

Διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ μορφομετρικών παραμέτρων λεκανών απορροής και υδρολογικών δεικτών

Καραλής Σ., Καρύμπαλης Ε., Βαλκάνου Κ., Χαλκιάς Χ., Κατσαφάδος Π., Καλογερόπουλος Κ., Μπατσάκης Β., Μποφίλιος Α.

Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ελ. Βενιζέλου 70, 17671, Αθήνα, Ελλάδα, skaralis@teiath.gr, karymbalis@hua.gr

Περίληψη

Στην Ελλάδα η υδρολογική ανάλυση των ποτάμιων συστημάτων με εφήμερη ροή ήταν πάντα δύσκολη λόγω της έλλειψης μετρήσεων βροχόπτωσης και απορροής. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη διερεύνηση των πιθανών σχέσεων μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών μικρού και μεσαίου μεγέθους λεκανών απορροής και υδρολογικών δεικτών, προκειμένου να βρεθούν οι μορφομετρικές εκείνες παράμετροι που μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών απορροής που δεν παρακολουθούνται υδρολογικά. Υπολογίστηκαν είκοσι δύο μορφομετρικές παράμετροι για είκοσι επτά λεκάνες απορροής της βόρειας Πελοποννήσου η έκταση των οποίων κυμαίνεται μεταξύ 3,6 km² και 330,5 km², χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS10. Η υδρολογική μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το TOPMODEL, ένα εννοιολογικό μοντέλο που βασίζεται στην αρχή της μεταβαλλόμενης συμβάλλουσας επιφάνειας στη γέννηση της απορροής σε κορεσμένα εδάφη, και το LISEM, ένα φυσικό μοντέλο απορροής και εδαφικής διάβρωσης. Οι προσομοιώσεις βροχής - απορροής έγιναν για μια ακραία βροχόπτωση. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τα οποία περιλαμβάνουν την παροχή αιχμής, το χρόνο υστέρησης και τον συντελεστή απορροής, συσχετίστηκαν με τις μορφομετρικές παραμέτρους των λεκανών απορροής. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων διέφεραν, πιθανά λόγω της διαφορετικής τους δομής, με τα αποτελέσματα του LISEM να είναι πιο κοντά στα αναμενόμενα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το εμβαδό, το μήκος της λεκάνης, η περίμετρος της λεκάνης και ο δείκτης συμπύκνωσης συσχετίζονται καλύτερα με την παροχή αιχμής της λεκάνης απορροής. Οι ίδιες παράμετροι και επιπλέον ο αριθμός τραχύτητας του Melton συσχετίζονται με το ποσοστό απορροής, ενώ η «ταχύτητα» του πλημμυρικού κύματος (μήκος της λεκάνης / χρόνος έως την αιχμή) συσχετίζονται καλύτερα με τον δείκτη αναγλύφου, δείχνοντας ότι όσο εντονότερο είναι το ανάγλυφο, τόσο ταχύτερη είναι και η απόκριση της λεκάνης.

Λέξεις-Κλειδιά: Μορφομετρία, Υδρολογικές προσομοιώσεις, TOPMODEL, LISEM, Πελοπόννησος

Abstract

In Greece the hydrological analysis of ephemeral streams has been especially difficult due to the lack of precipitation and discharge gauges. This study focuses on the investigation of possible relationship between morphometric characteristics of small to medium drainage basins and hydrological indices in order to discover morphometric parameters “predictors” of flash flood potential of ungauged catchments. Twenty-two morphometric parameters of twenty-seven drainage basins (ranging in area between 3.6 km² and 330.5km²) located in the northern part of the Peloponnese in southern Greece were calculated utilizing GIS software ArcGIS10. Hydrological modeling was performed using a simplified Matlab implementation of TOPMODEL, a conceptual model based on the principle of variable contributing area to runoff production through saturated overland flow, and LISEM, a physically based hydrologic and soil erosion model. Rainfall - runoff simulations were performed for an extreme precipitation event. The simulations outcomes, which include the peak discharge, time to peak and the percentage runoff, were correlated with the morphometric parameters of the catchments. Results were not consistent between the two models, probably due to their different philosophy, with the LISEM results being closer to what is anticipated. The results demonstrate that area, length of the basin,

perimeter and compactness factor are better correlated with the peak discharge (Q_{peak}) of the catchment. The same parameters as well as Melton's number correlate with percentage runoff (C), while "celerity" of the flood wave (length of the basin/time to peak) is better correlated with relief, indicating that the greater the relief, the fastest is the response of the basin.

Keywords : Geomorphometry, Hydrologic Modeling, TOPMODEL, LISEM, Greece

1. Εισαγωγή

Στην Ελλάδα πολλές λεκάνες απορροής έχουν μικρό μέγεθος και σχετικά απότομες κλίσεις, και έχουν διαμορφωθεί από χειμάρρους οι οποίοι είναι συνήθως ξηροί ή εμφανίζουν μικρή απορροή κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους του έτους αλλά γίνονται ιδιαίτερα ενεργοί κατά τη διάρκεια αιφνίδιων πλημμυρικών γεγονότων που συνήθως έχουν μικρή συχνότητα εμφάνισης αλλά μεγάλη ένταση. Τέτοιες υψηλές πλημμυρικές παροχές είναι δυνατό να προκαλέσουν τόσο σημαντικές υλικές ζημιές όσο και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η υδρολογική ανάλυση των χειμάρρων εφήμερης ροής είναι πολύ δύσκολη λόγω της παντελούς έλλειψης μετρήσεων βροχόπτωσης και απορροής (Karymbalis et al., 2011). Συνεπώς η ανάλυση πλημμύρας μεμονωμένων γεγονότων συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των διεργασιών που συμμετέχουν στη γένεση ακραίας απορροής (Καρύμπαλης κ.ά., 2013).

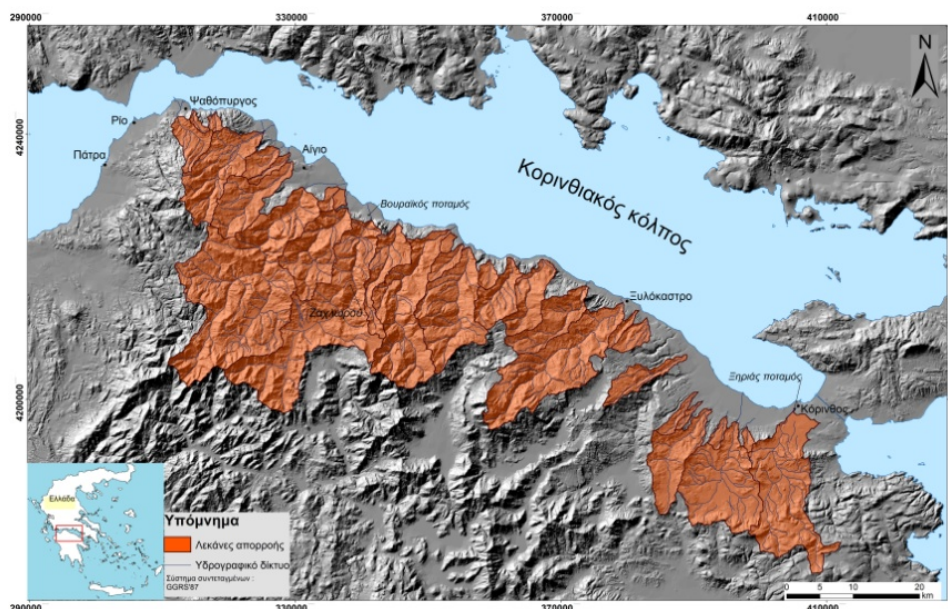
Γενικά οι ποτάμιες πλημμύρες στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου σχετίζονται με ακραία μετεωρολογικά γεγονότα αλλά υπάρχουν και ορισμένοι παράγοντες που εντείνουν τα πλημμυρικά φαινόμενα. Μεταξύ αυτών είναι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, η μορφολογία της λεκάνης απορροής και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Είναι γενικά γνωστό ότι οι υδρολογικοί δείκτες επηρεάζονται από την οργάνωση του υδρογραφικού δικτύου καθώς και από τη μορφομετρία των λεκανών απορροής (Gregory and Walling, 1973, Howard, 1990, Karymbalis et al., 2012). Έχουν γίνει πολλές μελέτες στο παρελθόν με αντικείμενο τη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ των μορφομετρικών παραμέτρων των λεκανών απορροής και των υδρολογικών δεικτών (Gregory and Walling, 1973, Cooke and Doornkamp, 1990). Σε κάποιες από αυτές επιχειρήθηκε η εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής και των μορφολογικών της χαρακτηριστικών (Post and Jakeman, 1996, Post and Jakeman, 1999, Runge and Ngumalet, 2005).

Οι ποτάμιες γεωμορφές είναι το αποτέλεσμα μιας μακράς διεργασίας εξέλιξης των λεκανών απορροής υπό τη δράση του ρέοντος νερού. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει σχέση μεταξύ των μορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής όπως εκφράζονται από τις μορφομετρικές παραμέτρους και της ποτάμιας παροχής. Ο προσδιορισμός των σχέσεων αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την πρόβλεψη και την εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων για ποταμούς όπου δεν είναι διαθέσιμες άμεσες μετρήσεις (Zăvoianou, 1985). Επιπλέον ορισμένες μορφομετρικές παράμετροι των λεκανών απορροής συσχετίζονται με το πλημμυρικό δυναμικό τους. Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων έχει ιδιαίτερη σημασία για την πρόβλεψη πλημμυρών σε λεκάνες για τις οποίες δεν υπάρχουν υδρολογικές μετρήσεις. Κατά καιρούς έχουν γίνει μελέτες που εστιάζουν στην εύρεση ποσοτικών σχέσεων μεταξύ της μορφομετρίας και των πλημμυρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής (Moore et al., 1991). Ωστόσο, μια γενική ποσοτικοποίηση των σχέσεων αυτών είναι σε ερευνητικό ακόμη στάδιο.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση, μέσω υδρολογικών προσομοιώσεων, του ρόλου των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής, όπως εκφράζονται μέσω ποσοτικών μορφομετρικών παραμέτρων, στη γένεση ακραίων επιφανειακών απορροών. Μεταξύ των κύριων στόχων αυτής της μελέτης είναι η αναζήτηση πιθανών ποσοτικών γεωμορφολογικών παραμέτρων που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη του δυναμικού πλημμύρας για μικρού και μεσαίου μεγέθους χειμαρρικές λεκάνες. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκαν είκοσι δύο μορφομετρικές παράμετροι για είκοσι επτά υδρολογικές λεκάνες της βόρειας Πελοποννήσου και αναζητήθηκαν οι σχέσεις τους με υδρολογικούς δείκτες που υπολογίστηκαν από δύο υδρολογικά μοντέλα, το TOPMODEL και το LISEM.

2. Περιοχή μελέτης

Η μελέτη εστιάζει σε είκοσι επτά λεκάνες απορροής, η έκταση των οποίων κυμαίνεται από 3.6 km² έως 330.5 km², οι οποίες βρίσκονται στην βόρεια Πελοπόννησο (Σχήμα 1). Οι κεντρικές κοίτες των υδρογραφικών δικτύων των λεκανών που μελετήθηκαν έχουν διεύθυνση ροής NNA-BΒΔ και εκβάλουν στον Κορινθιακό κόλπο κατά μήκος των νότιων ακτών του.



Σχήμα 1. Γεωγραφική θέση των λεκανών απορροής που μελετήθηκαν.

Ο Κορινθιακός κόλπος αποτελεί την πιο ενεργή νεοτεκτονική δομή της ανατολικής Μεσογείου (Armijo et al., 1996). Η τεκτονική τάφρος του Κορινθιακού νότια οριοθετείται από κανονικά ρήγματα η δραστηριοποίηση των οποίων έχει προκαλέσει την κατά 950 m ανύψωση των ορεινών όγκων της βόρειας Πελοποννήσου κατά τη διάρκεια της περιόδου του Τεταρτογενούς (McNeil and Collier, 2004). Οι λεκάνες που μελετήθηκαν αποτελούνται από γεωλογικούς σχηματισμούς Μεσοζωικής ηλικίας (κυρίως ασβεστολίθους αλλά και κερατολίθους και φλύσχη οι οποίοι ανήκουν στη ζώνη Ωλονού Πίνδου και Γαβρόβου Τριπόλεως, αντίστοιχα). Στο βόρειο τμήμα των λεκανών απορροής κυριαρχούν ποτάμια και λιμναίες αποθέσεις (ιλύς και κροκαλοπαγή) ηλικίας που υπέρκειται μαργών Τεταρτογενούς ηλικίας και μεταβαίνουν σε δελταϊκές αποθέσεις τύπου Gilbert που αποτελούνται από κροκαλοπαγή (Bornovas and Romdoyanni, 1983).

Το κλίμα της Βόρειας Πελοποννήσου είναι παράκτιο Μεσογειακό (Körpen: Csb) με μέση ετήσια θερμοκρασία που φθάνει τους 14.5°C. Η μέση θερμοκρασία του πιο ψυχρού μήνα είναι 10.6°C ενώ η μέση θερμοκρασία του πιο θερμού μήνα φθάνει τους 26.4°C. Τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης κυμαίνονται από πάνω από 1500 mm στους ορεινούς όγκους Ερύμανθου και Χελμού έως λιγότερο από 450 mm στα ανατολικά (Katsafados et al., 2012).

Ορισμένοι από τους ποταμούς της περιοχής μελέτης έχουν περιοδική ροή αλλά υπάρχουν και χειμάρροι καθαρά εφήμερης ροής. Στον κάτω ρου μερικών από τα ποτάμια αυτά συστήματα έχουν λάβει χώρα εκτεταμένες πλημμύρες κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Η σημαντικότερη ίσως από τις πρόσφατες πλημμύρες που έπληξε την περιοχή είναι αυτή που προκλήθηκε στις 11 και 12 Ιανουαρίου 1997 από έντονη βροχόπτωση και προκάλεσε εκτεταμένες υλικές ζημιές και την απώλεια έξι ανθρώπινων ζώων στην πόλη της Κορίνθου, στον κάτω ρου του χειμάρρου Ξηριά (Karymbalis et al., 2012). Οι λεκάνες απορροής, με εξαίρεση αυτή του Βουραϊκού δεν παρακολουθούνται υδρολογικά καθώς δεν υπάρχει εγκατεστημένο δίκτυο μετεωρολογικών και υδρολογικών σταθμών με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής για αιφνίδια πλημμυρικά γεγονότα.

3. Μεθοδολογία

3.1. Μορφομετρική Ανάλυση

Η ποσοτική μορφομετρική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής. Στην παρούσα μελέτη η μορφομετρική ανάλυση, που περιλαμβάνει τον υπολογισμό είκοσι δύο μορφομετρικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS10.

Οι μορφομετρικές παράμετροι που εκτιμήθηκαν για τις λεκάνες της περιοχής μελέτης φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Οι μορφομετρικές παράμετροι των λεκανών απορροής που υπολογίστηκαν (e: η ισοδιάσταση των ισοϋψών).

Σύμβολο	Μορφομετρική παράμετρος	Περιγραφή / Σχέση	Αναφορά
A	Εμβαδό της λεκάνης απορροής(km ²)	Η έκταση της επιφάνειας που οριοθετείται από τον υδροκρίτη	
P	Περίμετρος της λεκάνης απορροής (km)	Το μήκος της οριζόντιας προβολής του υδροκρίτη	
C _r	Μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής (m)	Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης	
H _{out}	Υψόμετρο της εξόδου της λεκάνης (m)	Το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης	
ΣL _{ch}	Συνολικό μήκος των κλάδων στη λεκάνη απορροής (km)	Το άθροισμα του μήκους όλων των κλάδων εντός της λεκάνης απορροής.	Horton (1945)
ΣL _{con}	Συνολικό μήκος των ισοϋψών (ανά 20μ) στη λεκάνη απορροής (km)	Το συνολικό μήκος των ισοϋψών που διασχίζουν τη λεκάνη απορροής	Roche (1963)
SI	Κλίση των κλιτύων της λεκάνης	$SI = e \cdot \Sigma L_{con} / A$	Roche (1963)
D	Υδρογραφική πυκνότητα	$D = \Sigma L_{ch} / A$	Horton (1945)
R	Δείκτης αναγλύφου της λεκάνης (m)	$C_r - H_{out}$	Strahler (1952)
H _{div.mean}	Μέσο υψόμετρο του υδροκρίτη (m)		Black (1996)
H _{centr}	Υψόμετρο του κεντροειδούς (m)		
L _{lfp}	Μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (km)		Schumm (1956)
SI _{lfp}	Κλίση της μέγιστης υδάτινης διαδρομής	Υψομετρική διαφορά κατά μήκος της κοίτης του κύριου ποταμού	Schumm (1956)
M	Αριθμός (τραχύτητας του)Melton	$M = R \cdot A^{-0.5}$	Melton (1956), Church and Mark (1980)
Circ	Δείκτης κυκλικότητας της λεκάνης απορροής	$Circ = 4\pi A / P^2$	Miller (1953)
Elong	Δείκτης επιμήκυνσης της λεκάνης απορροής	$Elong = 2\sqrt{(A/\pi)} / L_{lfp}$	Schumm (1956)
Comp.	Δείκτης συμπύκνωσης	$Comp = P / 2\sqrt{\pi A}$	Gravelius (1914)
R _{ratio}	Λόγος αναγλύφου	$R_{ratio} = R / L_{lfp}$	Schumm (1956)
R _{gd}	Δείκτης τραχύτητας	$R_{gd} = R_{ratio} \cdot D$	Strahler (1968)
R ₂	Δείκτης αναγλύφου της λεκάνης_2 (m)	$R_2 = H_{div.mean} - H_{out}$	
R _{ratio2}	Λόγος αναγλύφου_2	$R_{ratio2} = R_2 / L_{lfp}$	
R _{gd2}	Δείκτης τραχύτητας_2	$R_{gd2} = R_{ratio2} \cdot D$	

Υπολογίστηκαν από ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 25 m*25 m που κατασκευάστηκε από τοπογραφικούς χάρτες της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000 με ισοδιάσταση 20 m. Σύμφωνα με το Strahler (1957) υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες υπολογιζόμενων παραμέτρων: α) οι γραμμικής κλίμακας μετρούμενες παράμετροι, όπως το εμβαδό της λεκάνης, η περίμετρος, το μέγιστο υψόμετρο, το υψόμετρο της εξόδου, το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου εντός της λεκάνης απορροής, το συνολικό μήκος των ισοϋψών της λεκάνης, η κλίση της λεκάνης, η υδρογραφική πυκνότητα, το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής, το μέσο υψόμετρο του υδροκρίτη, το υψόμετρο του κεντροειδούς, το μήκος και η κλίση της μέγιστης υδάτινης διαδρομής και β) παράμετροι που αποτελούν αδιάστατους αριθμούς όπως ο αριθμός τραχύτητας του Melton, ο δείκτης κυκλικότητας της λεκάνης απορροής, ο δείκτης επιμήκυνσης, ο δείκτης αναγλύφου και ο λόγος αναγλύφου, ο δείκτης τραχύτητας που υπολογίζεται από τον δείκτη αναγλύφου και άλλοι δείκτες.

3. Υδρολογικές προσομοιώσεις

Οι υδρολογικές προσομοιώσεις έγιναν με δύο μοντέλα βροχής - απορροής: το TOPMODEL και το LISEM. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε μια απλοποιημένη εκδοχή του TOPMODEL σε MATLAB (Hornberger et al., 1998).

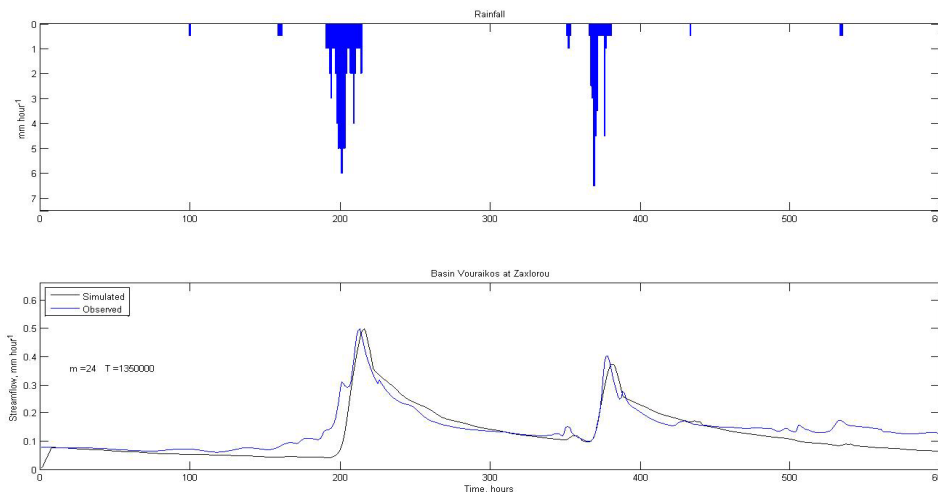
Το TOPMODEL είναι ένα παράδειγμα εννοιολογικής προσέγγισης (Beven and Kirkby, 1979) που βασίζεται στην άποψη ότι το ανάγλυφο (η τοπογραφία) ασκεί καθοριστικό ρόλο στην διόδευση της απορροής στις ορεινές κυρίως, λεκάνες απορροής. Στο TOPMODEL η συνολική απορροή αποτελείται από δυο συνιστώσες: την υποεπιφανειακή ή υποδόρια απορροή και την επίγεια απορροή, η οποία γεννάται μόνο από την βροχή πάνω σε κορεσμένες επιφάνειες, των οποίων η έκταση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της βροχής (μεταβαλλόμενη συμβάλλουσα επιφάνεια).

$$Q_{\text{συνολική}} = Q_{\text{υποδόρια}} + Q_{\text{επίγεια}}$$

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά των κλιτύων τα οποία επηρεάζουν την πιθανότητα να κορεστεί η επιφάνεια του εδάφους, είναι η ανάντη συμβάλλουσα επιφάνεια και η τοπική κλίση. Η ποσοτικοποίηση αυτής της επίδρασης εκφράζεται με τον τοπογραφικό δείκτη (Topographic Index - TI), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$TI = \ln(\alpha / \tan\beta)$$

όπου, α είναι η ανάντη συμβάλλουσα επιφάνεια ανά μονάδα μήκους της ισοϋψούς και $\tan\beta$ είναι η τοπική κλίση. Τα τμήματα της επιφάνειας με ίδιο TI έχουν ίδια υδρολογική απόκριση, και η λεκάνη απορροής, για το TOPMODEL, μεταφράζεται σε μια κατανομή συχνοτήτων των τιμών του TI. Οι πιο σημαντικές παράμετροι στο TOPMODEL είναι οι m [L] και T [L^2T^{-1}], και έχουν φυσική σημασία (Beven, 1997). Η επιλογή των παραμέτρων αυτών για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων έγινε με οπτική σύγκριση ενός μετρημένου υδρογραφήματος και του αντίστοιχου υδρογραφήματος που προέκυψε από προσομοίωση στη θέση του υδρομετρικού σταθμού της ΔΕΗ στη Ζαχλωρού, στη λεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και είναι η μοναδική για την οποία υπάρχουν μετρήσεις. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών που έδωσαν την καλύτερη προσαρμογή του προσομοιωμένου με το μετρημένο υδρογράφημα ($m=24$ m και $T_{\max}=1.350.000$ m²/hour), χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια και στις 27 προσομοιώσεις.



Σχήμα 2. Το μετρημένο και προσομοιωμένο υδρογράφημα για ένα συγκεκριμένο πραγματικό περιστατικό βροχόπτωσης στον υδρομετρικό σταθμό της Ζαχλωρούς, στη λεκάνη του Βουραϊκού. Η σύγκριση των υδρογραφημάτων οδήγησε στην επιλογή των τιμών των παραμέτρων m και T_{max} .

Δεδομένου ότι αρκετές από τις λεκάνες που μελετήθηκαν ήταν μεγάλες και σχετικά επιμήκεις, κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη στο μοντέλο ενός αλγορίθμου διόδευσης. Η διόδευση ήταν απλή μετάθεση του παραγόμενου υδρογραφήματος κατά μήκος ισόχρονων ζωνών, δηλαδή ζωνών ίσου χρόνου ροής έως την έξοδο της λεκάνης (Καρύμπαλης κ.ά., 2013).

Το LISEM, (Limburg Soil Erosion Model) είναι ένα φυσικό μοντέλο βροχής - απορροής και εδαφικής διάβρωσης που λειτουργεί σε κλίμακα λεκάνης απορροής (DeRoo et al., 1996). Το μοντέλο δημιουργήθηκε για να προσομοιώνει την πλημμυρική απορροή και την εδαφική διάβρωση σαν συνέπεια μεμονωμένων περιστατικών βροχόπτωσης (event based model) σε αγροτικές λεκάνες μεγέθους από μερικά εκτάρια έως 100 km^2 , αλλά έχει χρησιμοποιηθεί και σε αρκετά μεγαλύτερης έκτασης λεκάνες.

Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα φυσικού υδρολογικού μοντέλου πλήρως ενσωματωμένου σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, την PCRaster (Van Deursen et al., 1992). Το LISEM χρειάζεται κατ' ελάχιστο 24 διαφορετικούς χάρτες, ανάλογα και με τις επιλογές του χρήστη.

Ένα κελί μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερους από έναν τύπους επιφάνειας (κάλυψης γης). Τα χαρακτηριστικά της διήθησης ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας και η διήθηση υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε τύπο. Κατόπιν υπολογίζεται ένα μέσο ύψος νερού για το κελί, με το οποίο υπολογίζεται και η ταχύτητα. Η ταχύτητα, V (m/s), υπολογίζεται με τον τύπο του Manning:

$$V = \frac{1}{n} \sqrt[3]{R^2 \sqrt{S}}$$

όπου, R = υδραυλική ακτίνα (m), υπολογιζόμενη από το εύρος της ροής και το μέσο βάθος, S = ημίτονο της κλίσης, n = συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας του Manning.

Η παροχή Q (m^3/s) για κάθε κελί υπολογίζεται κατόπιν από την ακόλουθη σχέση (Chow et al., 1998):

$$A = aQ^\beta$$

στην οποία :

$$a = \left\{ \frac{n P^2}{\sqrt{S}} \right\}^{0.6} \text{ και } \beta = 0.6,$$

όπου, A = εμβαδόν υγρής διατομής (m^2), P = διαβρεχόμενη περίμετρος (m).

Για την κατανεμημένη διόδευση της επίγειας απορροής και της συγκεντρωμένης στα υδατορεύματα απορροής, χρησιμοποιείται μια λύση πεπερασμένων διαφορών τεσσάρων

σημείων του κινηματικού κύματος μαζί με την εξίσωση του Manning. Το κινηματικό κύμα γίνεται πάνω στο τοπικό υδρογραφικό δίκτυο (Local Drain Directions map) το οποίο συνδέει τα κελιά σε 8 διευθύνσεις.

Στην παρούσα εργασία το LISEM χρησιμοποιήθηκε απλά σαν μοντέλο βροχής - απορροής, χωρίς να ληφθούν υπόψη η διήθηση ή η κατακράτηση λόγω βλάστησης καθώς ενδιέφερε μόνο η επίδραση του αναγλύφου (τα χαρακτηριστικά του οποίου εκφράζονται από τις τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων) στην απόκριση της λεκάνης. Επομένως για τις προσομοιώσεις δεν ήταν αναγκαία η εκτίμηση άλλων παραμέτρων εκτός από τον συντελεστή τραχύτητας της επιφανείας του Manning(n). Το χρονικό βήμα των προσομοιώσεων με το LISEM ήταν 1 λεπτό.

Η εφαρμογή των μοντέλων οδήγησε στον υπολογισμό τριών υδρολογικών δεικτών της παροχής αιχμής (σε mm), που είναι η μεγαλύτερη τιμή της παροχής στο υδρογράφημα απορροής, του συντελεστή απορροής, που είναι ο λόγος της απορροής προς τη βροχόπτωση και του χρόνου έως την αιχμή, που είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αιχμή της βροχής έως την αιχμή της απορροής. Προκειμένου να σχετισθεί ο χρόνος έως την αιχμή με τις διαστάσεις των λεκανών απορροής, υπολογίστηκε ένας επιπλέον δείκτης (μόνο για τις προσομοιώσεις με το LISEM λόγω της χρονικής λεπτομέρειας των αποτελεσμάτων) που αφορά την "ταχύτητα" του πλημμυρικού κύματος (μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής / χρόνος έως την αιχμή).

4. Αποτελέσματα - Συζήτηση

Οι τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων για το σύνολο των λεκανών απορροής δίνονται στον Πίνακα 2. Ο ίδιος πίνακας περιέχει τις τιμές των υδρολογικών δεικτών που προέκυψαν μετά από την ανάλυση των υδρογραφημάτων των προσομοιώσεων με τα δύο μοντέλα.

Η αναζήτηση συσχετίσεων μεταξύ των μορφομετρικών παραμέτρων και των υδρολογικών δεικτών για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης έγινε με τον υπολογισμό των αντίστοιχων συντελεστών συσχέτισης για όλα τα ζεύγη μορφομετρικών παραμέτρων – υδρολογικών δεικτών (Πίνακας 3a για το TOPMODEL και Πίνακας 3b για το LISEM).

Είναι σημαντικό σε ανάλογες μελέτες διερεύνησης της υδρολογικής σημασίας των ποσοτικών μορφομετρικών παραμέτρων και αναζήτησης πιθανής σχέσης τους με το πλημμυρικό δυναμικό, να λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα - έκταση - της λεκάνης. Είναι σημαντικό να ορίζονται κατώφλια πέραν των οποίων ενδέχεται να μεταβάλλονται οι σχέσεις μορφομετρίας - απορροής. Για το λόγο αυτό οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες: μικρές λεκάνες με έκταση μικρότερη από 10 km², μεσαίες λεκάνες με εμβαδόν μεταξύ 10 km² και 100 km², και μεγάλες λεκάνες με επιφάνεια μεγαλύτερη από 100 km².

Πίνακας 2. Τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων και των υδρολογικών δεικτών, έτσι όπως προέκυψαν από την ανάλυση των υδρογραφημάτων των υδρολογικών προσομοιώσεων με το TOPMODEL και το LISEΜ για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης.

	Μορφομετρικές παράμετροι																		Υδρολογικοί δείκτες- TOPMODEL			Υδρολογικοί δείκτες- LISEM			Ταχύτητα πλημ. κύματος (km/hr)	
	Basin's name	A (km ²)	P (km)	ΣL _{ch} (km)	ΣL _{con} (km)	D	SI	Circ	R (m)	M	L _{IFP}	SI _{IFP}	R ₂ (m)	R _{ratio}	R _{ratio2}	Elong	Comp. Factor	Rgd	Rgd ₂	Q _{peak} (mm)	T _p (hr)	C (%)	Q _{peak} (mm)	T _p (hr)		C (%)
Μικρές λεκάνες	Τρανόρεμα	3.6	9.0	17.8	98.8	5.0	0.55	0.55	700	0.37	3.65	0.15	407	0.19	0.11	0.58	1.35	3.51	2.04	14.74	1.0	52.82	37.72	0.77	99.55	4.76
	Ανώμιο 2	3.9	10.9	17.0	108.6	4.3	0.55	0.41	627	0.32	4.63	0.11	423	0.14	0.09	0.48	1.55	2.71	1.83	16.76	2.0	54.02	40.53	0.42	99.74	11.11
	Ανώμιο 5	4.0	9.1	13.5	93.7	3.3	0.46	0.62	929	0.46	4.33	0.16	355	0.21	0.08	0.52	1.27	3.09	1.18	17.09	2.0	54.32	35.21	1.03	99.29	4.19
	Ανώμιο 10	6.2	13.4	16.0	87.0	2.6	0.28	0.44	337	0.14	6.25	0.05	169	0.05	0.03	0.45	1.51	0.86	0.43	17.53	2.0	54.73	37.95	0.93	99.03	6.70
	Ανώμιο 7	6.4	10.4	10.1	75.9	1.6	0.24	0.74	600	0.24	4.50	0.13	204	0.13	0.05	0.63	1.16	0.95	0.32	16.67	2.0	54.12	37.39	0.90	99.28	5.00
	Λίτσα	6.4	11.5	12.4	84.7	1.9	0.27	0.61	341	0.14	4.87	0.06	157	0.07	0.03	0.59	1.28	0.66	0.31	17.53	2.0	54.91	37.12	0.93	99.11	5.22
	Γουργουράτι	7.6	14.4	20.6	102.3	2.7	0.27	0.46	410	0.15	7.10	0.06	195	0.06	0.03	0.44	1.48	1.11	0.53	18.57	2.0	55.66	37.46	0.95	99.07	7.47
	Λαγκάδι	7.8	18.3	19.4	119.4	2.5	0.31	0.29	850	0.30	9.44	0.08	303	0.09	0.03	0.33	1.85	2.12	0.76	18.18	3.0	55.22	37.04	1.00	99.13	9.44
	Ρόζενα	8.2	11.3	20.9	215.2	2.5	0.52	0.81	1077	0.38	5.47	0.21	567	0.20	0.10	0.59	1.11	2.73	1.43	14.62	2.0	52.64	36.47	0.77	99.66	7.13
Μεσαίες λεκάνες	Θολοπόταμο 2	13.0	18.8	44.3	293.3	3.4	0.45	0.46	1224	0.34	8.97	0.13	550	0.14	0.06	0.45	1.47	4.16	1.87	16.21	3.0	53.73	38.25	0.80	99.60	11.22
	Ανώμιο 8	14.7	17.1	44.1	323.9	3.0	0.44	0.63	859	0.22	8.94	0.08	413	0.10	0.05	0.48	1.26	2.58	1.24	17.74	3.0	55.01	36.67	0.93	99.30	9.58
	Θολοπόταμο 1	15.4	17.6	45.0	274.9	2.9	0.36	0.63	933	0.24	8.10	0.12	370	0.12	0.05	0.55	1.26	2.73	1.08	17.33	2.0	54.78	37.29	0.93	99.32	8.67
	Βολινέος	27.2	27.4	98.0	656.9	3.6	0.48	0.45	1534	0.29	12.77	0.12	664	0.12	0.05	0.46	1.49	5.53	2.39	16.23	3.0	53.97	36.84	0.92	98.62	13.93
	Δερβένιος	40.9	33.3	101.7	1106.0	2.5	0.54	0.46	1724	0.27	16.78	0.10	926	0.10	0.06	0.43	1.47	4.29	2.30	16.02	4.0	53.52	35.45	0.95	99.53	17.66
	Σκουπέικο	45.5	36.1	98.1	1020.0	2.2	0.45	0.44	1726	0.26	16.67	0.09	810	0.10	0.05	0.46	1.51	3.72	1.75	16.58	7.0	54.16	36.00	1.00	99.39	16.67
	Λαδοπόταμος	47.4	48.9	112.2	1027.0	2.4	0.43	0.25	1912	0.28	22.66	0.08	1091	0.08	0.05	0.34	2.00	4.53	2.58	16.58	5.0	54.16	32.43	1.93	99.19	11.72
	Φόνισσα	53.2	40.4	121.0	1079.0	2.3	0.41	0.41	1580	0.22	22.38	0.07	862	0.07	0.04	0.37	1.56	3.59	1.96	16.46	5.0	54.41	34.83	1.18	99.19	18.91
	Μεγανίτας	60.7	45.3	103.5	1052.0	1.7	0.35	0.37	1571	0.20	19.65	0.07	744	0.08	0.04	0.45	1.64	2.68	1.27	16.55	5.0	53.99	36.09	1.18	99.03	16.60
	Νεμέας	66.5	46.0	190.5	1103.0	2.9	0.33	0.39	814	0.10	22.03	0.02	392	0.04	0.02	0.42	1.59	2.33	1.12	17.22	6.0	55.39	32.77	1.90	98.37	11.59
Κερνίτης	80.8	46.6	215.6	1944.0	2.7	0.48	0.47	1700	0.19	20.00	0.07	993	0.09	0.05	0.51	1.46	4.53	2.65	15.89	5.0	52.99	34.70	1.07	99.35	18.75	
Μεγάλες	Φοινίξ	88.2	53.1	203.8	1928.0	2.3	0.44	0.39	1881	0.20	20.58	0.07	936	0.09	0.05	0.51	1.59	4.35	2.16	17.79	6.0	54.86	35.13	1.25	99.02	16.46
	Ραϊζάνης	135.6	58.2	299.4	1663.0	2.2	0.25	0.50	1034	0.09	22.58	0.04	462	0.05	0.02	0.58	1.41	2.28	1.02	17.80	6.0	54.16	33.56	1.87	97.71	12.10
	Τρικαλιτικός	139.0	77.5	403.2	3060.0	2.9	0.44	0.29	2298	0.19	35.00	0.06	1141	0.07	0.03	0.38	1.85	6.67	3.31	15.80	8.0	52.96	32.92	1.47	98.77	23.86
	Κράθης	143.7	75.8	390.2	3955.0	2.7	0.55	0.31	2312	0.19	33.47	0.06	1202	0.07	0.04	0.40	1.78	6.28	3.26	16.25	9.0	53.74	32.06	1.40	99.08	23.91
	Ξηριάς	164.7	82.8	341.5	2075.0	2.1	0.25	0.30	1163	0.09	33.40	0.03	520	0.03	0.02	0.43	1.82	2.41	1.08	18.50	8.0	56.88	33.07	1.83	97.78	18.22
	Βουραϊκός	239.6	112.3	554.4	5498.0	2.3	0.46	0.24	2286	0.15	42.03	0.04	1196	0.05	0.03	0.42	2.05	5.29	2.77	15.80	11.0	52.99	25.57	2.53	97.33	16.59
Σελινόυντας	330.5	109.7	741.9	7850.0	2.2	0.48	0.34	2070	0.11	48.42	0.04	1115	0.04	0.02	0.42	1.70	4.65	2.50	16.13	10.0	52.86	31.01	2.10	98.12	23.06	

Πίνακας 3. Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ μορφομετρικών παραμέτρων και υδρολογικών δεικτών όπως προέκυψαν από τα υδρογραφήματα προσομοίωσης με την εφαρμογή των μοντέλων TOPMODEL (a) και LISEM (b); για το σύνολο των εικοσι επτά λεκανών καθώς και για κάθε ομάδα λεκανών ξεχωριστά: μικρές λεκάνες (<10 km²), μεσαίες λεκάνες (10-100 km²) και μεγάλες λεκάνες (>100 km²). Οι καλύτερες συσχετίσεις (με τιμές συντελεστή συσχέτισης >0,7) σημειώνονται με κόκκινο ενώ λιγότερο ισχυρές συσχετίσεις (με τιμές συντελεστή συσχέτισης >0,5) σημειώνονται με κίτρινο χρώμα.

(a)

	Μικρές λεκάνες			Μεσαίες λεκάνες			Μεγάλες λεκάνες			Σύνολο λεκανών		
	Qpeak	C	Tr	Qpeak	C	Tr	Qpeak	C	Tr	Qpeak	C	Tr
A	0.27	0.31	0.60	-0.08	-0.15	0.77	-0.21	-0.20	0.76	-0.14	-0.27	0.91
P	0.64	0.64	0.79	-0.07	-0.06	0.81	-0.27	-0.12	0.95	-0.12	-0.20	0.97
ΣL _{ch}	-0.11	-0.09	0.10	-0.09	-0.12	0.68	-0.47	-0.43	0.76	-0.19	-0.33	0.91
ΣL _{con}	-0.53	-0.53	0.12	-0.20	-0.33	0.70	-0.52	-0.46	0.81	-0.25	-0.39	0.88
D	-0.42	-0.44	-0.57	0.00	0.06	-0.66	-0.67	-0.60	-0.33	-0.32	-0.24	-0.37
Sl	-0.73	-0.76	-0.45	-0.56	-0.69	-0.08	-0.87	-0.69	0.53	-0.72	-0.66	0.12
Circ	-0.62	-0.60	-0.39	0.09	-0.06	-0.54	0.29	-0.07	-0.82	-0.17	-0.13	-0.65
Cr	-0.54	-0.58	0.12	-0.49	-0.59	0.48	-0.90	-0.69	0.64	-0.45	-0.50	0.79
R	-0.53	-0.57	0.14	-0.48	-0.58	0.48	-0.90	-0.69	0.63	-0.44	-0.49	0.79
M	-0.57	-0.62	-0.14	-0.41	-0.45	-0.47	-0.78	-0.58	0.11	-0.40	-0.28	-0.55
L _{IFP}	0.61	0.61	0.81	-0.14	-0.03	0.79	-0.38	-0.21	0.91	-0.14	-0.21	0.96
Sl _{IFP}	-0.82	-0.85	-0.30	-0.34	-0.44	-0.65	-0.65	-0.63	-0.37	-0.49	-0.36	-0.62
R ₂	-0.75	-0.78	-0.18	-0.51	-0.60	0.50	-0.96	-0.78	0.45	-0.50	-0.56	0.76
R _{ratio}	-0.77	-0.80	-0.40	-0.30	-0.47	-0.56	-0.73	-0.65	-0.16	-0.45	-0.34	-0.61
R _{ratio2}	-0.86	-0.89	-0.56	-0.50	-0.70	-0.37	-0.73	-0.67	-0.21	-0.59	-0.47	-0.53
Elong	-0.38	-0.33	-0.17	-0.09	-0.23	0.69	0.19	-0.04	0.31	-0.12	-0.24	0.89
Compact.	0.59	0.56	0.55	-0.16	-0.09	0.53	-0.49	-0.13	0.78	0.07	0.04	0.71
Rgd	-0.62	-0.66	-0.32	-0.56	-0.61	-0.01	-0.91	-0.71	0.30	-0.56	-0.58	0.60

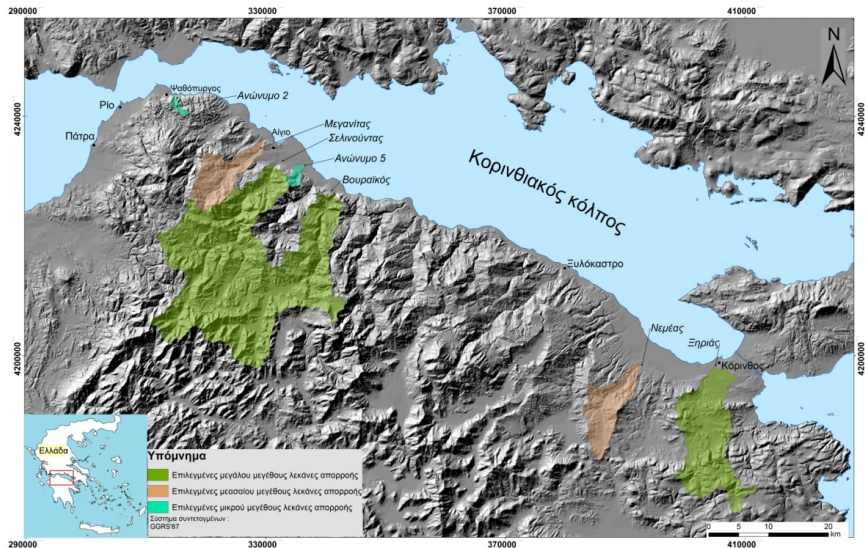
(b)

	Μικρές λεκάνες				Μεσαίες λεκάνες				Μεγάλες λεκάνες				Σύνολο λεκανών			
	Qpeak	C	Tr	Ταχύτητα πλημ. κύματος	Qpeak	C	Tr	Ταχύτητα πλημ. κύματος	Qpeak	C	Tr	Ταχύτητα πλημ. κύματος	Qpeak	C	Tr	Ταχύτητα πλημ. κύματος
A	-0.28	-0.39	0.39	0.19	-0.64	-0.33	0.47	0.66	-0.53	-0.33	0.66	0.19	-0.82	-0.76	0.82	0.72
P	0.05	-0.52	0.32	0.56	-0.78	-0.36	0.67	0.59	-0.79	-0.33	0.71	0.27	-0.89	-0.76	0.87	0.80
ΣL _{ch}	0.11	0.23	-0.20	0.54	-0.66	-0.44	0.49	0.55	-0.54	0.00	0.54	0.38	-0.83	-0.73	0.81	0.75
ΣL _{con}	-0.17	0.52	-0.24	0.28	-0.57	-0.15	0.32	0.74	-0.58	-0.03	0.48	0.44	-0.80	-0.63	0.74	0.73
D	0.38	0.60	-0.57	0.16	0.40	-0.14	-0.29	-0.56	0.12	0.81	-0.63	0.65	0.36	0.34	-0.41	-0.25
Sl	0.18	0.89	-0.65	0.16	0.17	0.46	-0.44	0.36	-0.42	0.56	-0.09	0.75	-0.08	0.36	-0.16	0.31
Circ	-0.43	0.32	0.03	-0.60	0.67	0.28	-0.69	-0.38	0.58	-0.10	-0.18	-0.54	0.53	0.47	-0.58	-0.65
Cr	-0.44	0.57	-0.06	0.02	-0.28	0.18	0.07	0.73	-0.52	0.47	-0.01	0.72	-0.70	-0.29	0.53	0.85
R	-0.41	0.57	-0.07	0.04	-0.28	0.22	0.07	0.72	-0.51	0.48	-0.02	0.72	-0.69	-0.29	0.53	0.86
M	-0.30	0.65	-0.19	-0.08	0.56	0.57	-0.51	-0.13	-0.15	0.73	-0.46	0.69	0.44	0.68	-0.58	-0.40
L _{IFP}	-0.07	-0.51	0.38	0.52	-0.85	-0.36	0.71	0.61	-0.59	-0.05	0.47	0.54	-0.87	-0.71	0.85	0.85
Sl _{IFP}	-0.32	0.74	-0.24	-0.23	0.81	0.54	-0.75	-0.24	0.18	0.83	-0.67	0.57	0.51	0.67	-0.65	-0.48
R ₂	0.01	0.88	-0.53	0.23	-0.45	0.25	0.20	0.72	-0.54	0.44	0.03	0.71	-0.68	-0.24	0.52	0.85
R _{ratio}	-0.32	0.72	-0.23	-0.31	0.82	0.57	-0.76	-0.22	-0.10	0.70	-0.48	0.50	0.48	0.64	-0.62	-0.53
R _{ratio2}	0.06	0.91	-0.58	-0.05	0.58	0.73	-0.66	0.05	-0.23	0.68	-0.37	0.59	0.46	0.66	-0.60	-0.40
Elong	-0.15	0.39	-0.17	-0.63	0.58	0.14	-0.58	-0.17	0.31	-0.46	0.14	-0.84	0.38	0.20	-0.38	-0.56
Compact.	0.36	-0.29	0.01	0.67	-0.71	-0.24	0.76	0.20	-0.68	-0.03	0.29	0.39	-0.64	-0.50	0.66	0.61
Rgd	-0.06	0.74	-0.38	0.06	0.02	0.11	-0.17	0.37	-0.30	0.65	-0.27	0.76	-0.52	-0.13	0.33	0.74
Rgd ₂	0.28	0.86	-0.67	0.21	-0.26	0.19	0.03	0.51	-0.35	0.62	-0.21	0.77	-0.51	-0.08	0.32	0.74

Τα δύο μοντέλα οδήγησαν σε ποιοτικά διαφορετικά αποτελέσματα σε ότι αφορά τη συσχέτιση μεταξύ μορφομετρικών παραμέτρων και υδρολογικών δεικτών. Συγκεκριμένα, λόγω της εσωτερικής του δομής (τον υπολογισμό του τοπογραφικού δείκτη) το TOPMODEL προβλέπει μια ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ της κλίσης της λεκάνης και της παροχής αιχμής, πράγμα που σημαίνει ότι λεκάνες με μεγαλύτερες κλίσεις δίνουν μικρότερες παροχές αιχμής. Αυτό ισχύει για το κλάσμα της επίγειας απορροής ενώ για την υποδόρια απορροή ισχύει το αντίθετο (ισχυρή θετική συσχέτιση). Αυτό είναι συνεπές με τον βασικό μηχανισμό απορροής που θεωρεί το μοντέλο. Με τον ίδιο τρόπο, μεσαία έως ισχυρή συσχέτιση παρατηρείται ανάμεσα στην κλίση της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (S_{LFP}) και την παροχή αιχμής (Q_{peak}), ενώ ασθενής αρνητική συσχέτιση παρατηρείται ανάμεσα στο μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (L_{LFP}) και τον συντελεστή απορροής (Q_{peak}). Μερικές μη αναμενόμενες συσχετίσεις εμφανίζονται μεταξύ μορφομετρικών παραμέτρων και του συντελεστή απορροής (C). Για παράδειγμα, η ίδια μέση - ισχυρή αρνητική συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ του συντελεστή απορροής και της κλίσης της λεκάνης (SI), αλλά επίσης και με τον δείκτη αναγλύφου (R), τον δείκτη τραχύτητας (Rgd) και τον δείκτη τραχύτητας² ($Rgd2$). Ασθενής αρνητική συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ του συντελεστή απορροής (C) και του αριθμού του Melton (M), την κλίση της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (S_{LFP}), του δείκτη αναγλύφου, (R) και του λόγου αναγλύφου, (R_{ratio}). Οι συσχετίσεις των μορφομετρικών παραμέτρων με τον χρόνο στην αιχμή (T_p) είναι περισσότερο αναμενόμενες και είναι παραπλήσιες με αυτές του LISEM ενώ επίσης συμφωνούν και στο πρόσημο.

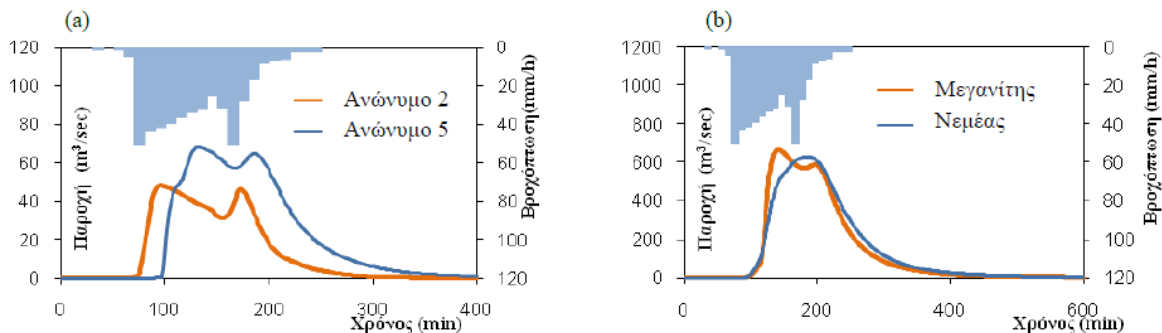
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του LISEM δίνουν μια άλλη, πιο αναμενόμενη, εικόνα. Σε αυτά, η παροχή αιχμής (Q_{peak}) εμφανίζεται να έχει ισχυρά αρνητική συσχέτιση με την έκταση της λεκάνης (A), την περίμετρο (P), το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (L_{LFP}), τους δείκτες αναγλύφου της λεκάνης (R και R_2) και τον δείκτη συμπίκνωσης ($Comp$), ενώ δε φαίνεται να υπάρχει κάποια συσχέτιση με την κλίση της λεκάνης (SI). Όσον αφορά τον συντελεστή απορροής (C), συσχετίζεται ισχυρά αρνητικά με την έκταση (A), και την περίμετρο της λεκάνης (P), το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (L_{LFP}), ενώ θετική είναι η συσχέτισή του με τον αριθμό τραχύτητας Melton (M).

Ο χρόνος έως την αιχμή συσχετίζεται ισχυρά θετικά με την έκταση και την περίμετρο της λεκάνης (A, P), το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής (L_{LFP}), και την παράμετρο της επιμήκυνσης της λεκάνης ($Elong$). Εάν συναρτήσουμε τον χρόνο στην αιχμή με το μήκος της λεκάνης (L_{LFP} / T_p , διαστάσεις ταχύτητας), η προκύπτουσα "ταχύτητα" συσχετίζεται θετικά με τον δείκτη αναγλύφου (R), και τον δείκτη τραχύτητας της λεκάνης (Rgd). Δεδομένου ότι ο δείκτης αναγλύφου εκφράζει μια υψομετρική διαφορά, η υπόθεση ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο πιο γρήγορα θα διοχετευτεί το πλημμυρικό κύμα προς την έξοδο της λεκάνης, είναι λογική. Τα αποτελέσματα του LISEM συμφωνούν περισσότερο με την εικόνα που υπάρχει για τα ακραία πλημμυρικά φαινόμενα και την εξέλιξή τους σε λεκάνες που βρίσκονται σε σχετικά ξηρές κλιματικά περιοχές, όπου ο κύριος πλημμυρικός όγκος προέρχεται από την επίγεια απορροή που οφείλεται σε υπέρβαση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους από την βροχόπτωση (infiltration excess), ή απορροή "τύπου Horton".



Σχήμα 4. Γεωγραφική θέση των λεκανών απορροής τα συγκριτικά υδρογραφήματα των οποίων παρατίθενται στα σχήματα 5 και 6.

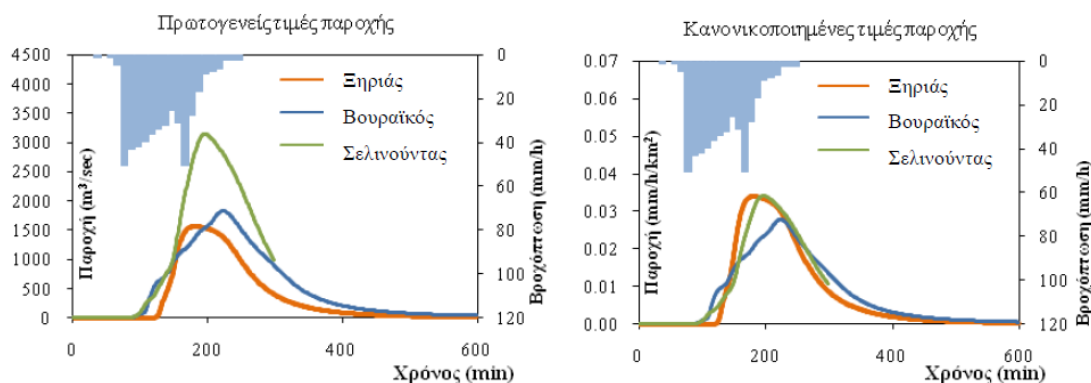
Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συγκριτική εξέταση κάποιων από τα υδρογραφήματα του LISEM, προκειμένου να γίνουν καλύτερα αντιληπτά τα εξαγόμενα του μοντέλου. Θα εξεταστούν τρεις περιπτώσεις: η πρώτη αφορά δυο μικρές λεκάνες απορροής, η δεύτερη αφορά ένα παράδειγμα από δύο ενδιάμεσης έκτασης λεκάνες απορροής και η τρίτη αφορά τα αποτελέσματα για τρεις από τις μεγαλύτερες λεκάνες της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 5. Σύγκριση υδρογραφήματων μεταξύ δύο μικρής έκτασης λεκανών απορροής (a) και δύο ενδιάμεσης έκτασης λεκανών απορροής (b).

Στο Σχήμα 5a φαίνονται τα υδρογραφήματα για δύο μικρές λεκάνες απορροής με περίπου το ίδιο εμβαδόν, οι οποίες συμπεριφέρονται αρκετά διαφορετικά στην ίδια βροχόπτωση. Ο χείμαρρος Ανώνυμο 5 έχει πολύ μεγαλύτερη απόκριση αλλά και αισθητά μεγαλύτερη καθυστέρηση στην εκδήλωση της πλημμυρικής αιχμής σε σχέση με τον Ανώνυμο2. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στα διαφορετικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά των δύο λεκανών. Αν και για τις μικρές λεκάνες δεν εμφανίζονται σημαντικές συσχετίσεις, εάν θεωρηθούν τα αποτελέσματα για το σύνολο των λεκανών, το Ανώνυμο 2 έχει σημαντικά μεγαλύτερη περίμετρο (P), μήκος μέγιστης υδάτινης διαδρομής (L_{LFP}) και δείκτη συμπύκνωσης (Comp) που είναι παράμετροι που εμφανίζουν ισχυρές αρνητικές συσχετίσεις με την απορροή αιχμής.

Στο Σχήμα 5b φαίνονται τα υδρογραφήματα δύο λεκανών ενδιάμεσης έκτασης, αυτών του Νεμέα και του Μεγανίτη που έχουν παρόμοια μορφομετρικά χαρακτηριστικά. Δεδομένου ότι ο Νεμέας έχει μεγαλύτερο μήκος ποταμού θα πρέπει να δώσει μικρότερη παροχή αιχμής. Ο δείκτης αναγλύφου του Μεγανίτη είναι πολύ μεγαλύτερος από του Νεμέα, επομένως αναμένεται να έχει πιο ταχεία απορροή (δηλαδή θα εκδηλώνεται πιο γρήγορα). Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, αυτός είναι πιθανότατα και ο λόγος (μικρότερος δείκτης αναγλύφου) που ο Νεμέας δεν παρουσιάζει δύο κορυφές στο υδρογράφημα απορροής, αντίστοιχες με αυτές που παρουσιάζει η βροχόπτωση, αλλά μία.

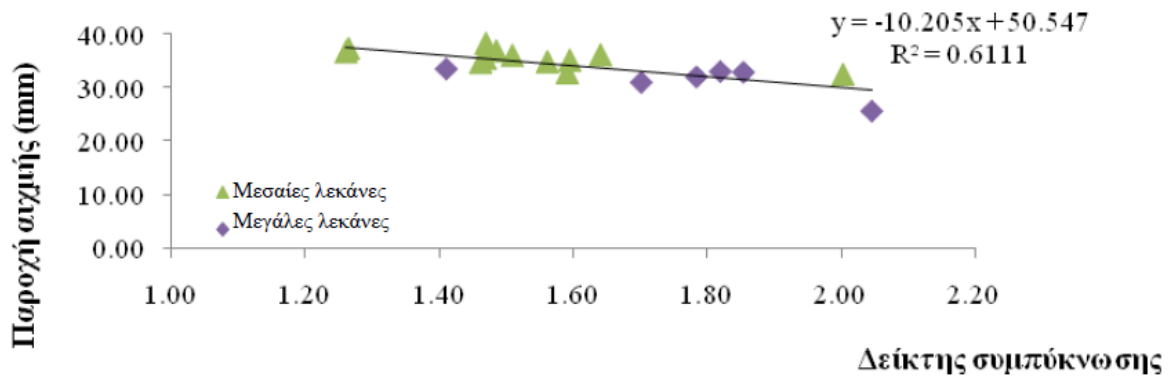


Σχήμα 6. Σύγκριση υδρογραφήματων των τριών μεγαλύτερων λεκανών απορροής (αριστερά πρωτογενείς και δεξιά οι κανονικοποιημένες τιμές).

Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται, τα πρωτογενή υδρογραφήματα και τα κανονικοποιημένα υδρογραφήματα (παροχή σε mm/km²) για τις τρεις λεκάνες απορροής, τον Σελινούντα, τον Βουραϊκό και τον Ξεριά. Τα κανονικοποιημένα υδρογραφήματα αποκαλύπτουν ότι η λιγότερο "παραγωγική" λεκάνη (μεγαλύτερη απορροή ανά μονάδα επιφάνειας) είναι αυτή του Βουραϊκού, πράγμα που είναι συνεπές με την ισχυρή αρνητική συσχέτιση της παροχής αιχμής με τον δείκτη συμπίκνωσης. Παρόλο το ότι ο Σελινούντας έχει αρκετά μεγαλύτερο μήκος κύριου κλάδου από τον Ξεριά (48 km έναντι 33km), η χρονική απόκρισή τους είναι σχεδόν ταυτόχρονη. Αυτό οφείλεται ίσως στο πολύ μεγαλύτερο δείκτη αναγλύφου του Σελινούντα. Απ' αυτή την άποψη ο Βουραϊκός αποτελεί εξαίρεση, μιας και έχει το μεγαλύτερο δείκτη αναγλύφου από όλους.

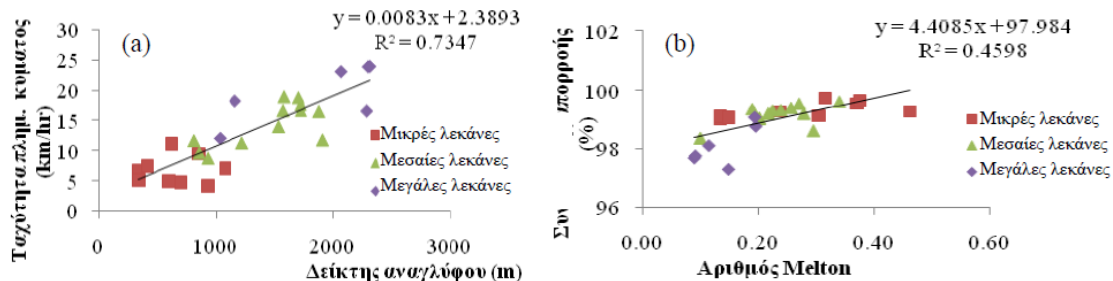
Η εξέταση του πίνακα των συντελεστών συσχέτισης του LISEM οδηγεί στη διαπίστωση ότι, για τις μικρές λεκάνες δεν υπάρχουν ισχυρές συσχετίσεις. Αντίθετα για τις μεσαίες και μεγαλύτερες λεκάνες η παροχή αιχμής (Q_{peak}) συσχετίζεται πιο ισχυρά με την περίμετρο (P) και τον δείκτη συμπίκνωσης (Com_p) και λιγότερο ισχυρά με την επιφάνεια (A), το συνολικό μήκος των κλάδων και το συνολικό μήκος των ισοϋψών. Ενδεχομένως ο δείκτης συμπίκνωσης να αποτελεί μια αντιπροσωπευτική παράμετρο του υδρολογικού δυναμικού για λεκάνες με έκταση μεγαλύτερη των 10 km².

Ο χρόνος έως την αιχμή (T_p) συσχετίζεται καλύτερα με την περίμετρο (P) ενώ η "ταχύτητα" του πλημμυρικού κύματος συσχετίζεται καλά με τον δείκτη αναγλύφου (R). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μια μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά θα ωθήσει την πλημμύρα γρηγορότερα στην έξοδο.



Σχήμα 7. Διάγραμμα διασποράς μεταξύ δείκτη συμπύκνωσης και παροχής αιχμής για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους λεκάνες απορροής

Ο συντελεστής απορροής (C) συσχετίζεται καλά με το λόγο αναγλύφου (Rratio) και τον αριθμό τραχύτητας του Melton (M).



Σχήμα 8: Διαγράμματα διασποράς δείκτη αναγλύφου - "ταχύτητας" του πλημμυρικού κύματος (a) και αριθμού Melton- συντελεστή απορροής (b).

5. Συμπεράσματα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των συντελεστών συσχέτισης ανάμεσα στις ποσοτικές γεωμορφολογικές παραμέτρους και τους υδρολογικούς δείκτες οδήγησε στο συμπέρασμα ότι μεταξύ των δύο μοντέλων το LISEM είναι πιο κατάλληλο για την προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων σε ορεινές λεκάνες με χειμναρικά χαρακτηριστικά και σε σχετικά ξηρά κλίματα (όπως αυτό της βόρειας Πελοποννήσου) όπου επικρατούν μεγάλοι όγκοι επίγειας απορροής "τύπου Horton".

Τα αποτελέσματα της έρευνας, έδειξαν ότι υφίστανται ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ ορισμένων μορφολογικών παραμέτρων και των υδρολογικών δεικτών. Συνεπώς η ποσοτική μορφομετρική ανάλυση είναι ιδιαίτερης σημασίας για την υδρολογική μελέτη μιας λεκάνης απορροής και ιδιαίτερα για την μελέτη του τρόπου απόκρισης σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης. Ο υπολογισμός κάποιων μορφομετρικών παραμέτρων μπορεί να διευκολύνει την αποτελεσματική πρόβλεψη των πλημμυρικών χαρακτηριστικών και του πλημμυρικού δυναμικού μιας λεκάνης και ενδεχομένως να βοηθήσει στην κατηγοριοποίησή τους ως προς τον πλημμυρικό κίνδυνο.

Κάποια ζητήματα που δεν αντιμετωπίστηκαν σε αυτή την αρχική φάση της έρευνας αφορούν κυρίως στην επίδραση των οριακών συνθηκών (παραμέτροι και βροχόπτωση), την ανάλυση της ευαισθησίας των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις, την επίδραση του

μεγέθους του κελιού στον υπολογισμό των μορφομετρικών παραμέτρων καθώς και το μέγεθος του δείγματος. Τα θέματα αυτά θα αποτελέσουν αντικείμενο της επόμενης φάσης της έρευνας αυτής.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Επιτροπή Ερευνών του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου για την χρηματοδότηση της έρευνας. (Κωδικός έργου : 261)

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- Armijo, R., Meyer, B., King, G., Rigo, A. and Papanastassiou, D., 1996. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophysical Journal International*, **126**, 11-53.
- Beven K., 1997. TOPMODEL, a critique. *Hydrological Processes*, **11(9)**, 1069-1085.
- Beven, K.J., and Kirkby M.J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin*, **24(1)**, 43-69.
- Black, P. E., 1996. *Watershed hydrology* (2nd edition), Ann Arbor Press, Chelsea, MI.
- Bornovas, I. and Rondoyanni Th., 1983. *Geological map of Greece*, scale 1:500,000, Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- Chow, V.T., Maidment, D. and Mays, L., 1998. *Applied Hydrology*, McGraw Hill International Editions.
- Church, M. and Mark, D.M., 1980. On size and scale in geomorphology, *Progress in Physical Geography*, **4**, 342-390.
- Cooke, R.U. and Doornkamp, J.C., 1990. *Geomorphology in environmental management*. Oxford University Press, 2nd edition.
- De Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E. and Cremers, N.H.D.T., 1996. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: II. Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, **10 (8)**, 1119-1126.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. and Ritsema, C.J., 1996. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and output. *Hydrological Processes*, **10 (8)**, 1107-1117.
- Gravelius, H., 1914. *Grundrifi der gesamten Gewisserskunde. Band I: Flufikunde* (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany.
- Gregory, K.J. and Walling, D.E., 1973. *Drainage basin. Form and Process : A Geomorphological approach*. Edward Arnold.
- Hornberger, G.M., Raffensperger, J.P., Wiberg, P.L. and Eshleman K.N., 1998. *Elements of Physical Hydrology*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins : a hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, **56(3)**, 275-370.
- Howard, A.D., 1990. Role of hypsometry and planform in basin hydrologic response. *Hydrological Processes*, **4**, 373-385.
- Karymbalis, E., Chalkias, C., Ferentinou, M. and Maistrali, A., 2011. "Flood hazard evaluation in small catchments based on quantitative geomorphology and GIS modeling: The case of Diakoniaris torrent (W. Peloponnese, Greece)" In: Nicolaos Lambrakis, George Stournaras and Konstantina Katsanou Ed., *Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp.137-145.
- Karymbalis, E., Katsafados, P., Chalkias, C. and Gaki-Papanastassiou, K., 2012. An integrated study for the evaluation of natural and anthropogenic causes of flooding in small catchments based on

- geomorphological and meteorological data and modeling techniques: The case of the Xerias torrent (Corinth, Greece). *Zeitschrift für Geomorphologie*, **56 (1)**, 045–067.
- Katsafados, P., Kalogirou, S., Papadopoulos, A. and Korres, G., 2012. Mapping long-term atmospheric variables over Greece. *Journal of Maps*, **8(2)**, 181–184.
- McNeil, L. and Collier, R. 2004. Uplift rates of the eastern Eliki fault segment, Gulf of Corinth, Greece, inferred from Holocene and Pleistocene terraces. *Journal of the Geological Society of London*, **161**, 81-92.
- Melton, M.A., 1965. The geomorphic and palaeoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona. *Journal of Geology*, **73**, 1-38.
- Miller, V.C., 1953. *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*, Department of Geology Columbia University, New York, 389-402.
- Moore, I. D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R., 1991. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, **5(1)**, 3-30.
- Post, D.A. and Jakeman, A.J., 1996. Relationships between catchment attributes and hydrological response characteristics in small Australian mountain ash catchments. *Hydrological Processes*, **10(6)**, 877-892.
- Post, D.A. and Jakeman, A.J., 1999. Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in SE Australia by regionalizing the parameters of a mumped conceptual rainfall-runoff model. *Ecological Modelling*, **123**, 91-104.
- Roche, M., 1963. *Hydrology de Surface Gauthier-Villars*, Paris.
- Runge, J. and Nguimalet, C.R., 2005. Physiogeographic features of the Oubangui catchment and environmental trends reflected in discharge and floods at Bangui 1911-1999, Central African Republic. *Geomorphology*, **70**, 311-324.
- Schumm, S.A., 1956. Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, *Geological Society of America*, New Jersey, **67**, 597- 646.
- Strahler, A.N., 1952. Dynamic basis of geomorphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, **63**, 923-938.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed Geomorphology, Transactions. *American Geological Union*, **38(6)**, 913-920.
- Strahler, A.N., 1968. Quantitative geomorphology, In: Fairbridge, R.W. (eds), *The Encyclopedia of geomorphology*, Reinhold Book Crop, New York.
- Van Deursen, WPA and Wesseling, CG., 1992. The PC-Raster Package: Department of Physical Geography, Utrecht University; <http://www.pcraster.nl>.
- Zăvoianu, I., 1985. *Morphometry of drainage basins, Developments in water science*, **20**, Elsevier publications, Amsterdam, pp. 4-5.

Ελληνόγλωσση

- Καρύμπαλης Ε., Κατσαφάδος Π., Καλογερόπουλος Κ., Καραλής Σ., Χαλκιάς Χ., 2013. *Η Γεωγραφία του παράκτιου και του νησιωτικού χώρου*. Κεφ. 7 *Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες*. Εκδόσεις Σταμούλη.