ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Γεωγραφίες

Γεωγραφίες, Τεύχος 41, 2023

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ανδρέας Στέφου

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 26/01/2026 05:17:56

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ανδρέας Στέφου[1]

Περίληψη
Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής σε δύο εκδοχές του, με περιοχή μελέτης τη λεκάνη απορροής του Ρέματος Γιαννούλας (νοτιοδυτική Πάρνηθα). Στην πρώτη εκδοχή θεωρείται ότι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα στην έκταση της λεκάνης. Στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης. Στα παραγόμενα υδρογραφήματα παρατηρήθηκαν αισθητές διαφορές στις εκτιμώμενες πλημμυρικές αιχμές. Επομένως, ο παράγοντας της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης θα πρέπει να λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψη για να επιτευχθεί μια ρεαλιστική προσομοίωση.

Λέξεις-κλειδιά: μοντέλο βροχής-απορροής, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, λεκάνη απορροής, επιφανειακή απορροή, συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα

Runoff modeling in GIS environment: the effect of spatial distribution of precipitation on the model output

Andreas Stefou

Abstract
In this study, a spatially distributed rainfall-runoff model is applied, in two variations, on the study area of Giannoula's torrent basin (southwest Parnitha). The first variation assumes that the precipitation was uniformly distributed over the runoff basin. The second one takes into consideration the spatial distribution of the rainfall. In the hydrographs produced, considerable differences were observed in the estimated peak flood discharges. Thus, the factor of spatial distribution of the rainfall should definitely be taken into account, in order to achieve a realistic simulation.

Keywords: rainfall-runoff model, Geographic Information Systems, watershed, runoff, synthetic unit hydrograph

Εισαγωγή

Το φαινόμενο της πλημμύρας έχει αναμφίβολα απασχολήσει την ανθρωπότητα από τα αρχαία χρόνια. Δεν πρόκειται μόνο για ένα αντικείμενο προς μελέτη, αλλά για ένα βίωμα των ανθρώπινων κοινωνιών. Πολλοί αρχαίοι λαοί μιλούν για τη μεγάλη πλημμύρα του παρελθόντος που σχεδόν εξαφάνισε τη ζωή στον πλανήτη. Οι πλημμύρες, βέβαια, πλήττουν τις ανθρώπινες κοινωνίες μέχρι και σήμερα, επιφέροντας απώλειες σε ζωές και καταστροφές σε περιουσίες ανθρώπων. Κάποια από τα πιο πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα στην Ελλάδα είναι οι πλημμύρες που

1. Γεωγράφος, ΜΔΕ Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου, andreasstefou2102@gmail.com

προκλήθηκαν στη Δυτική Αττική το 2017 από το βαρομετρικό χαμηλό «Ευριδίκη», οι πλημμύρες στην Εύβοια το 2020 και οι πλημμύρες στο νομό Έβρου το 2021. Στα παραπάνω είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας της κλιματικής αλλαγής. Μια από τις επιπτώσεις της είναι η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των καταιγίδων. Είναι λογικό λοιπόν, να αναμένονται περισσότερα περιστατικά αιφνίδιων πλημμυρών μελλοντικά.

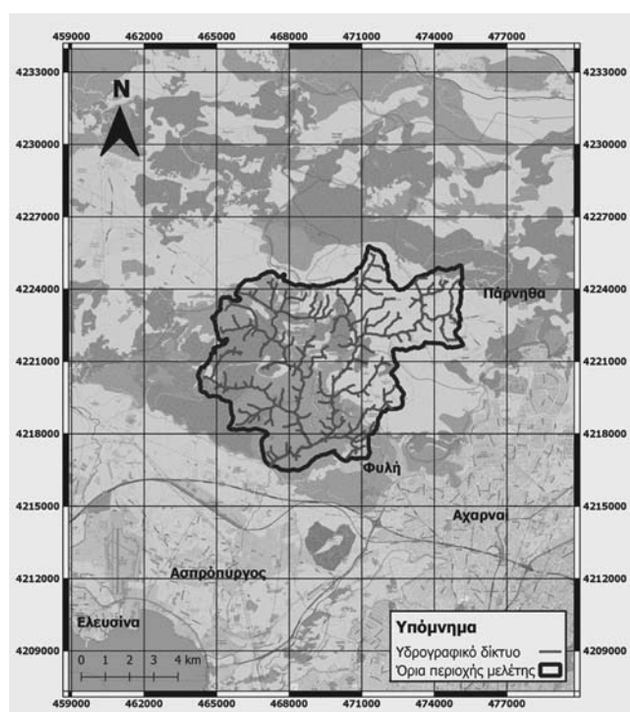
Εφόσον τα πλημμυρικά συμβάντα θέτουν σε κίνδυνο τις ανθρώπινες ζωές και περιουσίες, υπάρχει μεγάλη ανάγκη προτεραιοποίησης των αντιπλημμυρικών έργων. Για τους σκοπούς διαχείρισης τέτοιων περιστατικών, ο κίνδυνος απωλειών και καταστροφών συχνά κατανοείται ως ο συνδυασμός τριών επιμέρους παραγόντων: του επικίνδυνου φαινομένου, της έκθεσης του ανθρωπίνου παράγοντα στα φαινόμενα, και της τρωτότητάς του σε αυτά. Ο καθένας από τους παράγοντες αυτούς μπορεί να εκτιμηθεί με ποικίλες μεθόδους. Το άρθρο αυτό θα απασχολήσει η μοντελοποίηση επικίνδυνων φαινομένων σε ψηφιακό περιβάλλον, και συγκεκριμένα η μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής μετά από καταιγίδα. Κάποια από τα παράγωγα αυτής της διαδικασίας είναι το συνθετικό υδρογράφημα απορροής που εκτιμάται για μια διατομή της κοίτης ενός ποταμού/ρέματος, οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας κ.ά. Κατά τον Beven (2012), η βασική αιτία ύπαρξης μοντέλων βροχής-απορροής είναι οι περιορισμοί στις τεχνικές των υδρολογικών μετρήσεων. Επιπλέον, τα εν λόγω μοντέλα είναι χρήσιμα όταν οι λεκάνες απορροής στερούνται σταθμών μέτρησης παροχής. Ο Beven (2012) αναφέρεται επίσης στην ιδιότητα των μοντέλων να κάνουν εκτιμήσεις για το μέλλον, όπου οι μετρήσεις δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν.

Σκοπός του παρόντος άρθρου είναι να συγκρίνει δύο παραλλαγές ενός μοντέλου επιφανειακής απορροής, με περιοχή μελέτης τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας (νοτιοδυτική Πάρνηθα). Αυτή η σύγκριση μπορεί να προσφέρει χρήσιμα δεδομένα σε όσους ασχολούνται με τη μοντελοποίηση πλημμυρών ή/και με την ανάπτυξη μοντέλων απορροής, όσον αφορά τις παραμέτρους που θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη στα μοντέλα τους.

Περιοχή μελέτης

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας αποστραγγίζει το νερό από μια περιοχή της νοτιοδυτικής Πάρνηθας με συνολική έκταση περίπου 60 km^2. Αυτός ο όγκος νερού καταλήγει στην πεδινή περιοχή του Θριάσιου Πεδίου, όπου εντοπίζεται έντονη κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα. Η κοίτη του ρέματος στα πεδινά διέρχεται σε πολύ κοντινή απόσταση από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μάλιστα τέμνει γέφυρες, όπως αυτή της Αττικής Οδού. Σε εκείνες τις περιοχές είναι εμφανής η ανθρώπινη παρέμβαση στην κοίτη, καθώς η επιφάνειά της είναι τεχνητή.

Υπάρχουν ορισμένα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή επιβραδύνοντας ή επιταχύνοντάς τη (UCAR 2006). Στην περιοχή μελέτης, επικρατούν χαρακτηριστικά τα οποία ευνοούν την εμφάνιση των πλημμυρικών αιχμών σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη μιας καταιγίδας. Αυτά είναι το μικρό μέγεθος της λεκάνης απορροής (μόλις 60 km^2), το σχήμα της –το οποίο είναι περισσότερο κυκλικό παρά μακρόστενο–, οι απότομες μορφολογικές κλίσεις, η παρουσία μεγάλων εκτάσεων με αραιή βλάστηση, η μεγάλη πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου, και η έλλειψη μαιανδρισμών σε αυτό. Όπως φαίνεται στους ακόλουθους χάρτες, τα ιδιαίτερα γνωρίσματα της λεκάνης δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή. Αν και επικρατούν απότομες μορφολογικές κλίσεις, στα βορειοδυτικά υπάρχει μια εκτεταμένη περιοχή με ήπιο ανάγλυφο. Οι καλύψεις γης αφορούν κυρίως σκληρόφυλλη βλάστηση και δάση κωνοφόρων. Στο βο-



Χάρτης 1: Τοποθεσία και υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης (Χαρτογραφικό υπόβαθρο: OpenStreetMap)

Χάρτης 2: Μορφολογικές κλίσεις (%) της περιοχής μελέτης

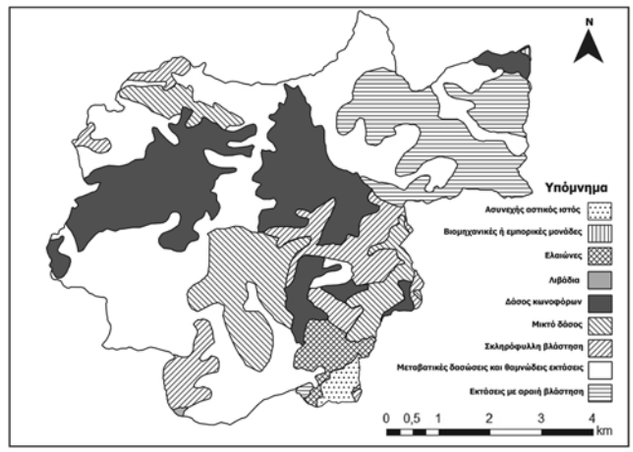
ρειοανατολικό άκρο συναντάται μια έκταση με αραιή βλάστηση, η οποία προέκυψε μετά από πυρκαγιά, καθώς και ένα μικρό μέρος ασυνεχή αστικού ιστού στα νοτιοανατολικά, που συνιστά τον οικισμό της Φυλής.

Μεθοδολογία

Δεδομένα και υλοποίηση

Για τους σκοπούς της μοντελοποίησης αξιοποιήθηκαν τα ακόλουθα πρωτογενή δεδομένα:

α. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους: Πρόκειται για ένα ALOS PALSAR High Resolution DEM της περιοχής μελέτης, με μέγεθος εικονοστοιχείου 12,5x12,5 m. Τα προϊόντα ALOS PALSAR προκύπτουν μετά από εφαρμογή ραδιομετρικής διόρθωσης εδάφους σε ήδη υπάρχοντα DEM διαφορετικής ανάλυσης (ASF 2023). Παρέχονται ελεύθερα από τη δορυφορική υπηρεσία της Alaska (Alaska Satellite Facility). Επιπλέον, είναι ικανά να εντοπίζουν κλάδους του υδρογραφικού δικτύου με μικρό πλάτος (Nipele και Chen 2019). Έτσι κρίνονται κατάλληλα για υδρολογικές εφαρμογές, ιδίως στην περιοχή μελέτης, που χαρακτηρίζεται από κοίτες μικρού πλάτους.



Χάρτης 3: Καλύψεις γης CORINE της περιοχής μελέτης για το 2018 (Πηγή δεδομένων: Copernicus Programme, 2023, ιδία επεξεργασία)

β. Ψηφιδωτά δεδομένα βροχόπτωσης: Είναι δορυφορικά ψηφιδωτά (raster) δεδομένα βροχόπτωσης PERSIANN-CCS, ανάλυσης 4x4 km και χρονικής διακριτότητας μίας ώρας. Αποτυπώνουν δύο περιστατικά βροχόπτωσης που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης, με διαφορετική ένταση και κατανομή στο χώρο. Συγκεκριμένα, το πρώτο περιστατικό αναφέρεται στην 9ωρη βροχόπτωση που συνέβη στις 11/11/2013 και το δεύτερο στην 6ωρη βροχόπτωση στις 16/11/2017. Η κάθε ώρα βροχής αφορά ένα ξεχωριστό raster που αναπαριστά την κατανομή της βροχής στη λεκάνη απορροής για εκείνο το χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα παρέχονται ελεύθερα από το Κέντρο Υδρομετεωρολογίας και Τηλεπισκόπησης του Πανεπιστημίου της California (Irvine),στο διαδικτυακό αποθετήριο CHRS Data Portal.

γ. Καλύψεις γης: Αφορά ένα διανυσματικό επίπεδο καλύψεων γης της περιοχής για το 2018, από την υπηρεσία CORINE του προγράμματος παρακολούθησης της γης Copernicus.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το λογισμικό ArcGIS 10.8.1, το οποίο παρέχει πληθώρα υδρολογικών εργαλείων, και με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων.

Προεπεξεργασία δεδομένων

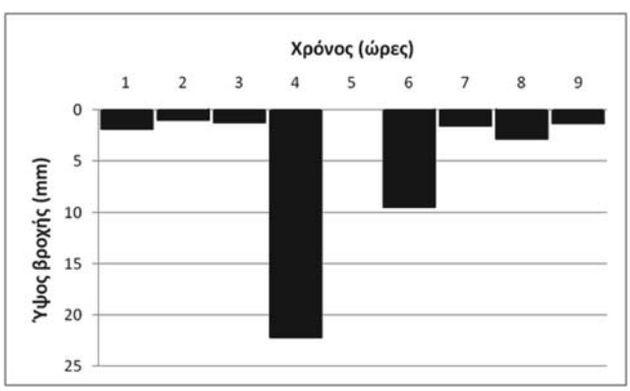
α. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους: Πριν αξιοποιηθεί το DEM, έγινε εξομάλυνση των σημείων ταπείνωσης του αναγλύφου (sinks), μέσω του εργαλείου Fill του ArcMap. Η ενέργεια αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς η ύπαρξη τέτοιων σημείων μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στη μοντελοποίηση.

β. Ψηφιδωτά δεδομένα βροχόπτωσης: Τα ψηφιδωτά

της βροχόπτωσης υπέστησαν επεξεργασία ώστε να εξομαλυνθούν με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάστηκαν δύο ρεαλιστικά σενάρια ακραίας βροχόπτωσης που μοιάζουν με τα πραγματικά περιστατικά που συνέβησαν στις 11/11/2013 (σενάριο Α΄) και 16/11/2017 (σενάριο Β΄). Επιπλέον, απέκτησαν νέο μέγεθος κελιού (12,5x12,5 m), ώστε να είναι το ίδιο με αυτό του ψηφιδωτού DEM. Στο τέλος έγινε μετατροπή των ψηφιδωτών στο SI (από mm ύψους βροχής σε m). Στους ακόλουθους πίνακες και στα ραβδογράμματα παρουσιάζονται τα στατιστικά των επιπέδων των σεναρίων βροχόπτωσης. Στην Εικόνα 1 διακρίνεται η κατανομή της αθροιστικής βροχόπτωσης για κάθε σενάριο στην έκταση της λεκάνης απορροής.

Διάρκεια βροχόπτωσης (h)	Ελάχιστη (mm)	Μέγιστη (mm)	Μέση (mm)	Τυπική απόκλιση
1	1	2	1,97	0,18
2	1	2	1,03	0,16
3	1	2	1,33	0,47
4	13	33	22,27	3,51
5	0	0	0	0
6	2	17	9,49	3,85
7	1	2	1,6	0,49
8	2	5	2,87	0,7
9	1	3	1,35	0,48

Πίνακας 1: Στατιστικά επιπέδων σεναρίου βροχόπτωσης Α΄ – ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή ύψους βροχής για κάθε ώρα και τυπική απόκλιση

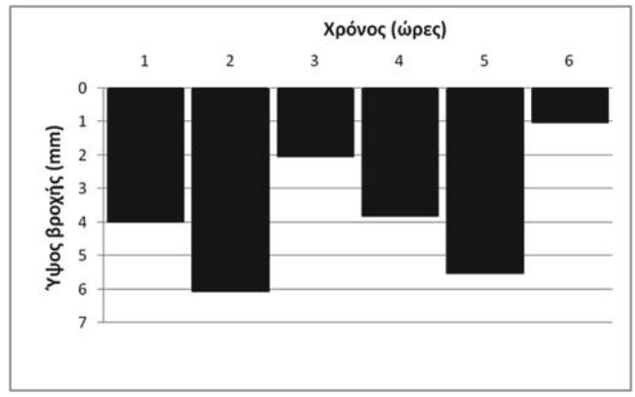


Διάγραμμα 1: Ραβδόγραμμα μέσων τιμών ύψους βροχής που δέχθηκε η λεκάνη απορροής κάθε ώρα (σενάριο βροχόπτωσης Α΄)

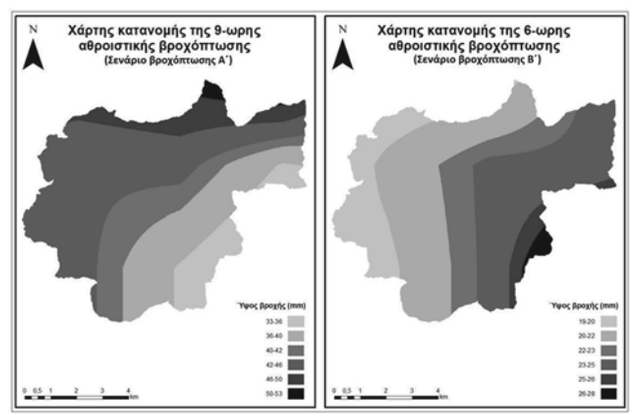
γ. Καλύψεις γης: Το επίπεδο καλύψεων γης χρησίμευσε στην κατασκευή ενός επιπέδου τραχύτητας εδάφους. Πρώτα, ήταν απαραίτητο να μετατραπεί από διανυσματική σε ψηφιδωτή μορφή. Μετά από βιβλιογραφική μελέτη αποδόθηκε σε κάθε κατηγορία κάλυψης γης ο κατάλληλος συντελεστής τραχύτητας (μέση τιμή Manning's n) σύμφωνα με τον πίνακα του Huang (2005). Οι τιμές του συντελεστή που αντιστοιχούν σε κάθε κάλυψη διακρίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διάρκεια βροχόπτωσης (h)	Ελάχιστη (mm)	Μέγιστη (mm)	Μέση (mm)	Τυπική απόκλιση
1	4	4	4	0
2	3	7	6,08	1,06
3	2	3	2,06	0,23
4	3	4	3,84	0,37
5	4	7	5,55	0,71
6	1	2	1,03	0,17

Πίνακας 2: Στατιστικά επιπέδων σεναρίου βροχόπτωσης Β΄– ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή ύψους βροχής για κάθε ώρα και τυπική απόκλιση



Διάγραμμα 2: Ραβδόγραμμα μέσων τιμών ύψους βροχής που δέχθηκε η λεκάνη απορροής κάθε ώρα (σενάριο βροχόπτωσης Β΄)



Εικόνα 1: Χάρτες κατανομής των αθροιστικών βροχοπτώσεων (αριστερά στην εικόνα διακρίνεται το σενάριο βροχής Α΄ και δεξιά το σενάριο βροχής Β΄)

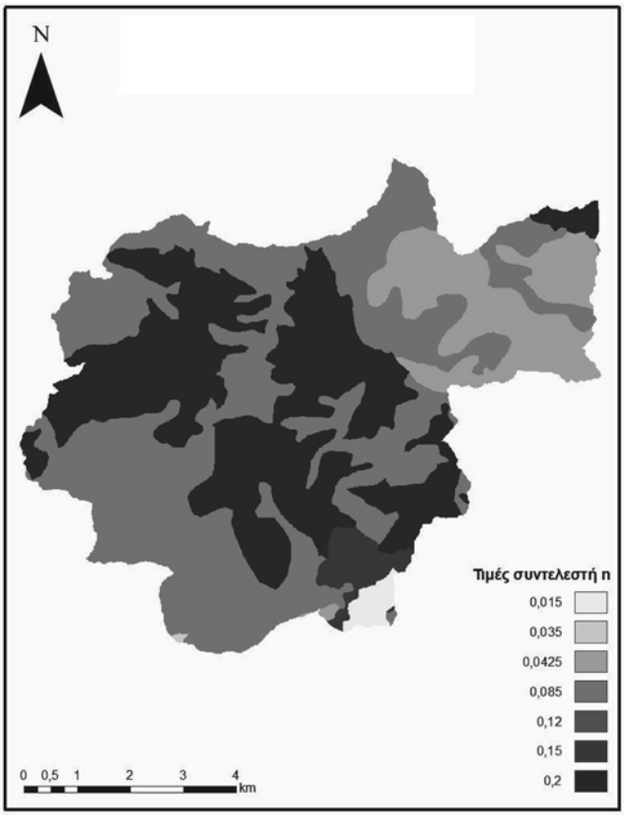
Τα παραπάνω δεδομένα αποκόπηκαν στα όρια της περιοχής μελέτης και η προβολή τους μετατράπηκε από το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα 1984 (WGS 84) στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (GGRS 87).

Ορισμός υδροκρίτη της λεκάνης απορροής

Τα όρια της περιοχής μελέτης αποτελούν τον υδροκρίτη της λεκάνης απορροής. Ο υδροκρίτης καθορίζει ποια από τα ύδατα των κατακρημνισμάτων διαχειρίζεται η λεκάνη της περιοχής μελέτης και ποια οι όμορες λεκά-

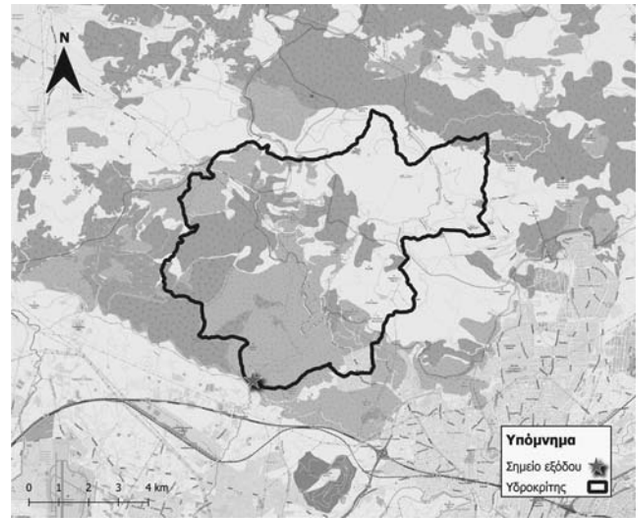
Κωδικός CORINE	Κάλυψη γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	0,015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	0,2
223	Ελαιώνες	0,15
231	Λιβάδια	0,035
312	Δάσος κωνοφόρων	0,2
313	Μικτό δάσος	0,2
323	Σκληρόφυλλη βλάστηση	0,085
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0,085
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0,0425

Πίνακας 3: Συντελεστής τραχύτητας Manning που αντιστοιχεί σε κάθε κάλυψη γης της περιοχής μελέτης



Χάρτης 4: Συντελεστής τραχύτητας Manning της περιοχής μελέτης

νες. Για να γίνει η οριοθέτηση με μαθηματική ακρίβεια αξιοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και τα υδρολογικά εργαλεία του περιβάλλοντος ArcMap του λογισμικού ArcGIS 10.8.1. Συγκεκριμένα, από το DEM παράχθηκε ένα επίπεδο κατεύθυνσης ροής. Από την πληροφορία του επιπέδου αυτού κατασκευάστηκε στη συνέχεια ένα επίπεδο συσσώρευσης ροής. Σε αυτό το ψηφιδωτό είναι ορατά τα κελιά όπου απορρέει συγκεντρωμένο το νερό της βροχής (κοίτες του ρέματος). Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα σημειακό shapefile που αντιπροσωπεύει το σημείο εξόδου του νερού, σε μια διατομή της κοίτης η οποία διαχειρίζεται το νερό που απορρέει απ' όλη τη λεκάνη. Η λεκάνη απορροής τελικά οριοθετήθηκε με το εργαλείο Watershed του λογισμικού αξιοποιώντας το επίπεδο συσσώρευσης ροής και το σημείο εξόδου. Στο Χάρτη 5 διακρίνεται το σχήμα της λεκάνης και η τοποθεσία του σημείου.



Χάρτης 5: Υδροκρίτης λεκάνης απορροής και τοποθεσία σημείου εξόδου (Χαρτογραφικό υπόβαθρο: OpenStreetMap)

Μοντέλο απορροής

Το χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη έχει αναπτυχθεί και αξιοποιηθεί από διάφορους ερευνητές όπως είναι οι Musik (1996), Maidment κ.ά. (1996), Melesse και Graham (2004) και Du κ.ά. (2009). Το τελικό προϊόν της μοντελοποίησης είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα για το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής. Το μοντέλο θεωρείται ότι δίνει καλά αποτελέσματα, καθώς μετά από εφαρμογή του στο παρελθόν από τον Musik (1996) διαπιστώθηκε ότι το υδρογράφημα της προσομοίωσης ταυτιζόταν με αυτό από την επιτόπια μέτρηση (Du κ.ά. 2009· Πεντέρης κ.ά. 2015). Η ροή των δεδομένων του υδρολογικού μοντέλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.

Το μοντέλο απορροής εφαρμόστηκε για δύο παραλλαγές του. Στην πρώτη (Α΄ παραλλαγή μοντέλου) έγινε αποδεκτή η παραδοχή του μοναδιαίου υδρογραφήματος (βλ. Chow κ.ά. 1988: 214), ότι για κάθε επιμέρους χρονικό διάστημα (ώρα), η βροχή ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στην έκταση της λεκάνης. Στη δεύτερη (Β΄ παραλλαγή μοντέλου) λαμβάνεται υπόψη η κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο, για κάθε ώρα βροχής.

Αξιοποίηση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Ένα μεγάλο μέρος της απαραίτητης πληροφορίας που

αξιοποιεί το μοντέλο προκύπτει από το DEM. Συγκεκριμένα, από αυτό παράγεται:

- ένα επίπεδο κατεύθυνσης ροής
- τα επίπεδα συσσώρευσης ροής και ανάντη μήκους ροής που προέρχονται από αυτό της κατεύθυνσης ροής
- ένα επίπεδο ποσοστού (%) μορφολογικών κλίσεων το οποίο αφού διαιρεθεί με το 100 δίνει τη μορφολογική κλίση μ/μ

Το επίπεδο κατεύθυνσης ροής δημιουργείται με ένα μοντέλο οκτώ κατευθύνσεων. Είναι ένα ψηφιδωτό του οποίου κάθε ψηφίδα (κελί) μπορεί να λάβει οκτώ διαφορετικές ακέραιες τιμές. Η κάθε τιμή αντιπροσωπεύει μία από τις οκτώ κατευθύνσεις: 1 = ανατολικά, 2 = νοτιοανατολικά, 4 = νότια, 8 = νοτιοδυτικά, 16 = δυτικά, 32 = βορειοδυτικά, 64 = βόρεια και 128 = βορειοανατολικά. Για να παραχθεί η πληροφορία αυτή, εντοπίζεται για κάθε κελί αυτό με τη μικρότερη τιμή υψομέτρου από τα οκτώ γειτονικά του. Στο ψηφιδωτό συσσώρευσης ροής τα κελιά λαμβάνουν τιμές σύμφωνες με τον αριθμό των κελιών που ρέουν προς αυτά. Τα κελιά που αναπαριστούν το υδρογραφικό δίκτυο έχουν επομένως αυξημένες τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα. Για τη δημιουργία του επιπέδου ανάντη μήκους ροής, υπολογίζεται η μεγαλύτερη απόσταση κατά μήκος της ροής προς τα ανάντη, από κάθε κελί μέχρι τον υδροκρίτη της λεκάνης. Τέλος, η μορφολογική κλίση προκύπτει από τον υπολογισμό του μέγιστου ρυθμού μεταβολής υψομέτρου κάθε κελιού από τα οκτώ γειτονικά του.

Παροχή απορροής

Πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της παροχής της απορροής στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και αυτής της υδροστρωματορροής. Η παροχή αυτή δεν αποτελεί την τελική πληροφορία του υδρογραφήματος απορροής, αλλά αξιοποιείται από το μοντέλο ώστε να δημιουργηθούν τελικά ισόχρονες ζώνες ροής του νερού. Για κάθε παραλλαγή του μοντέλου αξιοποιήθηκαν οι ίδιοι τύποι για τον υπολογισμό της παροχής, με τη διαφορά να βρίσκεται στα δεδομένα βροχόπτωσης.

Στην περίπτωση της Α΄ παραλλαγής του μοντέλου (ομοιομορφία στην κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο) η βροχόπτωση που δέχθηκε η λεκάνη σε κάθε ώρα είναι η μέση τιμή ύψους βροχής των κελιών του αντίστοιχου raster εκείνης της ώρας. Από την πρόσθεση των επιμέρους μέσων τιμών ύψους βροχής κάθε ώρας και τη διαίρεσή τους με τη συνολική διάρκεια βροχόπτωσης προκύπτει η συνολική ένταση (i) της βροχής:

$$i = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_j}{\Delta t}$$

όπου P_j είναι η τιμή του ύψους βροχής (m) κάθε ώρας και Δt η συνολική διάρκεια της βροχής (sec).

Στη Β΄ παραλλαγή του μοντέλου (άνιση κατανομή των κατακρημνισμάτων στο χώρο) αντί για τη μέση τιμή κάθε raster, αξιοποιήθηκαν αυτούσια τα raster βροχόπτωσης και με τον ίδιο τρόπο δημιουργήθηκε ένα επίπεδο συνολικής έντασης (i) της βροχής (Καρύμπαλης κ.ά. 2014). Κατ' αυτόν τον τρόπο αποτυπώθηκε η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στην έκταση της λεκάνης.

Έτσι, η παροχή στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου (m^3/s) υπολογίζεται ως:

$$Q_{ch} = i * \text{flow accumulation} * \text{cell size}^2$$

όπου i η ένταση της βροχής σε m/s, flow accumulation η συσσώρευση ροής και cell size το μέγεθος κελιού σε m.

Η παροχή της υδροστρωματορροής (m^2/s) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_{over} = i * l_{upstream}$$

όπου i η ένταση της βροχής σε m/s και $l_{upstream}$ το ανάντη μήκος ροής (m).

Ταχύτητα απορροής

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή επιπέδων ταχύτητας ροής του νερού στις κοίτες και ταχύτητας υδροστρωματορροής. Ο τύπος για τον υπολογισμό της ταχύτητας στις κοίτες που αξιοποιείται από το μοντέλο προτάθηκε από τους Du κ.ά. (2009) και προκύπτει από τον τύπο του Manning και την εξίσωση της συνέχειας:

$$V_{ch} = KS^{3/8}Q_{ch}^{1/4}n^{-3/4}$$

όπου K ο συντελεστής βαθμονόμησης για σφάλματα στο επίπεδο μορφολογικών κλίσεων και στο συντελεστή τραχύτητας, S το επίπεδο μορφολογικών κλίσεων μ/μ, Q_{ch} το επίπεδο παροχής των καναλιών (m^3/s) και n το επίπεδο του συντελεστή τραχύτητας Manning ($s/m^{1/3}$).

Η ταχύτητα υδροστρωματορροής προτείνεται επίσης από τους Du κ.ά. (2009) και προκύπτει από τον τύπο του Manning για την ομοιόμορφη μόνιμη ροή και από την εξίσωση της συνέχειας:

$$V_{over} = S^{3/10}Q_{over}^{2/5}n^{-3/5}$$

όπου S είναι το επίπεδο μορφολογικών κλίσεων (μ/μ), Q_{over} το επίπεδο παροχής της υδροστρωματορροής (m^2/s) και n το επίπεδο συντελεστή τραχύτητας ($s/m^{1/3}$).

Από την ένωση των δύο επιπέδων ταχύτητας δημιουργήθηκε ένα επίπεδο συνολικής ταχύτητας, με τις αντίστοιχες τιμές V_{ch} στις κοίτες και τις τιμές V_{over} στις λοιπές περιοχές.

Ισόχρονες ζώνες συρροής

Εφόσον έχει υπολογιστεί η ταχύτητα ροής στην έκταση της λεκάνης, αρκεί μια επίλυση ως προς το χρόνο για να κατασκευαστεί το επίπεδο του χρόνου συρροής. Ο χρόνος δίνεται από το γνωστό τύπο:

$$t = L/V$$

όπου L είναι το μήκος της διαδρομής της ροής (m) και V η ταχύτητα ροής (m/s), για κάθε σημείο της λεκάνης απορροής.

Έτσι, κατασκευάστηκε ένα επίπεδο κατάντη μήκους ροής (L) με συντελεστή το αντίστροφο της ταχύτητας (1/V), το οποίο αποτελεί το ψηφιδωτό του χρόνου συρροής. Στη συνέχεια, οι τιμές των κελιών του επιπέδου επαναταξινομήθηκαν ανά ώρα βροχόπτωσης και έτσι παράχθηκε ένα raster ισόχρονων ζωνών. Η κάθε ισόχρονη ζώνη αποτελεί μια περιοχή της λεκάνης από την οποία το νερό της βροχής χρειάζεται τον ίδιο χρόνο ώστε να απορρεύσει στην έξοδο. Τα εμβαδά των ζωνών αυτών είναι απαραίτητα ώστε να υπολογιστεί η άμεση απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

Υδρογράφημα απορροής

Η άμεση απορροή υπολογίζεται ως το άθροισμα του όγκου του νερού που απορρέει για κάθε ισόχρονη ζώνη, προς τον αντίστοιχο χρόνο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η βροχόπτωση θεωρήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη στην έκταση της λεκάνης απορροής (Α΄ παραλλαγή μοντέλου), υπολογίστηκε ως:

$$Q_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_j * A_i}{\Delta t}$$

όπου P_j η συνολική βροχή (σε m) που δέχτηκε η λεκάνη σε χρονικό διάστημα j, A_i το εμβαδόν (σε m^2) της κάθε ισόχρονης ζώνης και Δt το αντίστοιχο χρονικό διάστημα (σε sec).

Στην περίπτωση της άνισης κατανομής της βροχόπτωσης (Β΄ παραλλαγή μοντέλου) η άμεση απορροή εκτιμήθηκε σύμφωνα με τους Καρύμπαλης κ.ά. (2014) ως:

$$Q_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{ij} * A_i}{\Delta t}$$

όπου P_{ij} είναι η συνολική βροχή (σε m) που δέχθηκαν τα κελιά της κάθε ισόχρονης ζώνης σε χρονικό διάστημα j, A_i το εμβαδόν (σε m^2) της κάθε ισόχρονης ζώνης και Δt το αντίστοιχο χρονικό διάστημα (σε sec).

Παραδοχές

α. Απώλειες λόγω κατείσδυσης: Στο μοντέλο δεν υπολογίζονται οι απώλειες λόγω κατείσδυσης στους γεωλογικούς σχηματισμούς και όλη η ποσότητα του νερού της βροχής που δέχεται η λεκάνη θεωρείται ότι απορρέει επιφανειακά. Αυτό μπορεί να συμβεί και στην πραγματικότητα σε κάποιο βαθμό, όταν το έδαφος της περιοχής μελέτης είναι κορεσμένο σε νερό από βροχόπτωση που έχει προηγηθεί.

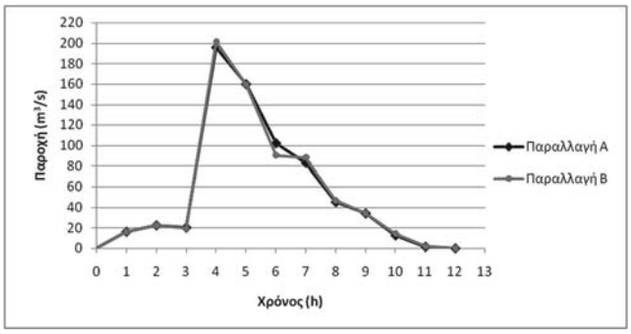
β. Βαθμονόμηση μοντέλου: Στην περίπτωση μελέτης γίνεται αποδεκτή η τιμή του συντελεστή βαθμονόμησης K = 1. Ο αναγνώστης θα πρέπει να έχει κατά νου ότι διαφορετικές τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης ενδέχεται να δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα.

γ. Συντελεστής τραχύτητας: Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας εξετάστηκαν βιβλιογραφικά. Θεωρήθηκε ότι η μέση τιμή του συντελεστή Manning's n που αντιστοιχεί σε κάθε κάλυψη γης είναι η κατάλληλη.

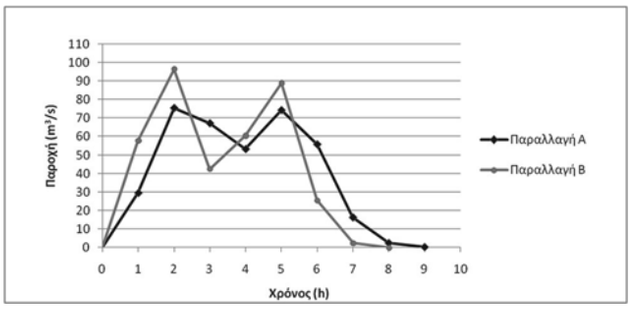
Οι παραδοχές γίνονται αποδεκτές καθώς σκοπός της παρούσας μελέτης δεν είναι να προσομοιωθεί με ακρίβεια η παροχή συναρτήσει του χρόνου στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκριτικά τα υδρογραφήματα όπως προκύπτουν από την εφαρμογή κάθε παραλλαγής του μοντέλου απορροής, για κάθε σενάριο βροχόπτωσης:



Διάγραμμα 3: Συνθετικά μοναδιαία άμεσα υδρογραφήματα απορροής για τις παραλλαγές Α΄ και Β΄ του μοντέλου – σενάριο βροχόπτωσης Α΄



Διάγραμμα 4: Συνθετικά μοναδιαία άμεσα υδρογραφήματα απορροής για τις παραλλαγές Α΄ και Β΄ του μοντέλου – σενάριο βροχόπτωσης Β΄

Συζήτηση

Σε όλα τα παραγόμενα υδρογραφήματα είναι εμφανές ότι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η παροχή μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της και ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται μέχρι να ελαχιστοποιηθεί είναι μεγάλος (απότομες κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης). Επιπλέον, οι πλημμυρικές αιχμές είναι αρκετά υψηλές και ο χρόνος που μεσολαβεί από τα μέγιστα ύψη βροχής μέχρι τη μέγιστη εκτιμώμενη παροχή στο σημείο εξόδου (χρόνος υστέρησης) είναι μικρότερος της μιας ώρας. Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν την ορμητική φύση της λεκάνης απορροής.

Συγκρίνοντας τα υδρογραφήματα που προέκυψαν από κάθε παραλλαγή του μοντέλου απορροής, για το σενάριο βροχόπτωσης Α΄, παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό ταύτιση στις τιμές της παροχής συναρτήσει του χρόνου. Αντιθέτως, στο σενάριο βροχόπτωσης Β΄, η διαφορά στα υδρογραφήματα από τις δύο εκδοχές του μοντέλου απορροής είναι αρκετά μεγάλη. Όταν λήφθηκε υπόψη η κατανομή της βροχόπτωσης στην έκταση της λεκάνης για κάθε ώρα (Β΄ παραλλαγή μοντέλου) τα μέγιστα παροχής ήταν υψηλότερα και η αποστράγγιση διήρκησε μία ώρα λιγότερη απ' ό,τι στην περίπτωση που η βροχή θεωρήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη (Α΄ παραλλαγή). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κατανομή της κάθε βροχόπτωσης σε συνδυασμό με αυτή που εμφανίζουν τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζει το μοντέλο και διαφοροποιούνται στην έκτασή της είναι η μορφολογική κλίση και η τραχύτητα του εδάφους. Η κατανομή τους στο χώρο συζητήθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Στην περίπτωση του σεναρίου βροχόπτωσης Α΄, το μεγαλύτερο όγκο νερού δέχθηκαν οι βόρειες και βορειοδυτικές περιοχές, ενώ στο σενάριο Β΄ οι ανατολικές. Η ήπια μορφολογία στα βορειοδυτικά και η ύπαρξη δασικών εκτάσεων μετρίασε το περιστατικό, επιβραδύνοντας το ρυθμό της αποστράγγισης. Αντιθέτως, όταν η λεκάνη δέχθηκε το μεγαλύτερο όγκο του νερού της βροχής στα ανατολικά, οι απότομες μορφολογικές κλίσεις και οι μικρότερες τιμές συντελεστή τραχύτητας οδήγησαν ταχέως το νερό στη διατομή εξόδου.

Η διαφορά αυτή είναι αναμενόμενο να προκύψει και από παρόμοια μοντέλα βροχής-απορροής που λαμβάνουν υπόψη τη μορφολογία και το συντελεστή τραχύτητας, όπως αυτά που υλοποιούνται σ' ένα περιβάλλον HEC-RAS. Σίγουρα είναι σημαντικό να γίνει επιλογή του πλέον κατάλληλου μοντέλου, που θα αποδώσει την καταιγίδα με τον καλύτερο τρόπο και ταυτόχρονα θα διευκολύνει το χρήστη περισσότερο. Αν και το μοντέλο που αξιοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, η διαδικασία είναι χρονοβόρα όταν αξιοποιούνται δεδομένα βροχόπτωσης raster. Διαφορετικά, αν τα δεδομένα αφορούν τιμές ύψους βροχής από ένα βροχομετρικό σταθμό (επομένως γίνεται αποδεκτή η παραδοχή ομοιομορφίας των κατακρημνισμάτων), η διαδικασία της μοντελοποίησης είναι πιο συνοπτική.

Συμπεράσματα

Ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης σε δύο εκδοχές του, για δύο διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης. Στην πρώτη εκδοχή του, η κατανομή της βροχής στην έκταση της λεκάνης απορροής θεωρήθηκε ομοιόμορφη, ενώ στη δεύτερη εκδοχή αποδόθηκε η χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Αν και τα περιστατικά βροχής που εξετάστηκαν δεν είναι ακραία, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δύο περιπτώσεις η απόκριση της λεκάνης μετά από βροχόπτωση είναι άμεση. Μεγάλοι όγκοι νερού απορρέουν από το σημείο εξόδου σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη της βροχόπτωσης (μικρότερο της μίας ώρας). Το γεγονός αυτό καθιστά δύ-

σκολη έως αδύνατη την πρόγνωση πλημμυρών και την άμεση προειδοποίηση για πλημμύρα στα κατάντη όπου εντοπίζεται έντονη κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να γίνονται γενικότερες ειδοποιήσεις σε περίπτωση εκδήλωσης ακραίας καταιγίδας.

Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο παραλλαγών του μοντέλου, έγιναν διακριτές οι διαφορές τους. Όπως φάνηκε στην περίπτωση μελέτης, όταν λαμβάνεται υπόψη η χωρική κατανομή μιας βροχόπτωσης στην έκταση της λεκάνης απορροής, η απόκριση της λεκάνης σε απορροή μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Με αυτόν τον τρόπο διερευνήθηκε αν η παραδοχή της ομοιομορφίας της κατανομής των κατακρημνισμάτων στο χώρο είναι επαρκής για υδρολογικές μελέτες, ή αν αξίζει για ένα πιο ακριβές μοντέλο να λαμβάνεται υπόψη η χωροχρονική τους κατανομή με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό εξαρτάται από τους σκοπούς τής εκάστοτε έρευνας. Αν αυτό που ενδιαφέρει είναι η ακρίβεια στα αποτελέσματα και μια ρεαλιστική προσομοίωση, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψη η παράμετρος αυτή. Ανάλογα με το περιβάλλον μοντελοποίησης αυτό ενδέχεται να κάνει τη διαδικασία πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα, όπως και στην περίπτωση μελέτης. Διαφορετικά, όταν σκοπός είναι να διερευνηθούν τα πρότυπα παροχής μιας λεκάνης απορροής, χωρίς απαραίτητα να προσομοιωθεί με ακρίβεια ένα πραγματικό πλημμυρικό συμβάν, τότε η περίπτωση της παραδοχής ομοιομορφίας της κατανομής της βροχόπτωσης είναι κατάλληλη. Το συνθετικό υδρογράφημα απορροής βέβαια που προκύπτει από ένα τέτοιο μοντέλο δεν θα πρέπει να θεωρείται αντιπροσωπευτικό του σεναρίου βροχόπτωσης, καθώς μια καταιγίδα ίδιας έντασης και διάρκειας, αλλά με ανομοιόμορφη κατανομή στο χώρο μπορεί να φέρει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά την εκτιμώμενη παροχή.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Alaska Satellite Facility - ASF (2023) *ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction.* Διαθέσιμο στο: https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/ (Ανακτήθηκε στις 31/3/2023).

Beven, K. J. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, 2η εκδ. Ηνωμένο Βασίλειο: John Wiley & Sons, Ltd.

Chow, V., Maidment, D. R. και Mays, L. W. (1988) *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Copernicus Programme (2023) *Corine Land Cover 2018*. [Data file]. Διαθέσιμο στο: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018.

Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y. και 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), σ. 44-54. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.033.

Huang, Y. (2005) *Appropriate modeling for integrated flood risk assessment*. PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands. Διαθέσιμο στο: https://research.utwente.nl/files/6071128/thesis_Huang.pdf

Maidment, D. R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A. και Fraczek, W. (1996) «Unit hydrograph derived for a spatially distributed velocity field», *Hydrological Processes*, 10 (6), σ. 831-844. DOI: https://doi.org/10.1002/(SICI)10991085(199606)10:6%3C831::AIDHYP374%3E3.0.CO;2-N.

Melesse, A. M. και Graham, W. D. (2004) «Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS», *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40 (4), σ. 863-879. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01051.x.

Muzik, I. (1996) «Flood modelling with GIS-derived distributed unit hydrographs», *Hydrological Processes*, 10 (10), σ. 1401-1409. DOI: https://doi.org/10.1002/(SICI)10991085(199610)10:10%3C1401::AID-HYP469%3E3.0.CO;2-3.

Niipele, J. N. και Chen, J. (2019) «The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin», *Journal of Hydrology*: Regional Studies, 21, σ. 57-67. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003.

University Corporation for Atmospheric Research - UCAR (2006) Basin Properties. *Basic Hydrologic Science Course: Runoff Processes*. Διαθέσιμο στο: http://www.faculty.luther.edu/~bernatzr/RainfallRunoff/comet/hydro/basic/Runoff/print_version/03-basin-properties.htm?fbclid=IwAR1HEyrF4pB4BfR4mSTyVci-oiYePajBenp74BRA8z6DG47YYLeqwEWUY3A#13.

Ελληνόγλωσση

Καρύμπαλης, Ε., Κατσαφάδος, Π., Καλογερόπουλος, Κ., Καραλής, Σ. Θ. και Χαλκιάς, Χ. (2014) «Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες», στο Καρύμπαλης, Ε., Παπαδόπουλος, Α. Γ. και Χαλκιάς, Χ. (επιμ.), *Η γεωγραφία του παράκτιου και νησιωτικού χώρου* (σ. 199-240). Αθήνα: Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.

Πεντέρης, Δ., Καλογερόπουλος, Κ. και Χαλκιάς, Χ. (2015) Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε υπολεκάνη του Βουραϊκού ποταμού με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, *Γεωγραφίες* 26, σ. 21-37.