ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Γεωγραφίες

Αρ. 26 (2015)

Γεωγραφίες, Τεύχος 26, 2015

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΒΟΥΡΑΪΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Δημήτρης Πεντέρης, Κλεομένης Καλογερόπουλος, Χρίστος Χαλκιάς

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 10/08/2025 08:40:04

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΒΟΥΡΑΪΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Δημήτριος Πεντέρης*, Κλεομένης Καλογερόπουλος**, Χρίστος Χαλκιάς***

Περίληψη

Οι φυσικοί κίνδυνοι είναι ιστορικά μια ουσιαστική απειλή για την πρόοδο και την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Η μελέτη αυτή ασχολείται με την αξιολόγηση της πλημμύρας στην χειμμαρική λεκάνη του Βουραϊκού ποταμού, ο οποίος που βρίσκεται στη Βόρεια Πελοπόννησο. Ο Βουραικός ποταμός έχει συνολικό μήκος 36 χλμ, και αποστραγγίζει μια λεκάνη έκτασης 239.6km^2. Εκβάλλει στον Κορινθιακό κόλπο και διέρχεται από την παραλιακή πόλη του Διακοπτού. Το κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής, είναι η προσομοίωση της απορροής σε μια τυπική χειμμαρική υπολεκάνη, με τη δημιουργία ενός συστήματος που βασίζεται σε τεχνολογία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής και αφορά την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής, στο εμπορικό λογισμικό ArcGIS (έκδοση 10.1). Ειδικότερα, εξετάστηκε ο ρόλος του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM), στην υδρολογική απόκριση της υπό εξέτασης λεκάνης απορροής. Για τον σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν δύο Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (5μ και 25μ μέγεθος ψηφίδας). Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σημαντική διαφορά στην υδρολογική απόκριση (μεταξύ των δύο DEM) της λεκάνης, εξετάζοντας τα παραγόμενα υδρογραφήματα.

Flood Hazard assessment in a subcatchment of Vouraikos River utilizing GIS

Dimitrios Penteris, Kleomenis Kalogeropoulos, Cristos Chalkias

Abstract

Natural hazards are historically a substantial threat to the progress and development of human communities. This study deals with the evaluation of flash flood in the torrential catchment of Vouraikos River, which is located in Northern Peloponnesus. It has a total main channel length of 36 km, and drains an area of 239.6km^2. It discharges into the Gulf of Corinth, flowing through the coastal town of Diakopto. The main object of this work, is the simulation of runoff in a typical sub-basin, which is directly related to catastrophic flood events, by creating a system based on GIS technology. For this purpose, we utilize a spatially distributed rainfall-runoff model, which concerns the hydrological analysis of a catchment, in ArcGIS 10.1 environment. Especially, we examine the role of DEM in hydrological analysis. For this purpose, we constructed two kind of DEM (5m & 25m cell size DEM). The results revealed a substantial difference in the hydrological response (between the two DEMs), by examining the manufactured direct unit hydrographs.

*Δημήτριος Πεντέρης, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ Βενιζέλου 70, Καλλιθέα 17671, τηλ. 210-9547374, email: gs20930@hua.gr

**Κλεομένης Καλογερόπουλος, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ Βενιζέλου 70, Καλλιθέα 17671, τηλ. 210-9547374, email: kalogeropoulos@hua.gr

***Χρίστος Χαλκιάς, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ Βενιζέλου 70, Καλλιθέα 17671, τηλ. 210-9547374, email: xalkias@hua.gr

Εισαγωγή

Οι πλημμύρες, λογίζονται ως ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, που δύνανται να προκληθούν από γεγονότα όπως καταιγίδες, τυφώνες, παλιρροιακά κύματα και τήξη πάγων ή χιονιού και τα οποία προβληματίζουν και ταλανίζουν την ανθρωπότητα από το παρελθόν έως και σήμερα. Η αύξηση της πιθανότητας της εκδήλωσης των πλημμυρικών φαινομένων και των δυσμενών επιδράσεων τους, πηγάζει από τις υφιστάμενες ανθρωπογενείς δραστηριότητες και την εντατικοποίηση αυτών. Η κλιματική αλλαγή, η οποία θα επιφέρει υψηλότερη ένταση των βροχοπτώσεων και άνοδο της στάθμης της θάλασσας, ενδέχεται να συμβάλλει σε πιθανή αύξηση της κλίμακας και της συχνότητας των πλημμυρικών φαινομένων (Smith and Petley 2009, Κουργιαλάς 2010).

Αρκετές περιοχές στον ελλαδικό χώρο, πολύ συχνά υποφέρουν από τοπικά πλημμυρικά επεισόδια τα οποία προξενούνται από ισχυρές καταιγίδες και συνδέονται, με μικρού ή μεσαίου μεγέθους, υδρολογικές λεκάνες ή τοπικά υδατορεύματα, όπως π.χ. χείμαρρους. Ουσιαστικά, τα υδρογραφικά δίκτυα αυτά, ενώ παραμένουν ξηρά σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, όταν λαμβάνουν χώρα ακραίες βροχοπτώσεις για συγκεκριμένη χρονική περίοδο, γίνονται ιδιαίτερα ενεργά παρουσιάζοντας ακραίες τιμές παροχής. Πρέπει να σημειωθεί πως, οι στιγμιαίες ή αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods) μπορεί να εμφανίζουν μικρή συχνότητα και ο χρόνος έως το σημείο αιχμής να είναι πολύ σύντομος αλλά διακρίνονται για την μεγάλη ισχύ και ένταση τους. Παρά την υψηλή σημασία των αιφνίδιων πλημμυρών σε λεκάνες υδατορευμάτων εφήμερης ροής, η υδρολογική μελέτη και ανάλυση αυτών στον ελλαδικό χώρο, καθίσταται διαχρονικά ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική, γεγονός που πηγάζει από την έλλειψη και αδυναμία μέτρησης των τιμών της κατακρήμνισης και της παροχής (Κουργιαλάς 2010, Καρύμπαλης, κ.α. 2014).

Ο «πλημμυρικός κίνδυνος», σχετίζεται τόσο με το ενδεχόμενο εκδήλωσης ενός πλημμυρικού επεισοδίου, όσο και με τις δυνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ουσιαστικά, αποτελεί παράγωγο τόσο των κοινωνικών, όσο και των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων. Κατά τη διερεύνηση του πλημμυρικού κινδύνου και των απωλειών λόγω πλημμυρών, οι μετεωρολογικές και υδρολογικές συνθήκες, η μορφή, η γεωμετρία και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός ποταμού και η γεωμορφολογία της λεκάνης του, οι συνθήκες χρήσεων γης, καθώς και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις είναι παράμετροι που θα πρέπει να εξετάζονται και να αξιολογούνται ξεχωριστά. Κάθε ένας από τους προαναφερθέντες παράγοντες δύναται να συμβάλλει στην αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου, ιδιαίτερα εφόσον προκύψουν αρνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους (Bronster 2003, Sene 2013).

Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών διευκολύνει σε σημαντικό βαθμό την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, καθιστώντας δυνατή την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών – στις οποίες συγκαταλέγεται και εκείνη του υδρολογικού κύκλου – συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στη μελέτη των πλημμυρικών επεισοδίων. Για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου, που περιλαμβάνει τόσο τη μαθηματική περιγραφή, όσο και την ποσοτικοποίηση, τον καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η αρχή διατήρησης της μάζας. Όσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια υπεισέρχεται στις επιμέρους διεργασίες (βροχόπτωση – χιονόπτωση, απορροή, κατείσδυση, εξατμισοδιαπνοή) της κυκλικής αυτής διαδικασίας, τόσο ακριβέστερη καθίσταται η προσομοίωση δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα (Moore et al. 1991, Forte et al. 2005, Abdalla 2006) .

Στην παρούσα μελέτη, υλοποιείται μια προσπάθεια για την μοντελοποίηση-προσομοίωση της επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού, σε συνδυασμό με την εφαρμογή των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), με σκοπό την αποτίμηση του ρόλου του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε, βασίζεται στην αξιοποίηση και εφαρμογή ενός χωρικά κατανεμημένου εννοιολογικού μοντέλου βροχής-απορροής, με σκοπό τη διερεύνηση της «απόκρισης» της λεκάνης του χείμαρρου σε ακραία ύψη βροχής. Ειδικότερα, προσδιορίζεται το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας της λεκάνης απορροής, ενώ ο κύριος στόχος μας είναι η κατασκευή ενός άμεσου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για μια ακραία βροχόπτωση, εκτιμώντας την απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης.

Το μοντέλο που εφαρμόστηκε, βασίζεται στην ψηφιακή βάση δεδομένων που σχεδιάστηκε και στη

χρήση ψηφιδωτών δεδομένων. Η γεωγραφική βάση δεδομένων, απαρτίζεται από βασικά θεματικά επίπεδα που περιλαμβάνουν ισοϋψείς καμπύλες, κλάδους υδρογραφικού δικτύου, λεκάνη απορροής, γεωλογικούς σχηματισμούς, χρήσεις γης, εδαφολογικά στοιχεία. Λόγω έλλειψης των απαραίτητων βροχομετρικών δεδομένων, έγινε μια παραδοχή, κατά την οποία μεταφέρεται το έντονο πλημμυρικό φαινομένο που προκλήθηκε στον παροδικής ροής ποταμό Ξηριά (Κόρινθος), στη λεκάνη απορροής του παραπόταμου του Βουραϊκού ποταμού, ο οποίος ευρίσκεται στην βορειοδυτική Πελοπόννησο και εκβάλλει στον Κορινθιακό κόλπο. Η προαναφερθείσα προσέγγιση επιτελείται και εφαρμόζεται για δύο διαφορετικά ΨΜΕ (DEM), ένα λεπτομερέστερης ανάλυσης (μέγεθος ψηφίδας 5x5μ) και ένα πιο γενικευμένης (μέγεθος ψηφίδας 25x25μ) για την ίδια περιοχή, με σκοπό τη διενέργεια συγκρίσεων και την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων όσον αφορά στην ακρίβεια εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Όπως έχει προαναφερθεί, τα ποτάμια πλημμυρικά φαινόμενα προξενούνται, όταν αφενός μεν, το ύψος βροχόπτωσης παρουσιάζει τέτοιες τιμές οι οποίες υπερβαίνουν την ικανότητα του κάθε τύπου εδάφους να απορροφήσει το νερό και αφετέρου, όταν δεν επιτρέπουν στο υδρογραφικό δίκτυο να αποστραγγίσει το νερό που συγκεντρώνεται ως επιφανειακή απορροή. Μετά από την έναρξη μιας ακραίας βροχόπτωσης, παρατηρείται μείωση της μεταφορικής ικανότητας του υδρογραφικού δικτύου με αποτέλεσμα το πλεόνασμα νερού που υπερχειλίζει την κοίτη του ποταμού, να προκαλεί ακραίες πλημμυρικές παροχές αιχμής. Είναι συχνό φαινόμενο τέτοιες πλημμυρικές παροχές να δημιουργούν δυσμενείς κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ανθρώπινες απώλειες, φθορές σε κτίρια, υποδομές και γεωργικές εκτάσεις καθώς και την υποβάθμιση περιβαλλοντικά σημαντικών εκτάσεων (Καρύμπαλης κ.α. 2014).

Η σχέση βροχής-απορροής, περιλαμβάνει πληθώρα παραμέτρων και είναι λογικό να συνιστά μια ιδιαίτερα πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία. Έχει αποδειχθεί, ότι η πρόβλεψη της πλημμυρικής απορροής και η εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης σε ένα αιφνίδιο επεισόδιο βροχόπτωσης, λογίζονται ως δύο εκ των σημαντικότερων προκλήσεων της υδρολογικής μοντελοποίησης. Μέθοδοι και τεχνικές όπως η ορθολογική μέθοδος, έχουν εφαρμοστεί ήδη για τον σκοπό αυτό αλλά σε κλίμακα λεκανών μικρής έκτασης. Μια άλλη προσέγγιση για την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής, βασίζεται στις συνθήκες υγρασίας του εδάφους και τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά, όπως π.χ. η μέθοδος των Dickinson et al. (1993).

Η ανάπτυξη και εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων, αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που απαιτεί έναν σημαντικό όγκο χωρικών πληροφοριών για τις λεκάνες απορροής και για την διερεύνηση και τον προσδιορισμό περιοχών με υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο. Στόχος της είναι η ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που θεωρείται πρακτικά αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, εξαρτάται από την λεπτομέρεια της επιμέρους διαδικασίας της κάθε προσέγγισης.

Για πολλές δεκαετίες, η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η οποία εισήχθη από τον Sherman το 1932, αποτελεί βασικό εργαλείο στον υπολογισμό και εκτίμηση τόσο της πλημμυρικής αιχμής, όσο και της γενικότερης κατανομής της απορροής που προξενεί η βροχόπτωση. Η δε συνεισφορά της θεωρίας αυτής στον υπολογισμό της διόδευσης της απορροής, θεωρείται ζωτικής σημασίας Κατά τον Sherman, το Μοναδιαίο Υδρογράφημα ορίζεται ως το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προξενείται από την ενεργό βροχόπτωση, μοναδιαίου ύψους (στο μετρικό σύστημα ίσης με 1 cm, h_R=1 cm) και συγκεκριμένης διάρκειας t_R, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα σ' όλη την έκταση της λεκάνης απορροής και έχει σταθερή ένταση. Ο όρος «μοναδιαίο» πηγάζει από το γεγονός, ότι η χρονική διάρκεια της καθαρής βροχόπτωσης λογίζεται ως χρονική μονάδα κατά την περαιτέρω χρήση του ΜΥΓ (Μιμίκου και Μπαλτάς 2006). Ο συνδυασμός του μοναδιαίου υδρογραφήματος με την ακραία βροχόπτωση, δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της παροχής στην έξοδο της λεκάνης. Παράλληλα, πραγματοποιείται μια υπόθεση ότι η απόκριση της εισόδου της λεκάνης στην ακραία βροχόπτωση είναι γραμμική και χρονικά αναλλοίωτη.

Κάθε λεκάνη έχει το δικό της υδρογράφημα για παρατηρημένες βροχές δεδομένης έντασης και διάρκειας. Για να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος επομένως απαιτού-

νται παρατηρημένα υδρογραφήματα της λεκάνης απορροής. Υδρογραφήματα δηλαδή από μετρήσεις βροχόπτωσης και παροχής κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων συμβάντων. Σε λεκάνες απορροής για τις οποίες υπάρχει έλλειψη μετρήσεων, είναι δυνατή η κατασκευή των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, η οποία επιτελείται μέσω κατάλληλων εξισώσεων μιας η περισσότερων παραμέτρων. Για την διαμόρφωση των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων θεωρούνται απαραίτητα δεδομένα και μετρήσεις από πραγματικά γεγονότα σε γειτονικές λεκάνες ή λεκάνες με όμοια χαρακτηριστικά.

Η μαθηματική αναπαράσταση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, παρουσιάζει σημαντικό ιστορικό στην υδρολογία. Η πρώτη απόπειρα, χρονολογείται στο 1945, όταν ο Clark διετύπωσε ένα μοντέλο μοναδιαίου υδρογραφήματος, συνδυάζοντας το διάγραμμα επιφάνειας-χρόνου της λεκάνης, με ένα γραμμικό ταμιευτήρα στην έξοδο αυτής, ενώ ακολούθησε το 1957 ο Nash, και το 1959 ο Dooge. Σύμφωνα με τον Dooge, η παροχή στην έξοδο της λεκάνης, δίνεται από το ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) της ενεργού βροχόπτωσης και του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το 1988, οι Chow et al., διαμόρφωσαν μια θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η οποία βασίζεται στη συσχέτιση των συναρτήσεων της παλμικής απόκρισης (στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα), της απόκρισης μοναδιαίου βήματος (S-Hydrograph), καθώς και της συνάρτησης μοναδιαίας παλμικής απόκρισης (unit hydrograph), η απόδοση των οποίων πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ολοκληρώματος συνέλιξης (Maidment et al 1996).

Για πολλά χρόνια, οι υδρολόγοι κατέβαλλαν αρκετές προσπάθειες για να συνδέσουν τα γεωμορφολογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας υδρολογικής λεκάνης και την υδρολογική της απόκριση. Τελικά μέσα από διάφορες μελέτες και την ανάπτυξη πληθώρας μοντέλων αποδείχθηκε, ότι οι μορφομετρικές παράμετροι μιας υδρολογικής λεκάνης, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις υδρολογικές διεργασίες, ελέγχοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό την υδρολογική της απόκριση. Οι μέθοδοι αυτές, αξιοποίησαν το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα και το ανέπτυξαν με τέτοιον τρόπο, ώστε να βασίζεται στις μορφομετρικές παραμέτρους. Το 1979, οι Rodriguez-Iturbe και Valdes ήταν οι πρώτοι που εισήγαγαν την έννοια του Γεωμορφολογικά στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος (GIUH), το οποίο στην συνέχεια γενικεύθηκε από τους Gupta et al., το 1980 και τους Gupta και Waymire το 1983. (Maidment 1993, Ajward and Muzik 2000, Du et al. 2009, Karalis et al. 2014).

Τα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, εκμεταλλεύονται την χωρική κατανομή των δεδομένων, και έχουν την δυνατότητα να συνδυάσουν πληροφορίες σχετικά με την χωρική μεταβλητότητα της τοπολογίας, των χρήσεων γης, της γεωλογίας και πληθώρας άλλων παραμέτρων που υπεισέρχονται σε ένα μοντέλο. (Χριστοφίδης 2008). Η ανάπτυξη και ευρεία χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και των λογισμικών τους, επέτρεψε την ραγδαία και ακριβή εκτίμηση των γεωμετρικών παραμέτρων της λεκάνης, συνέβαλε στην εξαγωγή βελτιωμένων αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή μεθόδων κατασκευής υδρογραφημάτων, οι οποίες απαιτούν χωρική ανάλυση και γενικότερα διευκόλυνε την εκτίμηση της απορροής των υδρολογικών λεκανών. Επίσης, επετράπη η δυνατότητα ανάπτυξης, πιο περίπλοκων και αναλυτικών υδρολογικών μοντέλων, τα οποία ως επί το πλείστον, διενεργούνται σε περιβάλλον ΣΓΠ.

Ο Maidment (1993), ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια του *''χωρικά κατανεμημένου μοντέλου''* (spatial distributed model). Παρουσίασε μία μεθοδολογία με ΣΓΠ, η οποία βασίζεται στην ψηφιδωτή δομή των raster, για την σύνθεση ενός χωρικά κατανεμημένου μοναδιαίου υδρογραφήματος (spatial distributed unit hydrograph model). Χρησιμοποίησε τα ΣΓΠ, για να περιγράψει την συνδεσιμότητα του κάθε κελιού και να καθορίσει το υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης. Θεωρώντας μια χρονικά αμετάβλητη ταχύτητα ροής, προχώρησε στον υπολογισμό του χρόνου συρροής του νερού από το κάθε κελί έως το στόμιο (έξοδος) της λεκάνης, διαιρώντας το μήκος ροής με μία σταθερή ταχύτητα. Έπειτα, ακολούθησε ο προσδιορισμός και η κατασκευή των ισόχρονων καμπυλών (ίσου χρόνου συρροής) και του διαγράμματος χρόνου - επιφανείας απορροής με το οποίο αναπαρίσταται η ολοένα αυξανόμενη έκταση της λεκάνης που συμβάλλει στην απορροή με την πάροδο του χρόνου. Τέλος, από το διάγραμμα χρόνου επιφάνειας υπολογίζεται το χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. (Olivera and Maidment 1999, Du et al. 2009,

Καρύμπαλης κ.α. 2014). Το 1996 ο Maidment et al., παρουσιάσε μια πιο περίπλοκη μέθοδο μοντελοποίησης της απορροής, κατά την οποία η απόκριση της λεκάνης υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους αποκρίσεων των υπολεκανών της. Πρόκειται για μια συνδυασμένη διαδικασία προσδιορισμού της ροής, ακολουθούμενη από μία διαδικασία διόδευσης μέσω ενός γραμμικού ταμιευτήρα (Olivera and Maidment 1999, Du et al. 2009).

Ο Muzik το 1996, εφήρμοσε την προσέγγιση του Maidment, στην υδρολογική λεκάνη Waiparous Creek έκτασης 229 km^2, στον Καναδά, χρησιμοποιώντας το GRASS GIS. Η βροχόπτωση που χρησιμοποίησε στο μοντέλο του ήταν χωρικά μεταβλητή, ενώ συμπεριέλαβε τις απώλειες βροχής, ο υπολογισμός των οποίων έγινε με την χρήση της μεθόδου SCS των αριθμών καμπύλης (Curve Number). Η προσομοίωση του απεδείχθη επιτυχημένη, καθώς υπήρξε ταύτιση στα αποτελέσματα του υπολογισμένου υδρογραφήματος με εκείνα του παρατηρημένου υδρογράφηματος (Melesse and Graham 2000, Du et al. 2009).

Το 2004, οι Melesse και Graham πρότειναν ένα ΣΓΠ μοντέλο διόδευσης βασισμένο επίσης στον υπολογισμό του χρόνου συρροής. Αρχικά, διέκριναν την ροή εντός της λεκάνης απορροής σε ροή στις κλιτύες (στρωματοροή) και σε συγκεντρωμένη ροή εντός των κοιτών των ποταμών και των χειμάρρων του υδρογραφικού δικτύου. Ο χρόνος συρροής του κάθε κελιού της στρωματοροής, εκτιμήθηκε από τον συνδυασμό της σταθερής κατάστασης προσέγγισης κινηματικού κύματος και της εξίσωσης του Manning. Σε κάθε κελί του υδρογραφικού δικτύου, ο χρόνος συρροής εκτιμήθηκε αξιοποιώντας την εξίσωση του Manning και την σταθερής κατάστασης, εξίσωση της συνέχειας. Ο χρόνος συρροής από το κάθε κελί έως την έξοδο της λεκάνης, είναι το άθροισμα των χρόνων συρροής όλων των κελιών που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής του νερού. Η άμεση απορροή, προσδιορίστηκε από το άθροισμα των ογκομετρικών ρυθμών ροής από όλα τα κελιά που συνεισφέρουν σε κάθε αντίστοιχο χρονικό βήμα Δt. Με τη μέθοδο αυτή, δίνεται η δυνατότητα, της ανάπτυξης ενός άμεσου υδρογραφήματος σταθερού χρόνου, για κάθε χωρικά κατανεμημένο επεισόδιο βροχόπτωσης, και αντίθετα με προηγούμενες προσεγγίσεις δεν βασίζεται στην σύνθεση ενός χωρικά συγκεντρωτικού μοναδιαίου υδρογράφηματος (Du et al. 2009, Καρύμπαλης κ.α. 2014).

Τέλος, οι Du et al., το 2009, πρότειναν ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο διόδευσης για την προσομοίωση της βροχής-απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την χρονική μεταβλητότητα της απορροής. Η προσέγγιση αυτή, βασίζεται στο μοντέλο των Melesse και Graham και οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, αφορούν στον υπολογισμό της διακύμανσης του χρόνου συρροής, η οποία οφείλεται στη διακύμανση του πεδίου ταχυτήτων λόγω άνισης κατανομής της βροχόπτωσης μέσα στον χρόνο. Οι απώλειες βροχής εκτιμήθηκαν βάσει της μεθοδολογίας του αριθμού καμπύλης (curve number), SCS. Το μοντέλο αυτό ορίστηκε ως χωρικά κατανεμημένο άμεσο υδρογράφημα μεταβλητού χρόνου (time variant spatially distributed direct hydrograph, Melesse and Graham 2000, Du et al. 2009).

Για την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής στη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα μοντέλο διόδευσης σε περιβάλλον ΣΓΠ. Η μεθοδολογία που αξιοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας στρωματοροής είναι εκείνη που προτάθηκε από τον Maidment (1993), ενώ για τον υπολογισμό της ταχύτητας στο υδρογραφικό δίκτυο εφαρμόζεται η προσέγγιση των Malesse και Graham (2004).

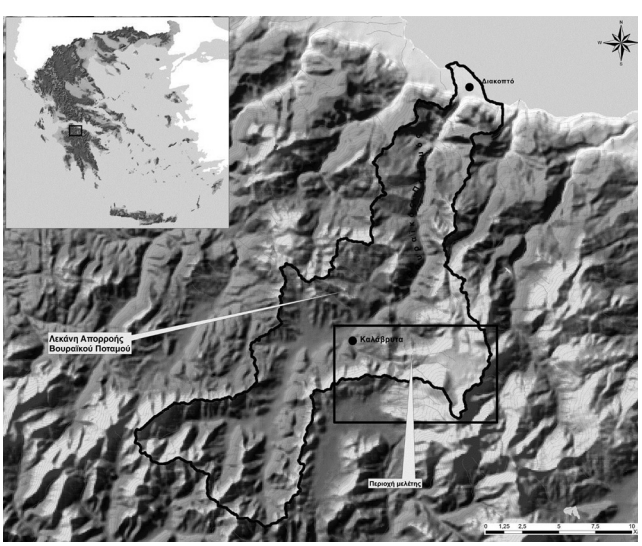
Περιοχή μελέτης

Ο Βουραϊκός είναι ένας ποταμός συνεχούς ροής, ο οποίος πηγάζει από το όρος Ερύμανθος και στη συνέχει διαρρέει τμήμα της βορειοδυτικής Πελοποννήσου. Έχει αναπτύξει μια επιμήκη λεκάνη απορροής έκτασης 239,6 km^2 ενώ η περίμετρος της είναι 144,18 km. Ο Χελμός, ο οποίος βρίσκεται στο νοτιανατολικό τμήμα της περιοχής, έχει μέγιστο υψόμετρο 2.320 m. Η κεντρική κοίτη ακολουθεί μια Νότιο Νοτιοδυτική προς Βόρεια Βορειοανατολική διεύθυνση ροής, για περίπου 36 km εκβάλλοντας στις νότιες ακτές του Κορινθιακού Κόλπου. Στις εκβολές του ποταμού, λόγω της απόθεσης των φερτών υλών, έχει διαμορφωθεί ένα δελταϊκό ριπίδιο, έκτασης 5,3 km^2, όπου εντοπίζεται η πόλη του Διακοπτού, με πληθυσμό 2.300 κατοίκους (Καρύμπαλης κ.α. 2002, Kalogeropoulos et al. 2013).

Η μορφή και το σχήμα του υδρογραφικού δικτύου αντικατοπτρίζει τις τεκτονικές, τις λιθολογικές (σύσταση και διαβρωσιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών), τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην

περιοχή, καθώς και τις κλίσεις του τοπογραφικού αναγλύφου (Παυλόπουλος 2011).

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Βουραϊκου, θεωρείται μέτρια ανεπτυγμένο, συμμετρικής μορφής, ενώ δύναται να χαρακτηρισθεί ως δενδριτικού τύπου. Επίσης, η υδρογραφική υφή χαρακτηρίζεται ως λεπτή στα τμήματα που συνίστανται από κροκαλοπαγή και τον φλύσχη της ενότητας της Πίνδου (πυκνή ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου με μεγάλη συχνότητα) και τραχειά στις περιοχές των ασβεστόλιθων (αραιή ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου με μικρή υδρογραφική συχνότητα) (Καρύμπαλης κ.α. 2002). Η επιμήκυνση της κεντρικής κοίτης είναι αποτέλεσμα τόσο της κατά βάθος, όσο και της οπισθοδρομούσας διάβρωσης, λόγω της τεκτονικής ανύψωσης της ευρύτερης περιοχής της Βόρειας Πελοποννήσου. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, οι σχετικά αδιαπέραστες λιθολογίες, έχουν προξενήσει ένα πυκνό δίκτυο αποστράγγισης το οποίο διαθέτει ένα σημαντικό αριθμό κλάδων πρώτης και δεύτερης τάξης, ενώ αντίστοιχα η παρουσία διαπερατών ασβεστολιθικών σχηματισμών στο βόρειο και νότιο τμήμα της λεκάνης έχουν διαμορφώσει χαμηλότερη πυκνότητα αποστράγγισης (Kalogeropoulos et al. 2013).



Εικόνα 1. Η περιοχή μελέτης.

Οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης εξετάζονται στα πλαίσια της μελέτης του κλίματος του νομού Αχαΐας. Το κλίμα δύναται να χαρακτηριστεί ως μεσογειακό εύκρατο (ύφυγρο), με συνέπεια να μην παρατηρούνται σημαντικές θερμοκρασικές μεταβολές. Το κλίμα στο εσωτερικό και ορεινό τμήμα του νομού, θεωρείτο ηπειρωτικό, ενώ στα παράκτια μεσογειακό. Στην παράκτια περιοχή, η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους 17-18 °C κατά προσέγγιση, ενώ είναι χαμηλότερη στις ορεινές περιοχές. Μάλιστα, ο χειμώνας στο νομό Αχαίας, είναι μεγάλης διάρκειας με παγετούς και χαρακτηρίζεται από πληθώρα χιονοπτώσεων.

Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου

4.1 Γενικά

Η παρούσα εργασία αφορά στη μοντελοποίηση-προσομοίωση της επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνη απορροής του Βουραϊκού ποταμού, σχεδιάζοντας ένα σύστημα βασισμένο σε τεχνολογία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκε ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Maidment (1993) και σχετίζεται με την υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ArcGIS 10.1, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster grid). Ο κύριος στόχος είναι η κατασκευή ενός άμεσου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για μια ακραία βροχόπτωση, εκτιμώντας την απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης για διαφορετικού μεγέθους ψηφίδας του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.

Με τη χρήση βασικών εργαλείων υδρολογικής ανάλυσης αλλά και ανάλυσης επιφάνειας, τα οποία παρέχονται από το λογισμικό ArcGIS, προέκυψαν επίπεδα πληροφορίας τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια. Η δημιουργία ενός DEM (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους), υψηλής ανάλυσης, θεωρείται μεγάλης σημασίας για την επιτέλεση των προαναφερθέντων λειτουργιών και την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος. Το τελικό στάδιο της μεθοδολογίας ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελεί η εξαγωγή ενός επιπέδου, το οποίο αποτυπώνει τον χρόνο συρροής του νερού. Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου αυτού σε διακριτά διαστήματα (ανάλογα με το βήμα της βροχόπτωσης, π.χ. μιας ώρας), κατασκευάζονται οι ισόχρονες καμπύλες, από τις οποίες είναι δυνατή η παραγωγή ενός διαγράμματος χρόνου επιφάνειας για την κίνηση του νερού στην λεκάνη για ένα συγκεκριμένο πλημμυρικό επεισόδιο, καθώς και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα γι' αυτό (Kalogeropoulos et al. 2013, Gioti et al. 2013).

4.2 Δεδομένα Εισόδου

Η μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής, βασίζεται σε εφαρμογές των Συστημάτων Γεωγραφικών

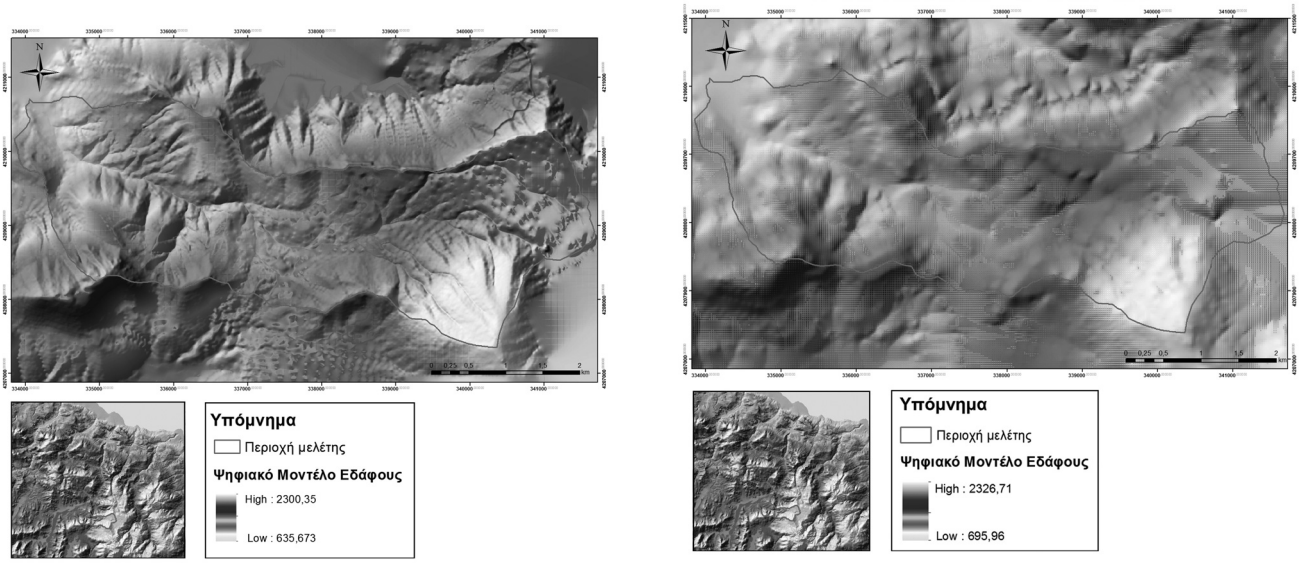
Πληροφοριών και στην ανάλυση και επεξεργασία μιας σειράς δεδομένων που αφορούν την περιοχή μελέτης. Συνεπώς, σχεδιάστηκε μια ψηφιακή χωρική βάση δεδομένων, η οποία αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα:

• Δεδομένα υποβάθρου: α) Τοπογραφικά δεδομένα (ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών με ισοδιάσταση 4 m και βοηθητικές καμπύλες ανά 2 m στα Τοπογραφικά διάγραμματα κλίμακας 1:5.000 της ΓΥΣ και ισοδιάστασης 20 m και ανά 10 m βοηθητικές καμπύλες στους χάρτες της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000 που αναφέρονται στην υπολεκάνη της περιοχής μελέτης, εν προκειμένω στην λεκάνη απορροής του εξεταζόμενου παραπόταμου του Βουραϊκού ποταμού), β) ψηφιοποίηση υδρογραφικού δικτύου από τα τοπογραφικά διάγραμματα κλίμακας 1:5000 και τους χάρτες κλίμακας 1:50000 της ΓΥΣ που προαναφέρθηκαν.

• Χωρικά δεδομένα-δευτερογενή θεματικά επίπεδα:

Δημιουργία δύο Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DEM) της λεκάνης απορροής του παραπόταμου του Βουραϊκού ποταμού, cell size 5x5 και 25x25 αντίστοιχα. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους αποτελεί το σημαντικότερο επίπεδο πληροφορίας, απαραίτητο για την προσομοίωση της πλημμύρας. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το ΨΜΕ, είναι ένα ψηφιδωτό επίπεδο (raster grid), όπου το κεντρικό σημείο κάθε κελιού (cell), περιλαμβάνει κάποια μέτρηση ύψους. Τα δύο ΨΜΕ, ένα λεπτομερές (5x5) και ένα πιο γενικευμένο (25x25), παρήχθησαν, χρησιμοποιώντας ψηφιοποιημένα πρωτογενή δεδομένα, όπως οι ισουψείς καμπύλες, το υδρογραφικό δίκτυο και τα γνωστά υψομετρικά σημεία και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο ANUDEM (Hutchinson 2003). Αποτυπώνουν την λεκάνη απορροής του υπό μελέτη παραπόταμου του Βουραϊκού ποταμού και αποτελούν τα βασικά επίπεδα ως προς τα οποία υλοποιείται η επεξεργασία και ανάλυση κατά την εκτέλεση του μοντέλου βροχής-απορροής.

Δύο επίπεδα συντελεστή τραχύτητας κατά Manning της περιοχής μελέτης με 5x5 και 25x25 μέγεθος ψηφίδας, αντίστοιχα. Στο παρόν μοντέλο βροχής-απορροής, πραγματοποιείται μια παραδοχή, κατά την οποία η παράμετρος που εξετάζεται και λαμβάνεται υπόψη είναι η τραχύτητα από την κάλυψη γης. Η κατασκευή του επιπέδου του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, βασίστηκε σε χάρτη κάλυψης γης, ο οποίος προέκυψε από τα δεδομένα του προγράμματος Ilot του Υπουργείου Γεωργίας (1998). Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται με την κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης σε κλίμακα 1:5.000, η οποία θεωρείται κατάλληλη για τη δημιουργία ενός επιπέδου που βασίζεται στον συντελεστή τραχύτητας του Manning για κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Η κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης και η αντιστοιχία κάθε κατηγορίας με τον συντελεστή τραχύτητας κατά Manning παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.



Εικόνα 2. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους α) DEM 5μ και β) DEM 25μ.

Κωδικός	Περιγραφή	Συντελεστής τραχύτητας Manning
10	Δασικές εκτάσεις	0,2
20	Αστική περιοχή	0,015
30	Λειβάδια – Βοσκοτόπια	0,1
40	Αρώσιμες καλλιέργειες	0,1
50	Μόνιμες καλλιέργειες	0,1
60	Ελαιώνας	0,15
70	Αμπελώνας	0,05
11	Δασικές μεικτές εκτάσεις	0,2
21	Αστικές μεικτές περιοχές	0,015
31	Λειβάδια-Βοσκοτόπια μεικτά	0,1
41	Αρώσιμες μεικτές	0,1
51	Μόνιμες μεικτές	0,1
61	Ελαιώνας μικτός	0,15
71	Αμπελώνας μικτός	0,05

Πίνακας 1. Αντιστοιχία του είδους κάλυψης γης με τον συντελεστή τραχύτητας

• Βροχομετρικά δεδομένα: Προκειμένου να υλοποιηθεί και να αναπτυχθεί το υδρολογικό μοντέλο, πραγματοποιήθηκε μια υπόθεση-παραδοχή κατά την οποία μεταφέρεται στην περιοχή μελέτης, το αιφνίδιο και έντονο πλημμυρικό επεισόδιο που έλαβε χώρα στην λεκάνη απορροής του ποταμού Ξηριά (Κόρινθος-Βόρεια Πελοπόννησος), στις 12-13 Ιανουαρίου του 1997. Το ύψος βροχής που κατεγράφη από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό ήταν της τάξης των 176 mm τις πρώτες 10 ώρες, ενώ η συνολική κατακρήμνιση ανήλθε στα 300 mm σε 24 ώρες, η οποία αντιστοιχεί στο μισό της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στη Βόρεια Πελοπόννησο (Μπαλούτσος κ.α. 2000, Karymbalis et al. 2012).

4.3 Περιγραφή & Εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου

Κύριος στόχος και ζητούμενο της προσομοίωσης αποτελεί η εκτίμηση της αιχμής της πλημμυρικής παροχής, καθώς και του κρίσιμου χρόνου που μεσολαβεί προκειμένου να φθάσει την αιχμή αυτή αμέσως μετά την βροχόπτωση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός της καμπύλης επιφάνειας-χρόνου από την έναρξη της βροχόπτωσης, ενώ έπειτα προκύπτει το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης. Μέσω της καμπύλης (ή ιστόγραμμα) επιφάνειας-χρόνου υποδεικνύεται η χωρική και χρονική κατανομή της επιφανειακής απορροής εντός της λεκάνης του παραπόταμου που εξετάζεται. Επίσης, η καμπύλη αυτή δύναται να εκφραστεί μέσω της επαναταξινόμησης του χρόνου απορροής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία καλούνται «ισόχρονες καμπύλες». Ο ισόχρονες καμπύλες αντιπροσωπεύουν εκείνα τα σημεία εντός της λεκάνης, όπου η απορροή ισαπέχει χρονικά από την έξοδο της λεκάνης (Καρύμπαλης κ.α. 2014).

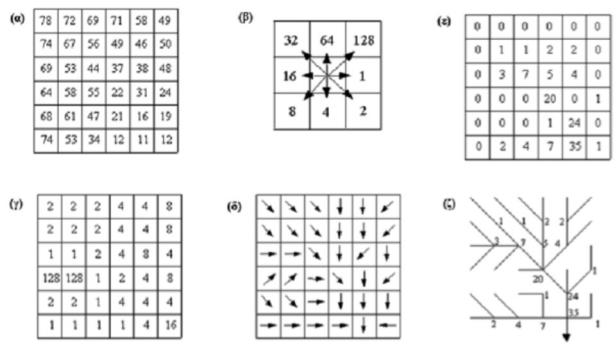
Λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος καταλήγουμε στο συμπέρασμα, πως η διάρκεια της πλημμύρας θεωρείται ίδια για οποιαδήποτε ποσότητα ενεργού βροχής δεδομένης διάρκειας, ενώ οι τετμημένες του υδρογραφήματος της απορροής πάνω στην κοινή αυτή διάρκεια (χρόνος βάσης της πλημμύρας) είναι ανάλογες με την ποσότητα της βροχής. Παράλληλα, η απορροή στην έξοδο της λεκάνης είναι αποτέλεσμα, της υπέρθεσης (πρόσθεση) στιγμιαίων μοναδιαίων υδρογραφημάτων, τα οποία συνεπιφέρονται από την ενεργή βροχή σε κάθε χρονικό βήμα. Στην υδρολογική πρακτική είναι δυνατό, να εξαχθούν τα μοναδιαία υδρογραφήματα με τη βοήθεια αριθμητικών τεχνικών από παρατηρημένα υδρογραφήματα. Σύμφωνα με ένα τέτοιου είδους μοντέλο, η λεκάνη απορροής διαθέτει την ίδια πλημμυρική απόκριση για κάθε μονάδα ενεργής βροχής και ανεξάρτητη του χρόνου κατά τον οποίο λαμβάνει χώρα η βροχόπτωση. Πρέπει να σημειωθεί, ότι σε σειρά περιπτώσεων, από τη μορφή του μοναδιαίου υδρογραφήματος αντικατοπτρίζεται μια σειρά από χαρακτηριστικά της λεκάνης τα οποία έχουν σχέση με την μορφολογία της όπως π.χ. η κλίση, το ανάγλυφο, η γεωμετρία (σχήμα), με το έδαφος όπως π.χ. η υφή των επιφανειακών της γεωλογικών σχηματισμών (πετρώματα και εδάφη) κ.α (Kalogeropoulos et al. 2013).

Για μετρήσιμες βροχοπτώσεις με συγκεκριμένη ένταση και διάρκεια, κάθε λεκάνη έχει το δικό της υδρογράφημα. Επομένως διαπιστώνεται πως προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή αυτή η μέθοδος, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός παρατηρημένου υδρογραφήματος της λεκάνης απορροής. Αυτού του είδους τα υδρογραφήματα προέρχονται από μετρήσεις βροχόπτωσης και παροχής κατά τη διάρκεια πραγματικών γεγονότων. Από την άλλη πλευρά, για την κατασκευή συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων απαιτούνται επίσης, δεδομένα και μετρήσεις από πραγματικά γεγονότα σε γειτονικές λεκάνες ή λεκάνες με παρεμφερή χαρακτηριστικά, ωστόσο ενδέχεται να τίθενται ζητήματα αμφιβολιών και ενδοιασμών ως προς την προβλεπτική αξία του μοντέλου (Καρύμπαλης κ.α. 2014).

Μετά την αναφορά και την προετοιμασία των δεδομένων προς επεξεργασία, ακολουθεί η περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου διόδευσης το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, σε περιβάλλον ArcGIS 10.1, για την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Η εννοιολογική αναπαράσταση και η ροή δεδομένων για το υδρολογικού μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

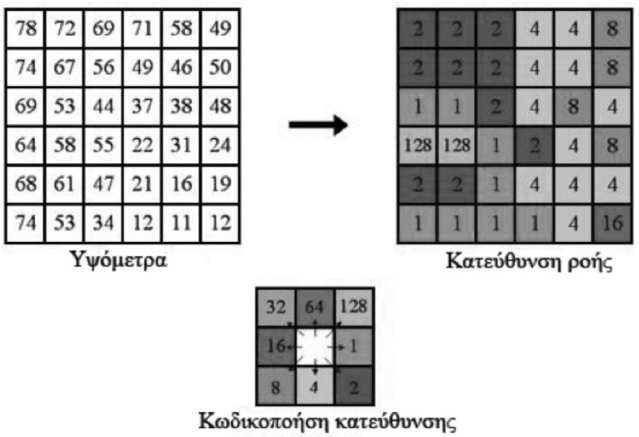
Εικόνα 3. Εννοιολογικό διάγραμμα μοντέλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Καρύμπαλης κ.α. 2014)

Η τοπογραφία του αναγλύφου (DEM), θεωρείται ως ένα από τα πρωτεύοντα στοιχεία για την προσομοίωση, καθώς η ανάλυση του αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτέλεση του μοντέλου βροχής-απορροής. Όπως έχει προαναφερθεί, το παρόν μοντέλο περιλαμβάνει τόσο την βασική ανάλυση της επιφάνειας (surface analysis), όσο και την υδρολογική ανάλυση (hydrological analysis) του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Μερικά από τα κυριότερα παράγωγα, που προέρχονται από την ανάλυση του DEM, είναι η κλίση (slope) που συνιστά την ανάλυση της επιφάνειας, καθώς και η διεύθυνση ροής (flow direction), η συσσώρευση ροής (flow accumulation) και το μήκος ροής (flow length) που αφορούν στην υδρολογική ανάλυση.



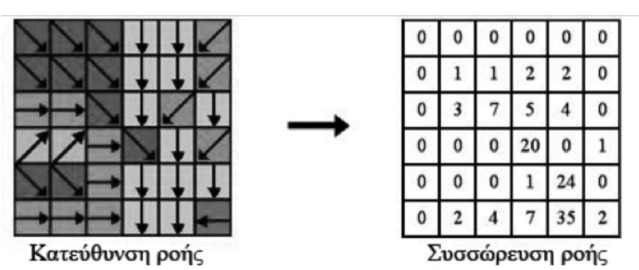
Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ. επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου, Πηγή: http://help.arcgis.com/EN/ arcgis desktop/10.0/help/index.html#//009z00000063000000.htm)

Αρχικά, από το DEM παράγεται το επίπεδο της κλίσης (%), το οποίο έπειτα μετατρέπεται σε εκείνο το επίπεδο κλίσης το οποίο μετράται σε μέτρο ανά μέτρο. Το επόμενο στάδιο, περιλαμβάνει την δημιουργία των επιπέδων διεύθυνσης ροής και συσσώρευσης ροής, με την βοήθεια της ενημερωμένης εργαλειοθήκης του ArcGIS, ArcToolbox. Με τη σύνθεση του πρώτου επιπέδου, δηλαδή ενός μωσαϊκού διευθύνσεων ροής, καθίσταται δυνατή, η αποτύπωση της διαδρομής του νερού της βροχής από κάθε κελί μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω διαθέσιμων αλγορίθμων, υπολογίζεται η πορεία του νερού της βροχής από το κάθε κελί προς κάποιο από τα 8 γειτονικά του, τουτέστιν εκείνο με το οποίο σημειώνει τη μεγαλύτερη διαφορά υψομέτρου. Επομένως, με την εκτέλεση αυτών των αλγορίθμων, αποδίδεται ένα επίπεδο όπου σε κάθε κελί, απεικονίζεται η κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το νερό της βροχής.



Εικόνα 5. Διαδικασία διεύθυνσης ροής (πηγή: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=flow_direction)

Χρησιμοποιώντας το επίπεδο της διεύθυνσης ροής, δύναται να αποδοθεί το επίπεδο της συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί το επίπεδο της διεύθυνσης ροής και εκτιμά τον αριθμό των ανάντη κελιών το νερό των οποίων καταλήγει σε κάθε κελί. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, συνίσταται από εκείνα τα κελιά που συγκεντρώνουν την μεγαλύτερη απορροή (Καρύμπαλης κ.α. 2014).



Εικόνα 6. Διαδικασία συσσώρευσης ροής (πηγή: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=flow_accumulation)

Το γεγονός ότι η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση βασίζεται στον χρόνο συρροής, έκρινε αναγκαίο τον υπολογισμό του χρόνου διαδρομής του νερού διαμέσου της λεκάνης του υπό μελέτη παραπόταμου, τόσο για την ροή εντός του καναλιού (κυρίως υδρογραφικό δίκτυο) έως την έξοδο της λεκάνης, όσο και για την στρωματοροή (υπόλοιπη λεκάνη). Προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών των δύο τύπων ροής, καθορίστηκε ένα κατώφλι συμβαλλόντων κελιών (συσσώρευσης ροής). Κατ' αυτόν τον τρόπο εκτός του ότι διαχωρίστηκαν οι δύο προαναφερθέντες τύποι ροής, ταυτόχρονα καθορίστηκε το υδρογραφικό δίκτυο (Kalogeropoulos et al. 2013).

Έχοντας ως δεδομένα, αφενός μεν το εξαγόμενο επίπεδο της συσσώρευσης ροής και αφετέρου τη βροχόπτωση εκφρασμένη σε μέτρα, μπορούμε να υπολογίσουμε το επίπεδο παροχής του καναλιού (επιφανειακή απορροή), με τη βοήθεια της εντολής Raster Calculator (Map Algebra). Η εξίσωση που χρησιμοποιούμε, για τον υπολογισμό της παροχής στους κλάδους του δικτύου ($Q_{\text{κανάλι}}$ σε m^3/s), είναι η εξής:

$$Q_{\text{κανάλι}} = \text{ό} \quad * \quad . \quad * \quad . \quad 2 \quad \text{ό}$$

όπου, flow.accumulation είναι η συσσώρευση ροής και cell.size (σε m) είναι το μέγεθος του κελιού.

Έπειτα, προκειμένου να υπολογιστεί το επίπεδο της παροχής της στρωματοροής ($Q_{\text{στρωματοροή}}$ σε m^3/s), σημειώθηκαν οι εξής ενέργειες. Αρχικά, από το επίπεδο κατεύθυνσης της ροής προήλθε το επίπεδο του ανάντη μήκους ροής (δηλαδή του μήκους της ροής του νερού από το κάθε κελί έως τον υδροκρίτη) εκφρασμένο σε μέτρα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η εξής σχέση, η οποία εισχωρήθηκε στο Raster Calculator:

$Q_{\text{στρωματοροή}}$

Για να υπολογίσουμε και να εξάγουμε το επίπεδο του χρόνου συρροής, θεωρείται προαπαιτούμενη η γνώση της ταχύτητας ροής στο κυρίως κανάλι αλλά και της ταχύτητας στρωματοροής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ταχύτητα ροής στο κυρίως κανάλι του υδρογραφικού δικτύου ($V_{\text{κανάλι}}$ σε m/s) δύναται να εκτιμηθεί, με τη βοήθεια του Raster Calculator, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{\text{κανάλι}} = K * 38 * Q_{\text{κανάλι}}^{0.25} * n^{-0.75}$$

όπου K είναι ο συντελεστής διόρθωσης των σφαλμάτων της προσομοίωσης για το επίπεδο συντελεστή

τραχύτητας και το επίπεδο των κλίσεων και ισούται με 1,

S είναι η κλίση εκφρασμένη (σε m/m) και

Q είναι η παροχή στο κυρίως κανάλι (σε m^3/s) που εκτιμήθηκε εφαρμόζοντας τον τύπο (1) και

n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε $s/m^{1/3}$).

Παράλληλα, η ταχύτητα στρωματοροής ($V_{στρωματοροή}$ σε m/s) δύναται να εκτιμηθεί, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση και με την βοήθεια του Raster Calculator (Du et al. 2009).

$$V_{στρωματοροή} = 310 * Q_{στρωματοροή}^{0.4} * n^{-0.6}$$

όπου Q (σε m^3/s) είναι η παροχή της στρωματοροής που εκτιμήθηκε από τον τύπο (2),

S είναι η κλίση εκφρασμένη σε (m/m) και

n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε $s/m^{1/3}$).

Μετά τον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής, τόσο στο κυρίως υδρογραφικό δίκτυο όσο και στην υπόλοιπη λεκάνη, πραγματοποιείται συνένωση αυτών των δύο επιπέδων, η οποία παρέχει την τελική ταχύτητα.

Δεδομένου, ότι έχει υπολογιστεί η τελική ταχύτητα ροής για κάθε κελί της λεκάνης, ο ζητούμενος χρόνος απορροής σε κάθε κελί, αποτιμάται βάσει της ταχύτητας και του μήκους ροής, το οποίο είναι σταθμισμένο με το επίπεδο 1/V (όπου V ταχύτητα ροής). Η εξίσωση με την οποία αποδίδεται ο χρόνος συρροής είναι:

$$T_{συρροής} = \text{ή} \quad \text{ή} \quad \text{ύ}$$

Με αυτό το επίπεδο παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάζεται μία σταγόνα νερού να κυλήσει προς την έξοδο της λεκάνης απορροής. Επομένως, ως χρόνος απορροής, ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται έτσι ώστε νερό που καταλήγει με τη μορφή βροχόπτωσης σε οποιοδήποτε σημείο της λεκάνης απορροής να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης. (Kalogeropoulos et al. 2013, Gioti et al. 2013, Καρύμπαλης κ.α. 2014).

Το τελικό στάδιο κατά την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου, περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του επιπέδου των ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή εκείνων των καμπυλών που συνδέουν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης. Η κατασκευή του επιπέδου των ισόχρονων, επιτυγχάνεται με την επαναταξινόμηση των τιμών του επιπέδου του χρόνου απορροής. Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το διάγραμμα χρόνου-επιφάνειας, ενώ μελετώντας τους παλμούς του νερού που πέφτουν στη μονάδα του χρόνου (που έχει οριστεί στις ισόχρονες καμπύλες), είναι εφικτή η δημιουργία του σύνθετου μοναδιαίου υδρογραφήματος για το υπό μελέτη πλημμυρικό φαινόμενο (Kalogeropoulos et al. 2013).

Αποτελέσματα

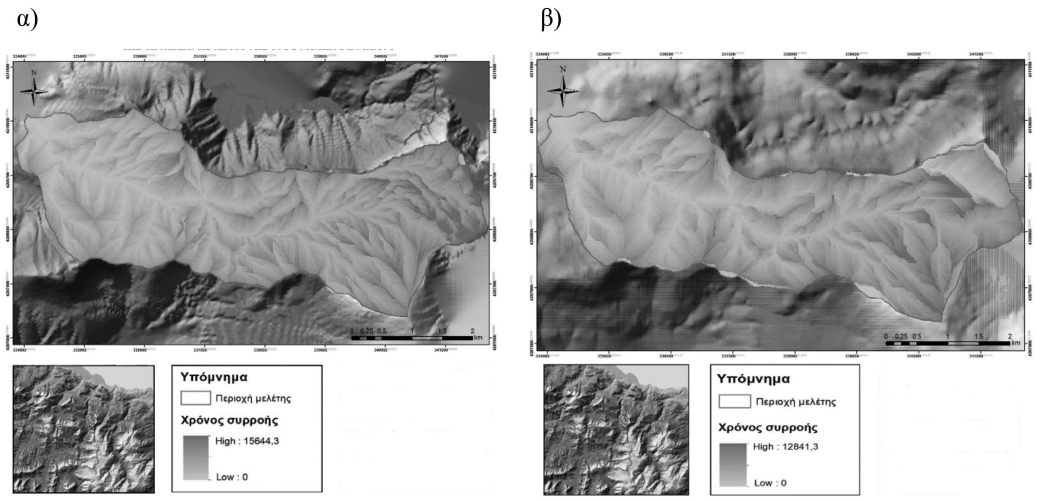
Συνοψίζοντας, το μοντέλο βροχής-απορροής, που αξιοποιήθηκε για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνη του Βουραϊκού ποταμού, καταλήγει στη δημιουργία ενός επιπέδου που απεικονίζει τις ισόχρονες καμπύλες εντός της λεκάνης.

Σύμφωνα με τον πίνακα των στατιστικών στοιχείων (αριθμός κελιών, έκταση) για τις ισόχρονες, μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του νερού που δέχεται ανά μία ώρα, κάθε μία κλάση ισόχρονων καμπυλών, εκτιμώντας έτσι την παροχή στην έξοδο της λεκάνης. Έπειτα από αυτήν την διαδικασία, οι τιμές των παλμών ορίστηκαν κατά τον ακόλουθο τρόπο. Ο πρώτος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που δέχτηκε την πρώτη ώρα η πρώτη ισόχρονη. Ο δεύτερος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που έπεσε την δεύτερη ώρα στην πρώτη ισόχρονη και την πρώτη ώρα στην δεύτερη ισόχρονη. Με την ίδια λογική, πράττουμε και για τους υπόλοιπους παλμούς.

Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, επιτελείται η εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που αναπαριστά τη διακύμανση της παροχής ανά ώρα στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης. Ακολουθεί η παράθεση των υδρογραφημάτων, για τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις που μελετώνται.

5.1 Περίπτωση μεγέθους ψηφίδας 5χ5

Με βάση την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, υπολογίζεται ο όγκος του νερού που δέχεται ανά μία ώρα, κάθε μία κλάση ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή εκτιμάται η παροχή στην έξοδο της λεκάνης, ενώ εν συνεχεία συνεκτιμώνται και ορίζονται οι τιμές των



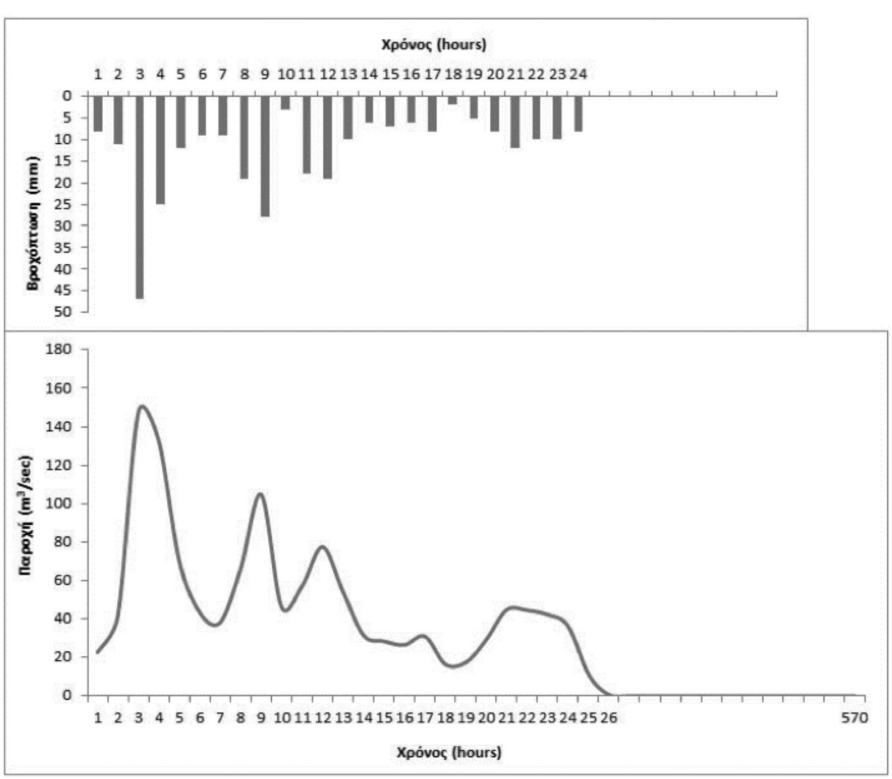
Εικόνα 7. Χρόνοι συρροής για α) DEM 5μ και β) DEM 25μ.

παλμών και κατασκευάζεται το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα.

Στο Διάγραμμα 1, απεικονίζεται, το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του παραπόταμου. Ταυτόχρονα, στο έτερο σχήμα, αναπαρίσταται με τη μορφή ιστογράμματος η κύμανση της βροχόπτωσης, ανά ώρα, πάνω από τη λεκάνη απορροής.

Το γεγονός, ότι το υδατόρεμα που μελετάται, είναι ουσιαστικά ένας εκ των παραπόταμων του Βουραϊκού ποταμού και ο οποίος ενδέχεται να είναι περιοδικής ροής, μας διευκολύνει ως προς την ανάλυση και την ερμηνεία του υδρογραφήματος που προέκυψε από την προσομοίωση της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής.

Η μορφή του εξαγόμενου υδρογραφήματος, θεωρείται τυπική, παρεπόμενο μιας αιφνίδιας πλημμύρας, ενώ από το διάγραμμα διαφαίνεται ότι η απόκριση της λεκάνης στην έντονη κατακρήμνιση είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Στο υδρογράφημα, διακρίνονται οι



Διάγραμμα 1. Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού (Περίπτωση Α')

τρεις μεγαλύτερες πλημμυρικές παροχές (αιχμές), εκ των οποίων η μία είναι και μέγιστη. Αρχικά, η μέγιστη παροχή παρουσιάζεται την 3η ώρα (κρίσιμος χρόνος), την ώρα δηλαδή που σημειώνεται η αιχμή της βροχόπτωσης (μέγιστο ύψος βροχόπτωσης), και είναι της τάξης των 148,1 m^3/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, σημειώνεται 9 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, είναι της τάξης των 104,7 m^3/s και δύναται να θεωρηθεί επακόλουθο της συσσωρευμένης βροχόπτωσης των προηγούμενων ωρών. Γενικά, παρατηρώντας το ιστόγραμμα βροχόπτωσης-χρόνου και το υδρογράφημα, συμπεραίνουμε πως η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Η τρίτη μεγαλύτερη παροχή, έλαβε χώρα 12 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και ανέρχεται στα 77,4 m^3/s.

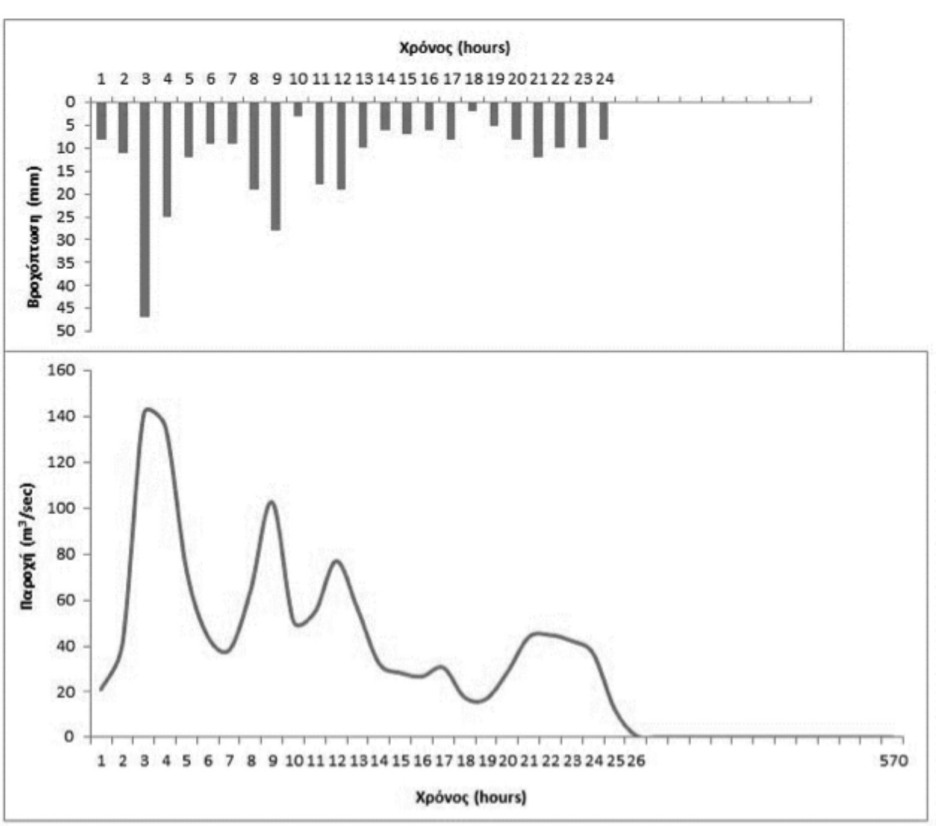
Επιπρόσθετα, η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου ανέρχεται κατά προσέγγιση στα 45 m^3/s, που αντιστοιχεί σε επιφανειακή απορροή συνολικού όγκου νερού περίπου 4.550.000 m^3.

5.2 Περίπτωση μεγέθους ψηφίδας 25χ25

Όπως και στην περίπτωση του cell size 5x5μ, έτσι και με την περίπτωση του cell size 25x25μ, υπολογίζεται ο όγκος του νερού που δέχεται ανά μία ώρα, κάθε μία κλάση ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή εκτιμάται η παροχή στην έξοδο της λεκάνης, ενώ εν συνεχεία συνεκτιμώνται και ορίζονται οι τιμές των παλμών και κατασκευάζεται το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα.

Στο Διάγραμμα 2, αποτυπώνεται το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του παραπόταμου. Ταυτόχρονα, στο έτερο σχήμα, απεικονίζεται με τη μορφή ιστογράμματος η κύμανση της βροχόπτωσης, ανά ώρα, πάνω από τη λεκάνη απορροής.

Όπως και στην περίπτωση Α', η μορφή του υδρογραφήματος, θεωρείται τυπική, ως επακόλουθο μιας αιφνίδιας, ακραίας πλημμύρας, ενώ από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η απόκριση της λεκάνης στην έντονη κατακρήμνιση είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Από το υδρογράφημα προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες πλημμυρικές παροχές (αιχμές) είναι τρεις, εκ των



Διάγραμμα 2. Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης απορροής του Βουραϊκού ποταμού (Περίπτωση Β')

οποίων η μία είναι και μέγιστη. Αρχικά, η μέγιστη παροχή λαμβάνει χώρα την 3η ώρα (κρίσιμος χρόνος), την ώρα δηλαδή που σημειώνεται η αιχμή της βροχόπτωσης (μέγιστο ύψος βροχόπτωσης), και ανέρχεται στα 141,33 m^3/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, σημειώνεται 9 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, είναι της τάξης των 102,8 m^3/s και θεωρείται αποτέλεσμα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης των προηγούμενων ωρών. Γενικά, από το ιστόγραμμα βροχόπτωσης-χρόνου και το υδρογράφημα, διαπιστώνεται πως η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Η τρίτη μεγαλύτερη παροχή, παρουσιάστηκε 12 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και είναι της τάξης των 77,1 m^3/s.

Όσον αφορά, τη μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού γεγονότος, ανέρχεται κατά προσέγγιση στα 46,8 m^3/s, που αντιστοιχεί σε επιφανειακή απορροή συνολικού όγκου νερού περίπου 4.550.000 m^3 (χωρίς απώλειες).

Συνοψίζοντας, από τα δύο σχήματα προκύπτει ότι η καμπύλη της παροχής καθ' όλη τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου ακολουθεί την πορεία της βροχόπτωσης, και είναι χαρακτηριστικό πως τις ώρες που σημειώνονται οι μεγαλύτερες τιμές βροχόπτωσης, εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές της παροχής. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε η απόκριση της λεκάνης του χείμαρρου σε ακραία επεισόδια είναι άμεση, γεγονός που αποτελεί τροχοπέδη στη λήψη μέτρων.

Τέλος, μετά την παράθεση και την ανάλυση των υδρογραφημάτων και των ιστογραμμάτων βροχής-χρόνου για τις δύο περιπτώσεις, κρίνεται αναγκαίο να επισημανθεί, ότι οι υψηλές τιμές παροχών που σημειώθηκαν, πηγάζουν αφενός μεν από τις εξαιρετικά ακραίες τιμές βροχόπτωσης που εισήχθησαν, οι οποίες θεωρήθηκε ότι επικράτησαν σε όλη την έκταση της λεκάνης της περιοχής μελέτης. Στην πραγματικότητα, οι τιμές αυτές, αφορούσαν στην λεκάνη του ποταμού Ξηριά, στην Βόρεια Πελοπόννησο και παρατηρήθηκαν στις εκβολές του στην Κόρινθο, έπειτα από μετρήσεις που εκπονήθηκαν στον σταθμό του Ξυλοκάστρου (Karymbalis et al. 2012). Αφετέρου, όπως προαναφέρθηκε, στο συγκεκριμένο υδρολογικό μοντέλο και καθ' όλη την εκτέλεση του, δεν εφαρμόστηκε κάποιου είδους προσέγγιση, έτσι ώστε να εκτιμηθούν και να δηλωθούν οι απώλειες (κατείσδυση, παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής βροχόπτωσης) κλπ, καθώς και για να υπολογιστεί η ενεργός βροχόπτωση. Θα μπορούσε κάλλιστα να εφαρμοστούν μεθοδολογίες όπως π.χ η μέθοδος SCS, με σκοπό τη διενέργεια συγκρίσεων με την ήδη υπάρχουσα για εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων, αν υπήρχαν εδαφολογικοί χάρτες με τα απαραίτητα δεδομένα για την περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, δύνανται να ληφθούν υπόψη στην διαχείριση πλημμυρικών φαινομένων, στην κατασκευή και αποπεράτωση αντιπλημμυρικών έργων προστασίας και γενικότερα στη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια προσπάθεια μοντελοποίησης της επιφανειακής απορροής στην υδρολογική λεκάνη παραπόταμου του Βουραϊκού ποταμού, μέσω της αξιοποίησης ενός χωρικά κατανεμημένου μοντέλου βροχής-απορροής, σε περιβάλλον Σ.Γ.Π, έτσι ώστε να γίνει η αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου για διαφορετικού μεγέθους ψηφίδας του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Μέσω της παραδοχής η οποία πραγματοποιήθηκε, για μεταφορά του πλημμυρικού γεγονότος που συνέβη στον Ξηριά (Κόρινθος, 12-13 Ιανουαρίου 1997), στην λεκάνη της περιοχής που μελετάται, αντλήθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα βροχόπτωσης, προκειμένου να εφαρμοστεί η μεθοδολογία.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση του χωρικά κατανεμημένου μοντέλου βροχής-απορροής, εφαρμόστηκε για δύο διαφορετικά ΨΜΕ, ένα με μέγεθος ψηφίδας 5x5μ και ένα με μέγεθος ψηφίδας 25x25μ, από τα οποία παρήχθησαν τα επίπεδα κλίσεων, διεύθυνσης ροής, συσσώρευσης ροής, κατάντη μήκους ροής, παροχής υδρογραφικού δικτύου, παροχής στρωματοροής, ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου, ταχύτητας στρωματοροής, χρόνου συρροής και το επίπεδο των ισόχρονων καμπυλών. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε η χαρτοσύνθεση των προαναφερθέντων επιπέδων, ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων.

Κατά το τελικό στάδιο, της προσομοίωσης, επιτελέστηκε η εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που αναπαριστά τη διακύμανση της παροχής ανά ώρα στην έξοδο της υπό μελέτης λεκάνης. Η κατασκευή του υδρογραφήματος, συνετέλεσε στην εκτίμηση της αιχμής της πλημμυρικής παροχής,

καθώς και του κρίσιμου χρόνου που μεσολαβεί προκειμένου να φθάσει την αιχμή αυτή αμέσως μετά την βροχόπτωση. Και στις δύο περιπτώσεις, η μορφή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής της περιοχής είναι τυπική, επακόλουθο μιας αιφνίδιας πλημμύρας με τρία μέγιστα πλημμυρικής παροχής, ενώ από το διάγραμμα προκύπτει ότι η απόκριση της λεκάνης στην έντονη κατακρήμνιση είναι άμεση και ταχύτατη. Από τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των δύο υδρογραφημάτων, προέκυψαν διαφορές οι οποίες έγκειται στις τιμές των μεγαλύτερων πλημμυρικών παροχών (αιχμές). Στην Α' περίπτωση, η μέγιστη παροχή παρουσιάζεται την 3η ώρα (κρίσιμος χρόνος), την ώρα δηλαδή που σημειώνεται η αιχμή της βροχόπτωσης (μέγιστο ύψος βροχόπτωσης), και είναι της τάξης των 148,1 m^3/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, σημειώνεται 9 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και είναι της τάξης των 104,7 m^3/s. Γενικά, παρατηρώντας το ιστόγραμμα βροχόπτωσης-χρόνου και το υδρογράφημα, συμπεραίνουμε πως η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Η τρίτη μεγαλύτερη παροχή, έλαβε χώρα 12 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και ανέρχεται στα 77,4 m^3/s. Στην Β' περίπτωση, η μέγιστη παροχή λαμβάνει χώρα την 3η ώρα (κρίσιμος χρόνος), την ώρα δηλαδή που σημειώνεται η αιχμή της βροχόπτωσης (μέγιστο ύψος βροχόπτωσης), και ανέρχεται στα 141,33 m^3/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, εκδηλώνεται 9 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, και είναι της τάξης των 102,8 m^3/s. Η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς ελαττώνεται η βροχόπτωση, όπως προκύπτει από το ιστόγραμμα βροχόπτωσης-χρόνου και το υδρογράφημα. Η τρίτη μεγαλύτερη παροχή, σημειώθηκε 12 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και είναι της τάξης των 77,1 m^3/s. Η διαπίστωση ότι και στις δύο περιπτώσεις, η απόκριση της λεκάνης είναι άμεση και ταχύτατη, πηγάζει από το γεγονός, ότι η πορεία της παροχής κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου, συμβαδίζει με την κύμανση της αθροιστικής βροχόπτωσης, με τις παροχές αιχμής να εκδηλώνονται ακριβώς την ίδια ώρα με τις αιχμές της βροχόπτωσης.

Πέραν της σύγκρισης των υδρογραφημάτων των δύο περιπτώσεων, συσχέτιση πραγματοποιήθηκε και μεταξύ των εξαγόμενων επιπέδων των κλίσεων, της διεύθυνσης ροής, της συσσώρευσης ροής, της παροχής υδρογραφικού δικτύου και στρωματοροής, της ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου και της στρωματοροής, καθώς και του χρόνου συρροής και των ισόχρονων καμπυλών. Κύριος στόχος των ενεργειών αυτών, ήταν α) η διερεύνηση του ρόλου και της συμπεριφοράς του ΨΜΕ στην ανάλυση της επιφάνειας και της υδρολογικής ανάλυσης, β) η επίδραση της ανάλυσης του ΨΜΕ στα εξαγόμενα επίπεδα και στις τιμές τους, γ) ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων και δ) η επιλογή των καταλληλότερων επιπέδων και των υδρογραφημάτων για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου. Γενικά, διαπιστώθηκε πως τα επίπεδα που παρήχθησαν, έχοντας ως βάση το DEM με μέγεθος ψηφίδας 5x5, διακρίνονται για τη μεγαλύτερη αξιοπιστία τους και την ποιοτικότερη αναπαράσταση και απεικόνιση της πληροφορίας. Τα επίπεδα που εξήχθησαν από το DEM χαμηλότερης ανάλυσης (μέγεθος ψηφίδας 25x25), δύνανται να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση, αλλά χαρακτηρίζονται από πληθώρα εξομαλύνσεων και γενικεύσεων που υποβαθμίζει την πληροφορία που αποτυπώνεται. Παρ' όλα αυτά, διαφαίνεται ότι για την γενική αποτίμηση-προσομοίωση της απορροής στο σημείο εξόδου, τα εξαγόμενα υδρογραφήματα (από τα δύο DEM μέγεθος ψηφίδας 5x5, μέγεθος ψηφίδας 25x25), έχουν παρόμοια μορφή (λόγω της διασποράς της βροχόπτωσης), αλλά οι τιμές τους είναι διαφοροποιημένες. Ειδικότερα, το υδρογράφημα της πρώτης περίπτωσης (DEM μέγεθος ψηφίδας 5x5) παρουσιάζει υψηλότερες μέγιστες τιμές παροχής, κατά περίπου 10%, σε σύγκριση με το αντίστοιχο της δεύτερης περίπτωσης (DEM μέγεθος ψηφίδας 25x25). Συμπερασματικά, θα μπορούσε να ειπωθεί πως η κάθε ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα των λόγων που την επιβάλλουν. Η επιλογή της ανάλυσης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, στην υδρολογική ανάλυση, είναι ανάλογη της ακρίβειας που επιζητείται κάθε φορά. Επί παραδείγματι, η ανάλυση 25x25 δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επ'ουδενί στη διερεύνηση και διαστασιολόγηση γεφυρών. Διότι, ακριβώς επειδή υφίσταται αυτή η διαφοροποίηση της τάξης του 10% στις μέγιστες παροχές, είναι βέβαιο πως θα υπάρξει αστοχία στη διαστασιολόγηση της. Αντίστοιχα, για την υδρολογική ανάλυση των λεκανών απορροής όλης της Ελλάδας, η χρησιμοποίηση ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους 5x5 θα ήταν υπερβολική, χρονοβόρα, δαπανηρή και άστοχη.

Η έλλειψη μετρήσεων της πλημμυρικής παροχής του υπό μελέτη υδρογραφικού δικτύου, για το συγκεκριμένο πλημμυρικό συμβάν, αποτέλεσε τροχοπέδη, στο να καταστεί εφικτός, ο άμεσος έλεγχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Ωστόσο έχει εκπονηθεί πληθώρα μελετών στις οποίες έχει αξιοποιηθεί η ίδια μεθοδολογία, απ' όπου έχουν αποδοθεί πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι οι υψηλές τιμές παροχών και ταχυτήτων που σημειώθηκαν, αποδίδονται σε παραδοχές που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και εκτέλεσης του μοντέλου.

• Οι εξαιρετικά ακραίες τιμές βροχόπτωσης που εισήχθησαν, οι οποίες θεωρήθηκε ότι επικράτησαν σε όλη την έκταση της λεκάνης της περιοχής μελέτης.

• Όπως έχει πολλάκις τονιστεί, στην πραγματικότητα, οι τιμές αυτές, αφορούσαν στην λεκάνη του ποταμού Ξηριά, στην Βόρεια Πελοπόννησο και παρατηρήθηκαν στις εκβολές του (ακτές Ξυλοκάστρου), έπειτα από μετρήσεις που εκπονήθηκαν στον σταθμό του Ξυλοκάστρου.

• Παράλληλα καθ' όλη την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου, δεν εφαρμόστηκε κάποιου είδους προσέγγιση, έτσι ώστε να συνεκτιμηθούν και να δηλωθούν οι απώλειες (λόγω πχ της κατείσδυσης ή της παραδοχής περι ομοιομορφίας της κατανομής βροχόπτωσης κλπ), καθώς και για να υπολογιστεί η ενεργός βροχόπτωση.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθότι παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης ακραίων παροχών και σχεδίασης άμεσου υδρογραφήματος σε υδρογραφικά δίκτυα και υδατορέματα, για τα οποία δεν υφίστανται πραγματικές μετρήσεις, εφαρμόζοντας κατάλληλες τεχνικές προσομοίωσης με τη χρήση ΣΓΠ. Πλήθος μελετών στο παρελθόν οι οποίες έχουν διεξαχθεί για τον ελλαδικό χώρο, έχουν καταδείξει πως η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει καταδείξει αξιόπιστα αποτελέσματα της μεθόδου, όσον αφορά στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, είτε ως προσομοιώσεις τεχνητών καταιγίδων σε επίπεδο λεκάνης απορροής (Kalogeropoulos et al. 2013, Karalis et al. 2014, Πεντέρης κ.α. 2015), είτε ως μοντελοποιήσεις πραγματικών καταιγίδων σε επίπεδο λεκάνης απορροής (Gioti et al. 2013, Tsanakas et al. 2013, Karymbalis et al. 2012, Μπαλούτσος κ.α. 2000). Η γνώση του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών είναι σημαντική για τη σχεδίαση της αντιπλημμυρικής προστασίας και την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων.

Βιβλιογραφία

Abdalla, R.C.V., Tao, H.W., & Maqsood, I.A. (2006) GIS Supported 3D Approach for Flood Risk Assessment of the Qu'Appelle River, Southern Saskatchewan. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 6 (4-6), 440-455.

Ajward, A.H., & Muzik, I. (2000) A Spatially Varied Unit Hydrograph Model, *Journal of Environmental Hydrology*, 8 (7), 1-8.

Bronster, A., (2003) Floods and Climate Change: Interactions and Impacts*, Risk Analysis* 23 (3), 545-557.

Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y., & Xu C.Y. (2009) Development and testing of a new storm runoff routing approach based on time variant spatially distributed travel time method, *Journal of Hydrology* 369 (1-2): 44–54.

Forte, F., Pennetta, L., & Strobl, R.O. (2005) Historic Records and GIS Application for Flood Risk Analysis in the Salento Peninsula (Southern Italy), *Natural Hazards and Earth System Science*, 5 (6), 833-844.

Gioti, E., Riga, C., Kalogeropoulos, K., & Chalkias C. (2013) A GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data, *EARsel eProceedings* 12, 1/2013.

Hutchinson, M.F. (2003) *ANUDEM Version 4.6.3*, Australian National University, Centre for Environmental Studies, Canberra.

Kalogeropoulos, K., Karalis, S., Karymbalis, E., Chalkias, G., Chalkias, C., & Katsafados, P. (2012) Modelling flash floods in Vouraikos River mouth Greece, MEDCOAST Conference Proceedings 2013, Marmaris, Turkey, Vol. II, 1135-1146.

Karalis, S., Karymbalis, E., Valkanou, K., Chalkias, C., Katsafados, P., Kalogeropoulos, K., Batzakis, V., & Bofilios, A. (2014) Assessment of the Relationships among Catchments' Morphometric Parameters and Hydrologic Indices. *International Journal of Geosciences*, 5, 1571-1583.

Karymbalis, E., Katsafados, P., Chalkias, C., & 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), 45–67.

Maidment, D.R. (1996) GIS and Hydrologic Modeling-an Assessment of Progress. *Third Internation Conference on GIS and Environmental Modeling,* January 22-26, 1996, Santa fe, New Mexico.

Maidment, D.R. (1993) Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS Applications of geographic information systems in hydrology and water resources, *Proc international conference*, Vienna, 1993, *IAHS Publ. no 211*, 181-192.

Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A., & Fraczek, W. (1996) A Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field, *Hydrological Processes* 10, 831-844.

Melesse, A.M, & Graham, W.D., (2004) Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS, *Journal of the American Water Resources Association* 40 (4), 864-879.

Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R. (1991) Digital Terrain Modelling: A review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5, 3-30.

Olivera, F., & Maidment, D. (1999) Geographic information systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing, *Polygraph International 1,* 35 (4), 1155-1164.

Sene, K. (2013) *Flash floods: Forecasting and Warning*, Springer, Heidelberg.

Smith, K., Petley, D.N. (2009) *Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster,* Fifth Edition, Routledge, London.

Tsanakas, K., Chalkias, C., Maroukian, H., Gaki-Papanastasiou, K., Katsafados, P., & Kalogeropoulos K. (2013) An integrated appraisal of flood causes in Xirolaki torrent, Northern Greece, based on geomorphological and meteorological data. *Proceedings of 8th IAG International Conference on Geomorphology*, Paris, France.

Καρύμπαλης, Ε., Κατσαφάδος, Π., Καλογερόπουλος, Κ., Καραλής, Σ., & Χαλκιάς, Χ. (2014) *Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες,* στο Καρύμπαλης Ε, Παπαδόπουλος Α., Χαλκιάς Χ., (επιμ.) Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.

Καρύμπαλης, Ε., Τέγου, Μ., & Τσαλκιτζής Ο. (2002) *Γεωπεριβαλλοντική προσέγγιση της Κοιλάδας του Βουραϊκού Ποταμού*, Συμπόσιο Γεωτουριστικά, Γεωπολιτιστικά Μονοπάτια και Γεωμυθότοποι, Συνδιοργάνωση Ελληνικός Οργανισμός Τουρισμού- Σύλλογος Ελλήνων Γεολόγων, Θεσσαλονίκη.

Κουργιαλάς, Ν. (2010) *Ολοκληρωμένη Διαχείριση-Πρόβλεψη & Αντιμετώπιση Πλημμυρικών Φαινομένων σε Σύνθετες Γεωμορφοολογικά Περιοχές με Χρήση Μαθηματικών Μοντέλων και GIS,* Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μιμίκου, Μ.Α., & Μπαλτάς, Ε.Α. (2006) *Τεχνική Υδρολογία,* Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μπαλούτσος, Γ., Κουτσογιάννη,ς Δ., Οικονόμου, Α., & Καλλίρης Π. (2000) Διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής Ξηριά Κορίνθου στην καταιγίδα της 11-13 Ιανουαρίου 1997 με τη μέθοδο SCS, Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, 11 (1), 77-90.

Παυλόπουλος, Κ. (2011) *Γεωμορφολογία: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.

Πεντέρης, Δ., Καλογερόπουλος Κ., & Χαλκιάς, Χ. (2015) Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου με χρήση GIS. HellasGIs – Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. *1ο Συνέδριο Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Χωρικής Ανάλυσης στη Γεωργία και στο Περιβάλλον*. 28-29 Μαΐου 2015, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Χριστοφίδης, Α. Δ. (2008) *Ανάπτυξη μοντέλου βροχής απορροής σε Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, 112 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.