

## ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ν. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζονται συνοπτικά οι υδρολογικές μέθοδοι για την εκτίμηση ποσοτήτων φερτών υλικών, οι οποίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των υδραυλικών/υδροδυναμικών μεθόδων όταν πρόκειται για εφαρμογές σε φυσικές λεκάνες απορροής. Αρχικά περιγράφονται οι μηχανισμοί και οι παράγοντες της εδαφικής διάβρωσης και γίνεται συνοπτική παρουσίαση της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις κατηγορίες μεθόδων εκτίμησης ποσοτήτων φερτών υλικών (στερεοαπορροής) σε υδατορεύματα. Στο τέλος δίνεται μία νέα εμπειρική σχέση εκτίμησης στερεοαπορροής, που βασίστηκε σε μετρήσεις σε ποτάμια της Βορειοδυτικής Ελλάδας.

## HYDROLOGY AND ESTIMATION OF SEDIMENT QUANTITIES

DIMITRIS N. KOUTSOYANNIS

ABSTRACT

This study is a review of hydrological-type methods, concerning the estimation of sediment quantities, which are more effective than hydraulic/hydrodynamic methods for prediction in natural watersheds. It starts with the description of the mechanics and factors of soil erosion, followed by a brief presentation of the Universal Soil Loss Equation. Three general categories of methods for sediment yield estimation are then summarised, and finally a new relation is presented, which has been derived from measurements in rivers of Northwestern Greece.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υδροδυναμικοί μηχανισμοί μετακίνησης των φερτών υλικών από το νερό έχουν σήμερα αναλυθεί και περιγραφεί μαθηματικά σε σημαντικό βαθμό. Έχουν καταστρωθεί αρκετές εξισώσεις, βασισμένες στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής, που υπολογίζουν τις διάφορες συνιστώσες της στερεοπαροχής ενός υδατορεύματος με αλλοβιακή κοίτη. Παρ' όλα αυτά, όμως, η υδροδυναμική αντιμετώπιση του θέματος είναι ανεπαρκής για την περιγραφή και ποσοτική εκτίμηση της στερεοπαροχής σε φυσικές λεκάνες απορροής και φυσικά υδατορεύματα, κυρίως γιατί δεν παίρνει υπόψη την προέλευση και διαθεσιμότητα των φερτών υλικών, ιδιαίτερα των λεπτόκοκκων.

Η υδρολογική αντιμετώπιση του φαινομένου, που ορισμένα στοιχεία της δίνονται στην εργασία αυτή, συχνά δεν έχει τη θεωρητική πληρότητα της υδροδυναμικής μεθόδου, αλλά δίνει πιο ικανοποιητικές εκτιμήσεις ποσοτήτων φερτών υλικών. Συνήθως στηρίζεται σε μετρήσεις στερεοπαροχής, που αφορούν το συγκεκριμένο, κάθε φορά, πρόβλημα, αλλά και όταν αυτές λείπουν, καταφεύγει σε εμπειρικές θεωρήσεις και εμπειρικούς τύπους. Δεν βασίζεται πάντα στους μηχανισμούς της κίνησης, είναι όμως συχνά αναγκασμένη να πάρει υπόψη την "πρώτη ύλη" της στερεοπαροχής, που είναι το προϊόν της διάβρωσης, και να εξετάσει το μηχανισμό τροφοδοσίας του υδατορεύματος με αυτή την πρώτη ύλη. Για το λόγο αυτό παίρνει υπόψη σαν παραγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο, πέρα από τους υδροδυναμικούς παράγοντες, (παροχή, ταχύτητα, συρτική τάση, κλπ.) τις υδρολογικές, κλιματικές, τοπογραφικές, γεωλογικές και άλλες φυσικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής.

Βέβαια τα τελειότερα μαθηματικά μοντέλα περιγραφής του όλου φαινομένου που έχουν αναπτυχθεί ή αναπτύσσονται σήμερα στηρίζονται συνήθως σε κάποια σύνθεση των δύο μεθόδων, και αξιοποιούν την υδρολογική θεώρηση για την αναπαράσταση του φαινομένου τροφοδοσίας του υδατορεύματος σε πρώτη ύλη, και την υδροδυναμική θεώρηση για τον υπολογισμό της μεταφορικής ικανότητας του υδατορεύματος.

## 2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

### 2.1. Βασικές έννοιες

Ο όρος εδαφική διάβρωση χρησιμοποιείται για αντιδιαστολή με τη διάβρωση της κοίτης και των οχθών των υδατορευμάτων με σημαντική διατομή (χειμάρρων, ποταμών). Η διάβρωση που απασχολεί την υδρολογία είναι αυτή που προέρχεται από τη δράση του νερού, και όχι από δράσεις άλλων στοιχείων (π.χ. αιολική). Για την ταξινόμηση της διάβρωσης και για την ποσοτική περιγραφή της χρησιμοποιούνται οι παρακάτω όροι: (βλ. και Vanoni και Kirkby-Morgan)

- Επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion) είναι η απομάκρυνση ενός λεπτού επιφανειακού εδαφικού στρώματος. Είναι προϊόν της συνδυασμένης δράσης της ενέργειας της βροχής και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής ροής.
- Διάβρωση ρυακιών (rill erosion) είναι η απομάκρυνση του εδάφους από τοπικές συγκεντρώσεις ροής βρόχινου νερού, που σχηματίζουν ένα μικρής και ασταθούς διατο-

μής δίκτυο αυλακιών, ασταθούς γεωμετρίας(ρυάκια). Συνήθως συμπεριλαμβάνεται στην επιφανειακή διάβρωση, εκτός αν γίνεται ιδιαίτερη μνεία.

- Διάβρωση χαντακιών (gully erosion) είναι η απομάκρυνση εδαφικού υλικού που οφείλεται στο νερό που τρέχει σε σαφώς σχηματισμένη και μόνιμη κοίτη (χαντάκι).
- Εδαφική απώλεια (soil loss) είναι η ποσότητα εδαφικού υλικού που τελικά απομακρύνεται από μία εδαφική έκταση σε δεδομένο χρόνο. Εκφράζει την διαφορά της ποσότητας εδαφικού υλικού που διαβρώθηκε μείον την ποσότητα που αποτέθηκε ξανά στην ίδια εδαφική έκταση. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας ανά επιφάνεια.
- Στερεοαπορροή ή ποσότητα φερτών (sediment yield) είναι η συνολική ποσότητα φερτών υλικών που διέρχονται από μία διατομή αναφοράς (π.χ. διατομή ποταμού) σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας και πολλές φορές 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 φερτών που έχει διαβρωθεί στην ανάντη της διατομής αναφοράς λεκάνη απορροής. Είναι μέτρο της απομείωσης των φερτών που μετακινούνται εξαιτίας ενδιάμεσων αποθέσεων στη λεκάνη απορροής και εκφράζεται με ένα αδιάστατο αριθμό ή ποσοστό.

## 2.2. Μηχανισμοί διάβρωσης

Η αρχική κινητήρια δύναμη της διάβρωσης είναι η ενέργεια της βροχής, που είναι το άθροισμα της κινητικής ενέργειας των μεμονωμένων σταγόνων. Η ενέργεια αυτή μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή της διαμέτρου των σταγόνων μιάς συγκεκριμένης βροχής, αφού και η ταχύτητα των σταγόνων είναι συνάρτηση του μεγέθους τους. Στην πράξη, βέβαια, αυτό είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, και έχουν αναζητηθεί προσρορότεροι τρόποι έκφρασης αυτής της ενέργειας. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται η ένταση της βροχής, (βλ. Kirkby and Morgan), σύμφωνα με τη σχέση

$$E = 5.79 \ln(25 I)$$

όπου  $E$ =ανηγμένη κινητική ενέργεια βροχής ( $\text{Joule}/\text{m}^2$  επιφ/μμ βροχής)

$$I = \text{ένταση βροχής (mm/h)}$$

Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα κατώφλι στην διαβρωσιμότητα της βροχής, αφού βροχοπτώσεις με μέση ένταση κάτω από 25mm/h δεν προκαλούν πρακτικά διάβρωση, ενώ η διαβρωτική ικανότητα παρουσιάζει μέγιστη τιμή για εντάσεις μεταξύ 50mm/h και 100mm/h.

Βέβαια η βροχόπτωση από μόνη της δεν προκαλεί μόνιμη μετακίνηση των εδαφικών κόκκων, αλλά απλώς παράγει το υλικό για μετακίνηση, δηλαδή αποσπά το υλικό και το θέτει σε αιώρηση, εφόσον όμως πραγματοποιείται ροή στην επιφάνεια του εδάφους. Η επιφανειακή ροή πραγματοποιείται όταν η ένταση της βροχής ξεπερνά το ρυθμό διήθησης. Συνήθως έχει ταχύτητες της τάξης των 1,5-4 cm/sec και βάθος ροής μέχρι 3mm. Η ροή αυτή, που συχνά είναι στρωτή, έχει πολύ μικρή ή πρακτικά μηδενική δια-

βρωτική ικανότητα, και δεν θα επαρκούσε για την απόσπαση των εδαφικών κόκκων, χωρίς την παράλληλη δράση της βροχής. Η δράση της επιφανειακής ροής εξαντλείται στην απόπλυση (wash) του εδάφους. Όταν όμως, μετά από κάποια διαδρομή του νερού, κατά την οποία πραγματοποιείται γραμμική αύξηση της παροχής, η ταχύτητα φτάσει τα 30cm/sec τότε σχηματίζονται ρυάκια, με πολύ μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα και παράλληλα με διαβρωτική ικανότητα, αφού εδώ η ροή είναι τυρβώδης. Ακόμη μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παροχής σχηματίζουν χαντάκια, που προκαλούν μόνιμη κατάτμηση του εδάφους.

### 2.3. Παράγοντες διάβρωσης

#### 2.3.1. Φυτοκάλυψη

Η φυτοκάλυψη αναστέλλει έντονα το ρυθμό της διάβρωσης (μέχρι και στο 1% του ρυθμού που παρατηρείται σε γυμνό έδαφος) δρώντας με τους εξής τρόπους.

- α) Αύξηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους, άρα μείωση της απορροής.
- β) Επαύξηση της τραχύτητας, άρα μείωση της ταχύτητας ροής και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας του νερού.
- γ) Απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της βροχής από το φυτικό ιστό. - Μείωση της πιθανότητας επαφής της βροχής με τους κόκκους του εδάφους.

#### 2.3.2. Χαρακτηριστικά εδάφους

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η κοκκομετρική κατανομή, η συνεκτικότητα, η δομή κλπ. επιδρούν στα ακόλουθα:

- α) Στο ρυθμό απόσπασης των κόκκων (δομή-συνεκτικότητα).
- β) Στη διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα της ροής (μέγεθος κόκκων).
- γ) Στην υδραυλική της ροής (τραχύτητα-μέγεθος κόκκων).
- δ) Στην ποσότητα της απορροής (διαπερατότητα).

#### 2.3.3. Τοπογραφικά χαρακτηριστικά (κλίση-μήκος)

Είναι προφανής η επίδραση της γωνίας κλίσεως στα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής και επομένως και στη μεταφορική και διαβρωτική της ικανότητα. Παράλληλα η κλίση επηρεάζει και τη διαδικασία απόσπασης εδαφικών κόκκων από τη βροχή, αφού σε μεγαλύτερες κλίσεις παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός απόσπασης.

Το μήκος μιάς κλιτύς (slope length) επηρεάζει επίσης τη διαδικασία διάβρωσης, αφού παρατηρείται γραμμική αύξηση της παροχής κατά την έννοια του μήκους, και κατά συνέπεια αύξηση της ταχύτητας και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητας της ροής.

### 2.4. Ποσοτική εκτίμηση εδαφικής απώλειας

#### 2.4.1. Γενικά - Η Πάγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος που διαθέτουμε για την εκτίμηση της εδαφικής

απώλειας, στην περίπτωση που δεν έχουμε μετρήσεις, είναι η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας - ΠΕΕΑ (Universal Soil Loss Equation - USLE), που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ. Αρχικά διατυπώθηκε περί το 1960, και από τότε έχουν γίνει αρκετές προσαρμογές και βελτιώσεις, (βλ. Wischmeier and Smith, 1978 και Kirkby and Morgan, 1980). Η εξίσωση αυτή αφορά την επιφανειακή εδαφική διάβρωση, συμπεριλαμβάνοντας και τη διάβρωση ρυακιών, και παίρνει υπόψη όλους τους μηχανισμούς και παράγοντες που περιγράφηκαν πιο πάνω, καθώς επίσης και τις τυχόν ανθρώπινες επεμβάσεις που γίνονται για τον έλεγχο της διάβρωσης. Η εξίσωση εξυπηρετεί τους ακόλουθους σκοπούς:

- 1) Εκτίμηση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας σε αγρούς ή και μη γεωργικές εκτάσεις.
- 2) Καθοδήγηση της επιλογής της φυτοπροστασίας ή άλλων έργων αντιδιαβρωτικής προστασίας εδαφικών εκτάσεων.
- 3) Καθοδήγηση της επιλογής είδους καλλιέργειας καλλιεργήσιμων εκτάσεων.

Η εξίσωση δεν είναι κατάλληλη για υπολογισμούς διάβρωσης και απόθεσης σε χαντάκια, χειμάρρους ή ποταμούς. Επίσης δεν είναι κατάλληλη για υπολογισμό της εδαφικής απώλειας που προκύπτει μετά από ένα συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής/απορροής, ή για ακολουθία τέτοιων επεισοδίων (π.χ. σε ένα μήνα ή έτος). Μπορεί πάντως να εφαρμοστεί στην τελευταία περίπτωση, αλλά οι τιμές που θα προκύψουν αποτελούν μέσες εκτιμήσεις πολλών ταυτόσημων επαναλήψεων του επεισοδίου ή της ακολουθίας επεισοδίων.

Η διατύπωση της ΠΕΕΑ είναι η εξής:

$$A = (0,224) R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

όπου: A= εδαφική απώλεια σε  $\text{Kg}/\text{m}^2$  - αναφέρεται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται και το R

R= συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής (rainfall erosivity factor)

K= συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους (soil erodibility factor)

L= συντελεστής μήκους κλιτύος (slope-length factor)

S= συντελεστής κλίσης κλιτύος (slope-steepness factor)

C= συντελεστής φυτοκάλυψης/καλλιέργειας (cover and management factor)

P= συντελεστής ελέγχου διάβρωσης (support practice factor)

Παρακάτω αναλύονται χωριστά οι συντελεστές της εξίσωσης.

#### 2.4.2. Ο συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής - R

Ο συντελεστής αυτός είναι μέτρο της αποτελεσματικότητας της βροχής ως προς

\* Στην εργασία αυτή έγινε μετατροπή της αρχικής σχέσης στο μετρικό σύστημα μονάδων (SI), από το αγγλοσαξωνικό σύστημα, στο οποίο έχει διατυπωθεί η αρχική σχέση, σε τρόπο όλα τα φυσικά μεγέθη να έχουν τις σωστές μονάδες του SI, αλλά οι συντελεστές της σχέσης (R, K, κλπ) να έχουν την ίδια αριθμητική τιμή, όπως στο αγγλοσαξωνικό σύστημα.

τη διάβρωση. Όπως αποδείχθηκε δεν αρκεί η συνολική ενέργεια της βροχής σαν έκφραση της αποτελεσματικότητας, αφού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και ο ρυθμός παροχής της ενέργειας αυτής. Έτσι έχει εισαχθεί σαν μέτρο αποτελεσματικότητας το γινόμενο της ενέργειας επί την ένταση της βροχής (EI). Για ένα επεισόδιο βροχής έχουμε τις εκφράσεις:

$$R = \frac{E \cdot I_{30}}{1700} \quad (2.2)$$

$$E = \sum_j \epsilon_j I_j \Delta t_j \quad (2.3)$$

$$\epsilon_j = 3,79 \ln(23I_j) \quad (2.4)$$

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<sup>2</sup>)

I<sub>30</sub> = μέγιστη τιμή της έντασης βροχής που παρατηρείται στο επεισόδιο για χρονικό διάστημα 30 λεπτών τουλάχιστον

Δt<sub>j</sub> = H j υποδιαίρεση του χρόνου βροχής (hr)

I<sub>j</sub> = ένταση βροχής στο χρόνο Δt<sub>j</sub> (mm/hr)

ε<sub>j</sub> = ειδική κινητική ενέργεια της βροχής, ήτοι ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα ύψους βροχής (Joule/m<sup>2</sup>/mm)

Για μία ακολουθία επεισοδίων βροχής (π.χ. ενός μήνα, ενός χρόνου κλπ.) πρέπει να προστεθούν τα μεμονωμένα R για να προκύψει το συνολικό. Στην πράξη εφόσον ενδιαφέρει η μέση ετήσια τιμή του R πρέπει να υπολογισθεί η ακολουθία τιμών του R για όλα τα επεισόδια βροχής μίας περιόδου N ετών, να ληφθεί το άθροισμα όλης της ακολουθίας και να διαιρεθεί με το N. Αυτό βέβαια είναι πολύ χρονοβόρα εργασία. Στις ΗΠΑ έχουν δημοσιευθεί χάρτες με τιμές του R που κυμαίνονται από 20 μέχρι 550, ενώ στη Δυτική Αφρική αντίστοιχοι χάρτες δείχνουν τιμές που φτάνουν μέχρι 2000.

Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας υπολογισμού του R έχουν γίνει προσπάθειες συσχέτισης της ετήσιας τιμής του R με απλούστερα υπολογιζόμενες παραμέτρους της βροχής, (βλ. Kirkby and Morgan). Αναφέρουμε μία τέτοια σχέση που αναπτύχθηκε στη Δυτική Αφρική

$$R_{ET}/P_{ET} = 0.50 \pm 0.05 \quad (2.5)$$

όπου

R<sub>ET</sub> = μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας

P<sub>ET</sub> = μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)

### 2.4.3. Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους - K

Ο συντελεστής αυτός έχει μελετηθεί πειραματικά και μπορεί να εκτιμηθεί από τη σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους με βάση τις σχέσεις

$$100K = 2,1 \cdot 10^{-4} M^{1,14} (12 - \alpha) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3) \quad (2.6)$$

$$M = P_s (100 - P_c) \quad (2.7)$$

όπου

M = παράμετρος μεγέθους κόκκων

$\alpha$  = ποσοστό οργανικού εδαφικού υλικού (%)

b = κωδικός εδαφικής δομής

c = κωδικός διαπερατότητας εδάφους

$P_s$  = ποσοστό ιλύος και πολύ λεπτής άμμου στο έδαφος (%): (διάμετρος κόκκων 0,0025-0,1mm)

$P_c$  = ποσοστό αργίλου στο έδαφος (%), (διάμετρος κόκκων μικρότερη των 0,002mm)

Η εξίσωση (2.6) ισχύει για τιμές του  $P_s$  μικρότερες του 70, ενώ για μεγαλύτερες τιμές θα πρέπει να καταφύγουμε σε σχετικό νομογράφημα (Wischmeier and Smith)

Ο κωδικός εδαφικής δομής παίρνει τιμές από 1 (για πολύ λεπτοκοκκώδη δομή) μέχρι 4 (για τεμαχισμένη ή πλακώδη δομή). Ο κωδικός διαπερατότητας παίρνει τιμές από 1 (για πολύ γρήγορη διαπερατότητα) μέχρι 6 (για πολύ αργή διαπερατότητα).

Για τη διευκόλυνση του καθορισμού του συντελεστή K έχουν δημοσιευθεί πίνακες για χαρακτηριστικές περιπτώσεις εδαφών.

### 2.4.4. Οι τοπογραφικοί συντελεστές L και S

Υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$L = (x/22,13)^m \quad (2.8)$$

$$S = (65,41 \sin^2\theta + 4,56 \sin\theta + 0,065) \quad (2.9)$$

όπου

x = μήκος κλιτύος (m), (κεκλιμένο) = απόσταση από το σημείο που αρχίζει η επιφανειακή ροή μέχρι το σημείο που η απορροή απάγεται από φυσικό ή τεχνητό αγωγό.

$\theta$  = γωνία κλίσης [ $\sin\theta = s/\sqrt{100^2+s^2}$ , όπου s η κλίση (%)]

$$m = \begin{cases} 0,1 \text{ για κλίση} & s < 1\% \\ 0,3 \text{ για κλίση} & 1\% \leq s < 3\% \\ 0,4 \text{ για κλίση} & 3\% \leq s < 5\% \\ 0,5 \text{ για κλίση} & s \geq 5\% \end{cases}$$

### 2.4.5. Οι συντελεστές φυτοκάλυψης και ελέγχου διάβρωσης - C και P

Και οι δύο συντελεστές έχουν υπολογισθεί πειραματικά για ποικιλία περιπτώ-

σεων και έχουν δημοσιευθεί πινακοποιημένες τιμές τους. Εκφράζονται με αδιάστατους αριθμούς μικρότερους από 1.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης C είναι μέτρο της απομείωσης της εδαφικής απώλειας που οφείλεται είτε σε φυσική φυτοκάλυψη (χόρτα, θάμνοι, δάση), είτε σε καλλιέργεια του εδάφους. Στη δεύτερη περίπτωση η τιμή του C καθορίζεται από το είδος και το πρόγραμμα της καλλιέργειας. Ο συντελεστής γενικά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Η επίδραση του C στην εξίσωση είναι δραστική, αφού οι τιμές του φτάνουν προς τα κάτω μέχρι 0,01.

Ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης P αφορά μόνο καλλιεργήσιμες εκτάσεις και είναι το μέτρο της απομείωσης της εδαφικής απώλειας που οφείλεται σε πρακτικές ενίσχυσης των αγρών έναντι της διάβρωσης, εφόσον ακολουθούνται τέτοιες. Τέτοιες πρακτικές είναι το όργωμα και η φύτευση σε γραμμές παράλληλες με τις ισοϋψείς (συντελεστές  $P=0,60 \pm 0,90$ ), ο ελαχισμός της γης σε λουρίδες παράλληλες με τις ισοϋψείς, με διαφορετική καλλιέργεια στην κάθε μιά, και ανακύκλωση των καλλιεργετών ( $P=0,30 \pm 0,45$ ) και η κατασκευή σειρών μικρών αναχωμάτων κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους ( $P=0,12 \pm 0,18$ ).

### 3. ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΟΑΠΟΡΡΟΗΣ

#### 3.1. Γενικά - κατάταξη φορτίου υδατορευμάτων

Ο όρος "στερεοαπορροή" (sediment yield), όπως ορίστηκε στην παράγραφο 2.1 δεν είναι ταυτόσημος με τον όρο "στερεοπαροχή" (sediment discharge). Ο πρώτος περιγράφει την συνολική ποσότητα φερτών που διέρχεται από μιά διατομή αναφοράς, σε μιά καθορισμένη χρονική διάρκεια, ενώ ο δεύτερος σημαίνει το στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς των φερτών που παρατηρείται στη διατομή (μονάδες: μάζα/χρόνος ή βάρος/χρόνος). Τα φερτά υλικά που κάποια καθορισμένη στιγμή μετακινούνται από τη ροή αποδίδονται με τον όρο "φορτίο" (load).

Το φορτίο ενός υδατορεύματος ταξινομείται γενικά με τους εξής τρόπους:

α) Με βάση το μηχανισμό μεταφοράς, διακρίνεται σε

- Φορτίο σε σύρση (bed load), που κινείται στην κοίτη ή πολύ κοντά σε 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 τη διάβρωση της λεκάνης απορροής. Το υλικό αυτό είναι γενικά πολύ πιο λεπτόκοκκο από το υλικό της κοίτης (ιλύς-άφηνλος) και μετακινείται σχεδόν αποκλειστικά με το μηχανισμό της αιώρησης.

Ανάλογη ταξινόμηση γίνεται και στα μενέθη της στερεοπαροχής και στερεοαπορ-



ροής.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή οι σχέσεις υπολογισμού στερεοπαροχής που βασίζονται σε υδροδυναμικές θεωρήσεις μπορούν να δώσουν μιά αρκετά καλή εικόνα της στερεοπαροχής υλικού κοίτης και μόνο, το οποίο προσδιορίζεται από τη μεταφορική ικανότητα του υδατορεύματος. Η στερεοπαροχή χωμάτων όμως είναι συνήθως πολλαπλάσια της στερεάς παροχής υλικού κοίτης, και προσδιορίζεται από τη διαθεσιμότητα των χωμάτων στο υδατόρευμα. Έτσι όταν μας ενδιαφέρει η ολική στερεοπαροχή καταφεύγουμε σε εμπειρικές μεθόδους υδρολογικού τύπου.

### 3.2. Εκτιμήσεις στερεοπαροχής από μετρήσεις στερεοπαροχής

#### 3.2.1. Η καμπύλη μεταφοράς φερτών

Αν και έχουν αναπτυχθεί τελευταία μέθοδοι για την αυτόματη καταγραφή της στερεοπαροχής σε συνεχή χρόνο, το πιο διαδεδομένο καθεστώς μετρήσεων είναι οι σποραδικές στιγμιαίες μετρήσεις στερεοπαροχής με ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής σε μιά συγκεκριμένη θέση υδατορεύματος. Από τα στοιχεία των μετρήσεων αυτών καταρτίζεται μιά έκφραση της σχέσης παροχής-στερεοπαροχής, αναλυτική ή γραφική, που λέγεται καμπύλη μεταφοράς φερτών (sediment transport curve). Η καθιέρωσή της οφείλεται στην αρκετά καλή συσχέτιση που υπάρχει ανάμεσα στα δύο μεγέθη, που δικαιολογείται από το γεγονός ότι η παροχή ενός υδατορεύματος αντιπροσωπεύει και τις υδραυλικές παραμέτρους της ροής, αλλά και τις υδρολογικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής. Πάντως η εμφανιζόμενη αβεβαιότητα της τιμής της στερεοπαροχής είναι αρκετά μεγάλη, αφού οι μετρημένες τιμές της στερεοπαροχής έχουν συνήθως απόκλιση μέχρι μιάς τάξης μεγέθους, για την ίδια τιμή της παροχής (μέγιστη:ελάχιστη τιμή=10). Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε άλλους παράγοντες, υδρολογικά κυρίως, που δεν λαμβάνονται υπόψη. 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 καταγίδων), οι 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

$$Q_s = aQ^b \quad (3.1)$$

όπου

$Q_s$  = στερεοπαροχή (ολική ή τμηματική) (Kg/sec)

$Q$  = παροχή ( $m^3/sec$ )

$a, b$  = σταθερές

Στην Ελλάδα έχουν γίνει μετρήσεις στερεοπαροχής από τη ΔΕΗ και το Υπουργείο Δημοσίων Έργων σε περιορισμένες θέσεις των κυριότερων ποταμών, σε περιπτώ-

σεις που το επέβαλαν ανάγκες προγραμματισμού και μελέτης σοβαρών έργων (φραγμάτων κυρίως). Οι μετρήσεις αφορούν μόνο το αιώρούμενο τμήμα της στερεοπαροχής. (Η μέτρηση της στερεοπαροχής με σύρση παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες). Στα διαγράμματα παροχής-στερεοπαροχής που έχουν καταρτισθεί για τις θέσεις μέτρησης, είναι στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανείς δύο διαφορετικές καμπύλες, μιά για την υγρή περίοδο (Δεκέμβριος-Μάιος) και μιά για την ξηρή (Ιούνιος-Δεκέμβριος). Η δεύτερη καμπύλη δίνει πολύ μεγαλύτερες τιμές της στερεοπαροχής από την πρώτη, για την ίδια τιμή της παροχής (5-20 φορές μεγαλύτερη).

### 3.2.2. Εκτίμηση στερεοαπορροής

Στην περίπτωση που υπάρχει καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής, ο υπολογισμός της στερεοαπορροής είναι ιδιαίτερα απλός. Αρκεί μιά καμπύλη διάρκειας παροχής σε ημερήσια ή καλύτερα στιγμιαία βάση. Η στερεοαπορροή προκύπτει τότε από την αριθμητική ολοκλήρωση της σχέσης

$$G = T \int_0^{\infty} g(Q) f(Q) dQ = T \int_0^1 g(Q) dF(Q) \quad (3.2)$$

όπου

$G$  = η στερεοαπορροή της χρονικής περιόδου  $T$ , στην οποία αναφέρεται και η καμπύλη διάρκειας (συνήθως είναι το μέσο έτος)

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

$F(Q)$  = η καμπύλη διάρκειας παροχής

Συνήθως η καμπύλη παροχής-στερεοπαροχής στηρίζεται μόνο σε μετρήσεις αιωρούμενων φερτών, οπότε και η στερεοαπορροή που προκύπτει έτσι αφορά μόνο τα αιωρούμενα φερτά. Το μέγεθος αυτό καλύπτει το σύνολο του φορτίου χωμάτων αλλά μόνο ένα τμήμα του φορτίου υλικών κοίτης. Σε μεγάλα ποτάμια το παραλειπόμενο τμήμα είναι αρκετά μικρό και συνήθως συνυπολογίζεται χοντρικά με μιά κατάλληλη προσ αύξηση της παραπάνω τιμής.

### 3.3. Εκτιμήσεις στερεοαπορροής από το μέγεθος διάβρωσης

Πρόκειται για μιά μέθοδο ανάλογη της μεθόδου εκτίμησης της απορροής από τη βροχόπτωση με βάση το συντελεστή απορροής. Εδώ έχουμε το συντελεστή στερεοαπορροής που γενικά είναι συνάρτηση της έκτασης της λεκάνης (φθίνουσα) και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών, όπως του μήκους του υδατορεύματος, του αναγλύρου κ.λπ. Στη βιβλιογραφία δίνονται τιμές του συντελεστή αυτού σαν συνάρτηση της έκτασης της λεκάνης. Ενδεικτικά έχουμε μιά τιμή ίση με 0,58 για έκταση λεκάνης ίση με 0,05 km<sup>2</sup> και 0,059 για έκταση λεκάνης ίση με 1000 km<sup>2</sup>.

Η βασική δυσκολία της μεθόδου, πέρα από την εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής, είναι η πολυπλοκότητα της εκτίμησης του μεγέθους διάβρωσης, σε ένα πολύπλοκο φυσικό ανάγλυφο. Σε αυτό περιλαμβάνεται η εδαφική διάβρωση (επιφανειακή ρυακίων, χαντακίων), καθώς και η διάβρωση του υδατορεύματος. Για το λόγο αυτό η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου περιορίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής. Μιά τέτοια

εφαρμογή για λεκάνες απορροής έκτασης μέχρι  $18 \text{ Km}^2$  στις ΗΠΑ δίνεται στην εργασία των Williams and Berndt (1972).

### 3.4. Εκτιμήσεις στερεοαπορροής από εμπειρικές σχέσεις

#### 3.4.1. Γενικά

Οι εμπειρικές σχέσεις βασίζονται στις παραμετρους της λεκάνης απορροής και αναφέρονται σε μιά συγκεκριμένη περιοχή. Μιά τέτοια σχέση μπορεί να παραχθεί με αξιοποίηση των μετρήσεων στερεοπαροχής, όταν υπάρχουν τέτοιες σε αρκετές θέσεις της περιοχής αναφοράς. Αφού υπολογιστεί η στερεοαπορροή, για τις θέσεις αυτές, με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2, στη συνέχεια γίνεται συσχέτιση της με παραμέτρους της λεκάνης απορροής. Εφόσον διαπιστωθεί ότι υπάρχει τέτοια συσχέτιση, καταρτίζεται μιά εξίσωση, με στατιστικές μεθόδους, η οποία θεωρείται ότι ισχύει και για άλλες θέσεις στον ίδιο τόπο αναφοράς.

Οι παράμετροι που παίρνονται σαν ανεξάρτητες μεταβλητές σε μιά τέτοια εξίσωση μπορεί να είναι: βροχόπτωση, απορροή, θερμοκρασία, έκταση λεκάνης, μήκος υδατορεύματος, κλίση ή ανάγλυφο λεκάνης, χαρακτηριστικά εδάφους, χρήση γής, φυτοκάλυψη, γεωλογικές παράμετροι. Ενδεικτικά αναφέρουμε μιά σχέση που καταρτίστηκε για τις Δυτικές ΗΠΑ από τον E. Flaxman (1972) με βάση στοιχεία αποθέσεων σε 39 ταμιευτήρες με λεκάνες απορροής έκτασης μέχρι  $129 \text{ Km}^2$ . Η σχέση αυτή έχει 4 ανεξάρτητες μεταβλητές, μιά κλιματική (λόγος βροχόπτωσης προς θερμοκρασία), μιά τοπογραφική (μέση κλίση λεκάνης) και δύο εδαφολογικές.

#### 3.4.2. Μία εμπειρική σχέση για την Βορειοδυτική Ελλάδα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μιά νέα εμπειρική σχέση εκτίμησης στερεοαπορροής που έχει αναπτυχθεί από στοιχεία μετρήσεων 7 σταθμών σε ποταμούς της Βορειοδυτικής Ελλάδας\*. Συγκεκριμένα πρόκειται για τους ποταμούς Άραχθο (θέσεις Γκόγκο Τσίμποβο, Πλάκα, Αρτα), Καλαμά (θέσεις Κιοτέκι και Σουλόπουλο), και Αλιάρκμονα (θέση Σιάτιστα). Οι εκτάσεις των λεκανών απορροής κυμαίνονται από 204 μέχρι  $2.725 \text{ Km}^2$ . Ας σημειωθεί ότι οι παραπάνω σταθμοί αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των σταθμών της Ελλάδας που έχουν επεξεργασμένες και αξιοποιήσιμες μετρήσεις.

Ο υπολογισμός της στερεοαπορροής έγινε με βάση τη μεθοδολογία της παραγράφου 3.2. Επειδή σε όλους τους σταθμούς υπήρχαν μόνο μετρήσεις στερεοπαροχής σε αιώρηση, γι' αυτό και η ποσότητα φερτών που υπολογίστηκε αναφέρεται ως στερεοαπορροή σε αιώρηση. Από τις ετήσιες τιμές προέκυψε τελικά η μέση ετήσια στερεοαπορροή η οποία συσχετίστηκε με διάφορες παραμέτρους της λεκάνης. Οι συσχετίσεις αυτές έ-

\* Η ανάπτυξη της σχέσης βασίστηκε κατά ένα μέρος στη διπλωματική εργασία της Κ. Ταρλά (1984). Τα στοιχεία μετρήσεων μας δόθηκαν από τη ΔΠΠ.

δειξαν ότι:

- α) Υπάρχει έντονη σχέση βροχόπτωσης-στερεοαπορροής και απορροής-στερεοαπορροής σε βάση μέσων ετήσιων τιμών. Η πρώτη είναι εντονότερη από τη δεύτερη, πράγμα που θεωρείται λογικό αφού σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω η βροχόπτωση είναι κινητήρια δύναμη της διάβρωσης. Έτσι θεωρήθηκε σαν σκελετός της σχέσης, η εξίσωση βροχής-στερεοαπορροής. Η εισαγωγή και της απορροής σαν δεύτερης ανεξάρτητης μεταβλητής στη σχέση δεν δίνει καμιά ουσιαστική βελτίωση στην προσαρμογή με τα πραγματικά δεδομένα.
- β) Η θερμοκρασία δεν έχει καμιά επίπτωση στη σχέση.
- γ) Η έκταση της λεκάνης και το μήκος του ποταμού δεν επηρεάζουν τη σχέση.
- δ) Η μέση κλίση του ποταμού και η μέση (φαινόμενη) κλίση της λεκάνης δεν επηρεάζουν τη σχέση, παρόλο που γενικά η κλίση θεωρείται ένας από τους βασικούς παράγοντες της διάβρωσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με γεωλογική θεώρηση της κλίσης: Για το ίδιο πέτρωμα αύξηση της κλίσης οδηγεί σε αύξηση της διάβρωσης, αλλά, για διαφορετικά πετρώματα, αυτό που εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη κλίση είναι και το ανθεκτικότερο, άρα έχει και μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση. Συνεπώς η επίδραση της μεταβολής της κλίσης δεν είναι μονοσήμαντη.
- ε) Η γεωλογική σύσταση της λεκάνης απορροής επηρεάζει τη στερεοαπορροή, πράγμα που άνηκε από τις συσχετίσεις με τα επιμέρους ποσοστά της εμφάνισης των διαφόρων πετρωμάτων στη λεκάνη απορροής.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι ανεξάρτητες μεταβλητές της σχέσης στερεοαπορροής θα πρέπει να αφορούν τη βροχόπτωση και τη γεωλογία της λεκάνης. Η τιμή του μέσου ετήσιου ύψους βροχής είναι πολύ αντιπροσωπευτική παράμετρος, αφού περιγράφει και την μέση ετήσια διαβρωτική αποτελεσματικότητα της βροχής (σχέση 2.5). Όσο αφορά τη γεωλογία της λεκάνης, προκειμένου να καταρτιστεί μία παράμετρος που να την περιγράφει μαθηματικά, κατατάχθηκαν τα εμφανιζόμενα πετρώματα σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τη διαβρωσιμότητα τους από το νερό και αποδόθηκε στην κάθε ομάδα ένα εμπειρικό μέτρο διαβρωσιμότητας κ ως εξής:

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. Ομάδα υψηλής διαβρωσιμότητας<br>Αλλούβια, Φλύσχης                                    | $k_1=1$   |
| 2. Ομάδα μέτριας διαβρωσιμότητας<br>Μάργες, Ψαμμίτες, Σχιστόλιθοι                       | $k_2=0,5$ |
| 3. Ομάδα χαμηλής διαβρωσιμότητας<br>Λσβεστόλιθοι, Δολομίτες, Μεταμορφωμένα, Έκκριξηγενή | $k_3=0,1$ |

Στη συνέχεια ορίστηκε ο γεωλογικός συντελεστής  $\gamma$ , σαν αντιπροσωπευτική παράμετρος της γεωλογίας της λεκάνης:

$$\gamma = k_1 P_1 + k_2 P_2 + k_3 P_3 \quad (3.3)$$

όπου  $k_1, k_2, k_3$  οι συντελεστές διαβρωσιμότητας, όπως παραπάνω, και

$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$  οι αντιστοιχες αναλογίες της έκτασης στην οποία εμφανίζεται η καθε κατηγορία πετρωμάτων, προς την συνολική έκταση της λεκάνης. Οι εκτάσεις μπορούν να μετρηθούν από τους γεωλογικούς χάρτες.

Με βάση τη μέθοδο της εκθετικής παλινδρόμησης προέκυψε η σχέση:

$$G_1 = 15e^{3P/1000} \quad (3.4)$$

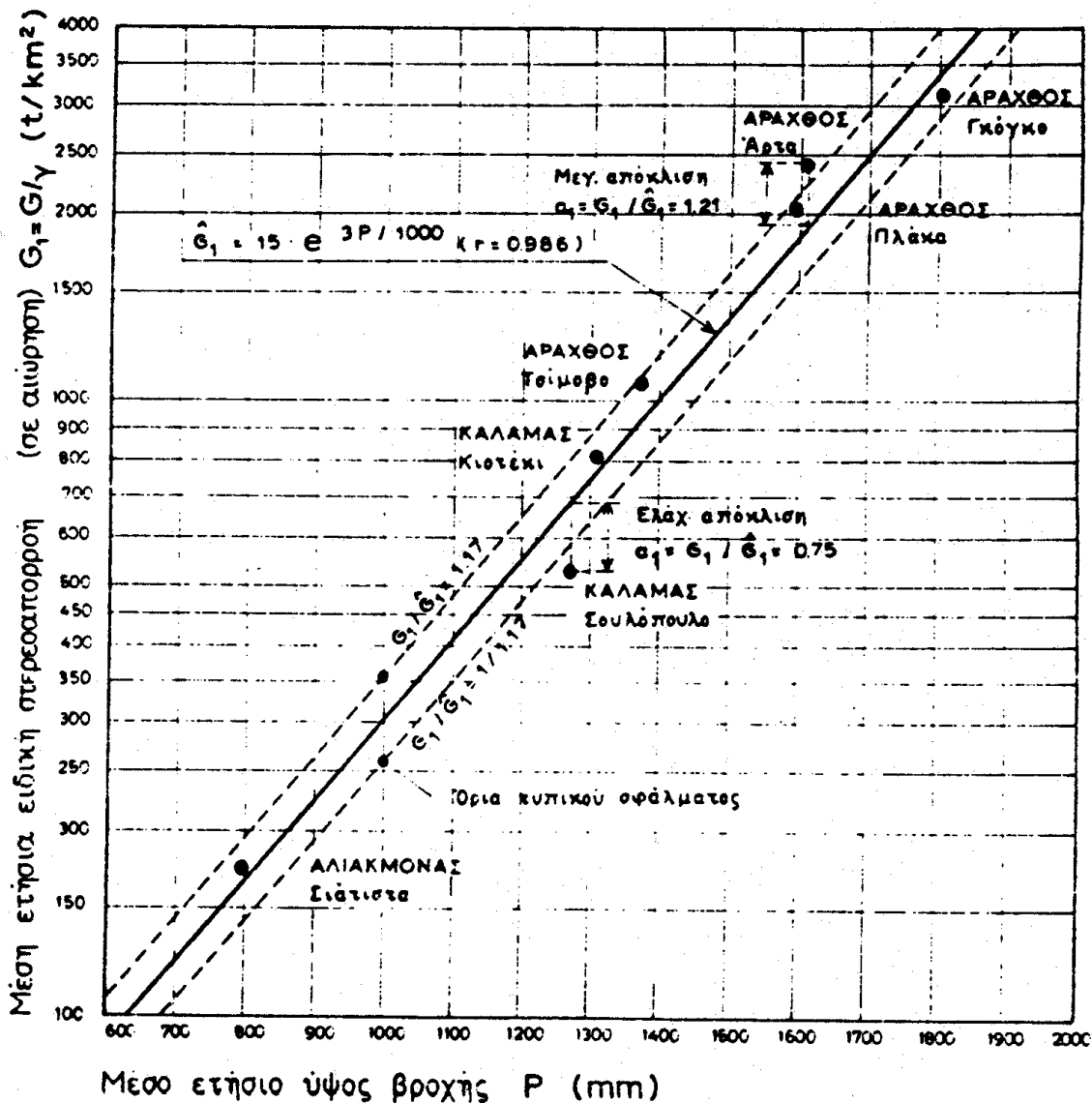
όπου

$G_1 = G/\gamma =$  μέση ετήσια ειδική στερεοαπορροή (σε αιώρηση) ( $t/km^2$ )

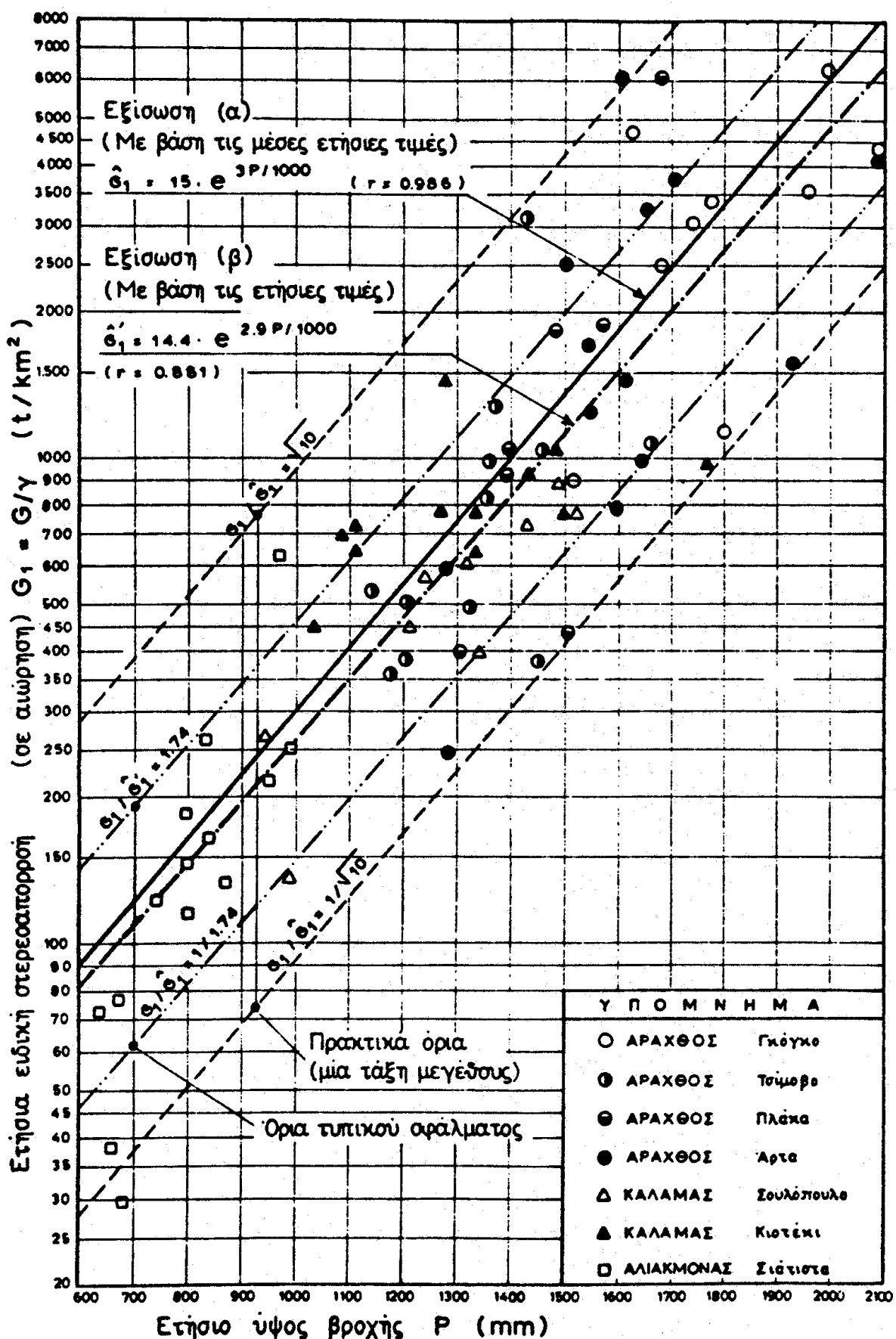
$G =$  μέση ετήσια στερεοαπορροή (σε αιώρηση) ( $t/km^2$ )

$P =$  μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

Ο συντελεστής συσχέτισης προέκυψε ίσος με 0.986.



ΣΧΗΜΑ 1: Συσχέτιση ειδικής στερεοαπορροής και βροχόπτωσης (σε βάση μέσων ετήσιων τιμών).



ΣΧΗΜΑ 2: Συσχέτιση ετήσιων τιμών ειδικής στερεοαπορροής και βροχόπτωσης

Επιλύοντας την εξίσωση (3.4) ως προς  $G$  και εκφράζοντας την βροχόπτωση  $P$  σε μέτρα, παίρνουμε την τελική έκφραση :

$$G = 15ve^{3P} \quad (3.5)$$

Στο σχήμα (1) φαίνεται η πολύ καλή συμφωνία της εξίσωσης (3.4) με τα πραγματικά δεδομένα. Στο σχήμα (2) έχει απεικονισθεί η ίδια εξίσωση σε συνδυασμό με τα πραγματικά δεδομένα σε ετήσια βάση, όπου και πάλι η προσαρμογή είναι ικανοποιητική.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ξανθόπουλος Θ. (1984): Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα.
- Ταράλα Κ. (1984): "Εκτίμηση ποσότητας αιωρούμενων φερτών υλών από τοπογραφικές, υδρομετεωρολογικές και γεωλογικές παραμέτρους - Προσπάθεια διερεύνησης στα ελληνικά ποτάμια", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων-Υδραυλικών και Θαλάσσιων Εργων, ΕΠΙ, 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.
- Nordin, C.F. and Sabol, G.V. (1973) "Estimating Average Sediment Yield from Annual Streamflow and Sediment Records", Proceedings of the International Symposium on River Mechanics, (IAHR).
- 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, U.S.A.