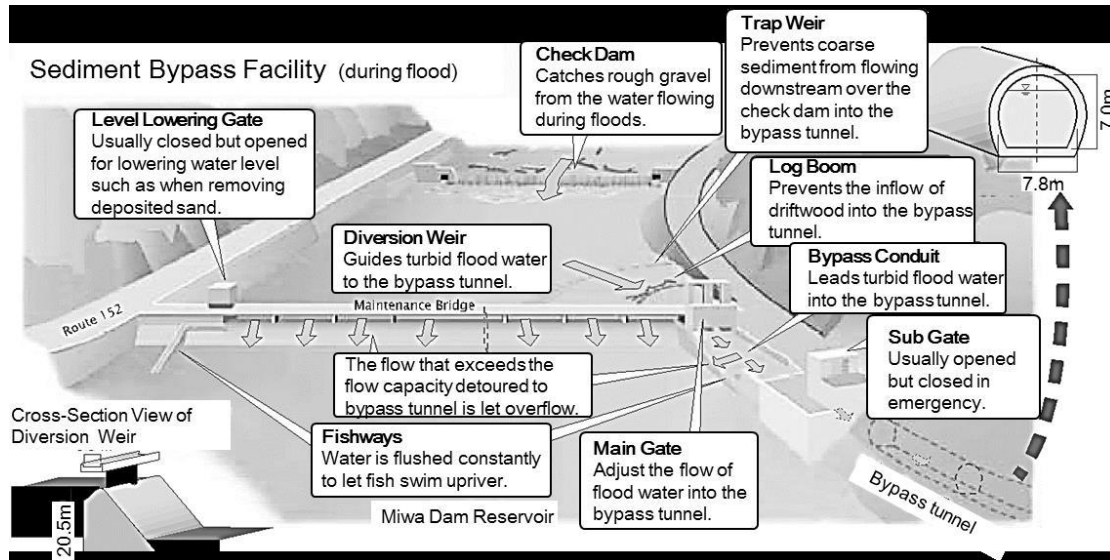
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι μία συνάρτηση του μεγέθους της πλημμύρας και της χρονικής στιγμής και διάρκειάς της. Τα πρώτα επτά χρόνια λειτουργίας της σήραγγας, δεν παρατηρήθηκαν σοβαρές επιπτώσεις στα κατάντη (Sumi et al ,2012).



Εικόνα 4.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος εκτροπής της ροής στο φράγμα Μίβα της Ιαπωνίας (Sumi et al,2012).

Η σήραγγα εκτροπής έχει μήκος 4 308 μέτρα με μέγιστη παροχή 300 m³/s. Το σχήμα της είναι πεταλοειδές, με ύψος 7 μέτρα και πλάτος 7.8 μέτρα, ενώ η κλίση της είναι 1/100. Για

να αποφευχθεί η έμφραξη της εισόδου της σήραγγας από μπάζα και κορμούς δέντρων, υπάρχει τόσο ένα φράγμα ελέγχου, όσο και μία μικρή κατασκευή συγκράτησης τέτοιων υλικών. Επιπλέον, για την αποφυγή της διάβρωσης στην έξοδο της, που θα μπορούσε να προκαλέσει το νερό της πλημμύρας, δημιουργήθηκε μία κατασκευή καταστροφής της ενέργειας. Αμφότερες οι δύο αυτές κατασκευές φαίνονται στην Εικόνα 4.7. Η διάταξη του συστήματος εκτροπής στο σύνολό του φαίνεται στην Εικόνα 4.6



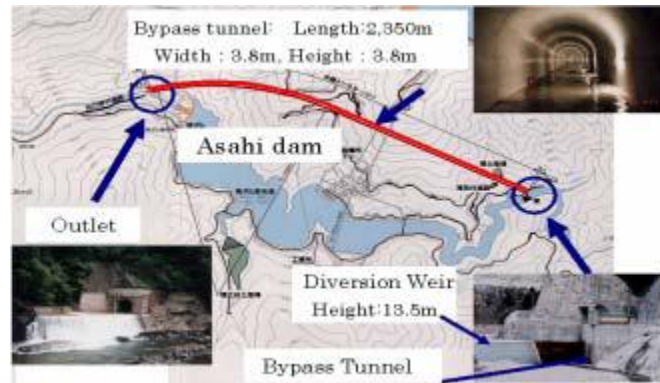
Εικόνα 4.6 Εγκατάσταση εκτροπής ταμιευτήρα Miwa.



Εικόνα 4.7 Αριστερά, η κατασκευή αποφυγής έμφραξης της εισόδου της σήραγγας. Δεξιά, η κατασκευή καταστροφής της ενέργειας στην έξοδο της σήραγγας.

Ο ταμιευτήρας Hushan της Βόρειας Κίνας, κατασκευάστηκε το 1969. Επτά μόλις χρόνια αργότερα, το 54% της χωρητικότητάς του είχε χαθεί λόγω της συσσώρευσης υλικών. Για την καταπολέμηση του προβλήματος, κατασκευάστηκε ένα φράγμα ελέγχου της πλημμύρας ακριβώς ανάντη της εισόδου του ταμιευτήρα, το οποίο οδηγούσε σε μία σήραγγα εκτροπής.

Το φράγμα Asahi της Ιαπωνίας, είναι ένα τοξωτό φράγμα, το οποίο ολοκληρώθηκε το 1978 για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Εκτεταμένα προβλήματα συσσώρευσης φερτών υλικών, οδήγησαν στην κατασκευή ενός φράγματος εκτροπής με την αντίστοιχη σήραγγα το 1998. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος εκτροπής ακολουθεί στην Εικόνα 4.8.

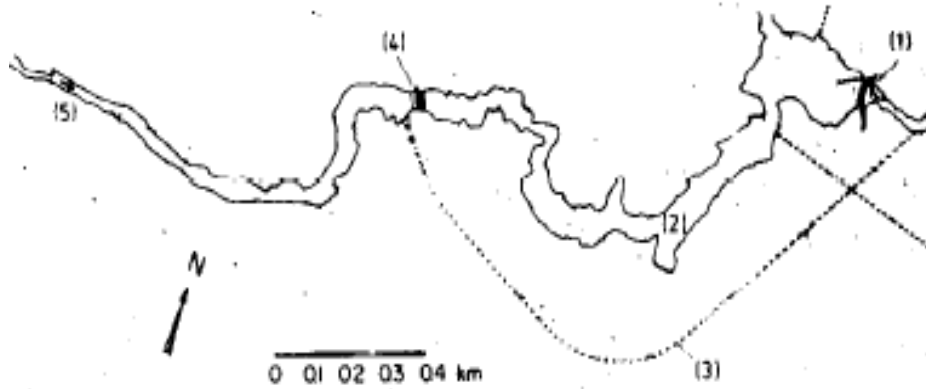


Εικόνα 4.8 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος εκτροπής στον ταμιευτήρα Asahi της Ιαπωνίας (Sumi et al,2004).

Η σήραγγα εκτροπής έχει μήκος 2 350 μέτρα με μέγιστη παροχή $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Το σχήμα της είναι πεταλοειδούς μορφής με ύψος 3.8 μέτρα και πλάτος επίσης 3.8 μέτρα και κλίση περίπου $1/35$.

Η επιλογή της τυπικής διατομής της σήραγγας, έγινε με βάση την επιθυμητή ομοιόμορφη ροή και μπορεί να απελευθερώσει τη μέγιστη απορροή, με το βάθος του νερού να καλύπτει μόνο το 80% της σήραγγας. Η μορφή της διατομής επιλέχθηκε, ώστε να είναι, κατά το δυνατόν, οικονομική και να επιτρέπει την εύκολη συντήρησή της. Παρά το γεγονός αυτό, παρατηρήθηκαν ζημιές λόγω των αυξημένων δυνάμεων τριβής. Ακόμη κι αν αυτές ήταν στα επίπεδα που είχαν προβλεφθεί κατά το στάδιο του σχεδιασμού, έγιναν επιδιορθώσεις και ενισχύσεις σε αρκετά σημεία κατά τη μη πλημμυρική περίοδο.

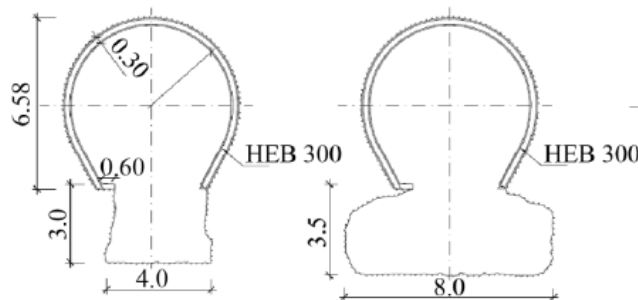
Στον ταμιευτήρα Palagnedra της Ελβετίας, η σήραγγα εκτροπής κατασκευάστηκε το 1978, με τη σχηματική απεικόνιση του συστήματος να φαίνεται στην Εικόνα 4.9.



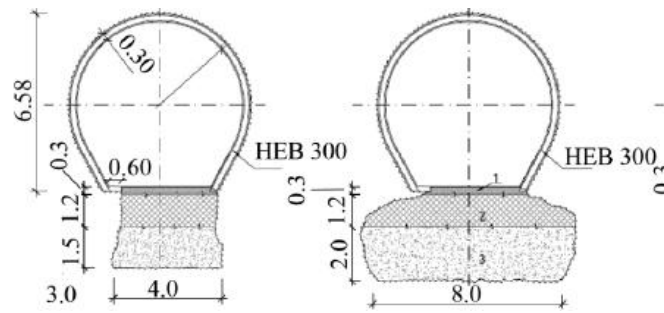
Εικόνα 4.9 Σχηματική απεικόνιση ταμιευτήρα Palagnedra. 1)Το φράγμα, 2)Ο ταμιευτήρας, 3)Σήραγγα εκτροπής, 4)Ανάντη ποταμός (UNESCO,1985).

Η σήραγγα έχει μήκος 1 760 μέτρα και μέγιστη παροχή $250 \text{ m}^3/\text{s}$. Το σχήμα της είναι πεταλοειδούς διατομής πλάτους 6.3 μέτρων και επιφάνειας 30 m^2 , με την κλίση της να είναι 2%.

Μία μεγάλη πλημμύρα, με απορροή από 2 000 έως και 3 500 m^3/s , που ξέσπασε τον Αύγουστο του 1978, προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες στη σήραγγα, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 4.12. Ο ταμιευτήρας γέμισε πλήρως με φερτά υλικά, ενώ τόσο η είσοδος, όσο και η έξοδος της σήραγγας είχαν φράξει. Τα πρώτα μέτρα επιδιόρθωσης έγιναν την περίοδο 1980-1988. Ωστόσο, ορισμένα τμήματα δεν επιδιορθώθηκαν ποτέ τα 30 και πλέον αυτά χρόνια λειτουργίας της. όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4.10 και 4.11, η βάση της σήραγγας γέμισε με ένα στρώμα χαλικιού, ακολούθησε ένα στρώμα σκυροδέματος πάχους ενός μέτρου και ολοκληρώθηκε από ένα στρώμα, πάχους 0.30 μέτρων, σκυροδέματος C50/60 υψηλής αντοχής.



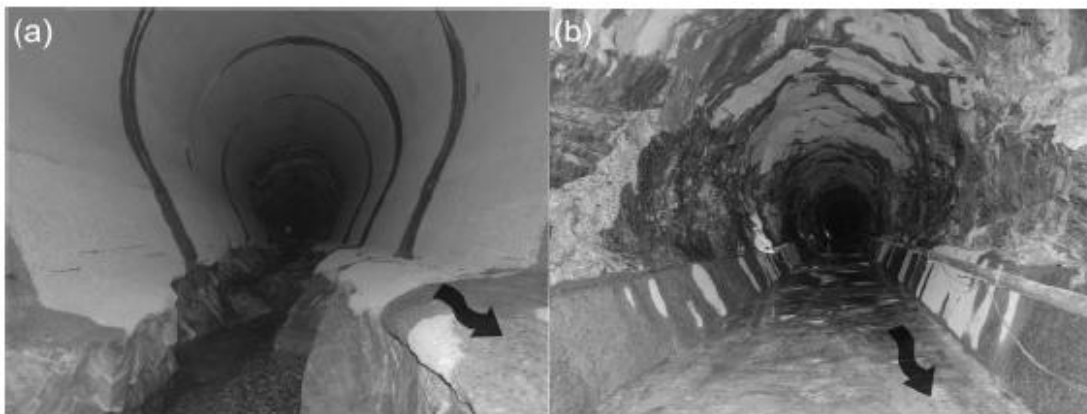
Εικόνα 4.10 Τυπική διατομή πριν την επισκευή.



Εικόνα 4. 11 Τυπική διατομή μετά την επισκευή

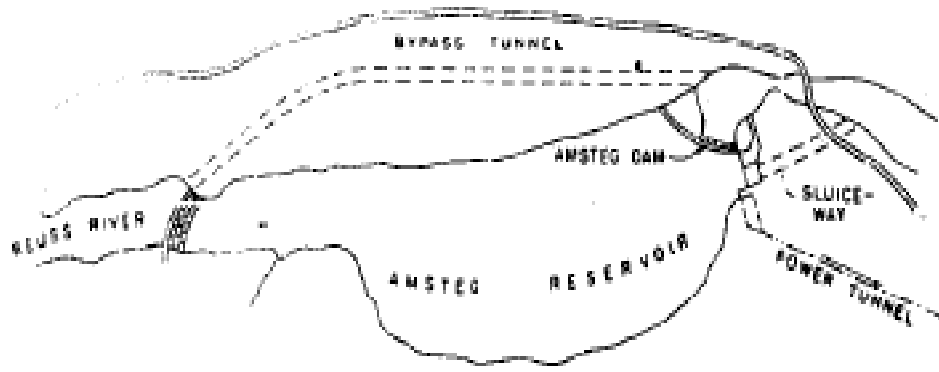


Εικόνα 4.12 Φωτογραφίες από εκτεταμένες βλάβες της σήραγγας εκτροπής.



Εικόνα 4.13 Σήραγγα εκτροπής του ταμιευτήρα Palagnedra (Auel and Boes, 2012).

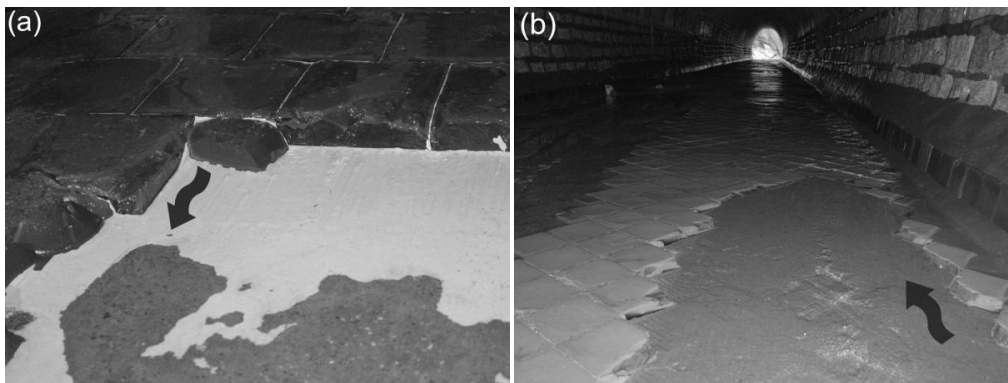
Παρόμοιο πρόβλημα παρατηρήθηκε και στον ταμιευτήρα Pfaffensprung (Amsteg) της Ελβετίας, μετά από ένα επεισόδιο πλημμύρας που διήρκησε πέντε χρόνια. Εκεί, το σύστημα εκτροπής κατασκευάστηκε το 1922, από πλάκες βασάλτη, με τη διάταξή του να φαίνεται στην Εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14 Διάταξη συστήματος εκτροπής ταμιευτήρα Amsteg (UNESCO,1985).

Εδώ η σήραγγα έχει μήκος 283 μέτρα και μέγιστη παροχή $220 \text{ m}^3/\text{s}$. Στα πρώτα 25 μέτρα της παρατηρείται καταβίβασμός κατά 6 μέτρα, που οδηγεί σε κλίση 24%, ενώ η διατομή της μειώνεται από τα 66 m^2 της εισόδου σε 21 m^2 . Στο υπολειπόμενο τμήμα της, η σήραγγα έχει κλίση 3%.

Στην Εικόνα 4.15 φαίνονται τα προβλήματα που προκάλεσε η διάβρωση στη σήραγγα.

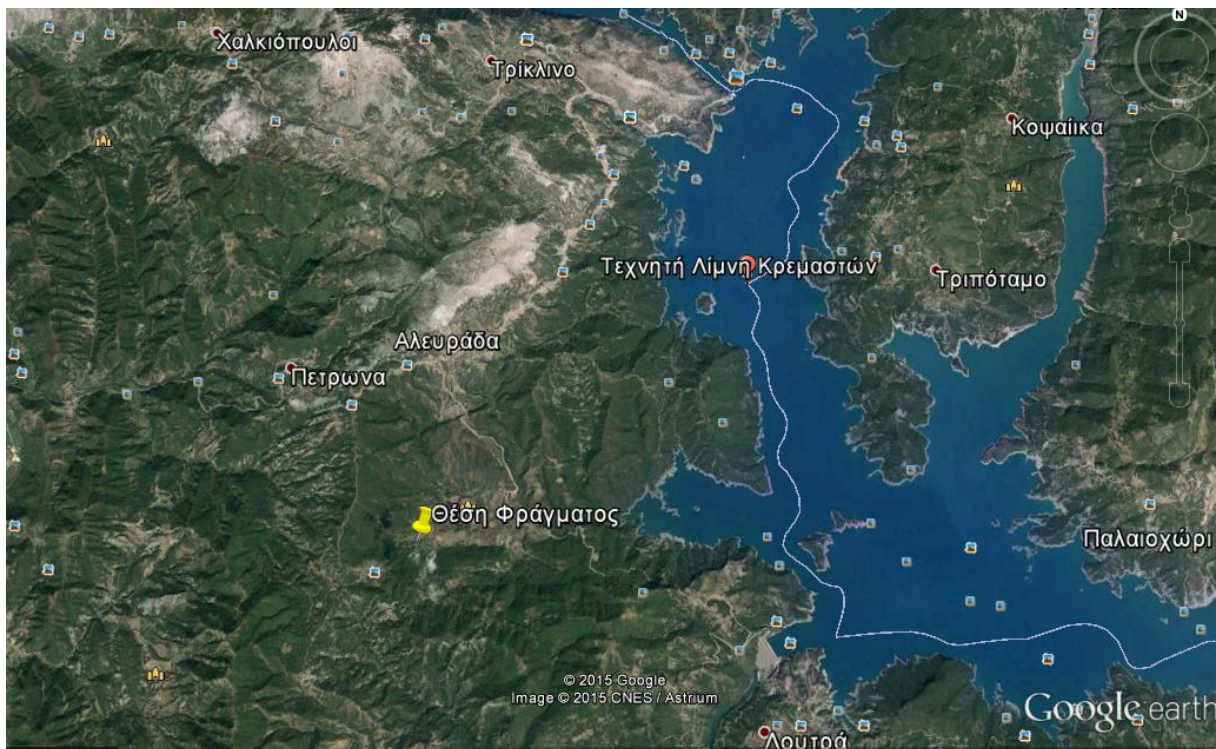


Εικόνα 4. 15 Σπασμένες πλάκες βασάλτη. Οι φωτογραφίες λήφθηκαν το 2011 (Auel and Boes,2012).

Έργα επιδιόρθωσης του προβλήματος πραγματοποιούνται κάθε χρόνο. Την τελευταία δεκαετία έχουν δοκιμασθεί διαφορετικά υλικά, όπως σκυρόδεμα, πλάκες σιδήρου και χάλυβα και πλάκες βασάλτη με άλλη διάταξη, χωρίς καμία από τις μεθόδους αυτές όμως να έχει αποδειχθεί βιώσιμη σε βάθος χρόνου.

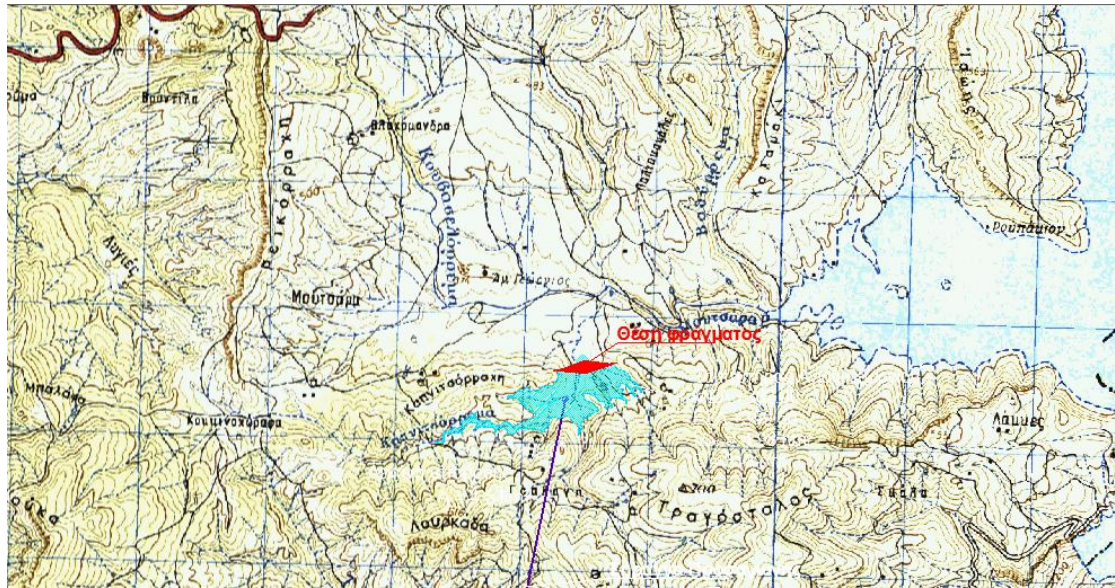
5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Στα πλαίσια της μελέτης της συσσώρευσης των φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα, αλλά και της διαχείρισης και αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού, έγινε προσπάθεια μελέτης ενός συστήματος εκτροπής φερτών υλικών σε ένα φράγμα. Αυτό επιλέχθηκε από το ερευνητικό έργο του ΕΜΠ “Διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής έργων αποταμίευσης ενέργειας μέσω άντλησης, σε περιοχές του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας” και είναι το λεγόμενο φράγμα Καπνισόρρεμα, στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου στο νομό Αιτωλοακαρνανίας. Η θέση του φράγματος στο χάρτη, καθώς και η διάταξη αυτού και του ταμιευτήρα φαίνονται στις Εικόνες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.



Εικόνα 5.1 Τοποθεσία φράγματος Αγίου Γεωργίου.

Το φράγμα αυτό διερευνάται για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πρόκειται λοιπόν, για ένα ταμιευτήρα αντλησοταμίευσης, η στάθμη του οποίου κυμαίνεται από τη μέγιστη έως την ελάχιστη τιμή της σε διάστημα 24 ωρών.

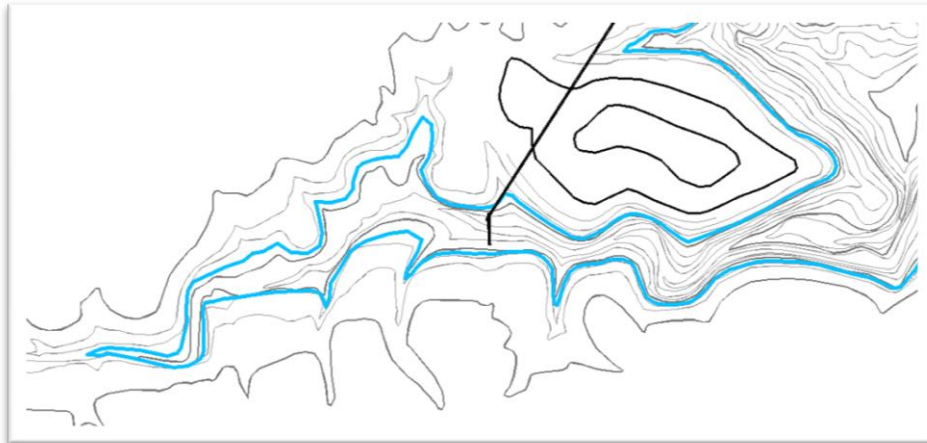


Εικόνα 5.2 Θέση φράγματος και ταμιευτήρα

Ο ταμιευτήρας είναι μεγέθους $E_{\text{ταμ}}=313$ στρεμμάτων, έχει λεκάνη απορροής έκτασης $A_{\text{λεκ}}=4.5 \text{ km}^2$ και ωφέλιμο όγκο $V_{\text{ωφ}}=4.98 \text{ hm}^3$. Για το σχεδιασμό του συστήματος εκτροπής, χρησιμοποιήθηκε η πλημμύρα των 100 χρόνων, $Q_{100}=26.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

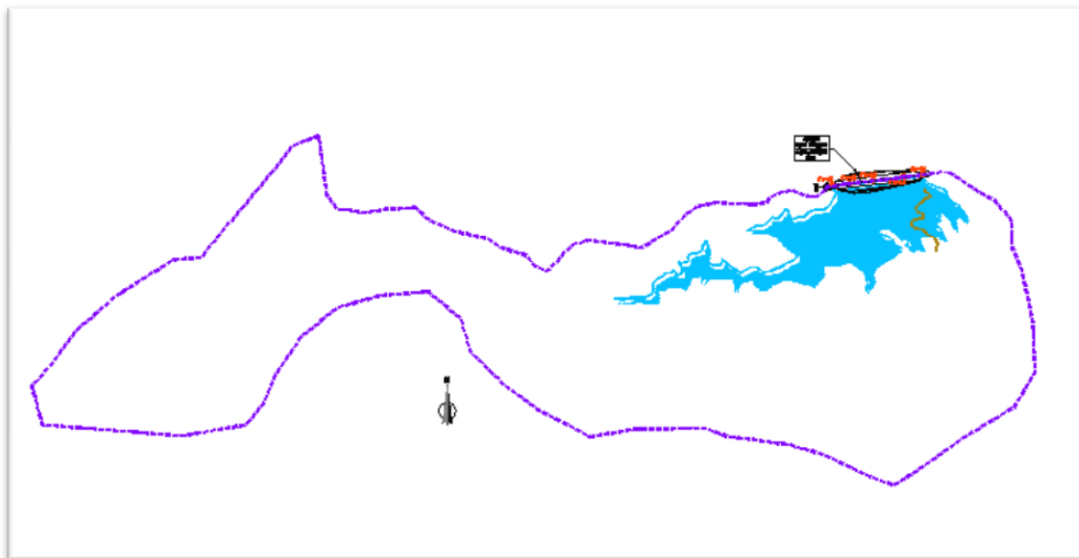
5.1 Επιλογή θέσης εισόδου και κορμού της σήραγγας

Για την κατασκευή της εισόδου επιλέχθηκε η Θέση Α (σύμφωνα με την παράγραφο 4.2 και την Εικόνα 4.2), ώστε να αποφευχθεί στο μέγιστο βαθμό η συσσώρευση υλικών μέσα στον ταμιευτήρα. Η επιλογή της θέσης εισόδου της σήραγγας επηρεάστηκε από δύο παράγοντες. Αφενός, η είσοδος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στο ανάντη άκρο του ταμιευτήρα και αφετέρου η στάθμη της θα πρέπει να είναι ευνοϊκή, όσο αφορά την επίτευξη των απαραίτητων κλίσεων. Έτσι η θέση της εισόδου επιλέχθηκε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 Κάτοψη εισόδου σήραγγας εκτροπής

Όπως είναι φανερό, δεν βρίσκεται ακριβώς στην αρχή του ταμιευτήρα. Αυτό οφείλεται πρωτίστως, στη λεκάνη απορροής του φράγματος, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 5.4.

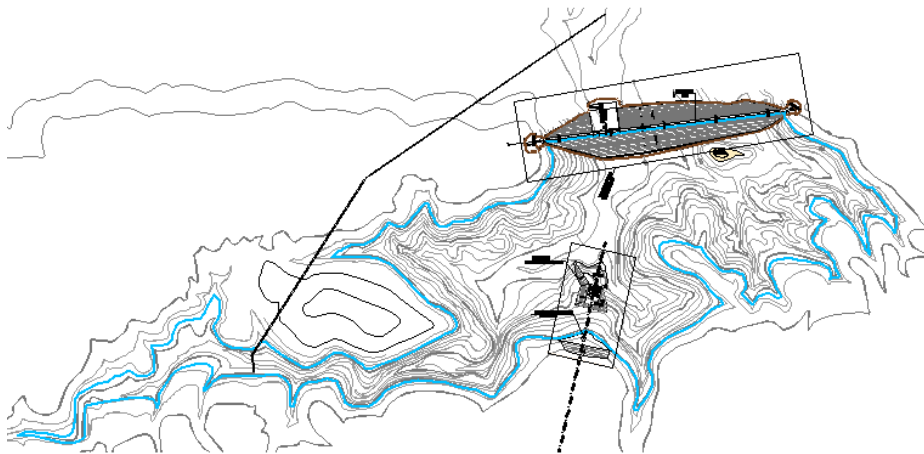


Εικόνα 5.4 Λεκάνη απορροής ταμιευτήρα.

Η είσοδος της σήραγγας τοποθετήθηκε εκεί, ώστε να συγκεντρώνει τη ροή όχι μόνο του κύριου ποταμού, αλλά και του μεγαλύτερου μέρους των παραποτάμων της λεκάνης απορροής. Έτσι, θεωρήθηκε πως η σήραγγα θα συγκεντρώνει τη ροή περίπου των 2/3 της λεκάνης απορροής. Σημαντικός παράγοντας ήταν, επίσης, η είσοδος να είναι όσο το δυνατό

πιο κοντά στην έξοδο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μήκους της σήραγγας και κατ' επέκταση του κόστους της.

Η στάθμη της εισόδου, λοιπόν, είναι +374 m. Το υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας θα πρέπει να μην πλησιάζει ιδιαίτερα τον ταμειευτήρα, ενώ η έξοδός της θα πρέπει να απέχει αρκετά από τις κατασκευές εξόδου κατάντη του φράγματος. Επιλέχθηκε λοιπόν, η διάταξη της Εικόνας 5.5.



Εικόνα 5.5 Κάτοψη σήραγγας εκτροπής

Γενικά, αποφεύγονται σχηματισμοί γωνιών στη σήραγγα, διότι προκαλούν τη δημιουργία κυμάτων πρόσκρουσης στα τοιχώματά της, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτεταμένων ζημιών. Έτσι, τη θέση της παίρνει ένα τόξο κύκλου, ακτίνας $R=30$ m και μήκους $L_{\text{συν}}=13.19$ m. Η έξοδος της σήραγγας, τέλος, έχει στάθμη +328 m και απέχει αρκετά από το φράγμα.

Το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι $L_{\text{σηρ}}=922.14$ m σε κάτοψη, μία τιμή που δε χαρακτηρίζεται φυσικά μικρή, αλλά ούτε και εξωφρενικά μεγάλη.

5.2 Επίτευξη κλίσης

Από τη βιβλιογραφία, η οποία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, η μέση κλίση για το τμήμα επιτάχυνσης είναι $\hat{S}=26\%$. Αυτή είναι επιθυμητό να επιτυγχάνεται σε μικρό μήκος, το οποίο εδώ επιλέχθηκε να είναι 50 m. Ο υπολογισμός της κλίσης γίνεται ως εξής:

$$\frac{374-x}{50}=0.26 \rightarrow \Delta h=13 \text{ m} \rightarrow x=361 \text{ m}$$

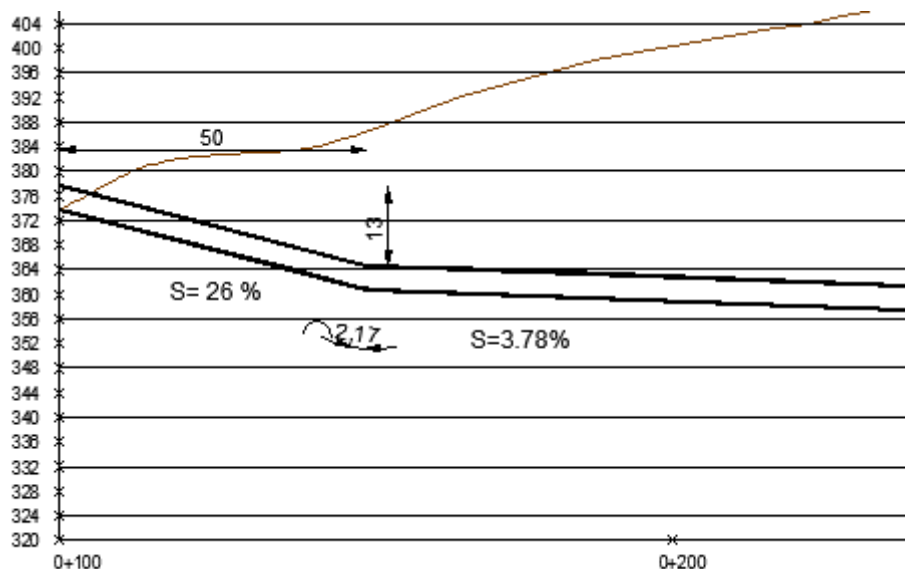
Επομένως, για την επίτευξη της επιθυμητής κλίσης, απαιτείται καταβιβασμός της στάθμης κατά 13 m στα πρώτα 50 m της σήραγγας.

Για το τμήμα ήπιας κλίσης τώρα, από τη βιβλιογραφία και πάλι, η μέση κλίση είναι $\hat{S}=2.47\%$. Ο βασικός περιορισμός όμως είναι $1\% < S < 4\%$. Η κλίση του τμήματος αυτού υπολογίζεται

$$\frac{361-328}{922,14-50} = 0.0378 \rightarrow S = 3.78 \%$$

Η κλίση αυτή παρ' όλο που είναι μεγαλύτερη της μέσης κλίσης \hat{S} , είναι αποδεκτή αφού είναι μέσα στις ακραίες τιμές της κλίσης του τμήματος αυτού.

Η μετάβαση από το ένα τμήμα στο άλλο γίνεται με ένα τόξο συναρμογής, ώστε να μη σχηματίζεται γωνία. Το τόξο αυτό είναι τμήμα κύκλου με ακτίνα $R=10$ m και έχει μήκος $L_{\text{συν}}=2.165$ m. Μία τυπική όψη φαίνεται στην Εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6 Μηκοτομή της σήραγγας εκτροπής. Φαίνεται η μετάβαση από την έντονη στην ήπια κλίση και το τμήμα της συναρμογής.

Ολοκληρωμένο το σχέδιο της μηκοτομής δίνεται στο Παράρτημα.

5.3 Διαστάσεις σήραγγας

Μια σήραγγα εκτροπής έχει σχήμα πεταλοειδές ή αψιδωτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε σήραγγα μικτής διατομής, αποτελούμενη από ένα ορθογωνικό τμήμα και ένα ημικύκλιο.

Βασική απαίτηση του σχεδιασμού είναι η ροή στη σήραγγα να είναι ελεύθερη, αλλά και υπερκρίσιμη. Έτσι, η ροή θα εισέρχεται στη σήραγγα με το κρίσιμο βάθος. Σύμφωνα με τον

Στεφανάκο(Σημειώσεις Υδραυλικών κατασκευών και Φραγμάτων, Έργα υπερχείλισης και εκτροπής, 2013), ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Υπόθεση πλάτους σήραγγας εκτροπής $B=2$ m και δεδομένη παροχή σχεδιασμού $Q_{100}=26.9$ m³/s.
- Κρίσιμου βάθους $y_{κρ} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 \times g}} \rightarrow y_{κρ} = \sqrt[3]{\frac{26.9^2}{2^2 \times 9.81}} \rightarrow y_{κρ} = 2.64$ m
- Ύψος ενέργειας $H=1.55 \times y_{κρ} \rightarrow H=1.55 \times 2.64 \rightarrow H=4.09$ m
- Για να επικρατεί ελεύθερη ροή πρέπει $H \leq 1.2D \rightarrow D \geq 4.09/1.2 \rightarrow D \geq 3.4$ m. Επομένως επιλέγεται ύψος σήραγγας $D=3.5$ m

Με δεδομένες τις παραπάνω διαστάσεις, υπολογίζεται ο αριθμός Froude με τη Σχέση 5.1

$$Fr = \frac{Q}{E(y)^{1.5} \times \sqrt{\frac{g}{B(y)}}} \quad (5.1)$$

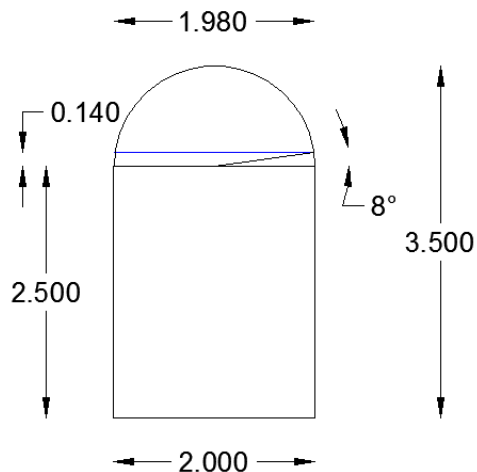
με

- $E(y)$ το εμβαδό της διατομής για βάθος ροής y , $E(y)=5.28$ m²
- $B(y)$ το πλάτος της βρεχόμενης επιφάνειας στη στάθμη του βάθους ροής y , $B(y)=1.98$ m
- $g=9.81$ m/s²

Έτσι,

$$Fr = \frac{26.9}{5.28^{1.5} \times \sqrt{\frac{9.81}{1.98}}} \rightarrow Fr=1.1, \text{ επομένως επαληθεύεται η υπερκρίσιμη ροή.}$$

Η διατομή της σήραγγας φαίνεται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7 Όψη της διατομής που τελικά επιλέχθηκε. Με μπλε χρώμα φαίνεται η στάθμη του νερού σε αυτή.

Αξίζει να σημειωθεί πως η εν λόγω σήραγγα δε χρειάζεται θυρόφραγμα στην είσοδό της, ακριβώς επειδή δεν πρόκειται για έναν ταμιευτήρα μόνιμης αποθήκευσης νερού. Ο ταμιευτήρας εδώ γεμίζει με νερό που προέρχεται από υδροληψίες, επομένως η λειτουργία του δεν επηρεάζεται αν όλη η εισροή του από τη λεκάνη απορροής παροχετεύεται στη σήραγγα εκτροπής.

5.4 Κριτήριο ταχύτητας στο τμήμα επιτάχυνσης

Από τη βιβλιογραφία, η ταχύτητα στο τέλος του τμήματος επιτάχυνσης είναι κατά μέσο όρο $\tilde{V}=15.3 \text{ m/s}=50.18 \text{ fps}$ ($1 \text{ m}=3.281 \text{ ft}$).

Με τη θεώρηση ότι το τμήμα επιτάχυνσης μπορεί να προσομοιωθεί με έναν υπερχειλιστή, πρέπει να βρεθεί το βάθος ροής στον πόδα του τμήματος, ώστε να βρεθεί η ταχύτητα και να επαληθευθεί το κριτήριο.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας, θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση της ενέργειας με:

$$E_{\alpha\rho\chi} = \text{Υψομετρική Διαφορά} + \text{Ύψος Ενέργειας} \quad (5.2) \rightarrow E_{\alpha\rho\chi} = z_1 + \frac{u^2}{2 \times g} \rightarrow E_{\alpha\rho\chi} = 13 + 4.09 \rightarrow$$

$$E_{\alpha\rho\chi} = 17.09 \text{ m}$$

$$E_{\tau\epsilon\lambda} = \text{Ύψος Ενέργειας} + \text{Βάθος Ροής} + \text{Απώλειες Τριβής} \quad (5.3) \rightarrow E_{\tau\epsilon\lambda} = \frac{u^2}{2 \times g} + \gamma_{\text{ποδ}} + h_f$$

Το βάθος ροής συνδέεται με τη γεωμετρία της διατομής και την παροχή Q , με τη Σχέση 5.4α

$$V = \frac{Q}{B \times \gamma_{\text{ποδ}}} \quad (5.4\alpha)$$

$$\text{Η αλλιώς } \gamma_{\text{ποδ}} = \frac{Q}{B \times V} \quad (5.4\beta)$$

Λόγω της διατήρησης της ενέργειας, αγνοώντας προς το παρόν τις απώλειες τριβής, προκύπτει

$$E_{\alpha\rho\chi} = E_{\tau\epsilon\lambda} \rightarrow 17.09 = \frac{V^2}{2 \times 9.81} + \frac{26.9}{2 \times V} + 0 \rightarrow V^3 - 335.3 \times V = -263.89$$

Η τριτοβάθμια αυτή εξίσωση οδηγεί σε τρεις λύσεις: $V_1 = -18.69$ m/s, $V_2 = 0.788$ m/s και $V_3 = 17.9$ m/s.

Οι δύο πρώτες λύσεις απορρίπτονται (η V_1 για ευνόητους λόγους και η V_2 διότι είναι πολύ μικρή και αναφέρεται σε υποκρίσιμη ροή), κι έτσι προκύπτει η ταχύτητα στον πόδα $V = 17.9$ m/s. Χρησιμοποιώντας τη Σχέση 5.4β, προκύπτει το βάθος ροής στον πόδα $\gamma_{\text{ποδ}} = 0.751$ m.

Η πραγματική ταχύτητα θα είναι μικρότερη αυτής που μόλις υπολογίστηκε, λόγω των απωλειών τριβής που αγνοήθηκαν. Στην προσπάθεια να γίνει μία καλύτερη προσέγγιση της ταχύτητας, και κατά συνέπεια του βάθους ροής στον πόδα, οι απώλειες τριβής μπορούν να εκτιμηθούν θεωρώντας τις περίπου το 20% της μεταβολής της ενέργειας. Έτσι,

$$h_f = 0.20 \times \Delta H = 0.20 \times (13 + 4.09) \rightarrow h_f = 3.42 \text{ m}$$

$$\text{Τότε από την εξίσωση της ενέργειας προκύπτει } E_{\alpha\rho\chi} = E_{\tau\epsilon\lambda} \rightarrow 17.09 = \frac{V^2}{2 \times 9.81} + \frac{26.9}{2 \times V} + 3.42$$

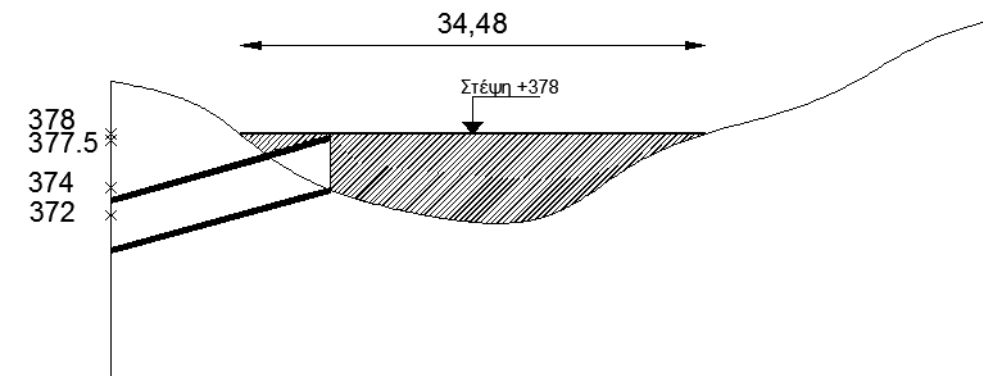
$$\rightarrow V^3 - 263.9 \times V = -263.89$$

Από την τριτοβάθμια αυτή εξίσωση προκύπτουν και πάλι τρεις λύσεις: $V_1 = -16.72$ m/s, $V_2 = 1$ m/s και $V_3 = 15.72$ m/s.

Προφανώς και πάλι οι δύο πρώτες θα απορριφθούν, οδηγώντας σε ταχύτητα στο πόδα $V = 15.72$ m/s, η οποία είναι πολύ κοντά σε αυτή που επικρατεί στη βιβλιογραφία. Τότε, και πάλι από τη Σχέση 5.4β, προκύπτει βάθος ροής στον πόδα $\gamma_{\text{ποδ}} = 0.86$ m.

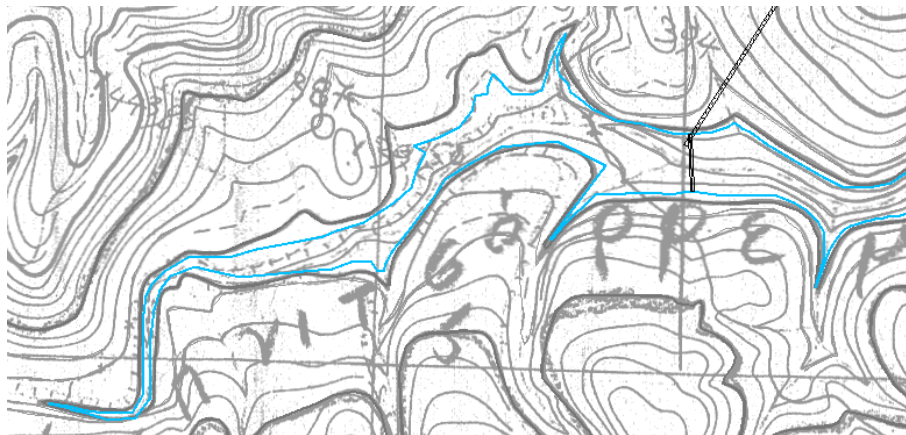
5.5 Θέση φράγματος εκτροπής και ογκομέτρηση

Η σήραγγα ξεκινά στη στάθμη +374 m, με ύψος 3.50 m. Το φράγμα εκτροπής θα πρέπει να καλύπτει τη σήραγγα, η οροφή της οποίας φτάνει τη στάθμη +377.5 m. Επιλέγεται λοιπόν, το φράγμα να φτάνει τη στάθμη +378 m. Η βάση του είναι στη στάθμη +372 m, επομένως το φράγμα εκτροπής έχει ύψος $h = 6$ m και μήκος $L_{\phi\rho} = 34.48$ m. Η όψη του φαίνεται στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 Όψη του φράγματος εκτροπής. Αριστερά του φράγματος, φαίνεται η είσοδος της σήραγγας εκτροπής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η στάθμη της στέψης του φράγματος εκτροπής καθορίζει και την ανώτατη στάθμη του ταμιευτήρα, αφού στη σήραγγα εκτροπής θα παροχετεύονται και τα ύδατα που προέρχονται από την υδροληψία του κατάντη ταμιευτήρα. Επομένως, η ανώτατη στάθμη του ταμιευτήρα θα είναι +378, με αποτέλεσμα η έκτασή του να είναι $E_{\text{ταμ}}=260$ στρέμματα, και ο ωφέλιμος όγκος $V_{\omega\phi}=3.6 \text{ hm}^3$. Η μορφή του ταμιευτήρα λοιπόν, στην είσοδο της σήραγγας διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9 Μορφή ταμιευτήρα μετά την κατασκευή του φράγματος εκτροπής. Ο ταμιευτήρας πλέον "ακουμπά" στο φράγμα, έχοντας ανώτατη στάθμη +378.

Η όψη του φράγματος έχει επιφάνεια $A_{\phi\rho}=138.02 \text{ m}^2$, και με την υπόθεση του πάχους των 2 m, ο όγκος του προκύπτει $V_{\phi\rho}=276.04 \text{ m}^3$.

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ο διαθέσιμος όγκος πίσω από το φράγμα, από τη βάση του έως την είσοδο της σήραγγας. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιείται η οριζοντιογραφία του τοπίου με τη θέση του φράγματος, σε συνδυασμό με τη Σχέση 5.5:

$$V_{\delta\iota\alpha\theta} = [A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}] \times \frac{d}{3} \quad (5.5)$$

με

- A_1 και A_2 η επιφάνεια των ισοϋψών
- d η μεταξύ τους απόσταση

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και με δεδομένα $A_{372}=430.06 \text{ m}^2$, $A_{374}=1689.35 \text{ m}^2$ και ισοδιάσταση $d=2 \text{ m}$, ο διαθέσιμος όγκος πίσω από το φράγμα προκύπτει $V_{\delta\iota\alpha\theta}=1\ 981.10 \text{ m}^3$.

Η τιμή του όγκου αυτού, χρειάζεται στον υπολογισμό του όγκου των φερτών υλικών που θα συσσωρευθούν με την πάροδο του χρόνου, πίσω από το φράγμα. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, δεν είναι δυνατό να επιτραπεί η είσοδος στη σήραγγα σε όλο τον όγκο των φερτών υλικών. Τα χονδρόκοκκα θα πρέπει να μένουν έξω από αυτή, τόσο για την αποφυγή της έμφραξής της, όσο και για την ελαχιστοποίηση των διατμητικών δυνάμεων που ασκούν αυτά στη σήραγγα. Έτσι, τα χονδρόκοκκα υλικά θα συσσωρεύονται πίσω από το φράγμα εκτροπής. Το κρίσιμο ζήτημα είναι ποια είναι η ποσότητα αυτών και κάθε πότε θα πληρώνουν το διαθέσιμο όγκο.

Θεωρείται στερεοαπορροή $1\ 000 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ και λεκάνη απορροής, στη συγκεκριμένη θέση, τα $2/3$ της συνολικής λεκάνης, δηλαδή $A=(2/3) \times 4.2=3 \text{ km}^2$. Επομένως, η συνολική ετήσια στερεοαπορροή της λεκάνης είναι $3\ 000 \text{ t}$.

Θεωρώντας μέση πυκνότητα των αποτιθέμενων φερτών υλών 1.5 t/m^3 , ο ετήσιος όγκος των αποθέσεων θα είναι $V_{\text{αποθ}}=3\ 000/1.5=2\ 000 \text{ m}^3$.

Ωστόσο, θεωρείται πως πίσω από το φράγμα εκτροπής αποθηκεύονται μόνο τα χονδρόκοκκα υλικά, τα οποία προσεγγιστικά υπολογίζονται ως το 10% του συνολικού όγκου. Επομένως, ο όγκος των αποθέσεων απομειώνεται σε $0.10 \times 2\ 000=200 \text{ m}^3$.

Ένα σημαντικό μέρος του όγκου αυτού όμως, θα έχει ήδη αποτεθεί πριν η ροή φτάσει στο φράγμα εκτροπής, μιας και αυτό δεν βρίσκεται ακριβώς στην είσοδο του ταμειυτήρα. Θεωρείται λοιπόν, πως εν τέλει πίσω από το φράγμα συσσωρεύεται ετησίως όγκος $V_{\text{αποθ}}=0.5 \times 200=100 \text{ m}^3$.

Με το διαθέσιμο όγκο να είναι $V_{\delta\iota\alpha\theta}=1\ 981.10 \text{ m}^3$, θα χρειαστούν $1\ 981.10/100 \approx 19$ χρόνια για να πληρωθεί και να δημιουργηθεί ζήτημα μηχανικής απομάκρυνσής τους.

5.6 Κατασκευή καταστροφής της ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, η ροή στη σήραγγα είναι υπερκρίσιμη με ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες. Είναι απαραίτητο, επομένως, στην έξοδο να υπάρχει μία κατασκευή καταστροφής της ενέργειας, για την αποφυγή της διάβρωσης του πυθμένα. Η ροή κατάντη αυτής θα πρέπει να γίνεται υποκρίσιμη, μέσω ενός υδραυλικού άλματος, ώστε να ομαλοποιείται. Το υδραυλικό άλμα θα πραγματοποιείται σε μία λεκάνη ηρεμίας, ακριβώς στην έξοδο της σήραγγας. Για τη διαστασιολόγηση της λεκάνης ηρεμίας ακολουθείται η εξής διαδικασία:

α) Υπολογισμός του ομοιόμορφου βάθους μέσα στη σήραγγα

Θεωρείται πως μετά από περίπου 1 km ροής, το βάθος θα έχει προσεγγίσει το ομοιόμορφο. Ακολουθείται η μεθοδολογία των σημειώσεων του Κατσαρέλη από την “Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Μέθοδοι και Εφαρμογές υπολογισμού, Ροή με ελεύθερη επιφάνεια” (2011). Απλοποιητικά θεωρείται ορθογωνική διατομή και η διαδικασία είναι η εξής:

i) Υπολογίζεται η ποσότητα $C_0 = \frac{n \times Q}{J^{1/2}}$ (5.6),

με

- n το συντελεστή Manning, n=0.014 για σωλήνες από σκυρόδεμα.
- Q την παροχή σχεδιασμού, $Q=Q_{100}=26.9 \text{ m}^3/\text{s}$
- J την κλίση της σήραγγας, $J=0.0378$

$$\text{Έτσι προκύπτει } C_0 = \frac{0.014 \times 26.9}{0.0378^{1/2}} \rightarrow C_0 = 1.9712$$

ii) Υπολογίζεται η ποσότητα $\Phi_0 = C_0 / (b^{8/3})$ (5.7),

με b το πλάτος της ορθογωνικής διατομής, $b=2 \text{ m}$

$$\text{Έτσι προκύπτει } \Phi_0 = 1.9712 / (2^{8/3}) \rightarrow \Phi_0 = 0.3104$$

iii) $Y_{01} = 1.73 \times b \times \Phi_0^{0.756}$ (5.8) $\rightarrow Y_{01} = 1.73 \times 2 \times 0.3104^{0.756} \rightarrow Y_{01} = 1.429 \text{ m}$

iv) $Y_{02} = b \times \Phi_0^{0.6} \times [1 + 2 \times \frac{Y_{01}}{b}]^{0.4}$ (5.9)

$$\rightarrow Y_{02} = 2 \times 0.3104^{0.6} \times [1 + 2 \times \frac{1.429}{2}]^{0.4} \rightarrow Y_{02} = 1.4137 \text{ m}$$

v) Απόκλιση $\delta y_0 = \frac{|Y_{02} - Y_{01}|}{Y_{01}}$ (5.10) $\rightarrow \delta y_0 = \frac{1.4137 - 1.429}{1.429} \rightarrow \delta y_0 = 1.07 \%$

Επιτρεπτή απόκλιση $\delta y_0 < 2\%$, επομένως ομοιόμορφο βάθος $y_0 = 1.42 \text{ m}$, στην ορθογωνική διατομή

β) Εύρεση ταχύτητας και αριθμού Froude για το ομοιόμορφο βάθος

Για την ταχύτητα χρησιμοποιείται η σχέση Manning : $V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times J^{1/2}$ (5.11),

με

- R τη η βρεχόμενη περίμετρο, που υπολογίζεται από τη σχέση $R = E/\Pi$ (5.12)

$$\rightarrow R = \frac{y_0 \times b}{2 \times y_0 + b} \rightarrow R = \frac{1.42 \times 2}{2 \times 1.42 + 2} \rightarrow R = 0.5868 \text{ m}$$

- J την κλίση της σήραγγας, $J = 0.0378$

Επομένως για την ταχύτητα προκύπτει $V = \frac{1}{0.014} \times 0.5868^{2/3} \times 0.0378^{1/2} \rightarrow V = 9.565 \text{ m/s}$.

Ο αριθμός Froude υπολογίζεται από τη Σχέση 5.1 και προκύπτει $F = \frac{26.9}{2 \times 1.42^{1.5} \times \sqrt{\frac{9.81}{2}}}$

$$\rightarrow F = 2.54$$

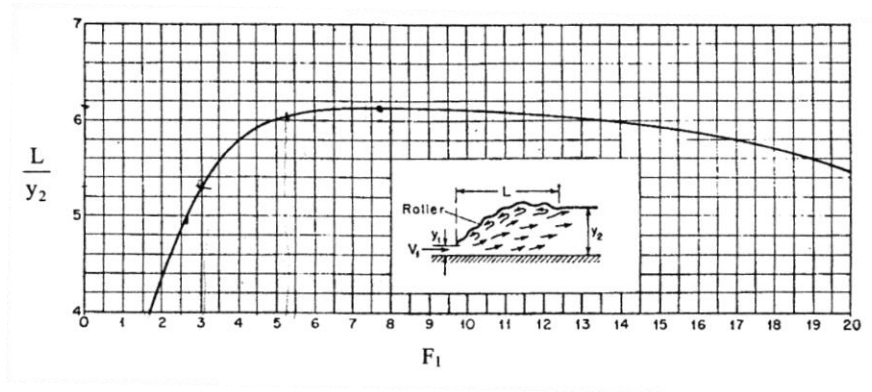
γ) Υπολογισμός βάθους, συζυγούς στο ομοιόμορφο

Για τα συζυγή βάθη ισχύει η σχέση $\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1]$ (5.13) (Υδραυλική Ανοιχτών Αγωγών, σχέση 2.51α). Επομένως προκύπτει

$$\frac{y_2}{1.42} = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 \times 2.56^2} - 1] \rightarrow \frac{y_2}{1.42} = 3.1548 \rightarrow y_2 = 4.48 \text{ m}$$

δ) Υπολογισμός μήκους του άλματος

Το μήκος του υδραυλικού άλματος υπολογίζεται από το παρακάτω Σχήμα 5.1.

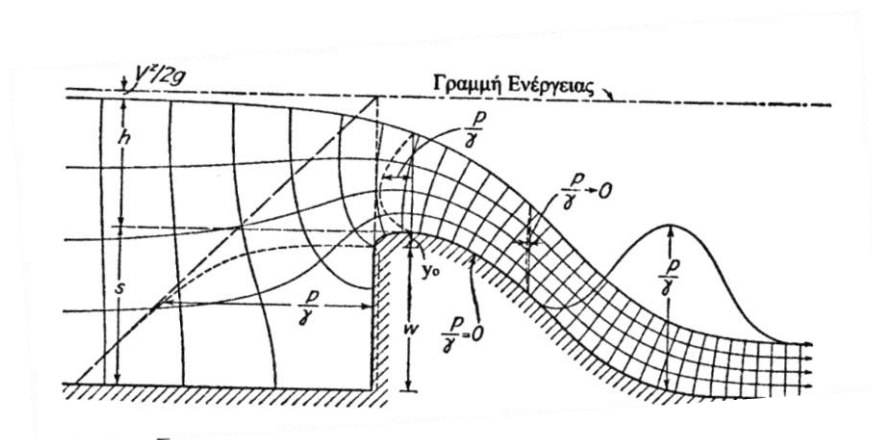


Σχήμα 5.1 Μήκος υδραυλικού άλματος (Νουτσόπουλος κ.ά.,2007)

Έτσι για $F_1=2.56$, προκύπτει $\frac{L}{y_2} \approx 4.8 \rightarrow L_{\alpha\lambda\mu}=4.48 \times 4.8 \rightarrow L_{\alpha\lambda\mu}=21.504$ m.

Έτσι το μήκος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί το υδραυλικό άλμα είναι $L=21.504$ m και η λεκάνη ηρεμίας θα πρέπει να έχει τουλάχιστον αυτό το μήκος.

Το τέλος της λεκάνης ηρεμίας έχει τη μορφή ενός υπερχειλιστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Ροή πάνω από υπερχειλιστή φράγματος (Νουτσόπουλος κ.ά.,2007)

Στην έξοδο της σήραγγας γίνεται εκσκαφή κατά 1 m. Η στάθμη του νερού εκεί είναι γνωστή, αφού πρόκειται για το ομοιόμορφο που ήδη έχει υπολογισθεί, $y_0=1.42$. Τότε πρέπει να υπολογισθεί το ύψος υπερχειλίσης h.

Από τη σχέση $Q=M \times B \times h^{2/3}$ (5.14),

με

- M το συντελεστή παροχής του υπερχειλιστή, $M=2.15$.

- Β το πλάτος της λεκάνης ηρεμίας, το οποίο είναι ίδιο με τη σήραγγα, άρα $B=2 \text{ m}$

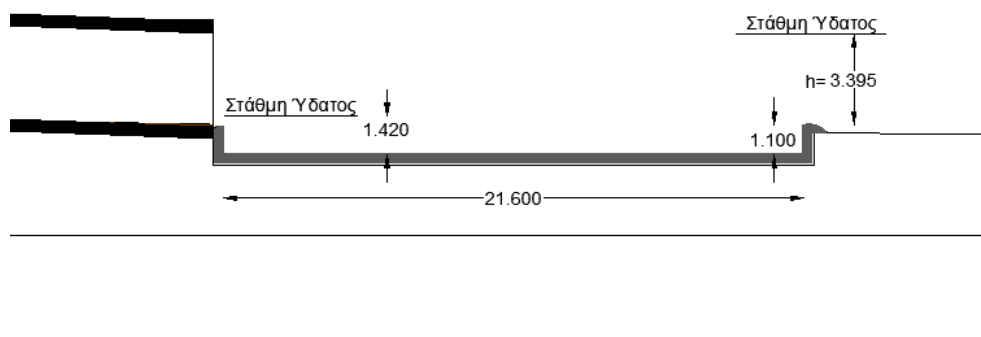
Τότε προκύπτει

$$26.9 = 2.15 \times 2 \times h^{2/3} \rightarrow h=3.395 \text{ m.}$$

Για να πραγματοποιείται το υδραυλικό άλμα, θα πρέπει η ροή να φτάνει το συζυγές βάθος $y_2=4.48 \text{ m}$. Άρα

$$h+s=4.48 \rightarrow s=1.085 \text{ m} \rightarrow s=1.10 \text{ m}$$

Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 Όψη λεκάνης ηρεμίας

5.7 Κόστος κατασκευής συστήματος εκτροπής

Ο υπολογισμός του κόστους θα γίνει σε τμήματα, σύμφωνα με τη διαδικασία της κατασκευής, και θα αθροισθεί στο τέλος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το μήκος της σήραγγας, σε κάτοψη, είναι $L=922.14 \text{ m}$. Από τη γνωστή κλίση, θα βρεθεί το μήκος της σήραγγας, για τα δύο τμήματα.

Για το τμήμα επιτάχυνσης

$$\tan\phi_1=0.26 \rightarrow \phi_1=14.57^\circ$$

$$\cos\phi_1 = \frac{50}{S} \rightarrow S_1=51.66 \text{ m}$$

Για το τμήμα ήπιας κλίσης

$$\tan\phi_2=0.0378 \rightarrow \phi_2=2.165^\circ$$

$$\cos\phi_2 = \frac{922.14-50}{S} \rightarrow S_2=871.51 \text{ m}$$

Τότε, συνολικά το μήκος της σήραγγας θα είναι $S_{σηρ} = S_1 + S_2 \rightarrow S_{σηρ} = 923.18 \text{ m}$

5.7.1 Κόστος κατασκευής φράγματος εκτροπής

Όπως ήδη υπολογίσθηκε παραπάνω, ο όγκος του φράγματος εκτροπής είναι $V_{φρ} = 276.04 \text{ m}^3$. Το κόστος κατασκευής φράγματος σκυροδέματος θεωρείται 70 €/m^3 . Το κόστος της σκυροδέτησης του φράγματος, επομένως, προκύπτει

$$C_{φρ} = 70 \times 276.04 \rightarrow C_{φρ} = 19\,322.8 \text{ €}.$$

5.7.2 Κόστος εκσκαφής σήραγγας εκτροπής

Για τη σήραγγα, ένα πάχος εκσκαφής $d = 0.60 \text{ m}$ θεωρείται μια καλή προσέγγιση. Η επιφάνεια εκσκαφής της σήραγγας υπολογίζεται

$$A_{εκσκ} = \pi \times \frac{R^2}{2} + (2 + 2 \times 0.6) \times (2.5 + 0.6) \rightarrow A_{εκσκ} = \pi \times \frac{(1 + 0.6)^2}{2} + 3.2 \times 3.1$$

$$\rightarrow A_{εκσκ} = 13.94 \text{ m}^2$$

Το κόστος της εκσκαφής θεωρείται 40 €/m^3 , ενώ προσαύξηση 20% γίνεται λόγω των εργασιών υποστήριξης της σήραγγας. Το κόστος, επομένως, της εκσκαφής, ανά μονάδα όγκου, θα είναι

$$C_{μον/εκσκ} = 1.2 \times 40 \rightarrow C_{μον/εκσκ} = 48 \text{ €/m}^3.$$

Το μήκος της εκσκαφής, δε θα είναι το μήκος της σήραγγας, διότι στα τελευταία 77.79 m , η σήραγγα βγαίνει στην επιφάνεια του εδάφους. Εκεί, εκσκαφή χρειάζεται μόνο για τον πυθμένα της σήραγγας. Επομένως $A_{εκσκ,πυθμ} = (2 + 2 \times 0.6) \times 0.6 \rightarrow A_{εκσκ,πυθμ} = 1.56 \text{ m}^2$.

Ο συνολικός όγκος εκσκαφής λοιπόν, θα είναι

$$V_{εκσκ} = A_{εκσκ} \times (923.18 - 77.79) + A_{εκσκ,πυθμ} \times 77.79 \rightarrow V_{εκσκ} = 11\,906.09 \text{ m}^3.$$

Τότε, το κόστος της εκσκαφής θα είναι

$$C_{εκσκ} = V_{εκσκ} \times C_{μον/εκσκ} \rightarrow C_{εκσκ} = 571\,492.3 \text{ €}.$$

5.7.3 Κόστος σκυροδέτησης σήραγγας εκτροπής

Θεωρείται πάχος σκυροδέτησης $d = 0.40 \text{ m}$. Τότε η επιφάνεια σκυροδέτησης υπολογίζεται

$$A_{σκυρ} = \left(\pi \times \frac{1.4^2}{2} - \pi \times \frac{1^2}{2} \right) + 2 \times 0.4 \times 2.5 + (2 + 2 \times 0.4) \times 0.4 \rightarrow A_{σκυρ} = 4.628 \text{ m}^2.$$

Το κόστος της σκυροδέτησης υπολογίζεται 70 €/m^3 , του οπλισμού 1 €/kg (με κατά προσέγγιση 100 kg/m^3), ενώ οι εργασίες σκυροδέτησης προσαυξάνουν την παραπάνω τιμή κατά 60%. Επομένως, το κόστος σκυροδέτησης της σήραγγας, ανά μονάδα όγκου, θα είναι

$$C_{μον/σκυρ} = 1.6 \times 70 + 1 \times 100 \rightarrow C_{μον/σκυρ} = 212 \text{ €/m}^3.$$

Το μήκος που σκυροδετείται είναι $L_{\text{σκυρ}}=923.18 \text{ m}$

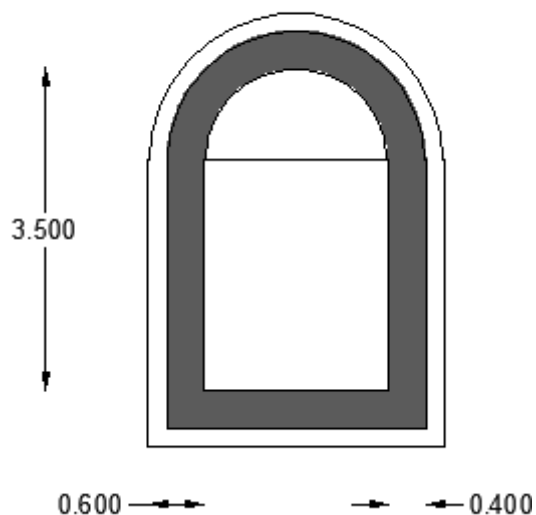
Επομένως, ο όγκος της σκυροδέτησης είναι

$$V_{\text{σκυρ}}= A_{\text{σκυρ}} \times L_{\text{σκυρ}} \rightarrow V_{\text{σκυρ}}=4\ 272.5 \text{ m}^3.$$

Τότε, το κόστος της σκυροδέτησης θα είναι

$$C_{\text{σκυρ}}= V_{\text{σκυρ}} \times L_{\text{σκυρ}} \rightarrow C_{\text{σκυρ}}=905\ 765.13 \text{ €}$$

Η διατομή που υφίσταται εκσκαφή και το μέρος αυτής που σκυροδετείται φαίνονται στην Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11 Διατομή εκσκαφής και σκυροδέτησης

5.7.4 Κόστος εσχάρας εισόδου

Στην είσοδο της σήραγγας θα τοποθετηθεί μία εσχάρα, ώστε να αποτρέψει την είσοδο χονδρόκοκκων υλικών, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές. Θεωρείται έτσι άνοιγμα 15 cm, που θα δημιουργείται από σίδερα πάχους $d=2 \text{ cm}$.

Στη συγκεκριμένη διατομή, θα χρειαστούν

Στο ορθογωνικό τμήμα

Οριζόντια: 10 σειρές, μήκους $l=2 \text{ m}$

Κατακόρυφα: 11 σειρές, μήκους $l=2.5 \text{ m}$

Στο ημικύκλιο

Οριζόντια: 6 σειρές, μήκους $l=1 \text{ m}$

Κατακόρυφα: 11 σειρές, μήκους $l=0.5$ m

Οι παραπάνω τιμές του μήκους του ημικυκλίου, είναι μέσες τιμές, αφού ανά δύο τα σίδερα θα έχουν διαφορετικό μήκος.

Συνολικά, λοιπόν, το μήκος είναι

$$L_{ολ} = 10 \times 2 + 11 \times 2.5 + 6 \times 1 + 11 \times 0.5 \rightarrow L_{ολ} = 59 \text{ m}$$

$$\text{Ο συνολικός όγκος θα είναι } V = A \times L \rightarrow V = \pi \times \frac{d^2}{4} \times L \rightarrow V = \pi \times \frac{0.02^2}{4} \times 59 \rightarrow V = 0.0185 \text{ m}^3.$$

Με δεδομένη την πυκνότητα του χάλυβα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, ο παραπάνω όγκος μετατρέπεται σε μάζα, ως εξής

$$m = 0.0185 \times 7850 \rightarrow m = 145.36 \text{ kg}.$$

Το κόστος του χάλυβα θεωρήθηκε και παραπάνω 1 €/kg , επομένως $C_{εσχ} = 145.36 \text{ €}$.

5.7.5 Κόστος επένδυσης σήραγγας

Λόγω των ισχυρών διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται από την κίνηση των φερτών υλικών, είναι δεδομένο ότι θα παρατηρηθούν ζημιές έπειτα από ορισμένα χρόνια λειτουργίας. Το πιο ευαίσθητο σημείο στη δράση των δυνάμεων αυτών, είναι το σημείο αλλαγής της κλίσης, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που έχουν αναπτύξει τα υλικά από το τμήμα επιτάχυνσης. Εκεί, είναι αναγκαία η επένδυση της σήραγγας με χάλυβα, ώστε να αποφευχθούν εκτεταμένα προβλήματα.

Επιλέγεται διατομή HEB300, η οποία θα επενδύσει μέρος του ορθογωνικού τμήματος της διατομής. Το απαραίτητο μήκος είναι

$$L = 2 + 1.8 \times 2 \rightarrow L = 5.6 \text{ m}$$

Θεωρώ λοιπόν μήκος $L = 6 \text{ m}$.

Η επένδυση θα γίνει ακριβώς στο σημείο αλλαγής της κλίσης και σε ορισμένη απόσταση πριν και μετά αυτού. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται περίπου 3-4 φορές το βάθος ροής. Επομένως, θεωρώ ότι η επένδυση θα πραγματοποιηθεί για 8 m . Έτσι απαιτούνται $8000/300 = 27$ σειρές, μήκους 6 m . Συνολικά λοιπόν,

$$L_{HEB} = 27 \times 6 \rightarrow L_{HEB} = 162 \text{ m}.$$

Η διατομή HEB300 ζυγίζει 117 kg/m , έτσι χρειάζονται $w = 162 \times 117 \rightarrow w = 18.954 \text{ t}$.

Το κόστος της διατομής αυτής θεωρείται $C = 475 \text{ €/t}$, επομένως

$$C_{επενδ} = 475 \times 18.954 \rightarrow C_{επενδ} = 9\,003 \text{ €}.$$

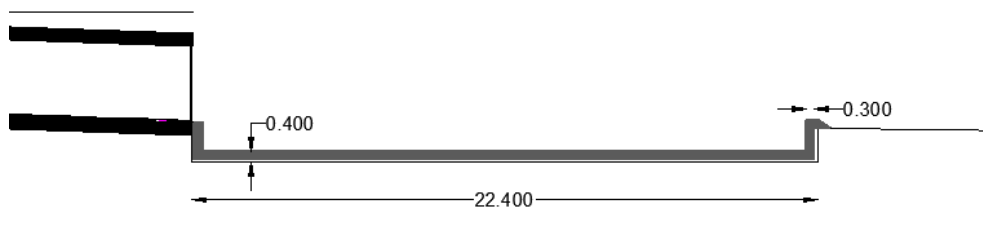
5.7.6 Κόστος κατασκευής λεκάνης ηρεμίας

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η λεκάνη ηρεμίας πρέπει να έχει το απαραίτητο μήκος για την πραγματοποίηση του υδραυλικού άλματος. Έτσι, αφού το μήκος του άλματος είναι $L_{\alpha\lambda\mu}=21.504$ m, το μήκος της λεκάνης θα είναι $L_{\lambda\epsilon\kappa}=21.6$ m. Το πλάτος της θα είναι όσο και το πλάτος της σήραγγας, επομένως $B_{\lambda\epsilon\kappa}=2$ m και το βάθος της $h_{\lambda\epsilon\kappa}=1$ m. Το πάχος της εκσκαφής λαμβάνεται $d_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}=0.40$ m και το πάχος της σκυροδέτησης, $d_{\sigma\kappa\upsilon\rho}=0.30$ m. Τα πάχη αυτά ισχύουν τόσο στον πυθμένα της λεκάνης, όσο και στην περιμέτρό της.

Επομένως, ο όγκος της εκσκαφής θα είναι

$$V_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}=h_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}\times L_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}\times B_{\epsilon\kappa\sigma\kappa} \rightarrow V_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}=1.40\times(21.6+2\times 0.40)\times(2+2\times 0.40) \rightarrow V_{\epsilon\kappa\sigma\kappa}=87.81 \text{ m}^3.$$

Μία τυπική τομή της λεκάνης, δίνεται στην Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 Πάχη εκσκαφής και σκυροδέτησης λεκάνης ηρεμίας

Αντίστοιχα, ο όγκος σκυροδέτησης διαιρείται σε δύο τμήμα, τον όγκο του πυθμένα και τον όγκο των τοιχωμάτων. Έτσι θα είναι

$$V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}=h_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}\times L_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}\times B_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu} \rightarrow V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}=(21.6+2\times 0.30)\times(2+2\times 0.30)\times 0.30$$

$$\rightarrow V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}=17.32 \text{ m}^3.$$

$$V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}=h_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}\times L_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}\times B_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}$$

$$\rightarrow V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}=[(1.30-1)\times(2+2\times 0.30)\times 0.30]\times 2+[(1.30-1)\times(21.6+2\times 0.30)\times 0.30]\times 2$$

$$\rightarrow V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}=14.88 \text{ m}^3.$$

Συνολικά λοιπόν, ο όγκος σκυροδέτησης της λεκάνης είναι

$$V_{\sigma\kappa\upsilon\rho}=V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\pi\upsilon\theta\mu}+V_{\sigma\kappa\upsilon\rho,\tau\omicron\iota\chi}=17.32+14.88 \rightarrow V_{\sigma\kappa\upsilon\rho}=32.2 \text{ m}^3.$$

Θεωρώντας κόστος υπαίθριας εκσκαφής, ανά μονάδα όγκου, $C_{\text{μον/εκσκ}}=2.42 \text{ €/m}^3$ και σκυροδέτησης χωρίς οπλισμό, πάλι ανά μονάδα όγκου, $C_{\text{μον/σκυρ}}=112 \text{ €/m}^3$, το συνολικό κόστος κατασκευής της λεκάνης ηρεμίας θα είναι

$$C_{\text{λεκ}} = 2.42 \times 87.81 + 112 \times 32.2 \rightarrow C_{\text{λεκ}} = 3\ 818.9 \text{ €}.$$

5.7.7 Κόστος εκσκαφής των συσσωρευμένων υλικών

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.5, ο διαθέσιμος όγκος πίσω από το φράγμα εκτροπής είναι $V_{\text{διαθ}}=1\ 981.1 \text{ m}^3$, τα οποία θα εξαντλούνται περίπου ανά 19 χρόνια. Με δεδομένο το κόστος εκσκαφής $5-10 \text{ €/m}^3$, η εκσκαφή του όγκου θα στοιχίζει

$$C_{\text{φερτών}} = 10 \times 1\ 981.10 \rightarrow C_{\text{φερτών}} = 19\ 811 \text{ €/20 έτη ή } 1\ 042.6 \text{ €/έτος}$$

5.7.8 Συνολικό κόστος

Αθροίζοντας τα παραπάνω επιμέρους κόστη, το συνολικό κόστος κατασκευής του συστήματος εκτροπής θα είναι

$$C_{\text{συστ}} = C_{\text{φρ}} + C_{\text{εκσκ}} + C_{\text{σκυρ}} + C_{\text{εσχ}} + C_{\text{επενδ}} + C_{\text{λεκ}}$$

$$\rightarrow C_{\text{συστ}} = 19\ 322.8 + 571\ 492.3 + 905\ 765.13 + 145.36 + 9\ 003 + 3\ 818.9 \rightarrow C_{\text{συστ}} = 1\ 509\ 547.5 \text{ €}$$

Συγκεντρωτικά τα κόστη ανά τμήμα φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Κόστος συστήματος εκτροπής ανά τμήμα κατασκευής

Τμήμα	Κόστος Μονάδας	Ποσότητα	Κόστος (€)
Φράγμα εκτροπής	70 (€/m ³)	276.04 (m ³)	19 322.8
Εκσκαφή σήραγγας εκτροπής	48 (€/m ³)	11 906.09 (m ³)	571 492.3
Σκυροδέτηση σήραγγας εκτροπής	212 (€/m ³)	4 272.5 (m ³)	905 765.13
Εσχάρα εισόδου	1 (€/kg)	145.36 (kg)	145.36
Επένδυση σήραγγας	475 (€/t)	18.954 (t)	9 003
Εκσκαφή λεκάνης ηρεμίας	2.42 (€/m ³)	87.81 (m ³)	212.5
Σκυροδέτηση λεκάνης ηρεμίας	112 (€/m ³)	32.2 (m ³)	3 606.4
Συνολικό Κόστος (€)			1 509 547.5

Στην τιμή αυτή του κόστους θα ήταν φρόνιμο να γίνει μία προσαύξηση της τάξης του 20%, μιας και οι τιμές του κόστους ανά μονάδα που χρησιμοποιήθηκαν είναι προσεγγιστικές.

Τότε, το συνολικό κόστος του συστήματος εκτροπής προκύπτει

$$C_{\text{συστ,τελ}} = 1.2 \times C_{\text{συστ}} \rightarrow C_{\text{συστ,τελ}} = 1\ 811\ 457 \text{ €}.$$

Με τα δεδομένα που ισχύουν έως τον Οκτώβριο του 2015, ο προϋπολογισμός του φράγματος ανέρχεται περίπου σε 35 000 000 €, γεγονός που καθιστά το κόστος κατασκευής του συστήματος εκτροπής περίπου το 5% του κόστους κατασκευής του φράγματος.

6.ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Κρισιμότητα διαχείρισης των φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα

Παρά τη συνεχόμενη αύξηση του αριθμού των φραγμάτων ανά τον κόσμο, ο συνολικός ωφέλιμος όγκος των ταμιευτήρων τους συνεχώς μειώνεται. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την έκταση του προβλήματος της συσσώρευσης των φερτών υλών στους ταμιευτήρες. Αυτή η φθίνουσα πορεία του ωφέλιμου όγκου, μειώνει και τέλος εξαλείφει την ικανότητα ρύθμισης της ροής, εμποδίζει την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ περιορίζει και την δυνατότητα ικανοποίησης των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης. Με άλλα λόγια, ο ταμιευτήρας δε μπορεί να εκτελέσει τις λειτουργίες για τις οποίες κατασκευάσθηκε. Από την άλλη πλευρά, ο όλο και αυξανόμενος πληθυσμός, αυξάνει και την ανάγκη για επιπλέον ωφέλιμο όγκο. Βασικός περιοριστικός παράγοντας αυτού, είναι η εξάντληση των θέσεων κατάλληλων για κατασκευή νέων φραγμάτων, καθώς και η ανάγκη για περιορισμό των οικονομικών δαπανών. Είναι εμφανής, λοιπόν, μία αντίστροφη σχέση μεταξύ της ανάγκης για μεγαλύτερη διαθεσιμότητα νερού και της πραγματικής διαθεσιμότητας νερού.

Τα στοιχεία αυτά έρχεται να συμπληρώσει η ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των ταμιευτήρων. Μειζων ζήτημα πλέον, δεν είναι μόνο η κατασκευή ενός νέου φράγματος. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η διαχείριση των στοιχείων του, έτσι ώστε αυτό να μην υποβαθμίζει την ποσότητα και την ποιότητα του νερού σε μακροπρόθεσμη βάση. Δεν τίθεται λόγος βέβαια, για το ποια είναι η βασική πηγή της υποβάθμισης αυτής.

Από όλα τα παραπάνω, δε μπορεί παρά να φανεί απαραίτητη η μελέτη των τρόπων διαχείρισης των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες.

6.2 Κατηγοριοποίηση φερτών υλικών

Η διαδρομή που ακολουθεί ένα εδαφικό σωματίδιο ξεκινά με το μηχανισμό της διάβρωσης, συνεχίζει με αυτόν της μεταφοράς, και καταλήγει με αυτόν της απόθεσης.

Τα φερτά υλικά, με βάση το μέγεθος των κόκκων τους, διαχωρίζονται σε φορτίο απόπλυσης και φορτίο υλικού κοίτης. Το φορτίο απόπλυσης αποτελείται από λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής και έχει ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον πυθμένα του υδατορεύματος. Το φορτίο υλικού κοίτης από την άλλη, αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά που βρίσκονται ήδη στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου.

Με βάση τον τρόπο μεταφοράς τους, τα φερτά υλικά διαχωρίζονται σε φορτίο αιώρησης και φορτίο σύρσης. Η πρώτη κατηγορία αφορά λεπτόκοκκα υλικά (άργιλο και ιλύ) τα οποία μεταφέρονται με την τύρβη, χωρίς να έχουν καμία επαφή με την κοίτη του ποταμού. Η δεύτερη κατηγορία αντιθέτως, αφορά χονδρόκοκκα υλικά (χαλίκια και κροκάλες), τα οποία μετακινούνται με συνεχόμενη ή διακοπτόμενη επαφή με τον πυθμένα.

Τέλος, για την περιγραφή όλων των μηχανισμών που σχετίζονται με τα φερτά υλικά, απαραίτητη είναι η χρήση των όρων της στερεοαπορροής και της στερεοπαροχής. Η στερεοαπορροή αφορά την ποσότητα των υλικών σε μία διατομή του ποταμού σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο και μετριέται σε $t/km^2/yr$. Η στερεοπροχή από την άλλη, ορίζεται από το στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς σωματιδίων και μετριέται σε kg/s .

6.3 Το φαινόμενο της διάβρωσης

Η διάβρωση ορίζεται ως η διαδικασία αποκοπής και μεταφοράς σωματιδίων βράχων, η οποία οφείλεται στο νερό ή σε άλλους γεωλογικούς παράγοντες, όπως τον αέρα, τα κύματα, ή τον πάγο. Στη φύση εμφανίζονται διάφορα είδη διάβρωσης, όπως η επιφανειακή διάβρωση, η αυλακωτή διάβρωση και η χαραδρωτική διάβρωση, με την επίδραση του κάθε είδους να εξαρτάται από τη γεωγραφική περιοχή. Η εκτίμηση της τιμής της διάβρωσης γίνεται με επιτόπου μετρήσεις, εμπειρικές ή επαγωγικές σχέσεις, όπως η U.S.L.E. και η R.U.S.L.E., με εννοιολογικά μοντέλα ή με την εκτίμηση της στερεοαπορροής. Η στερεοαπορροή με τη σειρά της, μπορεί να εκτιμηθεί από τις καμπύλες παροχής-στερεοπαροχής, από το συντελεστή στερεοαπορροής (SDR), από εμπειρικές σχέσεις ή και εννοιολογικά μοντέλα. Σύμφωνα με μελέτες, η διάβρωση αποτελεί την πιο σοβαρή αιτία υποβάθμισης της γης, ενώ επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες και τη βροχόπτωση, τη γεωλογία, το είδος και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τέλος, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

6.4 Το φαινόμενο της μεταφοράς

Κάτω από ορισμένες κρίσιμες συνθήκες, η αύξηση της ταχύτητας θα θέσει σε κίνηση τα αποτιθέμενα φερτά υλικά, με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους. Οι κρίσιμες αυτές συνθήκες λέγονται συνθήκες έναρξης της κίνησης και υπολογίζονται είτε σε όρους κρίσιμης μέσης ταχύτητας ροής, είτε κρίσιμης διατμητικής τάσης του πυθμένα, η οποία ορίζεται ως συρτική τάση. Πολλές από τις υπολογιστικές μεθόδους που στηρίζονται σε ένα από τα δύο αυτά κριτήρια, στηρίζονται και στις απλοποιητικές παραδοχές της σταθερής ομοιόμορφης ροής, της ύπαρξης μη συνεκτικών υλικών, καθώς και της επίτευξης συνθηκών ισορροπίας μεταξύ υγρού και πυθμένα. Το πεδίο ροής σε ένα ταμειυτήρα, ωστόσο, είναι ιδιαίτερα περίπλοκο, με αποτέλεσμα οι παραδοχές αυτές συχνά να μη ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες. Η δυσκολία προσδιορισμού του κριτηρίου έναρξης της κίνησης οφείλεται στη μεγάλη διασπορά των δεδομένων, η οποία οφείλεται ακριβώς σε αυτό το σφάλμα. Στα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων αναμένεται, επομένως, μικρή μόνο ακρίβεια, γι' αυτό και παρέχουν μόνο προσεγγιστικές εκτιμήσεις της υπό εξέταση συνθήκης.

6.5 Το φαινόμενο της απόθεσης

Η απόθεση είναι το βασικό πρόβλημα που επηρεάζει τον ωφέλιμο χρόνο ζωής ενός ταμιευτήρα. Όταν ένα ρεύμα εισέρχεται σε ένα ταμιευτήρα, άμεση συνέπεια είναι η μείωση της ταχύτητας ροής, με αποτέλεσμα την απόθεση του φορτίου του. Σε ένα ταμιευτήρα παρατηρούνται τρεις ζώνες αποθέσεων: το αρχικό τμήμα, που αποτελείται από δελταϊκές αποθέσεις του φορτίου κοίτης, το ενδιάμεσο τμήμα, που χαρακτηρίζεται από αύξηση της κλίσης και μείωση του μεγέθους των κόκκων και τέλος το τελικό τμήμα, που αποτελείται από τα πιο λεπτόκοκκα υλικά. Κατά τη διαμήκη έννοια, παρατηρούνται τέσσερις μορφές αποθέσεων: α) οι δελταϊκές αποθέσεις, β) οι σφηνοειδείς αποθέσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλο πάχος κοντά στο φράγμα και όλο και μικρότερο προς τα ανάντη και δημιουργούνται από τα ρεύματα πυκνότητας, γ) οι συγκλίνουσες αποθέσεις, οι οποίες μειώνονται σε πάχος καθώς κινούμαστε προς το φράγμα και τέλος δ) οι ομοιόμορφες αποθέσεις. Φυσικά πιο συχνά παρουσιάζονται τα δύο πρώτα είδη. Κατά την εγκάρσια έννοια τώρα, η πλειονότητα των φερτών υλικών συγκεντρώνεται στο βαθύτερο τμήμα κάθε τομής, δημιουργώντας έτσι αποθέσεις με σχεδόν οριζόντια επιφάνεια.

Το πιο σημαντικό στοιχείο των αποθέσεων στη μελέτη της διαχείρισης των φερτών υλικών είναι ο όγκος τους. Για να γίνει πρόβλεψη της μείωσης της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, το εισερχόμενο φορτίο θα πρέπει να μετρηθεί σε μονάδες όγκου. Αυτό γίνεται με τη χρήση της πυκνότητας των αποθέσεων. Το ειδικό βάρος των αποθέσεων εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, το πάχος των αποθέσεων καθώς και την εξέλιξη της διαδικασίας της στερεοποίησης. Ένα τυπικό εύρος της πυκνότητας στην Ελλάδα, θεωρείται από 1.3 έως 1.8 t/m³.

6.6 Επισκόπηση διατάξεων

Με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσονται όλο και περισσότερες τεχνικές διαχείρισης των φερτών υλικών. Οι τεχνικές αυτές αφορούν τις εξής τρεις προσεγγίσεις: α) μείωση της εισροής των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα, β) απομάκρυνση των ήδη αποτιθέμενων υλικών από τον ταμιευτήρα και γ) καθοδήγηση των φερτών υλικών, ώστε να μην εισέλθουν καν στον ταμιευτήρα.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εισροής των φερτών υλικών, μπορούν να παρθούν μέτρα καταπολέμησης της διάβρωσης, με τη διατήρηση του εδάφους ή με την κατασκευή μέτρων στήριξης στο υδατικό δίκτυο, ή να δημιουργηθεί μία λεκάνη συγκράτησης των χονδρόκοκκων υλικών κατάντη του ταμιευτήρα. Στη φιλοσοφία της απομάκρυνσης των φερτών υλών από τον ταμιευτήρα, μπορεί να εφαρμοσθεί είτε μηχανική βυθοκόρηση, είτε υδραυλική έκπλυση. Η πρώτη διαδικασία μπορεί να γίνει είτε από τις όχθες, είτε με τη χρήση πλοίου. Τίθεται ωστόσο, το θέμα της εκ νέου απόθεσης των υλικών που προέρχονται από την εκσκαφή, ενώ πρόκειται και για μια πολυέξοδη μέθοδο. Τέλος, για την καθοδήγηση του φορτίου των υλικών έξω από τον ταμιευτήρα, μπορεί να γίνει είτε παράκαμψη του

ταμιευτήρα, με τη δημιουργία ενός συστήματος εκτροπής, είτε διαρροή των ρευμάτων πυκνότητας, μέσω εξόδων στη βάση του φράγματος.

6.7 Υδραυλική έκπλυση

Η έκπλυση βασίζεται στη δημιουργία συνθηκών ποτάμιας ροής, παρόμοιων με αυτές που προϋπήρχαν της κατασκευής του ταμιευτήρα. Με τον τρόπο αυτό, θα διαβρώνεται ένα κανάλι δια μέσου των αποθέσεων και θα εκπλένεται σημαντικός όγκος των υλικών, δια μέσου των εξόδων του φράγματος. Η μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) με την εκκένωση του ταμιευτήρα και την ανάπτυξη συνθηκών ελεύθερης ροής ή β) με το μερικό καταβιβασμό της στάθμης του ταμιευτήρα και τη ροή υπό πίεση.

Κατά τη διαδικασία της έκπλυσης παρατηρούνται οι εξής μορφές διάβρωσης: α) αστοχία κλίσης στο κανάλι της έκπλυσης, λόγω αύξησης του πλάτους, β) παλινδρομική διάβρωση, με τη δημιουργία ενός σημείου απότομης αλλαγής κλίσης, το οποίο κινείται γρήγορα προς τα ανάντη και τέλος, γ) προοδευτική διάβρωση, κινούμενη προς τα κατόντη. Πρωταγωνιστικό ρόλο διαδραματίζει το κανάλι διάβρωσης, το οποίο για να διατηρηθεί απαιτεί συχνές επαναλήψεις της διαδικασίας, ενώ οι αποθέσεις στις όχθες του δε μπορούν παρά να αυξάνονται σε ύψος. Γι' αυτό και είναι σημαντική η επίτευξη του μέγιστου πλάτους του καναλιού.

Η αποτελεσματικότητα της έκπλυσης κρίνεται από δύο παράγοντες, το συντελεστή αποδοτικότητας, F_e και την μακροπρόθεσμη αναλογία χωρητικότητας του ταμιευτήρα, $LTCR$. Η αποδοτικότητα της έκπλυσης επηρεάζεται από τη διάρκειά της, ενώ αναμένονται μεγαλύτερες τιμές για έκπλυση με εκκένωση του ταμιευτήρα, απ' ό,τι με μερικό καταβιβασμό της στάθμης του. Η μακροπρόθεσμη αναλογία χωρητικότητας, από την άλλη, πρέπει να παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 50%, ώστε να θεωρείται η διαδικασία επιτυχής.

Με βάση τη γνώση που έχει αποκτηθεί από τα παραδείγματα έκπλυσης ανά τον κόσμο, έχουν δημιουργηθεί κάποια βασικά κριτήρια που καθορίζουν το εάν ή όχι αυτή έχει προοπτικές να διεξαχθεί επιτυχώς. Αρχικά, θα πρέπει να είναι γνωστά τα πρότυπα της απορροής του ταμιευτήρα, τόσο μέσα στο ίδιο έτος, όσο και από έτος σε έτος, καθώς και να έχει γίνει μία ακριβής εκτίμηση της στερεοαπορροής και της κοκκομετρίας των φερτών υλικών που αναμένονται. Κατάλληλοι θεωρούνται ταμιευτήρες με υδρολογικό μέγεθος μικρό, ιδανικά μικρότερο του 5%, ώστε να είναι βέβαιη η επαναπλήρωσή τους. Για τον ίδιο λόγο, επιλέγονται ταμιευτήρες με τακτική και διακριτή πλημμυρική περίοδο. Για την πλήρη ανάπτυξη του καναλιού διάβρωσης και την ελαχιστοποίηση των αποθέσεων στις όχθες τους, επιλέγονται ταμιευτήρες στενοί με απότομες πλαγιές. Πολλές φορές βέβαια, η διαδικασία της διάβρωσης χρειάζεται ενίσχυση, με τη δημιουργία πλευρικών και διαμήκων καναλιών. Οι έξοδοι πρέπει να κατασκευάζονται στη βάση του φράγματος, με παροχετευτικότητα τουλάχιστον διπλάσια της μέσης ετήσιας εισροής. Έλεγχος χρειάζεται και στο ρυθμό απόθεσης των υλικών μέσα στον ταμιευτήρα, καθώς τιμές μεγαλύτερες του

1-2%, καθιστούν την έκπλυση απαραίτητη βραχυπρόθεσμα. Σχεδιασμός θα πρέπει να γίνει για την έλλειψη προμηθειών νερού, οι οποίες είναι δεδομένες κατά την περίοδο της έκπλυσης, και οι οποίες επηρεάζουν το χρόνο στον οποίο αυτή θα προγραμματισθεί. Παράλληλα, σχεδιασμός απαιτείται και για τη διαχείριση του νερού κατάντη του φράγματος, το οποίο θα παρουσιάζει μεγάλη συγκέντρωση σε φερτά υλικά και είναι πιθανό να φράξει εγκαταστάσεις υδροληψίας. Τέλος, είναι αυτονόητο πως μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα έχει η έκπλυση που πραγματοποιείται με εκκένωση του ταμιευτήρα και δημιουργία ελεύθερης ροής. Επιτυχής θεωρείται η έκπλυση με την οποία ανακτάται όγκος μεγαλύτερου του 35% της αρχικής χωρητικότητας, χωρίς αυτό να σημαίνει όμως πως δε θα πρέπει να γίνεται και μια οικονομική αξιολόγηση του κόστους και των οφελών της διαδικασίας.

6.8 Δημιουργία συστήματος εκτροπής

Ένα τέτοιο σύστημα για τη διαχείριση της συσσώρευσης των φερτών υλικών παρουσιάζει σημαντικά οφέλη, κυρίως από οικολογική άποψη. Αφενός, η απελευθέρωση της ροής κατάντη του φράγματος επιβραδύνει τη διάβρωση και την υποβάθμιση του πυθμένα. Αφετέρου, δεν παρατηρείται ροή με μεγάλη συγκέντρωση σε φερτά υλικά, αφού αυτή προέρχεται από το φυσικό ποτάμιο σύστημα και δεν επηρεάζεται από τυχόν συσσώρευση υλικών. Επομένως, δε δημιουργεί προβλήματα κατάντη του φράγματος. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το αυξημένο οικονομικό κόστος, αν αναλογιστεί κανείς τις μεγάλες κατασκευές που πρέπει να δημιουργηθούν.

Ένα σύστημα εκτροπής αποτελείται από πέντε τμήματα: α)το φράγμα εκτροπής, το οποίο εκτρέπει την πλημμυρική ροή μέσα στη σήραγγα, β)την είσοδο της σήραγγας εκτροπής, η οποία έχει δύο πιθανές θέσεις και στη πλειονότητα των περιπτώσεων έχει θυρόφραγμα, γ)το πρώτο τμήμα της σήραγγας, το λεγόμενο τμήμα επιτάχυνσης της ροής, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλη κλίση, δ)το επόμενο τμήμα της σήραγγας, το λεγόμενο τμήμα ήπιας κλίσης και τέλος ε)τη λεκάνη ηρεμίας στην έξοδο της σήραγγας, ώστε να εκτονώνεται η μεγάλη ενέργεια της ροής που τη διαπερνά.

Κατά τη δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε τρία στοιχεία. Πρώτον, στη μεταφορική ικανότητα της σήραγγας, η οποία θα πρέπει να υπερβαίνει αυτή του ταμιευτήρα. Δεύτερον, στη θέση της εξόδου της σήραγγας, ώστε η ροή που εξέρχεται από αυτή να μην παρεμβάλει στη λειτουργία διαφόρων κατασκευών. Τέλος, απαιτείται μελέτη των έντονων διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μέσα στη σήραγγα, οι οποίες οδηγούν σε εκτεταμένες ζημιές.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας σήραγγας εκτροπής έχει δύο συνιστώσες. Πρώτον, εξαρτάται από το βέλτιστο υδραυλικό σχεδιασμό, ο οποίος περιλαμβάνει το είδος της διατομής της σήραγγας, την αποφυγή στροφών και την, κατά το δυνατό, σταθερή κλίση. Δεύτερον, τη χρήση βιώσιμων υλικών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της τριβής, η οποία

εξαρτάται από το είδος της κίνησης των σωματιδίων μέσα στη σήραγγα. Για μεταφορά των υλικών με κύλιση ή ολίσθηση, απαιτείται επένδυση με φυσικά υλικά όπως ο βασάλτης ή ο γρανίτης. Για μεταφορά με αναπήδηση, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με επένδυση από χάλυβα ή με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

6.9 Μελέτη και σχεδιασμός συστήματος εκτροπής

Στα πλαίσια της μελέτης των έργων διαχείρισης των φερτών υλικών και σε απόλυτη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός συστήματος εκτροπής, σε έναν υπό μελέτη, ακόμα, ταμιευτήρα. Πρωταρχικό ζήτημα αποτελεί η κατάλληλη θέση της εισόδου της σήραγγας. Βασικό κριτήριο της επιλογής είναι, αφενός η ελαχιστοποίηση, κατά το δυνατό, του μήκους της σήραγγας και αφετέρου η κατασκευή της σε ένα κατάλληλο υψόμετρο για την επίτευξη των επιθυμητών κλίσεων. Με βάση τη θέση της εισόδου και προσεγγιστικά τη θέση εξόδου, σχεδιάζεται μία σήραγγα εκτροπής μήκους 922.14 μέτρων, σε κάτοψη, με ένα τμήμα συναρμογής μορφής τόξου κύκλου. Η σήραγγα ξεκινά με το τμήμα επιτάχυνσης κλίσης 26% και με ένα τμήμα συναρμογής, πάλι μορφής τόξου, περνά στο τμήμα ήπιας κλίσης 3.78%. Εννοείται πως το τμήμα συναρμογής είναι επενδυμένο με χαλύβδινη διατομή, για την αποφυγή εκτεταμένων ζημιών. Τέλος, στην έξοδο της σήραγγας σχεδιάζεται μία λεκάνη ηρεμίας. Βασικό κριτήριο είναι η επίτευξη υδραυλικού άλματος μέσα σε αυτή, ώστε η ροή από υπερκρίσιμη που είναι μέσα στη σήραγγα, να μεταβάλλεται σε υποκρίσιμη και να καταστρέφεται, με τον τρόπο αυτό, η αυξημένη υδραυλική ενέργεια.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η διατομή της σήραγγας εκτροπής, καθώς και η παροχετευτικότητά της. Το σχήμα της επιλέγεται μικτής διατομής, αποτελούμενης από ένα ορθογωνικό τμήμα και ένα ημικόκλιο. Οι διαστάσεις προκύπτουν από την απαίτηση για ελεύθερη και υπερκρίσιμη ροή. Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιείται και ένα κριτήριο ταχύτητας στο τέλος του τμήματος επιτάχυνσης. Αυτές οι τρεις απαιτήσεις είναι που επηρεάζουν τελικά τον υπολογισμό των διαστάσεων.

Από τον υπολογισμό του κόστους ολόκληρου του συστήματος εκτροπής, το οποίο εν τέλει δεν είναι παρά το 5% του κόστους κατασκευής του φράγματος, γίνεται ξεκάθαρο πως το μεγαλύτερο μέρος του οφείλεται στην εκσκαφή και σκυροδέτηση της σήραγγας εκτροπής.

6.10 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη βασίστηκε σε μία εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων διαχείρισης των φερτών υλικών σε ένα ταμιευτήρα και κατέληξε με το σχεδιασμό ενός εξ' αυτών.

Το πρωταρχικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως εν τέλει, η αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος της συσσώρευσης των φερτών υλικών είναι εφικτή. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία της έκπλυσης μπορεί να επαναφέρει μέχρι και το 100% του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα, λύνοντας έως και οριστικά το πρόβλημα, με την εφαρμογή ετήσιων επαναλήψεων. Το συμπέρασμα αυτό βασίζεται στη διεθνή εμπειρία που αποκτήθηκε από την εφαρμογή της μεθόδου, η οποία συνεχώς εξελίσσεται και εμπλουτίζεται. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε ταμιευτήρες που δημιουργήθηκαν από φράγματα σκυροδέματος, οι οποίοι παράλληλα ικανοποιούν ορισμένες προϋποθέσεις σχετικά με το σχήμα τους, αλλά και την υδρολογία της περιοχής τους.

Άλλες μέθοδοι αναζητήθηκαν για ταμιευτήρες χωμάτων φραγμάτων, τα οποία συναντώνται συχνότερα στην Ελλάδα. Στην εργασία αυτή, έγινε η προσπάθεια σχεδιασμού ενός συστήματος εκτροπής της ροής. Το μείζον ζήτημα της μεθόδου είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής της σήραγγας εκτροπής. Μετά τη μελέτη του συστήματος εκτροπής των φερτών υλών, βγήκε το συμπέρασμα πως τελικά το κόστος κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι απαγορευτικό, αποτελώντας περίπου το 5% του κόστους κατασκευής του κυρίου φράγματος.

Φαίνεται επομένως, πως το τεράστιο πρόβλημα της απώλειας ωφέλιμου όγκου ενός ταμιευτήρα συναντά αποτελεσματικές λύσεις, ανάλογα με τις υπάρχουσες κάθε φορά συνθήκες. Παράλληλα, δημιουργείται μία αισιόδοξη αίσθηση πως ακόμη και στην Ελλάδα μία μέθοδος αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής ενός φράγματος μπορεί να βρει εφαρμογή. Δίνεται, έτσι, το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση του ζητήματος από μελετητές, οι οποίοι έχουν βρεθεί αντιμετώπι οι τόσο με τον κίνδυνο της πλήρωσης του ωφέλιμου όγκου ενός ταμιευτήρα από φερτά υλικά, όσο και με τις αντιδράσεις περιβαλλοντικών και οικολογικών οργανώσεων για την υποβάθμιση του περιβάλλοντος που συνοδεύει τη δημιουργία του ταμιευτήρα.

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Albertson, M. L., Malinas, A. and Hotchkiss, R., 1996, *Proceedings of the International Conference on Reservoir Sedimentation*, Fort Collins, Colorado
- ASCE Task Committee, 2008, *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice*. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers
- Atkinson, E., 1996, *Feasibility of flushing sediments from reservoir*, Report OD 137, HR Wallingford, U.K.
- Atkinson, E., 1998, Reservoir operation to control sedimentation: techniques for assessment, *Proceedings of the Conference of the British Dams Society*, Bangor
- Auel, C. and Boes, R. M., 2012, Sustainable reservoir management using sediment bypass tunnels, *24th International Commission on Large Dams*, pp. 403-410, Kyoto
- Auel, C. and Boes, R. M., 2014, Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity, *Journal of Hydraulic Engineering*, 221-228, London
- Auel, C. and Boes, R. M., 2011, Sediment bypass tunnel design-review and outlook, In: Schleiss J.I. and Boes R.M. (editors), *Dams and Reservoirs under changing Challenges*, 403-412 Taylor & Francis Group, London
- Basson, G. R. and Rooseboom, A., 1997a, *Dealing with reservoir sedimentation: guidelines and case studies*, Bulletin 115, ICOLD, Paris
- Basson, G. R. and Rooseboom, A., 1997b, *Dealing with reservoir sedimentation*, Water Research Commission Report No. TT91/97, Pretoria
- Baumer, A. and Radogna, R., 2015, Rehabilitation of the Palagnedra sediment bypass tunnel (2011-2013), *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland
- Boes, R.M., and Haggmann, M., 2015, Sedimentation countermeasures in Switzerland, *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland
- Borland, W. M., 1971, Reservoir Sedimentation, In H. W. Shen (editor), *River Mechanics*, Chap. 29, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado

- Boyce, R. C., 1975, Sediment Routing with Sediment-Delivery Ratios, In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 61-65, USDA SedimentationLab., Oxford
- Brandt, C. J., 1990, Simulation of the Size Distribution and Erosivity of Raindrops and Throughfall Drops, *Earth Surface Processes and Landforms*. 15, 687-698
- Bruce, J. P., 1992, *Meteorology and Hydrology for Sustaining Development*, WMO Report No. 769, World Meteorological Organization, Geneva
- Brune, G. M., 1953, Trap Efficiency of Reservoirs, *Trans. Am. Geophysical Union*, 34 (3), 407-418
- Chang, H. H., 1988, *Fluvial Processes in River Engineering*, John Wiley and Sons, New York
- Chaudhry, M. A. and Rehman, H., 2010, Worldwide Experience of Sediment Flushing Through Reservoirs, *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 31 (3), 395-408, 2012
- Churchill, M. A., 1948, Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data", by L. C. Gottschalk, *Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conf.*, 139-140, Denver
- Clark, E. H., 1985, The Off-site Costs of Soil Erosion, *Journal of Soil and Water Conservation*, 40 (1), 19-22
- Debkov, A. P. and Moszherin, V.I., 1992, Erosion and sediment yield in mountain regions of the world, In: *Erosion, debris flows and environment in mountain regions*, 29-36, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS Publication No. 209
- El-Swaify, S. A. and Dangler, E. W., 1982, Rainfall Erosion in the Tropics: A State-of-the-Art, In *Soil Erosion and Conservation in the Tropic*, 1-25, Am. Soc. Agronomy, Madison.
- Emmett, W. W., 1976, "Bedload Transport in Two Large Gravel-Bed Rivers, Idaho and Washington," *3d Federal Interagency Sedimentation Conf.*, Water Resources Council, Washington, D.C.
- Fan, J., 1985, Methods of Preserving Reservoir Capacity, In S. Bruk (editor), *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*, 65-164, UNESCO, Paris
- Fan, J., 1995, An Overview of Preserving Reservoir Storage Capacity, *Proc. 1995 Intl. Workshop on Reservoir Sedimentation at San Francisco*, Federal Regulatory Commission, Washington, D.C.
- Fan, J. and Jiang, R., 1980, On Methods for the Desiltation of Reservoirs, *Com. 15 Intl. Seminar of Experts on Reservoir Desiltation*, Tunis
- Fan, J. and Morris, G. L., 1992b, Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-term Storage Capacity, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 118 (3), 370-384

- Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G. and Moldenhauer, W. C., 1981, Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units, *J. Soil and Water Conservation*, 36 (6), 355-359
- Galay, V. I. and Okaji, T., 1995, Erosion from the Kulekhani Watershed Nepal During the July 1993 Rainstorm, In H. Schreier. P. B. Shah, and S. Brown (editors). *Challenges in Mountain Resource Management in Nepal*. Water and Energy Commission Secretariat, Kathmandu
- Geiger, A. F., 1963, Developing Sediment Storage Requirements for Upstream Retarding Reservoirs, *Proc. Federal Interagency Sedimentation Conf*, 881-885, USDA-ARS Misc. Pub. 970
- Glymph, L. M. 1957, Importance of Sheet Erosion as a Source of Sediment, *Trans. Am. Geophysical Union*, 35 (6), 903-907
- Goldman, S. J., Jackson, K. and Bursztynsky, T. A., 1986, *Erosion and sediment control handbook*, McGraw-Hill, New York
- Guo, Z. and Li, D., 1984, Experience on Water and Sediment Management in Hengshan Reservoir, *Water and Hydropower Technology* (5), 54-60 and 64 (in Chinese)
- Gvelessiani, L. G. and Shimaltse, N. P., 1968, Reservoir Silting at Hydroelectric Station, *Energy*, Moscow (in Russian)
- Heede, B. H., 1975, Stages of Development of Gullies in the West, In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 155-161, USDA Sedimentation Lab., Oxford
- Hjulstrom, F., 1935, *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris*, Bulletin: Geological Institute of Uppsalla, 25
- Holeman, J. N., 1981, The National Erosion Inventory of the Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, 1977-1979, *Erosion and Sediment Transport Measurement Symp.* 315-319, IAHS Publ.133, Wallingford, U.K.
- ICOLD 1998a, World Register of large Dams, ICOLD, Paris, Web site: http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp?IDA=206
- Jansson, M. B., 1992a, Suspended Sediment Inflow to the Cachi Reservoir, In M. B. Jansson and A. Rodriguez (editors), *Sedimentological Studies on the Cachí Reservoir, Costa Rica*, UNGI Report No. 81. Department of Physical Geography, Uppsala University, Sweden
- Jarecki, E. A. and Murphy, T. D., 1963, *Sediment Withdrawal Investigation-Guernsey Reservoir*, Proc. Federal Interagency Sedimentation Conference, Misc. Publ. 970. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

- Jolly, J. P., 1982, A proposed method for accurately calculating sediment yields from reservoir deposition volume, In: *Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield*, Proceedings from the Exeter symposium, July 1982, IAHS Publication no.137
- Jowett, I., 1984, Sedimentation in New Zealand Hydroelectric Schemes, *Water International*, 9 (1984), 172-176
- Julien, P. Y., 1995, *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L., 1995, *Treatment Wetlands*, Lewis Publishers, Boca Raton
- Kellogg, R. L., TeSelle, G. W. and Goebel, J., 1994, Highlights from the 1992 National Resources Inventory, *Journal Soil and Water Conservation*, 49 (6), 521-527
- Laften, I. M., Elliot, W. J., Simonton, J. R., Holzhey, C. S. and Kohl, K. D., 1991, WEPP Soil Erodibility Experiments for Rangeland and Cropland Soils, *Journal Water and Soil Conservation*, 46 (1), 39-44
- Laften, J. M., Lane, L. J. and Foster, G. R., 1991, WEPP A New Generation of Erosion Prediction Technology, *Journal Soil and Water Conservation*, 46 (1), 34-38
- Lai, J.S. and Shen, H. W., 1996, Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 34(2), 237-255
- Lal, R., 1994, Soil Erosion by Wind and Water: Problems and Prospects, In R. Lal (editor), *Soil Erosion Research Methods*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa
- Lane, E. W., 1947, Report of the Subcommittee on Sediment Terminology, *Trans. American Geophysics Union*, 28 (6), 936-938.
- Lane, E. W., 1955, Design of Stable Channels, *Trans. ASCE*, 120, 1234-1279.
- Lara, J. M. and Pemberton, E. L., 1963, Initial Unit Weight of Deposited Sediments. *Proc. Federal Interagency Sedimentation Conf.*, 818-845, USDA-ARS Misc. Publ. 970
- Lavelle, J. W. and Mofjeld, H., 1987, Do Critical Stresses for Incipient Motion and Erosion Really Exist?, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 113 (3), 370-385
- Laws, J. O. and Parsons, D. A., 1943, The Relationship of Raindrop-size to Intensity, *Trans. Am. Geophys.Union*, 24, 452-460
- Leopold, L. M., Wolman, M. G. and Miller, J. P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H.Freeman, San Francisco
- Mahmood, K., 1987, *Reservoir sedimentation: Impact, extent, and mitigation*, Techn.Paper No.71, The World Bank, Washington D.C., USA

- Meade, R. H. and Parker, R. S., 1984, Sediment in Rivers of the U.S., *National Water Summary*, USGS, Reston
- Meyer, L. D., 1985, Interrill Erosion Rates and Sediment Characteristics, In S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer, and A. Lo (editors), *Soil Erosion and Conservation*, 167-177, Soil Conservation Society of America, Iowa
- Morgan, R. P. C. and Davidson, D. A., 1986, *Soil erosion and conservation*, Longman Group, U.K.
- Morris G. L. and Fan J., 1998, *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill Book Co., New York
- Müller, B. and Walker, M., 2015, The Pfaffensprung sediment bypass tunnel: 95 years of experience, *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland
- Nakajima, H., Otsubo, Y. and Omoto, Y., 2015, Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam, *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland
- Natural Resources Conservation Service, 1995, *Summary Report 1992 Natural Resource Inventor,,* U.S.Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Okada, T. and Baba, K., 1982, Sediment Release Plan at Sakuma Reservoir, 41-64, *14th ICOLD*, 54(4)
- P.D. Townshed, *Removal of Sedimentation using automatic self-operating scour gates*, AmanziFlow projects, Johannesburg
- Paul, T. C. and Dhillon, G. S., 1988, Sluice Dimensioning for Desilting Reservoirs, *Water Power and Dam Construction* (May), 40-44
- Piest, R. F. Kramer, L. A., and Heinemann, H. G., 1975, Sediment Movement from Loessial Watersheds, In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 130-141, USDA Sedimentation Lab., Oxford
- Randle, T. J. and Lyons, J. K., 1995, Elwha River Restoration and Sediment Management, In *15th Annual USCOLD Lecture Series*, 47-62, USCOLD, Denver
- Renfro, G. W., 1975, Use of Erosion Equations and Sediment-Delivery Ratios for Predicting Sediment Yield, In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 33-45, USDA Sedimentation Lab., Oxford

- Rhoton, F. E. and Meyer, L. D., 1987, Sediment Size Distributions Predicted for Selected Soils, *J. Soil and Water Conservation*, 42 (2), 127-129
- Robertson, R. A. and Colletti, J. P., 1994, Off-site Impacts of Soil Erosion on Recreation: The Case of Lake Red Rock Reservoir in Central Iowa, *Journal of Soil and Water Conservation*, 49 (6), 576-581
- Rooseboom, A., 1992, Sediment Transport in Rivers and Reservoirs: A South African Perspective, *Report to Water Research Commission of South Africa*, by Sigma Beta Consulting Engineers, Stellenbosch
- Roveri, E., 1981, Conservazione della capacita,utile nei laghi artificiali, *Wasser Energie Luft*, 73(9), 199-201 (In Italian)
- Sakurai, T. and Kobayashi, K., 2015, Operations of the sediment bypass tunnel and examination of the auxiliary sedimentation measure facility at Miwa Dam, *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, VAW-Mitteilungen 232 (R. M. Boes ed.), Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Switzerland
- Sanders, J. H., Southgate, D. D. and Lee, J. G., 1995, The Economics of Soil Degradation: Technological Change and Policy Alternatives, SMSS Tech. Monograph 22, World Soil Resources, NRCS, USDA, Washington, D.C.
- Schumm, S. A., Harvey, M. D. and Watson, C. C., 1988, *Incised Channels: Morphology, Dynamics and Control*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado
- Shen, H. W. and Lai, J. S., 1996, Sustain reservoir useful life by flushing sediment, *International Journal of Sediment Research*, IRTCES, 11(3)
- Shen, H. W., 1999, Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, 37(6)
- Sombroek, W. G., 1985, Introduction to the Subject, *Intl. Symp. on Assessment of Soil Surface Sealing*, 1-7, Belgium
- Stanley Consultants, 1989, *Lake Francis Case Aggradation Study, 1953-1986*, U.S. Army Corps of Engineers, Omaha
- Strand, R. I. and Pemberton, E. L., 1987, Reservoir Sedimentation, In *Design of Small Dams*. U.S. Bureau of Reclamation, Denver
- Sumi T., 2008, *Evaluation of efficiency of reservoir sediment flushing in Kurobe River*
- Sumi, T., Okano, M. and Takata, Y., 2004, Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan, *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*, pp. 1036-1043, China

- Tolouie, E., West, J. R. and Billam, J., 1993, *Sedimentation and desiltation in the Sefid-Rud Reservoir*, Iran
- Tolouie, E., 1993, Reservoir Sedimentation and De-siltation, Ph.D. Thesis, University of Birmingham, U.K.
- Townshend, P., D., *Removal of sedimentation using automatic self operating scour gate*, AmanziFlow Projects, Johannesburg, South Africa, Web site: http://www.amanziflow.co.za/index.php?option=com_content&view=article&id=107&Itemid=72
- Trimble, S. W., 1974, *Man-Induced Soil Erosion on the Southern Piedmont, 1700-1970*. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa
- Turowski, J.M. and Rickenmann, D., 2009, Tools and cover effects in bedload transport observations in the Pitzbach, Austria. *Earth Surface Processes And Landforms* 34(1), 26-37
- U.S. Army Corps of Engineers, 1989, Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs, Engineering Manual 1110-2-4000, Washington, D.C.
- Ullmann, F., 1970, Particular Features of the Gebidem Dam of the Massa Hydroelectric Scheme, *World Dams Today*, 199-206
- UNESCO, 1985, *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*, Rapporteur: Steven Bruke, Paris
- US Global Change Research Information Office, 1999, *Soil erosion and sediment erosion*, 1-3, Web site: <http://www.gcrio.org/geo/>
- Vischer, D., 1981, Verlandung von Flusstauhaltungen und Speicherseen ('Sedimentation of stream ponds and reservoirs'). Proc. Intl. Symposium „Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum". *VAW-Mitteilung* 53, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (D. Vischer, ed.), ETH Zurich, Switzerland, 9-25 (in German)
- Vischer, D.L., 1981, Int. Symposium: Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. *VAW-Mitteilung* No. 53, 9-25, ETH Zurich, Switzerland (In German)
- Vischer, D.L., Hager, W.H., Casanova, C., Joos, B., Lier, P. and Martini, O., 1997, Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation, *Proc. 19th ICOLD Congress*, 74(37), 605-624, Florence, Italy
- Wada, A., 1995, *Japan's Experience in Reservoir Sediment Management*, Intl. Reservoir Sedimentation Workshop, San Francisco. Federal Energy Regulatory Commission, Washington, D.C.

- Walling, D. E. and Kleo, A. H., 1979, Sediment yields of rivers in areas of low precipitation, a global view, *The Hydrology of Areas of Low Precipitation*, 479-493, IAHS Publication No. 128, Wallingford, U.K.
- Walling, D. E. and Webb, B. W., 1996, Erosion and Sediment Yield: global overview, In: D. E. Walling and B. W. Webb (ed.) *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, Proceedings of the Exeter Symposium, , IAHS Publication No. 236, 3-19
- Walling, D. E., 1994, Measuring Sediment Yield from River Basins, In R. Lal (editor), *Soil Erosion Research Methods*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa
- Walling, D. E. and Webb, B. W., 1983, Patterns of sediment yield, In: K. J. Gregory and John Wiley (editors), *Background to palaeohydrology*, 69-100, New York
- Weiss, E. B., 1993, *Intergenerational Fairness and Water Resources*, In *Sustaining Our Water Resources*, Water Science and Technology Board 10th Anniversary Symposium, 3-10, National Academy Press, Washington, D.C.
- White R., 2001, *Evacuation of sediments from reservoirs*, Thomas Telford Publishing, London
- White, W. R., 1982, *Sedimentation problems in river basins*, Project 5.3 of the International Hydrological Programme, UNESCO
- Wilkins, D. C. and Hebei, S. J., 1982, Erosion, Redeposition and Delivery of Sediment to Midwestern Streams, *Water Resources Research*, 18 (4), 1278-1282
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1958, Rainfall Energy and its Relation to Soil Loss, *Trans. American Geophysical Union*, 39 (2), 285-291
- Xia, M., 1983, *Sediment Problems in Design and Operation of Medium and Small Size Reservoirs*, Science Press, Beijing (in Chinese)
- Yang, C. T., 1996, *Sediment Transport: Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York
- Zarlf, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydeks, L., Tockner, K., 2014, A global boom in hydropower dam construction, *Aquatic Sciences*, 77(1), 161-170
- Zarris D., Lykoudi, E. and Koutsoyiannis, D., 2001, Final Report, *Appraisal of river sediment deposits in reservoirs of hydropower dams*, Contractor: Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering – National Technical University of Athens
- Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2014, *Τα φράγματα της Ελλάδας*, Αθήνα
- Κατσαρέλης, Τ., 2011, Μέθοδοι και εφαρμογές υπολογισμού, Ροή με ελεύθερη επιφάνεια, *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Υδραυλικής*, Αθήνα

- Κουτσογιάννης, Δ. και Τάρλα, Κ., 1987, Εκτιμήσεις στεροαπορροής στην Ελλάδα, *Τεχνικά Χρονικά*, 7(3), σελ. 127-154
- Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α. και Κουτσογιάννης, Δ., 2015, *Σημειώσεις Υδροηλεκτρικών Έργων-Στερομεταφορά*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Νουτσόπουλος Γ., Χριστοδούλου Γ. και Παπαθανασιάδης Τ., 2007, *Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών*, Εκδόσεις Fountasbooks, Αθήνα
- Παναγούλια, Δ. και Δήμου, Γ., *Σημειώσεις Μηχανικής των Φερτών Υλικών*, Αθήνα, Ιστοσελίδα: <http://postgra.hydro.ntua.gr/>
- Στεφανάκος, Ι., 2013, Έργα εκτροπής και εκχείλισης, *Σημειώσεις Υδραυλικών Κατασκευών και Φραγμάτων*, Αθήνα
- Χρύσανθος, Β., 1989, Συσσώρευση φερτών υλών σε ταμειυτήρες, *Τεχνικά Χρονικά*, 9 (4)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ