



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ &
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ
ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ**

**Εκτίμηση ακραίας πλημμυρικής παροχής στη λεκάνη απορροής του
ρέματος Γιαννούλας (Θριάσιο Πεδίο)**

Διπλωματική Εργασία

Ανδρέας Στέφου



Αθήνα, 2022



HAROKOPIO UNIVERSITY

SCHOOL OF ENVIRONMENT, GEOGRAPHY AND APPLIED
ECONOMICS

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

POSTGRADUATE STUDY PROGRAMME: APPLIED
GEOGRAPHY AND SPATIAL PLANNING

COURSE: MANAGEMENT OF NATURAL AND HUMAN
INDUCED DISASTERS

**Extreme flood discharge estimation in the Giannoula torrent
watershed (Thriasio Pedio)**

Master Thesis

Andreas Stefou



Athens, 2022



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ &
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ»**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ
ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καρύμπαλης Ευθύμιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Δράκου Γ. Ευαγγελία

Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χαλκιάς Χρίστος

**Καθηγητής, Αντιπρύτανης Έρευνας, Ανάπτυξης και Δια-βίου
Εκπαίδευσης, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

Ο Ανδρέας Στέφου

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- 3) Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που βοήθησαν με κάθε τρόπο στη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Στην οικογένειά μου που με στήριζε κατά τη διάρκεια συγγραφής της. Στον Γιώργο για το χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει όταν χρειάστηκα. Στον επιβλέποντα της εργασίας Καρύμπαλη Ευθύμιο για την εκπληκτική συνεργασία που είχαμε και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του. Στους διδάσκοντες του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου για τις επιστημονικές γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια φοίτησής μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract	ii
Κατάλογος εικόνων	iii
Κατάλογος πινάκων.....	v
Κατάλογος σχημάτων	vii
Συντομογραφίες	viii
Εισαγωγή	1
ΚΕΦ.1: Η έννοια του κινδύνου στη λεκάνη απορροής	3
ΚΕΦ.2: Το υδρογράφημα απορροής.....	5
2.1. Το μοναδιαίο υδρογράφημα.....	6
ΚΕΦ.3: Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος	8
ΚΕΦ.4: Περιοχή μελέτης.....	11
ΚΕΦ.5: Μεθοδολογία	17
5.1. Δεδομένα και υλοποίηση	17
5.2. Προεπεξεργασία δεδομένων	20
5.3. Οριοθέτηση της λεκάνης απορροής	21
5.4. Το μοντέλο απορροής	24
5.4.1. Παράγωγα του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους	26
5.4.2. Επίπεδο συντελεστή τραχύτητας	29
5.4.3. Επίπεδα παροχής απορροής	31
5.4.4. Επίπεδο ταχύτητας απορροής	31
5.4.5. Επίπεδο ισόχρονων ζωνών.....	33
5.4.6. Υδρογράφημα απορροής	34
5.5. Παραδοχές.....	34
ΚΕΦ.6: Αποτελέσματα	36
ΚΕΦ.7: Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	52
ΚΕΦ.8: Συμπεράσματα	61
Βιβλιογραφικές αναφορές/Πηγές.....	63

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκτίμηση ακραίας πλημμυρικής παροχής μετά από βροχόπτωση, στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας στο Θριάσιο Πεδίο, με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Σχεδιάζονται συνθετικά μοναδιαία άμεσα υδρογραφήματα για τρεις διατομές κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ρέματος. Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας αναλύεται η έννοια του κινδύνου σε μια λεκάνη απορροής, καθώς και η χρησιμότητα του υδρογραφήματος στην εκτίμησή του. Επίσης, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της λεκάνης που μπορούν να επηρεάσουν την απορροή και το σχήμα του υδρογραφήματος. Έπειτα, γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης και παρουσίαση τρωτών σε πλημμυρικές παροχές περιοχών στην κεντρική κοίτη. Στη συνέχεια, αναλύεται η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην εργασία για την εκτίμηση της παροχής συναρτήσει του χρόνου. Πρόκειται για ένα μοντέλο επιφανειακής απορροής το οποίο αξιοποιεί ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, έναν ψηφιακό χάρτη του συντελεστή τραχύτητας της περιοχής και ψηφιδωτά επίπεδα ωριαίας βροχόπτωσης. Εφαρμόζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις του ίδιου μοντέλου. Στην πρώτη προσέγγιση γίνεται η παραδοχή ότι η βροχή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην έκταση της λεκάνης απορροής σε κάθε ώρα, ενώ στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη η ανομοιόμορφη κατανομή της στο χώρο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στην περίπτωση της ανομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης οι πλημμυρικές αιχμές ήταν υψηλότερες και εκδηλώθηκαν σε πιο μικρό χρονικό διάστημα μετά από το μέγιστο της βροχής. Και στις δύο περιπτώσεις εκτιμήθηκαν ακραίες πλημμυρικές παροχές οι οποίες εκδηλώθηκαν σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη της καταιγίδας, και στις τρεις διατομές κατά μήκος της κοίτης του ρέματος. Ο μικρός χρόνος απόκρισης της λεκάνης στη βροχόπτωση καθιστά δύσκολη τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου και ανώφελη τη λειτουργία ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμύρα στις περιοχές με σημαντική κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα. Η ανάγκη για αντιπλημμυρικά έργα στο σύνολο της έκτασης της λεκάνης είναι επείγουσας σημασίας και ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη γέφυρα της οδού Μεγαρίδος όπου έχει υπάρξει κατάρρευση μέρους της στο παρελθόν.

Λέξεις κλειδιά: πλημμυρική παροχή, μοντέλο απορροής, ΣΓΠ, συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, λεκάνη απορροής

Abstract

The aim of this study is to make an estimation of extreme flood discharge in the watershed of Giannoula torrent in Thriasio Pedio, with the aid of Geographic Information Systems (GIS). Synthetic unit direct hydrographs are created for three cross-sections along the main torrent-bed. The theoretical part of the study, presents an analysis of the concept of risk in a watershed, as well as the usefulness of the hydrograph for its assessment. Reference is also made to the characteristics of the watershed that may affect the runoff and the shape of the hydrograph. Next, there is a description of the area under study and a presentation of areas in the main bed that are vulnerable to flood discharges. In addition, the method applied for the estimation of the discharge versus time is analysed. It is a runoff model that utilizes a Digital Elevation Model, a digital map of the area roughness coefficient and raster layers of hourly rainfall. Two different approaches of the same model are applied. The first approach is based on the assumption that the rain is evenly distributed over the watershed every hour, while the second assumes that the rain is unevenly distributed over the area. The results show that in the case of the uneven distribution of the rainfall, the flood peaks were higher and occurred in a shorter period of time after the rainfall peak. In both cases, there is an estimation of extreme flood discharge which occurred shortly after the onset of the storm, in all three cross-sections along the torrent-bed. The short response time of the watershed to rainfall makes it difficult to manage flood risk and to use an early flood warning system in areas with significant socio-economic activity. The need for flood protection works over the whole area of the watershed is urgent, while the bridge on Megaridos Street, part of which has collapsed in the past, requires particular attention.

Keywords: flood discharge, runoff model, GIS, synthetic unit hydrograph, watershed

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Σχηματική απεικόνιση της λεκάνης απορροής.....	4
Εικόνα 2 Παράδειγμα υδρογραφήματος απορροής	6
Εικόνα 3 Η επιρροή του σχήματος της λεκάνης στο υδρογράφημα απορροής.....	8
Εικόνα 4 Χάρτης τοποθεσίας της περιοχής μελέτης: λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας	11
Εικόνα 5 Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης	12
Εικόνα 6 Χάρτης μορφολογικής κλίσης (%) της περιοχής μελέτης	13
Εικόνα 7 Χάρτης καλύψεων γης CORINE του 2018, για την περιοχή μελέτης	14
Εικόνα 8 Φωτογραφικό υλικό από τον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας (α).....	15
Εικόνα 9 Φωτογραφικό υλικό από τον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας (β).....	16
Εικόνα 10 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης.....	18
Εικόνα 11 Κατανομή της εξάωρης αθροιστικής βροχόπτωσης στις 16/11/2017 πάνω από την περιοχή μελέτης	19
Εικόνα 12 Παράδειγμα επεξεργασίας των δεδομένων βροχόπτωσης	21
Εικόνα 13 Υδρογραφικό δίκτυο και σημεία εξόδου Α, Β και Γ της περιοχής μελέτης	22
Εικόνα 14 Η λεκάνη απορροής Γ και οι υπολεκάνες Α και Β της περιοχής μελέτης	23
Εικόνα 15 Επίπεδο κατεύθυνσης ροής της περιοχής μελέτης	28
Εικόνα 16 Επίπεδο μορφολογικών κλίσεων μέτρο ανά μέτρο (μ/μ) της περιοχής μελέτης..	29
Εικόνα 17 Χάρτης καλύψεων γης της περιοχής μελέτης σε σύγκριση με τον παραγόμενο χάρτη συντελεστή τραχύτητας.....	30
Εικόνα 18 Παράδειγμα επιλογής κατώτατου ορίου συσσώρευσης ροής για τον καθορισμό των κοιτών του υδρογραφικού δικτύου.	33
Εικόνα 19 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	36
Εικόνα 20 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	37
Εικόνα 21 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	38
Εικόνα 22 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	39
Εικόνα 23 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	40
Εικόνα 24 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	41
Εικόνα 25 Σύγκριση των παραγόμενων επιπέδων ισόχρονων ζωνών..	52
Εικόνα 26 Απεικόνιση της δημιουργίας του επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής από τη μέση αθροιστική βροχόπτωση.....	53
Εικόνα 27 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση με, ένα χάρτη πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης.....	54

Εικόνα 28 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση, με ένα χάρτη μορφολογικών κλίσεων (%) της περιοχής μελέτης	54
Εικόνα 29 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση, με τον χάρτη του συντελεστή τραχύτητας της περιοχής μελέτης	55

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Α	18
Πίνακας 2 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Β	19
Πίνακας 3 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Γ	19
Πίνακας 4 Συντελεστής τραχύτητας Manning για κάθε κάλυψη γης της περιοχής μελέτης, κατά τον Huang (2005)	30
Πίνακας 5 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	37
Πίνακας 6 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	38
Πίνακας 7 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	39
Πίνακας 8 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	39
Πίνακας 9 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	40
Πίνακας 10 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	41
Πίνακας 11 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Α από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	42
Πίνακας 12 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Β από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	42
Πίνακας 13 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Γ από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	42
Πίνακας 14 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Α από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	42
Πίνακας 15 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Β από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	43
Πίνακας 16 Όγκος νερού (σε m ³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Γ από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	43
Πίνακας 17 Παροχή (m ³ /s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	44
Πίνακας 18 Παροχή (m ³ /s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	46

Πίνακας 19 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	47
Πίνακας 20 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	48
Πίνακας 21 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	50
Πίνακας 22 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης).....	51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Εννοιολογικό μοντέλο της μεθόδου της εργασίας	26
Σχήμα 2 Παράδειγμα δημιουργίας επιπέδου κατεύθυνσης ροής	27
Σχήμα 3 Παράδειγμα δημιουργίας επιπέδου συσσώρευσης ροής.....	28
Σχήμα 4 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	44
Σχήμα 5 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	45
Σχήμα 6 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	46
Σχήμα 7 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	48
Σχήμα 8 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	49
Σχήμα 9 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)	50
Σχήμα 10 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Α ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης	56
Σχήμα 11 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Β ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης	56
Σχήμα 12 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Γ ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης	57
Σχήμα 13 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Α, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση).....	58
Σχήμα 14 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Β, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση).....	58
Σχήμα 15 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Γ, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση).....	59

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASF	Alaska Satellite Facility
CCS	Cloud Classification System
CHRS	Center for Hydrometeorology and Remote Sensing
DEM	Digital Elevation Model
EM-DAT	Emergency Events Database
ESRI	Environmental Systems Research Institute
GIS	Geographic Information Systems
PALSAR	Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar
PERSIANN	Precipitation Estimation for Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
SI	International System of Units
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
UTC	Coordinated Universal Time
VICAIRE	Virtual Campus in Hydrology and Water Resources
ΣΓΠ	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΥΠΥΜΕΔΙ	Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πλημμυρικά φαινόμενα έχουν κοστίσει τη ζωή πολλών δεκάδων ανθρώπων τα τελευταία 20 χρόνια στην Ελλάδα. Μόνο από το πρόσφατο βαρομετρικό χαμηλό Ευρυδίκη του 2017, το οποίο προκάλεσε αιφνίδιες πλημμύρες στη Δυτική Αττική (Μάνδρα, Νέα Πέραμος, Μαγούλα, Ελευσίνα), έχασαν τη ζωή τους συνολικά 23 άτομα σύμφωνα με την βάση δεδομένων EM-DAT (2022). Είναι γνωστό ότι με την κλιματική αλλαγή εντείνονται τα πλημμυρικά φαινόμενα, γεγονός το οποίο θα πρέπει να προκαλέσει αφύπνιση, όσον αφορά τη διαχείριση και το μετριασμό των αρνητικών τους συνεπειών. Τα πλημμυρικά γεγονότα εξελίσσονται στο χώρο, επομένως με την κατάλληλη διαχείρισή του, πολλές απώλειες ανθρώπινων ζωών και περιουσίας μπορούν να αποφευχθούν. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση σε βάθος των πλημμυρικών φαινομένων ως φυσικές διεργασίες, των παραγόντων που τα προκαλούν και αυτών που μπορούν να μετριάσουν τα αρνητικά τους αποτελέσματα. Εξίσου απαραίτητος κρίνεται ο εντοπισμός περιοχών υψηλού πλημμυρικού κινδύνου, όπως και στην περίπτωση της παρούσας εργασίας. Σε αυτές τις περιοχές είναι αναγκαία η ανθρώπινη παρέμβαση και η προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας με σειρά αντιπλημμυρικών έργων.

Η περιοχή μελέτης της εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας στο Θριάσιο Πεδίο της Αττικής, στην οποία έχουν εκδηλωθεί πλημμυρικά γεγονότα στο παρελθόν. Πολυάριθμες μελέτες έχουν εκπονηθεί για τη διευθέτηση της κοίτης του ρέματος και για το μετριασμό των αρνητικών συνεπειών των πλημμυρών στην περιοχή, τις οποίες έχουν επακολουθήσει σε κάποιες περιπτώσεις τα αντίστοιχα αντιπλημμυρικά έργα. Αφορούν κυρίως το πεδινό τμήμα της λεκάνης απορροής, όπου λαμβάνουν χώρα οι ανθρώπινες κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες. Πρόκειται για μελέτες του ΥΠΥΜΕΔΙ για την αντιπλημμυρική προστασία του Θριάσιου Πεδίου, μελέτες για τη διευθέτηση της κοίτης στα τμήματα που συναντάει την Αττική Οδό κ.α. (Περιφέρεια Αττικής, 2015).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι μέσω της μοντελοποίησης της απορροής μετά από μία βροχόπτωση μεγάλης έντασης, με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, να εκτιμηθεί η παροχή συναρτήσει του χρόνου σε διατομές κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ρέματος που εμφανίζουν ενδιαφέρον. Με αυτόν τον τρόπο θα εκτιμηθούν τα πρότυπα παροχής και η «απόκριση» της λεκάνης απορροής σε ακραίες βροχοπτώσεις. Επιπλέον, θα διερευνηθεί η ενδεχόμενη επιρρέπεια του ρέματος σε πλημμύρες, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Επιπροσθέτως, στην εργασία εξετάζεται η επιρροή που έχουν τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης στην εκτίμηση της παροχής, με την εφαρμογή δύο προσεγγίσεων του μοντέλου απορροής, όπου στην πρώτη θεωρείται ομοιόμορφη η κατανομή της βροχής στο χώρο και στη δεύτερη

λαμβάνεται υπόψη η άνιση κατανομή της σε αυτόν. Η περίπτωση βροχόπτωσης της μελέτης έλαβε χώρα στις 16/11/2017, δηλαδή μία μέρα μετά από τα πλημμυρικά γεγονότα του 2017 στη Δυτική Αττική (βαρομετρικό χαμηλό Ευρυδίκη).

ΚΕΦ.1: Η έννοια του κινδύνου στη λεκάνη απορροής

Ο κίνδυνος συχνά ορίζεται ως «ο συνδυασμός της πιθανότητας να συμβεί ένα γεγονός με τις αρνητικές του συνέπειες» (UNISDR, 2009). Κατά τον Villagran De Leon (2006), πολλοί συγγραφείς παριστάνουν τον κίνδυνο ως τον συνδυασμό τριών παραγόντων: της επικινδυνότητας, της τρωτότητας και της έκθεσης. Περιγράφει τη σχέση τους χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Κίνδυνος} = \text{Επικινδυνότητα} \times \text{Έκθεση} \times \text{Τρωτότητα}$$

Σύμφωνα με τους ορισμούς που αναγράφονται στο γλώσσάρι της Στρατηγικής των Ηνωμένων Εθνών για τη Μείωση των Καταστροφών (UNISDR), η σημασία των επιμέρους μεταβλητών της συνάρτησης του κινδύνου είναι (UNISDR, 2009):

- Επικινδυνότητα: επικίνδυνο φαινόμενο που δύναται να επιφέρει αρνητικές συνέπειες
- Έκθεση: άτομα, περιουσία ή άλλα στοιχεία που βρίσκονται σε ζώνες επικινδυνότητας
- Τρωτότητα: χαρακτηριστικά ατόμου, συστήματος ή άλλου στοιχείου που το κάνουν επιρρεπές στις συνέπειες μιας επικινδυνότητας

Ο βασικός στόχος της διαχείρισης κινδύνων είναι να μειωθεί η πιθανότητα απωλειών σε ανθρώπινες ζωές και περιουσία. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, απαραίτητη προϋπόθεση για να μετριαστεί ο κίνδυνος είναι να μειωθεί έστω ένα από τα συστατικά στοιχεία του. Συνήθως, όταν πρόκειται για επικίνδυνα φαινόμενα που σχετίζονται με φυσικές διεργασίες είναι δύσκολο, και πολλές φορές αδύνατο, να περιοριστούν (π.χ. σεισμός, ακραία καιρικά φαινόμενα, πυρκαγιά, κλπ). Είναι λοιπόν αναγκαίο να δίνεται η προσοχή σε ζητήματα τρωτότητας και έκθεσης. Πρώτον, η μείωση της τρωτότητας μπορεί να αφορά ενέργειες όπως ο ασφαλής σχεδιασμός των υποδομών, ή η ενημέρωση του κοινού για τις απαραίτητες ενέργειες σε περίπτωση εκδήλωσης επικίνδυνων φαινομένων. Η μείωση του παράγοντα της έκθεσης συχνά αναφέρεται στην ανάπτυξη οικισμών ή στην εγκατάσταση βιομηχανικών ή εμπορικών μονάδων και δραστηριοτήτων, σε περιοχές εκτός ζωνών υψηλής πιθανότητας εκδήλωσης επικίνδυνων φαινομένων. Τέτοιες ζώνες μπορεί να είναι τα πευκοδάση όπου συνήθως γίνονται οι δασικές πυρκαγιές, οι περιοχές κοντά σε χειμάρρους με υψηλή πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας κ.α.

Πριν μετριαστεί ο κίνδυνος είναι απαραίτητο να προηγηθεί η εκτίμηση αυτού. Να εντοπιστούν δηλαδή, περιοχές όπου υπάρχει το ενδεχόμενο εκδήλωσης επικινδυνότητων και να γίνει ανάλυση των τρωτών περιοχών που μαζί με τα ακραία φαινόμενα θέτουν σε κίνδυνο τον εκτιθέμενο πληθυσμό, τις υποδομές και το

περιβάλλον. Η διαδικασία εκτίμησης του κινδύνου μπορεί να εφαρμοστεί και στη λεκάνη απορροής, δηλαδή σε μια περιοχή καθορισμένη με φυσικογεωγραφικά κριτήρια, και με μεγάλη συνήθως έκταση, το υδρογραφικό δίκτυο της οποίας αποστραγγίζει όλη την ποσότητα του νερού της βροχής που δέχεται. Το νερό διερχόμενο από τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και από την επιφάνεια του εδάφους καταλήγει σε έναν κεντρικό ποταμό και τελικά σε ένα σημείο εξόδου, ενώ μέρος του καταλήγει στο υπέδαφος.



Εικόνα 1 Σχηματική απεικόνιση της λεκάνης απορροής (Πηγή: Lake County Stormwater Management Commission, 2022)

Σε αυτήν την περίπτωση ένα πιθανό επικίνδυνο φαινόμενο είναι η πλημμύρα. Η έκθεση στην πλημμύρα μεταφράζεται ως η ύπαρξη ανθρώπων, περιουσίας και υποδομών σε περιοχές της λεκάνης απορροής όπου ένα ποτάμι ή ένας χείμαρρος μπορεί να υπερχυλίσει. Περιοχές που εκτίθενται στον πλημμυρικό κίνδυνο είναι οι πόλεις, οι οικισμοί, το οδικό δίκτυο, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ή άλλες περιοχές όπου πραγματοποιούνται ανθρώπινες δραστηριότητες και βρίσκονται εντός της λεκάνης απορροής. Στοιχεία τρωτότητας περιλαμβάνουν μια ακατάλληλα σχεδιασμένη γέφυρα και την αδυναμία των υποδομών να αντέξουν στις πιέσεις των πλημμυρικών παροχών. Έτσι, σημεία και περιοχές της λεκάνης με αυξημένο κίνδυνο σε πλημμυρικά γεγονότα, είναι αυτά στα οποία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρών, και περιέχουν ανθρώπους, περιουσία και υποδομές που είναι τρωτά σε αυτές.

ΚΕΦ.2: Το υδρογράφημα απορροής

Το υδρογράφημα απορροής είναι το διάγραμμα παροχής-χρόνου το οποίο εκτιμάται σε μια διατομή ενός ποταμού ή ρέματος. Αποτελεί ένα εργαλείο χρήσιμο για τον εντοπισμό σημείων κατά μήκος ενός ποταμού ή ενός ρέματος μιας λεκάνης απορροής, τα οποία εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές παροχής κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξεταστεί αν στις περιοχές αυτές υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικών παροχών και να αποκαλυφθούν τα πρότυπα παροχής της λεκάνης. Επιπλέον, τα ποσοτικά στοιχεία που ανακτώνται από αυτήν τη διαδικασία μπορούν να δώσουν κατευθυντήριες γραμμές στους μηχανικούς για την κατασκευή ασφαλών γεφυρών ή την ανακατασκευή τρωτών γεφυρών ή/και άλλων υποδομών. Μπορούν επίσης, να προβλεφθούν πλημμυρικά γεγονότα για την άμεση απομάκρυνση του εκτιθέμενου πληθυσμού και αν κριθεί απαραίτητο να πραγματοποιηθούν αντιπλημμυρικά έργα για τον μακροπρόθεσμο μετριασμό των αρνητικών τους επιπτώσεων.

Τα βασικά συστατικά στοιχεία του υδρογραφήματος είναι:

- η πλημμυρική αιχμή, η οποία είναι η μέγιστη τιμή παροχής που εκτιμήθηκε σε ένα περιστατικό βροχόπτωσης
- η βασική ροή, δηλαδή η κανονική ροή του ποταμού
- ο χρόνος συγκεντρώσεως, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εμφανιστεί η μέγιστη παροχή, από τη στιγμή που αρχίζει η αύξησή της
- η καμπύλη συγκεντρώσεως, η κλίση της οποίας δείχνει το ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η παροχή, από τη στιγμή που αρχίζει η αύξηση μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της
- ο χρόνος εκτονώσεως, δηλαδή το χρονικό διάστημα από τη μέγιστη παροχή μέχρι να επανέλθει η βασική ροή του ποταμού
- η καμπύλη εκτονώσεως, που η κλίση της δείχνει το ρυθμό με τον οποίο μειώνεται η παροχή αφού φτάσει τη μέγιστη τιμή της
- ο χρόνος υστέρησης, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της μέγιστης τιμής βροχόπτωσης και της μέγιστης τιμής παροχής

Σύμφωνα με τους Chow et al (1988), τα μοναδιαία υδρογραφήματα μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο όταν οι συνθήκες των κοιτών παραμένουν ίδιες, όταν δεν περιέχεται μεγάλη ποσότητα αποταμιευμένου νερού στις λεκάνες, ή το νερό καθώς υπερχειλίζει δε συσσωρεύεται στην επιφάνεια (χωρίς να απορρέει), καθώς και σε περιπτώσεις που η απορροή δεν προέρχεται από χιόνι ή πάγο.

Η δημιουργία μοναδιαίου υδρογραφήματος για σημεία της λεκάνης όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής γίνεται με μεθόδους συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων. Κατασκευάζονται λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, αλλά και με άλλους τρόπους όπως είναι τα μοντέλα χωρίς διαστάσεις και εκείνα που υπολογίζουν την αποταμιευμένη ποσότητα νερού στη λεκάνη (Chow et al, 1988).

ΚΕΦ.3: Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος

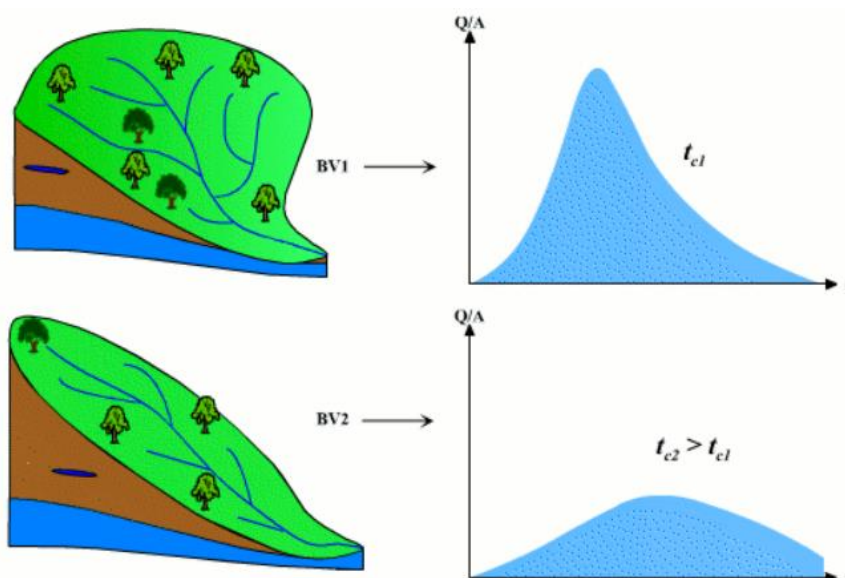
Η απορροή και το σχήμα του υδρογραφήματος, επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λεκάνης απορροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαφοροποιούνται από λεκάνη σε λεκάνη, καθώς και στην έκταση της κάθε μιας, και πρέπει να εξετάζονται από κοινού κατά την ερμηνεία του υδρογραφήματος. Τέτοια είναι:

1) Το μέγεθος της λεκάνης απορροής:

Λεκάνες απορροής μεγάλου μεγέθους δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων, επομένως έχουν μεγαλύτερη απορροή νερού. Οι χρόνοι υστέρησης είναι επίσης μεγαλύτεροι, καθώς το νερό διανύει μεγαλύτερες αποστάσεις για να φτάσει στον ποταμό.

2) Το σχήμα της λεκάνης:

Το σχήμα μιας λεκάνης απορροής επηρεάζει τη μορφή του υδρογραφήματος, καθώς σε μια επιμήκη λεκάνη ο χρόνος συγκέντρωσης μετά από βροχή θα είναι μεγαλύτερος, και επομένως η μέγιστη παροχή μικρότερη, από ότι σε μια λεκάνη σχήματος βεντάλιας στην ίδια βροχή (VICAIRE, 2006a).



Εικόνα 3 Η επιρροή του σχήματος της λεκάνης στο υδρογράφημα απορροής [Πηγή: Musy, 2001 (Ανακτήθηκε από: VICAIRE, 2006b)]

3) Το υψόμετρο:

Λεκάνες με μεγαλύτερα υψόμετρα δέχονται ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα πιο συχνά από ότι λεκάνες μικρότερων υψομέτρων με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένη απορροή.

4) Η υδρογραφική πυκνότητα:

Το νερό ρέει γρηγορότερα στις κοίτες από ότι ως υδροστρωματοροή. Λεκάνες λοιπόν, με πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερους χρόνους υστέρησης και μεγαλύτερη μέγιστη παροχή μετά από βροχόπτωση.

5) Το σχήμα των κοιτών της λεκάνης:

Είναι γνωστό από τη μηχανική των ρευστών, ότι η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη σε στενούς ποταμούς με κυκλικό σχήμα, από ότι σε ποταμούς με φαρδύ και πλατύ σχήμα. Έτσι, σε λεκάνες απορροής με στενούς και κυκλικούς κλάδους υδρογραφικού δικτύου υπάρχει η τάση για μικρότερους χρόνους υστέρησης και μεγαλύτερες μέγιστες παροχές.

6) Η μορφολογική κλίση:

Το νερό ρέει ταχύτερα σε περιοχές με απότομες μορφολογικές κλίσεις από ότι σε περιοχές ήπιων κλίσεων.

7) Ο προσανατολισμός της λεκάνης:

Σε λεκάνες απορροής με ύπαρξη χιονού, ο προσανατολισμός τους προς κατευθύνσεις με μεγαλύτερη έκθεση στον ήλιο, επιταχύνει το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνει η τήξη και το χιόνι μετατρέπεται σε απορροή (VICAIRE, 2006a).

8) Η επιφάνεια του εδάφους:

Ανάλογα με το είδος κάλυψης γης και με την επιφάνεια του εδάφους, διαφοροποιείται και η ταχύτητα ροής. Σε τραχείες επιφάνειες, όπως είναι τα δάση και οι θαμνώδεις εκτάσεις με πυκνή βλάστηση, το νερό ρέει πιο αργά από ότι σε μια αστική περιοχή όπου οι στεγανές επιφάνειες (άσφαλτος, τσιμέντο κλπ) αυξάνουν την ταχύτητα ροής. Η ύπαρξη βλάστησης μπορεί επιπλέον να συμβάλει στην κατακράτηση του νερού, επομένως μικρότερη ποσότητά του να απορρέει επιφανειακά.

9) Η γεωλογία της λεκάνης:

Η ύπαρξη υδατοπερατών πετρωμάτων στη λεκάνη απορροής, ενισχύει την κατείδυση, γεγονός το οποίο έχει ως συνέπεια μικρότερη ποσότητα νερού να απορρέει επιφανειακά.

10) Το κλίμα, η εποχή και ο καιρός:

Λεκάνες με τροπικό κλίμα δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα νερού από ότι λεκάνες μεσογειακού ή άλλου κλίματος. Αναλόγως με την εποχή, μεταβάλλεται και η ποσότητα των κατακρημνισμάτων (π.χ. συχνότερες βροχοπτώσεις στους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες). Επιπλέον, η ύπαρξη χιονιού στη λεκάνη επιβραδύνει την απορροή, ενώ η τήξη αυτού στο τέλος του χειμώνα, αυξάνει την ποσότητα του νερού. Όσον αφορά τον καιρό, βροχές με μεγάλη ένταση έχουν ως αποτέλεσμα ταχύτερη απορροή, μικρότερους χρόνους υστέρησης και μεγαλύτερες μέγιστες παροχές.

11) Τα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά:

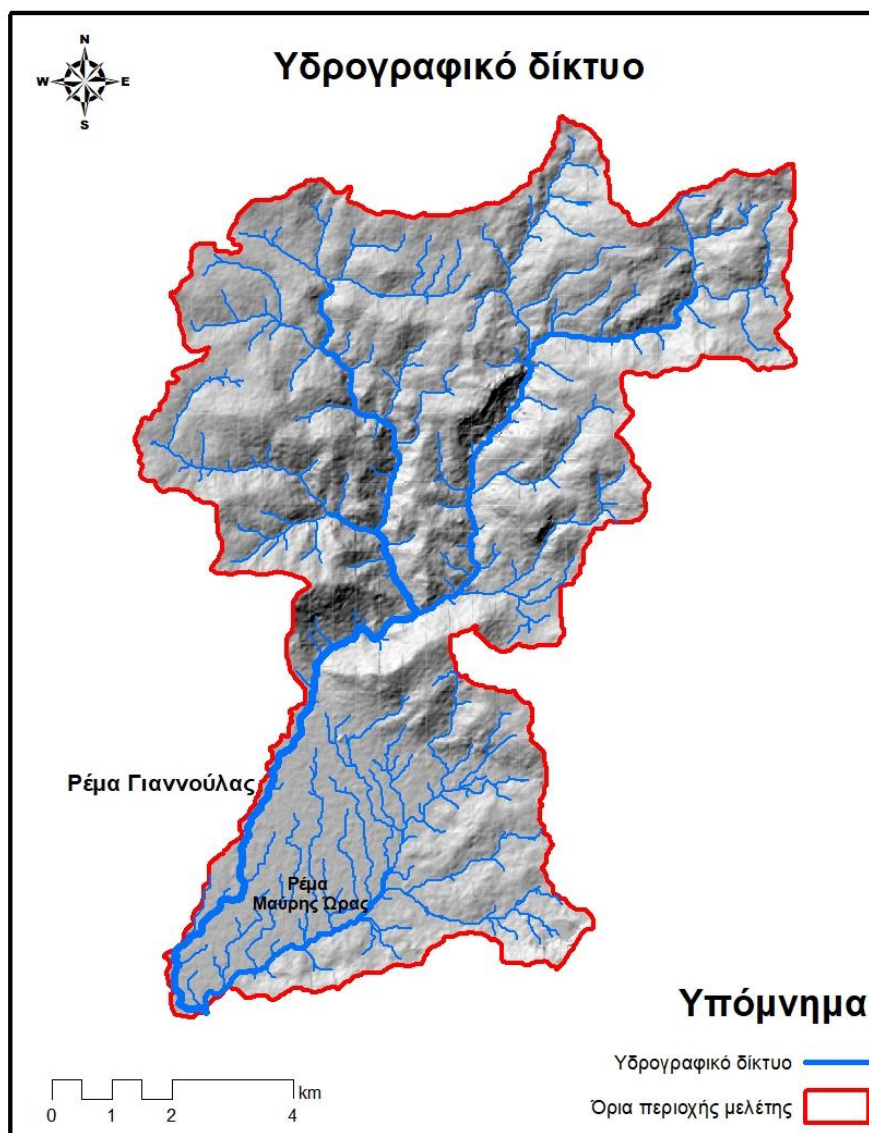
Οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε μια λεκάνη απορροής μπορούν να επηρεάσουν την απορροή και επομένως το σχήμα του υδρογραφήματος. Πρώτον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις αστικές περιοχές η απορροή είναι ταχύτερη. Η έντονη αστικοποίηση μπορεί λοιπόν να έχει ως συνέπεια την ταχεία δημιουργία πλημμυρών. Η αποψίλωση των δασών και η μείωση των χώρων πρασίνου έχει επίσης ως αποτέλεσμα λιγότερο νερό να συγκρατείται, άρα περισσότερο να ρέει επιφανειακά. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες όμως, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της ταχύτητας ροής και της μέγιστης πλημμυρικής παροχής του νερού σε έναν ποταμό ή ένα ρέμα μετά από καταιγίδα. Αυτό γίνεται μέσω αντιπλημμυρικών έργων, με τη δημιουργία φραγμάτων, με την άντληση μέρους του νερού των ποταμών για άρδευση, τη διευθέτηση των ρεμάτων κ.α.

ΚΕΦ.4: Περιοχή μελέτης

Το ρέμα Γιαννούλας βρίσκεται στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου, στη βιομηχανική περιοχή ανατολικά του Ασπροπύργου. Η λεκάνη απορροής του αποτελείται από έναν μεγάλο ορεινό όγκο με πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο και έκταση περίπου 60 km² (νοτιοδυτική Πάρνηθα), καθώς και από την πεδινή περιοχή του κάτω ρου του ρέματος, έως το σημείο που συμβάλλει με το Ρέμα Μαύρης Ώρας. Στο σημείο συμβολής η συνολική έκταση της λεκάνης είναι περίπου 86 km².

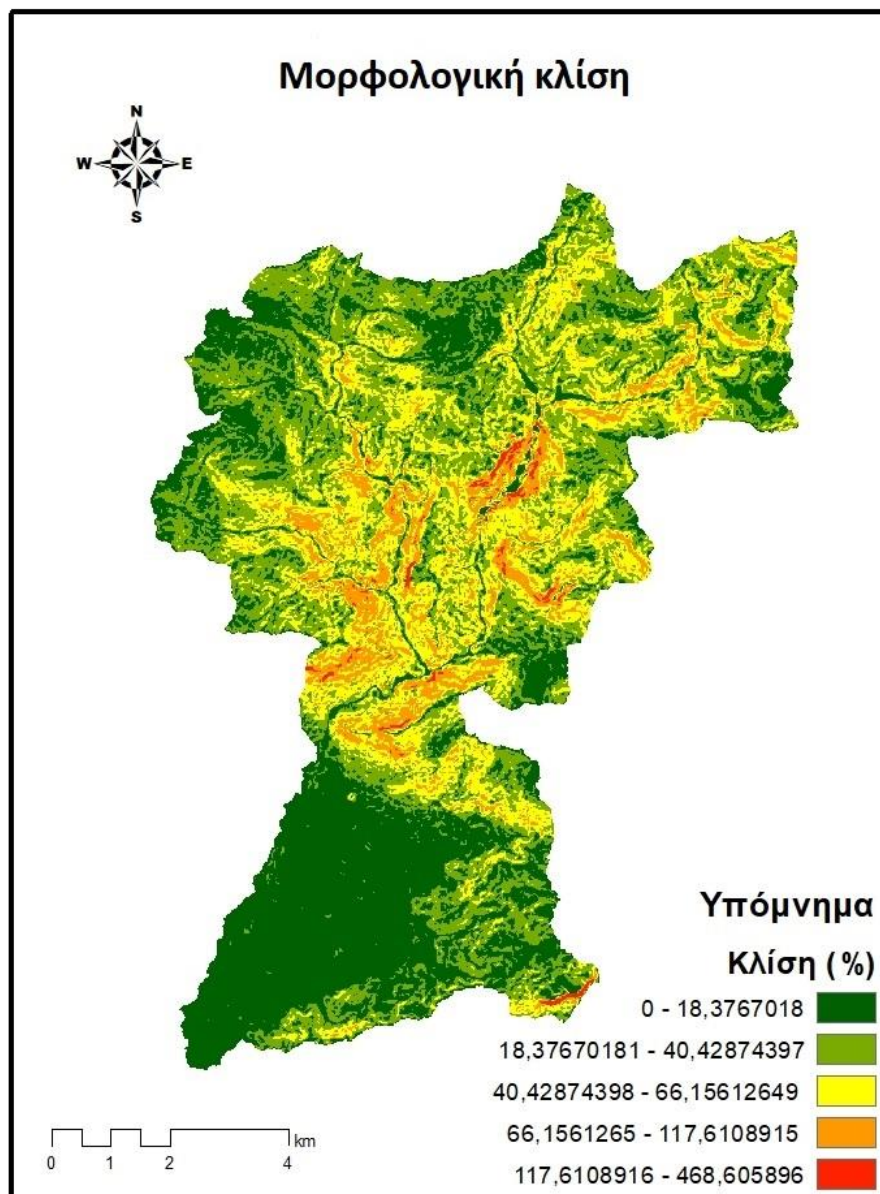


Εικόνα 4 Χάρτης τοποθεσίας της περιοχής μελέτης: λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας (Χαρτογραφικό υπόβαθρο: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community)

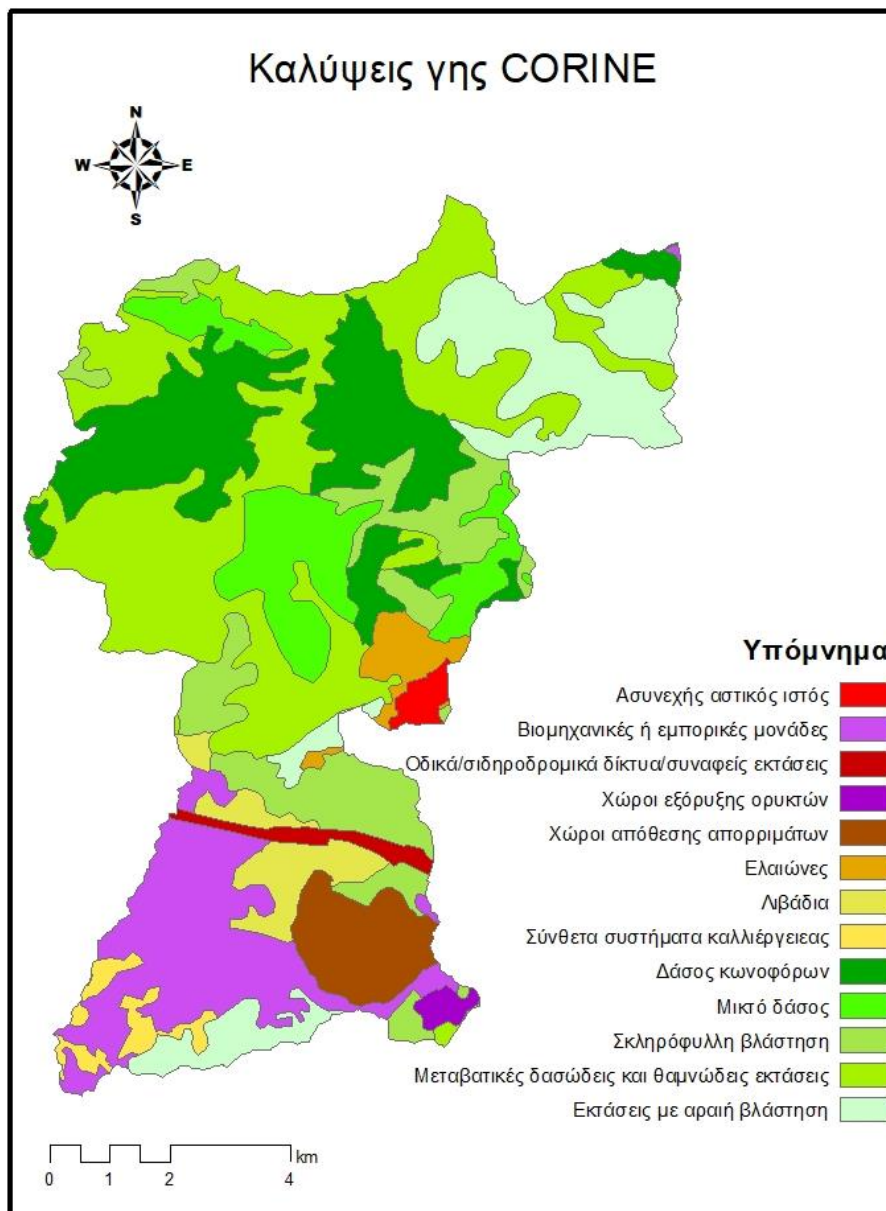


Εικόνα 5 Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης

Οι μορφολογικές κλίσεις είναι ιδιαίτερα υψηλές στο ορεινό τμήμα της λεκάνης, ενώ το νότιο τμήμα όπου βρίσκεται η βιομηχανική περιοχή χαρακτηρίζεται από αρκετά ήπιες κλίσεις. Στα ορεινά ωστόσο, συναντώνται περιοχές ήπιων κλίσεων στα βορειοδυτικά, ενώ στο πεδινό μέρος είναι πιο απότομες στα ανατολικά, καθώς εκεί βρίσκεται ένας μικρός ορεινός όγκος. Στην ορεινή λεκάνη κυριαρχούν κυρίως δάση κωνοφόρων και άλλες δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις, ενώ το πεδινό μέρος αποτελείται κυρίως από βιομηχανικές μονάδες και χώρους απόθεσης απορριμάτων. Στα κεντρικά και ανατολικά της λεκάνης συναντάται μια μικρή έκταση ασυνεχούς αστικού ιστού, που είναι ο οικισμός Φυλής.



Εικόνα 6 Χάρτης μορφολογικής κλίσης (%) της περιοχής μελέτης



Εικόνα 7 Χάρτης καλύψεων γης CORINE του 2018, για την περιοχή μελέτης (Πηγή δεδομένων: Copernicus Programme, 2022)

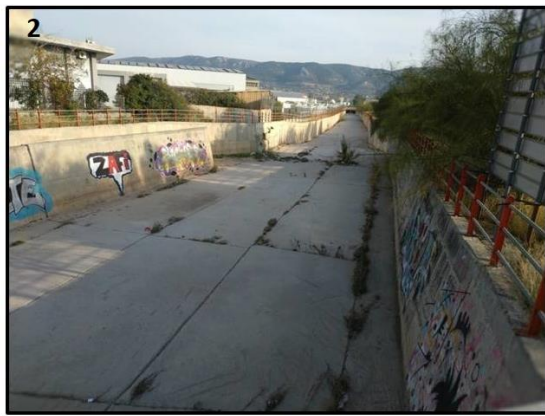
Από το σημείο που το ρέμα Γιαννούλας εξέρχεται από το ορεινό τμήμα της λεκάνης, μέχρι τη συμβολή του με το ρέμα Μαύρης Ώρας, έχει συνολικό μήκος περίπου 8,5 km. Στη διαδρομή αυτή η κεντρική κοίτη του ρέματος συναντά τη γέφυρα της Αττικής Οδού, τη γέφυρα του Προαστιακού Σιδηρόδρομου και στη συνέχεια αυτή της οδού Μεγαρίδος. Παρατηρώντας τα φερτά υλικά που έχουν αποτεθεί καταμήκος της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου τα οποία περιλαμβάνουν ευμεγέθεις κροκάλες και μεγάλων διαστάσεων ογκόλιθους, την έντονη κατά βάθος διάβρωση

της κοίτης, αλλά και τη διάβρωση των τεχνητών τοιχωμάτων της σε αρκετά σημεία, γίνεται φανερό ότι πρόκειται για ένα ρέμα με μεγάλη διαβρωτική ικανότητα. Στη γέφυρα στο ύψος της οδού Μεγαρίδος μπορεί να παρατηρηθεί ότι ένα μέρος της έχει υποστεί καταρρεύσεις, οι οποίες οφείλονται σε ακραίες πλημμυρικές παροχές του παρελθόντος.



Εικόνα 8 Φωτογραφικό υλικό από τον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας (α). Από πάνω αριστερά: 1 και 2) Καταρρεύσεις τμημάτων της γέφυρας Μεγαρίδος, 3) διάβρωση των τεχνητών τοιχωμάτων της κοίτης, 4) φερτά υλικά του ρέματος (ιδία λήψη)

Στην περιοχή που διασχίζει το ρέμα βρίσκεται μια πληθώρα βιομηχανικών και εμπορικών εγκαταστάσεων, σε πολλές από τις οποίες διέρχεται σε πολύ κοντινή απόσταση. Πριν φτάσει στο σημείο συμβολής με το ρέμα της Μαύρης Ώρας, η κοίτη του χάνεται καθώς έχει καλυφθεί, μέχρι να γίνει ξανά ορατή στην περιοχή κοντά στα διυλιστήρια. Σε εκείνες τις περιοχές είναι εμφανής η ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς η επιφάνεια και τα τοιχώματα της κοίτης είναι τεχνητά, αλλάζοντας εντελώς τις συνθήκες ροής του νερού σε περίπτωση βροχόπτωσης. Στην τεχνητή κοίτη συμβάλλει και ένα τρίτο ρέμα (ρέμα Διυλιστηρίων), το οποίο δε θα απασχολήσει την παρούσα εργασία. Η κοίτη τελικά, θα οδηγήσει την απορροή από τα τρία ρέματα στην παραλία του Ασπροπύργου.



Εικόνα 9 Φωτογραφικό υλικό από τον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας (β). Από πάνω αριστερά: 1) βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε κοντινή απόσταση από την κοίτη του ρέματος, 2) τμήμα της τεχνητά διευθετημένης κοίτης, 3) τμήμα που η κοίτη έχει καλυφθεί, 4) περιοχή συμβολής του ρέματος Γιαννούλας με το ρέμα Μαύρης Ώρας (ιδία λήψη)

ΚΕΦ.5: Μεθοδολογία

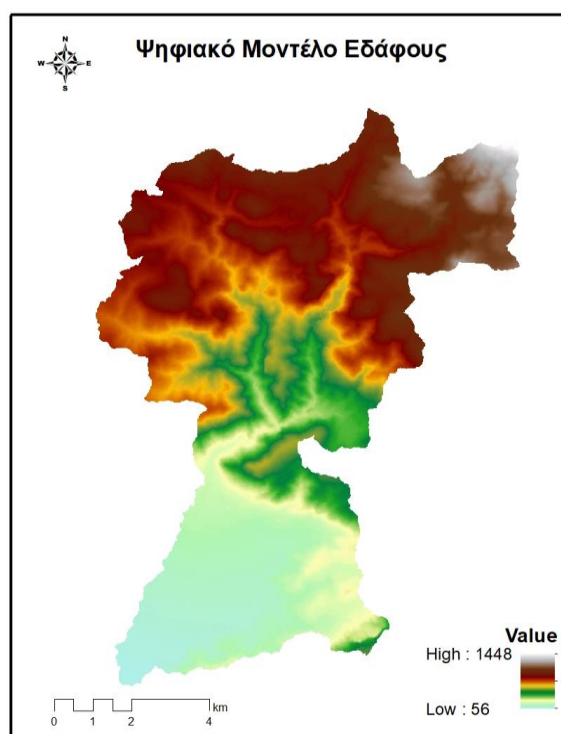
Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ενός μοντέλου απορροής, το οποίο αξιοποιεί τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), για τον υπολογισμό της παροχής συναρτήσει του χρόνου, κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού φαινομένου στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας. Στην πρώτη προσέγγιση γίνεται η παραδοχή ότι η βροχόπτωση που δέχτηκε η λεκάνη απορροής ανά ώρα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο, ενώ στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη η χωρικά ανομοιόμορφη κατανομή της στην έκταση της λεκάνης. Η μοντελοποίηση της απορροής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη διαχειριστικά, καθώς δεν υπάρχουν σταθμοί μέτρησης της παροχής κατά μήκος της κοίτης του ρέματος Γιαννούλας. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου περιγράφονται τα πρωτογενή δεδομένα της εργασίας και η επεξεργασία τους, ο τρόπος με τον οποίο οριοθετήθηκε η λεκάνη απορροής, το μοντέλο απορροής της εργασίας, καθώς και οι βασικές παραδοχές της μεθόδου που εφαρμόστηκε.

5.1. Δεδομένα και υλοποίηση

Τα πρωτογενή δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής στην παρούσα εργασία είναι:

- 1) ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης,
- 2) ψηφιδωτά επίπεδα (raster) ωριαίας βροχόπτωσης,
- 3) ένα επίπεδο καλύψεων γης της περιοχής.

Συγκεκριμένα, το πρώτο αφορά ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ALOS PALSAR High-Resolution DEM) της περιοχής μελέτης, με μέγεθος εικονοστοιχείου 12,5x12,5 m. Το προϊόν παρήγαγε και παρέχει ελεύθερα η δορυφορική υπηρεσία της Αλάσκα (ASF, 2022), μετά από εφαρμογή ραδιομετρικής διόρθωσης εδάφους. Οι Niirpele και Chen (2019), αναφέρονται στην ιδιότητα του ALOS DEM να εντοπίζει μικρού πλάτους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου λεκανών απορροής. Το μέγεθος εικονοστοιχείου και η ακρίβεια των δεδομένων κρίνονται κατάλληλα για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας, λόγω του περιορισμένου πλάτους της κοίτης του ρέματος στις περιοχές με μικρές μορφολογικές κλίσεις.



Εικόνα 10 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης (ALOS PALSAR High-Resolution DEM)

Τα επίπεδα βροχόπτωσης αφορούν 6 ψηφιδωτά (raster) επίπεδα (ανά ώρα), από το γεγονός της 6-ωρης βροχόπτωσης πάνω από την περιοχή μελέτης στις 16/11/2017. Είναι δεδομένα PERSIANN-CCS, υψηλής ανάλυσης (4x4 km) και χρονικής διακριτότητας 1 ώρας. Παρέχονται ελεύθερα στο αποθετήριο του Κέντρου Υδρομετεωρολογίας και Τηλεπισκόπησης CHRS Data Portal, του Πανεπιστημίου της California, Irvine (CHRS, 2022). Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα στατιστικά της βροχόπτωσης που δέχτηκε η κάθε επιμέρους λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης (η ανάλυση του διαχωρισμού της λεκάνης σε επιμέρους λεκάνες απορροής περιγράφεται παρακάτω) και στο χάρτη φαίνεται η κατανομή της 6ωρης αθροιστικής βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 1 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Α

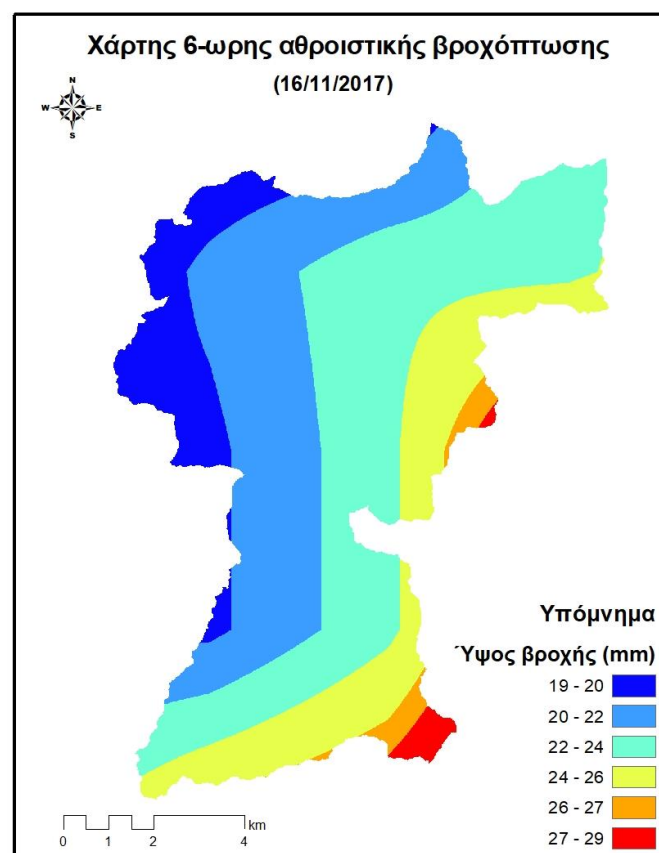
Ώρα βροχόπτωσης (UTC)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Τυπική απόκλιση
15:00-16:00	4	4	4	0
16:00-17:00	3	7	6,1	1,06
17:00-18:00	2	3	2,1	0,23
18:00-19:00	3	4	3,8	0,37
19:00-20:00	4	7	5,6	0,71
20:00-21:00	1	2	1	0,17

Πίνακας 2 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Β

Ώρα βροχόπτωσης (UTC)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Τυπική απόκλιση
15:00-16:00	4	4	4	0
16:00-17:00	3	7	6	1,19
17:00-18:00	2	4	2,1	0,27
18:00-19:00	3	5	3,9	0,37
19:00-20:00	4	7	5,6	0,72
20:00-21:00	1	2	1	0,16

Πίνακας 3 Στατιστικά της εξάωρης βροχόπτωσης (σε mm) στις 16/11/2017 στη λεκάνη απορροής Γ

Ώρα βροχόπτωσης (UTC)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Τυπική απόκλιση
15:00-16:00	4	4	4	0
16:00-17:00	3	8	5,8	1,3
17:00-18:00	2	5	2,3	0,62
18:00-19:00	3	6	3,9	0,4
19:00-20:00	4	8	5,8	0,73
20:00-21:00	1	3	1,1	0,37



Εικόνα 11 Κατανομή της εξάωρης αθροιστικής βροχόπτωσης στις 16/11/2017 πάνω από την περιοχή μελέτης

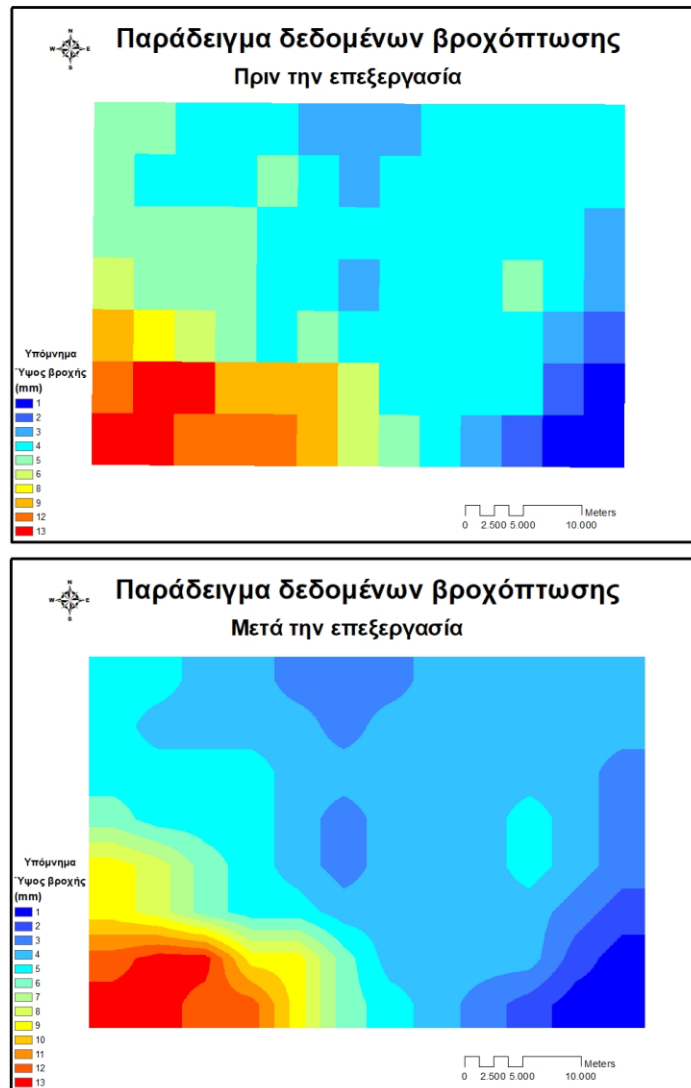
Τέλος, το επίπεδο καλύψεων γης είναι ένα διανυσματικό (vector) επίπεδο καλύψεων γης της περιοχής για το 2018 και παρέχεται ελεύθερα από την υπηρεσία CORINE του προγράμματος παρακολούθησης της γης Copernicus (Copernicus Programme, 2022). Το επίπεδο αυτό χρησιμεύει στην κατασκευή ενός χάρτη συντελεστή τραχύτητας της περιοχής, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Η επεξεργασία όλων των δεδομένων έγινε με το λογισμικό ArcGIS 10.8.1 καθώς και με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων. Η χρήση του λογισμικού ArcGIS κάνει την υλοποίηση της εργασίας ιδιαίτερα εύκολη λόγω του πλήθους υδρολογικών εργαλείων που περιέχει.

5.2. Προεπεξεργασία δεδομένων

Αρχικά, έγινε μετατροπή του συστήματος αναφοράς όλων τα δεδομένων στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ'87), το οποίο είναι κατάλληλο για τον ελληνικό χώρο. Πριν αξιοποιηθεί το DEM της περιοχής, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία του με το εργαλείο Fill του ArcMap, ώστε να εξομαλυνθούν τα σημεία ταπείνωσης του αναγλύφου (sinks) που πιθανώς περιέχει. Τα sinks, σύμφωνα με τον βοηθητικό οδηγό του ArcMap 10.8, είναι κελιά με απροσδιόριστη κατεύθυνση αποστράγγισης, με χαμηλότερες τιμές από όλα τα γειτονικά κελιά. Η ύπαρξη τέτοιων κελιών μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στο μοντέλο της απορροής.

Επιπλέον, για τους σκοπούς της εργασίας, τα επίπεδα βροχόπτωσης υπέστησαν ανασχεδιασμό με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής (κατάλληλη μέθοδος για συνεχή δεδομένα) με νέο μέγεθος κελιού 12,5x12,5 m. Αυτό το βήμα πραγματοποιήθηκε λόγω του μικρού μεγέθους της περιοχής μελέτης, με σκοπό τα δεδομένα να εξομαλυνθούν και έτσι να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο σε τυπικό για την περιοχή φαινόμενο βροχόπτωσης. Μετά από αυτήν την επεξεργασία δεν αποτελούν ακριβή αναπαράσταση της κατάστασης της ατμόσφαιρας για τις 16/11/2017. Παρόλα αυτά είναι επαρκή για το ζητούμενο της παρούσας εργασίας, εφόσον αυτή δεν αποτελεί προσπάθεια ακριβούς αναπαράστασης ενός πραγματικού παρελθοντικού πλημμυρικού γεγονότος. Επιπροσθέτως, σε κάθε επίπεδο βροχόπτωσης έγινε μετατροπή των τιμών από mm ύψους βροχής σε m.



Εικόνα 12 Παράδειγμα επεξεργασίας των δεδομένων βροχόπτωσης

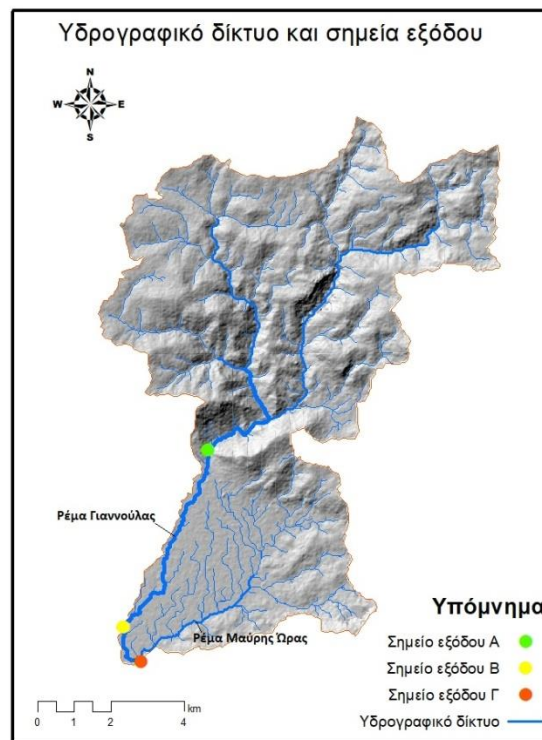
Τέλος, το διανυσματικό επίπεδο καλύψεων γης μετατράπηκε σε ψηφιδωτό, με μέγεθος εικονοστοιχείου 12,5x12,5 m, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί στη συνέχεια. Σε όλα τα δεδομένα έγινε αποκοπή στα όρια της περιοχής μελέτης.

5.3. Οριοθέτηση της λεκάνης απορροής

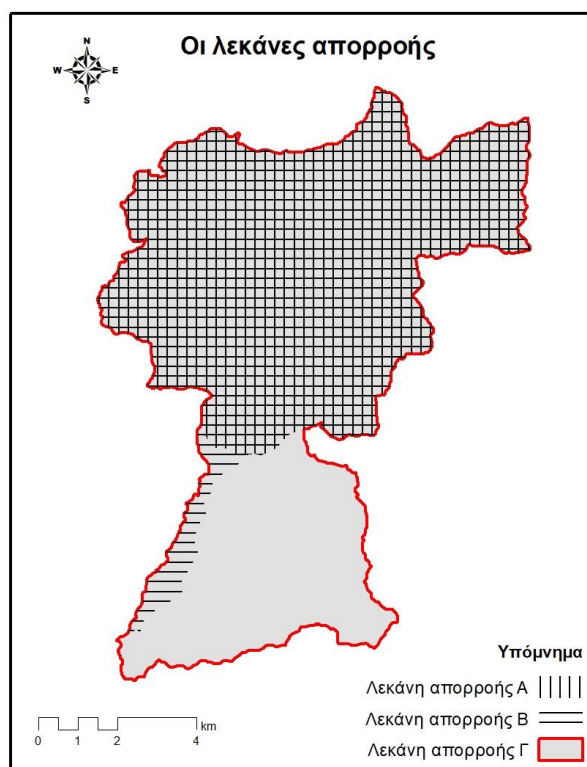
Η οριοθέτηση της λεκάνης απορροής έγινε με τη χρήση του επεξεργασμένου DEM καθώς και σημειακών δεδομένων εξόδου του νερού, αξιοποιώντας τα υδρολογικά εργαλεία του λογισμικού ArcMap. Από το DEM δημιουργήθηκε ένα επίπεδο κατεύθυνσης της ροής και από αυτό ένα επίπεδο συσσώρευσης της ροής. Στο επίπεδο συσσώρευσης της ροής γίνεται ορατό το ρέμα Γιαννούλας, κατά μήκος του οποίου επιλέχθηκαν τα σημεία εξόδου. Τα σημεία αυτά αντιπροσωπεύουν κελιά (εικονοστοιχεία) τα οποία δέχονται νερό από όλα τα υπόλοιπα κελιά της λεκάνης, και σε αυτά θα γίνει ο υπολογισμός της παροχής του νερού. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τρία σημεία εξόδου σε διατομές κατά μήκος του ρέματος, σύμφωνα με

τα οποία οριοθετήθηκαν και οι τρεις λεκάνες απορροής που αυτά καθορίζουν. Αυτό έγινε με τη χρήση του επιπέδου κατεύθυνσης ροής και των σημειακών δεδομένων.

Η κάθε λεκάνη αποτελείται από την περιοχή που καθορίζει το προηγούμενο σημείο εξόδου προστιθέμενης της περιοχής από την οποία δέχεται επιπλέον νερό το επόμενο σημείο, όπως φαίνεται στους ακόλουθους χάρτες:



Εικόνα 13 Υδρογραφικό δίκτυο και σημεία εξόδου Α, Β και Γ της περιοχής μελέτης



Εικόνα 14 Η λεκάνη απορροής Γ και οι υπολεκάνες Α και Β της περιοχής μελέτης

Τα παραπάνω θα αναφέρονται στην εργασία ως σημεία εξόδου Α, Β και Γ, και αντίστοιχα λεκάνη απορροής Α, Β και Γ. Τα σημεία εξόδου ορίστηκαν κατά μήκος του κύριου κλάδου του ρέματος, σε τοποθεσίες που κρίθηκαν σημαντικές για μετρήσεις παροχής. Η επιλογή τους έγινε μετά από επιτόπια έρευνα σε συνδυασμό με παρατήρηση ψηφιακών χαρτών, βήματα τα οποία ήταν απαραίτητα για τον εντοπισμό τρωτών σημείων ενδιαφέροντος για την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί.

Το σημείο εξόδου Α βρίσκεται στην τοποθεσία όπου καταλήγει το νερό της απορροής από όλο το ορεινό τμήμα της λεκάνης. Στο σημείο αυτό φανερώνεται η δυναμική ενός μεγάλου ορεινού όγκου ο οποίος συνεισφέρει στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων νερού στην πεδινή περιοχή, όπου λαμβάνουν χώρα σημαντικές ανθρώπινες δραστηριότητες. Το σημείο εξόδου Β βρίσκεται στο ύψος της γέφυρας επί της οδού Μεγαρίδος (στην πεδινή περιοχή της λεκάνης). Η γέφυρα αυτή έχει υποστεί καταρρεύσεις, από πλημμυρικά γεγονότα του παρελθόντος, όπως φαίνεται στο φωτογραφικό υλικό που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μετρήσεις παροχής στη διατομή αυτή εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να αποκαλύψουν την τιμή των πλημμυρικών παροχών που είναι πιθανό να επιφέρουν ζημιές στη γέφυρα. Τέλος, το σημείο εξόδου Γ βρίσκεται προς τα κατάντη, στο μέρος που το ρέμα Γιαννούλας, συμβάλλει με το μικρότερο γειτονικό ρέμα (ρέμα Μαύρης Ώρας). Στην πραγματικότητα το σημείο συμβολής των δύο

ρεμάτων βρίσκεται νοτιότερα, κοντά στα διυλιστήρια του Ασπροπύργου. Αυτό το σφάλμα οφείλεται είτε στις εξαιρετικά μικρές μορφολογικές κλίσεις με αποτέλεσμα το ακριβές ALOS PALSAR DEM να μην εντοπίζει με ακρίβεια τη θέση του σημείου συμβολής, ή στα έργα διευθέτησης των καναλιών που πραγματοποιήθηκαν πρόσφατα στην περιοχή. Παρά αυτό το γεγονός θα ληφθεί υπόψη η μέτρηση στο τρίτο σημείο εξόδου για τους παρακάτω λόγους:

1) η απόσταση σφάλματος δεν είναι πολύ μεγάλη ώστε το αποτέλεσμα να διαφέρει σημαντικά,

2) μια μεγάλη ποσότητα νερού επιφανειακής απορροής μεταφέρεται έτσι κι αλλιώς σε εκείνο το σημείο από το διπλανό ρέμα και η περιοχή περιβάλλεται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, επομένως μια πιθανή αύξηση της παροχής είναι λογικό να ενδιαφέρει για διαχειριστικούς λόγους,

3) θα διερευνηθεί με αυτόν τον τρόπο αν ήταν πράγματι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν τα έργα διευθέτησης της κοίτης στη συγκεκριμένη περιοχή.

Άρα, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η συνεισφορά του ρέματος Μαύρης Ώρας στην παροχή της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας. Το σφάλμα αυτό βέβαια, έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτιμηθεί και η συνεισφορά του ρέματος Διυλιστηρίων στην κεντρική κοίτη. Αυτό το γεγονός δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς η παρούσα εργασία αφορά κυρίως το ρέμα Γιαννούλας και συμπληρωματικά, εξετάζεται η συνεισφορά του ρέματος Μαύρης Ώρας.

5.4. Το μοντέλο απορροής

Το μοντέλο απορροής της παρούσας εργασίας βασίζεται στη δουλειά πολυάριθμων ερευνητών όπως οι Maidment et al (1996), Musik (1996), Melesse και Graham (2004), Du et al (2009), αλλά έχει εφαρμοστεί και μεταγενέστερα από τους Karymbalis et al (2012), Tsanakas et al (2016) κ.α. ως μια δόκιμη μέθοδος. Σκοπός είναι η κατασκευή ενός συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος, για κάθε ένα από τα σημεία εξόδου που ορίστηκαν για τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας. Η μέθοδος χρησιμεύει για την πρόβλεψη περιοχών που είναι επιρρεπείς σε ακραία πλημμυρικά φαινόμενα και επιπλέον ενδείκνυται για εκτιμήσεις σε ποταμούς που δε διαθέτουν σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης και παροχής στη λεκάνη απορροής τους (Kalogeropoulos et al, 2013).

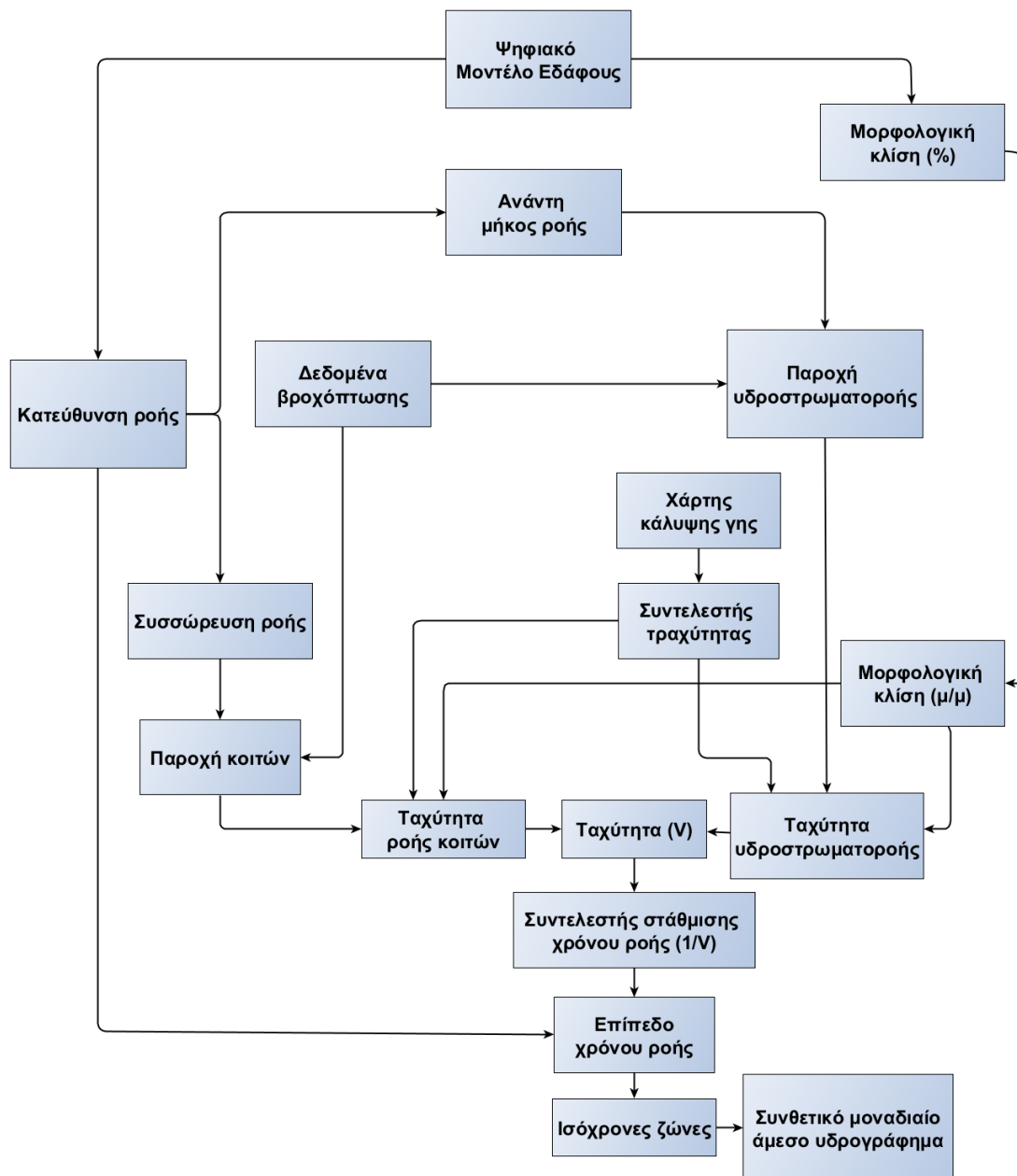
Για την υλοποίησή της τα κύρια δεδομένα εισόδου που επεξεργάζονται σε περιβάλλον ΣΓΠ είναι ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, ένα επίπεδο συντελεστή τραχύτητας και ψηφιδωτά επίπεδα βροχόπτωσης. Σκοπός της χρήσης των ΣΓΠ είναι η κατασκευή ενός επιπέδου χρόνου ροής, από την επαναταξινόμηση του οποίου δημιουργείται ένας χάρτης ισόχρονων καμπυλών ανά χρονική περίοδο επιφανειακής απορροής. Από εκεί ανακτώνται τα εμβαδά κάθε ισόχρονης ζώνης

που σχηματίζεται μεταξύ των καμπυλών, τα οποία χρησιμεύουν στη συνέχεια για την κατασκευή του υδρογραφήματος.

Δύο προσεγγίσεις του μοντέλου απορροής εφαρμόζονται στην εργασία. Στην πρώτη προσέγγιση γίνεται η συνήθης παραδοχή του μοναδιαίου υδρογραφήματος, ότι οι τιμές του ύψους βροχής που δέχτηκε η λεκάνη, ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες, ανά ώρα βροχόπτωσης, στο σύνολο της έκτασής της (μέση τιμή της βροχόπτωσης ανά ώρα). Στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη η άνιση κατανομή της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής όπως έχει γίνει και από τους Musik (1996), Du et al (2009), Kalogeropoulos et al (2013) κ.α. Η άνιση κατανομή της βροχόπτωσης λαμβάνεται υπόψη τόσο για την κατασκευή των χαρτών ισόχρονων καμπυλών, όσο και για τον υπολογισμό της παροχής ανά ώρα για τη δημιουργία του υδρογραφήματος. Οι δύο προσεγγίσεις του μοντέλου εξετάζονται ώστε μετά από σύγκριση των πλημμυρικών αιχμών και των χρόνων υστέρησης που προκύπτουν από την κάθε μια, να γίνει αισθητή η επιρροή που έχουν τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης στην απορροή.

Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για τη μοντελοποίηση της απορροής είναι το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης, η κατεύθυνση της ροής του νερού, η ροή μέσω υδρογραφικού δικτύου ή ως υδροστρωματοροή, η μορφολογική κλίση, η τραχύτητα του εδάφους, η ένταση της βροχής και η κατανομή της στο χώρο.

Στο εννοιολογικό μοντέλο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διεργασίες που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή των υδρογραφημάτων για κάθε ένα από τα τρία σημεία εξόδου και για τις δύο προσεγγίσεις της μεθόδου. Οι διεργασίες περιγράφονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια.



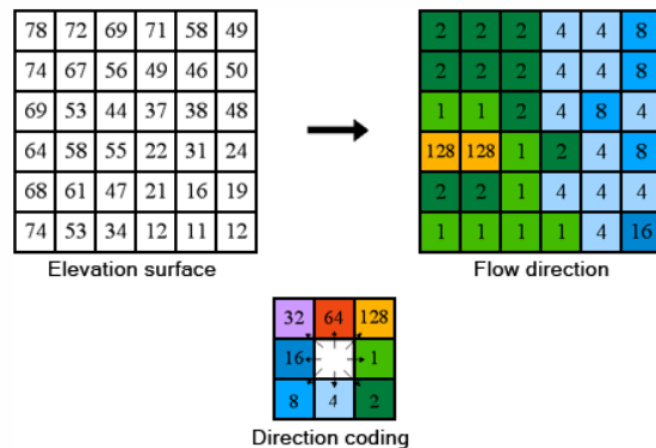
Σχήμα 1 Εννοιολογικό μοντέλο της μεθόδου της εργασίας

5.4.1. Παράγωγα του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

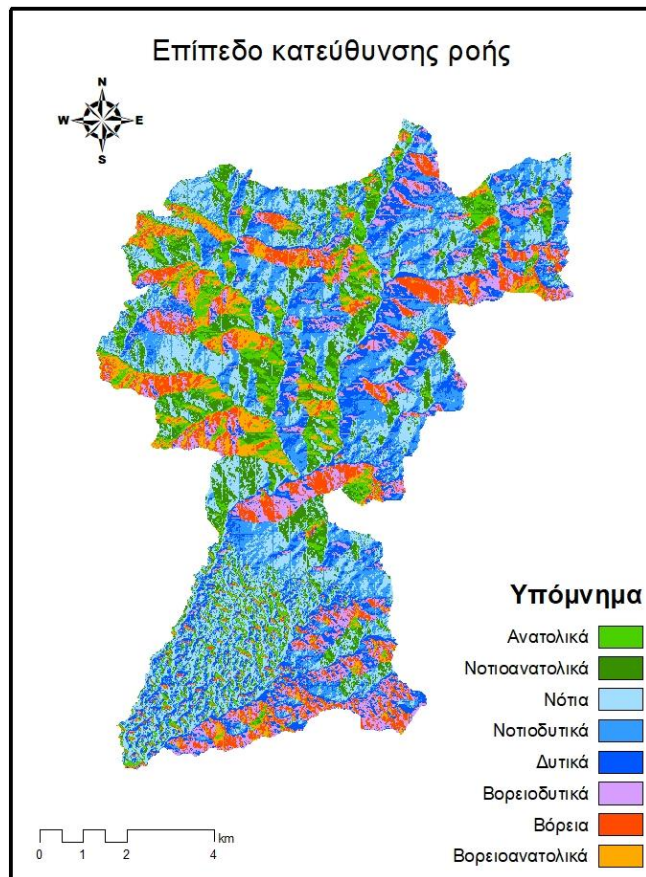
Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) έχει βασικό ρόλο στην υλοποίηση της εργασίας. Αφού εξωμαλυνθούν τα σημεία ταπείνωσης του αναγλύφου (sinks) παράγεται από αυτό, το επίπεδο κατεύθυνσης της ροής, από το οποίο προκύπτει το επίπεδο συσσώρευσης της ροής και το επίπεδο ανάντη μήκους ροής. Επιπλέον, από το DEM δημιουργείται το επίπεδο των μορφολογικών κλίσεων (%), από το οποίο προκύπτει το επίπεδο μορφολογικών κλίσεων μ/μ.

Ξεκινώντας από το επίπεδο κατεύθυνσης της ροής, πρόκειται για ένα ψηφιδωτό επίπεδο ακέραιων τιμών, το οποίο δημιουργήθηκε με ένα μοντέλο οκτώ κατευθύνσεων (D8) και λαμβάνει τιμές 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 και 128 στα κελιά του. Οι

τιμές παραπέμπουν σε κάθε μία από τις ακόλουθες κατευθύνσεις: ανατολικά (1), νοτιοανατολικά (2), νότια (4), νοτιοδυτικά (8), δυτικά (16), βορειοδυτικά (32), βόρεια (64) και βορειοανατολικά (128). Ο τρόπος που δημιουργείται αυτό το επίπεδο, σύμφωνα με τον βοηθητικό οδηγό του ArcMap (ESRI, 2016a), είναι υπολογίζοντας την μεγαλύτερη κατηφορική κλίση κάθε κελιού από τα γειτονικά του. Συγκεκριμένα, ο γενικός κανόνας που ακολουθείται για τη δημιουργία του επιπέδου, είναι ότι εντοπίζονται τα κελιά που έχουν χαμηλότερη τιμή από τα οκτώ γειτονικά τους και τους δίνεται η τιμή του χαμηλότερου γειτονικού κελιού. Η κατεύθυνση ροής ορίζεται προς αυτό το κελί.

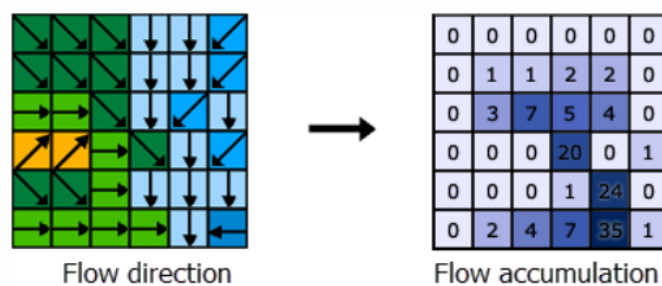


Σχήμα 2 Παράδειγμα δημιουργίας επιπέδου κατεύθυνσης ροής (Πηγή: (ESRI, 2016b))



Εικόνα 15 Επίπεδο κατεύθυνσης ροής της περιοχής μελέτης

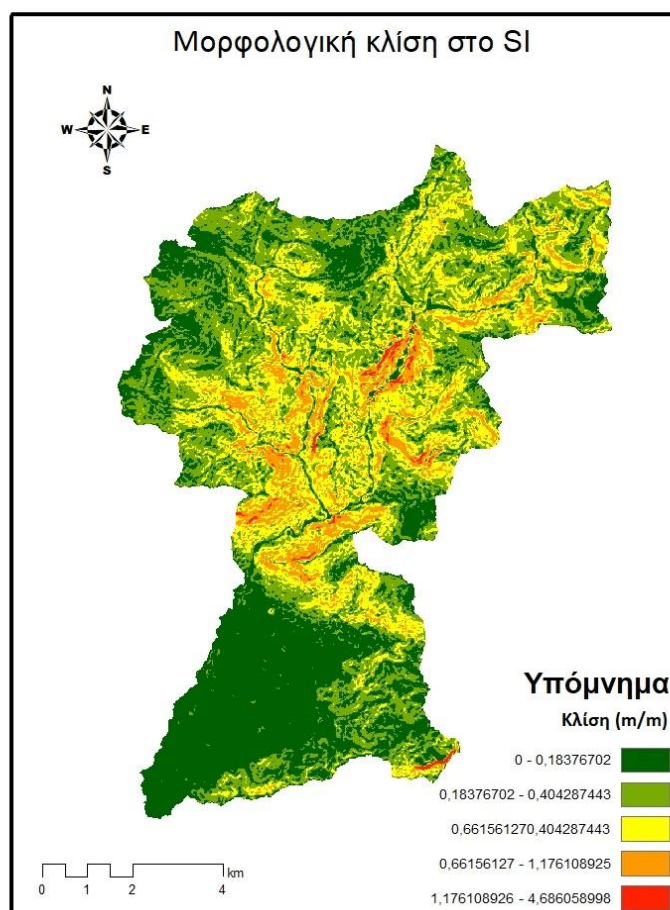
Το επίπεδο συσσώρευσης της ροής που παράγεται αξιοποιώντας την κατεύθυνση ροής, είναι ένα ψηφιδωτό επίπεδο με τιμές συσσωρευμένης ροής σε κάθε κελί. Το κάθε κελί παίρνει δηλαδή τιμή ίση με τον αριθμό των κελιών που ρέουν προς αυτό (ESRI, 2016c). Έτσι, τα κελιά με μηδενικές τιμές είναι σημεία που δε δέχονται νερό από κανένα άλλο κελί, αυτά με τις μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στις περιοχές των κοιτών του υδρογραφικού δικτύου, ενώ το κελί με τη μέγιστη τιμή αποτελεί το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 3 Παράδειγμα δημιουργίας επιπέδου συσσώρευσης ροής (Πηγή: ESRI, 2016c)

Το επίπεδο ανάντη μήκους ροής παράγεται επίσης από τη συσσώρευση ροής. Δημιουργείται από τον υπολογισμό της απόστασης ανάντη ή κατάντη, ή της σταθμισμένης απόστασης, κατά μήκος της διαδρομής της ροής για κάθε κελί (ESRI, 2016d).

Το επίπεδο της μορφολογικής κλίσης (%) που παράχθηκε από το DEM μπορεί να λάβει τιμές από 0 % έως το άπειρο, με το 0% να απεικονίζει επίπεδες επιφάνειες, το 100% μια κλίση 45 μοιρών και όσο οι κλίσεις γίνονται πιο κάθετες, το ποσοστό αυξάνεται αναλόγως (ESRI, 2016e). Για τη δημιουργία του υπολογίζεται ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής υψομέτρου από ένα κελί του DEM σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του (ESRI, 2016e). Το επίπεδο αυτό δε χρησιμοποιείται αυτούσιο, αλλά από αυτό παράγεται το επίπεδο της μ/μ (μέτρο ανά μέτρο) μορφολογικής κλίσης. Δημιουργείται από διαίρεση του επιπέδου κλίσεων (%) με το 100, ώστε η μονάδα μέτρησής του να είναι πλέον στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI).



Εικόνα 16 Επίπεδο μορφολογικών κλίσεων μέτρο ανά μέτρο (μ/μ) της περιοχής μελέτης

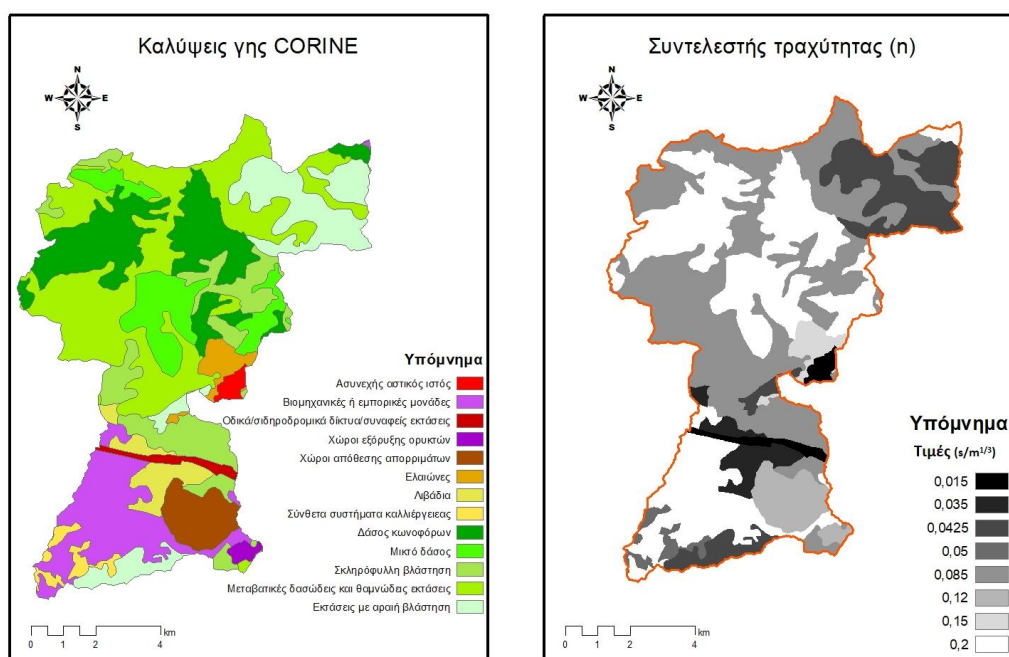
5.4.2. Επίπεδο συντελεστή τραχύτητας

Το επίπεδο του συντελεστή τραχύτητας Manning (n) δημιουργήθηκε από την επαναταξινόμηση του raster επιπέδου καλύψεων γης της περιοχής μελέτης. Μετά

από βιβλιογραφική μελέτη αποδόθηκε σε κάθε κατηγορία κάλυψης γης η ανάλογη μέση τιμή του συντελεστή τραχύτητας, σύμφωνα με τον Huang (2005). Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας που αποδόθηκαν σε κάθε κατηγορία κάλυψης γης:

Πίνακας 4 Συντελεστής τραχύτητας Manning για κάθε κάλυψη γης της περιοχής μελέτης, κατά τον Huang (2005)

Κατηγορία κάλυψης γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning ($s/m^{1/3}$)
Ασυνεχής αστικός ιστός	0,015
Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	0,2
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφείς εκτάσεις	0,015
Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0,12
Χώροι απόθεσης απορριμμάτων	0,12
Ελαιώνες	0,15
Λιβάδια	0,035
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0,05
Δάσος κωνοφόρων	0,2
Μικτό δάσος	0,2
Σκληρόφυλλη βλάστηση	0,085
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0,085
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0,0425



Εικόνα 17 Χάρτης καλύψεων γης της περιοχής μελέτης σε σύγκριση με τον παραγόμενο χάρτη συντελεστή τραχύτητας

5.4.3. Επίπεδα παροχής απορροής

Όπως έχει αναλυθεί, σκοπός της μεθόδου που εφαρμόζεται στην εργασία είναι αρχικά η δημιουργία ενός επιπέδου ισόχρονων ζωνών ανά χρονικό διάστημα επιφανειακής απορροής, το οποίο θα αξιοποιηθεί για την κατασκευή του υδρογραφήματος. Για να παρασκευαστεί το επίπεδο αυτό αρχικά είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παροχής των κοιτών και της παροχής της στρωματοροής στη λεκάνη απορροής. Η παροχή (m^3/s) στις περιοχές των κοιτών υπολογίζεται από τον τύπο:

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

όπου i είναι η ένταση της βροχής (m/s), flow accumulation η συσσώρευση ροής και cell size το μέγεθος κελιού (m). Έπειτα, η παροχή υδροστρωματοροής (m^2/s) υπολογίζεται από τον τύπο:

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

όπου i είναι η ένταση της βροχής (m/s) και $l_{upstream}$ το ανάντη μήκος ροής. Οι τύποι αυτοί εφαρμόζονται και για τις δυο προσεγγίσεις της μεθόδου της παρούσας εργασίας. Στην πρώτη προσέγγιση η τιμή της βροχής κάθε ώρα είναι η μέση τιμή της βροχής που δέχτηκε η λεκάνη απορροής, όπως ανακτήθηκε από τα raster βροχόπτωσης. Η ένταση της βροχόπτωσης (i σε m/s) αποτελεί την τιμή της βροχόπτωσης που δέχτηκε συνολικά η λεκάνη απορροής, προς τη συνολική διάρκεια βροχόπτωσης:

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

όπου P_j είναι η τιμή της βροχόπτωσης (σε m) που δέχτηκε η λεκάνη σε κάθε ώρα και Δt η συνολική διάρκεια της βροχής (σε s). Η ίδια λογική ακολουθείται και στην περίπτωση της δεύτερης προσέγγισης. Η διαφορά είναι ότι τώρα η ένταση της βροχής αποτελεί ένα επίπεδο raster που προκύπτει από την πρόσθεση των επιμέρους raster επιπέδων βροχόπτωσης και τη διαίρεσή τους με το συνολικό χρόνο διάρκειας της βροχόπτωσης. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική ένταση της βροχής για κάθε κελί της λεκάνης απορροής, η οποία επηρεάζει την έκταση και το πλήθος των ισόχρονων ζωνών.

5.4.4. Επίπεδο ταχύτητας απορροής

Στη συνέχεια για την δημιουργία του επιπέδου ταχύτητας ροής ήταν απαραίτητη η κατασκευή ενός επιπέδου ταχύτητας ροής των κοιτών (V_{ch}), καθώς και ενός επιπέδου ταχύτητας της υδροστρωματοροής (V_{over}). Η ταχύτητα ροής των κοιτών

υπολογίζεται με τον τύπο που προτείνουν οι Du et al (2009), ο οποίος προκύπτει από τον τύπο του Manning και την εξίσωση της συνέχειας:

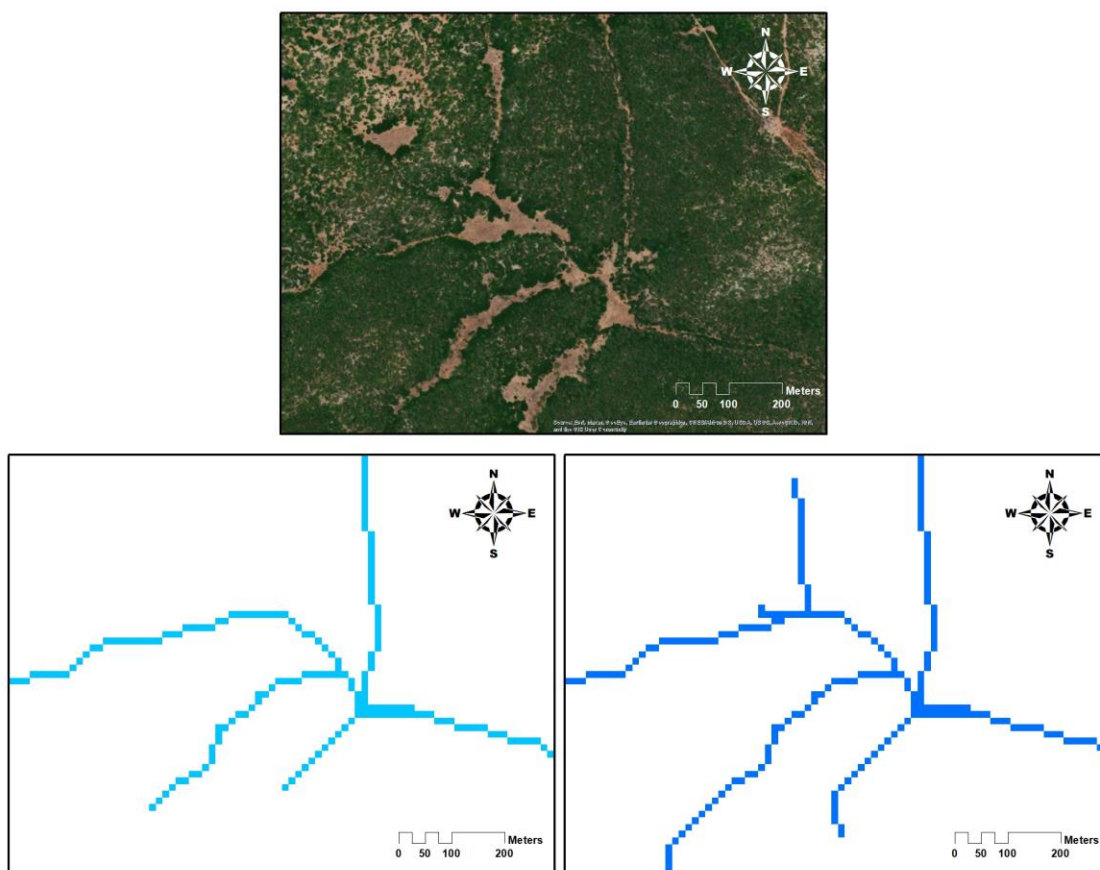
$$V_{ch} = K S^{3/8} Q_{ch}^{1/4} n^{-3/4}$$

όπου K είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης για σφάλματα στο επίπεδο κλίσεων και τον συντελεστή τραχύτητας, S το επίπεδο μορφολογικών κλίσεων μ/μ που κατασκευάστηκε (m/m), Q_{ch} το επίπεδο παροχής των καναλιών (m³/s) και n ο συντελεστής τραχύτητας Manning (s/m^{1/3}). Το επίπεδο της ταχύτητας υδροστρωματοροής υπολογίζεται με τον τύπο των Du et al (2009), ο οποίος προκύπτει από τον τύπο του Manning για 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 (m/m), Q_{over} το επίπεδο παροχής της υδροστρωματοροής (m²/s) και n ο συντελεστής τραχύτητας (s/m^{1/3}).

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το επίπεδο συνολικής ταχύτητας V , που περιέχει τις τιμές της ταχύτητας της ροής στις κοίτες και τις τιμές της ταχύτητας υδροστρωματοροής στις υπόλοιπες περιοχές της λεκάνης. Για να γίνει αυτό, ήταν απαραίτητο να οριστεί ένα κατώτατο όριο των τιμών του επιπέδου συσσώρευσης ροής, σύμφωνα με το οποίο καθορίστηκαν οι κοίτες του υδρογραφικού δικτύου και οι περιοχές που το νερό ρέει ως υδροστρωματοροή. Το κατώτατο όριο συσσώρευσης ροής που ορίστηκε στην περίπτωση της εργασίας είναι το 500, το οποίο επιλέχθηκε μετά από δοκιμές κατώτατων ορίων στο επίπεδο συσσώρευσης ροής και συγκριτική παρατήρηση των παραγόμενων επιπέδων με έναν ψηφιακό χάρτη δορυφορικών εικόνων.



Εικόνα 18 Παράδειγμα επιλογής κατώτατου ορίου συσσώρευσης ροής για τον καθορισμό των κοιτών του υδρογραφικού δικτύου. Στον άνω χάρτη διακρίνεται ένα μικρό μέρος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου της ορεινής λεκάνης απορροής. Κάτω στο σχήμα, συγκρίνονται δύο χάρτες συσσώρευσης ροής της ίδιας περιοχής, ο πρώτος με κατώτατο όριο 1000 (αριστερά) και ο δεύτερος με 500 (δεξιά).

Η τιμή αυτή θεωρήθηκε ότι ορίζει τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου με τα λιγότερα δυνατών σφάλματα. Το επίπεδο συνολικής ταχύτητας έγινε με τη διατύπωση της συνθήκης: $\text{con}(\text{flow_accumulation} > 500, V_{ch}, V_{over})$ στο εργαλείο Raster calculator του ArcMap. Στα σημεία δηλαδή που η συσσώρευση ροής είναι μεγαλύτερη αυτού του ορίου το επίπεδο λαμβάνει τιμές ταχύτητας ροής κοιτών (V_{ch}), ενώ στις υπόλοιπες περιοχές παίρνει τιμές ταχύτητας υδροστρωματοροής (V_{over}).

5.4.5. Επίπεδο ισόχρονων ζωνών

Η κατασκευή του επιπέδου χρόνου ροής βασίζεται στη λογική του γνωστού τύπου της ταχύτητας:

$$V = \Delta s / \Delta t$$

όπου s είναι η απόσταση (m) και t ο χρόνος (sec). Λύνοντας ως προς το χρόνο και εφαρμόζοντας τον τύπο στην περίπτωση μας, έχουμε για κάθε κελί της λεκάνης:

$$t = L / V$$

όπου L είναι το μήκος της διαδρομής της ροής σε κάθε κελί (m) και V η ταχύτητα ροής σε κάθε κελί (m/s). Για να γίνει αυτό, πρώτα δημιουργείται ένα επίπεδο στάθμισης του χρόνου απορροής ($1/V$). Αυτό χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως συντελεστής στη δημιουργία ενός επιπέδου κατάντη μήκους απορροής, το οποίο αποτελεί το επιθυμητό επίπεδο χρόνου ροής. Από επαναταξινόμηση των τιμών του raster χρόνου ροής ανά ώρα βροχόπτωσης παράγεται το raster ισόχρονων ζωνών, από τις οποίες ανακτώνται τα αντίστοιχα εμβαδά.

5.4.6. Υδρογράφημα απορροής

Η κατασκευή των υδρογραφημάτων για κάθε προσέγγιση της μεθόδου έγινε με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων. Για την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης στη λεκάνη, η άμεση απορροή είναι το άθροισμα του όγκου του νερού που απορρέει για κάθε ισόχρονη ζώνη, προς τον αντίστοιχο χρόνο:

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

όπου P_j είναι η συνολική βροχή (m) που δέχτηκε η λεκάνη σε χρονικό διάστημα j , και A_i το εμβαδόν (m^2) της κάθε ισόχρονης ζώνης. Στην περίπτωση δημιουργίας του υδρογραφήματος με τα raster επίπεδα βροχόπτωσης, πολλαπλασιαζόταν κάθε εμβαδό ισόχρονης ζώνης κάθε φορά με την αντίστοιχη τιμή βροχόπτωσης που δέχτηκαν τα κελιά της συγκεκριμένης ζώνης:

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

όπου P_{ij} είναι η συνολική βροχή (m) που δέχτηκαν τα κελιά της κάθε ισόχρονης ζώνης σε χρονικό διάστημα j και A_i είναι το εμβαδόν (m^2) της κάθε ισόχρονης ζώνης. Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν για κάθε ένα από τα σημεία εξόδου A, B και Γ που επιλέχθηκαν κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας.

5.5. Παραδοχές

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύονται και αιτιολογούνται οι βασικές παραδοχές που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία:

- Στην πραγματικότητα, ένα μέρος του νερού που δέχεται μια λεκάνη απορροής κατεισδύει στους γεωλογικούς σχηματισμούς (πετρώματα και εδάφη) ή ρέει υπογείως. Τα πλημμυρικά φαινόμενα δεν προκαλούνται από το νερό που χάνεται αλλά από αυτό που ρέει επιφανειακά (πλεονάζον νερό ή excess rainfall στην αγγλική βιβλιογραφία). Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται αποδεκτό ότι όποια ποσότητα νερού βροχής δέχεται η λεκάνη,

απορρέει επιφανειακά, χωρίς μέρος της να κατεισδύει. Επομένως, οι τιμές ύψους βροχής θα θεωρούνται ως πλεονάζον νερό.

- Όπως αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο τρόπος επεξεργασίας των επιπέδων raster της βροχόπτωσης, δεν αποτελεί δόκιμη μέθοδο ακριβούς αναπαράστασης της ατμόσφαιρας.
- Στο μοντέλο απορροής που εφαρμόζεται δίνεται η δυνατότητα βαθμονόμησης μετά από εφαρμογή επιτόπιων μετρήσεων της παροχής (συντελεστής βαθμονόμησης K). Στην εργασία θα δεχτούμε ότι $K = 1$, λόγω της έλλειψης της δυνατότητας διενέργειας μετρήσεων της παροχής.
- Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας του αντίστοιχου επιπέδου που αξιοποιείται από το μοντέλο, εξετάζονται βιβλιογραφικά στην παρούσα εργασία (λαμβάνονται υπόψη οι μέσες τιμές του συντελεστή για κάθε κάλυψη γης). Στην πραγματικότητα μπορούν να γίνουν επιτόπιες παρατηρήσεις για την επιλογή πιο κατάλληλων τιμών τραχύτητας. Τα σχετικά με το επίπεδο τραχύτητας της περιοχής αναλύονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

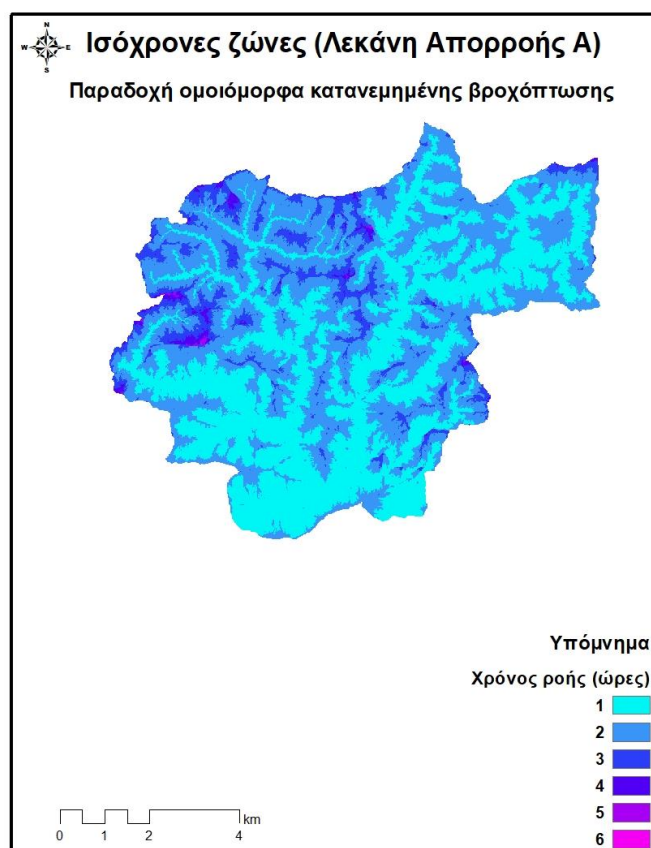
Όλες οι παραδοχές που αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό γίνονται αποδεκτές, καθώς η εργασία δεν αποτελεί προσπάθεια ακριβούς αναπαράστασης ενός πραγματικού παρελθοντικού πλημμυρικού φαινομένου. Σκοπός της είναι μέσα από την εφαρμογή ενός μοντέλου απορροής και με δεδομένα μιας πραγματικής ή και μη πραγματικής βροχόπτωσης, να φανερωθούν τα πρότυπα παροχής της λεκάνης απορροής και να εκτιμηθεί το ενδεχόμενο πλημμυρικής παροχής στα σημεία ενδιαφέροντος.

ΚΕΦ.6: Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου της εργασίας. Συγκεκριμένα, περιέχονται:

- α) οι χάρτες των ισόχρονων ζωνών που κατασκευάστηκαν από την κάθε προσέγγιση της μεθόδου και οι αντίστοιχοι πίνακες με τα εμβαδά τους,
- β) οι πίνακες με τις τιμές του όγκου νερού που δέχτηκε η κάθε ισόχρονη ζώνη των λεκανών απορροής (Α, Β και Γ) σε κάθε ώρα και συνολικά,
- γ) οι πίνακες παροχής ανά ώρα και τα αντίστοιχα υδρογραφήματα για κάθε σημείο εξόδου, που αποτελούν την απόκριση της λεκάνης απορροής και είναι τα βασικά αποτελέσματα της εργασίας.

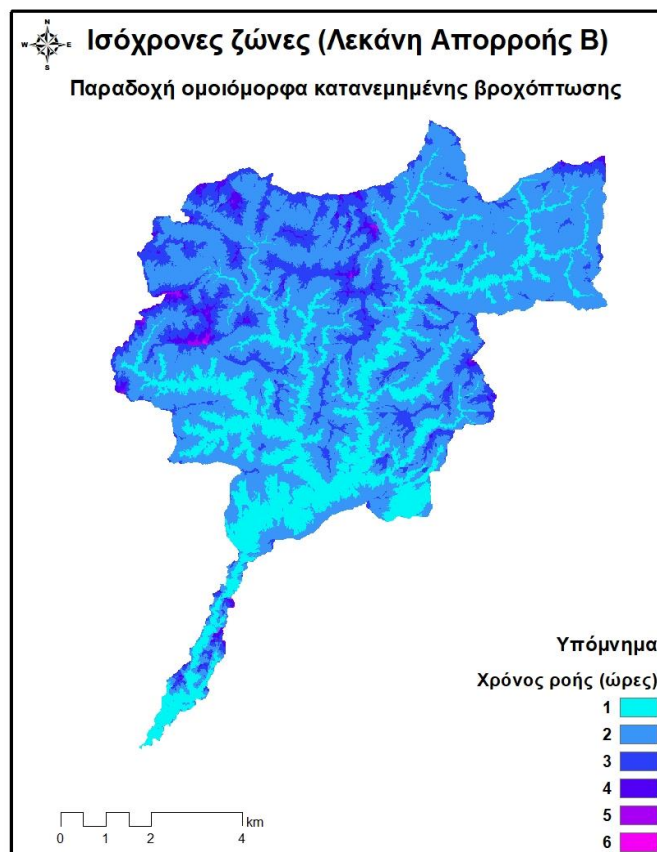
α) Ισόχρονες ζώνες:



Εικόνα 19 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 5 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

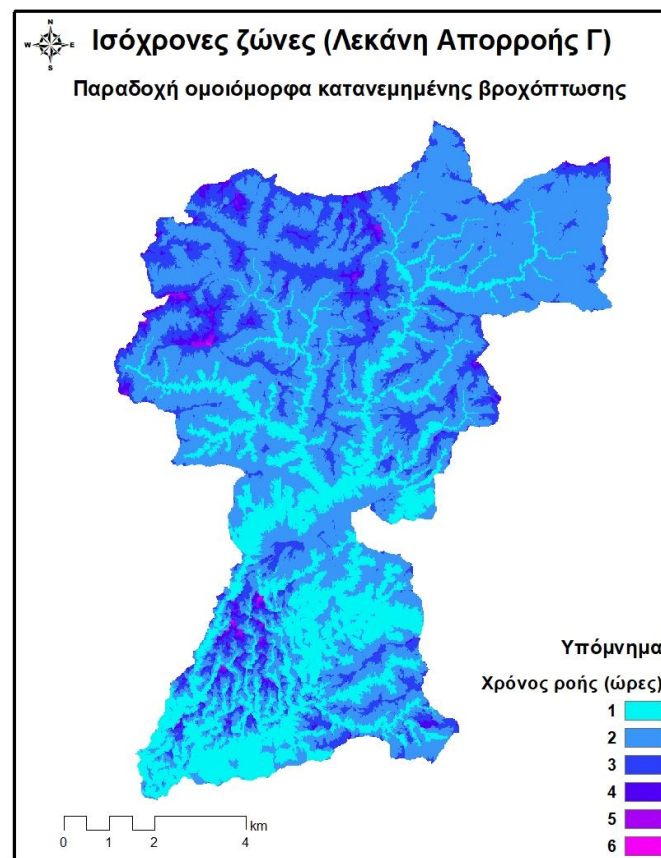
	Στρέμματα
Ζώνη 1	26.565
Ζώνη 2	27.453
Ζώνη 3	5.022
Ζώνη 4	624
Ζώνη 5	62
Ζώνη 6	2
Λεκάνη	59.728



Εικόνα 20 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 6 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

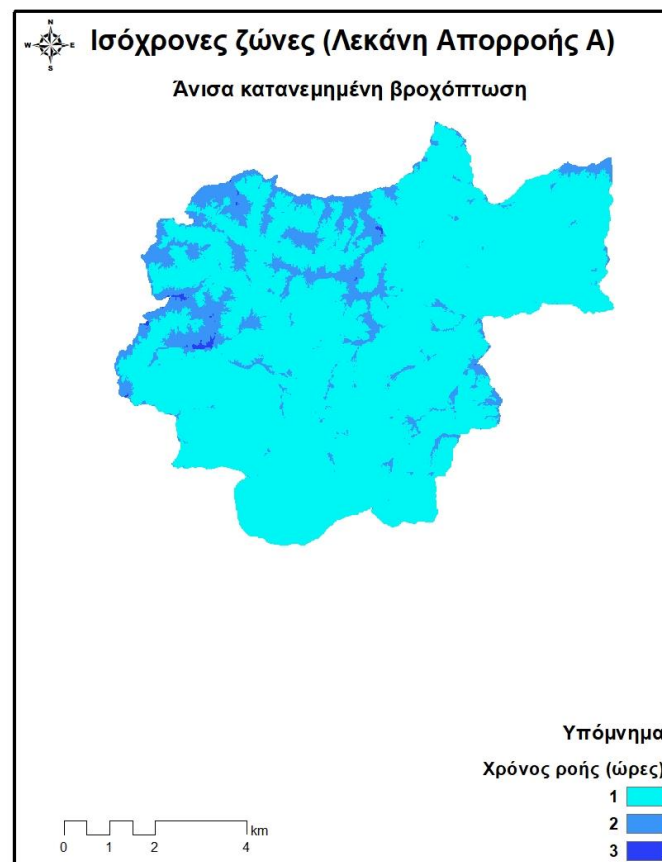
	Στρέμματα
Ζώνη 1	14.352
Ζώνη 2	37.717
Ζώνη 3	9.123
Ζώνη 4	1.264
Ζώνη 5	137
Ζώνη 6	7
Λεκάνη	62.600



Εικόνα 21 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 7 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

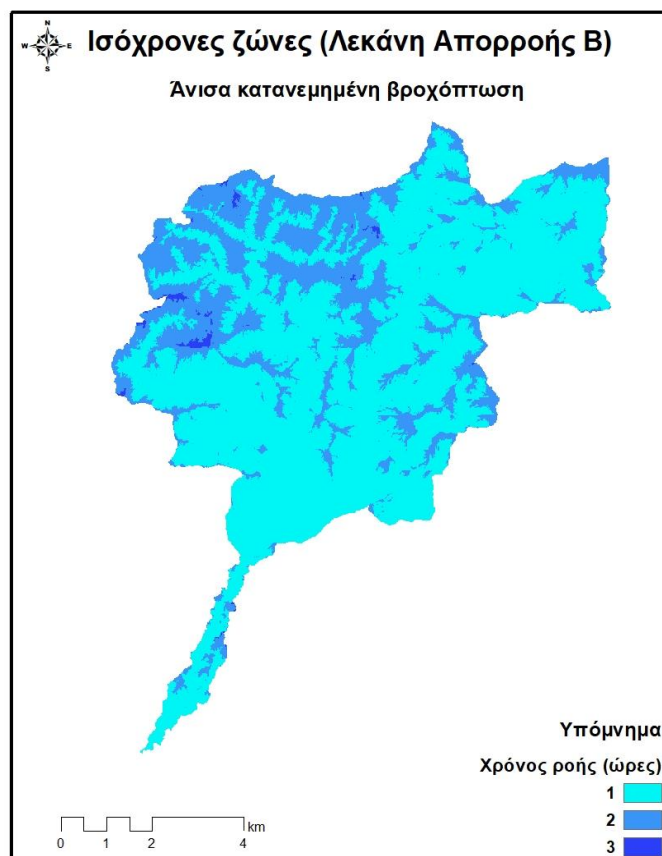
	Στρέμματα
Ζώνη 1	20.778
Ζώνη 2	49.142
Ζώνη 3	13.575
Ζώνη 4	2.075
Ζώνη 5	276
Ζώνη 6	16
Λεκάνη	85.863



Εικόνα 22 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 8 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

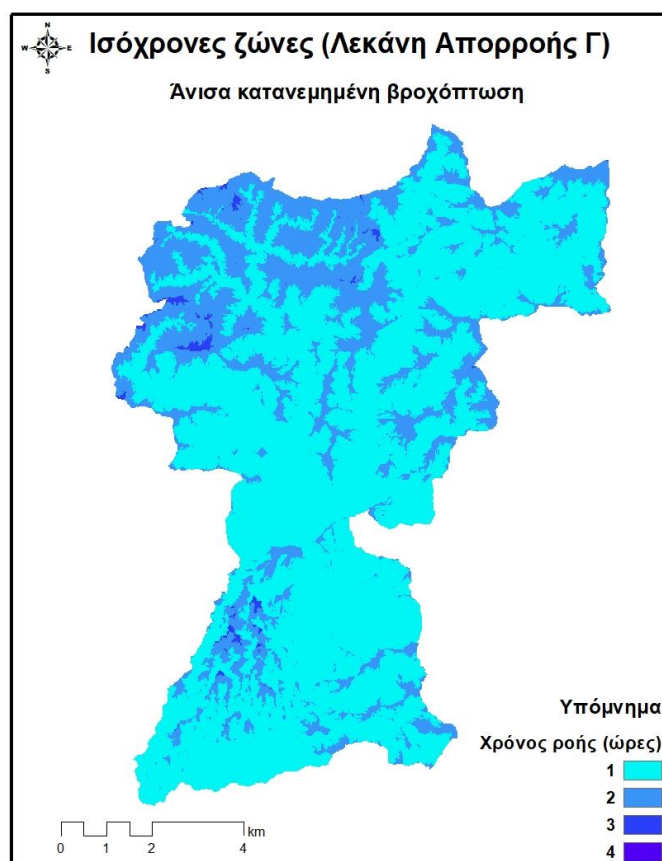
	Στρέμματα
Ζώνη 1	51.965
Ζώνη 2	7.631
Ζώνη 3	131
Λεκάνη	59.728



Εικόνα 23 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 9 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	Στρέμματα
Ζώνη 1	46.020
Ζώνη 2	16.223
Ζώνη 3	356
Λεκάνη	62.600



Εικόνα 24 Επίπεδο ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Πίνακας 10 Εμβαδά (σε στρέμματα) ισόχρονων ζωνών της λεκάνης απορροής Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	Στρέμματα
Ζώνη 1	62.842
Ζώνη 2	22.435
Ζώνη 3	584
Ζώνη 4	1
Λεκάνη	85.863

β) Όγκος νερού:

Πίνακας 11 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Α από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	106.261	153.547	61.100	103.604	153.281	30.284	608.077
Ζώνη 2	109.811	158.676	63.141	107.065	158.402	31.296	628.391
Ζώνη 3	20.087	29.026	11.550	19.585	28.975	5.725	114.947
Ζώνη 4	2.496	3.606	1.435	2.433	3.600	711	14.281
Ζώνη 5	249	359	143	243	359	71	1.423
Ζώνη 6	8	11	4	7	11	2	43
Λεκάνη	238.910	345.225	137.373	232.937	344.628	68.089	1.367.163

Πίνακας 12 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Β από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	57.408	82.955	33.010	55.973	82.811	16.361	328.518
Ζώνη 2	150.868	218.004	86.749	147.096	217.627	42.997	863.343
Ζώνη 3	36.493	52.732	20.983	35.580	52.640	10.400	208.828
Ζώνη 4	5.054	7.304	2.906	4.928	7.291	1.440	28.924
Ζώνη 5	546	789	314	533	788	156	3.126
Ζώνη 6	29	42	17	28	41	8	165
Λεκάνη	250.398	361.825	143.979	244.138	361.199	71.363	1.432.903

Πίνακας 13 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Γ από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	83.112	120.098	47.790	81.035	119.890	23.687	475.611
Ζώνη 2	196.569	284.043	113.027	191.655	283.551	56.022	1.124.868
Ζώνη 3	54.299	78.463	31.222	52.942	78.327	15.475	310.728
Ζώνη 4	8.299	11.992	4.772	8.091	11.971	2.365	47.490
Ζώνη 5	1.104	1.596	635	1.077	1.593	315	6.320
Ζώνη 6	66	95	38	64	95	19	376
Λεκάνη	343.450	496.285	197.484	334.864	495.427	97.883	1.965.392

Πίνακας 14 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Α από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	207.862	316.989	107.049	201.626	293.085	53.524	1.180.136
Ζώνη 2	30.523	45.632	15.643	27.089	37.772	7.860	164.520
Ζώνη 3	525	714	264	423	621	131	2.678
Λεκάνη	238.910	363.335	122.956	229.138	331.478	61.515	1.347.333

Πίνακας 15 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Β από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

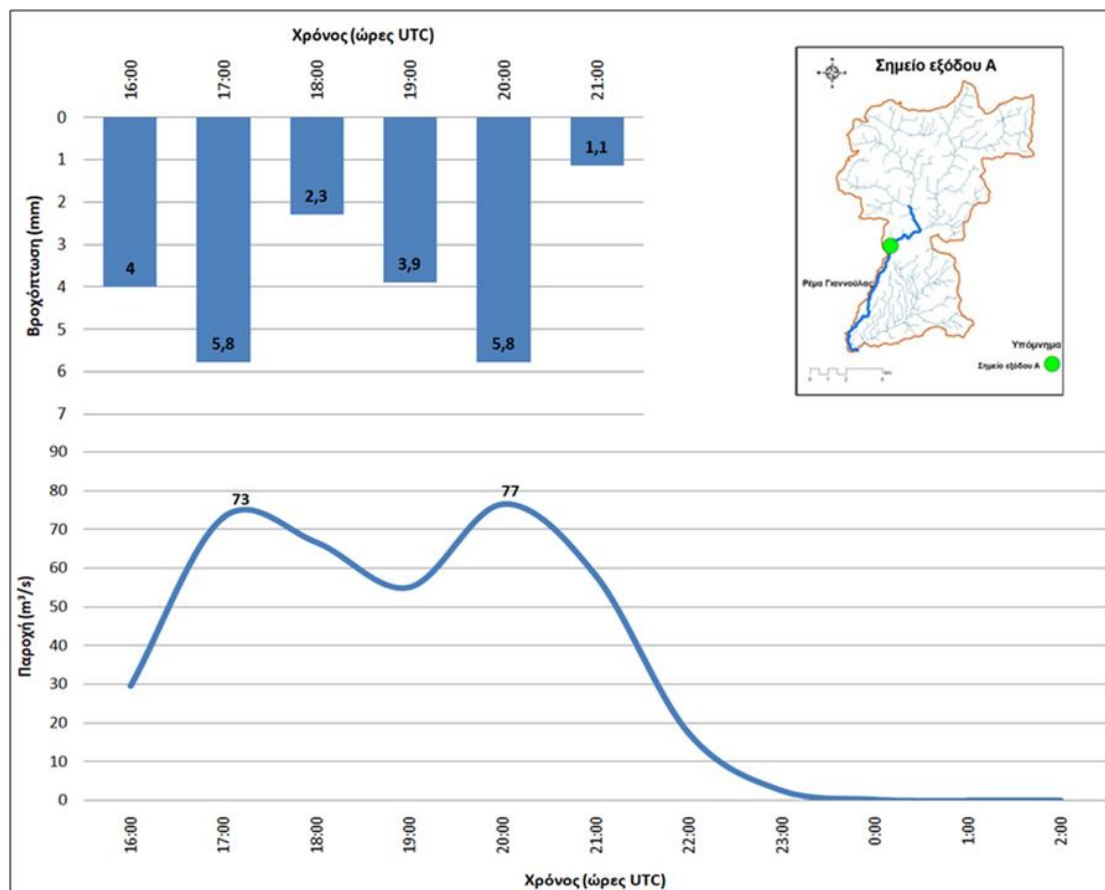
	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	184.080	273.359	95.722	180.859	264.155	46.940	1.045.114
Ζώνη 2	64.893	97.501	33.582	59.377	83.711	16.710	355.773
Ζώνη 3	1.426	1.910	716	1.183	1.679	356	7.271
Λεκάνη	250.398	372.770	130.020	241.419	349.545	64.007	1.408.158

Πίνακας 16 Όγκος νερού (σε m³) που δέχθηκε η λεκάνη απορροής Γ από την εξάωρη βροχόπτωση κάθε ώρα, σε κάθε ισόχρονη ζώνη και συνολικά (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

	1η ώρα	2η ώρα	3η ώρα	4η ώρα	5η ώρα	6η ώρα	Συνολικά
Ζώνη 1	251.369	361.343	147.051	250.112	372.654	72.897	1.455.425
Ζώνη 2	89.742	132.369	48.909	83.460	120.030	24.455	498.965
Ζώνη 3	2.337	2.892	1.198	2.045	2.944	584	12.000
Ζώνη 4	3	3	1	2	3	1	13
Λεκάνη	343.450	496.607	197.159	335.619	495.632	97.936	1.966.403

γ) Απόκριση της λεκάνης απορροής:

Η παροχή ανά ώρα, σε κάθε ένα από τα σημεία εξόδου όπως προκύπτει από την παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής βροχόπτωσης έχει ως εξής:

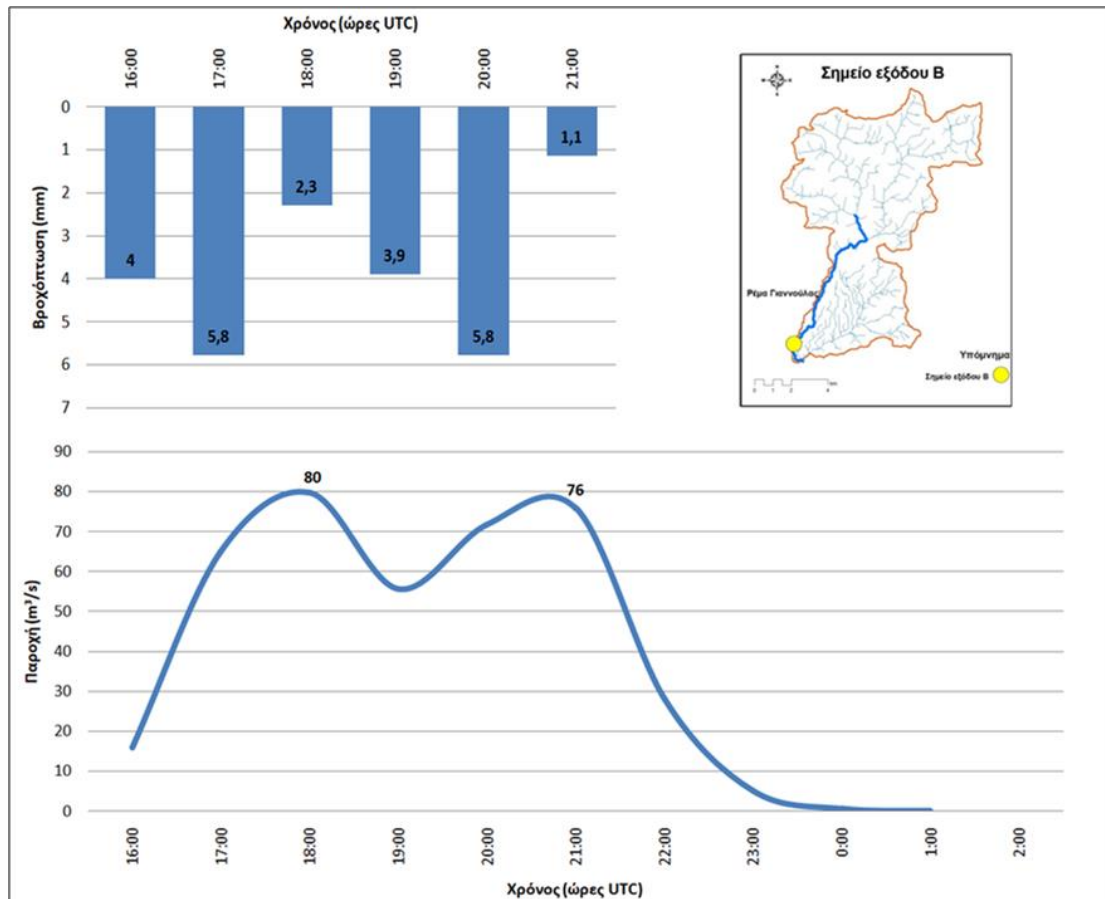


Σχήμα 4 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από όλη την έκταση της λεκάνης απορροής (Λεκάνη Γ). Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 17 Παροχή (m³/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Α (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m³/s)
16:00	30
17:00	73
18:00	67
19:00	55
20:00	77
21:00	58
22:00	17
23:00	3
0:00	0
1:00	0
2:00	0

Στο σημείο εξόδου Α εμφανίζονται δύο μέγιστες πλημμυρικές παροχές: η πρώτη φτάνει τα $73 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 17:00 και η δεύτερη τα $77 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 20:00. Ο χρόνος υστέρησης είναι μικρότερος από μία ώρα, ενώ οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης του υδρογραφήματος είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 23:00, δηλαδή 8 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.

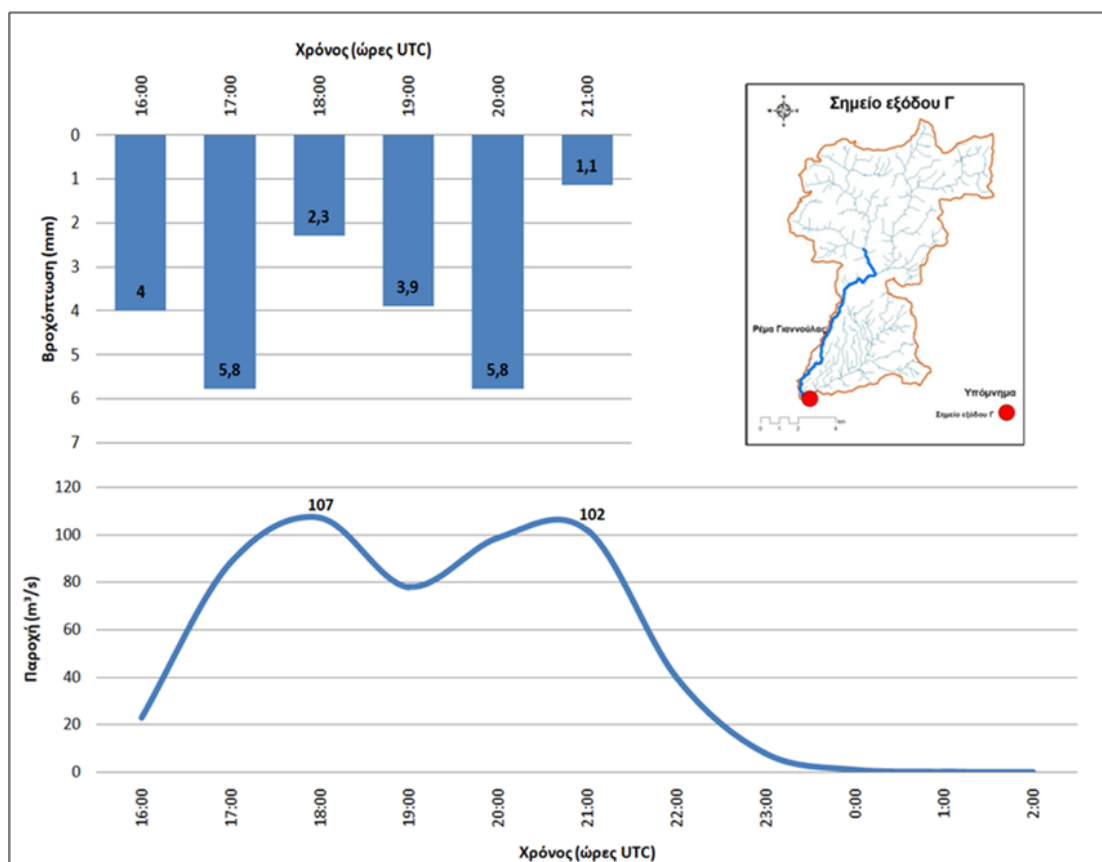


Σχήμα 5 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από όλη την έκταση της λεκάνης απορροής (λεκάνη Γ). Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 18 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Β (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m^3/s)
16:00	16
17:00	65
18:00	80
19:00	56
20:00	72
21:00	76
22:00	28
23:00	5
0:00	1
1:00	0
2:00	0

Στο σημείο εξόδου Β οι μέγιστες πλημμυρικές παροχές φτάνουν τα $80 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 18:00 και τα $76 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 21:00. Ο χρόνος υστέρησης είναι μία ώρα και οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 23:00, δηλαδή 8 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.



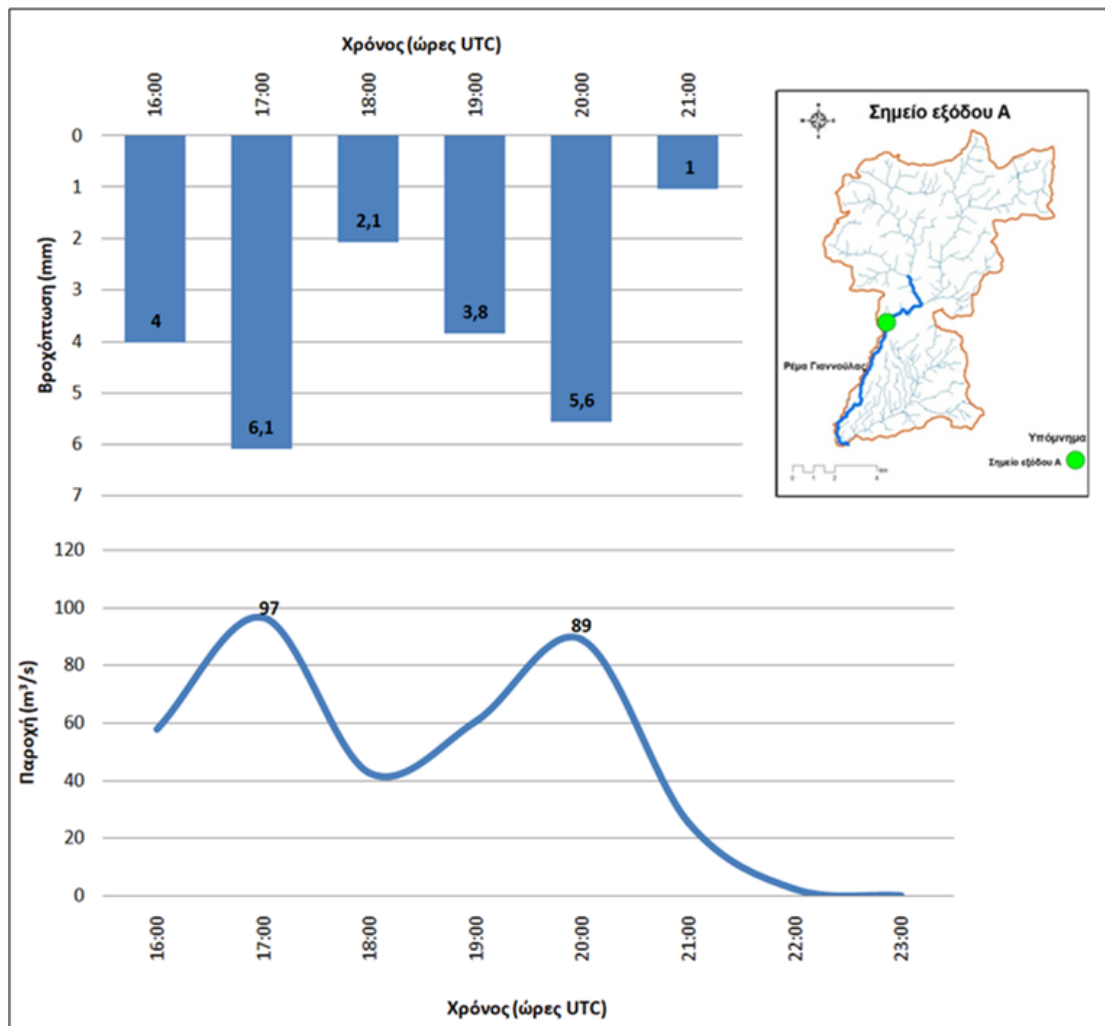
Σχήμα 6 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από όλη την έκταση της λεκάνης απορροής (λεκάνη Γ). Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 19 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Γ (παραδοχή ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m^3/s)
16:00	23
17:00	88
18:00	107
19:00	78
20:00	99
21:00	102
22:00	40
23:00	8
0:00	1
1:00	0
2:00	0

Στο σημείο εξόδου Γ οι μέγιστες πλημμυρικές παροχές εντοπίζονται στις 18:00 ($107 \text{ m}^3/\text{s}$) και στις 21:00 ($102 \text{ m}^3/\text{s}$). Ο χρόνος υστέρησης είναι μία ώρα και οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 23:00, δηλαδή 8 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.

Η παροχή ανά ώρα, σε κάθε ένα από τα σημεία εξόδου όπως προκύπτει από την προσέγγιση της άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης, φαίνεται στη συνέχεια:



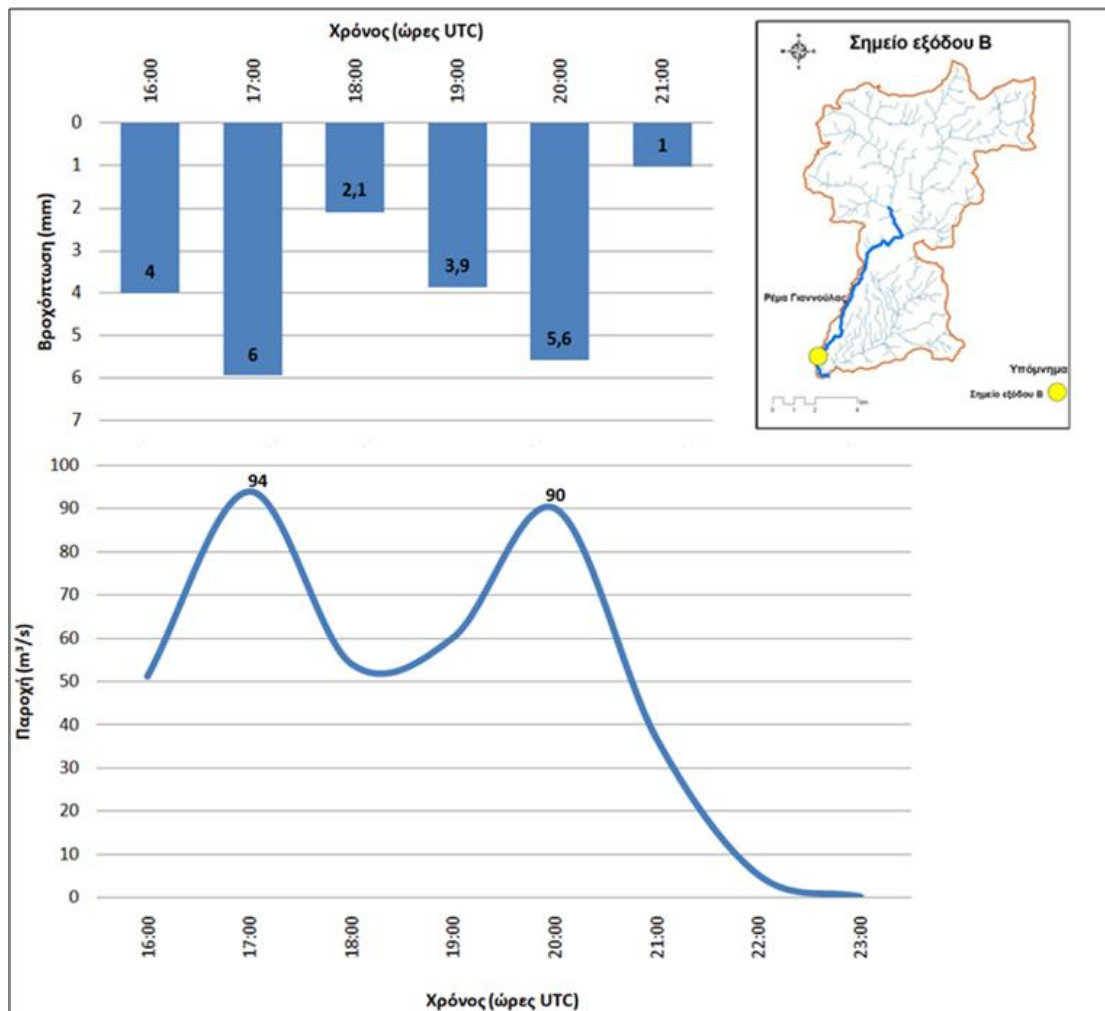
Σχήμα 7 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από την έκταση της λεκάνης απορροής Α. Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 20 Παροχή (m³/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Α (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m³/s)
16:00	58
17:00	97
18:00	43
19:00	61
20:00	89
21:00	25
22:00	2
23:00	0

Στο σημείο εξόδου Α εμφανίζονται δύο μέγιστες πλημμυρικές παροχές, με την πρώτη να αγγίζει τα 97m³/s στις 17:00 και την επόμενη να φτάνει στα 89 m³/s στις

20:00. Ο χρόνος υστέρησης είναι μικρότερος από μία ώρα, ενώ οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης του υδρογραφήματος είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 22:00, δηλαδή 7 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.

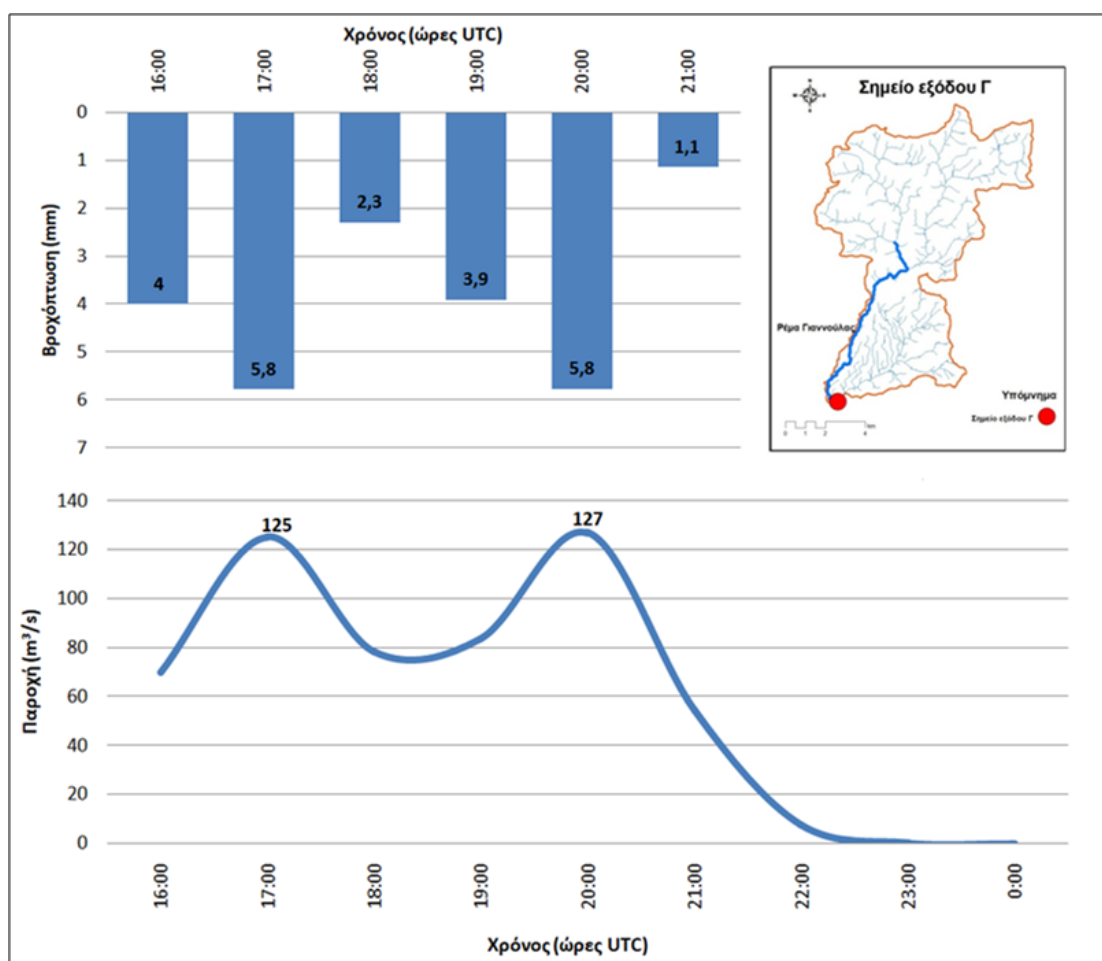


Σχήμα 8 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από την έκταση της λεκάνης απορροής Β. Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 21 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Β (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m^3/s)
16:00	51
17:00	94
18:00	54
19:00	60
20:00	90
21:00	37
22:00	5
23:00	0

Στο σημείο εξόδου Β εμφανίζονται δύο μέγιστες πλημμυρικές παροχές. Η πρώτη εντοπίζεται στις 17:00 ($94 \text{ m}^3/\text{s}$) και η δεύτερη στις 20:00 ($90 \text{ m}^3/\text{s}$). Ο χρόνος υστέρησης είναι μικρότερος από μία ώρα, ενώ οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης του υδρογραφήματος είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 22:00, δηλαδή 7 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.



Σχήμα 9 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο σημείο εξόδου Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης). Στο ιστόγραμμα απεικονίζεται η ανά ώρα αθροιστική μέση βροχόπτωση πάνω από την έκταση της λεκάνης απορροής Γ. Στο χάρτη διακρίνεται η τοποθεσία του σημείου εξόδου.

Πίνακας 22 Παροχή (m^3/s) ανά ώρα απορροής (UTC) στο σημείο εξόδου Γ (προσέγγιση άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης)

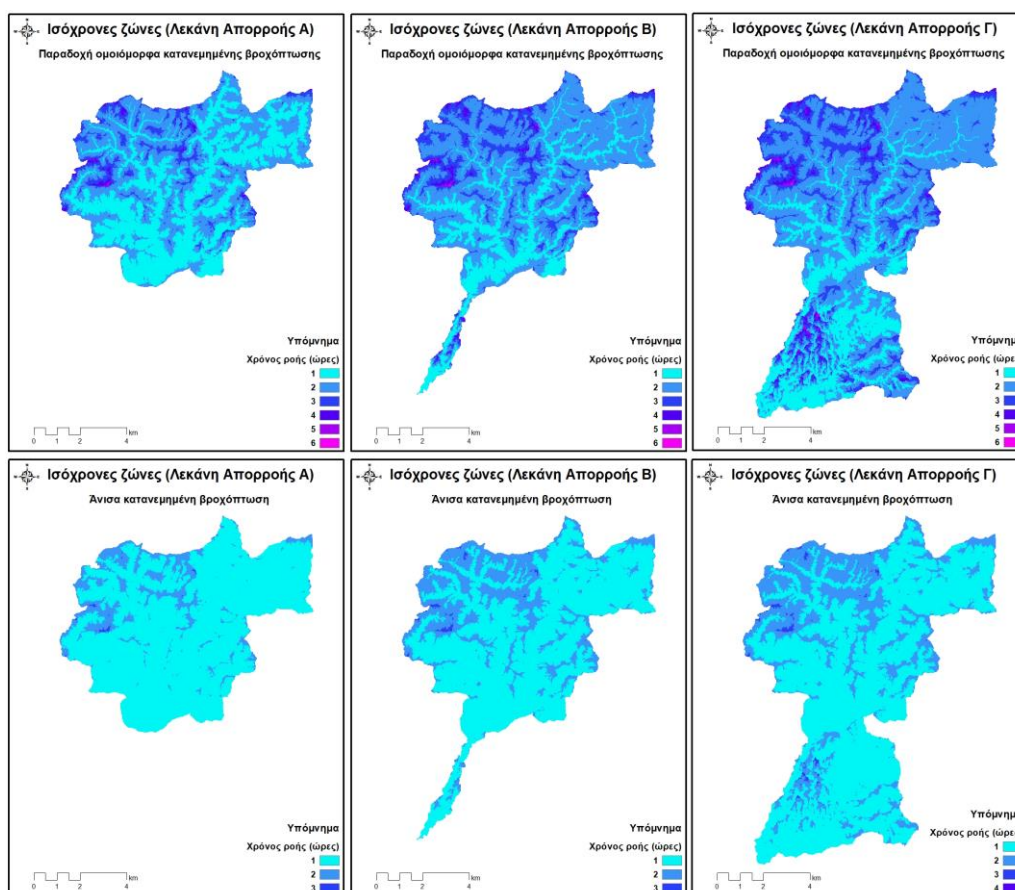
Ώρα απορροής (UTC)	Παροχή (m^3/s)
16:00	70
17:00	125
18:00	78
19:00	84
20:00	127
21:00	54
22:00	8
23:00	0
0:00	0

Στο σημείο εξόδου Γ εμφανίζονται δύο μέγιστες πλημμυρικές παροχές. Η πρώτη εντοπίζεται στις 17:00 ($125 \text{ m}^3/\text{s}$) και η δεύτερη στις 20:00 ($127 \text{ m}^3/\text{s}$). Ο χρόνος υστέρησης είναι μικρότερος από μία ώρα, ενώ οι κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης του υδρογραφήματος είναι απότομες. Η παροχή ελαχιστοποιείται στις 22:00, δηλαδή 7 ώρες μετά από την έναρξη της βροχόπτωσης.

ΚΕΦ.7: Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων

α) Ισόχρονες ζώνες:

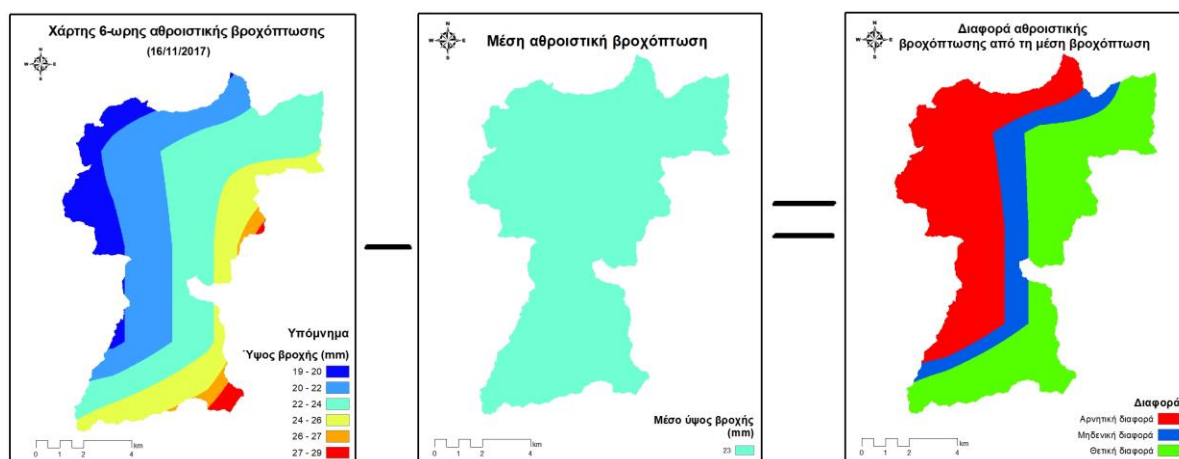
Οι δύο προσεγγίσεις της μεθόδου που εφαρμόστηκε έδωσαν διαφορετικό αριθμό ισόχρονων ζωνών με διαφορετικές εκτάσεις. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, στην περίπτωση της παραδοχής της ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης (άνω χάρτες) σχηματίστηκαν πέντε κύριες ισόχρονες ζώνες σε κάθε μία από τις λεκάνες Α, Β και Γ (η έκτη ζώνη αφορούσε έναν εξαιρετικά μικρό αριθμό κελιών, δηλαδή περιοχές που δεν έφταναν τα 10 στρέμματα ή λίγο μεγαλύτερες). Από την προσέγγιση της άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης (κάτω χάρτες στο σχήμα) σχηματίστηκαν τρεις κύριες ισόχρονες ζώνες στις λεκάνες (η τέταρτη ζώνη της λεκάνης Γ αφορά μόνο 1 στρέμμα).



Εικόνα 25 Σύγκριση των παραγόμενων επιπέδων ισόχρονων ζωνών. Στο άνω μέρος του σχήματος διακρίνονται τα επίπεδα ισόχρονων ζωνών που προκύπτουν από την παραδοχή της ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης (από αριστερά λεκάνη Α, Β και Γ) ενώ κάτω στο σχήμα τα αντίστοιχα επίπεδα από την προσέγγιση της άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης.

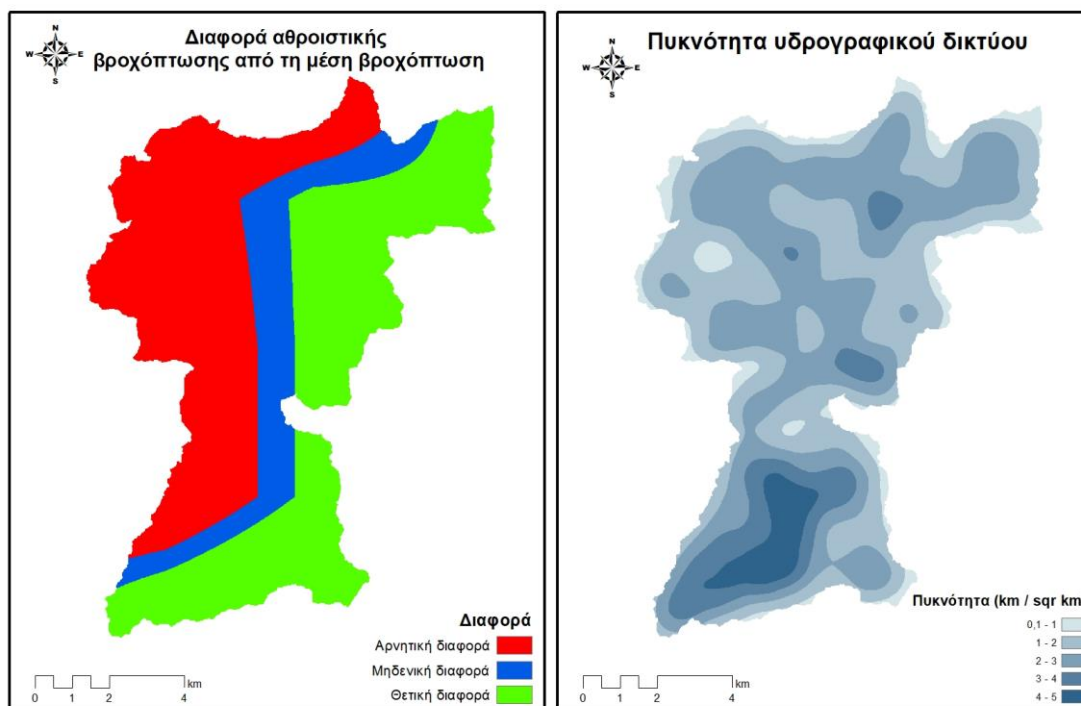
Σε γενικές γραμμές, όλα τα επίπεδα ισόχρονων ζωνών εμφανίζουν πιο μικρούς χρόνους απορροής στα ανατολικά σημεία της λεκάνης. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά της που επιταχύνουν την απορροή, και βρίσκονται κυρίως σε εκείνη

την περιοχή. Ο λόγος που στην περίπτωση της άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης μια σημαντικά μεγάλη περιοχή αποτελεί την ισόχρονη ζώνη της μίας ώρας, οφείλεται στην χωρική κατανομή της αθροιστικής βροχόπτωσης κυρίως στο ανατολικό και νότιο τμήμα της λεκάνης. Η λεκάνη δέχτηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού σε περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο εξόδου και σε περιοχές όπου επικρατούν χαρακτηριστικά της που επιταχύνουν την απορροή. Συνεπώς, η απορροή ήταν πιο άμεση για μεγαλύτερο μέρος του όγκου του νερού. Για να εξεταστεί αυτή η υπόθεση κατασκευάστηκε ένας χάρτης διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης, από τη μέση αθροιστική (23 mm). Για τη δημιουργία του αφαιρέθηκε από ένα επίπεδο αθροιστικής βροχόπτωσης, η μέση τιμή της εξάωρης βροχόπτωσης (όσο έβρεξε δηλαδή συνολικά στην προσέγγιση της παραδοχής).

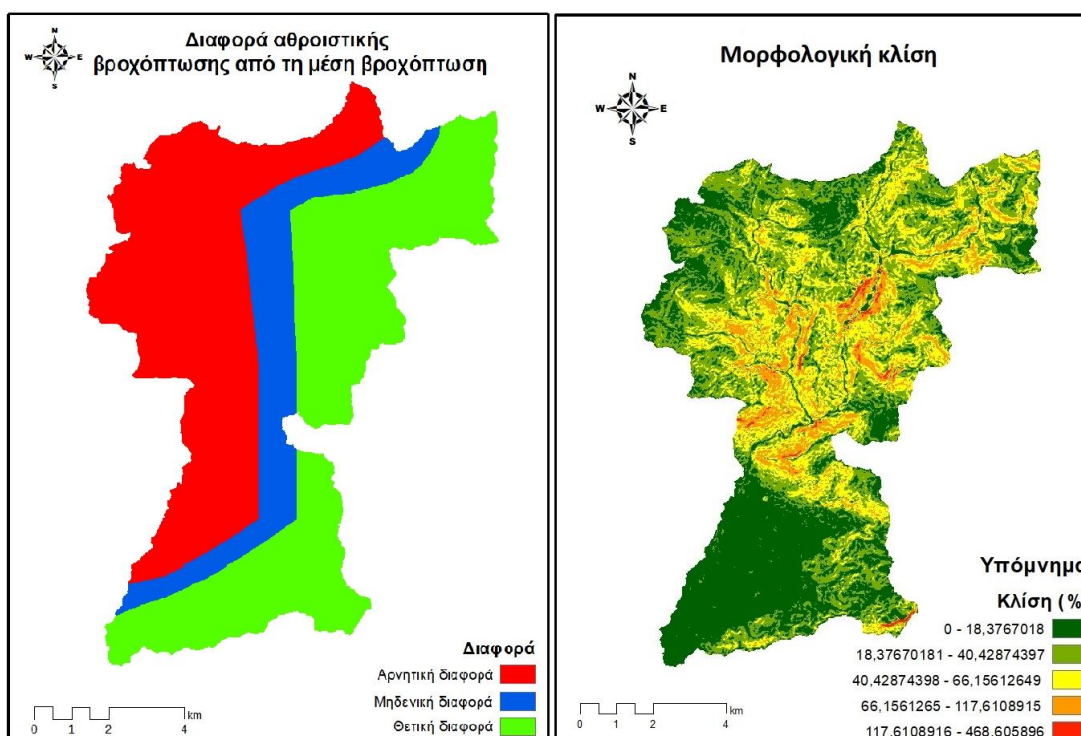


Εικόνα 26 Απεικόνιση της δημιουργίας του επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής από τη μέση αθροιστική βροχόπτωση

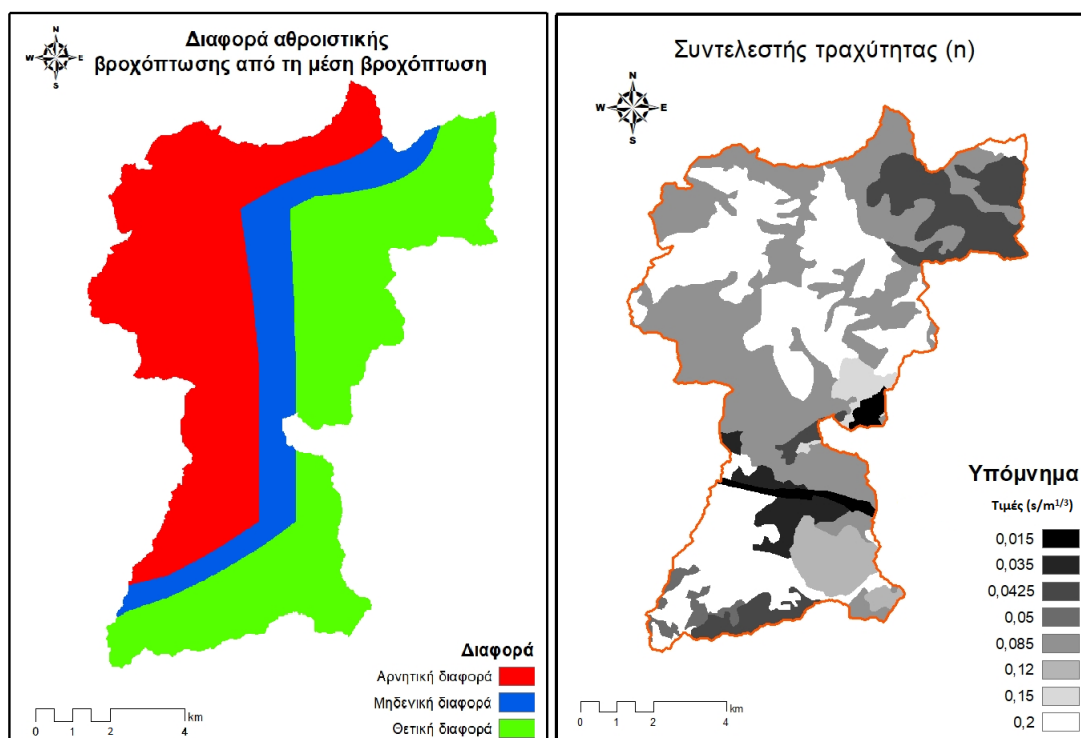
Όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα, στον παραγόμενο χάρτη διακρίνονται με κόκκινο χρώμα οι περιοχές που η λεκάνη δέχτηκε λιγότερο νερό από τη μέση τιμή βροχόπτωσης (δυτικά), με μπλε οι περιοχές που δέχτηκαν την ίδια τιμή (στη μέση) και με πράσινο αυτές που έλαβαν περισσότερο νερό (ανατολικά και νότια). Στα ακόλουθα σχήματα συγκρίνεται ο παραγόμενος χάρτης με χάρτες στους οποίους διακρίνεται η κατανομή των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την ταχύτητα απορροής στη λεκάνη. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η μεγάλη πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (κυρίως νότια αλλά και σε σημεία στα ανατολικά), οι υψηλές μορφολογικές κλίσεις του αναγλύφου (υψηλότερες κυρίως στα ανατολικά μέρη της λεκάνης) και ο μικρός συντελεστής τραχύτητας (κυρίως βορειοανατολικά και νοτιοανατολικά). Η από κοινού επιρροή που έχουν οι παράγοντες αυτοί στην απορροή και η διαφορετική κατανομή της βροχής στο χώρο είχαν ως συνέπεια τα διαφορετικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο προσεγγίσεων της μεθόδου της εργασίας.



Εικόνα 27 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση με, ένα χάρτη πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης



Εικόνα 28 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση, με ένα χάρτη μορφολογικών κλίσεων (%) της περιοχής μελέτης



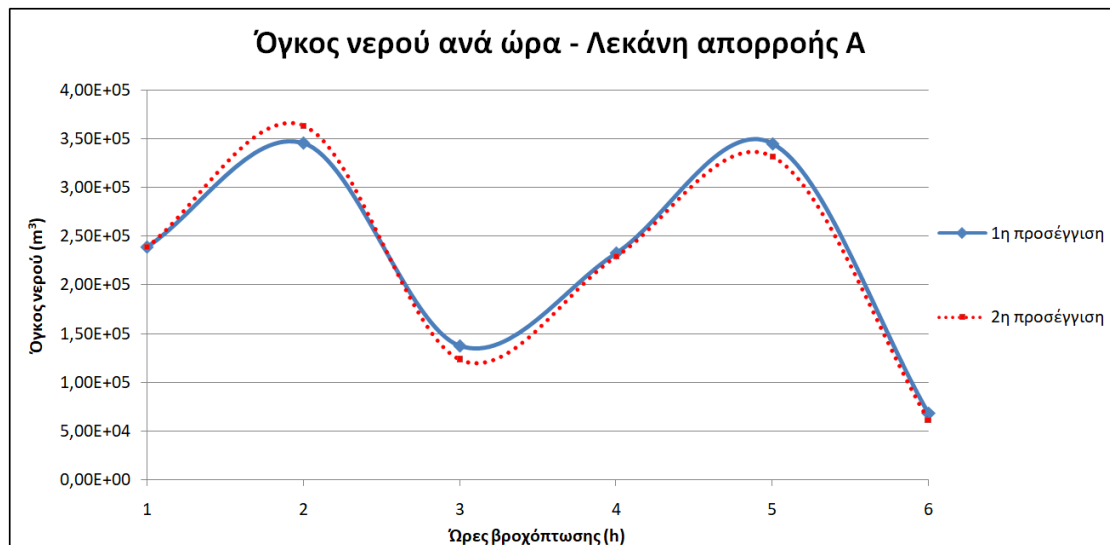
Εικόνα 29 Σύγκριση επιπέδου διαφοράς της αθροιστικής βροχόπτωσης από τη μέση, με τον χάρτη του συντελεστή τραχύτητας της περιοχής μελέτης

β) Όγκος νερού:

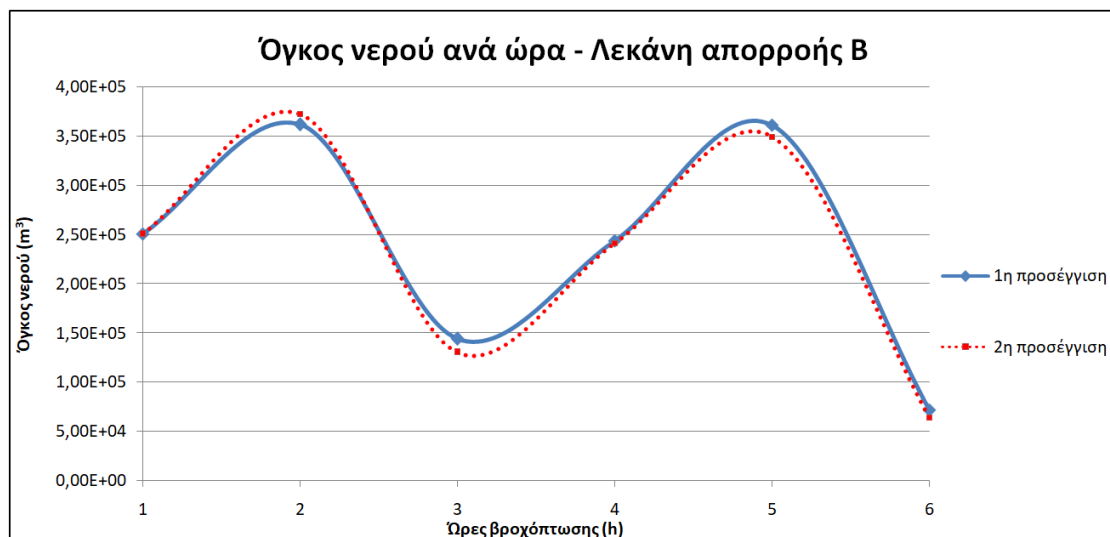
Ο όγκος του νερού που δέχθηκε η λεκάνη απορροής (Γ) και οι υπολεκάνες (Α και Β) κατά τη διάρκεια της εξάωρης βροχόπτωσης δε διαφέρει σημαντικά στις δύο προσεγγίσεις της μελέτης. Αυτό μπορεί να εξεταστεί με τον παρακάτω δείκτη (δ_i):

$$\frac{\Sigma_{V1} - \Sigma_{V2}}{\Sigma_{V1}} \leq 5\%$$

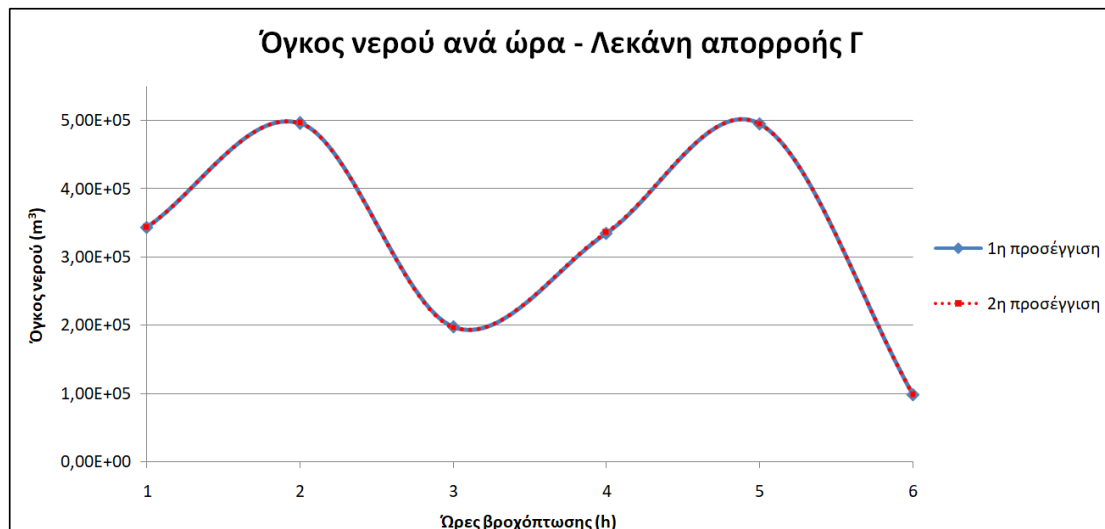
όπου Σ_{V1} είναι το σύνολο του όγκου του νερού που δέχτηκε η λεκάνη στο εξάωρο στην περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης και Σ_{V2} ο αντίστοιχος όγκος νερού στην προσέγγιση της άνισα κατανεμημένης βροχόπτωσης. Εφαρμόζοντας έχουμε για τη λεκάνη Α: $\delta_A \approx 1\%$, για τη λεκάνη Β: $\delta_B \approx 2\%$ και για τη λεκάνη Γ: $\delta_\Gamma \approx 0\%$. Η διαφορά λοιπόν στο συνολικό όγκο νερού που δέχτηκε η λεκάνη και οι υπολεκάνες στο εξάωρο θεωρείται αμελητέα. Παρατηρώντας τα ακόλουθα διαγράμματα του συνολικού όγκου που δέχτηκαν οι λεκάνες ανά ώρα στις δύο περιπτώσεις, γίνεται φανερό ότι η διαφορά είναι επίσης αμελητέα, καθώς οι τιμές σχεδόν συμπίπτουν. Έτσι προκύπτει ότι πιθανές διαφορές στην παροχή ανά ώρα και στους χρόνους υστέρησης των δύο προσεγγίσεων δεν οφείλονται στη διαφορά όγκου νερού που δέχτηκε η λεκάνη απορροής, αλλά στη διαφορετική κατανομή του νερού στο χώρο μέσα το χρονικό διάστημα της βροχόπτωσης.



Σχήμα 10 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Α ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης



Σχήμα 11 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Β ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης



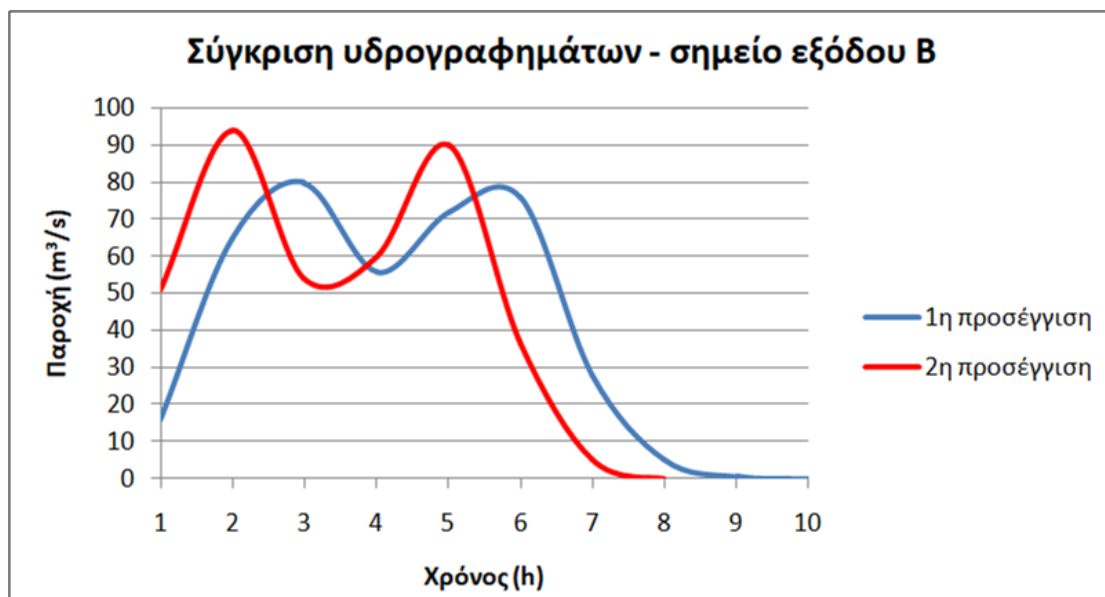
Σχήμα 12 Όγκος νερού (σε m^3) που δέχτηκε η λεκάνη απορροής Γ ανά ώρα στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης

γ) Απόκριση της λεκάνης απορροής:

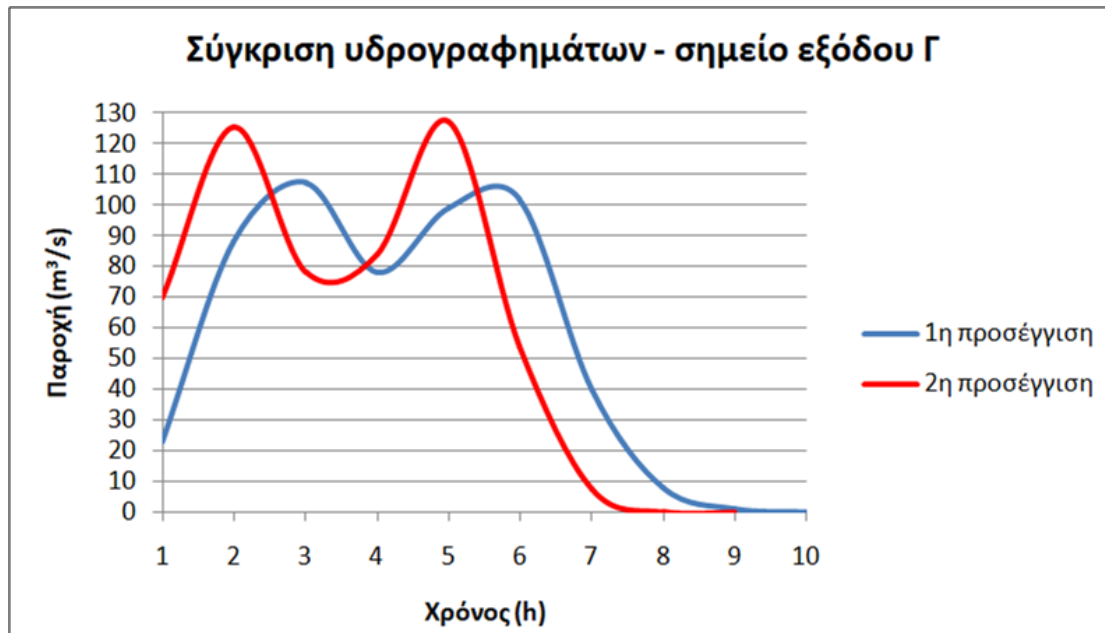
Μετά από σύγκριση των υδρογραφημάτων από την παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) με αυτά που κατασκευάστηκαν από την προσέγγιση της άνισης κατανομής (δεύτερη προσέγγιση) μπορεί να παρατηρηθεί μεγαλύτερος χρόνος υστέρησης των πρώτων στα σημεία εξόδου Β και Γ. Επιπλέον, στη δεύτερη προσέγγιση παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές παροχής και μεγαλύτερες κλίσεις στις καμπύλες συγκέντρωσης και εκτόνωσης. Τα παραπάνω οφείλονται στην κατανομή μεγαλύτερης ποσότητας του νερού της βροχόπτωσης σε περιοχές της λεκάνης με μεγαλύτερες μορφολογικές κλίσεις, μεγαλύτερη πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου και μικρότερο συντελεστή τραχύτητας, παράγοντες που ενισχύουν την ταχεία απορροή, όπως αναλύεται σε προηγούμενα κεφάλαια.



Σχήμα 13 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Α, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση)



Σχήμα 14 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Β, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση)



Σχήμα 15 Σύγκριση των συνθετικών μοναδιαίων άμεσων υδρογραφημάτων που εκτιμήθηκαν στο σημείο εξόδου Γ, από την περίπτωση της παραδοχής ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης (πρώτη προσέγγιση) και από την ανομοιόμορφα κατανεμημένη βροχόπτωση (2η προσέγγιση)

Στα σημεία εξόδου Α, Β και Γ εκτιμήθηκαν εξαιρετικά αυξημένες παροχές σε σύντομο χρονικό διάστημα, από την αρχή της βροχόπτωσης, και στις δύο προσεγγίσεις της μεθόδου που εφαρμόστηκε. Στο σημείο εξόδου Α που αποτελεί την έξοδο της ορεινής λεκάνης, η παροχή έφτασε τα $77 \text{ m}^3/\text{s}$ (πρώτη προσέγγιση) και $97 \text{ m}^3/\text{s}$ (δεύτερη προσέγγιση). Στο σημείο Β (γέφυρα Μεγαρίδος), οι αντίστοιχες μέγιστες εκτιμήσεις παροχής ήταν $80 \text{ m}^3/\text{s}$ και $94 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ στο σημείο Γ (σημείο συμβολής των δύο ρεμάτων) $107 \text{ m}^3/\text{s}$ και $127 \text{ m}^3/\text{s}$. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα σημεία Β και Γ βρίσκονται σε εξαιρετικά κοντινές αποστάσεις, είναι δυνατό αφαιρώντας τα μέγιστα παροχής να υπολογιστεί η συνεισφορά του ρέματος Μαύρης Ώρας σε παροχή, στην κεντρική κοίτη του ρέματος Γιαννούλας. Στην περίπτωση της πρώτης προσέγγισης η διαφορά υπολογίζεται στα $27 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ στη δεύτερη προσέγγιση στα $33 \text{ m}^3/\text{s}$. Η συνεισφορά του ρέματος Μαύρης Ώρας στην κεντρική κοίτη είναι σίγουρα σημαντική, και στην περίπτωση της ανομοιόμορφα κατανεμημένης στο χώρο βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη, καθώς αυτό βρίσκεται σε περιοχή της συνολικής λεκάνης που δέχτηκε μεγαλύτερη ποσότητα νερού της βροχής.

Ο χρόνος υστέρησης ήταν σε όλα τα σημεία εξόδου και τις περιπτώσεις 1 ώρα ή μικρότερος. Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση της λεκάνης ήταν εξαιρετικά άμεση στο γεγονός, καθώς οι πλημμυρικές παροχές εκδηλώθηκαν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα στα σημεία εξόδου, μετά την εκδήλωση των μέγιστων της βροχόπτωσης. Ο υπολογισμός μηδενικών χρόνων υστέρησης οφείλεται στη χρονική διακριτότητα των δεδομένων βροχόπτωσης (1 ώρα) και στο γεγονός ότι υπολογίζεται η παροχή στο τέλος της κάθε ώρας. Στην πραγματικότητα το νερό της βροχής δε γίνεται τη

στιγμή που πέφτει σε κάποιο σημείο της λεκάνης να εμφανιστεί σαν επιφανειακή απορροή απευθείας στην έξοδο, άρα ο μηδενικός χρόνος υστέρησης δηλώνει χρόνο μικρότερο της μίας ώρας. Οι απότομες κλίσεις των καμπυλών συγκέντρωσης και εκτόνωσης είναι ακόμα μια ένδειξη της άμεσης εκδήλωσης πλημμυρικών παροχών στο ρέμα, μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

Όλα τα παραπάνω ενισχύονται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Το σχήμα της έχει τα χαρακτηριστικά του σχήματος βεντάλιας (φαρδύ στα ανάντη και στενότερο στα κατάντη), το οποίο σε συνδυασμό με την ύπαρξη απότομων πλαγιών και το πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αιφνίδιων πλημμυρικών παροχών στην πεδινή κοίτη του ρέματος Γιαννούλας.

Τα αποτελέσματα αυτά έδωσαν μια λεκάνη συνολικού εμβαδού περίπου 86 km^2 (86.000 στρέμματα), με τις υπολεκάνες να φτάνουν κατά προσέγγιση τα 60 km^2 (λεκάνη Α) και 63 km^2 (λεκάνη Β), καθώς και μια βροχόπτωση συνολικού μέσου ύψους 23 mm σε έξι ώρες. Το εμβαδόν της λεκάνης είναι μέτριου προς μεγάλου μεγέθους για τα ελληνικά δεδομένα, καθώς περιλαμβάνει τις πλαγιές ενός μεγάλου ορεινού όγκου της δυτικής Αττικής, καθώς και μια αρκετά μεγάλη πεδινή περιοχή (βιομηχανική περιοχή στα ανατολικά του Ασπρούργου). Άλλοι ερευνητές του ελληνικού χώρου, εκτίμησαν μέγιστη πλημμυρική παροχή στα $65 \text{ m}^3/\text{s}$, με άμεση εκδήλωση, στη λεκάνη απορροής του Διακονάρη (βόρεια Πελοπόννησος) συνολικής έκτασης $27,83 \text{ km}^2$, και με βροχόπτωση 90 mm σε 12 ώρες (Karymbalis et al, 2011). Οι Karymbalis et al (2012), εκτίμησαν μέγιστη παροχή στα $610 \text{ m}^3/\text{s}$ περίπου και με χρόνο υστέρησης λιγότερο από 3 ώρες, στη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Κόρινθος), έκτασης $164,2 \text{ km}^2$, μετά από βροχόπτωση περίπου $176,8 \text{ mm}$ και διάρκειας 10 ωρών. Οι Kalogeropoulos et al (2013), υπολόγισαν μέγιστη παροχή $48,14 \text{ m}^3/\text{s}$ στη λεκάνη του Βουραϊκού ($239,6 \text{ km}^2$) και τέλος οι Tsanakas et al (2016), εκτίμησαν στη λεκάνη του ρέματος Ξερολακίου στον Όλυμπο ($19,7 \text{ km}^2$), μέγιστη παροχή $91,8 \text{ m}^3/\text{s}$ μετά από φαινόμενα έντονων βροχοπτώσεων. Συγκρίνοντας με τις εκτιμήσεις ακραίων πλημμυρικών παροχών στις προαναφερμένες λεκάνες διαφορετικών μεγεθών, μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια ότι οι τιμές παροχής της περίπτωσης της παρούσας μελέτης αφορούν ακραίο πλημμυρικό γεγονός που εκδηλώθηκε στο Ρέμα Γιαννούλας, σε πολύ άμεσο χρονικό διάστημα μετά το μέγιστο της βροχόπτωσης.

ΚΕΦ.8: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, μετά από ισχυρή βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας, στην περιοχή του Θριάσιου Πεδίου. Δύο προσεγγίσεις του μοντέλου εξετάστηκαν στην περίπτωση μελέτης. Στην πρώτη έγινε η παραδοχή ότι η βροχόπτωση ήταν ομοιόμορφα κατανομημένη στη λεκάνη απορροής σε κάθε ώρα της βροχής, ενώ στη δεύτερη προσέγγιση θεωρήθηκε ότι η κατανομή της βροχόπτωσης στο χώρο ήταν άνιση. Με αυτόν τον τρόπο έγινε περισσότερο αισθητή η επιρροή που έχουν τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης λεκάνης στην απορροή του νερού, καθώς όπως φάνηκε, ανάλογα με τη χωρική κατανομή της βροχής η απόκριση της λεκάνης διαφέρει σημαντικά. Επίσης, συμπεραίνεται ότι όταν λαμβάνεται υπόψη η κατανομή της ποσότητας των κατακρημνισμάτων στο χώρο, μπορεί να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η παροχή συναρτήσει του χρόνου, από ένα πραγματικό πλημμυρικό γεγονός. Σε λεκάνες που στερούνται σταθμούς μέτρησης της παροχής καθίσταται έτσι δυνατό, αν μετά από ακραία καταιγίδα παρατηρηθούν ζημιές σε μια υποδομή (π.χ. γέφυρα), να εκτιμηθούν πιο ακριβείς τιμές της μέγιστης παροχής, σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει ο ανασχεδιασμός της. Σε αυτήν την περίπτωση είναι σίγουρα απαραίτητη μια ακριβής προσομοίωση της κατάστασης της ατμόσφαιρας. Σε μεγαλύτερης έκτασης λεκάνες, όπου είναι δυνατή η πρόγνωση της χωροχρονικής κατανομής μιας καταιγίδας, γίνεται επίσης να προβλεφθούν πλημμυρικά φαινόμενα. Στην περίπτωση της παραδοχής της ομοιόμορφης κατανομής της βροχής στην έκταση της λεκάνης, τα αποτελέσματα αν και ικανοποιητικά, μπορεί να διαφέρουν από την πραγματικότητα, όπως αποδείχθηκε και στην περίπτωση μελέτης. Έτσι, η προσέγγιση της παραδοχής είναι περισσότερο χρήσιμη όταν γίνεται διερεύνηση των προτύπων παροχής μιας λεκάνης απορροής. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων προκύπτει επιπλέον, ότι είναι χρήσιμο σε μια λεκάνη να εξετάζονται από κοινού και μάλιστα με πολλαπλά σενάρια βροχοπτώσεων με διαφορετική κατανομή κάθε φορά στο χώρο, ώστε να διερευνηθεί η «πλημμυρική της συμπεριφορά» σε διάφορους τύπους βροχόπτωσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλές τιμές παροχής σε όλα τα σημεία εξόδου σε άμεσο χρονικό διάστημα από την έναρξη της βροχόπτωσης, γεγονός το οποίο μαρτυρεί ότι το ρέμα Γιαννούλας είναι επιρρεπές σε αιφνίδιες πλημμύρες. Μετά από ακραία βροχόπτωση έχει να διαχειριστεί το νερό από έναν μεγάλο ορεινό όγκο, με απότομες μορφολογικές κλίσεις και πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο καταλήγει σε περιοχές μικρών κλίσεων, με πληθώρα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (βιομηχανική περιοχή). Ο μικρός χρόνος απόκρισης καθιστά δύσκολη τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου και ανώφελη τη λειτουργία ενός συστήματος έγκαιρης

προειδοποίησης για πλημμύρα στις κατάντη περιοχές, που υπάρχει σημαντική κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη γέφυρα επί της οδού Μεγαρίδος στην οποία κρίνεται άμεση η ανάγκη επιδιορθώσεων. Η γέφυρα αυτή έχει υποστεί καταρρεύσεις από προηγούμενα πλημμυρικά γεγονότα και αποτελεί ένα σημείο υψηλού κινδύνου, καθώς εκεί μπορούν να υπάρξουν απώλειες ανθρωπίνων ζωών. Λίγο μικρότερης προσοχής χρήζει η περιοχή συμβολής του ρέματος Γιαννούλας με το ρέμα Μαύρης Ώρας, όπου οι τιμές της παροχής είναι ιδιαίτερα αυξημένες, εφόσον το δεύτερο μεταφέρει το νερό από έναν μικρότερο όμως καθόλου αμελητέο ορεινό όγκο. Μια πιθανή υπερχειλίση των κοιτών σε εκείνη την περιοχή μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τις γειτονικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τα έργα διευθέτησης των κοιτών που έχουν πραγματοποιηθεί ήδη στη συγκεκριμένη περιοχή. Θα πρέπει όμως, να εξεταστεί το ενδεχόμενο σημαντικής αύξησης της ταχύτητας ροής στην κοίτη, λόγω της τεχνητής επιφάνειάς της, που μπορεί να έχει ως συνέπεια να υπάρξουν ζημιές ή υπερχειλίσεις στην περιοχή συμβολής των ρεμάτων Γιαννούλας, Μαύρης Ώρας και Διυλιστηρίων. Τέλος, στο σημείο εξόδου Α που αποτελεί την έξοδο της ορεινής λεκάνης, θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο διευθέτησης του ρέματος με σκοπό τη μείωση της ταχύτητας ροής του νερού, το οποίο θα καταλήξει αργότερα στην πεδινή κοίτη μετά από ακραία βροχόπτωση. Όσα έργα διευθέτησης έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στο ύψος της Αττικής Οδού, είναι ωφέλιμα για τον περιορισμό των πλημμυρών σε εκείνη την περιοχή. Η εμπειρία βέβαια, έχει δείξει ότι για μικρές χειμαρρικές λεκάνες (και όχι μόνο), τα αντιπλημμυρικά έργα πρέπει να αφορούν το σύνολο της λεκάνης, περιλαμβάνοντας δράσεις και παρεμβάσεις τόσο στο ανάντη ορεινό τμήμα όσο και στο κατάντη πεδινό. Αυτή η προσπάθεια θα μπορούσε να ενισχυθεί από πιθανές δένδροφυτεύσεις ή άλλου είδους διαχειριστικές δράσεις της επιφάνειας της λεκάνης, σε σημεία όπου αυτό είναι εφικτό, οι οποίες ενδεχομένως θα μείωναν την ταχύτητα ροής, και τις τιμές των μέγιστων πλημμυρικών παροχών. Όργανα/αισθητήρες μέτρησης της παροχής σε διάφορα σημεία κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ρέματος, καθώς και τουλάχιστον ένας μετεωρολογικός σταθμός εντός της λεκάνης απορροής, θα μπορούσαν να συνεισφέρουν σημαντικά στην πρόληψη και τον περιορισμό των αρνητικών συνεπειών από την εκδήλωση μελλοντικών ακραίων πλημμυρικών γεγονότων. Περαιτέρω διερεύνηση και μελέτη της περιοχής θα δράσουν ενισχυτικά στη μετρίαση του πλημμυρικού κινδύνου. Το ρέμα Γιαννούλας, πρέπει να θεωρηθεί ως ένα ρέμα επιρρεπές στον πλημμυρικό κίνδυνο και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα το συντομότερο δυνατό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ/ΠΗΓΕΣ:

Alaska Satellite Facility - ASF (2022). *ALOS PALSAR: High Resolution Terrain Corrected DEM*. [Data file]. Available at: <https://search.asf.alaska.edu>

Center for Hydrometeorology and Remote Sensing – CHRS (2022). *PERSIANN-CCS* [Data files] Available at: <https://chrsdata.eng.uci.edu>

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

Copernicus Programme (2022). *Corine Land Cover 2018*. [Data file]. Available at: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

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
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.033>

Emergency Events Database (2022). [Data]. Available at: <https://public.emdat.be/data>

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2016a). *ArcMap: Flow Direction*. Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2016b). *ArcMap: How Flow Direction works*. Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2016c). *ArcMap: How Flow Accumulation works*. Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2016d). *ArcMap: Flow Length*. Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-length.htm>

Environmental Systems Research Institute – ESRI (2016e). *ArcMap: How Slope works*. Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>

Kalogeropoulos, K., Karalis, S., Karymbalis, E., Chalkias, C., Chalkias, G. & Katsafados, P. (2013). *Modeling flash floods in Vouraikos River mouth, Greece*. Global Congress on ICM, 2: 1135-1146 Available at:
https://www.researchgate.net/publication/259058873_Modeling_Flash_Floods_in_Vouraikos_River_Mouth_Greece

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 <http://dx.doi.org/10.1127/0372-8854/2012/S-00072>

Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A. & Fraczek, W. (1996). *Unit hydrograph derived for a spatially distributed velocity field*. Hydrological Processes, 10 (6): 831-844 [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199606\)10:6%3C831::AID-HYP374%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199606)10:6%3C831::AID-HYP374%3E3.0.CO;2-N)

Melesse, A.M. and 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): 863-879.
<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): 1401-1409 [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199610\)10:10%3C1401::AID-HYP469%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199610)10:10%3C1401::AID-HYP469%3E3.0.CO;2-3)

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

Storm Water Management Commission of Lake County (2022). *Watersheds*. [Image]. Available at:
<https://www.lakecountyil.gov/2375/Watersheds?fbclid=IwAR3JE6uE07V-evb5js0-Q9fTeQTE4h15bsJIXdzwyA2uZgkYpDXW8uf7K04>

Tsanakas, K., Gaki-Papanastassiou, K., Kalogeropoulos, K., Chalkias, C., Katsafados, P. & Karymbalis, E. (2016). *Investigation of flash flood natural causes of Xirolaki Torrent, Northern Greece based on GIS modeling and geomorphological analysis*. Natural Hazards, 84 (2): 1015-1033 <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2471-1>

United Nations International Strategy for Disaster Reduction - UNISDR (2009). *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations. Available at:
https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf

Villagran De Leon, J.C. (2006). *Vulnerability: A Conceptual and Methodological Review*. UNU-EHS Available at:
<https://collections.unu.edu/eserv/UNU:1871/pdf3904.pdf>

Virtual Campus in Hydrology and Water Resources - VICAIRe (2006a). 1.A. *Basic Hydrology*. Available at:
<https://echo2.epfl.ch/VICAIRE/?fbclid=IwAR1xO8JkjTq9Wmjr3jWdJO1y9WmYY0-DT7hAUdUc82tnkG8Bk7ad7JVeql>

Virtual Campus in Hydrology and Water Resources - VICAIRe (2006b). 1.A. *Basic Hydrology*. [Image]. Available at:
https://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_2/main.htm

Βαφειάδης, Μ. (2004). *Σημειώσεις: Υδρογραφήματα*. [διάγραμμα]. Διαθέσιμο στο:
<https://users.auth.gr>

Περιφέρεια Αττικής (2015). *Μελέτη Διευθέτησης Χειμάρρου Αγ. Ιωάννη Θριασίου Πεδίου Δ. Αττικής από Χ.Θ. 1+400 έως Χ.Θ. 6+125 (ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ)*. Ελληνική Δημοκρατία.