

Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα

Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, Κ. ΤΑΡΛΑ

Περίληψη

Η εργασία αυτή είναι μια προσπάθεια εξαγωγής ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων από τα διαθέσιμα στοιχεία μετρήσεων στερεοπαροχής στην Ελλάδα και περιλαμβάνει: α) Συνοπτική αναφορά στο καθεστώς των μετρήσεων και τις ακολουθούμενες μεθοδολογίες επεξεργασίας και αξιοποίησης τους. β) Εξέταση της επίδρασης των υδρολογικών, κλιματικών, τοπογραφικών και γεωλογικών παραμέτρων στην ποσότητα φερτών υλικών (στερεοαπορροή), με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων σε ποταμούς της βορειοδυτικής Ελλάδας, με παράλληλη ερμηνεία των εμφανιζόμενων αλληλεπιδράσεων. γ) Παραγωγή με στατιστικές μεθοδολογίες μιας απλής εμπειρικής σχέσης, κατάλληλης για εκτιμήσεις μέσης ετήσιας στερεοαπορροής, από στοιχεία υδρολογίας και γεωλογίας της λεκάνης απορροής.

Sediment Yield Estimations in Greece

D. KOUTSOYANNIS, K. TARLA

Abstract

This study is an attempt to draw conclusions from the available sediment measurements data in Greece, and it includes: a) A brief report on the regime of sediment measurements in Greece, as well as the consequential methods of data processing and utilization. b) Investigation of the effects of hydrological, climatic, topographical and geological factors on the sediment yield. This has been based on the data of gauging stations in northwestern Greece; there is also an attempt to interpret the interference of the above factors. c) Derivation by statistical methods of an empirical formula for sediment yield estimation from hydrological and geological data of watersheds.

Υποβλήθηκε: 3.11.86
Έγινε δεκτή: 20.1.87

Submitted: Nov. 3, 1986
Accepted: Jan. 20, 1987

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδροδυναμική ανάλυση του φαινομένου της μετακίνησης των φερτών υλών από το νερό, έχει δώσει μία πληθώρα από εξισώσεις στερεοπαροχής, βασισμένες είτε σε θεωρητική ανάλυση των μηχανισμών κίνησης, είτε σε εργαστηριακά δεδομένα, είτε σε συνδυασμό των παραπάνω. Αυτές οι εξισώσεις υδροδυναμικού (ή υδραυλικού) τύπου, όμως, σπάνια δίνουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις όταν εφαρμόζονται σε φυσικά υδατορεύματα, και αυτό αποδίδεται σε δύο βασικές αδυναμίες τους: (α) στο γεγονός ότι η κατάρτιση ή η επαλήθευσή τους στηρίχθηκε σε δεδομένα εργαστηρίου και (β) στην αδυναμία τους να συμπεριλάβουν βασικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής, που επηρεάζουν σαφώς την διαδικασία τροφοδοσίας του υδατορεύματος σε "πρώτη ύλη", δηλαδή σε προϊόντα εδαφικής διάβρωσης.

Μία άλλη θεώρηση του προβλήματος, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί υδρολογική, είναι πιο αποτελεσματική, παρόλο που συχνά παραλείπει την εξέταση των μηχανισμών μεταφοράς. Με τη θεώρηση αυτή το πρόβλημα της τροφοδοσίας του υδατορεύματος σε πρώτη ύλη, είτε αντιμετωπίζεται με άμεσο τρόπο, είτε ξεπερνιέται, καταφεύγοντας σε μετρήσεις στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, ή άλλη με παρόμοιες υδρολογικές και φυσικές συνθήκες.

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία κατηγορία υπολογιστικών μεθόδων με βάση το μέγεθος διάβρωσης, που στηρίζονται στην Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - ΠΒΕΑ (Universal Soil Loss Equation - USLE), ή σε κάποια παραλλαγή της (για την ακριβή έννοια του όρου "εδαφική απώλεια" βλέπε παράγραφο 2). Η ΠΒΕΑ είναι μία εξίσωση κατάλληλη για τον προσδιορισμό μέσω ετήσιων τιμών της εδαφικής απώλειας σε εδαφικές εκτάσεις με ενιαία τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά (π.χ. αγρούς ενιαίας κλίσης και ενιαίου τύπου εδάφους) (βλέπε Wischmeier and Smith, 1978, Kirkby and Morgan, 1980 και Vannoni, 1977). Είναι όμως δυνατό η μέθοδος να εφαρμοστεί και σε φυσικές λεκάνες απορροής με ποικιλία χαρακτηριστικών, αφού γίνει κατάλληλος διαχωρισμός της έκτασης σε επιμέρους τμήματα ενιαίων χαρακτηριστικών. Οι ποσότητες φερτών υλικών που προέρχονται από διάβρωση κοίτης του υδρογραφικού δικτύου υπολογίζονται χωριστά, ενώ λαμβάνονται υπόψη και οι ποσότητες φερτών που αποτίθενται σε ενδιάμεσες θέσεις της λεκάνης, με την εφαρμογή ενός πολλαπλασιαστικού συντελεστή, μικρότερου από 1, του συντελεστή στερεοαπορροής (βλ. παραγρ. 2). Πάντως η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου περιορίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής (Kirkby and Morgan, 1980 και Williams and Berndt, 1973).

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε δύο κατηγορίες μεθόδων εκτίμησης

ποσοτήτων φερτών υλικών, που συνίστανται είτε σε εκτίμηση από άμεσες μετρήσεις στερεοπαροχής, εφόσον έχουν εκτελεσθεί τέτοιες στη συγκεκριμένη διατομή, που ενδιαφέρει, είτε σε εκτίμηση από εμπειρικές στατιστικές σχέσεις, βασισμένες σε μετρήσεις στερεοπαροχής σε άλλες θέσεις, στην ίδια λεκάνη απορροής, ή σε άλλη κοντινή λεκάνη με παραπλήσιες φυσικές συνθήκες (Kirkby and Morgan, 1980, και Flaxman, 1972).

Η εργασία αυτή αφορά την παραγωγή μίας εμπειρικής σχέσης, κατάλληλης για ποσοτική εκτίμηση φερτών υλικών, που βασίστηκε σε μετρήσεις στερεοπαροχής σε ποτάμια της βορειοδυτικής Ελλάδας. Παράλληλα γίνεται αναφορά στο καθεστώς των μετρήσεων στερεοπαροχής στην Ελλάδα και στις μεθοδολογίες επεξεργασίας και αξιοποίησης των μετρήσεων.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$\alpha = G/\hat{G}$	= απόκλιση εκτίμησης στερεοπαροχής
γ	= γεωλογικός συντελεστής
ϵ	= ειδική κινητική ενέργεια βροχής
E	= κινητική ενέργεια βροχής
κ	= μέτρο διαβρωσιμότητας πετρώματος
a	= αριθμητική σταθερά
b	= αριθμητική σταθερά
c, c', c_1, c_2	= αριθμητικές σταθερές
F	= έκταση λεκάνης
G	= στερεοαπορροή (σε αιώρηση)
\hat{G}	= εκτίμηση στερεοαπορροής (σε αιώρηση)
$G_1 = G/\gamma$	= ειδική στερεοαπορροή
I	= ένταση βροχής
I_{30}	= μέγιστη ένταση βροχής 30λέπτου
L	= μήκος κύριου κλάδου ποταμού
L_g	= κεντροβαρικό μήκος ποταμού
n, n'	= αριθμητικές σταθερές
P	= ύψος βροχής
Q	= παροχή

Q_s	= στερεοπαροχή
R	= συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής (παρ. 6.1)
R	= ισοδύματο ύψος απορροής (υπόλοιπο κείμενο)
S_λ	= φαινόμενη κλίση λεκάνης
S_π	= μέση κλίση ποταμού
T	= θερμοκρασία (παρ. 6.1 και σχήμα 5)
T	= χρονική περίοδος (παρ. 5.2)
$t, \Delta t$	= χρονική διάρκεια

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ - ΟΡΟΛΟΓΙΑ - ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με την υδρολογική οπτική, οι φερτές ύλες που μετακινούνται σε ένα υδατόρευμα εξετάζονται σαν προϊόντα της διαδικασίας της διάβρωσης που προκαλεί η κίνηση του νερού. Υπάρχουν και άλλες μορφές διάβρωσης που προέρχονται από δράση άλλων στοιχείων, (π.χ. αιολική), αλλά δεν ενδιαφέρουν άμεσα την υδρολογία. Η διάβρωση έχει δύο βασικές συνιστώσες: την εδαφική διάβρωση και την διάβρωση των υδατορευμάτων. Στην πρώτη συγκαταλέγονται η επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), που είναι το αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης της ενέργειας της βροχής και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής ροής, η διάβρωση ρυακιών (rill erosion) που προκαλείται από τοπικές συγκεντρώσεις ασταθούς μορφής της επιφανειακής απορροής και η διάβρωση χαντακιών (gully erosion) που οφείλεται στο νερό που τρέχει σε σαφώς σχηματισμένη κοίτη (χαντάκι).

Για την ποσοτική περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης χρησιμοποιούνται οι πιο κάτω όροι:

- εδαφική απώλεια (soil loss) είναι η ποσότητα εδαφικού υλικού που τελικά απομακρύνεται από μία εδαφική έκταση σε δεδομένο χρόνο. Περιγράφει τη διαφορά της ποσότητας εδαφικού υλικού που διαβρώθηκε μείον την ποσότητα που αποτέθηκε ξανά στην ίδια εδαφική έκταση και εκφράζεται σε μονάδες μάζας ανά επιφάνεια.
- στερεοαπορροή ή ποσότητα φερτών (sediment yield) είναι η ποσότητα των φερτών υλικών που διέρχονται από μία διατομή αναφοράς (π.χ. διατομή ποταμού) σε μία καθορισμένη χρονική διάρκεια. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας και συχνά ανάγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, ανάντη της διατομής αναφοράς (μάζα/επιφάνεια).

- συντελεστής στερεοαπορροής (sediment delivery ratio) είναι ο λόγος της στερεοαπορροής προς την ποσότητα που έχει διαβρωθεί στην ανάντη της διατομής αναφοράς λεκάνη απορροής. Περιγράφει την απομείωση των φερτών που μετακινούνται, εξαιτίας ενδιάμεσων αποθέσεων στη λεκάνη απορροής και εκφράζεται με ένα αδιάστατο αριθμό ή ποσοστό.

Ο όρος "στερεοαπορροή" δεν είναι ταυτόσημος με τον όρο "στερεοπαροχή" (sediment discharge), αφού ο δεύτερος περιγράφει το στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς των φερτών που παρατηρείται στη διατομή αναφοράς (μονάδες: μάζα/χρόνος ή βάρος/χρόνος).

Το σύνολο των φερτών υλικών που κάποια καθορισμένη στιγμή μετακινείται από τη ροή, αποδίδεται με τον όρο "φορτίο" (load), που εκφράζεται σε μονάδες μάζας ή βάρους. Το φορτίο ενός υδατορεύματος ταξινομείται με τους εξής τρόπους:

- α) Με βάση το μηχανισμό μεταφοράς, διακρίνεται σε
 - φορτίο σε σύρση (bed load) που κινείται στην κοίτη ή πολύ κοντά σ' αυτή, όπου επικρατεί ο μηχανισμός σύρσης, και
 - φορτίο σε αιώρηση (suspended load), που κινείται πάνω από την κοίτη, όπου επικρατεί ο μηχανισμός της αιώρησης.
- β) Με βάση την προέλευση του υλικού, διακρίνεται σε
 - φορτίο υλικού κοίτης (bed sediment load), που προέρχεται κύρια από την διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος και μετακινείται και με σύρση και με αιώρηση, και
 - φορτίο χωμάτων ή φορτίο απόπλυσης (wash load) που προέρχεται κύρια από την διάβρωση της λεκάνης απορροής. Το υλικό αυτό είναι γενικά πολύ πιο λεπτόκοκκο από το υλικό της κοίτης (ιλύς-άργιλος) και μετακινείται σχεδόν αποκλειστικά με το μηχανισμό αιώρησης.

Ανάλογη ταξινόμηση γίνεται και στα μεγέθη της στερεοπαροχής και στερεοαπορροής.

Τέλος, σχετικοί με την ποσοτική περιγραφή του φορτίου είναι και οι όροι "συγκέντρωση" (concentration), που εκφράζει την μάζα των φερτών υλικών στη μονάδα όγκου του νερού, και "συγκέντρωση στερεοπαροχής" (sediment discharge concentration), που είναι το πηλίκο της στερεοπαροχής προς την παροχή σε μία δεδομένη διατομή ενός υδατορεύματος.

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Αν και έχουν αναπτυχθεί τελευταία μέθοδοι για την αυτόματη καταγραφή της στερεοπαροχής σε συνεχή χρόνο, το πιο διαδομένο καθεστώς μετρήσεων είναι οι σποραδικές μετρήσεις στερεοπαροχής με ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής του υδατορεύματος. Το καθεστώς αυτό ακολουθείται κατ' αποκλειστικότητα και στον ελληνικό χώρο.

Στην Ελλάδα εκτελούνται ή έχουν εκτελεσθεί στο παρελθόν συστηματικές μετρήσεις στερεοπαροχής κυρίως από τη ΔΕΗ σε περιορισμένες θέσεις των κυριότερων ποταμών (Αλιάκμονας, Αχελώος, Άραχθος, Καλαμάς, Αώος), και μόνο σε περιπτώσεις που το επέβαλαν ανάγκες προγραμματισμού και μελέτης σοβαρών έργων, και κυρίως φραγμάτων. Μεμονωμένες μετρήσεις που καλύπτουν μικρές χρονικές περιόδους έχουν γίνει και από το Υπουργείο Δημόσιων Έργων, ή από μελετητές συγκεκριμένων έργων, όπως οι μετρήσεις του αειμνήστου Ν. Αλτηγού στο Στρυμόνα, για τις ανάγκες της μελέτης διευθέτησης του ποταμού, το 1956 (βλ. Αλτηγός, 1970). Σε όλες τις περιπτώσεις οι μετρήσεις αναφέρονται στο φορτίο σε αιώρηση, ενώ για το φορτίο σε σύρση ούτε μετρήσεις έχουν γίνει (που γενικά παρουσιάζουν δυσκολίες), αλλά ούτε έχουν ληφθεί στοιχεία που να επιτρέπουν μία ορθολογική εκτίμησή του.

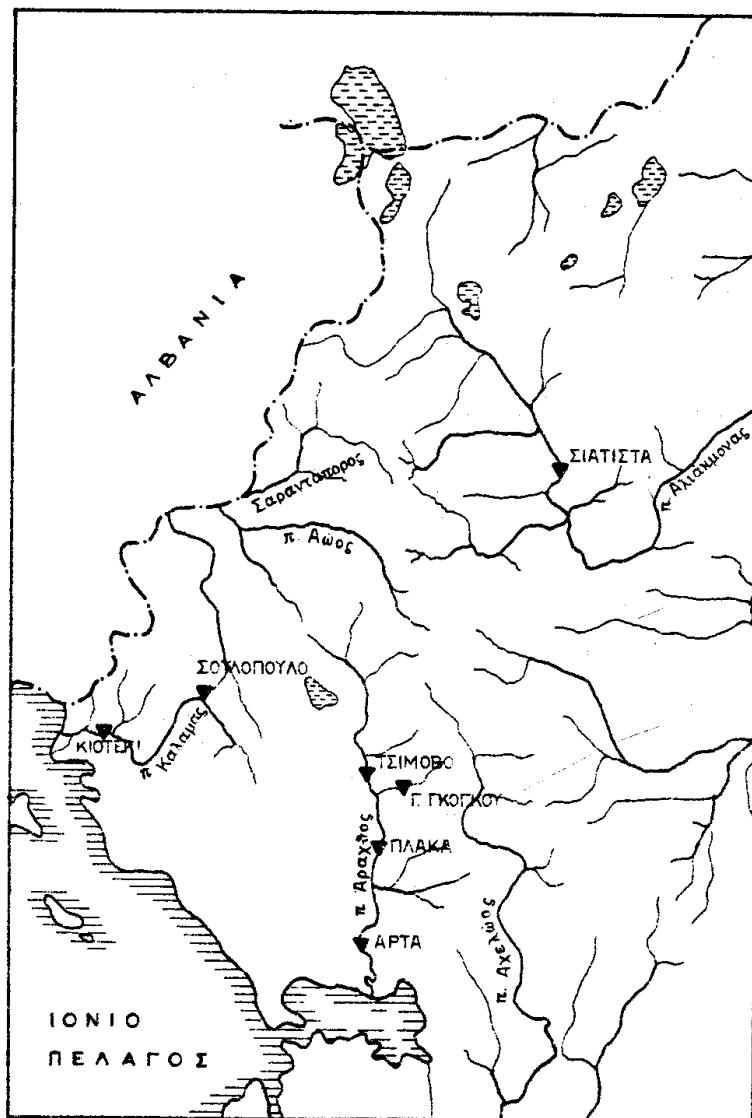
Οι μετρήσεις της ΔΕΗ, στις οποίες στηρίχθηκε η εργασία αυτή, γίνονται με συχνότητα από 2 φορές το μήνα μέχρι 1 φορά στο δίμηνο, άν και εμφανίζονται και ολόκληρα έτη χωρίς καμμία μέτρηση. Γενικά χρησιμοποιούνται δειγματολήπτες ολοκληρωτικοί ως προς το ύψος, και έτσι δεν μπορεί να αποδοθεί η εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης ως προς το ύψος. Μετά από μετρήσεις των δειγμάτων στο εργαστήριο προκύπτει η συγκέντρωση στερεοπαροχής με αιώρηση, και στη συνέχεια η στερεοπαροχή με αιώρηση.

Οι μετρήσεις αυτές όπως περιγράφηκαν μπορούν να χαρακτηριστούν επαρκείς ως ένα βαθμό για εκτιμήσεις της στερεοπαροχής με αιώρηση, αλλά δεν δίνουν ολοκληρωμένη εικόνα του φαινομένου, αφού δεν συλλέγονται πληροφορίες για άλλα βασικά στοιχεία, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση του φορτίου αιώρησης και του υλικού κοίτης, η κατανομή της συγκέντρωσης ως προς το ύψος, η θερμοκρασία του νερού και η κατά μήκος κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

4. ΒΑΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

4.1. Μετρήσεις στερεοπαροχής

Η εργασία αυτή στηρίχθηκε σε στοιχεία μετρήσεων 7 σταθμών σε



ΣΧΗΜΑ 1: Θέσεις σταθμών μέτρησης στερεοπαροχής

3 ποταμούς της Βοραιοδυτικής Ελλάδας. Συγκεκριμένα πρόκειται για τους ποταμούς Άραχθο (θέσεις Γκόγκο, Τσίμοβο, Πλάκα, Άρτα), Καλαμά (θέσεις Κιοτέκι, Σουλόπουλο) και Αλιάκμονα (θέση Σιάτιστα). Οι θέσεις των σταθμών φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 1. Οι εκτάσεις των λεκανών απορροής κυμαίνονται από 204Km^2 μέχρι 2725Km^2 . Ας σημειωθεί ότι οι παραπάνω σταθμοί αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό σταθμών με συστηματικές μετρήσεις στην Ελλάδα. Η αξιοποίηση των μετρήσεων στερεοπαροχής για την παραγωγή της στερεοαπορροής σε ετήσια βάση περιγράφεται στην παράγραφο 5.

4.2. Μετρήσεις παροχής.

Σε όλους τους παραπάνω σταθμούς υπάρχουν στοιχεία ημερήσιας παροχής, βασισμένα σε καταγραφή της στάθμης και υδρομετρήσεις. Τα στοιχεία αυτά καλύπτουν ή υπερκαλύπτουν την περίοδο μετρήσεων στερεοπαροχής. Το μέσο ετήσιο ισοδύναμο ύψος απορροής, όπως προέκυψε για την κάθε λεκάνη απορροής, και για την περίοδο όπου υπάρχουν μετρήσεις στερεοαπορροής, φαίνεται στον πίνακα 1.

4.3. Μέσες βροχοπτώσεις λεκάνης

Όλες οι λεκάνες απορροής που εξετάστηκαν καλύπτονται από επαρκές δίκτυο βροχομετρικών ή βροχογραφικών σταθμών, που ανήκουν στην πλειοψηφία τους στη ΔΕΗ. Την εργασία αυτή δεν ενδιαφέρουν οι σημειακές βροχοπτώσεις, αλλά οι επιφανειακά μέσες τιμές τους σε ετήσια βάση, προκειμένου αυτές να συσχετισθούν με το αντίστοιχο μέγεθος στερεοαπορροής. Οι τιμές αυτές δεν υπολογίστηκαν άμεσα στην εργασία αυτή, αλλά ελήφθησαν από παλιότερες μελέτες της ΔΕΗ για τις υπολεκάνες Αράχθου και από ερευνητικά προγράμματα του ΕΜΠ για τις υπολεκάνες του Καλαμά και Αλιάκμονα. Σε ορισμένες περιπτώσεις έγιναν συμπληρώσεις ή επεκτάσεις των τιμών με τις γνωστές μεθόδους. Τα μέσα ετήσια επιφανειακά ύψη βροχής των διαφόρων υπολεκανών φαίνονται στον πίνακα 1.

4.4. Κλιματικά δεδομένα

Η μόνη κλιματική παράμετρος που εξετάστηκε, σε συσχέτιση με την στερεοαπορροή είναι η θερμοκρασία. Οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες των λεκανών εκτιμήθηκαν με βάση τις μετρήσεις θερμοκρασίας των σταθμών Ιωαννίνων, Άρτας και Κοζάνης, που μας παραχώρησε η ΕΜΥ, με αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της κάθε λεκάνης απορροής και φαίνονται στον πίνακα 1.

4.5. Τοπογραφικά δεδομένα

Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν την εργασία αυτή, ήτοι εκτάσεις λεκανών, μήκη ποταμών, χαρακτηριστικά υψόμετρα και μέσες κλίσεις, ελήφθησαν από χάρτες κλίμακας 1:200.000 της Ε.Σ.Υ.Ε., και φαίνονται στον πίνακα 1.

4.6. Γεωλογικά δεδομένα

Τα γεωλογικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, της ΔΕΗ και του ερευνητικού προγράμματος Αλιάκμονα της ΓΓΕΤ (Καθηγητής Θ. Ξανθόπουλος). Τα ποσοστά εμφάνισης των διαφόρων κατηγοριών πετρωμάτων στην κάθε λεκάνη απορροής, φαίνονται στον πίνακα 1.

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ

5.1. Η καμπύλη μεταφοράς φερτών

Η καμπύλη μεταφοράς φερτών (sediment transport curve) είναι η γραφική ή αναλυτική έκφραση της σχέσης στερεοπαροχής-παροχής σε μία ορισμένη διατομή ενός υδατορεύματος. Η καθιέρωσή της οφείλεται στην αρκετά καλή συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στα δύο μεγέθη, του δικαιολογείται από το γεγονός ότι η παροχή ενός υδατορεύματος αντιπροσωπεύει και τις υδραυλικές παραμέτρους της ροής, αλλά και τις υδρολογικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής.

Η εν λόγω σχέση καταρτίζεται με βάση τις ταυτόχρονες μετρήσεις στερεοπαροχής (Q_s) και παροχής (Q). Πάντως τα σημεία ($Q-Q_s$) παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Οι τιμές της στερεοπαροχής έχουν αποκλίσεις που συνήθως ξεπερνούν τη μία τάξη μεγέθους για την ίδια τιμή της παροχής. Οι μεγάλες αυτές αποκλίσεις οφείλονται σε άλλους παράγοντες, υδρολογικούς (κυρίως) ή υδραυλικούς που δεν λαμβάνονται υπόψη στην κατάρτιση της σχέσης Q_s-Q . Καλύτερα αποτελέσματα δίνει η κατάρτιση εποχιακών καμπυλών μεταφοράς, εφόσον υπάρχει επαρκής αριθμός δεδομένων για κάθε εποχή. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται επιπλέον υπόψη αρκετές παράμετροι, με έμμεσο τρόπο. Τέτοιες παράμετροι είναι η θερμοκρασία του νερού, τα εποχιακά χαρακτηριστικά των υδρολογικών παραμέτρων (π.χ. ροή βάσης, τύπος καταιγίδων), εποχιακές διακυμάνσεις της φυτοκάλυψης στη λεκάνη απορροής κ.α.

Οι καμπύλες μεταφοράς φερτών μπορεί να αναφέρονται στην ολική στερεοπαροχή ή ένα τμήμα της, π.χ. στερεοπαροχή με αιώρηση. Συνήθως μπορούν να περιγραφούν από αναλυτικές εκφράσεις της μορφής

$$Q_s = aQ^b \quad (5.1.)$$

όπου

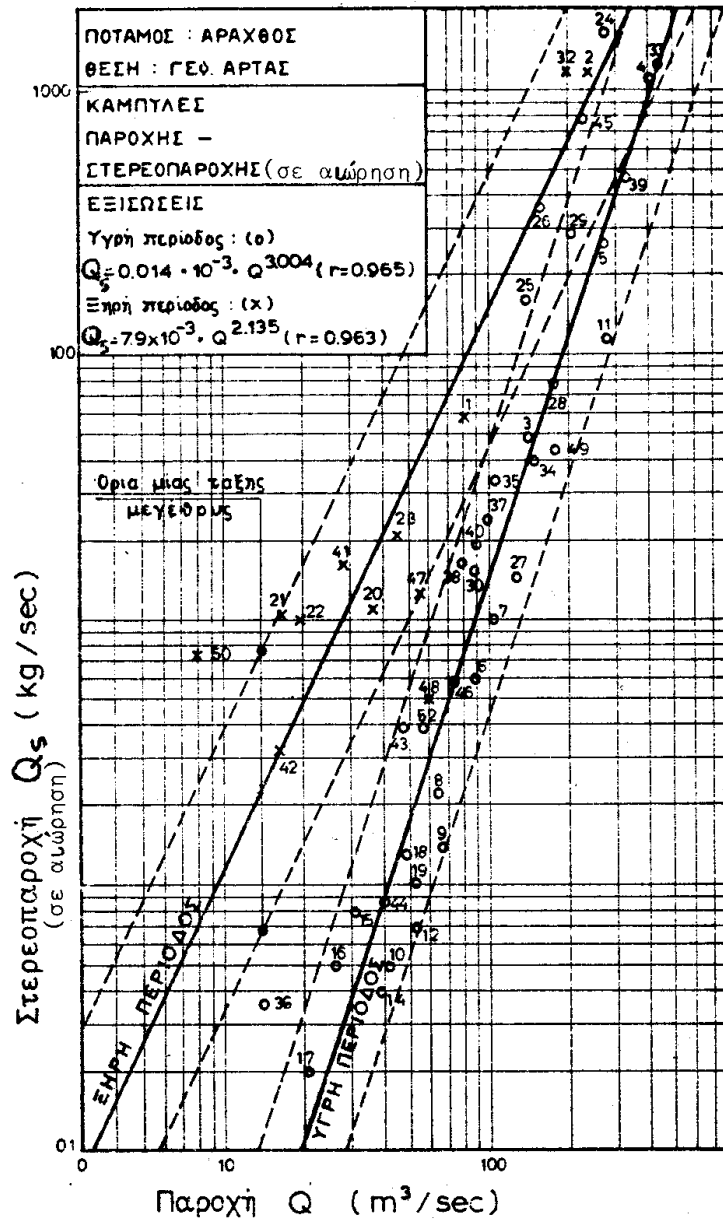
Q_s = στερεοπαροχή (ολική ή τμηματική) (kg/sec)

Q = παροχή (m^3/sec)

a, b = σταθερές

ΠΙΝΑΚΑΣ 1
ΜΕΣΕΣ ΕΤΗΣΙΕΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

ΛΕΚ. ΑΠΟΡΡΟΗΣ *	Α Ρ Α Χ Θ Ο Σ				* Κ Α Λ Α Μ Α Σ * ΑΛΙΑΚΜ. *		
Υπολεκάνη (θέση μετρήσεων)	Γκόγκο	Τσίμοβο	Πάσκα	Άρτα	Σουλιό- πουάο	Κιστέκι	Στα- τίστα
Έκταση (km ²)	204	640	970	1855	661	1481	2725
Περίοδος μετρ.	1966-72	1965-78	1965-76	1965-76	1969-78	1966-78	1965-79
Μέση ετ. στερεο- απορροή (t/km ²)	1176	891	1570	1546	203	386	84
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ - ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ (σε ετήσια βάση)							
Μέση βροχόπτωση Λεκάνης (mm)	1811	1377	1596	1614	1275	1310	799
Μέση ισοδ. απορροή Λεκάνης (mm)	1743	960	1165	988	1083	1050	260
Μέση θερμοκρασία Λεκάνης (ο C)	9.79	10.65	11.04	12.07	13.40	13.43	10.24
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΨΟΜΕΤΡΑ (m)							
Μέσο Λεκάνης	1300	1070	1060	889	621	567	1040
Θέσης σταθμού	377	364	248	42	180	54	502
Μέγιστο Λεκάν.	2469	2295	2469	2469	2050	2198	2520
Μέγ. κυρ. κλάδου	1800	1200	1200	1200	800	800	1800
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΚΗ ΠΟΤΑΜΟΥ (km)							
Ολικό κυρ. κλά.	18.6	43.8	60.0	107.8	51.4	98.4	110.6
Κεντροβαρικό	7.6	26.8	30.0	51.4	31.4	45.0	50.0
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΛΙΣΕΙΣ (m/km)							
Μέση ποταμού	76.5	19.1	15.9	10.7	12.1	7.6	11.7
Φαιν. Λεκάνης	121.4	26.3	27.1	16.5	14.0	11.4	10.8
ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ (ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ - %)							
Αλλούβια	7.8	4.1	5.0	5.7	20.9	17.0	18.9
Φλύσχης	23.4	75.8	67.8	37.9	9.6	17.5	1.8
Ψαμμίτες-μάργες -σχιστόλιθοι	0.0	0.0	1.6	36.6	1.5	15.0	47.8
Ασβεστόλιθοι- -δολομίτες	68.8	17.0	23.5	18.7	68.0	50.5	7.3
Μεταμορφωμένα- -εκρηξιγενή	0.0	3.1	2.1	1.1	0.0	0.0	24.2



ΣΧΗΜΑ 2: Καμπύλη μεταφοράς φερτών ποταμού Αράχθου στη θέση Γέφυρα Αρτας

Τέτοιες καμπύλες μεταφοράς φερτών σε αιώρηση καταρτίστηκαν για όλες τις θέσεις που εξετάζονται στην εργασία αυτή. Στο σχήμα 2 δίνεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα παροχής-στερεοπαροχής του σταθμού Άρτας. Παρατηρούμε ότι είναι εμφανείς δύο διαφορετικές καμπύλες, μία για την υγρή περίοδο (Δεκέμβριος-Μάιος) και μία για την ξηρή (Ιούνιος-Νοέμβριος). Η δεύτερη μάλιστα αντιστοιχεί σε πολύ μεγαλύτερες τι-

μές της στερεοπαροχής, για την ίδια παροχή. Ακόμη είναι εμφανής η μεγάλη διασπορά των σημείων, που πρακτικά, κυμαίνονται μέσα στα όρια μίας τάξης μεγέθους, συμμετρικά (στο λογαριθμικό διάγραμμα) ως προς την αντίστοιχη καμπύλη. Τέλος προκύπτει ότι είναι κατάλληλη η σχέση (5.1) για την αναλυτική έκφραση και των δύο καμπυλών, και αυτό συνέβη σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Σε μία συστηματική μελέτη των σταθερών a και b της σχέσης (5.1) στη Βορειοδυτική Ελλάδα (Mimikou, 1982) έχει αποδειχθεί ότι οι σταθερές αυτές εξαρτώνται από τη βροχόπτωση της λεκάνης και από ορισμένες τοπογραφικές παραμέτρους της.

5.2. Υπολογισμός στερεοαπορροής

Με το συνδυασμό της καμπύλης μεταφοράς φερτών και των ημερήσιων ή καλύτερα των στιγμιαίων τιμών της παροχής, μπορούν να προκύψουν άμεσα οι ημερήσιες ή στιγμιαίες τιμές της στερεοπαροχής και στη συνέχεια η στερεοαπορροή μιάς χρονικής περιόδου T . Η στερεοαπορροή μπορεί να προκύψει και άμεσα, χωρίς μεσολάβηση του υπολογισμού της χρονοσειράς των στερεοπαροχών, από την καμπύλη διάρκειας των παροχών της περιόδου T , με αριθμητική ολοκλήρωση της σχέσης

$$G = T \int_0^{\infty} g(Q) f(Q) dQ = T \int_0^1 g(Q) dF(Q) \quad (5.2)$$

όπου

T = χρονική περίοδος

G = στερεοαπορροή της χρονικής περιόδου T

$g(Q)$ = η σχέση παροχής-στερεοπαροχής: $Q_s = g(Q)$

$f(Q)$ = εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της παροχής

$F(Q)$ = καμπύλη διάρκειας παροχής

Η παραπάνω σχέση μπορεί να εφαρμοστεί είτε για συγκεκριμένη χρονική περίοδο, π.χ. για ένα συγκεκριμένο έτος, είτε για γενικευμένη, π.χ. το μέσο έτος, αρκεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη καμπύλη διάρκειας.

Στην εργασία αυτή ο υπολογισμός της στερεοαπορροής έγινε σε ετήσια βάση, με βάση τη σχέση (5.2) και οι μέσες ετήσιες τιμές υπολογίστηκαν σαν μέσοι όροι των ετήσιων τιμών. Οι μέσες τιμές για κάθε υπολεκάνη φαίνονται στον πίνακα 1.

6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗ

6.1. Μηχανισμοί επίδρασης των υδρολογικών παραγόντων

Είναι γνωστό από την ανάλυση των μηχανισμών της εδαφικής διάβρωσης, ότι η συνδυασμένη δράση της βροχόπτωσης και της απορροής είναι η κινητήρια δύναμη της διάβρωσης. Η κινητική ενέργεια της βροχής είναι υπεύθυνη για την απόσπαση των εδαφικών κόκκων, ενώ η απορροή, με την έννοια της επιφανειακής ροής, είναι υπεύθυνη για τη μετακίνηση των κόκκων. Όταν ενδιαφέρει η ποσοτική περιγραφή της διάβρωσης, δηλαδή η εδαφική απώλεια, τότε συνήθως αρκεί μόνο η βροχόπτωση για την εν λόγω ποσοτική περιγραφή. Πιο συγκεκριμένα στην Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας χρησιμοποιείται σαν παράμετρος ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής, που για ένα επεισόδιο βροχής ορίζεται από τις σχέσεις:

$$R = \frac{E \cdot I_{30}}{1700} \quad (6.1)$$

$$E = \sum_j \varepsilon_j I_j \Delta t_j \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_j = 3,79 \ln(23I_j) \quad (6.3)$$

όπου

R = συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής (μονάδες όπως προκύπτουν από τους επί μέρους όρους του)

E = συνολική κινητική ενέργεια της βροχής ανά μονάδα επιφάνειας (Joule/m^2)

I_{30} = μέγιστη τιμή της έντασης βροχής που παρατηρείται στο επεισόδιο για χρονικό διάστημα 30 λεπτών τουλάχιστον

Δt_j = η j υποδιαίρεση του χρόνου βροχής (hr)

I_j = ένταση βροχής στο χρόνο Δt_j (mm/hr)

ε_j = ειδική κινητική ενέργεια βροχής, ήτοι ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα ύψους βροχής ($\text{Joule}/\text{m}^2/\text{mm}$)

Όπως και το ύψος βροχής, ο συντελεστής διαβρωτικότητας έχει την ιδιότητα της προσθετικότητας, δηλαδή ο συντελεστής διαβρωτικότητας μιάς ακολουθίας επεισοδίων βροχής (π.χ. ενός μήνα, ενός έτους κλπ.) είναι το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών διαβρωτικότητας. Σε μία μελέτη που έγινε για τη διαβρωτικότητα των βροχών της

Δυτικής Αφρικής (βλ. Kirkby and Morgan) φάνηκε ότι ο μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας βρίσκεται σε σχέση αναλογίας με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής, σύμφωνα με τη σχέση

$$R_{ET}/P_{ET} = 0,50 \pm 0,05 \quad (6.4)$$

όπου

R_{ET} = μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας

P_{ET} = μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)

Αντίθετα με ότι συμβαίνει με την εδαφική διάβρωση, στην διάβρωση της κοίτης ενός υδατορεύματος η βασική κινητήρια δύναμη είναι η ροή στο υδατόρευμα, και συνεπώς η βασική παράμετρος για την ποσοτική περιγραφή του μεγέθους είναι η απορροή. Έτσι τελικά, όταν ενδιαφέρει η ολική στερεοαπορροή, δεν είναι σαφές πού από τα δύο μεγέθη (βροχόπτωση, απορροή) παίζει τον κυριότερο ρόλο, όσο αφορά τις ποσοτικές εκτιμήσεις.

6.2. Εμπειρική συσχέτιση στερεοαπορροής με υδρολογικές παραμέτρους

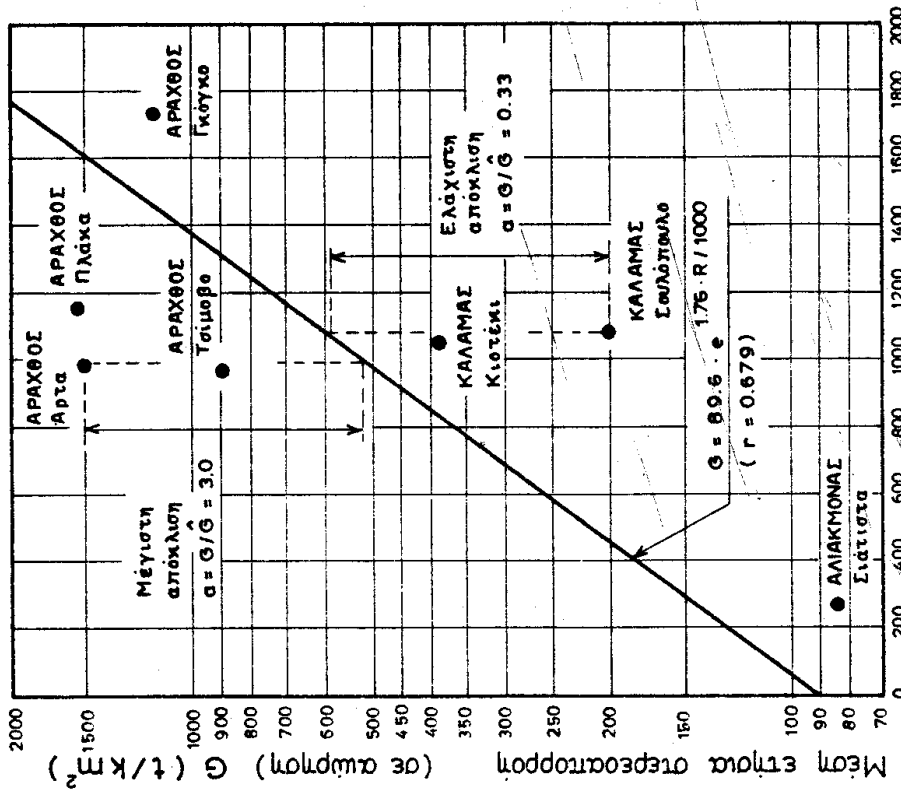
Με βάση τα δεδομένα του πίνακα 1, που αφορούν τις μέσες ετήσιες τιμές της στερεοαπορροής σε αιώρηση, της βροχόπτωσης, και της απορροής, στις λεκάνες που εξετάζουμε, συντάχθηκαν τα διαγράμματα των σχημάτων 3 και 4, όπου απεικονίζεται η συσχέτιση της στερεοαπορροής με τη βροχόπτωση και απορροή αντίστοιχα. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης της στερεοαπορροής επιλέχθηκε η λογαριθμική κλίμακα για αυτήν, ενώ τα άλλα δύο μεγέθη εκφράζονται σε φυσική κλίμακα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι υπάρχει αρκετά έντονη συσχέτιση της στερεοαπορροής (G) και με τη βροχόπτωση (P) και με την απορροή (R). Οι σχέσεις των μεταβλητών αυτών είναι προτιμότερο να εκφραστούν με εκθετικές εξισώσεις της μορφής:

$$\hat{G} = ce^{nP} \quad \text{και} \quad \hat{G} = c'e^{n'R} \quad (6.5) \quad \text{και} \quad (6.6)$$

Οι τιμές των σταθερών c, n, c' και n', που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, φαίνονται επίσης στα εν λόγω σχήματα.

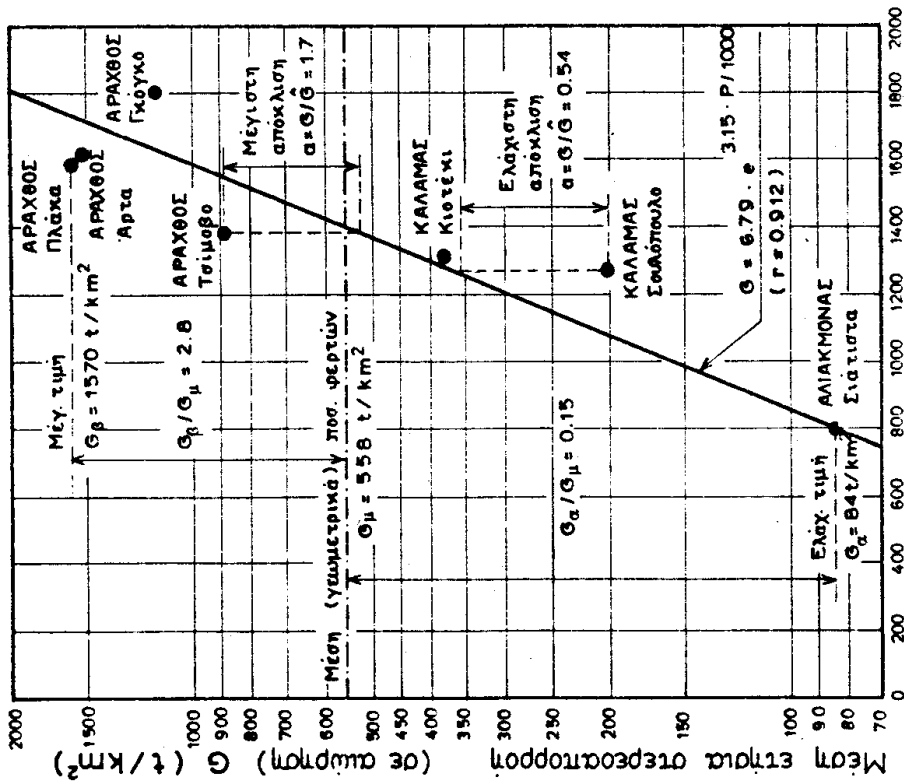
Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω συσχετίσεις μεταξύ τους είναι σαφές ότι η συσχέτιση με τη βροχόπτωση είναι η πιο έντονη, αφού παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (0,912 έναντι 0,679) και πολύ μικρότερη διασπορά των σημείων ως προς την αντίστοιχη εξίσωση (τυπικό σφάλμα, εκφραζόμενο με τη μορφή $G/\hat{G} = 1,53$ έναντι 2,15).

Μετά τα παραπάνω φαίνεται ότι η βασικότερη υδρολογική παράμε-



Μέσο ετήσιο ισοδυναμο ύψος απορροής R (mm)

ΣΧΗΜΑ 4: Συσχέτιση στερεοαπορροής σε αιώρη-ση και απορροής (σε μέση ετήσια βάση)



Μέσο ετήσιο ύψος βροχής P (mm)

ΣΧΗΜΑ 3: Συσχέτιση στερεοαπορροής σε αιώρη-ση και βροχόπτωσης (σε μέση ετήσια βάση)

μετρος που επηρεάζει ποσοτικά τη στερεοαπορροή, για τις συγκεκριμένες υπολεκάνες, είναι η βροχόπτωση. Η εισαγωγή και της απορροής σαν δεύτερης ανεξάρτητης μεταβλητής, στη σχέση βροχής-στερεοαπορροής, δεν δίνει καμιά ουσιαστική βελτίωση στην προσαρμογή με τα πραγματικά δεδομένα.

6.5. Επίδραση της θερμοκρασίας

Όπως έχει φανεί από εργαστηριακές αναλύσεις και από μετρήσεις σε φυσικά υδατορεύματα, υπάρχει επίδραση της θερμοκρασίας στη στερεοπαροχή. Ο μηχανισμός όμως, με τον οποίο επηρεάζει το φαινόμενο η θερμοκρασία, είναι αρκετά πολύπλοκος (βλ. Vanoni, 1977) και έτσι το αποτέλεσμα που θα έχει μία μεταβολή της θερμοκρασίας στη στερεοπαροχή δεν είναι πάντα το ίδιο.

Αν τώρα εξετάσουμε το θέμα σε μία μεγάλη χρονική περίοδο π.χ. ενός έτους, αναζητώντας την επίδραση της μέσης θερμοκρασίας της λεκάνης απορροής στη στερεοαπορροή θα πρέπει να είναι πολύ δύσκολο ή μάλλον απίθανο να ανιχνεύσουμε μία τέτοια επίδραση. Παρόλα αυτά σε διάφορες εμπειρικές σχέσεις στερεοαπορροής που έχουν καταρτιστεί η μέση θερμοκρασία της λεκάνης απορροής έχει χρησιμοποιηθεί σαν ανεξάρτητη μεταβλητή. Έτσι στην εργασία του E. Flaxman (1972) χρησιμοποιείται σαν ανεξάρτητη μεταβλητή ο λόγος της μεσης ετήσιας βροχόπτωσης προς τη μέση ετήσια θερμοκρασία.

Στα δικά μας δεδομένα φάνηκε κατ' αρχήν ότι υπάρχει μία ασθενής αρνητική συσχέτιση θερμοκρασίας-στερεοαπορροής, με συντελεστή συσχέτισης ίσο με $-0,30$. Αυτό όμως αποδόθηκε όχι στην καθαυτό δράση της θερμοκρασίας, αλλά σε άλλους παράγοντες που έμμεσα, μέσω της θερμοκρασίας, υπεισέρχονται στη συσχέτιση, όπως το μέσο υψόμετρο της λεκάνης και η ετήσια βροχόπτωση που είναι αύξουσα συνάρτηση του υψομέτρου, άρα φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Για να μελετηθεί λοιπόν η καθαρή επίδραση της θερμοκρασίας στη στερεοαπορροή πρέπει να αφαιρεθεί προηγουμένα η επίδραση της βροχόπτωσης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη μελέτη της συσχέτισης της θερμοκρασίας (T) με το μέγεθος

$$\alpha = G/\hat{G} \quad (6.7)$$

που εκφράζει την απόκλιση της παραγματικής στερεοαπορροής (G) από την εκτίμηση της με βάση τη βροχόπτωση (\hat{G} -σχέση 6.5).

Τα σημεία ($T-\alpha$) έχουν αποτυπωθεί στο διάγραμμα (β) του σχήματος (5), από όπου προκύπτει ότι δεν υπάρχει ανιχνεύσιμη συσχέτιση

άρα ούτε επίδραση της θερμοκρασίας στη στερεοαπορροή. (Ας σημειωθεί πάντως ότι λόγω του μικρού πλήθους σημείων που διαθέτουμε (μόνον 7) δεν μπορούν να ανιχνευθούν παρά μόνο έντονα μονότονες σχέσεις).

7. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Γιά να εξετάσουμε θεωρητικά την επίδραση των τοπογραφικών παραγόντων, ας θεωρήσουμε μία μικρή εδαφική έκταση με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Είναι σαφές ότι οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην εδαφική απώλεια είναι η κλίση S της εδαφικής έκτασης, η οποία επηρεάζει και τη διαβρωτικότητα της επιφανειακής απορροής, αλλά και το ρυθμό απόσπασης των εδαφικών κόκκων από τη βροχή, καθώς και το μήκος της κλιτύος L , δηλαδή το μήκος που διατρέχει η επιφανειακή ροή, μέχρι να φτάσει σε κάποιο φυσικό ή τεχνητό αποδέκτη.

Αν τώρα μεταφερθούμε στο πολύπλοκο φυσικό ανάγλυφο μιας λεκάνης απορροής δεν είναι καθόλου σαφές ποιές είναι οι τοπογραφικές παράμετροι που μπορεί να επηρεάζουν τη στερεοαπορροή. Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η επίδραση των εξής παραμέτρων:

- α) του μήκους του κύριου κλαδου του ποταμού, L
- β) της μέσης κλίσης του ποταμού $S = \Delta H / L$
- γ) μιας παραμέτρου ενδεικτικής της μέσης κλίσης της λεκάνης, που ονομάστηκε "φαινόμενη κλίση, S_λ " και ορίστηκε από τη σχέση $S_\lambda = (H_\mu - H_\epsilon) / L_g$ όπου H_μ το μέσο υψομετρο της λεκάνης, H_ϵ το υψομετρο του ποταμού στην έξοδο και L_g το χαρακτηριστικό "κεντροβαρικό" μήκος του ποταμού από την έξοδο μέχρι το σημείο όπου προβάλλεται το κέντρο βάρους της λεκάνης στον ποταμό. Η εισαγωγή αυτού του μεγέθους αντί της μέσης κλίσης έγινε γιατί ο υπολογισμός της μέσης κλίσης είναι χρονοβόρος.
- δ) της έκτασης της λεκάνης F . Βέβαια δεν περιμένουμε ότι η έκταση επηρεάζει την εδαφική απώλεια, αλλά θα μπορούσε να επηρεάζει το συντελεστή στερεοαπορροής (βλ. Kirkby and Morgan, Vanoni), άρα και τη στερεοαπορροή.

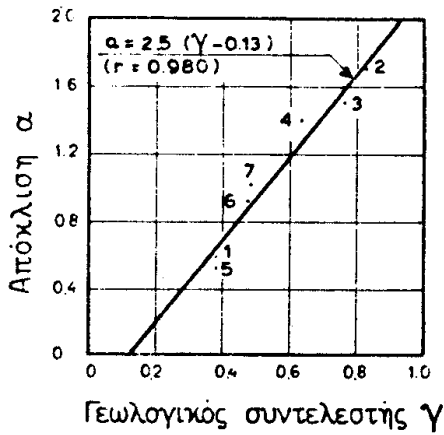
Προκειμένου να ανιχνευθεί η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στη στερεοαπορροή, μελετήθηκε η συσχέτισή τους με το μέγεθος της απόκλισης α , όπως ορίστηκε στην παράγραφο 6.3. Τα σχετικά διαγράμματα φαίνονται στο σχήμα 5 (γ:στ). Τελικά προκύπτει ότι καμία από τις τοπογραφικές παραμέτρους δεν έχει σαφή επίδραση στη στερεοαπορροή. Ειδικότερα το ότι οι κλίσεις S_λ και S_π δεν έχουν επίδραση φαίνεται κατ'αρχήν παράδοξο. Πιστεύουμε ότι μία ερμηνεία σε αυτό είναι η α-

κόλουθη: Αν θεωρήσουμε ότι δύο λεκάνες απορροής έχουν ακριβώς ίδια γεωλογική σύσταση, αλλά διαφορετικές μέσες κλίσεις, είναι σαφές ότι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη κλίση θα δώσει και τη μεγαλύτερη στερεοαπορροή. Στην πραγματικότητα όμως η γεωλογική σύσταση δεν είναι η ίδια, ενώ παράλληλα η μεγάλη κλίση είναι ένδειξη αυξημένης αντοχής των πετρωμάτων. Έτσι σε δύο λεκάνες απορροής αυτή που εμφανίζει μεγαλύτερες κλίσεις θα αποτελείται από γεωλογικά ανθεκτικότερα πετρώματα, και θα έχει και τη μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση. Για παράδειγμα η υπολεκάνη ανάντη του Γκόγκου που έχει σαφώς μεγαλύτερη κλίση από τις άλλες (σχήμα 5ε και 5στ) αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από ασβεστόλιθο, ο οποίος διαβρώνεται πολύ λιγότερο από το φλύσχη, που κυριαρχεί στις άλλες λεκάνες του Αραχθού. Συνεπώς η συνολική μέση κλίση δεν επηρεάζει μονοσήμαντα τη στερεοαπορροή. Η επίδραση της κλίσης θα έπρεπε να μελετηθεί αφού γίνει διάκριση της κλίσης κατά τμήματα ομοιόμορφης γεωλογικής σύστασης, αλλά αυτό ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής.

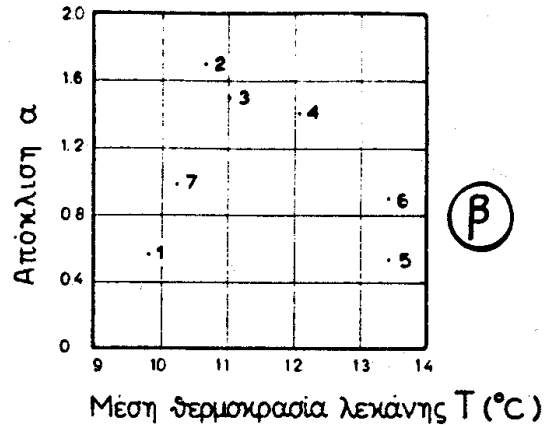
8. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗ

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως το μέγεθος των κόκκων (κοκκομετρική κατανομή), η δομή, η διαπερατότητα κλπ. έχουν πολλαπλή επίδραση στη διαδικασία απόσπασης-μεταφοράς και απόθεσης του εδαφικού υλικού. Πολύ σοβαρή είναι και η επίδραση της φυτοκάλυψης, αφού μπορεί να αναστείλει το ρυθμό διάβρωσης μέχρι και στο 1% του ρυθμού που εμφανίζεται στο γυμνό έδαφος. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών όμως δεν μελετήθηκε ποσοτικά στην εργασία αυτή, λόγω έλλειψης σχετικών δεδομένων. Αντίθετα μελετήθηκε η επίδραση της γεωλογικής σύστασης των λεκανών απορροής, με βάση τα στοιχεία που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.6.

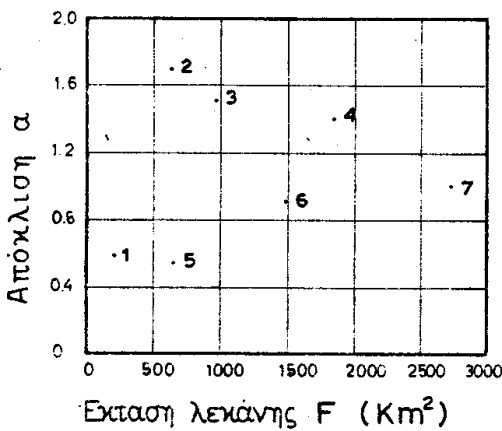
Παραβλέποντας το γεγονός ότι πολλές φορές δύο εμφανίσεις του ίδιου πετρώματος σε διαφορετικούς τόπους, μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά όσο αφορά τη διαβρωσιμότητα τους, θεωρήσαμε ότι το κάθε πέτρωμα έχει καθορισμένη μέση συμπεριφορά, και έτσι, στοιχεία όπως η έκταση στην οποία εμφανίζεται το κάθε πέτρωμα (βλ. πίνακα 1) θα μπορούσαν να δώσουν ποσοτικά συμπεράσματα για τη στερεοαπορροή. Από ορισμένες αρχικές παρατηρήσεις φάνηκε ότι υπάρχει σαφής θετική συσχέτιση της στερεοαπορροής σε αιώρηση με την αναλογία εμφάνισης του φλύσχη, πράγμα που θεωρείται λογικό λόγω της μεγάλης διαβρωσιμότητας του φλύσχη. Στην περίπτωση του ασβεστόλιθου η συ-



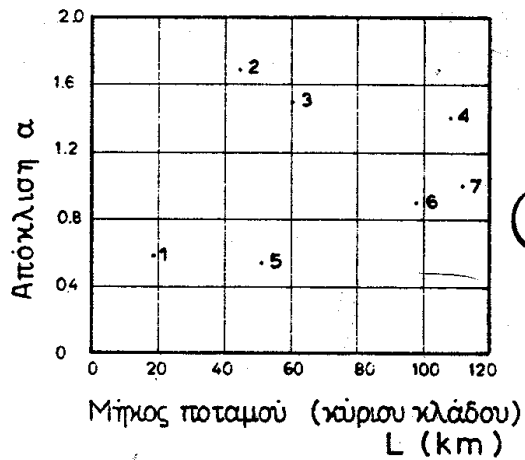
α



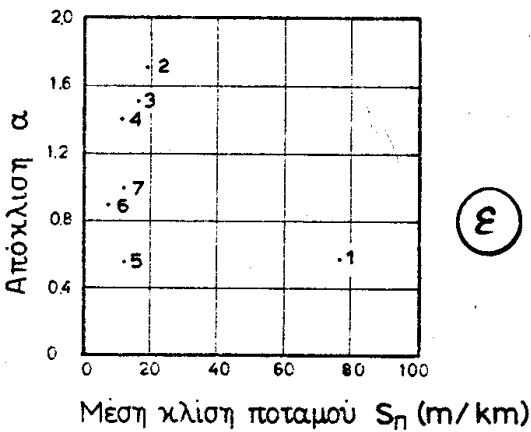
β



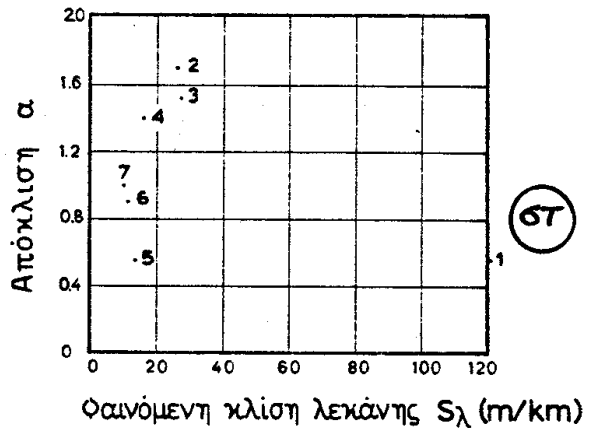
γ



δ



ε



στ

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| 1. Άραχθος - Γκόγκο | 5. Καλαμάς - Σουλόπουλο |
| 2. " Τσίμοβο | 6. " Κιοτέκι |
| 3. " Πλάκα | 7. Αλιάκμονας - Σιάτιστα |
| 4. " Άρτα | |

ΣΧΗΜΑ 5: Συσχέτιση της απόκλισης ($\alpha = G/\hat{G}$) της πραγματικής στερεοαπορροής (G) από την εκτίμηση της με βάση την βροχοπτώση (\hat{G}), με γεωλογικά, κλιματικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

σχέτιση είναι σαφώς αρνητική, όπως είναι φυσικό αφού ο ασβεστόλιθος διαβρώνεται σε μικρότερους ρυθμούς, ενώ τα προϊόντα της διάβρωσης του δεν συμβάλλουν στο φορτίο αιώρησης, αλλά στο φορτίο σύρσης (κροκάλες, χαλίκια), ή και μεταφέρονται σε διάλυση.

Μετά από αυτές τις παρατηρήσεις και προκειμένου να υιοθετηθεί μία και μόνο παραμετρος αντιπροσωπευτική της γεωλογίας της λεκάνης απορροής, κατατάχθηκαν τα εμφανιζόμενα πετρώματα σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τη διαβρωσιμότητά τους από το νερό και αποδόθηκε στην κάθε ομάδα ένα εμπειρικό μέτρο διαβρωσιμότητας κ ως εξής;

1. Ομάδα υψηλής διαβρωσιμότητας $\kappa_1=1$
Αλλούβια, φλύσχης
2. Ομάδα μέτριας διαβρωσιμότητας $\kappa_2=0,5$
Μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι
3. Ομάδα χαμηλής διαβρωσιμότητας $\kappa_3=0,1$
Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκκριξηγενή

Ετσι η ζητούμενη παράμετρος μπορεί να είναι το μέσο μέτρο διαβρωσιμότητας, που ονομάστηκε γεωλογικός συντελεστής, γ , και δίνεται από τη σχέση

$$\gamma = \kappa_1 p_1 + \kappa_2 p_2 + \kappa_3 p_3 \quad (8.1)$$

όπου

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ οι συντελεστές διαβρωσιμότητας, όπως παραπάνω, και
 p_1, p_2, p_3 οι αντίστοιχες αναλογίες της έκτασης στην οποία εμφανίζεται η κάθε κατηγορία πετρωμάτων, προς τη συνολική έκταση της λεκάνης, όπως προκύπτουν από τους γεωλογικούς χάρτες.

Στο σχήμα 5(α) απεικονίζεται η συσχέτιση του γεωλογικού συντελεστή γ και της αποκλισης στερεοαπορροής $\alpha = G/\hat{G}$. Παρατηρούμε ότι η συσχέτιση αυτή είναι έντονη και μπορεί να εκφρασθεί με τη γραμμική σχέση

$$\alpha = 2,5(\gamma - 0,13) \quad (8.2)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης έχει την υψηλή τιμή 0.980

Τελικά από όλες τις παραμέτρους που εξετάστηκαν, εκτός από τη βροχόπτωση και την απορροή, μόνο η γεωλογία της λεκάνης έχει σαφή επίδραση στη στερεοαπορροή. Η ποσοτική έκφραση αυτής της επίδρασης μέσω του γεωλογικού συντελεστή γ θεωρείται αποτελεσματική, παρόλη την κάπως αυθαίρετη εισαγωγή του συντελεστή αυτού.

9. ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΦΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ

Ο συνδυασμός των σχέσεων (6.5) και (8.2) δίνει τη σχέση τελικής εκτίμησης της στερεοαποροής σε αιώρηση:

$$G = 2,5(\gamma - 0,13) \cdot 6,79e^{3,15P/1000}$$

ή

$$G = 16,98 \cdot (\gamma - 0,13) \cdot e^{3,15P/1000} \quad (9.1)$$

Στην παραπάνω σχέση εμφανίζονται 3 συνολικά σταθερές, αριθμός που κρίνεται υπερβολικός για τον φτωχό αριθμό σημείων που διαθέτουμε. Προκειμένου να μειώσουμε τον αριθμό των σταθερών κατά 1, θα δεχθούμε αντί της (8.2) μία σχέση αναλογίας των μεγεθών γ και α , δηλαδή

$$\alpha = c_1 \cdot \gamma$$

οπότε με συνδυασμό της παραπάνω και της (8.2) θα έχουμε τη γενική μορφή σχέσης

$$G = c_2 \gamma e^{nP} \quad \text{όπου } c_2 = c \cdot c_1$$

ή

$$G/\gamma = c_2 e^{nP}$$

και αν θέσουμε $G_1 = G/\gamma$, μέγεθος που θα ονομάσουμε ειδική στερεοαποροή:

$$G_1 = c_2 e^{nP}$$

Οι σταθερές της παραπάνω σχέσης υπολογίστηκαν με απευθείας εκθετική πάλινδρόμηση ανάμεσα στις μεταβλητές G_1 και P και τελικά προέκυψε

$$G_1 = 15e^{3P/1000} \quad (9.2)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης πρέκυψε ίσος με 0,986. Επιλύοντας την παραπάνω ως προς G και εκφράζοντας την βροχόπτωση σε μέτρα έχουμε την τελική έκφραση:

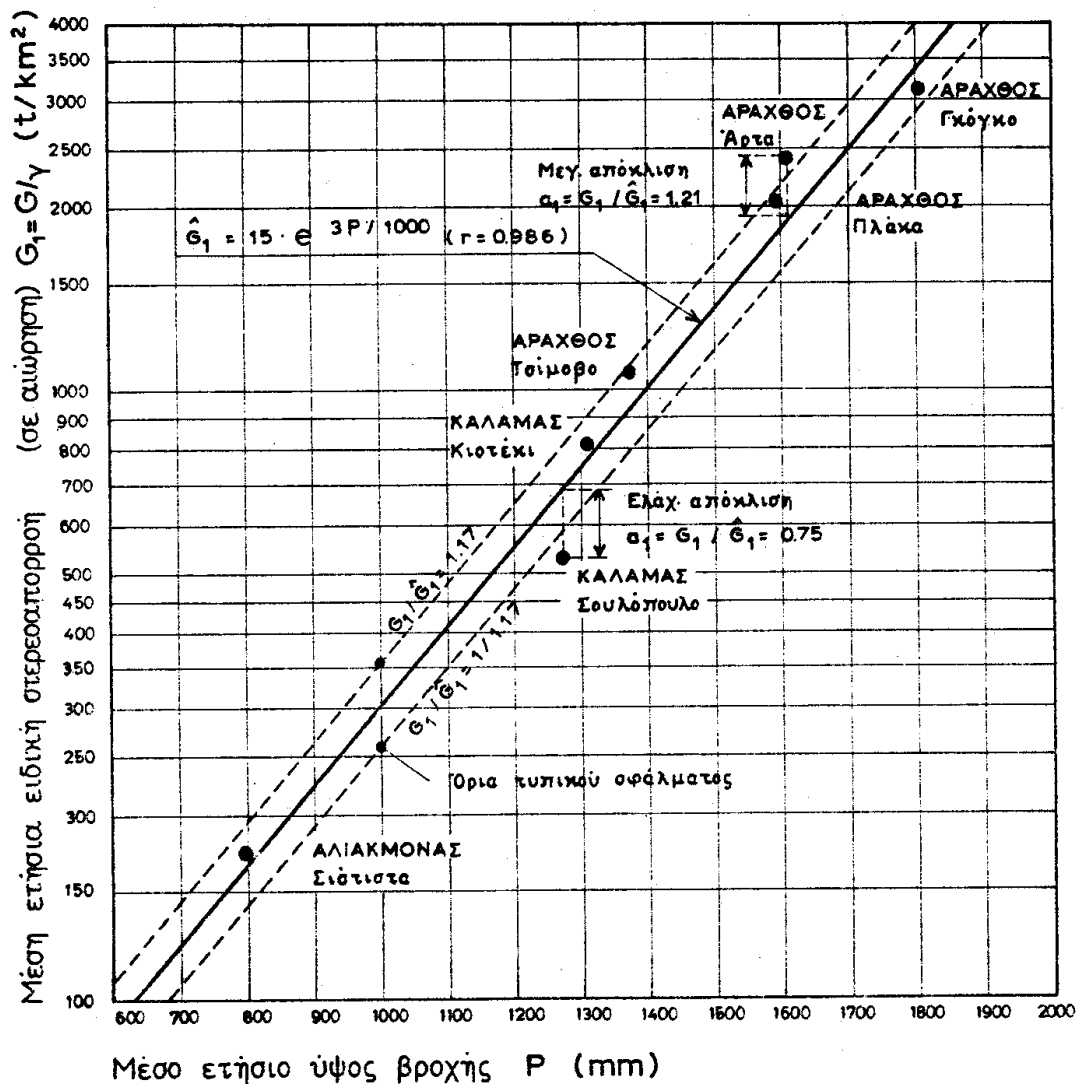
$$G = 15\gamma e^{3P} \quad (9.3)$$

όπου (ανακεφαλαιώνοντας τη σημασία των συμβόλων):

$$G = \text{μέση ετήσια στερεοαποροή σε αιώρηση (t/Km}^2\text{)}$$

$$P = \text{μέσο ετήσιο ύψος βροχής (m)}$$

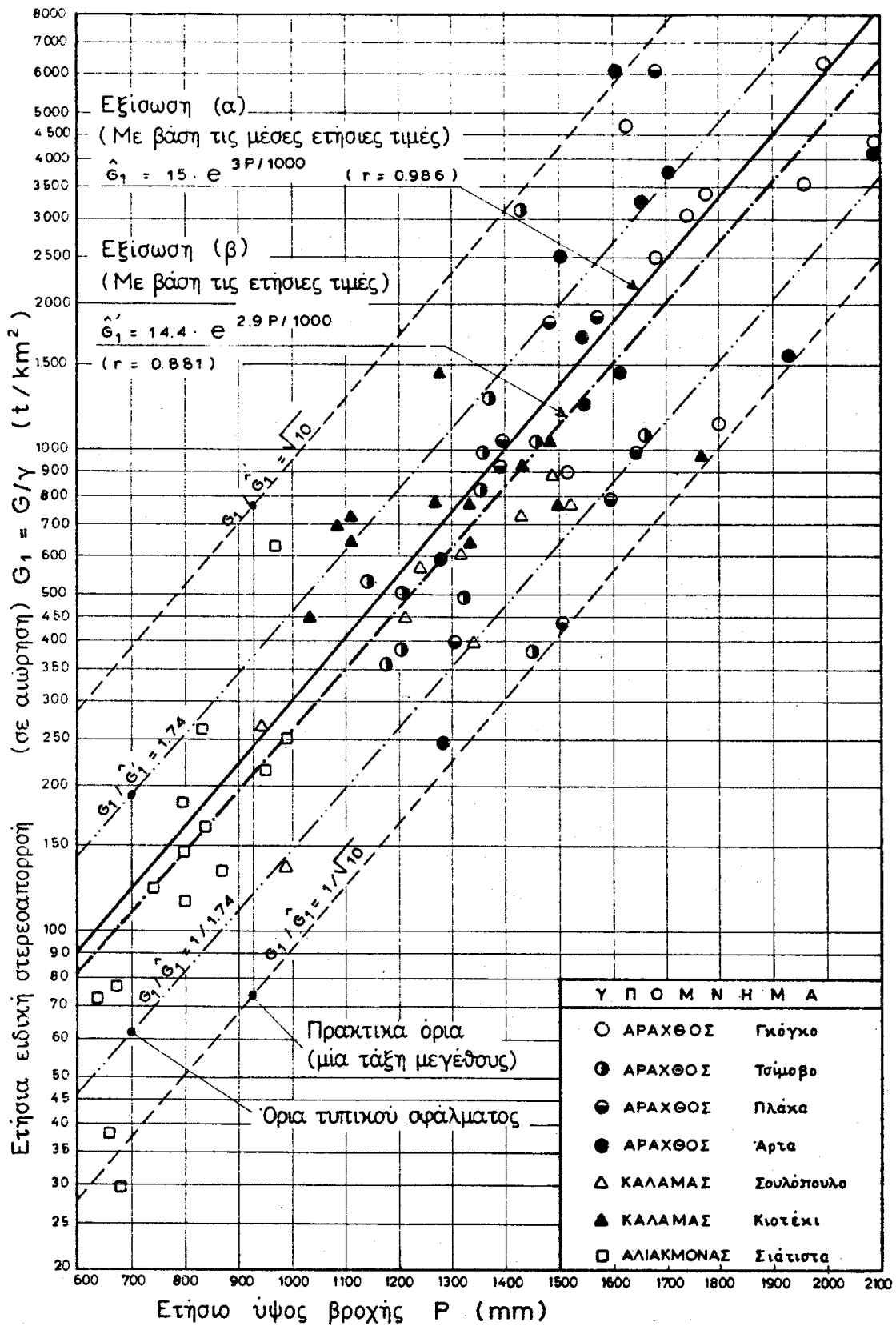
$$\gamma = \text{γεωλογικός συντελεστής, που ορίζεται με τη σχέση (8.1)}$$



ΣΧΗΜΑ 6: Συσχέτιση ειδικής στερεοαπορροής και βροχόπτωσης (σε βάση μέσων ετήσιων τιμών)

Στο σχήμα 6 φαίνεται η πολύ καλή συμφωνία της σχέσης (9.2) με τα πραγματικά δεδομένα. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόκλιση πραγματικής τιμής από την εκτίμησή της είναι 1.21 (+21%) και η ελάχιστη 0,75 (-25%) ενώ το τυπικό σφάλμα είναι 1,17.

Στο σχήμα 7 έχει απεικονισθεί η ίδια εξίσωση σε συνδυασμό με τα δεδομένα σε ετήσια βάση, όπου και πάλι η προσαρμογή είναι ικανοποιητική. Εδώ η απόκλιση πρακτικά καλύπτει ένα εύρος μιας τάξης μεγέθους. Παράλληλα στο ίδιο σχήμα έχει χαραχθεί η καμπύλη, που προέκυψε από τις σχέσεις παλινδρόμησης των ετήσιων τιμών των μεγεθών, με εξίσωση:



ΣΧΗΜΑ 7: Συσχέτιση ετήσιων τιμών ειδικής στερεοαπορροής και βροχόπτωσης

$$G_1 = 14,4e^{2,9P/1000} \quad (9.4)$$

που είναι πολύ κοντά στην εξίσωση (9.2). Ο συντελεστής συσχέτισης εδώ είναι 0,881 και το τυπικό σφάλμα 1,74.

ΕΚΤΟΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

Μία συνοπτική παρουσίαση των τελικών σχέσεων της εργασίας αυτής έγινε στο Σεμινάριο Έργων Εγγείων Βελτιώσεων, που οργανώθηκε από τον ΠΣΑΤΑΜ (Νοέμβριος 1986). Η εργασία βασίστηκε κατά ένα μέρος στη διπλωματική εργασία της Κ. Ταρλά (1984). Τα πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων στερεοπαροχής μας δόθηκαν από τη ΔΕΗ, Διεύθυνση Μελετών-Κατασκευών ΗΥΕ, την οποία και ευχαριστούμε. Ευχαριστούμε ακόμη και τον Καθηγητή Ι. Παπαγεωργάκη, για τη συζήτηση που είχαμε μαζί του σχετικά με τις γεωλογικές θεωρήσεις της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλιηγός Ν. (1970) "Σύντομος έκθεσις επί της κατανομής και μεταφοράς των εν αιωρήσει φερτών υλικών", Τεχνικά Χρονικά, Ιούλιος 1970, 387-413.
- Εανθόπουλος Θ. (1984): Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα.
- Ταρλά Κ. (1984): "Εκτίμηση ποσότητας αιωρουμένων φερτών υλικών από τοπογραφικές, υδρομετεωρολογικές και γεωλογικές παραμέτρους.-Προσπάθεια διερεύνησης στα ελληνικά ποτάμια", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Flaxman, E.M. (1972): "Predicting Sediment Yield in Western United States", Proceedings ASCE, Journal of Hydraulics Division, vol. 98, No HY12, 2073-2085.
- Kirkby, M.J. and Morgan, R.P.C. (editors) (1980): Soil Erosion, John Wiley and Sons, G.Britain.
- Mimikou, M. (1982) "An investigation of suspended sediment curves in Western and Northern Greece", Hydrological Sciences Journal 27, 3, 369-383.
- Vanoni, V.A. (editor) (1977): Sedimentation Engineering (prepared by the ASCE Task Committee), ASCE, New York, USA.

Williams, J.R. and Berndt, H.D. (1972) "Sediment Yield Computed with Universal Equation", Proceedings ASCE: Journal of the Hydraulics Division, vol. 98, No HY12, 2087-2098.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No 537, U.S.Department of Agriculture, Washington, USA.

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
Πολιτικός Μηχανικός
Επιστημονικός Συνεργάτης ΕΜΠ
Τομέας Υδατικών Πόρων-
Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων
157 73 Ζωγράφου

ΚΙΚΗ ΤΑΡΛΑ
Πολιτικός Μηχανικός
Βαρβάκη 38
114 74 Αθήνα

SEDIMENT YIELD ESTIMATIONS IN GREECE

By Dimitris Koytsoyiannis and Kiki Tarla

An extended summary

1. SEDIMENT MEASUREMENTS IN GREECE- BASIC DATA OF THE STUDY

Systematic sediment measurements have been carried out mainly by the Public Power Corporation, only in few sites of main rivers in Greece (Aliakmon, Aheloois, Aranthos, Kalamas, Aoois). These have been made especially for the needs of certain dams design. The only sediment portion measured is the suspended, and the only output of each measurement is the total sediment discharge concentration.

The data used in this study are coming from the measurements of the rivers Aranthos (sites Gogo, Tsimovo, Plaka, Arta), Kalamas (sites Kioteiki, Soulopoulo), and Aliakmon (site Siatista), shown in Fig. 1 [*Sediment measurement stations*]. The corresponding catchment areas of the above sites are between 204 and 2725 km². The average rainfall, runoff, and climatic data of the above catchments, derived from the relevant measurements, and certain topographic and geologic data, resulting from the corresponding maps, have been used in this study, as well.

2. EFFECTS OF THE HYDROLOGIC, CLIMATIC, TOPOGRAPHIC AND GEOLOGIC FACTORS ON THE SEDIMENT YIELD*

Based on the sediment measurements, the sediment transport curves have been derived, for all of the examined stations. As shown in Fig. 2 [*Sediment transport curve of river Aranthos, site Arta*], in general it was found that for each station there exist two different curves, one for the wet period (December - May), and one for the dry period (June - November). In the latter one, higher sediment transport rates appear, for the same water discharge.

Using the sediment transport curves and the corresponding discharge duration curves, the sediment yield in yearly basis, and consequently the mean annual sediment yield has been calculated, for each station. Possible relations between sediment yield and hydroclimatic and physiographic parameters were been searched. As shown in Fig. 3 [*Correlation between suspended sediment yield and precipitation*], and in Fig. 4 [*Correlation between suspended sediment yield and runoff*], the mean annual sediment yield (G) is correlated with both the mean annual precipitation (P) and the mean annual runoff (R). The former correlation is more significant than the latter (cor-

relation coefficients 0.912 and 0.679 respectively).

The ratio $\alpha = G / \hat{G}$, which expresses the deviation of the measured sediment yield (G) from its estimated value (\hat{G}), based on the above mentioned relation ($G - P$), has then been used in order to investigate possible correlation of sediment yield and other catchment parameters. As shown in Fig. 5 [*Correlation between suspended sediment yield and geologic, climatic and topographic catchment parameters*], it was found that sediment yield is not correlated with mean annual temperature (Fig. 5B), catchment area (Fig. 5Y), river length (Fig. 5S), average river slope (Fig. 5E) and average catchment slope (Fig. 5σ). The only factor affecting sediment yield seems to be the geology (Fig. 1α). The parameter γ , which has been introduced as a single measure of the catchment geology and is referred to as "geologic factor", is defined as follows:

$$\gamma = K_1P_1 + K_2P_2 + K_3P_3$$

where :

P_1 = fraction of the catchment area occupied by high errodibility soils/rocks (flysch, alluvia),

P_2 = fraction of the catchment area occupied by normal errodibility soils/rocks (sandstones, schists),

P_3 = fraction of the catchment area occupied by low errodibility rocks (limestones, dolomites, metamorphic, volcanic), and

K_1, K_2, K_3 : relative errodibility measures for the above defined three rock categories, respectively, with values empirically determined ($K_1=1, K_2=0.5, K_3=0.1$).

Nevertheless the arbitrary definition of the geologic factor, it seems to be an effective parameter in sediment yield estimation, because of the strong correlation with the deviation α (correlation coefficient = 0.980).

3. DERIVATION OF AN EMPIRICAL FORMULA FOR SEDIMENT YIELD ESTIMATION

Based on the above investigations of the correlation between the various parameters, a final empirical formula for the estimation of sediment yield from hydrologic and geologic parameters has been derived. The formula is :

$$G = 15 \times \gamma \times e^{3P}$$

where

G = mean annual sediment yield in t/km^2 ,

P = mean annual rainfall depth in mm, and

γ = geologic factor, defined in the previous paragraph.

In order to examine the fitting of the above relation to the real data, the parameter $G_1 = G/\gamma$ has been introduced, which is referred to as "specific sediment yield". Figure 6 [*Correlation between specific sediment yield and rainfall*] shows the good agreement between the formula and the data, in mean annual basis. The maximum deviation is 1.21 (+21%) and the minimum is 0.75 (-25%), while the standard error is 1,17. Figure 7 [*Correlation between annual values of the specific sediment yield and rainfall*] shows the same fitting, but in annual basis. In this case the maximum deviation of the real data is about one order of magnitude.

DIMITRIS KOUTSOYIANNIS
Civil Engineer
National Technical Univ. of Athens
Division of Water Resources,
Hydraulic and Maritime Engineering
157 73 Zografou.

KIKI TARLA
Civil Engineer
38, Varvaki str.
114 74 Athens.