



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας &

Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

“Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου”

Κατεύθυνση Γεωπληροφορική

**Διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης με την
επιφανειακή απορροή, σε χειμαρρική λεκάνη (ποταμός Κλαδέος) με την
αξιοποίηση Σ.Γ.Π**

Διπλωματική Εργασία του

Πεντέρη Δημήτριου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας &

Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα Γεωγραφίας

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

“Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου”

Κατεύθυνση Γεωπληροφορική

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Χρίστος Χαλκιάς (Επιβλέπων),

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο

Πανεπιστήμιο

Κατσαφάδος Πέτρος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο

Πανεπιστήμιο

Καλογήρου Σταμάτης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο

Πανεπιστήμιο

Ο Δημήτριος Πεντέρης

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 προσβάλλει 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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο *“Διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης με την επιφανειακή απορροή, σε χειμαρρική λεκάνη (ποταμός Κλαδέος) με την αξιοποίηση Σ.Γ.Π”*, μου ανετέθη από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου κ. Χρίστο Χαλκιά, το Νοέμβριο του 2016.

Η εργασία αυτή συνιστά το επιστέγασμα των προσπαθειών και του κόπου που κατεβλήθησαν καθ’ όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού σταδίου σπουδών, ενώ παράλληλα ολοκληρώνεται ένα σημαντικό κεφάλαιο, αυτό της φοίτησης μου στο μεταπτυχιακό τμήμα της Γεωπληροφορικής του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου.

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί εάν δεν υπήρχε η καθοριστική αρωγή και συμβολή πολλών ανθρώπων και συνεπώς θεωρώ υποχρέωση μου να τους ευχαριστήσω όλους ξεχωριστά.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χαλκιά, επιβλέποντα του παρόντος πονήματος, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση του και την εξαιρετική συνεργασία τόσο στα πλαίσια της υλοποίησης του όσο και καθ’ όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος. Η αμέριστη βοήθεια καθώς και οι σημαντικές συμβουλές και υποδείξεις του, συνέβαλαν στην τελική διαμόρφωση του κειμένου. Ουσιαστικά μου δόθηκε η δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο, γνωστό τόσο στο προπτυχιακό όσο και στο μεταπτυχιακό στάδιο σπουδών, στο οποίο έγινε μια προσπάθεια διαφοροποίησης και εξέλιξης της μεθοδολογίας. Έτσι αποκομίστηκαν γνώσεις και εμπειρίες χρήσιμες και απαραίτητες για το μέλλον και τη μετέπειτα πορεία μου.

Παράλληλα, θα ήθελα ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Πέτρο Κατσαφάδο, για την έμπρακτη συμβολή του με την παροχή των πρωτογενών δεδομένων βροχόπτωσης και τις σημαντικές παρατηρήσεις του, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Σταμάτη Καλογήρου και γενικότερα όλους τους καθηγητές του τμήματος Γεωγραφίας, καθότι οι γνώσεις που μου μετέδωσαν, διαδραμάτισαν καταλυτικό ρόλο στην απόδοση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Γεωγραφίας του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου, κ. Κλεομένη Καλογερόπουλο, για την συμβολή, τη βοήθεια, την συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε καθ’ όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Θα ήταν παράλειψη μου να μην δώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην οικογένεια μου, για την συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου παρείχε, τόσο σε ψυχολογικό όσο και οικονομικό επίπεδο, ώστε να αντιμετωπίσω τις όποιες δυσκολίες προέκυψαν κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς όλους τους συναδέλφους και τους στενούς φίλους μου και ιδιαίτερα στον Σωτήρη Λεβέντη και τον Στέφανο Κριαράκη για την καθοριστική βοήθεια, την ενθάρρυνση και την στήριξη τους μέχρι την τελευταία στιγμή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΑ... ..	8
Ευρετήριο Πινάκων	8
Ευρετήριο Εικόνων	9
Ευρετήριο Σχημάτων	11
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	13
ABSTRACT.....	13
1. Εισαγωγή	16
2. Πλημμυρικά φαινόμενα	18
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία	18
2.2 Αίτια δημιουργίας πλημμυρικών φαινομένων.....	20
2.3 Τύποι και κατηγορίες πλημμυρικών φαινομένων	22
2.4 Η Οδηγία 2007/60/EK για τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας.....	25
2.5 Γεωγραφία του πλημμυρικού προβλήματος	28
3. Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού	34
3.1 Γενικά	34
3.2 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού.....	35
3.3 Το μετεωρολογικό μοντέλο WRF... ..	38
4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών & Υδρολογία	42
4.1 Εισαγωγή στα Σ.Γ.Π (GIS)	42
4.2 Η επιστήμη της Υδρολογίας.....	44
4.2.1 Υδρολογικός Κύκλος.....	44
4.3 Υδρολογικά Μοντέλα	45
4.3.1 Ορισμός.....	45
4.3.2 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων.....	46
4.3.3 Υδρολογικά μοντέλα & ΣΓΠ	47
4.4 Υδρογράφημα απορροής.....	49
4.4.1 Υδρογράφημα και χαρακτηριστικά μεγέθη	49

4.5 Σχέσεις βροχής-απορροής.....	53
4.5.1 Μοναδιαίο Υδρογράφημα	53
4.5.1.1 Ορισμός και θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος.....	53
4.5.1.2 Μέθοδοι Ανάπτυξης Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων	56
4.5.2 Μοντέλα βροχής-απορροής με χρήση ΣΓΠ.....	59
5. Περιοχή μελέτης.....	68
5.1 Ο ποταμός Αλφειός.....	68
5.1.1 Ποταμός Κλαδέος	70
5.2 Υδρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά	72
6. Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου.....	73
6.1 Γενική περιγραφή της μεθοδολογίας.....	73
6.2 Δεδομένα Εισόδου	76
6.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ-DEM)	78
6.2.2 Συντελεστής Τραχύτητας κατά Manning.....	80
6.2.3 Βροχομετρικά δεδομένα	83
6.2.3.1 Ατμοσφαιρική προσομοίωση για την παραγωγή βροχομετρικών δεδομένων ...	84
6.2.3.2 Σενάρια βροχόπτωσης (πρότυπα βροχόπτωσης-rainfall patterns).....	84
6.2.3.3 Δημιουργία grids βροχόπτωσης με τη χρήση της μεθόδου IDW	95
6.3 Εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου	100
7. Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	110
7.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	110
7.1.1 Απόκριση της λεκάνης	131
7.2 Συμπεράσματα.....	143
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149

ΕΥΡΕΤΗΡΙΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 6.2.2.1 Πίνακας συντελεστών τραχύτητας κατά Manning	81
Πίνακας 6.2.3.2.1 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης	85
Πίνακας 6.2.3.2.2 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης.....	85
Πίνακας 6.2.3.2.3 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό).....	87
Πίνακας 6.2.3.2.4 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)	88
Πίνακας 6.2.3.2.5 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)	88
Πίνακας 6.2.3.2.6 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) που ακολουθεί κανονική κατανομή	90
Πίνακας 6.2.3.2.7 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί κανονική κατανομή	90
Πίνακας 6.2.3.2.8 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) που ακολουθεί τυχαία κατανομή.....	91
Πίνακας 6.2.3.2.9 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί τυχαία κατανομή.....	92
Πίνακας 6.2.3.2.10 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) με αύξηση τιμών κατά 50%	92
Πίνακας 6.2.3.2.11 Πίνακας αθροιστικής βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) με αύξηση τιμών κατά 50%	93
Πίνακας 6.2.3.12 Πίνακας ωριαίας βροχόπτωσης του πλημμυρικού συμβάντος (Κλαδέος- 5/2/12)	94
Πίνακας 7.1.1 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Α΄)	112
Πίνακας 7.1.2 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Β΄)	115
Πίνακας 7.1.3 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Γ΄)	118

Πίνακας 7.1.4 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Δ')	121
Πίνακας 7.1.5 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Ε')	123
Πίνακας 7.1.6 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο ΣΤ')	126
Πίνακας 7.1.7 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Ζ')	129
Πίνακας 7.2.1 Κατάταξη των σεναρίων βροχόπτωσης.....	145

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.5.1 Παγκόσμια κατανομή καταστροφικών πλημμυρών κατά την χρονική περίοδο 1974- 2003	29
Εικόνα 2.5.2 Χωρική κατανομή αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων ανά διοικητική μονάδα	32
Εικόνα 2.5.3 Χωρική κατανομή ανθρώπινων απωλειών ανά διοικητική μονάδα	33
Εικόνα 4.2.1.1 Ο Υδρολογικός κύκλος.....	45
Εικόνα 4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων βάσει της χωρικής τους κλίμακας	47
Εικόνα 4.4.1.1 Υδρογράφημα απορροής.....	52
Εικόνα 4.5.1.1.1 Αρχή της αναλογίας.....	54
Εικόνα 4.5.1.1.2 Αρχή της επαλληλίας.....	55
Εικόνα 4.5.1.2.1 Υπολογισμός καμπύλης S.....	57
Εικόνα 5.1.1 Αποτύπωση της θέσης του Αλφειού ποταμού	68
Εικόνα 5.1.2 Οι υπολεκάνες του Αλφειού ποταμού	69
Εικόνα 5.2.1.1 Θέση περιοχής μελέτης.....	70
Εικόνα 5.2.1.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί & υδρογραφικό δίκτυο Κλαδέου ποταμού	71
Εικόνα 5.3.1 Χάρτης υπερετήσιας βροχόπτωσης.....	72
Εικόνα 6.1.1 Το εννοιολογικό μοντέλο της μεθοδολογίας	74
Εικόνα 6.1.2 Ποσοτικοποίηση των προτύπων βροχόπτωσης σε πρότυπα απορροής	75
Εικόνα 6.2.1.1 Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της λεκάνης απορροής του Κλαδέου ποταμού, δεδομένης κλίμακας 1:5000 (cell size 5x5)	80
Εικόνα 6.2.2.1 Χάρτης συντελεστών τραχύτητας κατά Manning (cell size 5x5).....	82
Εικόνα 6.2.3.1 Χάρτης πρόγνωσης καιρού στις 3-4 Φεβρουαρίου 2012	94

Εικόνα 6.2.3.3.1 Χάρτης grid πραγματικής βροχόπτωσης (2ο τρίωρο)	97
Εικόνα 6.2.3.3.2 Χάρτης grid βροχόπτωσης (Σενάριο ομοιόμορφης κατανομής).....	98
Εικόνα 6.2.3.3.3 Χάρτης grid βροχόπτωσης 7ου τριώρου (Σενάριο καν. κατανομής)	98
Εικόνα 6.2.3.3.4 Χάρτης grid βροχόπτωσης 2 ^{ου} τριώρου(Σενάριο τυχαίας κατανομής).....	99
Εικόνα 6.2.3.3.5 Χάρτης grid βροχόπτωσης 2 ^{ου} τριώρου(Σενάριο αύξησης των τιμών κατά 50%)	99
Εικόνα 6.3.1 Εννοιολογικό διάγραμμα μοντέλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας.....	100
Εικόνα 6.3.2 Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ.επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου)	101
Εικόνα 6.3.3 Διαδικασία διεύθυνσης ροής.....	102
Εικόνα 6.3.4 Διαδικασία συσσώρευσης ροής	103
Εικόνα 6.3.5 Διαδικασία αυτοματοποίησης της μεθοδολογίας με την χρήση Model Builder	109
Εικόνα 7.1.1 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση μοντέλου προσομοίωσης)	111
Εικόνα 7.1.2 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση μοντέλου προσομοίωσης)	113
Εικόνα 7.1.3 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά σταθμό).....	114
Εικόνα 7.1.4 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά σταθμό).....	116
Εικόνα 7.1.5 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά τρίωρο).....	117
Εικόνα 7.1.6 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά τρίωρο).....	119
Εικόνα 7.1.7 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή).....	120
Εικόνα 7.1.8 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή).....	121

Εικόνα 7.1.9 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή)	122
Εικόνα 7.1.10 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή)	124
Εικόνα 7.1.11 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Αύξηση τιμών βροχόπτωσης κατά 50%)	125
Εικόνα 7.1.12 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Αύξηση τιμών βροχόπτωσης κατά 50%)	127
Εικόνα 7.1.13 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Πραγματικό πλημμυρικό γεγονός στις 5/2/15)	128
Εικόνα 7.1.14 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Πραγματικό πλημμυρικό γεγονός στις 5/2/15)	130
Εικόνα 7.1.1.1 Διαδικασία υπολογισμού των παλμών του νερού ανά μονάδα χρόνου	132

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2.1 Υδρογράφημα αστικού υδατορέματος κατά τη διάρκεια μια καταιγίδας	22
Σχήμα 2.5.1 Εποχιακή κατανομή πλημμυρικών επεισοδίων	30
Σχήμα 2.5.2. Μηνιαία κατανομή πλημμυρικών επεισοδίων	30
Σχήμα 2.5.3 Καταγραφή αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων και ανθρώπινων απωλειών ανά δεκαετία	31
Σχήμα 3.1.1 Οι βασικές διεργασίες που προσομοιώνονται σε ένα αριθμητικό ατμοσφαιρικό μοντέλο	35
Σχήμα 3.3.1 Περιγραφή του συστήματος του μοντέλου WRF.....	39
Σχήμα 3.3.2 Η κατακόρυφη δομή του υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου.....	40
Σχήμα 5.4.2.2.1 Υπολογισμός καμπύλης S.....	115
Σχήμα 7.1.1.1 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Περίπτωση βροχόπτωσης Ατμοσφαιρικού Μοντέλου προσομοίωσης)	133
Σχήμα 7.1.1.2 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο ομοιόμορφης κατανομής της	

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι φυσικοί κίνδυνοι είναι ιστορικά μια ουσιαστική απειλή για την πρόοδο και την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Οι πλημμύρες, λογίζονται ως ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, λόγω της συχνής εμφάνισής τους, καθώς και της μεγάλης χωρικής τους εξάπλωσής. Αρκετές περιοχές στον ελλαδικό χώρο, πολύ συχνά υποφέρουν από τοπικά πλημμυρικά επεισόδια τα οποία προξενούνται από ισχυρές καταιγίδες και συνδέονται, με μικρού ή μεσαίου μεγέθους, υδρολογικές λεκάνες ή τοπικά υδατορεύματα, όπως π.χ. χείμαρρους. Πρέπει να σημειωθεί πως, οι στιγμιαίες ή αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods) μπορεί να εμφανίζουν μικρή συχνότητα και ο χρόνος έως το σημείο αιχμής να είναι πολύ σύντομος αλλά διακρίνονται για την μεγάλη ισχύ και ένταση τους. Η σχέση της βροχής-απορροής, έχει μελετηθεί για μικρά υδρογραφικά δίκτυα, χειμαρρικών λεκανών απορροής της ευρύτερης Μεσογείου, σε διαφορετικά περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Παρά την υψηλή σημασία των αιφνίδιων πλημμυρών σε λεκάνες υδατορευμάτων εφήμερης ροής, η υδρολογική μελέτη και ανάλυση αυτών στον ελλαδικό χώρο, καθίσταται διαχρονικά ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική, γεγονός που πηγάζει από την έλλειψη και αδυναμία μέτρησης των τιμών της κατακρήμνισης και της παροχής. Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών διευκολύνει σε σημαντικό βαθμό την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, καθιστώντας δυνατή την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών – στις οποίες συγκαταλέγεται και εκείνη του υδρολογικού κύκλου – συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στη μελέτη των πλημμυρικών επεισοδίων. Σήμερα, γίνεται ολοένα και πιο προφανής η σημασία της αειφορικής διαχείρισης και της προστασίας των υδατικών πόρων, για την ανθρώπινη ζωή. Συνεπώς, τα GIS, συνιστούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση και σχεδίαση των συστημάτων των υδατικών πόρων.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, με την επιφανειακή απορροή, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου (παραπόταμος του Αλφειού ποταμού), ο οποίος βρίσκεται στην ΒΔ Πελοπόννησο, διαρρέει την πόλη της Αρχαίας Ολυμπίας και αποστραγγίζει μια έκταση 32,28 km². Ουσιαστικά τα GIS, αποτελούν το περιβάλλον στο οποίο, σχεδιάζονται και αναλύονται πληθώρα χωροχρονικών προτύπων βροχόπτωσης και απορροής. Αξιοποιώντας τα βροχομετρικά δεδομένα που αντλήθηκαν από ένα μοντέλο Ατμοσφαιρικής Προσομοίωσης, αναπτύσσονται μια σειρά από πρότυπα βροχόπτωσης (rainfall patterns), η ανάλυση των οποίων αποδίδει την χωροχρονική

κατανομή της. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, αξιοποιεί ένα χωρικά κατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής-απορροής (Maidment 1993, Olivera and Maidment 1999; Melesse and Graham 2004; Du et al. 2009), σε περιβάλλον GIS, έτσι ώστε κάθε ένα από αυτά τα πρότυπα βροχόπτωσης να παράξει και ένα συγκεκριμένο πρότυπο απορροής (runoff patterns). Σχεδιάζεται δηλαδή ένα χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο υδρογράφημα, και αφορά στην υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής σε περιβάλλον GIS, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster grid), με σκοπό τη διερεύνηση της «απόκρισης» της λεκάνης του χείμαρρου στα υποθετικά σενάρια βροχόπτωσης. Ο κύριος στόχος της προσομοίωσης, είναι η εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών ή αιχμών (flood peaks) καθώς και των κρίσιμων χρόνων (critical time) τους, έτσι ώστε να διερευνηθεί το κατά πόσο εφικτό είναι η ανίχνευση και η αναγνώριση των δυσμενέστερων χωροχρονικών προτύπων απορροής.

Λέξεις-κλειδιά: Πλημμυρικός κίνδυνος, Χειμαρρική λεκάνη, Μοντέλα Βροχής-Απορροής, Χωροχρονική Ανάλυση, Σύνθετο Μοναδιαίο Υδρογράφημα, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

ABSTRACT

Natural hazards are historically a substantial threat to the progress and development of human communities. Floods are considered to be one of the most devastating natural phenomena due to their frequent occurrence, as well as their crucial spatial spread. Several areas in Greece, very often, suffer from local flood events that caused by severe storms and they are associated with, small or medium size, catchment drained by ephemeral water courses, such as torrents. It should be noted that flash floods tend to have low frequency, but they are distinguished by great power and intensity. The rainfall-runoff relationship has been studied for small hydrographic networks of torrential basins in the Mediterranean area, in different environments characterized by particular climatic conditions. Despite the high importance of sudden floods, the hydrological study and analysis of these catchments in Greece has been extremely difficult and demanding over time, due to the lack of precipitation and discharge gauges. Generally, floods in the Mediterranean area are linked to storming events, but there are additional factors that can intensify flooding such as the pattern of the drainage network, the morphology of the catchment and the human interventions. Geographic Information Systems technology, successfully, facilitates the processing of large data,

in order to generate simulation models of natural processes - including the hydrological cycle - thus contributing to the study of flood events. Nowadays, is becoming more and more obvious the importance of sustainable management and protection of water resources, indispensable factors for human life. Therefore, GISs can be a very useful tool towards water resources systems analysis and planning.

This paper is focusing on the presentation of a methodology for the investigation on the correlation between the spatiotemporal distribution of the rainfall and the surface runoff in the hydrological sub-basin of Cladeos river which is included in Alfeios basin area. The selected sub-basin is located in the northwest Peloponnese, flows through the town of Archaia Olympia and drains an area of 32,28 km². Essentially, utilizing the GIS environment, a plethora of spatiotemporal patterns of rainfall and runoff have been analyzed. Using the rainfall data, derived from an Atmospheric Simulation model, a series of rainfall patterns are developed and this analysis indicates the spatiotemporal procedure in a region. The proposed methodology uses a spatially distributed rainfall-runoff model (Maidment 1993, Olivera and Maidment 1999; Melesse and Graham 2004; Du et al., 2009), in a GIS environment, in order to export specific runoff patterns. Thus, a spatially distributed unit hydrograph is developed and concerns the hydrological analysis of a catchment, using mosaic data (raster grid), to investigate the catchment's response to the hypothetical rainfall scenarios. The main objective of the simulation is to estimate the flood peaks and critical time in order to detect and identify the most adverse spatiotemporal runoff patterns.

Keywords: Flood Risk, Torrential catchment, Rainfall-Runoff Model, Spatiotemporal Analysis, Unit Hydrograph, GIS

1. Εισαγωγή

Από τα πιο συνήθη και καταστροφικά φυσικά φαινόμενα σε παγκόσμια κλίμακα, θεωρούνται οι πλημμύρες, τα οποία προβληματίζουν και ταλανίζουν την ανθρωπότητα από το παρελθόν έως και σήμερα. Συνολικά έχουν καταγραφεί από το 1900 πάνω από 3.000 καταστροφές, από το Ερευνητικό Κέντρο Επιδημιολογίας και Καταστροφών (CRED) (Domakinis et al, 2014). Μεταξύ αυτών, οι πιο επικίνδυνες είναι οι στιγμιαίες ή αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods), οι οποίες μπορεί να εμφανίζουν μικρή συχνότητα και ο χρόνος έως το σημείο αιχμής να είναι πολύ σύντομος αλλά διακρίνονται για την μεγάλη ισχύ και ένταση τους, με αποτέλεσμα να προξενούν τις περισσότερες ανθρώπινες απώλειες. Αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, είναι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η οποία ενδέχεται να συμβάλλει σε πιθανή αύξηση της κλίμακας και της συχνότητας των πλημμυρικών συμβάντων (Smith and Petley 2009, Κουργιαλάς 2010). Ο «πλημμυρικός κίνδυνος», σχετίζεται τόσο με το ενδεχόμενο εκδήλωσης ενός πλημμυρικού επεισοδίου, όσο και με τις δυνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ουσιαστικά, συνιστά παράγωγο τόσο των κοινωνικών όσο και των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων. Οι ακραίες πλημμυρικές παροχές, που συχνά προκαλούνται από ραγδαίες καταιγίδες, μπορούν να επιφέρουν ανθρώπινες απώλειες, καθώς και εκτεταμένες φθορές στα κτίρια, τις υποδομές, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και υποβάθμιση του περιβάλλοντος (Κουργιαλάς 2010, Καρύμπαλης, κ.α 2015).

Η τεχνολογική εξέλιξη κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, ειδικά στον τομέα της γεωπληροφορικής, έχει προσφέρει νέα πλεονεκτήματα όσον αφορά στα υδρολογικά μοντέλα. Οι σημαντικότερες εξ' αυτών είναι τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing). Σήμερα, ιδιαίτερη μνεία γίνεται στην σημασία της διαχείρισης των υδατικών πόρων και της ανάλυσης των λεκανών απορροής, προκειμένου να βελτιωθεί η καθημερινή ζωή μέσα από την επίτευξη της ανάπτυξης και την προστασίας. Τα ζητήματα αυτά, όντας άμεσα συνυφασμένα με την μελέτη και την έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους παγκόσμιους πόρους, καθώς και με τα συνεχώς αυξανόμενα ακραία φυσικά φαινόμενα (π.χ., πλημμύρες και διάβρωση), καθιστούν την υλοποίηση και εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων ως βασική προτεραιότητα. Εξάλλου, τα υδρολογικά μοντέλα σε συνδυασμό με τα ΣΓΠ, για την εκτίμηση και την αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου έχουν

αναδειχθεί σε ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση, και τον σχεδιασμό των συστημάτων υδατικών πόρων, καθώς και την αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών.

Στην παρούσα μελέτη, επιτελείται η υδρολογική ανάλυση σε περιβάλλον GIS, όπου προκύπτει πληθώρα χωροχρονικών προτύπων (spatiotemporal patterns) βροχόπτωσης και απορροής. Ως περιοχή μελέτης έχει οριστεί η υπολεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού (π. Κλαδέος), ο οποίος βρίσκεται στη δυτική Πελοπόννησο, διαρρέει την πόλη της Αρχαίας Ολυμπίας και αποστραγγίζει μια έκταση 32,28 km². Κύριος στόχος, είναι η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής και η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σχεδιάζοντας ένα σύστημα βασισμένο σε GIS, στο οποίο υπεισέρχονται χωρικά δεδομένα (spatial data) και χωροχρονικά μετεωρολογικά δεδομένα (spatiotemporal meteorological data). Η βροχόπτωση μελετάται σαν χωροχρονικό φαινόμενο και κατά συνέπεια τα πρότυπα βροχόπτωσης (rainfall patterns), αντλούνται από ένα μοντέλο Ατμοσφαιρικής προσομοίωσης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής (Maidment 1993, Olivera and Maidment 1999; Melesse and Graham 2004; Du et al. 2009) και αφορά στην υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster δίκτυο). Προκειμένου να επιτευχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα, αξιοποιείται ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) υψηλής ανάλυσης, καθώς η τοπογραφία της επιφάνειας του εδάφους (DEM), θεωρείται ως ένα από τα πρωτεύοντα στοιχεία κατά την υλοποίηση του μοντέλου βροχής-απορροής. Το τελικό στάδιο του μοντέλου, είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός άμεσου μοναδιαίου υδρογραφήματος για μια ακραία βροχόπτωση, εκτιμώντας την απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Η ανάλυση του υδρογραφήματος, τονίζει πρωτεύοντα στοιχεία, όπως η πλημμυρική αιχμή καθώς και ο κρίσιμος χρόνος που μεσολαβεί προκειμένου να φθάσει την αιχμή αυτή αμέσως μετά την βροχόπτωση.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση περιοχών που είναι επιρρεπείς σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα. Επίσης, με την σχεδίαση των υδρογραφημάτων θα μπορούσε να συμβάλλει στην ανάπτυξη συστημάτων προειδοποίησης ή και πρόβλεψης μελλοντικών αιφνίδιων πλημμυρών. Τέτοιου είδους μοντέλα, μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και στην οικονομική και την περιβαλλοντική προστασία μιας δυνητικά πληγείσας περιοχής. Τέλος, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως εργαλεία από τους κυβερνητικούς οργανισμούς, τους φορείς λήψης αποφάσεων, την τοπική αυτοδιοίκηση κλπ, λόγω της ανάγκης για την μελέτη, ανάλυση και

αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών, των οποίων οι συνέπειες επηρεάζουν τους ανθρώπους και την περιουσία τους, την τοπική οικονομία, τις υποδομές, το περιβάλλον κλπ, καθώς και την κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης και προγράμμάτων για αειφορική χρήση και εκμετάλλευση των φυσικών πόρων (αντιπλημμυρικά έργα, φράγματα, διαστασιολόγηση γεφυρών κλπ).

2. Πλημμυρικά φαινόμενα

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Οι πλημμύρες (floods), είναι δίχως αμφιβολία ο υδρολογικός φυσικός κίνδυνος με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στην υφήλιο. Μαζί με τις σεισμούς (earthquakes), τις ηφαιστειακές εκρήξεις (eruptions), τις πυρκαγιές (wildfires) και τις κατολισθήσεις (landslides), θεωρούνται ως τα πιο σημαντικά και καταστροφικά φυσικά φαινόμενα (natural disasters (Cluckie et al 1991, Agnone 1995). Δύνανται να προκληθούν από γεγονότα όπως καταιγίδες, τυφώνες, παλινροιακά κύματα και τήξη πάγων ή χιονιού, και σε συνδυασμό ή όχι με αστοχίες σε τεχνητά έργα (π.χ φράγματα) και γενικά προβληματίζουν και ταλανίζουν την ανθρωπότητα από το παρελθόν έως και σήμερα. Οι επιπτώσεις που προξενούν είναι δυσμενείς, όπως απώλειες ζωών, τραυματισμοί, φθορές ή καταστροφές στο κοινωνικοοικονομικό σύστημα με τις υποδομές και τις κοινωνικές δομές του, καθώς και στο φυσικό περιβάλλον (Smith and Petley 2009, Κουργιαλάς 2010).

Σύμφωνα με το Αθρο 2 παρ. 1 της Οδηγίας 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων της πλημμύρας, ως πλημμύρα, ορίζεται *«η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Αυτό περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χειμάρρους, εφήμερα ρέματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης»*.

Τα πλημμυρικά φαινόμενα, δύσκολα μπορούν να αποσοβηθούν, ενώ η φύση και κλίμακα τους ποικίλει. Η εξάπλωσή τους είναι παγκόσμια σαν αποτέλεσμα των μορφών εμφάνισής της, και αφορά τόσο τα ανεπτυγμένα όσο και τα αναπτυσσόμενα κράτη. Η πρόκληση ενός τέτοιου επεισοδίου μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικά όσο και ανθρωπογενή αίτια (Λέκκας 2000, Πεντέρης κ.α 2015). Ωστόσο, η αύξηση της πιθανότητας της εκδήλωσής τους και των δυσμενών επιπτώσεων που επιφέρουν, σχετίζεται κατά κύριο λόγο με τις υφιστάμενες ανθρωπογενείς δραστηριότητες και την εντατικοποίηση αυτών (Λέκκας 2000). Παράλληλα, πρωταρχικής

σημασίας κρίνεται η κλιματική αλλαγή, η οποία θα επιφέρει αλλαγή στις ισορροπίες και στο υδρολογικό ισοζύγιο, με εμφάνιση βροχοπτώσεων υψηλότερης έντασης και άνοδο της στάθμης της θάλασσας, γεγονός που ενδέχεται να συμβάλλει σε αύξηση της συχνότητας και της κλίμακας των πλημμυρικών φαινομένων. Ο συνδυασμός των παραπάνω με τις συνεχείς παρεμβάσεις σε πληθώρα υδρολογικών λεκανών, καθώς και την αδυναμία που παρατηρείται κατά τη διαχείριση τους, δημιουργούν ορατούς κινδύνους και προβλήματα αναφορικά με την ομαλή διόδευση των πλημμυρών (Λέκκας 2009, Κουργιαλάς 2010).

Ωστόσο πέραν των καταστροφικών συνεπειών τους, οι πλημμύρες, περισσότερο από κάθε άλλο κίνδυνο, έχουν την δυνατότητα να αποτελέσουν ταυτόχρονα και πολύτιμο πόρο. Συνεπώς, σε ορισμένες περιπτώσεις διακρίνονται για τις ευεργετικές τους ιδιότητες, καθότι εμπλουτίζουν τα εδάφη με ιλύες, συμβάλλοντας στην διατήρηση και συντήρηση της γονιμότητας και ευφορίας τους, τα τροφοδοτούν με νερό για φυσική άρδευση ενώ παράλληλα αποπλένουν τα επιφανειακά τους τμήματα από τα άλατα. Μάλιστα σε ημιάνυδρες εκτάσεις όπως π.χ της Αφρικής, η οικολογική και οικονομική συνεισφορά πιθανών περιοδικών κατακλύσεων θεωρείται ζωτικής σημασίας (Κουργιαλάς 2010).

Μέχρι σήμερα, οι αξιοσημείωτες προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας, έχουν μετουσιωθεί σε πληθώρα ερευνών και μελετών, σχετικά με τη υλοποίηση και εφαρμογή αποτελεσματικών μεθόδων και την ανάπτυξη συστημάτων για ζητήματα όπως: α) ο προσδιορισμός και η ανάλυση του φαινομένου και των παραμέτρων που το προκαλούν, β) η αποτελεσματική εκτίμηση και πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων, γ) η εξέταση των επιπτώσεων που προξενούνται τόσο στους ανθρώπους όσο και στις περιουσίες τους και δ) η εύρεση μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης τέτοιου είδους φαινομένων (Κουργιαλάς 2010). Οι μέθοδοι, οι τεχνικές και οι τεχνολογίες εφαρμόζονται είτε μεμονωμένα ή συνδυαστικά, με σκοπό την ανάπτυξη συστημάτων για την εκτίμηση και πρόβλεψη των πλημμυρών και την μετρίαση της δράσης και των επιπτώσεων τους. Παρά το γεγονός ότι έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος σε αυτόν τον τομέα, το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί και συνεχίζει να υφίσταται, όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο αλλά σε παγκόσμια κλίμακα (Smith and Petley 2009, Κουργιαλάς 2010) .

2.2 Αίτια δημιουργίας πλημμυρικών φαινομένων

Όπως προαναφέρθηκε, το πλημμυρικό φαινόμενο αναφέρεται στην ανεξέλεγκτη κατάκλυση μιας περιοχής από νερό, καθότι α) η χωρητικότητα του φυσικού ή ανθρωπογενούς συστήματος αποστράγγισης δεν είναι κατάλληλη για να παροχετεύσει τον όγκο του νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση και β) τα υφιστάμενα αντιπλημμυρικά έργα κρίνονται ανεπαρκή, με αποτέλεσμα την μη ομαλή διοχέτευσή του σε όλη τη λεκάνη απορροής (Barredo 2007).

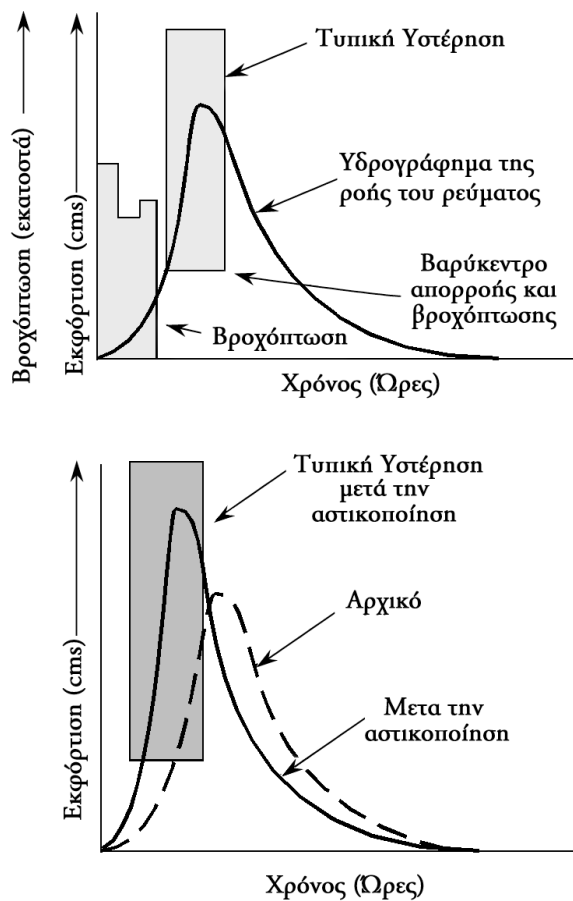
Οι παράγοντες που ενισχύουν τον τρόπο και τη διαδικασία συγκέντρωσης και κίνησης του νερού σε μια λεκάνη απορροής ή μια ευρύτερη περιοχή είναι οι εξής: α) τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (εμβαδόν, σχήμα, τοπογραφία, ανάγλυφο), β) τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, γ) τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποστράγγισης (υδρογραφικό δίκτυο, ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, γ) παράγοντες όπως η γεωλογική συγκρότηση, ο τύπος των εδαφών, το κλίμα και οι χρήσεις γης-φυτοκάλυψη (National Research Council 1991, Μαμάσης 2007).

Οι γενεσιουργές αιτίες στις οποίες οφείλεται η πρόκληση τέτοιων φαινομένων, έχουν να κάνουν τόσο με ατμοσφαιρικές και τεκτονικές διεργασίες όσο και με ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Πιο συγκεκριμένα, η προέλευση των πλημμυρικών όγκων νερού αποδίδεται σε α) ραγδαίες και παρατεταμένες βροχοπτώσεις, β) ταχεία τήξη χιονιών και παγετώνων, γ) ανύψωση της στάθμης του νερού (π.χ λόγω έντονης βροχόπτωσης) σε ρεύματα, υδροφόρα στρώματα, λίμνες κλπ με αποτέλεσμα την υπερχειλίση τους, δ) στην απότομη διάρρηξη ή θραύση φράγματος, ε) στην εισροή και διόγκωση της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές, στ) ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (π.χ λόγω τσουνάμι, παλίρροιας) (National Research Council 1991, Λέκκας 2000, Μαμάσης 2007). Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο πιο συχνός λόγος για τον οποίο συντελείται ένα πλημμυρικό επεισόδιο, είναι οι αιφνίδιες ραγδαίες βροχοπτώσεις πολύ υψηλής έντασης, επακόλουθο των οποίων είναι η υπερχειλίση των κοιτών των ποταμών- χειμάρρων, καθ' ότι το έδαφος δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει τόσο μεγάλες ποσότητες νερού (απότομη αύξηση της υδατοπαροχής) σε μικρό χρονικό διάστημα ή λόγω μείωσης της διατομής της κοίτης (Λέκκας 2000, Μαμάσης 2007).

Έπειτα από την κατάλληλη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διαπιστώνεται πως πέραν των γενικών αιτίων πρόκλησης ενός πλημμυρικού φαινομένου, υπάρχουν και βαθύτερα αίτια τα οποία λειτουργούν συνδυαστικά με τα παραπάνω και μπορούν να ενισχύσουν την εκδήλωση του φαινομένου.

Στο αστικό περιβάλλον, οι έντονες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις σε συνδυασμό με σημαντικές παραλείψεις και αστοχίες σε θέματα αντιπλημμυρικής προστασίας από τους αρμόδιους φορείς, έχει αυξήσει τόσο το μέγεθος όσο και τη συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων (Σχήμα 2.4.1) (Λέκκας 2000). Η συνεχής και εκτεταμένη αστική ανάπτυξη και οι βασικές εκφάνσεις της όπως, η πληθυσμιακή αύξηση, η αστικοποίηση, η ολοένα και μεγαλύτερη υλοποίηση οδικών και δομικών έργων, οδηγεί στην στεγανοποίηση της επιφάνειας της γης, μετατρέποντας την σε αδιαπέρατη, γεγονός που συμβάλλει ολοένα και περισσότερο στην εκδήλωση καταστροφικών πλημμυρικών επεισοδίων, αφού η αποστράγγιση των πλημμυρικών παροχών είναι ανεπαρκής έως αδύνατη (Κουργιαλάς 2010). Το γενικό συμπέρασμα είναι, ότι η αστικοποίηση συντελεί στην αύξηση της επιφανειακής απορροής και συνεπώς στον πλημμυρικό κίνδυνο, στις περισσότερες των περιπτώσεων (Λέκκας 2000).

Τέλος, συχνά αιτία πλημμυρογένεσης, αποτελούν επίσης α) ο εγκιβωτισμός και η τοπική στένωση των κοιτών, για την ανέγερση γεφυρών με ανοίγματα μικρότερα της υπάρχουσας αντιπλημμυρικής διατομής, β) η πλήρης κάλυψη των κοιτών ποταμών ή χειμάρρων, γ) η κατασκευή οδικών και άλλων έργων μεγάλης εμβέλειας, εγκάρσια προς την κοίτη ποταμών, δ) η ευθυγράμμιση του ρου των ποταμών, και ε) η εκτροπή της κοίτης ποταμών ή χειμάρρων (Κουργιαλάς 2010).



Σχήμα 2.2.1 Υδρογράφημα αστικού υδατορέματος κατά τη διάρκεια μια καταιγίδας (Λέκκας 2000)

2.3 Τύποι και κατηγορίες πλημμυρικών φαινομένων

Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την κατηγοριοποίηση των πλημμυρικών φαινομένων, σχετίζονται κατά κύριο λόγο, με το μέγεθος της πληγείσας περιοχής και τη διάρκεια της ενεργούς βροχόπτωσης που τα προξενεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο καθορίζονται η χωρική και η χρονική κλίμακα των πλημμυρικών φαινομένων. Λαμβάνοντας υπόψη τον χώρο και τον χρόνο που εκδηλώνεται ένα πλημμυρικό φαινόμενο, προκύπτουν δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι α) οι εκτεταμένες μεγάλης διάρκειας και β) οι τοπικές αιφνίδιες πλημμύρες (Schramm and Dries 1986, Bronstert 2003). Οι πλημμύρες συνήθως κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- ο **Στιγμιαίες ή αιφνίδιες πλημμύρες (Flash floods)**

Οι στιγμιαίες πλημμύρες ορίζονται ως εκείνες οι πλημμύρες που εκδηλώνονται με αιφνίδιο τρόπο, η πρόβλεψη τους καθίσταται δύσκολη, ενώ ο χρόνος έως το σημείο αιχμής είναι πολύ σύντομος (συνήθως λίγες μόνο ώρες) και η απορροή γι' αυτόν θεωρείται σημαντική. Οφείλονται κατά κύριο λόγο σε τοπικές βροχοπτώσεις μεγάλης ισχύος και έντασης, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε λεκάνες απορροής μικρού ή μετρίου μεγέθους όπου ο χρόνος απόκρισης τους είναι πολύ μικρός και διαρκούν για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (Kron 2005, Κουργιαλάς 2010). Οι παράγοντες που σχετίζονται με την πρόκληση των στιγμιαίων πλημμυρών είναι α) η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης, β) ο τύπος τους εδάφους και οι εδαφολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής, γ) η τοπογραφία της λεκάνης, δ) οι κλίσεις της λεκάνης και ε) αστικοποίηση και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, στ) οι χρήσεις γης και το ποσοστό φυτοκάλυψης της περιοχής (Doswell 2003). Αυτό που καθιστά τις flash floods τόσο καταστροφικές και επικίνδυνες, είναι η ταχύτητα και η ραγδαιότητα με τις οποίες συντελούνται. Οι ισχυρές και εντατικές καταιγίδες και η αδυναμία του εδάφους να απορροφήσει τις μεγάλες ποσότητες των υδάτων, προκαλούν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές ώρες), υψηλή επιφανειακή απορροή μεγάλης ταχύτητας, η οποία οδηγεί σε υπερχειλίση χειμάρρων, ρεμάτων, ποταμιών. Η δυναμική τους όπως και η επικινδυνότητα για ανθρώπινες απώλειες, τραυματισμούς και εκτεταμένες καταστροφές είναι πολύ μεγάλη. (Doswell 2003, Κουργιαλάς 2010). Τα δύο πιο σημαντικά περιστατικά στιγμιαίων πλημμυρών, σημειώθηκαν το 1996 στην Ισπανία (160 mm βροχής σε 1 ώρα) με 87 ανθρώπινα θύματα και πιο πρόσφατα το 2010 στην περιοχή Var της Γαλλίας (300 mm βροχής σε 12 ώρες), όταν λόγω της πλημμύρας έχασαν την ζωή τους 25 άνθρωποι (Berz et al 2001, EEA 2010).

- ο **Ποτάμιες πλημμύρες (River floods):**

Οι ποτάμιες πλημμύρες προξενούνται από τη σφοδρή, εντατική και παρατεταμένη βροχόπτωση για μεγάλο χρονικό διάστημα (αρκετές ημέρες ή ακόμη και εβδομάδες) σε μεγάλης έκτασης περιοχές, το οποίο ενδεχομένως να συνδυαστεί και με την τήξη χιονιού με αποτέλεσμα την υπερχειλίση ενός ποταμού (Kron 2005). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την κατάσταση κατά την οποία η χωρητικότητα του φυσικού ή ανθρωπογενούς συστήματος αποστράγγισης δεν επαρκεί για την αποφόρτιση του όγκου των υδάτων που προέρχονται από την εντατική βροχόπτωση ή όταν

δεν υφίστανται τα αναγκαία αντιπλημμυρικά έργα, με αποτέλεσμα το νερό να την υπερβαίνει και να εξαπλώνεται στα όμορα εδάφη (Jonkman 2005, Strahler 2003, Strahler 2011).

Όταν οι κοίτες των ποταμών κατακλύζονται από πλημμυρικούς όγκους, εκατέρωθεν τους, συσσωρεύονται και προσχώνονται αποθέσεις και ιζήματα διαμορφώνοντας έτσι σχεδόν επίπεδες εκτάσεις οι οποίες είναι γνωστές ως πλημμυρικές πεδιάδες ή πεδιάδες κατάκλυσης ή πεδιάδες υπερχείλισης ή πλημμυρικά πεδία (*floodplains*) (Λεκκας 2000, Bridge 2003). Ο όγκος του νερού ανά μονάδα χρόνου ροής σε ένα συγκεκριμένο σημείο (m^3/s), τη στιγμή που το νερό υπερχειλίζει την κοίτη ονομάζεται “εκφόρτιση πλημμύρας” και δύναται να προξενήσει καταστροφές (Λεκκας 2000).

Οι ποτάμιες πλημμύρες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, αυτές που συμβαίνουν στα ανάντη και εκείνες που συμβαίνουν στα κατάντη. Οι πλημμύρες στα ανάντη, προξενούνται λόγω σφοδρών και έντονων βροχοπτώσεων μικρής διάρκειας και εκδηλώνονται στα υψηλά τμήματα της αποστράγγισης, πάνω σε μία σχετικά μικρή περιοχή. Από την άλλη πλευρά, οι πλημμύρες στα κατάντη επηρεάζουν μια ευρεία περιοχή και συνήθως προξενούνται από καταιγίδες μεγάλης διάρκειας οι οποίες και έχουν αυξημένη επιφανειακή απορροή. Για να μετριαστούν ή και να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στα κατάντη, θα πρέπει μια πλημμύρα ελεγχθεί στα ανάντη, με διαδοχικά φράγματα για τη μείωση της ταχύτητας ροής των υδάτων (Λέκκας 2000).

ο Παράκτιες πλημμύρες (Coastal Floods)

Οι παράκτιες πλημμύρες, εκδηλώνονται κατά μήκος των ακτών των θαλασσών και των μεγάλων λιμνών και προέρχονται από την άνοδο της στάθμης των υδάτων είτε λόγω των δυνάμεων του ανέμου και της χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, ή μιας έντονης καταιγίδας, ενός τυφώνα κλπ. Σε περίπτωση που η δράση της συμπέσει με αυτή μιας μετεωρολογικής παλίρροιας που σημειώνεται κοντά στις ακτές, τότε μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή άνοδο της στάθμης της θαλάσσης και ακραία πλημμυρικά φαινόμενα στην παράκτια περιοχή (Jonkman 2005). Στην βάση δεδομένων της EM-DAT, οι παράκτιες πλημμύρες γενικά ταξινομούνται ως ανεμοθύελλες. Γενικά έχουν την δυναμική να επιφέρουν εκτεταμένες καταστροφές, τραυματισμούς και απώλειες ανθρωπίνων ζωών, καθώς συνήθως εμφανίζονται απρόσμενα, δίχως ουσιαστική προειδοποίηση. Συνεπώς ο χρόνος για προληπτική εκκένωση της δυνητικά πληγείσας περιοχής είναι ελάχιστος, με αποτέλεσμα να εκτίθενται σε αυτή μεγάλοι πληθυσμοί. Ειδικά, τα αναπτυσσόμενα κράτη όπως π.χ το Μπαγκλαντές, έχουν πληγεί ανεπανόρθωτα από τέτοιου είδους πλημμύρες. Μέχρι σήμερα,

έχουν επιτευχθεί σημαντικές βελτιώσεις σε παγκόσμιο επίπεδο αναφορικά με τα συστήματα πρόβλεψης για ενδεχόμενη εκδήλωση καταιγίδων και τυφώνων, καθώς και για την έγκαιρη προειδοποίηση και εκκένωση των απειλούμενων περιοχών (Jonkman et al 2008).

Ο «πλημμυρικός κίνδυνος» συνδέεται άρρηκτα τόσο με τις κοινωνικές όσο και με τις υδρομετεωρολογικές παραμέτρους. Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες δύναται να συμβάλλει στην αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου, ιδιαίτερα σε περίπτωση αλληλεπιδράσης μεταξύ τους. Κατά τη διερεύνηση του πλημμυρικού κινδύνου και των απωλειών λόγω πλημμυρών, οι μετεωρολογικές και υδρολογικές συνθήκες, η κλιματική αλλαγή, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός ποταμού, η βλάστηση και οι συνθήκες χρήσεων γης, είναι παράμετροι που θα πρέπει να εξετάζονται και να αξιολογούνται ξεχωριστά (Bronster 2003). Παράλληλα, συνυπολογίζονται μια σειρά κοινωνικών παραγόντων, όπως η οικονομική ανάπτυξη, οι πολιτικές μείωσης των συμβάντων, ο αριθμός των ανθρώπων και των αγαθών που εκτίθενται στον πλημμυρικό κίνδυνο, η φτώχεια κλπ. (EEA 2010).

2.4 Η Οδηγία 2007/60/EK για τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, για μεγάλο χρονικό διάστημα, είχε στόχο τη διαμόρφωση και ανάπτυξη ενός θεσμικού πλαισίου, το οποίο θα αφορούσε στην περιβαλλοντική νομοθεσία για την ποιότητα των υδάτων. Ο στόχος αυτός επετεύχθη με την θέσπιση της Οδηγίας 2000/60/ EK ή αλλιώς Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά (EU Water Framework Directive-WFD, δηλαδή ενός πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων (Κουργιαλάς 2010). Η Οδηγία 2000/60/EK τέθηκε σε ισχύ στις 22 Δεκέμβρη του 2000 και *«συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων και θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών».*

Ωστόσο μέχρι πρόσφατα, δεν είχαν αντιμετωπιστεί ζητήματα όπως οι πλημμύρες και οι επιπτώσεις τους, ο πλημμυρικός κίνδυνος, καθώς και η σχέση και η επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και της κλιματικής αλλαγής με τα πλημμυρικά φαινόμενα. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνωρίζοντας τα ζητήματα αυτά, προχώρησε στην διαμόρφωση και θέσπιση της κοινοτικής Οδηγίας 2007/60/EK (εφεξής Οδηγία) για την αξιολόγηση και διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, η οποία εκδόθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2007 και τέθηκε σε ισχύ στις 26

Νοεμβρίου του 2007. Η Οδηγία, η οποία αποτελεί συμπλήρωμα της προαναφερθείσας Οδηγίας 2000/60/EK, έχει ως πρωταρχικό στόχο την ανάπτυξη ενός πλαισίου εκτίμησης, αξιολόγησης και διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου, έτσι ώστε να ενισχύσει τις προσπάθειες των Κρατών Μελών στην πρόληψη, τον περιορισμό και την αντιμετώπιση των πλημμυρών και των δυσμενών επιπτώσεων τους, στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα (Οδηγία 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252>).

Σύμφωνα με την Οδηγία, ο πλημμυρικός κίνδυνος (flood risk), ορίζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα'' (Οδηγία 2007/60/EK κεφάλαιο I, άρθρο 2, Pistrika 2007). Συνεπώς ερμηνεύει τόσο την πιθανότητα να εκδηλωθεί ένα πλημμυρικό επεισόδιο, όσο και με τον αντίκτυπο που μπορεί να προξενήσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή (Πίστρια 2010).

Η Οδηγία, ενσωματώθηκε στο Εθνικό δίκαιο με την ΚΥΑ Η.Π. 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ Β 1108/21.07.2010) και αναφέρεται σε όλα τα είδη πλημμυρών (ποτάμιων, στιγμιαίων-flash flood, πλημμυρών σε αστικά κέντρα, παράκτιων και θαλάσσιων πλημμυρών) και απαιτεί από τα κράτη μέλη της να προβούν σε μια ολοκληρωμένη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Πρώτο Στάδιο '' Προκαταρκτική Αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας'':

Στο παρόν στάδιο, απαιτείται από τα κράτη μέλη η διεξαγωγή της **Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνου Πλημμύρας** (εφεξής **ΠΑΚΠ**) για κάθε Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού (**ΠΛΑΠ**) ή τμήμα λεκάνης απορροής ποταμού διεθνούς περιοχής που βρίσκεται εντός επικράτειά τους. Στόχος είναι η αναγνώριση, ο προσδιορισμός και η διάκριση των περιοχών για τις οποίες συμπεραίνεται ότι υπάρχουν **δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας** ή είναι **πιθανόν να εκδηλωθεί πλημμύρα**. Η καταληκτική ημερομηνία ολοκλήρωσης της ΠΑΚΠ ήταν στις **22 Δεκεμβρίου του 2011**, ενώ η επανεξέταση της για πρώτη φορά είναι προγραμματισμένη να ολοκληρωθεί ως τις 22/12/2018 και εν συνεχεία ανά εξαετία.

Δεύτερο Στάδιο ‘ Χάρτες Επικινδυνότητας και Κινδύνου πλημμύρας’:

Στο άρθρο 6 της Οδηγίας, παρουσιάζεται αναλυτικά το στάδιο περί της κατάρτισης **χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας ή πλημμυρικής κατάκλυσης** και **χαρτών κινδύνων πλημμύρας** σε επίπεδο ΠΛΑΠ για τις ανωτέρω περιοχές. Η καταληκτική ημερομηνία για την κατάρτιση των χαρτών αυτών ήταν στις 22 Δεκεμβρίου του 2013, ενώ η επανεξέταση γίνεται για πρώτη φορά ως τις 22/12/2019 και εν συνεχεία ανά εξαετία. Στους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας, αποτυπώνονται γεωγραφικές περιοχές που δύνανται να υποστούν πλημμυρική κατάκλυση, καθώς και τις δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις που συνδέονται με την εκδήλωση πλημμυρικών επεισοδίων.

Τρίτο Στάδιο ‘Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας’:

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο, περιλαμβάνει την κατάρτιση και εκπόνηση των **Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ)** σε επίπεδο ΠΛΑΠ για τις περιοχές που υπάρχουν **δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα** σύμφωνα με όσα ορίζονται στο άρθρο 7 της Οδηγίας. Τα Σχέδια θα επρέπε να υλοποιηθούν και να δημοσιευτούν έως τις 22 Δεκεμβρίου του 2015. Οι βασικοί άξονες των ΣΔΚΠ θα πρέπει να είναι η πρόληψη, η προστασία και η ετοιμότητα. Πιο συγκεκριμένα θα εστιάζουν στη διατήρηση ή/και αποκατάσταση πλημμυρικών περιοχών, καθώς και στα μέτρα πρόληψης και μετρίασης των φθορών που προξενούνται από τις πλημμύρες.

Με τα ΣΔΚΠ προωθούνται λύσεις οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά, τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των εξεταζόμενων περιοχών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την κατάλληλο συντονισμό εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών, με γνώμονα την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν θεσπισθεί με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα καθορίζονται α) οι βασικοί στόχοι για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, β) τα αναγκαία μέτρα για την επίτευξη των στόχων αυτών και γ) τα πορίσματα της ΠΑΚΠ υπό μορφή χάρτη με τις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας και τους χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και κινδύνου πλημμύρας. Τα στοιχεία των ΣΔΚΠ θα πρέπει να επανεξετάζονται περιοδικά και να επικαιροποιούνται, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην εκδήλωση των πλημμυρικών φαινομένων. Η επανεξέταση των ΣΔΚΠ πρέπει να υλοποιηθεί για πρώτη φορά ως τις 22/12/2021 και εν συνεχεία ανά εξαετία (<http://floods.ypeka.gr/index.php/odhgia-2007-60>).

Η αναθεώρηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσον αφορά στη στρατηγική αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων, αντικατοπτρίζεται στο γεγονός ότι σταδιακά απομακρύνεται από την ‘‘παραδοσιακή-συμβατική’’ ιδέα του απλού «ελέγχου-προστασίας» των πλημμυρών και στρέφεται προς τη Εκτίμηση του Πλημμυρικού Κινδύνου (Flood Risk Oriented) (Πίστρικα 2010). Σύμφωνα με την Οδηγία, ο όρος «Διαχείριση Πλημμυρικού Κινδύνου’’ έχει μεν στόχο την προστασία και την πρόληψη, αλλά δίνει έμφαση στην μετρίαση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων και του κινδύνου των αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με αυτά. Οι άξονες διαχείρισης του κινδύνου πλημμυρών περιλαμβάνουν τα εξής στοιχεία:

- Πρόληψη
- Προστασία
- Ετοιμότητα
- Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης
- Αποκατάσταση και εξαγωγή συμπερασμάτων (CEC, 2004).

2.5 Γεωγραφία του πλημμυρικού προβλήματος

Η γεωγραφική κατανομή και η χωρική κλίμακα των πλημμυρικών φαινομένων παρουσιάζουν μεταβλητότητα και έχουν τέτοια δυναμική, ώστε να μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις σε εκτεταμένες ηπειρωτικές περιοχές (Casale et al. 1999). Σε παγκόσμια κλίμακα, οι χώρες που έχουν πληγεί περισσότερο από πλημμυρικά φαινόμενα, κατά την χρονική περίοδο μεταξύ των ετών 1974 έως 2003, είναι η Κίνα, η Ινδία, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η Βραζιλία, η Ινδονησία και η Μαλαισία (Εικόνα 2.1.1) (Κουργιαλάς 2010). Στην Ευρώπη, κατά την χρονική περίοδο από το 1985 έως και το 2002, εκδηλώθηκαν σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα, σε περιοχές όπως η νότιοανατολική Γαλλία, στην βορειοδυτική Ρουμανία, στην Μεγάλη Βρετανία, καθώς και στην κεντρική και νότια Γερμανία (Casale and Margottini 1999).

Στην εικόνα 2.5.1, απεικονίζεται ο αριθμός των καταστροφικών πλημμυρικών φαινομένων για κάθε μία χώρα ξεχωριστά (παγκόσμια κλίμακα), τα οποία συνέβησαν κατά τη χρονική περίοδο 1974-2003.

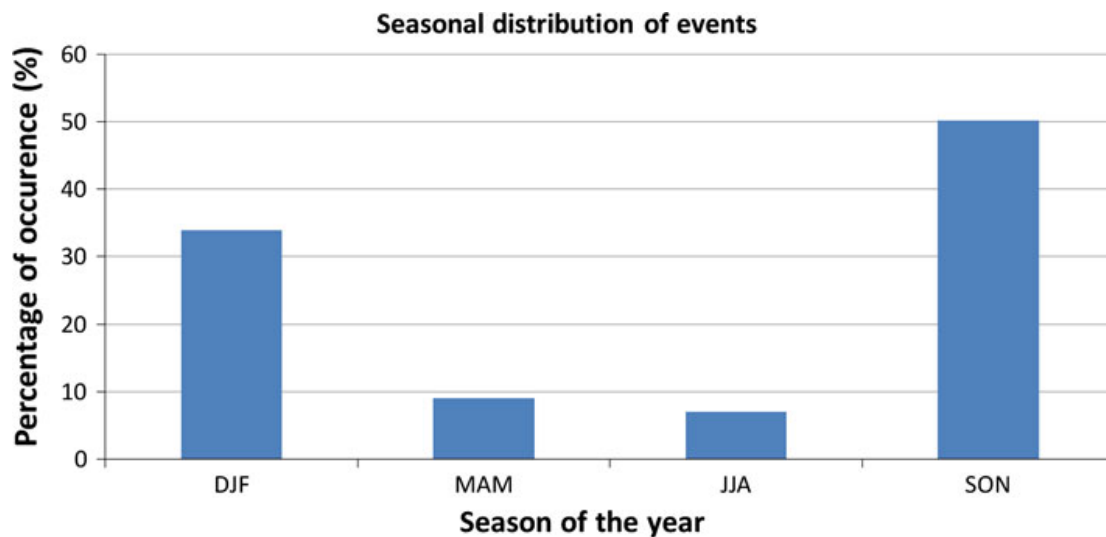


Εικόνα 2.5.1 Παγκόσμια κατανομή καταστροφικών πλημμυρών κατά τη χρονική περίοδο 1974-2003 (EM-DAT)

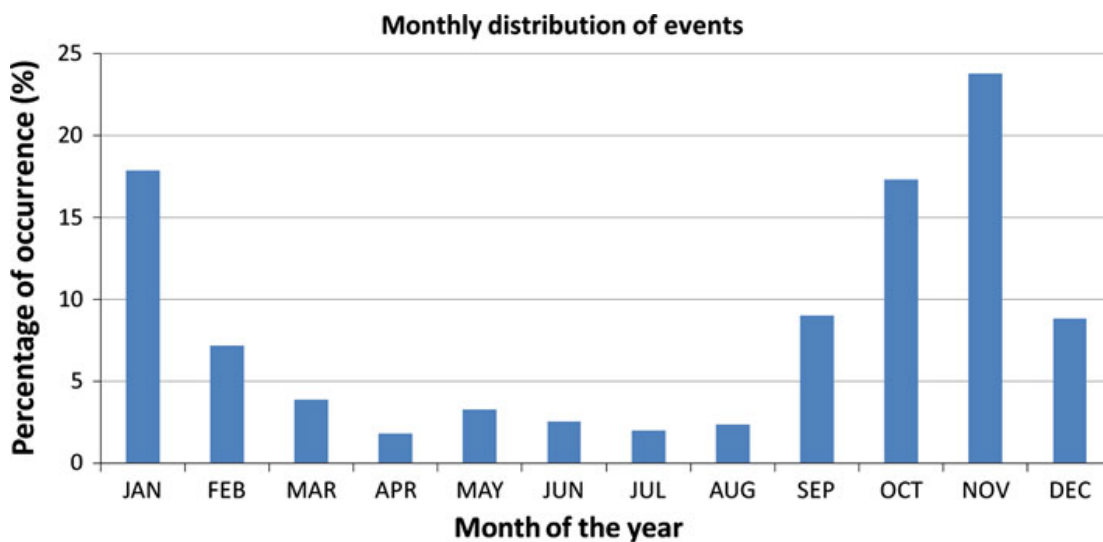
Η Ελλάδα δεν αποτελεί εξαίρεση, καθώς όπως δείχνει η βιβλιογραφία, πρόκειται για μια χώρα που έχει πληγεί πολλές φορές από πλημμυρικά φαινόμενα, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες (Diakakis et al 2013). Τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων σε τοπικό επίπεδο και η μορφολογία του εδάφους διαφοροποιούν τις ελληνικές πλημμύρες σε σύγκριση με εκείνες της Βόρειας Ευρώπης, τόσο σε χωρική όσο και σε χρονική κλίμακα. Τα πλημμυρικά φαινόμενα μεγάλης δυναμικής και έντασης εκδηλώνονται σπανίως. Ωστόσο, εκείνα που εμφανίζονται πολύ συχνά είναι τα τοπικά πλημμυρικά επεισόδια, τα οποία συνδέονται με μικρές υδρολογικές λεκάνες ή τοπικά υδατορεύματα, όπως π.χ χείμαρρους (Κουργιαλάς 2010).

Στην Ελλάδα η υδρολογική και κλιματική κατάσταση ελέγχεται από δύο βασικούς παράγοντες, το ορεινό ανάγλυφο και το χαμηλό βαρομετρικό από τη δύση. Στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας, η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800-2000 mm, ενώ στις ανατολικές περιοχές της χώρας ενδέχεται να μειωθεί ακόμα και στα 400 με 300 mm. Όσον αφορά τα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου και τη Δυτική Κρήτη, οι μεγαλύτερες ποσότητες βροχής που δέχονται ανέρχεται κατά μέσο όρο στα 700 mm (Koutsoyiannis et al. 2012, Παπανικολάου κ.α 2011).

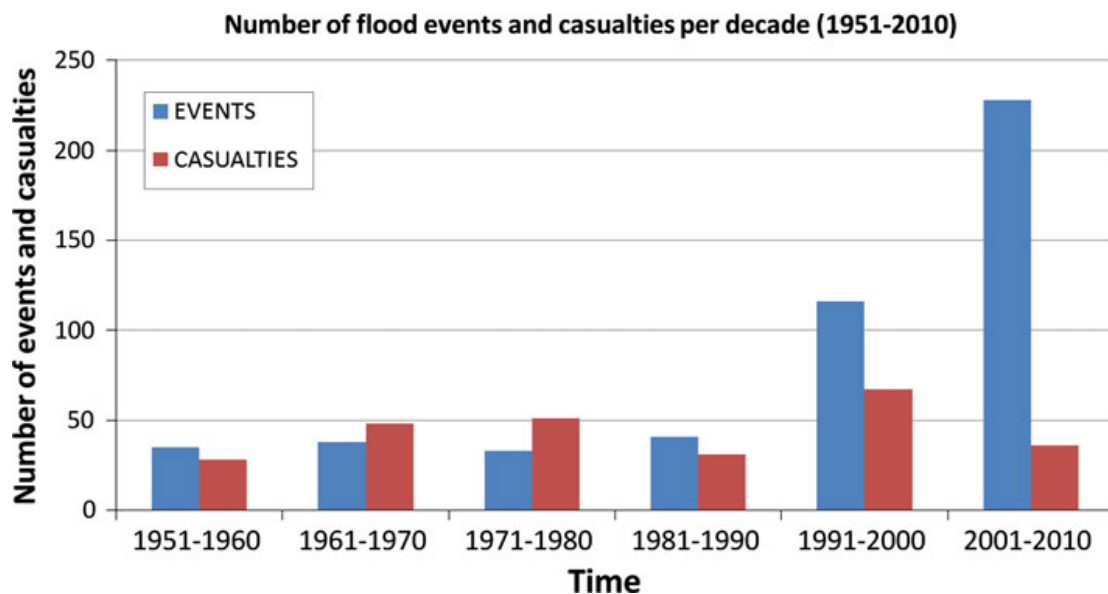
Στην έρευνα των Diakakis et al. (2012), περιγράφεται με αναλυτικό και μεθοδικό τρόπο το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα, για μια εκτενή χρονική περίοδο από το 1880 έως το 2010. Σύμφωνα με την ανάλυση της βάσης δεδομένων, τα περισσότερα πλημμυρικά επεισόδια σημειώθηκαν κατά την περίοδο του φθινοπώρου και πιο συγκεκριμένα τον Νοέμβριο (112 συμβάντα και 234 ανθρώπινες απώλειες), όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα 2.5.1. Ωστόσο, η πρόκληση απωλειών από πλημμύρες δεν ακολουθεί την μηνιαία κατανομή των πλημμυρικών συμβάντων (σχήμα 2.5.2).



Σχήμα 2.5.1 Εποχική κατανομή πλημμυρικών επεισοδίων (Diakakis et al. 2012)



Σχήμα 2.5.2 Μηνιαία κατανομή πλημμυρικών επεισοδίων (Diakakis et al. 2012)

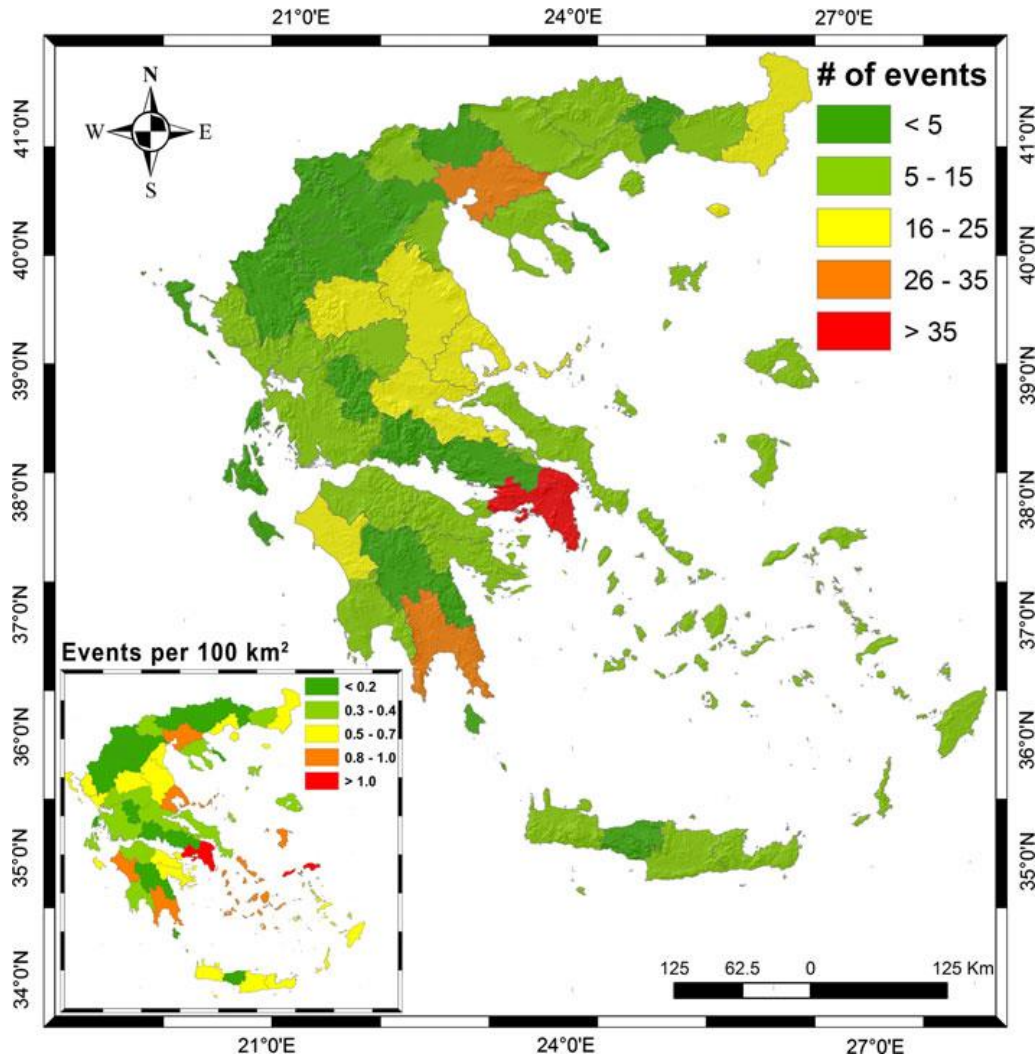


Σχήμα 2.5.3 Καταγραφή αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων και ανθρώπινων απωλειών ανά δεκαετία (Diakakis et al. 2012)

Σύμφωνα με τον Diakakis et al (2012), λαμβάνοντας υπόψη την χρονική κατανομή των πλημμυρών, έχει καταγραφεί σημαντική αύξηση των επεισοδίων τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι μπορεί να θεωρηθεί σαν τάση μιας φυσικής διαδικασίας (όπως π.χ κλιματική αλλαγή). Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση αυτή είναι οι ακόλουθοι.

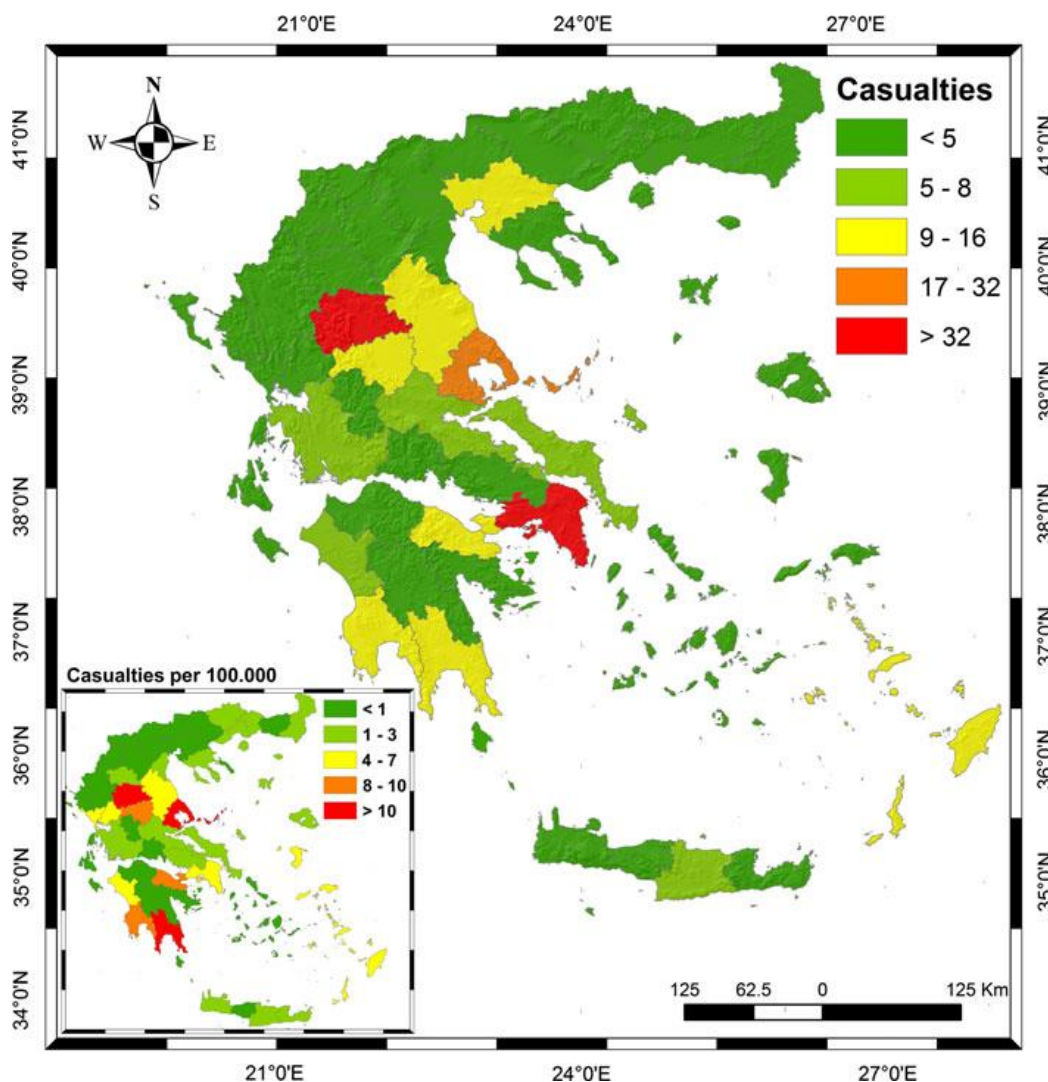
- Η αύξηση του πληθυσμού έχει προξενήσει πιέσεις για αστική επέκταση και ανεξέλεγκτης δόμησης ακόμα και σε ακατάλληλες περιοχές, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός του πληθυσμού και των ιδιοκτησιών που τίθενται σε κίνδυνο.
- Η βελτίωση των μέσων καταγραφής των φυσικών καταστροφών, καθώς και της ενημέρωσης των πολιτών με την πάροδο του χρόνου.
- Στο αυξημένο ενδιαφέρον της κοινωνίας και των μέσων μαζικής ενημέρωσης σχετικά με τις καταστροφές που συνδέονται με τις κλιματολογικές και τις υδρολογικές συνθήκες τις τελευταίες δεκαετίες και η μικρή ανοχή της κοινωνίας ως προς τους φυσικούς κινδύνους, γεγονός που οδηγεί στην αναφορά της πλειοψηφίας των συμβάντων, ακόμη και εκείνων που είναι ήσσονος σημασίας.

- ο Στις αυξημένες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις για τον έλεγχο των υδρολογικών διεργασιών, μέσω της υλοποίησης τεχνικών και δομικών έργων, οδικών δικτύων και αδιαπέρατων επιφανειών ειδικά στα αστικά κέντρα.



Εικόνα 2.5.2 Χωρική κατανομή αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων ανά διοικητική μονάδα (Diakakis et al. 2012)

Βάσει της χωρικής κατανομής των πλημμυρικών επεισοδίων και των απωλειών απο αυτά, εκφρασμένα σε αριθμούς ανά διοικητική μονάδα και χωρική πυκνότητα, διαπιστώνεται ότι οι περιοχές που παρουσιάζουν σημαντικά πλημμυρικά προβλήματα είναι οι εξής: α) η Αττική, β) η Θεσσαλονίκη, γ) η νότια Πελοπόννησος (Μεσσηνία και Λακωνία), δ) το ανατολικό τμήμα του Έβρου και ε) η Θεσσαλία. Στα αστικά περιβάλλοντα, παρατηρείται συγκέντρωση συμβάντων και απωλειών στα, ενώ στις αραιοκατοικημένες ορεινές περιοχές και στα νησιά καταγράφονται μικρότερα μεγέθη (Diakakis et al 2012).



Εικόνα 2.5.3 Χωρική κατανομή αριθμού ανθρώπινων απωλειών ανά διοικητική μονάδα (Diakakis et al. 2012)

3. Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού

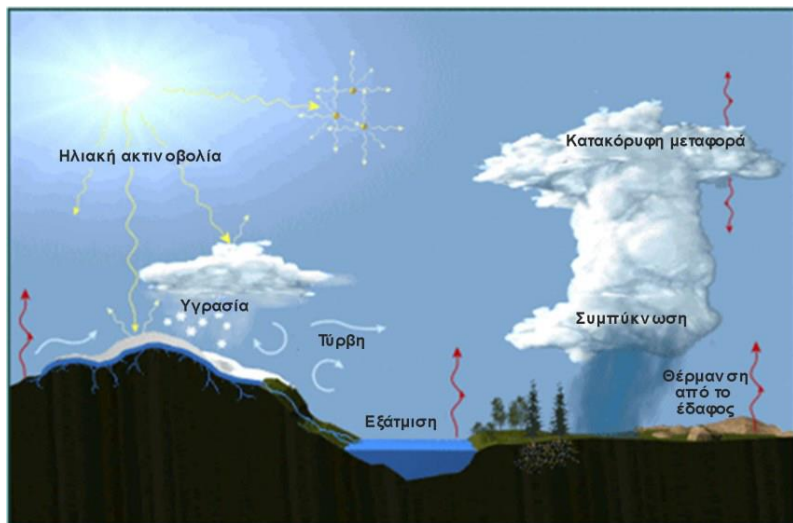
3.1 Γενικά

Με τον όρο πρόγνωση καιρού, περιγράφεται η διαδικασία πρόβλεψης των ατμοσφαιρικών συνθηκών που πρόκειται να επικρατήσουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή, σε καθορισμένη μελλοντική χρονική στιγμή ή περίοδο. Ουσιαστικά, υλοποιείται η πρόβλεψη-εκτίμηση του συνόλου των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία στην ατμόσφαιρα σε διάφορα σημεία της ατμόσφαιρας, η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, σε διάφορα επίπεδα, καθώς και στοιχεία όπως η βροχομετρική πίεση, η πρόκληση βροχής, καταιγίδας, χιονόπτωσης, καύσωνα ή παγετού, η παρουσία νεφώσεων ή ομίχλης κλπ. Παράλληλα, στα προβλεπόμενα φαινόμενα, καθορίζεται τόσο η ένταση όσο και η χρονική διάρκεια. Σε περίπτωση πρόγνωσης ενός έντονου φαινομένου, πρέπει να προσδιορίζονται η επικινδυνότητα και οι ενδεχόμενες επιπτώσεις του στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον, ώστε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα πρόληψης και προστασίας.

Μέχρι και πριν έναν αιώνα, η πρόγνωση του καιρού συνιστούσε μια ασαφή και τυχαία διαδικασία, με αποτελέσματα που δεν διέπονταν από αξιοπιστία. Οι παρατηρήσεις ήταν αραιές και ακανόνιστες, ειδικά για τα ανώτερα στρώματα του αέρα και πάνω από τους ωκεανούς. Οι αρχές της θεωρητικής φυσικής δεν μπορούσαν να συμβάλλουν στην πρακτική πρόγνωση, με αποτέλεσμα οι επιστήμονες να αξιοποιούν γενικευμένες τεχνικές extrapolation, γνώσεις της τοπικής κλιματολογίας και εικασίες που βασίζονταν στην διαίσθηση. Μάλιστα, για την παραγωγή χαρτών πρόγνωσης, οι προγνώστες αξιοποιούσαν την εμπειρία, την μνήμη και πληθώρα εμπειρικών τεχνικών (Lynch 2008).

Η λύση στο πρόβλημα αυτό δόθηκε με την ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών συστημάτων και συνεπώς την πρόγνωση των συνθηκών και της εξέλιξης τους (Lynch 2008). Η αριθμητική πρόγνωση καιρού (Numerical Weather Prediction) βασίζεται στη χρήση μαθηματικών μοντέλων με τα οποία επιτυγχάνεται η προσομοίωση της ατμοσφαιρικής κατάστασης και των δυναμικών αλληλεπιδράσεων της με τα υπόλοιπα συστήματα της βιόσφαιρας. Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα αποτελούν την αριθμητική αναπαράσταση των διεργασιών (δυναμικές, φυσικές, χημικές κλπ) που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και περιγράφονται από τις θεμελιώδεις αρχές της φυσικής. Οι διεργασίες αυτές, μπορούν να αναπαρασταθούν σε σημεία πλέγματος (διακριτοποίηση στο χώρο και το χρόνο) ή μέσω παραμετροποιήσεων σε περίπτωση

που είναι αδύνατη η ανάλυση τους από το μοντέλο, λόγω ανεπαρκούς χωρικής ανάλυσης. Οι παραμετροποιήσεις αυτές αφορούν σε στοιχεία όπως η τυρβώδης ροή, οι ροές ενέργειας από και προς το έδαφος, η ηλιακή ακτινοβολία και οι νεφικοί σχηματισμοί (Κατσαφάδος κ.α 2015) (Σχήμα 3.1.1).



Σχήμα 3.1.1 Οι βασικές διεργασίες που προσομοιώνονται σε ένα αριθμητικό ατμοσφαιρικό μοντέλο (Κατσαφάδος κ.α 2015)

3.2 Αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Η ανάπτυξη της θερμοδυναμικής κατά τον 19^ο αιώνα, είχε ως αποτέλεσμα τον καθορισμό του συνόλου των θεμελιωδών φυσικών αρχών που διέπουν την ροή της ατμόσφαιρας. Ο Bjerknes, ένας Νορβηγός φυσικός-μετεωρολόγος, το 1904, ήταν ο πρώτος που απέδωσε σε θεωρητικό επίπεδο, την δυνατότητα να υλοποιηθεί η αριθμητική πρόγνωση του καιρού (Ευσταθίου 2013, Κατσαφάδος κ.α 2015). Ο Bjerknes παρουσίασε ένα σχέδιο που απαρτίζεται από δύο στάδια με στόχο την ορθολογική πρόβλεψη. Το πρώτο στάδιο σχετίζεται με την διάγνωση, στο οποίο η αρχική κατάσταση της ατμόσφαιρας καθορίζεται χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις. Το δεύτερο αφορά στην πρόγνωση, στο οποίο για μια δεδομένη αρχική κατάσταση, χρησιμοποιούνται εξισώσεις για τον υπολογισμό του τρόπου με τον οποίο η κατάσταση αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου (Lynch 2008, Κατσαφάδος κ.α 2015).

Ο Richardson, ασχολήθηκε με πρόβλημα της πρόγνωσης του καιρού από το 1911, μελετώντας το έργο του Bjerknes και επιχείρησε το πείραμα της πρώτης πρόγνωσης καιρού το 1922. Η βασική

του ιδέα ήταν, ότι η κατάσταση της ατμόσφαιρας σε κάθε σημείο δύναται να καθοριστεί από την πίεση, τη θερμοκρασία, την πυκνότητα, την περιεκτικότητα σε νερό και την ταχύτητα του αέρα (Lynch 2008, Κατσαφάδος κ.α 2015). Έτσι επιχείρησε να εκφράσει τις φυσικές αρχές που διέπουν την κατάσταση και τη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας, σαν ένα σύστημα μαθηματικών εξισώσεων και στη συνέχεια να εφαρμόσει τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να λύσει το σύστημα αυτό (Lynch 2008). Στο πείραμα η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων έγινε με το χέρι, αλλά δεν ήταν επιτυχημένο λόγω της εκτίμησης ακραίας και μη ρεαλιστικής άυξησης της πίεσης κατά 145 hPa. Ωστόσο, μπορεί να μην αποτέλεσε μια επιτυχημένη προσπάθεια, αλλά έθεσε τις βάσεις για τη δημιουργία των σύγχρονων ατμοσφαιρικών μοντέλων (Κατσαφάδος κ.α 2015).

Σχεδόν 30 χρόνια αργότερα, το 1949, μια ομάδα ερευνητών στο Ινστιτούτο Προχωρημένων Ερευνών του Πανεπιστημίου του Princeton στις Η.Π.Α., με επικεφαλής τους Jules Charney, τον Ragnar Fjortoft και τον John von Neumann, κατάφερε να ολοκληρώσει με επιτυχία την πρώτη αριθμητική πρόγνωση διάρκειας 48 ωρών, εκτελώντας ένα βαροτροπικό μοντέλο στον υπολογιστή ENIAC (Lynch 2008, Κατσαφάδος κ.α 2015).

Η πρόγνωση του καιρού μπορεί να διακριθεί, κάπως αυθαίρετα, σε τρεις κατηγορίες: α) μικρής κλίμακας όπου η πρόγνωση επιτελείται για χρονική περίοδο μίας έως δύο ημερών, β) μεσαίας κλίμακας όπου η πρόγνωση καλύπτει ένα χρονικό διάστημα από τρεις ημέρες έως δύο εβδομάδες και γ) μεγάλης κλίμακας όπου η πρόγνωση γίνεται για ένα χρονικό διάστημα της τάξης ενός μήνα ή και περισσότερο (Lynch 2008, Κατσαφάδος κ.α 2015).

Η ραγδαία ανάπτυξη και εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της ισχύος τους, καθώς και η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών και διεργασιών ατμόσφαιρας, συνέβαλε τα μέγιστα στο να υλοποιηθεί πληθώρα μετεωρολογικών μοντέλων πρόγνωσης. Οι τρεις βασικοί πυλώνες των μοντέλων πρόγνωσης είναι το GFS (Global Forecasting System) που αναπτύχθηκε από τα Κέντρα Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP - National Centers for Environmental Prediction) του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) των Η.Π.Α, το μοντέλο IFS (Integrated Forecast System) του ECMWF (Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων - European Center for Mesoscale Weather Forecasts) και το Global Environmental Multiscale Model (GEM) που δημιουργήθηκε στον Καναδά (Ευσταθίου 2013). Το GFS είναι ένα παγκόσμιο αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης, το οποίο χρησιμοποιεί σφαιρικές αρμονικές συναρτήσεις (spherical harmonic basis functions). Το μαθηματικό μοντέλο εκτελείται τέσσερις φορές τη μέρα και δύναται να παράγει προγνώσεις έως και 16 συνεχόμενες ημέρες. Το μοντέλο, είναι φασματικό

και εκτελείται σε δύο μέρη, όπου το μεν πρώτο διαθέτει υψηλότερη ανάλυση (T1534) και ικανότητα πρόγνωσης από 0 έως 240 ώρες (0-10 ημέρες), ενώ το δεύτερο είναι χαμηλότερης ανάλυσης (T574) και η πρόγνωση γίνεται για το χρονικό διάστημα από 180 έως 384 ώρες (10-16 ημέρες). Το πρόβλημα που προκύπτει, όταν απαιτείται πρόγνωση για μεγαλύτερο διάστημα από 7 ημέρες, είναι η μειωμένη χωρική και χρονική ανάλυση και η αξιοπιστία όσον αφορά στα αποτελέσματα

(<http://www.emc.ncep.noaa.gov/?branch=GFS&tab=doc>).

Η ίδρυση του ECMWF, ήταν ίσως το σημαντικότερο επίτευγμα στον τομέα της Ευρωπαϊκής μετεωρολογίας. Το Κέντρο μέχρι σήμερα έχει να παρουσιάσει σημαντικά αποτέλεσμα όσον αφορά στις προγνώσεις και την αξιοπιστία τους. Το μοντέλο είναι φασματικό το οποίο βασίζεται σε Semi-Lagrangian σχήματα, ενώ ακολουθεί μια ολοκληρωμένη μεταχείριση των φυσικών διεργασιών. Η χωρική του ανάλυση είναι 25 km ενώ υπάρχουν 91 κάθετα επίπεδα. Οι 10ήμερες προγνώσεις, προέρχονται από ένα ντετερμινιστικό μοντέλο με χωρική ανάλυση T799 (25 km) και 91 κάθετα επίπεδα (L91) και διανέμονται δύο φορές την ημέρα. Οι προγνώσεις για χρονικό διάστημα έως και έναν μήνα, βασίζονται σε ολικά συστήματα πρόβλεψης, με χωρική ανάλυση T255 (78 km) και 62 επίπεδα (L62) και διανέμονται μία φορά την εβδομάδα. Τέλος, οι εποχιακές προγνώσεις για χρονικό διάστημα έως και έξι μήνες, βασίζονται σε ολικά συστήματα με χωρική ανάλυση T159 (125 km) και 40 επίπεδα (L40) και διανέμονται μία φορά την εβδομάδα (Lynch 2008).

Τέλος, κατέστη δυνατή η προσομοίωση των μεσαίας κλίμακας διεργασιών, με την υλοποίηση των περιφερειακών αριθμητικών μοντέλων (regional models) πρόγνωσης (MM5, ETA, RAMS, WRF, ARPS κ.τ.λ.) που έχουν αξιοποιηθεί σε επιχειρησιακή βάση (Ευσταθίου 2013). Η χρησιμότητα τους είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθότι έχουν την ικανότητα να παρέχουν μεσαίας κλίμακας προγνώσεις υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Αυτό υποδηλώνει και το συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας, τα οποία παρέχουν συνοπτική εικόνα της ατμόσφαιρας (Lin, 2007).

3.3 Το μετεωρολογικό μοντέλο WRF

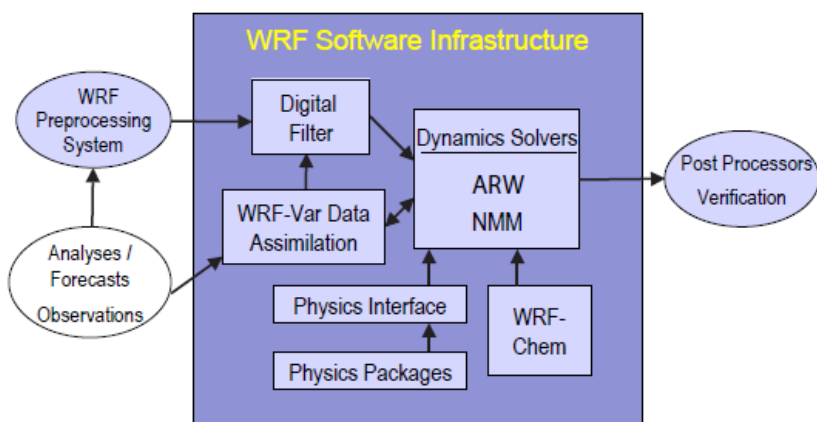
Το μετεωρολογικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting), είναι ένα σύστημα επόμενης γενιάς, μέσης κλίμακας αριθμητικών καιρικών προβλέψεων, το οποίο έχει σχεδιαστεί ως εργαλείο για την κάλυψη των αναγκών πρόγνωσης καιρού τόσο σε πανεπιστημιακό/ερευνητικό επίπεδο, όσο και για επιχειρησιακούς σκοπούς. Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη του μοντέλου, ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τη συνεργασία φορέων όπως το National Center for Atmospheric Research (NCAR), το National Center for Environmental Prediction (NCEP) και έπειτα των Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα και Federal Aviation Administration (FAA) (<http://www.wrf-model.org/index.php>, Ευσταθίου 2013).

Το μοντέλο, περιλαμβάνει δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων και ένα λογισμικό που διευκολύνει παράλληλα τον υπολογισμό και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Παράλληλα, δύναται να αναπτύξει ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, αναλύσεις) ή εξιδανικευμένες συνθήκες. Το γεγονός αυτό του δίνει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει πληθώρα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακα από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα (<http://www.wrf-model.org/index.php>). Τέτοιου είδους εφαρμογές, σχετίζονται με τα εξής: α) αριθμητική πρόγνωση καιρού σε πραγματικό χρόνο, β) ανάπτυξη συστημάτων αφομοίωσης δεδομένων, γ) έρευνα της παραμετροποίησης, δ) κλιματολογικές προσομοιώσεις σε περιφερειακό επίπεδο, ε) μοντελοποίηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, στ) μοντέλα προσομοίωση των διεργασιών σύζευξης ατμόσφαιρας-ωκεανού και ζ) εξιδανικευμένες προσομοιώσεις. Το μοντέλο χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακό επίπεδο από το NCEP, AFWA αλλά και από άλλα κέντρα (Skamarock et al., 2008).

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε στο μοντέλο εμπεριέχονται δύο ξεχωριστοί δυναμικοί πυρήνες (solvers): του ARW (Advanced Research WRF), ο οποίος είναι καταλληλότερος για ερευνητικές εφαρμογές και του NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) που χρησιμοποιείται κυρίως για επιχειρησιακούς σκοπούς (Skamarock et al., 2008, Ευσταθίου 2013). Τα βασικά συστατικά του συστήματος περιγράφονται στο σχήμα .

Η υδροστατική προσέγγιση βασίζεται στην ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται σε μία αέρια μάζα. Ατμοσφαιρικά μοντέλα με οριζόντια διακριτοποίηση πλέγματος

μεγαλύτερη των 10 km μπορούν να στηριχτούν στην υδροστατική προσέγγιση, επιτυγχάνοντας έτσι μικρότερο οικονομικό κόστος. Ωστόσο, για περιπτώσεις προσομοιώσεων μέσης κλίμακας, οι κατακόρυφες επιταχύνσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις δυνάμεις κατακόρυφης μεταφοράς και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σύστημα των προγνωστικών εξισώσεων των μοντέλων. Η υδροστατική προσέγγιση δεν έχει ισχύ σε προσομοιώσεις υψηλής χωρικής διακριτοποίησης πλέγματος (μικρότερη των 5 km), με συνέπεια να πρέπει να υπολογιστεί η προγνωστική τιμή της κατακόρυφης συνιστώσας του ανέμου (Κατσαφάδος κ.α 2015).



Σχήμα 3.3.1 Περιγραφή του συστήματος του μοντέλου WRF (Πηγή: Skamarock et al. 2008)

Σύστημα ARW

Το σύστημα ARW, είναι ένας δυναμικός πυρήνας που μαζί με τα υπόλοιπα συστατικά μέρη του μοντέλου, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση. Η μικροφυσική του συστήματος περιγράφεται από σχήματα που μπορεί να είναι είτε απλοποιημένα κατάλληλα για εξιδανικευμένες μελέτες, ή πιο εξελιγμένα, ιδανικά για μελέτες διαδικασίας και αριθμητική πρόγνωση καιρού. Οι παραμετροποιήσεις του συστήματος με τις κατάλληλες προσαρμογές και τα σχήματα μάζας-ροής, έχουν καθοριστικό ρόλο στις μοντελοποιήσεις μέσης κλίμακας (Skamarock et al., 2008).

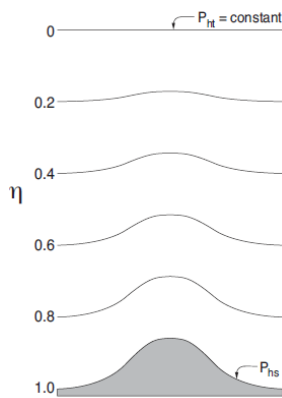
Οι εξισώσεις που αξιοποιούνται είναι οι μη υδροστατικές εξισώσεις για συμπιεστά ρευστά του Euler. Πρόκειται συνεπώς για εξισώσεις ροής, στις οποίες οι μεταβλητές έχουν ιδιότητες διατήρησης, ακολουθώντας τη φιλοσοφία του Ooyama (1990). Η εφαρμογή τους γίνεται σε μορφή πλέγματος όπου, κατά τον κατακόρυφο άξονα ακολουθείται η επιφάνεια του εδάφους με βάση μια

μεταβλητή που προσδιορίζει τα κατακόρυφα επίπεδα του μοντέλου και αποδίδεται με την εξής σχέση:

$$\eta = (p_h - p_{ht}) / \mu,$$

$$\text{όπου } \mu = (p_{hs} - p_{ht})$$

Ως p_h αποδίδεται η υδροστατική πίεση, p_{hs} η πίεση στην επιφάνεια και p_{ht} η πίεση στο πάνω όριο του πλέγματος. Ο ορισμός της μεταβλητής αυτής, όπως προτάθηκε από τον Laprise (1992), είναι ο αντίστοιχος με τη μεταβλητή σ που χρησιμοποιείται στα πληθώρα υδροστατικών αριθμητικών μοντέλων. Όπως αποτυπώνεται στο σχήμα, οι τιμές της η κυμαίνονται από 1 στην επιφάνεια έως 0 στο άνω όριο του πεδίου ορισμού του μοντέλου (Skamarock et al., 2008, Ευσταθίου 2013).



Σχήμα 3.3.2. Η κατακόρυφη δομή του υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου (Skamarock et al. 2008)

Από την στιγμή που το μέγεθος $\mu(x,y)$ περιγράφει την μάζα ανά μονάδα επιφάνειας ως προς τον κατακόρυφο άξονα στο πεδίο ορισμού του μοντέλου, η σχέση των μεταβλητών ροής θα είναι η εξής:

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W), \quad \Omega = \mu \eta', \quad \Theta = \mu \theta, \quad \text{όπου}$$

$\mathbf{v} = (u, v, w)$ είναι ταχύτητες της συνδιακύμανσης στις δύο οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις αντίστοιχα, ενώ τα μεγέθη ω είναι της κατακόρυφης ταχύτητας και θ η πιθανή θερμοκρασία. Στις βασικές εξισώσεις του μοντέλου εμπεριέχονται και οι μη – διατηρούμενες (nonconserved) μεταβλητές, οι οποίες είναι α) το γεωδυναμικό ($\phi = gz$), β) η πίεση (p) και γ) η αντίστροφη πυκνότητα ($\alpha = 1/\rho$) (Skamarock et al., 2008).

Βασικές εξισώσεις ροής του Euler (Flux-form Euler equations)

Όπως προαναφέρθηκε, για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής κατάστασης έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα, στα οποία αξιοποιείται ένα σύστημα εξισώσεων που διέπουν βασικούς νόμους της φυσικής, όπως:

- ο την αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας)
- ο την αρχή διατήρησης της θερμότητας (πρώτος θερμοδυναμικός νόμος)
- ο την αρχή διατήρησης της κίνησης (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα)
- ο την αρχή διατήρησης της ποσότητας νερού
- ο την αρχή διατήρησης της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών συστατικών

Οι συγκεκριμένοι νόμοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη συμπεριλαμβάνονται οι βασικοί νόμοι θερμοδυναμικής και υδροδυναμικής, που ισχύουν σε όλα τα συστήματα ρευστών (διατήρησης της μάζας, πρώτος και δεύτερος νόμος του Νεύτωνα). Στη δεύτερη συμπεριλαμβάνονται φυσικοί νόμοι που περιγράφουν τις ατμοσφαιρικές διεργασίες, όπως η απορρόφηση και η ανάκλαση της μικρού και μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, η εξάτμιση και συμπύκνωση του νερού, καθώς και η τυρβώδης μεταφορά ορμής και θερμότητας (Κατσαφάδος κ.α 2015).

Για την επίλυση των βασικών εξισώσεων εφαρμόζονται μέθοδοι και τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η αναπαράσταση των βασικών σχέσεων της δυναμικής της ατμόσφαιρας στο μοντέλο WRF, γίνεται με τη μορφή εξισώσεων ροής (Flux form equations) οι οποίες είναι οι εξής:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (1.1)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V u) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V \quad (1.2)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (1.3)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V \theta) = F_\Theta \quad (1.4)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (1.5)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla_\phi) - gW] = 0 \quad (1.6)$$

Η διαγνωστική σχέση για την αντίστροφη πυκνότητα είναι

$$\partial_h \phi = -\alpha \mu$$

Η καταστατική εξίσωση είναι η

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$$

όπου το α αντιπροσωπεύει μία γενική μεταβλητή. Το $\gamma = c_p / c_u = 1.4$ είναι η αναλογία της θερμοχωρητικότητας για τον ξηρό αέρα, το R_d είναι η σταθερά των αερίων για τον ξηρό αέρα, ενώ το p_0 είναι μία πίεση αναφοράς (συνήθως 10^5 Pascals). Οι όροι F στο δεύτερο μέρος των εξισώσεων αναφέρονται σε μηχανισμούς με τους οποίους δρουν οι φυσικές διεργασίες, η τυρβώδης διάχυση, η περιστροφή της γης κ.α (Skamarock et al., 2008, Ευσταθίου 2013).

4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών & Υδρολογία

4.1 Εισαγωγή στα Σ.Γ.Π (GIS)

Η δημιουργία των πρώτων χαρτών, σχετίζεται με την ανάγκη του ανθρώπου για συστηματική καταγραφή και ταξινόμηση των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, αλλά και την παροχή και διάθεση των πληροφοριών που αφορούσαν στη γήινη επιφάνεια (Ευελπίδου κ.α 2015).

Η εξέλιξη στην τεχνολογία των υπολογιστών καθώς και η ανάγκη δημιουργίας μια πληροφοριακής βάσης, στην οποία θα συμπεριλαμβάνονταν τόσο το είδος (θεματική-περιγραφική πληροφορία), όσο και η γεωγραφική θέση της πληροφορίας (χωρική πληροφορία), συνετέλεσαν στην ανάπτυξη νέων συστημάτων που διαχειρίζονται, αναλύουν και παρουσιάζουν αυτήν, την γεωγραφικής φύσεως, πληροφορία. Σύμφωνα με τον Goodchild (1985), τα συστήματα αυτά, ονομάζονται Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών ή ΣΓΠ (GIS-Geographical Information Systems) και αποτελούν λογισμικά με αυτοματοποιημένους μηχανισμούς και εργαλεία για την αποτελεσματική και αποδοτική συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση, διαχείριση και παρουσίαση δεδομένων που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με τη γεωγραφική πληροφορία. (Χαλκιάς 2011, Ευελπίδου κ.α 2015).

Γενικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα ΣΓΠ, συνιστούν ένα δυναμικό σύστημα που περιλαμβάνει το υλικό, το λογισμικό και τις διαδικασίες πληροφοριών, που με διάφορες μαθηματικές μεθόδους αξιοποιεί δεδομένα από τις Γεωεπιστήμες, τα οποία αναλύει, μοντελοποιεί και μετουσιώνει σε προχωρημένες γνώσεις για παραγωγή πληροφορίας υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιώντας την

εξελιγμένη τεχνολογία της πληροφορικής. Συγχρόνως συνιστά ένα καταλυτικό εργαλείο υποστήριξης λήψεων αποφάσεων στην επίλυση πληθώρας προβλημάτων διαχείρισης και σχεδιασμού (Χαλκιάς 2011, Χαλκιάς κ.α 2015, Λαμπράκης κ.α 2015).

Από την αρχή της δημιουργίας (μέσα της δεκαετίας του 1960) των ΣΓΠ έως σήμερα, έχουν μεσολαβήσει διάφορα εξελικτικά στάδια. Η εξέλιξη, η ανάπτυξη και η βελτίωση στην τεχνολογία γενικότερα και στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων ειδικότερα, έχει συντελέσει σε ανάλογη εξέλιξη και πρόοδο στα λογισμικά τύπου ΣΓΠ (Καλογερόπουλος 2011, Λαμπράκης κ.α 2015). Με την ενσωμάτωση των μαθηματικών και στατιστικών μεθοδολογιών στις χαρτογραφικές τεχνικές, την βελτιστοποίηση αυτών και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των Η/Υ και των συστημάτων τηλεπισκόπησης, διαμορφώθηκαν τα σημερινά ισχυρά ΣΓΠ. Η είσοδος και εδραίωση του διαδικτύου, των ασύρματων δικτύων και των κινητών τηλεφώνων επέφερε τις τελευταίες προσαρμογές των ΓΣΠ σε καθημερινές εφαρμογές τις οποίες χρησιμοποιούν εκατομμύρια πολίτες παγκοσμίως (Λαμπράκης κ.α 2015).

Τα ΣΓΠ είναι μια τεχνολογία, που παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη και ευρεία χρήση στις επιστήμες της Γεωγραφίας, της Τηλεπισκόπησης, της Τοπογραφίας, της Φωτογραμμετρίας, κ.λπ (Λαμπράκης κ.α 2015). Σήμερα, τα G.I.S που κυκλοφορούν στην αγορά, μπορεί να έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικές εταιρείες, όμως η λειτουργία τους βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία και τις ίδιες αρχές, έχουν παρόμοιες δυνατότητες και διέπονται από συγκεκριμένα πρότυπα (Ευελπίδου κ.α 2015).

4.2 Η επιστήμη της Υδρολογίας

4.2.1 Υδρολογικός Κύκλος

Μία εκ των κυρίαρχων φυσικών λειτουργιών της Γης είναι ο υδρολογικός κύκλος, με τον οποίο εξασφαλίζεται ο συνεχής εφοδιασμός της βιόσφαιρας με νερό. Πρόκειται για την αέναη κίνηση του νερού μεταξύ των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και της ξηράς και αφορά στις εναλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του. Η επιστήμη που εξετάζει το πλαίσιο και τις πτυχές της φυσικής κίνησης του νερού της Γης ονομάζεται υδρολογία (Κουτσογιάννης κ.α 1999).

Το πεδίο μελέτης της Υδρολογίας, περιλαμβάνει την υδρόσφαιρα (ωκεανούς), την επιφάνεια και το εσωτερικό της λιθόσφαιρας (βάθος έως 1 km), και την ατμόσφαιρα (ύψος 15 km). Εντός αυτού του ευρύτερου συστήματος, λαμβάνει χώρα ο υδρολογικός κύκλος, ο οποίος θεωρείται από τους σημαντικότερους που εξελίσσονται στη φύση (Μιμίκου κ.α 2006).

Η έναρξη αυτής της πολυσύνθετης διαδικασίας, λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα, όπου το νερό εξατμίζεται από τη θάλασσα και τη ξηρά και διαπνέεται από τα δέντρα και τη βλάστηση και στη συνέχεια ανέρχεται κατακόρυφα με τη μορφή υδρατμών. Μέσα από κατάλληλες διεργασίες, οι υδρατμοί αυτοί κινούμενοι υπό την επίδραση των ανέμων, συμπυκνώνονται σε νέφη και στη συνέχεια επανέρχονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βλ. βροχόπτωση, χιόνι, χαλάζι). Από το νερό που επανέρχεται στο έδαφος, ένα μέρος κατακρατείται από τη φυτοκάλυψη και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα δένδρα και τη βλάστηση, ένα μέρος διηθείται μέσα στο έδαφος και ένα τρίτο απορρέει επιφανειακά προς τα υδατορέματα και τα υδρογραφικά δίκτυα, εκβάλλοντας σε θάλασσες ή λίμνες (Κουτσογιάννης κ.α 1999, Μιμίκου κ.α 2006).

Τέλος, από το νερό που διηθείται στο έδαφος, ένα μέρος εξατμίζεται ή διαπνέεται διαμέσου των φυτών, ενώ το υπόλοιπο επαναφορτίζει τους ταμιευτήρες της υπόγειας ροής, το οποίο στη συνέχεια ενδέχεται να βρει διέξοδο προς την επιφάνεια, εκβάλλοντας τελικά στη θάλασσα. Το νερό επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, μέσω της εξάτμισης, για να ολοκληρώσει έτσι τον κύκλο του νερού, ο οποίος θα ξεκινήσει πάλι από την αρχή (Μιμίκου και Μπαλτάς 2006).



Εικόνα 4.2.1.1 Ο Υδρολογικός κύκλος (πηγή: USGS)

4.3 Υδρολογικά Μοντέλα

4.3.1 Ορισμός

Τα υδρολογικά μοντέλα αξιοποιούν ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και της απόκρισης ενός φυσικού συστήματος. Δηλαδή, χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών (Ευστρατιάδης 2008, Καλογερόπουλος 2011). Με τα μοντέλα αυτά περιγράφονται είτε μεμονωμένα γεγονότα (event-type), όπως π.χ ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας ή τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου, σε μια πεπερασμένη χωρικά ενότητα (π.χ. μιας λεκάνης απορροής). Στην πρώτη περίπτωση, η προσομοίωση του γεγονότος βασίζεται σε εμπειρικές ή συστημικές προσεγγίσεις (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), στις οποίες δεν συνυπολογίζονται διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, όπως η εξατμισιοδιαπνοή και η διήθηση. Στον αντίποδα, στην δεύτερη περίπτωση η προσέγγιση που εφαρμόζεται, διέπεται από ένα φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, κατά την οποία αξιοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης, για την αναπαράσταση των βασικών διεργασιών που επιδρούν στον υδρολογικό κύκλο, σε συνεχή χρόνο (continuous-time) (Ευστρατιάδης 2008).

4.3.2 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες, βάσει της μαθηματικής τους δομής, της χωρικής κλίμακας, και της χρονικής κλίμακας.

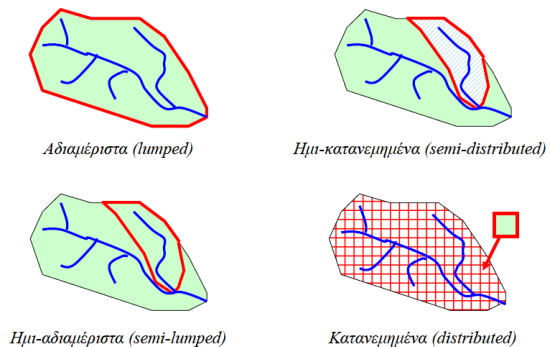
Αρχικά, ως προς τη μαθηματική τους δομή, τα υδρολογικά μοντέλα, ταξινομούνται στις κάτωθι κατηγορίες:

- *Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)*: Πρόκειται για κατανεμημένα μοντέλα, τα οποία διέπονται από φυσικούς νόμους και βασίζονται σε ημιεμπειρικές σχέσεις για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών μικρής κλίμακας. Η φυσική συνέπεια τους είναι θεωρητικά πλήρης σε πολύ μικρή (έως απειροστή) χωρική κλίμακα, αλλά υστερούν σε μεγαλύτερες κλίμακες.
- *Εννοιολογικά μοντέλα*: Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε χωρικές ενότητες (λεκάνες, υπολεκάνες), βασίζονται σε εξισώσεις με απλουστευμένες παραδοχές. Η φυσική συνέπεια τους είναι σχετική σε περίπτωση πάντα που οι παράμετροι λογίζονται ως αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης.
- *Στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα*: Για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών χρησιμοποιείται η πιθανοτική προσέγγιση. Η φυσική συνέπεια τους είναι στοιχειώδης, ελεγχόμενη, με πλήρη στατιστική συνέπεια.
- *Μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box)*: Στα μοντέλα αυτά οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, σε αντίθεση με τα εννοιολογικά και τα μοντέλα φυσικής βάσης. Τέτοιου είδους μοντέλα, είναι π.χ τα νευρωνικά δίκτυα (Ευστρατιάδης 2008).

Έπειτα με βάση την χωρική κλίμακα, τα υδρολογικά μοντέλα, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

- *Αδιαμέριστο ή συγκεντρωτικό (lumped)*: Η λεκάνη απορροής συνιστά ενιαία χωρική οντότητα, η υλοποίηση των χρονοσειρών φόρτισης αφορούν το σύνολο της επιφάνειας της, ενώ θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Καθορίζονται οι κύριες μεταβλητές του μοντέλου προσομοίωσης και η εκτίμηση της απορροής, πραγματοποιείται στην έξοδο της λεκάνης.

- *Ημι-κατανεμημένο (semi-distributed)*: Η υδρολογική λεκάνη, διαχωρίζεται σε μικρότερα διάκριτα τμήματα, όπου στο κάθε ένα αναλογούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Οι υπολογισμοί επιτελούνται για κάθε ενότητα, με την απόκριση κάθε μιας να αφορά στην έξοδο της λεκάνης.
- *Κατανεμημένο (distributed)*: Το φυσικό σύστημα, διαχωρίζεται σε μικρής κλίμακας χωρικές ενότητες, οι οποίες ονομάζονται κελιά. Αυτά, αναπαριστούν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αναλογούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (Ευστρατιιάδης 2008, Καλογερόπουλος 2011).



Εικόνα 4.3.2.1 Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων βάσει της χωρικής τους κλίμακας (Ευστρατιιάδης 2008)

Τέλος, η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χρονική κλίμακα, περιλαμβάνει δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι:

- *Μεμονωμένο υδρολογικό γεγονός*: όπου περιγράφονται μεμονωμένα γεγονότα, όπως π.χ ένα υδρογράφημα ή μια πλημμυρική αιχμή.
- *Συνεχή υδρολογικά γεγονότα*: όπου αποδίδεται η διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού ισοζυγίου μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (Καλογερόπουλος 2011).

4.3.3 Υδρολογικά μοντέλα & ΣΓΠ

Η τεχνολογική εξέλιξη που έχει συντελεστεί τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα στον τομέα της γεωπληροφορικής, έχει δημιουργήσει τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη των υδρολογικών μοντέλων. Οι τρέχουσες προσπάθειες, στοχεύουν στην βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων μοντέλων, στην αξιολόγηση τους (χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους, ανάλυση ευαισθησίας, δεδομένα πεδίου, κτλ.), στον συνδυασμό και την σύγκριση τους, καθώς και την

υλοποίηση νέων που βασίζονται σε τεχνολογίες όπως τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) (Chalkias et al 2016).

Στο παρελθόν, στοιχεία όπως ο μεγάλος όγκος των δεδομένων εισόδου, η πληθώρα παραμέτρων που έπρεπε να υπολογιστούν, αλλά και το γεγονός ότι τα δεδομένα έπρεπε να εισαχθούν στους Η/Υ σε κατάλληλες μορφές, ήταν δισεπύλητα προβλήματα που δυσκόλευαν την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου. Με την εδραίωση των ΣΓΠ και με την ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων αυτές οι αντικειμενικές δυσκολίες μετριάστηκαν κατά ένα μεγάλο βαθμό. Αυτό συνετέλεσε αφενός μεν στον υπολογισμό των απαιτούμενων παραμέτρων με πιο αποδοτικό τρόπο και αφετέρου στην ευκολότερη και ταχύτερη ανάκτηση των χωρικών δεδομένων, αποδίδοντας έτσι πιο αξιόπιστα μοντέλα προσομοίωσης. (Moore et al. 1991).

Σύμφωνα με τον Maidment (1996), ένα μοντέλο χωρικής υδρολογίας εξετάζει και προσομοιώνει τη ροή του νερού, προερχόμενη από την βροχόπτωση, σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αξιοποιώντας τη δομή και τη βάση των χωρικών δεδομένων, σε περιβάλλον GIS (Maidment 1996). Ο συνδυασμός διαφορετικών κλάδων όπως η υδρολογία, η γεωλογία, η γεωμορφολογία και η υδρομετεωρολογία και η αξιοποίηση δορυφορικά δεδομένων, μετρήσεων *in situ*, χρονοσειρών δεδομένων κλπ, συντελούν στην διαμόρφωση μιας σφαιρικής αντίληψης αναφορικά με το αντικείμενο της μελέτης (π.χ χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου, δυναμική της βροχόπτωσης, χαρακτηριστικά του εδάφους) (Chalkias et al 2016). Σ'ένα μοντέλο χωρικής υδρολογίας συμπεριλαμβάνονται, πληθώρα θεματικών επιπέδων, όπως τοπογραφικά, γεωμορφολογικά, εδαφολογικά και επίπεδα χρήσεων γης τα οποία απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό για την κατάλληλη διαχείρισή τους (Maidment 1996). Τα G.I.S, θεωρούνται καταλυτικά εργαλεία για τέτοιου είδους εφαρμογές, λόγω της δυναμικής τους να οργανώνουν και να επεξεργάζονται τα δεδομένα, αναπτύσσοντας τοπολογικές σχέσεις στο γεωγραφικό χώρο. Το πρωταρχικό στοιχείο της υδρολογικής ανάλυσης είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από το οποίο μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με το ανάγλυφο και τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής αλλά και για την κίνηση και τη συγκέντρωση των υδάτων (Maidment 1996). Γενικά, η μοντελοποίηση των φυσικών διεργασιών σε τέτοιου είδους συστήματα, δεν χρειάζεται παρά ελάχιστη κατανόηση της φύσης και των περιορισμών των δεδομένων και η επεξεργασία μέσω των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό γίνεται όχι μόνο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, αλλά

και για τον εντοπισμό των σφαλμάτων της μοντελοποίησης και την επαλήθευση της ανάλυσης (Chalkias et al 2016).

Η υδρολογική ανάλυση βασισμένη σε ένα GIS σύστημα, παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως η διερεύνηση και η αξιολόγηση των πραγματικών φυσικών φαινομένων, ο σχεδιασμός και η μελέτη των ενδεχόμενων συνεπειών του και η βέλτιστη διαχείριση (Ευελπίδου κ.α 2015). Παράλληλα, η οριοθέτηση μιας υδρολογικής λεκάνης, η εκτίμηση της απορροής, η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου και η χαρτογράφηση πλημμυρικών επεισοδίων επιτελούνται με τη χρήση ΓΣΠ. Τα καταγεγραμμένα υδρολογικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, εκμεταλλεύονται την χωρική κατανομή των δεδομένων, και έχουν την δυνατότητα να συνδυάσουν πληροφορίες σχετικά με την χωρική μεταβλητότητα της τοπολογίας, των χρήσεων γης, της γεωλογίας και πληθώρας άλλων παραμέτρων που υπεισέρχονται σε ένα μοντέλο. Η εφαρμογή ενός μοντέλου πλημμυρικού κινδύνου, για την χαρτογράφηση της χωρικής κατανομής του πλημμυρικού κινδύνου και της πλημμυρικής επικινδυνότητας, γίνεται προκειμένου να καταρτιστεί ο απαραίτητος στρατηγικός σχεδιασμός με σκοπό την αποδοτικότερη, αποτελεσματικότερη και πιο αξιόπιστη διαχείριση των κινδύνων και την ελάττωση των επιπτώσεων. Η πρόβλεψη για πιθανά καταστροφικά πλημμυρικά φαινόμενα καθώς και η έγκαιρη προειδοποίηση για εκκένωση πόλεων, αυξάνουν τη δυναμική και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων έκτακτης ανάγκης (Forte 2005, Abdalla 2006).

4.4 Υδρογράφημα απορροής

4.4.1 Υδρογράφημα και χαρακτηριστικά μεγέθη

Η απορροή (runoff) αποτελεί την ποσότητα του νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, που καταλήγει με κάποιο τρόπο στο υδρογραφικό δίκτυο και μέσω αυτού στη θάλασσα ή στις λίμνες. Η μέτρησή της πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη διατομή, συνήθως του κύριου κλάδου του υδρογραφικού δικτύου στην έξοδο μιας υδρολογικής λεκάνης, καθώς και σε οποιοδήποτε εσωτερικό σημείο της. Γενικά η απορροή αποτελεί τον συνολικό όγκο του νερού και χαρακτηρίζεται από τρεις συνιστώσες. Το μέρος των υδάτων που κινείται στην επιφάνεια του εδάφους αποτελεί την επιφανειακή απορροή (surface runoff), εκείνο που διηθείται σε μικρό βάθος και κυλάει παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους αποτελεί την υπεδάφια ή υποδερμική

απορροή (interflow), και τέλος το νερό που καταλήγει σε υδατορεύματα διαμέσου υπόγειων υδροφορέων συνιστά την υπόγεια απορροή (groundwaterflow) (Λαμπράκης κ.α 2015).

Κατά τη διάρκεια ενός έντονου ή ραγδαίου επεισοδίου βροχόπτωσης είναι σημαντικό να εξετάζεται η αντίδραση ή απόκριση της ροής των υδατορευμάτων. Συχνά η απόκριση αυτή είναι άμεση και οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μέρος των κατακρημνισμάτων ακολουθεί μια γρήγορη διαδρομή (επίγεια ή υπεδάφια) προς τα υδατορεύματα (Κουτσογιάννης κ.α 1999). Μια ακραία καταγίδα μεγάλης διάρκειας ή μια αιφνίδια τήξη μεγάλης ποσότητας χιονιού, χαρακτηρίζεται από άμεση επιφανειακή απορροή η οποία καλείται πλημμυρική απορροή (Λαμπράκης κ.α 2015). Η δυναμική της είναι τέτοια, ώστε η συνολική παροχή να υπερβαίνει τη διοχετευτική ικανότητα του υδατορέματος, με αποτέλεσμα να κατακλύζονται οι όμορες περιοχές και να προξενούνται σημαντικές καταστροφές (Καρύμπαλης 2008).

Το *υδρογράφημα* ενός πλημμυρικού φαινομένου και το αντίστοιχο *υετογράφημα*, που αποτυπώνει την ένταση της βροχής συναρτήσει του χρόνου, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον τρόπο εκδήλωσης και εξέλιξης του φαινομένου σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Ως υδρογράφημα, ορίζεται το διάγραμμα της παροχής σαν συνάρτηση του χρόνου σε ένα ορισμένο σημείο της κοίτης ενός υδατορεύματος [$Q=Q(t)$] (Βαφειάδης 2004). Δηλαδή, αποτυπώνει την χρονική διαφοροποίηση της απορροής σε μια υδρολογική λεκάνη, λόγω της βροχόπτωσης που λαμβάνει χώρα σε αυτή. Η παροχή (Q σε m^3/s) συνιστά την ποσότητα του νερού που διέρχεται από τη διατομή της κοίτης ενός ποταμού στη μονάδα του χρόνου (Παυλόπουλος 2011). Η μορφή και το σχήμα του υδρογραφήματος εξαρτώνται από παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή, όπως τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (π.χ μέγεθος και σχήμα λεκάνης, ανάγλυφο κλπ), την γεωλογική της δομή, καθώς και κλιματικούς παράγοντες (π.χ ένταση, κατανομή και διάρκεια βροχόπτωσης) (Λαμπράκης κ.α 2015).

Στην εικόνα αναπαρίσταται ένα τυπικό υδρογράφημα ενός πλημμυρικού επεισοδίου, μαζί με το αντίστοιχο υετογράφημα της βροχής που προξένησε την πλημμύρα. Παρατηρώντας το υδρογράφημα, διαπιστώνεται ότι πριν την εκδήλωση της ενεργού βροχόπτωσης, η παροχή συναρτήσει του χρόνου είναι ελαφρώς φθίνουσα. Ο κλάδος AB του υδρογραφήματος περιγράφει τη βασική ροή του ποταμού. Όταν ο χρόνος $t_A \equiv t_B$ τότε ξεκινά η ενεργός βροχόπτωση η οποία μετατρέπεται σε άμεση απορροή, με αποτέλεσμα η παροχή του υδατορέματος να αρχίζει να αυξάνεται με έντονο ρυθμό, έως ότου η παροχή αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της στο χρόνο t_T (Κουτσογιάννης κ.α 1999).

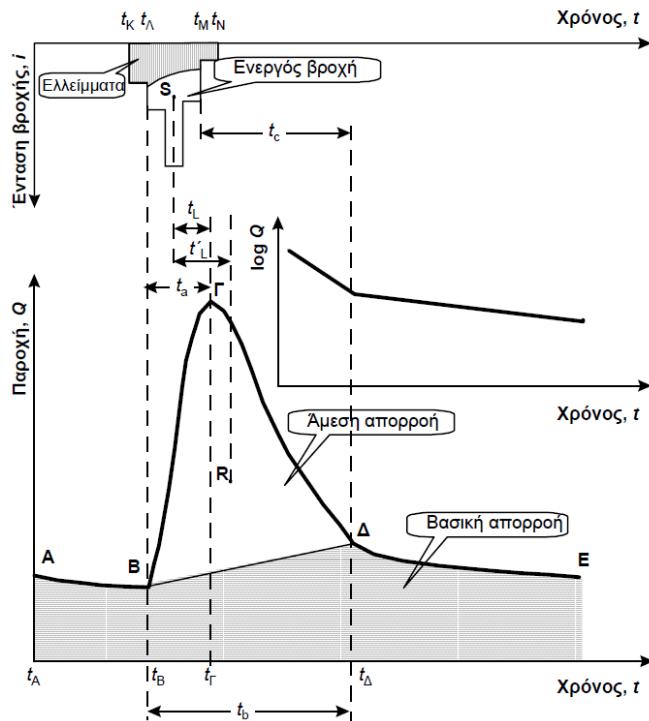
Το υδρογράφημα ενός πλημμυρικού επεισοδίου προερχόμενου από μια μεμονωμένη, αιφνίδια και ραγδαία βροχόπτωση, συνίσταται από τρία τμήματα, α) τον ανερχόμενο κλάδο ή καμπύλη συγκεντρώσεως, β) κορυφή ή πλημμυρική αιχμή και γ) τον κατερχόμενο κλάδο ή καμπύλη εκτονώσεως.

Πιο συγκεκριμένα:

- ο Ανερχόμενος κλάδος ή καμπύλη συγκεντρώσεως: Ο κλάδος ΒΓ στο σχήμα, όπου συσσωρεύονται όλο και μεγαλύτερες ποσότητες νερού στο υδατόρευμα, με συνέπεια την αύξηση της παροχής μέχρις ότου να σημειωθεί η μέγιστη τιμή αυτής.
- ο Κορυφή ή πλημμυρική αιχμή: Το σημείο Γ αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή της παροχής στον χρόνο t_r . Οι πλημμυρικές αιχμές, προέρχονται από απότομη αύξηση και κατόπιν μείωση της παροχής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Συνήθως λαμβάνουν χώρα μετά το τέλος της βροχόπτωσης, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί και πριν από αυτό. Επίσης αντιστοιχούν σε παροχές υψηλότερες της βασικής ροής του ρέματος και δύνανται να προξενήσουν υπερχειλίσεις και κατάκλυση των όμορων περιοχών.
- ο Κατερχόμενος κλάδος ή καμπύλη εκτονώσεως: Ο κλάδος ΓΔ περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο εκτονώνεται η παροχή (Κουτσογιάννης κ.α 1999, Τσόγκας 1999).

Η άμεση απορροή λαμβάνει χώρα μόνο στο χρονικό διάστημα (t_b , t_d), ενώ η βασική απορροή είναι διαρκής. Αρχικά, το χρονικό διάστημα $t_b = t_d - t_b$ αποτελεί τον *χρόνο βάσης ή διάρκεια πλημμύρας*, δηλαδή το διάστημα κατά το οποίο διαρκεί η άμεση απορροή από τη θεωρούμενη διατομή του ρεύματος. Στο υδρογράφημα ένα ακόμη σημαντικό χρονικό διάστημα, είναι ο *χρόνος ανόδου*, $t_a = t_r - t_b$, που περιγράφει τη χρονική περίοδο ανάμεσα στην αρχή της ανόδου του κλάδου έως την εμφάνιση της κορυφής, δηλαδή της αιχμής του υδρογραφήματος. Έπειτα, είναι ο *χρόνος υστέρησης* $t_L := t_r - t_s$, όπου t_s , ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους S του υετογραφήματος. Ο χρόνος υστέρησης, αποτελεί την χρονική διάρκεια που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο κέντρο βάρους τη βροχής και της αιχμής του υδρογραφήματος (κορυφή). Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος είναι ο *χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής* και αποτελεί τη χρονική απόσταση που μεσολαβεί ανάμεσα στη λήξη της ενεργού βροχής και τη λήξη της άμεσης απορροής, δηλαδή $t_c = t_d - t_m$. Ουσιαστικά ο χρόνος συρροής ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή για να διανύσει μια απόσταση από το πλέον απομακρυσμένο υδραυλικά σημείο της λεκάνης έως την διατομή

εξόδου (Κουτσογιάννης κ.α 1999, Τσόγκας 1999). Όταν λαμβάνουν χώρα, μεγάλης διάρκειας συμβάντα βργχόπτωσης, ο χρόνος συγκέντρωσης αντιπροσωπεύει τον χρόνο που χρειάζεται για να φθάσει η παροχή στο μέγιστο της (Τσόγκας 1999).



Εικόνα 4.4.1.1 Υδρογράφημα απορροής (Κουτσογιάννης κ.α 1999)

4.5 Σχέσεις βροχής-απορροής

4.5.1 Μοναδιαίο Υδρογράφημα (MYT)

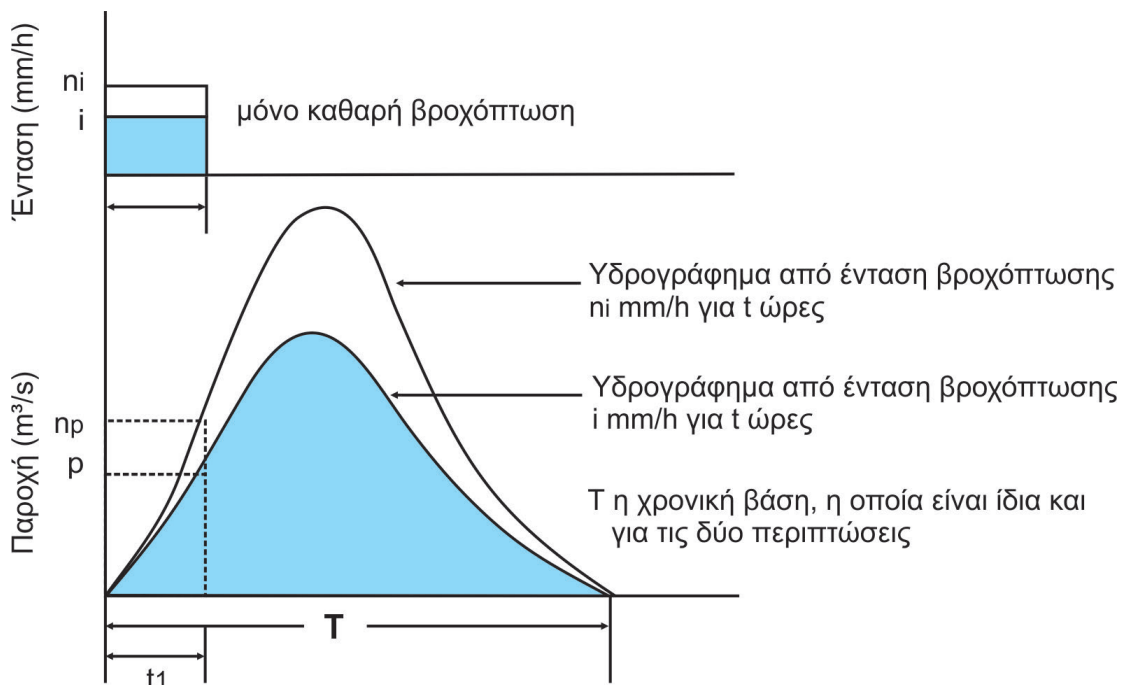
4.5.1.1 Ορισμός και θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Ο Sherman το 1932, ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (MYT-Unit Hydrograph), το οποίο ορίζεται ως το υδρογράφημα της άμεσης απορροής προερχόμενης από την ενεργό βροχόπτωση, μοναδιαίου ύψους (στο μετρικό σύστημα ίσης με 1 cm, $h_R=1$ cm) και συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας t_R , η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα σ' όλη την έκταση της λεκάνης απορροής και έχει σταθερή ένταση (Μιμίκου και Μπαλτάς 2006, Λαμπράκης κ.α 2015). Οι Linsley et al. (1975) κατέληξαν στο συμπέρασμα, που ισχύει μέχρι και σήμερα, ότι το καθοριστικό κριτήριο για να θεωρηθεί ένα υδρογράφημα μοναδιαίο, είναι η διάρκεια μιας τυπικής βροχής, η οποία πρέπει να είναι το ένα τέταρτον του χρόνου καθυστέρησης της λεκάνης. Ο χρόνος καθυστέρησης είναι ο χρόνος μεταξύ του κέντρου βάρους της βροχής και της αιχμής του υδρογραφήματος (Λαμπράκης κ.α 2015).

Το μοναδιαίο υδρογράφημα (UH), συνιστά μία εκ των κυριότερων μεθόδων εκτίμησης τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της γενικότερης κατανομής της απορροής που προξενεί η βροχόπτωση (Μιμίκου και Μπαλτάς 2006). Το σημαντικό χαρακτηριστικό του για μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, δεν είναι η μονάδα ύψους της απορροής, αλλά η χρονική διάρκεια του περισσέυματος βροχόπτωσης δηλαδή της τυπικής βροχής που λογίζεται ως χρονική μονάδα (Λαμπράκης κ.α 2015). Το MYT, αντανακλά το σύνολο των χαρακτηριστικών της υδρολογικής λεκάνης όπως το σχήμα, το μέγεθος, οι κλίσεις και το ανάγλυφο, το έδαφος κλπ, αλλά και εκείνα που σχετίζονται με τη βροχόπτωση που το προκάλεσε (τύπος, διάρκεια, ένταση) (Μιμίκου και Μπαλτάς 2006). Συνεπώς, δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του υδρογραφήματος της άμεσης απορροής οποιουδήποτε ύψους περισσέυματος βροχόπτωσης (Λαμπράκης κ.α 2015).

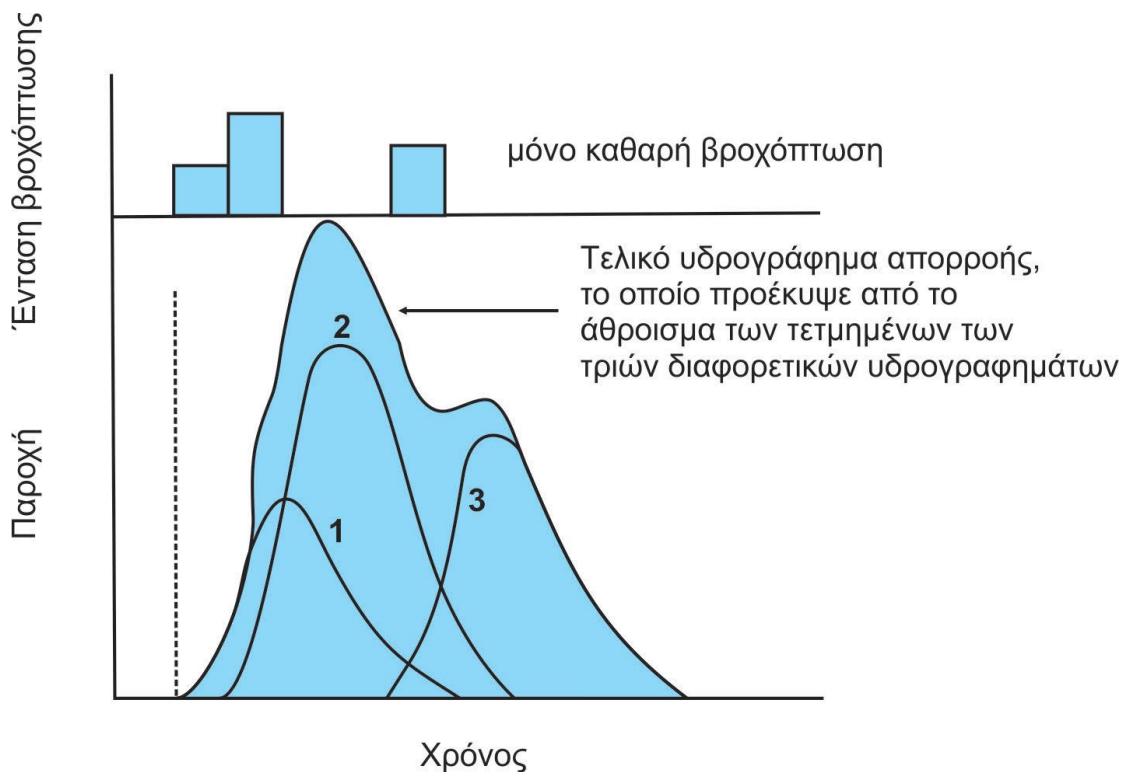
Οι τρεις θεμελιώδεις αρχές, στις οποίες βασίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

- *Αρχή της αναλογίας:* Οι τεταγμένες δύο υδρογραφημάτων άμεσης απορροής με κοινή χρονική βάση, είναι ανάλογες των συνολικών όγκων της άμεσης απορροής για καθένα από αυτά τα υδρογραφήματα. Δηλαδή, για μια βροχόπτωση ίδιας χρονικής διάρκειας και έντασης n φορές μεγαλύτερη από μια άλλη, οι τεταγμένες του υδρογραφήματος θα είναι n φορές μεγαλύτερες.



Εικόνα 4.5.1.1.1 Αρχή της αναλογίας (Λαμπράκης κ.α 2015)

- *Αρχή της επαλληλίας:* Το συνολικό υδρογράφημα άμεσης απορροής, που σχηματίζεται από τρεις διαδοχικές επιμέρους βροχοπτώσεις, είναι το άθροισμα των τριών υδρογραφημάτων άμεσης απορροής, των αντίστοιχων βροχοπτώσεων (Λαμπράκης κ.α 2015).



Εικόνα 4.5.1.1.2 Αρχή της επαλληλίας (Λαμπράκης κ.α 2015)

- *Αρχή ανεξαρτησίας:* Η άμεση απορροή προερχόμενη από δεδομένη βροχόπτωση, είναι ανεξάρτητη από προηγούμενες ή επόμενες βροχοπτώσεις (Ramirez 2000, Μιμίκου και Μπαλτάς 2006, Μαμάσης 2009).

Τέλος, η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος διέπεται από πληθώρα παραδοχών, οι οποίες είναι οι ακόλουθες.

- Η ενεργός βροχόπτωση $I(t)$ έχει σταθερή ένταση, καθ' όλη τη διάρκεια ισχύος της και κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής $Q(t)$.
- Οι λεκάνες απορροής συμπεριφέρονται ως γραμμικά συστήματα. Μια λεκάνη απορροής ονομάζεται γραμμική όταν ο μετασχηματισμός της ενεργούς βροχόπτωσης σε απορροή παρουσιάζει ευθεία γραμμική αναλογία.
- Ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος (διάρκεια της άμεσης απορροής), απόρροια της ενεργού βροχόπτωσης δεδομένης διάρκειας, είναι σταθερός.
- Ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος είναι ανεξάρτητος από την ένταση της ενεργού βροχόπτωσης (Chow et al. 1988, Μιμίκου και Μπαλτάς 2006, Μαμάσης 2009).

4.5.1.2 Μέθοδοι Ανάπτυξης Μοναδιαίων Υδρογραφήματων

Εμπειρικός τρόπος ανάπτυξης Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Σε μια λεκάνη απορροής καταγράφεται βροχόπτωση $h_r(\text{cm})$, χρονικής διάρκειας $t_R(\text{h})$, ενώ ισχύουν οι παραδοχές και τα κριτήρια που έχουν ήδη αναφερθεί. Επίσης οι τιμές της απορροής $Q(t) \text{ m}^3/\text{h}$ που αντιστοιχούν στη βροχόπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Για την κατασκευή του ΜΥΓ μεμονωμένης βροχόπτωσης ακολουθούνται τα εξής βήματα (Ramírez 2000, Λαμπράκης κ.α 2015):

- Διαχωρισμός για κάθε χρονικό διάστημα μέτρησης, $\Delta t - t_{i+1} - t_i(\text{h})$, της άμεσης $R(t) \text{ m}^3/\text{h}$ και της βασικής $B(t) \text{ m}^3/\text{h}$ απορροής με βάση την σχέση $R(t) = Q(t) - B(t)$ και σχεδιάζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής.
- Υπολογισμός του συνολικού όγκου της άμεσης απορροής $V_R (\text{m}^3)$, ο οποίος μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος βροχής h_R . Οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζεται ο συνολικός όγκος είναι οι εξής:

$$V_R = \int_0^1 R(t) dt \text{ ή } V_R = \Delta t \sum_{i=0}^n R_i$$

$$h_R = 0,36 \frac{\Delta t}{A} \sum_{i=0}^n R_i$$

- Υπολογισμός των απωλειών $h_L(\text{cm})$, έχοντας ως δεδομένα τη βροχόπτωση $h_r(\text{cm})$ και το ισοδύναμο ύψος βροχής της άμεσης απορροής $h_R(\text{cm})$. Η σχέση έχει ως εξής:

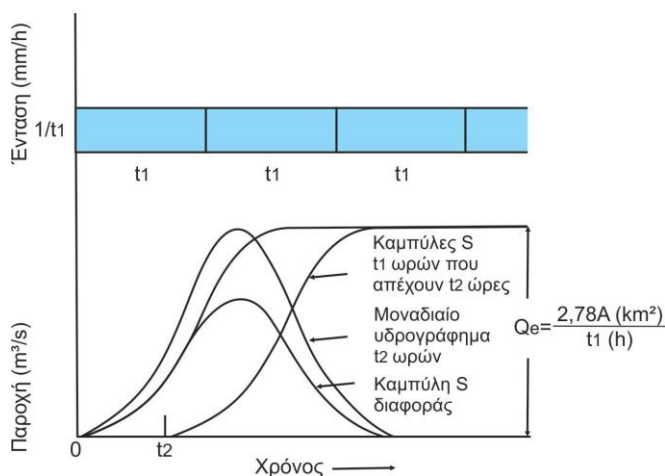
$$h_L = h_r - h_R$$

- Οι τεταγμένες του ΜΥΓ θα είναι πλέον $U_i = R_i/h_R$, όπως προκύπτει από την επαλήθευση:

$$\frac{1}{A} \int_0^T U(t) dt = 0,36 \frac{\Delta t}{A} \sum_{i=0}^n U_i = 1$$

S-Υδρογράφημα (S-Hydrograph)

Η καμπύλη S, αντιπροσωπεύει ένα αθροιστικό υδρογράφημα πολλών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, με το όνομα της να αποδίδεται στο χαρακτηριστικό της σχήμα. Ένα S-Υδρογράφημα, αναπαριστά την απόκριση της λεκάνης απορροής σε ένα επεισόδιο ενεργούς βροχόπτωσης, με διάρκεια μεγαλύτερη του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης.



Σχήμα 4.5.1.2.1 Υπολογισμός καμπύλης S (Λαμπράκης κ.α 2015)

Σε περίπτωση που τα μοναδιαία υδρογραφήματα δημιουργούνται από βροχοπτώσεις ομοιόμορφης έντασης $I=1 \text{ cm/h}$, τότε η καμπύλη S μετατοπίζεται κατά τη χρονική περίοδο ίση με $t_1=1 \text{ h}$, δημιουργώντας εμβαδό που αντιστοιχεί στον όγκο του νερού ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος. Αντίστοιχα, όταν η καμπύλη S μετατοπίζεται κατά τη χρονική περίοδο $t_2=2\text{h}$, προκύπτει ο όγκος του νερού του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το οποίο προέρχεται από βροχόπτωση έντασης $I_2=1\text{cm}/2\text{h}$ (0.5 cm/h). Η σταθερή παροχή Q_e (m^3/s) που αντιστοιχεί στην απορροή αυτού του υδρογραφήματος υπολογίζεται από την σχέση $Q_e=2,78(A/t_1)(\text{m}^3/\text{s})$ (Λαμπράκης κ.α 2015).

Μοναδιαίο Υδρογράφημα: Θεωρία γραμμικού συστήματος

Μια υδρολογική λεκάνη ονομάζεται γραμμική όταν η μετατροπή της ενεργούς βροχόπτωσης $I(t)$ σε απορροή $Q(t)$, παρουσιάζει ευθεία γραμμική αναλογία. Η υδρολογική απόκριση τέτοιων συστημάτων, εκφράζεται μέσω συναρτήσεων απόκρισης με τη βοήθεια του ολοκλήρωματος συνέλιξης (convolution integral). Τα γραμμικά συστήματα, διατηρούν τις ιδιότητες της

προσθετικότητας και της αναλογικότητας, οι οποίες συνδέονται άρρηκτα με το ολοκλήρωμα συνέλιξης (Ramirez 2000).

Το 1988, προτάθηκε από τους Chow et al, μια θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, της οποίας η κεντρική ιδέα ήταν η σύνδεση της συνάρτησης της στιγμιαίας παλμικής απόκρισης (στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα-IUH), με την συνάρτηση απόκρισης μοναδιαίου βήματος (S-Hydrograph), καθώς και την συνάρτηση μοναδιαίας παλμικής απόκρισης (μοναδιαίο υδρογράφημα-UH).

Αρχικά στα υδρολογικά συστήματα, προκύπτει ότι η συνάρτηση $u(t)$, αναπαριστά το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα (ΣΥΓ-IUH), ενώ οι συναρτήσεις $Q(t)$ και $I(t)$ περιγράφουν την άμεση απορροή και την ενεργό βροχόπτωση αντίστοιχα. Επιπλέον, το ΣΥΓ περιγράφει την απόκριση της λεκάνης (παροχή στην έξοδο της, συναρτήσει του χρόνου), σε βροχόπτωση όγκου 1 μονάδας, ομοιόμορφα κατανεμημένης σε όλη την έκταση της, η οποία εκδηλώνεται στιγμιαία σε χρόνο $t=0$.

Όταν, στην λεκάνη σημειώνεται καθαρή βροχόπτωση $I(t)$, τότε η *στιγμιαία παλμική απόκριση (IRF)* της λεκάνης, εκφράζει την απορροή $Q(t)$, η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια του ολοκληρώματος συνέλιξης, ως εξής (Maidment et al. 1996, Ramirez 2000)

$$Q(t) = \int_0^1 I_e(\tau) \cdot u(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

όπου $u(t)$ η συνάρτηση παλμικής απόκρισης (IRF) του συστήματος.

Η *συνάρτηση απόκρισης μοναδιαίου βήματος (SRF)*, διέπει το θεωρητικό πλαίσιο της καμπύλης S (S-υδρογράφημα), που αναφέρθηκε προηγούμενως στην εμπειρική ανάλυση του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Αναπαριστά το υδρογράφημα απορροής από μία συνεχή ενεργό βροχόπτωση και αποδίδεται με τη βοήθεια του ολοκληρώματος συνέλιξης των $I(t)$ και $u(t)$ ως εξής (Maidment et al. 1996, Ramirez 2000):

$$g(t) = \int_0^1 u(t) dt \quad (3)$$

Η συνάρτηση μοναδιαίας παλμικής απόκρισης (PRF), αντιπροσωπεύει το υδρογράφημα απορροής που έχει προκύψει από σταθερή ενεργό βροχόπτωση έντασης $1/\Delta t$ και διάρκειας Δt . Η αντίστοιχη απόκριση στην έξοδο της λεκάνης, εκφράζεται από τη σχέση (Maidment et al. 1996, Ramirez 2000)

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} [g(t) - g(t - \Delta t)] \quad (4)$$

Η τελική σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^1 u(\tau) d\tau \quad (5)$$

4.5.2 Μοντέλα βροχής-απορροής με χρήση ΣΓΠ

Από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα, πολλοί ερευνητές έχουν δημοσιεύσει (και συνεχίζουν να δημοσιεύουν), το ερευνητικό τους έργο πάνω στα ζητήματα της υδρολογίας, συμβάλλοντας κατ'αυτόν τον τρόπο στην διαμόρφωση της βιβλιογραφίας αυτού του γνωστικού αντικειμένου (Chalkias et al 2016). Δύο εκ των σημαντικότερων προκλήσεων της υδρολογικής μοντελοποίησης, αποτελούν η πρόβλεψη της πλημμυρικής απορροής και η εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης σε ένα αιφνίδιο επεισόδιο βροχόπτωσης. Μέθοδοι και τεχνικές όπως η ορθολογική μέθοδος, έχουν εφαρμοστεί ήδη για τον σκοπό αυτό αλλά σε κλίμακα λεκανών μικρής έκτασης (Christofidis 2008). Για πολλές δεκαετίες, η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, συνιστά βασικό εργαλείο στον υπολογισμό και την εκτίμηση τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της γενικότερης κατανομής της απορροής που προξενεί η βροχόπτωση. Η δε συνεισφορά του στον υπολογισμό της διόδευσης της απορροής, θεωρείται ζωτικής σημασίας (Maidment et al 1996).

Η πρώτη απόπειρα για την μαθηματική αναπαράσταση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, χρονολογείται στο 1945, όταν ο Clark διετύπωσε ένα μοντέλο συνδυάζοντας το διάγραμμα

επιφάνειας-χρόνου της λεκάνης, με ένα γραμμικό ταμιευτήρα στην έξοδο αυτής. Το 1959 ο Dooge, πρότεινε ένα μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα το οποίο διέπεται από τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Ο υπολογισμός της παροχής στην έξοδο της λεκάνης, αποδίδεται από το ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) της ενεργού βροχόπτωσης και του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η μεγαλύτερη συμβολή στην αναπαράσταση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, πιστώνεται στους Chow et al (1988), οι οποίοι εργάστηκαν πάνω στη συσχέτιση των συναρτήσεων της παλμικής απόκρισης (στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα), της απόκρισης μοναδιαίου βήματος (S-Hydrograph), καθώς και της συνάρτησης μοναδιαίας παλμικής απόκρισης (unit hydrograph), η απόδοση των οποίων πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ολοκληρώματος συνέλιξης (Maidment et al 1996).

Εφαρμοσμένη Υδρολογική Μοντελοποίηση τη δεκαετία του 1970s

Η ανάγκη για μετάβαση από την κλασσική στην εφαρμοσμένη υδρολογία, διατυπώθηκε από τους Nash και Sutcliffe το 1970, μέσα από μια σειρά από δημοσιεύσεις στην Journal of Hydrology. Μέσα από την δημιουργία εννοιολογικών μοντέλων, προσπάθησαν να προτείνουν ορισμένες αρχές για την πρόβλεψη της ποτάμιας ροής, τα οποία εν τέλει εφήρμοσαν σε συγκεκριμένες λεκάνες απορροής (βλ. Brosna Catchment στην Ιρλανδία και Ray Catchment στην Αγγλία). Στα επόμενα χρόνια, σημειώνεται άνθιση στην υδρολογική μοντελοποίηση, με πληθώρα μελετών να υλοποιούνται. Οι Beven και Kirby ανέπτυξαν ένα υδρολογικό μοντέλο πρόβλεψης το οποίο συνδυάζει την τοπολογία του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης και τα πλεονεκτήματα των απλών συγκεντρωτικών μοντέλων (Chalkias et al 2016). Το 1979, οι Rodriguez-Iturbe και Valdes ήταν οι πρώτοι που εισήγαγαν την έννοια του Γεωμορφολογικά στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος (GIUH), αξιοποιώντας το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα και αναπτύσσοντας το με τέτοιο τρόπο, ώστε να βασίζεται στις μορφομετρικές παραμέτρους. Ουσιαστικά με αυτήν την μελέτη αποδείχθηκε, ότι τα γεωμορφολογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας υδρολογικής λεκάνης, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις υδρολογικές διεργασίες, αφού ελέγχουν σε μεγάλο βαθμό την υδρολογική της απόκριση. Πιο συγκεκριμένα, για την μοντελοποίηση του μετασχηματισμού της ενεργού βροχόπτωσης σε άμεση απορροή, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο συνεχούς χρόνου του Markov, για την μελέτη της γεωμορφολογίας τους εμπειρικούς νόμους του Horton, ενώ για την ερμηνεία του μοναδιαίου υδρογραφήματος την

συνάρτηση πυκνότητας -πιθανότητας. Το μοντέλο αυτό, γενικεύθηκε από τους Gupta et al, το 1980 και τους Gupta και Waymire το 1983 (Du et al. 2009 (Du et al. 2009)). Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, οι Kitanidis και Bras, στηριζόμενοι στο επιστημονικό έργο του Nash, υλοποίησαν ένα εννοιολογικό μοντέλο, για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ποτάμιας ροής σε πραγματικό χρόνο (Chalkias et al 2016).

Εφαρμοσμένη Υδρολογική Μοντελοποίηση τη δεκαετία του 1980s

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, παρουσιάστηκαν νέες ιδέες που σηματοδότησαν την απαρχή της ψηφιακής εποχής στην υδρολογική μοντελοποίηση. Παράλληλα, παρατηρήθηκαν συντονισμένες προσπάθειες που σχετίζονταν με την αυξημένη ανάγκη για αξιολόγηση και βελτίωση των φυσικών μοντέλων (Chalkias et al 2016). Το 1982, οι Rodriguez-Iturbe et al, πρότειναν την έννοια του γεωμορφολογικού-κλιματικού στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος (GcIUH), το οποίο αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του πρώτου τους μοντέλου, καθώς υπεισέρχεται η παράμετρος του κλίματος (Ajward and Muzik 2000, Maidment 1993). Το 1984, οι O' Callaghan et al ανέπτυξαν μία τεχνική εξαγωγής υδρογραφικού δικτύου από ψηφιακά υψομετρικά δεδομένα, ενώ πέντε χρόνια αργότερα, προτάθηκε από τον Hutchinson μια νέα τεχνική (αλγόριθμος ANUDEM), προκειμένου να παρουσιάζονται τα υψομετρικά δεδομένα και το υδρογραφικό δίκτυο σε μορφή grid. Το 1986, το Υδραυλικό Ινστιτούτο της Δανίας, μαζί με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας και το SOGREAH (Γαλλία), δημιούργησαν ένα μοντέλο διαφορετικό από τα συμβατικά μοντέλα βροχής-απορροής, τα οποία θεωρούσαν ότι δεν είναι κατάλληλα για απαιτητικές εργασίες όπως π.χ η εκτίμηση και αξιολόγηση των ανθρωπογενών επιδράσεων στην αλλαγή των χρήσεων γης και της ποιότητας των υδάτων. Υποστήριζαν δε, ότι τα πολύπλοκα υδρολογικά ζητήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο από μοντέλα φυσικής βάσης που επιτρέπουν τη χωρική μεταβλητότητα εντός της λεκάνης απορροής (Chalkias et al 2016).

Εφαρμοσμένη Υδρολογική Μοντελοποίηση τη δεκαετία του 1990s

Τη χρονική περίοδο μεταξύ 1990 και 2000, σημειώθηκε η μεγαλύτερη άνθιση στον τομέα της υδρολογικής μοντελοποίησης. Πολλοί ερευνητές εφήρμοσαν κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα, τα οποία εκμεταλλεύονται την χωρική κατανομή των δεδομένων, και έχουν την δυνατότητα να συνδυάσουν πληροφορίες σχετικά με την χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης, της τοπολογίας, των χρήσεων γης, της γεωλογίας και πληθώρας άλλων παραμέτρων που υπεισέρχονται σε ένα μοντέλο. Μια εκ των μεθόδων που χρησιμοποίησαν (και συνεχίζουν να χρησιμοποιούν μέχρι και σήμερα) για την προσομοίωση της βροχής-απορροής, είναι η μέθοδος Χρόνου-Επιφάνειας (Time-Area method). Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επαναταξινόμηση του χρόνου συρροής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, η οποία οδηγεί στον σχεδιασμό των ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή εκείνων των καμπυλών που συνδέουν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης (Bourletsikas et. al 2006, Καρύμπαλης κ.α 2014). Σύμφωνα με τον McCuen (1989), η θεμελιώδης αρχή, πάνω στην οποία βασίζεται η μέθοδος χρόνου-επιφάνειας, είναι η σύνταξη του ιστογράμματος χρόνου-επιφάνειας, το οποίο αναπαριστά τη σχέση ανάμεσα στον χρόνο διαδρομής (time travel) της απορροής και της επιφάνειας της υδρολογικής λεκάνης που συμβάλλει στην απορροή, κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Ουσιαστικά, το ιστόγραμμα επιφάνειας-χρόνου, αντιπροσωπεύει τη χωρική και χρονική κατανομή της επιφανειακής απορροής εντός της λεκάνης του υδατορρέυματος (McCuen 1989). Παράλληλα μέσω της μεθόδου του αριθμού καμπύλης ροής (Curve Number-CN), δόθηκε η δυνατότητα του υπολογισμού των απωλειών της βροχόπτωσης (Christofidis 2008, Chalkias et al 2016).

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η γενικότερη τεχνολογική “έκρηξη”, έδωσε τη δυνατότητα στους υδρολόγους αλλά και σε επιστήμονες άλλων ειδικοτήτων να στραφούν προς τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ). Η ανάπτυξη και η ευρεία χρήση του λογισμικού των ΣΓΠ, τα τελευταία χρόνια, επέτρεψε την ραγδαία και ακριβή εκτίμηση των γεωμετρικών παραμέτρων της λεκάνης, συνέβαλε στην εξαγωγή βελτιωμένων αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή μεθόδων κατασκευής υδρογραφημάτων, οι οποίες απαιτούν χωρική ανάλυση και γενικότερα διευκόλυνε την εκτίμηση της απορροής των υδρολογικών λεκανών (Χριστοφίδης 2008). Επιπλέον, η εφαρμογή του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Digital Elevation Model-DEMs) στην υδρολογική μοντελοποίηση βασισμένη σε raster δεδομένα, συνετέλεσε στο να ενισχυθεί σημαντικά η χρήση των GIS στην υδρολογία. Παραδείγματος χάριν, στις αρχές της

δεκαετίας του 1990, οι Fairfield και Leymarie ασχολήθηκαν με την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μιας υδρολογικής λεκάνης από ένα ΨΜΕ, ενώ οι Zhang και Montgomery διερεύνησαν την επίδραση της ανάλυσης ενός ΨΜΕ στην απεικόνιση της τοπογραφίας και στις υδρολογικές προσομοιώσεις (Chalkias et al 2016).

Το 1993, ο Maidment ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια “χωρικά κατανεμημένο μοντέλο” (spatial distributed model). Πρότεινε μια μεθοδολογία με ΣΓΠ, βασισμένη στην ψηφιδωτή δομή των raster, για την σύνθεση ενός χωρικά κατανεμημένου μοναδιαίου υδρογραφήματος (spatial distributed unit hydrograph model), υπολογίζοντας τις ταχύτητες ροής σε κάθε κελί (cell), στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας υπολογίσει αυτήν την χρονικά αμετάβλητη ταχύτητα ροής, προχώρησε στον υπολογισμό του χρόνου συρροής του νερού από το κάθε κελί έως το στόμιο (έξοδος) της λεκάνης, διαιρώντας το μήκος ροής με την σταθερή ταχύτητα. Στη συνέχεια, ακολούθησε ο προσδιορισμός και η κατασκευή των ισόχρονων καμπυλών (ίσου χρόνου απορροής) και του διαγράμματος χρόνου - επιφάνειας απορροής με το οποίο αναπαρίσταται η ολόένα αυξανόμενη έκταση της λεκάνης που συμβάλλει στην απορροή με την πάροδο του χρόνου. Τέλος, από το διάγραμμα χρόνου επιφάνειας εξήχθη το χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. Το υδρογράφημα αυτό, δύναται να θεωρηθεί ως ένας τύπος γεωμορφολογικού-κλιματικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, καθότι εξαρτάται από παραμέτρους όπως η γεωμορφολογία, η βροχόπτωση και ο υδραυλικός χαρακτήρας της λεκάνης απορροής (Olivera and Maidment 1999, Du et al. 2009, Καρύμπαλης κ.α 2014).

Το 1996 οι Maidment et al, ανέπτυξαν μια διαφορετική προσέγγιση μοντελοποίησης της απορροής, κατά την οποία η απόκριση της λεκάνης υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους αποκρίσεων των υπολεκανών της. Ουσιαστικά, αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία κατά την οποία υλοποιείται ο προσδιορισμός της ροής, με στόχο την διόδευση της μέσω ενός γραμμικού ταμιευτήρα (Olivera and Maidment 1999, Du et al. 2009).

Ο Muzik το 1996, εφήρμοσε την προσέγγιση του Maidment (χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο υδρογράφημα) στην υδρολογική λεκάνη Waiparous Creek έκτασης 229 km², στα Rocky Mountains του Καναδά, αξιοποιώντας το λειτουργικό GRASS GIS. Η βροχόπτωση, που χρησιμοποίησε σαν δεδομένο εισόδου, ήταν χωρικά μεταβλητή, ενώ ο υπολογισμός των απωλειών βροχής, έγινε με την χρήση της μεθόδου SCS του αριθμού καμπύλης ροής (Curve Number). Αρχικά, προχώρησε στην εκτίμηση της ταχύτητα ροής για κάθε κελί του grid, συνδυάζοντας τη

εξίσωση συνέχειας και την εξίσωση του Manning. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν η καμπύλη χρόνου-επιφάνειας, που είχε τη μορφή ενός S-υδρογραφήματος. Όσον αφορά στην επαλήθευση του μοντέλου, προχώρησε στην σύνθεση ενός ωριαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος, όπου η βροχόπτωση είχε ένταση της τάξης των 3,7 mm/hr. Η προσομοίωση του κρίθηκε ως επιτυχημένη, αφού μέσα από κατάλληλη σύγκριση προέκυψε ταύτιση στα αποτελέσματα του υπολογισμένου υδρογραφήματος με εκείνα του παρατηρημένου υδρογράφηματος (Melesse and Graham 2000, Du et al 2009).

Το 1999, ο Olivera and Maidment, ανέπτυξαν ένα μοντέλο διόδευσης απορροής στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης (Waller Creek του Texas), για μια χωρικά κατανεμημένη ακραία βροχόπτωση. Για την αναπαράσταση του αναγλύφου και τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, αξιοποιήθηκε ένα ΨΜΕ. Όσον αφορά στην κύρια μεθοδολογία, αρχικά, ορίστηκε μια συνάρτηση διόδευσης της απόκρισης για κάθε κελί του κανάβου, και έπειτα, χάρις στην διαδικασία αυτή, απεδόθη η συνάρτηση απόκρισης για τη διαδρομή της ροής, στην οποία οι βασικές παράμετροι είναι η ταχύτητα ροής και ο συντελεστής διασποράς. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η σύνθεση του υδρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης, για μια ακραία βροχόπτωση, με την τελική απόκριση της λεκάνης να προκύπτει ως το άθροισμα των αποκρίσεων όλων των κελιών (Olivera and Maidment 1999, Du et al. 2009).

Το 2000, οι De Smedt et al., πρότειναν με τη σειρά τους μια μέθοδο διόδευσης της απορροής ροής μιας υδρολογικής λεκάνης, αξιοποιώντας ένα μοντέλο κύματος διάχυσης σε περιβάλλον GIS, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό των συναρτήσεων απόκρισης, ανάλογα με την κλίση, την ταχύτητα ροής και τα χαρακτηριστικά διάχυσης κατά μήκος των γραμμών ροής (De Smedt et al 2000, Christofidis 2008).

Συνοψίζοντας, πολλοί ερευνητές (Saghafian και Julien 1995, Wang και Hjelmfelt 1998, Ajward και Muzik 2000) ανέπτυξαν μοντέλα διόδευσης της απορροής, με τον χρόνο συρροής να προκύπτει από τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής με την θεωρία του κινηματικού κύματος. Στον αντίποδα, άλλοι ερευνητές, όπως ο Maidment (1993), οι Maidment et al. (1996), ο Ashour (2000) κ.α, υποστήριζαν ότι η μέση (σταθερή) ταχύτητα ροής δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του χρόνου συρροής της επιφανειακής απορροής και τη σύνθεση του υδρογραφήματος πλημμύρας. Στη δεύτερη περίπτωση, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος ροής δεν λαμβάνονται υπόψη (Saghafian et al. 2002, Bourletsikas et al. 2006).

Εφαρμοσμένη Υδρολογική Μοντελοποίηση τη δεκαετία του 2000s

Από την αρχή του 21^{ου} αιώνα, ήταν εμφανής η δυναμική και η σημασία των ΣΓΠ (GIS) και της Τηλεπισκόπησης (Remote Sensing), τεχνολογίες που συνεχώς εξελίσσονται, στον τομέα της υδρολογικής μοντελοποίησης. Μέχρι και σήμερα, αναπτύσσονται συνεχώς νέες και καινοτόμες ιδέες, από νέους επιστήμονες οι οποίοι βασίζονται στο ήδη υπάρχον υπόβαθρο προσπαθώντας να το βελτιώσουν. Καθοριστικό ρόλο σε αυτήν την εξέλιξη, διαδραμάτισαν τόσο η ανάπτυξη των ελεύθερων λογισμικών, τα οποία παρουσιάζουν ευρεία χρήση, όσο και η εξασφάλιση της διάθεσης μεγάλου όγκου ψηφιακών δεδομένων. Η εξέλιξη και η άνθιση στον τομέα της υδρολογικής μοντελοποίησης συνεχίζονται μέχρι και σήμερα, χάρις στις νέες τεχνολογίες και στις εφαρμογές που αναπτύσσονται, οι απαιτήσεις αυξάνονται διαρκώς και ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες εργάζονται πάνω σε νέες μελέτες (Chalkias et al 2016).

Το 2001, οι Dawson και Wilby εφήρμοσαν μια προσέγγιση βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN), για την υλοποίηση ενός μοντέλου βροχής-απορροής, με σκοπό την πρόγνωση. Παράλληλα, την ίδια χρονική περίοδο οι Thiemann et al πρότειναν ένα μοντέλο πρόβλεψης, βασισμένο σε μια πιθανολογική προσέγγιση εκτίμησης (Bayesian recursive Estimation). Με αυτόν τον τρόπο, κατάφεραν να αντιμετωπίσουν τα όποια προβλήματα σχετικά με την αβεβαιότητα στην υδρολογική μοντελοποίηση και την επίδραση των δεδομένων και των παραμέτρων. Το 2004, οι Nayak et al, παρουσίασαν μια καινοτόμα προσέγγιση, η οποία βασίστηκε σε ένα συνδυασμό ΤΝΔ και προσεγγίσεων ασαφούς λογικής (fuzzy logic), δημιουργώντας ουσιαστικά ένα νευρο-ασαφές υβριδικό σύστημα, για την υδρολογική μοντελοποίηση χρονοσειρών (Chalkias et al 2016).

Ένα εργαλείο που άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως, ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, είναι το Soil and Water Assessment Tool (SWAT), το οποίο συνιστά ένα εννοιολογικό ημικαταμεμημένο μοντέλο συνεχούς χρόνου και αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αλλά και των εστιών μολύνσεων σε μεγάλες υδρολογικές λεκάνες. Τον 21^ο αιώνα, το μοντέλο έχει εξελιχθεί σημαντικά (και συνεχίζει να εξελίσσεται), και οι εφαρμογές του έχουν αξιοποιηθεί σε πληθώρα μελετών αλλά και ερευνητικών προγραμμάτων (Chalkias et al 2016). Το 2001, οι Arnold et al. ανέπτυξαν μια μεθοδολογία, βασισμένοι στο μοντέλο SWAT, για τον σχεδιασμό και την διαμόρφωση υδροβιότοπων, ενώ το 2005 οι Arnold και Fohrer δημοσίευσαν μια μελέτη σχετικά με τις δυνατότητες του SWAT2000 στην εφαρμοσμένη μοντελοποίηση της υδρολογίας των λεκανών απορροής (Arnold et al 2001).

,Arnold and Fohrer 2005, Arnold et al 2012). Το 2007, οι Abbaspour et al. πρότειναν μια προσέγγιση αναφορικά με την μοντελοποίηση της υδρολογίας και της ποιότητας των υδάτων στην λεκάνη απορροής Thur (Abbaspour et al 2007). Τέλος οι Kalogeropoulos και Chalkias (2013), αποπειράθηκαν να ενσωματώσουν το μοντέλο SWAT σε περιβάλλον GIS, στοχεύοντας στην υδρολογική μοντελοποίηση αλλά και την διερεύνηση πληθώρας σεναρίων κλιματικής αλλαγής σε μια υδρολογική λεκάνη της Μεσογείου (Kalogeropoulos and Chalkias 2013, Chalkias et al 2016).

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

Το 2008 ο Christofidis, εφήρμοσε μια προσέγγιση, όπου με την αξιοποίηση της εξίσωσης του κινηματικού κύματος, υπολόγισε την ταχύτητα ροής σε κάθε κελί του κανάβου, το οποίο αναπαριστά μια λεκάνη απορροής. Ουσιαστικά συνδύασε το βάθος της ροής στην εξίσωση ισορροπίας (όπως αυτή δίδεται από τους Overton και Meadows, 1976), με την εξίσωση του Manning, για να εκτιμήσει την ταχύτητα απορροής για την επιφανειακή ροή (Du et al 2009, Diakakis 2011).

Οι Du et al, το 2009, πρότειναν ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο διόδευσης για την προσομοίωση της βροχής-απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την χρονική μεταβλητότητα της απορροής. Η προσέγγιση αυτή, βασίζεται στο μοντέλο των Melesse και Graham και οι βελτιώσεις που επιτελέστηκαν, σχετίζονται με τον υπολογισμό της διακύμανσης του χρόνου απορροής, η

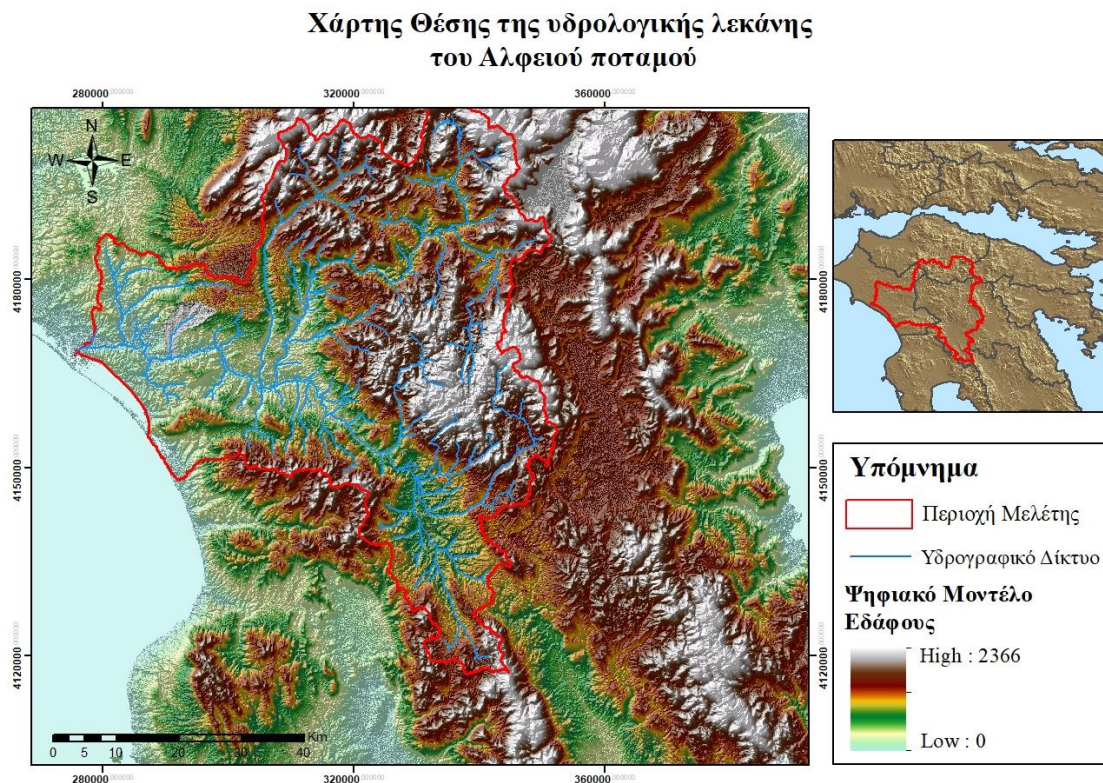
οποία οφείλεται στη διακύμανση του πεδίου ταχυτήτων λόγω άνισης κατανομής της βροχόπτωσης μέσα στον χρόνο. Οι απώλειες βροχής εκτιμήθηκαν βάσει της μεθοδολογίας του αριθμού καμπύλης (curve number), SCS. Το μοντέλο συνιστά ένα χωρικά κατανεμημένο άμεσο υδρογράφημα μεταβλητού χρόνου (time variant spatially distributed direct hydrograph) και η περιοχή μελέτης στην οποία εφαρμόστηκε ήταν η υπολεκάνη Jiaokou Reservoir, του ποταμού Yongjiang στην νοτιανατολική Κίνα (Melesse and Graham 2000, Du et al 2009).

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες και ακριβείς τεχνικές Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS), Τηλεπισκόπησης (RS), για τη μοντελοποίηση στην πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων και τη μείωση των συνεπειών τους (Billa et al. 2005, 2006, Pradhan & Shafiee 2009, Saleh & Al-Hatrushi 2010, Youssef et al. 2011, Pradhan & Youssef 2011, Haq et al. 2012). Παράλληλα, καταγράφονται και άλλες μελέτες με προσεγγίσεις βασισμένες σε πιθανοτικές θεωρήσεις (Pradhan & Shafie 2009, Pradhan 2010, Youssef et al. 2011).

5. Περιοχή Μελέτης

5.1 Ο ποταμός Αλφειός

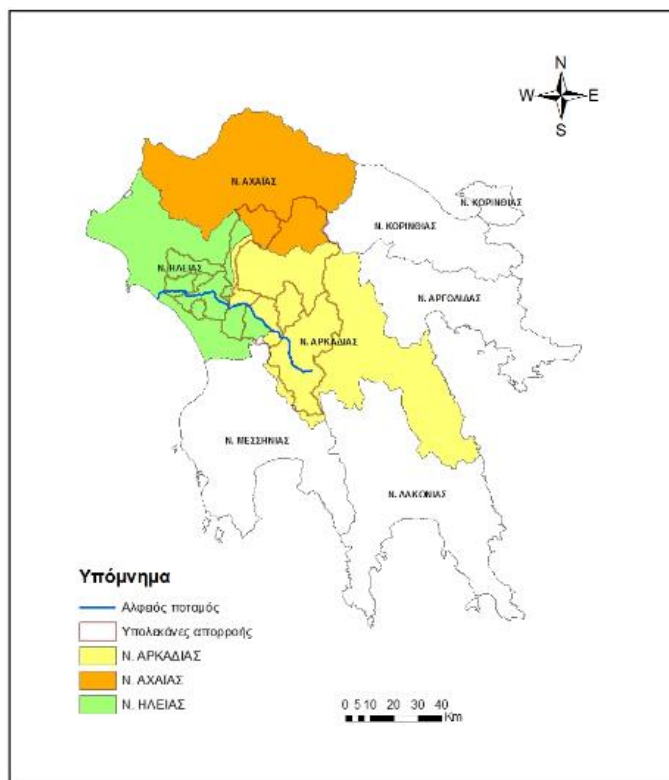
Ο Αλφειός είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός στην Πελοπόννησο (112 km) και ο ένατος σε όλη την Ελλάδα. Πηγάζει από τα αρκαδικά οροπέδια, απαρτίζεται από τρεις παραπόταμους (Άνω Αλφειό, Ερύμανθο, Λάδωνα), που ενώνονται στην ημιορεινή Ηλεία (Μέσος Αλφειός), και αποφορτίζεται εν τέλει στον Κυπαρισσιακό Κόλπο (Κάτω Αλφειός). Η λεκάνη απορροής του ποταμού αποστραγγίζει μια έκταση 3.658 km². Το κύριο κανάλι απορροής ακολουθεί μία ΝΔ κατεύθυνση ροής για περίπου 110 km στη δυτική Πελοπόννησο, όπου αρχικά, διαρρέει το λεκανοπέδιο της Μεγαλόπολης, σε περιοχή που γίνεται εξόρυξη λιγνίτη και εκτρέπεται τεχνητά. Στη συνέχεια κατευθύνεται ΒΔ, συμβάλλοντας στον Λούσιο ποταμό. Από την περιοχή αυτή δημιουργείται μία βαθιά κοιλάδα ανάμεσα σε επιβλητικούς ορεινούς όγκους (Λυκαίο, παρυφές Μαινάλου, βουνά της Ηραιάς βορειότερα κ.λπ.) διαμορφώνοντας ένα ενδιαφέρον φυσικό ανάγλυφο.



Εικόνα 5.1.1 Αποτύπωση της θέσης του Αλφειού ποταμού

Η λεκάνη απορροής του διασχίζει διάφορους τύπους ανάγλυφου, όπως απότομες πλαγιές βουνών, στενές κοιλάδες και φαράγγια με απότομο υπόστρωμα. Το κύριο κανάλι (7ο κατά σειρά Strahler) διασχίζει μία ευρεία επίπεδη κοιλάδα (Nikolakopoulos et al, 2007). Η λεκάνη απορροής του Αλφειού περιλαμβάνει τμήματα των Περιφερειών Πελοποννήσου και Δυτικής Ελλάδας με ποσοστά έκτασης 53,7% και 46,3% αντίστοιχα.

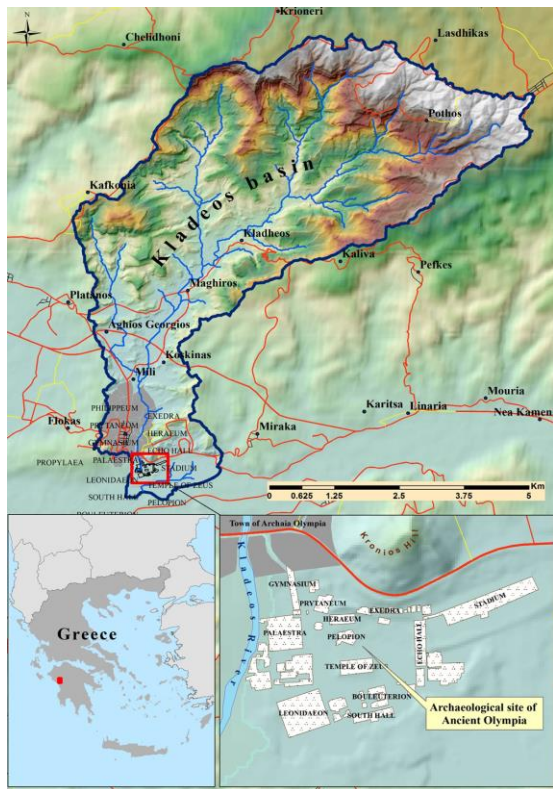
Η λεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη (υπολεκάνες), την άνω (250 km²), τη μεσαία (3048 km²) και την κάτω υπολεκάνη (362 km²). Εκτείνεται στη δυτική και την κεντρική Πελοπόννησο και κατανέμεται κυρίως στους Νομούς Ηλείας, Αρκαδίας και Αχαΐας κατά ποσοστό 26%, 57% και 17%, αντιστοίχως. Η άνω υπολεκάνη περιλαμβάνει το τμήμα του ποταμού Αλφειού στο οροπέδιο της Μεγαλόπολης, με κυριότερους παραποτάμους τους Λούσιο, Ελισσώνα και Ξερίλα. Η μεσαία υπολεκάνη περιλαμβάνει το ενδιάμεσο τμήμα άνωθεν του φράγματος Φλάκα, με κυριότερους παραποτάμους τον Σελινούντα, Κλαδέο, Ερύμανθο και Λάδωνα. Τέλος, η κάτω υπολεκάνη καταλαμβάνει το τμήμα από το φράγμα του Φλάκα έως τις εκβολές στον Κυπαρισσιακό κόλπο με κυριότερο παραπόταμο τον Ενιπέα (Manariotis & Yannopoulos, 2004).



Εικόνα 5.1.2 Οι υπολεκάνες του Αλφειού ποταμού (Καραγιαννοπούλου κ.α 2016)

5.1.1 Ποταμός Κλαδέος

Ο Κλαδέος είναι παραπόταμος του Αλφειού και πηγάζει από τους πρόποδες της Φολόης δυτικά του οικισμού Λάλα και διαρρέει την πόλη της Αρχαίας Ολυμπίας, πλησίον του ομώνυμου αρχαιολογικού χώρου. Ο Κλαδέος έχει μήκος που υπολογίζεται κατά προσέγγιση στα 15 km και αποτελεί έναν 4ης τάξης κλάδο που δημιουργείται από τη συμβολή δύο 3^{ης} τάξης κλάδων. Η υδρολογική λεκάνη του είναι επιμήκης, συνολικής έκτασης περίπου 32,28 km² και αναπτύσσεται στο ανατολικό τμήμα του τεκτονικά και σεισμικά ενεργού τεκτονικού βυθίσματος Πύργου – Ολυμπίας, που συνιστά την κύρια νεοτεκτονική μακροδομή της περιοχής μελέτης. Η περιοχή θεωρείται τεκτονικά ενεργή, γεγονός που αντανακλάται στα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου. Η ασυμμετρία της λεκάνης ως προς τον κύριο κλάδο της, που ρέει σε πολύ μικρή απόσταση από τον ανατολικό υδροκρίτη, είναι πολύ έντονη, με αποτέλεσμα να αποκτά χαρακτηριστικό σχήμα και μεγαλύτερη έκταση στα δυτικά της κοίτης του ρέματος (Φουντούλης κ.α 2008).



Εικόνα 5.1.1.1 Θέση περιοχής μελέτης (Kalogeropoulos et al. 2016)

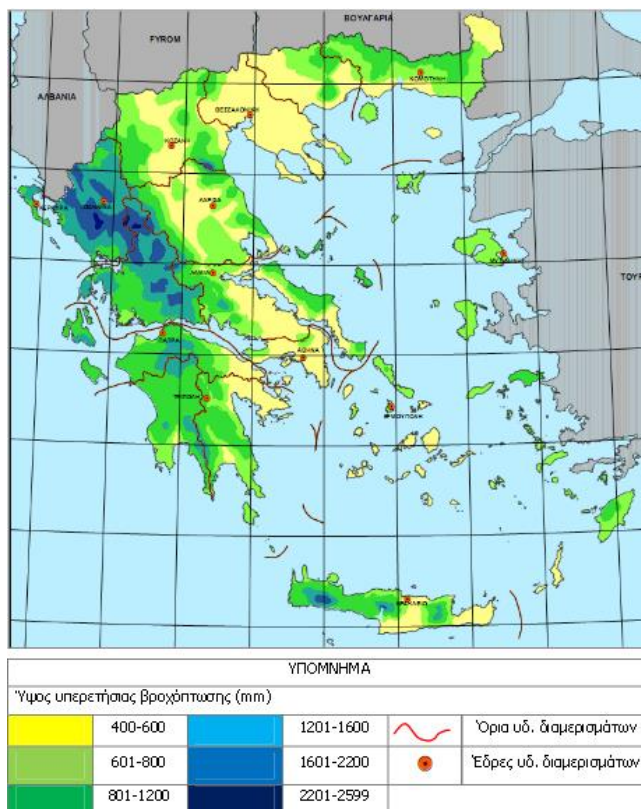
Τα υψηλότερα σημεία του υδροκρίτη (620 μ.) βρίσκονται βόρεια του Πόθου και νότια του Λάλα. Το έδαφος στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής συντίθενται από αλουβιακές αποθέσεις, αποτελούμενες από άμμο, χαλίκια και κροκάλες, καθώς επίσης και από νεογενή ιζήματα που χαρακτηρίζονται από ασυνέχεια και ανομοιογένεια, με επακόλουθο την εμφάνιση επάλληλων υπό πίεση υδροφόρων οριζόντων. Το πέτρωμα που κυριαρχεί στην ορεινή και ημιορεινή περιοχή είναι ο μεσοζωικός ασβεστόλιθος του Ωλενού, ο οποίος εμφανίζεται καρστικοποιημένος. Συνεπώς, στα διαβρωμένα ασβεστολιθικά συστήματα και τους κλαστικούς σχηματισμούς αναπτύσσονται υδροφόροι. Από τεκτονική άποψη, σε όλες τις ορεινές εξάρσεις επικρατούν καρστικοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι στους Β, ΒΔ και ΝΔ τομείς της λεκάνης απορροής ανήκουν στη γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου, ενώ στο Α, ΝΑ και ΒΑ τομέα, στη ζώνη Γαβρόβου Τριπόλεως (ΙΓΜΕ 1980-2003). Στην περιοχή της ζώνης της Πίνδου υπάρχουν σχιστοκερατολιθικοί (ραδιολαρίτες), αργιλικόι σχιστόλιθοι και ψαμμίτες του φλύσχη (Nikolakopoulos et al 2007, Mariolakos et al 1981).



Εικόνα 5.1.1.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί & υδρογραφικό δίκτυο Κλαδέου ποταμού (Καραγιαννοπούλου κ.α 2016)

5.2 Υδρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά

Το μεγάλο υψόμετρο στην κεντρική και δυτική Πελοπόννησο και η χειμερινή χιονοκάλυψη στους ορεινούς όγκους εξασφαλίζουν μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού της τάξεως των 600-900 x 10⁶ m³. Το κλίμα που επικρατεί στις παραλιακές και στις πεδινές εκτάσεις είναι το θαλάσσιο Μεσογειακό κλίμα ενώ μετατρέπεται σε ορεινό και ηπειρωτικό στα ορεινά της Πελοποννήσου.



Εικόνα 5.2.1 Χάρτης υπερετήσιας βροχόπτωσης (τροποποιημένο σχήμα από το Υπουργείο ανάπτυξης-Διεύθυνση υδατικού δυναμικού)

Τα κατακρημνισμήματα στην περιοχή της λεκάνης του Αλφειού είναι αρκετά σημαντικά με το ύψος βροχής να ανέρχεται κατά μέσο όρο στα 1100 mm ετησίως. Στις ορεινές περιοχές της Αρκαδίας το ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 800 mm & 1200 mm, ενώ στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης και στα παράλια φτάνει τα 1000 mm. Η μέση θερμοκρασία αέρα στη λεκάνη απορροής του ποταμού είναι 19 °C με εύρος διακύμανσης συνήθως λιγότερο των 16 °C. Οι βροχοπτώσεις είναι μικρότερες προς τα ανατολικά και σημαντικότερες στις περιοχές μεγαλύτερου υψομέτρου, λόγω της σαφούς συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου. Τα

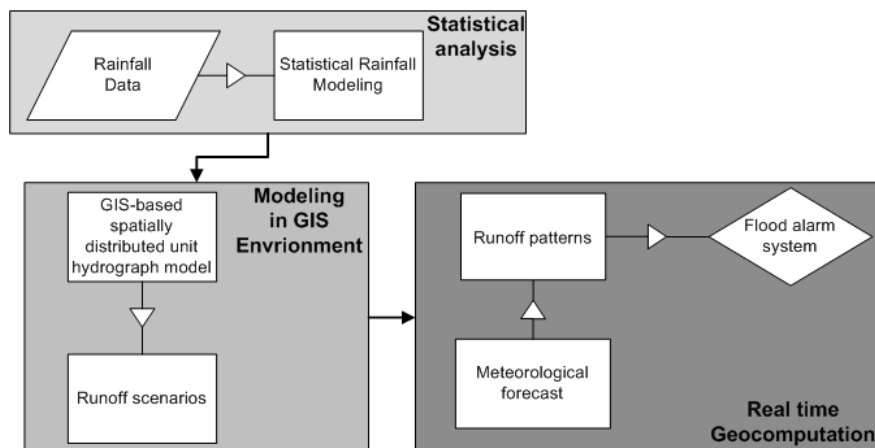
μεγαλύτερα ύψη βροχής παρουσιάζονται κατά τους μήνες Οκτώβριο ως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο (Nikolakopoulos et al 2007, Karymbalis et al 2012, Mariolopoulos 1961).

6.Ανάπτυξη Υδρολογικού Μοντέλου

6.1 Γενική περιγραφή της μεθοδολογίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η υδρολογική ανάλυση βασισμένη σε συστήματα GIS, έχει να επιδείξει πληθώρα εφαρμογών σε σχέση με τα φυσικά φαινόμενα και τις φυσικές καταστροφές. Στο κεφάλαιο αυτό, επιχειρείται η διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, με την επιφανειακή απορροή, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, στην ΒΔ Πελοπόννησο. Παράλληλα, τονίζεται η σημασία και η συνεισφορά των GIS στην υδρολογική ανάλυση και προσομοίωση παρουσιάζοντας μια εμπειρική μεθοδολογία. Πιο συγκεκριμένα, επιτελείται μια προσπάθεια για την μοντελοποίηση-προσομοίωση της επιφανειακής απορροής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κλαδέου (παραπόταμος του Αλφειού ποταμού), η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με καταστροφικά πλημμυρικά επεισόδια, σχεδιάζοντας ένα σύστημα βασισμένο σε τεχνολογία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιείται ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής (Maidment 1993, Olivera and Maidment 1999; Melesse and Graham 2004; Du et al. 2009) και αφορά στην υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ArcMap, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster grid).

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία της προσέγγισης αυτής, είναι η ανάλυση των προτύπων βροχόπτωσης (rainfall patterns) στην υπό μελέτη περιοχή, αξιοποιώντας διαθέσιμα ιστορικά βροχομετρικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά, στην παρούσα μελέτη, αντλήθηκαν από ένα μοντέλο Ατμοσφαιρικής Προσομοίωσης, για το οποίο γίνεται αναφορά στην συνέχεια. Με την ανάλυση αυτή, αποδίδεται η βασική χωροχρονική κατανομή που ακολουθεί η βροχόπτωση, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η στατιστική ανάλυση των τιμών των χωροχρονικών προτύπων (spatiotemporal patterns). Κάθε ένα από αυτά τα πρότυπα βροχόπτωσης θα παράξει και ένα συγκεκριμένο πρότυπο απορροής (runoff patterns), σχεδιάζοντας ένα χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο υδρογράφημα, βασισμένο σε GIS.

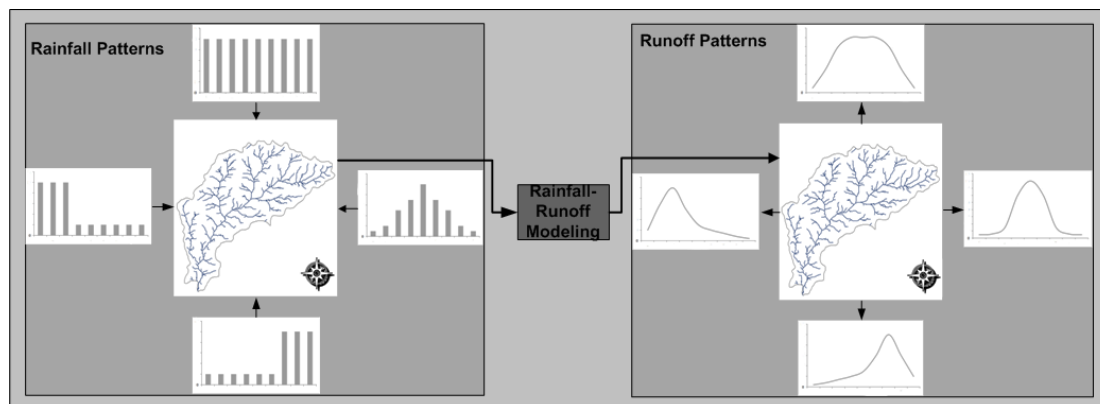


Εικόνα 6.1.1 Το εννοιολογικό μοντέλο της μεθοδολογίας

Ο κύριος στόχος της προσομοίωσης αυτής, είναι η εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών ή αιχμών (flood peaks) καθώς και των κρίσιμων χρόνων (critical time) που μεσολαβούν προκειμένου να σημειωθούν οι αιχμές αυτές, εξετάζοντας πληθώρα σεναρίων βροχόπτωσης. Για να καταστεί δυνατή αυτή η προσέγγιση, κατασκευάζεται ένα άμεσο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, σχεδιάζοντας την καμπύλη επιφάνειας-χρόνου (time-area curve) από την έναρξη της βροχόπτωσης. Ουσιαστικά κατ’ αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί η απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης. Η καμπύλη (ιστόγραμμα) επιφάνειας-χρόνου αποδίδει την χωρική και χρονική κατανομή της επιφανειακής απορροής στο εσωτερικό της υδρολογικής λεκάνης για το υπό μελέτη πλημμυρικό επεισόδιο. Επίσης, η καμπύλη εκφράζεται μέσω της επαναταξινόμησης του χρόνου απορροής σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Τα διαστήματα αυτά συνιστούν τις ισόχρονες καμπύλες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν εκείνα τα σημεία εντός της λεκάνης, όπου η απορροή ισαπέχει χρονικά από την έξοδο της λεκάνης (Καρύμπαλης κ.α 2014, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση περιοχών που είναι επιρρεπείς σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα. Επίσης, με την σχεδίαση των υδρογραφημάτων θα μπορούσε να συμβάλλει στην ανάπτυξη συστημάτων προειδοποίησης ή και πρόβλεψης μελλοντικών αιφνίδιων πλημμυρών. Αυτό μπορεί να γίνει αν συνδέσουμε ένα μετεωρολογικό μοντέλο πρόβλεψης με τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης. Έτσι, όταν το μοντέλο πρόβλεψης εμφανίζει ακραίες τιμές βροχόπτωσης, ένα σύστημα προειδοποίησης θα παράγει συγκεκριμένα σενάρια αναμενόμενης απορροής βασισμένα

στα εξαγόμενα πρότυπα απορροής. Τέτοιου είδους μοντέλα, μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και στην οικονομική και την περιβαλλοντική προστασία μιας δυνητικά πληγείσας περιοχής.



Εικόνα 6.1.2 Ποσοτικοποίηση των προτύπων βροχόπτωσης σε πρότυπα απορροής

Σύμφωνα με την θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η διάρκεια της πλημμύρας είναι ίδια για μια ποσότητα ενεργού βροχής δεδομένης διάρκειας, ενώ οι τετμημένες του υδρογραφήματος της απορροής που αντιστοιχούν στον χρόνο βάσης της πλημμύρας είναι ανάλογες με την ποσότητα της βροχής (Chow et al. 1988). Ταυτόχρονα, η απορροή στην έξοδο της λεκάνης είναι αποτέλεσμα της υπέρθεσης (πρόσθεση) στιγμιαίων μοναδιαίων υδρογραφημάτων, τα οποία προέρχονται από την ενεργή βροχή σε κάθε χρονικό βήμα. Γενικά στην υδρολογία, τα μοναδιαία υδρογραφήματα, είναι σύνηθες, να εξάγονται με τη βοήθεια αριθμητικών τεχνικών από παρατηρημένα υδρογραφήματα (Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απόκριση της λεκάνης απορροής στο υπό μελέτη πλημμυρικό επεισόδιο, εκτιμάται με τον σχεδιασμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος και είναι ίδια για κάθε μονάδα ενεργής βροχόπτωσης και ανεξάρτητη του χρόνου κατά τον οποίο αυτή σημειώνεται. Παράλληλα, από τη μορφή του μοναδιαίου υδρογραφήματος αντικατοπτρίζονται τόσο τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης όπως π.χ η κλίση, το ανάγλυφο, η γεωμετρία (σχήμα), όσο και τα εδαφολογικά όπως π.χ η υφή των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών (πετρώματα). Το μέγεθος και η δυναμική του παλμού (ενεργή βροχόπτωση), επιδρά στα χαρακτηριστικά αυτά (Kalogeropoulos et al 2013, Gioti et al 2013, Tsanakas et al 2016).

Κάθε λεκάνη έχει το δικό της υδρογράφημα, για μετρήσιμα βροχομετρικά δεδομένα με συγκεκριμένη ένταση και διάρκεια. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι απαραίτητη η χρήση ενός παρατηρημένου υδρογραφήματος της λεκάνης απορροής. Ο σχεδιασμός του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται σε δεδομένα και μετρήσεις από πραγματικά γεγονότα σε γειτονικές λεκάνες ή λεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά, ωστόσο συχνά τίθενται ζητήματα αβεβαιότητας αναφορικά με την προγνωστική δυναμική του μοντέλου (Καρύμπαλης κ.α 2014, Tsanakas et al 2016).

6.2 Δεδομένα Εισόδου

Η μελέτη και κατανόηση της ροής του νερού σε μια δεδομένη επιφάνεια, αλλά και η επίδραση της λόγω της πληθώρας των αλλαγών, θεωρείται υψίστης σημασίας σε ποικίλους επιστημονικούς τομείς, όπως η υδρολογία, η γεωλογία, η χωροταξία, η δασολογία κλπ. Όπως προαναφέρθηκε, η μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής, βασίζεται σε εφαρμογές των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και στην ανάλυση και επεξεργασία μιας σειράς δεδομένων που αφορούν την περιοχή μελέτης. Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, σχεδιάστηκε μια ψηφιακή χωρική βάση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην συνέχεια. Όσον αφορά στην προετοιμασία, την επεξεργασία και την ανάλυση των χωρικών δεδομένων, καθώς και την υδρολογική μοντελοποίηση που επιτελείται, αξιοποιήθηκαν το λογισμικό ArcGIS και μια σειρά από πακέτα και επεκτάσεις αυτού. Παράλληλα, για την αυτοματοποίηση της προσέγγισης που ακολουθείται, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Model Builder του ArcGIS.

Ως περιοχή μελέτης, για την μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής, έχει οριστεί η υδρολογική λεκάνη του π. Κλαδέου (υπολεκάνη του Αλφειού ποταμού), στην περιοχή της Αρχαίας Ολυμπίας στη Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα δεδομένα είτε δημιουργήθηκαν ή μετατράπηκαν στο προβολικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87 (Greek Grid), στο οποίο έγιναν και όλες οι μετέπειτα επεξεργασίες και αναλύσεις. Για την επίτευξη της προσπελασιμότητας και διαχείρισης των δεδομένων, καθώς και της επεξεργασίας και ανάλυσης αυτών, όλα τα δεδομένα (υποβάθρου και δευτερογενή) συγκεντρώθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε μία ψηφιακή χωρική βάση. Τα δεδομένα παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω, ωστόσο στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα.

1. Χωρικά δεδομένα-δευτερογενή θεματικά επίπεδα: α) Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της υπό μελέτη λεκάνης απορροής με cell size 5x5, το οποίο συνιστά το πρωταρχικό στοιχείο της ανάλυσης και εξήχθη από τις ισοϋψείς καμπύλες που ψηφιοποιήθηκαν με βάση τα Τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:5.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) β) Επίπεδο συντελεστή τραχύτητας κατά Manning της περιοχής μελέτης με cell size 5x5. Για την δημιουργία του, ήταν απαραίτητο το υπόβαθρο κάλυψης/χρήσεων γης το οποίο προήλθε από τα δεδομένα του προγράμματος “ilot” του Υπουργείου Γεωργίας (1998). Παράλληλα για την οπτικοποίηση του υποβάθρου αξιοποιήθηκε ένα ΨΜΕ SRTM (cell size 30x30), το οποίο αντλήθηκε από την ελεύθερης πρόσβασης βάση δεδομένων του USGS (U.S. Geological Survey- Αμερικάνικο Γεωλογικό Ινστιτούτο)

2. Βροχομετρικά δεδομένα: Προκειμένου να επιτευχθεί η υλοποίηση και ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου, αντλήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από δύο πραγματικά πλημμυρικά γεγονότα. Το πρώτο πλημμυρικό γεγονός έλαβε χώρα στις 5 Φεβρουαρίου 2012 στη λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, με το συνολικό ύψος βροχής να ανέρχεται στα 0,1514 μέτρα σε χρονικό διάστημα 9 ωρών. Στη δεύτερη περίπτωση, τα δεδομένα βροχόπτωσης προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση των συνοπτικών συνθηκών της ατμόσφαιρας, με το γεγονός που εξετάστηκε να ξεκινάει στις 21/10/15, ώρα 15:00 UTC και να ολοκληρώνεται στις 23/10/15 0:00 UTC (συνολική διάρκεια 36 ώρες). Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών απέδωσε διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης (πρότυπα βροχόπτωσης).

6.2.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ-DEM)

Η τοπογραφία της γήινης επιφάνειας, μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου της περιοχής έρευνας. Η τεχνολογία των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Digital Terrain Models - DTM, ή και Digital Elevation Models - DEM) αποτελεί το πρωταρχικό στοιχείο στη διαδικασία ανάλυσης, επεξεργασίας και παρουσίασης πληροφοριών που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον (Χαλκιάς 2015).

Ως ΨΜΕ, θεωρείται κάθε ψηφιακή αναπαράσταση του εδάφους, η οποία περιγράφει τη γεωμετρία της γήινης επιφάνειας. Ωστόσο παρά το γεγονός ότι οι ψηφιακές αναπαραστάσεις ισοϋψών καμπυλών και υψομετρικών σημείων μπορούν να θεωρηθούν ΨΜΕ, συνήθως με τον όρο αυτό υπονοούνται χωρικά μοντέλα με συνεχή κατανομή στο χώρο (Λαμπράκης κ.α 2015, Χαλκιάς 2015). Σύμφωνα με τους Miller και Laflamme (1958), ως ΨΜΕ ορίζεται «μια στατιστική αναπαράσταση της συνέχειας της επιφάνειας του εδάφους από ένα μεγάλο αριθμό από επιλεγμένα σημεία με γνωστές τις X,Y,Z συντεταγμένες τους σε ένα επίπεδο συντεταγμένων» (Miller and Laflamme 1958, Weibel and Heller 1991). Ο όρος DEM, θεωρείται πιο ειδικός καθότι αφορά μόνο στην ψηφιακή αναπαράσταση υψομέτρων, ενώ ο όρος DSM (Digital Surface Model) θεωρείται γενικότερος και χρησιμοποιείται για ψηφιακές αναπαραστάσεις της γήινης επιφάνειας συνυπολογίζοντας κι άλλα στοιχεία εκτός από το υψόμετρο, όπως είναι οι ανθρώπινες κατασκευές, η βλάστηση κ.λ.π. (Χαλκιάς 2007, Χαλκιάς 2015).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το ΨΜΕ, το οποίο αποτελεί και τον θεμέλιο λίθο όλης της επεξεργασίας και ανάλυσης κατά την εκτέλεση του μοντέλου βροχής -απορροής, είναι ένα ψηφιδωτό επίπεδο (raster grid), όπου το κεντρικό σημείο κάθε κελιού (cell), περιλαμβάνει κάποια μέτρηση ύψους. Η χωρική ανάλυση εικονοστοιχείου είναι 5 m, που σημαίνει ότι είναι ιδιαίτερα υψηλή και αντλήθηκε από την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών από τα τοπογραφικά διαγράμματα της ΓΥΣ. Με το παραγόμενο ΨΜΕ αποτυπώνεται η λεκάνη απορροής του υπό μελέτη παραπόταμου (Κλαδέος) του Αλφειού ποταμού.

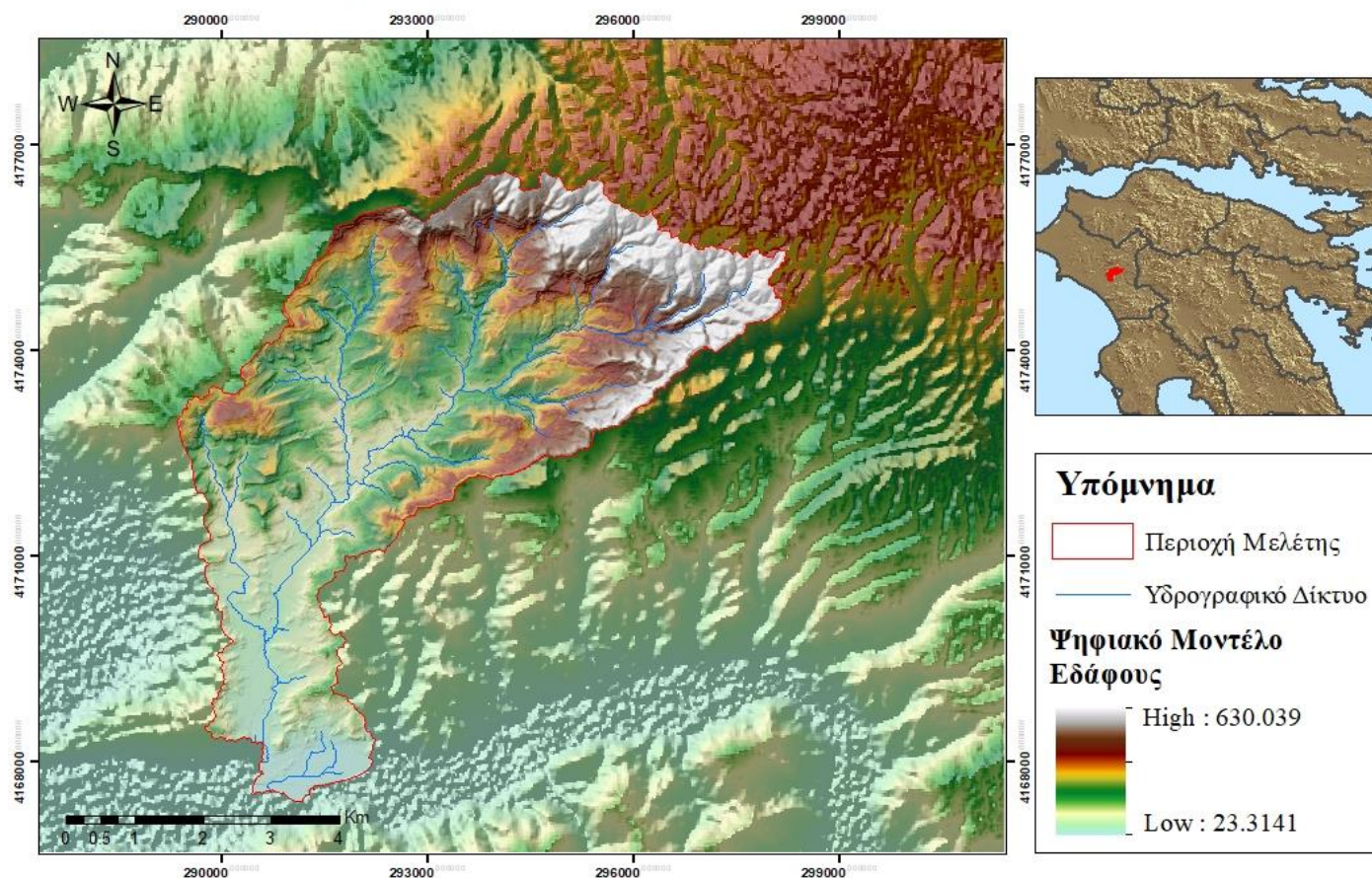
Για τη δημιουργία του ΨΜΕ, αξιοποιούνται ψηφιακές καταγραφές όπως οι ισοϋψείς καμπύλες, τα υψομετρικά σημεία και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί με ψηφιοποίηση των πρωτογενών δεδομένων. Τα πρωτογενή δεδομένα μπορεί να είναι είτε π.χ φύλλα τοπογραφικών χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού ή μετρήσεις στο πεδίο ή πληροφορία φωτογραμμετρικών μεθόδων. Με αυτόν τον τρόπο και με τεχνικές χωρικής παρεμβολής (spatial

interpolation) είναι δυνατή η δημιουργία του DEM. Η λειτουργία που χρησιμοποιήθηκε είναι το Raster interpolation του εργαλείου 3d Analyst, η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο ANUDEM (Hutchinson 2003) που είναι ειδικά σχεδιασμένος για αυτόν τον σκοπό. Στην προκειμένη περίπτωση, η τεχνική αυτή ενδείκνυται, καθότι επαρκούν τα διαθέσιμα θεματικά επίπεδα δεδομένων με πληροφορία υψομέτρου (ισοϋψείς καμπύλες, υψομετρικά σημεία κ.λ.π) ενώ ταυτόχρονα δεν προβλέπεται η δυνατότητα αξιοποίησης εικόνων στερεο-ζεύγους. Ουσιαστικά, παράγει παρεμβολή με υδρολογικά αποτελέσματα που θεωρούνται συνεπή, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί και την ακεραιότητα της τοπογραφίας. Τέλος, για την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης, ώστε το DEM να αποτυπώνει την λεκάνη απορροής του ποταμού Κλαδέου, ενσωματώνεται μια “μάσκα” με την λειτουργία Extract by mask του εργαλείου Spatial Analyst.

Είναι προφανές ότι η ποιότητα ενός ΨΜΕ σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. Άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την πιστότητα καταγραφής του υψομέτρου είναι η πυκνότητα δειγματοληψίας, το μέγεθος της ψηφίδας, ο αλγόριθμος παρεμβολής, αλλά και η τραχύτητα του υπό μελέτη ανάγλυφου.

Γενικά, όπως θα διαπιστωθεί και συνέχεια, το ΨΜΕ συνιστά ένα επίπεδο πληροφορίας, ύψιστης σημασίας, για την προσομοίωση ενός πλημμυρικού φαινομένου. Η ανάλυση του επιπέδου αυτού αποδίδει δευτερογενή επίπεδα πληροφορίας τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση της επιφανειακής απορροής με τη χρήση των ΣΓΠ. Με τη χρήση βασικών εργαλείων υδρολογικής ανάλυσης αλλά και ανάλυσης επιφάνειας, τα οποία παρέχονται από το λογισμικό ArcGIS, προέκυψαν επίπεδα πληροφορίας όπως η κλίση, η κατεύθυνση ροής, η συσσώρευση ροής, το μήκος ροής κτλ.

Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου



Εικόνα 6.2.1.1 Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της λεκάνης απορροής του Κλαδέου ποταμού, δεδομένης κλίμακας 1:5.000 (cell size 5x5)

6.2.2 Συντελεστής Τραχύτητας κατά Manning

Μια από τις παραμέτρους που υπεισέρχονται, στο παρόν μοντέλο βροχής-απορροής, είναι η τραχύτητα από την κάλυψη γης. Το υπόβαθρο κάλυψης/ χρήσεων γης που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από δεδομένα του προγράμματος “ilot” του Υπουργείου Γεωργίας (1998). Συγκριτικά με τα δεδομένα χρήσεων κάλυψης γης του προγράμματος “CORINE”, τα ilot είναι υψηλότερης ανάλυσης και έχουν μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στην κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης σε κλίμακα 1:5.000, η οποία θεωρείται κατάλληλη για τη δημιουργία ενός ψηφιδωτού επιπέδου που βασίζεται στον συντελεστή τραχύτητας του Manning για κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Τα δεδομένα αυτά, περιλαμβάνουν μια σχετικά ομοιόμορφη

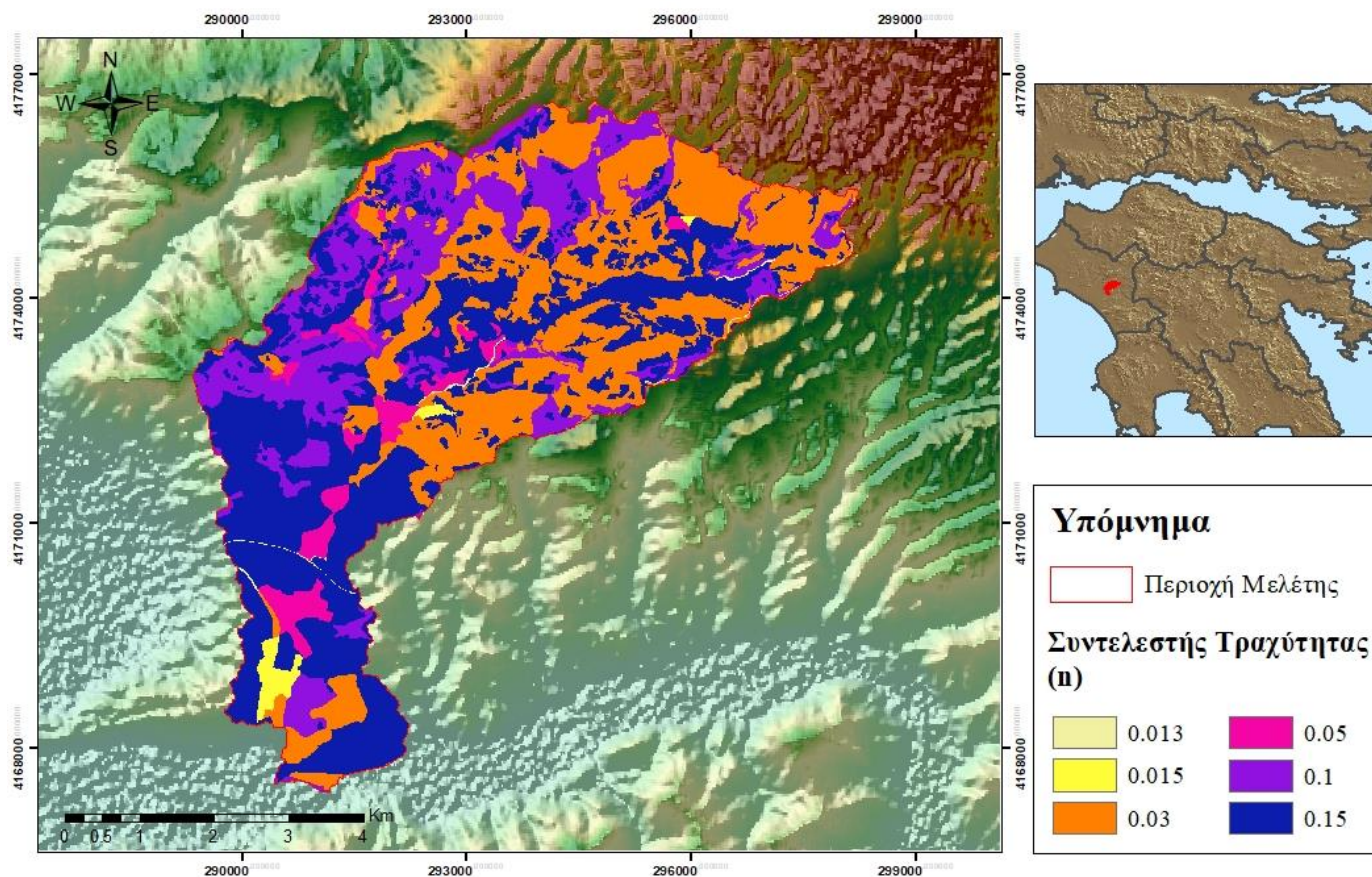
κατάσταση κάλυψης ή χρήσης γης, παρέχοντας την δυνατότητα της κατάταξής τους στις υποκατηγορίες κάλυψης με απλή ομοδοποίηση (ΕΓΥ, 2016). Η κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης και η αντιστοιχία κάθε κατηγορίας με τον συντελεστή τραχύτητας κατά Manning απεικονίζεται στον πίνακα 6.2.2.1.

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

Πίνακας 6.2.2.1 Πίνακας συντελεστών τραχύτητας κατά Manning (Καρύμπαλης κ.α 2014)

Τέλος, μια σειρά άλλων παραγόντων που θα μπορούσαν να συνεκτιμηθούν όπως η τραχύτητα εντός τοπογραφικού δικτύου ή η ενεργός βροχόπτωση, δεν λαμβάνονται υπόψη. Γενικά η προσέγγιση έχει απλοποιηθεί, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα της βαθμονόμησης του συντελεστή τραχύτητας κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου του Αλφειού (και κατ'επέκταση του π. Κλαδέου), ενώ οι υπάρχοντες εδαφολογικοί χάρτες δεν χαρακτηρίζονται από υψηλή λεπτομέρεια και ανάλυση. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια συγκριτική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου στο οποίο θα υπεισέλθουν οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν, έτσι ώστε να εντοπιστούν και να επισημανθούν οι όποιες ανακρίβειες και άλλα προβλήματα. Γενικά το μοντέλο αυτό, αποτελεί τη βάση ανάπτυξης ιδιαίτερα εξελιγμένων μοντέλων προσομοίωσης επιφανειακής απορροής με την αξιοποίηση των GIS (Καρύμπαλης κ.α 2015, Ψυχογιός 2013).

Χάρτης Τραχύτητας κατά Manning της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου



Εικόνα 6.2.2.1 Χάρτης συντελεστών τραχύτητας κατά Manning (cell size 5x5)

6.2.3 Βροχομετρικά δεδομένα

Η εκτίμηση της μεταβλητότητας της βροχόπτωσης είναι ένα από τα συνηθέστερα αντικείμενα μελέτης στην υδρολογία. Εξάλλου η βροχόπτωση, θεωρείται σε πολλές περιπτώσεις, ως η σημαντικότερη παράμετρος για την υδρολογική μοντελοποίηση (Buytaert et al 2005). Το μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει πληθώρα τύπων βροχομετρικών δεδομένων. Από τη στιγμή που τα δεδομένα προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς, ο τρόπος χρήσης και διαχείρισης των δεδομένων αυτών, εξαρτάται από τον αριθμό των σταθμών. Στην περίπτωση που έχουμε σαν γνώμονα την ύπαρξη μόνο ενός μετεωρολογικού σταθμού στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη, τα βροχομετρικά δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο (σαν δεδομένο εισόδου), έχουν τη μορφή αθροιστικής βροχόπτωσης (μία τιμή ύψους βροχής, π.χ σε μέτρα). Ωστόσο κατ' αυτόν τρόπο, η προσομοίωση που επιτελείται λαμβάνει υπόψη μόνο τη χρονική διάσταση της καταιγίδας (χρονική μοντελοποίηση-time modeling).

Στην περίπτωση που στην περιοχή μελέτης, υπάρχουν περισσότεροι από ένας μετεωρολογικοί σταθμοί, ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης και ενσωμάτωσης των δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, είναι η δημιουργία των πολυγώνων Thiessen (Voronoi geometries). Έτσι στην προσομοίωση, εκτός από την χρονική, συνυπολογίζεται και η χωρική διάσταση της βροχόπτωσης (ημι-χωροχρονική μοντελοποίηση- semispatiotemporal modeling).

Μια τελευταία προσέγγιση, αφορά στην χρήση είτε δεδομένων βροχόπτωσης προερχόμενων από ραντάρ, ή δεδομένων που παράγονται από ένα Μοντέλο Ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να μπορεί να συμπεριληφθεί στο υδρολογικό μοντέλο, τόσο η χωρική όσο και η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης (spatiotemporal modeling) (Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Για την υλοποίηση και ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου, ως βροχομετρικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν τόσο ένα πραγματικό πλημμυρικό γεγονός όσο και η χωροχρονική κατανομή μιας βροχόπτωσης εξαγόμενη από ένα μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης. Το πλημμυρικό γεγονός έλαβε χώρα στις 5 Φεβρουαρίου 2012 στη λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, με το συνολικό ύψος βροχής να ανέρχεται στα 0,1514 μέτρα σε χρονικό διάστημα 9 ωρών. Στη δεύτερη περίπτωση, τα δεδομένα βροχόπτωσης προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση των συνοπτικών συνθηκών της ατμόσφαιρας, με το γεγονός που εξετάστηκε να ξεκινάει στις 21/10/15 και να έχει διάρκεια 36 ώρες.

6.2.3.1 Ατμοσφαιρική προσομοίωση για την παραγωγή βροχομετρικών δεδομένων

Τα δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία προέρχονται από το μη-υδροστατικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting). Το μοντέλο αυτό, περιλαμβάνει τον δυναμικό πυρήνα NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), στο οποίο έχουν εφαρμοστεί δύο πλέγματα: α) ένα πλέγμα 305x273 σημείων, με οριζόντια διακριτοποίηση $0,09^{\circ} \times 0,09^{\circ}$ (περίπου 12 km) και καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και β) ένα πλέγμα 249x269 σημείων, που εμπεριέχεται στο μεγαλύτερο, με οριζόντια διακριτοποίηση $0,03^{\circ} \times 0,03^{\circ}$ (περίπου 4 km), το οποίο καλύπτει την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Καρύμπαλης κ.α 2014, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Πρόκειται ουσιαστικά για πλεγματικά δεδομένα με χωρική ανάλυση $0,03^{\circ} \times 0,03^{\circ}$ (~4 km) και χρονική διακριτότητα 3 ώρες. Το γεγονός που εξετάστηκε προξενήθηκε στις 21/10/15, ώρα 15:00 UTC και ολοκληρώθηκε στις 23/10/15 0:00 UTC (συνολική διάρκεια 36 ώρες). Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών απέδωσε διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης (πρότυπα βροχόπτωσης). Όπως θα δούμε στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον ΣΓΠ έτσι ώστε να δημιουργηθούν 12 επίπεδα βροχόπτωσης για τη λεκάνη απορροής, όπου το κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί σε ένα τρίωρο αθροιστικού ύψους βροχής. Με την προσέγγιση αυτή κατέστη δυνατή η εκτίμηση της χωρο-χρονικής μεταβολής της βροχόπτωσης, κατά τη διάρκεια του υπό εξέταση πλημμυρικού γεγονότος. Δηλαδή επιτυγχάνεται μια πιο αποτελεσματική προσομοίωση του φαινομένου, αφού συνυπολογίζονται τόσο η χωρική όσο και η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Εφαρμόζοντας τεχνικές χωρικής παρεμβολής στα προσομοιωμένα δεδομένα, προέκυψαν τα grids βροχόπτωσης, τα οποία εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης ως δεδομένα εισόδου για να εφαρμοστεί η προσέγγιση σε περιβάλλον GIS.

6.2.3.2 Σενάρια βροχόπτωσης (πρότυπα βροχόπτωσης-rainfall patterns)

Τα πλεγματικά δεδομένα βροχόπτωσης (αθροιστική βροχόπτωση ανά τρίωρο), που προέκυψαν από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, μπορούν να προβληθούν εύκολα με τη χρήση ενός φύλλου Excel. Συνολικά υπάρχουν 12 αρχεία σε .txt μορφή, τα οποία τροποποιούνται και εισάγονται συγκεντρωτικά σε ένα φύλλο excel, όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

LAT	LON	RAINFALL1	RAINFALL2	RAINFALL3	RAINFALL4	RAINFALL5	RAINFALL6
37.62	21.62	0.00221	0.01745	0.00187	0.00166	0.00099	0
37.62	21.70	0.00416	0.02469	0.002	0.00166	0.00145	0
37.65	21.66	0.0041	0.01703	0.00226	0.0041	0.00126	0.0005
37.65	21.74	0.00403	0.01977	0.00297	0.00379	0.00214	0.0002
37.68	21.63	0.0056	0.01365	0.00231	0.00598	0.00136	0.0019
37.68	21.70	0.00794	0.01769	0.00447	0.00687	0.00183	0.0022
37.71	21.67	0.00633	0.01512	0.00403	0.00747	0.00249	0.0038
37.71	21.74	0.00624	0.0168	0.00657	0.00706	0.00189	0.0036
37.74	21.63	0.00452	0.01078	0.00182	0.00691	0.00145	0.003
37.74	21.71	0.00756	0.01551	0.00414	0.0068	0.00266	0.0036

Πίνακας 6.2.3.2.1 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (6 πρώτα τρίωρα) από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης

RAINFALL7	RAINFALL8	RAINFALL9	RAINFALL10	RAINFALL11	RAINFALL12
0.00187	0.00302	0.00458	0.00215	0.00297	0.00546
0.00109	0.00327	0.00472	0.00289	0.00317	0.00481
0.00157	0.00496	0.00533	0.00377	0.00423	0.006
0.00186	0.00344	0.00443	0.00334	0.00287	0.00509
0.00229	0.00435	0.00533	0.00412	0.00474	0.00605
0.00266	0.00404	0.00559	0.00461	0.00345	0.00641
0.00335	0.00433	0.00572	0.0051	0.00539	0.00677
0.00289	0.00413	0.00534	0.00479	0.00482	0.00564
0.00379	0.00421	0.00554	0.00517	0.00582	0.00652
0.0037	0.0043	0.0055	0.00494	0.00385	0.00736

Πίνακας 6.2.3.2.2 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης

Με την επεξεργασία των δεδομένων που προήλθαν από την το μοντέλο της ατμοσφαιρικής προσομοίωσης αποδόθηκαν διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης (πρότυπα βροχόπτωσης). Ένα από τα βασικότερα στοιχεία της προσέγγισης αυτής, είναι η δημιουργία και η ανάλυση των προτύπων βροχόπτωσης (rainfall patterns) στην υπό μελέτη περιοχή. Με την ανάλυση αυτή, αποδίδεται η βασική χωροχρονική κατανομή που ακολουθεί η βροχόπτωση, ενώ στη συνέχεια

ακολουθεί η στατιστική ανάλυση των τιμών των χωροχρονικών προτύπων (spatiotemporal patterns).

Τα σενάρια που διαμορφώθηκαν, για τα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια, έχουν ως εξής: α) βροχόπτωση από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, β) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό), γ) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο), δ) βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή, ε) βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή, στ) αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%. Παράλληλα, αποδόθηκε ένα ακόμα σενάριο που βασίζεται στο ακραίο πλημμυρικό γεγονός το οποίο συνέβη στις 5/2/12 στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου.

Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή

Έστω X μια (απόλυτα) συνεχής τυχαία μεταβλητή ορισμένη στο διάστημα $[a, b]$ με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Στην περίπτωση αυτή, είναι δεδομένο ότι το X ακολουθεί την συνεχή ομοιόμορφη κατανομή (continuous uniform distribution) με παραμέτρους a και b και συμβολίζεται $X \sim U(a, b)$. Η ομοιόμορφη κατανομή, όπως ορίστηκε, πρόκειται για μια καλά ορισμένη κατανομή.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

α) Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό)

Ο βασικός στόχος του σεναρίου αυτού, είναι η δημιουργία μιας νέας βροχόπτωσης που να ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, έχοντας σαν βάση τα βροχομετρικά δεδομένα που εξήχθησαν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Προκειμένου να καταστεί εφικτό, υπολογίζεται ο μέσος όρος (average) βροχής που καταλήγει σε κάθε σταθμό κατά τη συνολική διάρκεια του φαινομένου, με τη χρήση ενός φύλλου excel. Παραδείγματος χάριν, για τον πρώτο σταθμό θα ισχύει η σχέση 'Υψος βροχής α' σταθμού = Συνολικό ύψος βροχής α' σταθμού / Συνολικός αριθμός τριώρων. Αντίστοιχα η ίδια διαδικασία επιτελείται και για τους υπόλοιπους σταθμούς με το τελικό αποτέλεσμα να αποτυπώνεται στον πίνακα 6.2.3.2.2 Γίνεται κατανοητό ότι, σε κάθε σταθμό

αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή ύψους βροχής, που όμως παραμένει σταθερή για κάθε τρίωρο. Ενδεικτικά παρατίθενται οι βροχοπτώσεις για τα πρώτα 6 τρίωρα.

LAT	LON	RAINFAL L1	RAINFAL L2	RAINFAL L3	RAINFAL L4	RAINFAL L5	RAINFAL L6
37.62	21.62	0.003686	0.003686	0.003686	0.003686	0.003686	0.003686
37.62	21.70	0.004493	0.004493	0.004493	0.004493	0.004493	0.004493
37.65	21.66	0.004593	0.004593	0.004593	0.004593	0.004593	0.004593
37.65	21.74	0.004494	0.004494	0.004494	0.004494	0.004494	0.004494
37.68	21.63	0.004807	0.004807	0.004807	0.004807	0.004807	0.004807
37.68	21.70	0.005647	0.005647	0.005647	0.005647	0.005647	0.005647
37.71	21.67	0.005825	0.005825	0.005825	0.005825	0.005825	0.005825
37.71	21.74	0.005814	0.005814	0.005814	0.005814	0.005814	0.005814
37.74	21.63	0.004961	0.004961	0.004961	0.004961	0.004961	0.004961
37.74	21.71	0.005827	0.005827	0.005827	0.005827	0.005827	0.005827

Πίνακας 6.2.3.2.3 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (πρώτα 6 τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό)

β) Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση και σε αυτό το σενάριο ο βασικός στόχος του σεναρίου αυτού, είναι η δημιουργία μιας νέας βροχόπτωσης που να ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, έχοντας σαν βάση τα βροχομετρικά δεδομένα που εξήχθησαν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Ωστόσο η βασική διαφορά έγκειται στον τρόπο υπολογισμού του μέσου όρου. Ουσιαστικά, υπολογίζεται ο μέσος όρος (average) βροχής που καταλήγει στο σύνολο των σταθμών το κάθε τρίωρο, με τη χρήση ενός φύλλου excel. Έτσι για το πρώτο τρίωρο θα ισχύει η σχέση Ύψος βροχής α' τριώρου= Συνολικό ύψος βροχής α' τριώρου/ Συνολικός αριθμός σταθμών. Αντίστοιχα η ίδια διαδικασία επιτελείται και για τους υπόλοιπους σταθμούς με το τελικό αποτέλεσμα να αποτυπώνεται στον αντίστοιχο πίνακα. Όπως διαπιστώνεται σε κάθε τρίωρο αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή ύψους βροχής.

LAT	LON	RAINFALL1	RAINFALL2	RAINFALL3	RAINFALL4	RAINFALL5	RAINFALL6
37.62	21.62	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.62	21.7	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.65	21.66	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.65	21.74	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.68	21.63	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.68	21.7	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.71	21.67	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.71	21.74	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.74	21.63	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188
37.74	21.71	0.005269	0.016849	0.003244	0.00523	0.001752	0.00188

Πίνακας 6.2.3.2.4 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (πρώτα 6 τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)

RAINFALL7	RAINFALL8	RAINFALL9	RAINFALL10	RAINFALL11	RAINFALL12
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011
0.002507	0.004005	0.005208	0.004088	0.004131	0.006011

Πίνακας 6.2.3.2.5 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)

Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή

Έστω X μια (απόλυτα) συνεχής τυχαία μεταβλητή. Θεωρείται ότι η μεταβλητή X είναι κανονική ή ότι ακολουθεί κανονική κατανομή) (κατανομή Gauss) με παραμέτρους m και σ (συμβολικά $N(\mu, \sigma)$) αν η πυκνότητα πιθανότητάς της είναι η συνάρτηση

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\frac{x-m}{\sigma})^2}{2}}$$

Στο σενάριο αυτό, επιτελείται μια προσπάθεια για την ανάπτυξη μιας νέας βροχόπτωσης που να ακολουθεί κανονική κατανομή, έχοντας σαν βάση τα γνωστά βροχομετρικά δεδομένα του μοντέλου. Η κανονική κατανομή ή αλλιώς κωδωνοειδής καμπύλη, διέπεται από την υπόθεση ότι η κατανομή των τιμών συγκεντρώνονται γενικά γύρω από τον μέσο όρο. Οι πολύ υψηλές ή οι πολύ χαμηλές τιμές είναι μεν πιθανές, αλλά παρουσιάζονται με μικρότερη συχνότητα συγκριτικά με εκείνες κοντά στον μέσο όρο. Γενικά υπάρχει πληθώρα τρόπων για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, αλλά τελικά προτιμήθηκε ένας αλγόριθμος στο Excel, που αναπτύχθηκε από τον Kuo (2016) με τον οποίο αυτοματοποιείται η διαδικασία δημιουργίας τιμών που ακολουθούν κανονική κατανομή. Η συνάρτηση που αποδίδει ένα σύνολο τέτοιων τυχαίων αριθμών, είναι η NORMINV (Probability, Mean, Standard Deviation), όπου α) probability είναι η πιθανότητα που εκτιμάται με την συνάρτηση RAND, β) mean ο μέσος όρος και γ) standard deviation η τυπική απόκλιση. Στον αλγόριθμο, αξιοποιείται τόσο η συνάρτηση που περιγράφηκε, όσο και μια ξεχωριστή φόρμουλα με την οποία ορίζονται τα ελάχιστα και τα μέγιστα (που δεν υπάρχουν στην NORMINV). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της πλατφόρμας αυτής, είναι καθορισμός της συχνότητας εμφάνισης των τυχαίων αριθμών, με τη χρήση του Count (<http://www.mbaexcel.com/excel/how-to-create-a-normally-distributed-set-of-random-numbers-in-excel>). Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε και για τα 12 τρώρα, με το τελικό αποτέλεσμα να απεικονίζεται στους παρακάτω πίνακες.

LAT	LON	RAINFALL1	RAINFALL2	RAINFALL3	RAINFALL4	RAINFALL5	RAINFALL6
37.62	21.62	0	0	0.001	0.004	0.005	0.009
37.62	21.7	0.001	0.0035	0.004	0.0055	0.007	0.0075
37.65	21.66	0	0.002	0.004	0.006	0.0065	0.0095
37.65	21.74	0	0.0015	0.004	0.005	0.007	0.0085
37.68	21.63	0.001	0.0025	0.003	0.004	0.007	0.009
37.68	21.7	0.0015	0.0035	0.0045	0.0055	0.007	0.009
37.71	21.67	0.002	0.003	0.005	0.007	0.01	0.0105
37.71	21.74	0.0015	0.002	0.0035	0.0065	0.0075	0.0085
37.74	21.63	0.001	0.0025	0.004	0.005	0.006	0.007
37.74	21.71	0.0025	0.003	0.0045	0.0055	0.007	0.01

Πίνακας 6.2.3.2.6 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί κανονική κατανομή

RAINFALL7	RAINFALL8	RAINFALL9	RAINFALL10	RAINFALL11	RAINFALL12
0.0095	0.0085	0.004	0.003	0	0
0.0095	0.007	0.0065	0.005	0.004	0.0035
0.0095	0.0075	0.0065	0.005	0.003	0.0015
0.0095	0.0085	0.0055	0.005	0.002	0
0.009	0.0085	0.005	0.003	0.0025	0.0015
0.011	0.0075	0.0055	0.005	0.0035	0.0025
0.011	0.0105	0.009	0.0065	0.0035	0.002
0.01	0.008	0.007	0.004	0.003	0.0015
0.01	0.006	0.005	0.004	0.0035	0.002
0.012	0.009	0.0065	0.005	0.0035	0.0025

Πίνακας 6.2.3.2.7 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί κανονική κατανομή

Βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή

Σε αυτό το σενάριο, επιτελείται μια προσπάθεια για την ανάπτυξη μιας νέας βροχόπτωσης της οποίας οι τιμές να ακολουθούν τυχαία κατανομή, βασιζόμενοι πάντα στα γνωστά βροχομετρικά δεδομένα του μοντέλου. Γενικά υπάρχει πληθώρα τρόπων για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, αλλά τελικά προτιμήθηκε η ανάπτυξη ενός σύντομου κώδικα στην γλώσσα προγραμματισμού R. Έχοντας σε μορφή .csv το αρχείο με την αθροιστική βροχόπτωση και αξιοποιώντας την βιβλιοθήκη (library) data.table, για την καλύτερη οργάνωση και διαχείριση των δεδομένων, υπολογίζονται ο μέσος όρος (mean) και η τυπική απόκλιση (standard deviation). Με τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης να είναι γνωστές, εφαρμόζεται η συνάρτηση “rnorm” (n, mean, sd), με την οποία αναπτύσσεται ένα διάνυσμα με τυχαίους αριθμούς. Στους τυχαίους αριθμούς που δημιουργήθηκαν, περιλαμβάνονται και αρνητικοί αριθμοί, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, καθότι η βροχόπτωση δεν μπορεί να λάβει τέτοιες τιμές. Για την επίλυση του ζητήματος αυτού, αναπτύχθηκε ένας κώδικας με τον οποίο τέθηκαν τα ανώτερα (max) και κατώτερα (min) όρια στην συνάρτηση rnorm. Αυτό σημαίνει ότι έγινε μια μορφή δειγματοληψίας στο εύρος των τιμών που αποδίδει η κανονική κατανομή. Τέλος, για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, ενσωματώθηκε ένας σύντομος βρόχος (for-loop), προκειμένου να επαναληφθούν οι εντολές του κώδικα και για τα 12 τρίαωρα.

LAT	Lon	RAINFALL1	RAINFALL2	RAINFALL3	RAINFALL4	RAINFALL5	RAINFALL6
37.62	21.62	0.001461	0.001564	0.004025	0.003537	0.006477	0.002017
37.62	21.7	0.012678	0.01245	0.000802	0.005802	0.000603	0.006983
37.65	21.66	0.003754	0.005782	0.001852	0.00834	0.00205	0.004549
37.65	21.74	0.00575	0.011433	0.010574	0.017582	0.016527	0.008442
37.68	21.63	0.005208	0.009333	0.000336	0.000908	0.001008	4.54E-05
37.68	21.7	0.001181	0.010646	0.005527	0.005661	0.006093	0.000718
37.71	21.67	0.009778	0.007837	0.008231	0.001619	0.005985	0.001954
37.71	21.74	0.006425	0.007425	0.01075	0.0047	0.003851	0.002044
37.74	21.63	0.002507	0.00569	0.008275	0.003267	0.002742	0.004813
37.74	21.71	0.006811	0.009015	0.001595	7.05E-05	0.000156	0.005046

Πίνακας 6.2.3.2.8 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (πρώτα 6 τρίαωρα) που ακολουθεί τυχαία κατανομή

RAINFALL7	RAINFALL8	RAINFALL9	RAINFALL10	RAINFALL11	RAINFALL12
0.015687	0.000006	0.005835	0.003022	0.00973	0.003258525
0.010615	0.00288	0.001933	0.005397	0.009198	0.002692528
0.013522	0.006186	0.00298	2.94E-05	0.00502	0.00757453
0.004254	0.00775	0.004566	0.004296	0.009576	0.000653014
0.007566	0.00789	0.001761	0.000901	0.005898	0.009540603
0.004879	0.01012	0.010921	0.012798	0.01316	0.003588652
0.007691	0.001341	0.007285	0.005367	0.008452	0.0057152
0.001895	0.011045	0.004388	0.002089	0.002503	0.009670526
0.006453	0.003415	0.000772	0.008539	0.006891	0.000762202
0.009272	0.0129	0.004671	0.004265	0.000684	0.009266433

Πίνακας 6.2.3.2.9 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) που ακολουθεί τυχαία κατανομή

Αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%.

Σε αυτήν την περίπτωση, το σενάριο βροχόπτωσης προκύπτει από την αύξηση κατά 50%, των τιμών των αρχικών βροχομετρικών δεδομένων του μοντέλου προσομοίωσης. Οι υπολογισμοί υλοποιούνται στο excel, με τις νέες τιμές βροχόπτωσης να εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα.

LAT	LON	RAINFALL1	RAINFALL2	RAINFALL3	RAINFALL4	RAINFALL5	RAINFALL6
37.62	21.62	0.003315	0.026175	0.002805	0.00249	0.001485	0
37.62	21.7	0.00624	0.037035	0.003	0.00249	0.002175	0
37.65	21.66	0.00615	0.025545	0.00339	0.00615	0.00189	0.00075
37.65	21.74	0.006045	0.029655	0.004455	0.005685	0.00321	0.0003
37.68	21.63	0.0084	0.020475	0.003465	0.00897	0.00204	0.00285
37.68	21.7	0.01191	0.026535	0.006705	0.010305	0.002745	0.0033
37.71	21.67	0.009495	0.02268	0.006045	0.011205	0.003735	0.0057
37.71	21.74	0.00936	0.0252	0.009855	0.01059	0.002835	0.0054
37.74	21.63	0.00678	0.01617	0.00273	0.010365	0.002175	0.0045
37.74	21.71	0.01134	0.023265	0.00621	0.0102	0.00399	0.0054

Πίνακας 6.2.3.2.10 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (πρώτα 6 τρίωρα) με αύξηση τιμών κατά 50%

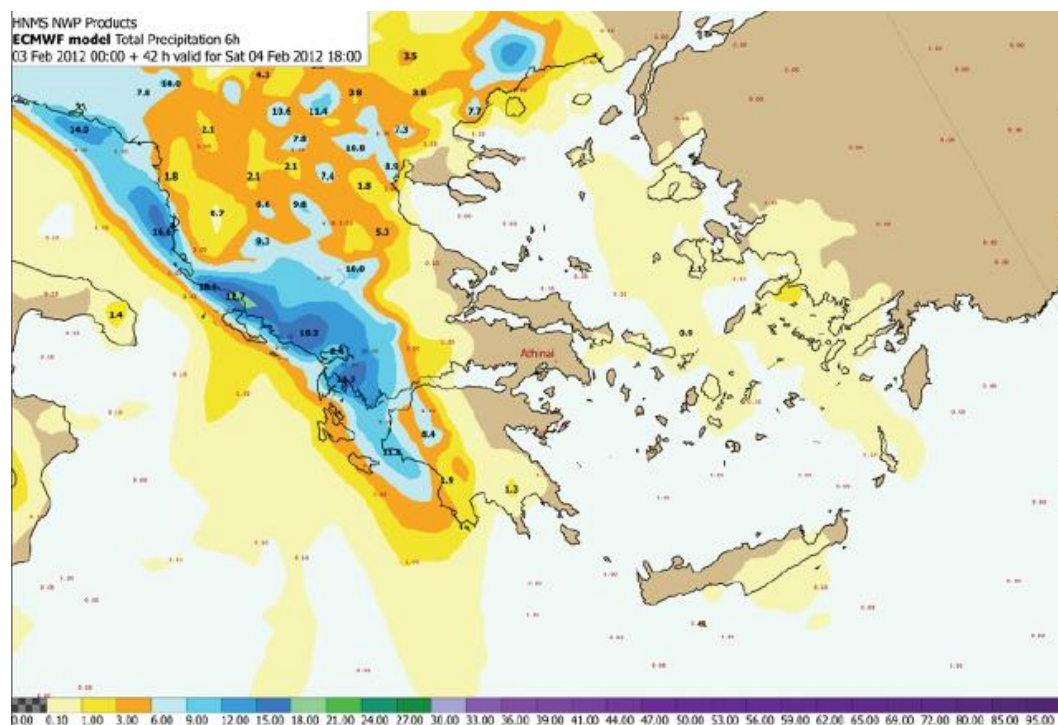
RAINFALL7	RAINFALL8	RAINFALL9	RAINFALL10	RAINFALL11	RAINFALL12
0.002805	0.00453	0.00687	0.003225	0.004455	0.00819
0.001635	0.004905	0.00708	0.004335	0.004755	0.007215
0.002355	0.00744	0.007995	0.005655	0.006345	0.009
0.00279	0.00516	0.006645	0.00501	0.004305	0.007635
0.003435	0.006525	0.007995	0.00618	0.00711	0.009075
0.00399	0.00606	0.008385	0.006915	0.005175	0.009615
0.005025	0.006495	0.00858	0.00765	0.008085	0.010155
0.004335	0.006195	0.00801	0.007185	0.00723	0.00846
0.005685	0.006315	0.00831	0.007755	0.00873	0.00978
0.00555	0.00645	0.00825	0.00741	0.005775	0.01104

Πίνακας 6.2.3.2.11 Πίνακας αθροιστικής 3ωρης βροχόπτωσης (υπόλοιπα 6 τρίωρα) με αύξηση τιμών κατά 50%

Πλημμυρικό γεγονός 5 Φεβρουαρίου 2012 (π. Κλαδέος)

Το τελευταίο σενάριο που διαμορφώθηκε, αφορά στο ακραίο πλημμυρικό γεγονός το οποίο έλαβε χώρα στις 5 Φεβρουαρίου του 2012, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, στην Δυτική Πελοπόννησο. Πρόκειται για μία καταστροφική πλημμύρα η οποία προξενήθηκε από μια εκ των πιο ακραίων καταιγίδων που έχουν συμβεί στον ν. Ηλείας.

Συγκεκριμένα, η ραγδαία μετακίνηση ενός χαμηλού βαρομετρικού στις 4/2/12 από την ευρύτερη περιοχή της Ιταλίας προς τα ανατολικά, προκάλεσε ισχυρές καταιγίδες στο βόρειο Ιόνιο και στην Ήπειρο το μεσημέρι. Αντίστοιχα, το απόγευμα σημειώθηκαν ακραίες καταιγίδες στην Δυτική Στερεά Ελλάδα και το κεντρικό και νότιο Ιόνιο πέλαγος. Το βράδυ της ίδιας ημέρας, το χαμηλό βαρομετρικό άρχισε να επιδρά στην βορειοδυτική περιοχή του ν. Ηλείας, όπου σημειώθηκε ταχύτατη μεταφορά του. Τα μεσάνυχτα του Σαββάτου, άρχισε να επιδρά στις πόλεις του Πύργου και της Αρχαίας Ολυμπίας, παραμένοντας στην περιοχή αυτή για περισσότερες από 8 ώρες.



Εικόνα 6.2.3.1 Χάρτης πρόγνωσης καιρού στις 3-4 Φεβρουαρίου 2012 (Gioti et al 2013).

Το φαινόμενο διήρκησε για περίπου 8 ώρες από τις 00:30 έως τις 8:20, με την συνολικό ύψος βροχής να ανέρχεται στα 151.4 mm νερού. Μάλιστα, τα 106,5 mm (70% της συνολικής κατακρήμνισης), καταγράφηκαν τις πρώτες 3,5 ώρες. Στον πίνακα 6.2.3.2.12 αποτυπώνεται η συνολική κατανομή του φαινομένου στην διάρκεια του χρόνου. Τα εκτεταμένα πλημμυρικά φαινόμενα και οι κατολισθήσεις που προκλήθηκαν, είχαν σημαντικό αντίκτυπο στις πόλεις του Πύργου και της Αρχαίας Ολυμπίας, με τις καταστροφές να είναι ανυπολόγιστες. Πιο συγκεκριμένα, σημειώθηκαν σοβαρές φθορές στους οδικούς άξονες, στην αγροτική και κτηνοτροφική παραγωγή, καθώς και στην τοπικές περιουσίες. Ωστόσο, χωρίς αμφιβολία, η πιο δραματική επίπτωση ήταν η απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής (Gioti et al 2013).

Time(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rainfall(m)	0.0323	0.0373	0.0229	0.0175	0.0117	0.0075	0.0066	0.0138	0.0018

Πίνακας 6.2.3.2.12 Πίνακας ωριαίας βροχόπτωσης του πλημμυρικού συμβάντος (Κλαδέος-5/2/12)

6.2.3.3 Δημιουργία grids βροχόπτωσης με τη χρήση της μεθόδου IDW

Πρώτο βήμα της επεξεργασίας, είναι η εισαγωγή του αρχείου excel με τα βροχομετρικά δεδομένα, στο ArcMap και στην συνέχεια η απεικόνιση του στον χώρο. Στον πίνακα δεδομένων οι συντεταγμένες (φ, λ-γεωγραφικό πλάτος-μήκος) είναι γνωστές, οπότε η απεικόνιση του στο ArcMap, γίνεται με τη χρήση του “Display XY Data”, έχοντας ορισμένο ως σύστημα αναφοράς το WGS’ 84. Στη συνέχεια, επιτελείται η μετατροπή των προσωρινών γεγονότων (events), σε ένα σημειακό shapefile, του οποίου το γεωγραφικό σύστημα είναι το WGS’ 84. Στα πλαίσια της προσέγγισης μετασχηματίστηκαν οι συντεταγμένες (φ, λ – γεωγραφικό πλάτος – μήκος σε μοίρες και υποδιαίρεσεις της) των μετεωρολογικών σταθμών από το γεωγραφικό σύστημα WGS’ 84, στο προβολικό Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ87) (x, y – καρτεσιανές συντεταγμένες σε μέτρα). Για να επιτευχθεί η μετατροπή αυτή, χρησιμοποιείται το εργαλείο “Project”, με το οποίο γίνεται επαναπροβολή του διανυσματικού επιπέδου σημείων από το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς WGS ’84 στο προβολικό EGSA ’87 (Greek Grid). Έτσι το τελικό εξαγόμενο, είναι ένα διανυσματικό επίπεδο σημείων (point shapefile), προβαλλόμενο σε ΕΓΣΑ87, απαραίτητο για τη δημιουργία των grids βροχόπτωσης. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα σενάρια βροχόπτωσης, που αναλύθηκαν παραπάνω, προκειμένου να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα σημειακά shapefiles.

Για την δημιουργία των grids βροχόπτωσης αξιοποιούνται τεχνικές χωρικής παρεμβολής. Η χωρική παρεμβολή αποτελεί μια διαδικασία εκτίμησης της τιμής μιας μεταβλητής σε θέσεις στο χώρο, όπου δεν υφίσταται δειγματοληψία, βάσει γνωστών τιμών της μεταβλητής αυτής σε άλλες θέσεις εντός της περιοχής μελέτης. Με την παρεμβολή, τα δεδομένα που έχουν τη μορφή σημειακών παρατηρήσεων μετατρέπονται σε μια συνεχή επιφάνεια (Σκριμιζέας 2014, Νικολακόπουλος 2015). Οι διάφορες θέσεις δύνανται να προσδιοριστούν ως σημεία στο χώρο και το χρόνο, με αποτέλεσμα η παρεμβολή να μην είναι απαραίτητο να καθορίζεται σε μια ή δύο διαστάσεις. Ωστόσο, ως επί το πλείστον εφαρμόζεται σε πεδίο δύο διαστάσεων (Νικολακόπουλος 2015). Κάθε μέθοδος χωρικής παρεμβολής, στηρίζεται στη βασική αρχή του νόμου του Tobler, ο οποίος υποστηρίζει ότι «*όλες οι θέσεις σχετίζονται μεταξύ τους αλλά οι κοντινές θέσεις σχετίζονται περισσότερο μεταξύ τους από ότι ο απομακρυσμένες*»

Οι μέθοδοι παρεμβολής (Interpolation methods) που βρίσκονται στα διαθέσιμα λογισμικά είναι ποικίλες. Το λογισμικό ArcMap, περιλαμβάνει πληθώρα μεθόδων και επιλογών παραμέτρων, για

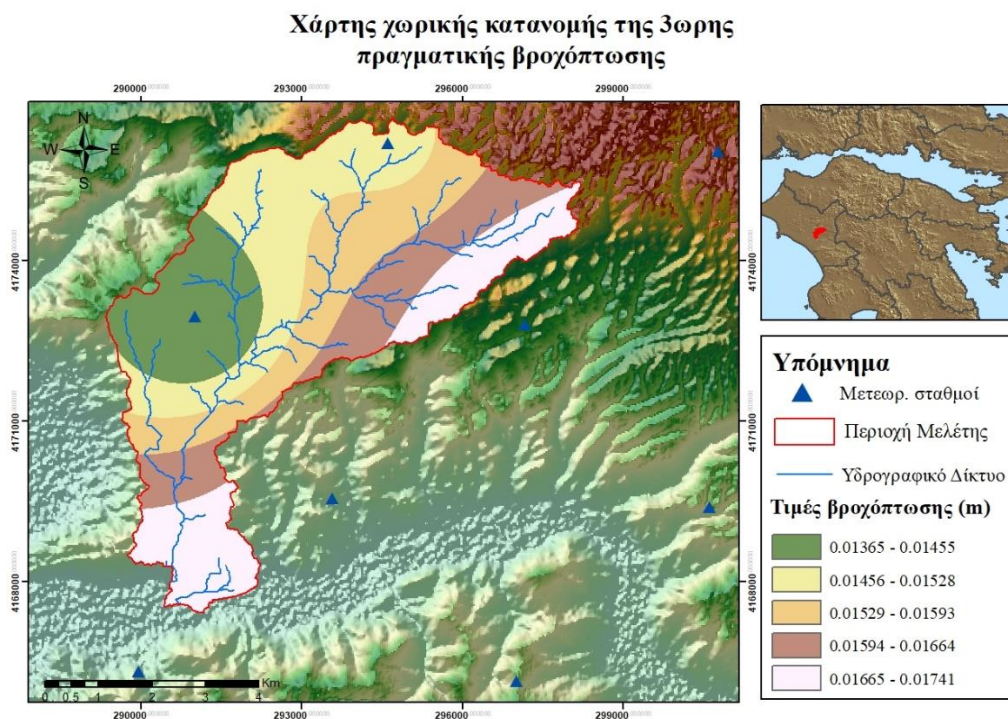
τη βελτιστοποίηση του εξαγόμενου αποτελέσματος της παρεμβολής. Παραδείγματα μεθόδων χωρικής παρεμβολής είναι η IDW, η Splines, η TIN, η Kriging κλπ (Νικολακόπουλος 2015). Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η σταθμισμένη παρεμβολή αντίστροφης απόστασης (inverse distance weighted interpolation-IDW), για την προσομοίωση του ύψους βροχής με τη δημιουργία των grids βροχόπτωσης. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως λόγω του μικρού αριθμού των σταθμών (10) στην υδρολογική λεκάνη αλλά και στην ευρύτερη περιοχή.

Η μέθοδος IDW είναι μια ντετερμινιστική μέθοδος παρεμβολής, η οποία εκτιμά τις άγνωστες τιμές με ένα σταθμισμένο συνδυασμό των γνωστών τιμών στην επιλεγμένη περιοχή (ή υποπεριοχή αυτής), με βάση την αρχή ότι οι τιμές στις πιο κοντινές περιοχές είναι περισσότερο όμοιες σε σύγκριση με τις πιο μακρινές (Σκριμιζέας 2014, Curtarelli et al 2014). Η εφαρμογή της IDW έγινε με τη βοήθεια του ArcGIS, στο Spatial Analyst (Interpolation toolset) του οποίου, υπάρχει το αντίστοιχο ειδικό εργαλείο. Στο σημείο αυτό καθορίζονται τα βασικά στοιχεία της μεθόδου χωρικής παρεμβολής, όπως το σημειακό shape file με τις τιμές βροχόπτωσης ανά τρίωρο, ο αριθμός των γειτόνων και η τιμή της δύναμης p . Μετά από πειραματισμούς ως προς την επιλογή των γειτόνων, επιλέχθηκαν οι 6 πλησιέστεροι γείτονες, δηλαδή οι 6 μετεωρολογικοί σταθμοί που είναι πιο κοντά στην περιοχή μελέτης. Ο βασικός λόγος αυτής της επιλογής είναι γιατί, οι γνωστές τιμές των παρατηρήσεων που βρίσκονται κοντινότερα στην περιοχή ενδιαφέροντος, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις προβλεπόμενες τιμές, συγκριτικά με εκείνες που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση. Η τιμή της δύναμης p ήταν ίση με 2, όπως ήταν αρχικά ορισμένη ως προεπιλογή. Μάλιστα όσο η τιμή αυτή αυξάνεται, οι συντελεστές στάθμισης για τα μακρινά σημεία μειώνονται ραγδαία. Γενικά, όταν η τιμή του p είναι πολύ υψηλή, μόνο τα πολύ κοντινά σημεία θα επηρεάσουν την πρόβλεψη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια συνεχής επιφάνειας με «ισοπληθείς» καμπύλες, οι οποίες στην περίπτωση μετεωρολογικών-κλιματολογικών δεδομένων, καλούνται «ισοϋέτιες» αφού αναπαριστούν ύψη βροχής (Σκριμιζέας 2014). Το cell size του τελικού raster επιπέδου, ορίστηκε να είναι το ίδιο με αυτό του DEM (δηλαδή 5x5 m).

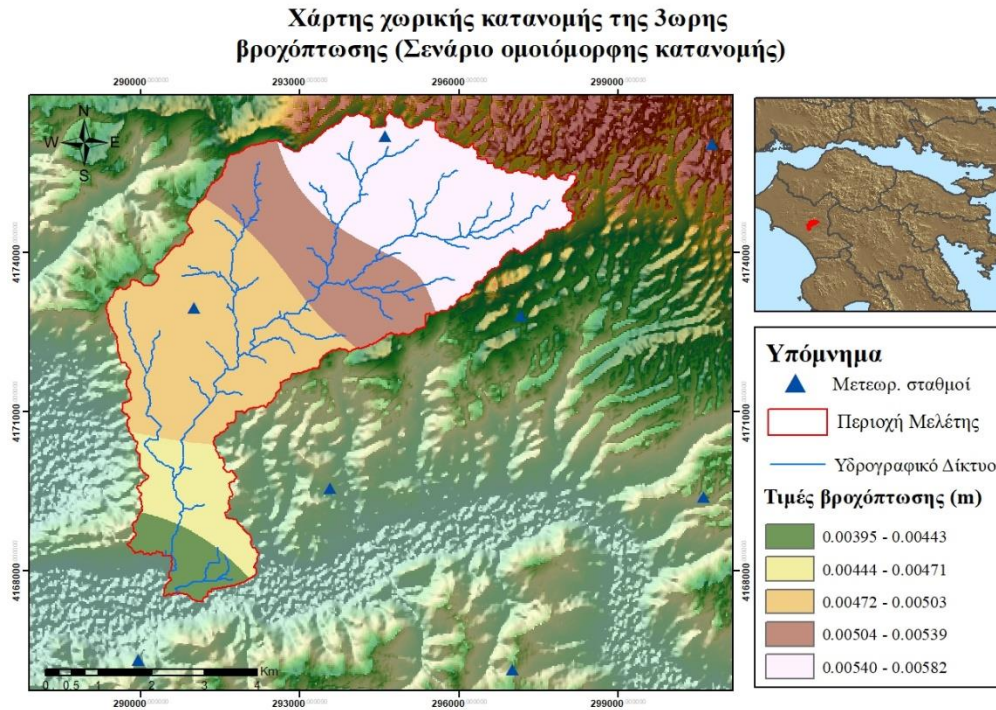
Εφαρμόζοντας την IDW στα βροχομετρικά δεδομένα του που προήλθαν από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, δημιουργήθηκαν 12 grids βροχόπτωσης. Παράλληλα, εξήχθησαν 12 grids για τα εξής σενάρια βροχόπτωσης, τα οποία βασίζονται στην βροχόπτωση του ατμοσφαιρικού μοντέλου: α) βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατατανομή, β) βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή, γ) αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%. Για το

σενάριο της βροχόπτωσης που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό), δημιουργήθηκε ένα grid βροχόπτωσης, αφού για κάθε τρίωρο έχει τις ίδιες τιμές. Στον αντίποδα όσον αφορά στο σενάριο με την ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο), υπάρχει μία μοναδική τιμή διαφορετική για κάθε τρίωρο, οπότε η δημιουργία των grids θα ήταν περιττή και ανούσια.

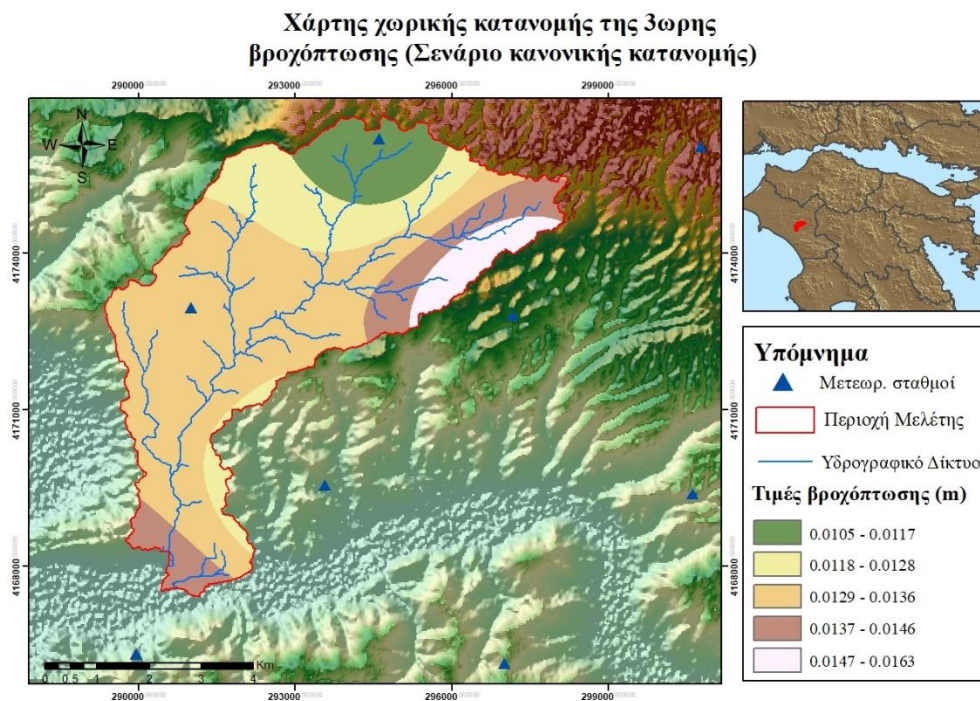
Όσον αφορά στο ακραίο πλημμυρικό γεγονός που έλαβε χώρα στις 5/2/12 στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, με ύψος βροχής 0,1514 μέτρα σε χρονικό διάστημα 9 ωρών, δεν επιτελέστηκε η προσέγγιση της IDW και αυτό γιατί, για κάθε ώρα αντιστοιχεί μια μοναδική τιμή βροχόπτωσης (ύπαρξη ενός μετεωρολογικού σταθμού). Στην συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά οι χάρτες των grid βροχόπτωσης με τις μεγαλύτερες τιμές για κάθε σενάριο.



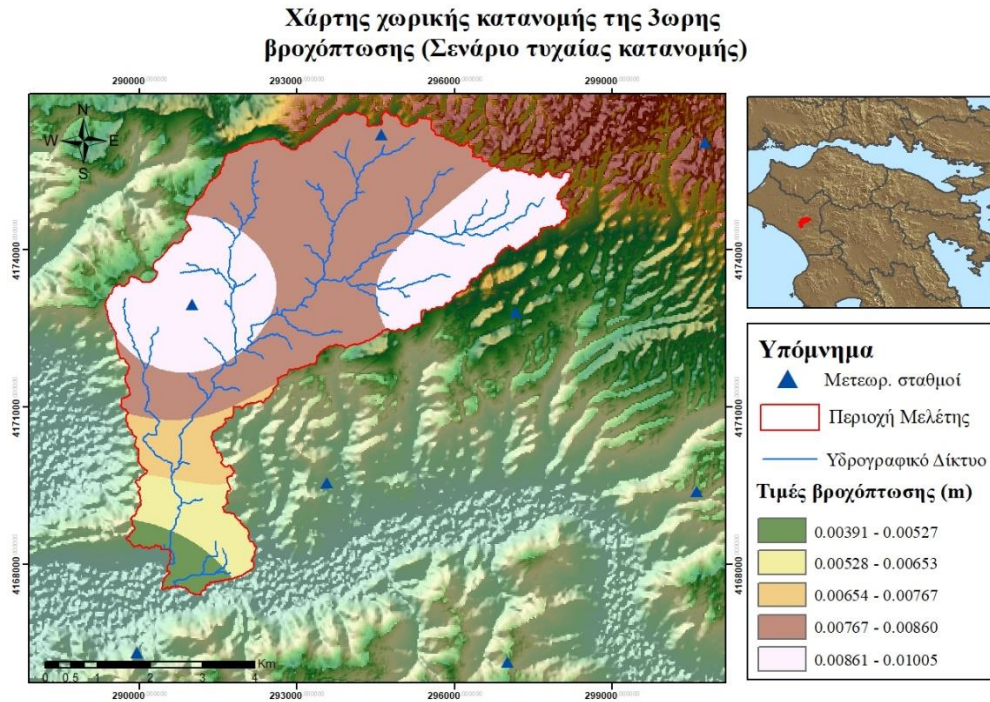
Εικόνα 6.2.3.3.1 Χάρτης grid πραγματικής βροχόπτωσης (2^ο τρίωρο)



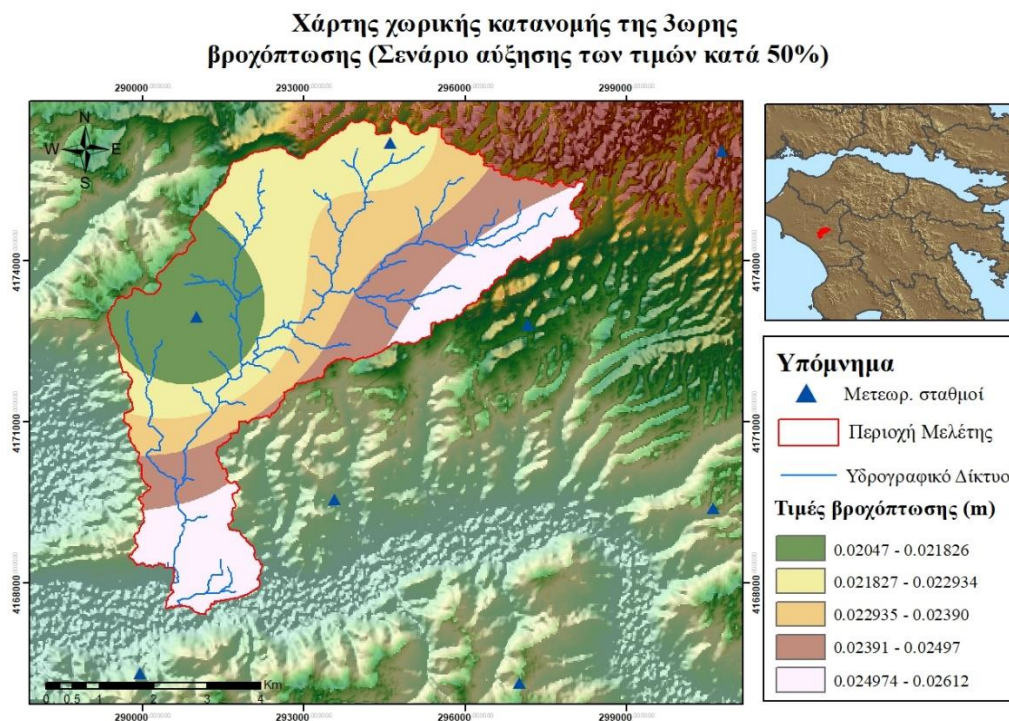
Εικόνα 6.2.3.3.2 Χάρτης grid βροχόπτωσης (Σενάριο ομοιόμορφης κατανομής)



Εικόνα 6.2.3.3.3 Χάρτης grid βροχόπτωσης 7^{ου} τριώρου (Σενάριο καν. κατανομής)



Εικόνα 6.2.3.3.4 Χάρτης grid βροχόπτωσης 2^{ου} τριώρου (Σενάριο τυχαίας κατανομής)

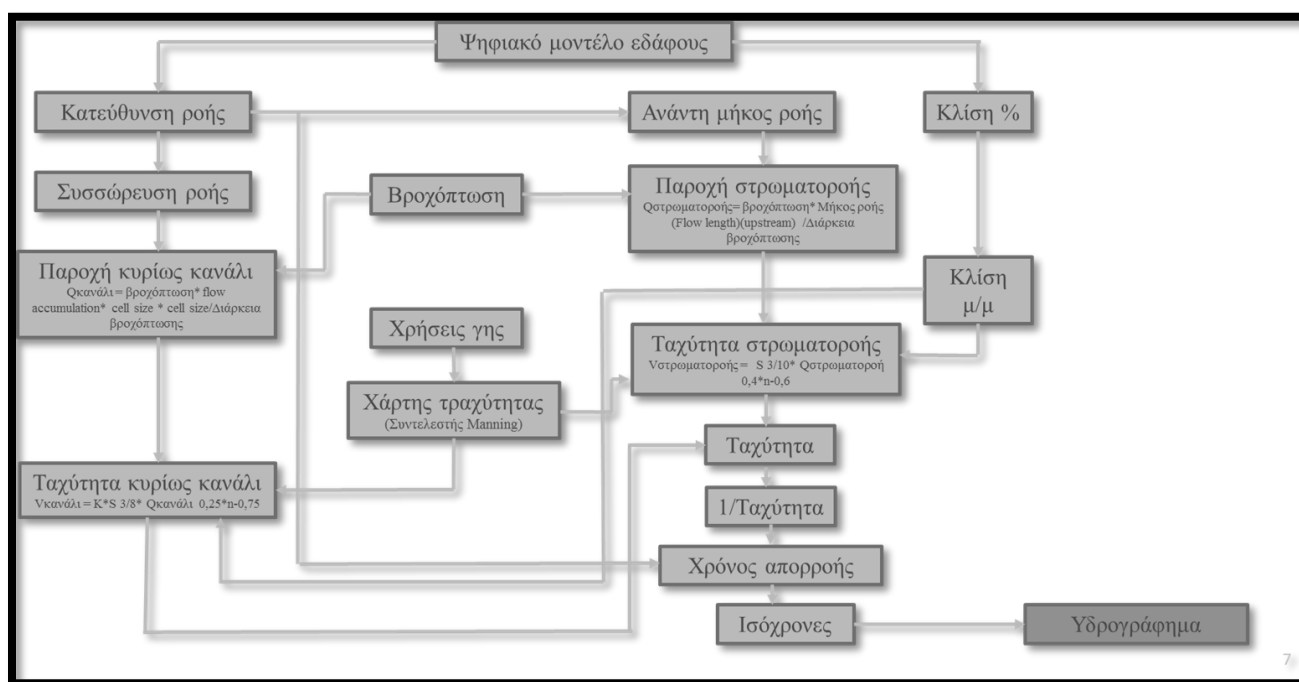


Εικόνα 6.2.3.3.5 Χάρτης grid βροχόπτωσης 2^{ου} τριώρου (Σενάριο αύξησης των τιμών κατά 50%)

6.3 Εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου

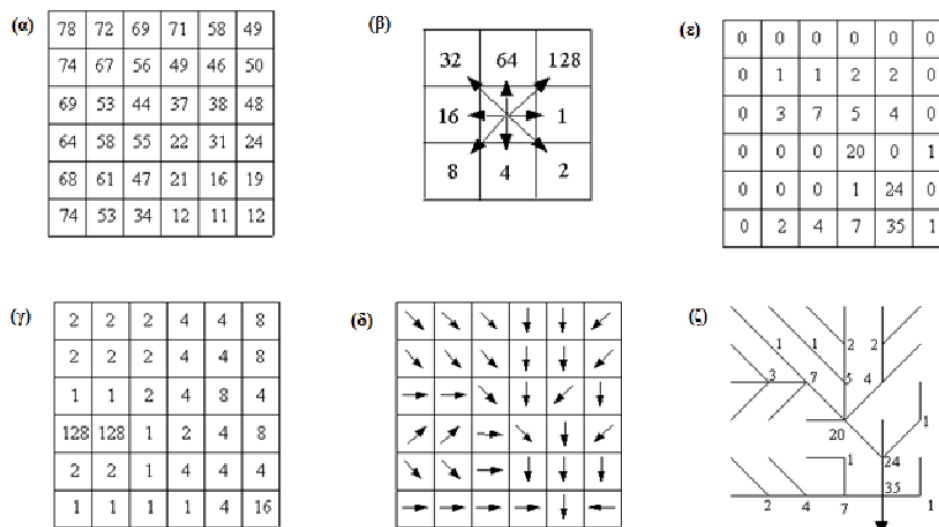
Στην παρούσα εργασία, για την μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής και της δυναμικής του πλημμυρικού φαινομένου στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, αποτέλεσμα ακραίων καιρικών γεγονότων, σχεδιάστηκε ένα μοντέλο διόδευσης βασισμένο σε τεχνολογία GIS. Η προσέγγιση που ακολουθείται, βασίζεται στην εκτίμηση του χρόνου απορροής, έτσι ώστε να σχεδιαστούν οι ισόχρονες καμπύλες. Όπως προαναφέρθηκε, ο τελικός στόχος της προσομοίωσης αποτελεί η εκτίμηση της των πλημμυρικών αιχμών καθώς και των κρίσιμων χρόνων και αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία του άμεσου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Με τα δεδομένα να είναι οργανωμένα και έτοιμα προς επεξεργασία στην ψηφιακή βάση, ακολουθεί η περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου διόδευσης το οποίο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcMap. Η εννοιολογική αναπαράσταση και η ροή δεδομένων του υδρολογικού μοντέλου, αποτυπώνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 6.3.1 Εννοιολογικό διάγραμμα μοντέλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Καραγιαννοπούλου κ.α 2016)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τοπογραφία της επιφάνειας του εδάφους (DEM), συνιστά ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία για την προσομοίωση, καθώς η ανάλυση του αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτέλεση του μοντέλου βροχής-απορροής. Η κατανόηση και η μελέτη της ροής του νερού πάνω στη γήινη επιφάνεια, καθώς και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζεται αυτή από ενδεχόμενες αλλαγές είναι πολύ σημαντική. Στο παρόν μοντέλο, συμπεριλαμβάνονται τόσο η βασική ανάλυση της επιφάνειας του εδάφους (surface analysis), όσο και η υδρολογική ανάλυση (hydrological analysis). Υπάρχει πληθώρα παραγώγων, προερχόμενα από την ανάλυση του DEM, όπως η κλίση (slope) που αντιστοιχεί στην ανάλυση της επιφάνειας, καθώς και η διεύθυνση ροής (flow direction), η συσσώρευση ροής (flow accumulation) και το μήκος ροής (flow length) που συνιστούν την υδρολογική ανάλυση.

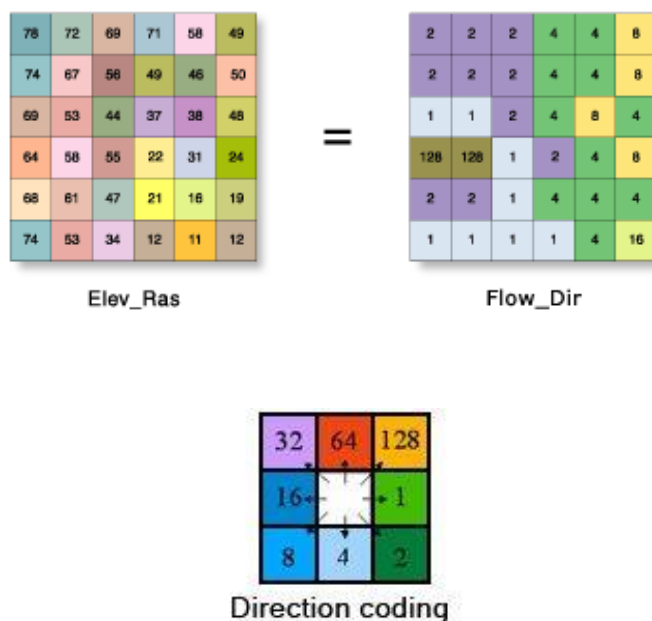


Εικόνα 6.3.2 Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ. επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου)

Αρχικά, για τη διόρθωση των ταπεινώσεων (depressions) του DEM, οι οποίες ενδεχομένως να προκαλέσουν εγκλωβισμό ή παρεμπόδιση της επιφανειακής απορροής, με συνέπεια περεταίρω αλλοιώσεις κατά την συνέχεια της ανάλυσης, χρησιμοποιείται το εργαλείο “Fill”. Οι τοπικές ταπεινώσεις του DEM οφείλονται συνήθως σε σφάλματα και αστοχίες, οπότε κρίνεται σκόπιμο να εξαλειφθούν με τη δημιουργία ενός νέου grid, παρόμοιου με το αρχικό, στο οποίο οι χαμηλότερες τιμές υψομέτρου αντικαθίστανται από υψηλότερες, βάσει των τιμών των γειτονικών κελιών. Έχοντας σαν βάση πλέον το αναδιαμορφωμένο ΨΜΕ, συνεχίζεται η ανάλυση με την

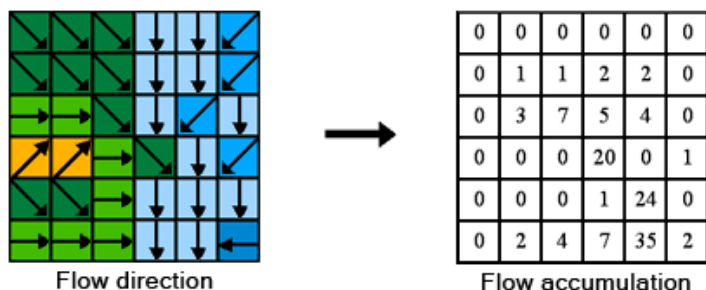
εξαγωγή του επιπέδου της κλίσης (%), κάνοντας χρήση του εργαλείου “Slope “. Ωστόσο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η υλοποίηση της ανάλυσης σε κοινή μονάδα μέτρησης, γίνεται η μετατροπή του ήδη υπάρχοντος επιπέδου κλίσης, σε εκείνο που μετριέται σε μέτρο ανά μέτρο. Οι υπολογισμοί γίνονται στο “Raster Calculator”.

Το επόμενο στάδιο, περιλαμβάνει την δημιουργία των επιπέδων διεύθυνσης και συσσώρευσης ροής, με τα εργαλεία “Flow Direction” και “Flow accumulation” αντίστοιχα (Arc Hydro tools). Το πρώτο επίπεδο συνιστά ένα μωσαϊκό διευθύνσεων ροής, με το οποίο αποτυπώνεται η διαδρομή του νερού της βροχής από κάθε κελί μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Ο υπολογισμός της γίνεται, μέσω διαθέσιμων αλγορίθμων, ενώ βασίζεται στην αρχή ότι ένα κελί απορρέει σε ένα μόνο από τα 8 γειτονικά του και συγκεκριμένα σε εκείνο με το οποίο έχει τη μεγαλύτερη διαφορά υψομέτρου (μεγαλύτερη κλίση μεταξύ τους). Ουσιαστικά αποδίδεται ένα επίπεδο με τιμές εικονοστοιχείων, που αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το νερό της βροχής.



Εικόνα 6.3.3 Διαδικασία διεύθυνσης ροής

Χρησιμοποιώντας το επίπεδο της διεύθυνσης ροής παράγεται το επίπεδο της συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Πρόκειται για ένα grid, με το οποίο ελέγχονται σε ποια κελιά συγκεντρώνεται η ροή νερού. Η εξαγωγή του grid γίνεται με την επεξεργασία του επιπέδου της διεύθυνσης ροής, μέσω ενός αλγορίθμου, ο οποίος υπολογίζει την τιμή κάθε κελιού, εκτιμώντας τον αριθμό των ανάντη κελιών το νερό των οποίων καταλήγει σε αυτό.



Εικόνα 6.3.4 Διαδικασία συσσώρευσης ροής

Από την στιγμή που η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση βασίζεται στον χρόνο συρροής, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός του χρόνου διαδρομής της του νερού διαμέσου της λεκάνης του π. Κλαδέου, τόσο για την ροή εντός του καναλιού (κυρίως υδρογραφικό δίκτυο) έως την έξοδο της λεκάνης, όσο και για την στρωματοροή (υπόλοιπη λεκάνη). (Kalogeropoulos et. al 2013, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016). Με την επαναταξινόμηση (εργαλείο “Reclassify”) του επιπέδου της συσσώρευσης ροής και την επιλογή ενός κατάλληλου κατωφλιού (threshold) συμβαλλόντων κελιών, επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των δύο τύπων ροής. Μετά από δοκιμές με διαφορετικές τιμές, ως κατώφλι επιλέχθηκε η τιμή 8000. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, συνίσταται από εκείνα τα κελιά που συγκεντρώνουν μεγάλη απορροή (τιμές άνωτερες του κατωφλιού), ενώ τα κελιά με τιμές μικρότερες του κατωφλιού αντιστοιχούν στην στρωματοροή της λεκάνης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι τα κελιά με μηδενικές τιμές αποτυπώνουν τα σημεία του υδροκρίτη όπου η συσσώρευση ροής είναι μηδενική, ενώ τα κελιά με την μέγιστη τιμή, συνιστούν το σημείο εξόδου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συσσώρευση ροής. Αυτό σημαίνει ότι η ολοένα και μεγαλύτερη μείωση των τιμών, μεταφράζεται ως προσέγγιση του υδροκρίτη, ενώ αντίθετα η ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση των τιμών σημαίνει προσέγγιση των κοιτών των υδατορεμάτων (Καρύμπαλης κ.α 2014, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Το προτεινόμενο μοντέλο βροχής-απορροής υπολογίζει την κίνηση του νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιώντας τους γνωστούς νόμους της υδρολογίας και υδραυλικής (εξισώσεις παροχής, ταχύτητα ροής). Έχοντας ως δεδομένα, αφενός μεν το εξαγόμενο επίπεδο της συσσώρευσης ροής και αφετέρου την βροχόπτωση, δύναται να υπολογιστεί το επίπεδο παροχής του καναλιού (επιφανειακή απορροή). Η εξίσωση που χρησιμοποιείται, για τον υπολογισμό της παροχής στους κλάδους του δικτύου ($Q_{\text{κανάλι}}$ σε m^3/s), είναι η εξής:

$$Q_{\text{κανάλι}} = \frac{\text{Βροχόπτωση} * \text{Flow.accumulation} * \text{cell.size}^2}{\text{Διάρκεια Βροχόπτωσης}} \quad (1)$$

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

Έπειτα, για τον υπολογισμό του επιπέδου της παροχής της στρωματοροής ($Q_{\text{στρωματοροή}}$ σε m^3/s), υλοποιήθηκαν οι εξής ενέργειες. Αρχικά, από το επίπεδο κατεύθυνσης της ροής προήλθε το επίπεδο του ανάντη μήκους ροής (δηλαδή του μήκους της ροής του νερού από το κάθε κελί έως τον υδροκρίτη) εκφρασμένο σε μέτρα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η κάτωθι σχέση

$$Q_{\text{στρωματοροή}} = \frac{\text{Βροχόπτωση} * \text{ανάντη μήκος ροής}}{\text{Διάρκεια Βροχόπτωσης}} \quad (2)$$

Στην περίπτωση που η βροχόπτωση, προέρχεται από έναν μετεωρολογικό σταθμό, τότε αντιστοιχεί σε μία μοναδική τιμή για κάθε ώρα του φαινομένου. Δηλαδή, η εξίσωση της παροχής θα επαναληφθεί τόσες φορές όσες και οι ώρες της καταιγίδας. Από την άλλη πλευρά, όταν η βροχόπτωση προέρχεται από μια σειρά από grids, που αντιπροσωπεύουν την χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης, τότε οι εξισώσεις των παροχών, εφαρμόζονται τόσες φορές όσες και το σύνολο των επιπέδων βροχόπτωσης (12 grids). Κάθε grid βροχόπτωσης αντιστοιχεί σε ένα τρίωρο του καιρικού φαινομένου.

Για τον υπολογισμό του χρόνου συρροής, είναι απαραίτητη η γνώση της ταχύτητας ροής τόσο στο κυρίως κανάλι όσο και στη στρωματοροή. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς, είναι γνωστές από την επιστήμη της υδρολογίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ταχύτητα ροής στο κυρίως κανάλι του υδρογραφικού δικτύου ($V_{\text{κανάλι}}$ σε m/s) δύναται να εκτιμηθεί, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{\text{κανάλι}} = K * S^{\frac{3}{8}} * Q_{\text{κανάλι}}^{0.25} * n^{-0.75} \quad (3)$$

όπου K είναι ο συντελεστής διόρθωσης των σφαλμάτων της προσομοίωσης για το επίπεδο συντελεστή τραχύτητας και το επίπεδο των κλίσεων και ισούται με 1, S είναι η κλίση εκφρασμένη σε m/m και Q είναι η παροχή στο κυρίως κανάλι (σε m^3/s) που εκτιμήθηκε εφαρμόζοντας τον τύπο (1) και n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε $\text{s}/\text{m}^{1/3}$) (Du et al. 2009).

Αντίστοιχα, για την εκτίμηση της ταχύτητας στρωματοροής ($V_{\text{στρωματοροή}}$ σε m/s) αξιοποιείται η ακόλουθη εξίσωση (Du κ.ά. 2009).

$$V_{\text{στρωματοροή}} = S^{\frac{3}{10}} * Q_{\text{στρωματοροή}}^{0.4} * n^{-0.6} \quad (4)$$

όπου S είναι η κλίση εκφρασμένη σε (m/m), Q (σε m^3/s) είναι η παροχή της στρωματοροής που εκτιμήθηκε από τον τύπο (2), και n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε $\text{s}/\text{m}^{1/3}$) (Du et al. 2009).

Μετά τον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής, τόσο στο κυρίως υδρογραφικό δίκτυο όσο και στην υπόλοιπη λεκάνη, ακολουθεί η συνένωση αυτών των δύο επιπέδων, έτσι ώστε να εξαχθεί η τελική ταχύτητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η τελική ταχύτητα ροής για κάθε κελί της λεκάνης απορροής, με τη βοήθεια μιας conditional συνάρτησης (εργαλείο Con) από το Spatial Analyst Tools.

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

$$T_{\text{συρροής}} = \frac{\text{Μήκος Ροής}}{\text{Ταχύτητα}} \quad (5)$$

Το επίπεδο αυτό, αντιπροσωπεύει τον χρόνο που χρειάζεται μία σταγόνα νερού να κυλήσει προς την έξοδο της λεκάνης απορροής (Kalogeropoulos et al. 2013, Gioti et al. 2013, Καρύμπαλης κ.α 2014).

Όλες οι εξισώσεις που παρατέθηκαν παραπάνω, για την υλοποίηση αυτής της προσέγγισης, υπολογίζονται με τη βοήθεια του εργαλείου Raster Calculator (Map Algebra). Η Map Algebra, είναι μια γλώσσα με καθορισμένη σύνταξη, που συνδυάζει θεματικά επίπεδα, εφαρμόζοντας μαθηματικές σχέσεις και συναρτήσεις ανάλυσης, για τη δημιουργία νέων θεματικών επιπέδων. Μια σχέση που εισάγεται στην Map Algebra, περιλαμβάνει ένα συνδυασμό από μαθηματικούς, λογικούς ή Boolean τελεστές (+, >, AND, tan, κλπ), συναρτήσεις χωρικής ανάλυσης, καθώς και χωρικά δεδομένα και αριθμούς (Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

Το τελικό στάδιο της εκτέλεσης του υδρολογικού μοντέλου, συνιστά ο σχεδιασμός του επιπέδου των ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή εκείνων των καμπυλών που συνδέουν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης. Η κατασκευή του επιπέδου των ισόχρονων, επιτυγχάνεται με την επαναταξινόμηση (εργαλείο “reclassify”) των τιμών του επιπέδου του χρόνου απορροής. Παράλληλα, με την αξιοποίηση των παραγόμενων επιπέδων των ισόχρονων καμπυλών καθώς και των grids της βροχόπτωσης, υπολογίζονται τα “zonal stats”, έτσι ώστε να εκτιμηθεί το ύψος βροχής που έπεσε το κάθε τρίωρο (στην περίπτωση της πραγματικής βροχόπτωσης και των αντίστοιχων σεναρίων) σε κάθε ισόχρονη. Με το εργαλείο zonal statistics, υπολογίζονται μια σειρά από στατιστικά μεγέθη (μέγιστο, ελάχιστο, μέσος όρος, άθροισμα, τυπική απόκλιση κλπ), για κάθε ζώνη με βάση τις τιμές ενός άλλου raster επιπέδου. Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας με συγκεντρωμένα όλα τα στατιστικά στοιχεία για κάθε ζώνη. Στην παρούσα προσέγγιση, αξιοποιείται η μέση τιμή της βροχόπτωσης που καταλήγει σε κάθε ισόχρονη το κάθε τρίωρο.

Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το διάγραμμα χρόνου-επιφάνειας, ενώ εκτιμώντας τους παλμούς του νερού που πέφτουν στη μονάδα του χρόνου (που έχει οριστεί στις ισόχρονες καμπύλες), σχεδιάζεται το σύνθετο μοναδιαίο υδρογράφημα για το υπό μελέτη πλημμυρικό φαινόμενο (Kalogeropoulos et al 2013, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016).

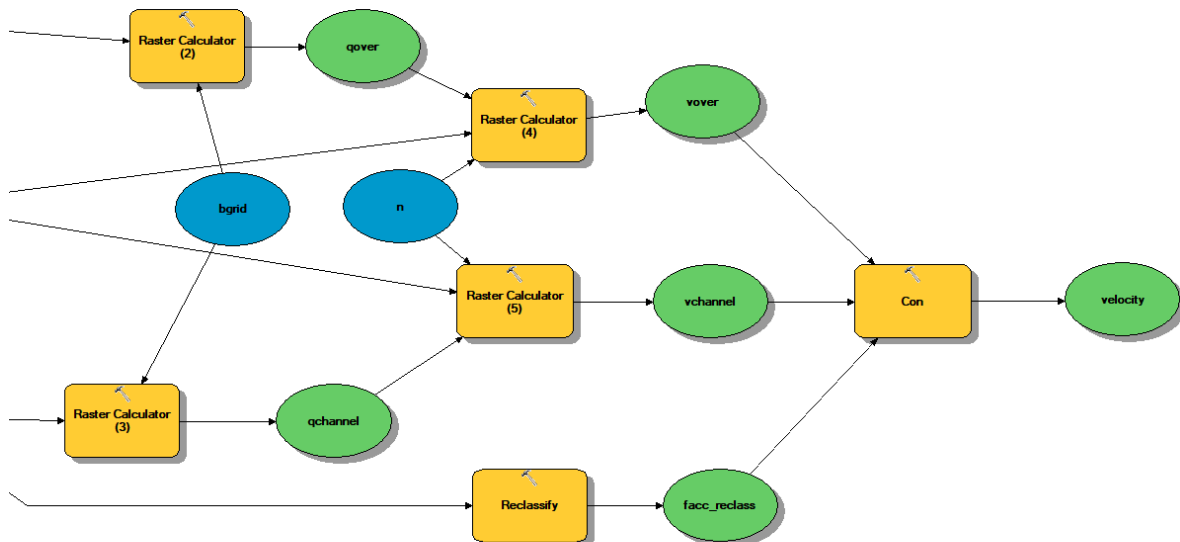
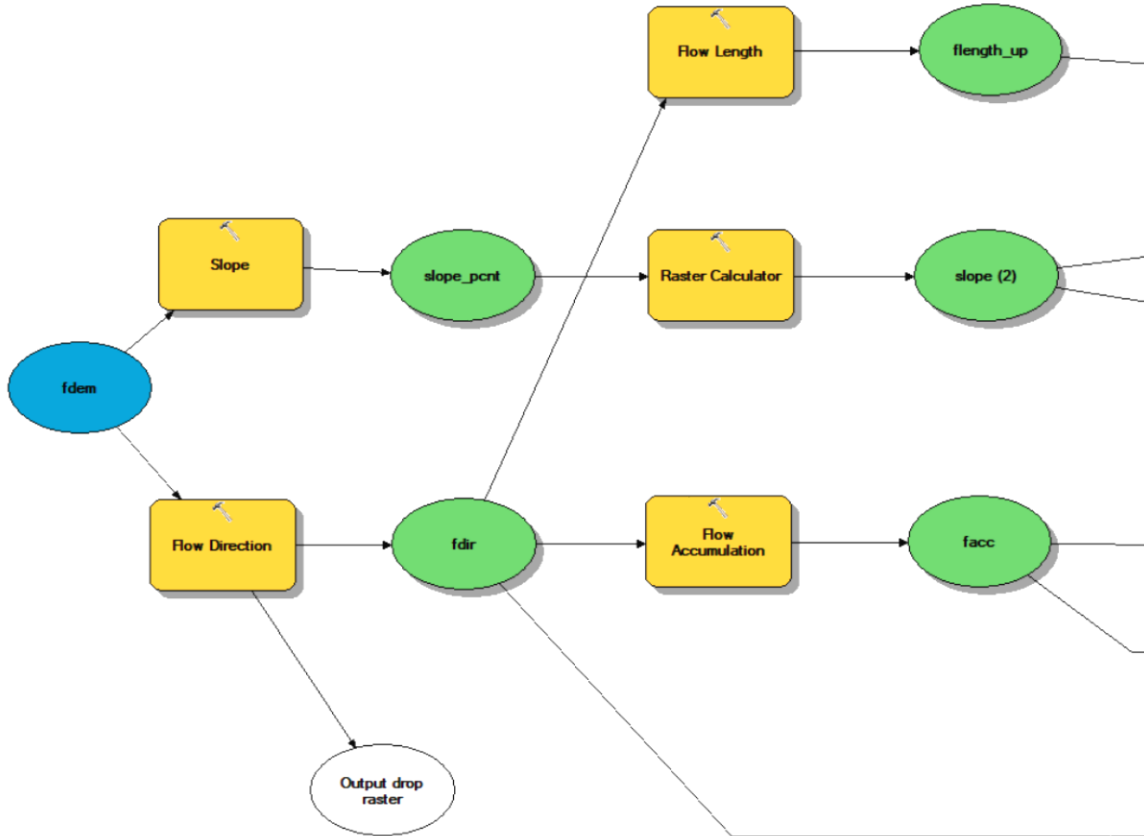
Model Builder

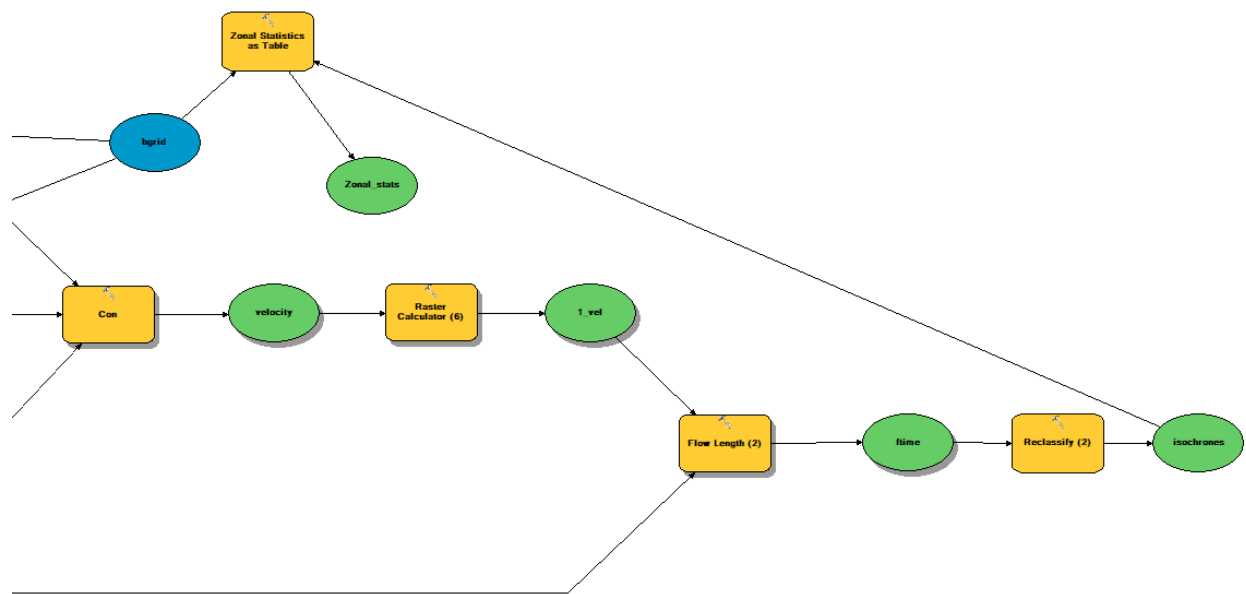
Το Model Builder είναι ένα διαδραστικό περιβάλλον του λογισμικού ArcGIS, μέσω του οποίου ο χρήστης, δύναται να αναπτύξει, να εφαρμόσει, να διορθώσει και να διαχειριστεί καθορισμένα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν μια σειρά εργαλείων για να επιτύχουν ένα συγκεκριμένο σκοπό. Η χρησιμότητα της εφαρμογής είναι πολύ σημαντική, καθώς επιτρέπει στο χρήστη την άμεση

εποπτεία όλων των ενεργειών που επιτελούνται ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα αυτοματοποίησης του μοντέλου. Παράλληλα, ο χρήστης έχει την ευελιξία και τον πλήρη έλεγχο των δεδομένων και των διαδικασιών που εκτελούνται. Όταν οι διαδικασίες που εκτελούνται είναι πολλές, απαιτείται η δημιουργία παραμέτρων και ο πειραματισμός με αυτές, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο άμεσος έλεγχος της επίδρασης τους και συνεπώς η καλύτερη λειτουργικότητα του μοντέλου.

Κάθε μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί από την αρχή, με την εισαγωγή δεδομένων, παραμέτρων και λειτουργιών, οι οποίες μπορούν να διαφοροποιηθούν, ανάλογα με τις ανάγκες της αναλυτικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται η εύκολη και άμεση αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, η άμεση προσθήκη ή αφαίρεση λειτουργιών, καθώς και η τροποποίηση των σχέσεων μεταξύ αυτών. Παράλληλα, ο χρόνος ανάλυσης και υλοποίησης του μοντέλου μπορεί να μειωθεί σημαντικά, με την ενσωμάτωση και εφαρμογή επαναληπτικών διαδικασιών με τη μορφή κώδικα (π.χ Python) (Κουτσόπουλος και Ανδρουλάκης 2005).

Στη παρούσα εργασία, η μεθοδολογία που ακολουθείται με βάση τα διαφορετικά σενάρια που αναπτύχθηκαν, εφαρμόζεται εξ'ολοκλήρου στο περιβάλλον του Model Builder. Οι κατάλληλες λειτουργίες και τα εργαλεία, ενσωματώθηκαν σε παραμετροποιημένα μοντέλα τα οποία έπειτα μπορούσαν να αναπαραχθούν με επαναληπτικό τρόπο, με τη διαφοροποίηση των δεδομένων εισόδου. Κατ'αυτόν τον τρόπο, παρήχθησαν σειρές αποτελεσμάτων, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο ανάλυσης, ενώ με την τροποποίηση των τιμών των παραμέτρων επετεύχθη η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ολοκληρωμένο το model builder που αναπτύχθηκε για την εκτέλεση του μοντέλου βροχής απορροής.





Εικόνα 6.3.4 Διαδικασία αυτοματοποίησης της μεθοδολογίας με την χρήση Model Builder

7. Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

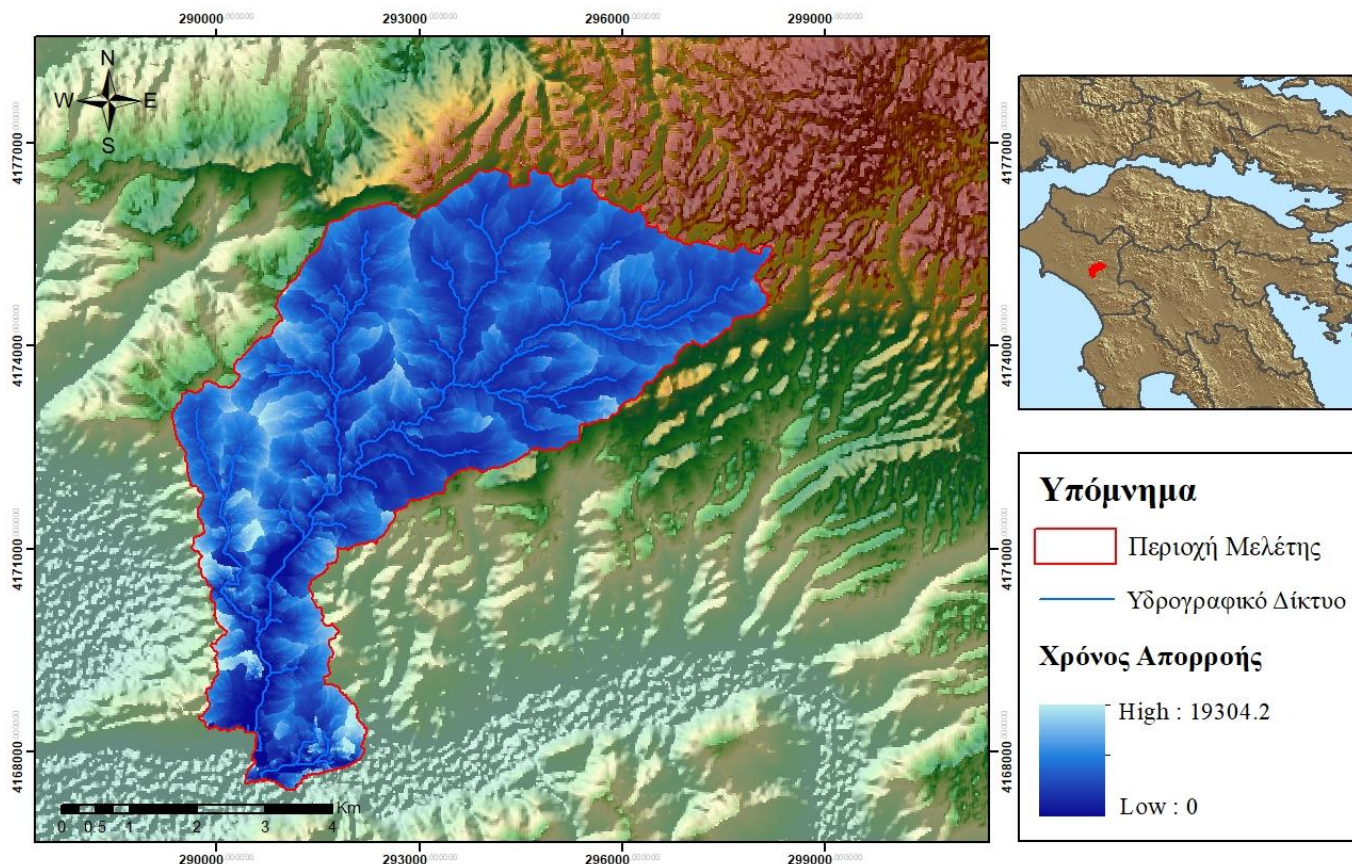
7.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παρούσα εργασία επιτελείται μια προσπάθεια για την μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, αναλύοντας την χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης και αξιοποιώντας ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο βροχής-απορροής, με σκοπό την αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε η περιγραφή και η παρουσίαση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου. Ο αντικειμενικός σκοπός της προσέγγισης ήταν η εξαγωγή των επιπέδων του χρόνου απορροής και των ισόχρονων καμπυλών, καθώς και η σχεδίαση του αντίστοιχου Υδρογραφήματος.

Ο ζητούμενος **χρόνος απορροής** σε κάθε κελί, δύναται να εκτιμηθεί βάσει της ταχύτητας και του μήκους ροής, χρησιμοποιώντας το επίπεδο βαρύτητας $1/V$ (όπου V ταχύτητα ροής). Ο χρόνος απορροής, ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται έτσι ώστε το νερό που καταλήγει με τη μορφή βροχόπτωσης σε οποιοδήποτε σημείο της λεκάνης απορροής να φθάσει στην έξοδο αυτής. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση της βροχόπτωσης που προήλθε από το ατμοσφαιρικό μοντέλο προσομοίωσης. Παρακάτω παρατίθενται τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Η υλοποίηση του μοντέλου βροχής απορροής, απέδωσε συνολικά 12 επίπεδα χρόνου απορροής, όσα δηλαδή και τα τρίωρα βροχόπτωσης (με τη μορφή raster grids) του υπό μελέτη φαινομένου. Ωστόσο, ενδεικτικά παρατίθεται ο χάρτης που αποτυπώνει το πιο δυσμενές σενάριο απορροής, το οποίο συνέβη κατά το το δεύτερο τρίωρο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Α')



Εικόνα 7.1.1 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση μοντέλου προσομοίωσης)

Όπως διαπιστώνεται και από τον παρακάτω χάρτη, ο μέγιστος χρόνος απορροής ή χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 19304,2 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 5,4 ώρες). Το επίπεδο του χρόνου απορροής υποδεικνύει ότι το νερό που βρίσκεται πλησιέστερα στην έξοδο της λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Στον αντίποδα, το νερό που βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 19304,2 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

Το τελικό στάδιο της μεθοδολογίας της προσομοίωσης, περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και τη σύνθεση των ισόχρονων καμπυλών. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, επαναταξινομείται το επίπεδο του χρόνου απορροής. Ο χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ανέρχεται στα 15644 δευτερόλεπτα, δηλαδή κατά προσέγγιση 4,3 ώρες και συνεπώς, θα διαμορφωθούν 6 διαφορετικές κλάσεις, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Ωστόσο, επειδή η έκταση των ισόχρονων της 5^{ης} και της 6^{ης} ώρας θεωρείται αμελητέα, διαμορφώνονται 4 ισόχρονες καμπύλες (προστίθενται οι ισόχρονες της 5^{ης} και της 6^{ης} σε αυτή της 4^{ης}). Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο χάρτης που παράγεται, διαχωρίζεται σε 4 ζώνες, οι οποίες απεικονίζουν της περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα που προκύπτει, αξιοποιείται για τη δημιουργία του ιστογράμματος χρόνου-επιφάνειας και την εκτίμηση του όγκου του νερού που έπεσε κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

Έπειτα, κάνοντας χρήση της πληροφορίας που παρέχεται στο attribute table, του επιπέδου των ισόχρονων, υπολογίζεται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap. Η εκτίμηση της έκτασης κάθε ισόχρονης προκύπτει από την σχέση $Area = Count * cell\ size^2$.

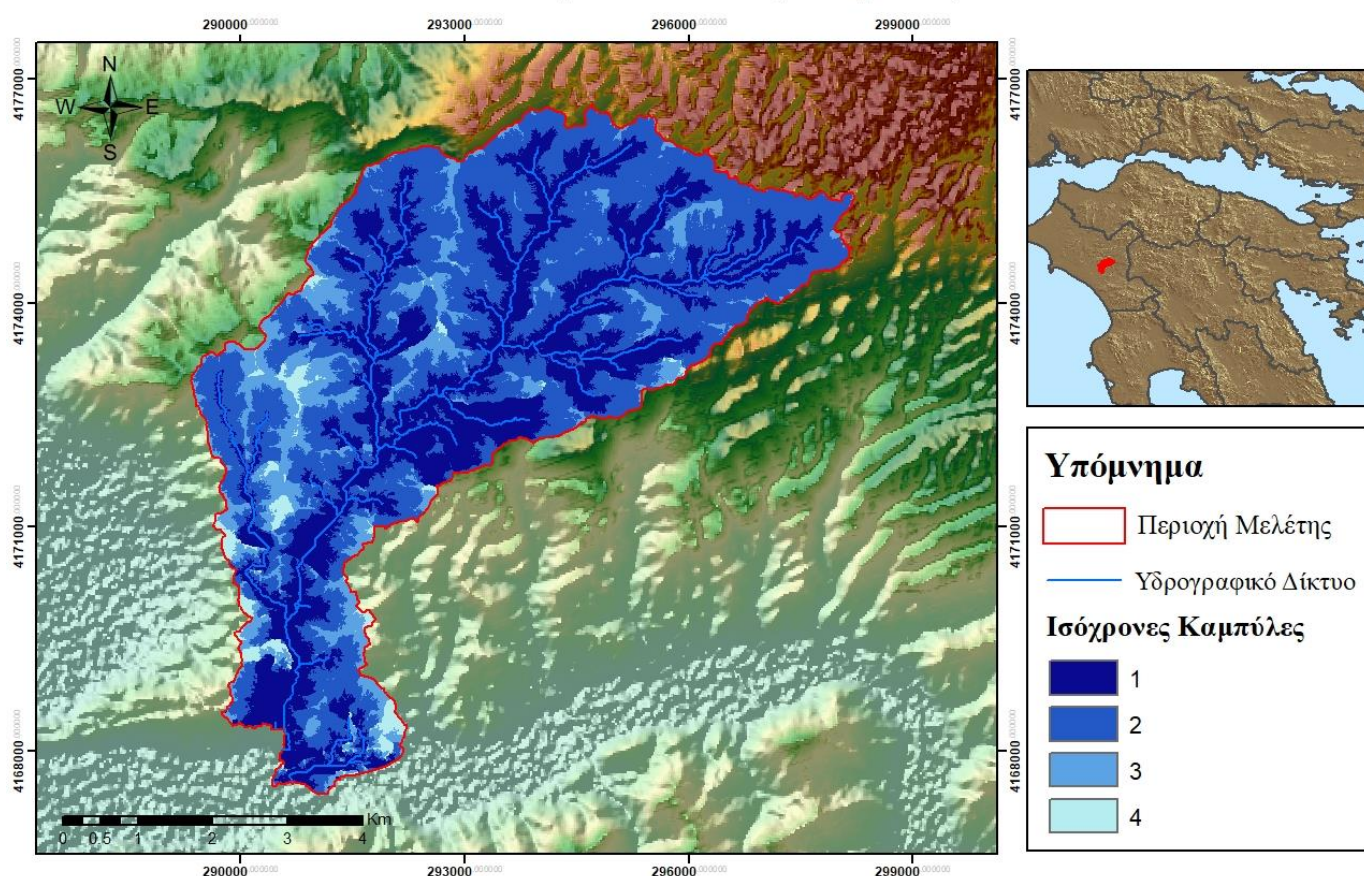
Στον πίνακα (7.1.1) που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	500576	36,21	12,51
2	674495	48.8	16,86
3	176448	12.75	4,41
4	31000	2.23	0,77

Πίνακας 7.1.1 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Α')

Σύμφωνα με τον πίνακα, η δεύτερη ισόχρονη καλύπτει τη μεγαλύτερη έκταση (12,51km²), με την πρώτη ισόχρονη να έπεται (16,86 km²). Η έκταση της τέταρτης ισόχρονης θεωρείται αμελητέα. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των ισόχρονων καμπυλών (Εικόνα 7.1.2).

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Α')



Εικόνα 7.1.2 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση μοντέλου προσομοίωσης)

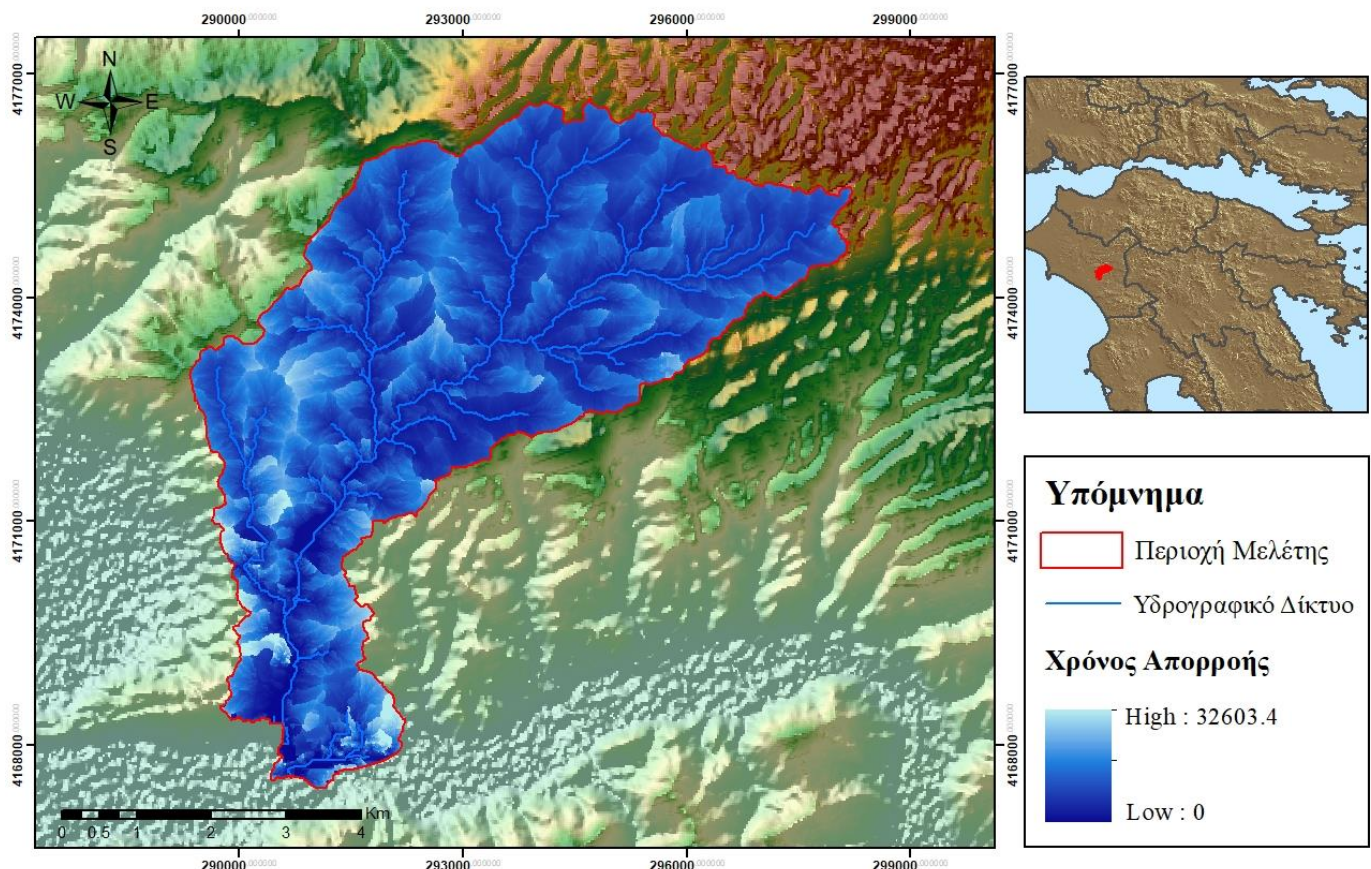
Το υδρολογικό μοντέλο για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής, εφαρμόστηκε για μια σειρά από σενάρια βροχόπτωσης, για τα οποία έχει γίνει η κατάλληλη ανάλυση και περιγραφή. Στη συνέχεια παρατίθενται τα εξαγόμενα αποτελέσματα της προσέγγισης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο βροχόπτωσης. Τα σενάρια που διαμορφώθηκαν συνοψίζονται ως εξής: α) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό), β) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο), γ) βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή, δ) βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή, ε) αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%. Τέλος,

εξετάζεται ένα σενάριο που είναι βασισμένο στην ακραία καταιγίδα που συνέβη στις 5/2/12 στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου.

✚ Σενάριο Β' "Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό)"

Στο σενάριο που αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε η βροχόπτωση να ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, σε κάθε σταθμό αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή ύψους βροχής, που όμως παραμένει σταθερή για κάθε τρίωρο. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ενός μόνο grid, το οποίο ενσωματώθηκε στο υδρολογικό μοντέλο για την υλοποίηση της προσέγγισης

**Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης
του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Β')**



Εικόνα 7.1.3 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά σταθμό)

Ο παραγόμενος χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ανέρχεται σε 32603,4 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 9 ώρες). Γενικά, όσο πιο κοντά βρίσκεται το νερό στην έξοδο της λεκάνης, τόσο πιο λίγο χρόνο για απορροή χρειάζεται. Αντίθετα, το νερό που πέφτει στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 32603,4 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο. Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου του χρόνου απορροής του νερού θα προκύψουν 10 ισόχρονες, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Ωστόσο, επειδή οι εκτάσεις των ισόχρονων της 10ης έως και της 7ης ώρας θεωρούνται από ελάχιστες έως και αμελητέες, διαμορφώνονται 6 ισόχρονες καμπύλες (προστίθενται οι ισόχρονες της 10^{ης} έως και της 7^{ης} ώρας σε αυτή της 6^{ης}). Συνεπώς, ο χρόνος απορροής διαχωρίζεται σε 4 ζώνες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν της περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα αυτό, θα αξιοποιηθεί, για την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατέληξε την κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

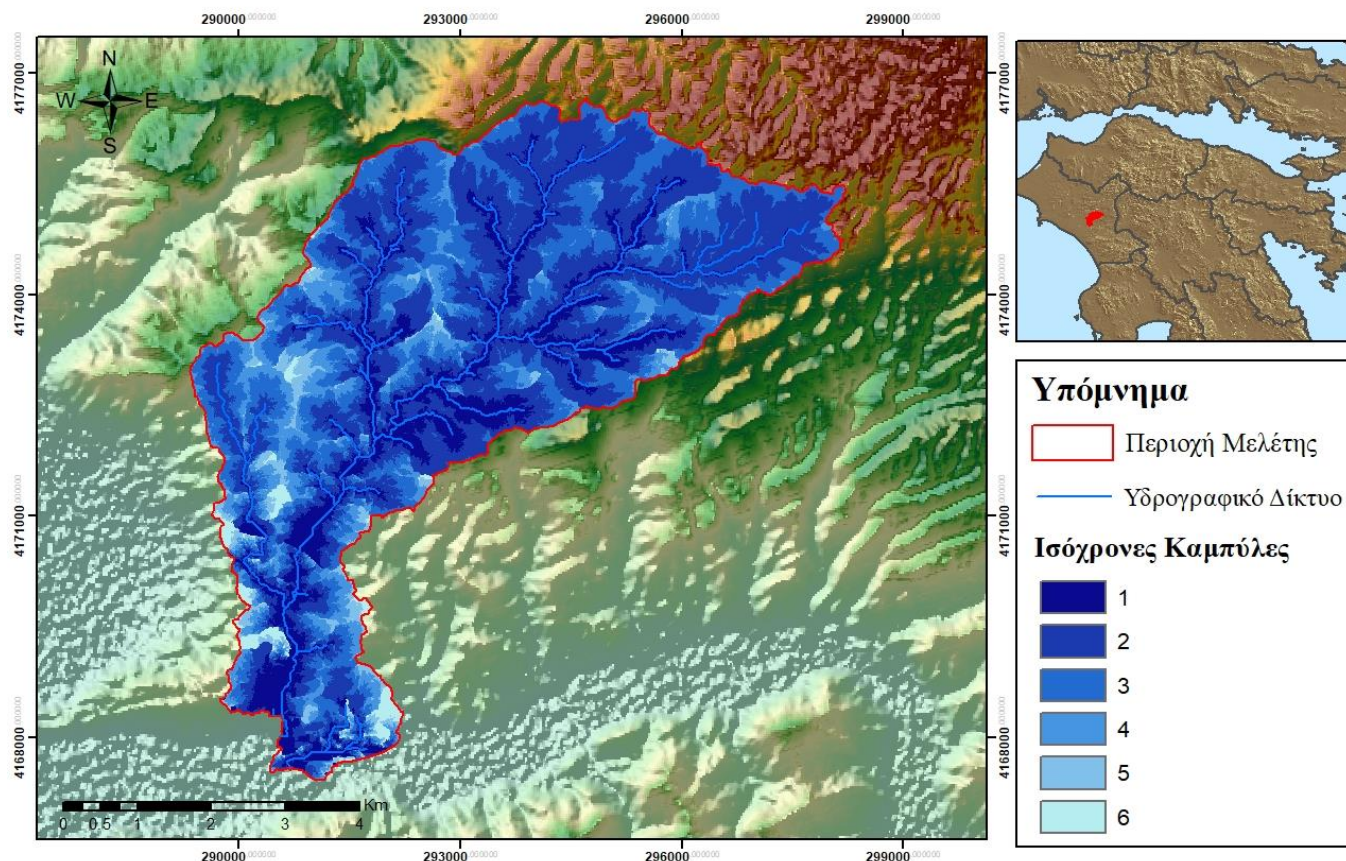
Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap, σύμφωνα με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	232325	16,82	5,81
2	565045	40,9	14,13
3	369989	26,8	9,25
4	145805	10,48	3,62
5	45973	3,33	1,15
6	23382	1,68	0,58

Πίνακας 7.1.2 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Β')

Από τον πίνακα, διαπιστώνεται πως τη μεγαλύτερη έκταση καλύπτει η δεύτερη ισόχρονη (14,13km²), με την τρίτη ισόχρονη να ακολουθεί (9,25km²). Η πρώτη ισόχρονη έχει έκταση 5,81 km². Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν πολύ μικρή έως αμελητέα έκταση. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των ισόχρονων καμπυλών.

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Β')



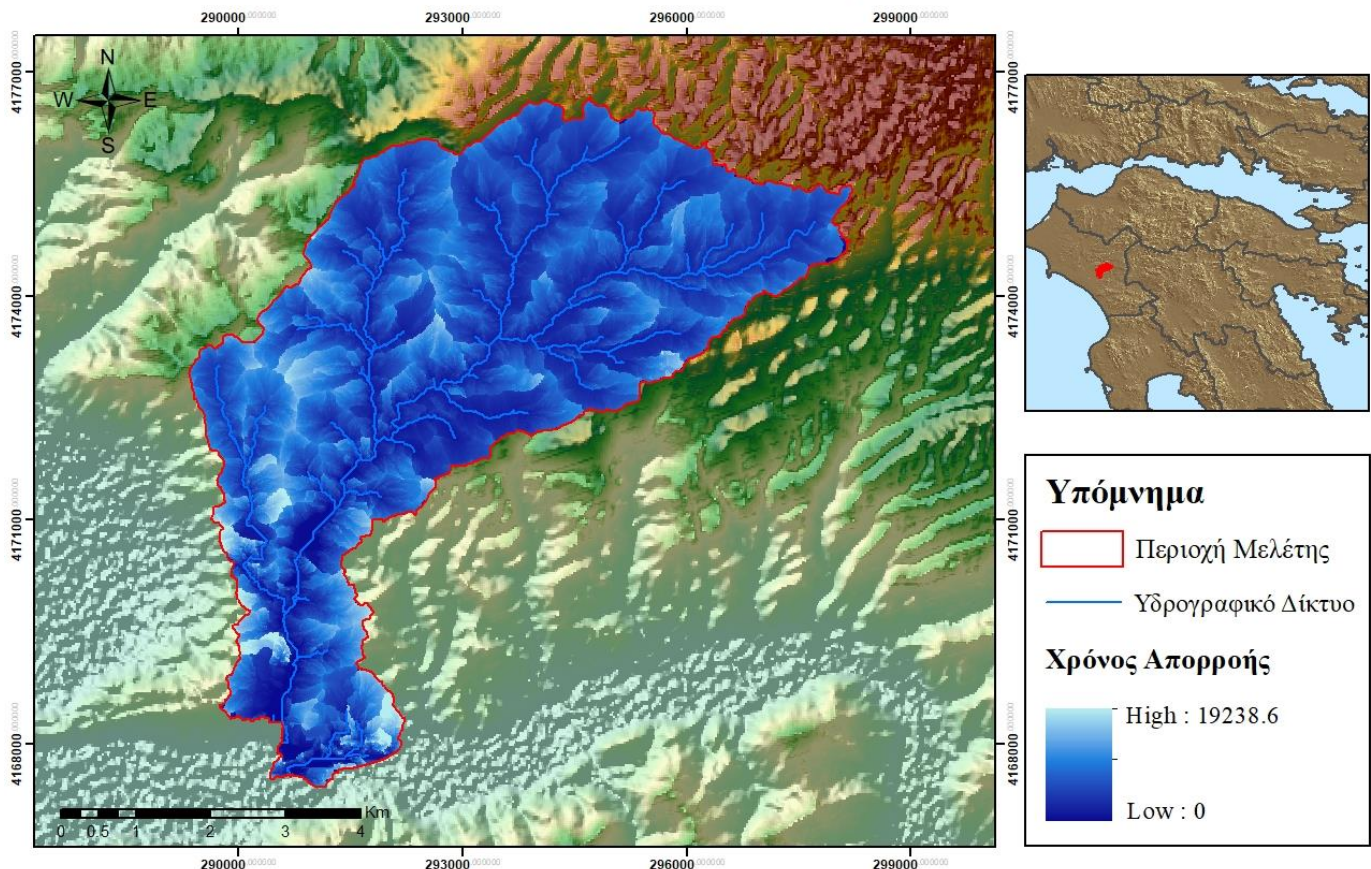
Εικόνα 7.1.4 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά σταθμό)

Σενάριο Γ’ “Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο)”

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έτσι και σε αυτό η βροχόπτωση ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, με τη διαφορά ότι σε κάθε τρίωρο αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή ύψους βροχής. Συνεπώς, η βροχόπτωση ενσωματώνεται στο υδρολογικό μοντέλο για την υλοποίηση της προσέγγισης, ως μία τιμή διαφορετική για κάθε τρίωρο. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν αναπτύχθηκαν grid βροχόπτωσης, καθότι θα ήταν περιττό. Συνολικά η μεθοδολογία, επιτελέστηκε για 12 τρίωρα και ενδεικτικά αναλύεται το 2^ο τρίωρο το οποίο συνιστά το δυσμενέστερο εξ’αυτών. Ο παραγόμενος χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ανέρχεται σε 19238,6 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 5,3 ώρες). Το νερό που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από την έξοδο της λεκάνης, τόσο λιγότερο χρόνο χρειάζεται για απορροή. Από την άλλη πλευρά, το

νερό που εντοπίζεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 19238,6 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Γ')



Εικόνα 7.1.5 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά τρίωρο)

Έτσι, ο χάρτης που συντίθενται, διακρίνεται σε 4 χρονικά διαστήματα, τα οποία αποτυπώνουν της περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα που προκύπτει, θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για να εκτιμηθεί ο όγκος του νερού που έπεσε κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη.

Από την στιγμή που ο χρόνος συρροής του νερού ανέρχεται σε 19238,6 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 5,3 ώρες), διαμορφώνονται 6 ισόχρονες, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Ωστόσο, επειδή οι εκτάσεις των ισόχρονων της 6^{ης} και της 5^{ης} ώρας λογίζονται ως αμελητέες, διαμορφώνονται 4 ισόχρονες καμπύλες (προστίθενται οι ισόχρονες της

6^{ης} έως και της 5^{ης} ώρας σε αυτή της 4^{ης}). Συνεπώς, με τον διαχωρισμό του χρόνου απορροής προκύπτουν 4 ζώνες, οι οποίες αντιστοιχούν στις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατέληξε την κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

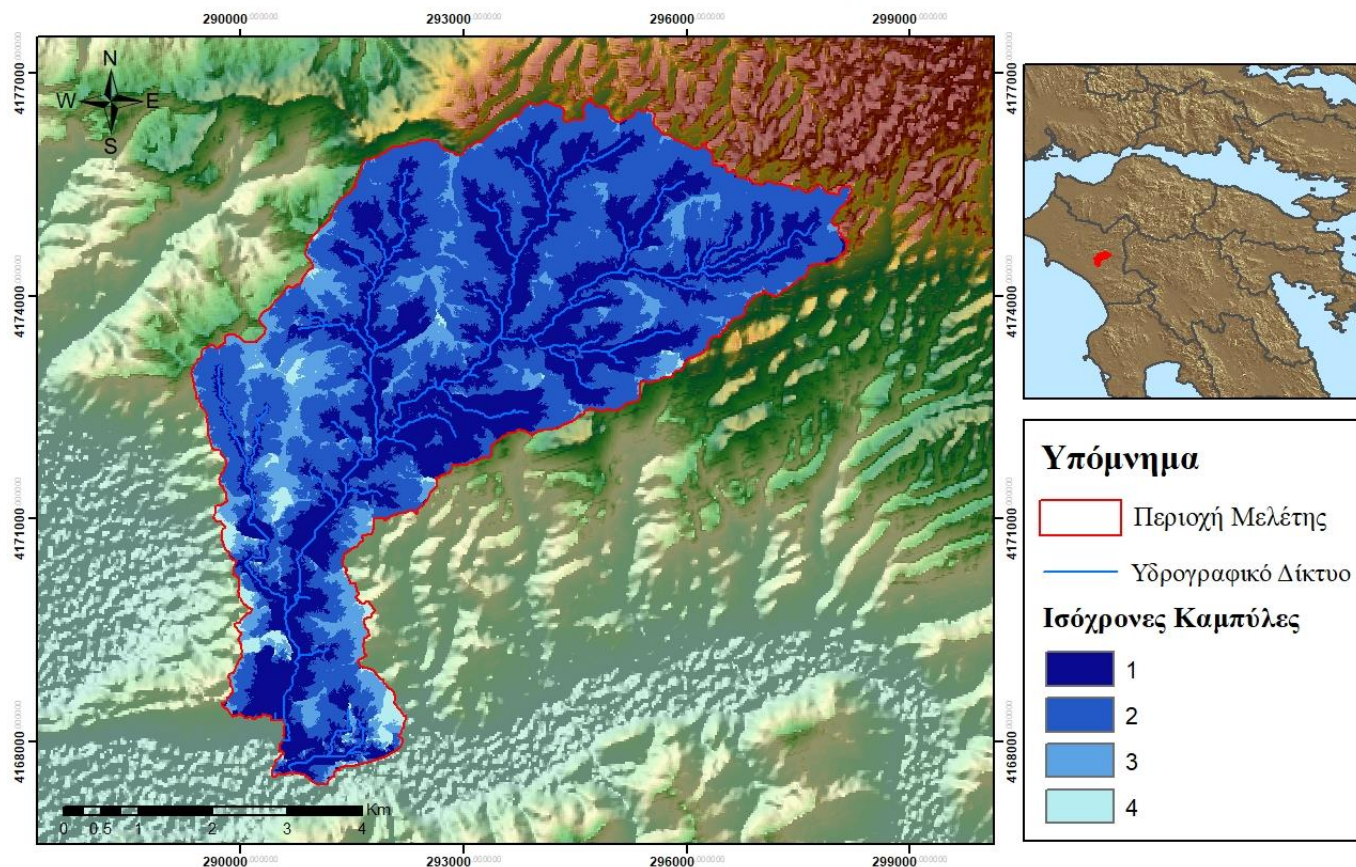
Έπειτα, υπολογίζεται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	541171	39,14	13,53
2	662431	47,9	16,56
3	153484	11,12	3,84
4	25433	1,85	0,64

Πίνακας 7.1.3 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Γ')

Με βάση τον πίνακα, παρατηρείται ότι τη μεγαλύτερη έκταση διαθέτει η δεύτερη ισόχρονη (16,56km²), με την πρώτη ισόχρονη να έπεται (13,53 km²). Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν πολύ μικρή έκταση.

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Γ')



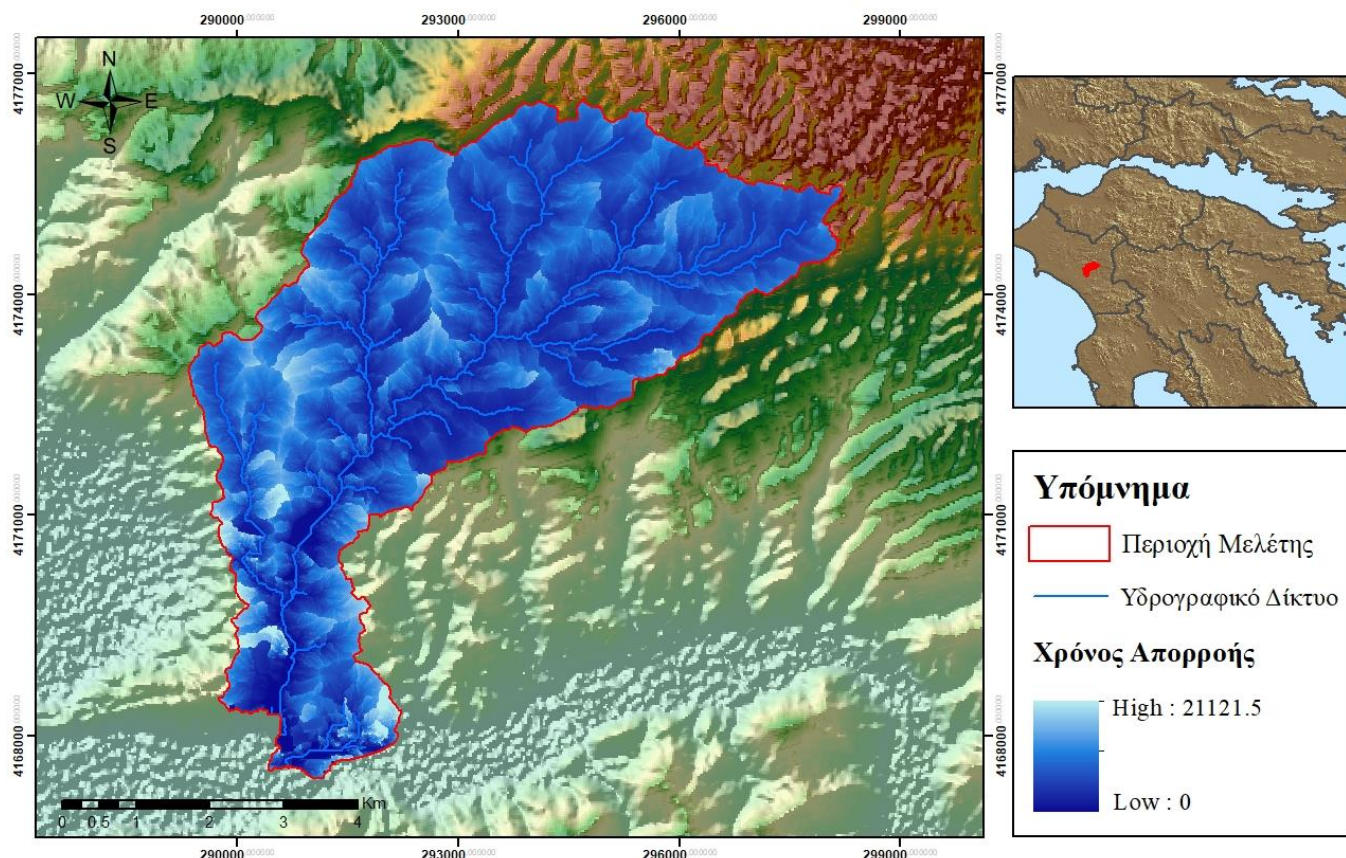
Εικόνα 7.1.6 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή-ανά τρίωρο)

✚ Σενάριο Δ' "Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή"

Έχοντας σαν δεδομένη την αρχική βροχόπτωση, από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, διαμορφώνεται ένα σενάριο κατά το οποίο οι τιμές ακολουθούν κανονική κατανομή. Η εφαρμογή του μοντέλου βροχής απορροής, απέδωσε συνολικά 12 επίπεδα χρόνου απορροής, όσα δηλαδή και τα τρίωρα βροχόπτωσης του υπό μελέτη φαινομένου. Το επίπεδο που επιλέχθηκε για να οπτικοποιηθεί σε χάρτη, αναπαριστά το πιο δυσμενές σενάριο απορροής, το οποίο συνέβη κατά το έβδομο τρίωρο. Όπως διαπιστώνεται και από τον παρακάτω χάρτη, χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 21121,5 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 5,9 ώρες). Το επίπεδο του χρόνου απορροής υποδεικνύει ότι το νερό που βρίσκεται πλησιέστερα στην έξοδο της

λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Στον αντίποδα, το νερό που βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 21121,5 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Δ')



Εικόνα 7.1.7 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή)

Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου του χρόνου απορροής του νερού θα προκύψουν 4 ισόχρονες, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Με τις εκτάσεις των ισόχρονων της 6^{ης} έως και της 5^{ης} ώρας να θεωρούνται από ελάχιστες έως και αμελητέες, εν τέλει διαμορφώνονται 4 ισόχρονες καμπύλες (προστίθενται οι ισόχρονες της 6^{ης} έως και της 5^{ης} ώρας σε αυτή της 4^{ης}). Αυτό σημαίνει πως, ο χρόνος απορροής διακρίνεται σε 4 ζώνες, οι οποίες αναπαριστούν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να καταλήξει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα αυτό, θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, για την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατέληξε την κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή). Έπειτα,

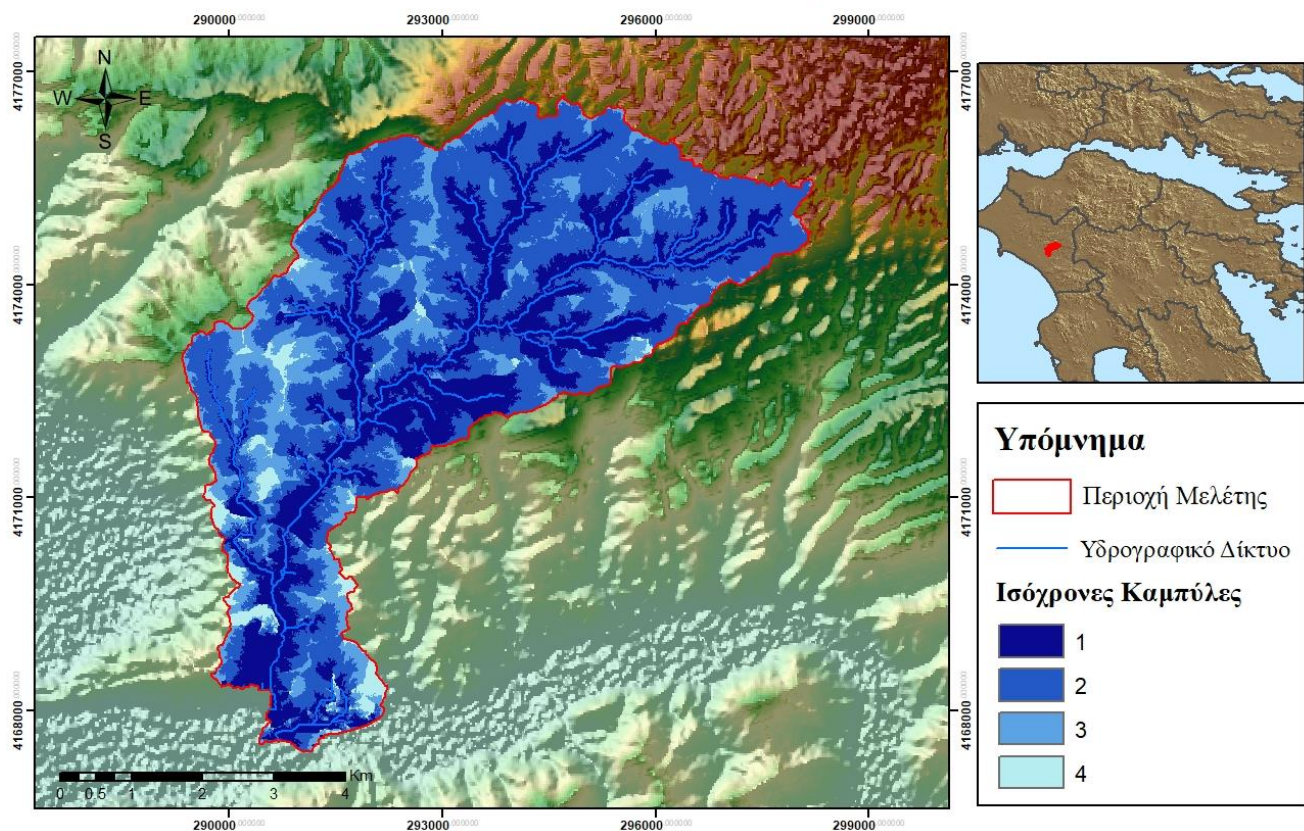
υπολογίζεται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	452502	32,7	11,31
2	673407	48,7	16,83
3	214675	15,51	5,36
4	41935	3,01	1,04

Πίνακας 7.1.4 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Δ')

Με βάση τον πίνακα, παρατηρείται ότι τη μεγαλύτερη έκταση διαθέτει η δεύτερη ισόχρονη (16,83 km²), με την πρώτη ισόχρονη να έπεται (11,31 km²). Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν πολύ μικρή έκταση.

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Δ')

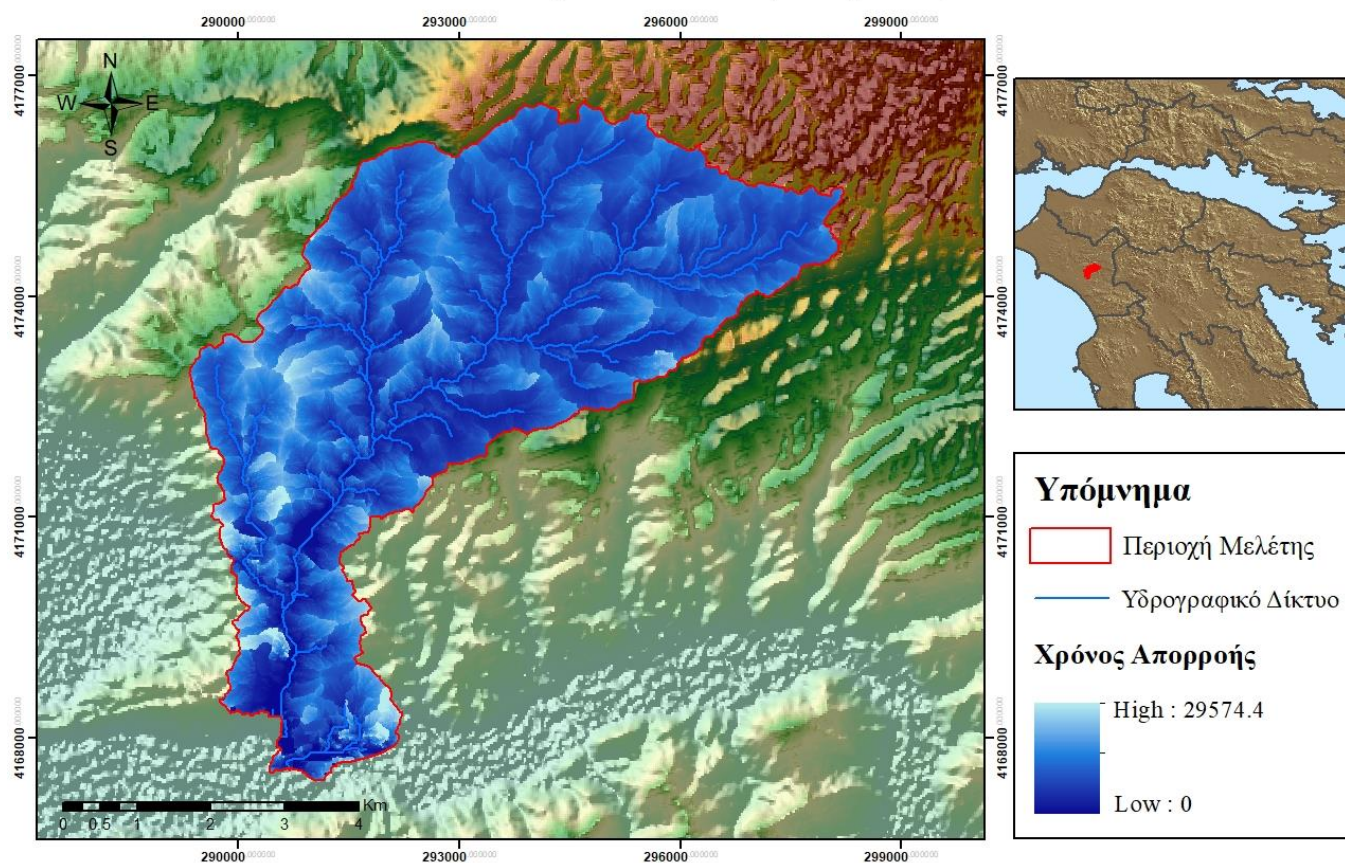


Εικόνα 7.1.8 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή)

✚ Σενάριο Ε' “Βροχόπτωση που ακολουθεί “τυχαία κατανομή”

Σε αυτό το σενάριο, αξιοποιείται μια βροχόπτωση που έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ακολουθεί μια τυχαία κατανομή. Από την υλοποίηση του μοντέλου βροχής απορροής, προήλθαν συνολικά 12 επίπεδα χρόνου απορροής, όσα δηλαδή και τα τρίωρα βροχόπτωσης (με τη μορφή raster grids) του υπό μελέτη φαινομένου. Από το σύνολο των επιπέδων, επιλέχθηκε να απεικονιστεί με τη μορφή χάρτη το δυσμενέστερο σενάριο απορροής, το οποίο συνέβη κατά το δεύτερο τρίωρο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Ε')



Εικόνα 7.1.9 Χάρτης χρόνου συρροής (sec) της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή)

Όπως διαπιστώνεται και από τον παρακάτω χάρτη, ο μέγιστος χρόνος απορροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 29574,4 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 8,2 ώρες). Από το επίπεδο του χρόνου απορροής προκύπτει ότι το νερό που βρίσκεται στην μικρότερη δυνατή

απόσταση από την έξοδο της λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Στον αντίποδα, το νερό που βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 29574,4 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου του χρόνου απορροής του νερού θα προκύψουν 9 ισόχρονες, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Με τις εκτάσεις των ισόχρονων της 9^{ης} έως και της 6^{ης} ώρας να θεωρούνται από ελάχιστες έως και αμελητέες, εν τέλει διαμορφώνονται 5 ισόχρονες καμπύλες (προστίθενται οι ισόχρονες της 9^{ης} έως και της 6^{ης} ώρας σε αυτή της 5^{ης}). Αυτό σημαίνει πως, ο χρόνος απορροής διακρίνεται σε 5 ζώνες, οι οποίες αναπαριστούν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να καταλήξει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα αυτό, θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, για την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατέληξε την κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

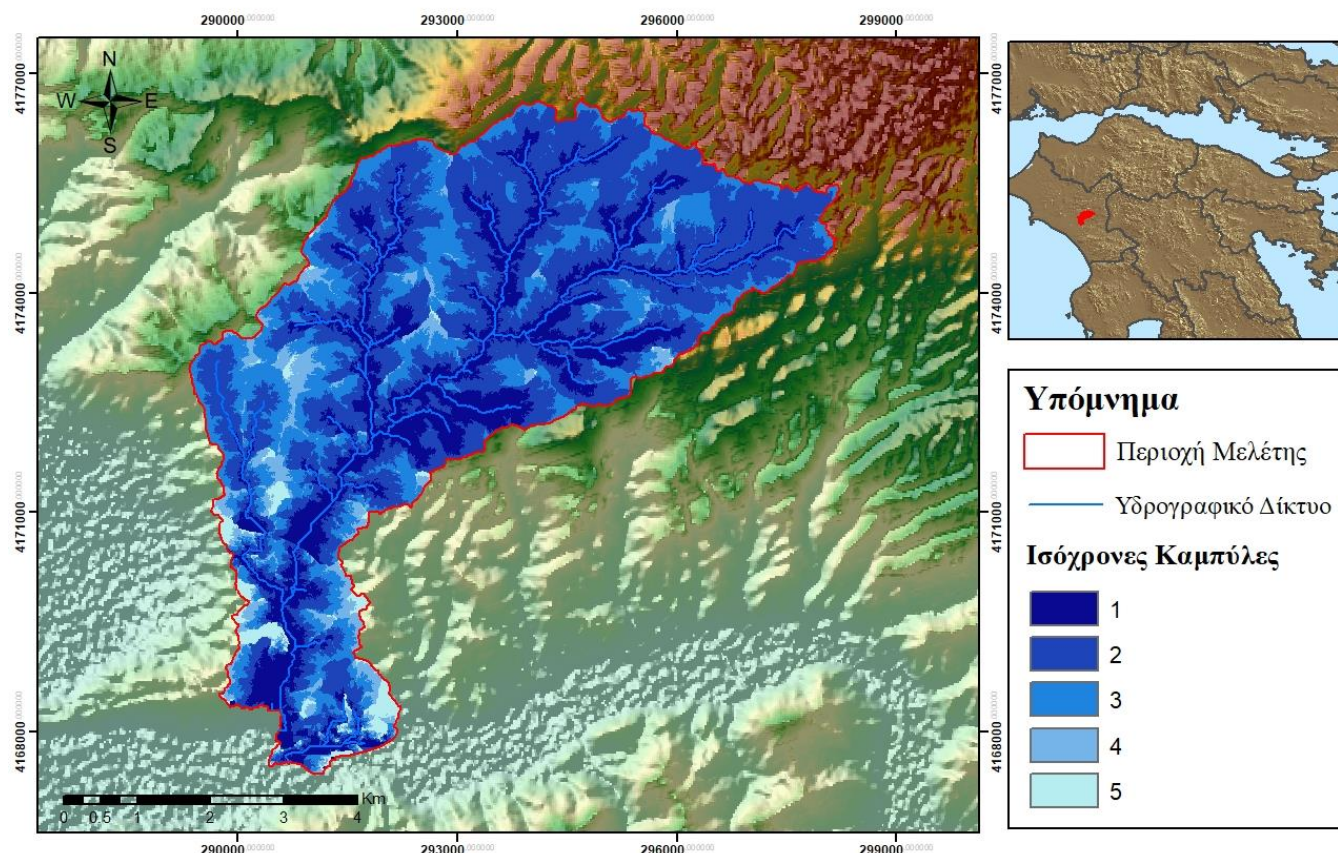
Έπειτα, εκτιμάται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap, σύμφωνα με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	325082	23,52	8,13
2	631284	45,66	15,78
3	317392	22,95	7,93
4	76422	5,53	1,91
5	32339	2,34	0,81

Πίνακας 7.1.5 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Ε')

Από τον πίνακα, προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη έκταση καλύπτει η δεύτερη ισόχρονη (15,78 km²), με την δεύτερη ισόχρονη να ακολουθεί (8,13 km²), με πολύ μικρή διαφορά από την τρίτη (7,93 km²). Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν πολύ μικρή έως αμελητέα έκταση. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των ισόχρονων καμπυλών.

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Ε')



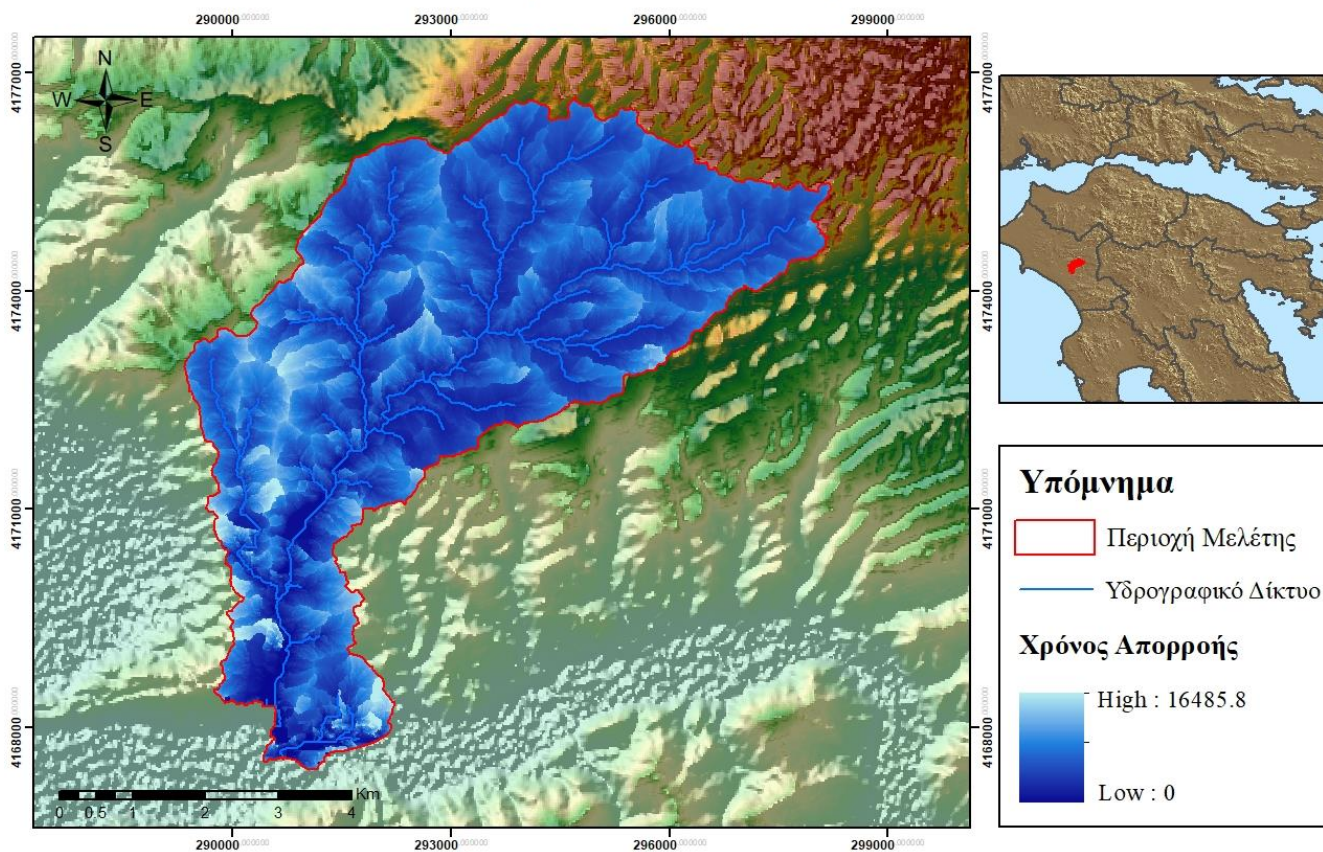
Εικόνα 7.1.10 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή)

✚ Σενάριο ΣΤ' "Αύξηση των τιμών της αρχικής βροχόπτωσης κατά 50%"

Έχοντας σαν δεδομένη την αρχική βροχόπτωση, από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης, διαμορφώνεται ένα σενάριο κατά το οποίο οι τιμές της αυξάνονται κατά 50%. Η εφαρμογή του μοντέλου βροχής απορροής, απέδωσε συνολικά 12 επίπεδα χρόνου απορροής, όσα δηλαδή και τα τρία βροχόπτωσης του υπό μελέτη φαινομένου. Το επίπεδο που επιλέχθηκε για να οπτικοποιηθεί σε χάρτη, αναπαριστά το πιο δυσμενές σενάριο απορροής, το οποίο συνέβη κατά

το δεύτερο τρίωρο. Όπως διαπιστώνεται και από τον παρακάτω χάρτη, χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 16485,8 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 4,6 ώρες). Το επίπεδο του χρόνου απορροής υποδεικνύει ότι το νερό που βρίσκεται πλησιέστερα στην έξοδο της λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Στον αντίποδα, το νερό που βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 16485,8 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο ΣΤ')



Εικόνα 7.1.11 Χάρτης χρόνου συρροής (sec) της περιοχής μελέτης (Αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%)

Το τελικό στάδιο της μεθοδολογίας της προσομοίωσης, περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και τη σύνθεση των ισόχρονων καμπυλών. Ο χρόνος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ανέρχεται στα 16485,8 δευτερόλεπτα, δηλαδή κατά προσέγγιση 4,6 ώρες και συνεπώς, και με την επαναταξινόμηση θα διαμορφωθούν 5 διαφορετικές κλάσεις, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Ωστόσο, επειδή η έκταση των ισόχρονων της 5^{ης} ώρας θεωρείται

αμελητέα, διαμορφώνονται 4 ισόχρονες καμπύλες (προστίθεται οι ισόχρονες της 5^{ης} σε αυτή της 4^{ης}). Κατ' αυτόν τον τρόπο, το επίπεδο των ισόχρονων απαρτίζεται από 4 ζώνες, οι οποίες απεικονίζουν της περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα που προκύπτει, αξιοποιείται για την εκτίμηση του όγκου του νερού που έπεσε κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

Αξιοποιώντας την πληροφορία που παρέχεται από το attribute table, του επιπέδου των ισόχρονων, υπολογίζεται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap. Η εκτίμηση της έκτασης κάθε ισόχρονης προκύπτει από την σχέση $\text{Area} = \text{Count} * \text{cell size}^2$.

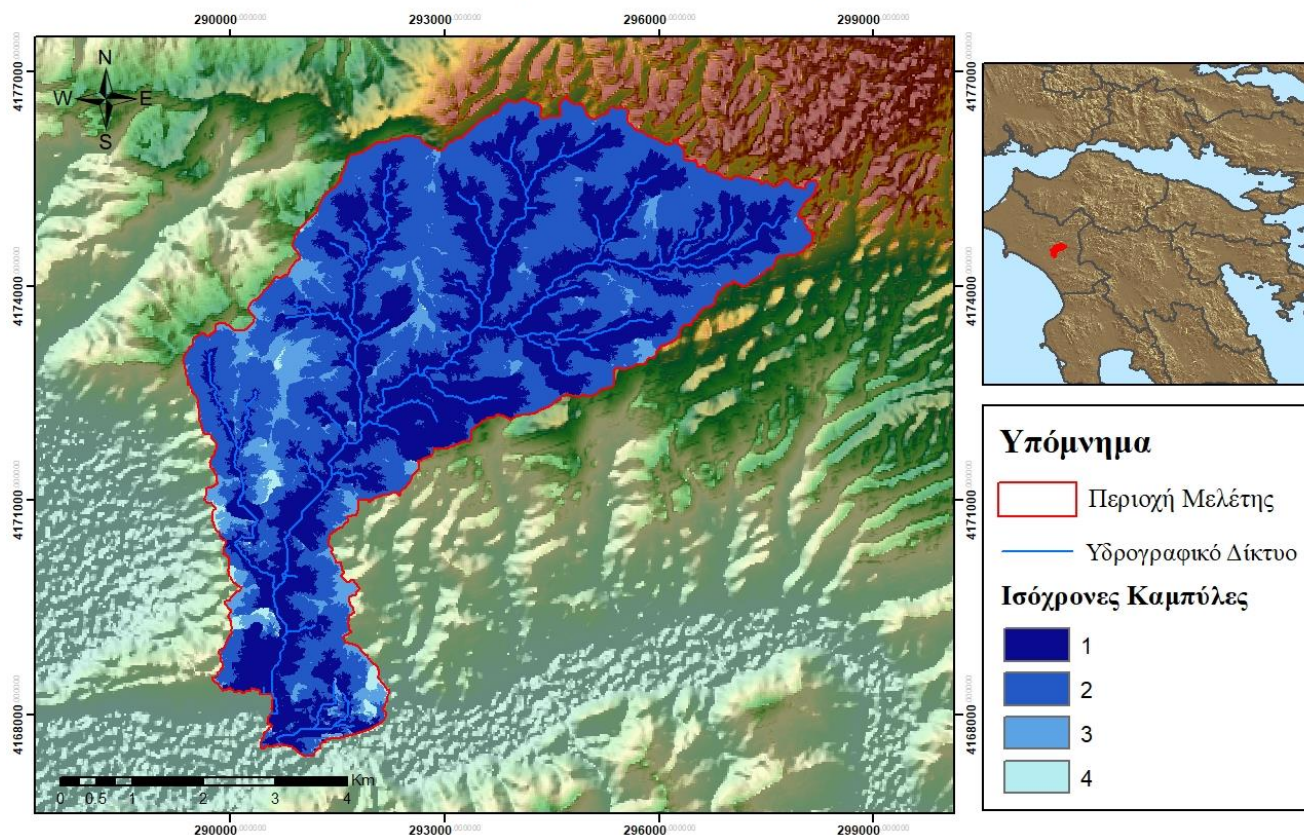
Στον πίνακα (7.1.4) που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	624928	45,11	15,6
2	648184	46,8	16,2
3	98198	7,23	2,5
4	11209	0,81	0,28

Πίνακας 7.1.6 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο ΣΤ')

Σύμφωνα με τον πίνακα, η δεύτερη ισόχρονη καλύπτει τη μεγαλύτερη έκταση (16,2 km²), με την πρώτη ισόχρονη να έπεται (15,6 km²), αλλά με πολύ μικρή διαφορά. Η έκταση των άλλων δύο ισόχρονων καμπυλών θεωρείται αμελητέα. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των ισόχρονων καμπυλών (Εικόνα 7.1.12).

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο ΣΤ')



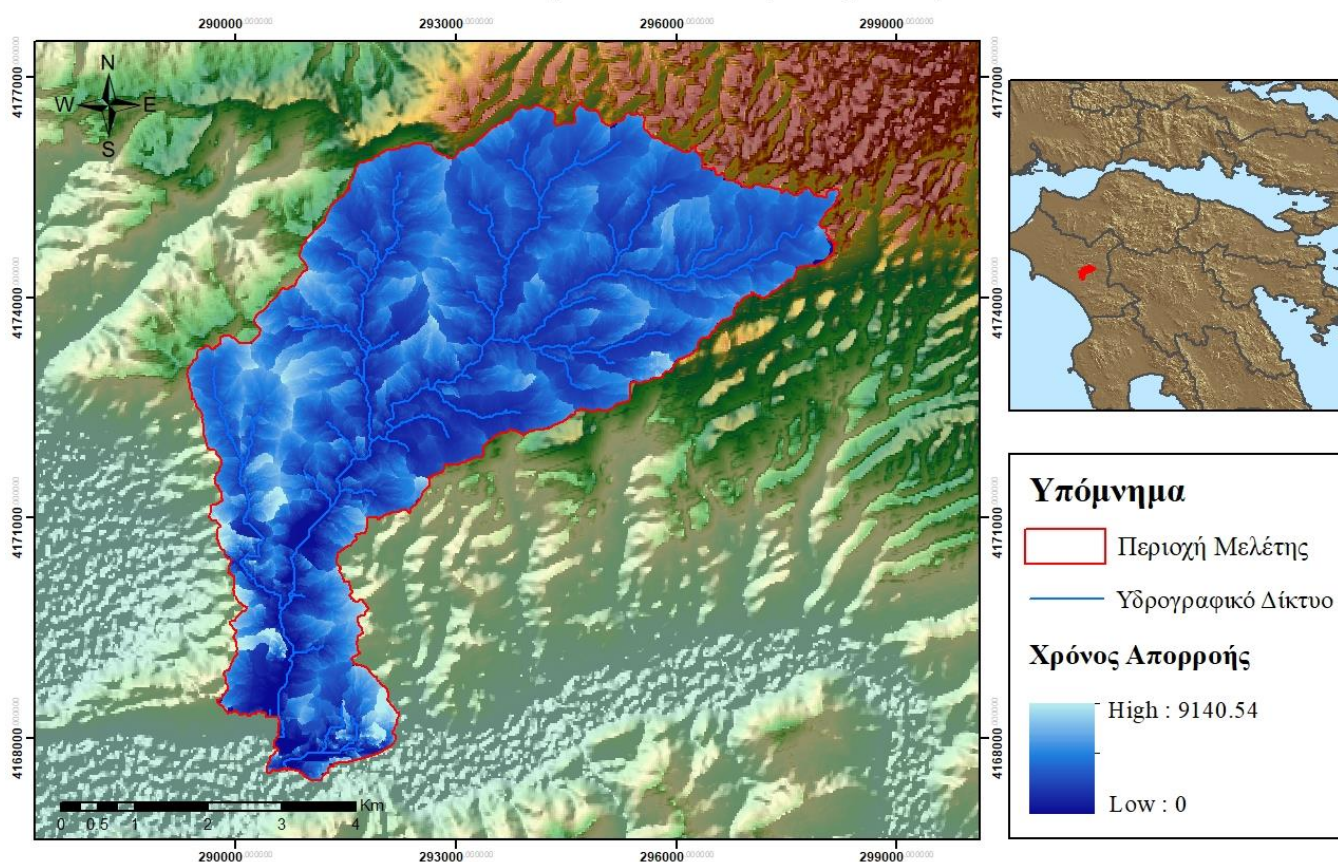
Εικόνα 7.1.12 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%)

Σενάριο Ζ' "Ακραίας βροχόπτωσης"

Στο τελευταίο σενάριο που διαμορφώθηκε, αξιοποιήθηκε η βροχόπτωση που προξένησε το ακραίο πλημμυρικό γεγονός (5/2/12), στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου. Το φαινόμενο διήρκεσε 9 ώρες, οπότε για κάθε ώρα ο αντιστοιχεί μία και μοναδική τιμή ύψους βροχής. Συνεπώς, η βροχόπτωση ενσωματώνεται στο υδρολογικό μοντέλο για την υλοποίηση της προσέγγισης, ως μία τιμή διαφορετική για κάθε ώρα. Ουσιαστικά, δεν αναπτύχθηκαν grid βροχόπτωσης, καθότι θα ήταν περιττό. Η υλοποίηση του μοντέλου βροχής απορροής, απέδωσε συνολικά 9 επίπεδα χρόνου απορροής, όσες δηλαδή και οι ώρες βροχόπτωσης του υπό μελέτη φαινομένου. Γενικά η πλειοψηφία των επιπέδων που εξήχθησαν θεωρούνται ακραία, αλλά εν τέλει επιλέχθηκε να

απεικονιστεί με τη μορφή χάρτη εκείνο που δύναται να προξενήσει τις πιο δυσμενείς επιπτώσεις. Το δυσμενέστερο σενάριο απορροής, συνέβη κατά την πρώτη ώρα. Όπως διαπιστώνεται και από τον παρακάτω χάρτη, ο μέγιστος χρόνος απορροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 9140,54 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 2,5 ώρες). Από το επίπεδο του χρόνου απορροής προκύπτει ότι το νερό που βρίσκεται πλησιέστερα στην έξοδο της λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Αντίθετα, το νερό που βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 9140,54 δευτερόλεπτα, για να καταλήξει στην έξοδο.

Χάρτης Χρόνου Απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Ζ')



Εικόνα 7.13 Χάρτης χρόνου απορροής (sec) της περιοχής μελέτης (Πραγματικό πλημμυρικό γεγονός-5/2/12)

Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου του χρόνου απορροής του νερού δημιουργούνται ισόχρονες, με το καθορισμένο διάστημα να είναι 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Η έκταση της 3^{ης} ισόχρονης ώρας θεωρείται αμελητέα και δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, οπότε διαμορφώνονται 2 ισόχρονες καμπύλες (προστίθεται η ισόχρονη της 3^{ης} σε αυτή της 2^{ης}). Συνεπώς προκύπτουν 2 ζώνες, οι οποίες αντιστοιχούν στις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να καταλήξει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα αυτό, χρησιμοποιείται, για την εκτίμηση του όγκου του νερού που κατέληξε την κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

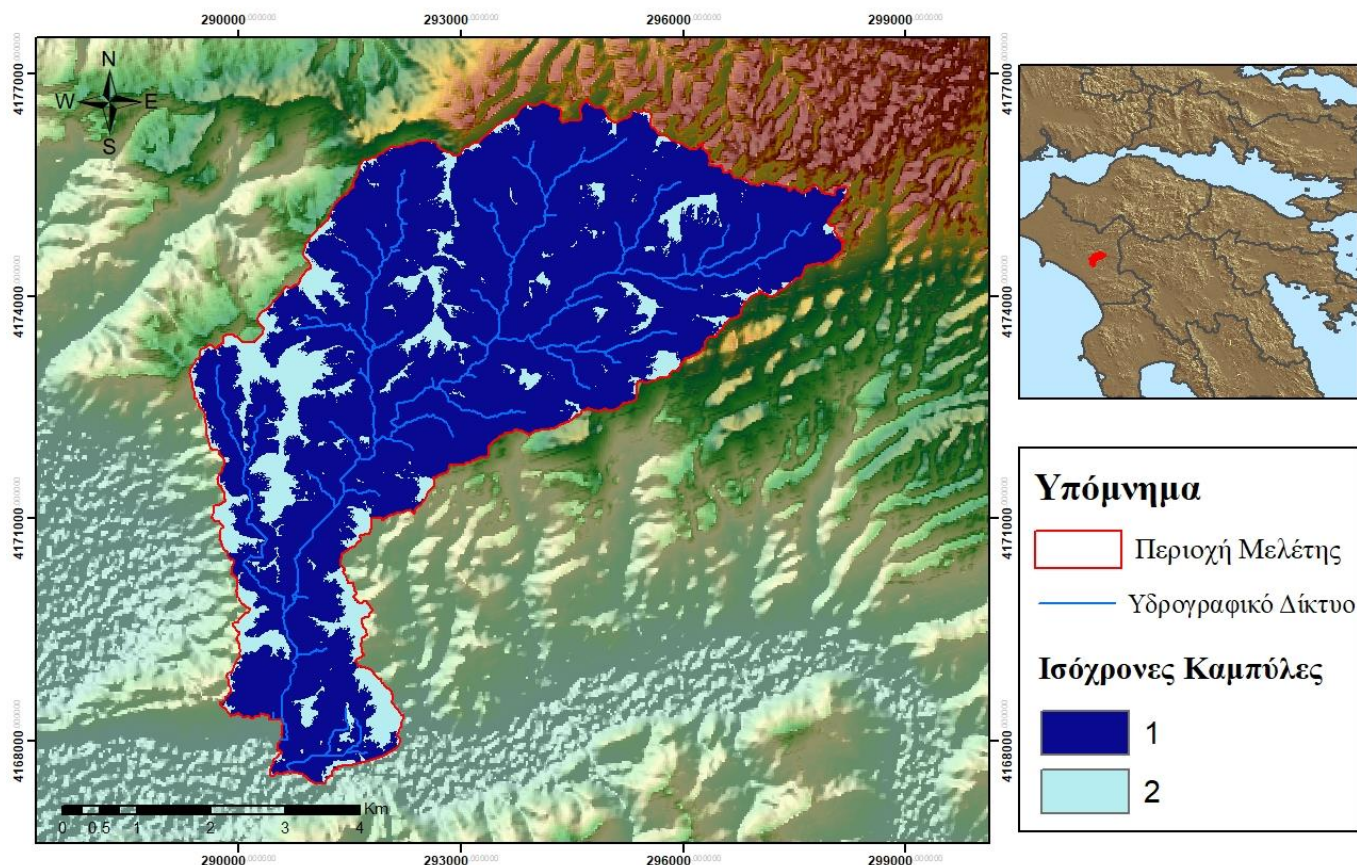
Έπειτα, εκτιμάται η συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap, ενώ στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία της κάθε ισόχρονης.

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km ²)
1	1197208	86,6	29,93
2	185311	13,4	4,63

Πίνακας 7.1.7 Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών (Σενάριο Ζ')

Από τον πίνακα, προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη έκταση καλύπτει η δεύτερη ισόχρονη (15,78 km²), με την δεύτερη ισόχρονη να ακολουθεί (8,13 km²), με πολύ μικρή διαφορά από την τρίτη (7,93 km²). Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν πολύ μικρή έως αμελητέα έκταση. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των ισόχρονων καμπυλών.

Χάρτης Ισόχρονων Καμπυλών της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο Ζ')



Εικόνα 7.1.14 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών της περιοχής μελέτης (Πραγματικό πλημμυρικό γεγονός-5/2/12)

Συνοψίζοντας, το συμπέρασμα και ο γενικός σχολιασμός που δύναται να γίνει για τα επίπεδα των ισόχρονων καμπυλών, που έχουν εξαχθεί τόσο με βάση την αρχική βροχόπτωση, όσο και τα υποθετικά σενάρια, ότι οι χρόνοι απορροής για τα σημεία που αντιστοιχούν στις κοίτες των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου είναι μικρότεροι συγκριτικά με τους χρόνους για τα σημεία της λεκάνης που αντιστοιχούν σε πλαγιές ή πρανή με συνέπεια το νερό να απορρέει επιφανειακά ως στρωματοροή. Ειδικά, στο σενάριο της ακραίας βροχόπτωσης, η επιφανειακή απορροή με την μορφή στρωματοροής είναι πολύ εμφανής. Η εξαγόμενη πληροφορία, που αποδίδεται τόσο από το επίπεδο των χρόνων απορροής όσο και από εκείνο των ισόχρονων, διέπεται από αξιοπιστία και ακρίβεια, καθότι το DEM που χρησιμοποιείται, είναι πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης. Ωστόσο,

είναι ορατά τα προβλήματα που σχετίζονται με γενικεύσεις και εξομαλύνσεις κατά την αποτύπωση του επιπέδου των ισόχρονων. Σε συγκεκριμένα τμήματα της λεκάνης απορροής, κυρίως στα νότια, διαπιστώνεται ότι η απορροή χρειάζεται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης, σε σύγκριση με τμήματα που βρίσκονται βορειότερα. Ουσιαστικά, το γεγονός αυτό προσομοιάζεται σαν να «παγιδεύεται» το νερό στα σημεία αυτά, με συνέπεια να παρεμποδίζεται η απορροή του και οφείλεται κυρίως σε σφάλματα και σε αστοχίες του DEM.

7.1.1 Απόκριση της λεκάνης

Συνοψίζοντας, το μοντέλο βροχής-απορροής, που αξιοποιήθηκε για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής στη λεκάνη του π. Κλαδέου, καταλήγει στη δημιουργία ενός επιπέδου που απεικονίζει τις ισόχρονες καμπύλες. Παράλληλα, έχουν εξαχθεί τα στατιστικά (zonal stats) σε μορφή πίνακα, έτσι ώστε να εκτιμηθεί το μέσο ύψος βροχής (σε m) που έπεσε το κάθε τρίωρο (στην περίπτωση της πραγματικής βροχόπτωσης και των αντίστοιχων σεναρίων) σε κάθε ισόχρονη.

Ο τελικός στόχος, είναι η κατασκευή του υδρογραφήματος της απορροής, για το σημείο εξόδου της λεκάνης. Με βάση τον πίνακα των στατιστικών στοιχείων (αριθμός κελιών, έκταση) για τις ισόχρονες καμπύλες, αλλά και την μέση τιμή της βροχόπτωσης που καταλήγει σε κάθε ισόχρονη το κάθε τρίωρο μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του νερού που δέχεται ανά μία ώρα, κάθε μία κλάση ισόχρονων καμπυλών.

Το φαινόμενο διήρκεσε συνολικά 36 ώρες (12 τρίωρα βροχόπτωσης) και όπως προαναφέρθηκε έχουν προκύψει 12 επίπεδα ισόχρονων καμπυλών. Η ανάλυση στην παρούσα προσέγγιση, έχει αναχθεί σε ωριαία βάση. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ορίσει τις ζώνες των ισόχρονων (π.χ z_1, z_2, z_3, z_4), τις εκτάσεις τους (π.χ A_1, A_2, A_3, A_4), και την βροχόπτωση (R_1, R_2, R_3, R_4), μπορούν να εκτιμηθούν οι αντίστοιχοι όγκοι νερού (π.χ V_1, V_2, V_3, V_4) σε m^3 , για κάθε επίπεδο ισόχρονων καμπυλών κάθε ώρα του υπό μελέτη φαινομένου. Συνεπώς, για την πρώτη ώρα του φαινομένου, αξιοποιείται το επίπεδο ισόχρονων καμπυλών και οι μέσες τιμές βροχόπτωσης του πρώτου τριώρου. Ο όγκος του νερού που καταλήγει στην ισόχρονη της πρώτης ώρας υπολογίζεται από την σχέση $V_1 = (R_1 * A_1) / 3$, ο όγκος του νερού που καταλήγει στην ισόχρονη της δεύτερης ώρας

υπολογίζεται από την σχέση $V_2 = (R_2 \cdot A_2) / 3$, κοκ. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για την δεύτερη και την τρίτη ώρα του φαινομένου. Για την τέταρτη έως και την έκτη ώρα, ναι μεν ακολουθείται η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, αλλά με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται το επίπεδο των ισόχρονων και οι μέσες τιμές βροχόπτωσης του δεύτερου τριώρου. Τέλος, φτάνοντας στην 34^η έως και την 36^η ώρα, αξιοποιούνται το επίπεδο των ισόχρονων και οι μέσες τιμές βροχόπτωσης του δωδεκάτου τριώρου.

			VALUE	Μέση βροχόπτωση				Μέση βροχόπτωση	
			1	0.005410609				0.01574502769	
			2	0.005840196				0.01554424253	
			3	0.005699784				0.01527352356	
			4	0.005311882				0.01571289563	
			5	0.004933645				0	
			6	0.004462064				0	
Ισόχρονη 1ου τριώρου				1st hour	2nd hour	3rd hour	4th hour	5th hour	6th hour
VALUE	COUNT	Area							
1	243596	6089900	0	10983.3564	10983.35636	10983.3564	65679.85816	65679.85816	65679.85816
2	581152	14528800	0	28283.6813	28283.68134	28283.6813	87370.94889	87370.94889	87370.94889
3	363472	9086800	0	17264.2664	17264.26643	17264.2664	22458.18904	22458.18904	22458.18904
4	129807	3245175	0	5745.99503	5745.995025	5745.99503	4059.164704	4059.164704	4059.164704
5	41121	1028025	0	1690.63667	1690.636669	1690.63667	0	0	0
6	23371	584275	0	869.024085	869.0240853	869.024085	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0
Ισόχρονη 2ου τριώρου									
VALUE	COUNT	Area							
1	500576	12514400			Palm 1	Palm 2	Palm 3	Palm 4	Palm 5
2	674495	16862375		Όγκος νερού	10983.35636	39267.0377	56531.30412	116973.801	177751.7052
3	176448	4411200		Παροχή	3.050932321	10.9075105	15.70314003	32.49272249	49.37547366
4	31000	775000		Χρονος (h)	1	2	3	4	5

Εικόνα 7.1.1.1 Διαδικασία υπολογισμού των παλμών του νερού ανά μονάδα χρόνου.

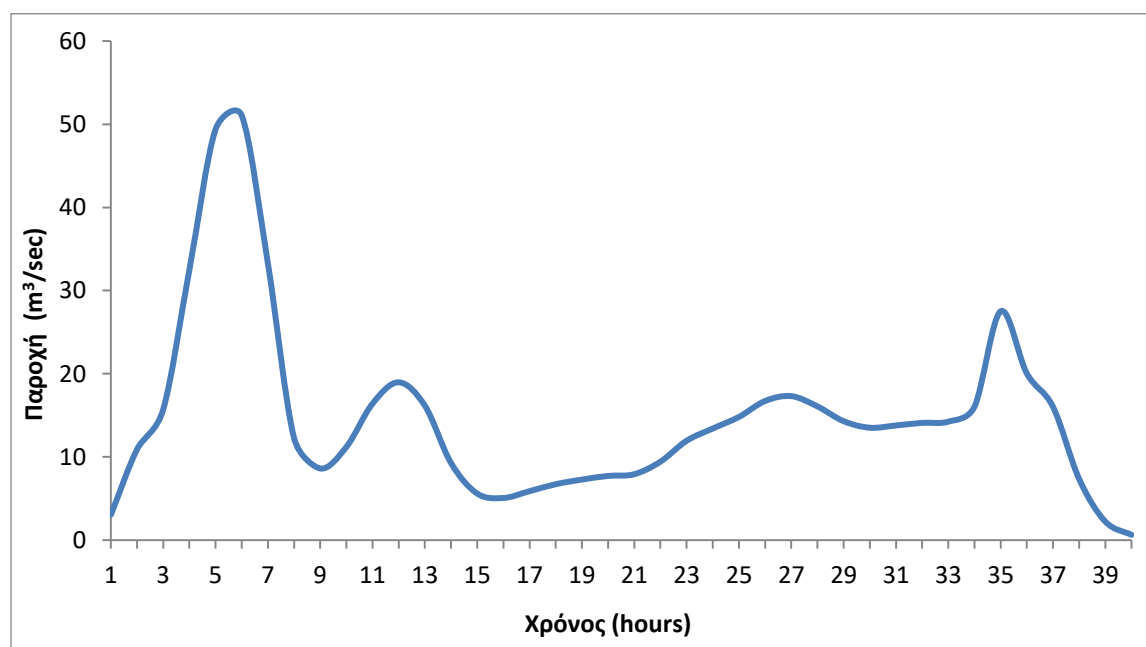
Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το διάγραμμα χρόνου-επιφάνειας, ενώ εκτιμώντας τους παλμούς του νερού που πέφτουν στη μονάδα του χρόνου (που έχει οριστεί στις ισόχρονες καμπύλες), σχεδιάζεται το σύνθετο μοναδιαίο υδρογράφημα για το υπό μελέτη πλημμυρικό φαινόμενο. Οι τιμές των παλμών ορίστηκαν με τον ακόλουθο τρόπο. Ο πρώτος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που δέχτηκε την πρώτη ώρα η πρώτη ισόχρονη. Ο δεύτερος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που έπεσε την δεύτερη ώρα στην πρώτη ισόχρονη και την πρώτη ώρα στην δεύτερη ισόχρονη. Με την ίδια λογική, υπολογίζονται και οι υπόλοιποι παλμοί, εκτιμώντας έτσι την παροχή στην έξοδο της λεκάνης.

Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, υλοποιείται η εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που αναπαριστά τη διακύμανση της παροχής ανά ώρα στην έξοδο της

υπό μελέτης λεκάνης. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι σχηματικές αναπαραστάσεις του συνόλου των παλμών νερού για κάθε ώρα του φαινομένου, καθώς και η παράθεση των υδρογραφημάτων, για κάθε σενάριο βροχόπτωσης.

🚧 Σενάριο Α': Περίπτωση βροχόπτωσης Ατμοσφαιρικού Μοντέλου προσομοίωσης

Με το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα (σχήμα), το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου, διερευνάται η απόκριση της στην καταιγίδα που έλαβε χώρα στις . Το γεγονός, ότι το υδατόρεμα που μελετάται, αποτελεί έναν εκ των παραπόταμων του Αλφειού ποταμού, διευκολύνει την ανάλυση και την ερμηνεία του υδρογραφήματος που προέκυψε από την προσομοίωση μιας πραγματικής βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής.



Σχήμα 7.1.1.1 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Περίπτωση βροχόπτωσης Ατμοσφαιρικού Μοντέλου προσομοίωσης)

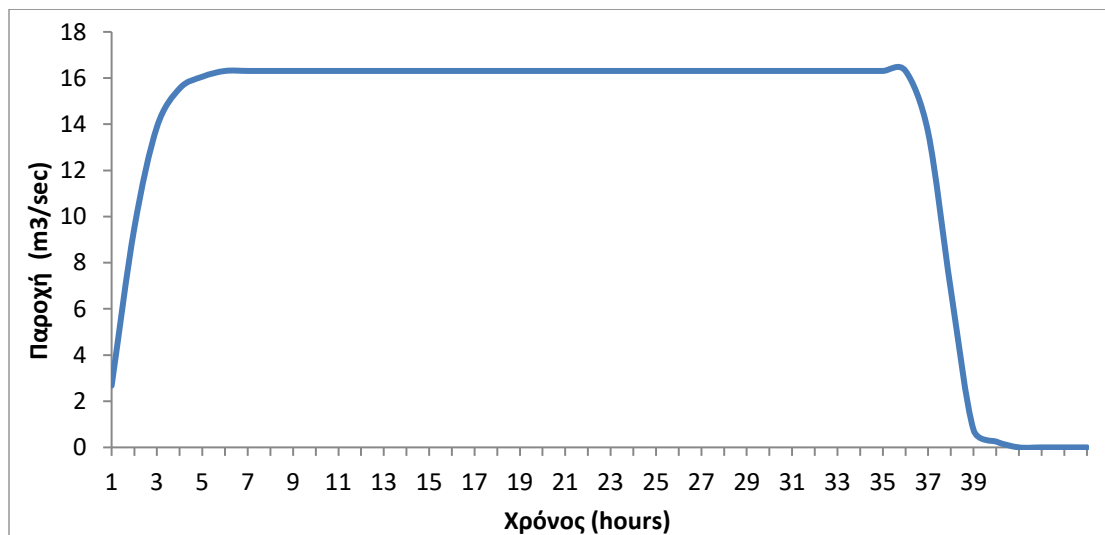
Το εξαγόμενο υδρογράφημα έχει τυπική μορφή, αποτέλεσμα μιας αιφνίδιας πλημμύρας (flash flood), ενώ εύκολα διαπιστώνεται ότι η απόκριση της λεκάνης στην κατακρήμνιση είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Το υδρογράφημα, είναι απότομο με μικρούς χρόνους βάσης και απότομα αυξανόμενους κλάδους. Συνολικά διακρίνονται δύο αιχμές παροχής, εκ των οποίων η μία είναι και μέγιστη. Η πρώτη αιχμή που συνιστά και τη μέγιστη παροχή του υδρογραφήματος, σημειώνεται την 6^η ώρα (κρίσιμος χρόνος), και είναι της τάξης των 51,1 m³/s. Η δεύτερη

μεγαλύτερη παροχή, σημειώνεται 35 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, και ανέρχεται στα $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$ και ενδέχεται να προξενείται από την συσσωρευμένη βροχόπτωση των προηγούμενων ωρών. Γενικά, παρατηρώντας το υδρογράφημα και την αντίστοιχη βροχόπτωση, συμπεραίνεται πως η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Τέλος, η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου εκτιμάται κατά προσέγγιση στα $13,6 \text{ m}^3/\text{s}$, με την επιφανειακή απορροή να έχει συνολικό όγκο νερού περίπου $2.100.000 \text{ m}^3$.

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι τόσο η καμπύλη της παροχής όσο και οι μεγαλύτερες τιμές της, ακολουθούν την πορεία της βροχόπτωσης καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου. Αυτό αποτελεί και μια ένδειξη ότι η απόκριση της λεκάνης του υδατορέματος είναι άμεση σε ακραία επεισόδια.

🚧 Σενάριο Β': Ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης (ανά σταθμό)

Με βάση την αρχική βροχόπτωση του ατμοσφαιρικού μοντέλο, διαμορφώθηκε ένα υποθετικό σενάριο, κατά το οποίο η βροχόπτωση ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. Η ανάλυση αυτή, πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο σταθμού και απέδωσε ένα συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου. Ο βασικός στόχος, είναι η διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης, στην υποθετική περίπτωση κατά την οποία θα συμβεί μια καταιγίδα αυτής της μορφής.



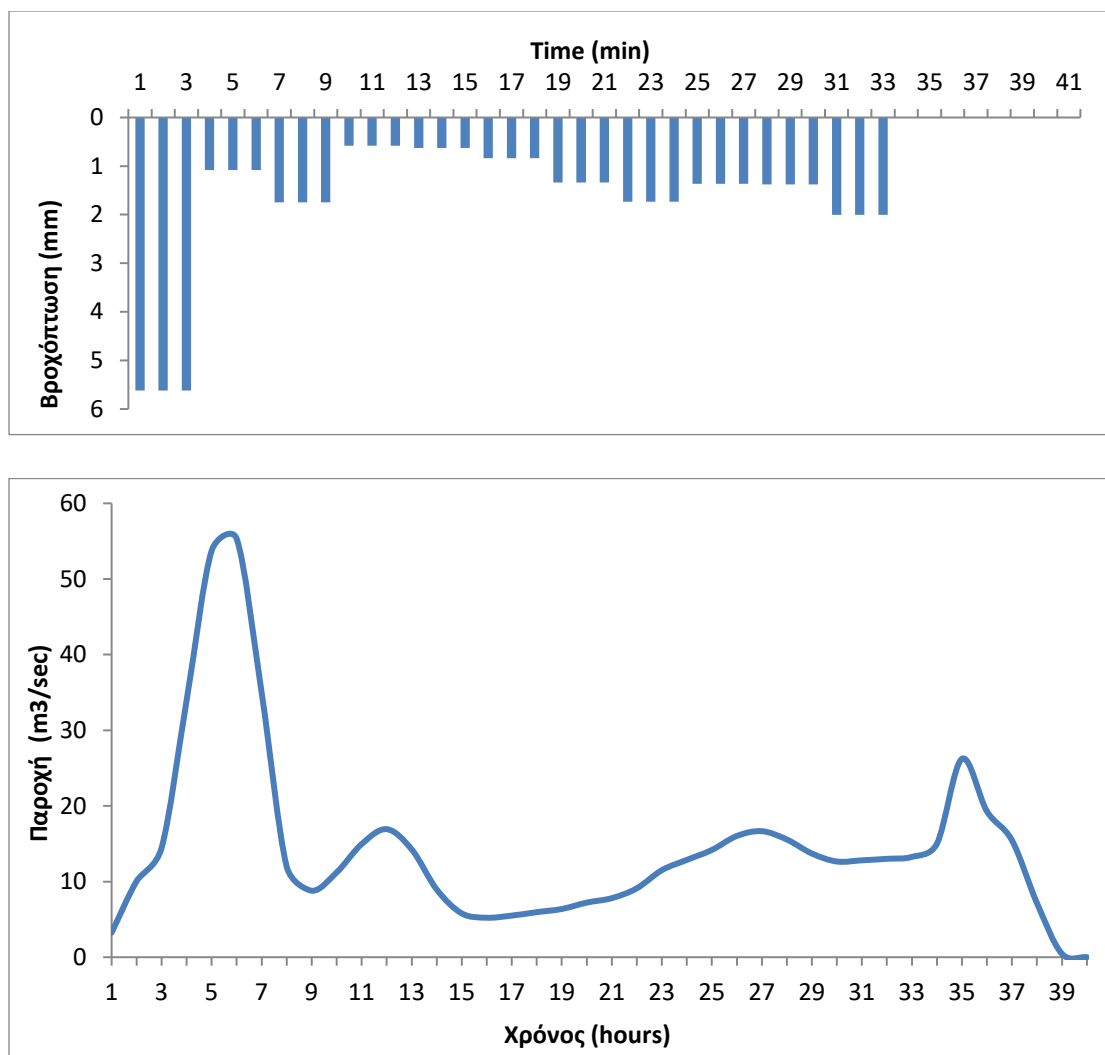
Σχήμα 7.1.1.2 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης ανά σταθμό)

Το εξαγόμενο υδρογράφημα έχει αναμενόμενη μορφή, αποτέλεσμα της ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης στην λεκάνη. Η βροχόπτωση που κατέληξε στην λεκάνη είχε τις ίδιες τιμές για κάθε τρίωρο. Η μέγιστη τιμή της παροχής είναι $16,3 \text{ m}^3/\text{s}$ και διατηρείται καθ'όλη τη διάρκεια του φαινομένου, μέχρι το σημείο που αρχίζει να φθίνει το φαινόμενο, όπως παρατηρείται και στο σχήμα.

🚧 Σενάριο Γ': Ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης (ανά τρίωρο)

Όπως και παραπάνω, διαμορφώθηκε ένα σενάριο βροχόπτωσης που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή με βάση την αρχική βροχόπτωση του ατμοσφαιρικού μοντέλου. Η ανάλυση αυτή, πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο τριώρου και απέδωσε ένα συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου. Ο βασικός στόχος, είναι η διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης, στο ενδεχόμενο που συμβεί μια καταιγίδα αυτής της μορφής. Ταυτόχρονα, στο έτερο σχήμα, απεικονίζεται με τη μορφή ιστογράμματος η κύμανση της βροχόπτωσης, ανά ώρα, πάνω από τη λεκάνη απορροής.

Η μορφή του εξαγόμενου υδρογραφήματος θεωρείται τυπική, ως επακόλουθο μιας αιφνίδιας, ακραίας πλημμύρας, ενώ από το διάγραμμα προκύπτει ότι η απόκριση της λεκάνης στην έντονη κατακρήμνιση είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Στο υδρογράφημα, παρατηρούνται μικροί χρόνοι βάσης και απότομα αυξανόμενοι κλάδοι. Οι αιχμές παροχής είναι δύο, με την μία να είναι και μέγιστη. Η πρώτη αιχμή αποτελεί τη μέγιστη παροχή του υδρογραφήματος, παρατηρείται την 6^η ώρα (κρίσιμος χρόνος), και ανέρχεται στα $55,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Μετά από 35 ώρες από την έναρξη της βροχόπτωσης, προξενείται και η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή η οποία είναι της τάξης των $26,2 \text{ m}^3/\text{s}$ και το πιθανότερο είναι πως προξενείται από την συσσωρευμένη βροχόπτωση των προηγούμενων ωρών. Γενικά, το συμπέρασμα που προκύπτει από το υδρογράφημα και το αντίστοιχο υετογράφημα, είναι πως όσο μειώνεται η βροχόπτωση, μειώνεται και η αιχμή της παροχής. Τέλος, η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου εκτιμάται κατά προσέγγιση στα $13,3 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο συνολικού όγκου νερού υπολογίζεται περίπου στα $2.060.000 \text{ m}^3$.

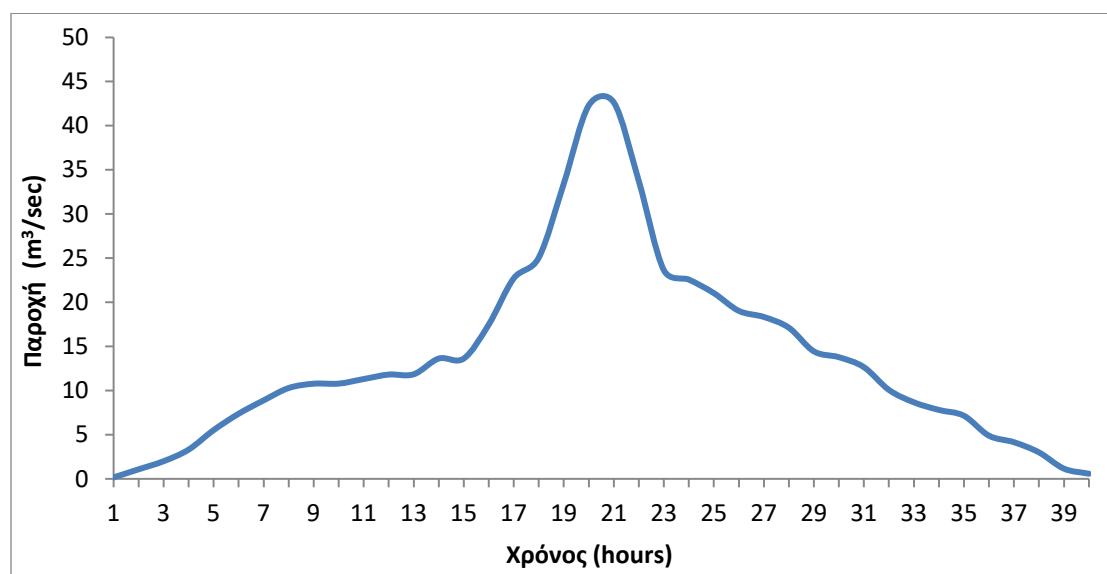


Σχήμα 7.1.1.3 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο ομοιόμορφης κατανομής της βροχόπτωσης-ανά τρίωρο)

Συνοψίζοντας, από τα δύο σχήματα παρατηρείται ότι η καμπύλη της παροχής και οι μεγαλύτερες τιμές αυτής, καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου, ακολουθούν την κατανομή της βροχόπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση της λεκάνης του υδατορέματος ενδέχομένως να είναι άμεση σε ακραία επεισόδια. Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται, οι ώρες που σημειώνονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής, δεν προξενούνται οι μέγιστες τιμές της παροχής. Επίσης, στην περίπτωση που η απόκριση της λεκάνης του χείμαρρου σε ακραία επεισόδια είναι άμεση, η λήψη μέτρων αμέσως μετά την εκδήλωση της καταιγίδας, συνιστά δύσκολο εγχείρημα.

🚧 Σενάριο Δ': Κανονική κατανομή της βροχόπτωσης (ανά τρίωρο)

Με βάση την βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή, σχεδιάστηκε ένα συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, η εκτίμηση του οποίου αφορά στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου. Στόχος είναι η διερεύνηση της απόκρισης της στην υποθετική αυτή καταιγίδα.



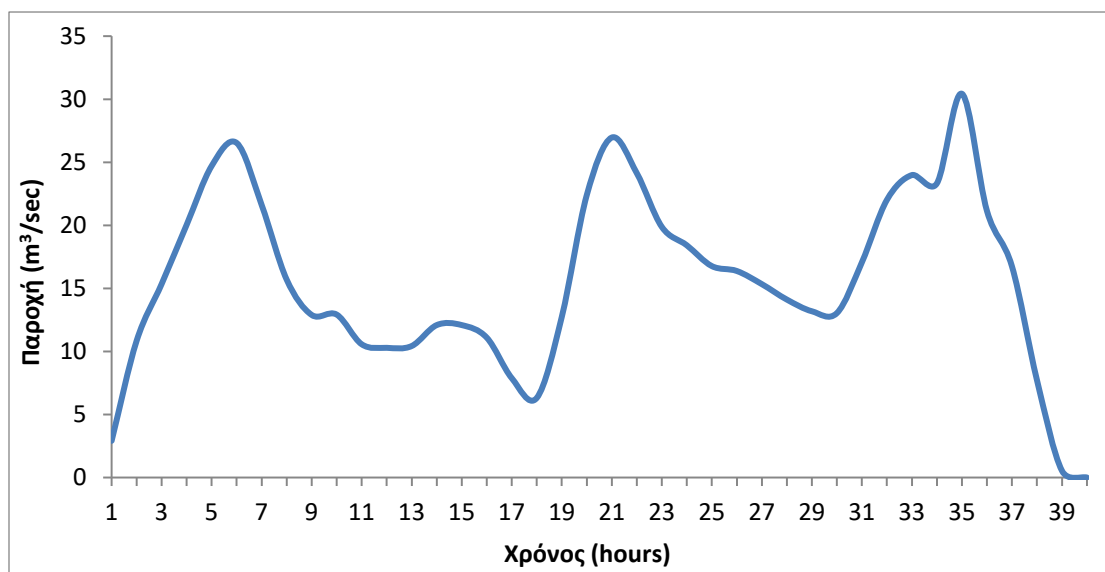
Σχήμα 7.1.1.4 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο κανονικής κατανομής της βροχόπτωσης)

Η μορφή του παραγόμενου υδρογραφήματος προσομοιάζει την καμπύλη της κανονικής κατανομής, κάτι που θεωρείται αναμενόμενο. Βέβαια όπως διαπιστώνεται δεν έχει διαμορφωθεί μια πιστή αναπαράσταση της κωδονοειδούς καμπύλης. Το υδρογράφημα, είναι αρκετά οξύληκτο, με μια αιχμή που είναι και μέγιστη, ενώ η απόκριση της λεκάνης στην κατακρήμνιση δεν είναι άμεση και γρήγορη. Η αιχμή της παροχής του υδρογραφήματος, σημειώνεται την 21^η ώρα (κρίσιμος χρόνος), και είναι της τάξης των 42,2 m³/s και λογικά είναι αποτέλεσμα αφενός μεν του μεγάλου ύψους βροχής (αιχμή βροχόπτωσης) που κατέληξε στην λεκάνη την 21^η ώρα και αφετέρου της συσσωρευμένης βροχόπτωσης των προηγούμενων ωρών. Τέλος, η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου εκτιμάται κατά προσέγγιση στα 13.6 m³/s, με την επιφανειακή απορροή να έχει συνολικό όγκο νερού περίπου 2.100.000 m³.

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι τόσο η καμπύλη της παροχής όσο και η μέγιστη τιμή της, ακολουθούν την κατανομή της βροχόπτωσης καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου. Γενικά, παρατηρώντας το υδρογράφημα και την αντίστοιχη βροχόπτωση, συμπεραίνεται πως η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση.

🚧 Σενάριο Ε': Τυχαία κατανομή της βροχόπτωσης (ανά τρίωρο)

Στο σενάριο που μελετάται, η βροχόπτωση που αναπτύχθηκε ακολουθεί μια τυχαία κατανομή. Υλοποιώντας το μοντέλο βροχής-απορροής, απεδόθη εν τέλει ένα συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης του ποταμού Κλαδέου. Με αυτόν τον τρόπο, εξετάζεται το πως ανταποκρίνεται η λεκάνης σε μια τέτοιου τύπου υποθετική καταιγίδα.



Σχήμα 7.1.1.5 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο τυχαίας κατανομής της βροχόπτωσης)

Η μορφή του εξαγόμενου υδρογραφήματος θεωρείται τυπική, με την απόκριση της λεκάνης στην κατακρήμνιση να είναι άμεση και γρήγορη. Γενικά οι κλάδοι της του υδρογραφήματος αυξάνονται με απότομο τρόπο, ενώ παρατηρούνται τρεις παροχές αιχμής, από τις οποίες η μία είναι και μέγιστη. Η πρώτη αιχμή σημειώνεται την 5^η ώρα με τιμή $26,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ η δεύτερη εκδηλώνεται 21 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και είναι της τάξης των $27 \text{ m}^3/\text{s}$ και λογικά είναι αποτέλεσμα της συσσωρευμένης βροχόπτωσης των προηγούμενων ωρών, καθώς και της

αυξημένης βροχόπτωσης που κατέληξε στην λεκάνη την 21^η ώρα. Η τρίτη αιχμή, η οποία είναι η και η μέγιστη παροχή, παρουσιάστηκε 35 ώρες (κρίσιμος χρόνος) μετά την έναρξη της βροχόπτωσης και είναι της τάξης των 30,4 m³/s.

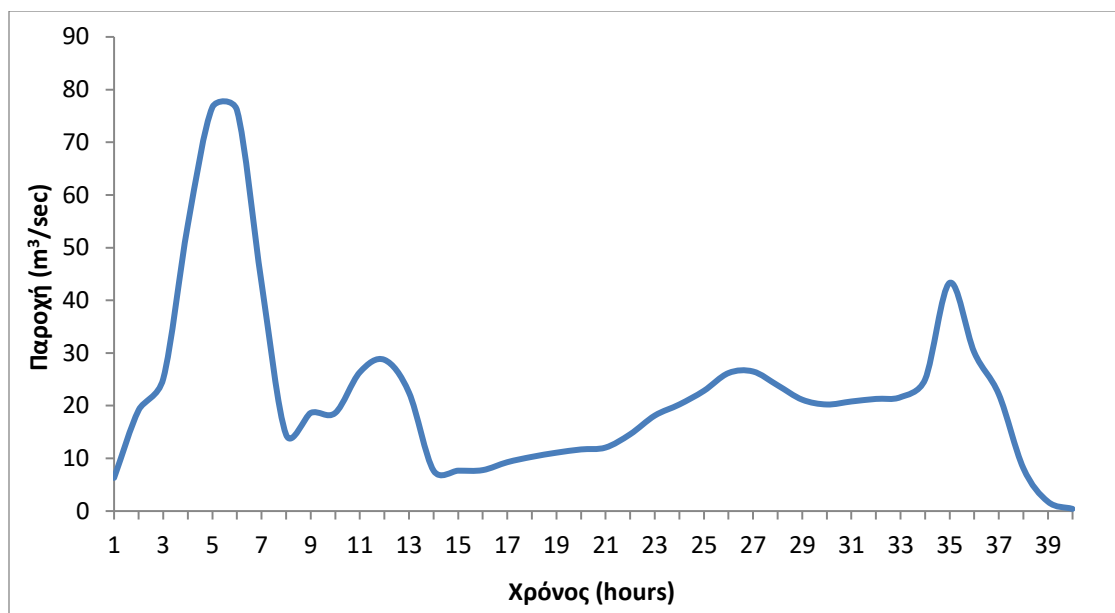
Όσον αφορά, τη μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού γεγονότος, ανέρχεται κατά προσέγγιση στα 14,6 m³/s, ενώ ο συνολικός όγκος της επιφανειακής απορροής ανέρχεται περίπου στα 2.250.000 m³.

Γενικά, η παροχή του υδρογραφήματος ακολουθεί την κύμανση της βροχόπτωσης καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου, ενώ και οι μεγαλύτερες τιμές της παροχής σημειώνονται τις ώρες που εκδηλώνονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής.

Σενάριο ΣΤ': Αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%

Έχοντας σαν βάση την αρχική βροχόπτωση (από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης), διαμορφώθηκε ένα σενάριο κατά το οποίο αυξάνονται οι τιμές της κατά 50%. Το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου, έτσι ώστε να διερευνηθεί η απόκριση της λεκάνης, στο ενδεχόμενο που εκδηλωθεί μια καταιγίδα με αυξημένες τιμές αυτής της τάξης.

Το εξαγόμενο υδρογράφημα έχει τυπική μορφή, παρεπόμενο μιας αιφνίδιας πλημμύρας, με την απόκριση της λεκάνης στην ακραία βροχόπτωση να είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Το υδρογράφημα, έχει απότομα αυξανόμενους κλαδους και μικρούς χρόνους βάσης. Συνολικά διακρίνονται δύο αιχμές παροχής, με τη μία να είναι και μέγιστη. Η πρώτη αιχμή αποτελεί τη μέγιστη παροχή του υδρογραφήματος, εκδηλώνεται την 6^η ώρα (κρίσιμος χρόνος), και είναι της τάξης των 76,7 m³/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, σημειώνεται 35 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, και ανέρχεται στα 43,3 m³/s. Η εμφάνιση αυτής της αιχμής, ενδεχομένως να προκαλείται λόγω της συσσωρευμένης βροχόπτωσης των προηγούμενων ωρών.



Σχήμα 7.1.1.6 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο αύξησης των τιμών της πραγματικής βροχόπτωσης κατά 50%)

Γενικά, από το υδρογράφημα και την αντίστοιχη βροχόπτωση, προκύπτει ότι η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Τέλος, η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου υπολογίζεται στα $20,6 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο συνολικός όγκος νερού είναι κατά προσέγγιση $3.200.000 \text{ m}^3$.

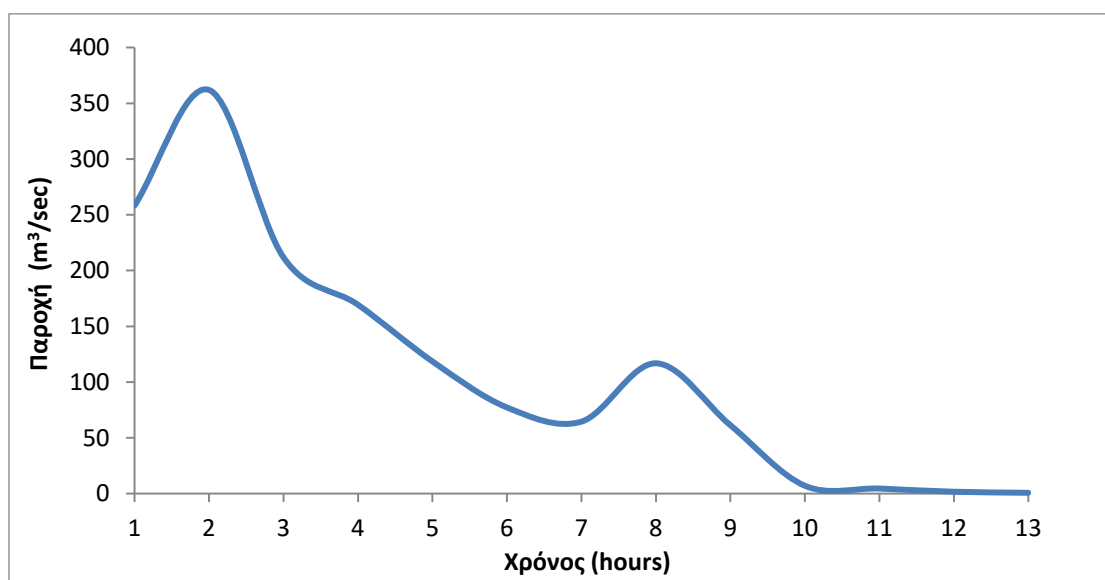
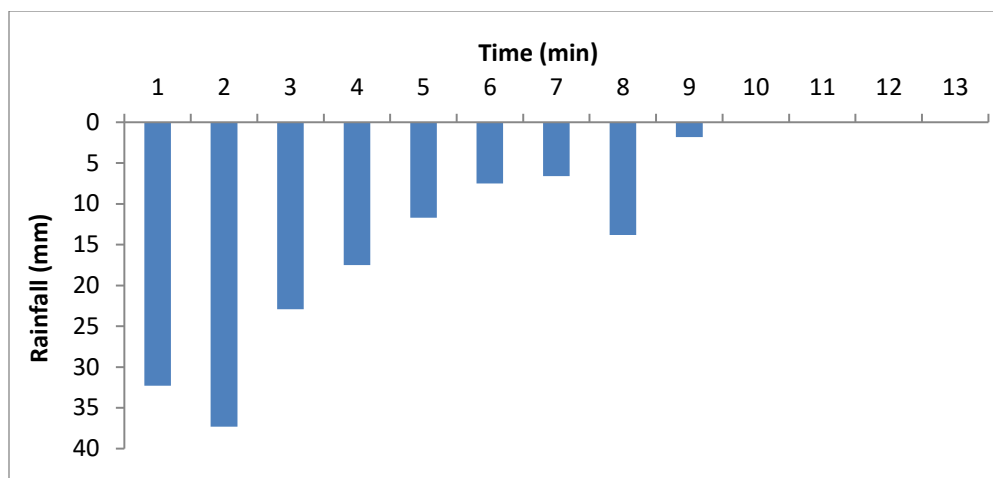
Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι τόσο η καμπύλη της παροχής όσο και οι μεγαλύτερες τιμές της, ακολουθούν την κύμανση της βροχόπτωσης καθόλη τη διάρκεια του φαινομένου. Αυτό αποτελεί και μια ένδειξη ότι η απόκριση της λεκάνης του υδατορέματος είναι άμεση σε ακραία επεισόδια.

✚ Σενάριο Ζ': Πραγματικό πλημμυρικό γεγονός -Κλαδέος 5/2/2012

Η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής για το πραγματικό σενάριο, βασίστηκε στο πραγματικό πλημμυρικό γεγονός, το οποίο έλαβε χώρα στις 5 Φεβρουαρίου 2012 στη λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, με το συνολικό ύψος βροχής να ανέρχεται στα 0,1514 μέτρα.

Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζονται, τόσο το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του υδατορέματος, όσο και το ιστόγραμμα που αναπαριστά την κύμανση της βροχόπτωσης, ανά ώρα, πάνω από τη λεκάνη απορροής.

Το παραγόμενο υδρογράφημα, θεωρείται τυπική μορφής, ως επακόλουθο ενός αιφνίδιου πλημμυρικού φαινομένου, ενώ από το ιστόγραμμα διαφαίνεται ότι η απόκριση της λεκάνης στην ραγδαία και έντονη κατακρήμνιση είναι άμεση και πολύ γρήγορη. Στο υδρογράφημα, διακρίνονται οι δύο μεγαλύτερες πλημμυρικές παροχές (αιχμές), εκ των οποίων η μία είναι και μέγιστη. Η μέγιστη παροχή σημειώνεται την 2η ώρα (κρίσιμος χρόνος), η οποία συμπίπτει με την αιχμή της βροχόπτωσης (μέγιστο ύψος βροχόπτωσης), και είναι της τάξης των $361,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Η δεύτερη μεγαλύτερη παροχή, παρατηρείται 8 ώρες μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, είναι της τάξης των $116,8 \text{ m}^3/\text{s}$ και ενδεχομένως να έχει προκύψει από την συσσωρευμένη βροχόπτωση των προηγούμενων ωρών. Γενικά, είναι εμφανές στο ιστόγραμμα βροχόπτωσης-χρόνου και το υδρογράφημα, ότι η αιχμή της παροχής είναι μειούμενη, καθώς μειώνεται και η βροχόπτωση. Παράλληλα η μέση τιμή της παροχής για το σύνολο του πλημμυρικού επεισοδίου ανέρχεται κατά προσέγγιση στα $111,8 \text{ m}^3/\text{s}$, που αντιστοιχεί σε επιφανειακή απορροή συνολικού όγκου νερού περίπου $5.230.000 \text{ m}^3$.



Σχήμα 7.1.1.7 Συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου (Σενάριο πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος-Κλαδέος 5/2/2012)

Συνοψίζοντας, από τα δύο σχήματα διαπιστώνεται, ότι η καμπύλη της παροχής καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου, ακολουθεί την πορεία της βροχόπτωσης, ενώ είναι χαρακτηριστικό πως οι μεγαλύτερες τιμές της παροχής σημειώνονται, τις ίδιες ώρες με τα μέγιστα της βροχόπτωσης. Αυτό συμβαίνει, καθότι όπως προαναφέρθηκε η λεκάνη είναι χειμαρρική και επιτρέπει την άμεση απορροή. Είναι χαρακτηριστικό ότι λόγω της παρατεταμένης υψηλής βροχόπτωσης τις 6 τελευταίες ώρες της καταιγίδας η παροχή παραμένει υψηλή (σε τιμές άνω των $65 \text{ m}^3/\text{s}$) για όλο το χρονικό αυτό διάστημα. Ταυτόχρονα, όπως προαναφέρθηκε η απόκριση της λεκάνης του χείμαρρου σε ακραία επεισόδια είναι άμεση, δυσχεραίνοντας τη λήψη μέτρων, αμέσως μετά την εκδήλωση της καταιγίδας.

7.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, με την επιφανειακή απορροή, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου, στην ΒΔ Πελοπόννησο. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία εκτίμησης του χωρικά κατανεμημένου άμεσου υδρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης, σχεδιάζοντας ένα σύστημα βασισμένο σε τεχνολογία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην αριθμητική προσομοίωση της ατμοσφαιρικής κατάστασης για την εκτίμηση της χωροχρονικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης και στην υδρολογική ανάλυση με τη χρήση ΣΓΠ για την εκτίμηση της κύμανσης της πλημμυρικής παροχής στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης.

Από τις κυριότερες πτυχές της προσέγγισης αυτής, είναι η ανάλυση των προτύπων βροχόπτωσης (rainfall patterns) στην υπό μελέτη περιοχή, διαμορφώνοντας έτσι τα αντίστοιχα σενάρια. Τα βασικά βροχομετρικά δεδομένα, αντλήθηκαν από ένα μοντέλο Ατμοσφαιρικής Προσομοίωσης και συνίστανται από 12 τρίωρα αθροιστικού ύψους βροχής. Με την ανάλυση αυτή, αποδίδεται η βασική χωροχρονική κατανομή που ακολουθεί η βροχόπτωση, για κάθε σενάριο ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η στατιστική ανάλυση των τιμών των χωροχρονικών προτύπων (spatiotemporal patterns). Τα σενάρια που διαμορφώθηκαν, βάσει των δεδομένων προσομοίωσης έχουν ως εξής: α) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά σταθμό), β) βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο), γ) βροχόπτωση που ακολουθεί κανονική κατανομή, δ) βροχόπτωση που ακολουθεί τυχαία κατανομή, ε) αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%, ε) σενάριο ακραίου πλημμυρικού γεγονότος το οποίο έλαβε χώρα στις 5/2/12 στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κλαδέου.

Η ενσωμάτωση της βροχόπτωσης ως παραμέτρος, στο μοντέλο βροχής-απορροής, έγινε με τη μορφή grid (raster) επιπέδων, τα οποία εξήχθησαν με τη χρήση της μεθόδου χωρικής παρεμβολής IDW. Κάθε grid βροχόπτωσης, εκφράζει το ύψος βροχής ανά τρίωρο, με τιμές που διαφοροποιούνται στον χρόνο και ανά διαστήματα στον χώρο. Δηλαδή, δεν περιλαμβάνει μία ενιαία τιμή βροχόπτωσης που όταν καταλήγει στην λεκάνη απορροής, κατανέμεται ομοιόμορφα σε αυτή. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο που υλοποιείται, αυτόματα καθίσταται πιο ρεαλιστικό. Κάθε ένα από τα υπό διερεύνηση πρότυπα βροχόπτωσης θα παράξει και ένα συγκεκριμένο πρότυπο απορροής (runoff patterns), σχεδιάζοντας ένα χωρικά κατανεμημένο μοναδιαίο

υδρογράφημα. Το παραγόμενο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα περιπτώσεων μελέτης. Πρωταρχικής σημασίας στην ανάλυση του ΜΥ, είναι τα μεγέθη της α) πλημμυρικής παροχής ή αιχμής (flood peaks) και β) του κρίσιμου χρόνου (critical time) δηλαδή η χρονική διαφορά που μεσολαβεί μεταξύ της αιχμής της βροχόπτωσης και της μέγιστης παροχής.

Άμεσο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα βάσει των σεναρίων βροχόπτωσης

Το μοντέλο βροχής-απορροής, εκτελέστηκε για τα επτά υπό μελέτη σενάρια και ο βασικός στόχος είναι η διερεύνηση και ανίχνευση των δυσμενέστερων χωροχρονικών προτύπων απορροής. Τα σενάρια που διαμορφώθηκαν δεν έχουν φυσική σημασία και σχετίζονται αποκλειστικά με την χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Τα συνθετικά μοναδιαία άμεσα υδρογραφήματα, εκτιμήθηκαν στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κλαδέου και διερευνάται η απόκριση της σε κάθε καταιγίδα.

Αναμφίβολα, το πιο δυσμενές σενάριο είναι εκείνο που αφορά στο ακραίο πραγματικό πλημμυρικό γεγονός που συνέβη στον Κλαδέο (5/2/12). Το παραγόμενο υδρογράφημα, έχει δύο αιχμές με την μέγιστη παροχή να είναι της τάξης των 361,9 m³/s, η οποία συνέβη την 2^η ώρα (κρίσιμος χρόνος), ενώ η απόκριση της λεκάνης ήταν άμεση και πολύ γρήγορη. Μια ακραία βροχόπτωση τέτοιου τύπου είναι ικανή να προξενήσει οδυνηρές επιπτώσεις. Ωστόσο, σαν σενάριο εξαιρείται από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των χωροχρονικών προτύπων, επειδή αναφέρεται σε διαφορετική βροχόπτωση.

Με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, επιτελέστηκε η κατάταξη των σεναρίων (βάσει της βροχόπτωσης του μοντέλου ατμοσφαιρικής προσομοίωσης) σε υψηλού, μέτριου και χαμηλού κινδύνου. Το δυσμενέστερο σενάριο, σχετίζεται με την αύξηση των τιμών της αρχικής βροχόπτωσης (από το μοντέλο ατμοσφαιρικής προσομοίωσης). Στο αντίστοιχο υδρογράφημα, διακρίνονται δύο αιχμές, με την μέγιστη παροχή να σημειώνεται την 6^η ώρα και να ανέρχεται στα 76,7 m³/s, με την απόκριση της λεκάνης να είναι άμεση και γρήγορη. Μια τέτοια βροχόπτωση, είναι ικανή να προξενήσει σημαντικές επιπτώσεις, ειδικά από την στιγμή που η υπό μελέτη λεκάνη είναι χειμαρρική και μικρής έκτασης. Το τελευταίο πιο δυσμενές σενάριο, είναι εκείνο που αντιστοιχεί σε βροχόπτωση που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή (ανά τρίωρο). Το υδρογράφημα διαθέτει δύο αιχμές, όπου η πρώτη που είναι και μέγιστη, εκδηλώνεται την 6^η ώρα και είναι της

τάξης των 55,3 m³/s. Τέλος το λιγότερο δυσμενές σενάριο είναι εκείνό που αντιστοιχεί στην ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης (ανά σταθμό), με μέγιστη παροχή 16,3 m³/s. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η συγκεντρωτική κατάταξη των χωροχρονικών προτύπων απορροής.

	Σενάρια βροχόπτωσης	Μέγιστη Παροχή	Κρίσιμος Χρόνος
Δυσμενή Σενάρια	Σενάριο ΣΤ': Αύξηση των τιμών της βροχόπτωσης κατά 50%	76,7 m ³ /s	6η ώρα
	Σενάριο Γ': Ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης (ανά σταθμό)	55,3 m ³ /s	6η ώρα
Μέτριου κινδύνου	Σενάριο Α': Περίπτωση βροχόπτωσης Ατμοσφαιρικού Μοντέλου προσομοίωσης	51,1 m ³ /s	6η ώρα
	Σενάριο Δ': Κανονική κατανομή της βροχόπτωσης (ανά τρίωρο)	42,2 m ³ /s	21η ώρα
Χαμηλού κινδύνου	Σενάριο Ε': Τυχαία κατανομή της βροχόπτωσης	30,4 m ³ /s	35η ώρα
	Σενάριο Β': Ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης (ανά τρίωρο)	16,3 m ³ /s	

Πίνακας 7.2.1 Κατάταξη των σεναρίων βροχόπτωσης

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των χωροχρονικών προτύπων, παρατηρούνται αποκλίσεις ως προς τις μέγιστες παροχές. Οι πιο αξιοσημείωτες εξ' αυτών είναι οι εξής. Η απόκλιση των τιμών των αιχμών μεταξύ των δύο πρώτων δυσμενέστερων σεναρίων είναι της τάξης του 40 %. Η απόκλιση των τιμών μεταξύ του σεναρίου ΣΤ' και του σεναρίου Α' είναι της τάξης του 50%. Τέλος, η απόκλιση των τιμών του σεναρίου Γ' και του σεναρίου Α', είναι της τάξης του 8%.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθότι παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης ακραίων παροχών και σχεδίασης άμεσου υδρογραφήματος σε υδρογραφικά δίκτυα και υδατορέματα, για τα οποία δεν υφίστανται πραγματικές μετρήσεις. Επίσης, με την σχεδίαση των υδρογραφημάτων θα μπορούσε να συμβάλλει στην αναγνώριση περιοχών που είναι επιρρεπείς σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα, καθώς και την ανάπτυξη συστημάτων προειδοποίησης ή και πρόβλεψης μελλοντικών αιφνίδιων πλημμυρών. Αυτό επιτυγχάνεται αν συνδεθεί ένα μετεωρολογικό μοντέλο πρόγνωσης με τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης. Έτσι,

όταν το μοντέλο πρόβλεψης εμφανίζει ακραίες τιμές βροχόπτωσης, ένα σύστημα προειδοποίησης (alarm system), θα παράγει συγκεκριμένα σενάρια αναμενόμενης απορροής βασισμένα στα εξαγόμενα πρότυπα απορροής. Συνεπώς ελέγχεται αν οι τιμές του προγνωστικού μέσου είναι παραπλήσιες ή ταυτίζονται με εκείνες του μοντέλου προσομοίωσης. Τέτοιου είδους μοντέλα, μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και στην οικονομική και την περιβαλλοντική προστασία μιας δυνητικά πληγείσας περιοχής.

Γενικά, ο σχεδιασμός τέτοιων υδρογραφήματων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακραία πλημμυρικά φαινόμενα, προκειμένου:

- να σχεδιαστούν υποδομές και κατασκευές όπως γέφυρες, οδικοί άξονες κτλ.
- να γίνει αξιολόγηση της επικινδυνότητας μιας πλημμύρας και την εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεων της.
- να εκτιμηθούν πλημμυρικά δεδομένα με βάση υπάρχοντα στοιχεία βροχοπτώσεων με σκοπό την υλοποίηση συστημάτων πρόβλεψης και διαχείρισης πλημμυρών.
- να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία από τους υπεύθυνους χάραξης της πολιτικής, προκειμένου να ληφθούν αποφάσεις για την σχεδίαση της αντιπλημμυρικής προστασίας, την κατασκευή και αποπεράτωση αντιπλημμυρικών έργων (τεχνητών φραγμάτων) και ζητήματα διαχείρισης των υδατικών πόρων γενικότερα.

Η τεχνολογία των GIS, έχει τη δυνατότητα για μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων που ανακτώνται από το μοντέλο και με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστό το πλημμυρικό δυναμικό της λεκάνης, μπορεί να τα μετουσιώσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να αξιοποιηθούν στην πολιτική διαχείρισης και λήψης αποφάσεων. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί, ότι στην υδρολογική μοντελοποίηση και ιδιαίτερα στην μοντελοποίηση των flash floods, τίθενται μια σειρά από υποθέσεις. Στην προκειμένη περίπτωση, η προτεινόμενη μεθοδολογία συνιστά μια πιλοτική εφαρμογή, που να μην θεωρείται ρεαλιστική και δεν πρέπει να υποτιμώνται τα αποτελέσματα και η αξιοπιστία της, αλλά δεν παύει να διέπεται από αρκετές παραδοχές. Αυτό σημαίνει ότι δεν εφαρμόστηκε κάποιου είδους προσέγγιση, έτσι ώστε να συνεκτιμηθούν και να δηλωθούν οι απώλειες (λόγω πχ της κατείσδυσης κλπ), καθώς και για να υπολογιστεί η ενεργός βροχόπτωση.

Η έλλειψη μετρήσεων της πλημμυρικής παροχής στο εξεταζόμενο υδρογραφικό δικτύου, αποτέλεσε τροχοπέδη, στο να καταστεί εφικτός ο άμεσος έλεγχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Ωστόσο έχει εκπονηθεί πληθώρα μελετών στις οποίες έχει αξιοποιηθεί η ίδια

μεθοδολογία και έχουν αποδοθεί αξιόπιστα αποτελέσματα (Καρύμπαλης κ.α 2015, Chalkias et al 2016, Tsanakas et al 2016). Τέλος, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και άλλες μεθοδολογίες όπως π.χ η μέθοδος SCS, αν υπήρχαν εδαφολογικοί χάρτες με τα απαραίτητα δεδομένα για την περιοχή μελέτης, ή μέσω του μοντέλου HEC-RAS με σκοπό τη διενέργεια συγκρίσεων με την ήδη υπάρχουσα μελέτη για εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Συμπεριφορά-Ρόλος DEM στην ανάλυση

Γενικά, η συμπεριφορά και ρόλος του DEM στην ανάλυση της επιφάνειας και την υδρολογική ανάλυση, θεωρείται υψίστης σημασίας. Η ανάλυση-ευκρίνεια (ή απόσταση) μεταξύ των γειτονικών σημείων ενός ΨΜΕ και η πολυπλοκότητα του εδάφους επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την παραγωγή εδαφικών χαρακτηριστικών και υδρολογικών επιπέδων. Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι έτσι διαμορφωμένη που τα επίπεδα της κλίσης, της διεύθυνσης ροής και της συσσώρευσης ροής και του μήκους ροής που παρήχθησαν από το ΨΜΕ, καθόρισαν την έκβαση της μοντελοποίησης, μέσω της δημιουργίας επιπέδων όπως αυτών των παροχών, των ταχυτήτων και τελικά των χρόνων απορροής.

Το DEM, που αξιοποιείται είναι πολύ υψηλής ανάλυσης (5 m), γεγονός που αναδεικνύεται στην απόδοση των επιπέδων και στην απεικόνιση της πληροφορίας. Η ποιότητα των επιπέδων και η εξαγόμενη πληροφορία είναι αρκετά ακριβής και αξιόπιστη. Ωστόσο δεν έχουν εξαλειφθεί οι εξομαλύνσεις, τα σφάλματα και οι αστοχίες, γεγονός που επιδρά στην τελική αποτύπωση των εξαγόμενων επιπέδων. Το βασικό μειονέκτημα ενός χαμηλότερης ανάλυσης DEM σε σύγκριση με ένα υψηλότερης, είναι η απώλεια βασικών τοπογραφικών στοιχείων εντός ενός κελιού (ισοϋψείς, υδρογραφικό δίκτυο κλπ).

Συμπερασματικά, θα μπορούσε να ειπωθεί πως, η κάθε ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τους λόγους που την επιβάλλουν. Η επιλογή της ανάλυσης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, στην υδρολογική ανάλυση, είναι ανάλογη της ακρίβειας που επιζητείται κάθε φορά. Στην προκειμένη περίπτωση, εφιστούμε την προσοχή περισσότερο στην κατανόηση της φιλοσοφίας της μεθοδολογίας και όχι τόσο στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για τη διερεύνηση και διαστασιολόγηση γεφυρών, η επιλογή ενός DEM, πολύ υψηλής ανάλυσης, θα ήταν ζωτικής σημασίας, όπως επίσης και η διαμόρφωση ενός πιο ρεαλιστικού μοντέλου, στο οποίο να

εξετάζονταν μια σειρά παραμέτρων (τραχύτητα, κατανομή βροχόπτωσης, ενεργός βροχόπτωση κλπ).

Τέλος, η μετεξέλιξη της παρούσας εργασίας θα περιλαμβάνει την διαμόρφωση τεχνητών καταιγίδων (artificial rainfall scenarios) μέσω ενός μοντέλου ατμοσφαιρικής προσομοίωσης (weather generator) με τη χρήση γλώσσας προγραμματισμού (Python ή R). Ο στόχος θα είναι ο ίδιος και θα σχετίζεται με τη διερεύνηση της χωρικής σχέσης της βροχόπτωσης με την επιφανειακή απορροή. Άλλοι μελλοντικοί στόχοι μπορεί να περιλαμβάνουν την εκτέλεση υδρολογικών/υδραυλικών μοντέλων για την παραγωγή χαρτών πλημμύρας, πλημμυρικού κινδύνου και επικινδυνότητας όσον αφορά στον αρχαιολογικό χώρο της Αρχαίας Ολυμπίας καθώς και τη τοπογραφική της αποτύπωση. Για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σημαντική αρωγή, θα αποτελούσε η συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων (από διάφορες πηγές όπως EMY, Αστεροσκοπείο, δορυφορικά δεδομένα) των ακραίων φαινομένων για την περιοχή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdalla R.C.V, Tao H.W, Maqsood I.A, (2006), GIS Supported 3D Approach for Flood Risk Assessment of the Qu'Appelle River, Southern Saskatchewan. *International Journal of Risk Assessment and Management*, Vol 6, No. 4-6, 440-455
2. Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R., (2007), Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/ alpine Thur watershed using SWAT. J., *Hydrol.* 333, 413–430.
3. Ajward A.H, Muzik I., (2000), A Spatially Varied Unit Hydrograph Model, *Journal of Environmental Hydrology*, Vol.8, Paper 7: 1-8.
4. Agnone JC (ed.) (1995) Raging Forces: Earth in Upheaval. National Geographic Society
5. Arnold, J. G., P. M. Allen, and D. S. Morgan. 2001. Hydrologic model for design and constructed wetlands. *Wetlands* 21(2): 167-178.
6. Arnold, J. G., and N. Fohrer , 2005) SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling, *Hydrol. Proc.* 19(3): 563-572.
7. Baker V.R, Kochel C.R, Patton P.C (1988), Flood Geomorphology, John Willy & Sons, New York.
8. Barredo J.I. (2009), Normalised flood losses in Europe:1970-2006. *Nat.Hazards Earth Syst.Sci.*,9,97-104
9. Berz G., Kron W., Loster T., Rauch E., Schimetschek J., Schmieder J., Siebert A., Smolka A, Wirtz, A., (2001), World Map of Natural Hazards-a Global View of the Distribution and Intensity of Significant Exposures, *Natural Hazards* 23, Kluwer Academic Publishers.
10. Billa L, Mansor S, Mahmud AR, Ghazali AH. (2005). AVHRR data for real-time operational flood forecasting in Malaysia. *Geoinform Disaster Manag.* 18: 1357-1379.

11. Billa L, Shattri M, Mahmud AR, Ghazali AH. (2006). Comprehensive planning and the role of SDSS in flood disaster management in Malaysia. *Disaster Prev Manag.* 15: 233-240.
12. Bourrough P.A, (1986) *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*, Oxford, Clarendon Press
13. Bourletsikas A., Baltas E. Mimikou M, (2006), Rainfall-Runoff Modeling for an Experimental Watershed of Western Greece Using Extended Time-Area Method and GIS, *Journal of Spatial Hydrology* Vol.6, No.1 Spring, pp. 93-104,
14. Bridge J.S, (2003), *Rivers and FloodPlains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*”, Blackwell Publishing.
15. Bronster A., (2003) Floods and Climate Change: Interactions and Impacts, *Risk Analysis*, 23: 545-557
16. Burton I., Kates R.W, (1964), The Perception of Natural Hazards in Resource Management, *Natural Resources Journal*, Vol III, No 3, pp 412-441.
17. Casale R. , Margottini C. (Eds), (1999), *Floods and Landslides: Intergrated Risk Assessment Flood Hazard Assessment and Mitigation: Chapter 2*, Springer
18. Chow V.T, Maidment D.R, Mays L.W, (1988) *Applied Hydrology*, McGraw- Hill International Editions, Civil Engineering series, New York.
19. Cluckie ID and Collier CG, (1991) *Hydrological Applications of Weather Radar*, Ellis Horwood
20. Chalkias C., Stathopoulos N., Kalogeropoulos K., Karympalis E. (2016), “Applied Hydrological Modeling with the Use of Geoinformatics: Theory and Practice”, INTECH
21. Christofidis A, (2008), Development of a GIS-based rainfall-runoff model. Master thesis., Department of Water Resources and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens.
22. Dalziell, E.P, McManus S.T, (2004) Resilience, Vulnerability and Adaptive Capacity: Implications for System Performance, International Forum for Engineering Decision Making (IFED), Switzerland, December 6-8 2004.

23. Dao. H, Peduzzi P., Global Evaluation of Human Risk and Vulnerability to Natural Hazards, Enviro-info , Edition du Tricorne, Geneve, Vol I, 435-446
24. Dawson, R. J. Speight, L., Hall, J. W., Djordjevic, S., Savic, D. & Leandro, J., (2008), Attribution of flood risk in urban areas, Journal of Hydroinformatics, Vol 10, No.4, 2008, pp. 275-288.
25. Debarati G, Hoyois P., Below R., (2012), Annual Disaster Statistical Review 2012: The Numbers and Trends, Brussels, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
26. De Smedt F., Yongbp L., Gebremeskel S., (2000), Integrated Hydrologic Modeling on a Catchment Scale for Prediction of Floods, ERB Conference.
27. Diakakis M., (2011), A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece, *Nat Hazards* 56: 803-814.
28. Diakakis, M., Mavroulis, S., Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach, *Natural hazards*, 62(2), 485-500.
29. Diakakis M.1 and Deligiannakis G, (2013), Changes in flood mortality during the last 50 years in Greece, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XLVII, *Πρακτικά 13ου Διεθνούς Συνεδρίου, Χανιά, Σεπτ. 2013*
30. Domakinis, C., Oikonomdis, D., Voudouris, K. and Astaras, T., 2014. Using geographic information systems (GIS) and remote sensing to map flood extent and to assess flood hazard in Erythrotamos river basin (Evros, Greece), Proc. of 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, Thessaloniki
31. Doswell C., Brooks H., Maddox R., (1996), Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology, Weather and Forecasting: Vol 11, Elsevier
32. Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y., Xu, CY. (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
33. European Environment Agency, (2003) Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe, *Environmental issue report* No 35. Compenhagen.

34. European Environment Agency, (2010), Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: An overview of the last decade, *Technical report No 13*, Copenhagen 2010.
35. Forte F. Pennetta and Strobl R.O (2005), Historic Records and GIS Application for Flood Risk Analysis in the Salento Peninsula (Southern Italy), *Natural Hazards and Earth System Science*, 5 (6), 833-844
36. Gioti E., Riga C., Kalogeropoulos K., Chalkias C., (2013), A GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data, *EARsel eProceedings* 12, 1/2013
37. Guoan T., Yongmei L., , Wangqing L., Zhengjiang C., Mudan Z. The Impact of Resolution on the Accuracy of Hydrologic Data Derived From DEMs, *Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University*.
38. Haq M, Akhtar M, Muhammad S, Paras S, Rahmatullah J. (2012). Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: a case study of Sindh province, Pakistan. *Egypt J Remote Sensing Space Sci.* 15: 135-141.
39. Jonkman S.N, (2005), Global perspectives on loss of human life caused by floods, *Natural Hazards* 34, 151-175, Springer.
40. Jonkman S.N, Vrijling J.K (2008), Loss of life due to floods, *Flood Risk Management*, (2008) 43–56
41. Kalogeropoulos, K., Karalis, S., Karymbalis, E., Chalkias, C., Chalkias, G., Katsafados, P., (2013), Modelling flash floods in Vouraikos River mouth Greece, 11th MEDCOAST Proceedings Conference, Marmaris. Turkey, 01/2013.
42. Kalogeropoulos K., Stathopoulos N, Psarogiannis A., Penteris D., Tsiakos C., Karagiannopoulou A., Krikigianni E., Karymbalis E., Chalkias C. (2016), A GIS-based method for flood risk assessment, *European Geosciences Union: General Assembly*, Vienna Austria.
43. Karymbalis E., Katsafados P., Chalkias C., Papanastasiou K.G, (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* Vol. 56, Suppl. 1, 045–067 Stuttgart.

44. Kok C.I, Ramli M.F, (2007), Scale Factor and Digital Elevation Analysis for Hydrological Studies, *Journal of Hydrology*, Vol. 15.
45. Koutsoyiannis D., Mamassis N, Efstratiadis A., and Christofides A., (2008), On the credibility of climate predictions, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (4), 671–684.
46. Koutsoyiannis D., Mamassis N, Efstratiadis A., Zarkadoulas N. , Markonis I., (2012), Floods in Greece, Department of Water Resources and Environmental Engineering, National Technical University of Athens, Greece
47. Kron W., (2005), Flood risk=Hazard*Values*Vulnerability, *International Water Resources Association, Water International, Volume 30, Number 1, Pages 58–68*
48. Lamothe D.N, Neveu G., Gorlach B., Interwies E., (2005), Final Report: Evaluation of the impact of floods and associated protection policies, European Commission DG Environment.
49. Lewis J., (1999), Development in Disaster-prone Places Studies of Vulnerability, Intermediate technology publication, London.
50. Lin P. (2008), Numerical Modeling of Water Waves, Taylor & Francis Routledge, New York
51. Longley P.A, Goodchild M.F, Maguire D.J, Rhind D.W, (2010) , Συστήματα και Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), John Wiley & Sons, Inc.
52. Lynch P., (2008), The origins of computer weather prediction and climate modeling, *Journal of Computational Physics* 227: 3431–3444, Elsevier
53. Maidment DR, (1993), Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS Applications of geographic information systems in hydrology and water resources, Proceedings of international conference – Vienna 1993, Austria, 211: 181-192
54. Maidment D.R, Olivera F., Calver A., Eatherall and Fraczek W., (1996), Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field, *Hydrological Processes*, 10:831-844.

55. Maidment DR (1996), GIS and Hydrologic Modeling-an Assessment of Progress, *Third International Conference on GIS and Environmental Modeling*, January 22-26, 1996, Santa Fe, New Mexico.
56. Maidment DR, Olivera F, Calver A, Eatherall and Fraczek W, (1996), A Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field, *Hydrological Processes*, Vol 10, pp 831-844.
57. Manariotis, I.D. and Yannopoulos, P.C. (2004). "Adverse Effects on Alfeios River Basin and an Integrated Management Framework Based on Sustainability." *Environmental Management*, 34 (2), 261-269.
58. Mariolakos I, D Papanikolaou, Z Karotsieris & S Lekkas, (1981). Quantitative geomorphological analysis of the IVth order drainage basins of Alfios River (Peloponnese, Greece) with the use of computer. *Annales Géologiques des Pays Helléniques*, 30(2): 515-533.
59. Mariolopoulos E G, (1961). An Outline of the Climate of Greece. Publications of the Meteorological Institute of the University of Athens (C Chirstou, Athens, Greece).
60. McCuen, R. H.. (1989) *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.
61. McDonnell R., Kemp K. (1995), *International GIS Dictionary*, John Wiley & Sons, Inc.
62. Melesse A.M, Graham W.D, (2004) Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS, *Journal of the American water resources association*, 40 (4): 863-879.
63. Mimikou M., Koutsoyiannis D., (1995), Extreme Floods in Greece: The case of 1994, U.S-ITALY Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods, Perugia, Italy, 13-17 November 1995.
64. Miller. C.L, Laflamme R.A, (1958), The Digital terrain model-theory and application, *Photogrammetric Engineering*, 24:433-442

65. Moore I.D, Grayson R.B, Ladson A.R, (1991), Digital Terrain Modelling: A review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5, 3-30
66. National Research Council, (1991), Opportunities in the Hydrologic Sciences, National Academy Press, Washington, D.C.
67. Nikolakopoulos K G, D A Vaiopoulos & G A Skianis, (2007), Use of multitemporal remote sensing data for mapping the Alfios River network changes from 1977 to 2000, *Geocarto International*, 22(4): 251-271.
68. Olivera F, Maidment D., (1999), Geographic information systems (GIS)- based spatially distributed model for runoff routing, *Water resources research*, Vol.35, No. 4, pp 1155-1164.
69. Pelling M., (2003) Natural disaster and development in a globalization world,.
70. Pistrika, A., Tsakiris, G., (2007), Flood Risk Assessment: A Methodological Framework, Centre for the Assessment of Natural Hazards & Proactive Planning, National Technical University of Athens, Greece.
71. Pradhan B, Shafiee M. (2009). Flood hazard assessment for cloud prone rainy areas in a typical tropical environment. *Disaster Adv.* 2: 7-15.
72. Pradhan B, Youssef AM. (2011). A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *J Flood Risk Manag.* 4: 189-202.
73. Ramirez J.A, (2000)“ Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics”. Chapter 11 of *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities*”, Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press.
74. Saghaian B., Julien P.Y, Rajaie H., (2002), Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrones technique, *Journal of Hydrology* 261 pp. 193-203.

75. Saleh A, Al-Hatrushi S. (2010). Torrential flood hazards assessment, management, and mitigation, in wadi Aday, Muscat area, Sultanate of Oman, a GIS & RS approach. Egypt J Remote Sensing and Space Sci. 12: 71-86.
76. Schramm D, Dries R., ‘‘*Natural Hazards: Causes and Effects, Study Guide for Disaster Management*’’, University of Wisconsin, Disaster Management Center, 1986, σελ. 126-129.
77. Sene K., (2013), Flash floods: Forecasting and Warning, Springer, Heidelberg .
78. Skamarock, W. C., (2004), Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra, *Monthly Weather Review*: 132, 3019–3032.
79. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., and Powers J.G, (2008), A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN–475+STR NCAR TECHNICAL NOTE.
80. Smith K., (2004), Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster, 4th Edition, Routledge, London.
81. Smith K., Petley D.N, (2009), Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster, Fifth Edition, Routledge, London.
82. Strahler, A., (2011), Introducing Physical Geography, Boston university, John Willey & Sons, Inc., Fifth Edition.
83. Tsakiris G., (2007) Practical Application of Risk and Hazard Concepts in Proactive Plannin, European Water 19/20: 47-56, E.W Publications.
84. Tsanakas K., Gaki-Papanastassiou, Kalogeropoulos K., Chalkias C., Katsafados P., (2016) Investigation of flash flood natural causes of Xirolaki Torrent, Northern Greece based on GIS modeling and geomorphological analysis, *Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Springer
85. Thywissen K., (2006), *Components of Risk: A Comparative Glossary*, Studies of the University: Research, Counsel, Education- Publication Series of UNU-EHS, No.2/2006,
86. Xing Fang, David B. Thompson, Theodore G. Cleveland, Pratistha Pradhan, and Ranjit Malla, (2000), Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined

by Automated and Manual Methods, , Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, March-April 2000 pp 202-211

87. Weibel R., Heller M., (1991), *Digital Terran Modelling*, In: Maguire, D.J, Goodchild, M.F and Rhind D.W (eds). Geographical Information Systems: Principles and Application. London: Longman, 269-297
88. Wisner, B., Blaikie P, Cannon T, Davis I., (2005) *At Risk: Natural Hazards, people's vulnerability and disasters*, Second Edition, Routledge
89. Yang P., Ames D.P, Fonseca A., Anderson D., Shrestha R., Glenn N.F, Cao Y., What is the effect of LiDAR- derived DEM resolution on large-scale watershed model results, *Environmental Modelling & Software* 58 (2014), Elsevier
90. Youssef AM, Pradhan B, Hassan AM. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environ Earth Sci.* 62: 61-623

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφειάδης Μ., (2004) Διδακτικές Σημειώσεις: “Υδρογραφήματα”, ΤΥΤΠ, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
2. Βαφειάδης Μ., (2010) Διδακτικές Σημειώσεις: “Επιφανειακή Υδρολογία”, Μάθημα: Υπόγεια Υδραυλική και Υδρολογία, ΑΠΘ.
3. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2007). “Οδηγία 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων της πλημμύρας”. L.288/27, 6.11.2007.
4. Ευελπίδου Ν., Αντωνίου Β., (2015), *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
5. Ευσταθίου Γ., (2013) “Μελέτη Παραμετροποιήσεων του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και της μικροφυσικής στην προσομοίωση ισχυρών βροχοπτώσεων, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.

6. Ευστρατιάδης Α., (2008), ‘Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων’, Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα 2008
7. Καλλία Α.Α, (2011) ‘Θεσμικό πλαίσιο για την Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων’, Εκδόσεις Ζήτη.
8. Καλογερόπουλος Κ. (2011), ‘Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη διερεύνηση δημιουργίας λιμνοδεξαμενών’, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
9. Καραγιαννοπούλου Α., Κρικιγιάννη Ε., Πεντέρης Δ., (2016) *Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου με χρήση τεχνολογίας GIS. Περιοχή μελέτης: Κλαδέος ποταμός (Αλφειός)*, Εργασία ΠΜΣ (Γεωπληροφορικής), Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
10. Καραγιαννοπούλου Α., Κρικιγιάννη Ε., Πεντέρης Δ., Τσιάκος Χ.Α, Παπαποστόλου Χ., Παρχαρίδης Ι., (2016) *Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου με χρήση τεχνολογίας GIS*, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Πολιτικής Προστασίας, Safe Envos 2016, Αλεξανδρούπολη
11. Καρύμπαλης Ε., (2008), Διδακτικές Σημειώσεις Φυσικής Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.
12. Καρύμπαλης Ε., (2008) ‘Φυσικές Διεργασίες-Κίνδυνοι και Καταστροφές: Ηφαιστειότητα-Πλημμύρες-Άνοδος Θαλάσσιας Στάθμης- Κίνδυνοι Εξωγήινης Προέλευσης’, Διδακτικές Σημειώσεις, Π.Μ.Σ Διαχείριση Φυσικών και Ανθρωπογενών Καταστροφών, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.
13. Καρύμπαλης Ε., Κατσαφάδος Π. Καλογερόπουλος Κ., Καραλής Σ., Χαλκιάς Χ., (2014) ‘Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες’, στο Καρύμπαλης Ε, Παπαδόπουλος Α., Χαλκιάς Χ., (επιμ.) *Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου*, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
14. Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η., (2015), *Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
15. Κουργιαλάς Ν., (2010), ‘Όλοκληρωμένη Διαχείριση-Πρόβλεψη & Αντιμετώπιση Πλημμυρικών Φαινομένων σε Σύνθετες Γεωμορφολογικά Περιοχές με Χρήση Μαθηματικών Μοντέλων και GIS’, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

16. Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ. (1999), ‘*Τεχνική Υδρολογία*’, ΕΜΠ, 3^η εκδ.
17. Λαμπράκης Ν., Νικολακόπουλος Κ., Κατσάνου Κ., (2015), Υδρολογία με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και δεδομένων Τηλεπισκόπησης, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
18. Λέκκας Ε., (2000), ‘*Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές*’, Έκδοσεις Access, Αθήνα.
19. Λέκκας Ε., (2010), “Επιχειρησιακή Οργάνωση των δήμων του ΑΣΔΑ για την Πολιτική Προστασία & την αντιμετώπιση φυσικών και περιβαλλοντικών κινδύνων: Α’ Φάση: Δράσεις Μείωσης πλημμυρικού κινδύνου”, Εφαρμοσμένο Ερευνητικό Πρόγραμμα, ΕΚΠΑ, Αθήνα.
20. Μαμάσης Ν., (2007), ‘*Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*’: Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.
21. Μαμάσης Ν., (2011) ‘Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών’: *Τυπικά Συστήματα Υδατικών Πόρων*, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.
22. Μαμάσης Ν., (2011), Διδακτικές Σημειώσεις: Εισαγωγή στην Υδρολογία, ΕΜΠ, Αθήνα.
23. Μιμίκου Μ.Α, Μπαλτάς Ε.Α, (2006) ‘*Τεχνική Υδρολογία*’, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
24. Miller jr, G.T, ‘Βιώνοντας στο Περιβάλλον II: Προβλήματα Περιβαλλοντικών Συστημάτων’, Μετάφραση: Ταλανταπούλου Μ., 9^η Έκδοση, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα 1999.
25. Παπανικολάου Δ., Διακάκης Μ., (2011) ‘Μεταβολές στη ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών’, Επιτροπή μελέτης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος.
26. Παππάς Β., (2011), Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Σχεδιασμός του Χώρου, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

27. Παυλόπουλος Κ., (2011), ‘Γεωμορφολογία: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες’, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
28. Πεντέρης Δ., Καλογερόπουλος Κ., Χαλκιάς Χ., (2015), Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε υπολεκάνη το Βουραϊκού ποταμού με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, *Γεωγραφίες, No 26, 21-37*
29. Πίστρικα Α., (2010) ‘Εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον,’ Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
30. Τσακίρης Γ., (2007), ‘Αντιπλημμυρική προστασία στις παράκτιες περιοχές’, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο:235-245, 2007
31. Τσακίρης Γ. ,‘Πρόληψη και Διαχείριση των Φυσικών Καταστροφών: Ο Ρόλος του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού’,Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Κέντρο Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού, Ειδικός Τόμος, Αθήνα 2010
32. Τσόγκας Χ.Ε, (1999) ‘Υδρολογία’, Εκδόσεις ΊΩΝ, Αθήνα.
33. Χαλκιάς Χ.(2011), Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Συμπληρωματικές Σημειώσεις, Καλλιθέα.
34. Χαλκιάς Χ., (2015), Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
35. Ψυχογιός Ε..Χ, (2013) ‘Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σύθα (Τρικαλίτικου) με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών’ , Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών: ‘Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου’,Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

1. http://www.hnms.gr/hnms/greek/index_html
2. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252>
3. <http://floods.ypeka.gr/index.php/odhgia-2007-60>

4. (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/?branch=GFS&tab=doc>
5. <http://www.wrf-model.org/index.php>
6. <http://www.mbaexcel.com/excel/how-to-create-a-normally-distributed-set-of-random-numbers-in-excel>