

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ
& ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ &
ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**MINISTRY OF DEVELOPMENT
GENERAL SECRETARIAT OF RESEARCH AND
TECHNOLOGY**

**PUBLIC POWER CORPORATION
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS**

**DEPARTMENT OF WATER RESOURCES,
HYDRAULIC & MARITIME ENGINEERING**

**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ
ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ
ΦΑΣΗ Α**

**RESEARCH PROJECT
APPRAISAL OF RIVER SEDIMENT
DEPOSITS IN RESERVOIRS OF
HYDROPOWER DAMS
PHASE A**

**ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΩΤΗΣ
ΦΑΣΗΣ**

FINAL REPORT OF PHASE A

ΣΥΝΤΑΞΗ: Δ. ΖΑΡΡΗΣ & Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ: Δ. ΖΑΡΡΗΣ**

ΑΘΗΝΑ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1999

BY: D. ZARRIS & D. KOUTSOYIANNIS

**SCIENTIFIC DIRECTOR: D. KOUTSOYIANNIS
PRINCIPAL INVESTIGATOR: D. ZARRIS**

ATHENS - OCTOBER 1999

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I. Εισαγωγή	1
1. Ιστορικό.....	1
2. Στόχοι	1
2.1 Γενικοί Στόχοι.....	1
2.2 Ειδικότεροι στόχοι της πρώτης φάσης	2
3. Συμβατικό αντικείμενο της πρώτης φάσης	2
4. Παραδοτέα της πρώτης φάσης	3
5. Ερευνητική ομάδα	4
6. Ευχαριστίες.....	4
7. Δομή της τελικής έκθεσης.....	5
II. Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	7
1. Γενική εισαγωγή.....	7
1.1. Ορισμοί και βασικές έννοιες.....	8
1.2. Μορφές στερεομεταφοράς και σύσταση των φερτών υλικών.....	10
1.3. Γενικές έννοιες γεωμορφολογίας.....	11
1.4. Υπάρχουσα γνώση και προοπτικές στον Ελληνικό χώρο.....	12
2. Εκτιμήσεις στερεοαπορροής	14
2.1. Μέθοδοι εκτίμησης της στερεοαπορροής.....	14
2.2. Επίδραση της χωρικής κλίμακας στη στερεοαπορροή	24
2.3. Φυσικές διεργασίες σε λεκάνες απορροής μεγάλης επιφάνειας.....	26
3. Κατανομή αποθέσεων σε ταμιευτήρες.....	28
3.1. Περιγραφή των μορφών απόθεσης.....	28
3.2. Μοντέλα υπολογισμού της κατανομής των αποθέσεων φερτών υλών σε ταμιευτήρες.....	32
III. Επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.....	35
1. Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών	35
2. Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.....	37
2.1. Υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	38
2.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά	43
2.3. Χρήσεις γης	44
2.4. Τοπογραφία.....	45
IV. Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών	46
1. Μέθοδοι υδρογραφικής αποτύπωσης ταμιευτήρων	46
2. Αναλυτική περιγραφή της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	48
2.1. Εντοπισμός θέσης.....	49
2.2. Καταγραφή του βάθους.....	51
3. Υπολογισμός όγκου αποθέσεων.....	53

V. Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών.....	60
1. Υδρολογικές παράμετροι.....	61
2. Φυσιογραφικές παράμετροι.....	62
2.1. Τοπογραφία.....	62
2.2. Γεωλογία.....	63
2.3. Χρήσεις γης.....	64
VI. Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	65
1. Σύνοψη των εργασιών της πρώτης φάσης.....	65
2. Γενικά συμπεράσματα του ερευνητικού έργου	66
3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	67
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Χάρτες	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Πίνακες	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Φωτογραφίες	90

I. Εισαγωγή

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. Ο φορέας - χρήστης ενέκρινε την ανάθεση εκπόνησης του ερευνητικού έργου με την υπ. αριθμ. 845/22.8.1998 απόφασης της Διεύθυνσης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων (ΔΑΥΕ) της ΔΕΗ.

2. Στόχοι

2.1 Γενικοί Στόχοι

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

Οι κύριοι στόχοι επομένως είναι δύο: Πρώτον, η εκτίμηση του ρυθμού πρόσχωσης των ήδη κατασκευασμένων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων και ο βέλτιστος σχεδιασμός του νεκρού όγκου των υπό μελέτη ταμιευτήρων. Εκτιμάται ότι η απώλεια όγκου αποθήκευσης του ταμιευτήρα λόγω της απόθεσης φερτών είναι πολύ σημαντική 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 παραγωγής και στους υδροστρόβιλους. Επιπροσθέτως, πιθανή υπερδιαστασιολόγηση του νεκρού όγκου οδηγεί σε σημαντική απώλεια του ωφέλιμου όγκου. Δεύτερον, η αξιόπιστη εκτίμηση της εδαφικής απώλειας (διάβρωσης) είναι σημαντική για την κατάστροψη των ισοζυγίων φερτών υ-

λικών και επομένως για μια συνολική, ορθολογική και βέλτιστη περιβαλλοντική διαχείριση των λεκανών απορροής.

Το μαθηματικό μοντέλο που θα προκύψει θα μπορεί να αποτιμήσει διάφορα σενάρια μεταβολών των χρήσεων γης και των υδρολογικών παραμέτρων, να προβλέπει το ρυθμό πρόσχωσης των ταμιευτήρων και να διαστασιολογήσει το νεκρό όγκο του ταμιευτήρα με ανάλυση διακινδύνευσης.

2.2 Ειδικότεροι στόχοι της πρώτης φάσης

Κατά την α' φάση ο κύριος άξονας θα είναι 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 συνεργείων καθώς και η οργάνωση της βάσης δεδομένων του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας (GIS). Το σημαντικότερο μέρος της α' φάσης θα είναι η διενέργεια των μετρήσεων στον ταμιευτήρα που θα επιλεγεί. Καθόλη τη διάρκεια της φάσης θα γίνεται η βιβλιογραφική ενημέρωση και τεκμηρίωση. Επίσης, θα γίνει ανάλυση και αξιολόγηση παρόμοιων ερευνητικών έργων και προϊόντων λογισμικού που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς.

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 ταμιευτήρα 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 πύκνωση 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 κατανεμημένων 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 ταμιευτήρα.* 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 ταμιευτήρα 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 ταμιευτήρα κατά τη β' φάση.

5. *Κατάστρωση 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.

4. Παραδοτέα της πρώτης φάσης

Τα παραδοτέα της πρώτης φάσης όπως αναγράφονται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

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

5. Ερευνητική ομάδα

Επιστημονικός υπεύθυνος του ερευνητικού έργου είναι ο Επίκουρος Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης. Στην ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων συμμετείχαν οι ακόλουθοι ερευνητές ενώ επίσης αναγράφονται και οι αντίστοιχες εργασίες οι οποίες διενεργήθηκαν από αυτούς.

Ονοματεπώνυμο	Ιδιότητα	Κύριες εργασίες
Δ. Κουτσογιάννης	Επ. Καθηγ. ΕΜΠ	Επιστημονικός υπεύθυνος, οργάνωση των εργασιών και μεθοδολογιών
Δ. Ζαρρής	Πολ. Μηχ., M.Sc. Υδρολογίας, Υπ. Διδ. ΕΜΠ	Συντονιστής ερευνητικής ομάδας, συμμετοχή στην εκτέλεση της υδρογραφικής αποτύπωσης.
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 ΓΣΠ
Α. Κουκουβίνος	Αγρ. Τοπ. Μηχ.	Συμμετοχή στη δημιουργία του ΓΣΠ
Γ. Πένιας	Τεχνικός	Πλοήγηση υδρογραφικού σκάφους
Δ. Συνετός	Τεχνικός	Συντήρηση βυθόμετρου

Από την πλευρά της ΔΕΗ την εποπτεία της ερευνητικής ομάδας ανέλαβε ο κ. Χ. Μακρυγιώργος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ. Στην ψηφιοποίηση των χαρτοταινιών σημαντική ήταν η συμβολή του κ. Θ. Θωμόπουλου, Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ. Τη γραμματειακή υποστήριξη ανέλαβαν οι Μ. Λαγογιάννη και Μ. Οικονόμου.

6. Ευχαριστίες

Η ερευνητική ομάδα επιθυμεί να ευχαριστήσει και να αναγνωρίσει τη σημαντική και πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση στο δύσκολο αυτό έργο των ακόλουθων φορέων:

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. Στεφανάκο, του επιβλέποντος από τη πλευρά της ΔΕΗ κ. Χ. Μακρυγιώργο 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 και τους υπόλοιπους συναδέλφους για την πολύτιμη συμβολή τους στην ψηφιοποίηση των παλαιών τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης. Χωρίς τη συμμετοχή τους η ολοκλήρωση της πρώτης φάσης 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. Τη Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής της ΔΕΗ και συγκεκριμένα το Διευθυντή του Κλάδου κ. Γ. Λέρη καθώς και τον κ. Ι. Μαύρο για το έμπρακτο ενδιαφέρον τους στην εξέλιξη του ερευνητικού έργου.
6. Τη Διεύθυνση του ΥΗΣ Κρεμαστών, τον διευθυντή κ. Ι. Παπαφώτη, 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.
7. Τους εργαζόμενους της ΔΕΗ στον ΥΗΣ Κρεμαστών για τη φιλοξενία τους, τη φιλία τους, τη διάθεση να βοηθήσουν σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυπτε.
8. 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.

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 τέσσερα κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο με τίτλο «*II. 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 στατιστικές 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 στις παραγράφους 2.2 και 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 με τίτλο «*III. Επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών*» αναλύεται και δικαιολογείται η επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών ως του πλοτικού ταμιευτήρα για την εκτίμηση της

στερεοαπορροής της ανάντη λεκάνης μέσω της μέτρησης του όγκου και της μάζας των φερτών υλικών που έχουν αποτεθεί 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 με τίτλο «*IV. Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών*» περιγράφεται η διαδικασία της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Περιγράφεται συνοπτικά η χρήση του Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού για την καταγραφή της θέσης και η χρήση των ηχοβολιστικών συσκευών για την μέτρηση του βάθους. Στην Παράγραφο 3 τέλος δίνονται οι υπολογισμοί του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών που έχουν κατακρατηθεί στον ταμιευτήρα για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του ταμιευτήρα.

Στο κεφάλαιο με τίτλο «*V. Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών*» περιγράφονται τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί και η χρήση των οποίων θα είναι εκτεταμένη κυρίως στη β' φάση του έργου. Έχουν αναπτυχθεί ειδικές εφαρμογές σε Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας, το οποίο εκτός από τη δυνατότητα αποθήκευσης, ανάκτησης και τροποποίησης των πρωτογενών δεδομένων, περιλαμβάνει και τις εφαρμογές εκείνες που επιτρέπουν την πραγματοποίηση συγκεκριμένων επεξεργασιών. Τα δεδομένα αυτά, δηλαδή η υδρολογία, η τοπογραφία, η γεωλογία και οι χρήσεις γης βρίσκονται αποθηκευμένα σε ψηφιακούς δίσκους που συνοδεύουν την τελική έκθεση.

Τέλος, στο κεφάλαιο με τίτλο «*VI. Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα*» συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την πρώτη φάση του ερευνητικού προγράμματος και κωδικοποιούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης, γίνεται μια αναφορά στο είδος των εργασιών που θα εκτελεσθούν στη δεύτερη φάση του ερευνητικού προγράμματος διασαφηνίζοντας και επεκτείνοντας, υπό το φως της εμπειρίας που αποκτήθηκε στην πρώτη φάση, τα όσα αναφέρονται στα τεχνικά δελτία της σύμβασης του ερευνητικού έργου.

II. Βιβλιογραφική επισκόπηση

1. Γενική εισαγωγή

Η απόθεση των φερτών υλικών σε υδάτινους αποδέκτες της ενδοχώρας (φυσικούς ή τεχνητούς) είναι απλά ένα 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 ταμιευτήρες 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 των ταμιευτήρων είναι σημαντικές και σχεδόν αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν πρακτικά. 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 ταμιευτήρων 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 τα 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 τα 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 πεντηκονταετία 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 km^3 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 δραματικά 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 μιας 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.

1.1. Ορισμοί και βασικές έννοιες

Η *στερεοαπορροή* (sediment yield), S_Y , είναι το φυσικό μέγεθος που μπορεί να συσχετίσει και τις τρεις αυτές 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].

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

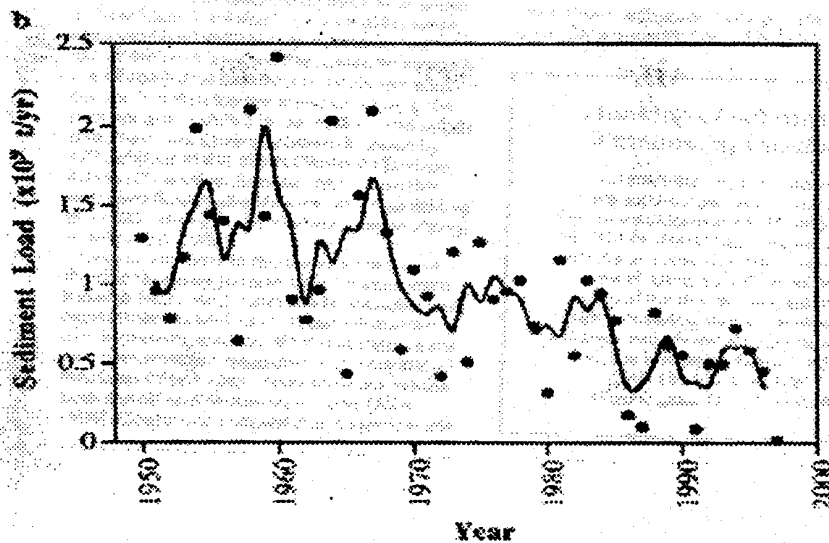
¹ Ωφέλιμη ζωή ενός ταμιευτήρα ορίζεται η περίοδος για την οποία η χωρητικότητά του επαρκεί για την κάλυψη των πρωτευουσών αναγκών.

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

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 και της συγκεντρωμένης απορροής μέχρι την υπόψη θέση του υδατορεύματος. Ο αριθμός αυτός δηλαδή εκφράζει 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. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής στερεοαπορροής είναι αδιάστατο μέγεθος και πάντα μικρότερος της μονάδας ενώ δεν μπορεί να είναι χρήσιμος για την εκτίμηση της στερεοαπορροής αφού ο υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης είναι το ίδιο αμφίβολος όσο και ο άμεσος υπολογισμός της στερεοαπορροής.

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 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/km^2), 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 στον υδρομετρικό σταθμό Lijin που βρίσκεται μόλις 10 km από τις εκβολές του. 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 κατάντη. 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.



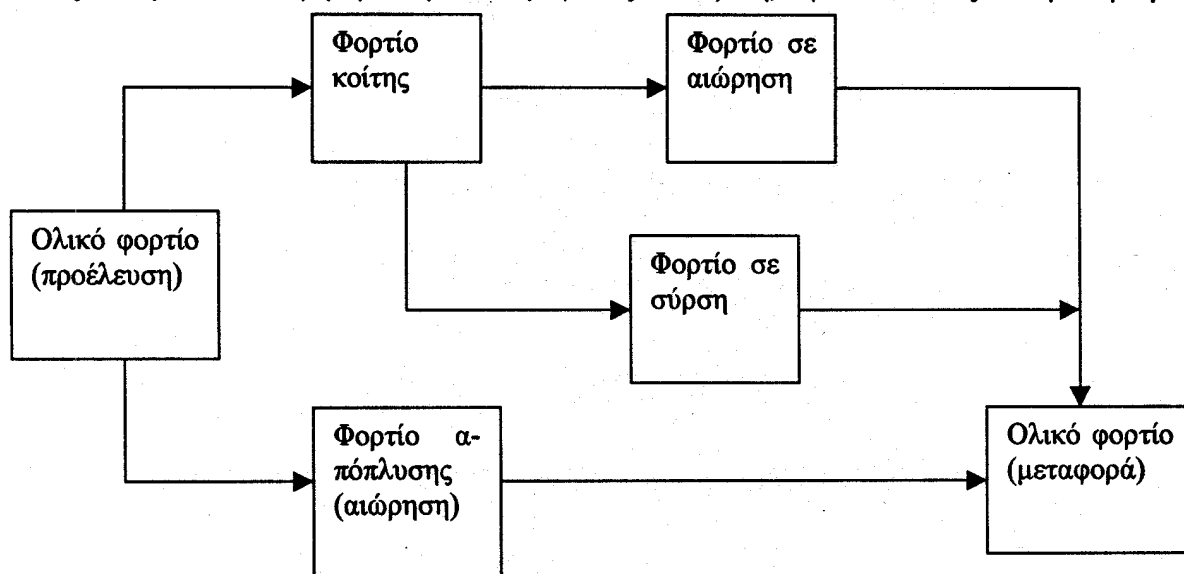
Σχήμα 1: Η ετήσια στερεοπαροχή του Κίτρινου ποταμού μετρημένη στο σταθμό Lijin [Qian and Dai, 1980]

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 συγκεκριμένη 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 αποτελεί 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 συ-

ντριπτικό 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 με-

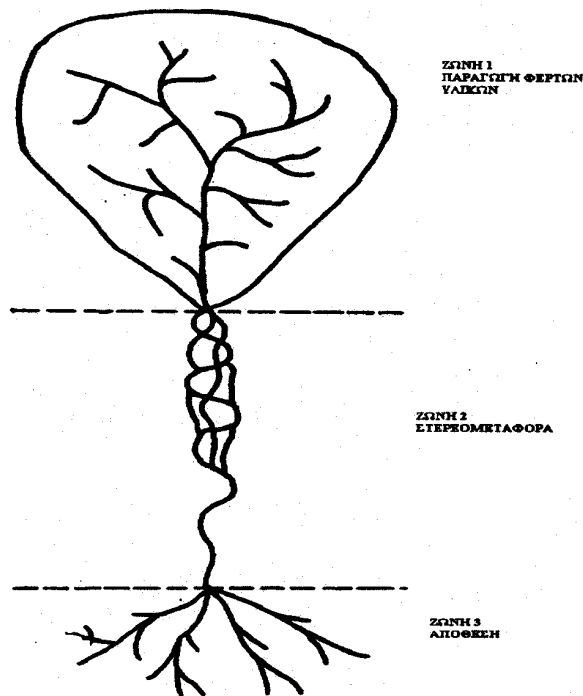


Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση των όρων στερεομεταφοράς.

γάλες κλίσεις υλικά με διάμετρο πολύ μεγαλύτερη των 63 μm μπορούν να συμπεριφερθούν ως «φορτίο απόπλυσης».

1.3. Γενικές έννοιες γεωμορφολογίας

Πριν από δύο δεκαετίες περίπου ο Schumm [1977] σχηματοποίησε το ιδεατό ποτάμιο σύστημα σε τρεις ζώνες: (α) της παραγωγής φερτών υλικών (sediment source), (β) της στερεομεταφοράς (sediment transport) και (γ) της απόθεσης (sediment sink), διακριτών σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους. Η Ζώνη 1 περιγράφει ουσιαστικά το ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής, εκεί που δημιουργούνται η επιφανειακή πλημμυρική απορροή και η διάβρωση των φερτών υλικών που ισοδυναμεί με το φορτίο απόπλυσης. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πολυσχιδές και δενδριτικού τύπου. Η Ζώνη 2 αποτελείται ουσιαστικά από το κύριο υδρογραφικό δίκτυο και περιγράφεται ως η ζώνη μεταφοράς των φερτών υλικών από τη λεκάνη απορροής. Η Ζώνη 3 περιγράφεται ως ζώνη απόθεσης των φερτών υλικών και αποτελείται από τις πλημμυρικές κοίτες των ποταμών και τους ταμιευτήρες. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σχηματική παράσταση ενός ποτάμιου συστήματος και ο διαχωρισμός στις τρεις ζώνες, η οποία, ως σημειωθεί, είναι απλουστευμένη και χονδροειδής.



Σχήμα 3: Ιδεατό ποτάμιο σύστημα κατά τον Schumm [1977].

Είναι προφανές ότι σε ένα κύριο υδατόρευμα μπορεί να παρατηρηθεί απόθεση και εκ νέου μεταφορά των φερτών υλικών ανάλογα με τις περιβάλλουσες υδραυλικές συνθήκες. Ο διαχωρισμός του ποτάμιου συστήματος σε ζώνες είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στη γενίκευση και απλοποίηση των διεργασιών για λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας (π.χ. της τάξης των 10^3 km^2 και μεγαλύτερες).

1.4. 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 σχέδια 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 ταμι-

ευτήρα (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, Άραχθος) 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 ενδεχόμενη διακοπή της κατασκευής νέων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων στην Ελλάδα έχει σταματήσει οποιαδήποτε μέτρηση στερεοπαροχής.

Πρόσφατα έχουν ξεκινήσει σποραδικά ερευνητικά προγράμματα χρηματοδοτούμενα από τη ΔΕΗ για τη μέτρηση των φερτών υλικών που έχουν αποτεθεί 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. Αώου¹ 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 αποτεθεί 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.

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.

¹ Το ερευνητικό έργο αφορούσε στη μέτρηση του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα και δεν έγινε άμεση μέτρηση του όγκου των φερτών υλικών.

2. Εκτιμήσεις στερεοαπορροής

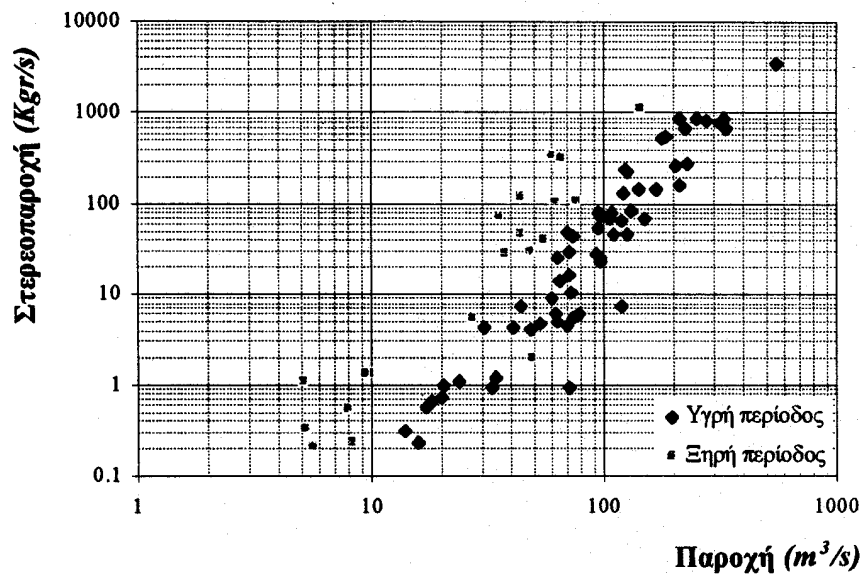
Το πρόβλημα της εκτίμησης της στερεοαπορροής σε μια θέση υδατορεύματος (sediment yield) είναι πολυσύνθετο, αφού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους με στοχαστικό χαρακτήρα αφενός και αφετέρου δεν υπάρχει κάποια αξιόπιστη διαδικασία μέτρησης των συγκεντρώσεων των φερτών υλικών είτε πρόκειται για φερτά σε 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.

2.1. Μέθοδοι εκτίμησης της στερεοαπορροής

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 4 παρουσιάζονται οι στερεοϋδρομετρήσεις του ποταμού Αλιάκμονα στη θέση Μ. Ιλαρίονα για χρονικό διάστημα 15 ετών (από 1965 έως 1980) (στοιχεία 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.



Σχήμα 4: 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 [L³/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 ανήκει στη λογαριθμοκανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3

$$E(\eta_i) = \exp \{ \sigma^2 (\ln e)^2 / 2 \} = \exp \{ 0.5 \sigma^2 \} \quad (3)$$

όπου η αναμενόμενη τιμή 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 1 ισοδυναμεί με το συνολικό φορτίο φερτών υλικών (L) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (T), όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 4.

$$L = \int_0^T Q_s dt \quad (4)$$

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες στο παρελθόν ώστε να συσχετισθούν οι συντελεστές της Εξίσωσης 1 με διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ανάντη απορροής. Αυτή η μεθοδολογία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη εντοπικών 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 πτώση¹ της [H km]. Με εφαρμογή πολλαπλής συσχέτισης βρέθηκαν εντοπικές 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 παροχής – στερεοπαροχής. Οι *Wolman and*

¹ Ως υψομετρική πτώση θεωρείται η διαφορά του υψομέτρου των πηγών του κυρίως κλάδου του ποταμού από τον υδροκρίτη έως τη διατομή μέτρησης των στερεοπαροχών.

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 της στερεοπαροχής, αφού οι στερεοϋδρομετρήσεις γίνονται συνήθως σε μη πλημμυρικές παροχές. 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.

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 μια 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 2 είναι απαγορευτική [Κουτσογιάννης, 1997]. Πάντως η χρήση του λογαριθμικού μετασχηματισμού των μεταβλητών (Εξίσωση 1) 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.

Εμπειρικά μοντέλα

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 $7.1 \cdot 10^4 \text{ km}^2$, η μέση ετήσια απορροή κυμαίνεται από 2.1 έως 33 cm και η μέση ετήσια στερεοαπορροή από 56 έως 695 t/km^2 . Σε λεκάνες απορροής που η μέση ετήσια απορροή είναι μικρότερη από 5 cm η εξίσωση συσχέτισης (Εξίσωση 5) είναι:

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

ενώ για περιοχές με μέση ετήσια απορροή πλέον των 5 cm η εξίσωση συσχέτισης (Εξίσωση 6) είναι:

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

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

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 στρώματος¹. Η ΠΕΕΑ καθώς οι διαφοροποιήσεις της (Revised USLE και USLE-M) για μεμονωμένες καταιγίδες [*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. 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 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.

Άλλα 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

¹ Οι παράμετροι της εξίσωσης είναι ευρέως γνωστές και μπορούν να αναζητηθούν σε πολλά και γνωστά εγχειρίδια και δεν εξετάζονται στην παρούσα τεχνική έκθεση.

[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.

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; Hrisanthou, 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 βαθμονόμηση 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 (μερικά μάλιστα) δωρεάν 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 ρυακιών μέσα στην επιφάνεια προσομοίωσης.

Το Water Erosion Prediction Project (WEPP) υπολογίζει την εδαφική διάβρωση στις κλιτύς και τη στερεοαπορροή 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 κλιτύς (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 κατανεμημένο μοντέλο σε βάση πλημμυρικού γεγονότος. Το μοντέλο αυτό βασίζεται πάνω στην υδρολογική πλατφόρμα του μοντέλου KINEROS. 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 κατανεμημένο μοντέλο, το EUROSEM χωρίζει μια λεκάνη απορροής σε μικρότερα ομοιογενή τμήματα ως προς την τοπογραφία, την εδαφική σύσταση ή τη φυτοκάλυψη. Το μοντέλο επομένως υπολο-

γίζει την απορροή και το φορτίο των φερτών υλικών που παράγονται σε ένα τμήμα και μετά γίνεται η υδρολογική διόδευση τους κατάντη.

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; Woolhizer 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 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 δυνατή λύση. 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 n 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 στερεοαπορροών. 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 βοηθητικών μεταβλητών 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.

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 λειτουργείται από το 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 km^2 έως 95.1 km^2 . Η μέση ετήσια απορροή της συνολικής λεκάνης απορροής είναι 4.7 mm , η μέση ετήσια στερεοαπορροή είναι 162 t/km^2 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.

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 επακριβώς η χρονική εξέλιξη της στερεοαπορροής σε πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα. Ακόμα και όσο ο χρόνος περνάει και 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; ΕΚΘΕ, 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 αυτόν) 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 και 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 αυτόχthonων αποθέσεων του ταμιευτήρα, δηλαδή των αποθέσεων που προέρχονται από τη διάβρωση των οχθών ή της βιολογικής παραγωγής για παράδειγμα, και των αλλόχthonων 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]. 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 Ι) παρατηρήθηκαν αποθέσεις με όγκο που κυμαίνεται από 4 έως 6 hm³ και πάχη μεταξύ 2 και 4 m. Στην περιοχή του ταμιευτήρα μεταξύ της Περιοχής Ι και του φράγματος (περιοχή ΙΙ) παρατηρήθηκαν αποθέσεις με όγκο που κυμαίνεται από 5 έως 6 hm³ 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.

2.2 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.

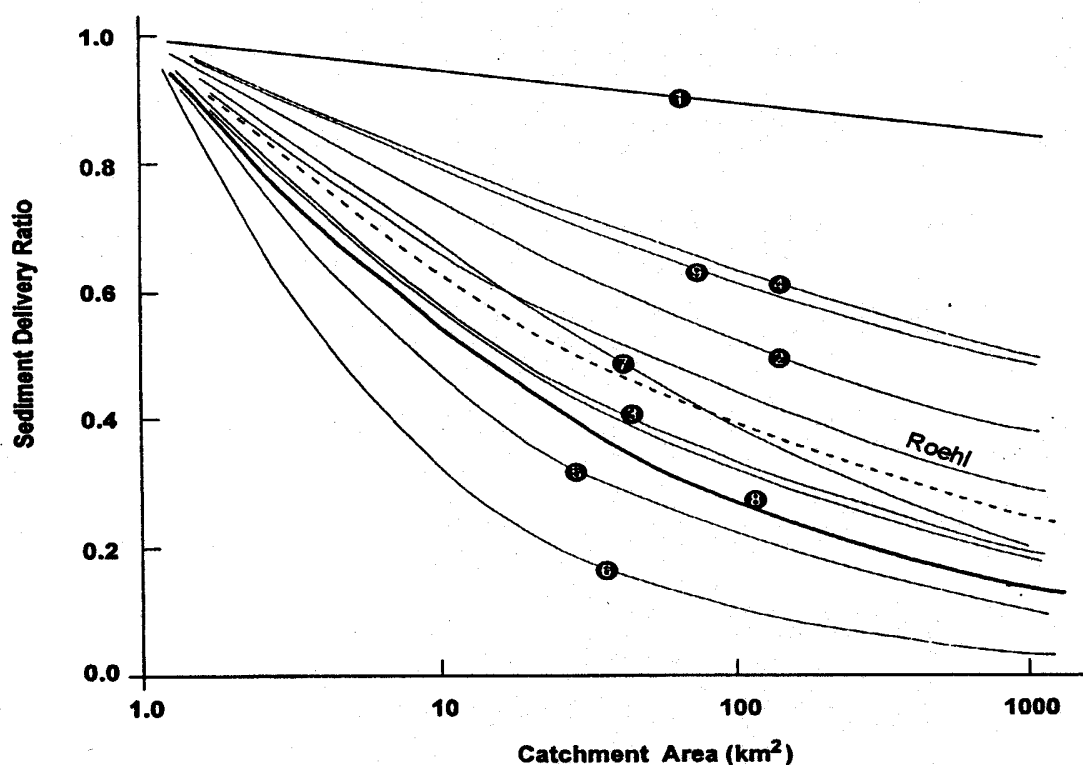
Οι Parker and Osterkamp [1995] συνέθεσαν πρόσφατα τις μέσες ετήσιες στερεοαπορροές φερτών υλικών σε αιώρηση από 24 ποτάμια στις ΗΠΑ, των οποίων οι λεκάνες απορροής κυμαίνονται από $1.6 \cdot 10^3$ έως $1.8 \cdot 10^6$ km². Οι μέσες ετήσιες στερεοαπορροές αιωρούμενων φερτών υλικών κυμαίνονται από 5 έως 1480 t/km². 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 κατανεμημένων σε όλη την επιφάνεια των ΗΠΑ. Οι λεκάνες απορροής κυμαίνονται από 2.9 έως $7.1 \cdot 10^4$ km², η μέση ετήσια απορροή κυμαίνεται από 21 έως 330 mm και η μέση ετήσια στερεοαπορροή από 56 έως 695 t/km². Από την ανάλυση αυτή προέκυψε μια σχετική σημαντική σχέση μεταξύ της μέσης ετήσιας απορροής (S_y σε t/km²/yr) και της έκτασης της λεκάνης απορροής (A σε km²), όπως φαίνεται στην Εξίσωση 7

$$S_T = 674 A^{-0.16}$$

(7)

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. 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 απορροής 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 απορροής 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]. Στο Σχήμα 5 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.



Σχήμα 5: Μεταβολή του συντελεστή στερεοαπορροής σε σχέση με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής για διάφορες λεκάνες παγκοσμίως.

2.3. 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 ρυακίων ενώ σε μεγαλύτερες λεκάνες απορροής υπεισέρχονται επιπλέον φυσικές διεργασίες, όπως κατολισθήσεις, απόθεση φερτών υλικών στις πλημμυρικές κοίτες ποταμών (floodplains), διάβρωση οχθών 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 ένα χωρικά κατανεμημένο με υδρολογική διόδευση με την κινηματική μέθοδο (KINEROS), μια απλή, χωρικά κατανεμημένη έκδοση της μεθόδου SCS και το απλό μοντέλο SCS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δύο πρώτα μοντέλα είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους (παρόλο που το KINEROS είναι ένα πολύ 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_T (t/km^2) για κάθε ταυτόχρονη μέτρηση της απορροής Q (mm) δίνεται από την Εξίσωση 8 [*Lane et al.*, 1997]

$$S_T = 22.11 Q^{1.07} \quad (8)$$

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.

3. 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 παραγωγής, αν πρόκειται για έργο παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.

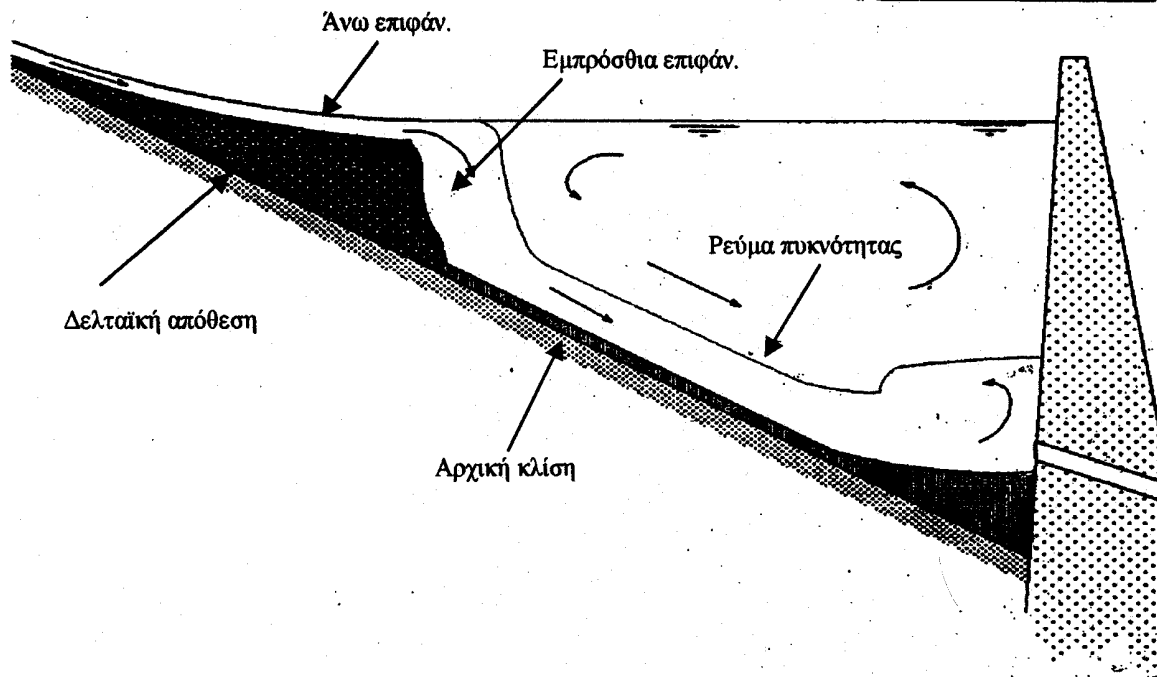
3.1. Περιγραφή των μορφών απόθεσης

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 συνέ-

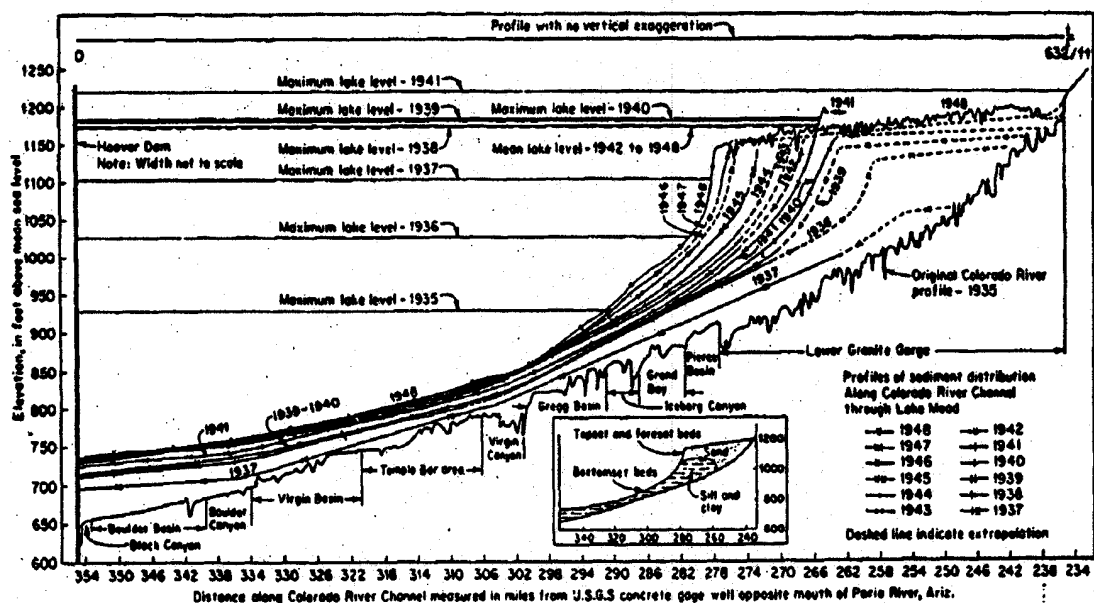
πεια τη μείωση της διαθέσιμης διακύμανσης του ύψους πτώσης σε περίπτωση υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα. Αντίθετα η ύπαρξη εκτεταμένων αποθέσεων στις εκβολές των ποταμών στους ταμιευτήρες δημιουργεί ανύψωση της κοίτης και ενδεχομένως αυξάνει την πιθανότητα πλημμυρών στις ανάντη περιοχές σε περιπτώσεις έντονων πλημμυρικών επεισοδίων.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η σχηματική παράσταση των αποθέσεων των φερτών υλικών σε ταμιευτήρες.



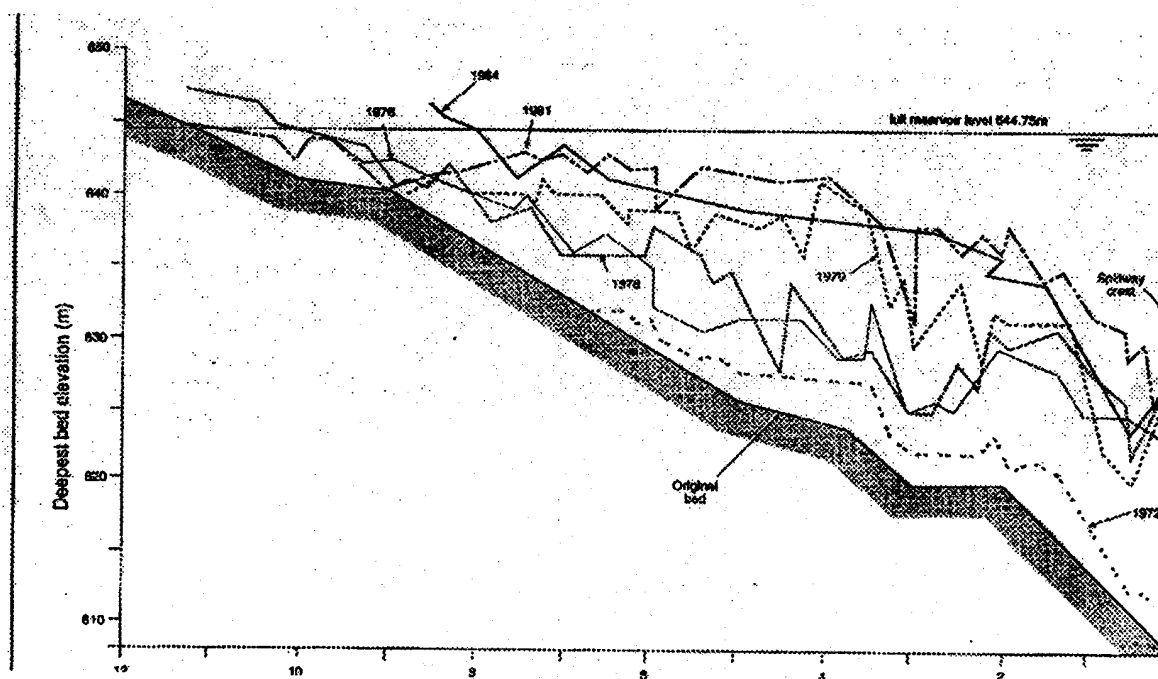
Σχήμα 6: Σχηματική παράσταση των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες

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 7 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της δελταϊκής απόθεσης στο ταμιευτήρα Mead του Hoover Dam των ΗΠΑ [Graf, 1971].



Σχήμα 7: Εξέλιξη της δελταϊκής απόθεσης των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Mead του Hoover Dam στις ΗΠΑ.

Στο Σχήμα 8 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 8: 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 ταμιευτήρες (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 ταμιευτήρα. Σε ταμιευτήρες όπου το πλάτος τους είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διατομή του ποταμού, το μίγμα φερτών υλικών και ροής εισρέει στον ταμιευτήρα με τη μορφή φλέβας. Η ροή συνεχίζεται για σημαντική απόσταση κατά μήκος της φλέβας δημιουργώντας αποθέσεις, που συνήθως συγκεντρώνονται σε ένα τμήμα του ταμιευτήρα όχι πολύ μεγαλύτερο από τη διατομή του ποταμού στην εκβολή του στον ταμιευτήρα.

Τα λεπτόκοκκα υλικά (και κυρίως το φορτίο απόπλυσης) μεταφέρονται στα πιο κατάντη τμήματα του ταμιευτήρα 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 ταμιευτήρα, τα φυσικά χαρακτηριστικά των φερτών υλών και τη διαφορά πυκνότητας του νερού του ταμιευτήρα 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 ταμιευτήρα (π.χ. στον ταμιευτήρα Mead παρατηρήθηκε ρεύμα πυκνότητας που μετέφερε φερτά υλικά σε απόσταση έως 150 km.).

Όπως φαίνεται, η στάθμη του ταμιευτήρα κατά την είσοδο των φερτών υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή των αποθέσεων στον ταμιευτήρα. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η στάθμη του ταμιευτήρα 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 ταμιευτήρα είναι σε χαμηλά επίπεδα, σημαντικό τμήμα των στερεοπαροχών θα μεταφέρεται στο εσωτερικό του ταμιευτήρα μέχρι το πόδι του φράγματος. Με άλλα λόγια, η πολιτική διαχείρισης του ταμιευτήρα (π.χ. η στάθμη ψηλά ή χαμηλά ανά περίοδο) παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της κατανομής των αποθέσεων στον ταμιευτήρα. Συνήθως, οι μελέτες υδρολογικού σχεδιασμού του ταμιευτήρα δεν περιλαμβάνουν καθόλου αυτήν την οπτική. Για παράδειγμα, σε έναν υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα με την υδροληψία του σταθμού παραγωγής κοντά στο φράγμα, θα ανέμενε κανείς ότι θα έπρεπε η στάθμη του ταμιευτήρα 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 ταμιευτήρες, 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 ταμιευτήρα στις αρχές του φθινοπώρου. Είναι φανερό επομένως ότι τίθεται ένα ζήτημα βελτιστοποίησης, ώστε ο ταμιευτήρας 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 ταμιευτήρα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν και αυτήν την παράμετρο, ιδιαίτερα σε ταμιευτήρες εξαιρετικά

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

3.2. 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 1D, 2D και 3D (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 βαθμονόμηση 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), 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 συγκεκριντρώσεις 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 δια-

φορά 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.

III. Επιλογή του ταμιευτήρα των Κρεμαστών

1. Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών

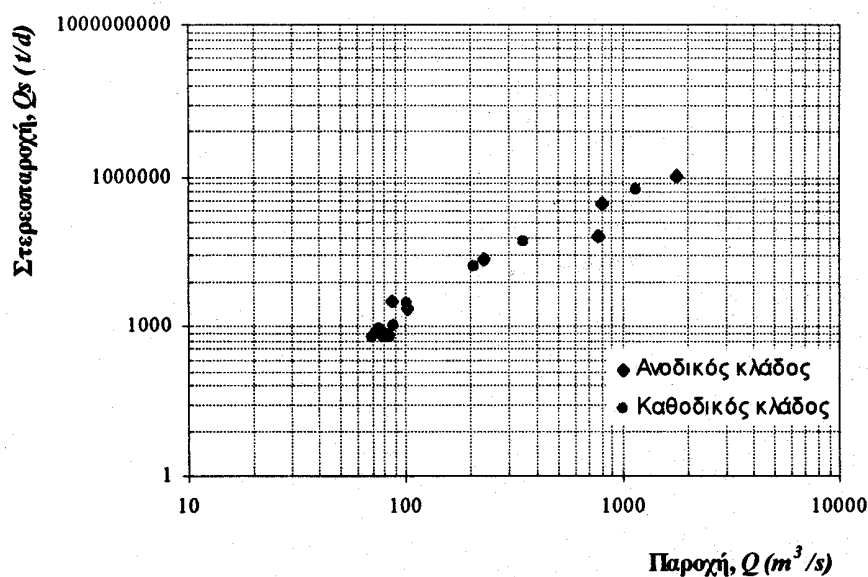
Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών είναι ο πιο ανάντη ταμιευτήρας της λεκάνης απορροής του Αχελώου πριν από την κατασκευή των ταμιευτήρων Μεσοχώρας και Συκιάς στον άνω ρου του. Στον ταμιευτήρα εκβάλλουν εκτός από τον κύριο κλάδο του Αχελώου (Ασπροπόταμος) και οι παραπόταμοι Αγραφιώτης, Μέγδοβας (Ταυρωπός) και Τρικεριώτης. Στο Χάρτη 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: Χάρτες) 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, χειμαρρώδη απορροή στη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, είτε διακοπτόμενη όπου παρατηρείται μηδενική απορροή κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Στη Φωτογραφία 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III: Φωτογραφίες) 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 III: Φωτογραφίες).

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 αξιολογών αποθέσεων που συνεπάγεται την υψηλότερη ακρίβεια και τη σαφήνεια των μετρήσεων. (β) Η επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι τόσο εκτεταμένη (80.6 km^2), 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 κάποιο 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 III: Φωτογραφίες). Η επιφάνεια του ταμιευτήρα στη στάθμη υπερχειλίσσης 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 $117.9 \text{ m}^3/\text{s}$ [Ζαργής, κ.ά., 1999].

Τα στοιχεία του υδρολογικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα είναι απαραίτητα για την ανάλυση της εισροής των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα, ανάλυση που προβλέπεται στη δεύτερη φάση του ερευνητικού προγράμματος. 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 υπερχειλίσσεις 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 9 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 9: 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. 1 παρουσιάζονται οι όγκοι φερτών υλικών που εκτιμήθηκε ότι θα έχουν αποτεθεί στον ταμιευτήρα μετά από το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Πίν. 1: Εκτιμώμενη χρονική εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών

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.

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. Αυτό σημαίνει ότι τα το φορτίο σε σύρση είναι γενικά μικρό καθώς οι συνήθεις βασικές απορροές πρακτικά αδυνατούν να μεταφέρουν το φορτίο αυτό. Στη Φωτογραφία 4 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Φωτογραφίες) 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 κατάντη σε περίπτωση έντονων πλημμυρικών επεισοδίων.

Στη Φωτογραφία 5 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Φωτογραφίες) 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, πρακτικά απεριόριστη.

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. 2 φαίνονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών και για τους οποίους έχουμε ένα αρκετά σημαντικό δείγμα ημερήσιων βροχοπτώσεων καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής Thiessen για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης. Η γεωγραφική θέση των βροχομετρικών σταθμών φαίνονται στο Χάρτη 2 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Χάρτες).

Πίν. 2: Βροχομετρικοί σταθμοί εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών

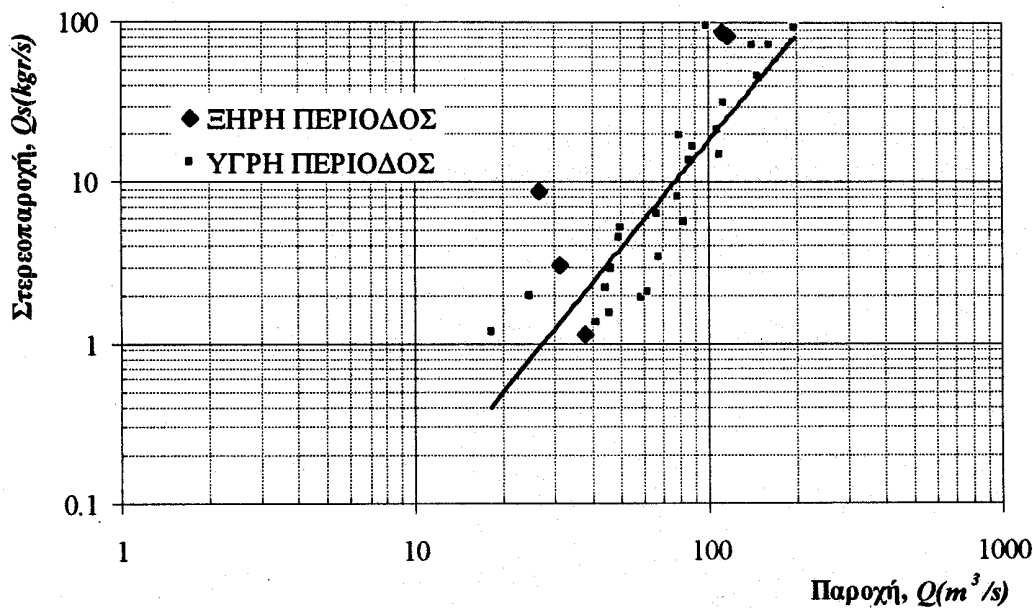
Βροχομετρικός σταθμός	Υπηρεσία	Δεδομένα	Υψόμετρο (m)	Συντελεστής Thiessen
Αγ. Βλάσιος	ΥΠΕΧΩΔΕ	1965-	140	0.016
Ανιάδα (*)	ΔΕΗ	1960-	1060	0.047
Αράχωβα	ΔΕΗ	1960-	960	0.001
Βακάριο (#)	ΔΕΗ	1959-	1150	0.251
Βραγκιανά Μικρά	ΔΕΗ	1960	580	0.116
Γέφυρα Επισκοπής	ΔΕΗ	1963-	277	0.048
Δρυμώνας (*)	ΔΕΗ	1971-	900	0.009
Επινιανά (#)	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 (Τυμφορηστού)	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 καταγίδων.

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

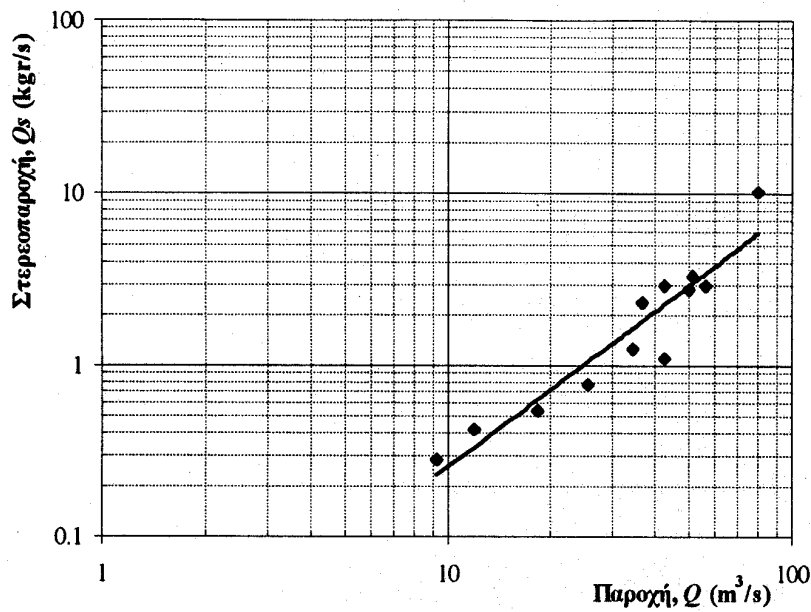
Μετρήσεις στάθμης και παροχής γίνονται σε μία θέση σε κάθε κύριο υδατόρευμα (Αχελώος στη θέση Αυλάκι, Αγραφιώτης στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας, Μέγδοβας στη θέση Γέφυρα Βίνιανης και Τρικεριώτης στη θέση Γέφυρα Γερομπόρου). Τα πιο αξιόπιστα και μακροχρόνια δείγματα υπάρχουν για τους ποταμούς Αχελώο και 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).

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 10 παρουσιάζονται οι υδρομετρήσεις 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. Η μέση τιμή των παροχών είναι ίση με $78.78 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ η μέγιστη τιμή είναι ίση με $196.24 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο συντελεστής μεταβλητότητας του δείγματος είναι ίσος με 0.563.



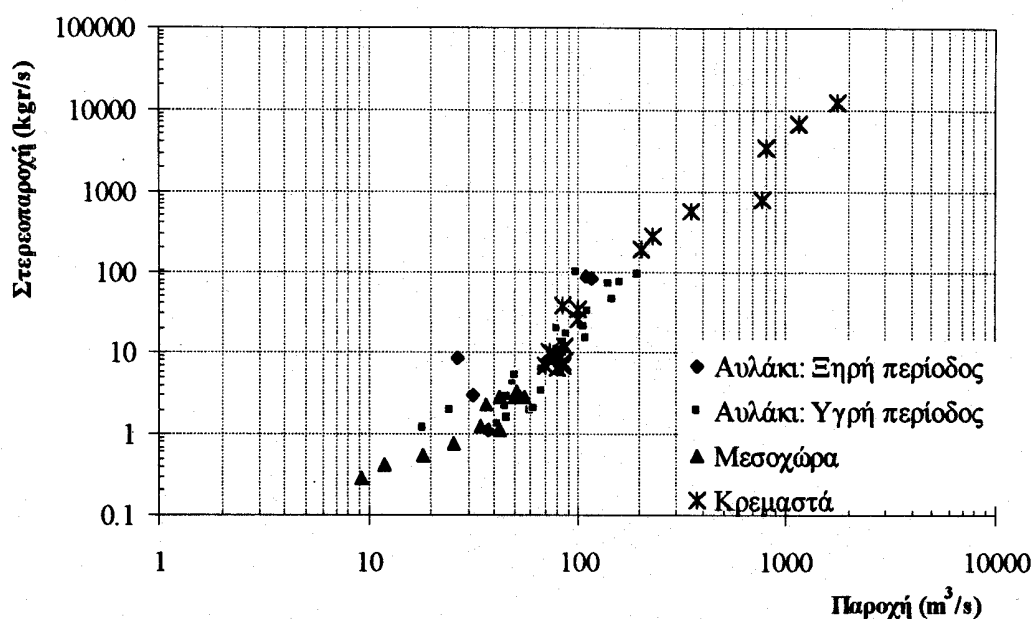
Σχήμα 10: Στερεοϋδρομετρήσεις και καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής στη θέση Αυλάκι του ποταμού Αχελώου.

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 11 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 καλύτερη ομοιομορφία. Επίσης 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 11: 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 12. 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 12: 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).

Οπως είναι φανερό οι μετρήσεις αυτές δεν αρκούν για τον υπολογισμό της στερεοαπορροής σε ετήσια βάση της λεκάνης απορροής των Κρεμαστών. Επομένως πρέπει να αναζητηθούν εναλλακτικές διατάξεις μέτρησης των στερεοπαροχών των φερτών υλικών. Οπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο II, Παράγραφος 2.1, 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 αγοράστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ένα θολόμετρο, το οποίο, με τη σύμφωνη γνώμη του φορέα – χρήστη, θα τοποθετηθεί στον υδρομετρικό σταθμό Αυλάκι του ποταμού Αχελώου.

Η χρήση της θολότητας (turbidity) ως βοηθητικού μεγέθους κερδίζει συνεχώς έδαφος στη διεθνή επιστημονική κοινότητα [Gippel, 1995; Lewis, 1996]. 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]. Η μέτρηση της θολότητας σχετίζεται πάντα με το πιο λεπτόκοκκο αιωρούμενο φορτίο.

Υπάρχουν βέβαια θεωρητικά προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή της θολότητας σε συνάρτηση του μεγέθους 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 (Μονάδες FTU) και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων φερτών ακόμα και κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων που πιθανό να υπάρχει μεταβολή στην ορυκτολογική σύσταση των φερτών υλικών.

Με βάση τα παραπάνω και κυρίως λόγω της απουσίας μετρήσεων των φερτών υλικών στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών, πιστεύουμε ότι η αγορά και η τοποθέτηση του θολόμετρου θα βοηθήσει στην αξιόπιστη εκτίμηση των στερεοπαροχών με τρόπο εύκολο, πρακτικό και το κυριότερο σε συνεχή χρόνο. Το θολόμετρο που αγοράστηκε (Global Water WQ700) κόστισε γύρω στις 700,000 δρχ. Ο φορέας – χρήστης ανέλαβε την εκτέλεση των στερεοϋδρομετρήσεων στη θέση Αυλάκι του ποταμού Αχελώου. Η εγκατάσταση του θολόμετρου και η έναρξη των μετρήσεων θολότητας και των αναγκαίων στερεοϋδρομετρήσεων για τη βαθμονόμηση του θα γίνει στη β' φάση του ερευνητικού έργου.

2.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Στη λεκάνη απορροής του ταμειυτήρα των Κρεμαστών απαντώνται δύο κύριες κατηγορίες πετρωμάτων, όπως προκύπτουν από τον Γεωτεχνικό Χάρτη της Ελλάδας [IGME, 1993] σε κλίμακα 1:500,000 αλλά και από τον Υδρολιθολογικό Χάρτη της Ελλάδας που συντάχθηκε από τους Χ. Σμυρνιώτη, Β. Περλέρο και Λ. Γεωργαλά, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας» [Υπουργείο Ανάπτυξης, 1996]. Αυτά τα πετρώματα είναι ο φλύσχης και ο ασβεστόλιθος με τις παραλλαγές τους. Η διαβρωσιμότητα των δύο αυτών σχηματισμών είναι διαμετρικά αντίθετη. Ο φλύσχης είναι γεωλογικός σχηματισμός με σημαντική διαβρωσιμότητα ενώ αντίθετα μικρή διαβρωσιμότητα (σε σχέση πάντα με την παραγωγή φερτών υλικών) 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 k . Ο συντελεστής αυτός για φλύσχη ορίστηκε στην τιμή $k_1 = 1$ ενώ για τους ασβεστόλιθους ορίστηκε στο $k_3 = 0.1$.

Ο φλύσχος (τύπος A1) αποτελεί το συντριπτικά μεγαλύτερο κομμάτι στη λεκάνη απορροής του Αχελώου και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: (α) Αδιαίρετος φλύσχος με εναλλαγές ιλυόλιθων και ψαμμιτών. Η μορφή αυτή του φλύσχη είναι έντονα αποσαθρωμένη, έχει εξαιρετικά υψηλή διαβρωσιμότητα ενώ είναι γενικά αδιαπέρατη. Τα στρώματά του παρουσιάζουν 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. (β) Φλύσχος με εναλλαγές λεπτόκοκκων έως αδρόκοκκων ψηφιδωτών και κροκαλοπαγών που παρουσιάζουν όμως μικρή ανάπτυξη στη λεκάνης απορροής των Κρεμαστών. Σε αντίθεση με τον αδιαίρετο φλύσχη παρουσιάζει αυξημένη υδροπερατότητα αλλά και αυτή η μορφή φλύσχη παρουσιάζει υπό προϋποθέσεις σημαντική διαβρωσιμότητα.

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: (α) Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (τύπος C). Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν έντονη καρστικοποίηση, λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που ποικίλλει μεταξύ ασβεστόλιθων 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 παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές. (β) Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κυμαινόμενης υδροπερατότητας (τύπος C1). Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν μέτρια καρστικοποίηση, λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που περιορίζεται εξαιτίας των εναλλαγών με ημιπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή του υπόγειου νερού να ελέγχεται από τις παρεμβολές των αδιαπέρατων σχηματισμών (φλύσχος, σχιστόλιθοι, κερατόλιθοι) και από τις μεγάλες τεκτονικές γραμμές (επιπτεύσεις, λεπίσεις). 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.

2.3. 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 100m×100m και επαβεβαιώθηκαν με επιτόπιες παρατηρήσεις από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και

Χαρτογραφήσεων 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 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: Πίνακες) παρουσιάζονται οι επεξηγήσεις των κωδικών των χρήσεων γης, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας.

2.4. Τοπογραφία

Τα δεδομένα τοπογραφίας της λεκάνης απορροής έχουν 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 ισοϋψείς 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 2 km. 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 μισγάγκειας, καθώς και το μήκος και η πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου.

IV. Διαδικασία μετρήσεων του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών

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 μονίμως 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 διατομές» μέθοδο γίνεται καταγραφή του βάθους του ταμιευτήρα μόνο σε γραμμές πλεύσης (ή βολιστικές γραμμές) κάθετες στην αρχική κοίτη του ποταμού. Οι τοπογραφικές εργασίες αποσκοπούν στον προσδιορισμό των διατομών αυτών, της μεταξύ τους απόστασης και του

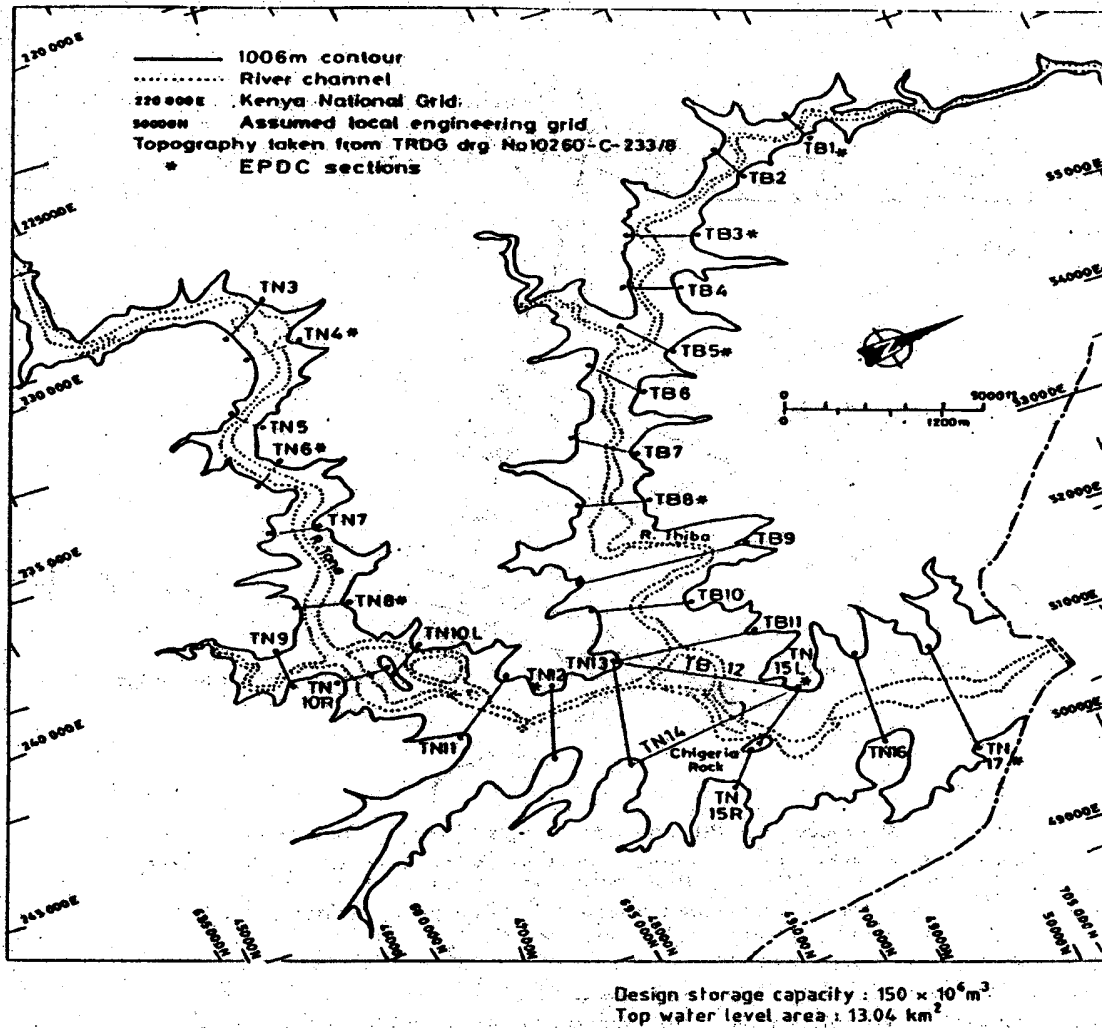
συνολικού τους αριθμού. Η μέθοδος αυτή επιλέγεται όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες σύγχρονες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της θέσης στον ταμιευτήρα (π.χ. Δορυφορικό Σύστημα Εντοπισμού), όταν το σχήμα του ταμιευτήρα είναι τέτοιο που να επιτρέπει τον προσδιορισμό τέτοιων διατομών και τέλος όταν ο υπολογισμός 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 διατομές 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 9 ως συνάρτηση της επιφάνειας του ταμιευτήρα ($A \text{ km}^2$)

$$N = 14.3 A^{0.29} \quad (9)$$

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 διατομών 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 διατομές» 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 διατομές» υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα Kamburu, Κένυα.

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 ισαπόσταση 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 ισαπόσταση μπορεί να είναι έως 50 m ενώ στο εσωτερικό τμήμα του ταμιευτήρα η απόσταση αυτή μεγαλώνει 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.

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 στο Κεφάλαιο II, Παράγραφος 3. 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.

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.

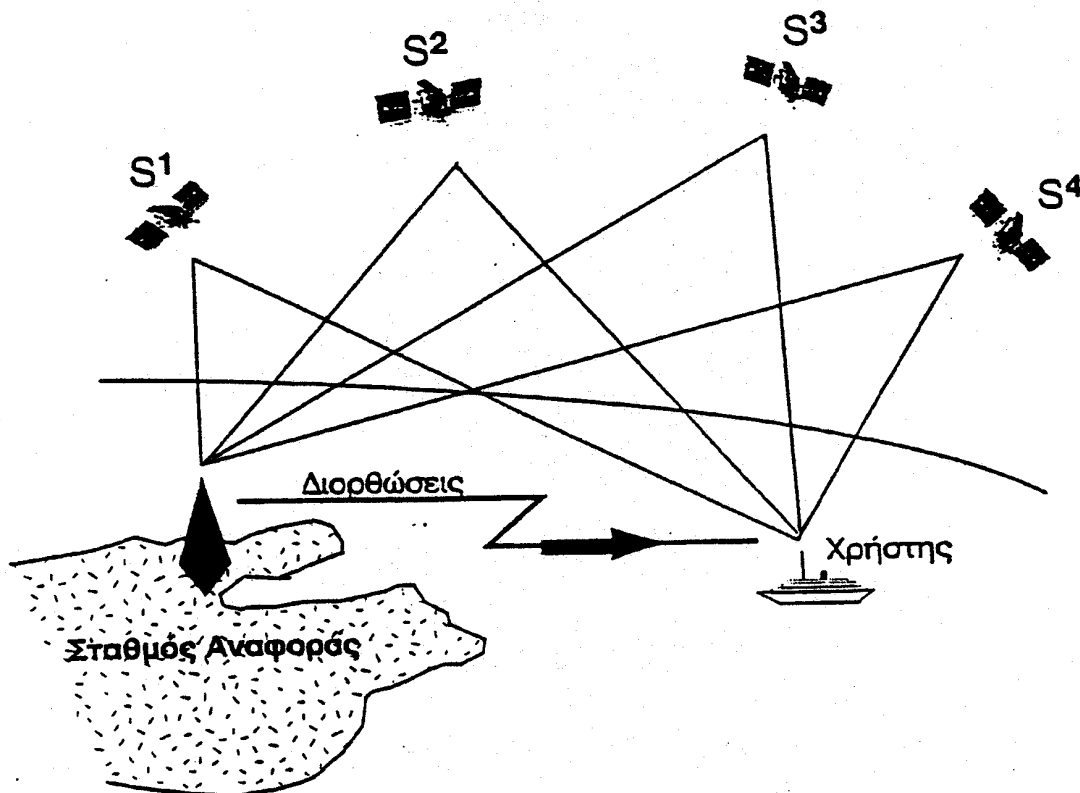
Ο κινούμενος δέκτης είναι ο Trimble SVeeSix XT Plus με έξι κανάλια επικοινωνίας, ο οποίος μετρά ψευδοαποστάσεις κώδικα C/A¹ και απόκλιση συχνότητας Doppler στη φέρουσα συχνότητα L1². Η ακρίβεια του δέκτη σε απόλυτο εντοπισμό θέσης με επιλεκτική διαθεσιμότητα είναι 100 m σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Ο δέκτης αυτός κάνει μετρήσεις ανά ένα δευτερόλεπτο, οι οποίες αυτόματα καταγράφονται στο φορητό υπολογιστή (Φωτογραφία 6, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III: Φωτογραφίες).

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 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.

¹ C/A (Coarse/Acquisition)

² 1575.42 MHz

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 ΙΙΙ: Φωτογραφίες) 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 ταμειευτήρα, 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 πρό-

γραμμα 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). Στο Χάρτη 5 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Χάρτες) φαίνεται η πυκνότητα της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα όπως προήλθε από τη ψηφιοποίηση των χαρτοταινιών του βυθόμετρου καθώς και τα τοπογραφικά διαγράμματα τα οποία έχουν ψηφιοποιηθεί έως τώρα. 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.

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.

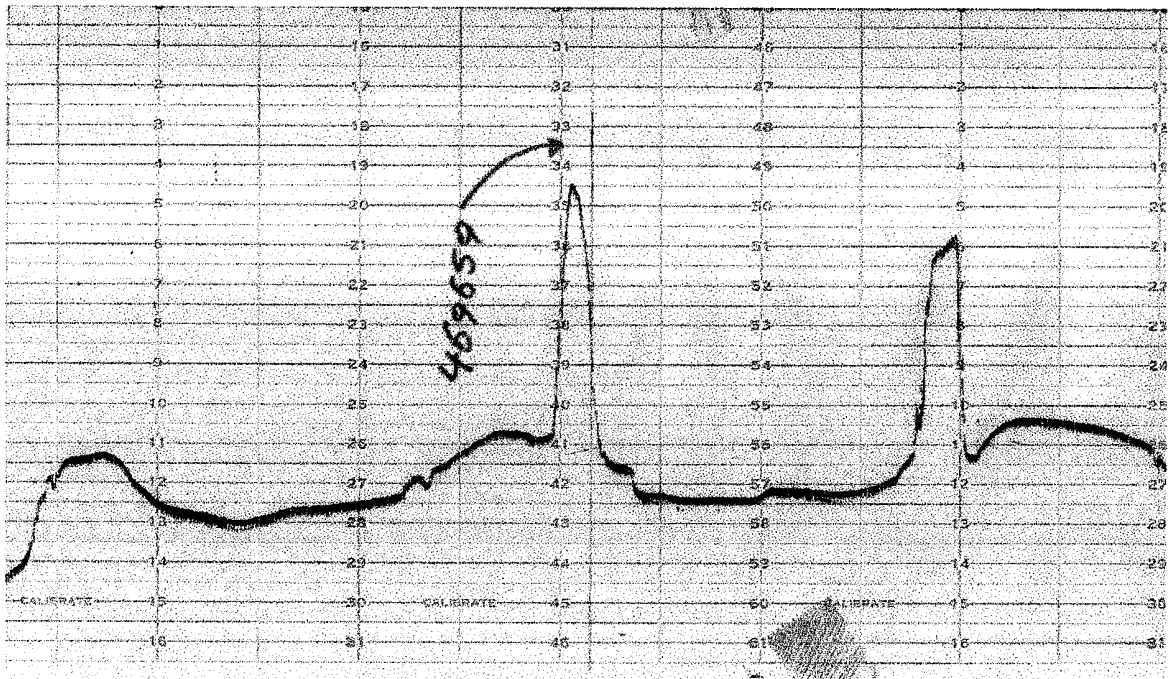
2.2. Καταγραφή του βάθους

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 Sparkers, 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 III: Φωτογραφίες), το σφάλμα μέτρησης του οποίου δίνεται από τον κατασκευαστή ίσο με $0.5\% \pm 1$ 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 ήχητικού 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 μετρίεται 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 δυνατόν 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 που περιέχουν 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 τους μορφή. Η ψηφιοποίηση των ταινιών έγινε με χρήση του προγράμματος ARC-INFO [ESRI, 1991b].

3. Υπολογισμός όγκου αποθέσεων

Ο όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών για όλο το διάστημα λειτουργίας του ταμιευτήρα των Κρεμαστών (πλέον των 30 ετών) υπολογίζεται 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. 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 Αναγλύφου του αρχικού πυθμένα απαιτήσε την ψηφιοποίηση των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων, διαδικασία που είναι εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα. Η ψηφιοποίηση των τοπογραφικών διαγραμμάτων (συνολικά 38 διαγράμματα σε κλίμακα 1:5000) έγινε στον Τομέα Τοπογραφίας και Μελετών Οδοποιίας της ΔΕΗ. Η ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων αυτών έγινε με χρήση αντιστοιχού φωτογραμμετρικού πακέτου της VTA με ψηφιοποιητή Calcomb 9100 με την λήψη ενός σημείου κάθε δέκα μέτρα περίπου. Σε περιοχές με απότομες κλίσεις έγινε η ψηφιοποίηση

μόνο των κύριων ισοϋψών αφού εκεί καλύπτεται η απαιτούμενη ακρίβεια. Η δημιουργία των μοντέλων έγινε σε κάναβο των 20 m με τη μέθοδο παρεμβολής του Ακανόνιστου Τριγωνικού Δικτύου (Triangulated Irregular Network (TIN)) [π.χ., *ESRI*, 1991a; *Meijerink et al.*, 1994].

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 προ της κατασκευής του φράγματος, 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 αξιολογή 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 αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μετρηθούν δύο τέτοια σημεία. Αυτά επιλέχθηκαν με κριτήριο τη σχετική γεωγραφική θέση τους (να μην είναι στο ίδιο μέρος του ταμιευτήρα), την προσπελασιμότητά τους, και την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων να έχει υποστεί κάποια φυσική ή ανθρωπογενή αλλοίωση η υλοποίησή τους. 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. 3. Επισημαίνεται ότι δεν μπορεί να γίνει έλεγχος όσον αφορά στα υψόμετρα των σημείων αυτών

Πίν. 3: Αποκλίσεις συντεταγμένων των δύο τριγωνομετρικών σημείων αναφοράς.

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
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. Στη Φωτογραφία 9 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Φωτογραφίες) φαίνεται η διάταξη για τη εκ νέου μέτρηση των σημείων. Η εκ των υστέρων σύγκριση των αποκλίσεων έδειξε ότι οι διαφορές είναι αμελητέες για την ακρίβεια της συγκεκριμένης εφαρμογής, αφού αυτές σε μέγεθος δεν ξεπερνούν την αναμενόμενη απόκλιση της μεθόδου υδρογραφικής αποτύπωσης. Έτσι δεν κρίθηκε αρχικά αναγκαία η επιβολή οριζοντιογραφικά γεωμετρικών διορθώσεων προκειμένου η γεωμετρική υπέρθεση των δύο ΨΜΑ να είναι όσο το δυνατό ακριβής.

Η διαδικασία παραγωγής των ψηφιακών μοντέλων συνίσταται στη δημιουργία του ακανόνιστου τριγωνικού δικτύου από τις ισοϋψείς των τοπογραφικών διαγραμμάτων και στη συνέχεια μέσω κατάλληλης μαθηματικής παρεμβολής το ψηφιακό μοντέλο. Το τριγωνικό 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 γίνε-

ται 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, ο οποίος 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 το προσανατολισμό αλλά και την αναγνώριση βασικών μορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, όπως τις κοίτες των υδατορευμάτων, τις όχθες ταμιευτήρων κ.ά.

Η παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου γίνεται με την εφαρμογή της πολυωνυμικής παρεμβολής με δύο μεταβλητές χρησιμοποιώντας πέμπτης τάξης πολυώνυμα σε x και y . Η παρεμβολή αυτή φαίνεται στην Εξίσωση 10:

$$z(x, y) = \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^{5-j} q_{jk} x^j y^k \quad (10)$$

Η εφαρμογή της παρεμβολής αυτής με τη μέθοδο των TIN επιτρέπει τη διακοπή της παρεμβολής στις περιοχές εκείνες που ορίζονται ως ασυνέχειες (breaklines), όπως για παράδειγμα οι όχθες ενός ταμιευτήρα.

Το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται σε έναν κανάβο (ψηφιδωτή διαμέριση) με συγκεκριμένες συντεταγμένες x , y , z ώστε να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος των αποθέσεων. Η διάσταση του πλέγματος του κανάβου είναι 20 m×20 m, η οποία είναι μια ικανή και βέλτιστη κλίμακα για τη μείωση του αναμενόμενου σφάλματος κατά τον υπολογισμό του όγκου των αποθέσεων. Η τιμή αυτή της διάστασης του κανάβου προσδιορίζεται αν πολλαπλασιαστεί η διακριτική ικανότητα της ανθρώπινης όρασης (0.5 mm) με την κλίμακα με την οποία είχε ληφθεί η αεροφωτογραφία (π.χ. 1:45000). Το γινόμενο (22.5 m) αντιστοιχεί περίπου στη διάσταση του κανάβου.

Οι βολιστικές γραμμές της υδρογραφικής αποτύπωσης μετατρέπονται και αυτές σε ΨΜΑ, σε κανάβο επίσης των 20 m με την ίδια μέθοδο. Η υιοθέτηση της ίδιας διάστασης του κανάβου με το υπόβαθρο της λεκάνης κατάκλυσης διευκολύνει τη διαδικασία του υπολογισμού του όγκου των αποθέσεων με μια απλή «αφαίρεση» των δύο υποβάθρων. Η διάσταση αυτή του κανάβου δίνει ικανοποιητική ακρίβεια στο μοντέλο του ταμιευτήρα στη σημερινή του μορφή, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ισοαπόσταση των διαδοχικών βολιστικών γραμμών (π.χ. 100-150 m), γεγονός που δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στην πληροφορία του ψηφιακού μοντέλου.

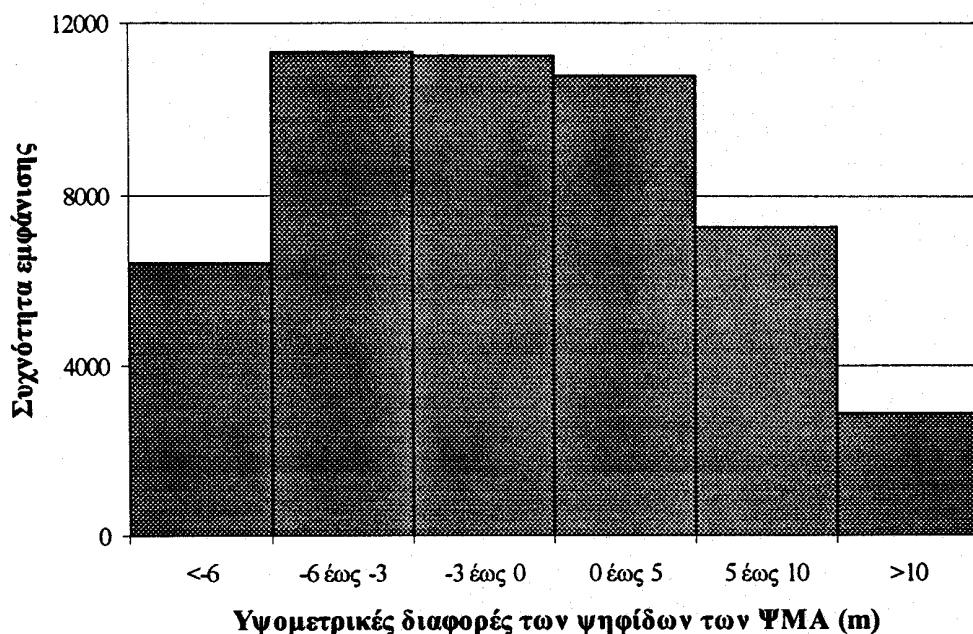
Το ψηφιακό μοντέλο της λεκάνης κατάκλυσης του ταμιευτήρα πριν την κατασκευή του είναι μεγαλύτερο σε έκταση από το ψηφιακό μοντέλο της υδρογραφικής αποτύπωσης του ταμιευτήρα. Αυτό γίνεται γιατί η μεγαλύτερη ισοϋψής στα τοπογραφικά διαγράμματα είναι των 300 m, ενώ η υδρογραφική αποτύπωση φτάνει έως την απόλυτη στάθμη του ταμιευτήρα που για τη διάρκεια της υδρογραφικής αποτύπωσης δεν ξεπερνούσε τα 274 m. Η αφαίρεση των δύο ΨΜΑ θα γίνει μόνο για τα κοινά τμήματα των ΨΜΑ καθώς για τα υπόλοιπα τμήματα που δεν έχουμε επικάλυψη θεωρείται ότι τα υπόβαθρα των ΨΜΑ των δύο αποτυπώσεων συμπίπτουν.

Στο Χάρτη 6 παρουσιάζεται η εικόνα των διαφορών των όγκων που προκύπτει από την αφαίρεση του ψηφιακού μοντέλου της λεκάνης κατάκλυσης πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα από το ψηφιακό μοντέλο του πυθμένα του ταμιευτήρα στη σημερινή του μορφή. Εύκολα επισημαίνεται ότι

σε εκτεταμένα τμήματα του ταμιευτήρα παρουσιάζονται αρνητικές τιμές των διαφορών (κυρίως στο κεντρικό τμήμα), δηλαδή ο αρχικός πυθμένας βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο. Με άλλα λόγια, εμφανίζεται μικρότερο υψόμετρο του πυθμένα στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα σε αντίθεση με τις εκβολές των ποταμών που παρατηρούνται θετικές τιμές των διαφορών, εκεί δηλαδή που παρατηρούνται αποθέσεις. Είναι προφανές ότι είναι αδύνατο να παρατηρείται διάβρωση του πυθμένα του ταμιευτήρα και μάλιστα σε τόσο εκτεταμένα τμήματά του και επομένως είναι βέβαιο ότι υπάρχουν σφάλματα (πιθανόν συστηματικά) στην υψομετρική υπέρθεση των δύο ΨΜΑ. Η εξ αρχής ύπαρξη αρκετών αρνητικών τιμών της διαφοράς των δύο ΨΜΑ ήταν αναμενόμενη κυρίως λόγω του αναγλύφου της λεκάνης κατάκλυσης και των σφαλμάτων του εντοπισμού θέσης του DGPS. Πιο συγκεκριμένα, όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει παρατηρώντας τα αρχικά τοπογραφικά διαγράμματα, η λεκάνη κατάκλυσης δεν παρουσιάζει μια ομαλή μορφή αλλά έχει έντονα χαρακτηριστικά ορεινής λεκάνης με εκτεταμένα τμήματα με πολύ μεγάλες κλίσεις επιφάνειας. Το τυπικό σφάλμα του εντοπισμού θέσης με DGPS είναι 2 m, το οποίο σφάλμα πιθανόν να σημαίνει υψομετρική διαφορά πολλών μέτρων σε περίπτωση που γίνεται η υδρογραφική αποτύπωση πυθμένα με έντονο ανάγλυφο. Σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη εκτεταμένων αρνητικών τιμών δείχνουν την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων. Τα σφάλματα αφορούν στα υψόμετρα των δύο ΨΜΑ καθώς όπως δείχτηκε προηγούμενα η οριζοντιογραφική υπέρθεση των δύο ΨΜΑ είναι ικανοποιητική.

Με δεδομένη την ακρίβεια της υδρογραφικής αποτύπωσης, οι πιθανές αιτίες που εισάγουν συστηματικά σφάλματα στα υψόμετρα των δύο ΨΜΑ είναι οι εξής: (α) Ενδεχόμενο σφάλμα στην παραγωγή των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης, λόγω της κλίμακας των αεροφωτογραφιών αλλά και της φωτογραμμετρίας και (β) ενδεχόμενο σφάλμα στη μέτρηση του απόλυτου υψομέτρου της στάθμης του ταμιευτήρα. Το πρώτο ενδεχόμενο δεν ήταν εφικτό να εξεταστεί κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης καθώς ο υψομετρικός προσδιορισμός με τη μέθοδο του DGPS δεν είναι ικανοποιητικός για τους στόχους του υπόψη προγράμματος. Επομένως δεν μετρήθηκαν εκ νέου τα υψόμετρα των στάσεων που φαίνονται στον Πίν. 3 και η μέτρησή τους αυτή θα γίνει στη δεύτερη φάση με κλασική χωροστάθμηση που δίνει καλύτερες ακρίβειες. Με την ίδια μέθοδο θα διερευνηθεί και πιθανό συστηματικό σφάλμα στο σταθμήμετρο του ταμιευτήρα.

Υπολογίστηκε κατόπιν ο αριθμός των ψηφίων του κανάβου των διαφορών των δύο ΨΜΑ που έχουν τιμές σε κάποια διαστήματα. Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των ψηφίων των δύο ΨΜΑ σε ορισμένα διαστήματα πάχους αποθέσεων. Διαπιστώνεται ότι η συντριπτική πλειονότητα των αρνητικών τιμών κυμαίνεται μεταξύ των 0 και 6 m, ενώ υπάρχουν και μεγαλύτερες αρνητικές διαφορές, οι οποίες όμως πιθανολογείται ότι οφείλονται σε οριζοντιογραφικά σχετικά σφάλματα των δύο αποτυπώσεων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επομένως με δεδομένο ότι δεν θα πρέπει εμφανίζονται αρνητικές τιμές των διαφορών, δηλαδή το ΨΜΑ της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης θα πρέπει να βρίσκεται συνέχεια χαμηλότερα σε σχέση με την υδρογραφική αποτύπωση, εξετάζεται εναλλακτικά η περίπτωση καταβιβασμού του ΨΜΑ της λεκάνης κατάκλυσης κατά 3 και 6 m, ώστε να μειωθούν δραστικά οι αρνητικές τιμές.



Σχήμα 16: Συχνότητα εμφάνισης ψηφίδων του κάναβου των διαφορών των δύο ΨΜΑ σε διάφορα διαστήματα.

Στους Χάρτες 6, 7 και 8 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: Χάρτες) εμφανίζονται οι διαφορές των δύο ΨΜΑ χωρίς υψομετρική διόρθωση, με καταβιβασμό του επιπέδου του αναγλύφου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 3 m και κατά 6 m αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι με τον καταβιβασμό του επιπέδου του αναγλύφου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης οι αρνητικές τιμές μειώνονται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε με μια σχετική ασφάλεια να υποθέσουμε ότι η παραγωγή των τοπογραφικών διαγραμμάτων της αρχικής λεκάνης απορροής εισήγαγε συστηματικό σφάλμα στην υψομετρία με τον αναβιβασμό του αρχικού αναγλύφου, ο οποίος κυμαίνεται από 3 έως 6 m. Η επαλήθευση της υπόθεσης αυτής προδιαγράφεται ως εργασία στην δεύτερη φάση.

Στο Χάρτη 9 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: Χάρτες) καθώς και στα διαγράμματα που το συνοδεύουν φαίνεται η θέση τεσσάρων εγκάρσιων τομών και τριών μηκοτομών που έχουν χαραχθεί στα τμήματα των εκβολών των αντίστοιχων ποταμών στον ταμιευτήρα. Οι τομές αυτές έχουν χαραχθεί στο ανάγλυφο των διαφορών χωρίς υψομετρική διόρθωση της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης και φυσικά στα τμήματα εκείνα που παρουσιάζονται θετικές διαφορές. Από την εξέταση των διαγραμμάτων αυτών, φαίνεται ότι η μορφή των αποθέσεων φερτών υλικών παρουσιάζει μια αναμενόμενη γενικά μορφή, όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Ειδικότερα όσον αφορά στη μηκοτομή 2 που φαίνεται στην είσοδο του ποταμού Αγραφιώτη στον ταμιευτήρα, η μορφή αυτή ανταποκρίνεται σχετικά ικανοποιητικά στην τυπική μορφή των δελταϊκών αποθέσεων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Το τμήμα εκείνο του ποταμού Αγραφιώτη (και γενικά ο ποταμός αυτός στο σύνολό του) παρουσιάζει ένα πολύ ομαλό ανάγλυφο σε αντίθεση με το πολυσχιδές ανάγλυφο των υπόλοιπων ποταμών που καταλήγουν στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Στον Πίν. 4 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των αποθέσεων φερτών υλικών και για τις τρεις εκδοχές λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους θετικούς όγκους και παραλείποντας τους αρνητικούς.

Πίν. 4: Συνολικοί όγκοι αποθέσεων φερτών υλικών με τρεις διαφορετικές εκδοχές.

Εκδοχή	Συνολικός όγκος αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών (hm^3)
Χωρίς υψομετρική αναγωγή του αναγλύφου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης.	51
Με καταβιβασμό του αναγλύφου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 3 m.	85
Με καταβιβασμό του αναγλύφου της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 6 m.	133

Σημειώνουμε ότι η εκτίμηση του υδρολογικού σχεδιασμού νεκρού όγκου του φράγματος (ECI, 1974), όπως φαίνεται στον Πίν. 1, έδινε συνολικό όγκο αποθέσεων ίσο με 394 hm^3 για διάρκεια λειτουργίας του έργου ίση με 50 έτη. Φαίνεται λοιπόν ότι η τρίτη εκδοχή, δηλαδή ο καταβιβασμός του αναγλύφου της λεκάνης κατάκλυσης κατά 6 m, προσεγγίζει περισσότερο την αρχική εκτίμηση αλλά παρόλαυτά φαίνεται πως η αρχική εκτίμηση είναι υπερεκτιμημένη. Ο όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών με βάση τις τρεις εκδοχές κυμαίνεται από 1.14% έως 2.96% του συνολικού όγκου του ταμιευτήρα στη στάθμη υδροληψίας (4495 hm^3).

Σημειώνεται επίσης ότι τα πάχη των αποθέσεων που παρουσιάζονται στις χαρακτηριστικές τομές που συνοδεύουν το Χάρτη 9 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Χάρτες) θα εμφανίζονται μεγαλύτερα κατά 3 και 6 m αντίστοιχα για τους αντίστοιχους υψομετρικούς καταβιβασμούς του αναγλύφου της λεκάνης κατάκλυσης.

Ο συνολικός όγκος αποθέσεων φερτών υλικών που υπολογίστηκε χωρίς υψομετρική διόρθωση επιμερίστηκε στα διαφορετικά τμήματα του ταμιευτήρα, δηλαδή στους κλάδους του Αχελώου, του Αγραφιώτη, του Μέγδοβα και Τρικεριώτη που εξετάζονται ενιαία και του κεντρικού τμήματος του ταμιευτήρα. Στον Πίν. 5 φαίνονται οι υπολογισμοί καθώς και οι μέγιστες τιμές και η μέση τιμή των παχών των αποθέσεων φερτών υλικών. Στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα δεν υπολογίζονται τα αντίστοιχα στοιχεία γιατί εκεί η συντριπτική πλειονότητα των διαφορών εμφανίζονται με αρνητικές τιμές. Σημαντικό ποσοστό των αποθέσεων εμφανίζεται στις εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα γεγονός που δείχνει ότι τα εισρέοντα φερτά υλικά είναι κυρίως ευμεγέθη και συμπεριφέρονται ως φορτίο κοίτης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί και από το γεγονός ότι η απόσταση από την αρχή του ταμιευτήρα έως το κύριο τμήμα του είναι σημαντική (κυρίως στο κλάδο του Αχελώου) και απαιτείται περισσότερος χρόνος για τη μεταφορά των υλικών από τα ανάντη τμήματα στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα.

Πίν. 5: Υπολογισμός διαφόρων μεγεθών των αποθέσεων φερτών υλικών σε διάφορα τμήμα του ταμιευτήρα χωρίς υψομετρική διόρθωση του αρχικού αναγλύφου.

Τμήμα ταμιευτήρα	Όγκος αποθέσεων (hm^3)	Έκταση αποθέσεων (km^2)	Μέγιστο πάχος (m)	Μέσο πάχος (m)
Κλάδος Αχελώου	12	1.47	24	13
Κλάδος Αγραφιώτη	7.8	1.4	15	8
Κλάδος Μέγδοβα & Τρικεριώτη	12.9	1.8	41	19
Κεντρικό τμήμα	18.5	-	-	-

Οι αρνητικοί όγκοι για τα τρία πρώτα τμήματα υπολογίστηκαν ίσοι με 0.5, 0.2 και 0.56 hm^3 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε σύγκριση με τις θετικές, γεγονός που αποτελεί θετική ένδειξη ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων στις συγκεκριμένες θέσεις.

Για την τελική εκτίμηση του όγκου των αποθέσεων πρέπει να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης της εκπόνησης του ερευνητικού έργου οι ακόλουθες εργασίες: α) Μέτρηση με κλασικές μεθόδους χωροστάθμησης του υψομέτρου συγκεκριμένων τοπογραφικών σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την τοπογραφική αποτύπωση της λεκάνης κατάκλυσης και σύγκριση με τα ήδη μετρημένα. Οι υψομετρικές αποκλίσεις που θα προκύψουν θα συνεκτιμηθούν στη διόρθωση των υψομέτρων των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων, και (β) διερεύνηση της πιθανότητας σφάλματος στην τοποθέτηση του σταθμημέτρου του ταμιευτήρα και κατά συνέπεια στη μέτρηση της στάθμης με εκ νέου μέτρηση του σταθμημέτρου με χωροστάθμηση. Οι εργασίες αυτές είναι εφικτές και αναγκαίες στα πλαίσια της δεύτερης φάσης ώστε να σχηματιστεί η βέλτιστη λύση του συνολικού όγκου των αποθέσεων.

Παράλληλα έχει προβλεφθεί η εκτέλεση γεωτρήσεων και η λήψη δειγμάτων (πυρηνοληψία) στη δεύτερη φάση του προγράμματος. Αναμένεται ότι η εργασία αυτή θα δώσει ενδείξεις για την ασφαλέστερη εκτίμηση του πάχους των αποθέσεων στις θέσεις μέτρησης, πράγμα που θα βοηθήσει στην ακριβέστερη σχετική τοποθέτηση των δύο ΨΜΑ.

V. Δημιουργία βάσης δεδομένων υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών

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 λεκά-νες 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).

1. Υδρολογικές παράμετροι

Από τις υδρολογικές παραμέτρους έχουν συγκεντρωθεί οι ημερήσιες βροχοπτώσεις στους 20 βροχομετρικούς σταθμούς που έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν στη λεκάνη απορροής καθώς και 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. Στερεοϋδρομετρήσεις 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. 2, σελ. 39.

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.

2. Φυσιογραφικές παράμετροι

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

2.1. 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 υπολεκάνων των ποταμών και των θέσεων μέτρησης των παροχών και στερεοπαροχών. Έχουν χαραχθεί οι αντίστοιχοι υδροκρίτες καθώς και τα πολύγωνα Thiessen για κάθε βροχομετρικό σταθμό.

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. Ισοϋψείς καμπύλες των λεκανών απορροής (ψηφιοποιήμενες από χάρτες κλίμακας 1:100000).
7. Ισοϋψείς 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. Ισοϋψείς καμπύλες του πυθμένα του ταμιευτήρα Κρεμαστών, όπως προέκυψαν από τις εργασίες βυθομέτρησης.

Παράγωγα επίπεδα πληροφορίας.

1. Μορφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής και συγκεκριμένα εμβαδόν, μέση κλίση, μέσο υψόμετρο, μήκος κύριας μισγάγκειας, μήκος και πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου.
2. Πολύγωνα και συντελεστές Thiessen των βροχομετρικών σταθμών για κάθε μια από τις λεκάνες απορροής που θα μελετηθούν.
3. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους των λεκανών απορροής (διάσταση κανάβου 2 km).
4. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του πυθμένα του ταμιευτήρα των Κρεμαστών, πριν την κατασκευή του ταμιευτήρα (διάσταση κανάβου 20 m).
5. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του πυθμένα του ταμιευτήρα Κρεμαστών στη σημερινή κατάσταση (διάσταση κανάβου 20 m).

Εφαρμογές

1. Υλοποίηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους.
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.

2.2. 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 συντάχθηκε από τους Χ. Σμυρνιώτη, Β. Πετλέρο και Α. Γεωργαλά, στα πλαίσια της

μελέτης «Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας» [Υπουργείο Ανάπτυξης, 1996].

2.3. 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 στο Κεφάλαιο III, Παράγραφος 2.4.

VI. Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

1. Σύνοψη των εργασιών της πρώτης φάσης

Η παρούσα πρώτη φάση του ερευνητικού έργου «*Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες*» αφιερώθηκε στη συλλογή και συστηματοποίηση της διαθέσιμης υδρολογικής και φυσιογραφικής πληροφορίας, την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και την εκτέλεση των μετρήσεων στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Αναλυτικότερα:

1. Έγινε συστηματική επισκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας τόσο σε θέματα στερεοαπορροής των λεκανών απορροής, όσο και της κατανομής των αποθέσεων των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα.
2. Έγινε συστηματική συλλογή, αξιολόγηση, αρχειοθέτηση και αξιολόγηση των σημαντικότερων πληροφοριών (υδρολογικών, τοπογραφικών, γεωλογικών, χρήσεων γης) της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών αλλά και κάθε διαθέσιμης πληροφορίας για τον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.
3. Αναπτύχθηκε σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για την απεικόνιση και χωρική επεξεργασία των σχετικών πληροφοριών.
4. Ολοκληρώθηκε η ψηφιοποίηση των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης του ταμιευτήρα πριν την κατασκευή του φράγματος και κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της σε κάναβο των 20 m.
5. Μετρήθηκαν εκ νέου με χρήση GPS οι συντεταγμένες δύο σημείων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τοπογραφικών διαγραμμάτων της λεκάνης κατάκλυσης. Η σύγκριση των συντεταγμένων σε προβολή HATT έδειξε ότι υπάρχουν ελαφρές οριζοντιογραφικές αποκλίσεις και σε κάθε περίπτωση είναι μέσα στην ακρίβεια της μεθόδου της υδρογραφικής αποτύπωσης που ακολουθήθηκε. Ο υψομετρικός έλεγχος των σημείων αυτών δεν έγινε γιατί η ακρίβεια του DGPS στη μέτρηση υψών δεν είναι ικανοποιητικός.
6. Ολοκληρώθηκε η υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα στη σημερινή του μορφή με τη χρήση εξελιγμένων μεθόδων προσδιορισμού θέσης και βάθους. Ο εντοπισμός θέσης έγινε με Διαφορικό Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού ενώ η βυθομετρία με χρήση ηχοβολιστικού. Επίσης κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου του υποβάθρου του πυθμένα του ταμιευτήρα σε κάναβο 20 m.
7. Υπολογίστηκαν οι όγκοι των αποθέσεων φερτών υλικών για όλον τον ταμιευτήρα αλλά και για τα επιμέρους τμήματά του. Επειδή όμως παρατηρήθηκαν ανεξήγητα σημαντικές και εκτεταμένες αρνητικές τιμές των αποθέσεων, θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα συστηματικό σφάλμα στα υψόμετρα είτε των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων είτε στο μηδέν του σταθμημέτρου του ταμιευτήρα.

8. Υπολογίστηκαν οι όγκοι των αποθέσεων φερτών υλικών του ταμιευτήρα με την υπόθεση ότι καταβιβάζεται το ανάγλυφο της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 3 και 6 m. Με τη δεύτερη εκδοχή, ο συνολικός όγκος των αποθέσεων προσεγγίζει σε κάποιο βαθμό την αρχική εκτίμηση του νεκρού όγκου του φράγματος.
9. Έγινε η περιγραφή των απαιτούμενων και αναγκαίων εργασιών για την επαλήθευση των εκδοχών που αναλύθηκαν προηγουμένως, μετρώντας εκ νέου τα υψόμετρα διαφόρων σημείων σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα και συγκρίνοντάς τα με τα αρχικά.
10. Αγοράστηκε στα πλαίσια της πρώτης φάσης ένα θολόμετρο, το οποίο θα τοποθετηθεί στη θέση μέτρησης παροχών και στερεοπαροχών στη θέση Αυλάκι του ποταμού Αχελώου. Η χρήση του θολόμετρου εκτιμάται ότι θα είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς η πιθανολογούμενη καλή συσχέτιση της θολότητας και της στερεοπαροχής θα αποφέρει τη συλλογή μιας αξιόπιστης και μικρού χρονικού βήματος χρονοσειράς στερεοπαροχών. Τα δεδομένα αυτά θα βοηθήσουν σημαντικά στον επιμερισμό της συνολικής στερεοπαροχής για τη διάρκεια λειτουργίας του έργου σε ετήσια βάση.

2. Γενικά συμπεράσματα του ερευνητικού έργου

Παρακάτω κωδικοποιούνται μερικά από τα πιο βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη πρώτη φάση του ερευνητικού έργου.

1. Η διακοπή των μετρήσεων στερεοπαροχής στα ελληνικά ποτάμια είναι επιζήμια γιατί παραμένουν άγνωστοι ο ρυθμός διάβρωσης και η στερεοαπορροή των ανάντη λεκανών απορροής. Σε ότι αφορά τους ταμιευτήρες, παραμένει άγνωστος ο ρυθμός πρόσχωσής των, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε και στη βιβλιογραφική επισκόπηση, πιθανόν να είναι πολύ διαφορετικός από εκείνον που εκτιμήθηκε κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου. Άμεση επίπτωση είναι η δραστική διαφοροποίηση της ωφέλιμης ζωής του σε περίπτωση σφαλμάτων εκτίμησης της στερεοαπορροής. Όπως προκύπτει και από την εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε, οι διεργασίες που σχετίζονται με τη στερεοαπορροή είναι τόσο πολύπλοκες, ώστε να καθίσταται πρακτικώς αδύνατη η εξαγωγή αξιόπιστων εκτιμήσεων χωρίς διαθεσιμότητα άμεσων μετρήσεων.
2. Σε λεκάνες απορροής μεγάλης κλίμακας (όπως η υπόψη λεκάνη των Κρεμαστών), η στερεοαπορροή εξαρτάται κυρίως από τη χωρική κατανομή των ισχυρών βροχοπτώσεων, την πλημμυρική απορροή και τη στερεομεταφορική ικανότητα των υδατορευμάτων αλλά και τα χαρακτηριστικά (γεωλογία, φυτοκάλυψη, κτλπ) της λεκάνης. Όπως διαπιστώθηκε από τη μελέτη όλων των στερεοϋδρομετρήσεων που έχουν γίνει στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών σε τρεις διαφορετικές θέσεις και σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους, η επιφάνεια της λεκάνης δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη σχέση παροχής - στερεοπαροχής και επίσης οι διαφοροποιήσεις στο χρόνο δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη σχετική ομογένεια φυσικών και κλιματικών χαρακτηριστικών στη λεκάνη απορροής.
3. Ο συνολικός όγκος των αποθέσεων αναμένεται να κυμαίνεται από 51 έως 133 hm³, και πάντως είναι γενικά μικρότερος από την πρόβλεψη του νεκρού όγκου κατά τον υδρολογικό σχεδιασμό του ταμιευτήρα. Ο όγκος αυτός κυμαίνεται από 1.14% έως 2.96% του συνολικού ό-

γκου του ταμιευτήρα στη στάθμη υδροληψίας. Σημαντικό ποσοστό των αποθέσεων εμφανίζεται στις εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα γεγονός που δείχνει ότι τα εισρέοντα φερτά υλικά είναι κυρίως ευμεγέθη και συμπεριφέρονται ως φορτίο κοίτης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί και από το γεγονός ότι η απόσταση από την αρχή του ταμιευτήρα έως το κύριο τμήμα του είναι σημαντική (κυρίως στο κλάδο του Αχελώου) και απαιτείται περισσότερος χρόνος για τη μεταφορά των υλικών από τα ανάντη τμήματα στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα.

3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη δεύτερη φάση του ερευνητικού έργου προβλέπεται να γίνουν δύο πολύ σημαντικές εργασίες: (α) η τελική εκτίμηση του όγκου των αποθέσεων και η εκτίμηση της μάζας τους μετά από μετατροπή του όγκου των αποθέσεων μέσω της συλλογής δειγμάτων των αποθέσεων των φερτών υλικών (πυρηνοληψία) και (β) η σχηματοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα περιγράφει τη στερεοαπορροή στη λεκάνη απορροής των Κρεμαστών.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικό κενό στην εκτίμηση της στερεοαπορροής και της σύστασης των εισρεόντων 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 λιγότερο λεπτομερειακή προσέγγιση (π.χ. καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής) θα δημιουργούσε τουλάχιστο συγκρίσιμα σφάλματα σε σχέση με πιο λεπτομερείς προσδιοριστικές μεθόδους.

Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτή τη προσέγγιση είναι η συλλογή αξιόπιστων και σε συνεχή χρόνο δεδομένων στερεοπαροχής 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 παραδοσιακής μεθόδου της διεξαγωγής των στερεοϋδρομετρήσεων αλλά και αξιοποίησής του για μια αξιόπιστη εκτίμηση της στερεοαπορροής, προτείνεται η χρήση βοηθητικών φυσικών μεταβλητών, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν εύκολα, αξιόπιστα και μάλιστα σε συνεχή χρόνο. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εύρεση μιας σημαντικά ικανοποιητικής συσχέτισης παράλληλων μετρήσεων της στερεοπαροχής και της βοηθητικής μεταβλητής, ώστε να προσδιοριστεί η σχέση μετατροπής των τιμών της μεταβλητής αυτής (π.χ. θολότητα). Με την αγορά και τη λειτουργία του θολόμετρου παρέχεται η ευκαιρία της υλοποίησης ενός τέτοιου προγράμματος συλλογής δεδομένων στερεοπαροχής που η επιτυχής κατάληξή του θα αποκτούσε τεράστια επιστημονική και ερευνητική αξία. Με τα δεδομένα αυτά θα είμαστε σε θέση να εξακριβώσουμε τη δίαυτα της λεκάνης απορροής σε σχέση με τις στερεοπαροχές από τη χρονική κλίμακα ενός πλημμυρικού επεισοδίου έως την υπερετήσια.

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.

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.

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

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, IIHR 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.
- 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.
- 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.
- Gippel, C.J., Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended sediments in streams, *Hydrol. Processes*, 9, 83-97, 1995.
- 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.
- 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.
- 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. Hydroscl. 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.
- Lea, N.J., *Analysis of reservoir range line surveys using the stage width modification method*, Report OD/TN, HRWallinford, UK, 1991.
- Lewis, J., Turbidity – controlled suspended sediment sampling for runoff – event load estimation, *Water Resour. Res.*, 32(7), 2299-2310, 1996.
- 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 mid-sized 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.
- 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, 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.
- 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.
- 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.
- Schumm, S.A., *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
- 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.
- 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. Krdtanovic, 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.
- 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.
- 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.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, Predicting rainfall erosion losses, *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. 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: Χάρτες

Χάρτης 1: Θέση ταμιευτήρα Κρεμαστών και λεκάνης απορροής με το κύριο υδρογραφικό δίκτυο.

Χάρτης 2: Βροχομετρικοί σταθμοί εγκατεστημένοι στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Χάρτης 3: Υδρομετρικοί σταθμοί στη λεκάνη απορροής με τις αντίστοιχες υπολεκάνες απορροής.

Χάρτης 4: Γεωλογικοί σχηματισμοί στη λεκάνη απορροής.

Χάρτης 5: Υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

Χάρτης 6: Διαφορές των δύο Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους χωρίς υψομετρική διόρθωση.

Χάρτης 7: Διαφορές των δύο Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους με καταβιβασμό του ΨΜΑ της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 3 m.

Χάρτης 8: Διαφορές των δύο Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους με καταβιβασμό του ΨΜΑ της αρχικής λεκάνης κατάκλυσης κατά 6 m.

Χάρτης 9: Θέσεις επιλεγμένων χαρακτηριστικών εγκάρσιων και διαμήκων τομών.

Χάρτης 1



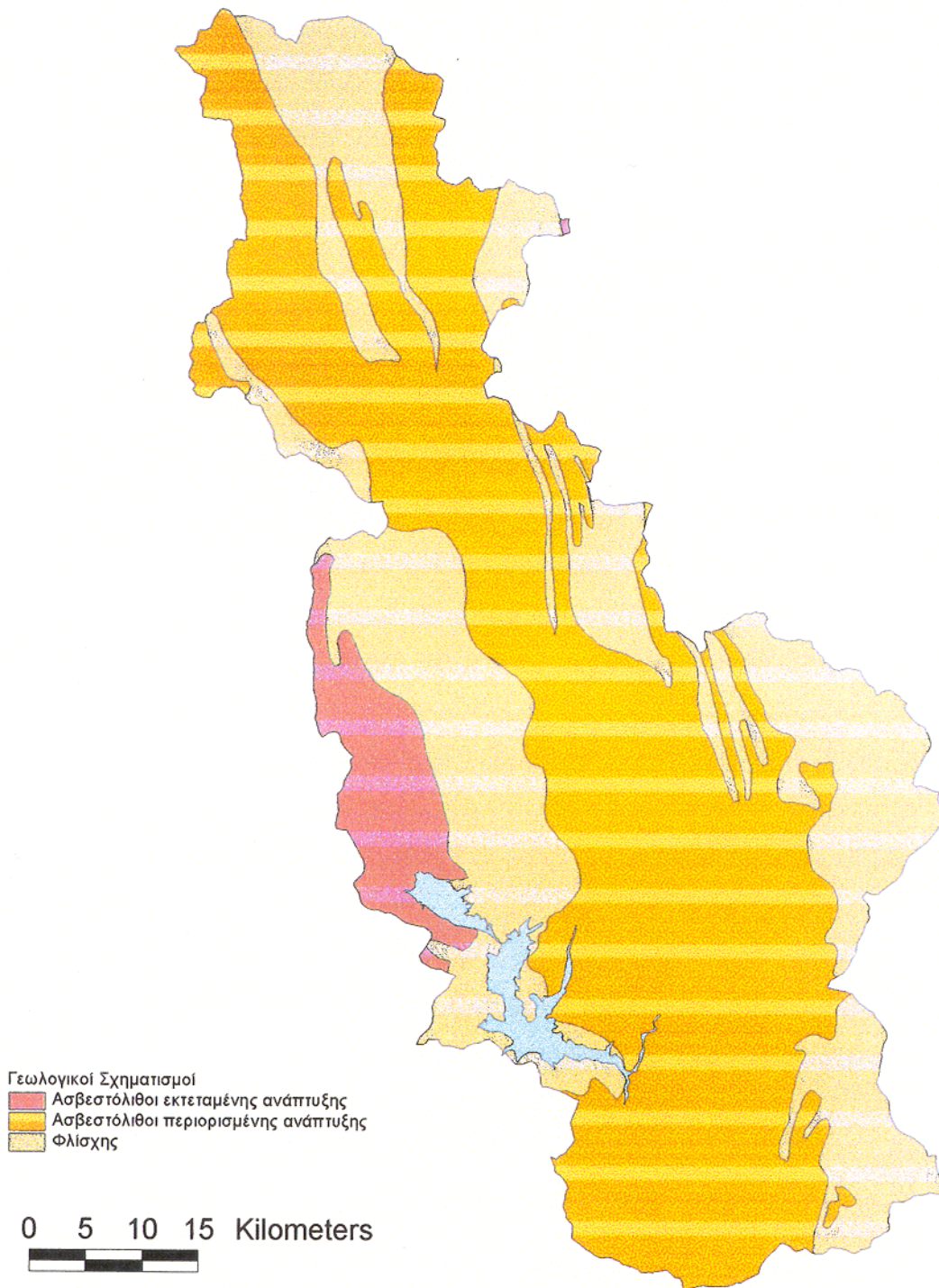
ΧΑΡΤΗΣ 2



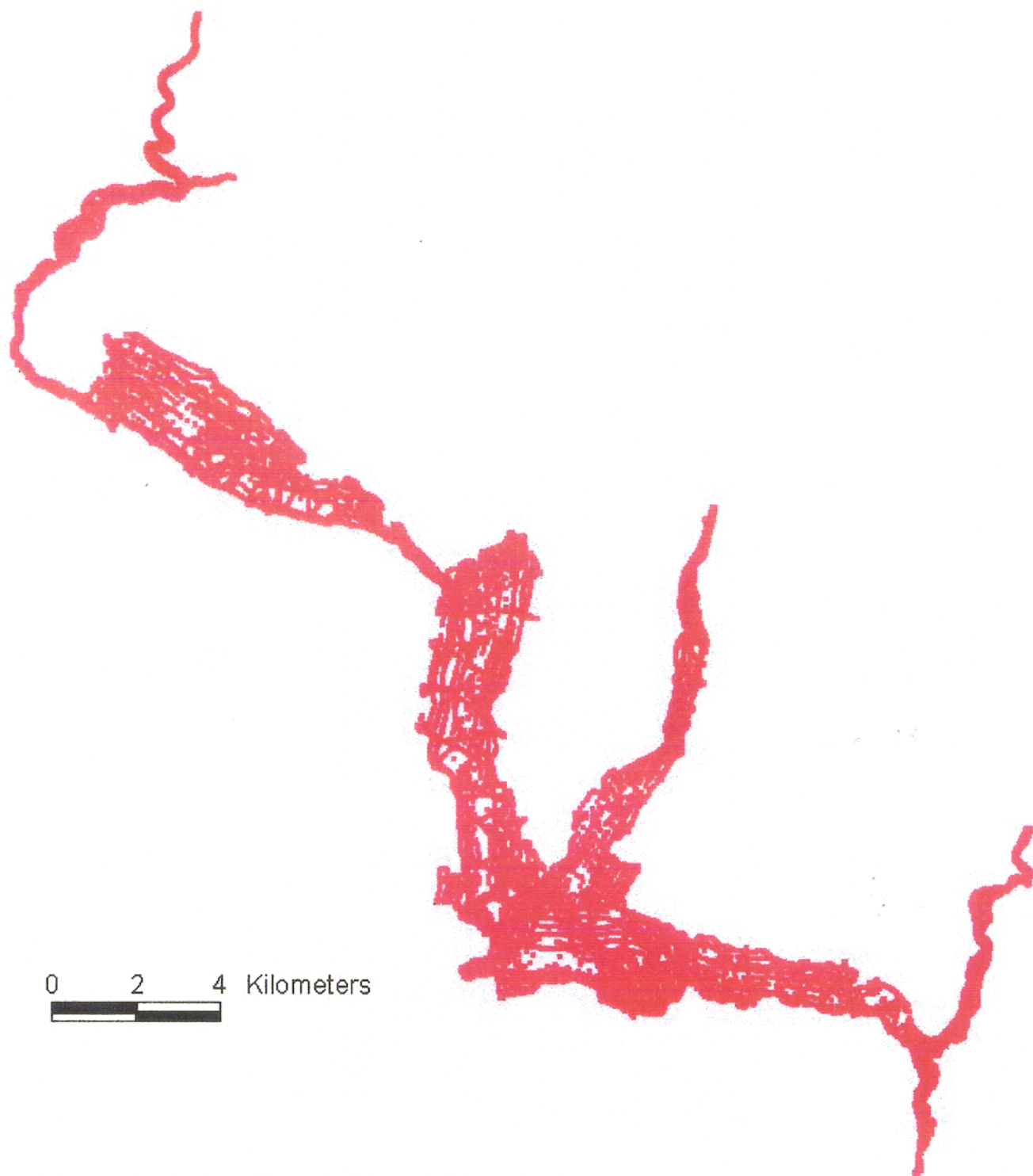
ΧΑΡΤΗΣ 3



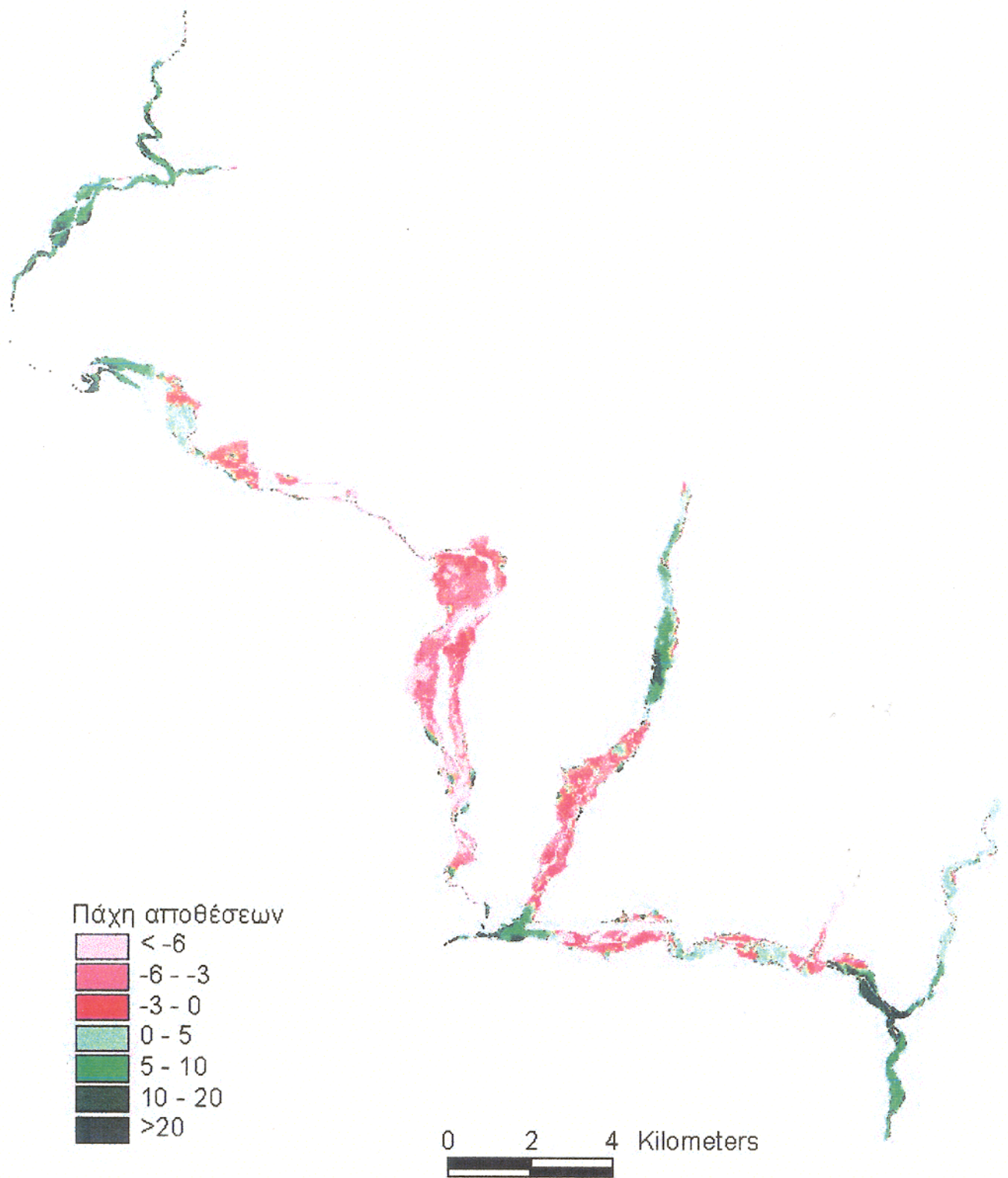
Χάρτης 4



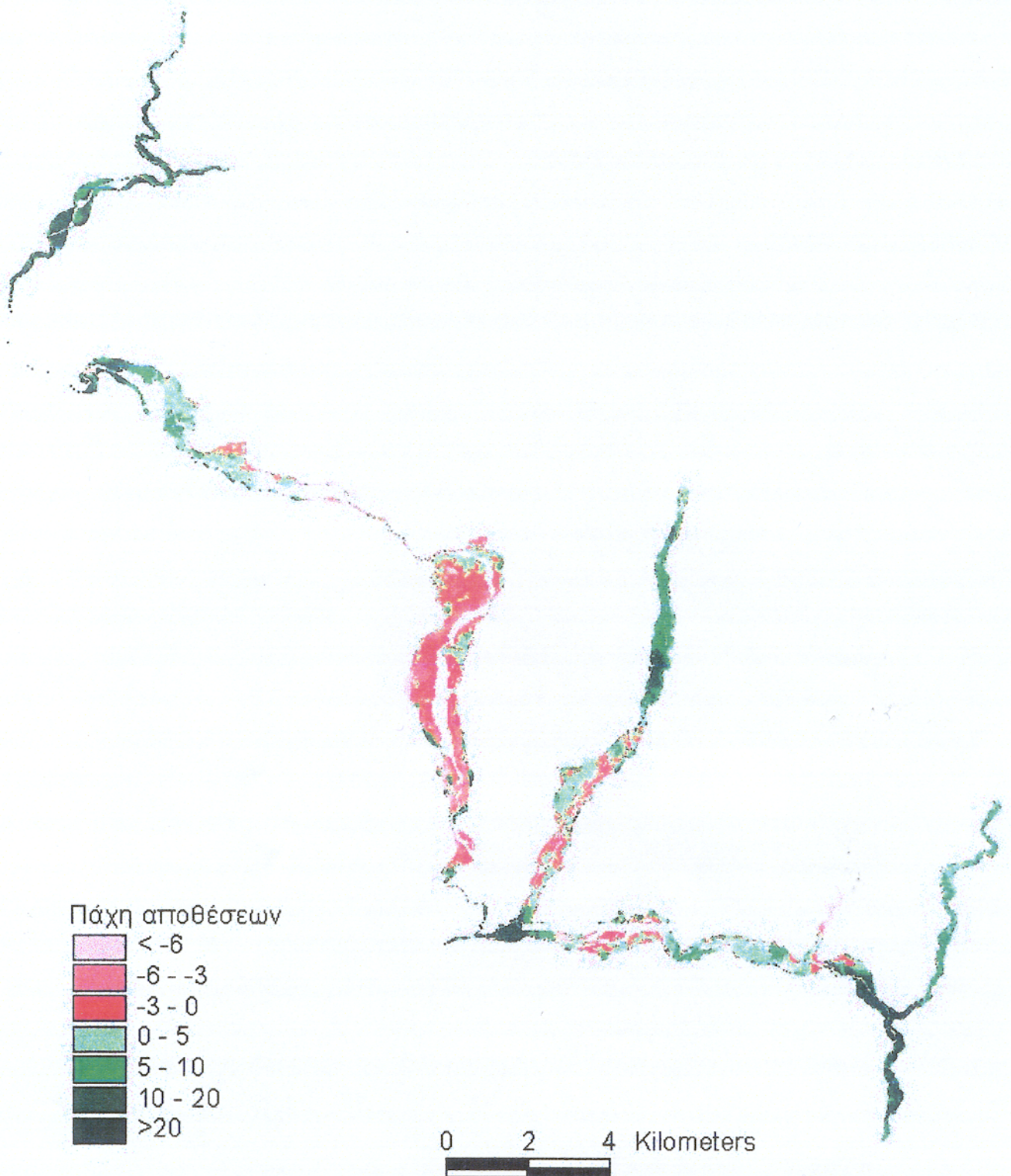
Χάρτης 5



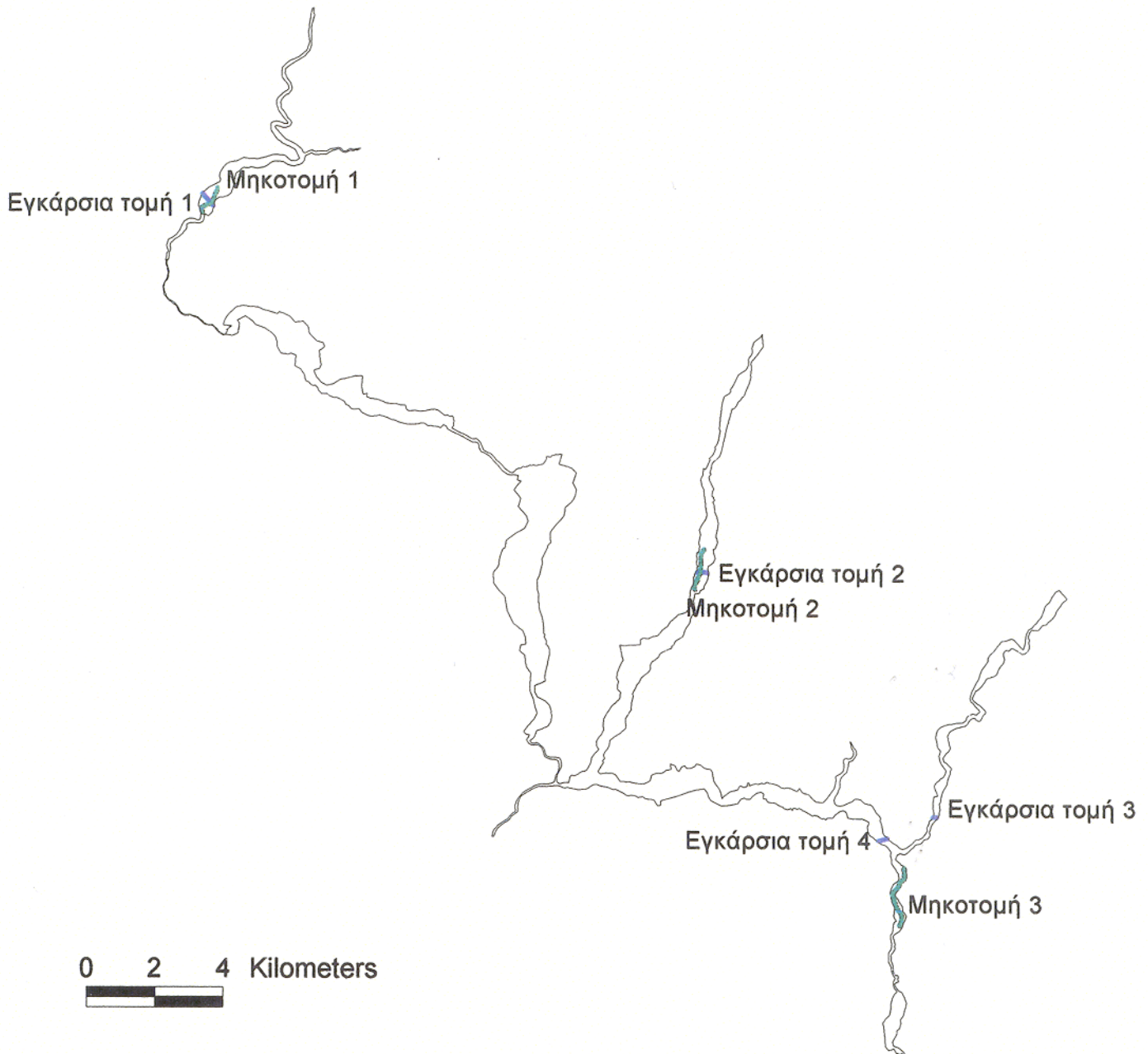
Χάρτης 6

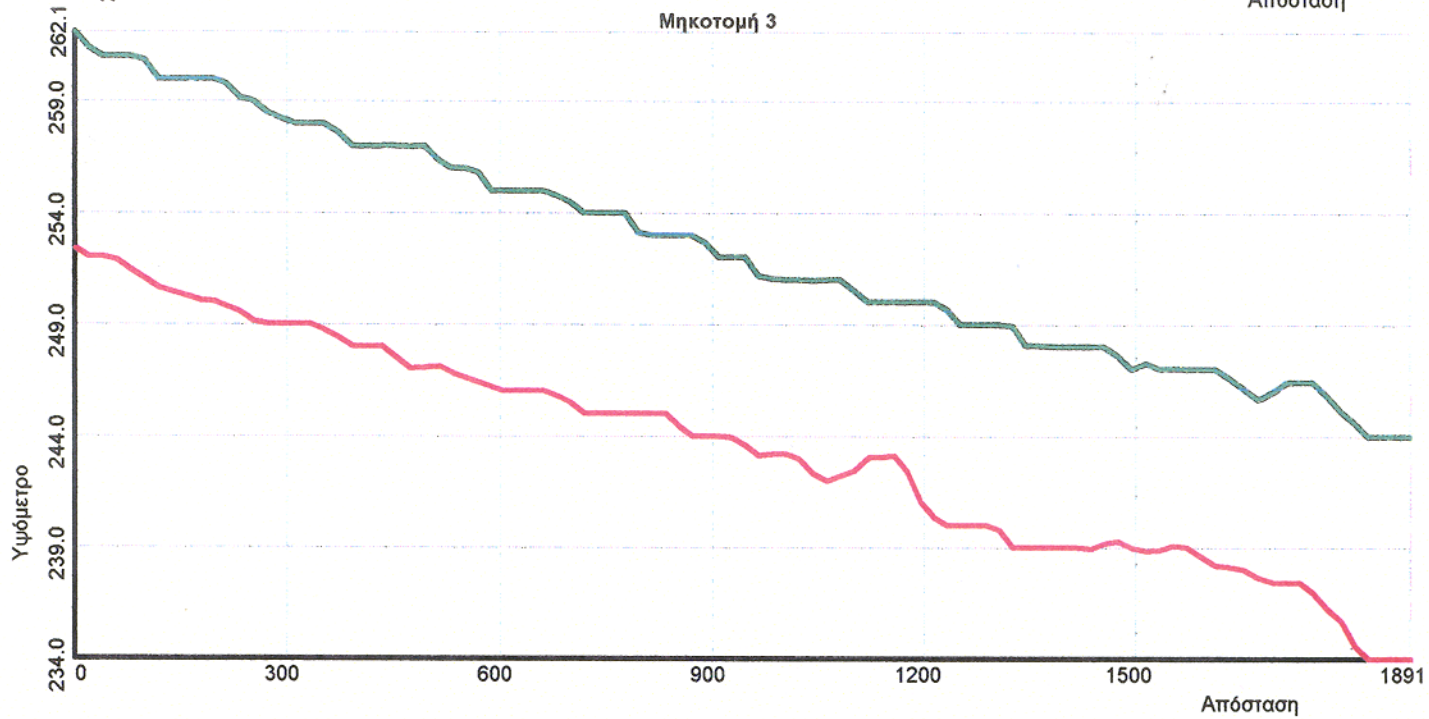
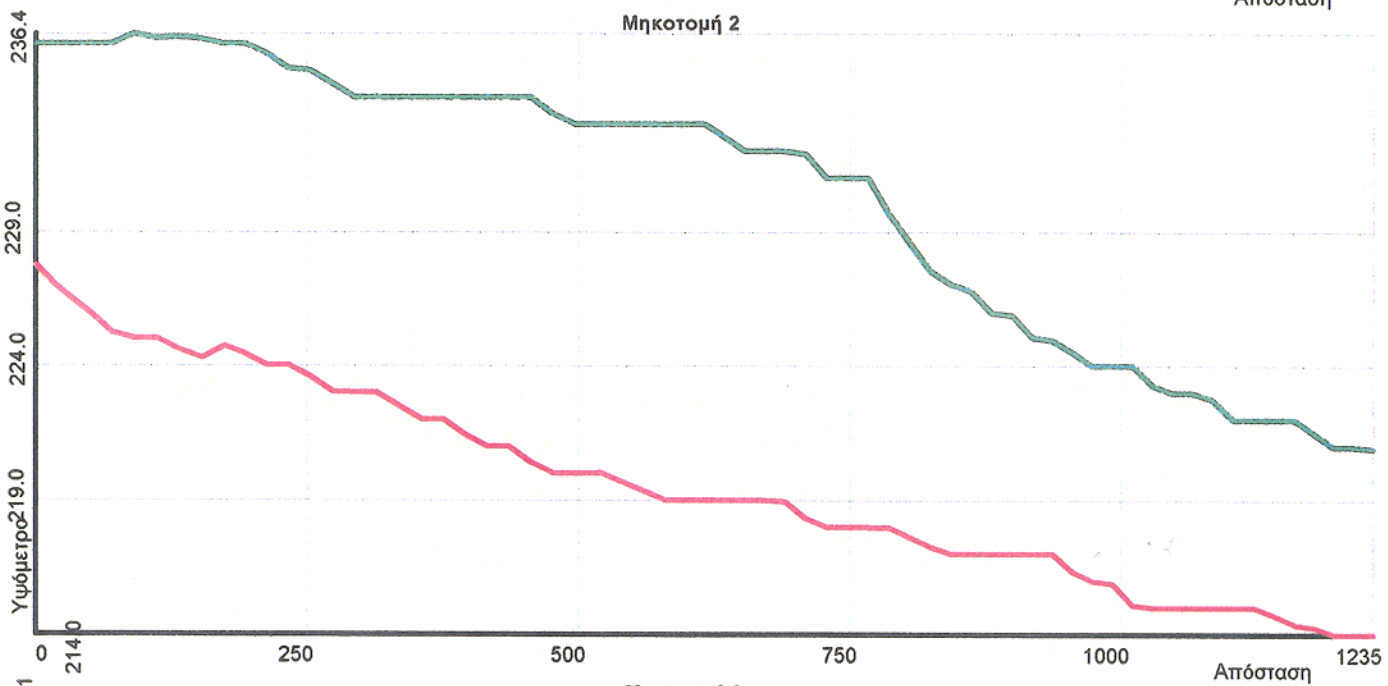
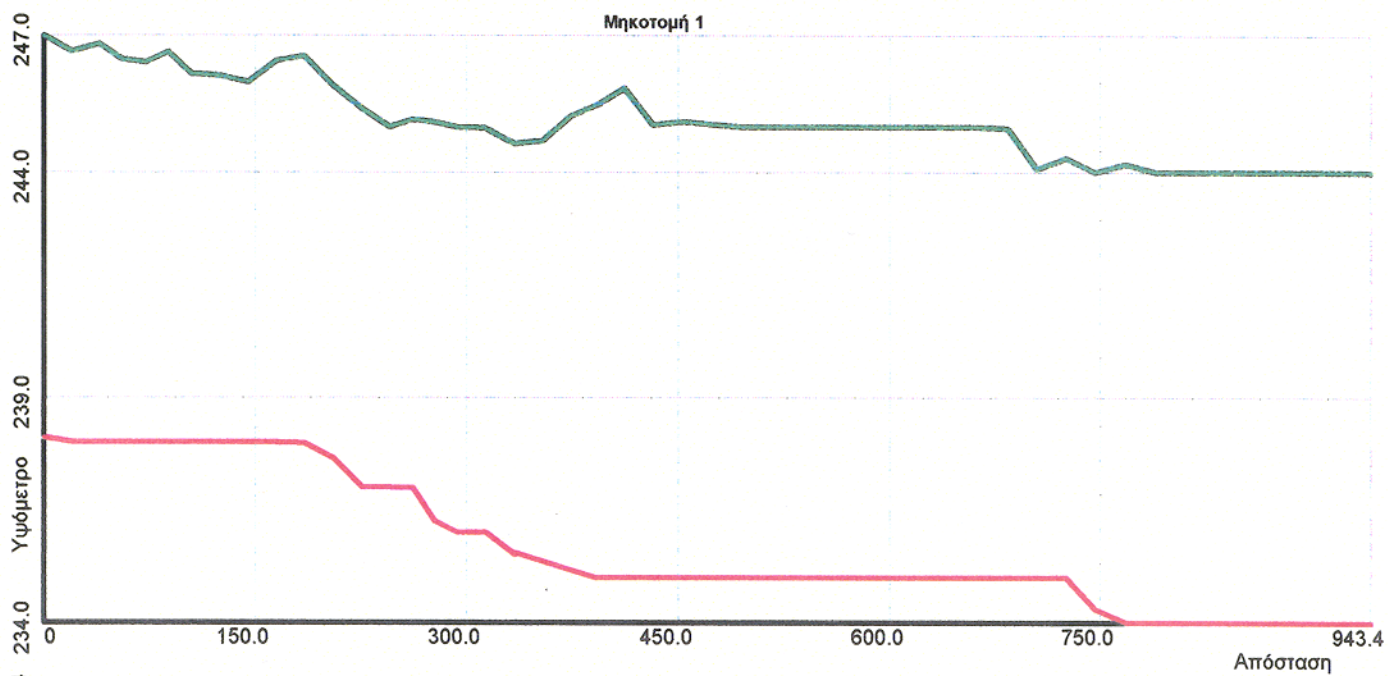


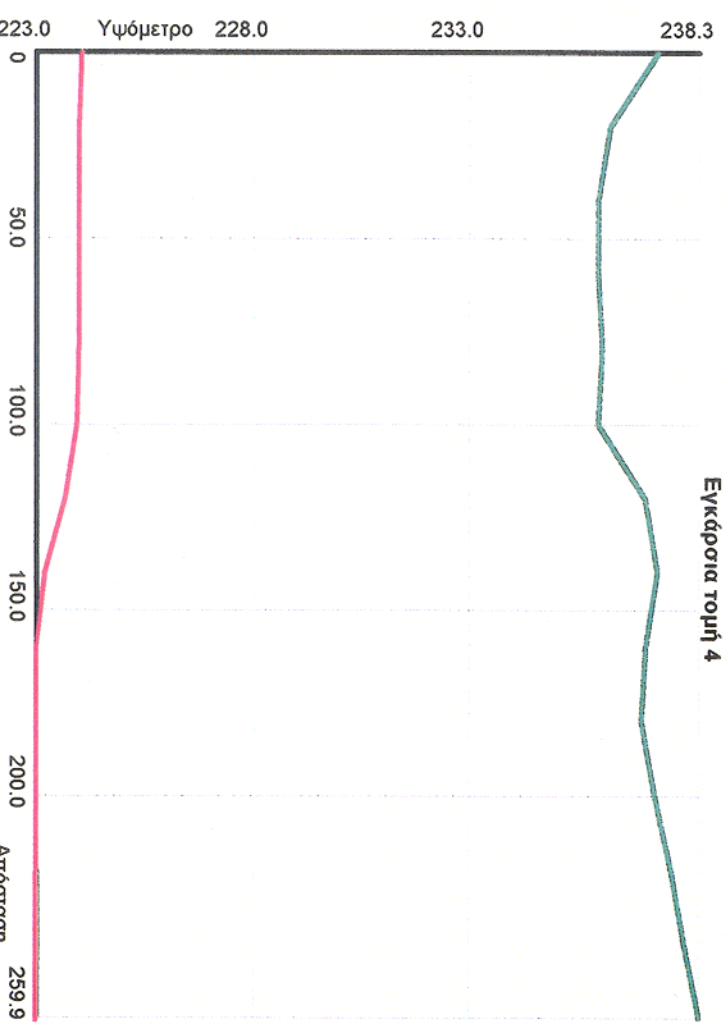
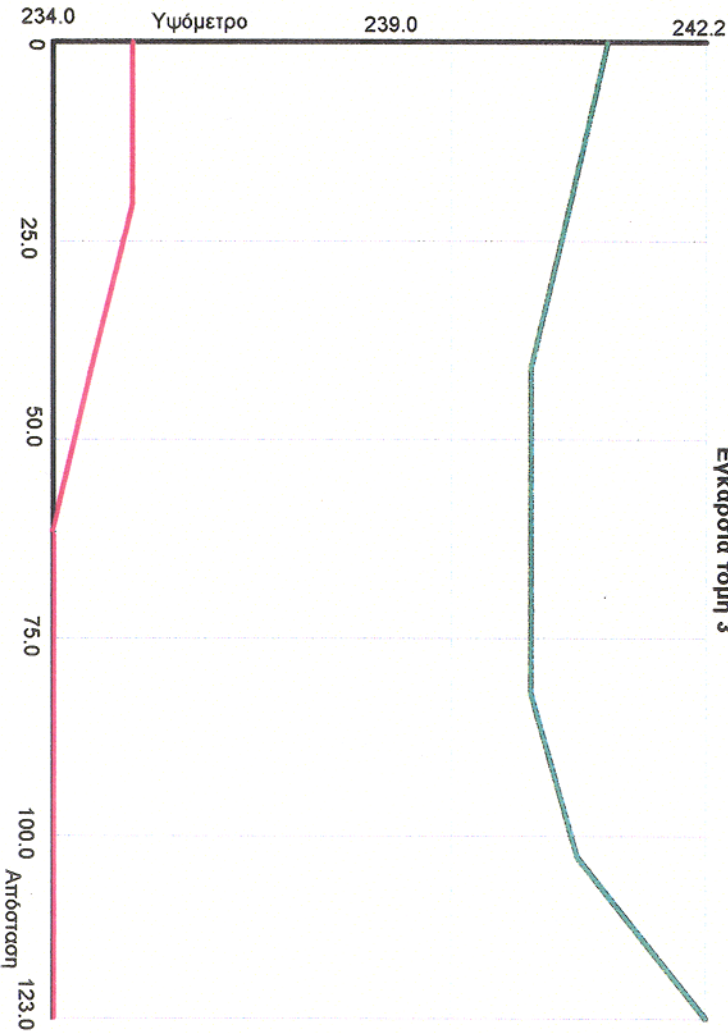
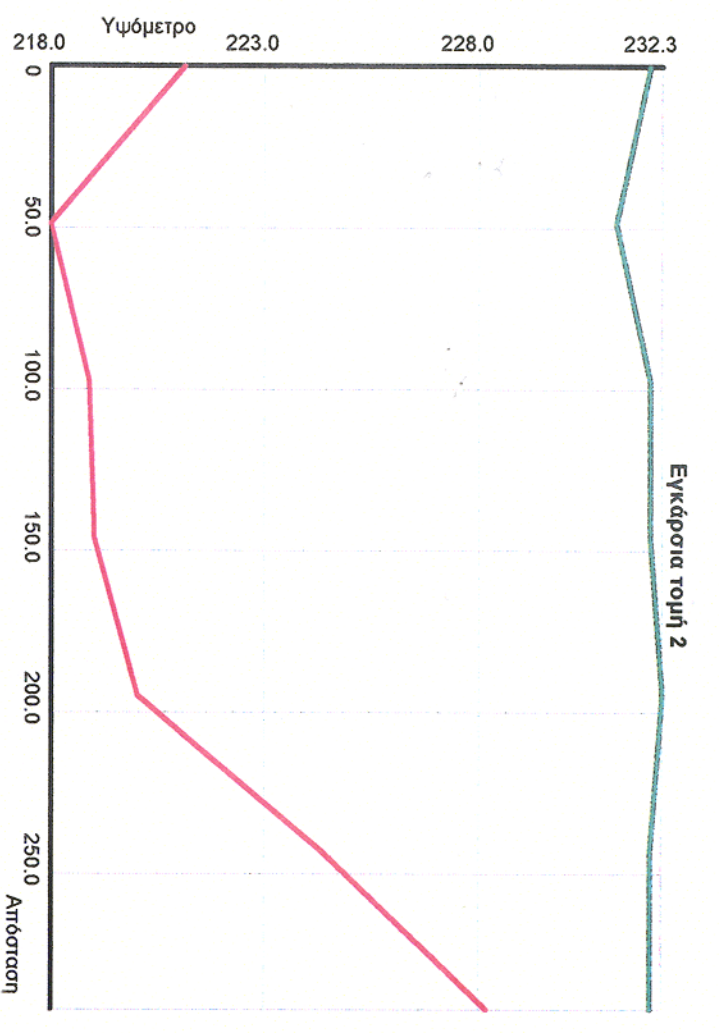
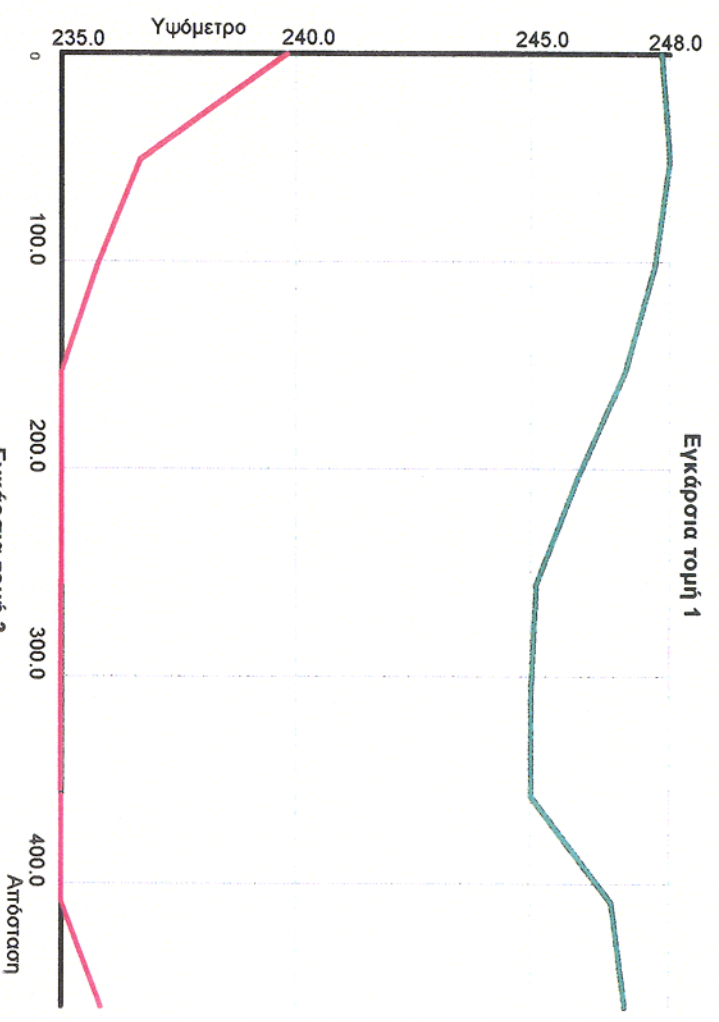
Χάρτης 7



Χάρτης 9







ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Πίνακες

Πίνακας 1: Κωδικοποιήσεις χρήσεων γης

ΧΡΗΣΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
Συνεχής αστική δόμηση	111
Διακεκομμένη αστική δόμηση	112
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	121
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	122
Ζώνες λιμένων	123
Αεροδρόμια	124
Χώροι εξορύξεως ορυκτών	131
Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	132
Χώροι οικοδόμησης	133
Περιοχές αστικού πράσινου	141
Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	142
Μη αρδεύσιμη αρώσιμη γη	211
Μόνιμα αρδευόμενη γη	212
Ορυζώνες	213
Αμπελώνες	221
Οπωροφόρα δένδρα	222
Ελαιώνες	223
Λιβάδια	231
Ετήσιες καλλιέργειες	241
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	242
Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	243
Γεωργοδασικές Περιοχές	244
Δάσος πλατύφυλλων	311
Δάσος κωνοφόρων	312
Μικτό δάσος	313
Φυσικοί βοσκότοποι	321
Θάμνοι και χερσότοποι	322
Σκληροφυλλική βλάστηση	323
Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	324
Παραλίες-αμμόλοφοι-αμμουδιές	331
Απογυμνωμένοι βράχοι	332
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	333
Αποτεφρωμένες εκτάσεις	334
Τυρφώνες	412

Παραθαλάσσιοι βάλτοι	421
Αλυκές	422
Παλιρροιακά επίπεδα	423
Ροές υδάτων	511
Συλλογές υδάτων	512
Παράκτιες λιμνοθάλασσες	521
Εκβολές ποταμών	522
Θάλασσα	523

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Φωτογραφίες

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.

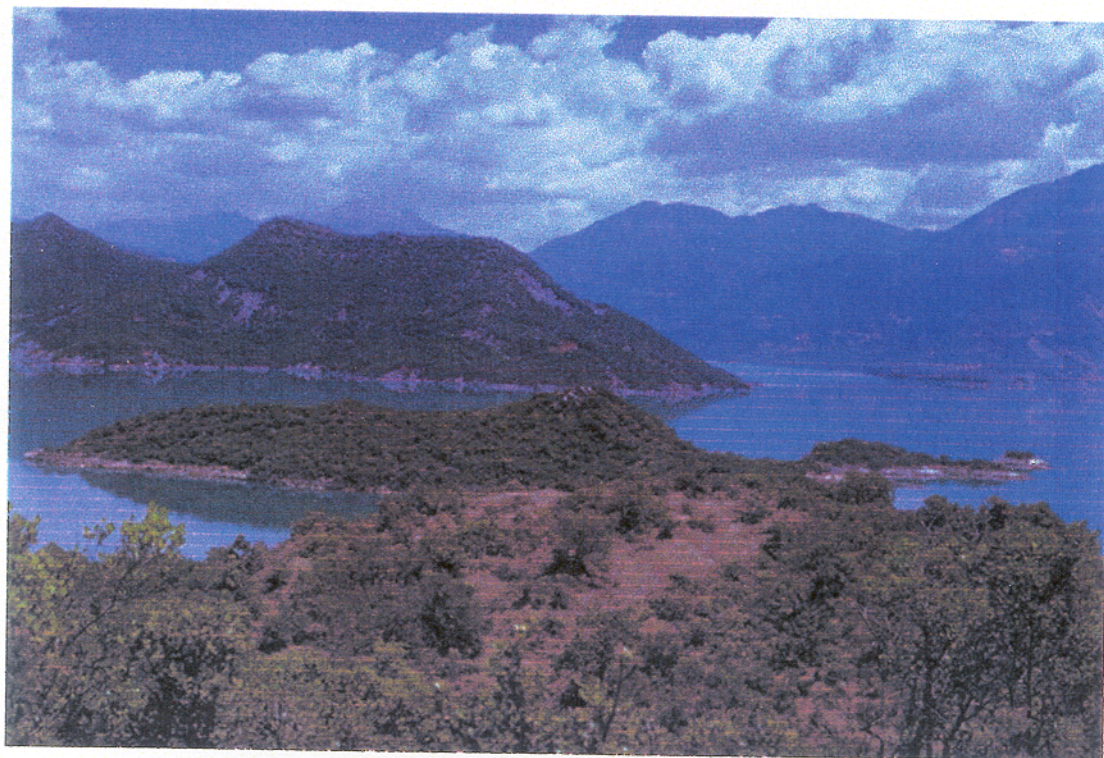
Φωτογραφία 5: Φερτά υλικά στην κοίτη του ποταμού Αγραφιώτη λίγο ανάντη της εκβολής του στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών.

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.

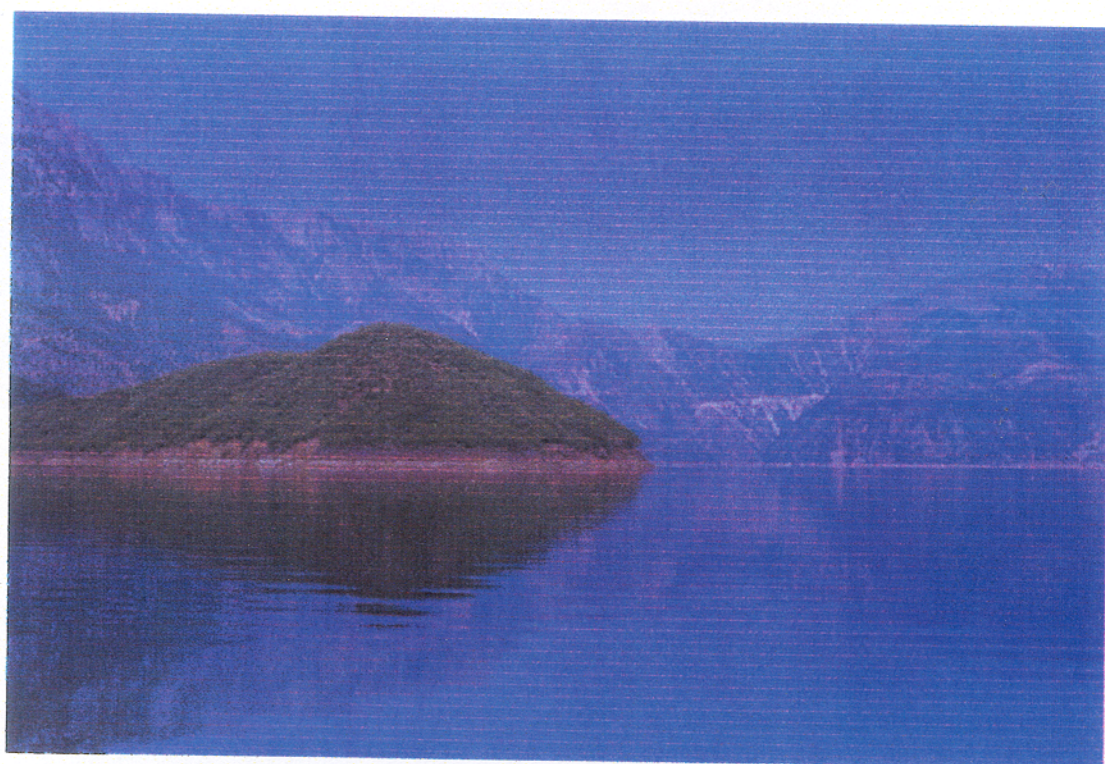
Φωτογραφία 7: Η κεραία του σταθμού αναφοράς τοποθετημένη στο δώμα του ξενώνα του οικισμού της ΔΕΗ στα Κρεμαστά.

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

Φωτογραφία 9: Διάταξη της εκ νέου μέτρησης των συντεταγμένων των τριγωνομετρικών σημείων της αρχικής αποτύπωσης της λεκάνης κατάκλυσης.



Φωτογραφία 1



Φωτογραφία 2



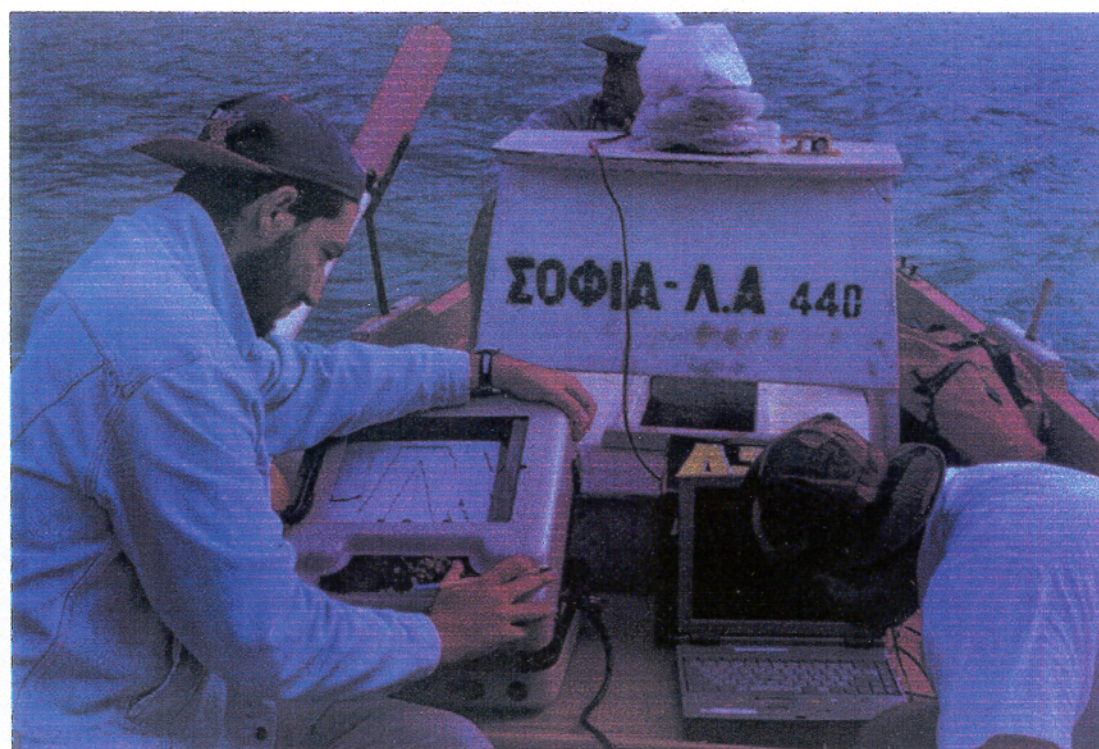
Φωτογραφία 3



Φωτογραφία 4



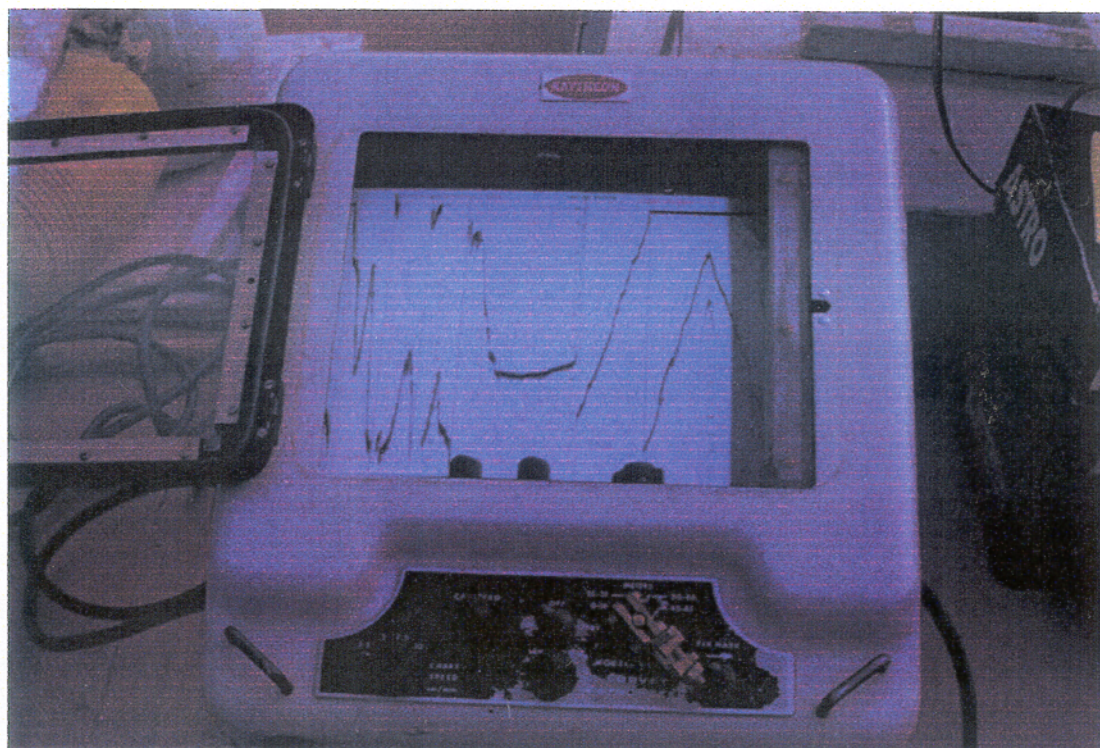
Φωτογραφία 5



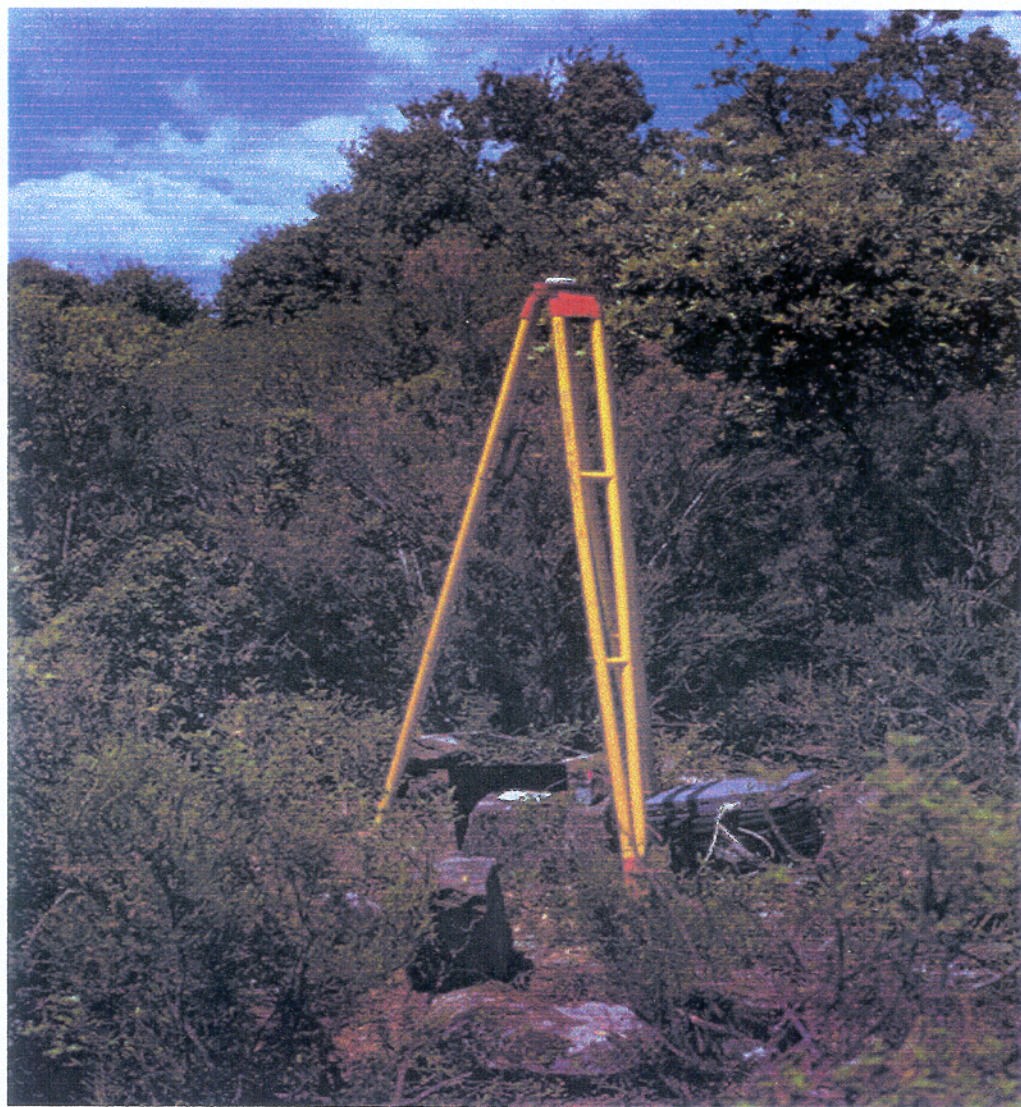
Φωτογραφία 6



Φωτογραφία 7



Φωτογραφία 8



Φωτογραφία 9