

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ G.I.S.

Υπό Π. ΑΓΓΕΛΙΔΗ και Ν.Ε.ΚΩΤΣΟΒΙΝΟΥ
Τομέας Υδραυλικής και Υδραυλικών Εργων Πολυτεχνικής Σχολής Δημοκριτείου
Πανεπιστημίου Θράκης
67100 ΞΑΝΘΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται η κατασκευή πακέτου (προγράμματος) Η/Υ που επιτυγχάνει: α) αριθμητική προσομοίωση του αναγλύφου (ισουψιών) της υδρολογικής λεκάνης με τη χρησιμοποίηση ψηφοποιητού (digitizer) συνδεδεμένου με ηλεκτρονικό υπολογιστή, δημιουργώντας έτσι ψηφιακό χάρτη της υδρολογικής λεκάνης. β) προσομοίωση της επιφανειακής απορροής επιλύοντας τις εξισώσεις *Saint Venant* πάνω στην υδρολογική λεκάνη, της οποίας τα δεδομένα εισήχθησαν προηγουμένως με τον ψηφοποιητή (προσέγγιση GIS). Το πρόγραμμα λαμβάνει υπ'όψη του διάφορα σενάρια για το συντελεστή διήθησης, την τραχύτητα του εδάφους, την εξατμισοδιαπνοή, την ένταση βροχής και την διάρκεια της βροχής. Παρουσιάζουμε την εφαρμογή του παραπάνω πακέτου στον υπολογισμό των υδρογραφημάτων για την υδρολογική λεκάνη του ρέματος Χαλανδρίου.

DEVELOPMENT OF A COMPUTER PACKAGE WHICH SIMULATES THE RUNOFF USING GIS APPROACH

by N.E.Kotsovinos and P.A. Angelidis, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece

ABSTRACT

The basic objective of this paper is the presentation of a mathematical-computer model which simulates the runoff in a hydrological basin. The computer program accepts as input the real morphology (contours) of the hydrological basin using a digitizer interfaced to a computer. The contours data are stored in the disk and the program automatically creates the stream network, numbers them, calculates area loading of the overland flow elements, computes slopes and length and stores them in matrix form. Precipitation or infiltration data can be input as a function of time and place. The location of the area with a specific precipitation or infiltration are introduced using the Digitizer. The main type of output is the hydrograph at various cross sections. Simulated precipitation data are used to investigate the hydrologic process in Xalandri stream.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλά προβλήματα ο Υδραυλικός-Πολιτικός Μηχανικός αναζητά αξιόπιστες μεθόδους υπολογισμού της εξέλιξης της πλημμύρας σε μία υδρολογική λεκάνη και του

υπολογισμού των υδρογραφημάτων σε διάφορες θέσεις των ρεμάτων της λεκάνης. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί πλήθος ημιεμπειρικών τύπων και μεθόδων, όπως του Snyder, της Soil Conservation Service (SCS), του Gray και του Clark. Περιγραφή των μεθόδων αυτών μπορεί κανείς να βρει σε κλασσικά βιβλία υδρολογίας (π.χ. Warren Viessman et al 1989). Οι κλασσικές αυτές προσεγγίσεις στηρίζονται σε ημιεμπειρικές σχέσεις για την διανομή της βροχόπτωσης και της τήξης του χιονιού, υπολογίζουν τις απώλειες και τα πλεονάσματα των βροχοπτώσεων και τήξεων χιονιού και καθορίζουν εμπειρικά τα υδρογραφήματα των υπολεκάνιων εκροών. Τα εμπειρικά αυτά μοντέλα βασίζονται στην ανάπτυξη ενός αντιπροσωπευτικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, έχουν χρησιμοποιηθεί γενικά επιτυχώς, αλλά είναι προφανές ότι είναι δύσκολο να συσχετίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις βασικές γεωμετρικές ιδιότητες των υδρολογικών λεκανών.

Για το σκοπό αυτό, την τελευταία εικοσαετία έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι προσδιορισμού του υδρογραφήματος με επίλυση των σχετικών εξισώσεων (συνεχείας, Saint Venant, διήθησης κλπ.) πάνω σε μια γεωμετρία που προσομοιάζει το ανάγλυφο της υδρολογικής λεκάνης. Η προσομοίωση αυτή στα περισσότερα των προγραμμάτων αυτών γίνεται χωρίζοντας την υδρολογική λεκάνη σε πλήθος μικρών υπολεκανών, όπου η κάθε μία μικρή υπολεκάνη θεωρείται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Οι διαστάσεις, τα υψόμετρα και τα φυσικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης (διηθητικότητα, βλάστηση κλπ.) καθώς και τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης εδίδοντο με ξεχωριστούς κοπιαστικούς πίνακες. Τέτοια υπολογιστικά πακέτα είναι τα HEC-1, HYMO, SWMM και TR-20 (SCS), περιγραφή των οποίων βρίσκεται στο βιβλίο των Viessman et al (1989). Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στην παρούσα έρευνα αποτελεί μία ανεξάρτητη (και προσαρμοσμένη στην φιλοσοφία των μεθόδων GIS) προσέγγιση του υπολογιστικού πακέτου HEC-1.

Στο υπολογιστικό πακέτο που αναπτύξαμε εισάγεται η τοπογραφία της υδρολογικής λεκάνης (ισουψείς) μέσα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό γίνεται με την χρήση ψηφιοποιητή (Digitizer). Συγχρόνως εισάγονται μέσω του digitizer τα εδαφικά χαρακτηριστικά, διάφορα σενάρια για το συντελεστή διήθησης, την τραχύτητα του εδάφους, την εξατμισοδιαπνοή, πληροφορίες για την έκταση και χρονική εξέλιξη της βροχής, πληροφορίες για βλάστηση κλπ. Στη συνέχεια το πακέτο προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή επιλύοντας τις εξισώσεις Saint Venant πάνω στην υδρολογική λεκάνη. Ουσιαστικά, η προσέγγιση αυτή είναι τεχνολογία GIS (γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών).

2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Οι μηχανισμοί μιας ασταθούς ροής ανοιχτού αγωγού θα μπορούσαν να εκφραστούν μαθηματικά με τα όρια των εξισώσεων που αναπτύχθηκαν το 1870 από τον St. Venant. Αυτές οι εξισώσεις [1.1 και 1.2] είναι μερικώς διαφορετικές, πράγμα το οποίο απορρέει από τους βασικούς κανόνες της διατήρησης της μάζας και της ορμής.

Εξισώσεις St. Venant

$$\text{Συνέχειας: } \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_L + (i - f) \quad (1.1)$$

$$\text{Ορμής: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_0 - S_f) - q_L \frac{u - v}{y} \quad (1.2)$$

g = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec^2)

y = μέσο βάθος (m)

q = εκροή ανά μονάδα πλάτους αγωγού (m^3/m)
 x = απόσταση μετρημένη κατά τη διεύθυνση της κατάντη ροής (m)

t = χρόνος (sec)

u = x -συνιστώσα μέσης ταχύτητας (m/sec)

i = ένταση βροχόπτωσης (m^3/m^2)

f = ποσοστό διήθησης (m^3/m^2)

S_0 = μέση κλίση πυθμένα (m/m)

S_f = κλίση τριβής οριζόμενη από την εξίσωση του Manning.

q_L = ολική πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους του ανοικτού αγωγού

v = η x -συνιστώσα της ταχύτητας της πλευρικής εισροής, η οποία θεωρείται αμελητέα.

Οι βασικές προϋποθέσεις που απαιτούνται για την ισχύ των εξισώσεων είναι οι εξής

:

1. Η ταχύτητα είναι σταθερή και η επιφάνεια του νερού είναι οριζόντια κατά μήκος κάθε κατακόρυφης διατομής στον διαμήκη άξονα της ροής.
2. Όλες οι ροές είναι βαθμιαίως μεταβαλλόμενες με υδροστατικές πιέσεις να ασκούνται σε όλα τα σημεία της ροής, έτσι ώστε όλες οι κατακόρυφες επιταχύνσεις στη στήλη του ύδατος να μπορούν να αγνοηθούν.
3. Ο διαμήκης άξονας του ανοικτού αγωγού μπορεί να προσεγγιστεί από μια ευθεία γραμμή, έτσι ώστε να μην συμβαίνουν δευτερεύουσες πλευρικές ροές.
4. Η κλίση του πυθμένα του αγωγού είναι μικρή (μικρότερη από 1:10)
5. Τα όρια του αγωγού μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μη μεταβαλλόμενα και μη αυξανόμενα.
6. Η αντίσταση της ροής μπορεί να περιγραφεί από εμπειρικές εξισώσεις αντίστασης όπως του Manning ή του Chezy.
7. Η ορμή που μεταφέρεται στο υγρό μέσω πλευρικών εισροών είναι αμελητέα.
8. Η ροή είναι ασυμπιεστή και ομογενής.

Οι υποθέσεις που λήφθηκαν στις παραδοχές 1 έως 6 και 8 ισχύουν και εφαρμόζονται για τις περισσότερες ροές ανοιχτών αγωγών σε φυσικούς ποταμούς και χειμάρους. Στις περισσότερες περιπτώσεις η υπόθεση 7 ισχύει.

Οι επιφανειακές ροές υπολογίζονται ξεχωριστά από τη ροή σε αγωγό, επειδή η επιφανειακή απορροή δημιουργεί αβαθείς ροές οι οποίες οδηγούν σε μια μορφή των εξισώσεων της κίνησης που διαφέρει από την μορφή που απαιτείται για τις ροές του συλλέκτη και του κύριου αγωγού.

Για το τμήμα επιφανειακής ροής του μοντέλου, υποθέσεις σχετικά με την απορροή αβαθούς επιφανειακού ύδατος προσαρμόζονται στις εξισώσεις (1.1 και 1.2), καταλήγοντας έτσι σε μια απλή μορφή εξισώσεων κινηματικού κύματος. Παρόμοιες απλοποιήσεις έχει βρεθεί ότι ισχύουν και είναι ταυτόχρονα χρήσιμες για τις περιπτώσεις ροής ανοιχτών αγωγών.

Η μορφή του κινηματικού κύματος από τις εξισώσεις του St. Venant παρέχει μια απλοποιημένη περιγραφή του φυσικού συστήματος σχετικά με επιφάνειες και κανάλια με ομογενή χαρακτηριστικά. Η βασική ιδέα του επιφανειακού τμήματος του μοντέλου είναι ότι το νερό διανέμεται σε μεγάλη επιφάνεια και σε πολύ μικρά μέσα βάθη, μέχρις ότου συναντήσει τον καθορισμένο συλλέκτη.

Το μοντέλο αναπτύσσει τις απορροές βάσει της έντασης βροχόπτωσης και τα ποσοστά απωλειών που αφορούν τις περατές και αδιαπέρατες επιφάνειες στη λεκάνη. Αφού η επιφανειακή ροή οδηγηθεί κατά μήκος της λεκάνης επιφανειακής ροής, διανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος του συστήματος συλλογής το οποίο αντιπροσωπεύει ρυάκια, κανάλια, ρήθρα, αποχετεύσεις. Μόλις το νερό της απορροής εισέρχεται στο σύστημα συλλογής και κινείται μέσα σε αυτό, η ροή του προσαυξάνεται (ομοιόμορφα κατανεμημένη) λόγω προστιθέμενων πλευρικών εισροών από πλευρικές λωρίδες απορροής. Αυτές οι ροές

του συλλέκτη τελικά καταλήγουν σε ένα κεντρικό κανάλι από όπου οδηγούνται ως ροές ανοιχτού αγωγού κατά μήκος του συστήματος.

Υπενθυμίζεται ότι τα κινηματικά κύματα συμβαίνουν όταν οι όροι δυναμικής στις εξισώσεις ορμής είναι αμελητέοι. Αυτό το γεγονός επιτρέπει την υπόθεση ότι η κλίση του πυθμένα είναι κατά προσέγγιση ίση με την κλίση τριβής ($S_0 = S_f$). Κάτω από αυτές τις συνθήκες η απορροή μπορεί να περιγραφεί συναρτήσει του βάθους και της ροής για κάθε x και t .

$$Q = a \cdot y^m \quad (1.3)$$

όπου, Q είναι η απορροή και a και m παράμετροι της ροής του κινηματικού κύματος οι οποίοι έχουν απευθείας σχέση με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και της ροής.

Οι Lighthill και Whitham (1955) απέδειξαν ότι για αριθμούς Froude μικρότερους του 2 η δυναμική συνιστώσα ελαττώνεται εκθετικά και το κινηματικό κύμα κυριαρχεί απόλυτα. Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, αυτό σημαίνει ότι δεν παρατηρείται καμμία ορατή επιφάνεια. Μόνο η άνοδος και η πτώση της επιφάνειας του νερού μπορούν να παρατηρηθούν (Σχήμα 1.1).

Οι Woolhiser και Liggett (1967) εξέτασαν τα χαρακτηριστικά αυξανόμενου υδρογραφήματος, για μια μεγάλη ποικιλία καταστάσεων ροής και βρήκαν ότι η δυναμική συνιστώσα θα έχει εξασθενήσει αρκετά έτσι ώστε να μπορεί να αγνοηθεί με την προϋπόθεση

$$k = \frac{S_0 L}{y F^2} > 10 \quad (1.4)$$

όπου L είναι το μήκος του επιπέδου, F ο αριθμός Froude $F = V / \sqrt{g \cdot y}$, y είναι το μέσο βάθος, S_0 η κλίση του πυθμένα και k είναι ο αριθμός αδιάστατης κινηματικής ροής.

Η εξίσωση κινηματικού κύματος για ένα τμήμα επιφανειακής ροής σε ένα ευρύ επίπεδο με πολύ ρηχές ροές, μπορεί να προκύψει από την εξίσωση του Manning και την εξίσωση (1.3). Λαμβάνουμε υπ' όψη τη ροή στη λωρίδα μιας επιφανειακής απορροής μοναδιαίου πλάτους όπως φαίνεται στο Σχήμα (1.3).

Ξαναγράφοντας τις βασικές εξισώσεις σε όρους εκροών ανά μονάδα πλάτους όπου οι δείκτες "0" υποδεικνύουν μεταβλητές που σχετίζονται με επιφανειακές ροές.

$$q_0 = a_0 \cdot y_0^{m_0} \quad (1.5)$$

όπου

$$a_0 = \left(\frac{1.486}{N} S_0^{1/2} \right)$$

$$m_0 = \frac{5}{3}$$

S_0 = μέση κλίση του στοιχείου επιφανειακής ροής

y_0 = μέσο βάθος επιφανειακής ροής

a_0 = μεταβίβαση για συγκεκριμένη επιφάνεια ροής, κλίση και τραχύτητα N .

Επειδή υπάρχουν δύο άγνωστοι στην εξίσωση (1.5) απαιτείται και άλλη εξίσωση για την μαθηματική επίλυση. Η εξίσωση συνέχειας (βλέπε εξίσωση 1.1) παρέχει την απαραίτητη δεύτερη εξίσωση έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η επίλυση.

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = (i - f) \quad (1.6)$$

όπου (i-f) είναι το περίσυμα βροχόπτωσης (βροχόπτωση- διήθηση) , Q_0 είναι η εκροή ανά μονάδα πλάτους , t είναι ο χρόνος , και Y_0 το μέσο βάθος της επιφανειακής απορροής. Οι εξισώσεις (1.5 και (1.6) αποτελούν τις πλήρεις εξισώσεις κινηματικού κύματος επιφανειακής ροής.

Για το σύστημα συλλέκτη (που αντιπροσωπεύει ρυάκια, οπές αποστράγγισης και σωλήνες αποχέτευσης) και τμήματα χειμάρων, έχουν χρησιμοποιηθεί σχήματα απλών διατομών για την εξομοίωση πρωτοτύπων καναλιών. Έχει βρεθεί ότι η κατάλληλη χρήση απλού τριγωνικού, τραπεζοειδούς και κυκλικού σχήματος καναλιού παρέχει ακριβή αντιπροσώπευση της απόδοσης του πρωτότυπου.

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο παρουσιαζόμενο πακέτο (το οποίο το ονομάσαμε HYDRO-AK) για τη λύση των θεμελιωδών εξισώσεων είναι μια μέθοδος πεπερασμένων διαφορών. Οι υπολογισμοί προχωρούν κατά την κατεύθυνση κατάντη για κάθε βήμα χρόνου Δt μέχρις ότου υπολογιστούν όλες οι ροές και τα στάδια καθόλο το μήκος L. Στη συνέχεια ο υπολογισμός μεταφέρεται στο χρόνο κατά ένα Δt και επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί της απορροής και της ανύψωσης της επιφάνειας του νερού. Ενδειξη της επιτυχούς αριθμητικής προσομοίωσης είναι η σύγκριση της αναλυτικής λύσης της ροής σε μία κεκλιμένη επίπεδη επιφάνεια με την αριθμητική επίλυση (βλέπε σχήμα 1)

3.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΡΕΜΑ ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ-ΠΕΝΤΕΛΗΣ

Η λεκάνη απορροής του Κατασκευάστηκε συνεπώς ψηφιακός χάρτης της περιοχής ,ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποικιλοτρόπως και για άλλες μελλοντικές εφαρμογές , όπως θέσεις δικτύων,δρόμων,πολεοδομικών εφαρμογών κλπ. Έγινε λεπτομερής και ποσοτική μελέτη της αλληλοεπίδρασης των παραμέτρων αυτών (φυτοκάλυψης-διήθησης-απορροής) για τη υδρολογική λεκάνη Πεντέλης . Βρήκαμε ότι η φυτοκάλυψη του ορεινού όγκου αυξάνει τον συντελεστή διήθησης ,αυξάνει τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και έχει ορατά αποτελέσματα για μικρής έντασης βροχοπτώσεις ,αλλά πρέπει να τονισθεί ότι βρήκαμε ότι οποιαδήποτε ρεαλιστική πολιτική δενδροφύτευσης στον ορεινό ογκο η στον εναπομείναντα αστικό θα βελτιώσει μεν την κατάσταση αργά-αργά (λόγω του χρόνου που απαιτείται για την ανάπτυξη των δένδρων) ,δεν θα απομακρύνει όμως τον κίνδυνο πλημμύρας σε μια ραγδαία βροχόπτωση.

Δηλαδή η δενδροφύτευση της λεκάνης απορροής,σαν μόνο μέτρο προστασίας ,δεν μπορεί να αποτελέσει ούτε πανάκεια ούτε άλλοθι για συνέχιση των κερδοσκοπικών επεμβάσεων στη παραρρημιάτα περιοχή.Η δενδροφύτευση δεν λύνει το πρόβλημα ,αν δεν συνδιασθεί με ουσιαστική προστασία του ρέμματος απο αυθαίρετες η κακομελετημένες παρεμβάσεις,"διευθετήσεις",κλπ

Έγινε, στα πλαίσια της έρευνας, υπολογισμός υδρογραφημάτων για διάφορα σενάρια πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς 25,50 ή 100 χρόνια. Ενα απο τα συμπεράσματα της έρευνας είναι ότι η βροχή που έδωσε τη μεγαλύτερη παροχή υδρογραφήματος είχε διάρκεια μία ώρα και ένταση βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών ίση με 62.4 mm /h .

Ο τύπος του Kirpich μας δίνει το χρόνο συγκέντρωσης t_c , που για μερικές λεκάνες απορροής (μέχρι 10 Km²) και για ομοιόμορφη έκταση και κατανομή της βροχής συμπίπτει περίπου με το χρόνο εμφάνισης της αιχμής της απορροής.

$$t_c = 4 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77}$$

όπου: t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης (ή ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής) σε min,

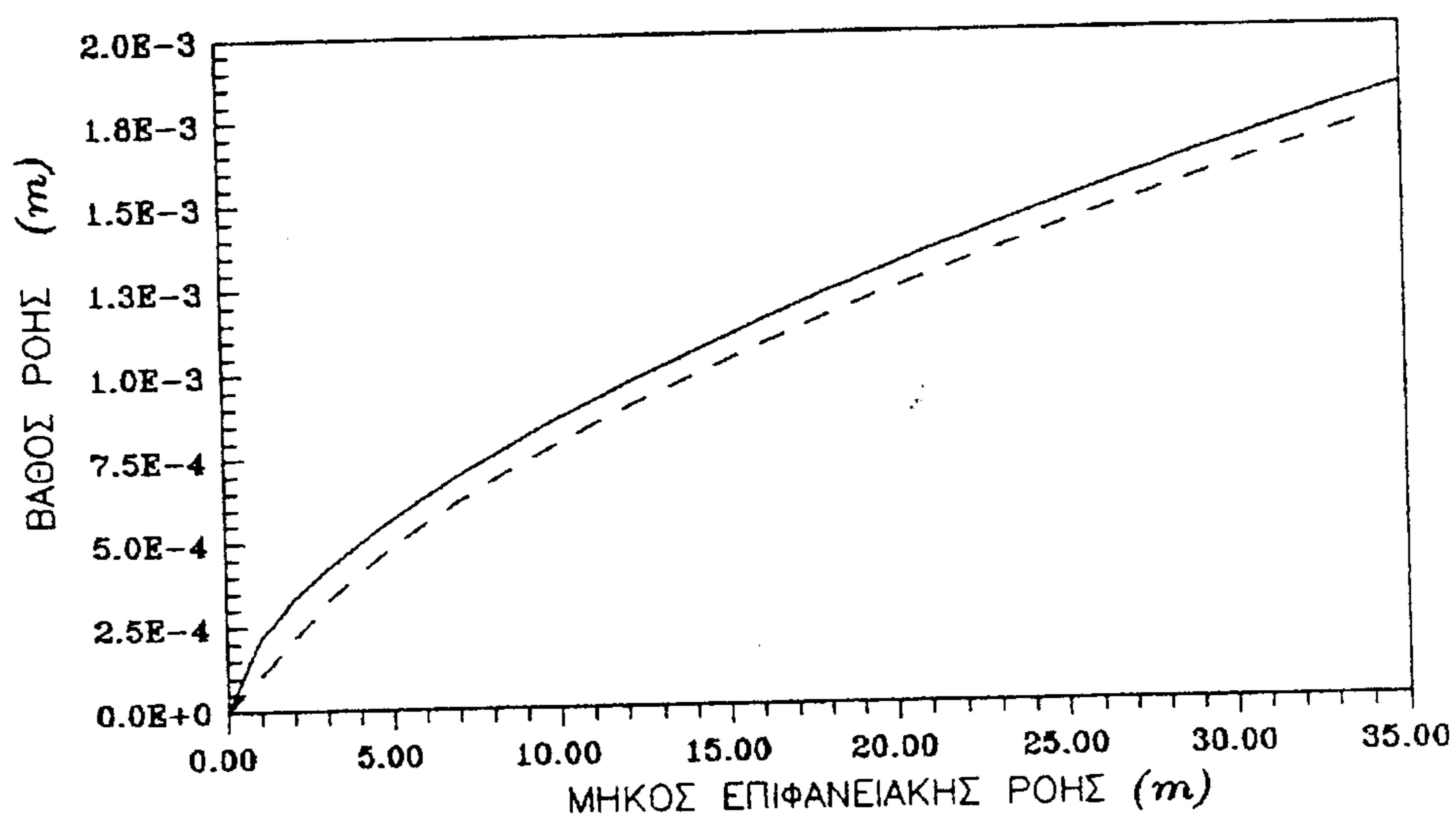
L: το μήκος της λεκάνης απορροής σε Km² μετρούμενο κατά μήκος του ρεύματος από την έξοδο μέχρι το ανώτερο σημείο της

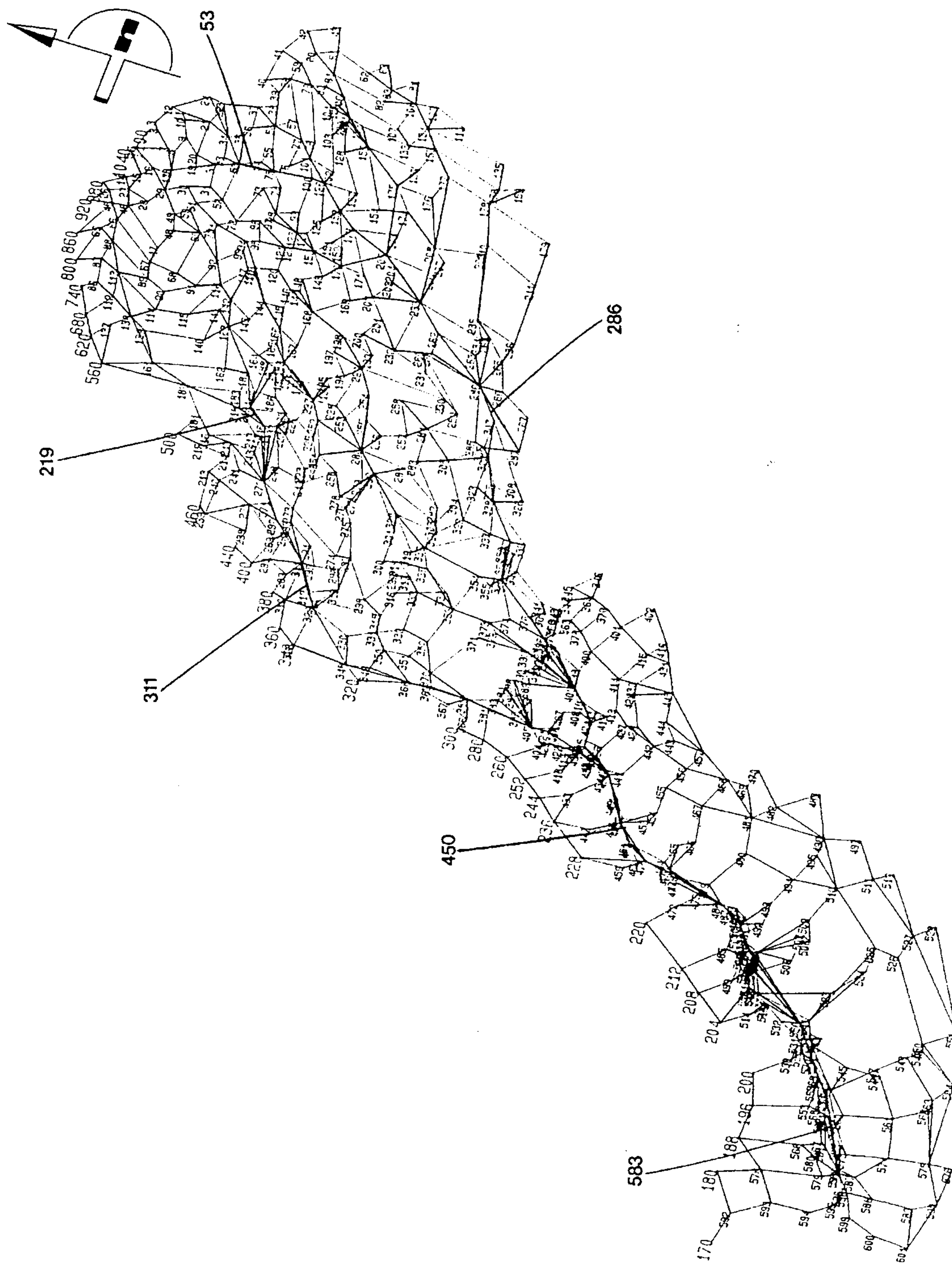
S: η μέση κλίση της λεκάνης απορροής μεταξύ της εξόδου και του υψηλότερου σημείου της.

Για την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής λαμβάνουμε $L=10,5\text{Km}$ και $S=0,088$ οπότε βρίσκουμε :

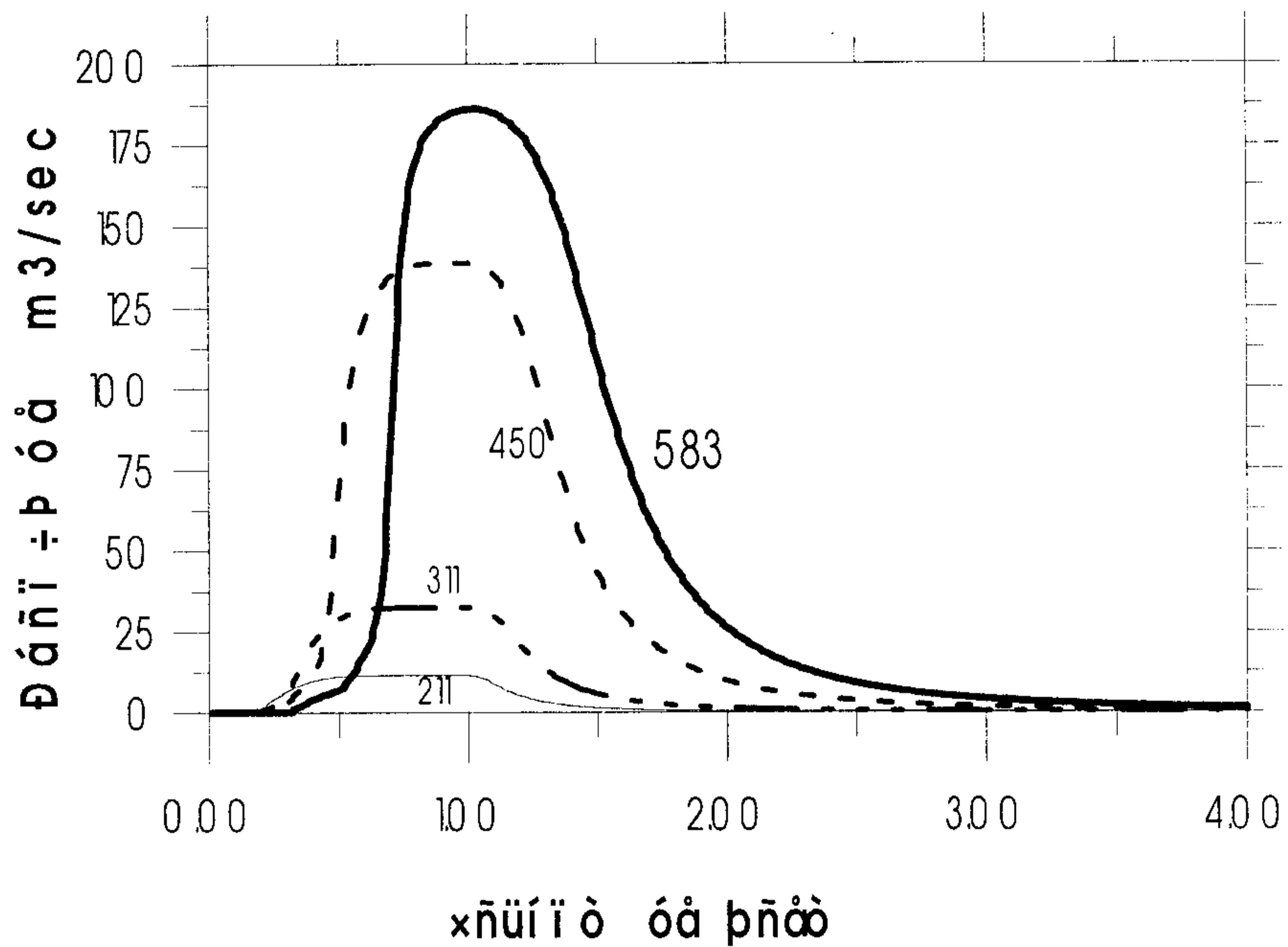
$$t_c = 4x \left(\frac{10,5}{\sqrt{0,088}} \right)^{0,77} = 62,33 \text{ min} = 1,03 \text{ h}$$

Το αποτέλεσμα (ελαφρά μεγαλύτερο της μιας ώρας) συμφωνεί κατά προσέγγιση με τους χρόνους εμφάνισης της αιχμής (1,02-1,23) των υδρογραφημάτων που προκύπτουν από το HYDRO.





Σχήμα 2 Το ψηφιακό δίκτυο των ρεμάτων και των επί μέρους μικρών λεκανών. Η αρίθμηση και τα γεωμετρικά στοιχεία των υπολεκανών και ρεμάτων γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα.



Σχήμα 3. Υδρογραφήματα ,όπως προέκυψαν απο την αριθμητική προσομοίωση με το HYDRO στις διατομές 211, 311, 450 και 583.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Lighthill, M.J. and Whitham, G.B. , 1955, Kinematic waves, Proc. Roy. Soc. ,London A 229,281-316
- Viessman, W. ,Lewis G. ,and Knapp J. ,1989, Introduction to Hydrology , Harper and Row Publishers, N.Y.
- Woolhiser , D.A. and Liggett, J.A. , 1967, Unsteady one -dimensional flow over a plane -the rising hydrograph, Water Resources Res. 3, No. 3, pp. 753-771