

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορικό	1
1.2	Στόχοι.....	1
1.2.1	Γενικοί Στόχοι	1
1.2.2	Ειδικότεροι στόχοι της πρώτης φάσης	2
1.2.3	Ειδικότεροι στόχοι της δεύτερης φάσης.....	2
1.3	Συμβατικό αντικείμενο της πρώτης φάσης.....	2
1.4	Συμβατικό αντικείμενο της δεύτερης φάσης	4
1.5	Ερευνητική ομάδα.....	5
1.6	Ευχαριστίες	6
1.7	Δομή της τελικής έκθεσης	7
2	Βιβλιογραφική επισκόπηση	10
2.1	Γενική εισαγωγή	10
2.1.1	Ορισμοί και βασικές έννοιες	11
2.1.2	Μορφές στερεομεταφοράς και σύσταση των φερτών υλικών.....	13
2.1.3	Υπάρχουσα γνώση και προοπτικές στον Ελληνικό χώρο	14
2.2	Εκτιμήσεις στερεοαπορροής.....	16
2.2.1	Εμπειρικά μοντέλα	16
2.2.2	Προσδιοριστικά μοντέλα.....	23
2.2.3	Στοχαστικά μοντέλα	25
2.2.4	Πειραματικές διατάξεις	26
2.2.5	Μετρήσεις συνολικού όγκου και μάζας αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες	27
2.3	Επίδραση της χωρικής κλίμακας στη στερεοαπορροή	28
2.4	Φυσικές διεργασίες σε λεκάνες απορροής μεγάλης επιφάνειας	31
2.5	Κατανομή αποθέσεων σε ταμιευτήρες.....	33
2.5.1	Περιγραφή των μορφών απόθεσης.....	33
2.5.2	Μοντέλα υπολογισμού της κατανομής των αποθέσεων φερτών υλών σε ταμιευτήρες	37
3	Ο ταμιευτήρας Κρεμαστών	40
3.1	Γενικές πληροφορίες.....	40
3.2	Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών	42
3.2.1	Υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	43
3.2.2	Μορφολογικά χαρακτηριστικά.....	50

3.2.3	Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	51
3.2.4	Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	52
3.2.5	Γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά.....	53
3.2.6	Χρήσεις γης.....	54
3.2.7	Τοπογραφία.....	54
4	Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών	55
4.1	Μέθοδοι υδρογραφικής αποτύπωσης ταμιευτήρων.....	55
4.2	Αναλυτική περιγραφή της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	57
4.2.1	Εντοπισμός θέσης.....	58
4.2.2	Καταγραφή του βάθους.....	60
4.3	Μεθοδολογία υπολογισμού συνολικού όγκου αποθέσεων.....	62
4.3.1	Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου υδρογραφικής αποτύπωσης.....	62
4.3.2	Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου πριν την κατασκευή του φράγματος.....	63
4.4	Παρουσίαση και ανάλυση της μεθοδολογίας υπολογισμού του όγκου αποθέσεων.....	65
4.5	Τελικά αποτελέσματα - συμπεράσματα.....	70
4.6	Διενέργεια δειγματοληπτικών γεωτρήσεων – Επαλήθευση των αποτελεσμάτων.....	76
4.6.1	Γεώτρηση Γ1.....	81
4.6.2	Γεώτρηση Γ2.....	82
5	Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών	90
5.1	Περιβάλλον λειτουργίας.....	90
5.2	Υδρολογικές παράμετροι.....	91
5.3	Φυσιογραφικές παράμετροι.....	92
5.3.1	Τοπογραφία.....	92
5.3.2	Γεωλογία.....	93
5.3.3	Χρήσεις γης.....	93
5.4	Πρωτογενή επίπεδα πληροφορίας.....	93
5.5	Παράγωγα επίπεδα πληροφορίας.....	93
6	Υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής	95
6.1	Εισαγωγή και περιγραφή του λογισμικού SEAGIS v. 1.0.....	95
6.1.1	Εκτίμηση της τοπικής εδαφικής διάβρωσης.....	96
6.1.2	Εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής.....	101
6.2	Διερεύνηση της καταλληλότητας του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	103
7	Έμμεσες εκτιμήσεις στερεοαπορροής	109

7.1	Η θολότητα ως δείκτης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών υλικών.	109
7.2	Εγκατάσταση και λειτουργία του θολόμετρου στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου.	111
7.3	Αιτίες της μη-ικανοποιητικής λειτουργίας του θολόμετρου και προτάσεις για τον υπερκερασμό τους.....	112
8	Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	115
8.1	Σύνοψη των εργασιών του ερευνητικού έργου.....	115
8.2	Κυριότερα συμπεράσματα του ερευνητικού έργου.	117
8.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	119
9	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	122
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ	131
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ	132
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ	133
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΠΙΝΑΚΕΣ	134
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΩΝ	135
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ	136

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Με βάση την υπ. αριθμ. 6965/18.6.1998 Κοινή Υπουργική Απόφαση των Υπουργών Ανάπτυξης και Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, η Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) ανέθεσε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) την εκπόνηση του ερευνητικού προγράμματος «*Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες*» με κωδικό έργου 96ΣΥΝ 156 με επιστημονικό υπεύθυνο τον Επίκουρο Καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη. Το ερευνητικό αυτό έργο εντάχθηκε στο Πρόγραμμα Συγχρηματοδοτήσεων του ΕΠΕΤ II (Υπ/μα 2, Μ.2.2) με φορέα - έρευνας το ΕΜΠ και φορέα - χρήστη (και συγχρηματοδότη του έργου) τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

Ως ημερομηνία έναρξης ορίστηκε η 25η Ιουλίου 1998 και η διάρκεια του έργου είναι 30 μήνες. Η πρώτη φάση έχει χρονική διάρκεια 15 μήνες με ημερομηνία λήξης την 25η Οκτωβρίου 1999. Η δεύτερη φάση αντίστοιχα έχει διάρκεια 15 μήνες με ημερομηνία λήξης την 26 Οκτωβρίου 2001. Ο φορέας - χρήστης ενέκρινε την ανάθεση εκπόνησης του ερευνητικού έργου με την υπ. αριθμ. 845/22.8.1998 απόφαση της Διεύθυνσης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων (ΔΑΥΕ) της ΔΕΗ.

1.2 Στόχοι

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι στόχοι και οι συμβατικές υποχρεώσεις του φορέα - έρευνας, όπως ακριβώς αναφέρονται στη υπ. αριθμ. 6965/18.6.1998 Κοινή Υπουργική Απόφαση των Υπουργών Ανάπτυξης και Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του ερευνητικού έργου, ελάχιστες από τις προδιαγεγραμμένες εργασίες έχουν μεταβληθεί κυρίως λόγω της φύσης του έργου που προϋποθέτει μεγάλης κλίμακας μετρητικές διατάξεις σε ένα πολλές φορές αφιλόξενο περιβάλλον.

1.2.1 Γενικοί Στόχοι

Το αντικείμενο του έργου είναι η εκτίμηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, η οποία προέρχεται από μέτρηση του όγκου των αποθέσεων σε ένα ταμιευτήρα της ΔΕΗ (τον ταμιευτήρα των Κρεμαστών) και από εκτίμηση της συνολικής τους μάζας. Το τελικό προϊόν είναι ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο έχει την ικανότητα να προσομοιώνει, με βάση των διάφορων υδρολογικών και φυσιογραφικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής και του ίδιου του ταμιευτήρα, το ρυθμό διάβρωσης της λεκάνης απορροής και την πρόσχωση στον κατάντη ταμιευτήρα.

Οι κύριοι στόχοι επομένως είναι δύο: Η εκτίμηση του ρυθμού πρόσχωσης των ήδη κατασκευασμένων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων και ο βέλτιστος σχεδιασμός του νεκρού όγκου των υπό μελέτη ταμιευτήρων. Η απώλεια όγκου αποθήκευσης του ταμιευτήρα λόγω της απόθεσης

φερτών έχει ιδιαίτερη σημασία και η πιθανή υποδιαστασιολόγηση του νεκρού όγκου μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πιθανότητας βλάβης στα συστήματα παραγωγής ενέργειας στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς λόγω της εισόδου των φερτών υλικών στους αγωγούς προσαγωγής και στους υδροστρόβιλους. Επιπροσθέτως, πιθανή υπερδιαστασιολόγηση του νεκρού όγκου οδηγεί σε σημαντική απώλεια του ωφέλιμου όγκου. Εξάλλου, η αξιόπιστη εκτίμηση της εδαφικής απώλειας (διάβρωσης) είναι σημαντική για την κατάστροψη των ισοζυγίων φερτών υλικών και επομένως για μια συνολική, ορθολογική και βέλτιστη περιβαλλοντική διαχείριση των λεκανών απορροής.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται, μπορεί να αποτιμήσει διάφορα σενάρια μεταβολών των χρήσεων γης και των υδρολογικών παραμέτρων, να προβλέπει το ρυθμό εισροής φερτών υλικών στους ταμιευτήρες και να διαστασιολογήσει το νεκρό όγκο του ταμιευτήρα με ανάλυση διακινδύνευσης.

1.2.2 Ειδικότεροι στόχοι της πρώτης φάσης

Κατά την α' φάση ο κύριος άξονας ήταν η οργάνωση της υποδομής του όλου έργου, και ειδικότερα η επιλογή του πιλοτικού ταμιευτήρα και του μετρητικού εξοπλισμού, η οργάνωση των μετρητικών διατάξεων και των συνεργειών καθώς και η οργάνωση της βάσης δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας (GIS). Το σημαντικότερο μέρος της α' φάσης ήταν η διενέργεια των μετρήσεων στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών, ενώ συμπεριλαμβάνονταν η βιβλιογραφική ενημέρωση και τεκμηρίωση. Επίσης, έγινε ανάλυση και αξιολόγηση παρόμοιων ερευνητικών έργων και προϊόντων λογισμικού που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς.

1.2.3 Ειδικότεροι στόχοι της δεύτερης φάσης

Στη β' φάση του έργου έγινε η λεπτομερής ανάλυση και αξιολόγηση των μετρήσεων του ταμιευτήρα και η εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων. Επίσης λήφθηκαν δείγματα των αποθέσεων (πυρηνοληψία) από τον πυθμένα του ταμιευτήρα. Στη συνέχεια καταστρώθηκε το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της εδαφικής απώλειας, της ποτάμιας στερεομεταφοράς και της εναπόθεσης στον ταμιευτήρα. Τέλος, με τη σύγκριση παράλληλων μετρήσεων στο διεθνή χώρο ολοκληρώθηκε η κατάρτιση του μαθηματικού μοντέλου με τη βαθμονόμησή του, την επαλήθευσή του και την ανάλυση ευαισθησίας.

1.3 Συμβατικό αντικείμενο της πρώτης φάσης

Σύμφωνα με την Κοινή Υπουργική Απόφαση το συμβατικό αντικείμενο της πρώτης φάσης έχει ως εξής:

Α' ΦΑΣΗ: Μεθοδολογία και στάδια υλοποίησής της

Στην πρώτη φάση προβλέπονται οι εξής εργασίες:

1. *Επιλογή του πιλοτικού ταμιευτήρα και των μετρητικών οργάνων.* Η επιλογή του ταμιευτήρα θα γίνει με βάση την στρατηγική σημασία του ταμιευτήρα, τη διάρκεια λειτουργίας του, την έκταση της λεκάνης απορροής και φυσικά τη στερεοπαροχή του ποταμού. Η επιλογή των μετρητικών οργάνων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη γιατί η κατάλληλη επιλογή μπορεί, για παράδειγμα, να μειώσει το σφάλμα στις μετρήσεις, το οποίο βεβαίως είναι αναπόφευκτο. Ο όγκος των αποθέσεων θα

υπολογιστεί με βάση τη μέθοδο της βέλτιστης παρεμβολής (Universal Kriging), με αντικειμενικό σκοπό τη μείωση του τυπικού σφάλματος της εκτίμησης του όγκου και της μάζας των αποθέσεων. Θα χρησιμοποιηθούν όργανα αποτύπωσης (Differential Global Positioning System) καθώς και συσκευή ηχοβολίσεων (Echo-Track DF-3200). Τα όργανα αυτά είναι διαθέσιμα στον Τομέα Τοπογραφίας του ΕΜΠ.

2. *Οργάνωση των μετρητικών διατάξεων και των συνεργείων.* Θα επιλεγεί η προσφορότερη από τις μεθόδους τοπογραφικής αποτύπωσης του πυθμένα του ταμειυτήρα σε σχέση με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του. Η αποτύπωση του πυθμένα θα γίνει πιθανότατα σε διατομές (range lines), κατά κανόνα, κάθετες στην αρχική κοίτη των ποταμών με πυκνωση του δικτύου κατά περίπτωση, δηλαδή σε σημεία που παρατηρούνται έντονες εναλλαγές των αποθέσεων.

3. *Οργάνωση της βάσης δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας.* Μελέτη των λεκανών απορροής των φραγμάτων και ειδικότερα των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών τους (τοπογραφία, γεωλογία, φυτοκάλυψη) και των υδρολογικών χαρακτηριστικών τους (βροχόπτωση, απορροή). Για καλύτερη εποπτεία των χωρικά κατανομημένων πληροφοριών, η επεξεργασία θα γίνει με ένα σύγχρονο σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (GIS) που είναι διαθέσιμο στο φορέα έρευνας (ΕΜΠ/ΤΥΠΥΘΕ) με χρήση των πλέον προηγμένων μεθόδων αποτύπωσης των χωρικά κατανομημένων παραμέτρων (Digital Elevation Models (DEM) ή Digital Terrain Models (DTM)). Το DEM παρέχει την αναγκαία μορφολογική και υψομετρική πληροφορία ενώ το DTM παρέχει την πληροφορία που εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο.

4. *Εκτέλεση των μετρήσεων στον ταμειυτήρα.* Είναι το πιο κρίσιμο στάδιο της πρώτης φάσης, αφού το όλο έργο θα στηριχτεί στις μετρήσεις αυτές. Άμεσο αποτέλεσμα θα είναι η εκτίμηση του όγκου των φερτών που έχουν εναποτεθεί στον ταμειυτήρα ενώ έμμεσο και τελικά ζητούμενο θα είναι η εκτίμηση της συνολικής τους μάζας που θα προκύψει από τις εκτιμήσεις της πυκνότητας των στρωματώσεων των αποθέσεων. Οι εκτιμήσεις πυκνότητας θα γίνουν από τα δείγματα που θα ληφθούν από τον πυθμένα του ταμειυτήρα κατά τη β' φάση.

5. *Κατάσρωση των καταστατικών μαθηματικών εξισώσεων που θα διέπουν τη φιλοσοφία του μοντέλου.* Βιβλιογραφική επισκόπηση καθώς και αξιολόγηση πακέτων λογισμικού φερτών υλικών που έχουν αναπτυχθεί στο διεθνή χώρο.

Τα παραδοτέα της πρώτης φάσης όπως αναγράφονται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση παρουσιάζονται στον Πίν. 1.

Πίν. 1: Παραδοτέα της πρώτης φάσης.

α/α	Τίτλος σταδίου	Ημερ/νία έναρξης σταδίου	Διάρκεια	Παραδοτέα	Εμπλεκόμενοι φορείς	Ανθρ/μήνες
1	Επιλογή ταμιευτήρα και μετρητικών οργάνων.	1/1/1998	2 μήνες	Επιλογή ταμιευτήρα και μετρητικών οργάνων.	ΕΜΠ/ΔΕΗ	2
2	Οργάνωση των μετρητικών διατάξεων.	1/3/1998	3 μήνες	Οργάνωση των μετρητικών διατάξεων.	ΕΜΠ/ΔΕΗ	3
3	Εκτέλεση των μετρήσεων στον ταμιευτήρα.	1/6/1998	3 μήνες	Αναλυτικά αποτελέσματα και εκτίμηση του όγκου των αποθέσεων.	ΕΜΠ	3
4	Οργάνωση της βάσης δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας και βιβλιογραφική επισκόπηση.	1/9/1998	7 μήνες	Ανάπτυξη εφαρμογής σε περιβάλλον ARC-VIEW.	ΕΜΠ	7

1.4 Συμβατικό αντικείμενο της δεύτερης φάσης

Στην δεύτερη φάση προβλέπονται οι εξής εργασίες:

1. Λήψη δειγμάτων (πυρηνοληψία) των αποθέσεων από το πυθμένα του ταμιευτήρα. Τα δείγματα αυτά θα βοηθήσουν στην κατανόηση της χρονικής εξέλιξης της απόθεσης, στην εκτίμηση της κοκκομετρίας των εισερχόμενων φερτών υλικών αλλά και της πυκνότητάς τους. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την εκτίμηση της μάζας των αποθέσεων. Θα ληφθούν τουλάχιστον τέσσερις πυρήνες από τις χονδρόκοκκες δελταϊκές αποθέσεις και ένας σημαντικός αριθμός δειγμάτων από τις λεπτόκοκκες ιλυώδεις αποθέσεις σε μεγαλύτερη βάθη του ταμιευτήρα, αφού το κόστος τους είναι κατά πολύ μικρότερο. Η εργασία αυτή λογικά εντάσσεται στην ενότητα εργασιών της α' φάσης και λόγω των συγκεκριμένων όρων και περιορισμών του προγράμματος ΣΥΝ'96 δεν είναι δυνατό να υπαχθεί στην α' φάση.

2. Λεπτομερής ανάλυση των μετρητικών δεδομένων και εκτιμήσεις μάζας των φερτών υλικών. Αξιολόγηση των μετρητικών δεδομένων και εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων για την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου και για τη συνέχεια του έργου.

3. Αναλυτική κατάστρωση του κώδικα του μαθηματικού μοντέλου και σχηματοποίησης του μέσεδρου (interface) του μοντέλου. Το μοντέλο θα προσομοιώνει την εδαφική απώλεια (διάβρωση), τη στερεομεταφορά σε υδατορεύματα και την απόθεση στους ταμιευτήρες. Θα έχει τη δυνατότητα να δέχεται χωρικά κατανεμημένα (spatially distributed) δεδομένα και να

επικοινωνεί με μοντέλο βροχής - απορροής (rainfall - runoff model) και με τη βάση δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας.

4. Τελική σχηματοποίηση και πιλοτική λειτουργία του μαθηματικού μοντέλου με βάση υποθετικά σενάρια (εξέλιξη κατακρημνισμάτων στο χώρο και στο χρόνο, αιφνίδιες μεταβολές στις χρήσεις γης, κ.ά). Επαλήθευση του μοντέλου με βάση την ανάλυση ευαισθησίας των τελικών εξαγομένων από τις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου. Σύγκριση με παραδοσιακούς τρόπους εκτίμησης της παραγωγής φερτών υλικών (sediment yield), όπως η εξαγωγή στερεοπαροχών από καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής, καθώς και με στοχαστικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί τελευταία.

Τα παραδοτέα της δεύτερης φάσης όπως αναγράφονται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση φαίνονται στον Πίν. 2.

Πίν. 2: Παραδοτέα της δεύτερης φάσης

α/α	Τίτλος σταδίου	Ημερ/νία έναρξης σταδίου	Διάρκεια	Παραδοτέα	Εμπλεκόμενοι φορείς	Ανθρ/μήνες
1	Λήψη δειγμάτων (πυρηνοληψία)	1/4/1999	3 μήνες	Τεχνική έκθεση. Κοκκομετρικές καμπύλες. Εκτιμήσεις πυκνότητας.	ΕΜΠ	3
2	Λεπτομερής ανάλυση των μετρητικών δεδομένων.	1/7/1999	2 μήνες	Τεχνική έκθεση και αποτελέσματα των αναλύσεων.	ΕΜΠ	2
3	Κατάστρωση κώδικα του μαθηματικού μοντέλου.	1/9/1999	5 μήνες	Τεχνική έκθεση. Δισκέττες Λογισμικού.	ΕΜΠ	5
4	Τελική σχηματοποίηση και πιλοτική λειτουργία	1/2/2000	5 μήνες	Τελική τεχνική έκθεση. Τελική παράδοση λογισμικού.	ΕΜΠ	5

1.5 Ερευνητική ομάδα

Επιστημονικός υπεύθυνος του ερευνητικού έργου ήταν ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Δ. Κουτσογιάννης. Στην ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων συμμετείχαν αρκετοί ερευνητές κάτοχοι διδακτορικών και μεταπτυχιακών τίτλων διαφόρων επιστημονικών ειδικοτήτων που παρουσιάζονται στον Πίν. 3 ενώ επίσης αναγράφονται και οι αντίστοιχες εργασίες στις οποίες συμμετείχαν.

Πίν. 3: Τα μέλη της ερευνητικής ομάδας.

Όνοματεπώνυμο	Ιδιότητα	Κύριες εργασίες
Δ. Κουτσογιάννης	Επ. Καθηγ. ΕΜΠ	Επιστημονικός υπεύθυνος, οργάνωση των εργασιών και μεθοδολογιών.
Δ. Ζαρρής	Πολ. Μηχ., M.Sc. Υδρολ ογίας, Υπ. Διδ. ΕΜΠ	Συντονιστής της ερευνητικής ομάδας, συμμετοχή στην εκτέλεση της υδρογραφικής αποτύπωσης, συμμετοχή στην επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων της υδρογραφικής αποτύπωσης, συμμετοχή στην κατάστρωση του μαθηματικού μοντέλου.
Ε. Λυκούδη	M.Sc. Ωκεανογραφίας, Δρ. Γεωλογίας ΕΜΠ	Συμμετοχή στην επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων της υδρογραφικής αποτύπωσης, συμμετοχή στην κατάστρωση του μαθηματικού μοντέλου.
Θ. Ζησόπουλος	Αγρ. Τοπ. Μηχ., Υπ. Διδ. ΕΜΠ	Συμμετοχή στην εκτέλεση της υδρογραφικής αποτύπωσης.
Ι. Κώτσης	Αγρ. Τοπ. Μηχ., Υπ. Διδ. ΕΜΠ	Συμμετοχή στην εκτέλεση της υδρογραφικής αποτύπωσης.
Κ. Ραπτάκης	Αγρ. Τοπ. Μηχ.	Συμμετοχή στην εκτέλεση της υδρογραφικής αποτύπωσης.
Ν. Μαμάσης	Δρ. Μηχανικός	Συμμετοχή στη δημιουργία του ΣΓΠ.
Α. Κουκουβίνος	Αγρ. Τοπ. Μηχ.	Συμμετοχή στη δημιουργία του ΣΓΠ.
Γ. Πένιας	Τεχνικός	Πλοήγηση υδρογραφικού σκάφους.
Δ. Συνετός	Τεχνικός	Συντήρηση βυθόμετρου.

Τη διενέργεια των πλωτών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στον ταμιευτήρα Κρεμαστών καθώς την ανάλυση και επεξεργασία των δειγμάτων ανέλαβε και εκτέλεσε το τεχνικό γραφείο «ΠΑΝΓΑΙΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί» ως υπεργολάβος του ερευνητικού έργου μετά από διενέργεια σχετικού διαγωνισμού. Από την πλευρά της ΔΕΗ την εποπτεία της ερευνητικής ομάδας ανέλαβε ο κ. Χ. Μακρυγιώργος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ ενώ την ευθύνη για την ψηφιοποίηση των παλαιών τοπογραφικών υποβάθρων της λεκάνης κατάκλυσης είχε ο κ. Δ. Κασκούρας, Τοπογράφος Μηχανικός. Στην ψηφιοποίηση των χαρτοταινιών σημαντική ήταν η συμβολή του κ. Θ. Θωμόπουλου, Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ. Τη γραμματειακή υποστήριξη ανέλαβαν οι Μ. Οικονόμου και Μ. Λαγογιάννη.

1.6 Ευχαριστίες

Η ερευνητική ομάδα επιθυμεί να αναγνωρίσει τη σημαντική και πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση στο δύσκολο αυτό έργο και να ευχαριστήσει τους ακόλουθους φορείς και πρόσωπα:

1. Τη Διεύθυνση Υποστήριξης Ερευνητικών Προγραμμάτων της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας για την έγκριση της χρηματοδότησης του έργου και την παροχή συμβουλών και διευκόλυνσης όσον αφορά στα διαδικαστικά θέματα.

2. Τη Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού για την απόφαση να συγχρηματοδοτηθεί το ερευνητικό αυτό έργο. Πιο συγκεκριμένα αναγνωρίζεται η σημαντική προσφορά του Διευθυντή της ΔΑΥΕ κ. Π. Κωστόπουλου, του Διευθυντή Κλάδου Μελετών της ΔΑΥΕ κ. Ι. Στεφανάκου, του επιβλέποντος από τη πλευρά της ΔΕΗ κ. Χ. Μακρυγιώργου καθώς και των συναδέλφων Ι. Κουβόπουλου και Η. Χατζησάββα για τις πολύτιμες παρατηρήσεις και υποδείξεις τους.
3. Τον Τομέα Τοπογραφίας και Μελετών Οδοποιίας (ΤΤΜΟ) της ΔΕΗ/ΔΑΥΕ και ειδικότερα τον Τομεάρχη κ. Κοτρογιάννη, τον κ. Δ. Κασκούρα, Τοπογράφο Μηχανικό και τους υπόλοιπους συναδέλφους για την πολύτιμη συμβολή τους στην ψηφιοποίηση των παλαιών τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης. Χωρίς τη συμμετοχή τους η ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος θα ήταν αδύνατη.
4. Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Τοπογραφίας του ΕΜΠ κ. Δ. Παραδείση για την πολύτιμη βοήθειά του σε θέματα Δορυφορικού Εντοπισμού. Χωρίς την προσωπική του συμβολή καθώς και του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα.
5. Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Γεωγραφίας –Κλιματολογίας του Γεωλογικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Χ. Μανουκιάν, για τις εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις του στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.
6. Τη Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής της ΔΕΗ και πιο συγκεκριμένα το Διευθυντή του Κλάδου κ. Γ. Λέρη καθώς και τον κ. Ι. Μαύρο για το έμπρακτο ενδιαφέρον τους στην εξέλιξη του ερευνητικού έργου.
7. Τη Διεύθυνση του ΥΗΣ Κρεμαστών, τον διευθυντή κ. Ι. Παπαφώτη και τον υποδιευθυντή κ. Αποστολόπουλο για τη φιλοξενία στον οικισμό της ΔΕΗ στα Κρεμαστά και τη βοήθειά τους στην εξεύρεση λύσης σε κάθε τεχνικής φύσης πρόβλημα που ανέκυπτε σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.
8. Τον κ. Δήμαρχο του Δήμου Απεραντίων του Νομού Ευρυτανίας κ. Δ. Τάτση καθώς και τους κατοίκους της κοινότητας Τοπόλιανων για την ευγενική τους υποστήριξη κατά τη διάρκεια διενέργειας των πλωτών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Ιδιαίτερα ευχαριστούμε τον κ. Χ. Πάσιο για τη διάθεση της βάρκας του για τη μετακίνηση του πλωτού γεωτρώπανου.
9. Τους εργαζόμενους της ΔΕΗ στον ΥΗΣ Κρεμαστών για τη φιλοξενία τους, τη φιλία τους, τη διάθεσή να βοηθήσουν σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυπτε.
10. Τους συναδέλφους στον Τομέα Συλλογής και Μελέτης Υδρολογικών Στοιχείων για τη βοήθειά τους στην αναζήτηση των υδρολογικών δεδομένων καθώς και τις κ. Π. Αναστασοπούλου και Κ. Αλεξοπούλου της ΕΥΔΕ Αχελώου του ΥΠΕΧΩΔΕ για τη διάθεση των διαγραμμάτων της χρήσης γης της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών.

1.7 Δομή της τελικής έκθεσης

Η παρούσα τελική έκθεση της πρώτης φάσης του ερευνητικού έργου με τίτλο «Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες» απαρτίζεται από επτά κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 με τίτλο «Βιβλιογραφική επισκόπηση» γίνεται μια λεπτομερής βιβλιογραφική επισκόπηση των σύγχρονων εξελίξεων στους σχετικούς τομείς της έρευνας, ξεκινώντας από τις εισαγωγικές έννοιες της στερεοπαροχής και της στερεοαπορροής καθώς και της διάκρισης των φερτών υλικών και του τρόπου μεταφοράς τους. Στη συνέχεια αναλύονται οι γνωστές μέθοδοι εκτίμησης της στερεοαπορροής από τα πολύ απλά εμπειρικά μοντέλα μέχρι τις πιο σύνθετες στοχαστικές προσεγγίσεις. Η επίδραση των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής στη στερεοαπορροή και κυρίως η ανάλυση των κύριων φυσικών διεργασιών που περισσότερο επιδρούν στη στερεοαπορροή λεκανών μεγάλης επιφάνειας περιγράφονται στη Παράγραφο 2.3. Σημαντικό τμήμα της βιβλιογραφικής επισκόπησης αφιερώνεται στην περιγραφή της κατανομής των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες καθώς γίνεται η ανάλυση των διάφορων μορφών απόθεσης καθώς και η συστηματική καταγραφή των μοντέλων υπολογισμού της χωρικής κατανομής των αποθέσεων που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Στο Κεφάλαιο 3 με τίτλο «*Ο ταμιευτήρας Κρεμαστών*» αναλύεται και δικαιολογείται η επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών ως του πιλοτικού ταμιευτήρα για την εκτίμηση της στερεοαπορροής της ανάντη λεκάνης μέσω της μέτρησης του όγκου και της μάζας των φερτών υλικών που έχουν αποθεθεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ταμιευτήρα. Παρουσιάζονται συγκεκριμένα στοιχεία της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα ανάμεσα στα οποία τα υδρολογικά και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις γης και η τοπογραφία.

Στο Κεφάλαιο 4 με τίτλο «*Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών*» περιγράφεται η διαδικασία της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα των Κρεμαστών καθώς και των αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης των αποθέσεων. Αρχικά περιγράφεται συνοπτικά η χρήση του Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού για την καταγραφή της θέσης και η χρήση των ηχοβολιστικών συσκευών για την μέτρηση του βάθους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά όλη η μεθοδολογία και οι σχετικοί υπολογισμοί για τη δημιουργία των Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου του πυθμένα στη σημερινή του μορφή και σε εκείνη πριν την πλήρωση του φράγματος. Στην Παράγραφο 4.3 δίνονται οι υπολογισμοί του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών που έχουν κατακρατηθεί στον ταμιευτήρα για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του ταμιευτήρα. Στη συνέχεια γίνονται οι εκτιμήσεις της αντίστοιχης μάζας και υπολογίζεται η στερεοαπορροή για όλη τη λεκάνη αλλά και για κάθε κλάδο ξεχωριστά. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία διενέργειας των δύο πλωτών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στον κλάδο του Αχελώου, οι εργαστηριακές δοκιμές των δειγμάτων και επαληθεύονται τα αρχικά δεδομένα.

Στο Κεφάλαιο 5 με τίτλο «*Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών*» περιγράφονται τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί σε κατάλληλα διαμορφωμένες βάσεις δεδομένων. Αναπτύχθηκαν ειδικές εφαρμογές σε Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας ArcView, το οποίο εκτός από τη δυνατότητα αποθήκευσης, ανάκτησης και τροποποίησης των πρωτογενών δεδομένων, περιλαμβάνει και τις εφαρμογές εκείνες που επιτρέπουν την πραγματοποίηση συγκεκριμένων επεξεργασιών. Το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο ανακτά τα απαιτούμενα δεδομένα από τη βάση που αναπτύχθηκε. Τα δεδομένα αυτά, δηλαδή η υδρολογία, η τοπογραφία, η γεωλογία και οι χρήσεις γης βρίσκονται αποθηκευμένα σε ψηφιακούς δίσκους που συνοδεύουν την τελική έκθεση.

Στο Κεφάλαιο 6 με τίτλο «Υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής» περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο και η λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής SEAGIS που αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute (DHI). Το μοντέλο αυτό λειτουργεί πάνω σε περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ) που επιτρέπει την εύκολη ανάπτυξη της εφαρμογής, τη γρήγορη ανάκτηση των απαραίτητων δεδομένων και την άνετη εποπτεία των αποτελεσμάτων μέσω του προσαρμοστικού χρήστη της εφαρμογής που επιτρέπει τη χωρική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί εφαρμογή της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (ΠΕΕΑ), και βρίσκεται ακόμα σε δοκιμαστική περίοδο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου, παρά τις διαφορές με τις εκτιμήσεις που προέρχονται από τις μετρημένες αποθέσεις στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών, είναι συμβατά ως τάξη μεγέθους. Οι διαφορές αυτές προέρχονται από τη δεδομένη αδυναμία της ΠΕΕΑ να προσομοιώσει την στερεοαπορροή σε μεγάλες λεκάνες απορροής και σε μικρότερο χρονικό βήμα από τις μέσες ετήσιες τιμές αλλά και από τα σαφή προβλήματα του μοντέλου στον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής.

Στο Κεφάλαιο 7 με τίτλο «Εμμεσες εκτιμήσεις στερεοαπορροής» περιγράφεται η ερευνητική προσπάθεια για την εκτίμηση της στερεοαπορροής των υδατορευμάτων χρησιμοποιώντας εναλλακτικές μεθόδους. Συγκεκριμενοποιείται η επιλογή της μέτρησης της θολότητας ως μιας τέτοιας εναλλακτικής μεθόδου και περιγράφεται η διαδικασία τοποθέτησης του θολόμετρου στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου, στην ίδια θέση που η ΔΕΗ λειτουργεί υδρομετρικό σταθμό. Παρόλη την μέχρι τώρα αποτυχία της καταγραφής αξιόπιστων αποτελεσμάτων, αιτιολογούνται τα πιθανά αίτια και προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα για τον υπερκερασμό τους ώστε το θολόμετρο να λειτουργήσει επιτυχώς σε χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο από εκείνο του παρόντος ερευνητικού έργου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 με τίτλο «Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα» συνοψίζονται και συμπεράσματα του ερευνητικού έργου και κωδικοποιούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται οι εκτιμήσεις του ρυθμού απόθεσης των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών (συνολικού όγκου και μάζας των αποθέσεων) καθώς και του ρυθμού διάβρωσης της λεκάνης απορροής με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μετρήσεων και του μοντέλου. Τέλος προτείνονται συγκεκριμένες ενέργειες για περαιτέρω έρευνα που θα αξιοποιούν τα αποτελέσματα αυτού του ερευνητικού έργου και θα θέτουν τις βάσεις για την επιστημονική και ερευνητική ανάπτυξη του επιστημονικού κλάδου της στερεοαπορροής στη χώρα μας.

2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Γενική εισαγωγή

Η απόθεση των φερτών υλικών σε υδάτινους αποδέκτες της ενδοχώρας (φυσικούς ή τεχνητούς) είναι απλά το σκέλος του συνολικού προβλήματος που αντιμετωπίζεται στο παρόν ερευνητικό έργο αλλά και σε παρόμοια διεθνώς. Η εδαφική διάβρωση λόγω της βροχής και της απορροής καθώς και η στερεομεταφορά των φερτών υλικών με αιώρηση ή / και με σύρση στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής είναι δύο χαρακτηριστικές διαδικασίες που εκ των πραγμάτων προηγούνται της απόθεσης των φερτών υλικών στους ταμειυτήρες και που απαιτούν συστηματική μελέτη για την επαρκή γνώση των φυσικών μηχανισμών τους.

Οι αρνητικές συνέπειες των παραπάνω διεργασιών προκάλεσαν την ανάπτυξη της επιστημονικής έρευνας γύρω από τις σχετικές διεργασίες, η οποία συγκεντρώνει ερευνητές από μια ποικιλία επιστημών όπως μηχανικούς, γεωλόγους, γεωπόνους μεταξύ άλλων, δεδομένου ότι η ανάγκη για μια διεπιστημονική προσέγγιση είναι παραπάνω από προφανής. Οι οικονομικές συνέπειες της εδαφικής διάβρωσης και της επακόλουθης πρόσχωσης είναι σημαντικές και σχεδόν αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν με ακρίβεια. Για παράδειγμα, η διάβρωση του εδαφικού υλικού και η περαιτέρω μεταφορά του κατάντη συχνά οδηγούν στην ελάττωση του πάχους του γόνιμου εδαφικού στρώματος και επομένως στη μείωση της αγροτικής παραγωγής. Επιπλέον η κατάντη μεταφορά του διαβρωμένου υλικού προκαλεί συχνά προβλήματα, όπως η πρόσχωση των ταμειυτήρων και των κύριων υδατορευμάτων καθώς και των λιμανιών όταν αυτά βρίσκονται κοντά σε εκβολές ποταμών. Πενήντα χρόνια πριν, ο *Brown* [1948] εκτίμησε ότι το συνολικό ετήσιο οικονομικό κόστος από την κατάντη μεταφορά των φερτών υλών στις ΗΠΑ είναι της τάξης των 175 εκατομμυρίων δολαρίων (σε τιμές 1948), τιμή που υπερβαίνει το ένα δισεκατομμύριο δολάρια σε σημερινές τιμές. Με την ολοένα και πιο σημαντική την ανάγκη αξιοποίησης των υδατικών πόρων, οι *Clark et al.*, [1984] κατέληξαν στο συνολικό κόστος των 6.1 δισεκατομμυρίων δολαρίων (σε τιμές 1980), από τα οποία 2.2 δισ. οφείλονται σε φερτά υλικά προερχόμενα από καλλιεργούμενες εκτάσεις. Οι εκτιμήσεις που προέρχονται από τις ΗΠΑ [*USDA*, 1981] αναφέρουν ότι αν οι ρυθμοί διάβρωσης συνεχιστούν με την ίδια ένταση για μια πενήνταετία τότε η αγροτική παραγωγή της χώρας θα μειωθεί κατά 8%. Επιπλέον, ο *Brown* [1984] εκτίμησε ότι παγκοσμίως οι καλλιεργούμενες εκτάσεις χάνουν περίπου 23 δισεκατομμύρια τόνους εδαφικού υλικού και ότι οι εδαφικοί πόροι μειώνονται κατά 8% παγκοσμίως ανά δεκαετία.

Σε παγκόσμια κλίμακα ο *Walling* [1984] εκτίμησε ότι $14 \cdot 10^9$ τόνοι φερτών υλικών σε αιώρηση και $1 \cdot 10^9$ τόνοι συρτικού φορτίου εκβάλλονται ετησίως στους ωκεανούς από όλα τα ποτάμια της γης. Και οι δύο παράγοντες συμβάλλουν στο γεγονός ότι η μείωση του εδαφικού στρώματος γίνεται με ρυθμό 57.5 mm για κάθε 1000 χρόνια. Αυτός ο ρυθμός μείωσης δεν ισοκατανέμεται γεωγραφικά αλλά υπάρχουν περιοχές (π.χ. Ασία, νησιωτικά συμπλέγματα του Δυτικού Ειρηνικού

Ωκεανού) όπου οι ρυθμοί διάβρωσης είναι εξαιρετικά μεγάλοι σε σχέση με τους αντίστοιχους σε άλλες περιοχές.

Η πρόσχωση των ταμιευτήρων που παρατηρείται από την απόθεση των φερτών υλικών λόγω της μεγάλης μείωσης έως και του μηδενισμού της ταχύτητας ροής αποτελεί την πιο σημαντική συνιστώσα που ενδιαφέρει το παρόν ερευνητικό έργο. Η μεγαλύτερη επιβάρυνση της πρόσχωσης των ταμιευτήρων είναι η μείωση της αποθηκευτικής τους ικανότητας. Οι ταμιευτήρες παγκοσμίως χάνουν περίπου το 1% της χωρητικότητάς τους ανά έτος (περίπου αντιστοιχεί σε 50 km³ απώλεια ωφέλιμου όγκου). Εκτιμάται επίσης ότι το κόστος της αποκατάστασης της απώλειας αυτής ανέρχεται σε 6 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως [Mahmood, 1987]. Για παράδειγμα, ο ταμιευτήρας Sanmenxia (Κίνα) χάνει το 1.7% της συνολικής του αποθηκευτικής ικανότητας το χρόνο ενώ ο ταμιευτήρας Mead (Hoover Dam) στις ΗΠΑ το 0.3% το χρόνο [Sloff, 1991]. Επομένως η ωφέλιμη¹ και η οικονομική² ζωή σχεδιασμού του έργου μπορεί να μειωθεί δραστικά σε συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, ο ταμιευτήρας Sefidrud στο Ιράν είχε σχεδιασθεί με ωφέλιμη ζωή να υπερβαίνει τα 100 έτη. Μετά από κάποια χρόνια λειτουργίας του ταμιευτήρα και έπειτα από μετρήσεις στον ταμιευτήρα για τον υπολογισμό του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών, εκτιμήθηκε ότι ο ρυθμός πρόσχωσης του ταμιευτήρα ήταν πολύ μεγαλύτερος από ότι είχε υιοθετηθεί κατά τη φάση σχεδιασμού λόγω των ανεπαρκών δεδομένων στερεοπαροχής. Με βάση τις μετρήσεις εκτιμήθηκε ότι η πραγματική ωφέλιμη ζωή του ταμιευτήρα είναι πλέον μόνο 30 χρόνια [Sloff, 1991].

Ειδικότερα σε ότι αφορά στους υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, η πρόσχωσή τους μπορεί να προκαλέσει και την εισχώρηση των φερτών υλικών διαμέσου της υδροληψίας στα συστήματα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας που πιθανό να έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές βλάβες. Δυστυχώς όμως, παρόλη την κρισιμότητα του θέματος στη λειτουργία ενός ταμιευτήρα, οι αποθέσεις των φερτών υλικών δεν λαμβάνονται υπόψη όσο θα έπρεπε σε συστήματα βελτιστοποίησης, ιδιαίτερα αν πρόκειται για ταμιευτήρα πολλαπλής σκοπιμότητας. Οι Miltz and White [1987] ανέπτυξαν μια μέθοδο βέλτιστης οικονομικής λύσης για την επιλογή της χωρητικότητας ενός ταμιευτήρα, δεδομένης της ετήσιας αναμενόμενης εισροής φερτών υλικών στον υπόψη ταμιευτήρα. Πρότειναν ως βέλτιστη χωρητικότητα εκείνη για την οποία το κόστος για την κατασκευή επιπλέον αποθηκευτικού όγκου στον ταμιευτήρα είναι ίσο με το κόστος της αφαίρεσης με μηχανικά μέσα των αποθέσεων φερτών υλικών ίσου όγκου.

2.1.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες

Η *στερεοαπορροή* (sediment yield), S_Y , είναι το φυσικό μέγεθος που μπορεί να εκφράσει και τις τρεις σχετικές φυσικές διεργασίες (εδαφική διάβρωση, στερεομεταφορά και απόθεση). Εκφράζει τη συνολική μάζα των φερτών υλικών που παροχετεύονται από μια διατομή ενός υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου ανοιγμένη στη μονάδα επιφάνειας της ανάντη λεκάνη απορροής (μάζα / χρόνος / επιφάνεια) [Vanoni, 1977; ASCE, 1982].

¹ Ωφέλιμη ζωή ενός ταμιευτήρα ορίζεται η περίοδος για την οποία η χωρητικότητά του επαρκεί για την κάλυψη των πρωτευουσών αναγκών.

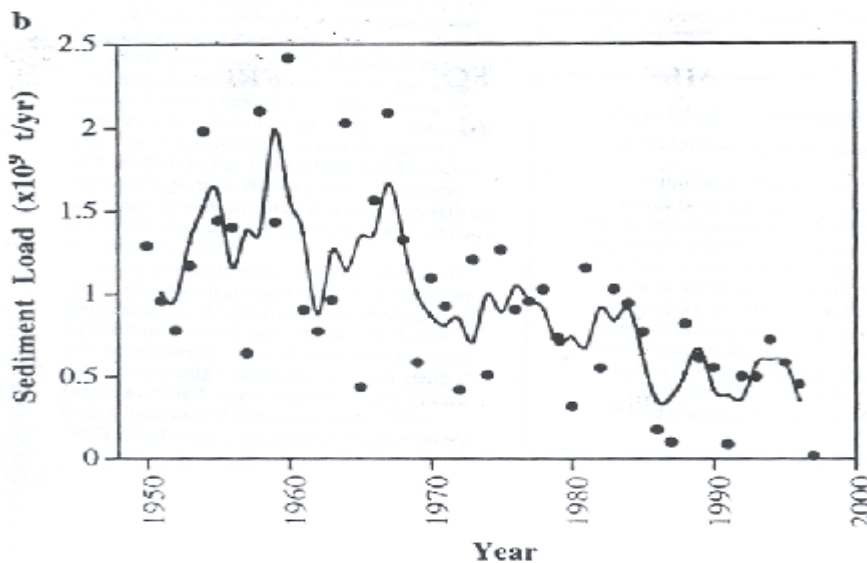
² Οικονομική ζωή του ταμιευτήρα είναι η περίοδος για την οποία οι ζημιές για επισκευή, συντήρηση, κ.ά. δεν υπερβαίνουν τα κέρδη.

Η *στερεοπαροχή* (sediment discharge), Q_s , ακολούθως εκφράζει τη συνολική μάζα των φερτών υλικών που παροχετεύονται από μια διατομή ενός υδατορεύματος στη μονάδα του χρόνου χωρίς αναφορά στη λεκάνη απορροής (μάζα / χρόνος). Η *ολική διάβρωση* (gross erosion) περιγράφει την ποσότητα του υλικού το οποίο αποκολλάται από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της δράσης της βροχής ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας (μάζα / χρόνος / επιφάνεια). Η *καθαρή διάβρωση* (net erosion) είναι το μέγεθος που εκφράζει το ποσοστό των φερτών υλικών που αποκολλούνται από το εδαφικό στρώμα και τα οποία δεν εναποτίθενται μέσα στην ίδια μονάδα επιφάνειας.

Αντίστοιχα ο *συντελεστής στερεοαπορροής* (sediment delivery ratio) είναι ο λόγος της στερεοαπορροής προς την ολική διάβρωση και εκφράζει το ποσοστό των φερτών υλικών που αποκολλήθηκαν από το έδαφος και τα οποία μεταφέρθηκαν μέσω της επιφανειακής απορροής μέχρι την υπόψη θέση του υδατορεύματος. Ο αριθμός αυτός λαμβάνει υπόψη το ποσοστό των φερτών υλικών τα οποία αποτέθηκαν είτε στην επιφάνεια της ανάντη λεκάνης απορροής, είτε στις βάσεις των κλιτύων, είτε στην κοίτη και στις όχθες του υδρογραφικού δικτύου πριν μεταφερθεί στην υπόψη διατομή. Εξάλλου σε μεγάλες λεκάνες απορροής σημαντικό ρόλο παίζει και ο χρόνος που θα χρειαστεί ώστε η εδαφική διάβρωση καταλήξει τελικά στην έξοδο. Ανάλογα με την επιφανειακή απορροή, η εδαφική διάβρωση μπορεί να μεταφερθεί για κάποιο διάστημα έπειτα να αποτεθεί στη λεκάνη απορροής και με την επόμενη πλημμύρα να ξεκινήσει η ίδια διαδικασία έως καταλήξει στην έξοδο της λεκάνης. Η μετρημένη στερεοπαροχή μια δεδομένη χρονική στιγμή, t , μπορεί να περιλαμβάνει φερτά υλικά που είχαν αρχικά διαβρωθεί μέχρι και αρκετά χρόνια πριν. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής στερεοαπορροής είναι αδιάστατο μέγεθος και πάντα μικρότερος της μονάδας. Για παράδειγμα, οι *Wade and Heady* [1978] αφού ανέλυσαν δεδομένα από 105 λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ κατάληξαν ότι οι συντελεστές στερεοαπορροής κυμαίνονται από 0.001 έως 0.38. Για μέσες ετήσιες τιμές τουλάχιστον, ο συντελεστής στερεοαπορροής μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής αφού εξομαλύνονται σε μεγάλο βαθμό οι ετήσιες διακυμάνσεις ενώ δεν μπορεί να είναι χρήσιμος για την εκτίμηση της στερεοαπορροής σε περιπτώσεις μεμονωμένων πλημμυρικών επεισοδίων. Σε κάθε περίπτωση η ακρίβεια της εκτίμησης του συντελεστή στερεοαπορροής αυξάνεται όσο μειώνεται η επιφάνεια της λεκάνης απορροής.

Οι τρεις ποταμοί με τη μεγαλύτερη ετήσια στερεοπαροχή είναι ο Κίτρινος Ποταμός (Κίνα), ο Γάγγης (Ινδία) και ο Αμαζόνιος (Βραζιλία). Ενδεικτική είναι η περίπτωση του Κίτρινου ποταμού, ο οποίος αν και η έκταση της λεκάνης απορροής του είναι μόνο το 1/8 του Αμαζόνιου και η μέση ετήσια απορροή τουλάχιστο δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη, η μέση ετήσια στερεοπαροχή του είναι ίση με $1.1 \cdot 10^9$ t για την περίοδο 1950-1980 [*Qian and Dai*, 1980] και γενικά είναι συγκρίσιμη με εκείνες των Γάγγη και Αμαζόνιου ενώ δεν υπάρχει διεθνώς βιβλιογραφική πηγή που να αναφέρει άλλο ποτάμι με ετήσια στερεοπαροχή μεγαλύτερη των $0.5 \cdot 10^9$ t. Για παράδειγμα, η μέση ετήσια στερεοπαροχή της νήσου Ταϊβάν προσεγγίζει τα $300 \cdot 10^6$ τόνους (10000 t/km²), αριθμός που είναι ελάχιστα μικρότερος από τη συνολική αντίστοιχη στερεοπαροχή των ΗΠΑ [*Annandale*, 1987]. Τα σημαντικά φορτία και οι υψηλές συγκεντρώσεις φερτών σε αιώρηση του Κίτρινου ποταμού (συχνά μεγαλύτερα των 50 g/L) οφείλονται εν μέρει στη σημαντική διάβρωση των χαλαρών εδαφών των οροπεδίων της βόρειας Κίνας [*Milliman et al.*, 1987]. Η κύρια αιτία πάντως είναι ότι το συντριπτικό ποσοστό της μέσης ετήσιας απορροής (της τάξης των 100 mm) λαμβάνει χώρα μέσα σε λίγες εβδομάδες (τέλος καλοκαιριού-αρχές

φθινοπώρου) με τη μορφή καταιγίδων πολύ μεγάλης έντασης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η χρονοσειρά των ετήσιων στερεοπαροχών του Κίτρινου Ποταμού μετρημένων στο υδρομετρικό σταθμό Lijin που βρίσκεται μόλις 10 km από τις εκβολές του. Η στερεοπαροχή υπολογίζεται σε δισεκατομμύρια τόνους ετησίως. Η γραμμή στο διάγραμμα απεικονίζει τους κυλιόμενους μέσους όρους 3-ετίας για την εξομάλυνση της διασποράς των ετήσιων τιμών. Είναι χαρακτηριστικό ότι η κατασκευή του ταμιευτήρα Sanmenxia (αρχές της δεκαετίας του 1960) σε απόσταση περίπου 600 km από το Lijin δεν φαίνεται να επηρέασε σημαντικά τη στερεοπαροχή κατόπιν. Η σημαντική μείωση της στερεοπαροχής τις δύο τελευταίες δεκαετίες οφείλεται κυρίως στη σαφή μείωση των βροχοπτώσεων, στην κατακράτηση νερού για αρδευτικούς σκοπούς αλλά και στην καλύτερη διαχείριση και αντιδιαβρωτική προστασία της αγροτικής γης.

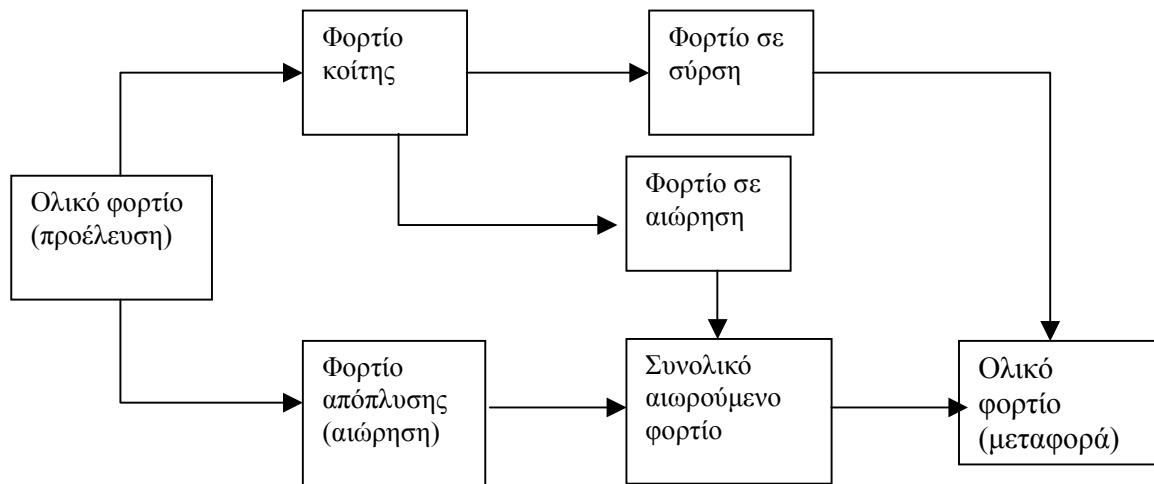


Σχήμα 1: Η ετήσια στερεοπαροχή του Κίτρινου ποταμού μετρημένη στο σταθμό Lijin [Qian and Dai, 1980]

2.1.2 Μορφές στερεομεταφοράς και σύσταση των φερτών υλικών

Η διάκριση των φερτών υλικών μπορεί να γίνει ως προς δύο παράγοντες: (α) ως προς τον τρόπο μεταφοράς τους και (β) ως προς την προέλευσή τους. Ως προς τον τρόπο μεταφοράς διακρίνεται το φορτίο σε αιώρηση (suspended load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα, και το φορτίο σε σύρση (bed load), όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη. Η διάκριση αυτή δεν μπορεί να είναι απόλυτη και μοναδική αφού φερτά υλικά του ίδιου μεγέθους και της ίδιας ορυκτολογικής σύστασης μπορεί να μεταφερθούν είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας ροής (π.χ. ταχύτητα ροής, τύρβη). Οι μορφές αυτές στερεομεταφοράς και οι μαθηματικές τους εκφράσεις περιγράφονται αναλυτικά στα πολύ γνωστά εγχειρίδια [Graf, 1971; Vanoni, 1977; Bogardi, 1978, Ξανθόπουλος, 1990] και δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας τελικής έκθεσης. Χονδροειδώς μπορεί να θεωρηθεί ότι ως φερτά υλικά σε σύρση είναι εκείνα με μέγεθος άνω των 0.85 mm, διάκριση που βασίζεται στο κριτήριο που αναφέρει ότι η ταχύτητα καθίζησης γίνεται ίση με τη συρτική ταχύτητα [Bagnold, 1966].

Ως προς την προέλευσή τους, τα φερτά υλικά μπορούν να διακριθούν σε φορτίο κοίτης (bed material load) και σε φορτίο απόπλυσης (wash load). Το φορτίο κοίτης, το οποίο μπορεί να είναι είτε σε αιώρηση είτε σε σύρση, αναφέρεται σε φερτά υλικά τα οποία ήδη βρίσκονται στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου και αποτελεί τη μοναδική πηγή φερτών υλικών σε ξηρές περιόδους ενώ το φορτίο απόπλυσης παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων και προέρχεται από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής. Το φορτίο απόπλυσης λόγω του ότι μεταφέρεται μέσω της πλημμυρικής απορροής συνήθως είναι φορτίο σε αιώρηση και είναι πιο εύκολο να μετρηθεί στο πεδίο καθώς είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στη διατομή της κοίτης του ποταμού. Η στερεοπαροχή του φορτίου απόπλυσης σε ένα τμήμα ενός υδατορεύματος εξαρτάται από το ρυθμό που τα φερτά υλικά είναι διαθέσιμα στη λεκάνη απορροής και όχι από τη στερεομεταφορική ικανότητα της ροής. Το φορτίο απόπλυσης ιδιαίτερα στις Μεσογειακές χώρες αποτελεί το συντριπτικό ποσοστό της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης και μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων έντονων πλημμυρικών επεισοδίων το χρόνο. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς. Σημειώνεται ότι οι ορισμοί διαφέρουν στη διεθνή βιβλιογραφία και σε μεγάλο βαθμό παραμένουν αυθαίρετοι. Για παράδειγμα, σε σχετικές μελέτες ως «φορτίο απόπλυσης» θεωρούνται όλα τα φερτά υλικά με διάσταση μικρότερη των 63 μm [Lawrence, 1996], με τη λογική ότι φερτά υλικά με αυτή τη διάμετρο συνήθως δεν βρίσκονται σε κοίτες ποταμών. Η θεώρηση αυτή είναι προφανώς αυθαίρετη, αφού σε κοίτες ποταμών με μεγάλες κλίσεις υλικά με διάμετρο πολύ μεγαλύτερη των 63 μm μπορούν να συμπεριφερθούν ως «φορτίο απόπλυσης».



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση των μορφών στερεομεταφοράς.

2.1.3 Υπάρχουσα γνώση και προοπτικές στον Ελληνικό χώρο

Η επιστημονική πρόοδος που έχει επιτευχθεί διεθνώς έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την καθυστέρηση στη χώρα μας, όπου εδώ και αρκετά χρόνια έχει εγκαταλειφθεί οποιοδήποτε πρόγραμμα μέτρησης της στερεοπαροχής στα ποτάμια. Αυτό έχει ως συνέπεια την απουσία οποιασδήποτε εκτίμησης για την στερεοαπορροή και το ρυθμό διάβρωσης στον Ελληνικό χώρο. Μόνο η ΔΕΗ στη φάση της μελέτης κάποιου ταμιευτήρα διενεργεί στερεοϋδρομετρήσεις (ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής) πριν την κατασκευή του ώστε να εκτιμήσει το νεκρό όγκο του. Οι μετρήσεις αυτές (που είναι σποραδικές και συχνά ανεπαρκείς) αφορούν

μόνο στο φορτίο σε αιώρηση και σταματούν μετά την κατασκευή του έργου. Το άμεσο αποτέλεσμα είναι ότι σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να εκτιμηθεί αν η πραγματική στερεοαπορροή και επομένως ο ρυθμός πρόσχωσης του ταμιευτήρα είναι στα επίπεδα εκείνου που είχε υιοθετηθεί κατά τα σχεδιασμό του έργου. Επομένως παραμένει άγνωστος ο ρυθμός πρόσχωσης του ταμιευτήρα, οι απώλειες της χωρητικότητας του ταμιευτήρα και η πραγματική οικονομική ζωή του έργου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του φράγματος Λούρου στον ποταμό Λούρο της Ηπείρου, όπου οι στερεοπαροχές του ποταμού είχαν υποεκτιμηθεί σημαντικά ώστε ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα (0.37 hm^3) να καλυφθεί από τις προσχώσεις μέσα σε λίγα χρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ταμιευτήρας να έχει μηδενική αποθηκευτική ικανότητα και ο ΥΗΣ να λειτουργεί πλέον ως σταθμός βάσης αξιοποιώντας μόνο την υπάρχουσα στιγμιαία παροχή του ποταμού.

Μετρήσεις στερεοπαροχής έχουν γίνει σε αρκετά ελληνικά ποτάμια (π.χ. Αλιάκμονας, Αχελώος, Αραχθός) κυρίως από τη ΔΕΗ [Mimikou, 1982; Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987]. Οι μετρήσεις της στερεοπαροχής γίνονται με δειγματολήπτες ολοκληρωτικούς ως προς το βάθος σε διαφορετικές θέσεις σε όλο το πλάτος της διατομής. Οι στερεοϋδρομετρήσεις επιτρέπουν την κατάρτιση καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής (sediment discharge rating curves) και την επακόλουθη εκτίμηση της μέσης ημερήσιας στερεοπαροχής με βάση τη στιγμιαία μέτρηση της στάθμης από σταθμήμετρο ή / και τη μέση ημερήσια παροχή όταν στο σταθμό μέτρησης έχει εγκατασταθεί και σταθμηγράφος. Η μέθοδος αυτή πλέον εγκαταλείπεται διεθνώς ως μάλλον αναξιόπιστη και ανακριβής για την εκτίμηση της στερεοαπορροής κυρίως σε μικρές λεκάνες απορροής, έχει όμως ως πλεονέκτημα το σχετικά χαμηλό κόστος. Τα δείγματα των στερεοϋδρομετρήσεων πλέον του ότι είναι σποραδικά, σταματούν μετά από λίγα χρόνια. Επομένως είναι αδύνατο να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της στερεοαπορροής στην Ελλάδα αλλά πολύ περισσότερο μια εκτίμηση της χρονικής (αλλά και γεωγραφικής) της μεταβολής τόσο στην κλίμακα ενός συγκεκριμένου πλημμυρικού γεγονότος όσο και σε υπερετήσια κλίμακα. Με τη διακοπή της κατασκευής νέων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων στην Ελλάδα έχουν διακοπεί και οι μετρήσεις στερεοπαροχής.

Πρόσφατα έχουν ξεκινήσει σποραδικά ερευνητικά προγράμματα χρηματοδοτούμενα από τη ΔΕΗ για τη μέτρηση των φερτών υλικών που έχουν αποθεθεί σε ταμιευτήρες στην Ελλάδα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μελέτη των Ινστιτούτων Εσωτερικών Υδάτων και Ωκεανογραφίας του Εθνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών [ΕΚΘΕ, 1997] στον ταμιευτήρα του Πολύφυτου στον π. Αλιάκμονα και του Τομέα Ιστορικής Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών στον ταμιευτήρα των Πηγών του π. Αώου³ για λογαριασμό της ΔΕΗ. Την ίδια περίοδο με την εκπόνηση του ερευνητικού αυτού έργου εκπονείται η «Μελέτη ποιότητας νερών των ταμιευτήρων του ΥΗΣ Πηγών Αώου και του ΥΗΣ Πουρναρίου» από το ΕΚΘΕ. Οι μετρήσεις των φερτών υλικών που έχουν αποθεθεί στον ταμιευτήρα είναι εξαιρετικά χρήσιμες, αλλά η απουσία μετρήσεων στερεοπαροχής στα ποτάμια που τροφοδοτούν τους υπόψη ταμιευτήρες έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτίμησης του χρονικού επιμερισμού της μοναδικής τιμής του όγκου και της μάζας των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα, π.χ. σε ετήσια χρονική κλίμακα για την περίοδο λειτουργίας του ταμιευτήρα.

³ Το ερευνητικό έργο αφορούσε στη μέτρηση του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα και δεν έγινε άμεση μέτρηση του όγκου των φερτών υλικών.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διεθνώς τεχνικές για την αυτόματη και αξιόπιστη μέτρηση της στερεοπαροχής με τη χρήση συγκεκριμένων οργάνων που καταγράφουν τη συγκέντρωση των φερτών υλικών (κυρίως αφορούν σε αιωρούμενα φερτά υλικά αλλά και σε φερτά κοίτης σπανιότερα) σε συνεχή χρόνο. Οι νέες τεχνολογίες είναι δυστυχώς πολύ ακριβές (αφού βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο επιχειρησιακό στάδιο) και επομένως απαιτείται μια εθνική στρατηγική, κεντρικά σχεδιασμένη για την (επαν)-έναρξη των μετρήσεων στερεοπαροχής στη χώρα.

2.2 Εκτιμήσεις στερεοαπορροής

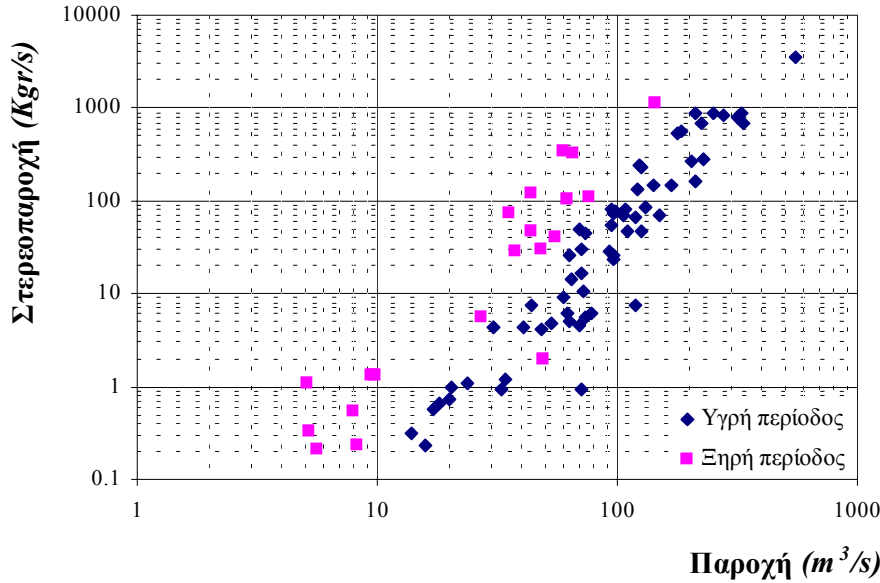
Το πρόβλημα της εκτίμησης της στερεοαπορροής σε μια θέση υδατορεύματος (sediment yield) είναι πολυσύνθετο, αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους με στοχαστικό χαρακτήρα αφενός και αφετέρου δεν υπάρχει κάποια αξιόπιστη διαδικασία μέτρησης των συγκεντρώσεων των φερτών υλικών είτε πρόκειται για φερτά σε αιώρηση είτε ακόμα περισσότερο για φερτά σε σύρση. Οι περισσότερες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς αφορούν είτε σε πειραματικές λεκάνες, είτε σε μικρές λεκάνες απορροής στην πιο σύνθετη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει γιατί σε τέτοια κλίμακα μπορεί πιο εύκολα να γίνει η μέτρηση και η κατανόηση των φυσικών διεργασιών.

2.2.1 Εμπειρικά μοντέλα

Οι εκτιμήσεις της στερεοαπορροής στα υδατορεύματα προκύπτουν από τις εξής μεθόδους:

Καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής

Οι καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής (sediment discharge rating curves) καταρτίζονται από ταυτόχρονες μετρήσεις της παροχής και της στερεοπαροχής σε μια συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος. Οι εκτιμήσεις της στερεοαπορροής από την εφαρμογή των καμπυλών εμφανίζουν μειωμένη αξιοπιστία καθώς οι μετρημένες στερεοπαροχές για την ίδια τιμή της παροχής παρουσιάζουν διακυμάνσεις τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους [Walling, 1977; Ferguson, 1986; Walling and Webb, 1988; Moog and Whitting, 1994, Hodgkins, 1999]. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι στερεοϋδρομετρήσεις του ποταμού Αλιάκμονα στη θέση Μ. Ιλαρίονα για χρονικό διάστημα 15 ετών (από 1965 έως 1980, δεδομένα της ΔΕΗ). Από τη διάταξη των δεδομένων είναι εμφανής η μεταβλητότητα των μετρήσεων όπου για μια συγκεκριμένη τιμή της παροχής παρατηρούνται στερεοπαροχές διαφορετικές έως και 3 τάξεις μεγέθους. Οι στερεοϋδρομετρήσεις που έχουν διεξαχθεί κατά τις ξηρές περιόδους εμφανίζουν μεγαλύτερες στερεοπαροχές κυρίως λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής που προέρχεται από τις σχετικές φυσικές, ατμοσφαιρικές, χημικές και άλλες διεργασίες, ως επακόλουθα μιας ξηρής περιόδου που έχει προηγηθεί.



Σχήμα 3: Στερεοϋδρομετρήσεις στον ποταμό Αλιάκμονα στη θέση Μ. Ιλαρίονα

Οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής έχουν μορφή εξίσωσης δύναμης, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 2, και οι συντελεστές a και b προκύπτουν από την εφαρμογή της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των φυσικών λογαρίθμων των τιμών της παροχής και της στερεοπαροχής (Εξίσωση 1),

$$\ln Q_{si} = a + b \ln Q_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

όπου Q_{si} (M/T) είναι η στερεοπαροχή για τη μέτρηση i , Q_i [M³/T] είναι η αντίστοιχη παροχή του υδατορεύματος, a και b είναι οι σταθεροί συντελεστές της παλινδρόμησης και ε_i είναι ο αθροιστικός όρος σφάλματος που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση σ . Η Εξίσωση 1 ισοδυναμεί με την εξίσωση δύναμης, που φαίνεται στην Εξίσωση 2,

$$Q_{si} = e^a Q_i^b \eta_i \quad (2)$$

όπου η_i είναι ο πολλαπλασιαστικός όρος σφάλματος ($\ln \eta_i = \varepsilon_i$ και $E(\varepsilon_i) = 0$) και ανήκει στη λογαριθμοκανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3

$$E(\eta_i) = \exp(0.5\sigma^2) \quad (3)$$

όπου σ^2 είναι η διασπορά των ε_i . Η αναμενόμενη τιμή του η_i είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα εκτός από την περίπτωση που δεν υπάρχει διασπορά των μετρήσεων ($\sigma = 0$). Η απολογαριθμοποίηση εισάγει μεροληψία στην εκτίμηση του Q_{si} , η οποία είναι μεγαλύτερη όσο πιο μεγάλη είναι η διασπορά σ [Ferguson, 1986].

Η ολοκλήρωση των τιμών των στερεοπαροχών που προκύπτουν από την Εξίσωση 2 ισοδυναμεί με το συνολικό φορτίο φερτών υλικών (L) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (T), όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 4.

$$L = \int Qsdt \quad (4)$$

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες στο παρελθόν ώστε να συσχετισθούν οι συντελεστές της Εξίσωσης 1 με διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ανάντη λεκάνης απορροής. Αυτή η μεθοδολογία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη περιοχικών μοντέλων για λεκάνες απορροής στις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις στερεοπαροχής. Η *Mimikou* [1982] αναλύοντας τα στοιχεία από στερεοϋδρομετρήσεις στη Δυτική και Βορειοδυτική Ελλάδα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι συντελεστές της Εξίσωσης 1 εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης [P mm], την έκταση της λεκάνης απορροής [A km²] και την υψομετρική πτώση⁴ της [H km]. Με εφαρμογή πολλαπλής συσχέτισης βρέθηκαν σχέσεις ρυθμισμένες για όλη τη Β και ΒΔ Ελλάδα που συνδέουν τις παραμέτρους a και b με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης της στερεοπαροχής είναι περίπου 30% και 50% για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα και για τις μέγιστες μετρημένες παροχές. Το σφάλμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις μέγιστες παροχές, που συνδέονται άμεσα με το φορτίο απόπλυσης. Το σφάλμα αυτό αναμένεται να είναι μεγαλύτερο για τις παροχές που υπερβαίνουν τις μέγιστες μετρημένες καθώς οι στερεοϋδρομετρήσεις συνήθως δεν εκτελούνται κατά τη διάρκεια έντονων πλημμυρικών επεισοδίων. Το σφάλμα αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι συντελεστές βαθμονομούνται με βάση τη μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης και μετά εφαρμόζονται στην πρόβλεψη ενός εξαιρετικά σημαντικού πλημμυρικού επεισοδίου διάρκειας λίγων ωρών.

Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι σταθεροί συντελεστές της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των λογαρίθμων των μετρήσεων υπονοούν τη μονιμότητα στο χρόνο της σχέσης μεταξύ της παροχής και στερεοπαροχής, η οποία στην πραγματικότητα δεν ισχύει. Στην περίπτωση ενός μεμονωμένου πλημμυρικού γεγονότος (που η καμπύλη είναι συνήθως βροχωτή για τον ανοδικό και καθοδικό κλάδο του πλημμυρογραφήματος) απόκλιση από τη μονιμότητα προκαλεί η διακύμανση της απόπλυσης των φερτών υλικών στη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, όπως για παράδειγμα στην εποχιακή, είναι εμφανής η διακύμανση των στερεοπαροχών κατά την ξηρή και υγρή περίοδο. Σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα, όπως η υπερετήσια, αποκλίσεις από τη μονιμότητα παρατηρούνται όταν για παράδειγμα η λεκάνη απορροής υπόκειται σε εκτεταμένες και βαθμιαίες μεταβολές στις χρήσεις γης [*Dunne*, 1979; *Kuhnle et al.*, 1996]. Ο *Beschta* [1978] εκτίμησε μια σημαντική προς τα κάτω μεταβολή των καμπυλών (μικρότερη στερεοπαροχή για την ίδια τιμή της παροχής) για τους μήνες που ακολουθούν τη μέγιστη ετήσια πλημμύρα. Αντίστοιχα, οι *Moog and Whitting* [1994] σε σχέση με τις καμπύλες συρτικού φορτίου παρατήρησαν ότι αυξημένες στερεοπαροχές παρουσιάζονται πριν την εμφάνιση της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας. Η υστέρηση, η οποία εμφανίζεται μετά από μια συγκεκριμένη τιμή της απορροής και η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε υδατόρευμα, δείχνει ότι η διαθεσιμότητα φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής είναι σημαντικός παράγοντας στον προσδιορισμό της στερεοαπορροής. Ο *Moore* [1984] θεώρησε τη διαθεσιμότητα των φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής ως μια εκθετικά πτωτική συνάρτηση κατά την υγρή περίοδο ως προς το χρόνο ενώ οι *VanSickle and Beschta* [1983] εισήγαγαν μια συνάρτηση της διαθεσιμότητας των φερτών υλικών στη εξίσωση δύναμης των καμπυλών

⁴ Ως υψομετρική πτώση θεωρείται η διαφορά του υψομέτρου των πηγών του κυρίως κλάδου του ποταμού από τον υδροκρίτη έως τη διατομή μέτρησης των στερεοπαροχών.

παροχής – στερεοπαροχής. Οι *Wolman and Gerson* [1978] μέτρησαν μειούμενες τιμές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών υλικών σε τέσσερα ποτάμια για μια περίοδο πέντε ετών μετά την εμφάνιση πλημμυρών με περίοδο επαναφοράς από 50 έως 100 έτη. Σε περιπτώσεις όπου το συντριπτικό ποσοστό της στερεοπαροχής μεταφέρεται κατά τη διάρκεια λίγων πλημμυρικών επεισοδίων το χρόνο (π.χ. Μεσογειακές χώρες), η χρήση των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υπεκτίμηση αποκλειστικά του φορτίου απόπλυσης, αφού οι στερεοϋδρομετρήσεις γίνονται συνήθως στους καθοδικούς ή ανοδικούς κλάδους των πλημμυρικών παροχών και σίγουρα όχι γύρω από τις αιχμές των πλημμυρών αυτών. Αυτό αναπόφευκτα σημαίνει ότι, πρώτον ένα πρόγραμμα στερεοϋδρομετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι σχετικά απίθανο να συγκεντρώσει δείγματα αντιπροσωπευτικά των περιόδων κατά τις οποίες μεταφέρεται η πλειονότητα των φερτών υλικών. Δεύτερον, επειδή η καμπύλη προσαρμόζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε όλο το δείγμα των παροχών και στερεοπαροχών, η κλίση της θα επηρεάζεται άμεσα από τον κύριο όγκο των στερεοϋδρομετρήσεων με χαμηλές παροχές και στερεοπαροχές και επομένως δεν μπορεί είναι αντιπροσωπευτική των περιόδων κατά τις οποίες μεταφέρεται η πλειονότητα των φερτών υλικών. Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με την ελληνική πρακτική, οι στερεοϋδρομετρήσεις εκτελούνται μόνο όταν στο ποτάμι είναι εμφανές το φορτίο απόπλυσης. Το γεγονός αυτό εισάγει αντίθετη μεροληψία, δηλαδή εισάγει υπερεκτίμηση των στερεοπαροχών σε μη – πλημμυρικές περιόδους (αλλά με ίδια τιμή της παροχής) που σε γενικές γραμμές το ποτάμι είναι καθαρό. Απόδειξη της υπερεκτίμησης αυτής παρουσιάζεται στις Παραγράφους 3.2.1 και 7.3.

Αρκετοί ερευνητές [π.χ. *Walling and Webb*, 1988] αναφέρουν ότι σε πολλές περιπτώσεις οι εκτιμήσεις των στερεοπαροχών από τις καμπύλες σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές μετρημένες στερεοπαροχές παρουσίαζαν εξαιρετικά σημαντικές αποκλίσεις. Είναι αξιοσημείωτο πάντως το γεγονός ότι το σφάλμα των εκτιμήσεων από τις καμπύλες μειώνεται όσο αυξάνεται η επιφάνεια της λεκάνης απορροής, [*Walling and Webb*, 1988; *Walling*, 1999], γεγονός που ίσως σημαίνει ότι σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας το σφάλμα που υπάρχει στις καμπύλες πιθανόν να μην είναι μεγαλύτερο από το σφάλμα που περιέχουν οι υπόλοιπες μέθοδοι που θα εξεταστούν παρακάτω.

Επίσης, μεταβλητές χρονικά συσχετισμένες, όπως π.χ. η απορροή και η στερεοαπορροή μπορεί να δημιουργήσουν μοντέλα παλινδρόμησης με συσχετισμένους όρους σφάλματος (ετεροσκεδαστικότητα), ιδιαίτερα αν οι μετρήσεις είναι πολύ μικρού χρονικού βήματος (π.χ. ημερήσιες) [*Weber et al.*, 1976; *Lemke*, 1991]. Η ετεροσκεδαστικότητα είναι προφανώς σημαντική ακύρωση μιας από τις βασικές προϋποθέσεις της γραμμικής παλινδρόμησης των ελαχίστων τετραγώνων. Η ύπαρξη συσχετισμένων όρων σφάλματος οδηγεί σε συντελεστές παλινδρόμησης, οι οποίοι όμως δεν έχουν πλέον την ιδιότητα του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος και επομένως η χρήση του μοντέλου της Εξίσωσης 1 είναι απαγορευτική [*Κουτσογιάννης*, 1997]. Πάντως η χρήση του λογαριθμικού μετασχηματισμού των μεταβλητών αμβλύνει το πρόβλημα της ετεροσκεδαστικότητας. Ως γενικό συμπέρασμα θα μπορούσε να αναφερθεί ότι η μέθοδος των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής θα πρέπει να αντικατασταθεί έτσι ώστε να συμπεριλάβει περισσότερο τη σχέση μεταξύ πλημμυρικού επεισοδίου και στερεοαπορροής και όχι τόσο την ολοκλήρωση των ημερήσιων παροχών – στερεοπαροχών.

Οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής είναι ουσιαστικά ένα εμπειρικό μοντέλο καθώς συσχετίζονται με μια απλή γραμμική παλινδρόμηση οι φυσικοί λογάριθμοι των δύο μεγεθών. Παρόμοιες συσχετίσεις (π.χ. μη - γραμμική ή / και πολλαπλή παλινδρόμηση) με υδρολογικές (π.χ. βροχόπτωση, απορροή) ή και φυσιογραφικές παραμέτρους οδήγησαν στην ανάπτυξη απλών εμπειρικών μοντέλων στερεοαπορροής [Flaxman, 1972; Jansen and Painter, 1974; Dendy and Bolton, 1976; Weber et al., 1976; Wischmeier and Smith, 1978; Mimikou, 1982; Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987].

Για παράδειγμα οι Dendy and Bolton [1976] συσχέτισαν την ετήσια στερεοαπορροή με την ετήσια απορροή και την επιφάνεια της λεκάνης απορροής από δεδομένα αποθέσεων φερτών υλικών σε 800 λεκάνες κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια των ΗΠΑ. Οι λεκάνες απορροής κυμαίνονται από 2.9 έως 7.1 10⁴ km², η μέση ετήσια απορροή κυμαίνεται από 2.1 έως 33 cm και η μέση ετήσια στερεοαπορροή από 56 έως 695 t/km². Σε λεκάνες απορροής που η μέση ετήσια απορροή είναι μικρότερη από 5 cm η εξίσωση συσχέτισης είναι:

$$S_y = 1965Q^{0.46}(1.43-0.11\log A) \quad (5)$$

ενώ για περιοχές με μέση ετήσια απορροή πλέον των 5 cm η εξίσωση συσχέτισης είναι:

$$S_y = 1958e^{-0.14Q}(1.43-0.11\log A) \quad (6)$$

όπου, S_y (t/km²) είναι η μέση ετήσια στερεοαπορροή, Q (cm) είναι η μέση ετήσια απορροή και A (km²) είναι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι ίσος με 0.75.

Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας

Επιστήμονες στις ΗΠΑ ανέπτυξαν την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (ΠΕΕΑ) (Universal Soil Loss Equation (USLE)) [Wischmeier and Smith, 1965, 1978] ως μια τεχνική εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης και αποτίμησης των διαφόρων πρακτικών διατήρησης του εδαφικού στρώματος. Η ΠΕΕΑ τουλάχιστον στην αρχική της μορφή έχει αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης σε ετήσια τουλάχιστον κλίμακα. Η ΠΕΕΑ καθώς οι διαφοροποιήσεις της (Revised USLE και USLE-Modified) για μεμονωμένες καταγίδες [Williams and Bernt, 1977; Renard et al., 1991; Kinnell and Rise, 1998] αποτελούν τις πιο δημοφιλείς μεθόδους της κατηγορίας αυτής κυρίως λόγω της απλότητάς τους στην εφαρμογή.

Η ΠΕΕΑ στην αρχική της μορφή εκφράζεται ως το απλό γινόμενο διαφόρων παραγόντων, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 7.

$$A = R K L S C P \quad (7)$$

όπου,

A , η εδαφική απώλεια ανά μονάδα επιφάνειας [t/ha],

R , ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (rainfall erosivity factor) [MJ mm ha⁻¹ h⁻¹],

K , ο συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (soil erodibility factor) [t h MJ⁻¹ mm⁻¹],

LS , ο τοπογραφικός συντελεστής (topographic factor) που αποτελείται από το γινόμενο του συντελεστή μήκους κλιτύος (L) (slope-length factor) και του συντελεστή κλίσης κλιτύος (S) (slope-gradient factor) [-],

C , ο συντελεστής φυτοκάλυψης (cropping management factor) [-], και

P , ο συντελεστής διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης (erosion control practice factor) [-].

Οι αριθμητικές τιμές των έξι συντελεστών έχουν προκύψει από συγκεντρωμένα δεδομένα από διάφορες λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ. Οι φυσικές διεργασίες της διάβρωσης που αριθμητικά αναπαριστώνται από τους πιο πάνω συντελεστές αποκλίνουν σημαντικά από τις μέσες τιμές κατά τη διάρκεια μεμονωμένων καταιγίδων, λόγω της σημαντικότερης επιρροής των τυχαίων διακυμάνσεων. Η επιρροή αυτή αρχίζει να εξισορροπείται για μεγαλύτερες διάρκειες. Επομένως η ακρίβεια της ΠΕΕΑ για μεμονωμένα πλημμυρικά επεισόδια, ακριβώς για το λόγο των απρόβλεπτων τυχαίων διακυμάνσεων, είναι χαμηλή σε σχέση με την ακρίβεια της πρόβλεψης της εδαφικής απώλειας σε μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες. Για παράδειγμα, στην πιο λεπτομερή μελέτη πάνω στην ΠΕΕΑ που έχει γίνει ποτέ [Wischmeier, 1972], χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εδαφικής απώλειας από 189 μικρές λεκάνες που συνολικά αποτελούν ένα δείγμα 2300 ετών δεδομένων εδαφικής απώλειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για καθεμία από τις 189 μικρές λεκάνες η μέση απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και των υπολογισθεισών τιμών ήταν $0.31 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Αντίθετα, για το συνολικό δείγμα των 2300 τιμών η ΠΕΕΑ υπερεκτιμά την πραγματική εδαφική απώλεια με μέσον όρο $0.09 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

Ο υπολογισμός του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τη σωστή και αποτελεσματική χρήση της εξίσωσης. Τα αρχικά δεδομένα που οδήγησαν στην ανάπτυξη της εξίσωσης έδειξαν ότι διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές, η εδαφική απώλεια είναι ανάλογη σε ένα συντελεστή EI_{30} , όπου E είναι η κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης και I_{30} είναι η μέγιστη 30-λεπτη ένταση βροχόπτωσης σε κάθε καταιγίδα. Η κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης E [$\text{kg m}/(\text{m}^2 \text{ mm})$] συνδέεται με τη μέγιστη 30-λεπτη ένταση I_{30} [mm/h] με την Εξίσωση 8,

$$E = 1.213 + 0.89 \log_{10} I_{30} \quad (8)$$

Η τιμή του συντελεστή R είναι τότε το άθροισμα όλων των EI_{30} για όλες τις ισχυρές βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Βροχοπτώσεις με συνολικό ύψος βροχόπτωσης μικρότερο από 13 mm και με προηγούμενη μη βροχερή περίοδο 6 h δεν υπολογίζονται, εκτός αν 6 mm και πλέον βροχής πέσουν σε 15 min [Foster et al., 1981]. Είναι φανερό, ότι για την κατάρτιση των EI_{30} κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους απαιτείται η ύπαρξη δεδομένων από βροχογράφο με χρονική κλίμακα 30 min. Σε πολλές περιπτώσεις η πληροφορία αυτή δεν είναι διαθέσιμη, ακόμα και σε προηγμένες τεχνολογικά χώρες. Για την παράκαμψη αυτού του προβλήματος έχουν αναζητηθεί τεχνικές που συσχετίζουν το συντελεστή R με άλλες μεταβλητές που είναι πιο εύκολα μετρήσιμες και διαθέσιμες. Οι Schwertmann et al., 1990, ανέπτυξαν μια σχέση γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ του συντελεστή R και της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Άλλοι ερευνητές πρότειναν παρόμοιες τεχνικές όπως για παράδειγμα στο Βέλγιο [Bolline et al., 1979] με συσχέτιση του συντελεστή R με τη μέση ετήσια βροχόπτωση και στη Βαυαρία [Rogler and Schwertmann, 1981]. Στις ΗΠΑ, τα αντίστοιχα εγχειρίδια [π.χ. Wischmeier and Smith, 1978] προτείνουν τη χρήση της παρεμβολής με τη μέθοδο της αντίστροφης απόστασης μεταξύ των τιμών του συντελεστή R στις ισοδιαβρωτικές καμπύλες (isoerodent maps) που έχουν αναπτυχθεί για πολλές περιοχές των ΗΠΑ καθώς επίσης και με τη

χρήση γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ του συντελεστή R και του ύψους βροχόπτωσης w διάρκειας και περιόδου επαναφοράς 2 ετών. Στην Ελλάδα δυστυχώς δεν έχουν αναπτυχθεί τέτοιου είδους συσχετίσεις, δείγμα ίσως της συνολικής καθυστέρησης στην έρευνα της στερεοαπορροής στη χώρα.

Ο συντελεστής του μήκους κλιτύος (slope-length factor) (L) υπολογίζεται από τη σχέση 9:

$$L = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \quad (9)$$

όπου x , είναι το μήκος της κλιτύος σε οριζόντιο επίπεδο (m), και m εκθέτης, ο οποίος είναι ίσος με 0.5 αν η κλίση είναι $\geq 5\%$, 0.4 αν η κλίση είναι μεταξύ των 3 και 5%, 0.3 αν είναι μεταξύ 1 και 3% και 0.2 αν η κλίση είναι $\leq 1\%$.

Ο συντελεστής της κλίσης κλιτύος (slope-gradient factor) (S) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{0.43 + 0.3s + 0.043s^2}{6.413} \quad (10)$$

όπου s είναι η κλίση (%).

Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για να εκτιμηθεί κατά πόσο είναι δυνατή η αυτούσια μεταφορά της ΠΕΕΑ στις Ευρωπαϊκές συνθήκες. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των παραμέτρων της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (R) [Chisci and Zanchi, 1981; Richter, 1983] και της εδαφικής διαβρωσιμότητας (K) [Richter, 1980; DePloey, 1986; Schwertmann, 1986]. Δεδομένου ότι η ΠΕΕΑ στην αρχική της μορφή υπολογίζει μόνο μέσες ετήσιες τιμές της εδαφικής διάβρωσης, ακόμα και αν η μεταφορά στις Ευρωπαϊκές συνθήκες είναι επιτυχημένη, η πληροφορία που λαμβάνεται από την ΠΕΕΑ είναι ελάχιστη καθώς ενδιαφέρει περισσότερο η στερεοαπορροή κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων. Σε κάθε περίπτωση όμως η ΠΕΕΑ αφορά μόνο στην εδαφική διάβρωση και δεν είναι κατάλληλη να περιγράψει την ενδιάμεση απόθεση φερτών υλικών ή τη στερεομεταφορά σε συγκεντρωμένη απορροή σε υδατορεύματα. Άλλη σημαντική αδυναμία της ΠΕΕΑ είναι ότι υπολογίζει την εδαφική διάβρωση πολλαπλασιάζοντας εντελώς διαφορετικά μεγέθη, τα οποία εκφράζουν βροχόπτωση, εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τοπογραφικές κλίσεις, φυτοκάλυψη και πρακτικές ελέγχου της διάβρωσης ενώ στην πραγματικότητα η διάβρωση δεν μπορεί να προσεγγιστεί με τόσο απλουστευμένο τρόπο [Kirkby, 1980]. Τέλος, η ΠΕΕΑ έχει αναπτυχθεί με βάση δεδομένα μικρών εδαφικών εκτάσεων με σχετικά ομοιόμορφα τοπογραφικά, εδαφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και επομένως η εφαρμογή της σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας είναι προβληματική.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ΠΕΕΑ έχει ενσωματωθεί σε πολλά προγράμματα που κυκλοφορούν διεθνώς και μάλιστα βασισμένα σε ένα σύγχρονο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ). Για παράδειγμα, το μοντέλο SEAGIS v. 1.0 (Soil Erosion Assessment using GIS) που αναπτύχθηκε από την Danish Hydraulic Institute (DHI) είναι ένα τέτοιο πρόγραμμα που χρησιμοποιεί την εξίσωση αυτή. Το ΣΓΠ έχει την ικανότητα της άνετης πρόσβασης και εμφάνισης χωρικά κατατεταγμένων μεταβλητών, όπως των συντελεστών της ΠΕΕΑ. Ο υπολογισμός των συντελεστών απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο και είναι αξιόπιστος. Η εκτίμηση της στερεοαπορροής αποτελείται από δύο διαφορετικούς όρους: (α) από την τοπική εδαφική διάβρωση (source erosion), και (β) από τη μεταφερόμενη διάβρωση (transported

erosion), με άλλα λόγια την στερεοπαροχή μέσω του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί και εφαρμογή του ερευνητικού προγράμματος και περιγράφεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 6.

Αλλα εμπειρικά μοντέλα συσχετίζουν την στερεοαπορροή με τις κλιματικές συνθήκες και την τοπογραφία της λεκάνης απορροής [*Jansen and Painter, 1974*] καθώς και με τις χρήσεις γης [*Dunne, 1979*]. Οι ελληνικές προσεγγίσεις στο θέμα [*Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987*] αποτελούν κατά κύριο λόγο απλουστευμένες εκφράσεις της ΠΕΕΑ και μπορούν να εφαρμοστούν σε λεκάνες απορροής με λίγα μόνο δεδομένα εισόδου.

Τα εμπειρικά μοντέλα όπως φαίνεται αποτελούν και αυτά αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης. Η σταθερότητα των συντελεστών σε όλες τις χρονικές κλίμακες θεωρεί τη μονιμότητα των φυσικών διεργασιών, γεγονός, που όπως και στις καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής, δεν ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις. Σε περίπτωση αλλαγών στο σύστημα τα μοντέλα αυτά δεν είναι πλέον κατάλληλα και απαιτείται η εκ νέου συλλογή δεδομένων για τον επαναπροσδιορισμό των συντελεστών.

2.2.2 Προσδιοριστικά μοντέλα

Η ανάγκη να ξεπεραστούν οι αδυναμίες των εμπειρικών μοντέλων αλλά και της μαθηματικής φυσικής περιγραφής της στερεοαπορροής οδήγησε στην ανάπτυξη προσδιοριστικών μοντέλων προσομοίωσης της εδαφικής απώλειας και της στερεοαπορροής, τα οποία μπορεί να είναι είτε φυσικά θεμελιωμένα (physically based) [*Storm et al., 1987; Flanagan and Nearing, 1995; Wicks and Bathurst, 1996*] είτε εννοιολογικά (ή παραμετρικά) (conceptual) [*Singh, 1983; Hrissanthou, 1988*]. Οι παράμετροι των φυσικών μοντέλων έχουν φυσικό νόημα και μετρούνται στο πεδίο ή προσδιορίζονται προσεγγιστικά, ενώ οι αντίστοιχες των εννοιολογικών μοντέλων δεν είναι άμεσα μετρήσιμες και απαιτείται η διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού των παραμέτρων. Τα μοντέλα αυτά συχνά απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες για τη διαμόρφωση της λεκάνης απορροής που συχνά δεν είναι διαθέσιμες ή εισάγονται εμπειρικά. Η αναπόφευκτη εισαγωγή πολλών παραμέτρων στη σχηματοποίηση του μοντέλου δυσκολεύει την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού των παραμέτρων για τη βαθμονόμησή του ακόμα και όταν υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα. Τα μοντέλα αυτά δομούνται πάνω σε ήδη έτοιμα μοντέλα βροχής – απορροής, των οποίων οι αβεβαιότητες στην μετατροπή της βροχής σε απορροή καθώς και τα υπόλοιπα εγγενή σφάλματα λόγω της αδυναμίας της πλήρους κατανόησης των φυσικών διεργασιών, ιδιαίτερα σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας, μεταφέρονται και μεγεθύνονται στην εκτίμηση της στερεοαπορροής.

Τα γνωστότερα προσδιοριστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν διεθνώς στο διαδίκτυο είναι τα Water Erosion Prediction Method (WEPP) [*Flanagan and Nearing, 1995*], CREAMS [*Knisel, 1980*], KINEROS [*Woolhiser et al., 1990*], The Walnut Gulch Hydrologic Method (WGHM) [*Lane and Nichols, 1997*], ANSWERS [*Beasley and Huggins, 1991*], European Soil Erosion Model (EUROSEM) [*Morgan et al., 1998*] καθώς και το SHETRAN [*Wicks and Bathurst, 1996*]. Το τελευταίο αποτελεί ίσως το πιο αξιόπιστο, σύγχρονο αλλά και πολυσύνθετο μοντέλο εκτίμησης της στερεοαπορροής κυρίως γιατί βασίζεται στην υδρολογική πλατφόρμα του

πολύ γνωστού υδρολογικού μοντέλου Systeme Hydrologique Europeen (SHE) [Abbott et al., 1986a,b].

Στο μοντέλο SHETRAN οι φυσικές διεργασίες της διάβρωσης, της στερεομεταφοράς και της απόθεσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες συνιστώσες: (α) στις διεργασίες στις κλιτύες και (β) στις διεργασίες στα υδατορεύματα. Η αποκόλληση του εδαφικού υλικού γίνεται μέσω της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής ενώ η διόδευση των φερτών υλικών μέσω της επιφανειακής απορροής γίνεται με την προσεγγιστική επίλυση (μέθοδος πεπερασμένων διαφορών) των δι-διάστατων μερικών διαφορικών εξισώσεων της διατήρησης της μάζας των φερτών υλικών. Η διόδευση των φερτών υλικών γίνεται ουσιαστικά μέσω της σύγκρισης της στερεομεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής απορροής και των διαθέσιμων φερτών υλικών. Η στερεομεταφορά στα κύρια υδατορεύματα γίνεται με την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε μια διάσταση ενώ επίσης συγκρίνεται η στερεοπαροχή με τη μέγιστη στερεομεταφορική ικανότητα του υδατορεύματος επιλέγοντας μια χαρακτηριστική εξίσωση (π.χ. Ackers-White ή Engelund and Hansen)

Στα μειονεκτήματα του SHETRAN συγκαταλέγονται η εμπειρική εισαγωγή αρκετών παραμέτρων που αφορούν στη διαβρωσιμότητα του εδάφους αλλά και η εμπειρική μορφή των εξισώσεων της στερεομεταφορικής ικανότητας ενώ επίσης ουσιαστικά αγνοείται ο διαχωρισμός της επιφανειακής διάβρωσης από την διάβρωση ρυακίων μέσα στην επιφάνεια προσομοίωσης.

Το Water Erosion Prediction Project (WEPP) υπολογίζει την εδαφική διάβρωση στις κλιτύες και τη στεροαπορροή στις βάσεις των κλιτύων σε συνεχή χρόνο και δεν διαθέτει υπολογιστικές διαδικασίες για τη στερεομεταφορά στα υδατορεύματα. Όπως στο SHETRAN, οι επιφανειακές διαδικασίες διαχωρίζονται στην επιφανειακή απορροή πολύ μεγάλου πλάτους και μικρού ύψους (sheet flow) και στη συγκεντρωμένη απορροή στα ρυάκια (rill flow). Η επιφανειακή διάβρωση διακρίνεται στη διάβρωση λόγω της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής. Το ποσοστό των φερτών υλικών που τελικά κατευθύνονται στα ρυάκια είναι ανάλογο του γινομένου της έντασης της βροχόπτωσης και του ύψους της επιφανειακής απορροής. Η διάβρωση στα ρυάκια περιγράφεται μαθηματικά ως συνάρτηση της ικανότητας της ροής να αποκολλάει φερτά υλικά από τα ρυάκια, τη στερεομεταφορική ικανότητα της ροής και το υπάρχον φορτίο φερτών υλικών από την επιφανειακή διάβρωση. Η στερεομεταφορική ικανότητα της ροής υπολογίζεται από μια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης του *Yalin* [1963].

Το WEPP μπορεί να υπολογίσει τις χρονικές και χωρικές μεταβολές της στερεοαπορροής σε διάφορα χρονικά βήματα, αφού διαθέτει και μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης της βροχόπτωσης καθώς και μοντέλο επιμερισμού του ημερήσιου ύψους βροχόπτωσης. Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει τη στερεοαπορροή σε μικρές κλιτύες (μήκους έως 100 m) και επομένως η σχηματοποίηση μιας σύνθετης λεκάνης απορροής γίνεται μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία. Επίσης, επειδή το μοντέλο αυτό λειτουργεί σε συνεχή χρόνο απαιτεί πληθώρα δεδομένων (όπως η εδαφική υγρασία πριν από την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου), τα οποία κατά κανόνα δεν είναι διαθέσιμα. Ένα άλλο μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι το γεγονός ότι η διόδευση της πλημμυρικής απορροής γίνεται με την απλή κινηματική μέθοδο και την ισοδύναμη παραδοχή της ομοιόμορφης ροής, η οποία δεν ισχύει κυρίως σε λεκάνες απορροής με μεσογειακά χαρακτηριστικά. Σε αυτές τις λεκάνες οι πλημμυρικές απορροές ιδιαίτερα μεγάλης έντασης αποκλίνουν σημαντικά από την παραδοχή της κινηματικής μεθόδου διόδευσης της απορροής.

Το EUROSEM αποτελεί κατά κάποιο τρόπο την ευρωπαϊκή απάντηση στο WEPP. Το EUROSEM αποτελεί ένα καταναμημένο μοντέλο σε βάση πλημμυρικού γεγονότος. Το μοντέλο αυτό βασίζεται πάνω στην υδρολογική πλατφόρμα του μοντέλου KINEROS της USDA [Woolhiser et al., 1990]. Το KINEROS επιλύει αριθμητικά την εξίσωση της διατήρησης της μάζας στο μοναδιαίο όγκο με την υπόθεση του κινηματικού πλημμυρικού κύματος (kinematic wave assumption method). Το συνδυασμένο μοντέλο προσομοιώνει την εδαφική διάβρωση από την επίδραση της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής σε μικρές λεκάνες απορροής σε χρονικό βήμα 1 min. Ως ένα χωρικά καταναμημένο μοντέλο, το EUROSEM χωρίζει μια λεκάνη απορροής σε μικρότερα ομοιογενή τμήματα ως προς την τοπογραφία, την εδαφική σύσταση ή τη φυτοκάλυψη. Το μοντέλο επομένως υπολογίζει την απορροή και το φορτίο των φερτών υλικών που παράγονται σε ένα τμήμα και μετά γίνεται η υδρολογική διόδυσή τους κατάντη.

2.2.3 Στοχαστικά μοντέλα

Σε αρκετές περιπτώσεις και κυρίως σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας, είναι εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστούν τα προσδιοριστικά μοντέλα γιατί (α) ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται για να περιγραφεί λεπτομερώς η λεκάνη απορροής είναι τέτοιος που κάνει τη συλλογή τους μια πολυέξοδη, κοπιαστική και αμφίβολης αποτελεσματικότητας διαδικασία, και (β) σε εκτεταμένες λεκάνες απορροής επιδρούν και άλλες φυσικές τυχαίες διεργασίες οι οποίες δεν περιγράφονται μαθηματικά στα προσδιοριστικά μοντέλα. Το μειονέκτημα αυτό των προσδιοριστικών μοντέλων μαζί με την έλλειψη δεδομένων στερεοπαροχής μικρού χρονικού βήματος (π.χ. ωριαία ή ημερήσια) και για μεγάλες περιόδους οδήγησε στην ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά συνίστανται στη στοχαστική προσομοίωση της στερεοπαροχής με τη δημιουργία συνθετικών σειρών στερεοπαροχής βασισμένων σε ένα αρχικό δείγμα συνεχών μετρήσεων στερεοπαροχής (π.χ. σε ημερήσια βάση). Τα περισσότερα στοχαστικά μοντέλα κάνουν χρήση ανάλυσης χρονοσειρών (time series analysis) ή μοντέλων συνάρτησης μεταφοράς (transfer function models) [Rodriguez-Iturbe and Nordin, 1968; Woolhizer and Todorovic, 1971; Sharma and Dickinson, 1980; Woolhiser and Renard, 1980; Van Sieckle, 1982; Lemke, 1991]. Τα αρχικά στοχαστικά μοντέλα ουσιαστικά περιορίζονταν στη δημιουργία συνθετικών βροχοπτώσεων με εποχιακά κυμαινόμενες παραμέτρους και εισαγωγή τους σε ντετερμινιστικό μοντέλο βροχής - απορροής - στερεοαπορροής [Singh and Krstanovic, 1987] ή στη δημιουργία συνθετικών πλημμυρικών παροχών σε εφήμερα υδατορεύματα και τη χρήση ενός απλού εμπειρικού μοντέλου (π.χ. καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής) [π.χ. Lane and Renard, 1972]. Οι Shen and Kikkawa [1980] περιγράφουν αναλυτικά τα πρώιμα στοχαστικά μοντέλα που ως αντικειμενικό σκοπό έχουν την ανάπτυξη συναρτήσεων κατανομής της στερεοαπορροής λόγω ανεπαρκών δεδομένων.

Το στοχαστικό μέρος στα μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών συνίσταται στην εισαγωγή θορύβου ανεξάρτητου από τις εισαγόμενες μεταβλητές κυρίως με τη μορφή ενός ολοκληρωμένου μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης - κυλιόμενων μέσων όρων ARIMA(p,d,q) σε μια ντετερμινιστική μορφή της απορροής και της στερεοπαροχής.

Τα μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς [Lemke, 1991] πλεονεκτούν στο γεγονός ότι ως δυναμικά μοντέλα προσαρμόζονται καλύτερα σε μη μόνιμα συστήματα (π.χ. λεκάνη απορροής) κυρίως επειδή επιτρέπουν καθυστερήσεις μεταξύ των εισαγομένων στο σύστημα και της απόκρισης. Με βάση αυτήν την ιδιότητα τα μοντέλα συνάρτησης μεταφοράς προσδιορίζουν την επίδραση

χρονικά προηγούμενων συνθηκών της λεκάνης απορροής στις τιμές των στερεοπαροχών, λόγω του ότι οι παράμετροι μπορούν να συσχετιστούν με την έκταση της λεκάνης απορροής, τις χρήσεις γης και άλλα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά αποκτώντας έτσι πιο ρεαλιστική βάση.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της στοχαστικής προσομοίωσης είναι η δημιουργία συνθετικών σειρών στερεοαπορροής βασισμένων σε στατιστικές παραμέτρους από μικρό ιστορικό δείγμα μετρήσεων και επομένως ο επακόλουθος προσδιορισμός της συνάρτησης κατανομής των στερεοπαροχών. Ο προσδιορισμός της συνάρτησης κατανομής προσφέρει στον ερευνητή το σημαντικό πλεονέκτημα του πιθανοτικού υπολογισμού διαφόρων μεγεθών με σημαντική περίοδο επαναφοράς (πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος του παρατηρημένου δείγματος). Για παράδειγμα μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος της στερεοαπορροής με περίοδο επαναφοράς T ετών, ή αντίστοιχα η πιθανότητα της πραγματοποίησης στερεοαπορροής μεγαλύτερης κάποιου συγκεκριμένου μεγέθους. Η γνώση της συνάρτησης κατανομής της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής μπορεί να είναι σημαντική, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις εκείνες που απαιτείται μια πιο λεπτομερής προσέγγιση στον υπολογισμό του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα. Σε πολλές περιπτώσεις ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα ως βέλτιστη τιμή τίθεται ίσος με την αναμενόμενη στερεοαπορροή για όλη τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του. Η αναμενόμενη τιμή σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι και η καλύτερη λύση ταυτόχρονα. Σε μεγάλους ταμιευτήρες με μεγάλο χρονικό ορίζοντα η ακριβής μορφή της συνάρτησης κατανομής των ετήσιων στερεοαπορροών δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω του γεγονότος ότι το άθροισμα των ετήσιων στερεοαπορροών ακολουθεί κατά προσέγγιση κανονική κατανομή, βάσει του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος. Για μικρότερες κατασκευές με μικρότερο χρονικό ορίζοντα (π.χ. αντιπλημμυρικά φράγματα) η προηγούμενη υπόθεση δεν ισχύει και επομένως η ακριβής γνώση της συνάρτησης κατανομής των στερεοαπορροών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Για στερεοαπορροές μικρότερου χρονικού βήματος (π.χ. μηνιαίες) η γνώση της συνάρτησης κατανομής σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη.

Για την ανάπτυξη των στοχαστικών μοντέλων είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αξιόπιστου και χρονικά εκτεταμένου ιστορικού δείγματος στερεοπαροχών. Οι μετρήσεις αυτές, οι οποίες πρέπει να είναι συνεχείς και σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. ημερήσιες), είναι προς το παρόν σπάνιες ακόμα και σε εξελιγμένες τεχνολογικά χώρες ενώ συνήθως απουσιάζουν στην Ελλάδα. Νέες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ώστε να αντικατασταθούν οι άμεσες μετρήσεις στερεοπαροχής με έμμεσες εκτιμήσεις από βοηθητικές μεταβλητές όπως για παράδειγμα η θολότητα [π.χ. *Gippel*, 1995; *Lewis*, 1996]. Για να υπάρχουν όμως αξιόπιστες εκτιμήσεις του αιωρούμενου φορτίου θα πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης της θολότητας σε τακτά χρονικά διαστήματα (τουλάχιστον μία φορά ανά δύο εβδομάδες) και σε διαφορετικές παροχές (κατά προτίμηση πλημμυρικές) με ταυτόχρονη εκτέλεση μέτρησης της στερεοπαροχής φερτών σε αιώρηση.

2.2.4 Πειραματικές διατάξεις

Η χρήση πειραματικών λεκανών (experimental basins) για την κατανόηση και προσομοίωση των φυσικών μηχανισμών της εδαφικής απώλειας και της στερεοαπορροής είναι μια αρκετά χρήσιμη διαδικασία στη μικροκλίμακα [*Lane et al.*, 1997]. Στις λεκάνες αυτές μπορεί κανείς με σχετική ευκολία να διαθέτει δεδομένα για όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της στερεοαπορροής. Οι πιο γνωστές και σημαντικές πειραματικές διατάξεις είναι εκείνες της λεκάνης απορροής του Walnut Gulch στην Αριζόνα των ΗΠΑ έκτασης 149 km^2 που λειτουργεί

με ευθύνη του United States Department of Agriculture (USDA) καθώς και του Iowa State University επίσης στις ΗΠΑ.

Η λεκάνη απορροής του Walnut Gulch χωρίζεται σε 15 επιμέρους λεκάνες απορροής με επιφάνειες που κυμαίνονται από 0.00018 km² έως 95.1 km². Η μέση ετήσια απορροή της συνολικής λεκάνης απορροής είναι 4.7 mm, η μέση ετήσια στερεοαπορροή είναι 162 t/km² ενώ η ογκομετρική συγκέντρωση των αιωρούμενων φερτών υλικών είναι ίση με 3.5%.

Παράλληλα, το Iowa State University καταγράφει τις στερεοπαροχές στις εξόδους δύο λεκανών απορροής επιφάνειας 5.1 ha και 6.4 ha αντίστοιχα. Το κύριο χαρακτηριστικό των δεδομένων που προέρχονται από τις δύο αυτές λεκάνες είναι ότι το χρονικό βήμα των δεδομένων της έντασης της βροχόπτωσης, της απορροής και της στερεοπαροχής είναι 1 min. Περισσότερες πληροφορίες για τις πειραματικές αυτές λεκάνες μπορεί κανείς να αναζητήσει στους *Hamlett et al.*, [1984].

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων σε τέτοιες λεκάνες απορροής είναι ότι η στερεοαπορροή κυρίως εξαρτάται από το ύψος και την ένταση της βροχόπτωσης, τη φυτοκάλυψη και την τοπογραφία καθώς και από τις χωρικές τους μεταβολές. Η αυτούσια μεταφορά των συμπερασμάτων σε λεκάνες απορροής με πολύ μεγαλύτερη έκταση και με διαφορετικά κλιματικά και φυσικά χαρακτηριστικά αποτελεί μια εξαιρετικά αμφίβολη προσέγγιση.

2.2.5 Μετρήσεις συνολικού όγκου και μάζας αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες

Ακόμα και στην υποθετική περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα για την εκτίμηση της στερεοαπορροής, δεν είναι δυνατό να ξεπερνούν σε διάρκεια τις δύο δεκαετίες ακόμα και σε τεχνολογικά προηγμένες χώρες. Όμως σε αρκετές περιπτώσεις ενδιαφέρει η εξέλιξη της στερεοαπορροής σε χρονικό διάστημα πολύ μεγαλύτερο από όσο επιτρέπουν οι διαθέσιμες μετρήσεις, ώστε να κατανοηθεί με κάθε λεπτομέρεια η χρονική εξέλιξη της στερεοαπορροής σε πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα. Παρόλο που όσο ο χρόνος περνάει, τα δεδομένα αυξάνονται, πιθανόν να μην παρατηρηθούν πάλι κάποια γεγονότα τα οποία επηρέασαν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη στερεοαπορροή στο παρελθόν (π.χ. δραστική αλλαγή στις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής). Οι τελευταίες εντυπωσιακές εξελίξεις στον τομέα της υδρογραφίας και της υποθαλάσσιας γεωλογίας επιτρέπουν σε σημαντικό βαθμό τη μελέτη των φερτών υλικών που έχουν αποθεθεί στους ταμιευτήρες ώστε να προσδιοριστεί μια όσο το δυνατό ρεαλιστικότερη εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της στερεοαπορροής. Οι ταμιευτήρες αποτελούν μια κατάλληλη πειραματική διάταξη αφού αποθηκεύουν σε μεγάλο βαθμό τις στερεοπαροχές της ανάντη λεκάνης απορροής [*Oldfield*, 1977; *Garcia and Vignoli*, 1988; *Duck and McManus*, 1994; *Labadz et al.*, 1995; *Rowan et al.*, 1995; *White et al.*, 1997; *EKΘΕ*, 1997].

Η εκτίμηση του συνολικού όγκου των φερτών υλικών προέρχεται από την υδρογραφική αποτύπωση του πυθμένα του ταμιευτήρα και τη σύγκρισή του με τον αρχικό πυθμένα (πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα) ή με την προηγούμενη υδρογραφική αποτύπωση. Οι μέθοδοι της υδρογραφικής αποτύπωσης περιγράφονται συνοπτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Η πυκνότητα των αποθέσεων των φερτών υλικών χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του συνολικού όγκου που προκύπτει από την υδρογραφική αποτύπωση σε ισοδύναμη μάζα. Η πυκνότητα των αποθέσεων κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών και εξαρτάται από το μέγεθος των φερτών υλών, την

ηλικία των αποθέσεων, την ορυκτολογική τους σύσταση και τον τρόπο λειτουργίας του ταμιευτήρα. Οι μετρήσεις πυκνότητας μπορούν να γίνουν με τη λήψη δειγμάτων των αποθέσεων (πυρηνοληψία) από τις χονδρόκοκκες αποθέσεις (εκβολές ποταμών) αλλά και από τις λεπτόκοκκες αποθέσεις (στο εσωτερικό τμήμα του ταμιευτήρα). Δεδομένα από ταμιευτήρες στην Ινδία δείχνουν ότι η πυκνότητα των αποθέσεων κυμαίνεται από 0.46 t/m^3 έως 1.8 t/m^3 [Lawrence, 1996].

Οι κυριότερες προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στην εκτίμηση της στερεοαπορροής είναι οι εξής: (α) Ο ταμιευτήρας πρέπει να έχει μεγάλη ικανότητα κατακράτησης που να προσεγγίζει το 100% (δηλαδή το ποσοστό των φερτών που αποτίθενται στον ταμιευτήρα και παραμένουν σε αυτό σε σχέση με τη συνολική εισρέουσα μάζα φερτών στον ταμιευτήρα). Αυτό σημαίνει ότι η έκταση του ταμιευτήρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μην διαφεύγουν φερτά υλικά είτε από την υδροληψία, είτε από τον υπερχειλιστή του φράγματος, τα οποία δεν μπορούν να μετρηθούν. (β) Πρέπει να είναι διαθέσιμες τεχνικές για τη χρονολόγηση των δειγμάτων των φερτών υλικών (πυρήνες) που λαμβάνονται από τα στρώματα των αποθέσεων. (γ) Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι δυνατή η συσχέτιση των δειγμάτων που λαμβάνονται σε διάφορες θέσεις σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα ώστε να μπορεί να γίνει εκτίμηση των σύγχρονων στρωμάτων των αποθέσεων, και (δ) πρέπει να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των αυτόχθονων αποθέσεων του ταμιευτήρα, δηλαδή των αποθέσεων που προέρχονται από τη διάβρωση των οχθών ή της βιολογικής παραγωγής για παράδειγμα, και των αλλόχθονων αποθέσεων που προέρχονται από τη διάβρωση της ανάντη λεκάνης απορροής.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα στο διεθνή χώρο που μέσω αυτής της προσέγγισης έχει γίνει δυνατή η δημιουργία της χρονοσειράς της ετήσιας στερεοαπορροής [Walling, 1988, Rowan *et al.*, 1995]. Στον Ελληνικό χώρο, εκτός από το παρόν ερευνητικό έργο, έχει εκπονηθεί παρόμοιο ερευνητικό έργο από το ΕΚΘΕ [1996] στον ταμιευτήρα του Πολύφυτου στον Αλιάκμονα για την ποιοτική ανάλυση των φερτών υλικών που εισρέουν στον ταμιευτήρα. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι κοντά στις εκβολές του Αλιάκμονα στον ταμιευτήρα που ονομάζεται ως «προδελταϊκή πλατφόρμα» (περιοχή I) παρατηρήθηκαν αποθέσεις με όγκο που κυμαίνεται από 4 έως 6 hm^3 και πάχη μεταξύ 2 και 4 m. Στην περιοχή του ταμιευτήρα μεταξύ της Περιοχής I και του φράγματος (περιοχή II) παρατηρήθηκαν αποθέσεις με όγκο που κυμαίνεται από 5 έως 6 hm^3 και πάχη μεταξύ 0.2 και 0.94 m αν και παρατηρήθηκαν και περιοχές με πάχη αποθέσεων από 1 έως 2.5 m. Ο ρυθμός απόθεσης φερτών υλικών ανά περιοχή και ανά έτος προκύπτει απλά από το πηλίκο του συνολικού όγκου προς τα έτη λειτουργίας του ταμιευτήρα και δεν λήφθηκαν δείγματα των αποθέσεων για να εξακριβωθεί η χρονική τους διακύμανση.

2.3 Επίδραση της χωρικής κλίμακας στη στερεοαπορροή

Ένα σημαντικό στοιχείο στην εκτίμηση της στερεοαπορροής είναι η ανάλυση της επίδρασης της κλίμακας της λεκάνης απορροής στην στερεοαπορροή. Το ερώτημα είναι αν η επιφάνεια της λεκάνης απορροής είναι κρίσιμο μέγεθος στην εκτίμηση της στερεοαπορροής και σε καταφατική απάντηση σε ποιο βαθμό και ποια είναι η μαθηματική έκφρασή της. Με το ερώτημα αυτό έχουν ασχοληθεί αρκετοί ερευνητές καθώς η ανάγκη για μια απλή αλλά και αξιόπιστη εκτίμηση της στερεοαπορροής παραμένει το ίδιο επιτακτική.

Οι *Parker and Osterkamp* [1995] συνέθεσαν πρόσφατα τις μέσες ετήσιες στερεοπαροχές φερτών υλικών σε αιώρηση από 24 ποτάμια στις ΗΠΑ, των οποίων οι λεκάνες απορροής κυμαίνονται από $1.6 \cdot 10^3$ έως $1.8 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Οι μέσες ετήσιες στερεοαπορροές αιωρούμενων φερτών υλικών κυμαίνονται από 5 έως 1480 t/km^2 . Αναλύσεις γραμμικής και μη-γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μέσων ετήσιων στερεοαπορροών και της έκτασης των αντίστοιχων λεκανών απορροής δεν έδειξαν κάποια στατιστικώς σημαντική συσχέτιση. Παλαιότερα, οι *Dendy and Bolton* [1976] χρησιμοποίησαν δεδομένα από αποθέσεις φερτών υλικών σε ταμιευτήρες στις ΗΠΑ για να εξετάσουν πιθανές σχέσεις μεταξύ της στερεοαπορροής και της επιφάνειας των λεκανών απορροής από 800 λεκάνες κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια των ΗΠΑ. Οι λεκάνες απορροής κυμαίνονται από 2.9 έως $7.1 \cdot 10^4 \text{ km}^2$, η μέση ετήσια απορροή κυμαίνεται από 21 έως 330 mm και η μέση ετήσια στερεοαπορροή από 56 έως 695 t/km^2 . Από την ανάλυση αυτή προέκυψε μια σχετικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της μέσης ετήσιας απορροής (S_Y σε $\text{t/km}^2/\text{yr}$) και της έκτασης της λεκάνης απορροής (A σε km^2), όπως φαίνεται στην Εξίσωση 11

$$S_Y = 674A^{-0.16} \quad (11)$$

με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.68$. Σχεδόν η ίδια συσχέτιση παρατηρήθηκε από τον *Wasson* [1994], ο οποίος μελέτησε τα αντίστοιχα δεδομένα από 275 λεκάνες στην Αυστραλία. Αντίθετα, από την ανάλυση της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης φερτών υλικών (C_b %) στις 14 υπολεκάνες απορροής στο Walnut Gulch σε σχέση με την επιφάνεια απορροής προέκυψε η σχέση $C_b = 1.16 A^{0.16}$ με πολύ μικρό συντελεστή προσδιορισμού ($R^2 = 0.35$), γεγονός που δεν δείχνει κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση [*Lane et al.*, 1998]. Σε κάθε περίπτωση όμως, η έκταση της λεκάνης απορροής είναι μόνο μία από τις παραμέτρους που επιδρούν στην στερεοαπορροή (π.χ. γεωλογία, υδρολογία, εδάφη, βλάστηση, χρήσεις γης, χαρακτηριστικά απορροής, λειτουργία ποταμών) και δεν θα πρέπει να λαμβάνεται ως μοναδική παράμετρος στην ποσοτική εκτίμηση της στερεοαπορροής.

Αντίστοιχα και ο συντελεστής στερεοαπορροής μπορεί να μεταβληθεί με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Σε λεκάνες απορροής που η καθαρή διάβρωση είναι σημαντική (δηλαδή όταν ο ρυθμός αποκόλλησης του εδαφικού υλικού είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό απόθεσής του), ο συντελεστής στερεοαπορροής αυξάνεται με την αύξηση της επιφάνειας. Αντίστοιχα σε λεκάνες απορροής που η καθαρή διάβρωση είναι μικρή, ο συντελεστής στερεοαπορροής αναμένεται να μειώνεται με την αύξηση της επιφάνειας της λεκάνης. Είναι αναμενόμενο ότι σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας θα υπάρχουν εκτεταμένες περιοχές που η καθαρή διάβρωση θα είναι είτε μεγάλη (π.χ. σημαντικές τοπογραφικές κλίσεις), είτε μικρή (π.χ. πεδιάδες). Εξαρτάται επομένως σε ποιο τμήμα της λεκάνης απορροής επικεντρώνεται κανείς. Σε κάθε περίπτωση όμως, η έννοια του συντελεστή στερεοαπορροής αφορά σε λεκάνες απορροής της τάξης έως 10^4 km^2 και σε σημεία ενδιαφέροντος που από τη φύση τους προκαλούν αποθέσεις (π.χ. ταμιευτήρες, εκβολές ποταμών). Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής στερεοαπορροής αναμένεται να μειώνεται με την αύξηση της επιφάνειας της λεκάνης και κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 1.0 [*Vanoni*, 1977; *Lane et al.*, 1997]. Ο *Williams* [1975] αναφέρει την παρακάτω εξίσωση για τον συντελεστή στερεοαπορροής D :

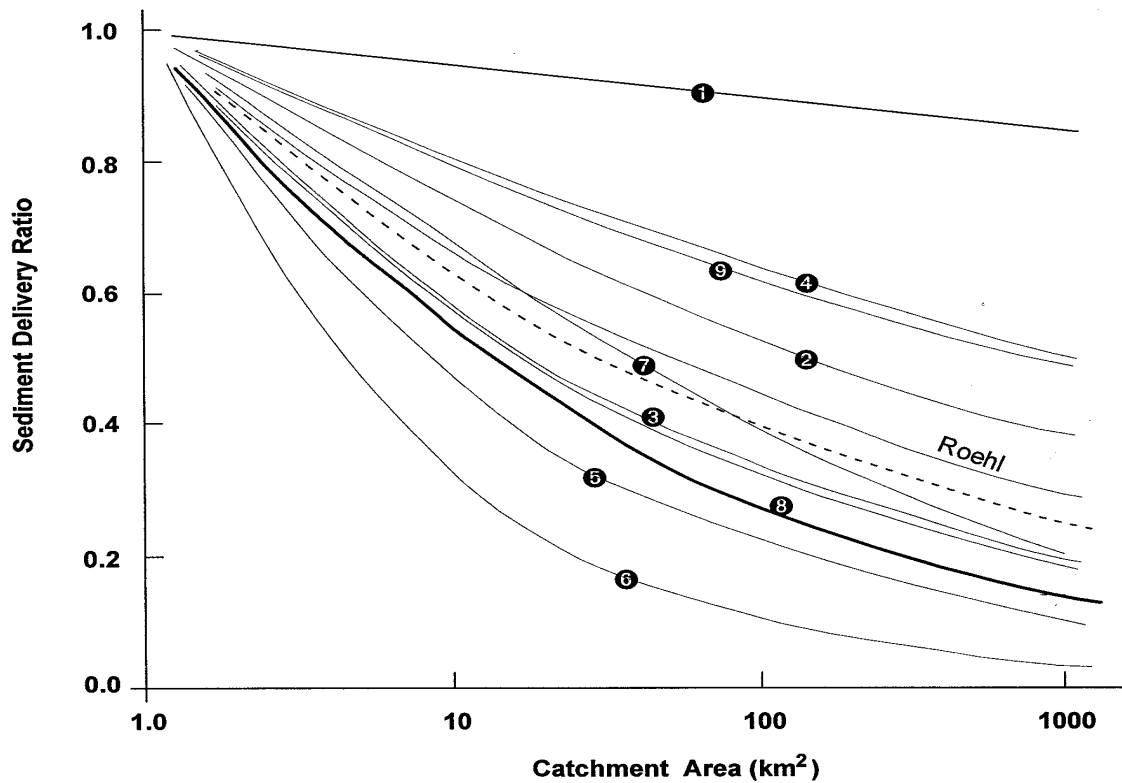
$$D = \exp(-bt(d_{50})^{1/2}) \quad (12)$$

όπου, b παράμετρος, t ο χρόνος ροής μεταξύ δύο διατομών ενός υδατορεύματος και d_{50} η μέση διάμετρος των φερτών υλικών.

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή στερεοαπορροής σε σχέση με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής με δεδομένα από διάφορες λεκάνες της υδρογείου [Lawrence, 1996]. Είναι εμφανής η πτωτική τάση του συντελεστή στερεοαπορροής με την αύξηση της επιφάνειας. Με την εστιγμένη γραμμή παρουσιάζεται η μέση τιμή όλων των καμπυλών και εκφράζεται μαθηματικά με την εξίσωση $D = A^{-0.2}$. Οι διακυμάνσεις όμως μεταξύ των λεκανών απορροής είναι τόσο μεγάλες που δεν επιτρέπουν την εφαρμογή της σχέσης αυτής σε άλλες περιοχές της γης χωρίς αντίστοιχα δεδομένα. Παρόμοια εξίσωση αναπτύχθηκε από τον Renfro [1972], η οποία έχει τη μορφή

$$\log D = 1.877 - 0.1419 \cdot \log(25.9A) \quad (13)$$

όπου, A , η επιφάνεια της λεκάνης απορροής σε km^2 . Αναλυτική παρουσίαση των αρχικών εμπειρικών μεθόδων εκτίμησης της στερεοαπορροής παρουσιάζεται από τον Novotny [1980].



Σχήμα 4: Μεταβολή του συντελεστή στερεοαπορροής σε σχέση με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής για διάφορες λεκάνες παγκοσμίως.

Παρόμοιες σχέσεις μεταξύ του συντελεστή στερεοαπορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής έχουν αναπτυχθεί από τον Roehl [1972]. Αυτές οι σχέσεις που βασίζονται αποκλειστικά στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής ισχύουν μόνο για μακροπρόθεσμες προβλέψεις ενώ η ακρίβεια του υπολογισμού του συντελεστή στερεοαπορροής για ένα συγκεκριμένο πλημμυρικό γεγονός (φορτίο απόπλυσης) είναι σχεδόν μηδενική.

2.4 Φυσικές διεργασίες σε λεκάνες απορροής μεγάλης επιφάνειας

Η εκτίμηση και η μαθηματική προσομοίωση της στερεοαπορροής για λεκάνες απορροής πολύ μεγάλης έκτασης (όπως της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών έκτασης 3570 km²) δεν αντιμετωπίζονται επαρκώς στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Όλες οι προσεγγίσεις που έχουν διενεργηθεί μέχρι τώρα και περιγράφονται αναλυτικά στην Παράγραφο 2.1 αφορούν σε πολύ μικρές λεκάνες απορροής (από μερικά εκτάρια μέχρι λίγα τετραγωνικά χιλιόμετρα) και η επέκταση των συμπερασμάτων τους σε λεκάνες απορροής μεγαλύτερης έκτασης είναι μια εξαιρετικά αμφίβολη διαδικασία. Επιπλέον τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν σε γενικό βαθμό μόνο την επιφανειακή διάβρωση και τη διάβρωση ρυακιών ενώ σε μεγαλύτερες λεκάνες απορροής υπεισέρχονται επιπλέον φυσικές διεργασίες, όπως κατολισθήσεις, απόθεση φερτών υλικών στις πλημμυρικές κοίτες ποταμών (floodplains), διάβρωση όχθων και άλλες [Walling, 1999], οι οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να περιγραφούν μαθηματικά και να προβλεφθούν. Επίσης, επειδή όλα τα μοντέλα στερεοαπορροής είναι βασισμένα σε μοντέλα βροχής – απορροής, οι αβεβαιότητες αυτών των μοντέλων μεταφέρονται μεγεθυμένα στα αποτελέσματα των μοντέλων στερεοαπορροής. Σε μια σχετικά πρόσφατη δημοσίευση, οι Goodrich and Woolhiser [1991] αναφέρουν ότι σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας οι υδρολόγοι αδυνατούν να κατανοήσουν και να περιγράψουν μαθηματικά τις πολυσύνθετες διεργασίες. Επομένως σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας πιθανόν να μην απαιτείται μια πολύ λεπτομερειακή προσέγγιση της στερεοαπορροής αλλά απλούστερα στη δομή τους μοντέλα. Αυτό προέρχεται από την υπόθεση ότι η εμπειρική εισαγωγή παραμέτρων σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας είναι αναπόφευκτο να εισάγει σφάλματα, τα οποία μπορεί να μην είναι λιγότερα από τα αντίστοιχα μιας απλής και ολιστικής προσέγγισης. Για παράδειγμα, οι Michaud and Sorooshian [1994] εφάρμοσαν τρία μοντέλα βροχής – απορροής στη λεκάνη απορροής του Walnut Gulch. Τα μοντέλα αυτά ήταν (α) ένα χωρικά κατανεμημένο με υδρολογική διόδευση με την κινηματική μέθοδο (KINEROS), (β) μια απλή, χωρικά κατανεμημένη έκδοση της μεθόδου SCS, και (γ) το απλό μοντέλο SCS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δύο πρώτα μοντέλα είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (παρόλο που το KINEROS είναι ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο) ενώ επίσης το KINEROS έδινε καλύτερα αποτελέσματα χωρίς να προηγηθεί βαθμονόμηση των παραμέτρων του.

Σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας η πλειονότητα του υδρογραφικού δικτύου (εκτός από τα κύρια υδατορεύματα με συνεχή βασική απορροή (perennial streams)) είναι υδατορεύματα με εφήμερη (ephemeral streams) ή διακοπτόμενη (intermittent streams) ροή και των οποίων η κοίτη τους αποτελείται από γενικά χονδρόκοκκα υλικά. Η διαθεσιμότητα φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής είναι γενικά απεριόριστη ειδικά όταν το επιτρέπουν οι γεωλογικές συνθήκες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι δυνατό να συσχετίζεται πολύ ικανοποιητικά η στερεοπαροχή με την απορροή και η θεωρία της στερεομεταφορικής ικανότητας της ροής να είναι αρκετή για την μαθηματική περιγραφή της στερεομεταφοράς σε αιώρηση και σε σύρση [Renard and Laursen, 1975]. Για παράδειγμα, στη λεκάνη του Walnut Gulch συγκεντρώθηκαν 76 δείγματα αιωρούμενων φερτών υλικών κατά τη διάρκεια επτά πλημμυρικών επεισοδίων το 1964 και ενός το 1996. Η σχέση που συνδέει τη στερεοαπορροή S_Y (t/km²) για κάθε ταυτόχρονη μέτρηση της απορροής Q (mm) δίνεται από την Εξίσωση 14 [Lane et al., 1997]

$$S_Y = 22.11Q^{1.07} \quad (14)$$

με συντελεστή προσδιορισμού που προσεγγίζει τη μονάδα ($R^2 = 0.99$). Ένας σημαντικός λόγος για αυτήν την πολύ καλή συσχέτιση είναι ότι η καμπύλη προσαρμόζεται στο πιο μεγάλο ζεύγος του δείγματος (στερεοαπορροή 104.64 t/km^2) ενώ η αμέσως μικρότερη είναι ίση με 45.57 t/km^2 . Σε κάθε περίπτωση όμως είναι εμφανής μια ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ απορροής και στερεοαπορροής.

Οι κύριες φυσικές διεργασίες που επιδρούν στην στερεοαπορροή σε λεκάνες απορροές μεγάλης κλίμακας, εκτός από την απορροή που εξετάστηκε παραπάνω είναι το ύψος και η ένταση της βροχόπτωσης καθώς και η χωρική της κατανομή στη λεκάνη απορροής, οι ιδιότητες των υδατορευμάτων του υδρογραφικού δικτύου καθώς και η στερεομεταφορική ικανότητα των υδατορευμάτων αυτών. Φυσικά και οι άλλες παράμετροι (π.χ. φυτοκάλυψη, επιφανειακή διάβρωση) επιδρούν στην στερεοαπορροή αλλά οι επιδράσεις τους καλύπτονται από τις προαναφερόμενες παραμέτρους. Είναι αρκετά πιθανό ότι η στερεοαπορροή επηρεάζεται πολύ πιο έντονα από τις διεργασίες στις κλιτύς και στα ρυάκια όταν η κλίμακα της λεκάνης απορροής μειώνεται.

Σε μεγάλες λεκάνες απορροής είναι πιθανό η στερεοαπορροή να διατηρεί κάποια μνήμη από προηγούμενα πλημμυρικά επεισόδια. Αρκετές έρευνες [π.χ., *Gregory and Walling, 1973; Walling, 1983*] έδειξαν ότι η εμμονή στις στερεοπαροχές των υδατορευμάτων οφείλεται στο γεγονός ότι οι τυχαίες συνιστώσες του συστήματος, όπως για παράδειγμα οι καταιγίδες, καλύπτουν χωρικά μόνο ένα κομμάτι της λεκάνης απορροής και επομένως η απόκριση όλης της λεκάνης προσδιορίζεται σημαντικά από την αντίστοιχη της υπόψη υπολεκάνης. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η λεκάνη απορροής τόσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η στερεοπαροχή θα διοδευτεί μέχρι τη θέση μέτρησης και επομένως θα υπάρχει σημαντική χρονική καθυστέρηση στη μέγιστη πλημμυρική αιχμή της λεκάνης αλλά και στη μέγιστη στερεοπαροχή.

Παρόλα αυτά επειδή η αναφορά όλων των μετρήσεων στερεοπαροχής είναι ο σταθμός μέτρησης της απορροής και της στερεοπαροχής σε μια συγκεκριμένη διατομή του υδατορεύματος παραμένει ανεπίλυτο το ερώτημα κατά πόσο οι τοπικές υδραυλικές συνθήκες στη διατομή μέτρησης διαστρεβλώνουν την απόκριση ολόκληρης της λεκάνης. Παρόλο που για μεγάλη χρονική κλίμακα οι τοπικές συνθήκες μπορεί να αναπαριστούν την απόκριση και εξέλιξη ολόκληρης της λεκάνης απορροής, εξ ίσου πιθανό είναι και το αντίθετο στη βάση των πλημμυρικών επεισοδίων. Πιο συγκεκριμένα, ο *Brune [1950]* επισημαίνει ότι η προέλευση της στερεοπαροχής σε έντονα πλημμυρικά επεισόδια είναι κυρίως οι κοίτες του κύριου υδρογραφικού δικτύου και η διάβρωση των οχθών ενώ τα φερτά υλικά που παράγονται μέσω των διεργασιών στις κλιτύς αποθηκεύονται σε διάφορα κοίλα τμήματα των λεκανών απορροής ή στις κοίτες των ποταμών ώστε να μεταφερθούν με επόμενα πλημμυρικά γεγονότα. Αυτό σημαίνει ότι προγράμματα διαχείρισης της λεκάνης απορροής που αποβλέπουν στον περιορισμό της εδαφικής διάβρωσης πιθανόν να παρουσιάζουν μηδενικά αποτελέσματα μέσα στις πρώτες δεκαετίες από την εφαρμογή τους. Η τοποθέτηση περισσότερων του ενός μετρητικών σταθμών μπορεί να δημιουργήσει τις κατάλληλες απαντήσεις αλλά και πάλι η γνώση και η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών της στερεοαπορροής σε λεκάνες μεγάλης κλίμακας θα παραμείνει ως πρόκληση για την διεθνή επιστημονική κοινότητα τις επόμενες δεκαετίες.

2.5 Κατανομή αποθέσεων σε ταμιευτήρες

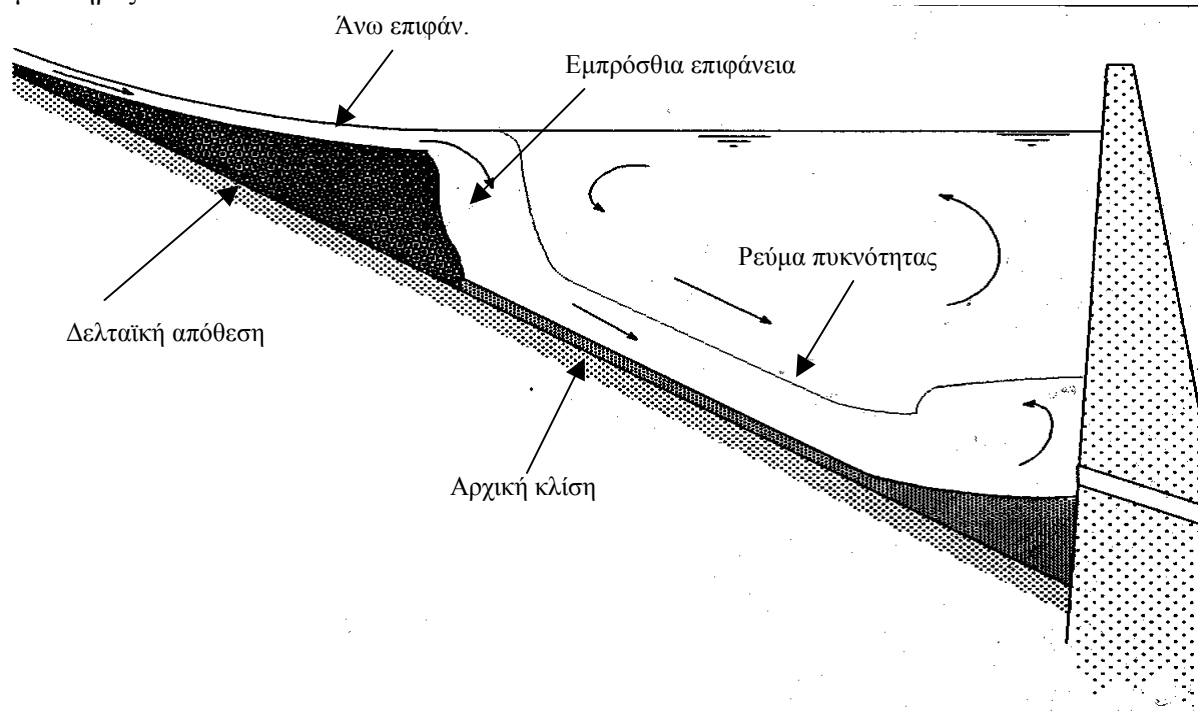
Σε πολλές περιπτώσεις δεν ενδιαφέρει μόνο ο συνολικός όγκος των φερτών υλικών που θα αποτεθεί στον ταμιευτήρα αλλά και η κατανομή του όγκου αυτού. Για παράδειγμα διαφορετικές είναι οι επιπτώσεις στη λειτουργία του ταμιευτήρα αν τα εισρέοντα φερτά υλικά αποτεθούν κοντά στις εκβολές των ποταμών ή κοντά στο φράγμα. Αυτό γίνεται ώστε να αποφασισθεί ήδη από το στάδιο σχεδιασμού του ταμιευτήρα η στάθμη κατασκευής π.χ. της υδροληψίας της σήραγγας προσαγωγής, αν πρόκειται για έργο παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.

2.5.1 Περιγραφή των μορφών απόθεσης

Η αρχική εκτίμηση των ερευνητών κατά την πρώιμη εποχή του σχεδιασμού και κατασκευής των ταμιευτήρων ήταν ότι το σύνολο των φερτών υλικών μεταφέρονταν έως τη θέση του φράγματος και το σύνολο των αποθέσεων εμφανίζονταν εκεί. Με την διενέργεια υδρογραφικών αποτυπώσεων σε αρκετούς ταμιευτήρες (κυρίως στις ΗΠΑ και τη Ν. Αφρική) είναι πλέον κοινή η πεποίθηση ότι η αρχική αυτή εκτίμηση είναι λανθασμένη. Αυτό που έχει αποδειχθεί είναι ότι οι αποθέσεις εμφανίζονται σε όλη την επιφάνεια του ταμιευτήρα, δημιουργούνται αρχικά στις εκβολές των ποταμών, οδηγώντας βαθμιαία σε μείωση της αποθηκευτικότητας του ταμιευτήρα σε όλη του την έκταση. Το συμπέρασμα αυτό ουσιαστικά αλλάζει τη λογική σχεδιασμού ενός ταμιευτήρα καθώς πλέον είναι γνωστό ότι ο νεκρός όγκος δεν συγκεντρώνεται κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο αλλά σε ολόκληρο τον ταμιευτήρα.

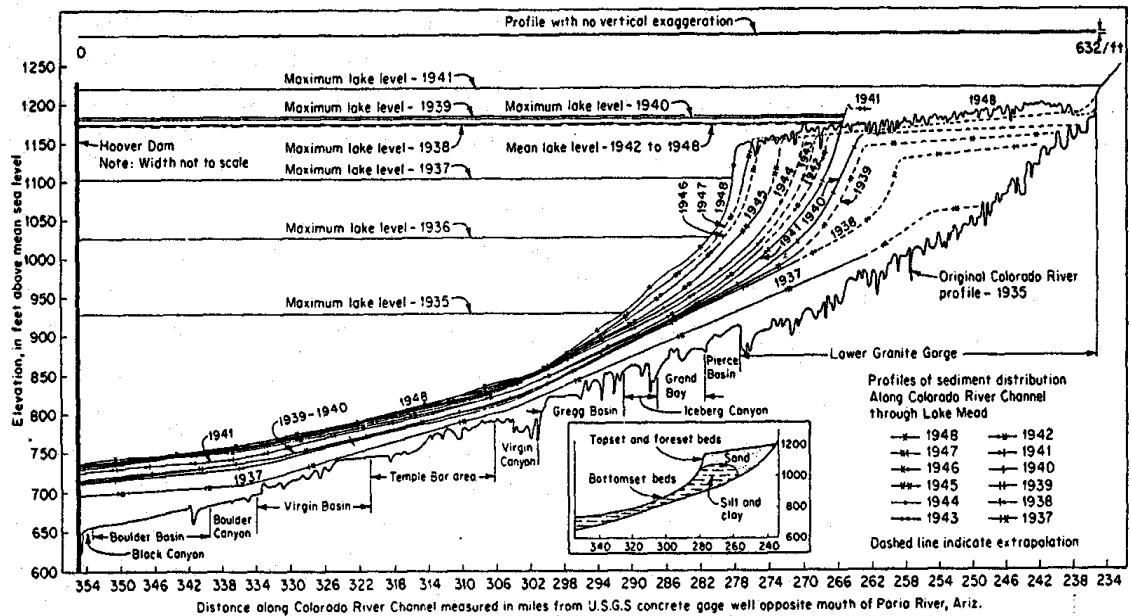
Ο υδρολογικός σχεδιασμός του ταμιευτήρα με την υιοθέτηση του νεκρού όγκου, όπως γίνεται έως τώρα, ουσιαστικά τοποθετεί τις υδροληψίες σε μεγαλύτερο υψόμετρο από το πραγματικό καθώς θεωρεί ότι το σύνολο των φερτών υλικών αποτίθενται μπροστά στο φράγμα. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της διαθέσιμης διακύμανσης του ύψους πτώσης σε περίπτωση υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Αντίθετα η ύπαρξη εκτεταμένων αποθέσεων στις εκβολές των ποταμών στους ταμιευτήρες δημιουργεί ανύψωση της κοίτης και ενδεχομένως αυξάνει την πιθανότητα πλημμυρών στις ανάντη περιοχές σε περιπτώσεις έντονων πλημμυρικών επεισοδίων.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η σχηματική παράσταση των αποθέσεων των φερτών υλικών σε ταμιευτήρες.



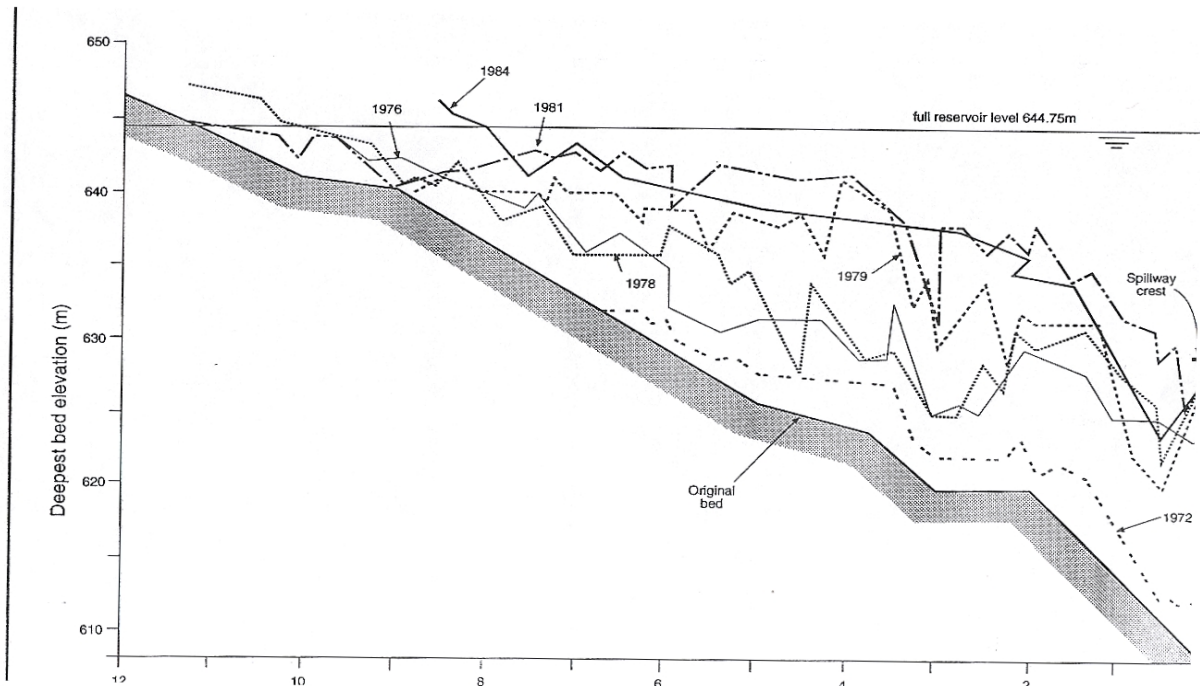
Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες

Με την είσοδο των φερτών υλικών στην καμπύλη οπισθοδρομίας (backwater curve) του ταμιευτήρα, η μείωση της ταχύτητας της ροής έχει ως αποτέλεσμα την καθίζηση των πιο ευμεγεθών φερτών υλικών (π.χ. φορτίο κοίτης) και σχηματίζουν την αρχική δελταϊκή απόθεση. Η επιφάνεια της δελταϊκής απόθεσης, η οποία ονομάζεται άνω επιφάνεια (topset bed) έχει κλίση, η οποία αντιστοιχεί μεταξύ του $1/2$ και των $2/3$ της αντίστοιχης κλίσης της αρχικής επιφάνειας. Η κλίση αυτή από ένα σημείο και έπειτα παραμένει σταθερή ενώ όσο οι αποθέσεις αυξάνονται η άνω επιφάνεια ανυψώνεται παράλληλα. Μετά από μια συγκεκριμένη απόσταση, η άνω επιφάνεια διακόπτεται απότομα και δίνει τη θέση της στην εμπρόσθια επιφάνεια (frontset bed), της οποίας η κλίση είναι τουλάχιστο πέντε φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της άνω επιφάνειας. Με την συνεχιζόμενη εισροή φερτών υλικών σε σύρση η άνω επιφάνεια επεκτείνεται στο εσωτερικό του ταμιευτήρα ενώ η κλίση της εμπρόσθιας επιφάνειας αυξάνεται συνεχώς έως να φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή. Το σημείο τομής της άνω επιφάνειας με την εμπρόσθια επιφάνεια δημιουργείται από τη μέγιστη υπερετήσια ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα, και ιδιαίτερα όταν αυτή η ταπείνωση χρονικά συμπίπτει με την έναρξη της υγρής περιόδου, γεγονός που συνήθως συμβαίνει σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες. Στο Σχήμα 6 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της δελταϊκής απόθεσης στο ταμιευτήρα Mead του Hoover Dam των ΗΠΑ [Graf, 1971].



Σχήμα 6: Εξέλιξη της δελταϊκής απόθεσης των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Mead του Hoover Dam στις ΗΠΑ.

Στο Σχήμα 7 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των αποθέσεων στον ταμιευτήρα Ichari στην Ινδία [Atkinson, 1996]. Αν και η εξέλιξη των αποθέσεων δεν είναι τόσο ομαλή όπως στην περίπτωση του ταμιευτήρα Mead, ακολουθεί σε γενικές γραμμές τα κύρια χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 7: Χρονική εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Ichari της Ινδίας [Atkinson, 1996]

Ο *Vanoni* [1977] περιγράφει δύο φυσικές διαδικασίες που συντελούν στην ανάπτυξη των δελταϊκών αποθέσεων. Σε στενούς ταμειυτήρες (δηλαδή σε εκείνους που το πλάτος τους δεν είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος της διατομής της κοίτης του ποταμού στην εκβολή του) η ροή και τα φερτά υλικά κατανέμονται ισομερώς σε όλο το πλάτος του ταμειυτήρα. Σε ταμειυτήρες όπου το πλάτος τους είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διατομή του ποταμού, το μίγμα φερτών υλικών και ροής εισρέει στον ταμειυτήρα με τη μορφή φλέβας. Η ροή συνεχίζεται για σημαντική απόσταση κατά μήκος της φλέβας δημιουργώντας αποθέσεις, που συνήθως συγκεντρώνονται σε ένα τμήμα του ταμειυτήρα όχι πολύ μεγαλύτερο από τη διατομή του ποταμού στην εκβολή του στον ταμειυτήρα.

Τα λεπτόκοκκα υλικά (και κυρίως το φορτίο απόπλυσης) μεταφέρονται στα πιο κατάντη τμήματα του ταμειυτήρα μέσω των ρευμάτων πυκνότητας (density currents) και σχηματίζουν αποθέσεις στη βάση του φράγματος. Τα ρεύματα πυκνότητας αναπτύσσονται κατά μήκος του πυθμένα και δημιουργούνται από τη θερμική διαστρωμάτωση του ταμειυτήρα, τα φυσικά χαρακτηριστικά των φερτών υλών και τη διαφορά πυκνότητας του νερού του ταμειυτήρα και του μίγματος εισρέοντος νερού και φερτών υλών. Ο σχηματισμός ενός ρεύματος πυκνότητας είναι δυνατός όταν η συγκέντρωση των φερτών υλών σε αιώρηση ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή ενώ η απόσταση στην οποία μπορεί να μεταφερθούν τα φερτά μπορεί να φτάσει και το μέγιστο μήκος του ταμειυτήρα (π.χ. στον ταμειυτήρα Mead παρατηρήθηκε ρεύμα πυκνότητας που μετέφερε φερτά υλικά σε απόσταση έως 150 km).

Όπως φαίνεται, η στάθμη του ταμειυτήρα κατά την είσοδο των φερτών υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή των αποθέσεων στον ταμειυτήρα. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η στάθμη του ταμειυτήρα κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα κατά την περίοδο αυξημένων στερεοαπορροών (π.χ. έναρξη της υγρής περιόδου), η μείωση της ταχύτητας λόγω της καμπύλης οπισθοδρομίας θα γίνεται αρκετά πιο ανάντη από την εκβολή και επομένως σημαντικό ποσοστό των φερτών υλών θα αποτίθενται στο δελταϊκό τμήμα. Σε αντίθετη περίπτωση που η στάθμη του ταμειυτήρα είναι σε χαμηλά επίπεδα, σημαντικό τμήμα των στερεοπαροχών θα μεταφέρεται στο εσωτερικό του ταμειυτήρα μέχρι το πόδι του φράγματος. Με άλλα λόγια, η πολιτική διαχείρισης του ταμειυτήρα (π.χ. η στάθμη ψηλά ή χαμηλά ανά περίοδο) παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της κατανομής των αποθέσεων στον ταμειυτήρα. Συνήθως, οι μελέτες υδρολογικού σχεδιασμού του ταμειυτήρα δεν περιλαμβάνουν καθόλου αυτήν την οπτική. Για παράδειγμα, σε έναν υδροηλεκτρικό ταμειυτήρα με την υδροληψία του σταθμού παραγωγής κοντά στο φράγμα, θα ανέμενε κανείς ότι θα έπρεπε η στάθμη του ταμειυτήρα να είναι ψηλά κατά τη φθινοπωρινή περίοδο ώστε να εμποδιστεί η μεταφορά των φερτών υλικών έως την υδροληψία. Αυτό το ενδεχόμενο φυσικά δεν μπορεί να συμβεί σε υδροηλεκτρικούς ταμειυτήρες, αφού κατά τη θερινή περίοδο η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τέτοια που αναγκάζει τους σταθμούς παραγωγής να εργάζονται με εντατικούς ρυθμούς μειώνοντας αναπόφευκτα τη στάθμη του ταμειυτήρα στις αρχές του φθινοπώρου. Είναι φανερό επομένως ότι τίθεται ένα ζήτημα βελτιστοποίησης, ώστε ο ταμειυτήρας να καλύπτει τις ανάγκες παραγωγής ενέργειας με τα λιγότερα δυνατά προβλήματα λόγω των αποθέσεων κοντά στην υδροληψία.

Καταλήγοντας, επισημαίνεται ότι τα σενάρια βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός ταμειυτήρα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν και αυτήν την παράμετρο, ιδιαίτερα σε ταμειυτήρες εξαιρετικά

σημαντικής οικονομικής αξίας που συγκεντρώνουν απορροές από λεκάνες απορροής υψηλής διαβρωσιμότητας.

2.5.2 Μοντέλα υπολογισμού της κατανομής των αποθέσεων φερτών υλών σε ταμιευτήρες

Οι βασικές μορφές μοντέλων που προσομοιώνουν την κατανομή των φερτών υλικών στον πυθμένα του ταμιευτήρα διακρίνονται κυρίως στα εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε υδρογραφικές αποτυπώσεις ταμιευτήρων κυρίως στις ΗΠΑ και στα αναλυτικά μοντέλα που επιχειρούν να περιγράψουν με πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις τους φυσικούς μηχανισμούς των οποίων η πλήρης κατανόησή τους δεν έχει ακόμα γίνει κατορθωτή.

Εμπειρικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται από την εμπειρία που αποκομίστηκε από υδρογραφικές αποτυπώσεις ταμιευτήρων κυρίως στις ΗΠΑ. Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ δημοφιλή κυρίως λόγω της απλότητάς τους και των λίγων δεδομένων που απαιτούνται. Κάποια από τα πολλά εμπειρικά μοντέλα που υπάρχουν διαθέσιμα είναι μεταξύ άλλων των *Christofano, 1953; Borland and Miller, 1958; Szechowycz and Qureshi, 1973; Croley et al., 1978.*

Η πιο γνωστή από όλες τις εμπειρικές μεθόδους είναι η Εμπειρική Μέθοδος Μείωσης Επιφάνειας [*Borland and Miller, 1958*]. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην υδρογραφική αποτύπωση 30 ταμιευτήρων στις ΗΠΑ. Ο αντικειμενικός σκοπός της μεθόδου είναι ο υπολογισμός των καμπυλών βάθους – επιφάνειας – όγκου αφού έχει προηγηθεί η απόθεση των φερτών υλικών με μόνο δεδομένο την μέση ετήσια στερεοπαροχή στον ταμιευτήρα. Η μέθοδος αποτελείται από δύο βήματα: (α) την κατάταξη του ταμιευτήρα σε μία από τις τέσσερις συγκεκριμένες κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα του ταμιευτήρα και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του, και (β) τον επαναληπτικό υπολογισμό των σχέσεων βάθους – επιφάνειας – όγκου.

Οι εμπειρικές μέθοδοι, αν και εύκολες στη χρήση, έχουν μικρή ακρίβεια, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένους τύπους ταμιευτήρων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως μια πρώτη ένδειξη για χρονικό ορίζοντα μέχρι λίγες δεκαετίες.

Αναλυτικά ντετερμινιστικά μοντέλα

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε μια σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη των αναλυτικών ντετερμινιστικών μοντέλων που περιγράφουν μαθηματικά την εισροή, τη μεταφορά και την κατανομή των φερτών υλικών μέσα στον ταμιευτήρα. Σε αντίθεση με τα εμπειρικά, τα μαθηματικά μοντέλα αυτού του τύπου επιτρέπουν την εξαγωγή εκτιμήσεων σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες καθώς και την περιγραφή μέσω καταστατικών μαθηματικών εξισώσεων των φυσικών διεργασιών. Λόγω της πολυπλοκότητας των μοντέλων αυτών, στην πράξη πολλά από αυτά είναι μονοδιάστατα (στη διεύθυνση της ροής στον ταμιευτήρα). Αυτή η απλοποίηση είναι πολλές φορές δικαιολογημένη σε περίπτωση που το μήκος του ταμιευτήρα είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πλάτος και το βάθος και όταν υπάρχει σημαντική ροή μέσα στον ταμιευτήρα.

Δύο είναι οι κυριότερες κατηγορίες των αναλυτικών μοντέλων. (α) Εκείνα που είναι βασισμένα στην επίλυση των καταστατικών μαθηματικών εξισώσεων της διατήρησης της μάζας του νερού και των φερτών υλικών και της διατήρησης της ορμής (conservation of mass and momentum) και

(β) εκείνα που επιλύουν προσεγγιστικά τις εξισώσεις μεταφοράς - διάχυσης (advection - diffusion equations). Δεν αποτελεί σκοπό της έκθεσης αυτής να περιγράψει αναλυτικά τις μαθηματικές αυτές σχέσεις. Έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγιστικές αριθμητικές επιλύσεις των εξισώσεων αυτών είτε σε 1, 2 και 3 διαστάσεις (μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων όγκων), οι οποίες χρησιμοποιούνται στα μοντέλα αυτά [π.χ. *Lopez*, 1978; *Soares et al.*, 1982b; *Lai*, 1986; *Van Rijn et al.*, 1986].

Για παράδειγμα, ο *Lopez* [1978] χωρίζει τον ταμιευτήρα σε τρία τμήματα ώστε να διευκολυνθεί στην μαθηματική προσομοίωση. Στο πρώτο ανάντη τμήμα (ποταμός) με μονοδιάστατη ανάλυση υπολογίζεται το ποσοστό των φερτών υλικών που αποτίθενται εκεί λόγω της καμπύλης οπισθοδρομίας. Στο δεύτερο τμήμα το οποίο είναι η εκβολή του ποταμού στον ταμιευτήρα εφαρμόζεται η θεωρία της τυρβώδους φλέβας σε δύο διαστάσεις και στο τρίτο τμήμα (κυρίως ταμιευτήρας) το οποίο χωρίζεται σε ιδεατούς διαμήκεις αγωγούς και αναλύονται σε μία διάσταση. Πιο γνωστά εμπορικά πακέτα τα οποία συνδυάζουν και φιλικό προσαρμοστικό χρήστη για την εύκολη εισαγωγή των δεδομένων και την παραστατική απόδοση των αποτελεσμάτων είναι το MIKE11 GST του Danish Hydraulic Institute (DHI), το TELEMAC της Electricite de France και του HRWallingford καθώς και το HEC6 [*Thomas*, 1977] της United States Geophysical Survey (USGS).

Σε αντίθεση με τα εμπειρικά, τα αναλυτικά ντετερμινιστικά μαθηματικά μοντέλα έχουν αποδειχθεί αξιόπιστα σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν για τη βαθμονόμησή τους ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων, οι οποίες συχνά δεν είναι διαθέσιμες. Αρκετές όμως από τις φυσικές διεργασίες που συμμετέχουν στο μηχανισμό απόθεσης των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες είναι ακόμα σε εμπειρικό στάδιο (π.χ. συμπεριφορά των συσσωματώσιμων φερτών (cohesive sediments) και αλληλεπίδραση της υδάτινης ροής και της στερεομεταφοράς). Έτσι όταν κάποιος πρέπει να εφαρμόσει ένα τέτοιο μοντέλο πρέπει να έχει από πριν μια εξαιρετικά καλή ιδέα για το τι είδους ταμιευτήρα πρόκειται, ποια είναι η σύσταση των φερτών υλικών που αναμένονται στον ταμιευτήρα κ.ά., στοιχεία που συχνά δεν μπορούν να είναι διαθέσιμα.

Σε γενικές γραμμές, η μη-πλήρης γνώση των φυσικών μηχανισμών, τα ανακριβή δεδομένα πεδίου (λόγω των αναπόφευκτων μετρητικών σφαλμάτων), οι απλουστεύσεις όσον αφορά στις διαστάσεις της μαθηματικής ανάλυσης (π.χ. μονο- ή δι- διάστατη ανάλυση αντί για τρισδιάστατη) καθώς και οι χωρικά και χρονικά ολοκληρωμένες παράμετροι, δεν επιτρέπουν ακριβείς προβλέψεις από τα αναλυτικά μοντέλα.

Φυσικά μοντέλα

Η κατασκευή φυσικών ομοιωμάτων στο εργαστήριο προσφέρει τη δυνατότητα της συστηματικής μελέτης και περιγραφής των μηχανισμών της απόθεσης. Οι εκβολές των ποταμών προσομοιάζονται συνήθως από έναν εκχειλιστή στον οποίον παροχετεύονται ροές με συγκεκριμένες συγκεντρώσεις και μεγέθη φερτών υλικών. Για παράδειγμα, ο *Chang* [1982] μελέτησε πειραματικά τη συμπεριφορά των δελταϊκών αποθέσεων σε ένα εκχειλιστή. Τα πειράματα έδειξαν ότι ο σχηματισμός και η μορφή του δέλτα αντανακλούν μεταβολές στην παροχή του ποταμού, στην εισροή φερτών υλικών και στην κλίση του πυθμένα της κοίτης.

Τα φυσικά μοντέλα μπορεί να είναι χρήσιμα για την ποιοτική κατανόηση κάποιων φυσικών διεργασιών. Αδυνατούν όμως εκ των πραγμάτων να δώσουν ποσοτικές λύσεις, αφού η τεράστια διαφορά κλίμακας μεταξύ του εργαστηρίου και της πραγματικότητας εισάγει πολλές αβεβαιότητες και σφάλματα.

Στοχαστικά μοντέλα

Η στοχαστική φύση των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία σχηματισμού των αποθέσεων υπαγόρευσε την ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων κυρίως σε συνδυασμό με τη στοχαστική προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα με το σκεπτικό όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο [Soares *et al.*, 1982b]. Η εισροή νερού στον ταμιευτήρα είναι τυχαία μεταβλητή και το ίδιο ισχύει και για την εισροή φερτών υλικών. Επίσης και οι εκροές φερτών υλικών από τον ταμιευτήρα είναι χρονικά κυμαινόμενες (ακόμα και στην περίπτωση σταθερής εκροής νερού) αφού η στάθμη του νερού θα κυμαίνεται επίσης χρονικά μεταβάλλοντας την συγκέντρωση των φερτών υλικών που εκρέουν. Για παράδειγμα, στο μοντέλο των Soares *et al.*, [1982b] η αθροιστική απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρα παρουσιάζεται ως μια ανέλιξη Markoff, δηλαδή η απόθεση των φερτών υλικών σε ένα συγκεκριμένο έτος είναι έντονα συσχετισμένη με την απόθεση των φερτών υλικών κατά το προηγούμενο έτος. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί παράλληλα με το απλό μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας ταμιευτήρων του Moran [1956], ώστε να προσομοιώνονται και οι στάθμες του ταμιευτήρα για κάθε χρονικό βήμα. Το μοντέλο αυτό τελικά υπολογίζει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της αθροιστικής απόθεσης φερτών υλικών σε διακριτό χρονικό βήμα σε έτη.

Τα στοχαστικά μοντέλα κατανομής του όγκου των αποθέσεων που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς είναι ελάχιστα, κυρίως λόγω των σημαντικών δυσκολιών στην ανάπτυξή τους.

3 Ο ταμιευτήρας Κρεμαστών

3.1 Γενικές πληροφορίες

Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών είναι ο πιο ανάντη ταμιευτήρας της λεκάνης απορροής του Αχελώου πριν από την κατασκευή των ταμιευτήρων Μεσοχώρας και Συκιάς στον άνω ρου του. Στην Εικόνα 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ) παρουσιάζεται η δορυφορική εικόνα της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα από δορυφόρο Landsat 7 (Enhanced Thematic Mapper Plus) με ημερομηνία λήψης 28 Ιουλίου 1999. Στον ταμιευτήρα εκβάλλουν εκτός από τον κύριο κλάδο του Αχελώου (Ασπροπόταμος) και οι παραπόταμοι Αγραφιώτης, Μέγδοβας (Ταυρωπός) και Τρικεριώτης. Στην Εικόνα 2 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ) φαίνεται η θέση του ταμιευτήρα και η λεκάνη απορροής με το βασικό υδρογραφικό δίκτυο. Οι ποταμοί αυτοί είναι και οι μοναδικοί με μόνιμη βασική απορροή ενώ το υπόλοιπο σαφώς καθορισμένο υδρογραφικό δίκτυο είτε έχει εφήμερη απορροή στη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, είτε διακοπτόμενη, χειμαρρώδη όπου παρατηρείται μηδενική απορροή κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Στη Φωτογραφία 1, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ φαίνεται μια άποψη του ταμιευτήρα με τα νησάκια που έχουν δημιουργηθεί. Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών αποτελεί μια ανεκμετάλλευτη πηγή για την ανάπτυξη των γύρω δήμων καθώς η φυσική ομορφιά του τοπίου είναι πρωτόγνωρη. Τμήματα του ταμιευτήρα (π.χ. εκβολές του ποταμού Αχελώου) έχουν χαρακτηριστεί ως Τοπίο Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους (ΤΙΦΚ) (Φωτογραφία 2, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ).

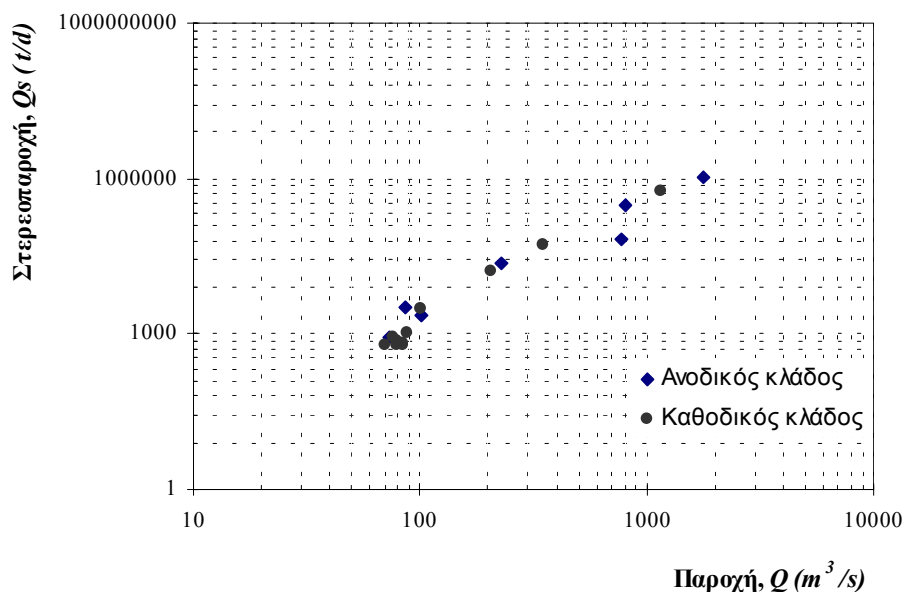
Η επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών για την εκτίμηση της στερεοαπορροής της αντίστοιχης λεκάνης απορροής έγινε για πέντε συγκεκριμένους λόγους: (α) Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών είναι από τους παλαιότερους στην Ελλάδα καθώς η λειτουργία του ξεκίνησε το 1965, δηλαδή έχουν μεσολαβήσει πάνω από 30 χρόνια από την αρχική πλήρωση του ταμιευτήρα. Ο χρόνος αυτός αποτελεί ένα ικανό μέγεθος για τη δημιουργία αξιόλογων αποθέσεων που συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια και σαφήνεια των μετρήσεων. (β) Η επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι τόσο εκτεταμένη (80.6 km²), ώστε κανείς με ασφάλεια μπορεί να υποθέσει ότι η ικανότητα κατακράτησης του ταμιευτήρα τείνει στη μονάδα, δηλαδή ο ταμιευτήρας κατακρατεί σχεδόν το σύνολο των φερτών υλικών που εισρέουν σε αυτόν και επομένως δεν υπάρχουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλικών που διαφεύγουν μέσω της υδροληψίας ή του υπερχειλιστή. (γ) Τα υδατορεύματα που εκβάλλουν στον ταμιευτήρα έχουν αυξημένη στερεοαπορροή καθώς η πλειονότητα των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζονται από σημαντική διαβρωσιμότητα (π.χ. φλύσχης) και επομένως οι όγκοι των αποθέσεων των φερτών υλικών που αναμένονται είναι σημαντικοί. (δ) Τα κύρια υδατορεύματα εκβάλλουν στον ταμιευτήρα σε σαφώς καθορισμένο χώρο και διακριτό από το αντίστοιχο των υπολοίπων. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα τη δυνατότητα για ξεχωριστή μελέτη των στερεοαπορροών τεσσάρων διαφορετικών λεκανών απορροής από τις αποθέσεις σε ένα μόνο ταμιευτήρα. (ε) Ο ταμιευτήρας ήταν μέχρι τώρα ο πιο ανάντη της λεκάνης απορροής του Αχελώου και επομένως συγκεντρώνει την απόκριση της συνολικής λεκάνης απορροής για όλη την περίοδο λειτουργίας του χωρίς να κατακρατείται

κάποιο ποσοστό σε πιο ανάντη ταμιευτήρα (με την εξαίρεση του ταμιευτήρα Πλαστήρα στο ανάντη τμήμα του ποταμού Μέγδοβα ο οποίος όμως είναι παλαιότερος του ταμιευτήρα των Κρεμαστών).

Ο ταμιευτήρας και ο σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας των Κρεμαστών είναι από τους μεγαλύτερους στην Ελλάδα (Φωτογραφία 3, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ. Η επιφάνεια του ταμιευτήρα στη στάθμη υπερχειλίσεως είναι ίση με 80.6 km^2 , ενώ ο αντίστοιχος συνολικός αποθηκευτικός όγκος είναι ίσος με 4495 hm^3 . Η λεκάνη απορροής στη θέση του φράγματος έχει επιφάνεια ίση με 3570 km^2 ενώ η μέση ετήσια εισροή στον ταμιευτήρα είναι ίση με $117.9 \text{ m}^3/\text{s}$ [Ζαρρής, κ.ά., 1999]. Εξαιρώντας τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα καθώς και τμήμα της λεκάνης απορροής που απορρέει άμεσα στον ταμιευτήρα, η λεκάνη απορροής των ποταμών Αχελώου, Αγραφιώτη, Μέγδοβα και Τρικεριώτη είναι ίση με 3292 km^2 .

Τα στοιχεία του υδρολογικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα είναι απαραίτητα για την ανάλυση της εισροής των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα, έχουν συγκεντρωθεί οι μηνιαίες εισροές νερού στον ταμιευτήρα από όλη τη λεκάνη απορροής, οι μηνιαίοι όγκοι βροχοπτώσεων στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, οι μηνιαίες εκροές μέσω του ΥΗΣ για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, οι υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα και η εξάτμιση σε μηνιαία βάση. Επίσης έχουν καταγραφεί η στάθμη του ταμιευτήρα στο τέλος κάθε μήνα, η μέση επιφάνεια και ο μέσος όγκος για κάθε μήνα. Όλα τα παραπάνω στοιχεία αναφέρονται σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου και καταγράφονται από τη ΔΕΗ.

Σύμφωνα με την υδρολογική μελέτη του ταμιευτήρα [ECI, 1974] η εκτίμηση του συνολικού όγκου του ταμιευτήρα που θα καταληφθεί από τις αποθέσεις των φερτών υλικών, δηλαδή η εκτίμηση του νεκρού όγκου, είναι ίση με 782 hm^3 (ή 17.4% της συνολικής χωρητικότητας) για 100 χρόνια λειτουργίας του ταμιευτήρα. Η εκτίμηση αυτή έγινε με χρήση της καμπύλης παροχής - στερεοπαροχής με βάση 29 στιγμιαίες μετρήσεις στερεοπαροχής στο χρονικό διάστημα από 17 Ιανουαρίου έως 3 Μαρτίου 1962. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι στεροϋδρομετρήσεις που διενεργήθηκαν στο διάστημα αυτό. Μάλιστα οι μετρήσεις αυτές έγιναν όταν η στάθμη του ποταμού ήταν είτε σε κάθοδο, είτε σε άνοδο αλλά η διάταξη των μετρήσεων στο διπλό λογαριθμικό χαρτί δεν δείχνει κάποια συγκεκριμένη τάση λόγω πιθανής υστέρησης. Η καμπύλη παροχής - στερεοπαροχής επομένως είναι εύκολο να υπολογισθεί αφού υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση των μετρήσεων, κυρίως επειδή οι μετρήσεις έγιναν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Οι στεροϋδρομετρήσεις αυτές διακόπηκαν στις 3 Μαρτίου γιατί η απορροή είχε μειωθεί τόσο πολύ που η στερεοπαροχή των αιωρούμενων φερτών ήταν πρακτικά μηδενική. Επίσης επειδή οι εργασίες για την κατασκευή του φράγματος λίγο ανάντη της θέσης μέτρησης είχαν ήδη ξεκινήσει, το γεγονός αυτό θα επηρέαζε άμεσα την αξιοπιστία των μετρήσεων, παρουσιάζοντας μερικές φορές αυξημένες τιμές σε σχέση με τις πραγματικές. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν μόνο στο φορτίο σε αιώρηση ενώ για το φορτίο σε σύρση εκτιμήθηκε απλώς ότι αποτελεί το 10% του φορτίου σε αιώρηση, θεώρηση που αποτελεί και συνήθη διεθνή πρακτική όταν δεν είναι δυνατό να γίνουν μετρήσεις συρτικού φορτίου.



Σχήμα 8: Στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Κρεμαστά πριν από την κατασκευή του φράγματος.

Η καμπύλη που καταρτίστηκε εφαρμόστηκε στο δείγμα των ημερήσιων παροχών που ήταν τότε διαθέσιμο από την 1η Ιουλίου 1937 και έγινε επέκταση για 1, 50 και 100 χρόνια από την έναρξη λειτουργίας του ταμιευτήρα. Στον Πίν. 4 παρουσιάζονται οι όγκοι φερτών υλικών που εκτιμήθηκε ότι θα είχαν αποτεθεί στον ταμιευτήρα μετά από το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Πίν. 4: Εκτιμώμενη χρονική εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών σύμφωνα με τη μελέτη σχεδιασμού του έργου [ECI, 1974].

Περίοδος λειτουργίας ταμιευτήρα (έτη)	Προβλεπόμενος όγκος αποθέσεων (hm^3)	Ποσοστό επί της ολικής χωρητικότητας του ταμιευτήρα
1	8.1	0.2
50	394.0	8.8
100	782.0	17.4

Είναι προφανές ότι η αξιοπιστία των εκτιμήσεων αυτών είναι εξαιρετικά μειωμένη λόγω του ανεπαρκούς αρχικού δείγματος στερεοπαροχών. Γεγονός πάντως είναι ότι ακόμα και αν ολόκληρος ο προβλεπόμενος όγκος των φερτών υλικών αποτεθεί στη βάση του φράγματος, δεν θα υπάρξει πρόβλημα για την ομαλή λειτουργία της υδροληψία του σταθμού παραγωγής.

3.2 Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθούν και θα αξιολογηθούν όλα τα διαθέσιμα στοιχεία και δεδομένα που συγκέντρωσε η ερευνητική ομάδα. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (βροχόπτωση, απορροή), στη γεωλογία, στις χρήσεις γης και στην τοπογραφία.

Η κοίτη των υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών χαρακτηρίζεται από φερτά υλικά κοίτης μεγάλης διαμέτρου. Στη Φωτογραφία 4 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ) φαίνονται τα φερτά υλικά κοίτης ενός χειμάρρου στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών. Διακρίνεται καθαρά το μεγάλο μέγεθος των φερτών υλικών που είναι γενικά χαρακτηριστικό των χειμάρρων σε μεσογειακά κλίματα, καθώς και η σημαντική διαθεσιμότητα των φερτών υλικών κοίτης που πιθανόν να μεταφερθούν κατόντη σε περίπτωση έντονων πλημμυρικών επεισοδίων. Στη Φωτογραφία 5, (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ) αντίστοιχα φαίνεται η κοίτη του ποταμού Αγραφιώτη λίγο πριν την εκβολή του στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Η διάσταση των φερτών υλικών κοίτης είναι τώρα αρκετά μικρότερη από εκείνη των φερτών υλικών του χειμάρρου αλλά η διαθεσιμότητα των φερτών υλικών κοίτης είναι εξαιρετικά μεγάλη.

Για μια πιο αναλυτική περιγραφή της γεωμορφολογίας της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών ο αναγνώστης παραπέμπεται στη *Λυκούδη*, [2000].

3.2.1 Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Στη λεκάνη απορροής λειτουργούν 20 βροχομετρικοί σταθμοί από τους οποίους οι 8 είναι εξοπλισμένοι με βροχογράφο. Οι 18 από τους βροχομετρικούς σταθμούς ανήκουν στη δικαιοδοσία της ΔΕΗ ενώ οι υπόλοιποι δύο στο ΥΠΕΧΩΔΕ. Στον Πίν. 5 φαίνονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών, για τους οποίους έχουμε ένα αρκετά σημαντικό δείγμα ημερήσιων βροχοπτώσεων καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές Thiessen για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης. Η γεωγραφική θέση των βροχομετρικών σταθμών φαίνονται στην Εικόνα 3 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: ΕΙΚΟΝΕΣ).

Πίν. 5: Βροχομετρικοί σταθμοί εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα των Κρεμαστών

Βροχομετρικός σταθμός	Υπηρεσία	Δεδομένα	Υψόμετρο (m)	Συντελεστής Thiessen
Αγ. Βλάσιος	ΥΠΕΧΩΔΕ	1965-	140	0.016
Ανιάδα (*)	ΔΕΗ	1960-	1060	0.047
Αράχωβα	ΔΕΗ	1960-	960	0.001
Βακάριο (#)	ΔΕΗ	1959-	1150	0.251
Βραγκιανά Μικρά	ΔΕΗ	1960	580	0.116
Γέφυρα Επισκοπής	ΔΕΗ	1963-	277	0.048
Δρυμόνας (*)	ΔΕΗ	1971-	900	0.009
Επιτιανά (#)	ΔΕΗ	1960-	1050	0.033
Καρπενήσι	ΥΠΕΧΩΔΕ	1967-	960	0.037
Κρεμαστά (ΥΗΣ)(#)	ΔΕΗ	1960-	390	0.033
Κρίκελλο (*)	ΔΕΗ	1959-	1120	0.033
Μαυρομάτα	ΔΕΗ	1960-	900	0.083
Μοναστηράκι	ΔΕΗ	1960-	660	0.043
Νεοχώρι (Τυμφρηστού)	ΔΕΗ	1960-	800	0.012
Παπαρούσι	ΔΕΗ	1960-	660	0.037
Πιτσιωτά	ΔΕΗ	1960-	800	0.03
Τέμπλα	ΔΕΗ	1960-	306	0.078
Τριπόταμος	ΔΕΗ	1960-	650	0.013
Τροβάτο (#)	ΔΕΗ	1959-	1060	0.054
Φουσιανά(#)	ΔΕΗ	1960-	850	0.025

(*) Λειτουργεί και βροχογράφος με καταγεγραμμένα ωριαία δεδομένα καταιγίδων.

(#) Είναι εγκατεστημένος βροχογράφος χωρίς να γίνει δυνατή η συλλογή των δεδομένων.

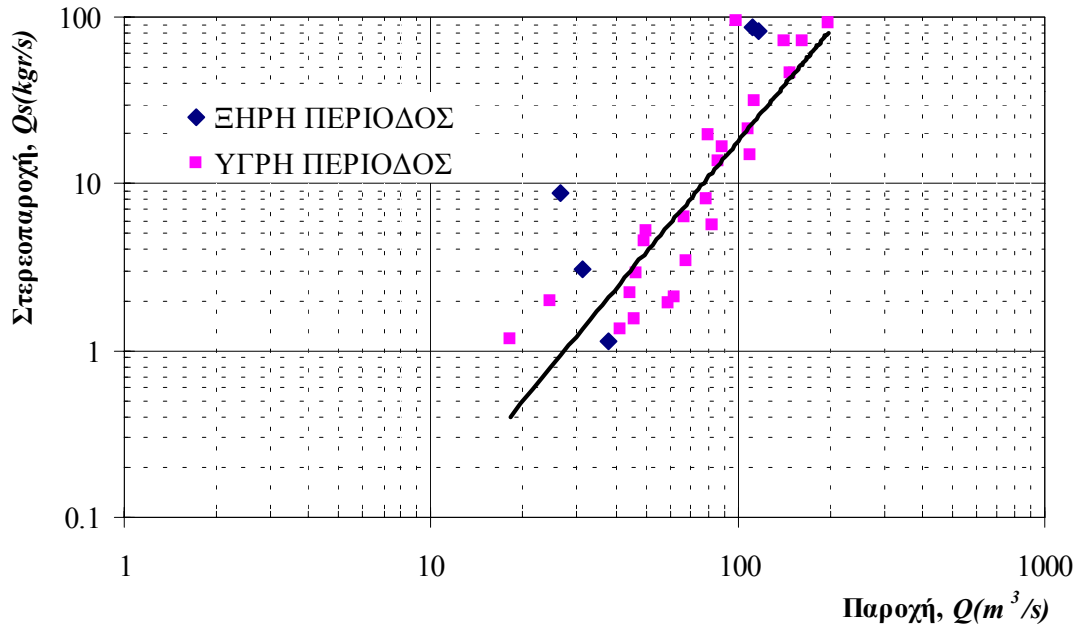
Μετρήσεις στάθμης και παροχής γίνονται σε μία θέση σε κάθε κύριο υδατόρευμα (Αχελώος στη θέση Αυλάκι, Αγραφιώτης στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας, Μέγδοβας στη θέση Γέφυρα Βίνιανης και Τρικεριώτης στη θέση Γέφυρα Γερομπόρου). οι υδρομετρικοί σταθμοί και οι ανάντη λεκάνη απορροής εμφανίζεται στην Εικόνα 4, (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ). Τα πιο αξιόπιστα και μακροχρόνια δείγματα υπάρχουν για τους ποταμούς Αχελώο και Τρικεριώτη. Δυστυχώς οι ημερήσιες καταγραφές στάθμης στο σταθμό Αυλάκι δεν είναι συνεχείς αλλά παρουσιάζουν σημαντικά κενά μέχρι και αρκετές συνεχόμενες ημέρες και δεν είναι δυνατή η συμπλήρωση του δείγματος και η εξαγωγή παροχών και στερεοπαροχών σε μεγαλύτερο χρονικό βήμα (μηνιαίες ή

ετήσιες). Με έμμεσες μεθόδους είναι δυνατή όμως η συμπλήρωση του δείγματος των ετήσιων παροχών του Αχελώου στη θέση του φράγματος (φυσικοποιημένες παροχές από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου του ταμειυτήρα) για τα υδρολογικά έτη 1950-1999. Στον Πίν. 6 παρουσιάζονται τα βασικά υδρολογικά μεγέθη για τις λεκάνες απορροής του Αχελώου στη θέση Αυλάκι και στη θέση του φράγματος των Κρεμαστών.

Πίν. 6: Βασικά υδρολογικά μεγέθη για τις λεκάνες απορροής του Αχελώου στη θέση Αυλάκι και της λεκάνης απορροής του ταμειυτήρα Κρεμαστών

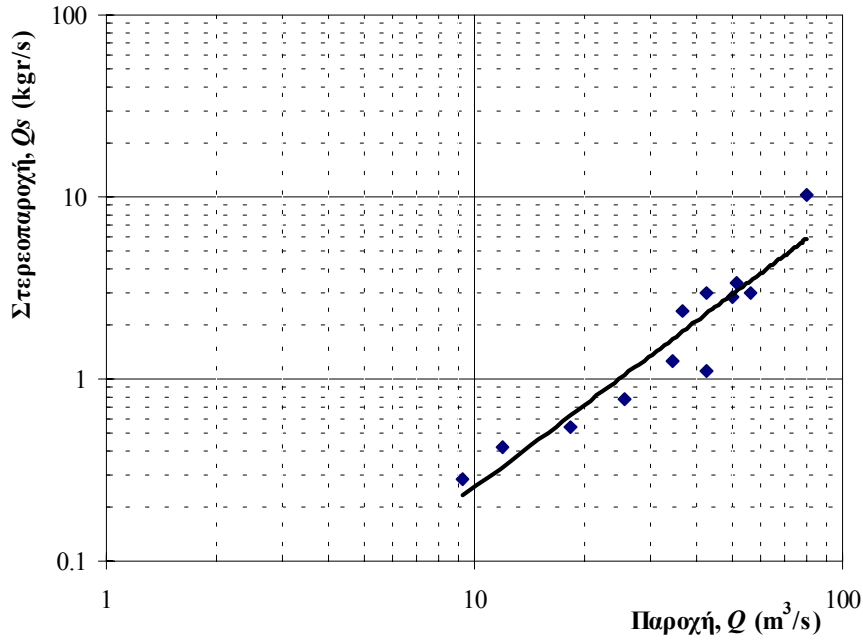
Θέση	Αυλάκι	Κρεμαστά
Έκταση λεκάνης (km ²)	1358	3570
Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	1778.8	1432.7
Μέση ετήσια παροχή (m ³ /s)	51.98	117.1
Ισοδύναμο ύψος απορροής (mm)	1206.9	1034.5
Συντελεστής απορροής	0.68	0.72

Οι συστηματικές μετρήσεις στερεοπαροχής είναι ελάχιστες και γίνονταν στη θέση Αυλάκι του Αχελώου (για την περίοδο 1966-1970) με πολύ αραιή συχνότητα και έχουν σταματήσει πλέον, γεγονός που δυσκολεύει την εκτίμηση της στερεοαπορροής. Σχεδόν όλες οι μετρήσεις έχουν διεξαχθεί κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου ενώ μόλις πέντε στην ξηρή περίοδο. Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται οι στερεοϋδρομετρήσεις που έχουν διεξαχθεί στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου καθώς και η καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής για όλο το δείγμα. Ο συντελεστής προσδιορισμού του συνολικού δείγματος ($R^2=0.7783$) είναι ιδιαίτερα υψηλός γεγονός που ίσως σημαίνει μια γενικά σταθερή απόκριση φερτών υλικών της λεκάνης απορροής στο χρονικό αυτό διάστημα και στο δεδομένο εύρος των παροχών. Επισημαίνεται η απουσία στερεοϋδρομετρήσεων σε σημαντικές παροχές και η πυκνή συγκέντρωση σε μία χαμηλή τιμή της παροχής. Η μέση τιμή των παροχών είναι ίση με 78.78 m³/s ενώ η μέγιστη τιμή είναι ίση με 196.24 m³/s. Ο συντελεστής μεταβλητότητας του δείγματος είναι ίσος με 0.563 που είναι μια αρκετά χαμηλή τιμή και δηλώνει την υψηλή συγκέντρωση του δείγματος γύρω από τη μέση τιμή.



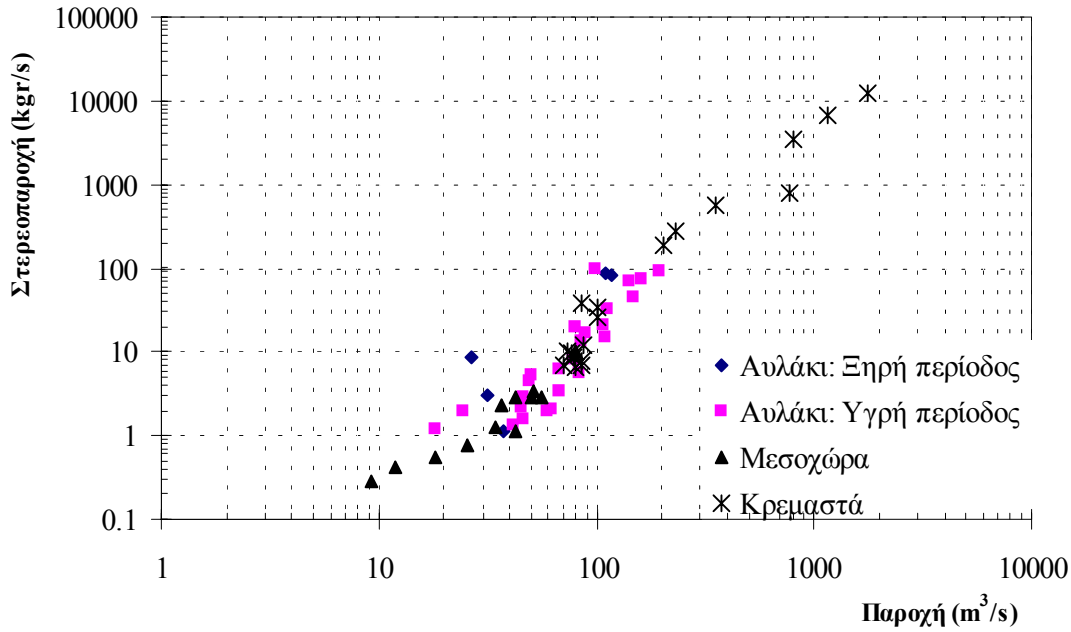
Σχήμα 9: Στερεοϋδρομετρήσεις και καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής στη θέση Αυλάκι του ποταμού Αχελώου.

Εκτός από τη θέση Αυλάκι, έχουν επίσης διεξαχθεί επίσης 12 στερεοϋδρομετρήσεις στον π. Αχελώο στη θέση Μεσοχώρα (ανάντη της θέσης Αυλάκι), κατά τη διάρκεια των ετών 1969 έως 1973 για τη μελέτη του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα Μεσοχώρας που έχει ήδη σχεδόν κατασκευαστεί. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι στερεοϋδρομετρήσεις με την αντίστοιχη καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής. Ο συντελεστής προσδιορισμού ($R^2 = 0.892$) είναι υψηλότερος του αντίστοιχου του υδρομετρικού σταθμού στο Αυλάκι και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η λεκάνη απορροής του Αχελώου στη θέση Μεσοχώρα (633 km^2) είναι αρκετά μικρότερη και επομένως η απόκριση της λεκάνης σε στερεοπαροχές αναμένεται να χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ομοιομορφία. Και σε αυτήν την περίπτωση, το δείγμα των μετρημένων παροχών εξαντλείται σε σχετικά χαμηλές τιμές, με μέση τιμή ίση με $38.21 \text{ m}^3/\text{s}$ και συντελεστή μεταβλητότητας ίσο με 0.523.



Σχήμα 10: Στερεοϋδρομετρήσεις και καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής στον π. Αχελώο στη θέση Μεσοχώρα.

Αν εξετάσουμε και τα τρία δείγματα ταυτόχρονα διαπιστώνουμε την πολύ καλή διάταξή τους σε ένα διπλό λογαριθμικό χαρτί. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο Σχήμα 11. Ακόμα και αν οι στερεοϋδρομετρήσεις έχουν διεξαχθεί σε διαφορετικές θέσεις και σε διαφορετικές περιόδους διαπιστώνουμε ότι παρουσιάζουν μεταξύ τους μια πολύ καλή συσχέτιση. Το δείγμα των μετρήσεων στη θέση Μεσοχώρα ως το πιο ανάντη έχει τις μικρότερες παροχές και στερεοπαροχές, ακολουθούν οι μετρήσεις στη θέση Αυλάκι και οι μεγαλύτερες τιμές των παροχών και των στερεοπαροχών εμφανίζονται στην πιο κατάντη θέση στα Κρεμαστά.



Σχήμα 11: Όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις στερεοπαροχής στον ποταμό Αχελώο.

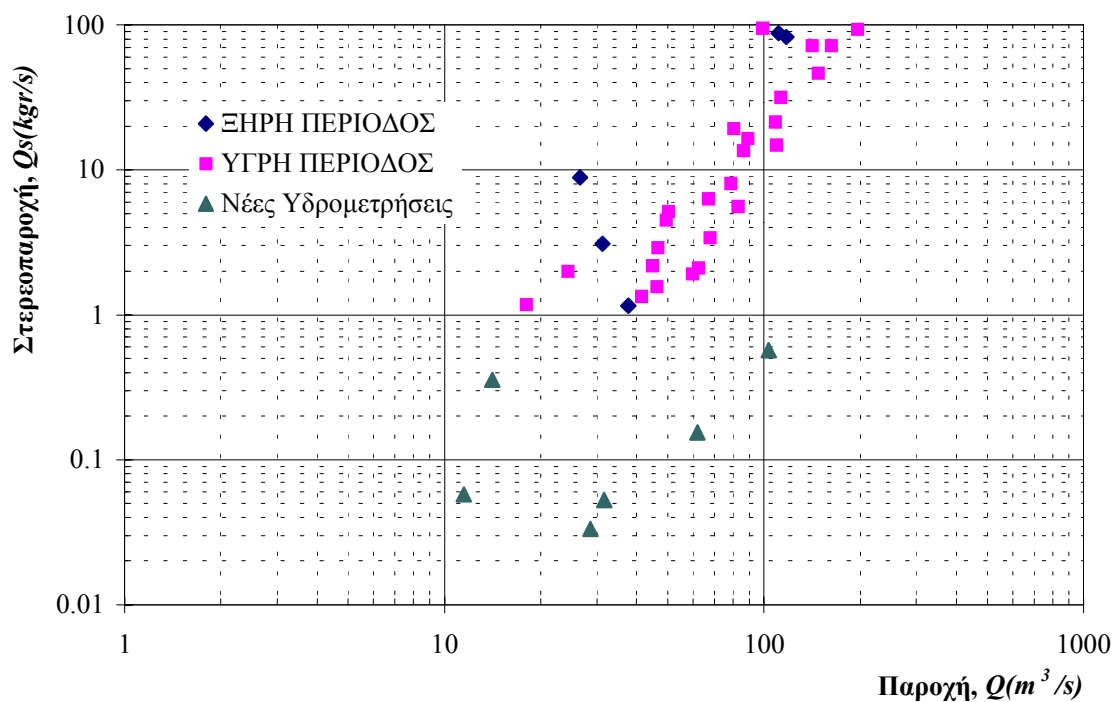
Επίσης φαίνεται πως πιθανόν υπάρχει μια σταθερότητα στη σχέση της παροχής – στερεοπαροχής σε σχέση με το χώρο και το χρόνο, γεγονός που σημαίνει ότι η λεκάνη απορροής του Αχελώου δεν έχει μεταβληθεί ποιοτικά (π.χ. κλιματικές συνθήκες, χρήσεις γης) σε όλα αυτά τα χρόνια και ότι η έκταση της λεκάνης απορροής δεν είναι σημαντικός παράγοντας (δεν εισάγει μεταβλητότητα) στην απόκριση της λεκάνης (και ειδικότερα στη σχέση παροχής-στερεοπαροχής).

Όπως είναι φανερό, οι μετρήσεις αυτές δεν αρκούν για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής σε ετήσια βάση της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών. Επιπροσθέτως είναι δυνατό να δίνουν και λανθασμένα (υπερεκτιμημένα) αποτελέσματα. Σύμφωνα με την ελληνική πρακτική, στερεοϋδρομετρήσεις διενεργούνται μόνο στην περίπτωση που το υδατόρευμα είναι θολό δηλαδή υπάρχει σημαντική ποσότητα φορτίου απόπλυσης κυρίως κατά τον καθοδικό κλάδο της πλημμυρικής απορροής. Πράγματι, στα πλαίσια του προγράμματος αυτού διενεργήθηκαν νέες στερεοϋδρομετρήσεις στην ίδια θέση χωρίς την προαπαιτητή το νερό να είναι θολό. Οι στερεοϋδρομετρήσεις συνέπιπταν χρονικά με τις υδρομετρήσεις που εκτελεί κανονικά η ΔΕΗ στο σταθμό αυτό.

Πίν. 7: Χαρακτηριστικά στοιχεία των στερεοϋδρομετρήσεων που διενεργήθηκαν από τη ΔΕΗ/ΔΑΥΕ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος.

Ημερομηνία	Στάθμη (m)	Παροχή (m^3/s)	Στερεοπαροχή (kg/s)
9/5/2000	1.71	31.96	-
6/6/2000	1.50	13.53	-
12/9/2000	1.39	5.21	-
10/10/2000	1.62	23.16	-
7/11/2000	1.52	14.10	0.357
12/12/2000	1.50	11.48	0.057
16/1/2001	1.76	31.66	0.053
6/2/2001	2.04	61.97	0.155
6/3/2001	2.28	103.3	0.568
3/4/2001	1.80	28.62	0.033

Στον Πίν. 7 παρουσιάζονται τα στοιχεία των στερεοϋδρομετρήσεων που διενεργήθηκαν από τη ΔΕΗ/ΔΑΥΕ στα πλαίσια της δεύτερης φάσης του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Η επεξεργασία των δειγμάτων και ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών υλικών έγιναν στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των νέων αυτών υδρομετρήσεων σε σχέση με τις αρχικές.



Σχήμα 12: Οι νέες υδρομετρήσεις στη θέση Αυλάκι σε σχέση με τις αρχικές στερεοϋδρομετρήσεις.

Φαίνεται ότι οι νέες στερεοϋδρομετρήσεις εμφανίζουν χαμηλότερο ποσό αιωρούμενου φορτίου για την ίδια τιμή της παροχής, τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους. Μόνο μια στερεοϋδρομέτρηση αντιστοιχεί στην αρχική καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν δεν είχε πραγματοποιηθεί στερεοϋδρομέτρηση εκείνες τις ημέρες, η στερεοπαροχή θα είχε υπολογιστεί βάσει της καμπύλης παροχής – στερεοπαροχής με υπερεκτίμηση μιας τάξης μεγέθους. Δηλαδή για όλες τις ημερήσιες τιμές της στερεοπαροχής που αντιστοιχούν στη βασική απορροή του Αχελώου στην ίδια θέση, η υπερεκτίμηση του αιωρούμενου φορτίου είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια. Επομένως είτε θα πρέπει να επανεξεταστεί η μεθοδολογία διενέργειας των στερεοϋδρομετρήσεων (σε περίπτωση που επαναληφθούν σε πανελλήνια κλίμακα) είτε πρέπει να αναζητηθούν εναλλακτικές διατάξεις μέτρησης των στερεοπαροχών των φερτών υλικών. Όπως θα αναφερθεί στο Κεφάλαιο 7, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βοηθητικές μεταβλητές, των οποίων η μέτρηση είναι πολύ πιο εύκολη, αξιόπιστη και δεν χρειάζεται ειδικευμένο προσωπικό, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της στερεοπαροχής και της βοηθητικής μεταβλητής. Η θολότητα είναι μια τέτοια μεταβλητή, και για το λόγο αυτό έγινε προσπάθεια στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος να διερευνηθεί η πιθανή χρήση της θολότητας ως έμμεσου τρόπου εκτίμησης της στερεοαπορροής.

3.2.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών στον κλάδο του Αχελώου είναι ορεινή και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το ένα βρίσκεται βόρεια και ανάντη της Συκιάς και το άλλο νότια και κατάντη αυτής. Στο ανάντη τμήμα της Συκιάς σχηματίζονται κρημνώδη πρηνή κυρίως σε περιοχές όπου το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελείται από σκληρούς σχηματισμούς της ζώνης Πίνδου και τα στρώματα είναι πολυπτυχωμένα με κλίσεις τόσο μεγάλες που προσεγγίζουν την καθετότητα. Παράλληλα δημιουργούνται βαθιά και μαιανδρικά φαράγγια, όπως αυτό του Σέλτσου, το οποίο βρίσκεται κατάντη των Πηγών. Οι απότομες πλαγιές, οι οποίες είναι είτε γυμνές είτε με πυκνή φυτοκάλυψη, κατακερματίζονται από ρήγματα, δημιουργώντας μικρότερες ράχες και χαράδρες, καθιστώντας την περιοχή εξαιρετικά δύσβατη και επικίνδυνη. Στην Εικόνα 5, (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ), παρουσιάζεται το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου της λεκάνης με ισοδιάσταση κανάβου ίση με 200 m.

Στο κατάντη τμήμα, δηλαδή από το ύψος της Συκιάς και προς νότια, το τοπίο αλλάζει δραστικά, καθώς εξαφανίζονται τα ορεινά χαρακτηριστικά και η μορφολογία γίνεται ομαλή με ηπιότερες κλίσεις. Η κοίτη του ποταμού φαρδαίνει και είναι γεμάτη με ασβεστολιθικό κυρίως υλικό, του οποίου το μέγεθος ποικίλει από χαλικιού μέχρι και βράχου. Το υλικό αυτό, το οποίο είναι αδρομερές, δημιουργεί επίμηκες νησίδες με αποτέλεσμα τη διακλάδωση της κύριας κοίτης του ποταμού σε δύο ή περισσότερες κοίτες. Οι νησίδες αυτές δημιουργούνται εξαιτίας της μεγάλης στερεοαπορροής του ανάντη τμήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού και της αδυναμίας της ροής του ποταμού στο τμήμα αυτό να μεταφέρει εξολοκλήρου το υλικό αυτό κατάντη. Η ελάττωση της μεταφορικής ικανότητας της ροής οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διευρυμένη κοίτη.

Οι λεκάνες απορροής του Αγραφιώτη και του Ταυρωπού παρουσιάζουν τα ίδια περίπου μορφολογικά χαρακτηριστικά με αυτά του ανατολικού τμήματος της λεκάνης του Αχελώου, εφόσον η γεωλογική δομή είναι η ίδια.

Τα υδρογραφικά δίκτυα του Αχελώου, του Αγραφιώτη και του Ταυρωπού είναι πυκνά και έχουν σύνθετη μορφή. Ο δε τύπος τους είναι γενικά επιμήκης δενδριτικός αλλά και ορθογώνιος, εξαιτίας του ρηξιγενούς τεκτονισμού. Στο τμήμα όπου αναπτύσσεται ο φλύσχος της Πίνδου, σχηματισμός σχετικά μη περατός, το νερό ρέει επιφανειακά ακολουθώντας τις τεκτονικές δομές της περιοχής, με αποτέλεσμα το υδρογραφικό δίκτυο να γίνεται πυκνότερο. Σε σχηματισμούς περατούς όπως είναι οι ασβεστόλιθοι και οι κερατόλιθοι, εξαιτίας της παρουσίας ρωγμών, το υδρογραφικό δίκτυο είναι αραιότερο. Οι χείμαρροι έχουν κυρίως σχήμα «V» εξαιτίας της μεγάλης κλίσης του αναγλύφου, της έντονης τεκτονικής δράσης και του σκληρού πετρώματος. Χείμαρροι με σχήμα «U» υπάρχουν στο νότιο τμήμα της περιοχής, όπου το πέτρωμα είναι χαλαρό και η κλίση του αναγλύφου μικρότερη.

3.2.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα Κρεμαστών, δομείται από σχηματισμούς των ζωνών της «Ιονίου», του «Γαβρόβου», της «Πίνδου» και της «Υπερπινδικής» καθώς και από νεότερους σχηματισμούς (μεταλλικούς). Πιο αναλυτικά διακρίνονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, με διάταξη από τους νεότερους προς τους παλαιότερους.

Οι **Μεταλλικοί σχηματισμοί** αντιπροσωπεύονται από αλλουβιακές αποθέσεις (Al), οι οποίες αποτελούνται από κροκάλες ποικίλης διαμέτρου και ποικίλης λιθολογικής σύστασης. Απαντούν στις κοίτες των ποταμών και ρευμάτων.

Η **ζώνη της «Ιονίου»** στο χώρο έρευνας αντιπροσωπεύεται μόνο με φλύσχικά ιζήματα του ανώτερου Ηωκαίνου-Μειοκαίνου και αντιστοιχεί στην ανώτερη τεκτονική ζώνη της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα ο φλύσχος της ζώνης αυτής, αντιπροσωπεύεται μόνο από αργιλούχες μάργες. Εξαιτίας της μικρής εμφάνισης του σχηματισμού αυτού και των μη σαφών ορίων επαφής του με το φλύσχη της ζώνης Γαβρόβου, εμφανίζεται στο γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 6: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ) ενοποιημένος με τον φλύσχη Γαβρόβου.

Τα ανώτερα μέλη της **ζώνης του «Γαβρόβου»** αντιπροσωπεύονται από φλύσχη (Ft), του οποίου η απόθεση αρχίζει από το Πριαμπόνιο και τελειώνει στο τέλος του Ολιγοκαίνου, οπότε ακολουθεί οριστική ανάδυση της οροσειράς. Στην οροφή του σχηματισμού αυτού, εμφανίζονται κατά θέσεις ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι και χαρακτηριστικοί μαύροι ασβεστόλιθοι. Γενικά, όμως στα ανώτερα μέλη υπερτερούν οι ιλυώδεις, αργιλούχες μάργες έναντι των πλακωδών ψαμμιτικών στρωμάτων. Μέσα σ'αυτές διαχωρίστηκαν ψαμμιτικοί ορίζοντες και κροκαλοπαγή, αποτελούμενα κυρίως, από ψαμμιτικές και ασβεστολιθικές κροκάλες. Τα κατώτερα μέλη αποτελούνται από αδρόκοκκους έως λεπτόκοκκους ψαμμίτες, με λίγες παρεμβολές αργιλούχων μαργών. Κατά τόπους, παρατηρούνται μικρές φακοειδείς ενδιστρώσεις κροκαλοπαγών. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα του σχηματισμού αυτού είναι η σημαντική ανάπτυξη των κροκαλοπαγών, τα οποία πολλές φορές σχηματίζουν πάγκους πάχους μεγαλύτερου των 2 m. Ακόμα μέσα στην μάζα των ιλύολιθων, διαπιστώθηκε η παρουσία, σε μια τυχαία πυκνότητα και διασπορά, ημιστρογγυλωμένων ή καλά στρογγυλωμένων ασβεστολιθικών ή κερατολιθικών κροκαλών ή χαλικιών. Κάτω από το φλύσχη της ζώνης «Γαβρόβου» ακολουθεί μία ανθρακική σειρά ηωκαινικής ηλικίας. Υποκείμενοι των ηωκαινικών ασβεστολιθών εμφανίζονται οι κρητιδικοί ασβεστόλιθοι οι οποίοι είναι κατά θέσεις δολομιτωμένοι (Kg).

Τα ανώτερα μέλη της ζώνης της «Πίνδου» αντιπροσωπεύονται από την απόθεση του νεότερου φλύσχη ψαμμιτομαργαϊκού τύπου ή «δεύτερου φλύσχη» (F₀), του οποίου η ιζηματογένεση αρχίζει κατά το Δάνιο και συνεχίζεται στο Τριτογενές, μέχρι το ανώτερο Ηώκαινο - κατώτερο Ολιγόκαινο. Είναι ο κυρίως φλύσξης, ο πιο τυπικός και αντιπροσωπευτικός του ελληνικού χώρου με ρυθμικές εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, μαργών και ασβεστολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Τοπικά αναγνωρίστηκαν φακοειδείς ενδιαστρώσεις κροκαλοπαγών, μικρού πάχους. Επίσης μέσα στα αργιλοψαμμιτικά ιζήματα του φλύσχη, εμφανίζονται συχνά όγκοι ολισθολίθων με διαστάσεις από λίγα εκατοστά μέχρι πολλά μέτρα. Τα ανώτερα στρώματα σχηματίζουν ένα τύπο άγριου φλύσχη, εξαιτίας της άφιξης των πιο εσωτερικών καλυμμάτων. Στη βάση του φλύσχη οι ψαμμίτες είναι αδρόκοκκοι, χωρίς παρεμβολές αργιλιτών, με πάχος των πάγκων τους μέχρι και 4 m. Κύριο χαρακτηριστικό του φλύσχη της «Πίνδου» είναι οι πτυχωμένες εικόνες που παρουσιάζει σε πολλές θέσεις.

Η βάση του φλύσχη της ζώνης «Πίνδου» αντιπροσωπεύεται από τα στρώματα μετάβασης (εναλλαγές πλακωδών ασβεστολίθων, με ψαμμίτες και αργιλίτες) και ακολουθεί η ανθρακική ιζηματογένεση με εναλλαγές των πελαγικών πλακωδών ασβεστολίθων, με κερατολιθικές ενδιαστρώσεις, κυανού, πράσινου, καστανού, ερυθρού και μαύρου χρώματος και αργιλικούς σχιστόλιθους. Η ακολουθία αυτή αρχίζει από το Τριαδικό και τελειώνει το Κρητιδικό (K_p).

Η «Υπερπινδική ζώνη» εμφανίζεται με πολύ μικρή έκταση και βρίσκεται στα ανατολικά της ζώνης «Πίνδου», αποτελείται από πολυπτυχωμένους και μικρολατυποπαγείς ασβεστολίθους (K_y). Στην ζώνη αυτή περιλαμβάνονται επίσης σχηματισμοί του Λιασίου - Τιθωνίου, οι οποίοι διακρίνονται σε ασβεστολιθικούς και σε κερατολιθικούς ορίζοντες.

3.2.4 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι η λεκάνη απορροής δομείται κυρίως από φλυσχικά ιζήματα και ασβεστόλιθους. Ως προς την υδρογεωλογία οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζουν τα παρακάτω φυσικά και υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά. Τα στοιχεία προέρχονται από τον Υδρολιθολογικό Χάρτη της Ελλάδας που συντάχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας» [Υπουργείο Ανάπτυξης, 1996].

Ο φλύσξης γενικά είναι γεωλογικός σχηματισμός με σημαντική διαβρωσιμότητα ενώ αντίθετα μικρή διαβρωσιμότητα σε σχέση με την παραγωγή φερτών υλικών για αιώρηση εμφανίζει ο ασβεστόλιθος. Πιο συγκεκριμένα, οι Κουτσογιάννης και Ταρλά [1987] κατέταξαν τους εδαφικούς σχηματισμούς ανάλογα με τη διαβρωσιμότητά τους με ένα εμπειρικό μέτρο που ονομάστηκε συντελεστής διαβρωσιμότητας, κ . Ο συντελεστής αυτός για φλύσχη ορίστηκε στην τιμή $\kappa_1 = 1$ ενώ για τους ασβεστόλιθους ορίστηκε στο $\kappa_3 = 0.1$.

Ο φλύσξης Γαβρόβου παρουσιάζει υψηλή υδροπερατότητα, η οποία όμως εξαρτάται από τη λιθολογική σύσταση, το βαθμό τεκτονισμού, το υδρογεωλογικό καθεστώς και τη θέση του σχηματισμού στις κοιλάδες των ποταμών. Τα σκληρά πετρώματα του σχηματισμού αυτού (κροκαλοπαγή και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι), όταν βρίσκονται σε υγιή κατάσταση παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή και υδροπερατότητα. Η μεγάλη υδροπερατότητα των σκληρών πετρωμάτων του φλύσχη, οφείλεται στην ύπαρξη ρηγμάτων και στο μέγεθος και στη πυκνότητα των διακλάσεων. Οι ιλύολιθοι είναι υδατοστεγείς σχηματισμοί και λόγω της έντονης παρουσίας ιλύτη και αργιλικών στοιχείων, παρουσιάζουν μεγάλη σχετικά ανθεκτικότητα στη διάβρωση.

Ο φλύσσης της Πίνδου παρουσιάζει έντονα ίχνη τεκτονικών παραμορφώσεων (π.χ. πτυχές, διαρρήξεις, αναστροφές) ενώ συχνά χαρακτηρίζεται από έκδηλη αστάθεια που συνδέεται κυρίως με συχνές ετερογενείς επαφές των στρωμάτων και τις ισχυρές κλίσεις αυτών σε συνδυασμό με το έντονο ανάγλυφο και τη δράση του νερού.

Ο ασβεστόλιθος απαντά συχνότερα στη λεκάνη απορροής των υπόλοιπων κύριων υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών και γενικά χαρακτηρίζεται από μέτρια διαβρωσιμότητα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ασβεστόλιθων: Ο ασβεστόλιθος του Γαβρόβου ο οποίος παρουσιάζει μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζει έντονη καρστικοποίηση, λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που ποικίλλει μεταξύ ασβεστολίθων και δολομιτών. Η συνήθως μεγάλη επιφανειακή τους ανάπτυξη, η έντονη τεκτονική τους καταπόνηση, η λιθολογική τους σύσταση και η στρωματογραφική τους δομή συντελούν στην ανάπτυξη πορώδους ρωγμών και ασυνεχειών (δευτερογενές πορώδες), με αποτέλεσμα η υδροπερατότητα τους να κυμαίνεται από μέτρια έως υψηλή. Η μεγάλη επιφανειακή τους εξάπλωση ευνοεί την ανάπτυξη εκτεταμένων καρστικών συστημάτων. Ανάλογα με την τεκτονική δομή των καρστικών συστημάτων δημιουργούνται επιμέρους υδρογεωλογικές ενότητες, που μπορεί να εκφορτίζονται σε διαφορετικά επίπεδα. Σε πολλές περιπτώσεις τα καρστικά συστήματα εκφορτίζονται με πηγές υπερπλήρωσης (εσωτερικές λεκάνες) ή με πηγές οι οποίες εκβάλλουν μέσα στις λίμνες (π.χ. Τριγωνίδα).

Η ανθρακική ακολουθία της ζώνης της Πίνδου είναι περιορισμένης ανάπτυξης και κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν μέτρια καρστικοποίηση, λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που περιορίζεται εξαιτίας των εναλλαγών με ημιπερατούς και σχετικά μη περατούς σχηματισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή του υπόγειου νερού να ελέγχεται από τις παρεμβολές των σχετικά μη περατών σχηματισμών (φλύσσης, σχιστόλιθοι, κερατόλιθοι) και από τις μεγάλες τεκτονικές γραμμές (εφιππεύσεις, λεπιώσεις). Χαρακτηριστικό των περιοχών με ανάπτυξη αυτού του τύπου καρστικών σχηματισμών είναι η ανάπτυξη επιμήκων υδρογεωλογικών λεκανών με εμφάνιση πολλών πηγών, κυρίως επαφής, σε διαφορετικά υψόμετρα και η ανάπτυξη υπό πίεση υδροφορέων λόγω της τεκτονικής δομής τους, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην κίνηση του υπόγειου νερού.

3.2.5 Γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά

Η τεκτονική δράση αφενός ευθύνεται για την ανύψωση μιας περιοχής (απότομες κλίσεις των κλιτύων), ευνοώντας τη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου, αφετέρου με την καταπόνηση των πετρωμάτων και τη δημιουργία ρωγμών και διακλάσεων, ευνοεί τις αποσθρωτικές-διαβρωτικές διεργασίες, συντελώντας έτσι στην ταπείνωση του αναγλύφου. Για τους πιο πάνω λόγους είναι απαραίτητη η γνώση των τεκτονικών γεγονότων που έχουν επιδράσει στους λιθολογικούς σχηματισμούς της περιοχής έρευνας.

Η τεκτονική εικόνα της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών δείχνει να επικρατούν δύο κύριες διευθύνσεις, (α) ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνσης, που είναι οι καλυμματικές δομές και τα κανονικά ρήγματα, και (β) ΑΒΑ-ΔΝΔ διεύθυνσης, που είναι τα κανονικά ρήγματα και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, τα οποία έπονται των ρηγμάτων ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνσης.

Σε περιοχές όπου απαντώνται σχηματισμοί της ζώνης Γαβρόβου επικρατούν μεγάλα κατακόρυφα ρήγματα και πτυχές μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας. Η τεκτονική αυτή δομή δίνει μια ήρεμη

εικόνα (απουσία συνεχών επιπεύσεων, λεπιώσεων κ.λ.π.), γεγονός που έχει ευνοϊκή επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος. Σε περιοχές όπου απαντάται η ανθρακική ακολουθία της ζώνης Πίνδου με εναλλαγές κερατολίθων, αργιλικών σχιστολίθων και κλαστικών ιζημάτων, οι συχνές λιθολογικές εναλλαγές και η έντονη τεκτονική που έχουν υποστεί τα πετρώματα αυτά, έχουν επηρεάσει τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων της ζώνης αυτής, υποβαθμίζοντας την ποιότητά τους. Οι διακλάσεις αποτελούν την κυριότερη αιτία που οι γεωλογικοί αυτοί σχηματισμοί υποβαθμίζονται ποιοτικά, ιδίως τα άκαμπτα μέλη τους, όπως είναι οι ασβεστόλιθοι.

Τέλος αν και ο φλύσχος της Πίνδου είναι έντονα τεκτονισμένος, λόγω του εύκαμπτου χαρακτήρα του σχηματισμού αυτού και των παρατηρούμενων γεωλισθήσεων, οι τεκτονικές επιδράσεις δεν είναι τόσο εμφανείς όσο στην ανθρακική ακολουθία της ζώνης αυτής. Κατολισθήσεις με θραύση εμφανίζονται στα σκληρά μέλη του φλύσχη, όπως είναι οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή.

3.2.6 Χρήσεις γης

Το σημαντικότερο τμήμα της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών αποτελείται από δάση κωνοφόρων δέντρων ενώ η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει παραμείνει σε μικρά επίπεδα, λόγω του πολύ χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης της περιοχής. Οι χρήσεις γης παρουσιάζονται στους αντίστοιχους χάρτες που αντλήθηκαν από τη μελέτη με τίτλο «*Συνολική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκτροπής Αχελώου*» για λογαριασμό της ΕΥΔΕ Αχελώου [1995]. Ο προσδιορισμός των χρήσεων γης έγινε με επεξεργασία δορυφορικών εικόνων (Landsat), με διακριτική ικανότητα 100 m×100 m και επιβεβαιώθηκαν με επιτόπιες παρατηρήσεις από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας (ΟΚΧΕ). Η εργασία αυτή ολοκληρώθηκε το 1994 ενώ η ταξινόμηση των χρήσεων γης έγινε με βάση τις προδιαγραφές των προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine – Land use. Στο Πίνακα 5 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΠΙΝΑΚΕΣ) παρουσιάζονται οι επεξηγήσεις των κωδικών των χρήσεων γης, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας..

3.2.7 Τοπογραφία

Τα δεδομένα τοπογραφίας της λεκάνης απορροής έχει προέλθει από την ψηφιοποίηση των χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) σε κλίμακα 1:50000 και 1:100000. Οι λεκάνες απορροής των κύριων ποταμών (Αχελώου, Αγραφιώτη, Μέγδοβα και Τρικεριώτη) στη θέση του ταμιευτήρα καθώς και οι λεκάνες απορροής στη θέση μέτρησης των παροχών και των στερεοπαροχών (Αχελώος στη θέση Αυλάκι, Αχελώος στη θέση Μεσοχώρα, Αγραφιώτης στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας και Τρικεριώτης στη θέση Γέφυρα Γερομπόρου) έχουν χαραχτεί στους χάρτες με κλίμακα 1:50000. Το υδρογραφικό δίκτυο των λεκανών απορροής καθώς και οι ισούψείς καμπύλες προήλθαν από την ψηφιοποίηση των χαρτών σε κλίμακα 1:100000.

Με βάση τους χάρτες αυτούς δημιουργήθηκαν τα Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου των λεκανών απορροής με διάσταση κανάβου 200 m. Επίσης μέσω των εφαρμογών του προγράμματος ARCINFO [ESRI, 1991a] σχεδιάστηκαν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής και συγκεκριμένα η επιφάνεια, η μέση κλίση, το μέσο υψόμετρο, το μήκος της κύριας μισγάγγειας, καθώς και το μήκος και η πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου.

4 Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών

4.1 Μέθοδοι υδρογραφικής αποτύπωσης ταμιευτήρων.

Η μέθοδος της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα των Κρεμαστών υπαγορεύτηκε ουσιαστικά από τις ανάγκες της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή των Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου. Δηλαδή η μέθοδος της υδρογραφικής αποτύπωσης του πυθμένα ενός ταμιευτήρα ουσιαστικά επιλέγεται με βάση το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η σημαντική επιστημονική πρόοδος στον τομέα της υδρογραφίας έχει δώσει στους ερευνητές πολλά περιθώρια για την όσο το δυνατό ακριβέστερη υδρογραφική αποτύπωση των ταμιευτήρων. Τρεις είναι οι κύριες διαδικασίες για την αποτύπωση του πυθμένα ενός ταμιευτήρα. (α) Η «εν ξηρώ» αποτύπωση, (β) η υδρογραφική αποτύπωση και γ) ένας συνδυασμός των προηγούμενων.

Στην «εν ξηρώ» αποτύπωση ουσιαστικά ο ταμιευτήρας αδειάζει και αποκαλύπτονται οι αποθέσεις των φερτών υλικών. Έπειτα με τη χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων λαμβάνονται τα τοπογραφικά διαγράμματα του προσχωματικού πυθμένα του ταμιευτήρα. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη των τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης ώστε να γίνει η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων. Βασική όμως προϋπόθεση είναι η πλήρης εκκένωση του ταμιευτήρα, η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι αδύνατη έστω και αν η απαιτούμενη συχνότητα επαναλαμβανόμενων αποτυπώσεων είναι συνήθως 10 έτη. Στην περίπτωση του ταμιευτήρα των Κρεμαστών για ευνόητους λόγους είναι αδιανόητη η σκέψη για πλήρη εκκένωση του ταμιευτήρα.

Στις πλείστες των περιπτώσεων που ο ταμιευτήρας είναι μόνιμως σε λειτουργία και παρουσιάζει αποθηκευτικό όγκο, η υδρογραφική αποτύπωση εμφανίζεται ως η μοναδική αξιόπιστη λύση. Η υδρογραφική αποτύπωση είναι μια εξ αποστάσεως μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί σύγχρονα και εξελιγμένα όργανα και μεθοδολογίες για τη μέτρηση του βάθους του πυθμένα από την επιφάνεια του ταμιευτήρα και την ταυτόχρονη καταγραφή της θέσης πάνω στον ταμιευτήρα. Η καταγραφή του στίγματος γίνεται με τη χρήση του Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού (Global Positioning System (GPS)) και η μέτρηση του βάθους γίνεται με τη χρήση ειδικών οργάνων που ονομάζονται βυθόμετρα (ηχοβολιστικά). Σε περίπτωση που το ανάντη τμήμα του πυθμένα του ταμιευτήρα έχει αποκαλυφθεί λόγω χαμηλής στάθμης τότε μπορεί να γίνει ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων.

Οι υδρογραφικές αποτυπώσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (α) μέθοδος «κατά διατομές» (range line method), και (β) ομοιόμορφη (ή ανομοιόμορφη) αποτύπωση σε ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου.

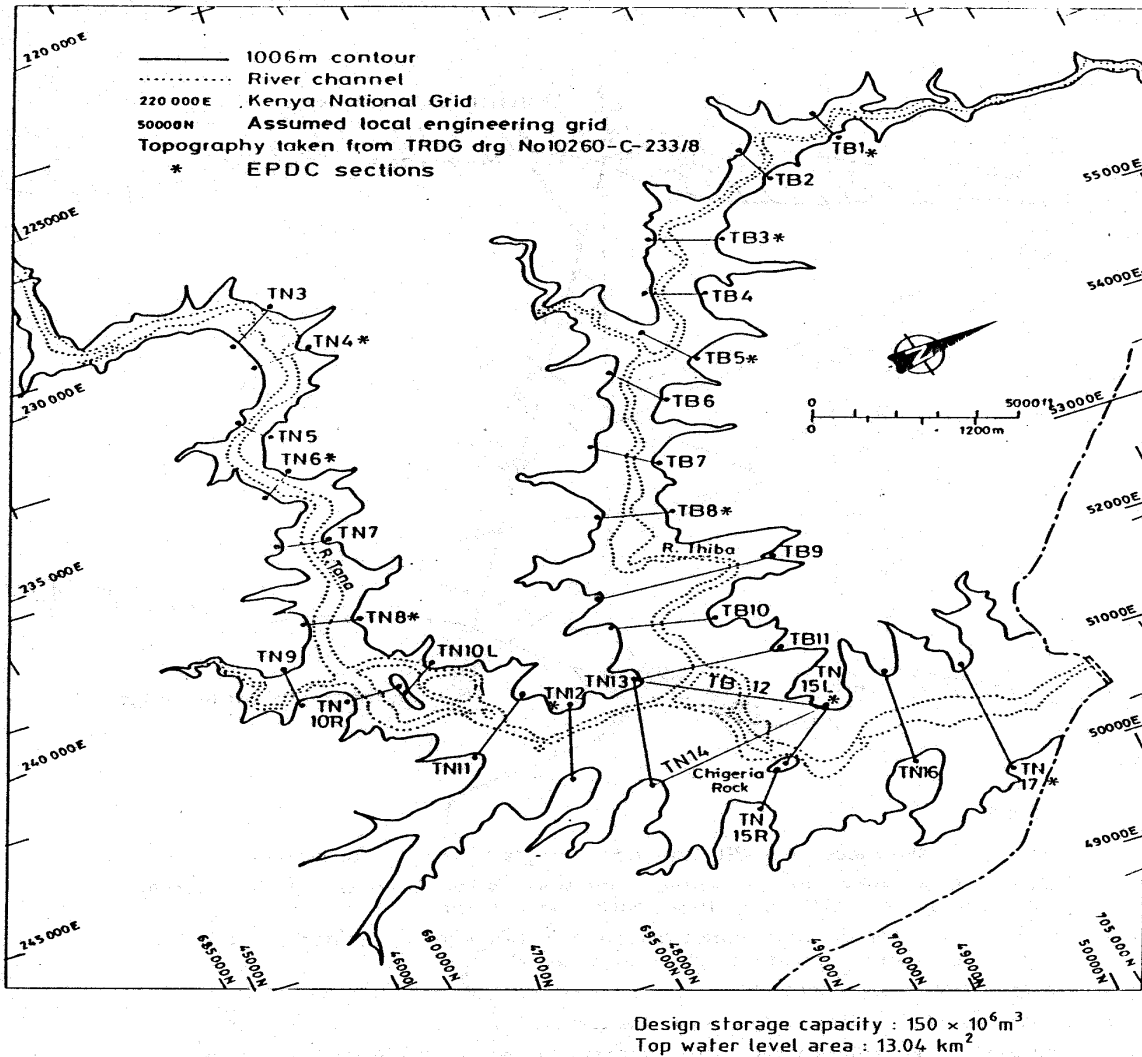
Στην «κατά τομές» μέθοδο γίνεται καταγραφή του βάθους του ταμιευτήρα μόνο σε γραμμές πλεύσεις (ή βολιστικές γραμμές) κάθετες στην αρχική κοίτη του ποταμού. Οι τοπογραφικές εργασίες αποσκοπούν στον προσδιορισμό των τομών αυτών, της μεταξύ τους απόστασης και του συνολικού τους αριθμού. Η μέθοδος αυτή επιλέγεται όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες σύγχρονες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της θέσης στον ταμιευτήρα (π.χ. Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού), όταν το σχήμα του ταμιευτήρα είναι τέτοιο που να επιτρέπει τον προσδιορισμό τέτοιων τομών και τέλος όταν ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων μπορεί να προκύψει από απλές μαθηματικές σχέσεις και δεν απαιτείται η εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών μεθόδων παρεμβολής (π.χ. βέλτιστη παρεμβολή (kriging)) στην εξαγωγή του μοντέλου του πυθμένα. Οι τομές αυτές θα πρέπει να ορίζουν τμήματα του ταμιευτήρα όσο το δυνατό ομοιόμορφα, να πυκνώνουν εκεί που αναμένονται σημαντικές αποθέσεις φερτών υλικών και να είναι κάθετες στην αρχική κοίτη του ποταμού. Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία [Lawrence, 1996], ο αριθμός των διατομών που πρέπει να αποτυπωθούν (N) προκύπτει ενδεικτικά από την Εξίσωση 15 ως συνάρτηση της επιφάνειας του ταμιευτήρα ($A \text{ km}^2$)

$$N = 14.3 A^{0.29} \quad (15)$$

Η σχέση αυτή είναι εμπειρική και δεν λαμβάνει υπόψη το σχήμα του ταμιευτήρα καθώς ένας ταμιευτήρας με ακανόνιστο σχήμα και με αρκετούς συμβάλλοντες ποταμούς θα απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό τομών σε σχέση με ένα ταμιευτήρα με ομοιόμορφο σχήμα ίσης επιφάνειας. Στο Σχήμα 13 φαίνονται οι διατομές που προσδιορίστηκαν για την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα Kamburu στην Κένυα.

Ο προσδιορισμός του όγκου των αποθέσεων με τη μέθοδο «κατά τομές» είναι απλή με τη χρήση κυρίως των παραλλαγών της μεθόδου του τραπεζίου. Οι κύριες μέθοδοι υπολογισμού του όγκου είναι η μέθοδος του σταθερού συντελεστή (constant factor method) [Burrell, 1951] και της διαφοροποίησης στάθμης – εύρους (stage width modification method) [Lea, 1991]. Με την εξέλιξη των μεθόδων προσδιορισμού θέσης, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε πολύ μικρούς ταμιευτήρες ή στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου το κόστος για μια σύγχρονη υδρογραφική αποτύπωση είναι συνήθως υπέρογκο.

Η αποτύπωση με σκοπό τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου μπορεί να βασιστεί είτε σε χωρικά ομοιόμορφη είτε σε ανομοιόμορφη αποτύπωση. Στη περίπτωση της ανομοιόμορφης αποτύπωσης μπορεί να γίνει πύκνωση των γραμμών πλεύσης της αποτύπωσης του ταμιευτήρα σε περιοχές που ενδιαφέρουν περισσότερο λόγω ενδεχόμενης σημαντικής απόθεσης φερτών υλικών (π.χ. δελταϊκές αποθέσεις). Η μέθοδος αυτή δίνει πολύ μεγάλη ακρίβεια, επιτρέπει την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του πυθμένα με τη χρήση εξελιγμένων μεθόδων παρεμβολής για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης, είναι ανεξάρτητη της μορφής του ταμιευτήρα και επιτρέπει την πύκνωση των γραμμών πλεύσης σε περιοχές σημαντικού ενδιαφέροντος.



Σχήμα 13: Η «κατά τομές» υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα Kamburu, Κένυα.

4.2 Αναλυτική περιγραφή της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Για την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα των Κρεμαστών επιλέχθηκε η μέθοδος της δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου του πυθμένα του ταμιευτήρα. Η σάρωση του ταμιευτήρα έγινε με βάση προκαθορισμένες πρωτεύουσες βολιστικές γραμμές, που είχαν σχεδιαστεί από πριν με βάση την επιθυμητή ακρίβεια του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου που θα προκύψει. Η ισοάπσταση των πρωτεύουσών βολιστικών γραμμών εξαρτάται από το τμήμα του ταμιευτήρα που αποτυπώνεται κάθε φορά. Για παράδειγμα, σε ένα στενό τμήμα των εκβολών των ποταμών στον ταμιευτήρα η ισοάπσταση μπορεί να είναι έως 50 m ενώ στο εσωτερικό τμήμα του ταμιευτήρα η απόσταση αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη ενώ παραμένει γύρω στα 100 με 150 m πάνω από τις αρχικές κοίτες των ποταμών που αναμένεται να συγκεντρώνουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των αποθέσεων. Στην Εικόνα 8, (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ),

παρουσιάζονται όλες οι βολιστικές γραμμές της υδρογραφικής βάρκας που διενεργήθηκαν για την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα.

Οι πρωτεύουσες βολιστικές γραμμές έγιναν κατά την έννοια της διάστασης του μήκους δηλαδή παράλληλα στις όχθες για τα ποτάμια και προσανατολισμένες στη μεγάλη διάσταση για κάθε επιμέρους τμήμα του κεντρικού ταμιευτήρα. Επιπροσθέτως, για την καλύτερη αξιοποίηση της πληροφορίας των πρωτευουσών γραμμών διενεργήθηκαν και δευτερεύουσες γραμμές ελέγχου σε διεύθυνση 45° ως προς τις πρωτεύουσες βολιστικές γραμμές.

Οι μετρήσεις του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών του ταμιευτήρα έγιναν σε δύο στάδια: Στο πρώτο στάδιο (από 27/7/1998 έως 3/8/1998) έγινε η υδρογραφική αποτύπωση των ανάντη τμημάτων του ταμιευτήρα, δηλαδή των εκβολών των ποταμών Αχελώου, Αγραφιώτη και Μέγδοβα, στα τμήματα των οποίων αναμένεται η ύπαρξη αποθέσεων μεγάλου πάχους από χονδρόκοκκα φερτά υλικά, όπως τεκμηριώθηκε στην Παράγραφο 2.5. Στο δεύτερο στάδιο (από 6/6/1999 έως 26/6/1999) έγινε η υδρογραφική αποτύπωση του κεντρικού τμήματος του ταμιευτήρα στον οποίον αναμένεται η απόθεση των πιο λεπτόκοκκων υλικών καθώς και του ανάντη τμήματος στις εκβολές του π. Τρικεριώτη. Επίσης διενεργήθηκαν μετρήσεις το Σεπτέμβριο του 1998, οι οποίες όμως διακόπηκαν λόγω ακατάλληλων και επικίνδυνων για την ασφάλεια των ερευνητών καιρικών συνθηκών. Η διαδικασία των μετρήσεων συνίσταται σε δύο φάσεις, οι οποίες είναι (α) ο εντοπισμός θέσης και (β) η καταγραφή του αντίστοιχου βάθους. Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μια απλή βάρκα πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν όλα τα αναγκαία όργανα και συγκεκριμένα ο δορυφορικός δέκτης GPS, ο φορητός υπολογιστής, το βυθόμετρο και η ιθυντήρια πυξίδα.

4.2.1 Εντοπισμός θέσης

Ο εντοπισμός θέσης έγινε με τη χρήση του Διαφορικού Συστήματος Δορυφορικού Εντοπισμού (Differential Global Positioning System (DGPS)). Στο κείμενο αυτό δεν γίνεται περισσότερη αναφορά στις τεχνικές του δορυφορικού εντοπισμού. Για περισσότερες πληροφορίες γενικά σε θέματα δορυφορικού εντοπισμού, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει σε πολλές και πλούσιες αναφορές [π.χ. *Παραδείσης*, 1992; *Seeber*, 1993; *Hofmann – Wellenhof et al.*, 1994; *Leick*, 1995]. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τον κινούμενο δέκτη και το σταθμό αναφοράς.

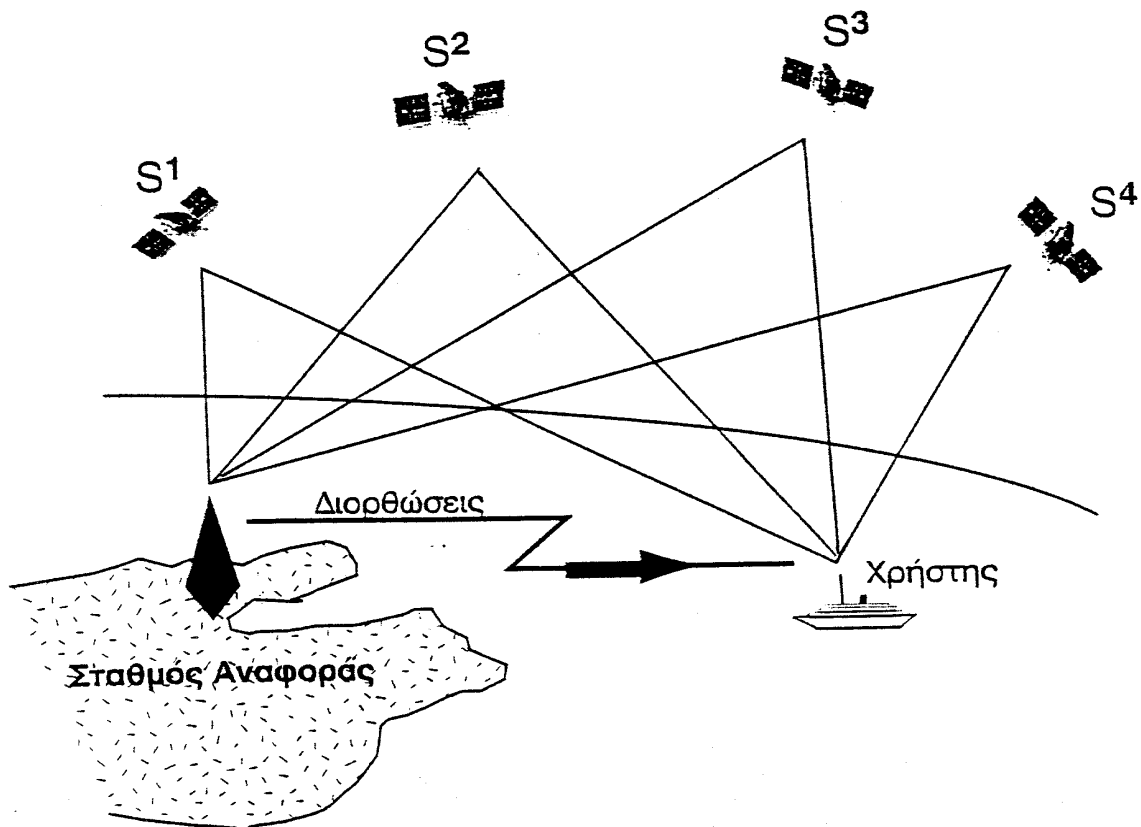
Ο κινούμενος δέκτης είναι ο Trimble SVeeSix XT Plus με έξι κανάλια επικοινωνίας, ο οποίος μετρά ψευδοαποστάσεις κώδικα C/A⁵ και απόκλιση συχνότητας Doppler στη φέρουσα συχνότητα L1⁶. Η ακρίβεια του δέκτη σε απόλυτο εντοπισμό θέσης με επιλεκτική διαθεσιμότητα είναι 100 m σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ο δέκτης αυτός κάνει μετρήσεις ανά ένα δευτερόλεπτο, οι οποίες αυτόματα καταγράφονται στο φορητό υπολογιστή (Φωτογραφία 6, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ).

Ο σταθμός αναφοράς είναι ο Trimble 4000 Reference Locator (RL) με δώδεκα κανάλια επικοινωνίας και μετρά ψευδοαποστάσεις κώδικα C/A και απόκλιση συχνότητας Doppler στη φέρουσα συχνότητα L1. Το σύστημα αυτό κάνει μετρήσεις ανά ένα δευτερόλεπτο και οι διορθώσεις του κινούμενου δέκτη από το σταθμό βάσης γίνονται εκ των υστέρων. Ο σταθμός

⁵ C/A (Coarse/Acquisition)

⁶ 1575.42 MHz

αναφοράς έχει τοποθετηθεί σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες και γνωρίζει τις συντεταγμένες των δορυφόρων από τις εκπεμπόμενες εφημερίδες των τροχιών και επομένως την απόσταση δέκτη – δορυφόρου. Ο σταθμός αναφοράς τότε υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ αυτής της πραγματικής απόστασης και της μετρημένης και καταγράφει αυτήν ως διόρθωση για κάθε δορυφόρο. Ο σταθμός αναφοράς τοποθετήθηκε στο δώμα του ξενώνα του οικισμού της ΔΕΗ στα Κρεμαστά (Φωτογραφία 7, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ) σε τοπογραφικό σημείο ενταγμένο στο κρατικό τριγωνομετρικό δίκτυο, οι συντεταγμένες του οποίου βρέθηκαν στο τοπογραφικό διάγραμμα του οικισμού. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια του διαφορικού συστήματος εντοπισμού είναι 2-5 m σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με επιλεκτική διαθεσιμότητα. Λόγω μη επαρκών οικονομικών πόρων και του έντονου αναγλύφου της περιοχής του ταμειυτήρα, δεν κατέστη δυνατή η ενδο-επικοινωνία (link) μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του κινούμενου δέκτη ώστε οι διορθώσεις που καταγράφει ο σταθμός αναφοράς να μεταφέρονται αυτόματα και στον κινούμενο δέκτη. Αυτό πρακτικά έχει ως συνέπεια την αδυναμία πλοήγησης της υδρογραφικής βάρκας σε ήδη προδιαγεγραμμένες πορείες σε πραγματικό χρόνο (real time navigation) με μεγάλη ακρίβεια λόγω της επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Οι συνέπειες αυτού του περιορισμού είναι ότι σε γενικές γραμμές είναι αδύνατο να διατηρηθεί σταθερή η απόσταση μεταξύ δύο παράλληλων βολιστικών γραμμών σε όλο το μήκος τους. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η εφαρμογή του Διαφορικού Συστήματος Δορυφορικού Εντοπισμού στην υδρογραφία.



Σχήμα 14: Τυπική διάταξη Διαφορικού Συστήματος Δορυφορικού Εντοπισμού με πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο [Ζησόπουλος και Παραδείσης, 1999].

Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται σε παρόμοιες περιπτώσεις είναι η εκ των υστέρων σχεδίαση των γραμμών πλεύσης με τα διορθωμένα πλέον στίγματα σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα υπολογιστή (π.χ. AutoCAD) και η αξιολόγηση της επιχείρησης με βάση το προαποφασισμένο πρόγραμμα σάρωσης του ταμιευτήρα για τη συγκεκριμένη ημέρα. Η ύπαρξη ενδοεπικοινωνίας μεταξύ του σταθμού αναφοράς και του κινούμενου δέκτη για την πλοήγηση του υδρογραφικού σκάφους σε πραγματικό χρόνο προϋποθέτει την επιπλέον στελέχωση του υδρογραφικού συνεργείου και επιπλέον εξοπλισμού, το κόστος του οποίου δεν μπορούσε να καλυφτεί από τους ανεπαρκείς πόρους του ερευνητικού προγράμματος. Σε κάθε περίπτωση η υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα είναι πολύ ικανοποιητική και αντιστοιχεί σε διάφορες διεθνείς προδιαγραφές. Στο ψηφιακό δίσκο που συνοδεύει την τελική έκθεση φαίνεται το σύνολο των βολιστικών γραμμών και των γραμμών ελέγχου που διενεργήθηκαν (σε αρχείο AutoCAD). Η σάρωση του ταμιευτήρα είναι πολύ ικανοποιητική για τους στόχους του υπόψη προγράμματος. Σε περιοχές χωρίς κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη αποθέσεων (π.χ. μικρά βάθη κοντά στις όχθες του κυρίως ταμιευτήρα) προτιμήθηκε μια γενικά αραιή σάρωση με αντιστάθμιση την πυκνωση της σάρωσης σε περιοχές με μεγαλύτερο ενδιαφέρον από πλευράς αποθέσεων φερτών υλικών. Ειδικότερα σε παρόχθιες περιοχές του κεντρικού τμήματος του ταμιευτήρα η σάρωση ήταν ιδιαίτερα αραιή καθώς δεν ενδιαφέρουν οι αποθέσεις που έχουν προκύψει από τη διάβρωση των οχθών του ταμιευτήρα, και οι οποίες δεν πρέπει να συνυπολογιστούν στο τελικό εξαγόμενο.

Το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του ταμιευτήρα καταγράφεται δύο φορές την ημέρα (στις 07:00 και 24:00) από το ηλεκτρονικό σταθμήμετρο που έχει εγκαταστήσει και λειτουργεί η ΔΕΗ δίπλα στη θέση του φράγματος. Σε περίπτωση που παρατηρείται σημαντική μεταβολή στη στάθμη του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της ημέρας, με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται η στάθμη σε χρονικό βήμα μιας ώρας ώστε να επιμεριστεί το σφάλμα από τη μεταβολή της στάθμης. Με γνωστή τη στάθμη του ταμιευτήρα υπολογίζονται οι ισοβαθείς σε απόλυτο υψόμετρο ώστε να γίνει αργότερα η σύγκριση μεταξύ των δύο ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου.

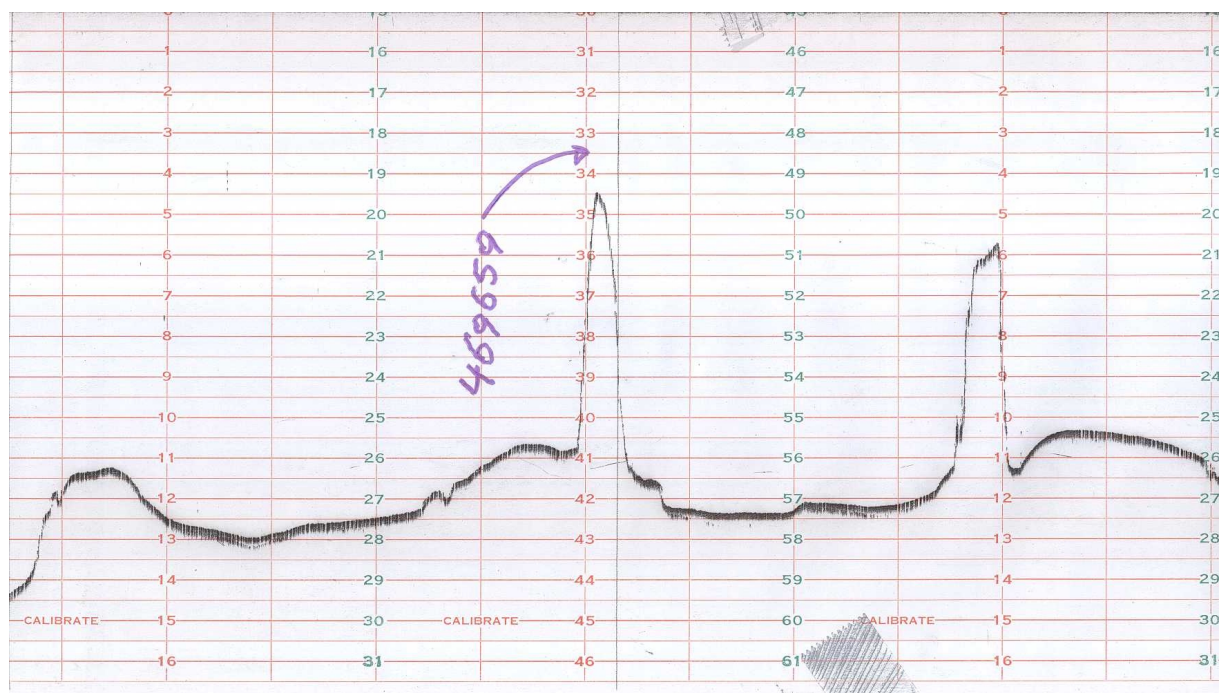
4.2.2 Καταγραφή του βάθους

Η βυθομετρία, δηλαδή η καταγραφή του βάθους του πυθμένα του ταμιευτήρα, είναι η δεύτερη σημαντική παράμετρος για την επιτυχημένη ολοκλήρωση μιας υδρογραφικής αποτύπωσης. Οι συσκευές, οι οποίες μετατρέπουν το χρόνο που χρειάζεται ένας ηχητικός παλμός να διανύσει την απόσταση από τον προβολέα της συσκευής μέχρι τον πυθμένα και να επιστρέψει με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό, σε βάθος ονομάζονται ηχοβολιστικά. Οι ηχοβολιστικές συσκευές λειτουργούν κυρίως σε συχνότητες από 10 – 300 kHz. Τα υψίσυχνα ηχοβολιστικά (>20 kHz) (echo-sounders) χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση των μικρών βαθών (<200 m) ενώ καταγράφουν επιστροφή σήματος και από τις χαλαρές αποθέσεις λεπτόκοκκων φερτών υλικών (π.χ. ιλύς). Τα ηχοβολιστικά αυτά έχουν όμως μηδενική διεισδυτική ικανότητα και δεν μπορούν να καταγράψουν ούτε τα υποκείμενα στρώματα των αποθέσεων, ούτε να δώσουν εκτιμήσεις της πυκνότητάς τους.

Ηχοβολιστικά που λειτουργούν σε πολύ μικρότερες συχνότητες είναι ικανά να καταγράψουν και τις μεταβολές της πυκνότητας των υποκείμενων στρωμάτων των αποθέσεων μέχρι και το μητρικό πέτρωμα. Λόγω της ικανότητάς τους αυτής να διαπερνούν το αρχικό επιφανειακό στρώμα ονομάζονται και τομογράφοι (sub-bottom profilers). Οι κυριότερες μορφές τομογράφων είναι: (α) οι ανιχνευτές χαλαρών ιζημάτων (Pinger) που λειτουργούν σε συχνότητες από 3.5 – 7 KHz,

έχουν διεισδυτική ικανότητα 30-50 m και διακριτική ικανότητα 0.3 m, (β) τα Boomer, που λειτουργούν σε συχνότητες από 200 Hz έως 2 KHz, έχουν διεισδυτική ικανότητα έως 150m και διακριτική ικανότητα 2m, και γ) τα Sparker, που λειτουργούν σε συχνότητες από 50 Hz – 2 KHz, έχουν διεισδυτική ικανότητα έως 1000 m και διακριτική ικανότητα 2-10 m. Διαπιστώνουμε επομένως ότι σε κάθε τύπο αποθέσεων αντιστοιχεί ένας συγκεκριμένος τύπος τομογράφου λόγω της διαφορετικής διακριτικής ικανότητας κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένας ανιχνευτής χαλαρών ιζημάτων θα είναι εντελώς αδύνατο να καταγράψει τις δελταϊκές αποθέσεις από φερτά υλικά μεγάλου μεγέθους. Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η διεισδυτική ικανότητα του τομογράφου τόσο λιγότερη είναι η διακριτική ικανότητα και επομένως η λεπτομέρεια της καταγραφής των υποκείμενων στρωμάτων. Οπότε σε ένα ταμιευτήρα που αναμένονται διαφορετικές μορφές αποθέσεων θα χρειαστούν πλέον του ενός τομογράφοι. Με δεδομένη την πολύ υψηλή τιμή αγοράς ενός τομογράφου η προοπτική αυτή δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου. Για περισσότερες πληροφορίες για τη βυθομετρία και για τις ηχοβολιστικές συσκευές ο αναγνώστης παραπέμπεται στους *Pirie* [1977]; *Φερεντίνο* [1985] και *Ingham* [1992] μεταξύ άλλων.

Η καταγραφή του βάθους του ταμιευτήρα έγινε με το υδρογραφικό βυθόμετρο Raytheon DE 719B (Φωτογραφία 8, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ) το σφάλμα μέτρησης του οποίου δίνεται από τον κατασκευαστή ίσο με $0.5\% \pm 1\text{in}$ του συνολικού βάθους και λειτουργεί στη συχνότητα των 200 kHz. Η καταγραφή του βάθους γίνεται αναλογικά σε ειδική χαρτοταινία ενώ η πρώτη επιστροφή του εκπεμπόμενου ηχητικού παλμού καταγράφει την επιφάνεια του πυθμένα με τις αποθέσεις των φερτών υλικών ανεξάρτητα από τη σύσταση και την πυκνότητά τους. Στο Σχήμα 15 φαίνεται η αναλογική καταγραφή του υδρογραφικού βυθόμετρου. Στο τμήμα αυτό το οποίο είναι η καταγραφή πάνω σε μια γραμμή ελέγχου φαίνεται καθαρά η κοίτη του ποταμού ανάμεσα στις όχθες και επίσης φαίνεται καθαρά η πολύ συγκεκριμένη επιστροφή του ηχητικού κύματος στον προβολέα του ηχοβολιστικού με αποτέλεσμα την πολύ ικανοποιητική καταγραφή του πυθμένα. Επίσης φαίνεται η μηδενική διεισδυτική ικανότητα του ηχοβολιστικού λόγω του ότι η συχνότητα λειτουργίας του (200 kHz) δεν επιτρέπει τη διείσδυση του ηχητικού παλμού κάτω από τον πυθμένα. Με μελάνι έχει σημειωθεί πάνω στην χαρτοταινία του ηχοβολιστικού ο χρόνος του Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού (GPSTime). Ο χρόνος αυτός μετρείται σε δευτερόλεπτα και συμβαδίζει με τον Greenwich Mean Time (GMT), από τον οποίο προηγείται κατά ένα συγκεκριμένο ακέραιο αριθμό δευτερολέπτων που κατά τη διάρκεια της υδρογραφικής αποτύπωσης ήταν ίσος με 12 δευτερόλεπτα. Η καταγραφή του GPSTime πάνω στην ταινία του βυθόμετρου γίνεται σε τακτά και σύντομα χρονικά διαστήματα ώστε να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία της ψηφιοποίησης των ταινιών θα ολοκληρωθεί με τα λιγότερα δυνατά σφάλματα.



Σχήμα 15: Παράδειγμα καταγραφής του υδρογραφικού βυθόμετρου Raytheon DE 719B.

Η περαιτέρω επεξεργασία της καταγραφής του βυθόμετρου περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση των ταινιών του βυθόμετρου. Η ψηφιοποίηση των ταινιών δημιουργεί αρχεία ASCII με δεδομένα χρόνου (GPST) και βάθους. Η λύση της θέσης του κινούμενου δέκτη (διορθωμένης από το σταθμό βάσης) δημιουργεί επίσης ένα αρχείο με δεδομένα χρόνου και θέσης. Η σύζευξη των δύο αυτών αρχείων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθούν τα Ψηφιακά Μοντέλα Αναγλύφου (ΨΜΑ) (Digital Terrain Models (DTM)) του πυθμένα του ταμιευτήρα στη σημερινή του μορφή. Η ψηφιοποίηση των ταινιών έγινε με χρήση του προγράμματος ARC-INFO [ESRI, 1991b].

4.3 Μεθοδολογία υπολογισμού συνολικού όγκου αποθέσεων

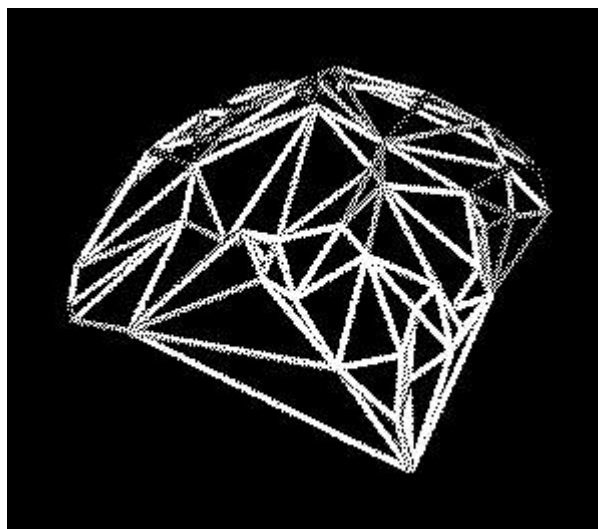
Ο όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών για όλο το διάστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα των Κρεμαστών (πλέον των 30 ετών) θα υπολογιστεί από τη σύγκριση του αρχικού υπόβαθρου του πυθμένα πριν την κατασκευή του φράγματος και του ταμιευτήρα και από το υπόβαθρο του πυθμένα της υδρογραφικής αποτύπωσης που διενεργήθηκε όπως περιγράφηκε πιο πάνω.

4.3.1 Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου υδρογραφικής αποτύπωσης

Η διαδικασία παραγωγής των ψηφιακών μοντέλων συνίσταται στη δημιουργία του αρχείου κανάβου από τα ASCII αρχεία θέσης και υψομέτρου που προέκυψαν από τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.2. Για την τελική κατασκευή των αρχείων κανάβου, είναι κρίσιμη και αποφασιστικής σημασίας η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου παρεμβολής. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος «*Triangulation with Linear Interpolation*» (Τριγωνισμός με γραμμική παρεμβολή) θεωρήθηκε ως ο καταλληλότερος γιατί επιβάλλει την επαφή της δημιουργούμενης επιφάνειας με όλα τα σημεία απόλυτου υψομέτρου που έχουν καταχωρηθεί και επιπλέον δίνει μια ομαλή και συνεχόμενη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει διαδικασία

στην οποία όλα τα αρχικά σημεία δεδομένων ενώνονται στο χώρο με ένα δίκτυο, κατά το δυνατόν ισόπλευρων τριγωνικών επιφανειών [Lawson, 1977; Koch and Link, 1980; Lee and Schachter, 1980] και στη συνέχεια διενεργεί τη γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό του κανάβου. Το αρχικό αποτέλεσμα της συνένωσης αυτών των χωρικά ακανόνιστων σημείων είναι το ονομαζόμενο Τριγωνικό Ακανόνιστο Δίκτυο (Triangular Irregular Network (TIN)). Η δημιουργία του κανάβου γίνεται με το γνωστό λογισμικό πακέτο SURFER v. 7.0 [Golden Software, 1999].

Το τριγωνικό ακανόνιστο δίκτυο απαρτίζεται από δύο βασικά στοιχεία: (α) Σημεία χωρικά ακανόνιστα με x , y , z τιμές και (β) μια σειρά από πλευρές που ενώνουν τα σημεία σε μορφή τριγώνου. Η δημιουργία του τριγωνικού δικτύου γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε: (α) Κάθε σημείο μέτρησης γίνεται κορυφή τριγώνου και (β) κάθε τρίγωνο ικανοποιεί το κριτήριο Delaunay, το οποίο αναφέρει ότι μέσα σε ένα κύκλο, που ορίζεται από τα τρία σημεία – κορυφές του τριγώνου, δεν πρέπει να περιλαμβάνεται άλλο σημείο. Αυτή η διαδικασία μεγιστοποιεί τις εσωτερικές γωνίες του τριγώνου και ελαχιστοποιεί τις μεγάλες πλευρές, γεγονός που έχει ως συνέπεια την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η εφαρμογή των TIN επιτρέπει τη διατήρηση βασικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας όπως για παράδειγμα την κλίση και τον προσανατολισμό αλλά και την αναγνώριση βασικών μορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, όπως των κοιτών των υδατορευμάτων, των όχθων των ταμιευτήρων κ.ά. Η τιμή σε τρεις διαστάσεις κάθε σημείου p το οποίο βρίσκεται στο τρίγωνο abc υπολογίζεται από γραμμική παρεμβολή στο τρίγωνο που περικλείει το σημείο p . Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται μια TIN επιφάνεια σε τρεις διαστάσεις.



Σχήμα 16: Παράδειγμα επιφάνειας TIN σε τρεις διαστάσεις.

Η διάσταση του πλέγματος του κανάβου εκτιμήθηκε μετά από διάφορες δοκιμές ίση με 6m×6m, η οποία είναι μια ικανοποιητική κλίμακα για τη μείωση του αναμενόμενου σφάλματος κατά τον υπολογισμό του όγκου των αποθέσεων.

4.3.2 Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου πριν την κατασκευή του φράγματος

Ο αρχικός πυθμένας έχει χαρτογραφηθεί για τις ανάγκες των απαλλοτριώσεων από το τότε Υπουργείο Δημοσίων Έργων (ΥΠΔΕ) με μεθόδους φωτογραμμετρίας. Οι αεροφωτογραφίες είχαν

ληφθεί προ του 1963 με κλίμακα 1:45000 ή 1:30000 (δεν υπάρχουν αναφορές). Η τοπογραφική αποτύπωση των φωτοσταθερών έγινε από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) και προέκυψαν τοπογραφικά διαγράμματα 1:5000 σε προβολή HATT. Η δημιουργία των Ψηφιακών Μοντέλων Ανάγλυφου του αρχικού πυθμένα απαιτεί την ψηφιοποίηση των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων, διαδικασία που είναι εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα. Η ψηφιοποίηση αυτή έγινε στον Τομέα Τοπογραφίας και Μελετών Οδοποιίας (ΤΤΜΟ) της ΔΕΗ/ΔΑΥΕ. Η ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων αυτών έγινε με χρήση αντίστοιχου φωτογραμμετρικού πακέτου της VTA με ψηφιοποιητή Calcomb 9100 με την λήψη ενός σημείου κάθε δέκα μέτρα περίπου. Σε περιοχές με απότομες κλίσεις γίνεται η ψηφιοποίηση μόνο των κύριων ισοϋψών αφού εκεί καλύπτεται η απαιτούμενη ακρίβεια.

Διενεργήθηκε εκτεταμένος και λεπτομερής έλεγχος των ψηφιοποιημένων τοπογραφικών διαγραμμάτων. Ο έλεγχος αυτός περιλάμβανε τα εξής στάδια: (α) Βιβλιογραφική αναζήτηση συμπληρωματικών πηγών σε ότι αφορά την αξιοπιστία των τοπογραφικών διαγραμμάτων, που προήλθαν από αεροφωτογραφίες του 1960, (β) έλεγχος των ψηφιακών δεδομένων (αρχεία AutoCAD (*.dwg) και Drawing Interchange Format αρχεία (*.dxf)), που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων, και (γ) έλεγχος των τιμών των ισοϋψών καμπυλών των παραπάνω τοπογραφικών διαγραμμάτων και συμπλήρωση αυτών σε περιπτώσεις όπου δεν υπήρχε η πληροφορία του υψομέτρου (ελάχιστες περιπτώσεις).

Η όλη διαδικασία περιγράφεται ως εξής: Από τα διανυσματικά αρχεία (π.χ. αρχεία AutoCAD) τα οποία περιέχουν τις ισοϋψείς ως polylines (δηλαδή πολυγωνικές γραμμές που σε κάθε μία αντιστοιχίζεται και ένα υψόμετρο) είναι αναγκαία η δημιουργία ενός αρχείου κανάβου (grid file) για την ίδια περιοχή που καλύπτουν και τα διανυσματικά αρχεία. Το πρώτο στάδιο για τη δημιουργία του συνολικού αρχείου κανάβου είναι η μετατροπή των διανυσματικών αρχείων DXF σε απλά αρχεία ASCII (αρχεία *.dat), μέσω κατάλληλου λογισμικού (DXF2XYZ v.1.3) [Guthrie CAD/GIS Software, 1999]. Τα αρχεία αυτά αποτελούνται από τρεις στήλες που παριστάνουν τις x, y και z συντεταγμένες για κάθε σημείο της ισοϋψούς καμπύλης μέσω της απόδοσης τιμής υψομέτρου ίδιου με την τιμή της ισοϋψούς από την οποία προέρχονται τα αντίστοιχα σημεία. Τα αρχεία αυτά εισάγονται στο γνωστό λογισμικό πακέτο SURFER v. 7.0 και δημιουργούνται βάσει της ίδιας παρεμβολής (τριγωνισμός με γραμμική παρεμβολή) αρχεία κανάβου (αρχεία *.grd) ενώ παράλληλα ενώνονται όλα τα επιμέρους διανυσματικά αρχεία σε ένα και μόνο αρχείο κανάβου για όλο τον ταμιευτήρα. Έτσι συμπερασματικά έγινε (α) η επιλογή του επιπέδου του ΨΜΑ από τα αρχεία DWG, DXF των τοπογραφικών διαγραμμάτων (πριν τη κατασκευή του φράγματος), (β) η μετατροπή των διανυσματικών αρχείων DXF σε ASCII αρχεία DAT και ενοποίηση αυτών σε ένα ενιαίο αρχείο, και (γ) η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων και απάλειψη όλων των κοινών σημείων, που είχαν δημιουργηθεί στα dxf αρχεία του Autocad στο επίπεδο του ΨΜΑ.

Τα τοπογραφικά διαγράμματα είναι αρκετά αξιόπιστα και ως προς την παραγωγή τους και ως προς την ψηφιοποίησή τους. Το σφάλμα που δικαιολογείται να υπάρχει, είναι ανάλογο της κλίμακας και είναι για τοπογραφικά διαγράμματα 1:5000, περίπου ± 1.5 m. Το μικρότερο σφάλμα εντοπίζεται σε περιοχές όπου υπάρχουν τοπογραφικές αποτυπώσεις φωτοσταθερών και το μεγαλύτερο σε περιοχές απομακρυσμένες από σημεία με τοπογραφικές αποτυπώσεις φωτοσταθερών. Γενικά όμως τα σφάλματα αυτά είναι μικρά και όχι συστηματικά (± 1.5 m), ωστόσο όμως δεν παύουν να υπάρχουν. Σε κάθε περίπτωση, τα σφάλματα αυτά είναι μέσα στα

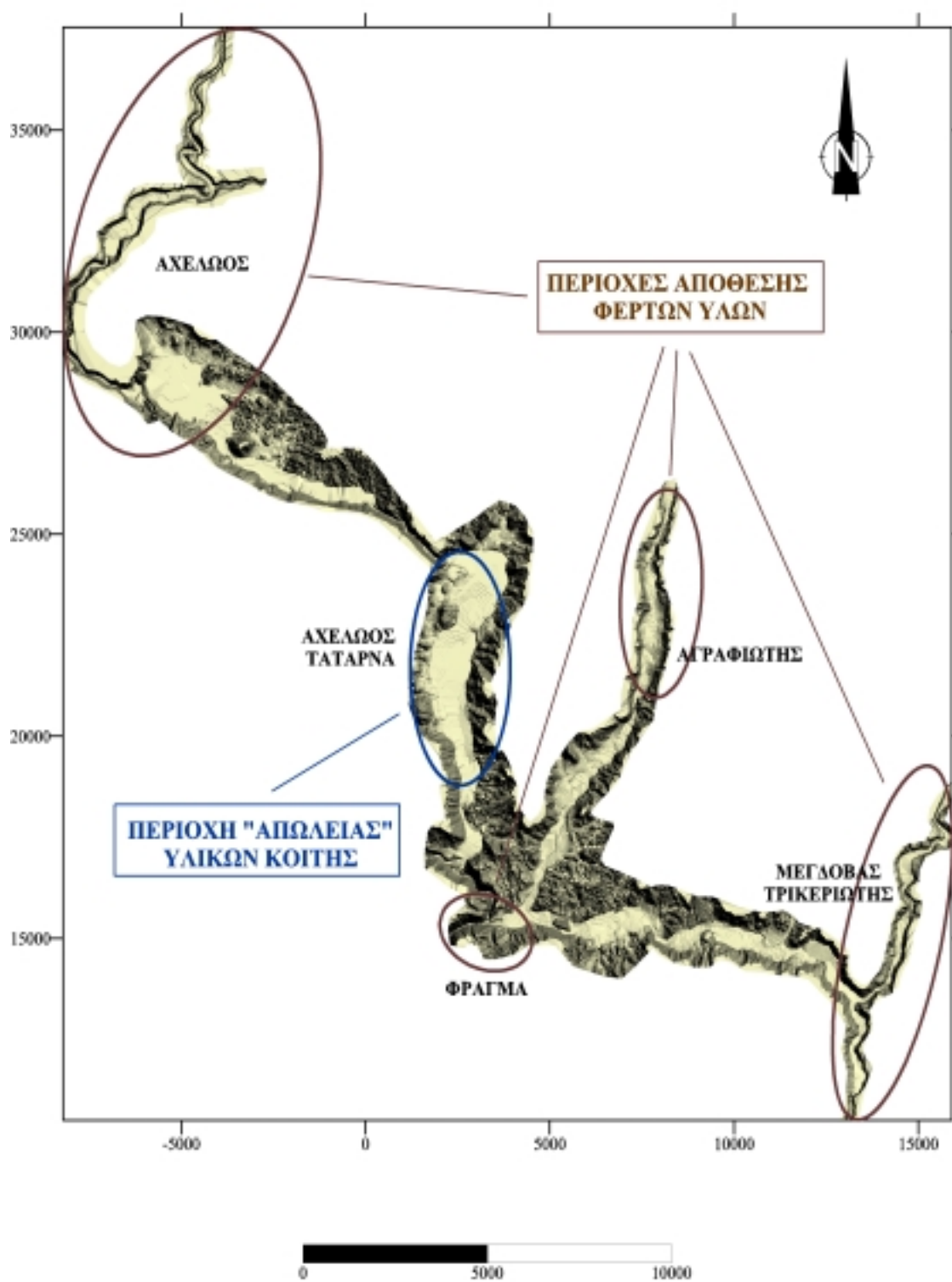
πλαίσια της επιθυμητής ακρίβειας βάσει των άλλων σφαλμάτων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του συνολικού όγκου των αποθέσεων και προέρχονται από την υδρογραφική αποτύπωση (π.χ. σφάλμα επιλεκτικής διαθεσιμότητας του GPS, σφάλμα από διακυμάνσεις στην ταχύτητα της υδρογραφικής βάρκας). Άλλωστε, το ζητούμενο δεν είναι η ακρίβεια των τοπογραφικών διαγραμμάτων αλλά η διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών που καλύπτεται από την αναφερόμενη ακρίβεια. Γενικά τα αποτελέσματα της υδρογραφικής αποτύπωσης και των τοπογραφικών διαγραμμάτων, είναι αρκετά ακριβή και αξιόπιστα.

Το ψηφιακό μοντέλο της λεκάνης κατάκλυσης του ταμιευτήρα πριν την κατασκευή του είναι μεγαλύτερο σε έκταση από το ψηφιακό μοντέλο της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους: (α) η περιοχή ενδιαφέροντος από την άποψη της εμφάνισης αποθέσεων φερτών υλικών είναι σαφέστατα μικρότερη από τη συνολική επιφάνεια του ταμιευτήρα, και (β) η μεγαλύτερη ισοϋψής στα αρχικά τοπογραφικά διαγράμματα είναι των 300 m, ενώ η υδρογραφική αποτύπωση φτάνει έως την απόλυτη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα που για τη διάρκεια της υδρογραφικής αποτύπωσης δεν ξεπερνούσε τα 274 m. Επομένως ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών, που προκύπτει από την υπέρθεση των δύο υψομετρικών μοντέλων, θα γίνει στην τομή τους, δηλαδή στην έκταση του μοντέλου της υδρογραφικής αποτύπωσης.

4.4 Παρουσίαση και ανάλυση της μεθοδολογίας υπολογισμού του όγκου αποθέσεων.

Ο συνολικός όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα θα προκύψει από την υπέρθεση των δύο ΨΜΑ και τον υπολογισμό της υψομετρικής διαφοράς τους. Εξετάζοντας μακροσκοπικά την υπέρθεση των δύο ΨΜΑ διαπιστώνουμε καταρχήν δύο σημαντικά σημεία: (α) Υπάρχουν τέσσερις διακεκριμένες περιοχές όπου εμφανίζονται σημαντικές και εκτεταμένες αποθέσεις φερτών υλικών. Οι περιοχές αυτές είναι οι εκβολές του Αχελώου, του Αγραφιώτη, του Μέγδοβα και Τρικεριώτη καθώς και η περιοχή του φράγματος. (β) Στον υπόλοιπο ταμιευτήρα όχι μόνο δεν εμφανίζονται αποθέσεις αλλά υπάρχουν περιοχές όπου εμφανίζεται ακόμα και ενδεχόμενη διάβρωση του πυθμένα. Με βάση την αντίστοιχη θεωρία που αναπτύχθηκε στην Παράγραφο 2.5, οι εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα είναι προνομιακός χώρος για την εμφάνιση αποθέσεων φερτών υλικών καθώς η μείωση και ο μηδενισμός της ταχύτητας ροής ευνοεί την απόθεση των υλικών αυτών. Η έκταση των αποθέσεων προφανώς είναι συνάρτηση της στερεοαπορροής των αντίστοιχων λεκανών απορροής, της διακύμανσης της στάθμης του ταμιευτήρα κυρίως κατά την περίοδο που εμφανίζονται τα φορτία απόπλυσης, της σύστασης των φερτών υλικών και πιθανόν της ύπαρξης ρευμάτων μέσα στον ταμιευτήρα (π.χ. ρεύματα πυκνότητας) που ευνοούν μικρομετακινήσεις κυρίως του πιο λεπτόκοκκου υλικού σε μακρό χρονικό ορίζοντα. Στον υπόλοιπο ταμιευτήρα θεωρούμε ότι είναι αναμενόμενο να μην εμφανίζονται αποθέσεις φερτών υλικών κυρίως λόγω του μεγάλου μήκους των τεσσάρων κυρίων υδατορευμάτων που καταλήγουν στον ταμιευτήρα.

ΧΑΡΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ
ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ



Σχήμα 17: Χάρτης εμφάνισης αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι περιοχές του ταμιευτήρα που εμφανίζονται αποθέσεις φερτών υλικών και οι περιοχές εκείνες που εμφανίζεται απώλεια υλικού. Για μια πιο λεπτομερή και αναλυτική επεξεργασία και έλεγχο των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν, μέσω των λογισμικών πακέτων Surfer 7.0 και Excel, 124 τοπογραφικές τομές κατά μήκος των ποταμών και της λεκάνης κατάκλυσης. Οι τομές αυτές που σχεδιάζονται εγκάρσια στην κοίτη των αρχικών υδατορευμάτων εμφανίζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ. Οι τομές αυτές παρουσιάζουν σε ενιαίο διάγραμμα τον πυθμένα του ταμιευτήρα στη σημερινή κατάσταση και σε εκείνη πριν την κατάκλυση του ταμιευτήρα. Στα διαγράμματα αυτά ο κατακόρυφος άξονας δείχνει το απόλυτο υψόμετρο και ο οριζόντιος άξονας το γεωγραφικό μήκος ή το γεωγραφικό πλάτος ανάλογα τη διεύθυνση της τομής. Παρατηρώντας όλες τις τοπογραφικές τομές διαφαίνεται, από πρώτη άποψη, μια πολύ καλή συσχέτιση του παλαιού και του σημερινού υποβάθρου με κάποιες αποκλίσεις σε ορισμένες περιοχές.

Πιο συγκεκριμένα, για τις περιοχές των εκβολών των τεσσάρων υδατορευμάτων οι τοπογραφικές τομές παρουσιάζουν μια πολύ καλή συσχέτιση με αναμενόμενες μορφές αποθέσεων και λογικά πάχη. Η κοίτη του ταμιευτήρα στα τμήματα αυτά παρουσιάζει μια κλίση που είναι σε γενικές γραμμές συμβατή με την αρχική κοίτη των ποταμών, με μια διαγραφόμενη τάση να ομαλοποιείται το ανάγλυφο λόγω των αποθέσεων. Επίσης, σε τμήματα των τομών που εξέχουν από τις αποθέσεις, το ανάγλυφο των δύο τομών σχεδόν ταυτίζεται. Επομένως μπορεί κανείς με λογική συνέπεια να συμπεράνει ότι οι τομές δείχνουν μια ρεαλιστική αναπαράσταση του υφιστάμενου πυθμένα σε σχέση με την αρχική κοίτη στα τμήματα αυτά με πολύ καλή ακρίβεια. Πράγματι στα τμήματα αυτά λόγω του ομαλού ανάγλυφου της κοίτης και κυρίως λόγω της αρκετά πυκνής διάταξης των βολιστικών γραμμών της υδρογραφικής βάρκας, η αναμενόμενη ακρίβεια είναι ικανοποιητική. Παρόλαυτά σε κάποιες περιπτώσεις, από τις παλαιές και νέες τοπογραφικές τομές, διαφαίνεται ότι υπάρχουν κάποιες μικρές οριζοντιογραφικές αποκλίσεις (π.χ. τοπογραφικές τομές 29, 32). Οι αποκλίσεις αυτές παρατηρούνται σε πολύ λίγες τοπογραφικές τομές, δεν είναι σημαντικές και δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να αποδοθούν είτε στα μη – συστηματικά και τυχαία σφάλματα που είναι αναπόφευκτα και αναλύθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους αλλά μπορεί να αποδοθούν και σε πραγματικές αιτίες. Για παράδειγμα, η κατάκλυση παλαιών κλιτύων από τα νερά του ταμιευτήρα, κυρίως σε περιοχές με σαθρούς και εύκολα διαβρώσιμους εδαφικούς σχηματισμούς, είναι δυνατό να προκαλέσει αποκόλληση σημαντικών ποσοτήτων των εδαφών αυτών, με αποτέλεσμα οι περιοχές αυτές να έχουν υποχωρήσει σε σχέση με τις παλαιότερες.

Στον υπόλοιπο κυρίως ταμιευτήρα όμως παρατηρούνται, εκτός από τις οριζοντιογραφικές αποκλίσεις και υψομετρικά σφάλματα που εκδηλώνονται με αρνητικές τιμές των αποθέσεων. Σε αντίθεση με την περιοχή των εκβολών των υδατορευμάτων, στον κυρίως ταμιευτήρα εμφανίζονται εκτεταμένες περιοχές με αρνητικές τιμές απόθεσης. Οι μεγαλύτερες τιμές αρνητικών αποθέσεων παρατηρούνται στην περιοχή της λεκάνης της Τατάρνας (βλ. Σχήμα 17), (περιοχή που περιγράφεται από την κοίτη του Αχελώου ποταμού εκατέρωθεν της γέφυρας Τατάρνας), όπως φαίνεται και από τις τοπογραφικές τομές s2-14, s_y, s_y1 και s_y2, οι οποίες κυμαίνονται με ανώτερη τιμή τα 5 m. Σε ορισμένες από τις υπόλοιπες τοπογραφικές τομές τα υψομετρικά σφάλματα είναι πολύ μικρότερα και σε άλλες σχεδόν μηδενικά. Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε πως αν και είναι πιθανή η διάβρωση κάποιων περιορισμένων περιοχών από διάφορες αιτίες, η διάβρωση σε εκτεταμένες περιοχές είναι αδύνατη και δεν μπορεί να δικαιολογηθεί.

Τρεις είναι οι κύριες αιτίες για την εμφάνιση των διαφορών αυτών: (α) Προβλήματα κατά την παρεμβολή του κανάβου του ΨΜΑ λόγω της απόστασης των βολιστικών γραμμών της υδρογραφικής βάρκας και του πολυσχιδούς ανάγλυφου του πυθμένα στην περιοχή αυτή, (β) ανακρίβειες στην υψομετρική απόδοση του αρχικού αναγλύφου, και (γ) πιθανή απόληψη υλικού από την περιοχή αυτή για την κατασκευή του φράγματος αλλά και των άλλων έργων υποδομής στην περιοχή κατά τη διάρκεια κατασκευής του φράγματος και λίγο μετέπειτα. Σε ότι αφορά τις δύο πρώτες περιπτώσεις, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, τα δύο ΨΜΑ ως προς την οριζοντιογραφία και το υψόμετρό τους είναι γενικά αξιόπιστα και ακριβή, όσο το επιτρέπουν οι συνθήκες παραγωγής τους. Στη συγκεκριμένη περιοχή και γενικά στον κυρίως ταμιευτήρα, ορισμένα υψομετρικά σφάλματα που παρατηρούνται σε περιοχές υπερυψωμένες (υβώματα) εντός της λίμνης κατάκλυσης, οφείλονται στην αδυναμία πλοήγησης της υδρογραφικής βάρκας στις περιοχές αυτές και στην αποτύπωση των περιοχών αυτών. Η απόσταση των βολιστικών γραμμών της υδρογραφικής βάρκας στην περιοχή εκείνη, για λόγους που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 4.2, ήταν περίπου 200 m κατά μέσο όρο. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα ύβωμα (λόφος), που υπήρχε πριν την κατάκλυση της λεκάνης και σήμερα είναι καλυμένο από τον ταμιευτήρα, εκτείνεται μεταξύ των δύο βολιστικών γραμμών τότε θα αποκλειστεί από το ΨΜΑ της υδρογραφικής αποτύπωσης ενώ αντίθετα εμφανίζεται στο ΨΜΑ της τοπογραφικής αποτύπωσης της λεκάνης κατάκλυσης. Επομένως, όπως παρατηρείται και στις τοπογραφικές τομές, τα ανώτερα τμήματα ορισμένων υβωμάτων δεν εμφανίζονται καθόλου στο σημερινό ΨΜΑ, ενώ αντίθετα στο παλαιό ΨΜΑ εμφανίζονται, δίνοντας έτσι σημαντικές αρνητικές τιμές απόθεσης (π.χ. τοπογραφικές τομές 23, 24, 25, 26, 27, w3, v1). Επειδή όμως στις υπερυψωμένες αυτές περιοχές δεν επικρατούν διεργασίες απόθεσης, δεν υπολογίζονται στον τελικό υπολογισμό του όγκου και δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας έρευνας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι η πυκνότητα των βολιστικών γραμμών ήταν μεγαλύτερη πάνω από τις παλαιές κοίτες των ποταμών και αραιότερες εκτός αυτών μπορεί κανείς να δικαιολογήσει τις αρνητικές αυτές τιμές.

Παρόλη όμως την προφανή αυτή αδυναμία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, σε αρκετές άλλες τοπογραφικές τομές κατά μήκος της κοίτης της λεκάνης της Τατάρνας (π.χ. s_y , s_{y1} και s_{y2}), παρατηρείται ότι το σημερινό και το παλαιότερο υπόβαθρο, στα πρηνή και στα υβώματα, παρουσιάζουν πολύ καλή υπέρθεση. Εξαιρεση αποτελεί ο πυθμένας της ίδιας της λεκάνης (Τατάρνα), όπου εμφανίζεται υψηλότερα το παλιό ανάγλυφο και χαμηλότερα το σημερινό. Το παραπάνω γεγονός αποκλείει την περίπτωση σφάλματος, εφόσον αυτό δεν είναι δυνατόν να αφορά επιλεκτικά σε κάποιο μεμονωμένο τμήμα της λεκάνης, όπως αυτό του πυθμένα. Επιπλέον θα αναμένονταν μεγαλύτερο σφάλμα στα πρηνή της λεκάνης, λόγω μεγάλων κλίσεων και μικρότερο στον πυθμένα αυτής, εξαιτίας του ομαλού αναγλύφου (βλ. τοπογραφικές τομές s_y , s_{y1} , και s_{y2}).

Για να διαπιστωθεί η ορθότητα της ακολουθούμενης μεθόδου έγιναν οι εξής εργασίες: Λόγω του διαφορετικού συστήματος αναφοράς, της υψομετρικής αφετηρίας, των μέσων και των μεθόδων της τοπογραφικής αποτύπωσης που έγινε τότε, θεωρήθηκε ότι για να εξασφαλιστεί η ορθή από γεωγραφικής άποψης υπέρθεση μεταξύ των δύο ΨΜΑ, ήταν χρήσιμο να μετρηθούν και να υπολογιστούν εκ νέου οι συντεταγμένες μερικών εκ των σημείων που αποτέλεσαν στάσεις για τη τοπογραφική αποτύπωση. Η εκ των υστέρων σύγκριση μεταξύ των παλαιών και των νέων συντεταγμένων για τα σημεία αυτά, θα αποκάλυπτε εάν και σε ποιο βαθμό υπάρχει αξιόλογη γεωγραφική διαφορά μεταξύ των δύο αποτυπώσεων (στροφή, κλίμακα, μετάθεση). Στην

περίπτωση που προέκυπτε κάποια σημαντική γεωγραφική διαφορά, αυτή θα υπολογιζόταν και εφαρμοζόταν, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη γεωμετρικά υπέρθεση μεταξύ των δύο ΨΜΑ, εφόσον αυτό που ενδιαφέρει δεν είναι η απόλυτη θέση των ΨΜΑ στο χώρο, αλλά η σχετική τους θέση.

Για τον σκοπό αυτόν επιλέχτηκε να μετρηθούν δύο τέτοια σημεία. Αυτά επιλέχτηκαν με κριτήριο την γεωγραφική κατανομή τους (ώστε να κατανέμονται σε όλο το ταμιευτήρα), την προσπελασιμότητά τους, και την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων να έχει υποστεί κάποια φυσική ή ανθρωπογενή αλλοίωση η υλοποίησή τους. Άλλωστε ήταν και τα μοναδικά τριγωνομετρικά σημεία που ήταν δυνατό να εντοπιστούν. Οι στάσεις αυτές που αποτελούν πύκνωση του τριγωνομετρικού δικτύου στην περιοχή με τις τιμές των συντεταγμένων τους σε προβολή HATT, οι εκ νέου μετρημένες τιμές με GPS σε προβολή HATT καθώς και οι διαφορές των αντίστοιχων συντεταγμένων φαίνονται στον Πίν. 8.

Πίν. 8: Αποκλίσεις συντεταγμένων τριών τριγωνομετρικών σημείων.

Στάση	X(m) ΥΠΔΕ	Y(m) ΥΠΔΕ	X(m) GPS	Y(m) GPS	ΔX(m)	ΔY(m)
Λινάτσα	10400	15470	10402.89	14566.68	+2.89	-3.32
Παληοκαρυά	3080	16690	3054.87	16719.69	-25.13	+29.69
Παλιοκάλυβο	710	23000	719.07	23003.37	+9.07	+3.37

Η μέτρηση των σημείων έγινε με ακριβώς τον ίδιο τρόπο και εξοπλισμό με τον οποίο έγινε και η υδρογραφική αποτύπωση. Η εκ των υστέρων σύγκριση των αποκλίσεων έδειξε ότι οι διαφορές είναι αμελητέες για την ακρίβεια της συγκεκριμένης εφαρμογής (εκτός από τη θέση Παληοκαρυά που οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες), αφού αυτές σε μέγεθος δεν ξεπερνούν την αναμενόμενη απόκλιση της μεθόδου υδρογραφικής αποτύπωσης. Έτσι δεν κρίθηκε αναγκαία η επιβολή γεωμετρικών διορθώσεων προκειμένου η γεωμετρική υπέρθεση των δύο ΨΜΑ να είναι όσο το δυνατό ακριβής. Πάντως, η θέση των τριγωνομετρικών σημείων «Παληοκαρυά» και «Παλιοκάλυβο» βρίσκεται στην περιοχή εκείνη (στον κλάδο του Αχελώου κατάντη της γέφυρας Τατάρνας) που όπως θα περιγραφεί ευθύς αμέσως εμφανίζεται να υπάρχει διάβρωση του πυθμένα του ταμιευτήρα.

Η λεκάνη της Τατάρνας δείχνει να έχει απωλέσει υλικό όγκου 16 hm³ περίπου. Η απώλεια αυτή υλικού είναι πιθανό να οφείλεται στο ότι η περιοχή αυτή λειτούργησε ως δανειοθάλαμος, για την κατασκευή του ίδιου του φράγματος από την κατασκευαστική εταιρεία Kaiser Engineering and Constructions των ΗΠΑ, αλλά και αργότερα από την εταιρεία Geotechnike Yugoslavia (1970), η οποία ανέλαβε την εκτέλεση ενός συμπληρωματικού και εκτεταμένου έργου γεωτρήσεων και σηράγγων τσιμεντενέσεων - αποστραγγίσεων, εξαιτίας του μεγάλου κινδύνου που διέτρεχε το φράγμα από τις εκτεταμένες διαρροές. Μόνο για την κατασκευή του φράγματος (χωμάτινος τύπος με αργιλικό πυρήνα), χρειάστηκε όγκος υλικού 8.1 hm³, όπου: (α) σώμα φράγματος: 6.2 hm³, (β) πυρήνας: 1.02 hm³, (γ) φίλτρα: 287,600 m³ και (δ) ανάντη και κατάντη προστασία 613,500 m³. Δεν υπάρχουν ακριβείς αναφορές για την προέλευση του υλικού για την κατασκευή του φράγματος, οπότε και πιθανολογείται ότι επιπλέον δανειοθάλαμοι δημιουργήθηκαν στην περιοχή αυτή.

Μικρότερα υψομετρικά σφάλματα που παρατηρήθηκαν στη λεκάνη κατάκλυσης των Κρεμαστών ήταν αναμενόμενα, εφόσον τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές πηγές και διαφορετικές μεθόδους παραγωγής.

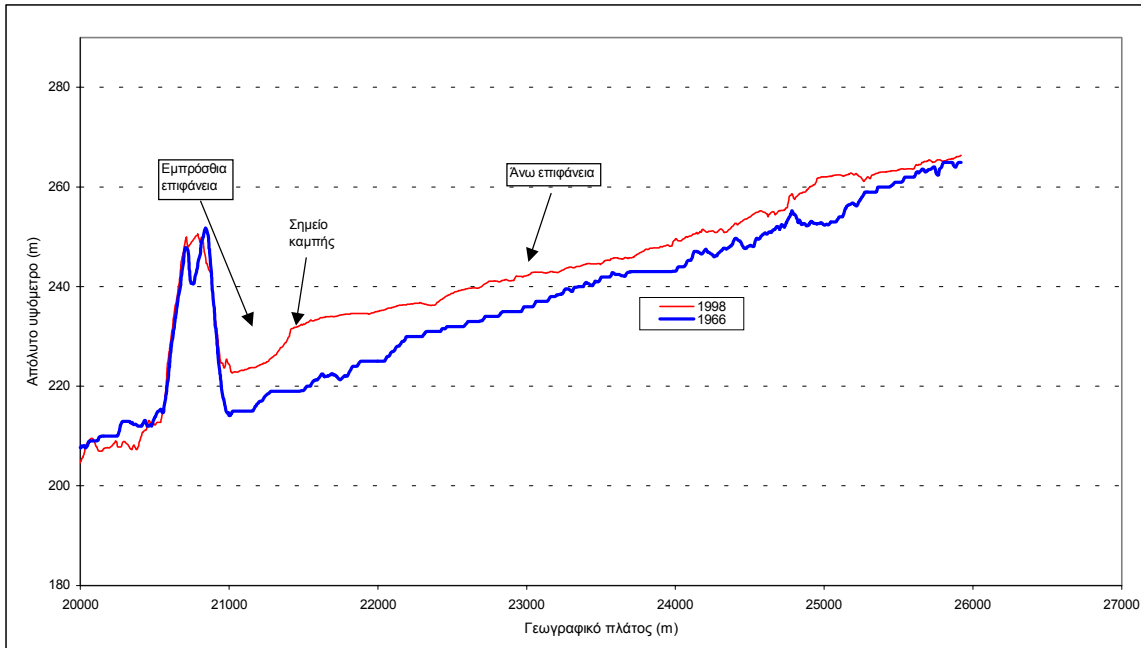
4.5 Τελικά αποτελέσματα - συμπεράσματα

Με βάση τη μακροσκοπική θεώρηση των αποθέσεων φερτών υλικών καταρχήν και των τοπογραφικών τομών στη συνέχεια εντοπίστηκαν οι περιοχές όπου παρατηρείται απόθεση φερτών υλικών και υπολογίστηκε χωριστά ο όγκος των φερτών υλικών και η έκταση αυτών για την κάθε μία περιοχή. Οι περιοχές αυτές είναι οι εκβολές των τεσσάρων ποταμών και η περιοχή του φράγματος. Με τον τρόπο αυτό αφαιρούνται από τον υπολογισμό των όγκων, οι περιοχές που δεν απαντούν αποθέσεις φερτών υλικών ή εμφανίζονται αρνητικές τιμές, αποφεύγοντας έτσι την επίδραση των σφαλμάτων, που υπάρχουν κυρίως στις περιοχές αυτές, στο τελικό αποτέλεσμα του υπολογισμού. Θεωρούμε επίσης ότι οι θετικές τιμές της υπέρθεσης των δύο ΨΜΑ στην περιοχή του φράγματος δεν οφείλονται σε φερτά υλικά που μεταφέρθηκαν μέχρι εκείνη τη θέση αλλά στα υλικά της κατασκευής του φράγματος, του υπερχειλιστή και της υδροληψίας του ΥΗΣ καθώς και των έργων διαμόρφωσης του χώρου. Επομένως ο όγκος αυτός αποκλείεται από την ογκομέτρηση των αποθέσεων. Επίσης θεωρούμε ότι είναι αδύνατο να έχουν αποθεθεί στο φράγμα φερτά υλικά ενώ στο ανάντη τμήμα να παρατηρούνται μηδενικές αποθέσεις.

Πιο αναλυτικά, ο όγκος των φερτών υλικών υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Surfer v.7.0, αφού προηγουμένως έγινε η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, δηλαδή δημιουργήθηκαν ίδια αρχεία κανάβου ως προς τα όρια (x_{min} , y_{min} , x_{max} , y_{max}) και τον αριθμό των σημείων x , y (ίσες γραμμές και στήλες των σημείων x και y). Κατόπιν δημιουργήθηκαν κατάλληλα αρχεία blanking files (*.bln), τα οποία οριοθετούν τις περιοχές με αποθέσεις αποθηκεύοντας γεωγραφικές πληροφορίες και εξαιρώντας τις γύρω περιοχές. Με τη βοήθεια αυτών των αρχείων δημιουργήθηκαν καινούργια αρχεία κανάβου, για το παλαιό (1965) και το σημερινό ανάγλυφο (1999) της λεκάνης κατάκλυσης, που αφορούσαν μόνο στις περιοχές με θετικές αποθέσεις. Τελικά ο όγκος των αποθέσεων προσδιορίστηκε με την αφαίρεση των δύο αρχείων.

Επιπρόσθετα, έγινε επαλήθευση των όγκων με προσομοίωση των περιοχών αυτών σε γεωμετρικά σχήματα (τραπέζια). Ο υπολογισμός αυτός βοηθά στον έλεγχο της τάξης μεγέθους των όγκων, που προκύπτουν από το λογισμικό πακέτο, χωρίς όμως το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών να λαμβάνεται υπόψη ως τελικές τιμές.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ παρουσιάζεται το σύνολο των τοπογραφικών τομών που έχουν κατασκευαστεί. Το πάχος των αποθέσεων φερτών υλικών στον Αχελώο δεν ξεπερνούν τα 15 m, ενώ στους υπόλοιπους κλάδους δεν ξεπερνούν τα 10 m. Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον η απεικόνιση της μηκοτομής του κλάδου του Αγραφιώτη (βλ. Σχήμα 18) καθώς ο κλάδος παρουσιάζει ένα πολύ ομαλό ανάγλυφο.



Σχήμα 18: Ευθύγραμμη τομή του πυθμένα των Κρεμαστών κατά μήκος του κλάδου Αγραφιώτη. Η έξαρση αντιστοιχεί σε στροφή της παλαιάς κοίτης του ποταμού.

Η μορφή των αποθέσεων σε αυτό το τμήμα του ταμιευτήρα προσεγγίζει κατά πολύ την τυπική μορφή των αποθέσεων, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5, σελ. 34. Το σημείο καμπής που διακρίνει την εμπρόσθια με την άνω επιφάνεια έχει απόλυτο υψόμετρο σχεδόν ταυτόσημο με την ελάχιστη στάθμη που έχει καταγραφεί ποτέ στον ταμιευτήρα (+231.45 m, Σεπτέμβριος 1983). Στη συνέχεια εμφανίζεται ένα ύβωμα, λόγω του μαιανδρισμού του Αγραφιώτη σε εκείνο το σημείο. Σε αυτήν την περίπτωση διαπιστώνεται η πολύ καλή υπέρθεση των δύο επιφανειών.

Οι όγκοι καθώς και η έκταση των αποθέσεων στους κλάδους Αχελώου, Αγραφιώτη και Μέγδοβα, Τρικεριώτη παρουσιάζονται στον Πίν. 9.

Πίν. 9: Όγκοι και επιφάνειες των αποθέσεων φερτών υλικών σε τμήματα του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Τμήματα λεκάνης κατάκλυσης	Όγκος αποθέσεων (hm ³)	Έκταση αποθέσεων (km ²)
Αχελώος	41.3	5.7
Αγραφιώτης	13.1	2.5
Μέγδοβας (Ταυρωπός) και Τρικεριώτης	12.2	2.2
ΣΥΝΟΛΟ	66.6	10.4

Ο όγκος των αποθέσεων αποτελεί το 1.48% της συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα (στη στάθμη της υδροληψίας του ΥΗΣ). Από τα στοιχεία αυτά είναι προφανής η σαφώς μεγαλύτερη στερεοπαροχή του Αχελώου σε σχέση με τους υπόλοιπους κλάδους καθώς αποτελεί το 62% της συνολικής στερεοπαροχής του ταμιευτήρα ενώ οι αποθέσεις των φερτών

υλικών καταλαμβάνουν το 50% της συνολικής επιφάνειας των αποθέσεων. Η λειτουργία του ΥΗΣ Κρεμαστών τοποθετείται στο 1966, επομένως και με χρονολογία της υδρογραφικής αποτύπωσης το 1999, δηλαδή για 34 χρόνια λειτουργίας, η μέση ετήσια απόθεση φερτών υλικών σε όλον τον ταμιευτήρα είναι ίση με 1.96 hm^3 .

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται ότι ο αρχικός σχεδιασμός του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα ήταν υπερδιαστασιολογημένος. Πράγματι, όπως φαίνεται από τον Πίν. 4, σελ. 42, για 50 χρόνια λειτουργίας του έργου είχε εκτιμηθεί ότι ο συνολικός όγκος των αποθέσεων θα είναι 394 hm^3 δηλαδή το 8.8% της συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Η τιμή αυτή είναι σαφώς μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα τιμή ακόμα και σε όρους 50-ετίας. Η λανθασμένη κατά τη γνώμη μας αρχική εκτίμηση οφείλεται κατά βάση στα ελλιπή στοιχεία της στερεοπαροχής του Αχελώου. Πράγματι η τιμή αυτή υπολογίστηκε με βάση δείγμα 18 στερεοϋδρομετρήσεων που διενεργήθηκαν σε χρονικό διάστημα 41 ημερών (από 22 Ιανουαρίου 1962 έως 3 Μαρτίου 1962). Με βάση το δείγμα αυτό έγινε επέκταση των στερεοπαροχών, μέσω της καμπύλης διάρκειας – παροχής και υπολογίστηκε ο προαναφερόμενος όγκος. Η μέθοδος αυτή, πέρα από τα καθαρά στατιστικά σφάλματα (π.χ. ύπαρξη συσχετισμένων όρων σφάλματος), ελέγχεται και για το γεγονός ότι οι στερεοπαροχές για το διάστημα εκείνο και για δεδομένες παροχές (λόγω πιθανής ύπαρξης φορτίου απόπλυσης) υπερεκτιμά τις στερεοπαροχές για αντίστοιχες παροχές της βασικής απορροής.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από την παρόμοια εργασία που διενήργησε το *EKΘΕ* [1997] στον ταμιευτήρα του Πολύφυτου στον π. Αλιάκμονα με επιφάνεια λεκάνης απορροής ίση με 5600 km^2 , βρέθηκε ότι ο συνολικός όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών είναι 20 hm^3 . Ο χρόνος λειτουργίας του φράγματος ήταν 15 έτη, επομένως ο μέσος ετήσιος ρυθμός απόθεσης φερτών υλικών στον ταμιευτήρα ήταν 1.3 hm^3 . Η τιμή αυτή είναι απολύτως συγκρίσιμη με την αντίστοιχη τιμή του παρόντος ερευνητικού έργου, παρόλο το γεγονός ότι η λεκάνη απορροής του Πολύφυτου είναι σχεδόν διπλάσια της αντίστοιχης των Κρεμαστών.

Σε όρους στερεοαπορροής έχει ιδιαίτερη σημασία η μετατροπή του όγκου των αποθέσεων σε αντίστοιχη μάζα. Η πυκνότητα των αποθέσεων φερτών υλικών υπολογίζεται από διάφορες σχέσεις που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία. Για μια αναλυτική περιγραφή των μεθόδων αυτών ο αναγνώστης παραπέμπεται μεταξύ άλλων στους *Vanoni, 1977, Annandale, 1987, και Sloff, 1991*. Η πιο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία είναι η σχέση των Lane and Kelzer, η οποία έχει ως εξής:

$$W = W_T + K \log_{10} T \quad (16)$$

όπου, W_T , είναι η πυκνότητα των αποθέσεων (kg/m^3) μετά από T έτη,

W , είναι η αρχική πυκνότητα των αποθέσεων μετά από 1 έτος στον ταμιευτήρα (kg/m^3), και

K , είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη λειτουργία του ταμιευτήρα και από τη σύσταση των φερτών υλικών. Στον Πίν. 10 παρουσιάζονται οι τιμές της αρχικής πυκνότητας και της σταθεράς K για διάφορες κατηγορίες λειτουργίας ταμιευτήρων και για διαφορετική σύσταση των φερτών υλικών. Η τιμή της αρχικής πυκνότητας του Πίν. 10 αντιπροσωπεύει το φαινόμενο ειδικό βάρος μιας βυθισμένης μάζας στο νερό, η οποία λόγω της άνωσης είναι ίση με το ειδικό βάρος της ίδιας ποσότητας υλικού εν ξηρώ μείον του ειδικού βάρους του νερού.

Πίν. 10: Χαρακτηριστικές τιμές της αρχικής πυκνότητας W και της σταθεράς K με τη μέθοδο Lane and Kelzer.

Λειτουργία ταμιευτήρα	ΑΜΜΟΣ		ΙΛΥΣ		ΑΡΓΙΛΟΣ	
	W	K	W	K	W	K
Αποθέσεις πάντα ή σχεδόν πάντα καλυμμένες	1490	0	1040	5.7	480	16.0
Κατά κανόνα μικρή μείωση στάθμης	1490	0	1180	2.7	740	10.7
Κατά κανόνα μεγάλη μείωση στάθμης	1490	0	1270	1.0	970	6.0
Ταμιευτήρας κατά κανόνα άδειος	1490	0	1310	0	1250	0

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του έργου λήφθηκαν δείγματα των αιωρούμενων φερτών υλικών του Αχελώου στη θέση του φράγματος και έγιναν οι απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές για τον υπολογισμό της πυκνότητας των υλικών αυτών. Υπολογίστηκε [ECI, 1974] ότι η αρχική πυκνότητα των φερτών υλικών ανέρχεται σε 1340 kg/m^3 . Για μια τιμή του $K = 11.7$, η μέση πυκνότητα των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών μετά από 34 χρόνια λειτουργίας είναι $W_{34} = 1358 \text{ kg/m}^3$. Επομένως η αντιστοιχία σε μάζα των συνολικών αποθέσεων ανέρχεται σε $90,442,800 \text{ t}$ δηλαδή 90.4 Mt .

Όπως θα περιγραφεί στην Παράγραφο 4.6 λήφθηκαν δείγματα από τον πυθμένα του ταμιευτήρα για τον υπολογισμό της πυκνότητας των αποθέσεων των φερτών υλικών. Ο άμεσος υπολογισμός της πυκνότητας των αποθέσεων φερτών υλικών δεν στάθηκε δυνατός λόγω της αδυναμίας λήψης αδιατάρακτων δειγμάτων κατά τη διενέργεια των δειγματοληψιών, κυρίως λόγω της σύστασης των αποθέσεων. Η εκτίμηση της πυκνότητας θα γίνει έμμεσα με τη χρήση του Πίν. 10 και με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις κοκκομετρίας των δειγμάτων. Αν υποθέσουμε ότι η σύσταση των αποθέσεων σε άμμο, ιλύ και άργιλο σε όλη την έκταση των αποθέσεων μπορεί να προσεγγιστεί από τις τιμές των δύο γεωτρήσεων, είναι δυνατό να υπολογιστεί η μέση πυκνότητα των αποθέσεων. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι δεν ενδιαφέρει η πυκνότητα των υλικών εν ξηρώ αλλά στο περιβάλλον του πυθμένα, δηλαδή κορεσμένων από το νερό. Με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις της κοκκομετρίας των δειγμάτων και την εύρεση της σύστασης των φερτών υλικών προέκυψε ότι η μέση αρχική πυκνότητα των αποθέσεων είναι ίση με 1689 kg/m^3 τιμή που είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κατά το σχεδιασμό του έργου⁷. Θεωρώντας επίσης τη σχέση των Lane and Kelzer για 34 χρόνια λειτουργίας του φράγματος και $K = 2.1$ η συνολική μέση πυκνότητα των αποθέσεων είναι ίση με 1692 kg/m^3 .

Στον Πίν. 11 δίνονται οι τιμές της ποσότητας των αποθέσεων σε εκατομμύρια τόνους για όλον τον ταμιευτήρα και για κάθε κλάδο ξεχωριστά.

⁷ Συνολικά οι αποθέσεις αποτελούνται από 71.9% άμμο, 23.3% ιλύ και 4.8% άργιλο.

Πίν. 11: Συνολική και τμηματική ισοδύναμη ποσότητα αποθέσεων φερτών υλικών με βάση δύο διαφορετικές εκτιμήσεις πυκνότητας αποθέσεων (σε εκατομμύρια τόνους).

Τμήματα λεκάνης κατάκλυσης	Μάζα αποθέσεων (Mt)
Αχελώος	69.8
Αγραφιώτης	22.1
Μέγδοβας (Ταυρωπός) και Τρικεριώτης	20.6
ΣΥΝΟΛΟ	112.5

Η μέση ετήσια στερεοαπορροή της συνολικής λεκάνης απορροής των Κρεμαστών, για 34 χρόνια και λεκάνη απορροής έκτασης 3292 km², είναι ίση με 1005.6 t/km² ενώ η μέση ετήσια στερεοπαροχή είναι ίση με 106.4 kg/s. Αντίστοιχα για τις λεκάνες απορροής του Αχελώου, του Αγραφιώτη και του Μέγδοβα – Τρικεριώτη στις εκβολές τους στον ταμιευτήρα έχουμε τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάζονται στον Πίν. 12.

Πίν. 12: Χαρακτηριστικά μεγέθη στερεομεταφοράς για τις τρεις επιμέρους λεκάνες απορροής των Κρεμαστών.

Λεκάνη απορροής	Μέση ετήσια στερεοαπορροή Sy (t/km ²)	Μέση ετήσια στερεοπαροχή Qs (kg/s)	Έκταση λεκάνης απορροής (km ²)
Αχελώου	1184.6	66.0	1733
Αγραφιώτη	2034.8	20.9	320
Μέγδοβα – Τρικεριώτη	489.4	19.5	1239
ΣΥΝΟΛΟ	1005.6	106.4	3292

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώνουμε τη σχετικότητα των ορισμών των όρων στερεομεταφοράς. Για παράδειγμα, ενώ η μέση ετήσια στερεοπαροχή του Αχελώου είναι τουλάχιστο τριπλάσια της αντίστοιχης του Αγραφιώτη και Μέγδοβα – Τρικεριώτη, η μέση ετήσια στερεοαπορροή (δηλαδή η στερεοπαροχή σε αντιστοιχία με τη λεκάνη απορροής) του Αγραφιώτη είναι σχεδόν διπλάσια εκείνης του Αχελώου και σχεδόν τετραπλάσια των Μέγδοβα – Τρικεριώτη. Αυτό σημαίνει ότι ανά μονάδα λεκάνης απορροής ο Αγραφιώτης «συνεισφέρει» περισσότερο φορτίο φερτών υλικών από όλα τα άλλα ποτάμια. Σε απόλυτους αριθμούς όμως ο Αχελώος αποθέτει ασυγκρίτως τις περισσότερες ποσότητες φερτών υλικών. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η διαφορά αυτή δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι η εδαφική διάβρωση ανά μονάδα επιφάνειας στη λεκάνη απορροής του Αγραφιώτη είναι μεγαλύτερη από εκείνη του Αχελώου. Η γεωμορφολογία της περιοχής και κατά συνέπεια το υδρογραφικό δίκτυο είναι σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στη μεταφορά της εδαφικής διάβρωσης στον ταμιευτήρα. Η ανάλυση αυτή θα γίνει με τη λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής που θα περιγραφεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 6. Συγκρινόμενη η τιμή της μέσης ετήσια στερεοαπορροής με την

αντίστοιχη τιμή (184 t/km^2) που προκύπτει από τη σχέση των *Dendy and Balton* [1976] (Εξ. 11) διαπιστώνουμε ότι η τιμή της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών έχει σχεδόν 6 φορές μεγαλύτερη. Αυτό εξηγείται από τη μεγάλη διαφορά στη γεωμορφολογική εξέλιξη και τεκτονική των λεκανών απορροής στην Ελλάδα και στις ΗΠΑ από όπου προέκυψε η σχέση αυτή. Επίσης, η εξίσωση των *Κουτσογιάννη και Ταρλά* [1987] δίνει επίσης μικρότερη τιμή της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής ίσης με 606 t/km^2 . Διαπιστώνουμε δηλαδή ότι οι υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής υποεκτιμούν την πραγματική στερεοαπορροή σε σημαντικό βαθμό.

Οι τιμές αυτές της στερεοπαροχής είναι από τις μεγαλύτερες καταγεγραμμένες στην Ελλάδα και συμβατές με αντίστοιχες στο διεθνή χώρο. Στον Πίν. 13 καταγράφονται οι τιμές της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής υπολογισμένες από καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής σε τρία ελληνικά ποτάμια [*Κουτσογιάννης και Ταρλά*, 1987]. Αρχικά παρατηρούμε ότι στους ποταμούς Άραχθο και Καλαμά, η μέση ετήσια στερεοαπορροή αυξάνεται με τη λεκάνη απορροής, συμπέρασμα που είναι ελεγχόμενο και πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω καθώς παραβιάζει τη γενική τάση μείωσης της στερεοαπορροής με την επιφάνεια της λεκάνης (π.χ. *Dendy and Bolton*, [1974]).

Πίν. 13: Καταγεγραμμένες τιμές της στερεοπαροχής σε διάφορα ποτάμια στον Ελληνικό χώρο.

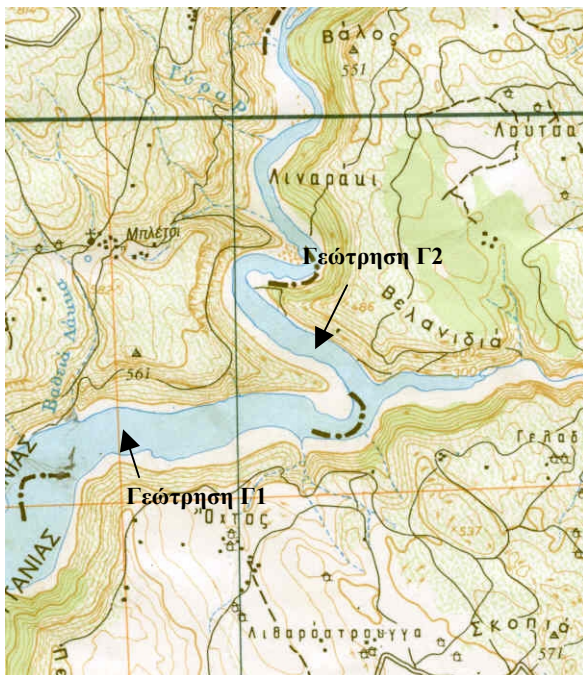
Υδατόρευμα / Θέση μέτρησης	Μέση ετήσια στερεοπαροχή Q_s (kg/s)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή S_y (t/km ²)	Λεκάνη απορροής (km ²)
Άραχθος / Γκόγκο	8	1220	204
Άραχθος / Τσίμοβο	18	875	640
Άραχθος / Πλάκα	49	1571	970
Άραχθος / Άρτα	92	1543	1855
Καλαμάς / Σουλόπουλο	4	188	661
Καλαμάς / Κιοτέκι	18	378	1481
Αλιάκμονας / Σιάτιστα	7	80	2725

Στον Πίν. 13 φαίνεται ότι μόνο ο Άραχθος έχει μεγαλύτερη μέση ετήσια στερεοπαροχή από τον Αχελώο, συμπέρασμα το οποίο κατά τη γνώμη μας είναι ελεγχόμενο. Αντίθετα ο Καλαμάς και πολύ περισσότερο ο Αλιάκμονας παρουσιάζουν πολύ μικρότερη στερεοπαροχή. Το συμπέρασμα αυτό όμως θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω καθώς η εκτίμηση των μεγεθών αυτών έχουν προκύψει με εντελώς διαφορετικές μεθόδους και για διαφορετικό χρονικό διάστημα. Σε αντιδιαστολή με την αντίστοιχη ερευνητική εργασία του *EKΘΕ*, [1997], και με βάση τα στοιχεία που αναφέρονται υπολογίζεται ότι η συνολική μάζα των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα θεωρείται ίση με 51 Mt και επομένως η μέση ετήσια στερεοαπορροή είναι ίση 628 t/km^2 , δηλαδή μικρότερη της αντίστοιχης στερεοαπορροής του Μέγδοβα – Τρικεριώτη ενώ η μέση ετήσια στερεοπαροχή είναι ίση με 113 kg/s τιμή που είναι ιδιαίτερα υψηλή και σε σχέση με την τιμή του Αλιάκμονα στη θέση Σιάτιστα (ανάντη του ταμιευτήρα) όπως αναφέρεται στον Πίν. 13. Στη μελέτη αυτή έχει μετατραπεί ο όγκος των αποθέσεων σε μάζα με βάση το ειδικό βάρος

των υλικών (2550 kg/m^3), προσέγγιση που δεν λαμβάνει υπόψη το κορεσμένο περιβάλλον στον πυθμένα του ταμιευτήρα και επομένως τη μεταβολή των τιμών της πυκνότητας με βάση τη σχέση των Lane and Kolzer (Πίν. 10). Χρειάζεται ενδεχομένως περαιτέρω διερεύνηση η αξιοπιστία των μετρήσεων και των μεθοδολογιών για τον υπολογισμό των δύο αυτών τιμών.

4.6 Διενέργεια δειγματοληπτικών γεωτρήσεων – Επαλήθευση των αποτελεσμάτων

Όπως είχε προδιαγραφεί από τη σύμβαση ανάληψης του ερευνητικού έργου, έγιναν πλωτές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός του έργου περιόρισε τον αριθμό των γεωτρήσεων αυτών στις δύο. Λόγω της ιδιαίτερης σπουδαιότητας του κλάδου του Αχελώου και της έλλειψης στοιχειώδους υποδομής για τη μετακίνηση του πλωτού γεωτρήσανου, αποφασίστηκε και οι δύο γεωτρήσεις να γίνουν στον κλάδο του Αχελώου. Η πρώτη γεώτρηση έγινε στο κλάδο του Αχελώου κατάντη της συμβολής του με τον π. Γρανιτσιώτη που εκβάλλει στον ταμιευτήρα από ανατολικά και η δεύτερη γεώτρηση διενεργήθηκε ανάντη της παραπάνω συμβολής. Στο Σχήμα 19 εμφανίζονται στο χάρτη της ΓΥΣ οι θέσεις των δύο γεωτρήσεων. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες στο σύστημα WGS84 είναι για μεν την πρώτη γεώτρηση (Γ1) $39^{\circ}03.011' \text{ N}$ και $21^{\circ}23.955' \text{ E}$ ενώ για τη δεύτερη γεώτρηση (Γ2) οι αντίστοιχες συντεταγμένες είναι $39^{\circ}03.374' \text{ N}$ και $21^{\circ}24.928' \text{ E}$. Στη Φωτογραφία 9, (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ), παρουσιάζεται το γεωτρήσανο τοποθετημένο πάνω στη σχεδία να πλέει στην επιφάνεια του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης.



Σχήμα 19: Οι θέσεις των δύο πλωτών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Η διενέργεια των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων γίνεται για τους εξής λόγους: (α) Την επαλήθευση των υπολογισμών των αποθέσεων των φερτών υλικών και επομένως της ακολουθούμενης μεθοδολογίας, (β) την ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών και της ορυκτολογικής σύστασης των φερτών υλικών και της συσχέτισής τους με τη λεκάνη απορροής, (γ) την εκτίμηση της πυκνότητας των αποθέσεων, (δ) την εκτίμηση του πραγματικού ρυθμού

απόθεσης των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα, και (ε) τη μέτρηση του οργανικού ποσοστού των φερτών υλικών. Οι γεωτρήσεις διενεργήθηκαν στο δεύτερο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου 2001. Η στάθμη του ταμιευτήρα στο διάστημα αυτό ήταν ίση με 258 m περίπου. Η στάθμη αυτή είναι κατά 11 m χαμηλότερη από την αντίστοιχη στάθμη κατά τη διάρκεια της υδρογραφικής αποτύπωσης του τμήματος αυτού (28-30/7/1998, 269.09 m) ενώ είναι κατά 8 m υψηλότερη από την ελάχιστη στάθμη των τελευταίων 5 ετών τουλάχιστον (12/2000, 250.82 m). Οι πλωτές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις είχαν συνολικό βάθος 20 m η καθεμία και έγιναν με την εποπτεία και ευθύνη του μελετητικού γραφείου “ΠΑΝΓΑΙΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί” ως υπεργολάβο του ερευνητικού έργου μετά από σχετικό διαγωνισμό και με τη συμμετοχή μελών της ομάδας του ερευνητικού έργου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ανύπαρκτης υποδομής (π.χ. οδικές προσβάσεις στον ταμιευτήρα, πλωτά μεταφορικά μέσα), η διενέργεια των γεωτρήσεων ήταν μια πολύ δύσκολη επιχείρηση.

Οι γεωτρήσεις εκτελέστηκαν με περιστροφικό υδραυλικό γεωτρύπανο τύπου LONGYEAR 36, που ήταν εξοπλισμένο με τα αναγκαία εξαρτήματα και εργαλεία (στελέχη, δειγματολήπτες, καρωταρίες, κοπτικά εξαρτήματα, σωληνώσεις επένδυσης και λοιπό βοηθητικό εξοπλισμό, αντλητικό συγκρότημα, δεξαμενή νερού κλπ). Το γεωτρύπανο τοποθετήθηκε επί πλωτής μεταλλικής σχεδιάς. Το διατρητικό συγκρότημα ποντίστηκε στον ταμιευτήρα στη θέση Σιβίστα του Δήμου Απεραντίων και ρυμουλκήθηκε με χρήση λέμβου στις θέσεις των γεωτρήσεων.

Τα τοιχώματα των γεωτρήσεων σωληνώθηκαν προσωρινά με σωλήνωση Φ114 / 104, μέχρι βάθους 16.50 m στη γεώτρηση Γ1 και 17.00 m στη γεώτρηση Γ2. Η διάτρηση στη γεώτρηση Γ1 έγινε αρχικά με μονή καρωταρία T-101 με κοπτικό από καρβίδια, μέχρι βάθους 3.30 m και συνεχίστηκε με μονή καρωταρία T-86 με κοπτικό από καρβίδια, μέχρι του βάθους περάτωσης της γεώτρησης στα 20.00 m. Η διάτρηση στη γεώτρηση Γ2 έγινε αρχικά με μονή καρωταρία T-101 με κοπτικό από καρβίδια, μέχρι βάθους 4.50 m και συνεχίστηκε με μονή καρωταρία T-86 με κοπτικό από καρβίδια, μέχρι του βάθους περάτωσης της γεώτρησης στα 20.00 m. Κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων έγινε προσπάθεια για συνεχή, κατά το δυνατό, δειγματοληψία, προκειμένου να ληφθεί η πληρέστερη εικόνα της στρωματογραφίας του υπεδάφους της περιοχής. Τα δείγματα που ελήφθησαν ήταν ημιδιαταραγμένα, με δειγματολήπτη απλού σωλήνα (μονή καρωταρία) και με τη μέθοδο του «φραγμού».

Η διάτρηση και η δειγματοληψία ανά γεώτρηση παρουσιάζονται στον Πίν. 14.

Πίν. 14: Στοιχεία διάτρησης και δειγματοληψίας ανά γεώτρηση.

ΔΙΑΤΡΗΣΗ/ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Γ1	Γ2
Διάτρηση με τη μέθοδο του φραγμού συμπεριλαμβανομένων των δειγμάτων φραγμού			
α. Καρωταρία T-101 (καρβίδια)	(m)	3.30	4.50
β. Καρωταρία T-86 (καρβίδια)	(m)	16.70	15.50
Δείγματα φραγμού			
α. Καρωταρία T-101	(τεμ./m)	1/3.30	4/4.50
β. Καρωταρία T-86	(τεμ./m)	11/16.7	14/15.5
Δείγματα Terzaghi	(τεμ.)	3	4

Κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων εκτελέστηκαν δοκιμές τυποποιημένης διείσδυσης (Standard Penetration Test, (SPT)), για την εκτίμηση της επιτόπου πυκνότητας και της συνεκτικότητας των εδαφικών σχηματισμών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 15. Στη στήλη «Κρούσεις» αναφέρεται ο αριθμός των απαιτούμενων κρούσεων για να εισχωρήσει το κατάλληλο εξάρτημα κατά 15 cm στο αντίστοιχο στρώμα. Ο αριθμός N_{SPT} αναφέρει πόσες τέτοιες κρούσεις έγιναν σε κάθε εδαφικό στρώμα. Έχει επικρατήσει στην εδαφομηχανική πρακτική να μετρώνται μόνο οι δύο τελευταίες ομάδες κρούσεων για κάθε δοκιμή.

Πίν. 15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών SPT.

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ	ΚΡΟΥΣΕΙΣ	N_{SPT}
Γ-1	3.00 – 3.45	1 – 1	2
	7.00 – 7.45	3 – 5 – 8	13
	12.00 – 12.45	4 – 7 – 6	13
Γ-2	3.00 – 3.45	1 – 2 – 1	3
	5.40 – 5.95	5 – 4 – 9	13
	9.00 – 9.45	10 – 16 – 21	37
	12.00 – 12.45	10 – 13 – 18	31

Επίσης διενεργήθηκαν οι παρακάτω εργαστηριακές αναλύσεις: (α) Δοκιμές κατάταξης και (β) δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών. Στις πρώτες περιλαμβάνονται οι κοκκομετρικές αναλύσεις με κόσκινα και αραιόμετρο, ο προσδιορισμός ορίου υδαρότητας, LL , ο προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας, PL , και ο προσδιορισμός του δείκτη πλαστικότητας, PI , όπου αυτό ήταν δυνατό. Στις δεύτερες περιλαμβάνονται ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους

στερεών, G_s , και ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας των εδαφών σε οργανικά. Για τις προαναφερθείσες εργαστηριακές δοκιμές τηρήθηκαν οι όροι των σχετικών προ-διαγραφών του Υπουργείου ΠΕΧΩΔΕ⁸. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο υπολογισμός της πυκνότητας θα γίνει έμμεσα με βάση τις κοκκομετρικές καμπύλες των δειγμάτων των αποθέσεων.

Στο «ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΩΝ» παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των εδαφικών σχηματισμών του πυθμένα στις θέσεις των γεωτρήσεων. Στους Πίν. 16 και Πίν. 17 περιγράφονται συνοπτικά οι λιθολογικές τομές του πυθμένα στις θέσεις των δύο γεωτρήσεων. Θα πρέπει να επισημανθεί εδώ ότι τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων δεν θα πρέπει να αναλυθούν καθαρά ποσοτικά αλλά ποιοτικά, συσχετίζοντας τα αναμενόμενα πάχη των αποθέσεων στις θέσεις των γεωτρήσεων που προέκυψαν από την υδρογραφική αποτύπωση με την περιγραφή των εδαφικών στρωματώσεων και τις εργαστηριακές αναλύσεις (π.χ. κοκκομετρικές καμπύλες). Επίσης, λόγω της φύσης των γεωτρήσεων (πλωτές γεωτρήσεις σε πολύ χαλαρά εδάφη) αλλά και των δύσκολων συνθηκών δεν περιμένει κανείς την απόλυτη σύμπτωση των δύο μετρήσεων.

Πίν. 16: Χαρακτηριστικά εδαφολογικής τομής της γεώτρησης Γ1.

α/α	Βάθος δείγματος (m)	Χαρακτηρισμός εδαφικού στρώματος
1.	0.00 – 3.00 m	Στρώμα τεφρής πολύ μαλακής αργιλώδους ιλύος
2.	3.00 – 7.00 m	Στρώμα καστανότεφρης πολύ χαλαρής λεπτόκοκκης άμμου με λίγα γωνιώδη ή στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις ($d_{max}=7cm$)
3.	7.00 – 9.00 m	Ιλυώδης άμμος με διάσπαρτες κροκάλες.
4.	9.00 – 14.50 m	Στρώμα τεφροκάστανης λεπτόκοκκης άμμου με ιλύ και χάλικες κατά θέσεις, μέσης πυκνότητας.
5.	14.50 – 20.00 m	Στρώμα καστανής άμμου με ιλύ και χάλικες ή χαλίκων με ιλύ και άμμο. Το ιλυώδες υλικό είναι ασβεστιτικό και οι χάλικες ασβεστολιθικής – ψαμμιτικής προέλευσης ($d_{max} = 4cm$)

Στον Πίν. 16 περιγράφονται τα στρώματα των εδαφών όπως προέκυψαν από απλή παρατήρηση των δειγμάτων στη γεώτρηση Γ1. Οι χαρακτηριστικές τιμές των κοκκομετρικών αναλύσεων αναγράφονται στο αντίστοιχο παράρτημα. Το αρχικό στρώμα πάχους 3 m αποτελείται από μαλακή άργιλο ενώ στα βαθύτερα στρώματα ως το τέλος της γεώτρησης κυριαρχεί η άμμος με διάφορες εναλλαγές κροκαλών και χαλίκων. Όσο βαθύτερο είναι το εδαφικό στρώμα τόσο πιο χονδρόκοκκο εμφανίζεται το τελικό αποτέλεσμα από τις κοκκομετρικές καμπύλες. Η ιλύς που απαντάται ακόμα και στα βαθύτερα στρώματα προκύπτει από το «σορτάρισμα» των υλικών καθώς λεπτόκοκκα υλικά καλύπτουν τα κενά των πιο χονδρόκοκκων σχηματισμών. Αξίζει να

⁸ Ε 105-86 Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής, που εγκρίθηκαν με τις υπ. αριθμ. ΕΚ/5662/728/οικ/31.7.1986 αποφάσεις του Υπουργού Δημοσίων Έργων - Φ.Ε.Κ. 955/Β/31.12.1986.

σημειωθεί ότι οι κοκκομετρικές αναλύσεις δεν γίνονται για όλο το δείγμα (π.χ. της διαστρωμάτωσης από 9.00 έως 14.50 m) αλλά για ένα πολύ μικρό δείγμα από το κατώτατο τμήμα της στήλης και λαμβάνεται τυχαία. Είναι δηλαδή πιθανό να μην συμπίπτει η μέση διάσταση των υλικών από τις κοκκομετρικές καμπύλες (και επομένως ο χαρακτηρισμός των υλικών) με το χαρακτηρισμό από απλή παρατήρηση. Επίσης, η πιθανή ύπαρξη διάσπαρτων κροκαλών στο δείγμα που αναλύεται δεν λαμβάνεται υπόψη για το χαρακτηρισμό του δείγματος, συνηθισμένη πρακτική σε εδαφολογικές αναλύσεις, αλλά υπό το πρίσμα της μελέτης της μεταφοράς των φερτών υλικών, η ύπαρξη διάσπαρτων κροκαλών σε ένα λεπτόκοκκο περιβάλλον άμμου μπορεί να αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Επομένως η ύπαρξη διάσπαρτων κροκαλών και λατύπων σε περιβάλλον άμμου δεν λαμβάνονται υπόψη στις κοκκομετρικές αναλύσεις (π.χ. εδαφικό στρώμα από 7.0 έως 9.0 m). Η ύπαρξη τους εκεί οφείλεται κυρίως σε διάβρωση παρόχθιων σχηματισμών κροκαλοπαγών του φλύσχη Γαβρόβου. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του φλύσχη Γαβρόβου είναι η παρουσία πάγκων κροκαλοπαγών πάχους έως και 2m, των οποίων οι κροκάλες είναι ασβεστολιθικής και κερατολιθικής προέλευσης και ποικίλου μεγέθους. Στη συγκεκριμένη δειγματοληψία είναι πολύ δύσκολο να τοποθετηθεί το όριο μεταξύ της αρχικής κοίτης και των αποθέσεων των φερτών υλικών, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν περιγραφές της αρχικής κοίτης του Αχελώου στο σημείο αυτό. Μελετώντας τη διαστρωμάτωση των σχηματισμών κάτω από τα 9.0 m, που οι εργαστηριακές δοκιμές κατάληξαν στο χαρακτηρισμό «ιλυώδης άργιλος», μέχρι και λίγο πριν το τέλος της γεώτρησης βλέπουμε ότι τα χαρακτηριστικά είναι λίγο – πολύ κοινά με την ύπαρξη άμμου με ιλύ και χαλικιών που προοδευτικά αυξάνονται με το βάθος. Η συστηματικά εμφάνιση των χαλικιών εμφανίζεται μετά τα 9.0 m, γεγονός που επιτρέπει να θεωρηθεί ότι οι αποθέσεις φερτών υλικών στη θέση της γεώτρησης έχουν πάχος γύρω στα 9 m.

Πίν. 17: Χαρακτηριστικά εδαφολογικής τομής της γεώτρησης Γ2.

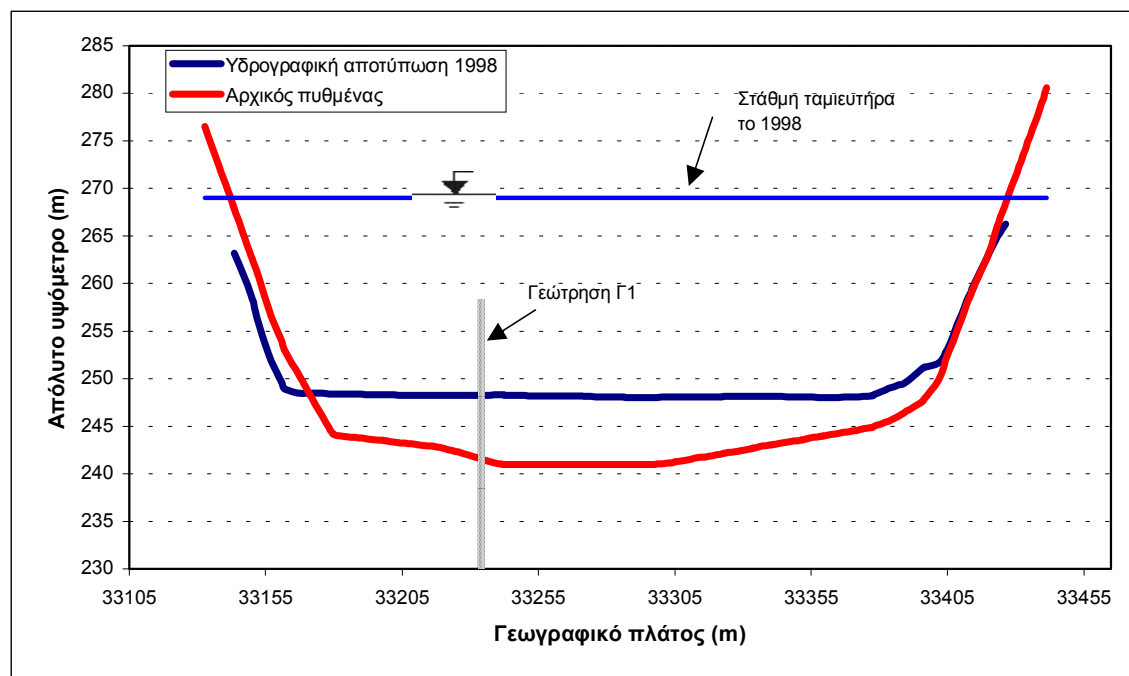
α/α	Βάθος δείγματος (m)	Χαρακτηρισμός εδαφικού στρώματος
1.	0.00 – 3.00 m	Στρώμα χαλαρής τεφρής ιλυοαργιλώδους άμμου.
2.	3.00 – 5.40 m	Στρώμα τεφρής μαλακής αργίλου χαμηλής πλαστικότητας.
4.	5.40 – 5.60 m	Στρώμα αποθέσεων παλαιάς κοίτης ποταμού με ευμεγέθεις ($d_{max} = 10 \text{ cm}$) κροκάλες ασβεστόλιθου και κερατόλιθου.
5.	5.60 – 20.00 m	Στρώμα χαλικιών όχι καλής διαβάθμισης με ιλύ και άμμο πυκνής απόθεσης. Το μέγεθος των χαλικιών μειώνεται προοδευτικά με το βάθος.

Στον Πίν. 17 περιγράφεται η εδαφολογική τομή της γεώτρησης Γ2. Στη γεώτρηση αυτή η τομή δίνει πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα καθώς μέχρι τα πρώτα 5.40 m παρατηρούνται λεπτόκοκκα υλικά άμμου, ιλύος και αργίλου. Περίεργο από πρώτη άποψη φαίνεται το γεγονός ότι η άμμος ως πιο χονδρόκοκκο υλικό εμφανίζεται ως υπερκείμενο στρώμα της αργιλώδους ιλύος και της αργίλου που είναι προφανώς πιο λεπτόκοκκα. Μια πιθανή εξήγηση είναι οι διαφορετικές

υδραυλικές συνθήκες και η χρονική περίοδος κατά την είσοδο των υλικών αυτών στον ταμιευτήρα, αν παρατηρήσει κανείς και τις μεταβολές της στάθμης του ταμιευτήρα για την περίοδο λειτουργίας του ταμιευτήρα. Η συγκεκριμένη πάντως γεώτρηση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον που θα περιγραφεί στην Παράγραφο 4.6.2.

4.6.1 Γεώτρηση Γ1

Όπως σημειώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θεωρούμε ότι η αρχική κοίτη του Αχελώου στο σημείο της γεώτρησης, με βάση την περιγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών, την κοκκομετρική καμπύλη και των δοκιμών SPT, βρίσκεται σε βάθος 9 m από τον υφιστάμενο πυθμένα του ταμιευτήρα. Στη διατομή του πυθμένα του ταμιευτήρα εκτιμάται με βάση την υδρογραφική αποτύπωση ότι το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 3 έως 8 m ενώ στη θέση της γεώτρησης το πάχος των αποθέσεων εκτιμάται στα 7 m περίπου. Το βάθος του νερού βρέθηκε ίσο με 8 m, καθώς το βάθος του νερού μετρήθηκε με το στέλεχος της σωλήνωσης της γεώτρησης ενώ το αντίστοιχο βάθος με βάση την υδρογραφική αποτύπωση είναι 10 m (βλ. Σχήμα 20). Επομένως υπάρχει μια διαφορά 2 m μεταξύ των δύο τιμών του βάθους, η οποία όμως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Ιδιαίτερη εντύπωση προκαλεί το συντριπτικό ποσοστό της εμφάνισης άμμου στο στρώμα των αποθέσεων. Από τα δύο δείγματα για τα οποία έγιναν κοκκομετρικές αναλύσεις και θεωρήθηκαν ότι ανήκουν στο στρώμα των αποθέσεων, βρέθηκε ότι το ποσοστό της άμμου είναι ίσο με 92% για το υπερκείμενο δείγμα (3.50 – 4.0 m) και 82% για το υποκείμενο δείγμα (8.50 – 9.0 m). Τα αθροιστικά ποσοστά της ιλύος και της αργίλου δεν ξεπερνούν το 8% για το πρώτο δείγμα και το 15% για το δεύτερο. Η τομή του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης εμφανίζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Τομή του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης Γ1.

Η διαφορά των δύο εκτιμήσεων για το πάχος των αποθέσεων είναι ίση με 2 m. Η διαφορά αυτή συσχετίζεται αφενός με τη διαφορά στο βάθος του νερού που μετρήθηκε κατά τη φάση της

δειγματοληψίας και αφετέρου με τη γεώτρηση Γ2 και δικαιολογείται εν μέρει από τη μετακίνηση αποθέσεων μέσα στον ταμιευτήρα λόγω της σημαντικής ταπείνωσης της στάθμης στα προηγούμενα έτη. Στην επόμενη παράγραφο θα αναλυθεί διεξοδικά η μετακίνηση αυτή των αποθέσεων και θα συσχετιστεί με την ανάντη γεώτρηση Γ2. Σε γενικές γραμμές πάντως, με βάση τη δυσκολία εκτίμησης της αρχικής κοίτης στο σημείο αυτό και τα πιθανά σφάλματα κατά τη δειγματοληψία θεωρούμε ότι η εκτίμηση του πάχους των αποθέσεων στο σημείο αυτό είναι ικανοποιητική και στα πλαίσια της απαιτούμενης ακρίβειας. Στο Σχήμα 21 δίνεται σχηματικά η λιθολογική τομή της γεώτρησης.

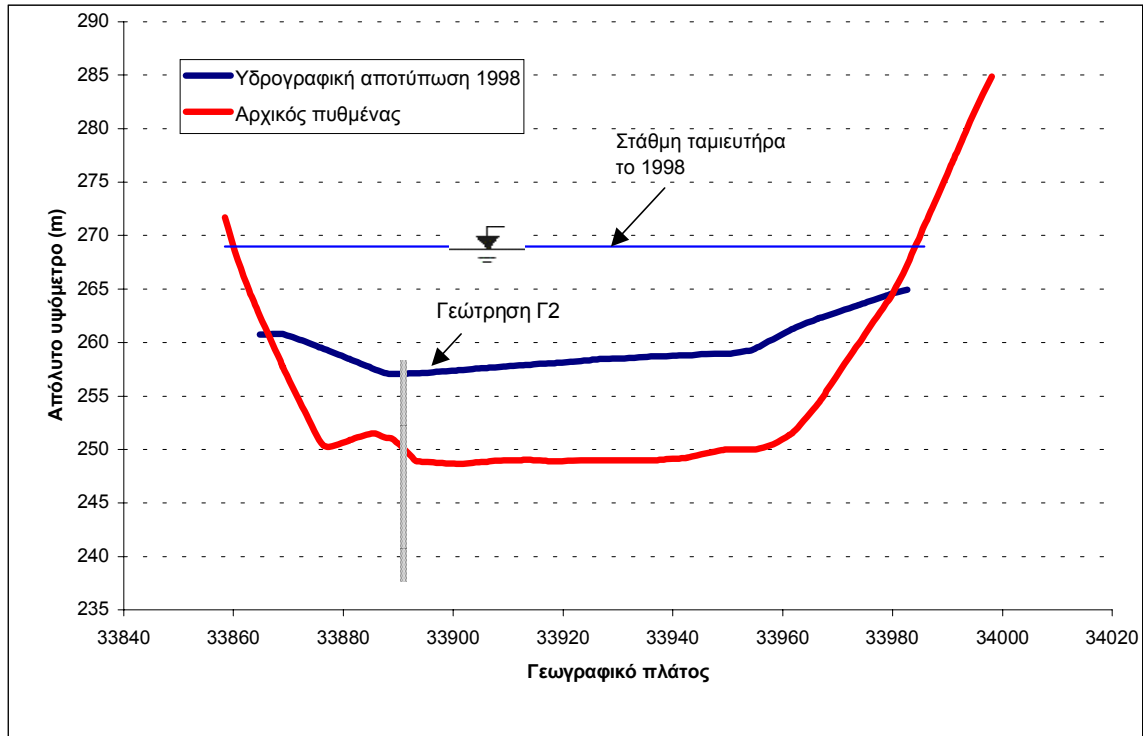
4.6.2 Γεώτρηση Γ2

Όπως σημειώθηκε στην Παράγραφο 4.6, θεωρούμε ότι η αρχική κοίτη του Αχελώου στο σημείο της γεώτρησης, με βάση την περιγραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών, την κοκκομετρική καμπύλη και των δοκιμών SPT, βρίσκεται σε βάθος 5.4 m από τον υφιστάμενο πυθμένα του ταμιευτήρα. Η εναλλαγή των εδαφολογικών χαρακτηριστικών κάτω των 5.4 m είναι τόσο έντονη που δεν αφήνει καμμία αμφιβολία για την ύπαρξη της αρχικής κοίτης από εκείνο το επίπεδο. Ιδιαίτερη εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι ενώ το αρχικό στρώμα είναι ιλυοαργιλώδης άμμος τα επόμενα υποκείμενα στρώματα είναι άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας. Από τα τρία δείγματα για τα οποία έγιναν κοκκομετρικές αναλύσεις βρέθηκε ότι το ποσοστό της άμμου είναι ίσο με 52% για το υπερκείμενο δείγμα (2.50 – 3.0 m), 9% για το επόμενο υποκείμενο δείγμα (3.50 – 4.0 m) και μόλις 6% για το πιο υποκείμενο δείγμα (5.0 – 5.40 m). Τα αθροιστικά ποσοστά της ιλύος και της αργίλου είναι ίσα με 48%, 91% και 94% αντίστοιχα. Η διαστρωμάτωση αυτή είναι πράγματι περίεργη καθώς κανείς θα περίμενε τα πιο χονδρόκοκκα υλικά να βρίσκονται σε υποκείμενα στρώματα. Είναι πολύ πιθανό η άργιλος να είχε αποτεθεί σε περιόδους που η στάθμη του ταμιευτήρα να ήταν αρκετά υψηλή (και επομένως η πολύ λεπτή άργιλος να είχε αποτεθεί στο πιο κατάντη σημείο των αποθέσεων της υπόψη περιόδου) και κατά την επόμενη περίοδο που υπήρχε ταπείνωση της στάθμης να αποτέθηκε ένα πιο χονδρόκοκκο υλικό από πάνω.

Στη διατομή του πυθμένα του ταμιευτήρα εκτιμάται με βάση την υδρογραφική αποτύπωση ότι το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 5 έως 9 m ενώ στη θέση της γεώτρησης το πάχος των αποθέσεων εκτιμάται στα 7 m περίπου. Το απόλυτο υψόμετρο του πυθμένα με βάση την υδρογραφική αποτύπωση του 1998 θα έπρεπε να κυμαίνεται μεταξύ των +260 και +257 m περίπου. Με δεδομένη τη στάθμη του ταμιευτήρα στα +258 m θα έπρεπε το σημείο αυτό να είναι ουσιαστικά η διατομή που ξεκινά ο ταμιευτήρας. Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η τομή του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης.

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ1		
Θέση : Καπάνη συμβολής π. Γρανισιώτη		Βάθος : 20.00 m
Συντεταγμένες: 39°03.011'N - 21°23.955'E		Υψόμετρο πυθμένα: +250m
Έτος κατασκευής : 2001		
Βάθος (m)	Λιθολογική τομή	Λιθολογική Περιγραφή
0		Στρώμα τεφρής πολύ μαλακής αργιλώδους ιλύος
1		Στρώμα καστανότεφρης πολύ χαλαρής λεπτόκοκκης άμμου με λίγα γωνιώδη ή στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις (dmax = 7 cm)
2		
3		
4		Στρώμα καστανότεφρης πολύ χαλαρής λεπτόκοκκης άμμου με λίγα γωνιώδη ή στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις (dmax = 7 cm)
5		
6		
7		Ιλυώδης άμμος με διάσπαρτες κροκάλες
8		
9		Στρώμα τεφροκάστανης λεπτόκοκκης άμμου με ιλύ και χάλικες κατά θέσεις, μέσης πυκνότητας
10		
11		
12		
13		
14		Στρώμα καστανής άμμου με ιλύ και χάλικες ή χαλίκων με ιλύ και άμμο. Το ιλώδες υλικό είναι ασβεστικό και οι χάλικες ασβεστολιθικής - ψαμμιτικής προέλευσης (dmax = 4cm)
14,50		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

Σχήμα 21: Σχηματική παράσταση της λιθολογικής τομής της Γεώτρησης Γ1.



Σχήμα 22: Τομή του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης Γ2.

Στο σημείο της γεώτρησης το βάθος του νερού θα έπρεπε να είναι ίσο με 1 m. Η γεώτρηση έγινε στο μέσον της διαθέσιμης βρεχόμενης διατομής του ταμιευτήρα που ήταν κατά πολύ μικρότερη από τη διατομή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 22. Το βάθος του νερού στη θέση της γεώτρησης ήταν 3 m που καταρχήν αναιρεί τα αποτελέσματα της υδρογραφικής αποτύπωσης. Όμως αν εξετάσει κανείς διεξοδικά τις φωτογραφίες που φαίνονται στο Σχήμα 23 και Σχήμα 23, σχηματίζεται ένας αναβαθμός περίπου στο μέσο της αρχικής διατομής πολύ μεγάλης κλίσης (σχεδόν κατακόρυφης) και ύψους περίπου 4 m. Ο αναβαθμός αυτός δεν εμφανίζεται πουθενά στη διατομή στο Σχήμα 22, άρα δεν υπήρχε το 1998, έτος διενέργειας της υδρογραφικής αποτύπωσης. Στο συγκεκριμένο τμήμα του κλάδου του Αχελώου, το οποίο είναι ευθύγραμμο μεταξύ δύο διαδοχικών στροφών της αρχικής κοίτης του ποταμού, παρατηρείται ένα εκτεταμένο μέτωπο των αναβαθμών που καταλαμβάνει σχεδόν όλο το τμήμα. Η μέγιστη τιμή του ύψους του αναβαθμού αυτού εμφανίζεται στη μέση περίπου του τμήματος με μειούμενα ύψη στις άκρες.



Σχήμα 23: Αποψη της διατομής του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης Γ2 με όψη προς την ανατολική όχθη.

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται με μεγάλη λεπτομέρεια η μορφή του μετώπου των αναβαθμών στο τμήμα αυτό. Ήταν αδύνατο να εξακριβωθεί αν αυτού του είδους οι αναβαθμοί εξαπλώνονται και προς το ανάντη τμήμα καθώς λόγω του μικρού βάθους δεν υπήρχε η δυνατότητα να πλεύσει η λέμβος προς το τμήμα αυτό.

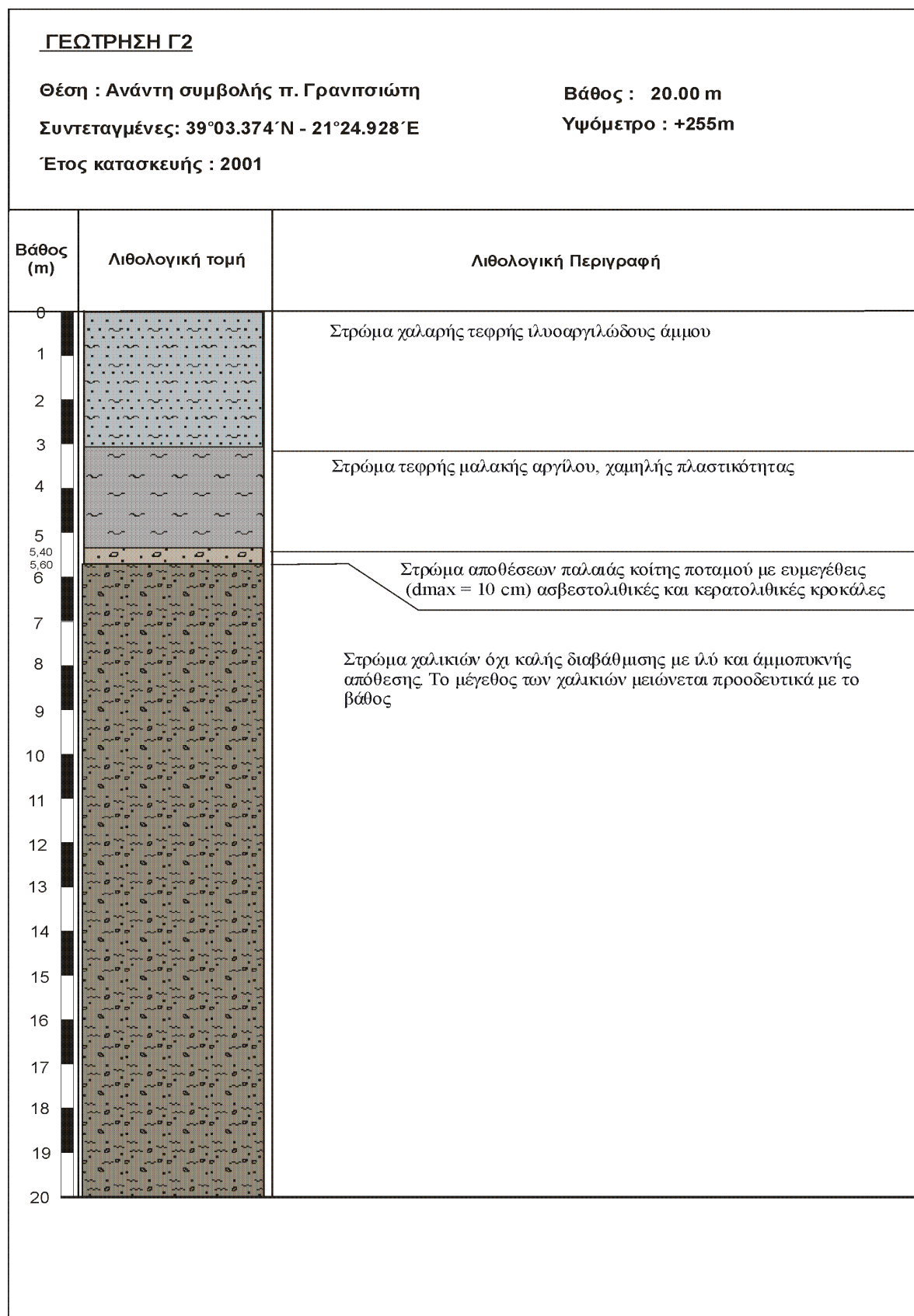


Σχήμα 24: Εικόνα του μετώπου των αναβαθμών στην περιοχή της γεώτρησης Γ2.

Άλλη άποψη από το μέτωπο των αναβαθμών από πιο μακρινή λήψη εμφανίζεται στη Φωτογραφία 10, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ. Θα ήταν ενδιαφέρον εδώ να εξετάσει κανείς την «ιστορία» του ταμιευτήρα από την ημερομηνία διενέργειας της υδρογραφικής αποτύπωσης έως τη διενέργεια της δειγματοληπτικής γεώτρησης το Σεπτέμβριο του 2001. Από το καλοκαίρι του 1999 και ένθεν ακολούθησαν δύο ξηρά υδρολογικά έτη, που σε συνάρτηση με την πολιτική διαχείρισης του ταμιευτήρα, είχε ως αποτέλεσμα η στάθμη του να εμφανίζει σημαντική πτώση με μέγιστο ελάχιστο στα +250.82 m το Δεκέμβριο του 2000. Η στάθμη αυτή είναι κατά 8 m χαμηλότερη από την αντίστοιχη στάθμη κατά τη δειγματοληψία, γεγονός που δείχνει ότι η συγκεκριμένη περιοχή ήταν εκτός ταμιευτήρα για τουλάχιστον ένα έτος και στην περιοχή εκείνη ο Αχελώος είχε την κανονική του ροή. Για την ίδια τιμή επίσης του μέγιστου ελάχιστου της στάθμης, η διατομή στη θέση της γεώτρησης Γ1 ήταν οριακά στο σημείο έναρξης του ταμιευτήρα. Από αυτό το χρονικό σημείο μέχρι σήμερα η στάθμη του ταμιευτήρα αυξάνεται συνεχώς έως να φτάσει τη σημερινή του τιμή. Το ερώτημα πλέον είναι πως δημιουργήθηκε αυτός ο αναβαθμός, η εκσκαφή ουσιαστικά του δυτικού τμήματος των αποθέσεων στη διατομή της Γ2 γεώτρησης.

Με τις πρώτες χειμερινές πλημμύρες του υδρολογικού έτους 2000-2001, οι οποίες πλέον στο σημείο εκείνο είχαν μικρότερη μείωση της ταχύτητας ροής (λόγω της καμπύλης υπερύψωσης από τον ταμιευτήρα) απότι θα είχαν σε άλλη περίπτωση (με υψηλότερη στάθμη στον ταμιευτήρα), έγινε διάβρωση (εκσκαφή) των επιφανειακών στρωμάτων των αποθέσεων στο δυτικό τμήμα της διατομής. Όπως φαίνεται και στη φωτογραφία, το υλικό των αποθέσεων που αποκαλύπτεται από τον αναβαθμό (και ουσιαστικά προσφέρει μια αποκαλυπτική τομή των αποθέσεων) είναι κατά κύριο λόγο πολύ μικρής διαμέτρου κόκκου (ιλλοαργιλώδης άμμος) και πολύ εύκολα διαβρώσιμο. Το στρώμα της ιλλοαργιλώδους άμμου του αναβαθμού είναι κατά βάση συνέχεια του αρχικού στρώματος της ιλλοαργιλώδους άμμου που προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση του υπερκείμενου δείγματος της γεώτρησης. Λόγω της μορφής της κοίτης σε αυτό το σημείο (δεξιά στροφή προς τα κατάντη) η ροή διέβρωσε το δεξί (δυτικό) τμήμα της διατομής. Τέτοιοι αναβαθμοί εμφανίζονται και αλλού στην ίδια περιοχή. Για παράδειγμα στη Φωτογραφία 11, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ, εμφανίζονται και άλλοι αναβαθμοί αποθέσεων φερτών υλικών στη συμβολή του π. Γρανισιώτη με τον Αχελώο, οι οποίοι δημιουργούνται από τοπική διάβρωση των τμημάτων των αποθέσεων από τη ροή των υδατορευμάτων όταν η στάθμη του ταμιευτήρα έχει υποχωρήσει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.

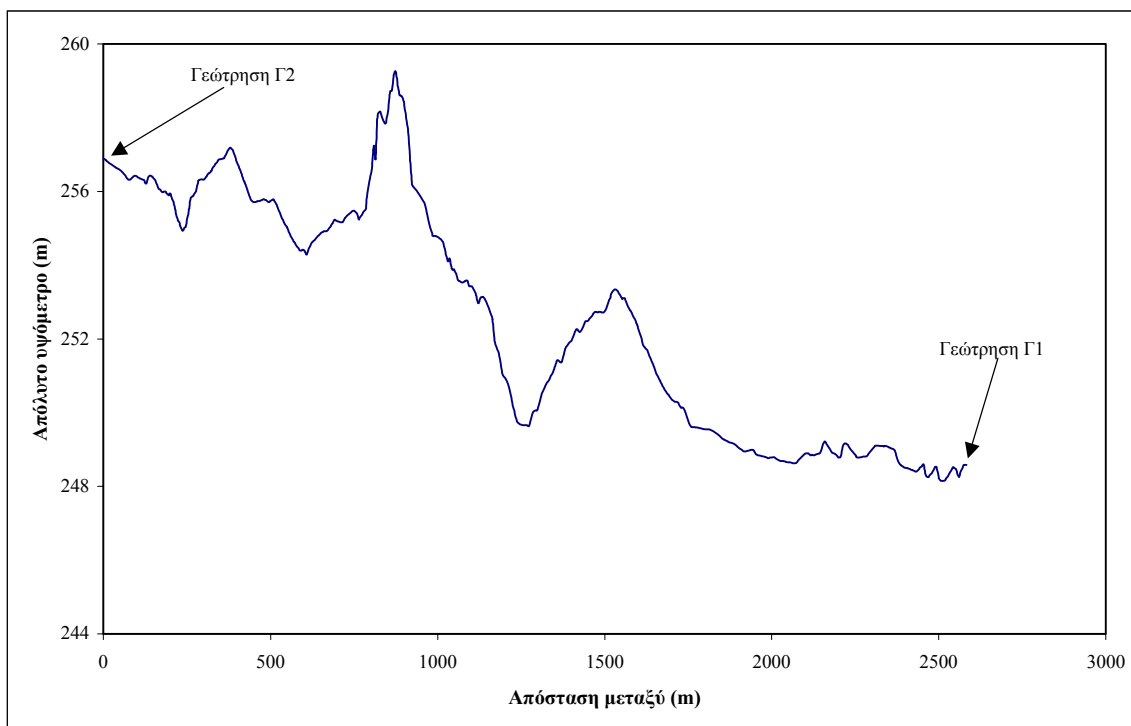
Το παραπάνω σκεπτικό αποτελεί μια υπόθεση η οποία επιβεβαιώνεται όμως από το αποτέλεσμα της εργαστηριακής ανάλυσης των δειγμάτων. Από την ανάλυση αυτή διαπιστώνεται ότι το πάχος των αποθέσεων σε εκείνο το σημείο είναι περίπου 7 m. Αυτό σημαίνει ότι αν αθροίσουμε το πάχος των μετρημένων αποθέσεων (5.4 m) και το βάθος του νερού (3 m) και αφαιρέσουμε το βάθος του νερού που υπήρχε κατά τη διάρκεια της πλωτής δειγματοληψίας (1 m), τότε προκύπτει ότι το πραγματικό πάχος των αποθέσεων θα πρέπει να είναι ίσο με 7.4 m το οποίο διαφοροποιείται από την αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε και εμφανίζεται στο Σχήμα 22 κατά 0.5 m περίπου, τιμή που θεωρείται στα όρια του σφάλματος σε πλωτές γεωτρήσεις.



Σχήμα 25: Σχηματική παράσταση της λιθολογικής τομής της Γεώτρησης Γ2.

Το τμήμα της άμμου που διαβρώθηκε από τη θέση της Γ2 μεταφέρθηκε κατάντη έως το σημείο που η ταχύτητα ροής ελαχιστοποιείται και πραγματοποιείται εκ νέου απόθεση. Η απόσταση αυτή περιορίζεται από τη χαμηλότερη στάθμη του ταμιευτήρα που την περίοδο εκείνη περίπου ήταν στο επίπεδο του πυθμένα του ταμιευτήρα στη θέση της γεώτρησης Γ1. Επομένως μπορεί να υποτεθεί ότι το τμήμα της άμμου που διαβρώθηκε από τη Γ2 μεταφέρθηκε προς τα κατάντη και αποτέθηκε στη θέση της Γ1 καθώς σταδιακά η στάθμη του ταμιευτήρα αυξάνεται. Επομένως, μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι η διαφορά των 2 m μεταξύ του εκτιμώμενου πάχους των αποθέσεων από την υδρογραφική αποτύπωση και του μετρημένου από την δειγματοληψία προέρχεται από την εκ νέου μεταφορά και απόθεση της ιλυοαργιλώδους άμμου που διαβρώθηκε από τη Γ2. Σε αυτό το γεγονός ίσως οφείλεται και η επικράτηση της όχι καλά διαβαθμισμένης άμμου στο υπερκείμενο δείγμα της Γ1.

Συμπερασματικά, εξετάζοντας τις δύο γεωτρήσεις και συγκρίνοντας την κλίση της κοίτης του Αχελώου πριν την κατασκευή του φράγματος με τη σημερινή κατάσταση διαπιστώνει ότι είναι πράγματι συγκρίσιμες. Ενώ η υψομετρική διαφορά των δύο σημείων κατά την αρχική κατάσταση είναι 8 m περίπου, στη σημερινή η αντίστοιχη διαφορά είναι ίση με 10 m. Στο Σχήμα 26 εμφανίζεται η ευθύγραμμη τομή της αρχικής κοίτης του κλάδου του Αχελώου μεταξύ των θέσεων των δύο γεωτρήσεων. Οι εξάρσεις του αναγλύφου αντιστοιχούν σε στροφές της αρχικής κοίτης.



Σχήμα 26: Ευθύγραμμη τομή της αρχικής κοίτης του κλάδου του Αχελώου μεταξύ των θέσεων των δύο γεωτρήσεων. Οι εξάρσεις του αναγλύφου αντιστοιχούν σε στροφές της αρχικής κοίτης.

Συμπερασματικά, μπορεί κανείς να υποθέσει, με όσα περιθώρια δίνονται από τη διενέργεια μόνο δύο γεωτρήσεων, ότι η μεθοδολογία υπολογισμού του όγκου των αποθέσεων είναι σε γενικές γραμμές ακριβής και αξιόπιστη και μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό υπόβαθρο για την έρευνα των αποθέσεων στον ταμιευτήρα. Καθώς διαπιστώθηκε ότι η έκταση των αποθέσεων των φερτών υλικών καταλαμβάνουν ένα σχετικά μικρό τμήμα του ταμιευτήρα, είναι δυνατή η διενέργεια παρόμοιων υδρογραφικών αποτυπώσεων, διαδοχικών ανά κανονικά χρονικά

διαστήματα (π.χ. 3- 5 ετών) ώστε να υπολογιστεί ο ετήσιος ρυθμός απόθεσης των φερτών υλικών. Ο υπολογισμός αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία με την έναρξη λειτουργίας των ταμιευτήρων στον άνω ρου του Αχελώου (Μεσοχώρα, Συκιά) για τη μελέτη της επίπτωσης των έργων αυτών στην στερεοαπορροή.

5 Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών

5.1 Περιβάλλον λειτουργίας

Η στερεοαπορροή εξαρτάται αποκλειστικά από διάφορες υδρολογικές (π.χ. βροχόπτωση, απορροή) αλλά και φυσιογραφικές (π.χ. γεωλογία, τοπογραφία) παραμέτρους, οι οποίες έχουν σε μεγάλο βαθμό συγκεντρωθεί και ταξινομηθεί. Επειδή η στερεοαπορροή σε μεγάλης κλίμακας λεκάνες απορροής εξαρτάται από παράμετρους που είναι χωρικά μεταβαλλόμενες, οι παράμετροι αυτές έχουν εισαχθεί σε Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ), ώστε να είναι πιο παραστατική η χωρική κατανομή τους. Το ΣΓΠ εκτός από την δυνατότητα αποθήκευσης, ανάκτησης και τροποποίησης των πρωτογενών δεδομένων, περιλαμβάνει και τις εφαρμογές εκείνες που επιτρέπουν την πραγματοποίηση συγκεκριμένων επεξεργασιών. Τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο ΣΓΠ και οι απαιτούμενες για την επεξεργασία εφαρμογές, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Τα ΣΓΠ συνδέουν γεωγραφικές πληροφορίες με μια βάση δεδομένων και επιτρέπουν την προσομοίωση στοιχείων του γεωγραφικού χώρου όπως αυτά διατάσσονται πραγματικά στο χώρο, τόσο σε δισδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη μορφή. Τα ΣΓΠ δηλαδή, αποτελούν μία εξέλιξη της ψηφιακής χαρτογράφησης και επομένως έχουν άμεση εξάρτηση από τοπογραφικές πληροφορίες.

Η βάση δεδομένων μπορεί να περιέχει οποιαδήποτε πληροφορία για στοιχεία του γεωγραφικού χώρου και να συνδέεται με άλλες ανάλογες πληροφορίες. Η βάση αυτή δεν δεσμεύεται από τις γεωγραφικές πληροφορίες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα με τη μορφή πίνακα, τόσο για μεμονωμένα στοιχεία του χώρου όσο και για συνδυασμό τους σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Τα ΣΓΠ προσφέρουν μια σειρά πλεονεκτημάτων στην υλοποίηση εφαρμογών, που συνοψίζονται στα εξής:

- Συνδυάζουν τη διαχείριση βάσης δεδομένων με τη γραφική απεικόνιση χαρτών και άλλες πληροφορίες στο χώρο.
- Επιτρέπουν άμεση πρόσβαση σε ακριβείς πληροφορίες.
- Επιτρέπουν ταυτόχρονη ενημέρωση του γραφικού μέρους και της βάσης δεδομένων.
- Έχουν τη δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων από και σε άλλα λογισμικά.

Όσον αφορά στη χρήση τους σε υδρολογικές εφαρμογές, οι τεχνικές που υποστηρίζονται από τα ΣΓΠ προσφέρουν δυνατότητες όπως:

- Παρεμβολή και επιφανειακή ολοκλήρωση υδρολογικών μεταβλητών.
- Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής.

- Εξαγωγή υδρολογικών ιδιοτήτων λεκάνης απορροής με βάση την επιφάνεια υψομέτρου (συγκέντρωση ροής, υδρογραφικό δίκτυο).
- Συσχέτιση απορροής με δεδομένα λεκάνης (εδαφολογία, φυτοκάλυψη, γεωλογία, χρήσεις γης).

Το ARCVIEW είναι ένα πρόγραμμα ΣΓΠ, το οποίο έχει δυνατότητα οπτικοποίησης και διαχείρισης γεωγραφικών δεδομένων. Το λειτουργικό σύστημα με το οποίο είναι συμβατό το πρόγραμμα ARCVIEW είναι τα Windows. Πρόκειται δηλαδή για ένα παραθυρικό πρόγραμμα με μενού και γραμμές εργαλείων.

Τα δεδομένα συνδέονται με τους ψηφιακούς χάρτες και παρέχεται η δυνατότητα διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων αυτών και με γεωγραφικό τρόπο έτσι ώστε να διαφαίνονται εύκολα οι σχέσεις μεταξύ των γεωγραφικών περιοχών. Όλα αυτά είναι δύσκολο να γίνουν μέσα από απλές καταστάσεις (reports) και φύλλα εργασίας (spreadsheets).

Το ΣΓΠ ARCVIEW παρέχει δυνατότητες για:

- Δημιουργία ψηφιακών χαρτών.
- Δημιουργία νέων γεωγραφικών περιοχών, γραμμών ή σημείων, χρησιμοποιώντας τα σχεδιαστικά εργαλεία του συστήματος και τη δυνατότητα της ψηφιοποίησης.
- Διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων μέσω θεματικών χαρτών, γραφημάτων και αναφορών.
- Επεξεργασία των θεματικών χαρτών (editing).
- Εκτύπωση χαρτών με υπόμνημα, σύμβολα κλίμακας και διεύθυνσης ή και γραφήματα.
- Εξαγωγή των χαρτών σε τύπους αρχείων άλλου γραφικού προγράμματος.
- Εκτύπωση σε μορφή αφίσας (PostScript).
- Συνεργασία με άλλα σχεδιαστικά προγράμματα ή ΣΓΠ (AutoCAD, ARCINFO).

5.2 Υδρολογικές παράμετροι

Από τις υδρολογικές παραμέτρους έχουν συγκεντρωθεί οι ημερήσιες βροχοπτώσεις στους 20 βροχομετρικούς σταθμούς που έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν στη λεκάνη απορροής καθώς των οκτώ βροχογράφων που είναι εγκατεστημένοι στους αντίστοιχους από τους ανωτέρω βροχομετρικούς σταθμούς. Ημερήσιες παροχές έχουν υπολογισθεί σε θέσεις υδρομετρήσεων σε κάθε ποταμό ενώ υπάρχουν και πιο μικρού χρονικού βήματος (ωριαίες) σε όσους σταθμούς έχει τοποθετηθεί σταθμηγράφος. Στερεοϋδρομετρήσεις δεν εκτελούνται πλέον από την αρμόδια υπηρεσία της ΔΕΗ γεγονός που δυσκολεύει τη διαδικασία εκτίμησης της στερεοαπορροής. Στερεοϋδρομετρήσεις υπάρχουν στο υδρομετρικό σταθμό Αυλάκι στον π. Αχελώο ενώ ένα πολύ μικρό δείγμα υπάρχει ανάντη του φράγματος της Μεσοχώρας. Συνοπτικά έχουν συγκεντρωθεί τα εξής:

Πρωτογενή δεδομένα

1. Ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα 18 σταθμών για περίοδο 40 ετών.

2. Ωριαία βροχομετρικά δεδομένα 3 σταθμών για περίοδο 40 ετών.
3. Ημερήσια υδρομετρικά δεδομένα (σταθμημετρικά, σταθμηγραφικά, υδρομετρήσεις) σε τρεις σταθμούς (Αυλάκι, Γέφυρα Βαρβαριάδας, Γέφυρα Γερομπόρου).
4. Στερεουδρομετρήσεις στη θέση Κρεμαστά, Αυλάκι και Μεσοχώρα.

Παράγωγα δεδομένα

1. *Ημερήσιες και μηνιαίες επιφανειακές βροχοπτώσεις:* Η μετατροπή των σημειακών σε επιφανειακές βροχοπτώσεις στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών υπολογίστηκαν με την εφαρμογή της γνωστής μεθόδου επιφανειακής ολοκλήρωσης των πολυγώνων Thiessen (π.χ. Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1998]. Οι συντελεστές Thiessen υπολογίστηκαν ως εφαρμογή στο πρόγραμμα ARCINFO και παρουσιάζονται στον Πίν. 5, σελ. 44.

2. *Ημερήσιες και μηνιαίες παροχές στις θέσεις των υδρομετρικών σταθμών:* Οι ημερήσιες παροχές προκύπτουν από την εφαρμογή των καμπυλών στάθμης – παροχής στις μετρήσεις στάθμης στους υδρομετρικούς σταθμούς που λειτουργούν στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών. Οι καμπύλες στάθμης – παροχής έχουν παρόμοια μαθηματική έκφραση με τις καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής και μετατρέπουν τη στιγμιαία καταγραφή της στάθμης από σταθμήμετρο σε ημερήσια παροχή και μετά σε μηνιαία ή και σε ετήσια. Σε περίπτωση που είναι εγκατεστημένος και σταθμηγράφος (στην περίπτωση του υδρομετρικού σταθμού του Αχελώου στη θέση Αυλάκι) τότε η ημερήσια παροχή του υδατορεύματος προκύπτει ως η ολοκλήρωση των επιμέρους παροχών (π.χ. ωριαίων). Οι καμπύλες στάθμης – παροχής κατασκευάζονται με βάση ειδική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για αυτόν τον σκοπό στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ [Τσακαλίας και Κουτσογιάννης, 1995]. Σε αρκετές περιπτώσεις δεν κατέστη δυνατή η εκτίμηση των παροχών σε μηνιαία και σε ετήσια κλίμακα λόγω των κενών που υπήρχαν στην καταγραφή της στάθμης.

3. *Ημερήσιες και μηνιαίες στερεοπαροχές στη θέση Αυλάκι του ποταμού Αχελώου:* Ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών δεν κατέστη δυνατός λόγω των κενών που υπήρχαν στις μετρήσεις της στάθμης και αντίστοιχα στις εκτιμήσεις της παροχής αλλά και λόγω των σημαντικών κενών στις στερεουδρομετρήσεις.

5.3 Φυσιογραφικές παράμετροι

Από τις φυσιογραφικές παραμέτρους ενδιαφέρουν περισσότερο και έχουν συγκεντρωθεί οι εξής: (α) τοπογραφία, (β) γεωλογία, και (γ) χρήσεις γης.

5.3.1 Τοπογραφία

Το τοπογραφικό υπόβαθρο της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών έχει προέλθει από τη ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ σε κλίμακα 1:50000 και έχει γίνει η παραγωγή των Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου όλων των υπολεκανών των ποταμών και των θέσεων μέτρησης των παροχών και στερεοπαροχών. Έχουν χαραχθεί οι αντίστοιχοι υδροκρίτες καθώς και τα πολύγωνα Thiessen για κάθε βροχομετρικό σταθμό.

5.3.2 Γεωλογία

Η γεωλογία της λεκάνης απορροής επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διαβρωσιμότητα του εδάφους και επομένως τη στερεοαπορροή. Η γεωλογία έχει προέλθει από τους χάρτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) και από τον υδρολιθολογικό χάρτη της Ελλάδας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της μελέτης «Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας» [Υπουργείο Ανάπτυξης, 1996].

5.3.3 Χρήσεις γης

Αντίστοιχα οι χάρτες των χρήσεων γης (π.χ. δασικές εκτάσεις, αστικές περιοχές) της λεκάνης απορροής έχουν ληφθεί από τα αντίστοιχα επίπεδα, όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.4.

5.4 Πρωτογενή επίπεδα πληροφορίας

1. Λεκάνες απορροής των ποταμών Αχελώου, Αγραφιώτη και Μέγδοβα στη λίμνη των Κρεμαστών, του Αχελώου στη θέση Αυλάκι, του Αγραφιώτη στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας και του Τρικεριώτη στη θέση Γέφυρα Γερομπόρου. Οι λεκάνες έχουν χαραχθεί με βάση χάρτες κλίμακας 1:50000.
2. Υδρογραφικό δίκτυο των παραπάνω λεκανών, το οποίο έχει ψηφιοποιηθεί από χάρτες κλίμακας 1:100000.
3. Γεωγραφική θέση βροχομετρικών και υδρομετρικών σταθμών.
4. Πληροφορία για την υδροπερατότητα της περιοχής όπως έχει προκύψει από ψηφιοποίηση υδρολιθολογικού χάρτη κλίμακας 1:500000.
5. Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης οι οποίες έχουν προέλθει από την μελέτη με τίτλο «Συνολική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκτροπής Αχελώου» Μελετητής ΕΥΔΕ Αχελώου, 1995.
6. Ισοψείς καμπύλες των λεκανών απορροής (ψηφιοποιημένες από χάρτες κλίμακας 1:100000).
7. Ισοψείς καμπύλες του βυθού της λίμνης του ταμιευτήρα Κρεμαστών οι οποίες έχουν προέλθει από την ψηφιοποίηση παλαιών τοπογραφικών διαγραμμάτων (πριν την κατασκευή του φράγματος) κλίμακας 1:5000.
8. Ισοψείς καμπύλες του πυθμένα του ταμιευτήρα Κρεμαστών, όπως προέκυψαν από την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα.

5.5 Παράγωγα επίπεδα πληροφορίας.

1. Μορφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής και συγκεκριμένα εμβადόν, μέση κλίση, μέσο υψόμετρο, μήκος κύριας μισγάγγειας, μήκος και πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου.
2. Πολύγωνα και συντελεστές Thiessen των βροχομετρικών σταθμών για κάθε μια από τις λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν.
3. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου των λεκανών απορροής (διάσταση κανάβου 200 m).

4. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου του πυθμένα του ταμειυτήρα των Κρεμαστών, πριν την κατασκευή του ταμειυτήρα (διάσταση κανάβου 6 m).

5. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου του του πυθμένα του ταμειυτήρα Κρεμαστών στη σημερινή κατάσταση (διάσταση κανάβου 6 m).

Εφαρμογές

1. Υλοποίηση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου.

2. Τυποποιημένη εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών λεκανών απορροής και πολυγώνων Thiessen.

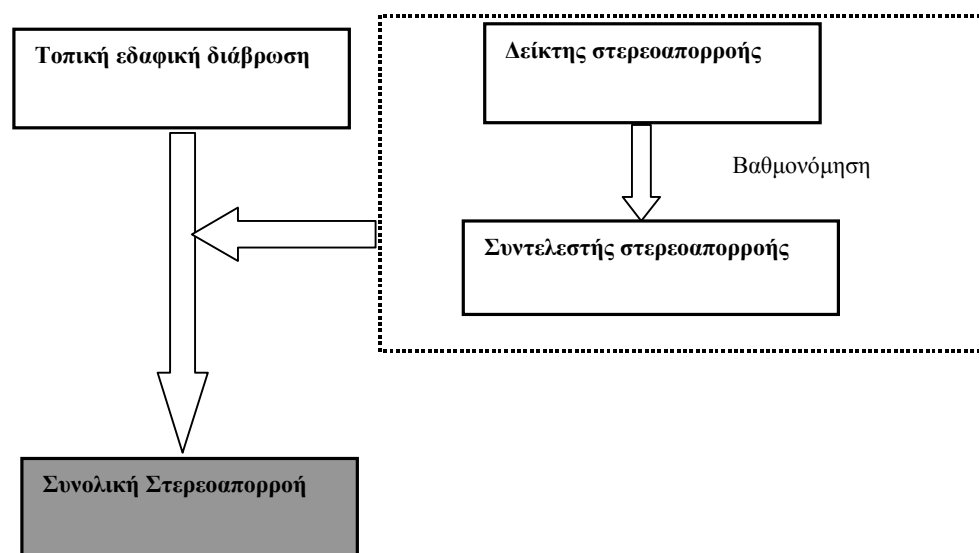
3. Σύγκριση ψηφιακών μοντέλων εδάφους και υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων ως διαφορά των δύο ψηφιακών μοντέλων.

6 Υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2, σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας, όπως για παράδειγμα η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών, η χρήση αναλυτικών μοντέλων που προσομοιώνουν με τη μέγιστη δυνατή λεπτομέρεια τις φυσικές διεργασίες της στερεοαπορροής δεν προσφέρουν σημαντικά βελτιωμένα αποτελέσματα για τους λόγους που αναφέρθηκαν. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος προτιμήθηκε η χρήση απλών εμπειρικών μεθόδων εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής, με την υιοθέτηση της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (Παράγραφος 2.2.1), βασισμένης σε σύγχρονο περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας. Το ΣΓΠ αυτό υλοποιείται στην πλατφόρμα ArcView 3.2 της ESRI. Το υδρολογικό μοντέλο ονομάζεται SEAGIS (version 1.0) της Danish Hydraulic Institute (DHI) και βρίσκεται ακόμα σε δοκιμαστική περίοδο (beta-version).

6.1 Εισαγωγή και περιγραφή του λογισμικού SEAGIS v. 1.0

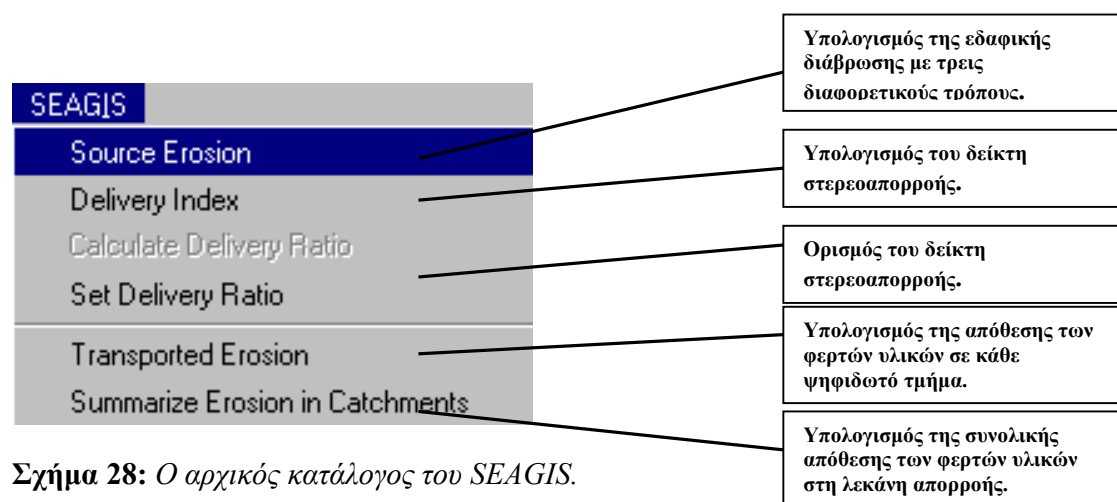
Ο όρος SEAGIS είναι συντόμευση των λέξεων Soil Erosion Assessment using GIS. Αποτελεί ένα πρόγραμμα βασισμένο σε ΣΓΠ και έχει αναπτυχθεί ως εφαρμογή του ArcView GIS και απαιτείται η εγκατάσταση του Spatial Analyst ώστε να γίνει εφικτή η χρήση του. Η εκτίμηση της στερεοαπορροής αποτελείται από δύο διαφορετικούς όρους: (α) από την τοπική εδαφική διάβρωση (source erosion), και (β) από τη μεταφερόμενη διάβρωση (transported erosion), με άλλα λόγια την στερεοπαροχή μέσω του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής. Στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται σχηματικά σε διάγραμμα ροής η βασική λογική του SEAGIS.



Σχήμα 27: Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του μοντέλου SEAGIS

Η τοπική εδαφική διάβρωση υπολογίζεται για κάθε ψηφιδωτό τμήμα (grid cell) της λεκάνης απορροής με βάση τρεις διαφορετικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές είναι η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (στην αρχική και στην αναθεωρημένη της μορφή), το μοντέλο Soil Loss Estimator for Southern Africa (SLEMSA), το οποίο προφανώς έχει αναπτυχθεί για τη Νότια Αφρική, καθώς και το μοντέλο Morgan and Finney (Morgan, 1986). Πολλαπλασιάζοντας την τοπική εδαφική διάβρωση με τον συντελεστή στερεοαπορροής (sediment delivery ratio), όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.1.1, προκύπτει η συνολική στερεοπαροχή στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Με την εγκατάσταση της εφαρμογής SEAGIS (αρχείο seagis.avx) στο ArcView, εμφανίζεται ένας νέος κατάλογος επιλογών στον αρχικό κατάλογο επιλογών του προσαρμοστικού χρήστη, ο οποίος έχει τον τίτλο *SEAGIS*. Επιλέγοντας αυτόν τον κατάλογο εμφανίζονται όλες οι απαραίτητες λειτουργίες για τη χρήση του προγράμματος. Στο Σχήμα 28 παρουσιάζεται ο κύριος κατάλογος του SEAGIS. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν όλες οι λειτουργίες του προγράμματος με τις αντίστοιχες θεωρητικές παραδοχές.



Σχήμα 28: Ο αρχικός κατάλογος του SEAGIS.

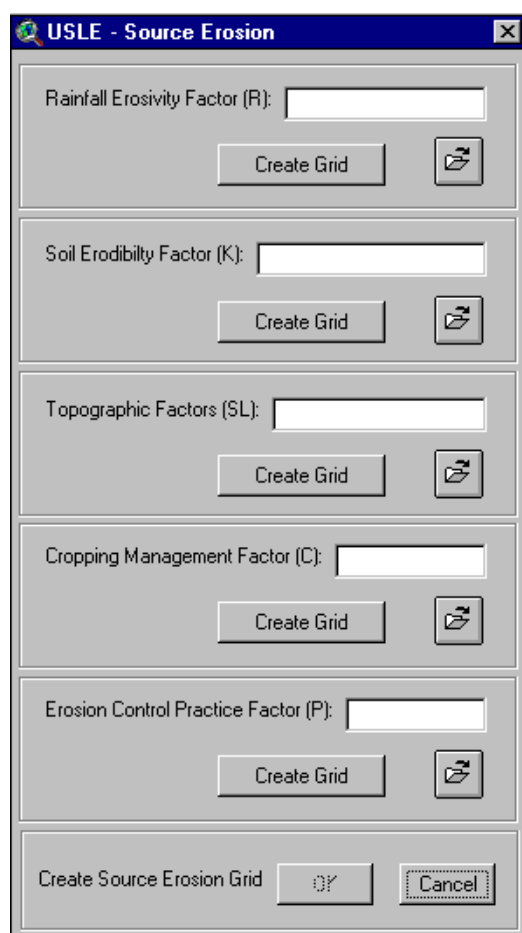
6.1.1 Εκτίμηση της τοπικής εδαφικής διάβρωσης

Για την εφαρμογή του μοντέλου στην λεκάνη Κρεμαστών, η εκτίμηση της τοπικής εδαφικής διάβρωσης έχει επιλεγεί να γίνει με τη χρήση της ΠΕΕΑ στην αρχική της μορφή [*Wischmeier and Smith, 1978*], όπως αναλυτικότερα έχει περιγραφεί στην Παράγραφο 2.2.1. Τα απαιτούμενα αρχικά δεδομένα που απαιτούνται για το «τρέξιμο» του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίν. 18. Είναι φανερό ότι στα πλεονεκτήματα του μοντέλου κατατάσσονται μεταξύ άλλων και η προφανής απλότητα στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων που σε γενικές γραμμές είναι πολύ εύκολο να διατεθούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, και οι τέσσερις απαιτούμενες κατηγορίες δεδομένων είναι διαθέσιμες από τη βάση δεδομένων που έχει δημιουργηθεί και περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5. Το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου απαιτείται για τον υπολογισμό του τοπογραφικού συντελεστή *LS* καθώς και για τον δείκτη στερεοαπορροής. Ο κánaβος της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης απαιτείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης *R*, ο εδαφικός – γεωλογικός χάρτης για τον προσδιορισμό του συντελεστή της εδαφικής διαβρωσιμότητας *K* και τέλος ο χάρτης των χρήσεων γης απαιτείται για τον υπολογισμό του συντελεστή της εδαφικής φυτοκάλυψης *C* και του συντελεστή διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης, *P*.

Πίν. 18: Ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα για τη χρήση του μοντέλου SEAGIS.

Δεδομένα	Μορφή δεδομένων
Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (ΨΜΑ)	Κάναβος ⁹
Κάναβος Μέσης Ετήσιας Βροχόπτωσης	Κάναβος
Εδαφικός – Γεωλογικός Χάρτης	Shapefile ¹⁰
Χάρτης Φυτοκάλυψης	Shapefile

Επιλέγοντας από τον αρχικό κατάλογο την επιλογή “*Source Erosion*” και αφού έχουμε επιλέξει τη μέθοδο της USLE/RUSLE και τις μονάδες στο σύστημα SI, εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου που φαίνεται στο Σχήμα 29.

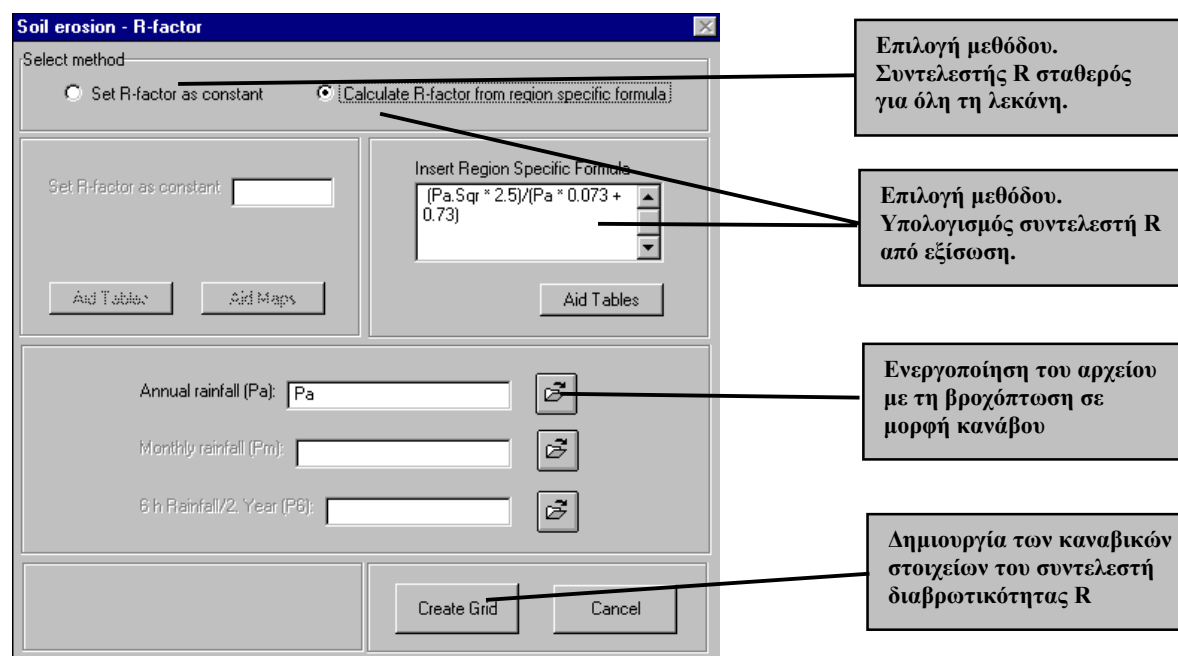
**Σχήμα 29:** Ο κεντρικός κατάλογος για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης.

Για καθένα από τους συντελεστές της ΠΙΕΕΑ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα δικά του δεδομένα ή να αναζητήσει βοήθεια από πίνακες. Όλα τα δεδομένα που εμφανίζονται στον Πίν. 18

⁹ Η μορφή των αρχείων GRID είναι κατατεθειμένη από την ESRI και υποστηρίζει 32-bit ακέραιους και 32-bit floating point raster αρχεία κανάβου.

¹⁰ Η μορφή Shapefile είναι κατατεθειμένη από την ESRI, είναι διανυσματική και αποθηκεύει γεωμετρική θέση και χαρακτηριστικές πληροφορίες των γεωγραφικών στοιχείων.

μετατρέπονται σε κানাβο μέσω της εντολής «Convert to Grid» του ArcView. Το σημαντικότερο σημείο στον υπολογισμό των παραμέτρων είναι ο υπολογισμός του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχοπτώσης R . Επιλέγοντας την επιλογή «Create Grid» από τον αρχικό κατάλογο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 29, προκύπτει ο κατάλογος που φαίνεται στο Σχήμα 30. Ο κατάλογος αυτός επιτρέπει τον υπολογισμό του συντελεστή R από τον κানাβο των μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τιμές του συντελεστή R από πίνακες ή σχήματα (σε περίπτωση που για την περιοχή μελέτης έχουν υπολογιστεί οι τιμές αυτές) ή εισάγει μία εξίσωση παρεμβολής που να συνδέει τη μέση ετήσια βροχοπτώση με τον συντελεστή R που ισχύει για την υπόψη περιοχή μελέτης. Στο πλαίσιο διαλόγου «select method», ο χρήστης μπορεί να απαιτήσει ο συντελεστής R να είναι συγκεκριμένος «Set R-factor constant» και ο χρήστης να ορίσει την τιμή του από σχετικούς πίνακες και χάρτες ή να υπολογιστεί βάσει κάποιας σχέσης που να συνδέει τη μέση ετήσια βροχοπτώση με τη μορφή καναβικού αρχείου με το συντελεστή R «Calculate R-factor from region specific formula».



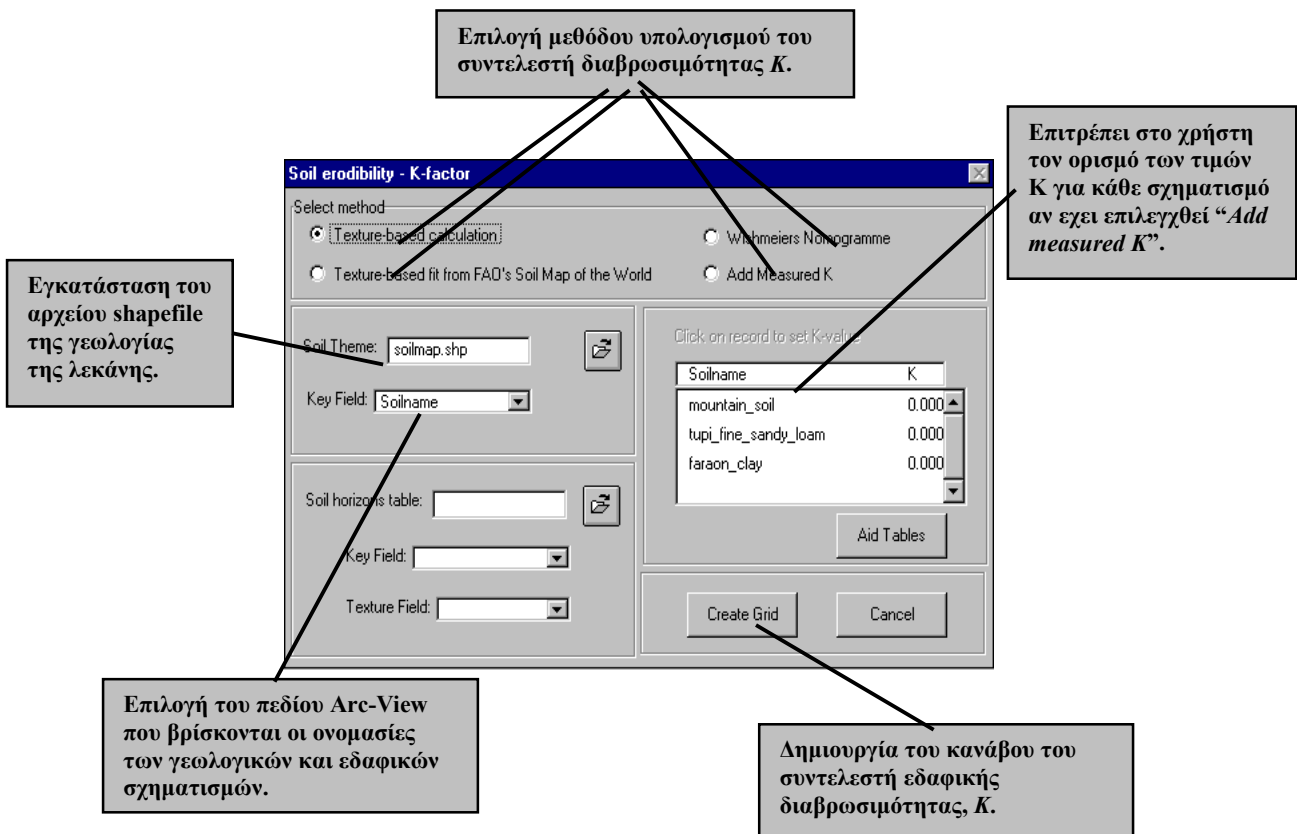
Σχήμα 30: Σχηματική επεξήγηση του πλαισίου διαλόγου για τον υπολογισμό του συντελεστή R .

Επειδή το μοντέλο αυτό είναι ακόμα σε περίοδο δοκιμαστικής χρήσης δεν είναι ενεργοποιημένες οι επιλογές των μηνιαίων βροχοπτώσεων καθώς επίσης και οι βροχοπτώσεις διάρκειας 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών. Η εισαγωγή των μηνιαίων βροχοπτώσεων αντί των ετήσιων χωρίς μεταβολή κάποιων από τους υπόλοιπους συντελεστές, δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή, αφού σε κάθε περίπτωση η ΠΕΕΑ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ετήσιων τιμών της εδαφικής διάβρωσης. Στο πλαίσιο διαλόγου «Insert Region Specific Formula» ο χρήστης πληκτρολογεί την εξίσωση χρησιμοποιώντας τους συντακτικούς κανόνες για αριθμητικές συναρτήσεις μέσω του «Map Calculator»¹¹. Επιλέγοντας το πλαίσιο «Create Grid», θα ζητηθεί

¹¹ Το Map Calculator είναι ένα πλαίσιο διαλόγου το οποίο χρησιμοποιεί μαθηματικές εκφράσεις σε καναβικά αρχεία στο ARC-View χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Spatial Analyst.

από το χρήστη να ορίσει το μέγεθος και το βήμα του εξαγόμενου κανάβου R . Η επιλογή «same as» βεβαιώνει ότι ο εξαγόμενος κανάβος θα έχει το ίδιο μέγεθος και βήμα με το κανάβο των ετήσιων βροχοπτώσεων αποφεύγοντας έτσι ανώφελες παρεμβολές. Οι μονάδες μέτρησης του συντελεστή R είναι $[MJ*mm/(ha*h)]$.

Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους K υπολογίζεται από ένα αρχείο shapefile, το οποίο παριστάνει το γεωλογικό και εδαφολογικό χάρτη της λεκάνης απορροής. Σε ένα από τα πεδία αναγράφονται ονομαστικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί στη λεκάνη απορροής. Σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό αναφέρεται μια συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή K , η οποία προκύπτει από τη σχετική διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία. Οι γεωλογικές ενότητες της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών αποτελείται κατά κύριο λόγο από εκτεταμένες ζώνες φλύσχη και ασβεστόλιθου (περισσότερο γνωστές ως ζώνη Γαβρόβου). Στο Σχήμα 31 παρουσιάζεται το πλαίσιο διαλόγου του υπολογισμού του συντελεστή K .

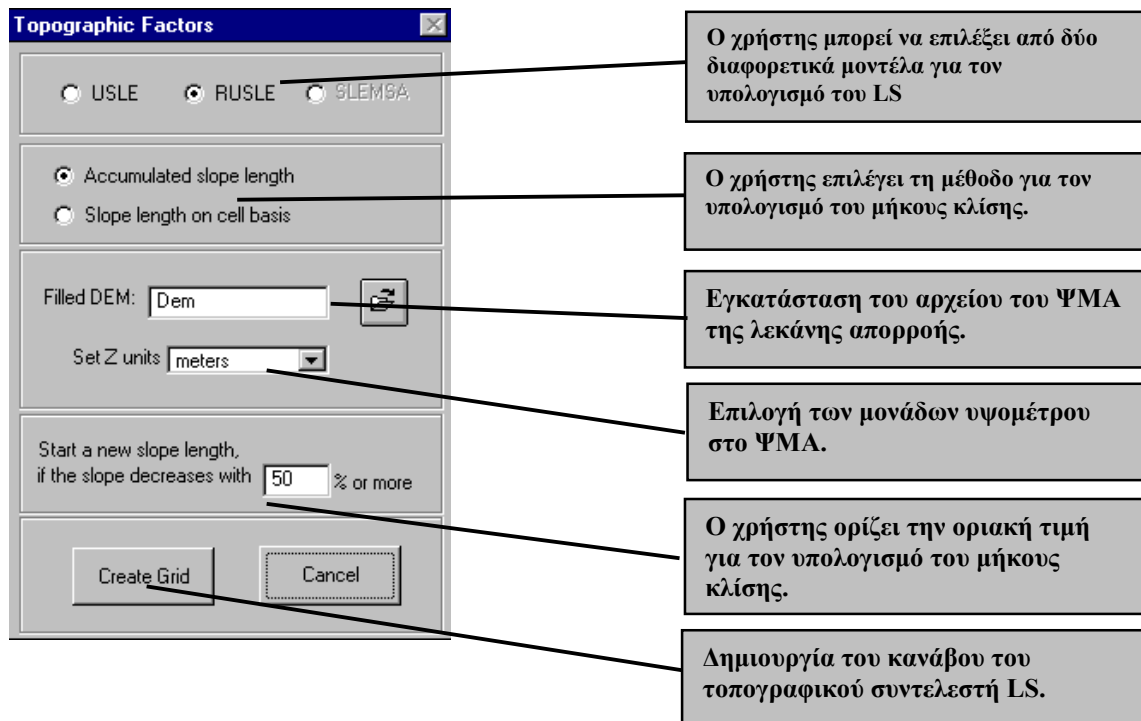


Σχήμα 31: Σχηματική επεξήγηση του πλαισίου διαλόγου για τον υπολογισμό του κανάβου του συντελεστή της εδαφικής διαβρωσιμότητας K .

Οι μονάδες του εξαγόμενου κανάβου του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K είναι $[t h MJ^{-1} mm^{-1}]$.

Ο τοπογραφικός συντελεστής LS (topographic factor) προκύπτει από το ΨΜΑ της λεκάνης απορροής μετά από την απαραίτητη επεξεργασία, που περιγράφεται παρακάτω. Το πλαίσιο διαλόγου του υπολογισμού του τοπογραφικού συντελεστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 32. Ο

τοπογραφικός συντελεστής αποτελείται από το συντελεστή μήκους κλιτύς L (slope-length factor) και το συντελεστή της κλίση κλιτύς S (slope-gradient factor). Το μήκος κλιτύς μπορεί να υπολογιστεί από το μήκος κάθε ψηφίδας στο οριζόντιο επίπεδο (slope length on pixel basis) ή εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω διαδικασία. Για καθένα από τα υψηλότερα σημεία τη λεκάνης απορροής υπολογίζονται ξεχωριστά διαφορετικές διευθύνσεις επιφανειακής απορροής. Στο αντίστοιχο πλαίσιο διαλόγου ο χρήστης θα πρέπει να έχει ορίσει μία οριακή τιμή της κλίσης κλιτύς, για την οποία αν η κλίση γίνει μικρότερη από αυτήν την τιμή τότε ο υπολογισμός του μήκους κλιτύς ξεκινά από την αρχή για τα κατάντη τμήματα (accumulated slope length). Για παράδειγμα, αν έχει οριστεί η οριακή τιμή 50% και η κλίση κλιτύς μειωθεί από τις 10° στις 4° τότε το σύνολο των ανάντη φερτών υλικών υπολογίζεται ότι θα αποτεθούν σε εκείνο το σημείο, οπότε ο υπολογισμός της νέας τιμής του μήκους κλίσης συνεχίζεται για τις κατάντη περιοχές του ΨΜΑ. Η οριακή τιμή αυτή δεν είναι φυσικά η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις αλλά εξαρτάται από τον τύπο και τη διάσταση των αποκολλώμενων φερτών υλικών.



Σχήμα 32: Σχηματική επεξήγηση του πλαισίου διαλόγου για τον υπολογισμό του συντελεστή LS .

Ο υπολογισμός των δύο τελευταίων συντελεστών, δηλαδή του συντελεστή φυτοκάλυψης (C) (vegetation factor) και του συντελεστή της διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης (P) (erosion control practice factor), γίνεται με τη χρήση του αρχείου shapefile που περιγράφει τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής. Ο κánaβος των δύο συντελεστών προκύπτει με τρόπο παρόμοιο με εκείνο του συντελεστή της διαβρωσιμότητας του εδάφους (K). Σε κάθε χρήση γης αντιστοιχίζεται και μια τιμή του συντελεστή C , αφού πρώτα ομαδοποιηθούν οι παρόμοιες χρήσεις γης ώστε να αναζητηθούν ευκολότερα οι αντίστοιχες τιμές από τη βιβλιογραφία. Όσον αφορά στον υπολογισμό του συντελεστή P , λαμβάνει παντού την τιμή $P = 1$, αφού στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών ουσιαστικά δεν λαμβάνεται κανένα μέτρο προστασίας έναντι της εδαφικής διάβρωσης.

Όταν όλα τα αρχεία έχουν «φορτωθεί» στα πλαίσια όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 29, τότε το πρόγραμμα υπολογίζει την τοπική εδαφική διάβρωση σε μορφή αρχείου κανάβου. Η διάβρωση, υπολογίζεται και εμφανίζεται σε αρχείο κανάβου, το οποίο αποθηκεύεται για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής στο τελικό στάδιο.

6.1.2 Εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής

Απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής είναι το αρχείο κανάβου του ΨΜΑ, το αρχείο κανάβου της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης καθώς και το αρχείο shapefile του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής. Το τελευταίο είναι η ψηφιοποιημένη αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης από το μικρότερο υδατόρευμα έως την έξοδο της λεκάνης. Πριν από τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής, DI (sediment delivery ratio) υπολογίζεται ο δείκτης στερεοαπορροής (sediment delivery index). Ο δείκτης στερεοαπορροής είναι έκφραση της στερεοαπορροχεντικότητας των υδατορευμάτων και αναφέρεται σε ανηγμένες τιμές από 0 έως 255. Η στερεομεταφορική ικανότητα της ροής, T [kg/m^2], μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T = cQ^a S^b \quad (17)$$

όπου, Q [m^3/s] είναι η παροχή και S [m/m] η κλίση του υδατορεύματος και οι σταθερές a , b και c μεταβάλλονται ανάλογα με τη μέγεθος κόκκου των φερτών υλικών. Η συγκέντρωση, C , των φερτών υλικών στη ροή είναι τότε ίση με:

$$C = \frac{T}{Q} = cQ^{a-1} S^b \quad (18)$$

Οι χαρακτηριστικές τιμές [DHI , 1999] του συντελεστή, a , για τη συγκεντρωμένη απορροή σε υδατορεύματα είναι 1.35 ενώ για την επιφανειακή απορροή είναι μεταξύ 1.04 και 1.80. Αντίστοιχα, ο συντελεστής, b , είναι ίσος με 1.66 σε υδατορεύματα ενώ κυμαίνεται μεταξύ 1.44 και 1.96 για την επιφανειακή απορροή. Αποφασίστηκε να υιοθετηθούν οι τιμές $a=1.5$ και $b=1.67$, καταλήγοντας στην εξίσωση

$$X = cQ^{0.5} S^{1.67} \quad (19)$$

Κατά μήκος μιας συγκεκριμένης γραμμής ροής, η στερεοαπορροή από κάθε ψηφίδα της λεκάνης σε αυτή τη διαδρομή θα περιορίζεται από τη ψηφίδα με την ελάχιστη στερεοαπορροή. Επομένως η τιμή του δείκτη στερεοαπορροής για κάθε ψηφίδα θα είναι ίση με την ελάχιστη μεταφορική ικανότητα κατά μήκος μιας συγκεκριμένης γραμμής ροής.

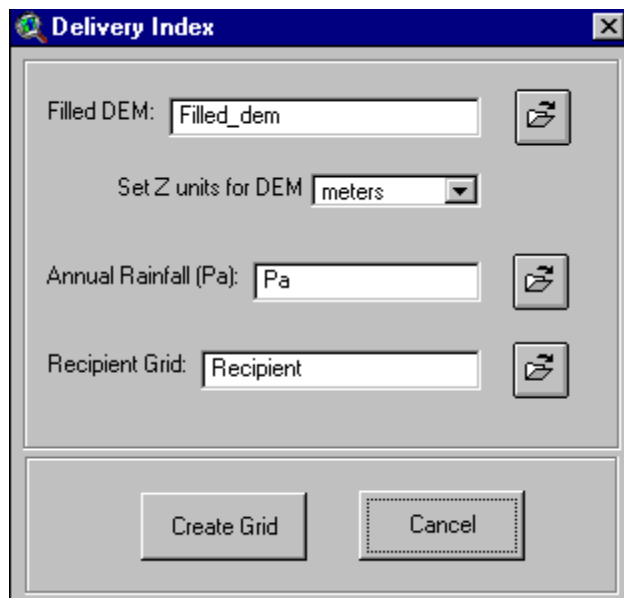
Ο υπολογισμός της παροχής, Q , είναι σχετικά απλός και βασίζεται σε μια απλή εκθετική παρεμβολή μεταξύ της συνολικής ετήσιας απορροής, V_a , και της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, P_a , της μορφής:

$$V_a = F P_a^{1.66} \quad (20)$$

όπου, F είναι παράμετρος ροής. Ο δείκτης στερεοαπορροής για κάθε γραμμή ροής, DI_P , προκύπτει από την εξίσωση:

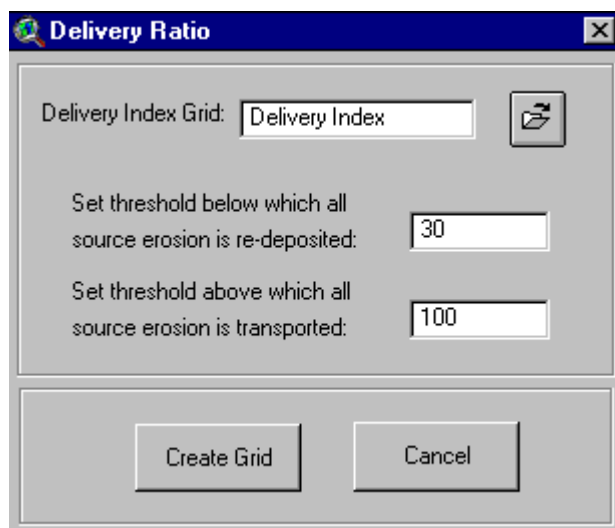
$$DI_P = \min[F^{0.5} P_a^{0.7} S^{1.67}] \quad (21)$$

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζεται το πλαίσιο διαλόγου για τον υπολογισμό του δείκτη στερεοαπορροής.



Σχήμα 33: Παράθυρο διαλόγου για τον υπολογισμό του δείκτη στερεοαπορροής.

Ο συντελεστής στερεοαπορροής, S_y , προφανώς κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται το πλαίσιο διαλόγου για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής.



Σχήμα 34: Παράθυρο διαλόγου για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοαπορροής πρέπει ο χρήστης να ορίσει δύο οριακές τιμές του δείκτη στερεοαπορροής. Η μεγαλύτερη τιμή δηλώνει την οριακή τιμή του δείκτη στερεοαπορροής της διατομής ενός υδατορεύματος, για την οποία (και για τις μεγαλύτερες τιμές έως το 255) όλη η εδαφική διάβρωση μεταφέρεται προς τα κατάντη. Η μικρότερη τιμή δηλώνει αντίθετα την οριακή τιμή του δείκτη στερεοαπορροής για την οποία μικρότερες αντίστοιχες τιμές θα αποθέτουν το σύνολο της εδαφικής διάβρωσης. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 34, αναφέρεται ότι για να μεταφερθεί το σύνολο της εδαφικής διάβρωσης, θα πρέπει ο δείκτης της στερεοαπορροής

για τη συγκεκριμένη γραμμή ροής να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 100. Αντίστοιχα, αν ο δείκτης στερεοπαροχής είναι μικρότερος ή ίσος του 30, τότε το σύνολο της εδαφικής διάβρωσης θα αποτεθεί. Για τις ενδιάμεσες τιμές του δείκτη της στερεοπαροχής μόνο ένα τμήμα της συνολικής εδαφικής διάβρωσης θα μεταφερθεί προς τα κατάντη. Ο ορισμός των δύο αυτών οριακών τιμών είναι σε γενικές γραμμές αυθαίρετος και εξαρτάται από το μέγεθος και τη σύσταση των φερτών υλικών και τη στερεομεταφορική ικανότητα των υδατορευμάτων.

Μια επιπλέον παραδοχή του μοντέλου αναφέρει ότι αν τα μεταφερόμενα φερτά υλικά της εδαφικής διάβρωσης καταλήξουν μέσω της επιφανειακής απορροής σε κάποιο υδατόρευμα τότε το σύνολο αυτών θα προκύψουν ως στερεοαπορροή στην έξοδο της λεκάνης. Με άλλα λόγια, το μοντέλο δεν διοδεύει την στερεοπαροχή στο υδρογραφικό δίκτυο.

Ο υπολογισμός της συνολικής στερεοαπορροής, TE , γίνεται βάσει της εξίσωσης

$$TE = SE f(DI) \quad (22)$$

όπου SE , η εδαφική διάβρωση και $f(DI)$ η συνάρτηση του δείκτη στερεοαπορροής. Η στερεοαπορροή της λεκάνης απορροής εκφράζεται σε μονάδες t/ha/year.

6.2 Διερεύνηση της καταλληλότητας του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Με βάση την περιγραφή του μοντέλου στην προηγούμενη παράγραφο δημιουργούμε όλα τα κατάλληλα αρχεία για το «τρέξιμο» του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R παρατηρούμε τα εξής: (α) Δεν υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία από βροχογράφους σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής ώστε να εκτιμηθεί ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R από το άθροισμα των επιμέρους δεικτών EI_{30} . Επομένως αναγκαστικά καταφεύγουμε σε απλές σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης που δίνουν τον συντελεστή R σε συνάρτηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, N . (β) Δεν υπάρχει στην ελληνική βιβλιογραφία σχέση που να συνδέει το συντελεστή R με τη μέση ετήσια βροχόπτωση N για τις ελληνικές συνθήκες. Επομένως θα χρησιμοποιήσουμε την εξής σχέση που αναπτύχθηκε στη Γερμανία [Schwertmann et al., 1990] και έχει χρησιμοποιηθεί και για τις ελληνικές συνθήκες [Χρυσάνθου και Πολιώτης, 1995]:

$$R = 0.83N - 17.7 \quad (23)$$

όπου: R [MJ*mm/(ha*h)] ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, και

N [mm] η μέση ετήσια βροχόπτωση.

Σε ότι αφορά το συντελεστή της εδαφικής διαβρωσιμότητας (K) ομαδοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο οι γεωλογικοί σχηματισμοί, που φαίνονται στο αντίστοιχο shape file του γεωλογικού – εδαφολογικού χάρτη, ώστε να είναι δυνατή η απόδοση χαρακτηριστικών τιμών του συντελεστή K από τη διεθνή βιβλιογραφία [Mitchell and Bubbenzer, 1980; Χρυσάνθου και Πολιώτης, 1995] προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη περίπτωση με βάση και την υποκειμενική κρίση των ερευνητών. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ομαδοποιούνται με βάση τη διαβρωσιμότητά τους σε φλύσχη Γαβρόβου, σε φλύσχη Πίνδου, σε αλλούβιους σχηματισμούς, σε ασβεστόλιθους Πίνδου

(ασβεστόλιθοι με ενδιαστρώσεις κερατολίθων και αργλικών σχιστόλιθων), σε ασβεστόλιθους Γαβρόβου (ασβεστόλιθους ελαφρώς δολομιτωμένους) και σε υπερπινδικούς ασβεστόλιθους (ασβεστολιθικοί και κερατολιθικοί ορίζοντες). Στον Πίν. 19 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή K για τους υπάρχοντες γεωλογικούς σχηματισμούς.

Πίν. 19: Ομαδοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών και απόδοση συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας.

Γεωλογικός σχηματισμός	Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (K)
Φλύσχης Γαβρόβου	0.017
Φλύσχης Πίνδου	0.01
Αλλούβιες αποθέσεις	0.027
Ασβεστόλιθος Πίνδου	0.004
Ασβεστόλιθος Γαβρόβου	0.0007
Υπερπινδικοί ασβεστόλιθοι	0.008

Ο τοπογραφικός συντελεστής (LS) υπολογίζεται με τις σχέσεις που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 2.2.1 και βάσει της διαδικασίας της Παραγράφου 6.1.1. Ο κánaβος του ΨΜΑ της λεκάνης απορροής έχει διάσταση 200 m.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης (C) προκύπτει από τα διαγράμματα των χρήσεων γης. Χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα σε κλίμακα 1:100,000 με τις ονομασίες Πέτας, Αγρίνιο, Καρδίτσα και Καρπενήσι. Σε κάθε κωδικοποιημένη χρήση γης που απαντάται στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών αντιστοιχίζεται μια τιμή του συντελεστή C , αξιοποιώντας τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία προσαρμοσμένες στην περιγραφή των συγκεκριμένων χρήσεων γης [*Wischmeier and Smith, 1978; Schwertmann et al., 1990; Χρυσάνθου και Πολιώτης, 1995*]. Στον Πίν. 20 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής, με τους αντίστοιχους κωδικούς του CORINE σε παρένθεση, και οι αντίστοιχοι συντελεστές C .

Πίν. 20: Χρήσεις γης στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής και αντίστοιχη τιμή του συντελεστή C.

Χρήση γης	Συντελεστής C	Χρήση γης	Συντελεστής C
Διακεκομμένη αστική δόμηση (112)	0.001	Δάσος κωνοφόρων (312)	0.001
Μη αρδεύσιμη αρώσιμη γη (211)	0.3	Μικτό δάσος (313)	0.001
Ορυζώνες (213)	0.15	Φυσικοί βοσκότοποι (321)	0.3
Αμπελώνες (221)	0.2	Θάμνοι και χερσότοποι (322)	0.45
Οπωροφόρα δέντρα (222)	0.2	Σκληροφυλλική βλάστηση (323)	0.03
Ετήσιες καλλιέργειες (241)	0.18	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις (324)	0.02
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας (242)	0.18	Παραλίες-αμμόλοφοι-αμμουδιές (331)	0.6
Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (243)	0.1	Απογυμνωμένοι βράχοι (332)	0.45
Γεωργοδασικές περιοχές (244)	0.05	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση (333)	0.45
Δάσος πλατύφυλλων (311)	0.001	Συλλογές υδάτων (512)	0.000

Ο συντελεστής P θεωρήθηκε ίσος με τη μονάδα, αφού δεν λαμβάνονται μέτρα προστασίας από τη διάβρωση στην περιοχή. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ παρουσιάζονται οι χάρτες των αρχείων κανάβου για κάθε συντελεστή της ΠΕΕΑ.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο κánaβος της τοπικής εδαφικής διάβρωσης. Η μέση τιμή της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης στη λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα Κρεμαστών υπολογίστηκε ίση με 47.26 t/ha. Για τα 34 χρόνια λειτουργίας του ταμειυτήρα η συνολική εδαφική διάβρωση είναι ίση με 528,971,728 t δηλαδή 528.97 Mt. Με βάση τη συνολική ποσότητα της εδαφικής διάβρωσης που κατακρατήθηκε στον ταμειυτήρα (βλ. Πίν. 11, σελ.74) ο συντελεστής στερεοαπορροής της λεκάνης Κρεμαστών εκτιμάται ίσος με 0.20. Η τιμή αυτή είναι αρκετά ρεαλιστική και είναι ίση με αυτή που προκύπτει από την εξίσωση $D = A^{-0.2}$ ($D=0.2$) [Laurence, 1986], αλλά και με τη σχέση του Renfro [1972] ($D=0.14$) καθώς και με το Σχήμα 4, σελ. 30 αλλά και με αποτελέσματα άλλων λεκανών απορροής που έχουν καταγραφεί σε παγκόσμιο επίπεδο [π.χ. Roehl, 1972].

Πίν. 21: Τοπική εδαφική διάβρωση και συντελεστές στερεοαπορροής για τις λεκάνες των κύριων υδατορευμάτων και του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Λεκάνη απορροής	Επιφάνεια (km ²)	Ανηγμένη εδαφική διάβρωση (t/ha/year)	Συνολική εδαφική διάβρωση (34 έτη) (Mt)	Συντελεστής στερεοαπορροής
Αχελώος	1733	70.77	417.0	0.17
Αγραφιώτης	320	48.47	52.7	0.42
Μέγδοβας - Τρικεριώτης	1239	22.51	94.8	0.22
ΣΥΝΟΛΟ	3292	50.4	564.5	0.20

Βάσει του Πίν. 21 διαπιστώνουμε ότι ο Αγραφιώτης παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή στερεοαπορροής κυρίως λόγω αφενός της γεωμορφολογίας της λεκάνης (π.χ. αυξημένες κλίσεις, μικρό μήκος σε σχέση με το πλάτος), αφετέρου της απλής μορφής του ποταμού (π.χ. απουσία μαιάνδρων) που επιτρέπει την διόδευση των φερτών υλικών μέχρι τον ταμιευτήρα. Ανάλογα με τον Αγραφιώτη συμπεριφέρεται και ο Μέγδοβας – Τρικεριώτης. Αντίθετα, ο Αχελώος, αν και η λεκάνη απορροής του εμφανίζει σημαντική εδαφική διάβρωση, ο συντελεστής στερεοαπορροής είναι ιδιαίτερα χαμηλός. Η μειωμένη στερεοαπορροή του Αχελώου σε σχέση με την ανάντη εδαφική διάβρωση, οφείλεται αφενός στην μεγάλη επιφάνεια της λεκάνης απορροής και αφετέρου στη μορφή της εισόδου του ταμιευτήρα των Κρεμαστών στον κλάδο του Αχελώου. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη επιφάνεια της λεκάνης απορροής του Αχελώου και ιδιαίτερα το κατά πολύ μεγαλύτερο μήκος της επιτρέπει την απόθεση των φερτών υλικών σε ενδιάμεσα τμήματα της λεκάνης απορροής πριν καταλήξουν στον ταμιευτήρα. Πράγματι, στην είσοδο του Αχελώου στον ταμιευτήρα λίγο κατάντη της γέφυρας Τέμπλας, απαντάται ένα πολύ στενό πέρασμα ενώ αμέσως ανάντη απαντάται μια πολύ ευρεία κοίτη, με αποτέλεσμα ένα πολύ μεγάλο μέρος των φερτών υλικών (το πιο χονδρόκοκκο) να αποτίθεται εκεί και να μην εισρέει στον ταμιευτήρα. Το υλικό αυτό που έχει αποθεθεί σε εκείνη την περιοχή ήταν εκτός της επιφάνειας της υδρογραφικής αποτύπωσης και επομένως δεν έχει υπολογιστεί. Στο Χάρτη 6, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ, παρουσιάζεται ο κάρναβος της τοπικής εδαφικής διάβρωσης. Από το χάρτη αυτό μπορεί κανείς να διαπιστώσει τις περιοχές εκείνες που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διάβρωση. Επίσης μπορεί να παρατηρήσει την έντονη διάβρωση που συντελείται στη λεκάνη απορροής του Αχελώου (σε όλο σχεδόν το βορειοδυτικό του τμήμα) λόγω κυρίως των έντονων κλίσεων και των εύκολα διαβρώσιμων εδαφικών σχηματισμών. Λιγότερο έντονα είναι τα διαβρωτικά φαινόμενα στον κλάδο του Αγραφιώτη ενώ ακόμα λιγότερα στον κλάδο του Μέγδοβα – Τρικεριώτη. Η διαπίστωση αυτή είναι σημαντική για την εκπόνηση διαχειριστικού σχεδίου για την αντιμετώπιση της διάβρωσης σε τοπικό επίπεδο, όπως για παράδειγμα τη διαχείριση της αγροτικής γης και τον έλεγχο των κατολισθήσεων. Για τον ταμιευτήρα όμως δεν ενδιαφέρει μόνο η διάβρωση σε τοπικό επίπεδο

στη λεκάνη απορροής αλλά πόση από αυτήν την εδαφική διάβρωση καταλήγει τελικά στον ταμιευτήρα. Το μοντέλο SEAGIS συμπεριλαμβάνει τη λειτουργία της διόδευσης των φερτών υλικών και στον τελικό υπολογισμό της στερεοαπορροής.

Η διαδικασία του υπολογισμού της στερεοαπορροής, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι καθαρά εμπειρική και απαιτείται ο προηγούμενος υπολογισμός των δύο οριακών τιμών του δείκτη στερεοαπορροής. Οι δύο τιμές αυτές δεν μπορούν να υπολογιστούν από πριν καθώς δεν έχουν κάποιο συγκεκριμένο μετρήσιμο μέγεθος. Είναι όμως δυνατό, με την υπόθεση ότι η στερεοαπορροή όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4 είναι σωστή, να βαθμονομηθούν οι δύο αυτοί συντελεστές βάσει της γνωστής στερεοαπορροής.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου με την εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των δύο αυτών οριακών τιμών θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής του ταμιευτήρα με βάση διάφορα υδρολογικά σενάρια (π.χ. μεταβολή των μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων για το προσεχές διάστημα λόγω και του φαινομένου του θερμοκηπίου) ή και μορφολογικά (π.χ. αλλαγή των χρήσεων γης σε εκτεταμένα τμήματα της λεκάνης απορροής από πυρακαϊές κλπ.).

Με βάση διαδοχικές δοκιμές (trial – and – error procedure) με κάποιες αρχικές τιμές των οριακών τιμών του δείκτη στερεοαπορροής, υπολογίστηκε τελικά ότι η άνω οριακή τιμή του δείκτη στερεοαπορροής, DI_{max} , είναι ίση με 240 ενώ η κάτω οριακή τιμή του δείκτη στερεοαπορροής, DI_{min} , ίση με 192.

Με βαθμονομημένο το μοντέλο στερεοαπορροής υπολογίζουμε σε τελικό στάδιο τον συντελεστή στερεοαπορροής και έπειτα τη συνολική στερεοαπορροή πολλαπλασιάζοντας τον κánaβο της τοπικής εδαφικής διάβρωσης με τον κánaβο του συντελεστή στερεοαπορροής. Στο Χάρτη 8 και 9, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ, παρουσιάζονται οι κánaβοι του συντελεστή στερεοαπορροής και της συνολικής στερεοαπορροής. Όσον αφορά το πρώτο, διαπιστώνει κανείς ότι ο συντελεστής στερεοαπορροής παίρνει τη μέγιστη τιμή (σχεδόν ίση με 1) στις περιοχές εκείνες που γειτνιάζουν με τις κοίτες των υδατορευμάτων λόγω πιθανών των έντονων κλίσεων εκεί αλλά και της αυξημένης τιμής της επιφανειακής απορροής. Σε περιοχές σχετικά μακριά από το υδρογραφικό δίκτυο με μικρές κλίσεις ο συντελεστής στερεοαπορροής είναι σχεδόν μηδενικός.

Η συνολική στερεοαπορροή υπολογίστηκε ίση με 13.32 t/ha μεγαλύτερη από τη μετρημένη στερεοαπορροή στον ταμιευτήρα (10.05 t/ha). Αντίστοιχα, η εκτιμώμενη στερεοαπορροή για τον κλάδο του Αχελώου υπολογίστηκε ίση με 18.82 t/ha (11.84 t/ha), του Αγραφιώτη 14.70 t/ha (20.35 t/ha) και του Μέγδοβα 8.37 t/ha (4.89 t/ha)¹². Είναι φανερό ότι η στερεοαπορροή που υπολογίζεται από το μοντέλο υπερεκτιμά σε κάποιο βαθμό τη μετρημένη στερεοαπορροή. Αυτό το συμπέρασμα δηλώνει και την αδυναμία του μοντέλου να υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια τη στερεοαπορροή ακόμα και στην περίπτωση της βαθμονόμησης του δείκτη στερεοαπορροής. Στον Πίν. 22 παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα με τη συνδυασμένη χρήση της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα και του υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής.

¹² Σε παρένθεση αναγράφεται η μέση ετήσια στερεοαπορροή υπολογισμένη από την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα.

Πίν. 22: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων με βάση την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα και το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής.

Κλάδος	Επιφάνεια (km ²)	Υδρογραφική αποτύπωση ταμιευτήρα		Ανηγγμένη εδαφική διάβρωση (t/km ² /year)	Υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής	
		Μέση ετήσια στερεοαπορροή (t/km ²)	Συντελεστής στερεοαπορροής		Μέση ετήσια στερεοαπορροή (t/km ²)	Συντελεστής στερεοαπορροής
Αχελώος	1733	1184.6	0.17	7077	1882	0.27
Αγραφιώτης	320	2034.8	0.42	4847	1470	0.30
Μέγδοβας – Τρικεριώτης	1239	489.4	0.22	2251	837	0.37
Σύνολο	3292	1005.6	0.20	5040	1332	0.26

Σε γενικές γραμμές, το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής SEAGIS δίνει φυσιολογικά και λογικά αποτελέσματα σε σχέση με τη μετρημένη τιμή της στερεοαπορροής στον ταμιευτήρα Κρεμαστών για όλη τη λεκάνη απορροής. Όμως για τις επιμέρους λεκάνες ο υπολογισμός του μοντέλου είναι κατά πολύ διαφορετικός και μάλιστα με τάση να μειώνει τις αυξημένες τιμές του συντελεστή στερεοαπορροής από την υδρογραφική αποτύπωση και να αυξάνει τις χαμηλές. Προφανώς λόγω της επιφάνειας της συνολικής λεκάνης απορροής, που εξισορροπεί τις επί μέρους ανομοιομορφίες, ο συντελεστής στερεοαπορροής για όλη τη λεκάνη μπορεί να γίνει αποδεκτός.

Διαπιστώνεται τελικά ότι ο υπολογισμός της συνολικής στερεοαπορροής όπως υπολογίζεται από το μοντέλο απαιτεί σημαντική βελτίωση καθώς η βαθμονόμηση των δεικτών στερεοαπορροής είναι σε κάθε περίπτωση αυθαίρετη και χωρίς άμεσα μετρήσιμο χαρακτήρα. Παρόλη τη βαθμονόμηση των δεικτών στερεοαπορροής με τέτοιο τρόπο ώστε ο συντελεστής στερεοαπορροής όλης της λεκάνης του ταμιευτήρα από την υδρογραφική αποτύπωση να είναι ίσος με τον αντίστοιχο συντελεστή του μοντέλου, το μοντέλο αποτυγχάνει να προσεγγίσει τις στερεοαπορροές των επιμέρους λεκανών, ενώ προσεγγίζει σχετικά ικανοποιητικά τη συνολική στερεοαπορροή.

Πιστεύουμε όμως ότι αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για μια πρώτη προσέγγιση στον υπολογισμό καταρχήν της εδαφικής διάβρωσης σε τοπική και σε ευρύτερη κλίμακα λεκάνης απορροής αλλά και της στερεοαπορροής. Ειδικότερα σε περιπτώσεις που διερευνώνται οι συνέπειες μιας σημαντικής αλλαγής π.χ. των χρήσεων γης μιας λεκάνης στην στερεοαπορροή, το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βοήθημα και εργαλείο διαχείρισης της λεκάνης.

7 Έμμεσες εκτιμήσεις στερεοαπορροής

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η εκτίμηση της στερεοαπορροής με τις μεθόδους που περιγράφηκαν εκεί, παραμένει ακόμα αμφίβολη και σε αρκετές περιπτώσεις αναξιόπιστη. Επιπλέον, όσον αφορά στις μετρήσεις των αιωρούμενων φερτών υλικών, η διεξαγωγή των στερεοϋδρομετρήσεων γίνεται εκ των πραγμάτων σε πολύ αραιά διαστήματα και σε πολλές περιπτώσεις όταν δεν απαιτούνται. Για παράδειγμα, ενώ είναι γνωστό ότι σχεδόν το σύνολο της ετήσιας στερεοαπορροής λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια λίγων πλημμυρικών επεισοδίων το έτος, πολλές στερεοϋδρομετρήσεις γίνονται σε μη-πλημμυρικές περιόδους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναξιόπιστη επέκταση των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής στα επίπεδα των πλημμυρικών γεγονότων, αφού το φαινόμενο της στερεοπαροχής είναι εντελώς διαφορετικό σε πλημμυρικές παροχές.

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος και μετά από σχετική έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, αποφασίστηκε η διερεύνηση της πιθανότητας χρήσης των έμμεσων μεθόδων εκτίμησης της στερεοπαροχής σε διατομή ενός υδατορεύματος. Ως μια μέθοδος έμμεσης εκτίμησης της στερεοπαροχής θεωρείται και η θολότητα.

7.1 Η θολότητα ως δείκτης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών υλικών.

Η χρήση της θολότητας (turbidity) ως βοηθητικού μεγέθους κερδίζει συνεχώς έδαφος στη διεθνή επιστημονική κοινότητα [*Foster et al.*, 1992; *Gippel*, 1995; *Lewis*, 1996; *Laurence*, 1996] και έχει εφαρμοστεί σε λίγες περιπτώσεις με αξιολογή όμως επιτυχία. Η μέτρηση της θολότητας γίνεται με νεφελομετρικούς αισθητήρες (nephelometric turbidity sensors) που μετρούν τη σκέδαση - διάθλαση του εκπεμπόμενου φωτός υπό γωνία 90 μοιρών από τον αισθητήρα και έχουν υιοθετηθεί στις ΗΠΑ από τα Standard Methods ως η καλύτερη μέθοδος μέτρησης της θολότητας [*American Public Health Association (APHA)*, 1985]. Οι μονάδες μέτρησης της θολότητας είναι οι Νεφελομετρικές Μονάδες Θολότητας (Nephelometric Turbidity Units (NTU)). Η μέτρηση της θολότητας σχετίζεται πάντα με το πιο λεπτόκοκκο αιωρούμενο φορτίο ενώ η ευαισθησία του θολόμετρου σε αμμόδες φορτίο είναι πολύ μικρή και επομένως η θολότητα είναι κατάλληλη για την εκτίμηση του φορτίου απόπλυσης.

Ο αισθητήρας μέτρησης της θολότητας πριν την εγκατάστασή του στη θέση μέτρησης βαθμονομείται με βάση τα δείγματα φορμαζίνης (formazine standards) και περιγράφονται με το πιστοποιητικό ISO 7027. Η φορμαζίνη είναι μια ουσία της οποίας τα διαλύματα σκεδάζουν το εκπεμπόμενο φως με ένα συγκεκριμένο πρότυπο. Αν η βαθμονόμηση γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση της θολότητας με τα δείγματα φορμαζίνης, τότε η θολότητα και η συγκέντρωση των αιωρούμενων φερτών υλικών θα έχουν επίσης μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση για δεδομένο μέγεθος και σύνθεση των φερτών υλικών [*Foster et al.*, 1992; *Gippel*, 1995]. Κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, κυρίως λόγω της προέλευσης των αιωρούμενων φερτών υλικών (φορτίο απόπλυσης), είναι εξαιρετικά πιθανό στα περισσότερα

υδατορεύματα οι φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων φερτών υλικών να αλλάζουν σε διαφορετικό βαθμό. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα υπάρχει μια απόκλιση από τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ της θολότητας και της συγκέντρωσης φερτών υλικών. Επομένως, προτείνεται [Lewis, 1996] η λήψη λίγων δειγμάτων (λιγότερων των 10) σε όλο το εύρος των παρατηρημένων συγκεντρώσεων αιωρούμενων φερτών υλικών είναι απαραίτητη για τη σχηματοποίηση της αντίστοιχης εξίσωσης για πλημμυρικά επεισόδια. Η σχέση αυτή αποτελεί ένα μέσο για την αξιόπιστη εκτίμηση της στερεοπαροχής και κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων και επίσης η χρονοσειρά λεπτομερών μετρήσεων της στερεοπαροχής μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την εισροή των φερτών υλικών στο υδατόρευμα και την προηγούμενη εδαφική διάβρωση [Lewis and Eads, 1996,1998].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της υιοθέτησης της θολότητας ως εναλλακτικού μεγέθους εκτίμησης της στερεοπαροχής είναι ότι αν υιοθετηθεί η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών υλικών και της θολότητας, τότε ο υπολογισμός του συνολικού φορτίου θα είναι σε γενικές γραμμές αμερόληπτος. Αντίθετα, με τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου με τις καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής όπου υπάρχει γραμμική διάταξη των λογαρίθμων της παροχής και της στερεοπαροχής, ο υπολογισμός της διασποράς είναι πολύ πιο σύνθετος [Gilroy et al., 1990] ενώ τέτοια μοντέλα συνήθως είναι υπεύθυνα για σημαντικά σφάλματα [Walling and Webb, 1988]. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής της θολότητας σε συνεχή και πραγματικό χρόνο και μάλιστα κατά την περίοδο πλημμυρικών γεγονότων, όπου οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής αδυνατούν σε κάθε περίπτωση να προσφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα με βάση μια απλή επέκταση της καμπύλης.

Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα να προγραμματιστεί το καταγραφικό του αισθητήρα ώστε να καταγράφει μετρήσεις σε μικρότερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων, αν υπάρχει επικοινωνία του καταγραφικού του αισθητήρα με ένα δεύτερο ηλεκτρονικό όργανο, όπως για παράδειγμα ένα ηλεκτρονικό καταγραφέα της στάθμης του υδατορεύματος. Σε περιόδους που η στάθμη ανεβαίνει πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο, ο αισθητήρας της θολότητας μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να παίρνει μετρήσεις σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Υπάρχουν βέβαια θεωρητικά προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή της θολότητας σε συνάρτηση με το μέγεθος των φερτών υλικών, με τη πιθανή ύπαρξη οργανικού φορτίου στη σύσταση των φερτών υλικών αλλά και πρακτικά προβλήματα όπως π.χ. η κατάλληλη και ασφαλής τοποθέτηση και λειτουργία του αισθητήρα και των εξαρτημάτων του (π.χ. καταγραφικό μετρήσεων, μπαταρία). Παρόλα όμως τα πιθανά προβλήματα, στις περισσότερες των περιπτώσεων θα πρέπει να αναμένονται ικανοποιητικές σχέσεις μεταξύ θολότητας και αιωρούμενου φορτίου καθώς είτε οι μεταβολές του μεγέθους των αιωρούμενων φερτών υλικών δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, είτε σχετίζονται άμεσα με τη συγκέντρωση των αιωρούμενων φερτών υλικών [Lewis, 1996].

Σε κάθε περίπτωση όμως οι μετρήσεις θολότητας δεν θα πρέπει να αντικαθιστούν τις μετρήσεις στερεοπαροχής ιδιαίτερα αν δεν έχει γίνει από πριν ή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αισθητήρα θολότητας προσεκτική μελέτη της σχέσης μεταξύ της θολότητας και του αιωρούμενου φορτίου για τη θέση εγκατάστασης του θολόμετρου. Επομένως για να υπάρχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις του αιωρούμενου φορτίου θα πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση του θολόμετρου σε

τακτά χρονικά διαστήματα (τουλάχιστον μία φορά ανά δύο εβδομάδες) και σε διαφορετικές παροχές (κατά προτίμηση πλημμυρικές) με ταυτόχρονη εκτέλεση μέτρησης της στερεοπαροχής φερτών σε αιώρηση. Για παράδειγμα, οι *Krause and Ohm* [1984] βαθμονομώντας θολόμετρο με ταυτόχρονες μετρήσεις του αιωρούμενου φορτίου με συχνότητα μία φορά ανά δύο εβδομάδες κατάφεραν να πετύχουν ακρίβεια στην εκτίμηση των αιωρούμενων υλικών έως και 90%. Ο [Lewis, 1996] διαπιστώνει μια πολύ καλή συσχέτιση της θολότητας και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών ακόμα και κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων που πιθανό να υπάρχει μεταβολή στη σύσταση των φερτών υλικών.

Με βάση τα παραπάνω και κυρίως λόγω της απουσίας μετρήσεων των φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών, εκτιμήθηκε ότι η εγκατάσταση θολόμετρου θα μπορούσε να βοηθήσει στην έμμεση και αξιόπιστη εκτίμηση των στερεοπαροχών με τρόπο εύκολο, πρακτικό και το κυριότερο σε συνεχή χρόνο. Το θολόμετρο εγκαταστάθηκε στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Αυλακίου (κατασκευαστής: Global Water WQ700, κόστος περίπου 700,000 δρχ). Ο φορέας – χρήστης ανέλαβε την εκτέλεση των απαιτούμενων για τη βαθμονόμηση του οργάνου στερεουδρομετρήσεων στη θέση Αυλάκι.

7.2 Εγκατάσταση και λειτουργία του θολόμετρου στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου.

Το θολόμετρο (μοντέλο Global Water WQ700) αποτελείται από τον αισθητήρα της θολότητας (turbidity sensor) που συνδέεται με το καταγραφικό των μετρήσεων (data logger) του ίδιου



Σχήμα 35: Εικόνα του αισθητήρα θολότητας GlobalWater WQ700.

κατασκευαστή. Στο Σχήμα 35 φαίνεται ο αισθητήρας της θολότητας. Στο κάτω μέρος του κυλίνδρου βρίσκεται το οπτικό σύστημα του αισθητήρα το οποίο και μετρά τη θολότητα. Οι μετρήσεις καταγράφονται στο καταγραφικό κάθε 15 λεπτά της ώρας. Το καταγραφικό

τοποθετήθηκε στον παράπλευρο οικίσκο στον οποίο έχει τοποθετηθεί ο συμβατικός και ηλεκτρονικός σταθμηγράφος που λειτουργεί η ΔΕΗ στην ίδια θέση. Ο αισθητήρας της θολότητας τοποθετήθηκε μέσα σε ένα προστατευτικό σωλήνα από χάλυβα ώστε να προστατευτεί ο αισθητήρας από ευμεγέθη φερτά υλικά σε έντονες πλημμυρικά επεισόδια. Η συνολική εγκατάσταση (αισθητήρας και προστατευτικός σωλήνας) προσαρμόστηκε σε ένα σταθμήμετρο του υδρομετρικού σταθμού και ο αισθητήρας τοποθετήθηκε μέσα στο υδατόρευμα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αρκετά υψηλότερα από τον πυθμένα της κοίτης σε εκείνο το σημείο αλλά και να είναι βυθισμένος ακόμα και σε πολύ μικρές παροχές του Αχελώου σε εκείνο το σημείο. Στη Φωτογραφία 12, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ παρουσιάζεται μια άποψη της εγκατάστασης του θολόμετρου. Στη Φωτογραφία 13, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ, παρουσιάζεται η σύνδεση του καταγραφικού με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη μεταφορά των δεδομένων.

Η εγκατάσταση του θολόμετρου αποτέλεσε μια πολύ δύσκολη και επικίνδυνη εργασία. Η ανάγκη για τοποθέτηση του αισθητήρα σε σημείο κοντά στην όχθη ώστε να αντιπροσωπεύει καλύτερα τη ροή σε όλη τη διατομή σε συνάρτηση με την ανυπαρξία υποδομής (π.χ. έλλειψη οδικής πρόσβασης και ηλεκτροδότησης) αλλά και η ανάγκη προστασίας του οργάνου από έντονα πλημμυρικά φαινόμενα δημιούργησαν σοβαρά προβλήματα στη διαδικασία τοποθέτησης του οργάνου. Δοκιμάστηκαν διάφορες μέθοδοι και θέσεις εγκατάστασης έως να επιλεγεί η τελική χωρίς να δώσουν τα κατάλληλα αποτελέσματα. Η εγκατάσταση του θολόμετρου στην τελική του μορφή έγινε μόλις πριν δύο μήνες από τη λήξη του προγράμματος χωρίς όμως πάλι να είμαστε σε θέση να δώσουμε κάποια αποτελέσματα. Οι αιτίες για την έως τώρα διαφαινόμενη αδυναμία του αισθητήρα να καταγράψει κάποιες αξιόπιστες μετρήσεις της θολότητας περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

7.3 Αιτίες της μη-ικανοποιητικής λειτουργίας του θολόμετρου και προτάσεις για τον υπερκερασμό τους.

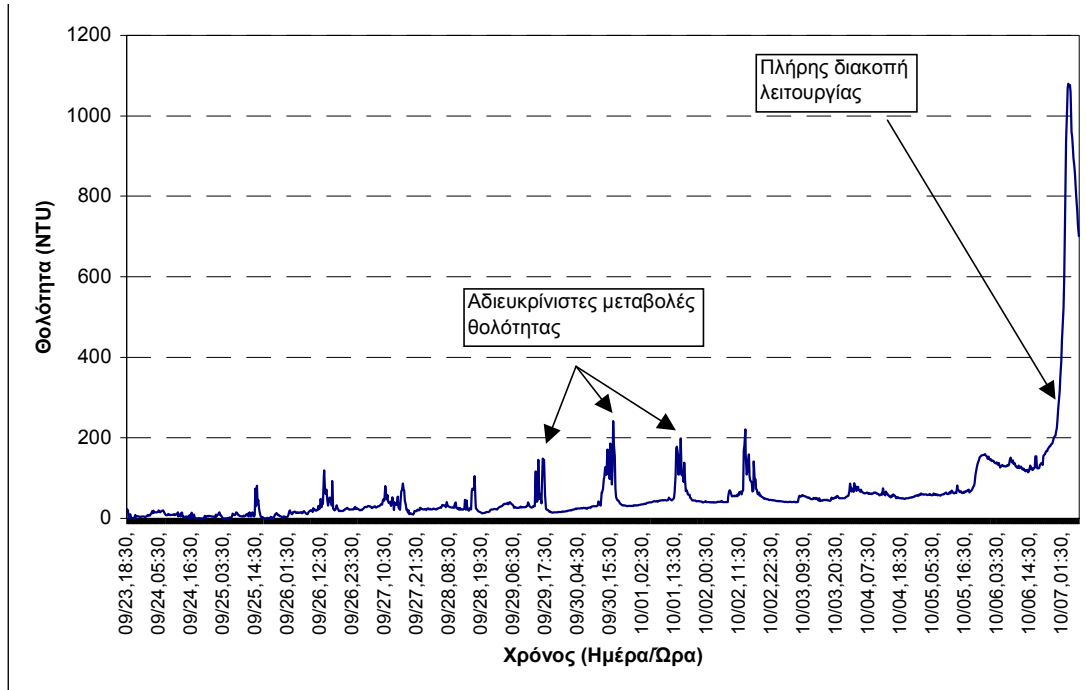
Είναι ανάγκη να διασαφηνιστεί εξ αρχής ότι η εγκατάσταση και η λειτουργία του θολόμετρου ως μια μεθοδολογία εκτίμησης της στεροαπορροής ξεπερνά κατά πολύ το χρονικό ορίζοντα ενός ερευνητικού έργου και αποτελεί μια μακρόχρονη επένδυση που απαιτεί όμως συστηματική παρακολούθηση και μελέτη. Διάφορες μέθοδοι έμμεσης εκτίμησης της στεροαπορροής και συγκεκριμένα μέσω της θολότητας αποτελούν ακόμα μια διεθνή πρωτοτυπία χωρίς ευρεία χρήση και σε αρκετές περιπτώσεις με αμφίβολα αποτελέσματα. Παρόλ' αυτά πιστεύουμε ότι αξίζει τον κόπο η έρευνα αυτή αν και μέχρι τώρα δεν στάθηκε δυνατή η καταγραφή αποτελεσμάτων που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και να ερμηνευτούν.

Κύρια αιτία αυτής της αναποτελεσματικότητας κατά τη γνώμη μας αποτελεί το καθεστώς της πολύ ξηρής περιόδου που ακολούθησε από την πρώτη τοποθέτηση του οργάνου στη διατομή του Αχελώου το καλοκαίρι του 2000. Από τις 10 υδρομετρήσεις που διενεργήθηκαν από τη ΔΕΗ/ΔΑΥΕ κατά τη διάρκεια εκπόνησης της δεύτερης φάσης του ερευνητικού προγράμματος μόνο μία ξεπέρασε τα $100 \text{ m}^3/\text{s}$, γεγονός που δείχνει την ανυπαρξία αξιόλογων παροχών στον Αχελώο για τη συγκεκριμένη περίοδο. Πράγματι, ενώ ο μέσος όρος των μετρημένων παροχών των στερεοϋδρομετρήσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 9, σελ. 46, είναι $78.78 \text{ m}^3/\text{s}$, ο αντίστοιχος μέσος όρος του Πίν. 7 είναι μόλις $32.49 \text{ m}^3/\text{s}$. Οι πολύ χαμηλές ταχύτητες ροής στη

διατομή του Αχελώου διευκόλυναν την προσκόλληση διαφόρων αιωρούμενων φερτών υλικών αλλά και άλλων σωματιδίων πάνω στον αισθητήρα. Η εμμονή των χαμηλών παροχών επέτεινε το πρόβλημα χωρίς τη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού του αισθητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη-ικανοποιητική εκπομπή του φωτός από τον αισθητήρα με συνέπεια τις λανθασμένες καταγραφές του.

Ο κατασκευαστής [*GlobalWater*, 1997] αναφέρει ότι, όπως και σε κάθε αισθητήρα μέτρησης της θολότητας, αν το γυαλί το οποίο περιβάλλει τον αισθητήρα γεμίσει από κάθε λογής σωματίδια τότε θα καταγράφονται λανθασμένα αποτελέσματα. Παρόμοια προβλήματα έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές [*Laurence*, 1996; *Lewis and Eads*, 1998]. Η συχνότητα καθαρισμού του αισθητήρα ποικίλει από θέση σε θέση αλλά γενικά προτείνεται μία φορά την εβδομάδα, ενώ μάλιστα ο *Laurence*, [1996] προτείνει τον καθημερινό καθαρισμό του οπτικού συστήματος του αισθητήρα λόγω της ταχύτατης ανάπτυξης αλγών.

Πράγματι, στο Σχήμα 36 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θολότητας για χρονικό βήμα 15 λεπτών για το χρονικό διάστημα από την 23 Σεπτεμβρίου 2000 έως τη 7 Οκτωβρίου 2000. Οι αρχικές καταγραφές του θολόμετρου ήταν φυσιολογικές, καθώς η τυπική τιμή θολότητας για υδατόρευμα συνήθως δεν υπερβαίνει τα 20 NTU. Κάποιες διακυμάνσεις με ξαφνικές και σύντομες αυξήσεις της τιμής της θολότητας παραμένουν αδιευκρίνιστες αφού δεν συνοδεύονται με αύξηση της παροχής. Μέχρι την 30 Σεπτεμβρίου (δηλαδή μία εβδομάδα μετά την έναρξη των μετρήσεων) οι τιμές παραμένουν σε λογικά επίπεδα αλλά μετά παρουσιάζουν αυξητική τάση μέχρι την 6 Οκτωβρίου που πλέον οι τιμές θολότητας που καταγράφονται είναι προφανώς εκτός πραγματικότητας. Παρόμοια τάση υπάρχει κάθε φορά που ο αισθητήρας καθαρίζεται από τα μικροσωματίδια που προσκολλώνται πάνω του. Επομένως, διαπιστώνεται ότι απαιτείται ο καθαρισμός του αισθητήρα τουλάχιστον μια φορά την εβδομάδα όταν οι διερχόμενες παροχές είναι σε χαμηλά επίπεδα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της ιδιαίτερα δύσκαμπτης εγκατάστασης για την προστασία του αισθητήρα από ευμεγέθη φερτά υλικά και τις πλημμυρικές παροχές αλλά και λόγω του δυσπρόσιτου της θέσης μέτρησης, δεν υπήρχε δυνατότητα συχνού καθαρισμού του αισθητήρα. Ειδικότερα για την εγκατάσταση του θολόμετρου δόθηκε έμφαση στην αποφυγή της καταστροφής του ή απώλειάς του κατά τις έντονες πλημμύρες, ενώ υποτιμήθηκε το πρόβλημα του καθαρισμού του θολόμετρου.



Σχήμα 36: Χρονικές διακυμάνσεις της θολότητας για την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2000.

Προτείνεται η κατασκευή ενός πιο ευέλικτου συστήματος εγκατάστασης το οποίο και να παρέχει μία ικανοποιητική προστασία του αισθητήρα αλλά και ευκολία στον καθαρισμό του που θα μπορεί να γίνει και από μη – εξειδικευμένα άτομα (π.χ. κάτοικοι γειτονικού οικισμού). Επίσης η αναμενόμενη αύξηση της βασικής απορροής στον Αχελώο για την επόμενη περίοδο θα δημιουργήσει καταλληλότερες συνθήκες για τον αυτοκαθαρισμό του αισθητήρα. Η συνέχιση της λειτουργίας και συντήρησης του θολόμετρου, στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής που εκπονείται την περίοδο αυτή στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, θεωρείται δεδομένη και τα αποτελέσματα θα γνωστοποιηθούν σε επόμενες αναφορές στο φορέα – χρήστη καθώς και στη ΓΓΕΤ.

8 Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται με πολύ συνοπτικό τρόπο οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου, τα αποτελέσματα και τα γενικά συμπεράσματα, καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω σε ζητήματα που γέννησε η μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

8.1 Σύνοψη των εργασιών του ερευνητικού έργου.

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου διενεργήθηκαν οι πιο κάτω εργασίες:

1. Συστηματική μελέτη και ανάλυση της διεθνούς και ελληνικής σχετικής βιβλιογραφίας ώστε να προσεγγιστεί το θέμα σε όλες του τις διαστάσεις και να διερευνηθούν οι υπάρχουσες ερευνητικές μέθοδοι. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η στερεοαπορροή με βάση τα υδρολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, περιγράφηκαν τα διαθέσιμα μαθηματικά μοντέλα για την εκτίμηση της στερεοαπορροής από τις πιο απλές στατιστικές μεθόδους έως τις πιο σύνθετες στοχαστικές και αναλύθηκε η μεταβολή της στερεοαπορροής με βάση την κλίμακα της λεκάνης. Τέλος, περιγράφηκαν οι μορφές των αποθέσεων των φερτών υλικών σε ταμιευτήρες παραθέτοντας παραδείγματα από ταμιευτήρες στη διεθνή βιβλιογραφία.
2. Επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών ως του πιλοτικού ταμιευτήρα. Ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας είναι από τους παλαιότερους στην Ελλάδα (έτος έναρξης λειτουργίας το 1966) και συγκεντρώνει τις απορροές τεσσάρων σημαντικών ποταμών της Ελλάδας (Αχελώο, Αγραφιώτη, Μέγδοβα και Τρικεριώτη). Επιλέχθηκε η μεθοδολογία προσέγγισης του προβλήματος με βάση τις διαθέσιμες υποδομές και το διαθέσιμο εξοπλισμό. Η μέτρηση της στερεοαπορροής της λεκάνης απορροής προείληθε από τη μέτρηση του όγκου των φερτών υλικών που έχουν αποτεθεί στον ταμιευτήρα με βάση την υδρογραφική αποτύπωση του πυθμένα του ταμιευτήρα και σύγκρισή του με το αρχικό υπόβαθρο της λεκάνης κατάκλυσης.
3. Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών. Η βάση δεδομένων επικοινωνεί με ένα Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας για τη χωρικά αναπαράσταση των υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών. Επιπλέον, το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής χρησιμοποιεί τα δεδομένα αυτά για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής της λεκάνης απορροής.
4. Ψηφιοποίηση των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης πριν την κατασκευή του φράγματος. Η ψηφιοποίηση των τοπογραφικών διαγραμμάτων έγιναν από το φορέα – χρήστη και δημιουργήθηκαν τα ψηφιακά αρχεία σε διανυσματική μορφή. Ακολούθησε μετατροπή των αρχείων συτών σε αρχεία κανάβου βάσει συγκεκριμένης

μεθοδολογίας και λογισμικού. Ο καναβος του μοντέλου έχει ισοδιάσταση 6 m και αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική υποδομή για τον υπολογισμό του όγκου των αποθέσεων. Τα αναπόφευκτα σφάλματα (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά) που υπάρχουν όχι μόνο από τη διαδικασία παραγωγής τους αλλά και από τη διαδικασία ψηφιοποίησής τους φαίνεται να μην είναι σημαντικά στα πλαίσια της επιδιωκόμενης ακρίβειας και σε συνάρτηση με την ακρίβεια της υδρογραφικής αποτύπωσης.

5. Διενέργεια της υδρογραφικής αποτύπωσης της λεκάνης κατάκλυσης του ταμιευτήρα. Η υδρογραφική αποτύπωση έγινε με τη χρήση εξοπλισμού προσδιορισμού θέσης και μέτρησης βάθους. Ο προσδιορισμός της θέσης έγινε με τη χρήση του Διαφορικού Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού (DGPS) το οποίο παρέχει ικανοποιητική οριζοντιογραφική ακρίβεια. Η μέτρηση του βάθους του πυθμένα έγινε με τη χρήση ηχοβολιστικού βυθόμετρου. Η ανάκλαση του σήματος γίνεται από την αρχική χαλαρή επιφάνεια ώστε να καταγράφεται το αρχικό χαλαρό στρώμα των αποθέσεων όπου υπάρχουν. Η καταγραφή του βάθους είναι αναλογική σε απλό χαρτί και ακολούθησε η ψηφιοποίηση των ταινιών για τη μετατροπή τους σε ηλεκτρονικά αρχεία. Η σύνθεση των δεδομένων του DGPS και του βυθόμετρου δίνει ένα συνολικό, ακανόνιστο ψηφιακό μοντέλο της λεκάνης κατάκλυσης στη σημερινή της μορφή.
6. Κατασκευή του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου του πυθμένα του ταμιευτήρα στη σημερινή του κατάσταση. Η κατασκευή αυτή έγινε με τη χρήση του αλγόριθμου παρεμβολής επιφάνειας, γνωστού με την ονομασία «Τριγωνισμός με Γραμμική Παρεμβολή». Η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητική ακρίβεια παρεμβολής, είναι ευρέως διαδεδομένη και διατηρεί βασικά στοιχεία της επιφάνειας. Χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό για τη δημιουργία του κανάβου και ο τελικός κανάβος έχει διάσταση 6 m, ίδια με αυτή του κανάβου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης.
7. Συστηματική διερεύνηση των αποθέσεων με χρήση διατομών ώστε να εξακριβωθούν οι περιοχές εκείνες που παρουσιάζουν θετικές τιμές των αποθέσεων από την υπέρθεση των δύο ΨΜΑ. Λόγω των διαφορών στην παραγωγή των δύο καναβικών αρχείων, υπήρχαν προφανή σφάλματα που εμφανίζονταν ως αρνητικές τιμές των αποθέσεων. Γενικά, εμφανίστηκαν θετικές τιμές των αποθέσεων σε συγκεκριμένες και αναμενόμενες θέσεις, όπως οι εκβολές των ποταμών. Στον κυρίως ταμιευτήρα εμφανίστηκαν εκτεταμένες περιοχές με αρνητικές τιμές των αποθέσεων. Δεδομένου ότι είναι αδύνατον να υπάρχει διάβρωση σε τόσο εκτεταμένα τμήματα θεωρήθηκε ότι τα τμήματα των αποθέσεων στον ταμιευτήρα είναι μόνο εκείνα στις εκβολές των φραγμάτων.
8. Υπολογισμός του συνολικού όγκου των αποθέσεων βάσει της υπέρθεσης των δύο ΨΜΑ. Ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων έγινε μόνο για τα τμήματα αυτά στα οποία εμφανίστηκαν θετικές τιμές των αποθέσεων (δηλαδή οι εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα εξαιρώντας την περιοχή κοντά στο φράγμα) και στον κυρίως ταμιευτήρα θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν καθόλου αποθέσεις. Επομένως, διαπιστώνουμε ότι ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα δεν καταλαμβάνει όλη την έκταση του ταμιευτήρα, όπως αυτός έχει οριστεί, αλλά περιορίζεται μόνο στα ανάντη τμήματα των εκβολών.
9. Διενέργεια δύο πλωτών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στον κλάδο του Αχελώου του ταμιευτήρα. Οι γεωτρήσεις αυτές διενεργήθηκαν με σκοπό την εξακρίβωση των

αποτελεσμάτων της υδρογραφικής αποτύπωσης αλλά και της κοκκομετρίας των αποθέσεων. Οι γεωτρήσεις αυτές είχαν βάθος 20 m η καθεμία και εκτελέστηκαν με βάση τις ισχύουσες προδιαγραφές. Λήφθηκαν τα δείγματα του πυθμένα του ταμιευτήρα με σκοπό αφενός την απαλήθευση των υπολογισμών της υδρογραφικής αποτύπωσης και αφετέρου τον υπολογισμό των βασικών φυσικών χαρακτηριστικών των αποθέσεων.

10. Διενέργεια των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων των αποθέσεων από τις πλωτές γεωτρήσεις. Υπολογίστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες με χρήση κοσκίνων και αραιόμετρων, η σύσταση των δειγμάτων σε οργανικό υλικό και άλλες φυσικές ιδιότητες των αποθέσεων όπως ο προσδιορισμός ορίου υδαρότητας, *LL*, ο προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας, *PL*, και ο προσδιορισμός του δείκτη πλαστικότητας, *PI*. Λόγω της αδυναμίας υπολογισμού της με άμεσο τρόπο, καθώς δεν κατέστη εφικτή η συλλογή αδιατάρακτων δειγμάτων, η πυκνότητα των αποθέσεων υπολογίστηκε έμμεσα με βάση τη σχέση των Lane and Kolzer.
11. Μετατροπή του συνολικού όγκου των αποθέσεων σε μάζα σε συνάρτηση με την πυκνότητα των φερτών υλικών, η οποία προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων φερτών υλικών των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Διαπιστώθηκε ότι η πυκνότητα των αποθέσεων διαφέρει από τις εκτιμήσεις κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του φράγματος, δηλαδή τα δείγματα των στερεοϋδρομετρήσεων που αναλύθηκαν πριν από την κατασκευή του φράγματος δεν αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τη σύσταση των εισρέοντων φερών υλικών για όλο το διάστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα.
12. Χρήση υδρολογικού μοντέλου στερεοαπορροής για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης και της στερεοαπορροής. Το μοντέλο αυτό είναι σχηματοποιημένο ως εφαρμογή του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας ArcView και βασίζεται στην Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας για τον υπολογισμό της εδαφικής απώλειας. Η στερεοαπορροή βασίζεται σε απλές σχέσεις παροχής – στερεομεταφορικής ικανότητας σε κάθε ψηφιδωτό τμήμα της λεκάνης απορροής.
13. Τοποθέτηση του θολόμετρου και διενέργεια εκ νέου στερεοϋδρομετρήσεων. Το θολόμετρο (όργανο μέτρησης της θολότητας) τοποθετήθηκε στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου, ανάντη του ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Η συσχέτιση της θολότητας με τη στερεοπαροχή είναι δυνατό να δώσει αξιολογικά αποτελέσματα, εκτιμώντας τη στερεοπαροχή κυρίως σε πλημμυρικές παροχές. Για τη βαθμονόμηση του θολόμετρου στις επιτόπιες συνθήκες, διενεργήθηκε πρόγραμμα στερεοϋδρομετρήσεων για την κατάρτιση δείγματος κοινών μετρήσεων στεροπαροχής και θολότητας. Το πρόγραμμα αυτό βρίσκεται σε αρχική φάση και αναμένεται να συνεχιστεί ώστε να δώσει αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

8.2 Κυριότερα συμπεράσματα του ερευνητικού έργου.

Ο βασικός σκοπός του ερευνητικού προγράμματος είναι ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών και η διερεύνηση του κινδύνου από τις αποθέσεις αυτές. Τα κυριότερα συμπεράσματα του ερευνητικού έργου είναι τα εξής:

1. Ο συνολικός όγκος των αποθέσεων μετρήθηκε σε 66.6 hm^3 , δηλαδή το 1.48% της συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα, οι οποίες εκτείνονται σε έκταση 10.4 km^2 . Στο

μέγεθος αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται και οι αποθέσεις που βρίσκονται έξω από τα όρια της υδρογραφικής αποτύπωσης, δηλαδή για στάθμες του ταμιευτήρα μεγαλύτερες από 269.4 m. Ο όγκος αυτός είναι πολύ λιγότερος από τον αντίστοιχο όγκο που υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του έργου. Αντίστοιχα, οι αποθέσεις είναι συγκεντρωμένες σε περιορισμένα τμήματα του ταμιευτήρα, τα οποία ορίζονται στις εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα). Ο όγκος των αποθέσεων στον κλάδο του Αχελώου ανέρχεται στα 41.3 hm³, στον κλάδο του Αγραφιώτη στα 13.1 hm³ και στον κλάδο του Μέγδοβα – Τρικεριώτη τα 12.2 hm³. Η μέση ετήσια απόθεση φερτών υλικών σε όλον τον ταμιευτήρα είναι ίση με 1.96 hm³. Το πάχος των αποθέσεων δεν ξεπερνά τα 15 m στον κλάδο του Αχελώου ενώ στους υπόλοιπους κλάδους δεν ξεπερνά τα 10 m. Στο κυρίως τμήμα του ταμιευτήρα δεν παρουσιάζονται αποθέσεις γεγονός που δείχνει ότι η κατακράτηση των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα είναι ίση με τη μονάδα.

2. Με βάση τον υπολογισμό της πυκνότητας των αποθέσεων φερτών υλικών από τις δειγματοληψίες που διενεργήθηκαν, υπολογίστηκε η συνολική μάζα των αποθέσεων. Η μάζα αυτή είναι ίση με 112.55 Mt, από την οποία οι 69.80 Mt είναι η μάζα στον κλάδο του Αχελώου, 22.14 Mt και 20.62 Mt οι μάζες στους κλάδους του Αγραφιώτη και Μέγδοβα – Τρικεριώτη αντίστοιχα. Η μέση ετήσια στερεοαπορροή της συνολικής λεκάνης απορροής των Κρεμαστών, για 34 χρόνια και λεκάνη απορροής έκτασης 3292 km², είναι ίση με 1005.6 t/km² ενώ η μέση ετήσια στερεοπαροχή είναι ίση με 106.43 kg/s.
3. Η διενέργεια των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων καταρχήν επιβεβαίωσε για τις συγκεκριμένες θέσεις την αξιοπιστία των εκτιμήσεων καθώς τα πάχη των αποθέσεων που προέκυψαν από τις γεωτρήσεις γενικά συμπίπτουν με τον υπολογισμό από την υδρογραφική αποτύπωση. Ενώ στη γεώτρηση Γ1 απαντάται μια φυσιολογική εξέλιξη των εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με το βάθος της δειγματοληψίας, στη Γεώτρηση Γ2 παρουσιάζεται το φαινομενικά «παράδοξο» να εμφανίζεται στρώμα ιλυοαργιλώδους άμμου ως υπερκείμενο στρώμα ενώ το πιο λεπτόκοκκο στρώμα μαλακής αργίλου διαδέχεται την άμμο ως υποκείμενο στρώμα. Το φαινομενικά παράδοξο αυτό γεγονός δικαιολογείται από τις κατά καιρούς μεταβολές τις στάθμης του ταμιευτήρα που ουσιαστικά μεταβάλλουν δραστικά τις υδραυλικές συνθήκες και επομένως το περιβάλλον απόθεσης. Σε αρκετές περιπτώσεις διαπιστώνουμε πως κροκάλες και λατυποπαγή με σημαντικό μέγεθος βρίσκονται σε λεπτόκοκκο περιβάλλον, για παράδειγμα, άμμου. Η διαστρωμάτωση αυτή θεωρείται ότι προκύπτει ως αποτέλεσμα εισχώρησης των αδρότερων φερτών υλικών προς τα βαθύτερα στρώματα λόγω της βαρύτητάς τους, κάτι που επιτρέπει η χαλαρότητα των υπερκείμενων λεπτόκοκκων αποθέσεων. Το γεγονός ότι το ανώτερο στρώμα των αποθέσεων στο ακραίο ανάντη τμήμα του ταμιευτήρα (εκβολή Αχελώου) είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο (π.χ. ιλυώδης άργιλος) εναρμονίζεται με το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν αποθέσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα.
4. Η μορφή των αποθέσεων, όπως αυτή απεικονίζεται από την υδρογραφική αποτύπωση, δεν συμφωνεί με το πρότυπο του νεκρού όγκου που περιγράφεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Φαίνεται ότι το συνολικό ποσοστό των φερτών υλικών αποτίθεται στα ανάντη τμήματα του ταμιευτήρα και δεν μεταφέρεται προς τα κατόντη. Αυτό ίσως οφείλεται και στη μεγάλη απόσταση μεταξύ των εκβολών των ποταμών στον ταμιευτήρα και του κυρίως ταμιευτήρα και της περιοχής του φράγματος.

5. Η μορφή των αποθέσεων των φερτών υλικών δεν παρουσιάζεται σταθεροποιημένη αλλά μεταβάλλεται δυναμικά σε τρόπο που εξαρτάται από τη στάθμη του ταμιευτήρα, τις έντονες εισερχόμενες πλημμύρες και τη σύσταση των φερτών υλικών. Διαπιστώθηκε ότι ένα σημαντικό τμήμα των ανάντη αποθέσεων στην εκβολή του Αχελώου διαβρώθηκε και μετακινήθηκε προς τα κατάντη σε περίοδο που η στάθμη στον ταμιευτήρα είχε υποχωρήσει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από τη στάθμη του πυθμένα της περιόδου της υδρογραφικής αποτύπωσης. Οι πλημμυρικές παροχές εκείνη την χειμερινή περίοδο απομάκρυναν τις χαλαρές αποθέσεις και δημιούργησαν μια τοπική διάβρωση.
6. Το υδρολογικό μοντέλο στερεοαπορροής βασισμένο στην Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας ανεπτυγμένο ως εφαρμογή ενός Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο καταρχήν για τον υπολογισμό της τοπικής εδαφικής διάβρωσης. Μετά την εισαγωγή των διαφόρων απαραίτητων παραμέτρων που περιγράφουν τη λεκάνη απορροής, η λειτουργία του μοντέλου έδειξε ότι η συνολική εδαφική διάβρωση στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών ανέρχεται σε 529 Mt, από τους οποίους οι 417 Mt προέρχονται από τον κλάδο του Αχελώου. Αντίθετα, ο συντελεστής στερεοαπορροής του Αχελώου είναι πολύ μικρός (0.13) σε σύγκριση με τους αντίστοιχους του Αγραφιώτη (0.33) και του Μέγδοβα – Τρικεριώτη (0.17). Έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου υπολογισμού του συντελεστή στερεοαπορροής με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική στερεοαπορροή – εξαγόμενο του μοντέλου να πλησιάζει κατά το δυνατόν την αντίστοιχη μετρημένη. Η χρησιμότητα του μοντέλου σε πλήρη εφαρμογή είναι αυτονόητη αφού μόνο με ελάχιστα πλέον δεδομένα, ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει τη συνολική στερεοαπορροή με υπερετήσιο χρονικό ορίζοντα.
7. Η χρήση της θολότητας ως έμμεσης παραμέτρου εκτίμησης της στερεοπαροχής εκτιμάται ότι θα καταστεί εφικτή με τον προϋπόθεση ότι θα ξεπεραστούν τα πρακτικά προβλήματα της σωστής τοποθέτησης και συντήρησης του αισθητήρα. Λόγω των παρατεταμένων χαμηλών παροχών κατά τη μικρή περίοδο της ως τώρα λειτουργίας παρατηρήθηκε προσκόλληση σωματιδίων πάνω στον αισθητήρα της θολότητας με αποτέλεσμα τη μη-ικανοποιητική του λειτουργία. Εξετάζονται εναλλακτικοί τρόποι τοποθέτησης ώστε να γίνει εφικτός ο σχεδόν καθημερινός καθαρισμός του αισθητήρα ακόμα και απο μη – εξειδικευμένο προσωπικό.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τα αποτελέσματα του παρόντος ερευνητικού έργου μπορεί να αποτελέσουν ένα χρήσιμο υπόβαθρο για την περαιτέρω μελέτη των διαδικασιών της στερεομεταφοράς στην Ελλάδα αλλά και για τη συμβολή στη διεθνή επιστημονική έρευνα. Τα σημαντικότερα σημεία στα οποία θα μπορούσε να απαντήσει μια τέτοια έρευνα είναι τα εξής:

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικό κενό στην εκτίμηση της στερεοαπορροής και της σύστασης των εισρέοντων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες με μεγάλες λεκάνες απορροής. Τα προσδιοριστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί αποτυγχάνουν σε πολλές περιπτώσεις να δώσουν ακριβείς προβλέψεις γιατί κυρίως έχουν αναπτυχθεί για μικρές λεκάνες απορροής και γιατί απαιτούν πολλές παραμέτρους για τη βαθμονόμησή τους. Επίσης, σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας συμμετέχουν και φυσικές διεργασίες, των οποίων οι μηχανισμοί είναι ακόμα άγνωστοι

και δεν μπορούν εκ των πραγμάτων να περιγραφούν μαθηματικά. Επομένως ενδέχεται ότι σε μεγάλης κλίμακας λεκάνες απορροής μια black-box προσέγγιση (π.χ. καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής) ή ακόμα και απλές εμπειρικές μέθοδοι (π.χ. Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας) φαίνεται ότι δίνουν σφάλματα τουλάχιστο συγκρίσιμα σε σχέση με πιο λεπτομερείς προσδιοριστικές μεθόδους.

Σημαντικό σημείο επίσης αποτελεί η διερεύνηση της ετήσιας στερεοαπορροής και εισροής των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες. Κατά συνέπεια ενδιαφέρει επίσης η συμβολή συγκεκριμένων πλημμυρών με μεγάλη περίοδο επαναφοράς ώστε να εξεταστεί η απόκριση της υδρολογικής λεκάνης σε σχέση με το φορτίο απόπλυσης. Επομένως ενδιαφέρει ιδιαίτερα αν η συνολική ετήσια, για παράδειγμα, στερεοαπορροή προέρχεται από το φορτίο απόπλυσης για πλημμυρικές παροχές ή από το αιωρούμενο φορτίο και το φορτίο σε σύρση για μη πλημμυρικές παροχές. Σε περίπτωση που το φορτίο απόπλυσης αποτελεί το συντριπτικό ποσοστό της συνολικής στερεοπαροχής σε ένα υδατόρευμα, που είναι ένα πολύ πιθανό γεγονός τουλάχιστο για τις ελληνικές συνθήκες, τότε θα πρέπει να αναθεωρηθεί η δυνατότητα χρήσης των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής στον υπολογισμό της στερεοαπορροής και επομένως στον υπολογισμό του νεκρού όγκου ενός ταμιευτήρα. Ο υπολογισμός του νεκρού όγκου με βάση τις καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής φαίνεται να οδηγεί στην υπερδιαστασιολόγηση του νεκρού όγκου του ταμιευτήρα και επομένως στην απώλεια πολύτιμου αποθηκευτικού όγκου. Σε οικονομικά μεγέθη, το κόστος της υπερδιαστασιολόγησης του νεκρού όγκου, ανάλογα με τη χρήση του ταμιευτήρα, είναι τέτοιο που επιβάλλει την επανεξέταση των μεθόδων υπολογισμού του νεκρού όγκου.

Αντίστοιχα, σε μικρούς ταμιευτήρες, έχει ιδιαίτερη σημασία η μελέτη και ανάλυση των φορτίων απόπλυσης καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στα φορτία αυτά λόγω του μικρού τους όγκου. Επομένως, θα αποκτούσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της στερεοαπορροής των πλημμυρικών γεγονότων με μία πιθανοτική θεώρηση του σχεδιασμού του νεκρού όγκου σε τέτοιες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, ποιά είναι η περίοδος επαναφοράς, T , ενός φορτίου απόπλυσης που θα καταλάβει ένα συγκεκριμένο ποσοστό του συνολικού όγκου ενός ταμιευτήρα, ή σε πόσα χρόνια αναμένεται να καλυφθεί ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα; Αυτά είναι μόλις δύο από πολλά ερωτήματα που είναι δυνατό να προκύψουν κατά το σχεδιασμό του νεκρού όγκου ενός τέτοιου ταμιευτήρα.

Η μεθοδολογία μέτρησης της στερεοαπορροής που εξετάστηκε στο συγκεκριμένο ερευνητικό έργο, δηλαδή μέσω της υδρογραφικής αποτύπωσης των ταμιευτήρων που συγκεντρώνουν τις απορροές των υδατορευμάτων, αποδεικνύεται ότι αποτελεί μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδο. Δεδομένης της ύπαρξης αρκετών ταμιευτήρων στον ελληνικό χώρο με διαφορετικές μορφές των λεκανών απορροής, η μελέτη των αποθέσεων φερτών υλικών σε αυτούς μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση της στερεοαπορροής σε πανελλήνια κλίμακα. Το προφανές αποτέλεσμα θα είναι μια απλή στην εφαρμογή εξίσωση βασισμένη σε δεδομένα από τον ελληνικό φυσικό χώρο. Με δεδομένο το σκηνικό της υποστήριξης μικρών υδροηλεκτρικών έργων (στα πλαίσια της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας) η ανάγκη ανάπτυξης μιας απλής παραμετρικής εξίσωσης για τον υπολογισμό του νεκρού όγκου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

Πέρα από τη χωρική κλίμακα, αναγκαία είναι και η μελέτη της χρονικής κλίμακας της στερεοαπορροής. Με βάση την αποκτηθείσα εμπειρία της ερευνητικής ομάδας στην υδρογραφική αποτύπωση ταμιευτήρων, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η επανάληψη της αποτύπωσης των

τμημάτων του ταμιευτήρα Κρεμαστών για τα τμήματα εκείνα που παρουσιάζουν αποθέσεις. Οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις στα τμήματα αυτά εκτός της δεδομένης αξιοπιστίας τους θα είναι και λιγότερο δαπανηρά καθώς το υπόβαθρο και η υποδομή είναι ήδη είναι διαθέσιμα. Με τον τρόπο αυτό θα υπάρχουν εκτιμήσεις στερεοαπορροής σε ετήσια κλίμακα για τέσσερις σημαντικές υδρολογικές λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου. Επίσης, όπως φαίνεται και στην Παράγραφο 4.6.2, η σχηματοποίηση των αποθέσεων στον ταμιευτήρα είναι ακόμα μια δυναμική διαδικασία, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στάθμη στον ταμιευτήρα και κατά συνέπεια τη διαχειριστική πολιτική, τη συχνότητα πραγματοποίησης έντονων πλημμυρών και τη σύσταση των εισρέοντων φερτών υλικών.

Μια επιπλέον απαραίτητη προϋπόθεση για αυτή τη προσέγγιση είναι, εκτός του υπολογισμού της μάζας των αποθέσεων, η συλλογή αξιόπιστων και σε συνεχή χρόνο δεδομένων στερεοπαροχής των ποταμών και μάλιστα σε συνθήκες πλημμυρών. Όσο η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων αυτών παραμένει ανενεργή, η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης δεν μπορεί να γίνει δυνατή. Κατανοώντας τις δυσκολίες της “χειρωνακτικής” παραδοσιακής μεθόδου της διεξαγωγής των στερεοϋδρομετρήσεων, προτείνεται η χρήση βοηθητικών φυσικών μεταβλητών, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με ηλεκτρονικά μέσα και μάλιστα σε συνεχή χρόνο. Βεβαίως, όπως αποδείχτηκε σε αυτό το ερευνητικό έργο, η εφαρμογή μιας τέτοιας μεθοδολογίας παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, αλλά εκτιμάται ότι τα εμπόδια μπορούν να υπερπηδηθούν με συστηματική προσπάθεια. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εύρεση μιας σημαντικά ικανοποιητικής συσχέτισης παράλληλων μετρήσεων της στερεοπαροχής και της βοηθητικής μεταβλητής, στη συγκεκριμένη περίπτωση η θολότητα, ώστε να προσδιοριστεί η σχέση μετατροπής των τιμών της μεταβλητής αυτής. Η πιθανότητα υλοποίησης μιας τέτοιας μετρητικής διάταξης και η επιτυχής κατάληξη του προγράμματος μετρήσεων, η οποία προδιαγράφεται στο Κεφάλαιο 7 θα δημιουργούσε μια σειρά δεδομένων με σημαντική επιστημονική και ερευνητική αξία. Με τα δεδομένα αυτά θα είμαστε σε θέση να εξακριβώσουμε την απόκριση της στερεοπαροχής της ανάντη λεκάνης απορροής από τη χρονική κλίμακα ενός πλημμυρικού επεισοδίου έως τις ετήσιες μέσες τιμές.

9 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΥΔΕ Αχελώου, *Εκτροπή Αχελώου, Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*, Παράρτημα Γ: Μελέτη Οικολογικών και Περιβαλλοντικών Χαρακτηριστικών, Αθήνα, 1995.

Ζαρρής, Δ., Ε. Ρόζος και Δ. Σακελλαριάδης, Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση Γ', *Τεύχος 36 - Περιγραφή υδατικών συστημάτων*, ΕΜΠ, Αθήνα, 1998.

Ζησόπουλος, Α., και Δ. Παραδείσης, Διαφορικός εντοπισμός (DGPS), Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Τομέας Τοπογραφίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, *Γεωτεχνικός χάρτης της Ελλάδας*, Κλίμακα 1:500,000, Αθήνα, 1993.

Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, *Τεχνικά Χρονικά*, 7 (3), 127-154, 1987.

Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 2 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

Λυκούδη, Ε., *Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής του άνω ρου του Αχελώου ποταμού*, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

Ξανθόπουλος, Θ., *Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1990.

Παραδείσης, Δ., *The Global Position System*, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Τομέας Τοπογραφίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1992.

Τσακαλίας, Γ., και Δ. Κουτσογιάννης, Καμπύλες στάθμης – παροχής και εξαγωγή παροχών, Τεύχος 19, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1995.

Υπουργείο Ανάπτυξης, *Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας*, Αθήνα, 1996.

Φερντίνος, Γ., *Τεχνική Ωκεανογραφία*, Πάτρα, 1985.

Χρυσάνθου, Β. και Α. Πυλιώτης, *Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σε έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή*, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, 1995.

Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, and J. Rasmussen, An introduction the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen "SHE" 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, (1-2), 45-59, 1986a.

- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, and J. Rasmussen, An introduction the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen “SHE” 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, (1-2), 61-77, 1986b.
- American Society of Civil Engineers, Chapter V. Sediment sources and sediment yield, *J. Hydr. Div. ASCE 96 (HY6)*, 1283-1330, 1982.
- American Public Health Association (APHA), *Standard methods for the examination of water and wastewater, 16th edition*, 1269 pp., Am. Public Health Assoc., Washington, D.C., 1985.
- Annandale, G.W., *Reservoir Sedimentation*, Developments in Water Science, 29, Elsevier, 1987.
- Atkinson, E., *The feasibility of flushing sediment from reservoirs*, Report OD 137, HR Wallingford, UK, 1996.
- Bagnold, R.A., An approach to the sediment transport problem from general physics, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-I, 1966.
- Beasley, D.B. and L.F. Huggins, *The ANSWERS User's Manual*, second edition, 1991.
- Beschta, R.L., Long term patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range, *Water Resour. Res.*, 14, 1011-1016, 1978.
- Bogardi, J., *Sediment transport in alluvial streams*, Hungarian Academy of Sciences, 826p., Budapest, 1978.
- Borland, W.M. and C.R. Miller, Distribution of sediments in large reservoirs, *J. Hydr. Div. ASCE*, 84, (HY2), 1958.
- Brown, C.B., Perspective on sedimentation – purpose of conference, in: *Proceedings of the first Federal Interagency Sedimentation Conference*, US Dep. Inter., Bur. Reclam., 1948.
- Brown, L.R., Conserving soils, In: L.R. Brown (ed), *State of the world*, Norton, New York, pp. 53-75, 1984.
- Brune, G.M., The dynamic concept of sediment sources, *Eos Trans. AGU*, 31(4), 587-594, 1950.
- Burrell, G.N., Constant factor method aids computation of reservoir sedimentation, *Civil Engineering, ASCE*, 21 (7), p. 51-52, 1951.
- Chang, H.H., Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans, *J. Hydr. Div. ASCE*, 108, (HY11), p. 1282-1295, 1982.
- Chisci, G. and C. Zanchi, The influence of different tillage systems and different crops on soil losses on hilly silty-clayey soil, in: Morgan, R.P.C., (ed) *Soil conservation: Problems and prospects*, pp. 211-217, Wiley, Chichester, 1981.
- Christofano, E.A., Area increment method of distributing sediment in a reservoir, U.S. Bureau of Reclamation, Albuquerque, New Mexico, 1953.
- Clark, E.H., J.A. Haverkamp and W. Chapman, *Eroding soils: The off-farm impacts*, The Conservation Foundation, Washington, D.C., 252 pp., 1985.

- Croley, T.E., K.N. Raja Rao, F. en Karim, Reservoir sedimentation model with continuous distribution, compaction and slump, *IHR Report No. 98*, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, USA, 1978.
- Dendy, F.E. and G.C. Bolton, Sediment yield-runoff drainage area relationships in the United States, *J. Soil and Water Cons.*, 31, 264-266, 1976.
- DePloey, J., Soil erosion and possible measures in loess loamy areas, in: Chisci, G. and R.P.C. Morgan (eds), *Soil erosion in the European Community: Impact of changing agriculture*, pp. 157-163, Balkema, Rotterdam, 1986.
- DHI, *SEAGIS 1.0: Documentation and user's manual*, 1999.
- Duck, R.W. and J., McManus, A long term estimate of bedload and suspended sediment yield derived from reservoir deposits, *Journal of Hydrology*, 159, 365-373, 1994.
- Dunne, T., Sediment yield and land-use in tropical catchments, *Journal of Hydrology*, 42, 281-300, 1979.
- Engineering Consultants Inc., Technical record of investigation, authorization, design and construction of dam and power project, *Kremasta project report Volume I*, Colorado, USA, 1974.
- Environmental Systems Research Institute Inc., Surface modelling with TIN, *ARC/INFO user's guide*, 1991a.
- Environmental Systems Research Institute Inc., Editing coverages and tables with ARCEDIT, *ARC/INFO user's guide*, 1991b.
- Ferguson, R.I., River loads underestimated by rating curves, *Water Resour. Res.*, 22 (1), 74-76, 1986.
- Flanagan, D.C and M.A. Nearing, USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation, *NSERL Report No. 10*, USDA-ARS-NSERL, West Lafayette, IN, 1995.
- Flaxman, E.M., Predicting sediment yield in western United States, *J. Hydr. Div. ASCE*, 98 (12), 2073-2085, 1972.
- Foster, G.R., D.K. McCool, K.G. Renard and W.C. Moldenhauer, Conversion of the USLE equation to SI metric units, *J. of Soil and Water Cons.*, 36 (6), 355-359, 1981.
- Garcia, E.P. and F.O. Vignoli, Average long-term sediment discharge investigations based on reservoir resurvey data and sediment yield rate factors, in: Bordas, M.P and D.E. Walling (eds.) *Sediment Budgets*, IAHS Publication No. 174, UK, 1988.
- Gilroy, E.J., R.M. Hirsch and T.A. Cohn, Mean square error of regression based constituent transport estimates, *Water Resour. Res.*, 26 (9), 2069-2077, 1990.
- Gippel, C.J., Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended sediments in streams, *Hydrol. Processes*, 9, 83-97, 1995.
- GlobalWater, *WQ700 Turbidity Sensor, Instruction Manual*, California, 1997.
- Golden Software, *Surfer version 7. Documentation and User's manual*, 1999.

- Goodrich, D.C., and D.A. Woolhiser, Catchment hydrology, *Rev. of Geophysics Supplement*, American Geophysical Union, 202-209, 1991.
- Graf, W.H., *Hydraulics of sediment transport*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- Gregory, K.J., and D.E. Walling, *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach*, 458 pp. Edward Arnold, London, 1973.
- Hamlett, J.M., J.L. Baker, S.C. Kimes and H.P. Johnson, Runoff and sediment transport within and from small agricultural watersheds, *Trans. ASAE*, 27, 1355-1363, 1984.
- Hodgkins, R., Controls on suspended sediment transfer at a high-arctic glacier determined from statistical modelling, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1, 1999.
- Hofmann – Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and practice*, 3rd edition, Springer – Nerlag, Wien, 1994.
- Hrissanthou, V., Simulation model for the computation of sediment yield due to upland and channel erosion from large basins, in: Bordas, M.P and D.E Walling (eds.) *Sediment Budgets*, IAHS Publication No. 174, UK, 1988.
- Ingham, A.E., *Hydrography for the surveyor and engineer*, 3rd rev. edition, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 1992.
- Jansen, J.M.L and R.B. Painter, Predicting sediment yield from climate and topography, *Journal of Hydrology*, 21, 371-380, 1974.
- Kinnell, P.I.A., and L.M. Risse, USLE-M: Empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 62, 1667-1672, 1998.
- Kirkby, M.J., Modelling water erosion processes. In Kirkby, M.J. and Morgan, R.P.C. (eds) *Soil Erosion*, pp. 183-216, Wiley, Chichester, 1980.
- Knisel, W.G., CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems, *USDA Conservation Research Report No. 26*, USDA-ARS, Washington, DC. 1980.
- Koch, G. S. and R. F. Link, *Statistical Analysis of Geological Data*, Dover Publications, New York, 1980.
- Krause, G., and K. Ohm, A method to measure suspended load transports in estuaries, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 19, 611-616, 1984.
- Kuhnle, R.A., R.L. Bingner, R.L. Foster and E.H. Grissinger, Effect of land use changes on sediment transport in Goodwin Creek, *Water Resour. Res.*, 32 (10), 3189-3196, 1996.
- Lai, C., Numerical modelling of unsteady open-channel flow, in: Chow, V.T. (ed.) *Advances in hydroscience*, Vol. 14, Academic Press, Orlando, USA, 1986.
- Labadz, J.C., D.P. Butcher, A.W.R. Potter and P. White, The delivery of sediment in upland reservoir systems, *Phys. Chem. Earth*, 20 (2), 191-197, 1995.
- Lane, L.J. and M. Nichols, A hydrologic method for sediment transport and yield, In Wang, S.Y, E.J.J. Lanzendoen and F.D.Shields (eds) *Management of landscapes disturbed by channel*

incision, pp. 365-370, Center for Com. Hydrosoci. and Eng., University of Mississippi, Oxford, MS, 1997.

Lane, L.J., M. Hernandez, and M. Nichols, Process controlling sediment yield from watersheds as functions of spatial scale, *Environmental Modelling and Software*, 12 (4), 355-370. 1997.

Lawson, C. L., "Software for C1 surface interpolation" in J. Rice (ed.), *Mathematical Software III*, Academic Press, New York, p. 161-193. New York, 1977.

Lea, N.J., *Analysis of reservoir range line surveys using the stage width modification method*, Report OD/TN, HRWallinford, UK, 1991.

Lee, D.T., and B.J. Schachter, Two algorithms for constructing a Delaunay Triangulation, *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9, 3, 219-224, 1980.

Lewis, J., Turbidity – controlled suspended sediment sampling for runoff – event load estimation, *Water Resour. Res.*, 32(7), 2299-2310, 1996.

Lewis, J., and R. Eads, Turbidity controlled suspended sediment sampling, *Watershed Management Council Newsletter* 6 (4), 4-5, 1996.

Lewis, J., and R. Eads, Automatic real-time control of suspended sediment sampling based upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity, in *Proceedings of the Federal Interagency Workshop "Sediment Technology for the 21st Century"*, St. Petersburg, Florida, 1998.

Leick, A., *GPS satellite surveying*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, 1995.

Lemke, K., Transfer function models of suspended sediment concentration, *Water Resour. Res.*, 27 (3), 293-305, 1991.

Lopez, J.L., Mathematical modelling of sediment deposition in reservoirs, *Ph.D. Dissertation*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, 1978.

Mahmood, K., Reservoir sedimentation: Impact, extend and mitigation, *Tech. Paper No. 171*, The World Bank, Washington D.C., 1987.

Meijerink, A.M.J., H.A.M. de Brouwer, C.M. Mannaerts and C.R. Valenzuela, *Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical Hydrology*, Publication Number 23, UNESCO International Hydrological Programme and International Institute for Aerospace, Survey and Earth Sciences, pp. 243, 1994.

Michaud, J. and S. Sorooshian, Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed, *Water Resour. Res.*, 30, 593-605, 1994.

Milliman, J.D., Y.S. Qin, M.E. Ren and Y. Saito, Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the Yellow River (Huanghe) example. *J. Geol.*, 95, 1987.

Miltz, D. and D.C. White, Sedimentation and the economics of selecting an optimum reservoir site, *Water Resour. Res.*, 23, (8), 1443-1448, 1987.

Mimikou, M., An investigation of suspended sediment curves in Western and Northern Greece, *Hydrol. Sci. J.*, 27 (3), 369-383, 1982.

- Mitchell, J.K, and G.D. Bubenzer, Soil Loss Estimation, in Kirkby, M.J. and R.P.C. Morgan, *Soil Erosion*, John Wiley and Sons Ltd., pp. 17-62, 1980.
- Moog, D.B., and P.J. Whitting, Annual hysteresis in bed load rating curves, *Water Resour. Res.*, 34 (9), 2392-2399, 1998.
- Moore, R.J., A dynamic model of basin sediment yield, *Water Resour. Res.*, 20 (1), 89-103, 1984.
- Moran, P.A.P., A probability theory of a dam with a continuous release, *Q. J. Math. (Oxford 2)*, 7, 130-137, 1956.
- Morgan, R.P.C, *Soil Erosion and Conservation*, Longman Group, UK, 1986.
- Morgan, R.P.C, Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. and Folly, A.J.V., *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and user guide, Version 3.6.*, Silsoe College, U.K., 1998.
- Novotny, V., Delivery of suspended sediment and pollutants from non-points sources during overland flow. *Water Resources Bulletin*, 16, 6, 1057-1965, 1980.
- Oldfield, F., Lakes and their drainage basins as units of sediment-based ecological study, *Progr. Phys. Geogr.*, 1, 460-504, 1977.
- Pirie, G., *Oceanography*, Oxford University Press, New York, 1977.
- Qian, N. and D.Z. Dai, The problems of river sedimentation and the present status of its research in China, *Chinese Soc. Hydrol. Eng., Proc. Int. Riv. Sedimentation*, 1, pp 1-39, 1980.
- Renard, K.G. and E.M. Laursen, A dynamic behavior model of ephemeral streams, *J. Hydr. Div. ASCE (HY5)*, 511-528, 1975.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, and J.P. Porter, RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation, *J. Soil and Water Cons.*, 46, 30-33, 1991.
- Renfro, G.W., Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield, in "Sediment yield workshop: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources" Proceedings USDA Sedim. Labor. Oxford, Mass. Usa, pp. 33-45, 1972.
- Richter, G., On the soil erosion problem in temperate humid area of Central Europe, *Geo Journal*, 4, 279-287, 1980.
- Richter, G., Aspects and problems of soil erosion hazard in the EEC countries, in: Prendergast, A.G. (ed), *Soil erosion*, pp. 9-17, Commission of the European Communities Report No. EUR 10860 EN, 1983.
- Rijn, L.C. van, H. van Rossumand and A.P.P. Termes, Field verifications of 2D and 3D suspended sediment models, *J. Hydr. Div. ASCE*, 116 (10), 1270-1287, 1990.
- Rodriguez-Iturbe, I., and C.F. Nordin, Time series analysis of water and sediment discharges, *Hydrol. Sci. Bull.*, 13 (2), 69-78, 1968.
- Roehl, J.W., Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors, Publication No. 59, IASH Commission on land erosion, pp. 202-213, 1962.

- Rowan, J.S., P. Goodwill and M. Greco, Temporal variability in detachment sediment yield determined from repeated bathymetric surveys: Abbeystead Reservoir, UK, *Phys. Chem. Earth*, (20) 2, 199-206, 1995.
- Schwertmann, U., Soil erosion: extent, prediction and protection in Bavaria, in: Chisci, G. and R.P.C. Morgan (eds), *Soil erosion in the European Community: Impact of changing agriculture*, pp. 157-163, Balkema, Rotterdam, 1986.
- Schwertmann, U., W. Vogl and M. Kainz, *Bodenerosion durch Wasser*, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1990.
- Seeber, G., *Satellite geodesy: Foundations, methods and applications*, Walter de Gruyter, Berlin, 1993.
- Sharma, T.C., and W.T. Dickinson, System model for daily sediment yield, *Water Resour. Res.*, 16 (3), 501-506, 1980.
- Shen, H.W. and H. Kikkawa, (eds), *Application of stochastic processes in sediment transport*, Water Resources Publications, Littleton, USA, 1980.
- Singh, V.P., Analytical solutions of kinematic equations for erosion on a plane, II, Rainfall of finite duration, *Adv. Water Resour.*, 6, 2-10, 1983.
- Singh, V.P., and P.F. Krtdanovic, A stochastic model for sediment yield using the principle of maximum entropy, *Water Resour. Res.*, 23 (5), 781-793, 1987.
- Sloff, C.G., *Reservoir sedimentation: A literature survey*, Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Delft University of Technology, 1991.
- Soares, E.F., T.E. Unny and W.C. Lennox, Conjunctive use of deterministic and stochastic models for predicting sediment storage in large reservoirs 1. A stochastic sediment storage model, *Journal of Hydrology*, 59, 49-82, 1982a.
- Soares, E.F., T.E. Unny and W.C. Lennox, Conjunctive use of deterministic and stochastic models for predicting sediment storage in large reservoirs 2. A deterministic model for the sediment deposition process, *Journal of Hydrology*, 59, 83-105, 1982b.
- Storm, B., G.H. Jorgensen and M. Styczen, Simulation of water flow and soil erosion processes with a distributed physically-based modelling system, *IAHS Publ. 167*, 595-608, 1987.
- Szechowycz, R.W. and M.M. Qureshi, Sedimentation in Mangla Reservoir, *J. Hydr. Div. ASCE (HY9)*, 1973.
- Thomas, W.A., *Scour and deposition in rivers and reservoirs*, HEC-6, Hydrologic Engineering Centre, US Army Corps of Engineers, 1977.
- U.S. Department of Agriculture, *Soil, Water and Related Resources in the United States: Analysis of Resource Trends*, 1980 RCA Appraisal, Gov. Print. Off., Washington, D.C., 1981.
- Vanoni, V.A., (editor) *Sedimentation Engineering* (prepared by the ASCE Task Committee), ASCE, New York, 1977.

- Van Sickle, J., Stochastic prediction of sediment yields from small coastal watersheds in Oregon, USA, *Journal of Hydrology*, 56, 309-323, 1982.
- Van Sickle, J., and R.L. Beschta, Supply-based models of suspended sediment transport in streams, *Water Resour. Res.*, 19 (3), 768-778, 1983.
- Wade, J.C., and Heady E.O., Measurement of sediment control impacts on agriculture, *Water Resour. Res.*, 14, 1-8, 1978.
- Walling, D.E., Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, *Water Resour. Res.*, 13 (3), 531-538, 1977.
- Walling, D.E., The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology*, 65, 209-237, 1983.
- Walling, D.E., Muddy waters move mountains, *The Geographical Magazine*, pp. 262-267, 1984.
- Walling, D.E. and B.W. Webb, The reliability of rating curves estimate of suspended sediment yield: some further comments, in *Sediment Budgets, IAHS Publication No. 174*, UK, 1988.
- Walling, D.E, Personal Communication, 1999.
- Weber, J.E., M.M Fogel and L. Duckstein, The use of multiple regression models in predicting sediment yields, *Water Resources Bulletin*, 12 (1), 1-18, 1976.
- White, P., D.P. Butcher and J.C. Labadz, Reservoir sedimentation and catchment sediment yield in the Strines catchment, UK, *Phys. Chem. Earth*, (22), 3-4, 321-328, 1997.
- Wischmeier, W.H., Upland erosion analysis, In: *Environmental Impacts on Rivers*, Colorado State University, Fort Collins, 1972.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, *Agric. Handbook 282*, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, 1965.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, Predicting rainfall erosion losses; A guide to Conservation planning, *Agriculture Handbook No. 537*, USDA Sci. and Edyc. Admin., Washington D.C., 1978.
- Wicks, J.M and J.C. Bathurst, SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system, *Journal of Hydrology*, 175, 213-238, 1996.
- Williams, J.R., Sediment routing for agricultural watersheds, *Water Resources Bulletin*, 11, 965-974, 1975.
- Williams, J.R. and H.D. Berndt, Sediment yield prediction based on watershed hydrology, *Trans. ASAE* 20, 1100-1104, 1977.
- Wolman, M.G., and R. Gerson, Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology, *Earth Surf. Processes*, 3, 189-208, 1978.
- Woolhiser, D.A., and P. Todorovic, *A stochastic model for sediment yield for ephemeral streams*, International Association for Statistics in Physical Science Symposium on Hydrology, Tucson, Arizona, 1971.

Woolhiser, D.A., and K.G. Renard, Stochastic aspects of watershed sediment yield, in *Application of stochastic processes in sediment transport*, edited by H.W. Shen and H. Hikkavan, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 1980.

Woolhiser, D.A., R.E. Smith and D.C. Goodrich, *KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*, USDA-Agricultural Research Service, ARS-77,pp 130., 1990.

Yalin, M.S., An expression for bed-load transportation, *Journal of Hydr. Div.*, 98 (HY3), ASCE, 221-250, 1963.

Yang, C.T., *Sediment Transport: Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1996.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Δορυφορική εικόνα λεκάνης απορροής Κρεμαστών από το δορυφόρο LANDSAT –7 (Enhanced Thematic Mapper Plus).

Εικόνα 2: Θέση ταμιευτήρα Κρεμαστών και λεκάνης απορροής με το κύριο υδρογραφικό δίκτυο.

Εικόνα 3: Βροχομετρικοί σταθμοί εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Εικόνα 4: Υδρομετρικοί σταθμοί στη λεκάνη απορροής με τις αντίστοιχες υπολεκάνες απορροής.

Εικόνα 5: Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου λεκάνης απορροής ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Εικόνα 6: Γεωλογικοί σχηματισμοί στη λεκάνη απορροής.

Εικόνα 7: Κάναβος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης λεκάνης απορροής ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Εικόνα 8: Οι βολιστικές γραμμές της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ

Χάρτης 1: Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (R).

Χάρτης 2: Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (K).

Χάρτης 3: Τοπογραφικός συντελεστής (LS).

Χάρτης 4: Συντελεστής φυτοκάλυψης (C).

Χάρτης 5: Συντελεστής διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης (P).

Χάρτης 6: Κάναβος τοπικής εδαφικής διάβρωσης συνολικής λεκάνης απορροής (SE).

Χάρτης 7: Κάναβος δείκτη στερεοαπορροής (delivery index, DI).

Χάρτης 8: Κάναβος συντελεστή στερεοαπορροής (delivery ratio, DR).

Χάρτης 9: Κάναβος συνολικής στερεοαπορροής (transported erosion, TE).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου για το χρονικό διάστημα μέχρι το 1983.

Πίνακας 2: Νέες στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Αυλάκι για τα έτη 2000-2001.

Πίνακας 3: Στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Μεσοχώρα του π. Αχελώου για το χρονικό διάστημα 1969-1973.

Πίνακας 4: Στερεοϋδρομετρήσεις στη θέση Κρεμαστά του π. Αχελώου το έτος 1964.

Πίνακας 5: Κωδικοποιήσεις χρήσεων γης κατά CORINE.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

Φωτογραφία 1: Πανοραμική άποψη τμήματος του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Φωτογραφία 2: Η εκβολή του ποταμού Αχελώου στον ταμιευτήρα.

Φωτογραφία 3: Το φράγμα των Κρεμαστών μαζί με τον υπερχειλιστή και την υδροληψία του σταθμού παραγωγής ενέργειας.

Φωτογραφία 4: Παράδειγμα φερτών υλικών κοίτης σε χείμαρρο της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Φωτογραφία 5: Φερτά υλικά στην κοίτη του ποταμού Αγραφιώτη λίγο ανάντη της εκβολής του στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Φωτογραφία 6: Ο βασικός εξοπλισμός για τη διεξαγωγή της υδρογραφικής αποτύπωσης: Δεξιά, ο κινούμενος δέκτης GPS με το φορητό υπολογιστή και αριστερά το ηχοβολιστικό βυθόμετρο σε παράλληλη λειτουργία.

Φωτογραφία 7: Η κεραία του σταθμού αναφοράς τοποθετημένη στο δώμα του ξενώνα του οικισμού της ΔΕΗ στα Κρεμαστά.

Φωτογραφία 8: Το βυθόμετρο Raytheon ενώ καταγράφει τα βάθη του πυθμένα στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Φωτογραφία 9: Το πλωτό γεωτρύπανο στη θέση της πλωτής γεώτρησης Γ1.

Φωτογραφία 10: Το μέτωπο των αναβαθμών στη θέση της πλωτής γεώτρησης Γ2.

Φωτογραφία 11: Χαρακτηριστικοί αναβαθμοί των αποθέσεων φερτών υλικών στη συμβολή του π. Γρανιτσιώτη με τον π. Αχελώο.

Φωτογραφία 12: Το θολόμετρο εγκατεστημένο στη θέση Αυλάκι του π. Αχελώου.

Φωτογραφία 13: Η διάταξη μεταφοράς δεδομένων από το θολόμετρο σε φορητό υπολογιστή.