

Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών και εκτιμήσεις στερεοαπορροής στη ΒΔ Ελλάδα

Δ. Ζαρρής

M.Sc. Πολιτικός Μηχανικός, Υπ. Διδάκτορας, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λέξεις κλειδιά: Στερεοαπορροή, πρόσχωση ταμιευτήρων, ταμιευτήρας Κρεμαστών, ΒΔ Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο πρώτο μέρος του παρόντος άρθρου αναλύεται η μεθοδολογία εκτίμησης της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής σε αιώρηση στην υδρολογική λεκάνη του π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστών μέσω της υδρογραφικής αποτύπωσης και του ογκομετρικού υπολογισμού των αποθέσεων φερτών υλικών του ταμιευτήρα. Στο δεύτερο μέρος αναλύεται η μεθοδολογία υπολογισμού της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής σε αιώρηση σε διάφορες θέσεις ποταμών στη ΒΔ Ελλάδα με βάση τη τεθλασμένη παλινδρόμηση ως καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα με παλαιότερες εκτιμήσεις από άλλους ερευνητές και δίνονται τυπικές σχέσεις παλινδρόμησης με υδρολογικά κυρίως χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής. Η μεθοδολογία αυτή θα δώσει τη δυνατότητα εκτίμησης της στερεοαπορροής σε υπό σχεδιασμό ταμιευτήρες που θα λαμβάνει υπόψη πραγματικά δεδομένα από τον Ελληνικό χώρο.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 της στερεοαπορροής που ενδιαφέρει σε ό,τι αφορά τον υδραυλικό και υδρολογικό σχεδιασμό των μεγάλων φραγμάτων. Η απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρες και η μείωση της αποθηκευτικότητας επηρεάζει αρνητικά τους σκοπούς για τους οποίους έχει κατασκευαστεί ένας ταμιευτήρας, όπως η ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, κ.ά. Ειδικότερα σε ό,τι 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. Σε άνυδρες περιοχές, τα προβλήματα από την απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρες γίνονται ιδιαίτερα έντονα όταν η απώλεια του αποθηκευτικού όγκου ξεπερνά το 1 με 2% το χρόνο και η οικονομική ζωή του έργου δεν ξεπερνά τα 20 με 30 έτη. Ο ταμιευτήρας *Welbedacht* στη Νότια Αφρική, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 1973 με 152.2 hm³ αποθηκευτικό όγκο, απώλεσε το 66% της αποθηκευτικής του δυνατότητας μέσα στα 13 πρώτα έτη της λειτουργίας του (Rooseboom, 1992). Στην Ινδία οι μετρήσεις απόθεσης φερτών υλικών σε ταμιευτήρες δείχνουν ότι η μέση ετήσια απώλεια όγκου νερού σε εννέα σημαντικούς ταμιευτήρες κυμαίνεται μεταξύ 0.34 και 1.79%. Από συνολικά 23 μεγάλους ταμιευτήρες, ο μετρημένος ρυθμός της απώλειας αποθήκευσης νερού ήταν μικρότερος από την αντίστοιχη τιμή κατά την εκπόνηση της μελέτης σε μόνο δύο ταμιευτήρες, στους υπόλοιπους η μετρημένη τιμή ήταν τουλάχιστο πενταπλάσια της αρχικά εκτιμημένης (Central Water Commission, 1996). Ο ταμιευτήρας *Austin* του π. Colorado στο Texas των ΗΠΑ απώλεσε το 95.6% της αποθηκευτικότητάς του σε 13 έτη, ο ταμιευτήρας *Habra* στην Αλγερία το 58% σε 22 έτη, ο ταμιευτήρας *Wuchieh* στην Taiwan το 98.7% σε 35 μόλις έτη (Xiaoqing, 2003).

Στην Ιταλία, ανάλυση σε 268 ταμιευτήρες που κατανέμονται σε όλη τη χώρα με μέση διάρκεια λειτουργίας τα 50 έτη δείχνουν ότι το 1.5% από αυτούς έχουν πλήρως καταληφθεί από φερτά υλικά, το 4.5% έχουν απωλέσει το 50% του αποθηκευτικού τους όγκου και το 17.5% το 20% του αντίστοιχου όγκου. Ο ταμιευτήρας *Ichari* στην Ινδία προσχώθηκε έως τη στάθμη υπερχειλίσσης μέσα σε δύο μόνο έτη. Στην Κίνα, ο Κίτρινος ποταμός είναι ένα ποτάμιο σύστημα με μέση ετήσια στερεοπαροχή ίση με 1600 Mt. Με στοιχεία του 1989, οι απώλειες αποθηκευτικού όγκου από την απόθεση φερτών υλικών σε ταμιευτήρες έφτασαν τα 10900 hm³, που λογίζονται ίσες με το 21% της συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας όλων των ταμιευτήρων που βρίσκονται στο κύριο κλάδο του ποταμού αλλά και στους επιμέρους κλάδους. Στους επιμέρους κλάδους οι απώλειες αποθηκευτικού όγκου υπολογίζεται σε 26% επί του συνόλου (Χίαοqing, 2003).

Στην Ελλάδα είναι προφανής η απουσία οποιασδήποτε συστηματικής εκτίμησης της στερεοαπορροής και του ρυθμού διάβρωσης. Μόνο η ΔΕΗ στη φάση της μελέτης κάποιου ταμιευτήρα διενεργούσε παλαιότερα στερεοϋδρομετρήσεις (ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής) πριν την κατασκευή του ώστε να εκτιμήσει το νεκρό όγκο του (π.χ. Αλιάκμονας, Αχελώος, Άραχθος (π.χ. Μιμίκου, 1982; Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987)). 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 πραγματικός ρυθμός πρόσχωσης του ταμιευτήρα, η απώλεια της χωρητικότητας του ταμιευτήρα και η πραγματική οικονομική ζωή του έργου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του φράγματος *Λούρου* στον ποταμό Λούρο της Ηπείρου, όπου οι στερεοπαροχές του ποταμού είχαν υποεκτιμηθεί σημαντικά ώστε ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα (0.37 hm³) να καλυφθεί από τις προσχώσεις μέσα σε λίγα χρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ταμιευτήρας να έχει μηδενική αποθηκευτική ικανότητα και ο αντίστοιχος ΥΗΣ να λειτουργεί πλέον ως σταθμός βάσης αξιοποιώντας μόνο την υπάρχουσα στιγμιαία παροχή του ποταμού.

Οι στερεοϋδρομετρήσεις επιτρέπουν την κατάρτιση καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής (sediment discharge rating curves) και την επακόλουθη εκτίμηση της μέσης ημερήσιας στερεοπαροχής με βάση την αντίστοιχη τιμή της παροχής είτε πρόκειται για στιγμιαία μέτρηση της στάθμης από σταθμήμετρο ή / και τη μέση ημερήσια όταν στο σταθμό μέτρησης έχει εγκατασταθεί και σταθμηγράφος. 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.

Στο πρώτο μέρος του παρόντος άρθρου αναλύεται η μεθοδολογία εκτίμησης της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής στην υδρολογική λεκάνη του π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστών μέσω της υδρογραφικής αποτύπωσης και του ογκομετρικού υπολογισμού των αποθέσεων φερτών υλικών του ταμιευτήρα. Στο δεύτερο μέρος αναλύεται η μεθοδολογία υπολογισμού της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής σε διάφορες θέσεις ποταμών στη ΒΔ Ελλάδα με βάση τη τεθλασμένη παλινδρόμηση ως καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα με παλαιότερες εκτιμήσεις από άλλους ερευνητές και δίνονται τυπικές σχέσεις παλινδρόμησης με υδρολογικά κυρίως χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής.

2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟΝ Τ. ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ

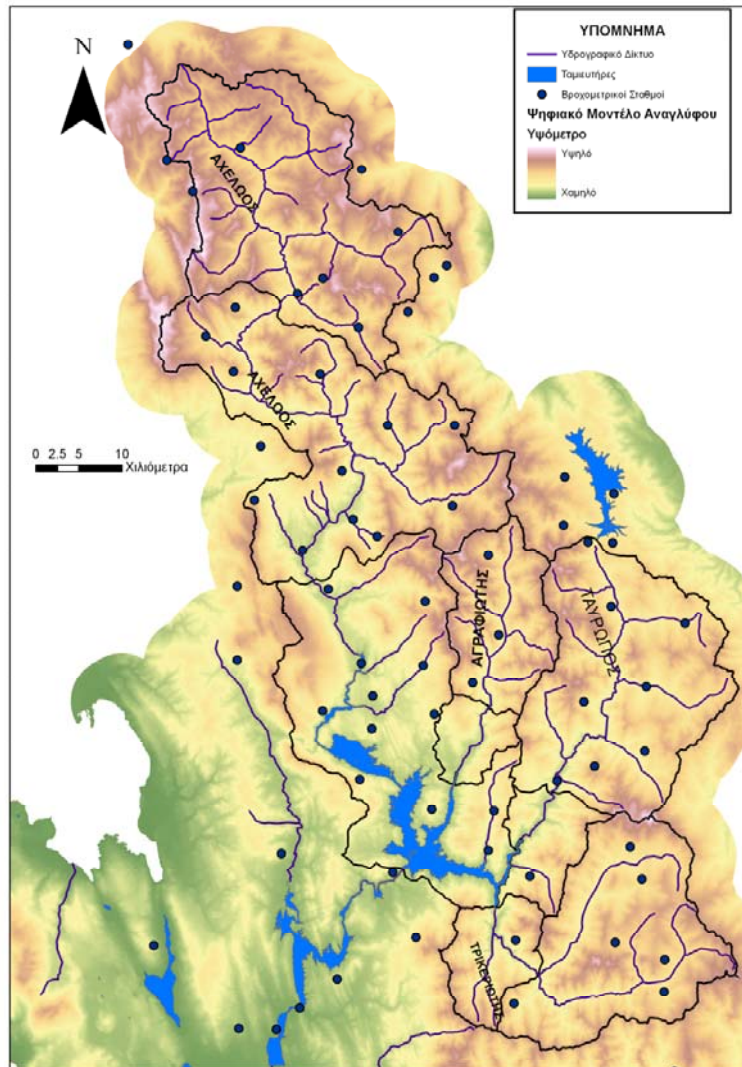
Ο ταμιευτήρας των Κρεμαστών βρίσκεται στη ΒορειοΔυτική Ελλάδα και καταλαμβάνει τμήματα των νομών Αιτωλοακαρνανίας και Ευρυτανίας και συγκεντρώνει τις απορροές του ποταμού

Αχελώου και των παραποτάμων του Ταυρωπού, Αγραφιώτη και Τρικεριώτη. Ο ταμιευτήρας στη στάθμη του υπερχειλιστή καταλαμβάνει έκταση 80.6 km^2 ενώ ο συνολικός αποθηκευτικός όγκος είναι ίσος με 4495 hm^3 . Η λεκάνη απορροής έχει επιφάνεια 3292 km^2 ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 1433 mm . Η μέση ετήσια εισροή στον ταμιευτήρα είναι ίση με $107.8 \text{ m}^3/\text{s}$ για τα υδρολογικά έτη από 1966-67 έως 2000-01. Τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής κυμαίνονται από $+284 \text{ m}$ έως $+2433 \text{ m}$. Το γεωλογικό υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται κατά κύριο λόγο από το φλύσχη της ζώνης του Γαβρόβου και της Πίνδου και τους ελαφρά δολομιτωμένους ασβεστόλιθους της ζώνης του Γαβρόβου και τους ασβεστόλιθους με ενδιαστρώσεις κερατολίθων, αργιλικών σχιστολίθων και φλύσχη της ζώνης Πίνδου (Λυκούδη, 2000). Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η μορφή της λεκάνης απορροής του π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Σημείο – κλειδί της ερευνητικής μεθοδολογίας είναι η υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα Κρεμαστών που διενεργήθηκε κατά τη διετία 1998-1999 στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες» που ανατέθηκε στον Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων (ΤΥΠΥΘΕ) με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Δ. Κουτσογιάννη και χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Η υδρογραφική αποτύπωση έγινε με τη χρήση του διαφορικού Συστήματος Δορυφορικού Εντοπισμού (differential Global Position System, dGPS) για τον προσδιορισμό της θέσης και ενός ηχοβολιστικού βυθόμετρου (echo sounder) για τον προσδιορισμό του βάθους του πυθμένα. Το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (ΨΜΑ) του πυθμένα πριν την κατασκευή του φράγματος καταστρώθηκε με βάση την ψηφιοποίηση των αρχικών τοπογραφικών διαγραμμάτων κλίμακας 1:5000. Αντίστοιχα το ΨΜΑ του πυθμένα στη σημερινή του μορφή έγινε από τη σύζευξη των ψηφιακών αρχείων του dGPS και του ηχοβολιστικού βυθόμετρου. Ο κάρναβος των ΨΜΑ προέκυψε ύστερα από την εφαρμογή του αλγόριθμου τριγωνισμού με γραμμική παρεμβολή που είναι διαθέσιμος στο λογισμικό πακέτο SURFER. Ο αλγόριθμος «Triangulation with Linear Interpolation» (Τριγωνισμός με γραμμική παρεμβολή) θεωρήθηκε ως ο καταλληλότερος γιατί επιβάλλει την επαφή της δημιουργούμενης επιφάνειας με όλα τα σημεία απόλυτου υψομέτρου που έχουν καταχωρηθεί και επιπλέον δίνει μια ομαλή και συνεχόμενη επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει διαδικασία στην οποία όλα τα αρχικά σημεία δεδομένων ενώνονται στο χώρο με ένα δίκτυο, κατά το δυνατόν ισόπλευρων τριγωνικών επιφανειών και στη συνέχεια διενεργεί τη γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό του κανάβου. Ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων έγινε μέσω της υψομετρικής αφαίρεσης των δύο ΨΜΑ και ο συνολικός όγκος των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών ανέρχεται σε 69.7 hm^3 .

Η σάρωση του ταμιευτήρα έγινε με βάση προκαθορισμένες πρωτεύουσες βολιστικές γραμμές (ή γραμμές πλεύσης του υδρογραφικού σκάφους), που είχαν σχεδιαστεί από πριν με βάση την επιθυμητή ακρίβεια του ΨΜΑ που θα προκύψει. Η ισοαπόσταση 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 (όπου αναμένεται και η μεγαλύτερη απόθεση φερτών υλικών και επομένως η μέγιστη απαιτούμενη ακρίβεια) η ισοαπόσταση μπορεί να είναι και μικρότερη των 50 m ενώ στο εσωτερικό τμήμα του ταμιευτήρα η απόσταση αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη αλλά πάντως παραμένει γύρω στα 100 m με 150 m πάνω από τις αρχικές κοίτες των ποταμών που αναμένεται να συγκεντρώνουν ένα 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 πρωτεύουσών γραμμών διενεργήθηκαν και δευτερεύουσες γραμμές ελέγχου σε διεύθυνση 45° ως προς τις πρωτεύουσες βολιστικές γραμμές. Το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του ταμιευτήρα καταγράφεται δύο φορές την ημέρα (στις 07:00 και 24:00) από το ηλεκτρονικό σταθμόμετρο 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

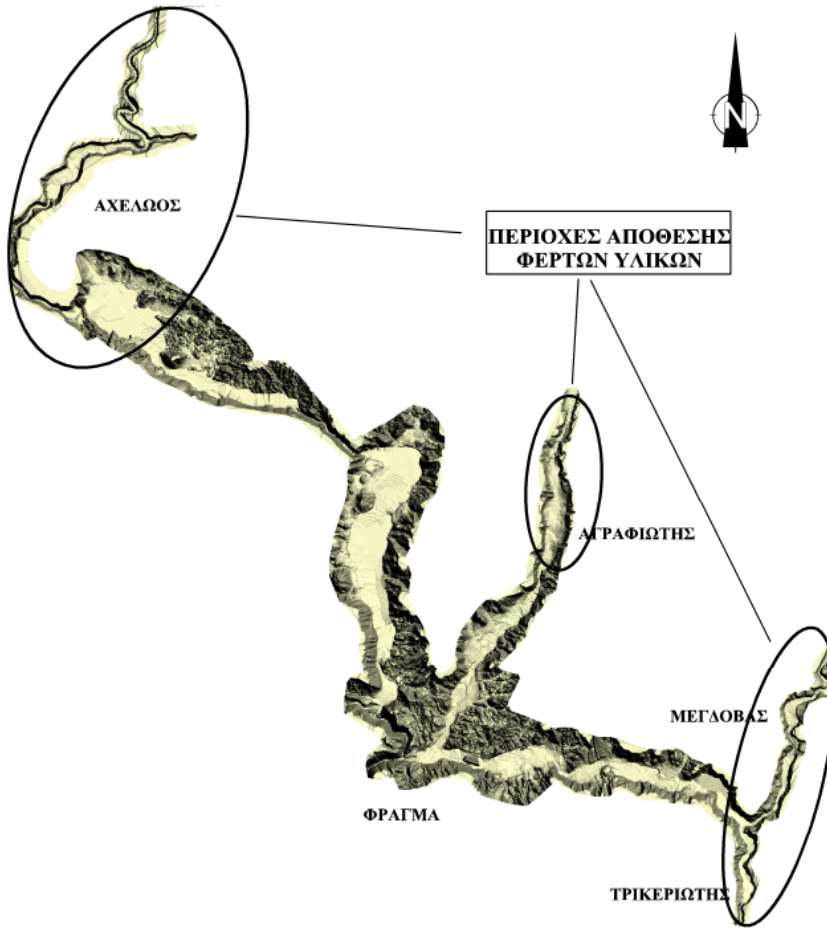
χρονικό βήμα μιας ώρας ώστε να επιμεριστεί το σφάλμα από τη μεταβολή της στάθμης. Με γνωστή τη στάθμη του ταμιευτήρα υπολογίζονται οι ισοβαθείς σε απόλυτο υψόμετρο ώστε να γίνει αργότερα η σύγκριση μεταξύ των ΨΜΑ πριν την κατάκλυση του ταμιευτήρα και της υδρογραφικής αποτύπωσης.



Εικόνα 1: Λεκάνη απορροής του π. Αγελώου στη θέση του τ. Κρεμαστών

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των αποθέσεων των φερτών υλικών εντός του ταμιευτήρα Κρεμαστών. Ο συνολικός όγκος των αποθέσεων εμφανίζεται μόνο στις εκβολές των ποταμών στον ταμιευτήρα ενώ το εσωτερικό τμήμα του ταμιευτήρα είναι κενό από φερτά υλικά. Η παρατήρηση αυτή θέτει καταρχήν υπό σοβαρή αμφισβήτηση την έννοια του νεκρού όγκου στη διαστασιολόγηση των ταμιευτήρων, όπως αυτή εννοείται σήμερα. Συγκεκριμένα θεωρείται συμβατικά ότι νεκρός όγκος είναι ο όγκος του ταμιευτήρα ο οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από μία δεδομένη στάθμη. Αυτό όμως δεν αντιστοιχεί στην πραγματική εικόνα των αποθέσεων των φερτών υλικών, αφού οι αποθέσεις καταλαμβάνουν τμήμα του ωφέλιμου όγκου, ενώ ο νεκρός όγκος είναι άδειος από φερτά υλικά. Αυτή η μορφή των αποθέσεων εμφανίζεται και σε άλλους ταμιευτήρες στη διεθνή βιβλιογραφία που ασκούν υπερετήσια ρύθμιση με γενικά μικρή μεταβολή της στάθμης. Αντίθετα σε αντιπλημμυρικούς ταμιευτήρες που είναι κατά κανόνα άδαιοι πριν την είσοδο της

πλημμύρας το σημαντικότερο ποσοστό των αποθέσεων εμφανίζεται στην περιοχή κοντά στο φράγμα.



Εικόνα 2: Χωρική κατανομή των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστόν

Η μέση ετήσια στερεοαπορροή μιας υδρολογικής λεκάνης όπως προκύπτει από τον υπολογισμό του όγκου των αποθέσεων των φερτών υλικών είναι ίση με:

$$S_y = 100 \frac{SV \times dBD}{A \times TE} \quad (1)$$

όπου SV ο μετρημένος ρυθμός απόθεσης ($m^3/έτος$), dBD (dry bulk density) είναι το ειδικό βάρος των αποθέσεων φερτών υλικών (t/m^3), A η επιφάνεια της λεκάνης απορροής (km^2) και TE η ικανότητα κατακράτησης των φερτών υλικών στον ταμιευτήρα (%). Για τον αξιόπιστο υπολογισμό της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής είναι εξαιρετικά κρίσιμος ο ακριβής υπολογισμός του dBD και του TE . Η ικανότητα κατακράτησης του ταμιευτήρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογιστεί ιδίως σε μικρούς ταμιευτήρες (Vestraeten and Poesen, 2000). Σε εκτεταμένους ταμιευτήρες μπορεί βάσιμα να υποθέσει κανείς ότι η ικανότητα κατακράτησης είναι ίση με τη μονάδα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η πυκνότητα των αποθέσεων υπολογίστηκε αφού λήφθηκαν δύο δειγματοληπτικές γεωτρήσεις από τον πυθμένα του ταμιευτήρα στον κλάδο του π. Αχελώου. Ο πολύ μικρός (και ίσως ανεπαρκής) αριθμός των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οφείλεται στον περιορισμένο προϋπολογισμό του ερευνητικού έργου και αποτελεί μειονέκτημα της μεθοδολογίας.

Ο άμεσος υπολογισμός της πυκνότητας των αποθέσεων φερτών υλικών δεν στάθηκε δυνατός λόγω της αδυναμίας λήψης αδιατάρακτων δειγμάτων κατά τη διενέργεια των δειγματοληψιών. Η εκτίμηση της πυκνότητας των αποθέσεων γίνεται έμμεσα με τη χρήση σχετικού πίνακα και με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις κοκκομετρίας των δειγμάτων. Αν υποθέσουμε ότι η σύσταση των αποθέσεων σε άμμο, ιλύ και άργιλο σε όλη την έκταση των αποθέσεων μπορεί να προσεγγιστεί από τις τιμές των δύο γεωτρήσεων, είναι δυνατό να υπολογιστεί η μέση πυκνότητα των αποθέσεων. Με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις της κοκκομετρίας των δειγμάτων και την εύρεση της σύστασης των φερτών υλικών διαπιστώνεται ότι η πλειονότητα των φερτών υλικών είναι γενικά αμμώδους σύστασης και προέκυψε ότι η μέση αρχική πυκνότητα των αποθέσεων είναι ίση με 1506.1 kg/m^3 τιμή που είναι ελάχιστη μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κατά το σχεδιασμό του έργου. Θεωρώντας επίσης τη σχέση των Lara and Pemberton, (1965) για 32 χρόνια λειτουργίας του ταμιευτήρα η συνολική μέση πυκνότητα των αποθέσεων είναι ίση με 1518.5 kg/m^3 . Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ερευνητικής μεθοδολογίας για τις τρεις επιμέρους λεκάνες απορροής αλλά και για την ενιαία λεκάνη.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη στερεοαπορροής για τις τρεις επιμέρους λεκάνες απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Λεκάνη απορροής	Επιφάνεια (km^2)	Όγκος αποθέσεων (hm^3)	Μάζα αποθέσεων (Mt)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή S_y (t/km^2)	Μέση ετήσια στερεοπαροχή Q_s (kg/s)
Αχελώος	1733	43.2	65.7	1184.6	66.0
Αγραφιώτης	320	13.7	20.8	2034.8	20.9
Ταυρωπός – Τρικεριώτης	1239	12.8	19.4	489.4	19.5
ΣΥΝΟΛΟ	3292	69.7	105.9	1005.6	106.4

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. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, για 32 έτη λειτουργίας του ταμιευτήρα ο όγκος των φερτών υλικών είναι μόλις 70 hm^3 . Θεωρώντας ότι ο ρυθμός απόθεσης θα είναι ίδιος και για τα υπόλοιπα 68 έτη, τότε η αναμενόμενη πραγματική απόθεση φερτών υλικών θα είναι περίπου ίση με 220 hm^3 . Η τιμή αυτή είναι τουλάχιστο 3 φορές μικρότερη από εκείνη που εκτιμήθηκε στα πλαίσια της μελέτης του έργου. Επομένως στο τέλος της οικονομικής ζωής του έργου, η συνολική απώλεια όγκου νερού για τον ταμιευτήρα θα είναι το άθροισμα των 782 hm^3 του νεκρού όγκου του φράγματος που ούτως ή άλλως δεν χρησιμοποιείται για την αποθήκευση νερού και είναι κενός από φερτά υλικά και των 220 hm^3 των πραγματικών αποθέσεων που όμως καταλαμβάνουν τμήμα του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα.

3 ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκτίμηση της Στερεοαπορροής Υδρολογικών Λεκανών με Συνδυαστική Ανάλυση Υδρολογικών και Γεωμορφολογικών Παραμέτρων» που εκπονήθηκε από τον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ με επιστημονική υπεύθυνη την κ. Δ. Παναγούλια, συγκεντρώθηκαν για κάθε θέση μέτρησης των στερεοπαροχών της ΔΕΗ, οι στερεοϋδρομετρήσεις από τα αντίστοιχα φύλλα καταγραφών για την κατάστρωση των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής καθώς και οι μέσες ημερήσιες παροχές του ίδιου χρονικού διαστήματος για την εξαγωγή των στερεοπαροχών. Οι θέσεις αυτές είναι συνολικά 11, η πλειονότητα των οποίων

ανήκουν στο υδατικό διαμέρισμα της Ηπείρου (βλ. Πίνακας 2). Στις 11 αυτές θέσεις θα προστεθούν και οι τρεις κλάδοι του π. Αχελώου (Αχελώος, Αγραφιώτης και Ταυρωπός/Τρικεριώτης), οι τιμές στερεοαπορροής των οποίων έχουν υπολογιστεί κατά την υδρογραφική αποτύπωση του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

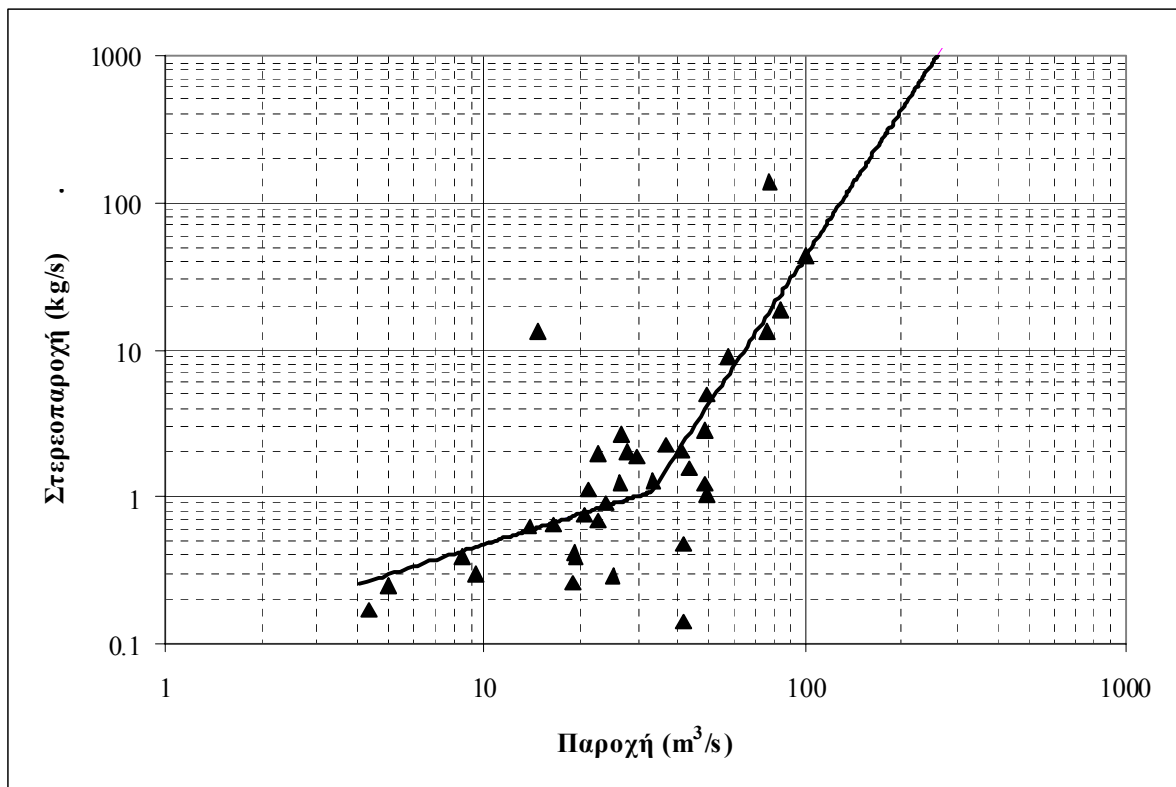
Έτσι σχηματοποιείται ένα δείγμα 14 θέσεων εκτίμησης της στερεοαπορροής στον Ελληνικό φυσικό χώρο, το οποίο είναι και το μεγαλύτερο από αυτά που έχουν παρουσιαστεί από τους κυριότερους μελετητές σε αυτό το θέμα. Οι Κουτσογιάννης & Ταρλά (1987) παρουσίασαν εκτιμήσεις στερεοαπορροής σε 7 θέσεις στερεουδρομετρήσεων. Στελέχη της Διεύθυνσης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων (ΔΑΥΕ) της ΔΕΗ στα πλαίσια της υδρολογικής μελέτης των ΥΗΣ εκτίμησαν τη στερεοαπορροή σε 10 από αυτές τις θέσεις. Αντίστοιχα οι Roulos and Chronis 1997 υπολόγισαν τις αντίστοιχες τιμές σε 7 από τις θέσεις αυτές. Γενικά παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε θέσεις λεκανών όπου η απόκλιση των εκτιμήσεων της στερεοπαροχής με την υιοθέτηση ενιαίων καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής από τις μετρημένες είναι επίσης σημαντική, όπως θα αναλυθεί αμέσως παρακάτω. Οι μεγαλύτερες διαφορές απαντώνται στη λεκάνη του π. Εύηνου στη θέση *Πόρος Ρηγανίου* και του π. Αχελώου στη θέση *Αυλάκι*, όπου οι προηγούμενες εκτιμήσεις δίνουν πολύ μικρές τιμές της στερεοαπορροής. Αντίστοιχα στη θέση *Γ. Πλάκας* του π. Αραχθού οι εκτιμήσεις της ΔΑΥΕ/ΔΕΗ είναι πολύ μεγαλύτερες ενώ στις υπόλοιπες θέσεις υπάρχει μια γενικότερη συμφωνία.

Οι κοινές και ευρέως χρησιμοποιούμενες καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: είναι ενιαίες, με την ίδια κλίση για όλες τις μετρημένες παροχές και δίνονται με τη μορφή εξίσωσης δύναμης $Q_s = aQ^b$, όπου a και b παράμετροι. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση παροχής – στερεοπαροχής παραμένει σταθερή και με τα ίδια χαρακτηριστικά για όλο το εύρος των μετρημένων παροχών. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι αυτό γενικά δεν ισχύει καθόσον είναι διαφορετική η προέλευση των φερτών υλικών, τα οποία μεταφέρονται με την ποτάμια απορροή σε περιόδους πλημμυρικών και βασικών απορροών. Η στερεομεταφορά κατά τη διάρκεια της βασικής απορροής αφορά αποκλειστικά στο φορτίο κοίτης ενώ στη διάρκεια των πλημμυρικών απορροών στο φορτίο απόπλυσης, το οποίο προέρχεται από τη λεκάνη απορροής και όχι από την κοίτη. Επίσης, στις υψηλές απορροές θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες πηγές φερτών υλικών, όπως για παράδειγμα η διάβρωση της όχθης των ποταμών, ή, πολύ περισσότερο, σε διατομές χαλικόστρωτων ποταμών (gravel bed rivers) η αναδιάταξη του στρώματος θωράκισης (armor layer). Στις συνήθεις ποτάμιες παροχές, όπου η διατμητική τάση της ροής είναι μικρότερη της διατμητικής αντοχής των επιφανειακών χαλίκων, τα αμμώδη υλικά που υπόκεινται σε χαμηλότερο στρώμα δεν μετακινούνται επίσης (παρόλο που αν ήταν εκτεθειμένα στις παροχές αυτές θα ήταν πιθανό να είχαμε μετακίνηση) καθόσον «προστατεύονται» από το υπερκείμενο στρώμα των περισσότερο χονδρόκοκκων υλικών. Σε μεγαλύτερες παροχές, κατά τη διάρκεια ενός έντονου πλημμυρικού γεγονότος, όπου η διατμητική τάση της ροής γίνεται ίση και μεγαλύτερη με τη διατμητική αντοχή του επιφανειακού στρώματος, τότε έχουμε μετακίνηση των χαλίκων προς την κατεύθυνση της ροής. Σε αυτό ακριβώς το σημείο, τα κατώτερα λεπτόκοκκα φερτά υλικά βρίσκονται πλέον εκτεθειμένα στις υψηλές παροχές και επαναιωρούνται προς την κατεύθυνση της ροής αυξάνοντας σημαντικά και αιφνίδια τη στερεοπαροχή. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η τεθλασμένη καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής στη θέση *Πόρος Ρηγανίου* του π. Εύηνου. Διαπιστώνεται η πολύ καλή προσαρμογή της καμπύλης στις στερεοπαροχές των υψηλών παροχών. Η προσαρμογή αυτή έχει τεράστια σημασία καθώς είναι σαφές ότι η πλειονότητα της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής συμβαίνει κατά τη διάρκεια λίγων πλημμυρικών επεισοδίων.

Η επιβεβαίωση της ισχύος της τεθλασμένης παλινδρόμησης ως καμπύλης παροχής – στερεοπαροχής έγινε για τις στερεουδρομετρήσεις στη θέση *Αυλάκι* του π. Αχελώου, η οποία βρίσκεται λίγο ανάντη της εκβολής του π. Αχελώου στον ταμιευτήρα Κρεμαστών. Η εφαρμογή διάφορων τύπων καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής που κοινό τους χαρακτηριστικό είχαν την ενιαία κλίση σε όλο το εύρος των μετρημένων παροχών (εκτός εκείνης της τεθλασμένης παλινδρόμησης) παρουσίασαν σημαντική υποεκτίμηση της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής για τη θέση *Αυλάκι*, η οποία θα πρέπει να είναι σχετικά παραπλήσια με την αντίστοιχη του κλάδου του

π. Αχελώου στη θέση του ταμιευτήρα Κρεμαστών (βλ. Πίνακας 2). Η εφαρμογή της τεθλασμένης παλινδρόμησης στα δεδομένα παρουσίασε σημαντική σύγκλιση με τη μετρημένη στερεοαπορροή στη θέση του ταμιευτήρα (Koutsoyiannis, 2000, Zarris and Koutsoyiannis, 2005).

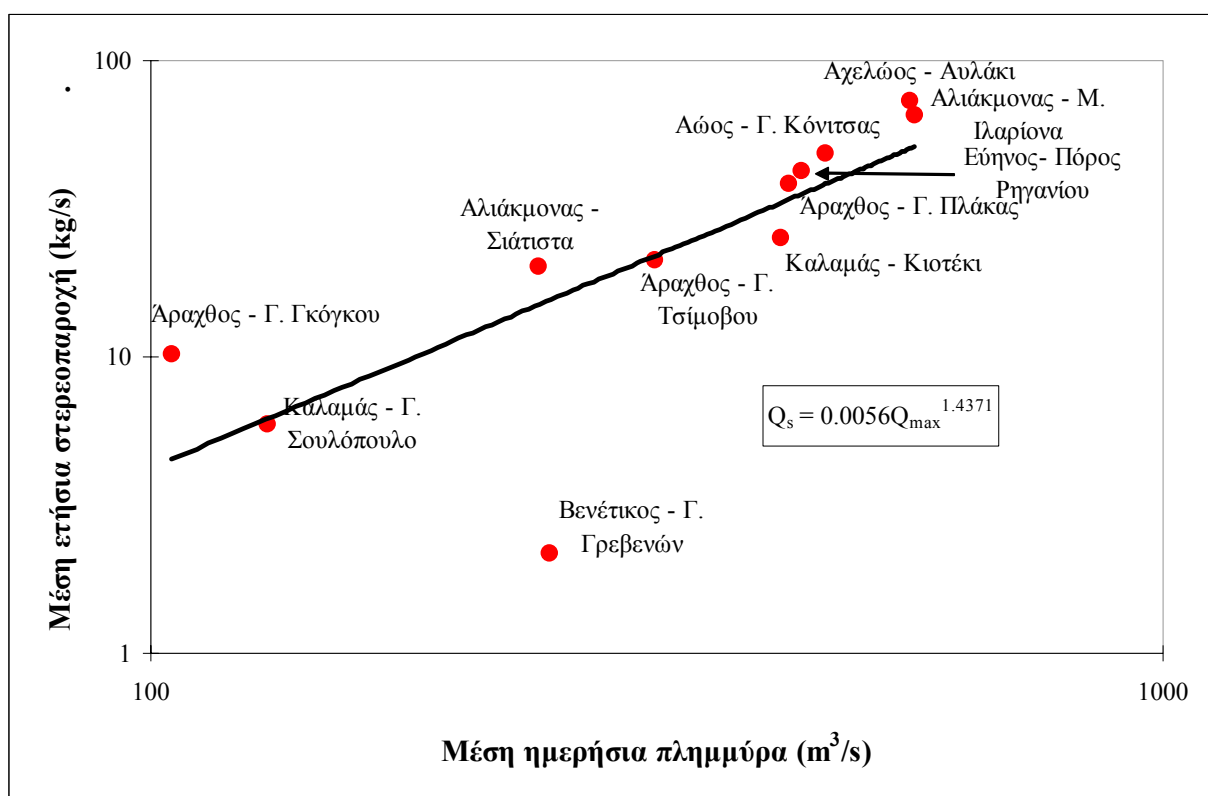
Για κάθε μια από αυτές τις θέσεις υπολογίστηκαν δύο παράμετροι της απορροής: η μέση ετήσια απορροή (Q_{av}) και η μέση ετήσια πλημμύρα (Q_{max}) και υπολογίστηκαν απλές εξισώσεις παλινδρόμησης μορφής δύναμης με τη στερεοαπορροή και τη στερεοπαροχή. Η μέση ετήσια πλημμύρα υπολογίζεται ως η μέση τιμή των μέγιστων ημερήσιων παροχών για όλα τα διαθέσιμα υδρολογικά έτη δεδομένων. Το μέγεθος αυτό δηλώνει τη διαβρωτική ικανότητα από την ισχύ ροής σε ακραία πλημμυρικά γεγονότα. Επίσης σχέσεις παλινδρόμησης υπολογίστηκαν με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής, με το συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους (όπως υπολογίζεται στα πλαίσια της Παγκόσμιας Εξίσωσης της Εδαφικής Απώλειας), κ.ά. Η σημαντικότερη συσχέτιση της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής ($R^2=0.85$) παρουσιάζεται με τη μέση ετήσια πλημμύρα (βλ. Εικόνα 4) ενώ πολύ μικρότερη συσχέτιση επιτυγχάνεται με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ($R=0.49$) ενώ εντύπωση προκαλεί η σχεδόν μηδενική συσχέτιση με το συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους κυρίως για το λόγο ότι όλες οι εξεταζόμενες λεκάνες απορροής παρουσιάζουν περίπου κοινά γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά αφού εντοπίζονται αποκλειστικά στη ΒΔ Ελλάδα και άλλες παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο τη στερεοαπορροή.



Εικόνα 3: Η τεθλασμένη παλινδρόμηση ως έκφραση των καμπυλών παροχής – στερεοπαροχής στη θέση Πόρος Ρηγαίου του π. Εύηνου

Πίνακας 2: Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στον Ελληνικό χώρο

α/α	Λεκάνη απορροής	Θέση	Επιφάνεια (km ²)	Μέση ετήσια απορροή Q _{av} (m ³ /s)	Μέση ετήσια στερεοπαροχή Q _s (kg/s)	Μέση ετήσια στερεοαπορροή S _y (t/km ²)
1	Αχελώος	Αυλάκι	1355	50.2	73.3	1705.5
2	Αχελώος	τ. Κρεμαστών	1733	-	66.0	1184.6
3	Αγραφιώτης	τ. Κρεμαστών	320	-	20.9	2034.8
4	Ταυρωπός	τ. Κρεμαστών	1239	-	19.5	489.4
5	Εύηνος	Πόρος Ρηγανίου	914	25.3	42.5	1447.3
6	Άραχθος	Γ. Τσίμοβου	640	18.7	21.3	1049.5
7	Άραχθος	Γ. Γκόγκου	203	11.4	10.3	1592.1
8	Άραχθος	Γ. Πλάκας	970	36.1	38.4	1249.0
9	Καλαμάς	Γ. Σουλόπουλο	660	22.7	5.9	279.6
10	Καλαμάς	Κιοτέκι	1481	48.9	25.4	532.6
11	Αώος	Γ. Κόνιτσας	706	24.9	48.9	2150.7
12	Αλιάκμονας	Γ. Γρεβενών	847	17.0	2.2	81.3
13	Αλιάκμονας	Σιάτιστα	2724	22.8	20.2	233.3
14	Αλιάκμονας	Μ. Ιλαρίονα	5005	48.7	65.8	414.6



Εικόνα 4: Συσχέτιση της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής με τη μέση μέγιστη ημερήσια πλημμύρα

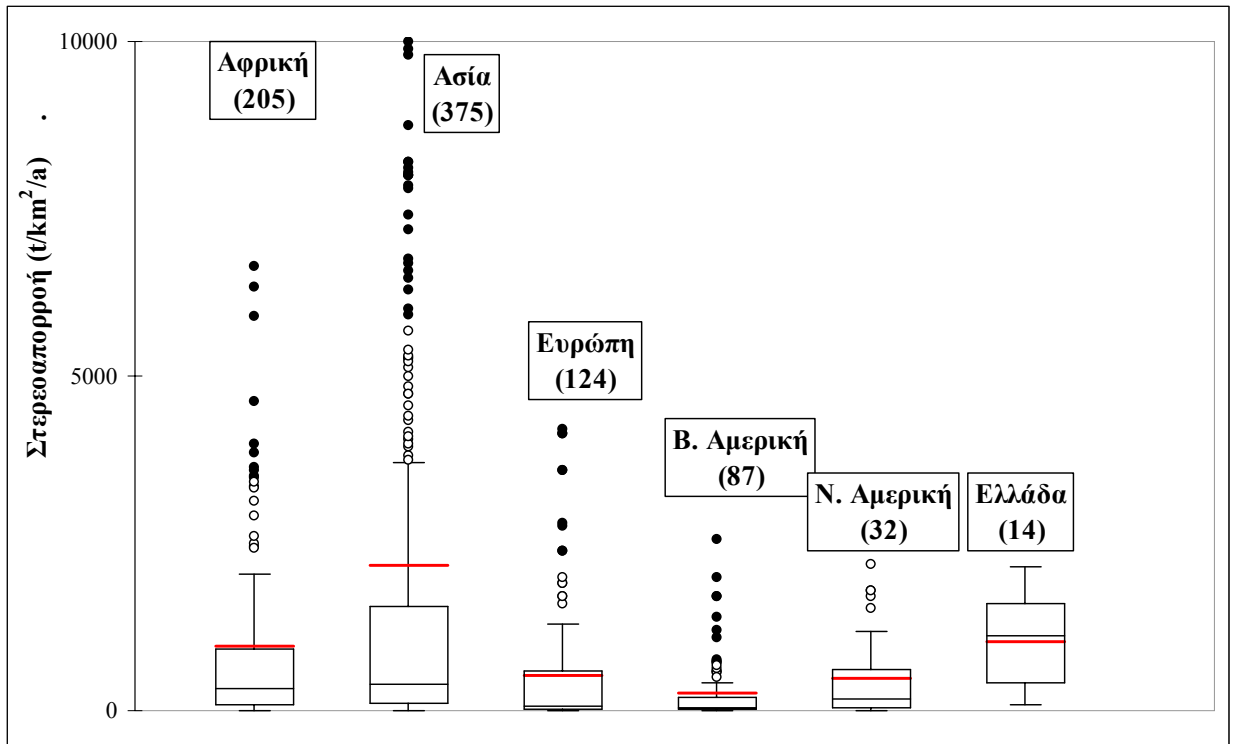
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω έγινε δυνατή (α) η εκτίμηση του πραγματικού ρυθμού πρόσχωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών από τις απορροές του π. Αχελώου και των παραποτάμων του και επομένως της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής των υδρολογικών λεκανών που εκβάλλουν στον ταμιευτήρα, και (β) η εκτίμηση της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής σε συνολικά 14 θέσεις μέτρησης που εντοπίζονται στη ΒΔ Ελλάδα από τα δεδομένα στερεοϋδρομετρήσεων της ΔΕΗ. Σημειώνεται ότι εδώ και τουλάχιστο μια δεκαετία δεν λαμβάνεται πλέον καμία τιμή της στερεοπαροχής πουθενά στη χώρα.

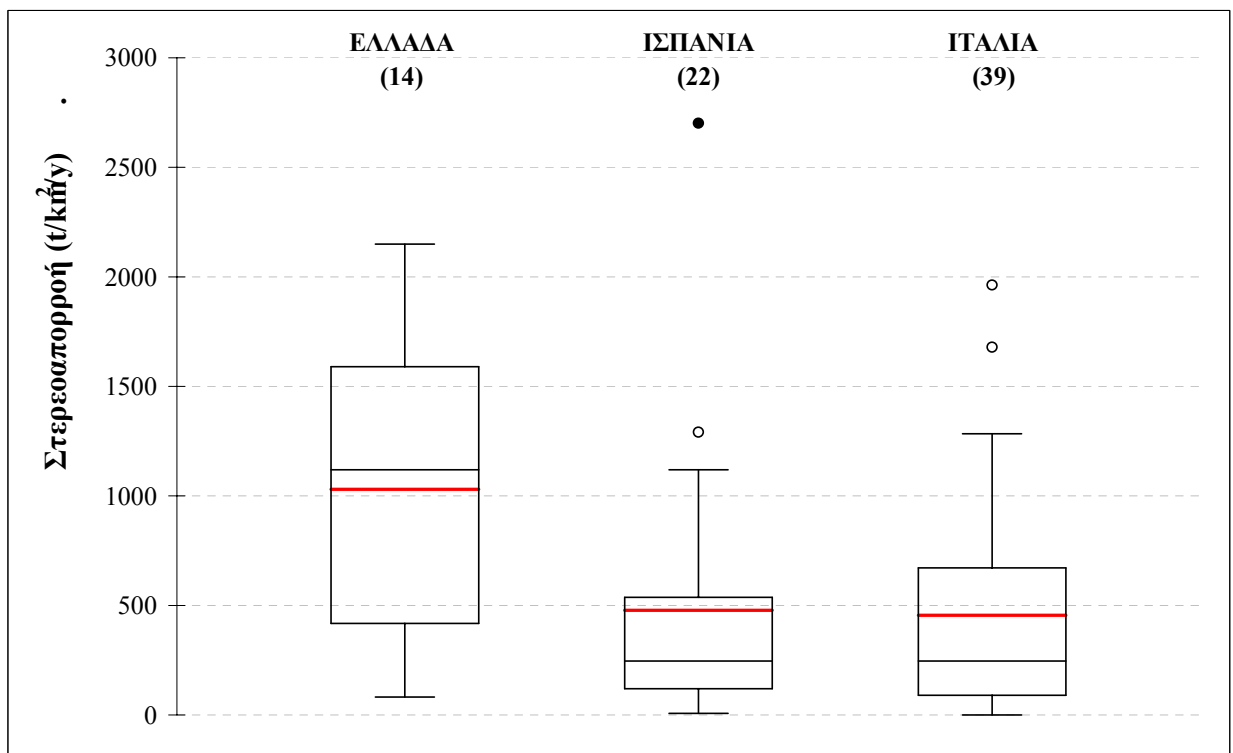
Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται οι συνοπτικές παραστάσεις δείγματος (boxplots) από διάφορες αναφορές εκτιμήσεων στερεοαπορροής σε 840 λεκάνες απορροής παγκοσμίως, από τις οποίες οι 375 βρίσκονται στην Ασία, οι 205 στην Αφρική, οι 124 στην Ευρώπη (χωρίς της Ελλάδας), οι 87 στη Β. Αμερική και οι 32 στη Ν. Αμερική. Είναι προφανές ότι οι υψηλότερες τιμές της στερεοαπορροής απαντώνται στην Ασία με μέση τιμή περίπου στα 2000 t/km²/a. Επίσης η στερεοαπορροή σε αρκετές λεκάνες απορροής στην Ασία ξεπερνά την τιμή των 6000 t/km²/a. Αυτό εξηγείται από την ύπαρξη εκτεταμένων λεκανών απορροής (π.χ. π. *Yangtze* στην Κίνα) με σημαντική εμφάνιση εκτεταμένων αποθέσεων χαλαρών ιζημάτων. Οι εκτιμώμενες τιμές της στερεοαπορροής στην ΒΔ Ελλάδα είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές που απαντώνται για την υπόλοιπη Ευρώπη, κυρίως στη Β. Ευρώπη, αλλά και στην Αμερική. Αυτό συμβαίνει αφενός γιατί οι λεκάνες που εξετάστηκαν εδώ αποτελούνται όλες κατά κύριο λόγο από φλυσικά πετρώματα, που είναι δεκτικά στη διάβρωση, αλλά και η σημαντική τεκτονική τους δραστηριότητα που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αυξημένη στερεοαπορροή.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται οι συνοπτικές παραστάσεις της στερεοαπορροής για τρεις μεσογειακές χώρες, δηλαδή την Ισπανία (με εκτιμήσεις από 22 λεκάνες απορροής), την Ιταλία (με 34 λεκάνες απορροής) και τη ΒΔ Ελλάδα όπως εκτιμήθηκαν εδώ. Διαπιστώνεται ότι οι εκτιμήσεις στερεοαπορροής στη ΒΔ Ελλάδα είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις δύο άλλες χώρες. Η σημαντική διαφορά και κυρίως οι λόγοι που επιδρούν σε αυτή θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Αυτό συμβαίνει αφενός γιατί το μικρό δείγμα σε ό,τι αφορά τις Ελληνικές συνθήκες δεν επιτρέπει αυθαίρετες γενικεύσεις και αφετέρου οι εκτιμήσεις στερεοαπορροής κυρίως στην Ισπανία προέρχονται από μετρήσεις των αποθέσεων φερτών υλικών σε σχετικά μικρούς ταμιευτήρες που ενδεχομένως να εισάγουν σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό της στερεοαπορροής της ανάντη υδρολογικής λεκάνης, κυρίως λόγω της εκτίμησης της ικανότητας κατακράτησης των ταμιευτήρων.

Η προσπάθεια αξιόπιστης εκτίμησης της στερεοαπορροής στην Ελλάδα και όχι μόνο στο Βορειοδυτικό της τμήμα θα πρέπει να ενταθεί στο χρονικό διάστημα που ακολουθεί. Δυστυχώς η Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά (Οδηγία 2000/60/ΕΕ) δεν συμπεριλαμβάνει τις διαδικασίες διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης ως διακριτό τμήμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων με αποτέλεσμα να συνεχίζεται η μη καταγραφή της στερεοαπορροής στη χώρα μας. Το πρόβλημα όμως θα εντείνεται με την συνεχιζόμενη (και με αυξανόμενους ρυθμούς) κατασκευή μικρών ταμιευτήρων κυρίως σε νησιωτικές περιοχές. Οι ταμιευτήρες αυτοί σχεδιάζονται στην πλειονότητα των περιπτώσεων χωρίς καν να υπολογιστεί η διάβρωση και η στερεοαπορροή της ανάντη λεκάνης απορροής.



Εικόνα 5: Σύγκριση των εκτιμήσεων στερεοαπορροής στην Ελλάδα σε σχέση με μια εκτεταμένη βάση δεδομένων από τον υπόλοιπο πλανήτη



Εικόνα 6: Σύγκριση της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής για τρεις Μεσογειακές χώρες

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το άρθρο αυτό αποτελεί προδημοσίευση της διδακτορικής διατριβής του συγγραφέα που προβλέπεται σύντομα να παρουσιαστεί στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Ο συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει τον Αναπληρωτή Καθηγητή και επιβλέποντα της διατριβής κ. Δ. Κουτσογιάννη καθώς επίσης τη Λέκτορα κ. Δ. Παναγούλια, τη Δρ. Γεωμορφολογίας κ. Ε. Λυκούδη καθώς επίσης και τη ΔΑΥΕ/ΔΕΗ για την παροχή των δεδομένων στερεοπαροχής στη ΒΔ Ελλάδα.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Central Water Commission, Experience in sedimentation of Indian reservoirs and current scenario. *Proceedings of the International Conference on Reservoir Sedimentation*, Volume 1, pp. 53-72, 1996.

Koutsoyiannis, D., Broken line smoothing: a simple method for interpolating and smoothing data series, *Environmental Modelling & Software*, 15, 139-149, 2000.

Lara, J.M. & E.L. Pemberton, *Initial Unit Weight of Deposited Sediments*, 1965.

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

Poulos, S.E. & G.T. Chronis, The importance of the river systems in the evolution of the Greek coastline, In: *Transformations and evolution of the Mediterranean coastline*, Bulletin de l' Institut Oceanographique, Monaco, 75-96, 1997.

Rooseboom, A., River sediment problems in South Africa. *Proceedings of the Fifth International Symposium on River Sedimentation*, Karlsruhe, 1992.

Verstraeten, G. & J. Poessen, Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 375-394, 2000.

Xiaoqing, Y, *Manual on sediment management and measurement*, Operational Hydrology Report No. 47, World Meteorological Organization, Geneva, 2003.

Zarris, D., and D. Koutsoyiannis, Evaluating sediment yield estimations from large-scale hydrologic systems using the rating curve concept, *RMZ-Materials and Geoenvironment*, Vol. 52, No. 1, 157-159, 2005.

Assessment of sediment deposits in Kremasta Reservoir and sediment yield estimates in NorthWestern Greece

D. Zarris

M.Sc. Civil Engineer, Ph.D. Candidate, Department of Water Resources and the Environment, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens.

Key Words: Sediment yield, reservoir siltation, Kremasta Reservoir, NorthWestern Greece

ABSTRACT: In the first part of this research paper the analysis of the methodology for the estimation of the suspended sediment yield of the Acheloos R. at Kremasta Reservoir is made. This estimation is accomplished by the hydrographic survey and the volumetric computation of the deposited sediments of the reservoir. In the second part a methodology of computation of the mean annual sediment yield in various cross sections in NW Greece is presented. This analysis is done using the broken line interpolation procedure as a suspended sediment rating curve considering the results from the first part. A comparison of the present estimates with previous ones from various researchers is carried out and regression relations are formulated with hydrologic characteristics of the specific catchments. This methodology will give the chance for the estimation of sediment yield for designing the dead volumes of future reservoirs that will consider real data from catchments in NW Greece.