



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ –
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

ΘΕΟΔΩΡΑ Ζ. ΑΝΔΡΙΚΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ευάγγελος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Είναι ο Πηνειός ποταμός, ο οποίος σύμφωνα με τον μύθο δημιουργήθηκε από τα δάκρυα μιας χαμένης αγάπης. Συγκεκριμένα, ο θεός Απόλλωνας πάντρεψε την αγαπημένη του Πίνδο με ένα όμορφο παλικάρι το Λίγκο (τα σημερινά Χάσια Όρη). Τα δύο βουνά ήταν ευτυχισμένα, όμως οι θεοί ζήλεψαν την ευτυχία τους και τα χώρισαν. Έτσι, από τα δάκρυά τους δημιουργήθηκε ο Πηνειός...

Περιεχόμενα

Executive summary	xix
Introduction.....	xix
Materials and Methods	xix
Study area.....	xix
Data used.....	xx
Multi-criteria analysis.....	xxi
Hydrometeorological analysis	xxiii
Hydrological analysis	xxiv
Hydraulic analysis	xxviii
Results and discussion.....	xxix
Conclusions.....	xl
Selected References	xliii
1 Εισαγωγή.....	45
1.1 Γενικά.....	45
1.1.1 Οι πλημμύρες ως φυσικές καταστροφές.....	45
1.1.2 Θεσμικό Πλαίσιο για τις Πλημμύρες	46
1.2 Αντικείμενο Εργασίας και Σημεία Πρωτοτυπίας.....	51
1.3 Διάρθρωση Εργασίας	51
2 Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα	53
2.1 Γενικά στοιχεία	53
2.1.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.....	53
2.1.2 Γεωμορφολογία περιοχής.....	55
2.1.3 Χρήσεις Γης.....	56
2.1.4 Βροχομετρικά χαρακτηριστικά	58
2.1.5 Ιστορικό Πλημμυρών	59
2.2 Δεδομένα.....	61
2.2.1 Γεωχωρικά Δεδομένα.....	61

2.2.2	Βροχομετρικά Δεδομένα.....	67
3	Μεθοδολογία ολοκληρωμένης προσέγγισης στη μελέτη του πλημμυρικού κινδύνου .	69
3.1	Γενική επισκόπηση μεθοδολογίας.....	69
3.2	Πολυκριτηριακή Ανάλυση για τον καθορισμό πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών ..	70
3.2.1	Πολυκριτηριακή ανάλυση και ΣΓΠ.....	70
3.2.2	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (ΑΗΡ).....	71
3.2.3	Επιλογή Κριτηρίων Προβλήματος.....	75
3.3	Υδρομετεωρολογική Ανάλυση πρόσφατων πλημμυρών.....	82
3.3.1	Επεξεργασία Δεδομένων	82
3.3.2	Αντικείμενο υδρομετεωρολογικής ανάλυσης	84
3.4	Υδρολογική Ανάλυση για επιλεγμένα επεισόδια	85
3.4.1	Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο ισόχρονων καμπυλών (Time - Area Diagram)	85
3.4.2	Υδρολογική ανάλυση για ιστορικά πλημμυρικά επεισόδια της περιοχής.....	97
3.5	Υδραυλική προσομοίωση.....	106
3.5.1	Το λογισμικό HEC-RAS.....	106
3.5.2	Υδραυλική προσομοίωση σε θέσεις ενδιαφέροντος	109
4	Αποτελέσματα - Συζήτηση	113
4.1	Καθορισμός πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών	113
4.2	Υδρομετεωρολογική ανάλυση	115
4.3	Υδρολογικά χαρακτηριστικά επεισοδίων – Πλημμυρογραφήματα	118
4.4	Υδραυλική προσομοίωση.....	128
5	Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα	135
5.1	Σύνοψη	135
5.2	Συμπεράσματα	135
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	137
	Αναφορές	139

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	53
Πίνακας 2.2: Χωρικές καρτεσιανές συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών.....	68
Πίνακας 3.1: Θεμελιώδης κλίμακα σύγκρισης ζευγών (Saaty, 1977) (Προέλευση: Samo Drobne and Anka Lisec, 2009, μετά από προσαρμογή).....	72
Πίνακας 3.2: Κριτήρια προσδιορισμού των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών.....	77
Πίνακας 3.3: Μητρώο συγκρίσεων των κριτηρίων κατά ζεύγη.....	78
Πίνακας 3.4: Συντελεστές βάρους των εξεταζόμενων κριτηρίων με εφαρμογή της ΑΗΡ.....	78
Πίνακας 3.5: Μέσος δείκτης συνέπειας (CI), λόγος συνέπειας (CR) και τυχαίος δείκτης συνέπειας (RI) της ΑΗΡ.....	78
Πίνακας 3.6: Συντελεστής αδιαπερατότητας σε σχέση με τις κατηγορίες χρήσεων γης του Corine.....	80
Πίνακας 3.7: Παράμετροι όμβριων καμπυλών ανά βροχομετρικό σταθμό (Πηγή: https://floods.ypeka.gr/).....	84
Πίνακας 3.8: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Καββαδά, 2012, μετά από επεξεργασία).....	91
Πίνακας 3.9: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και ανάντη Νομής.....	96
Πίνακας 3.10: Συντελεστές Thiessen για κάθε λεκάνη μελέτης.....	100
Πίνακας 3.11: Συντελεστές καμπύλης απορροής ανά λεκάνη.....	103
Πίνακας 3.12: Ρυθμός υδρολογικών απωλειών ανά κατηγορία εδάφους (Προέλευση: SCS, 1986, Skaggs and Khaheel, 1982, μετά από επεξεργασία).....	104
Πίνακας 3.13: Τιμές ειδικής παροχής στον Πηνειό ποταμό ανάλογα με την εποχικότητα.....	106
Πίνακας 3.14: Συντελεστής τραχύτητας Manning σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Huang, 2015, μετά από επεξεργασία).....	110
Πίνακας 4.1: Μέγιστες τιμές συνολικού ύψους και διάρκειας σημειακής βροχόπτωσης για τα επιλεγμένα επεισόδια.....	116
Πίνακας 4.2: Περίοδοι επαναφοράς ιστορικών επεισοδίων για διαφορετικές διάρκειες βροχής.....	117
Πίνακας 4.3: Συνολικές υδρολογικές απώλειες ανά επεισόδιο βροχής.....	122
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά επεισοδίων βροχής για τις λεκάνες απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και ανάντη Νομής.....	123
Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 01/02/2015.....	124

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 22/05/2016	124
Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 09/09/2016	124

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	50
Σχήμα 2.1: Περιοχή μελέτης, όμοροι Καλλικρατικοί Δήμοι και κέντρα οικισμών (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	54
Σχήμα 2.2: Λεκάνες απορροής Θεσσαλίας (Πηγή: ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).....	56
Σχήμα 2.3: Κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης κατά Corine (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	57
Σχήμα 2.4: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	62
Σχήμα 2.5: Κατανομή χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2012 για την περιοχή μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	64
Σχήμα 2.6: Κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	65
Σχήμα 2.7: Κατηγορίες εδάφους της περιοχής μελέτης.....	67
Σχήμα 3.1: Πλαίσιο ολοκληρωμένης προσέγγισης στη διαχείριση κινδύνου πλημμύρας	69
Σχήμα 3.2: Στάδια υλοποίησης μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (Προέλευση: Χαλκιάς, 2015, μετά από επεξεργασία).....	70
Σχήμα 3.3: Χάρτες κριτηρίων μετά την τυποποίηση (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	81
Σχήμα 3.4: Ιστορικά επεισόδια βροχής στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	83
Σχήμα 3.5: Σκαρίφημα τυπικού υδρογραφήματος απορροής με το αντίστοιχο υετογράφημα.....	87
Σχήμα 3.6: Θέσεις ενδιαφέροντος για την υδρολογική ανάλυση (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	89
Σχήμα 3.7: Στάδια υλοποίησης μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS.....	90
Σχήμα 3.8: Υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	93
Σχήμα 3.9: Όρια λεκανών απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και Νομής (θέση ανάντη οικισμού) (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	94
Σχήμα 3.10: Λεκάνες απορροής (α) Καλαμπάκας, (β) Πύλης, (γ) Μουζακίου και (δ) ανάντη Νομής (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	95
Σχήμα 3.11: Βροχομετρικοί σταθμοί (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	99
Σχήμα 4.1: Χάρτης πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών και υποπεριπτώσεις εναλλακτικής ταξινόμησης 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	114
Σχήμα 4.2: Ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας στη θέση Καλαμπάκα.....	118
Σχήμα 4.3: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα.....	119

Σχήμα 4.4: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Πύλη (Προέλευση: ΔΕΗ, μετά από προσαρμογή).....	120
Σχήμα 4.5: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Μουζάκι.....	120
Σχήμα 4.6: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής.....	121
Σχήμα 4.7: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 01/02/2015	125
Σχήμα 4.8: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 01/02/2015.....	125
Σχήμα 4.9: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 01/02/2015	125
Σχήμα 4.10: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 01/02/2015 ..	125
Σχήμα 4.11: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 22/05/2016	126
Σχήμα 4.12: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 22/05/2016.....	126
Σχήμα 4.13: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 22/05/2016	126
Σχήμα 4.14: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 22/05/2016 ..	126
Σχήμα 4.15: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 09/09/2016	127
Σχήμα 4.16: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 09/09/2016.....	127
Σχήμα 4.17: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 09/09/2016	127
Σχήμα 4.18: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 09/09/2016 ..	127
Σχήμα 4.19: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Καλαμπάκας	130
Σχήμα 4.20: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Πύλης....	130
Σχήμα 4.21: : Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Μουζακίου	131
Σχήμα 4.22: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Καλαμπάκας	131
Σχήμα 4.23: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Πύλης	132
Σχήμα 4.24: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Μουζακίου	132

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Τμήμα του Πηνειού ποταμού (α) σε συνθήκες κανονικής ροής και (β) σε φαινόμενο πλημμύρας (01/02/2015) (Πηγή: Τύπος).....	129
---	-----

List of Figures

Figure 1: DEM and stream network of the study area.....	xx
Figure 2: Standardized criteria (C1-C6)	xxiii
Figure 3: Flow chart of time – area method	xxv
Figure 4: Kalabaka; Pili; Mouzaki and Nomi (upstream) basins.....	xxviii
Figure 5: Flood vulnerability map with Natural Breaks and manual classification alternatives (5.1, 5.2, 5.3)	xxx
Figure 6: Time – area histogram of Kalabaka position.....	xxxi
Figure 7: Unit hydrographs for the basins of Kalabaka (a), Pili (b), Mouzaki (c) and Nomi, upstream (d).....	xxxii
Figure 8: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 01/02/2015	xxxii
Figure 9: Flow hydrograph of Pili position, event: 01/02/2015.....	xxxiii
Figure 10: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 01/02/2015.....	xxxiii
Figure 11: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 01/02/2015	xxxiii
Figure 12: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 22/05/2016	xxxiii
Figure 13: Flow hydrograph of Pili position, event: 22/05/2016.....	xxxiv
Figure 14: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 22/05/2016.....	xxxiv
Figure 15: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 22/05/2016.....	xxxiv
Figure 16: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 09/09/2016	xxxiv
Figure 17: Flow hydrograph of Pili position, event: 09/09/2016.....	xxxv
Figure 18: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 09/09/2016.....	xxxv
Figure 19: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 09/09/2016.....	xxxv
Figure 20: Maximum flow depth downstream the basin of Kalabaka.....	xxxvii
Figure 21: Maximum flow depth downstream the basin of Pili.....	xxxvii
Figure 22: Maximum flow depth downstream the basin of Mouzaki	xxxviii
Figure 23: Maximum flow velocity downstream the basin of Kalabaka.....	xxxviii
Figure 24: Maximum flow velocity downstream the basin of Pili.....	xxxix
Figure 25: Maximum flow velocity downstream the basin of Mouzaki.....	xxxix

List of Tables

Table 1: Scale for pairwise comparison (Saaty, 1977) (Drobne and Lisec, 2009)	xxi
Table 2: Square pairwise comparison matrix of the employed criteria.....	xxii
Table 3: Normalized factor weights using the AHP method	xxii
Table 4: Consistency Index (CI), Random Consistency Index (RI) and Consistency Ratio (CR)	xxii
Table 5: Topographic attributes of the employed subbasins	xxvii

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της, καθώς και για τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε στο πλαίσιο της εξαιρετικής συνεργασίας μας.

Παράλληλα, ευχαριστώ τους κ. Νικόλαο Μαμάση, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την κ. Ελισσάβετ Φελώνη, Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τις καθοριστικές συμβουλές της, την καθοδήγηση και το χρόνο που διέθεσε, καθώς και για τις γνώσεις που μου προσέφερε πάνω σε επιστημονικά ζητήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή της ήταν καθοριστική.

Παράλληλα, ευχαριστώ τον κ. Απόλλωνα Μπουρνά, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για το χρόνο που διέθεσε, τις επισημάνσεις του σε καίρια ζητήματα και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ, ακόμη, την Αιμιλία Θεοχάρη, Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη συμβολή της και την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα, ακόμη, να εκφράσω ένα ευχαριστώ στην αδελφή μου Ελένη Ανδρικοπούλου, Msc Διπλωματούχο Αγρονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την αμέριστη βοήθεια και την αδιάλειπτη ενθάρρυνσή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και γενικότερα.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου και την οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

Θεοδώρα Ζ. Ανδρικοπούλου

Αθήνα, 2019

Περίληψη

Η ιδιαίτερη γεωμορφολογία σε συνδυασμό με την ανθρώπινη επίδραση καθιστούν πολλές περιοχές της Ελλάδας ευπαθείς σε πλημμυρικά φαινόμενα, τα οποία συχνά συνοδεύονται από δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού έως τη θέση Αλή Εφέντη, που αντιπροσωπεύει κυρίως τα όρια της ΠΕ Τρικάλων. Αναλύοντας χαρακτηριστικά της περιοχής όπως η τοπογραφία, ο τύπος και η αδιαπερατότητα του εδάφους, η βροχόπτωση αλλά και η κάλυψη γης, έγινε προσδιορισμός των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης και τεχνικών Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Μελετώντας το σχετικό ιστορικό πλημμυρών και συνδυάζοντάς το με τα διαθέσιμα δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών διενεργήθηκε υδρομετεωρολογική ανάλυση για το σύνολο των πρόσφατων επεισοδίων πλημμύρας που σημειώθηκαν στην περιοχή. Στο πλαίσιο της υδρομετεωρολογικής ανάλυσης προσδιορίστηκαν η διάρκεια, το συνολικό ύψος, καθώς και η περίοδος επαναφοράς των ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης. Με δεδομένες τις περιοχές υψηλού κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας έγινε εκτίμηση του μηχανισμού βροχής – απορροής σε κάποιες από αυτές, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υδρολογική προσομοίωση για τρία από τα ιστορικά επεισόδια που αναλύθηκαν, αξιοποιώντας τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η εκτίμηση του μοναδιαίου υδρογραφήματος στις θέσεις που εξετάστηκαν έγινε με εφαρμογή της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών. Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών στην υδρολογική ανάλυση, εφαρμόστηκε η μέθοδος Thiessen για την αναγωγή της σημειακής σε επιφανειακή βροχόπτωση, για την οποία υπολογίστηκαν οι υδρολογικές απώλειες σύμφωνα με τη μέθοδο SCS - CN. Τα αποτελέσματα της υδρολογικής ανάλυσης για το δυσμενέστερο επεισόδιο αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου στην υδραυλική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε τελικά με σκοπό τη σκιαγράφηση του πλημμυρικού πεδίου κατάκλισης σε θέσεις ενδιαφέροντος.

Λέξεις κλειδιά: Λεκάνη απορροής, επεισόδιο βροχόπτωσης, πλημμύρα, πλημμυρικός κίνδυνος, Καλαμπάκα, Πύλη, Μουζάκι, Νομή, ισόχρονες καμπύλες, GIS, HEC-RAS

Executive summary

Introduction

Floods are among the most important natural hazards due to the increasing number of inundation events with their associated social and economic repercussions. In the context of reducing the adverse consequences of floods regarding human health, environment, cultural heritage and economic activity, EU enacted the Directive 2007/60 on the assessment and management of flood risks. According to the framework of this Directive, every EU Member is required to implement an integrated process involving preliminary estimation of flood prone areas relevant to their water courses and coast lines, flood hazard and risk maps and coordinated flood risk management plans for the vulnerable areas.

This diploma thesis aims at assessing flood risk in Ali - Efenti catchment, Central Greece, the upper part of Pinios river. The frequency and the severity of rainfall events in conjunction with the consequences occurred make this area appropriate to be investigated. In the first part of this thesis, a GIS-based spatial multi-criteria analysis is conducted for the identification of flood prone areas at watershed scale. Given the areas which are potentially at risk of flooding, hydrological analysis is also performed based on the unit hydrograph theory that is applied to simulate the rainfall – runoff process in four subbasins of the catchment described above, namely Kalabaka, Pili, Mouzaki and Nomi (upstream). The hydrological analysis concerns three historic rainfall events inducing flood. Alongside, a hydrometeorological analysis for a sequence of historic flood events recorded during the last decade is made using the available rainfall data. In the context of the integrated approach of flood hazard estimation within the study area, hydraulic simulation using the HEC-RAS software is carried out downstream the abovementioned subbasins for the most severe rainfall event. In this way, the identification of floodplains is possible, which is necessary for the integrated flood risk management, forecasting and mitigation that is within the frame of future research.

Materials and Methods

Study area

Ali - Efenti watershed constitutes a subbasin of the broader Pinios river catchment in the northwest part of the River Basin District (RBD) of Thessaly. It is located between the longitude 21°13'E - 22°6'E and the latitude 39°53'N - 39°18'N. Study area is up to the Ali - Efenti bridge, close to the Amygdalia location (downstream). Within the study area Pinios river has experienced frequent flood episodes due to intense storms occurred especially in the west.

Ali – Efenti catchment covers an area of about 2806 km² and also includes a 144.81 km long section of Pinios river. Elevation ranges from 84 to 2205 m with mean elevation 554 m. In regard with the precipitation depth, the mean annual rainfall is approximately 687 mm with higher values observed in the mountainous parts of the western part of the basin. The predominant land cover type according to Corine Land Cover (2012) classification is permanently irrigated land and transitional woodland-shrub along with broad-leaved forest follow. Generally, the area appears as a plain bounded by hills and is mainly exploited as cultivated land.

Data used

The datasets in which the analysis was based are the Digital Elevation Model (DEM), Corine Land Cover (2012) and other DEM-derived geomorphological and hydrological attributes, such as the slope and streams definition. Finally, the soil type (A, B, C, D) according to SCS (1972) is taken into consideration. The DEM (Figure 1) was provided by the National Cadastre and Mapping Agency S.A., with a cell size of 5x5 m. DEM along with the stream network of the study area is depicted in Figure 1.

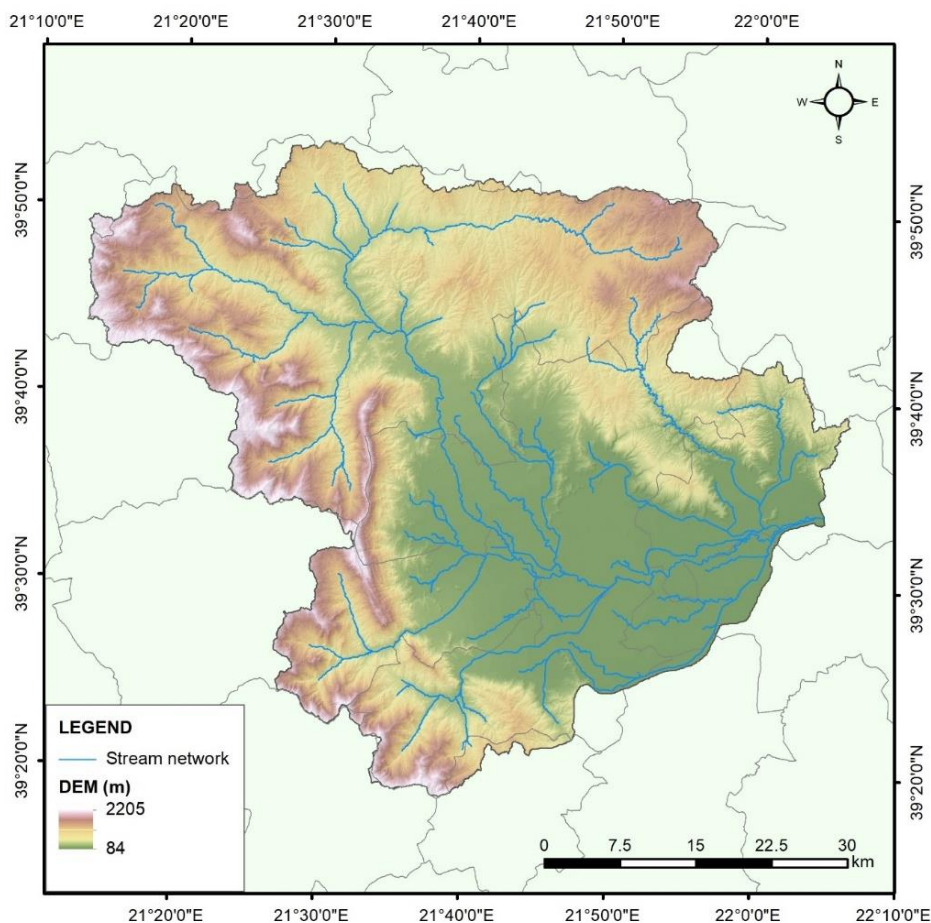


Figure 1: DEM and stream network of the study area

Further investigation is based on the available hydro-meteorological data of the recent historic flood events occurred within the study area. More specifically, the 10 – min rainfall measurements of the adjacent to the catchment area rain gauges were used.

Multi-criteria analysis

A GIS - based (spatial) multi-criteria analysis and evaluation framework has been developed and implemented at catchment scale for the identification of the potentially flood prone areas. Multi-Criteria Analysis (MCA) is used to analyse a series of alternatives or objectives with a view to ranking them from the most preferable to the least preferable using a structured approach. The results of MCA are often a set of weights linked to the various objectives (Papaioannou, 2014). In order to weight the criteria selected, Analytical Hierarchy Process (AHP) has been applied based on the following steps: definition of the unstructured problem, development of the AHP hierarchy, creation of the pairwise comparison table, estimation of the relative weights, consistency evaluation and overall rating of the method. The pairwise comparison is based on the fundamental comparison scale introduced by Saaty in 1977 (Table 1).

Table 1: Scale for pairwise comparison (Saaty, 1977)
(Drobne and Lisec, 2009)

Intensity of Importance	Definition
1	Equal importance
2	Equal to moderate importance
3	Moderate importance
4	Moderate to strong importance
5	Strong importance
6	Strong to very strong importance
7	Very strong importance
8	Very to extremely strong importance
9	Extreme importance

In this study, the following spatial criteria have been considered:

C1) Corine Land Cover (2012), C2) Slope, C3) Elevation (DEM), C4) Rainfall, C5) Soil Type, C6) Imperviousness. The efficiency of the comparison between the primary factors as well as the resulting weighting factors was verified with the Consistency Ratio approach (CR) according to which, CR should not overcome 10%.

The results of the pairwise comparison process, the final weights and the indices of CR analysis are presented in the following tables (Tables 2-4).

Table 2: Square pairwise comparison matrix of the employed criteria

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	4	2	4	2
C2	3	1	5	4	5	2
C3	1/4	1/5	1	1/3	1/2	1/2
C4	1/2	1/4	3	1	4	1/2
C5	1/4	1/5	2	1/4	1	1/2
C6	1/2	1/2	2	2	2	1

Table 3: Normalized factor weights using the AHP method

C1	Land Cover	0.218
C2	Slope	0.378
C3	Elevation	0.054
C4	Rainfall	0.139
C5	Soil Type	0.068
C6	Imperviousness	0.149

Table 4: Consistency Index (CI), Random Consistency Index (RI) and Consistency Ratio (CR)

Coefficient	Value
CI	0.068
RI	1.24
CR	0.055

All derived features have the same spatial resolution (5x5 m cell size) and were calculated as normalized criteria within the scale from zero (0), indicating low vulnerability, to one (1), for high vulnerability, to increase objectivity and general application of the method in other watersheds.

Figure 2 presents the six selected geomorphologic indices and their normalized spatial distribution used for the detection of potential flood-prone areas.

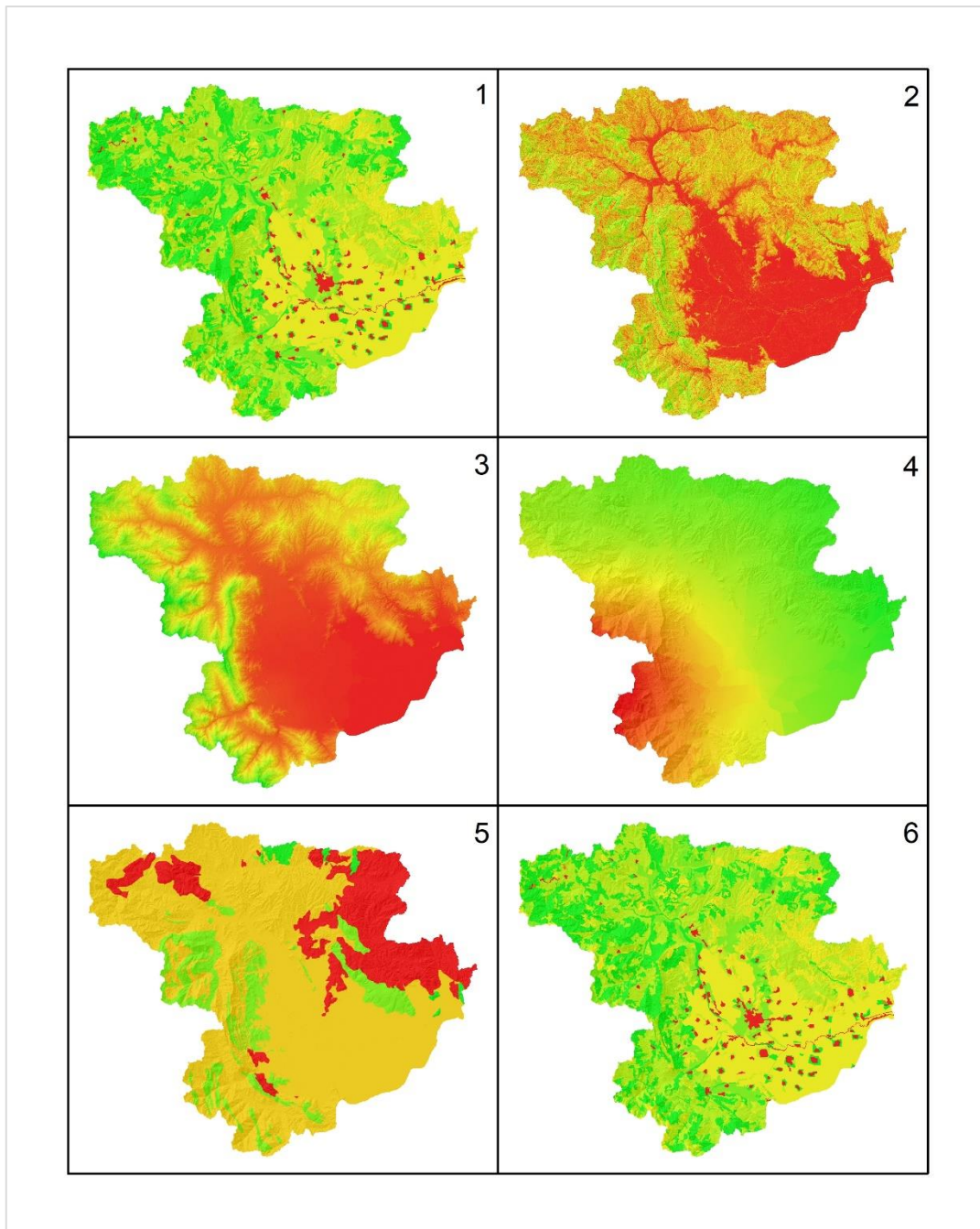


Figure 2: Standarized criteria (C1-C6)

Hydrometeorological analysis

The hydrometeorological analysis concerns historic flood events data. As historical flood recordings for the last years have been collected by several authorities, newspapers, local interviews and testimonies of flood victims. More specifically, historic flood events occurred within the study area during the last decade are taken into consideration.

Rainfall data series were provided by NOANN (Lagouvardos et al., 2017) and they concern 10 - minute rainfall measurements (in mm/10min). Nine stations used namely Trikala, Karditsa, Larissa, Gardiki, Kalabaka, Plastira, Koniskos, Metsovo and Pertouli. During the data analysis

and processing, it was observed that the availability in rainfall measurements for all events is not systematic for all stations, thus a selection was made.

The rainfall events selected for further analysis are presented below:

- 11/09/2010
- 15/04/2012
- 30/12/2012
- 12/11/2013
- 01/02/2015
- 16/01/2016
- 22/05/2016
- 23/08/2016
- 09/09/2016
- 09/03/2017
- 16/11/2017

For each of the employed flood events the total precipitation, the duration and the return period for rainfall duration of 1, 2, 6, 12, 24 and 48 h are determined. The total rainfall height as well as the duration of each event are directly calculated from the 10 - minute historic observations. Return period is determined through the intensity-duration-frequency (IDF) curves that are available for various stations in the region. The IDF parameters are determined in the frame of the implementation of the 2007/60/EC directive.

Hydrological analysis

Three historic events were selected for hydrological analysis, as follows:

- 01/02/2015
- 22/05/2016
- 09/09/2016

During these three events, high total rainfall depth and duration was recorded leading to considerable impacts.

Hydrological analysis for these events is based on the unit hydrograph theory. In order to determine the unit hydrograph, the time – area diagram method is applied mainly executed in GIS environment.

The time - area methods were developed in recognition of the importance of the time distribution of rainfall on runoff (Singh, 1992). The basic idea of these methods is the time –

area histogram, which indicates the distribution of partial watershed areas contributing to runoff at the watershed outlet as function of travel time. These areas are bounded by isochrones curves. An ‘isochrone’ is a contour joining those point in the watershed that are separated from the outlet by the same travel time. The isochrones cannot cross one another, cannot close and can only originate or terminate on the watershed boundary (Singh, 1992).

Derivation of the time - area diagram requires knowledge of the soil roughness, the terrain slope, as well as the distribution of flow directions and velocities over the watershed (Muzik, 1996). The flow chart of the method applied is presented in the following figure (Figure 3).

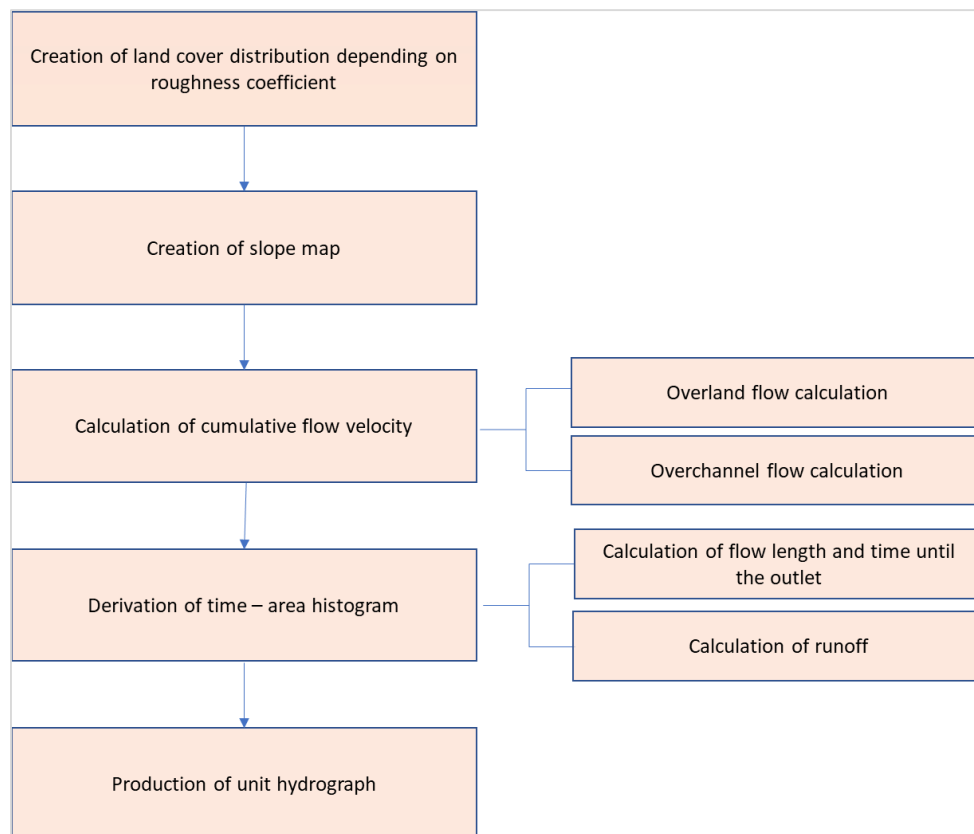


Figure 3: Flow chart of time – area method

To estimate the discharge at the outlet of the basin and create the corresponding flood hydrograph, well-distributed rainfall data are required. The rainfall time series for the three selected events represent the precipitation measured at the point where rain gauges are located. Therefore, surface integration is needed to be applied in order to deduce point observations to surface rainfall representative for the entire catchment. For this purpose, in this study, Thiessen polygon method is applied using GIS techniques.

Thiessen polygon is a commonly used methodology for computing the mean areal precipitation for a catchment from rain gauge observations which was presented by Thiessen (1911). The method is found on the assumption that measured amounts at any station can be

applied halfway to the next station in any direction, which means that for any point rainfall is equal to the observed rainfall at the closest gauge. The weights of the rain gauges are computed by their relative areas, which are estimated with the Thiessen polygon network. The polygons are formed by the perpendicular bisectors of the lines joining nearby stations. The area of each polygon is used to weight the rainfall amount of the station in the center of the polygon. If the amount for any station is missing, the polygon must be changed. The limitation of the method is that Thiessen polygons are unable to consider orographic differences in rainfall distributions (Schumann, 1998).

Subsequently, hydrological losses were identified through the SCS - CN method to calculate the net rainfall that accounts for the direct runoff. The Curve Number (CN) was developed by the USDA Natural Resources Conservation Service and is an empirical parameter used in hydrology for predicting direct runoff or infiltration from rainfall excess. The runoff CN is based on the area's hydrologic soil group, land use and soil moisture conditions. Since it is a function of the soil and land use of a drainage basin, estimation of a curve number requires mapping of the soil and land use within the drainage basin boundaries, and specification of unique soil types and unique land use categories. In this study, CN is estimated according to the CN tables in a way to represent the mean conditions of soil group and soil moisture of the whole basin.

The resulting water losses are distributed over time according to the Initial and constant-rate loss model. The concept of the initial and constant-rate model is that the maximum potential infiltration rate is constant. The initial loss is added to the model to represent interception and depression storage (Feldman, 2000). These two parameters of constant rate and initial loss indicate the physical characteristics of soil, land use and antecedence conditions of basin. According to American standards, range of initial loss in forest area is between 10 to 20 percent of rainfall and it varies between 0.1 to 0.2 inches in urban areas. Constant loss rate shows the final capacity of soil (Saleh, 2011).

The derived unit hydrographs along with the surface rainfall data result in the creation of the flood hydrograph. According to Singh (1976) direct surface runoff rates at homologous times are considered proportional to different amounts of rainfall excess of the same duration. The assumed noninterference of the time distribution of concurrent surface runoffs from various storm periods permits the synthesis of flood hydrographs based on the principle of superposition. Thus, the use of a unit hydrograph to compute flood hydrographs from various storms is based on the principles of linearity and superposition.

The total discharge at the outlet of the basin is calculated by adding the base flow, which represents the water seeping into the stream from groundwater, helping to keep water in streams during droughts. According to the Flood Risk Management Plan for the River District Basin of Thessaly, in flood studies as base flow is commonly considered the mean annual specific runoff (q) of the river.

In agreement with all the above, in this research, base flow is calculated by multiplying the specific runoff proposed in the Flood Risk Management Plan for Pinios river draining through Ali – Efenti catchment ($0.014 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) with the basin of special interest area. Due to the seasonality phenomenon, base flow value copes with fluctuations with the highest values be noted between December – February and the lowest between July – August, when both precipitation and runoff are minor. Thus, the specific flow depending on the period that event under consideration occurred is equal to 0.014 , 0.011 and $0.007 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ for the events of 01/02/2015, 22/05/2016 and 09/09/2016, respectively.

The hydrological analysis concerns four subbasins of the initial basin hence all the processes described before are repeating for each of them, separately. In particular, the basins of Kalabaka in the north, Pili and Mouzaki in the southwest and Nomi (upstream) covering most of the whole basin area except for the eastern part, are considered. The main topographic attributes of these basins are presented in the following Table (Table 5).

Table 5: Topographic attributes of the employed subbasins

Basin	Area (km^2)	Mean Elevation (m)	Mean Slope ($^\circ$)
Kalabaka	1016.12	840.05	48.32
Pili	132.88	950.80	66.10
Mouzaki	143.49	816.14	58.63
Nomi (upstream)	2017.65	656.76	42.16

The relative position of the regarded basins as to the initial Ali – Efenti watershed is depicted in Figure 4.

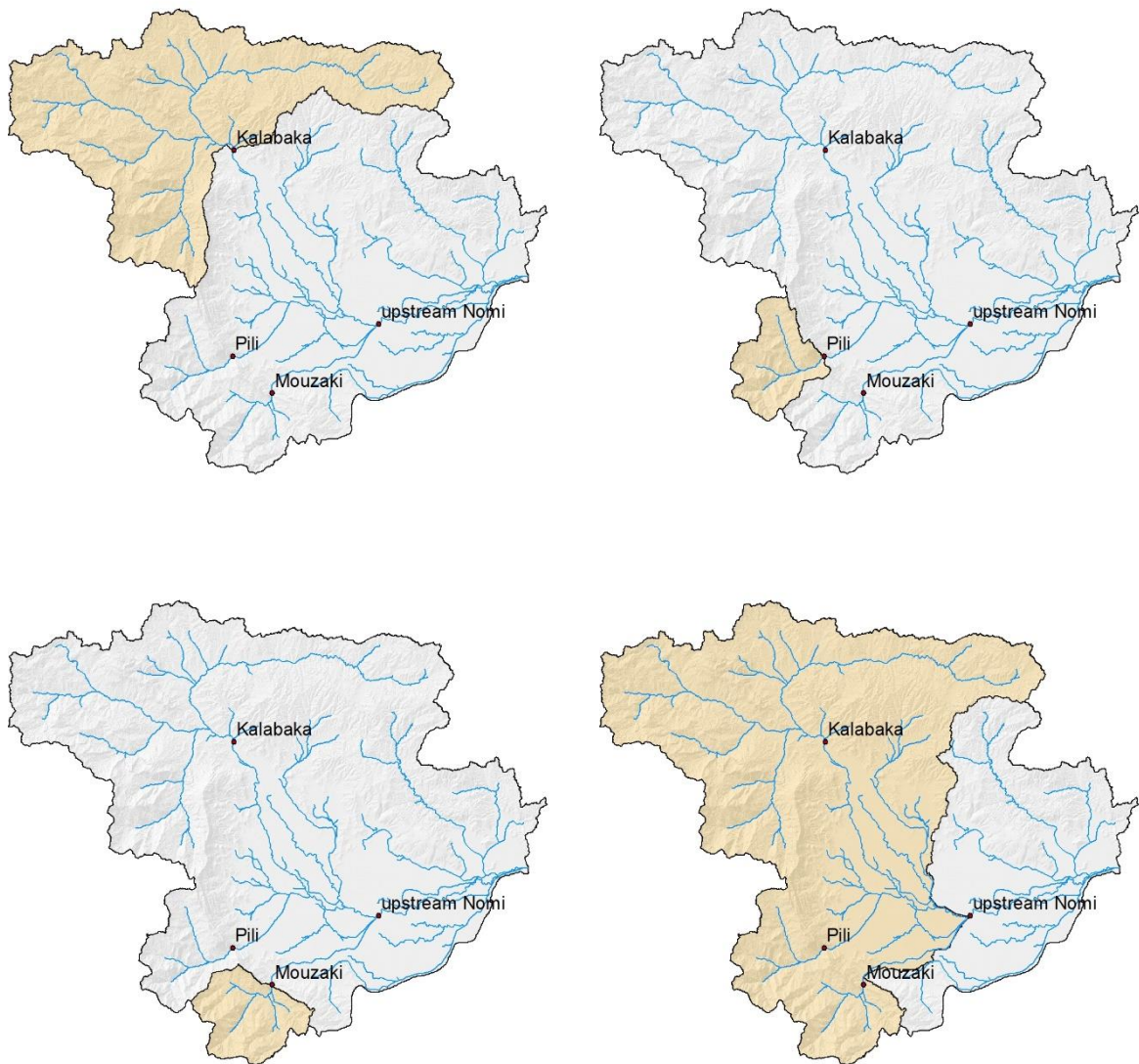


Figure 4: Kalabaka; Pili; Mouzaki and Nomi (upstream) basins

Hydraulic analysis

In the context of the integrated approach of flood hazard estimation, hydraulic simulation is attempted in four positions within the initial watershed of Ali – Efenti. More specifically, a 2D hydrodynamic unsteady flow analysis is conducted, using the software HEC – RAS 5.0.7 for Kalabaka, Pili, Mouzaki and Nomi, downstream areas. HEC-RAS is a freeware hydraulic model which can be used for one-dimensional steady and unsteady flow hydraulics computations. Regarding unsteady flow computations, Saint-Venant Equations' numerical solution is approximated using an implicit finite difference approach through the computational Box Scheme (USACE, 2016). During the model building setup, the stream network, the terrain, the land use and the boundary conditions were ascertained. The terrain was defined by the Digital Elevation Model input feature of 5x5 m pixel size resolution. The land use layer was based on

the Corine Land Cover (2012) shapefile. As an upper boundary condition, the corresponding flood hydrograph as calculated in a previous stage was used. Manning's roughness coefficient was integrated in the model by the land use input. The simulation outputs are evaluated in reference to the inundation rendered in historic press records. Finally, maps for the maximum depth and maximum velocity are produced for the resulting floodplain area.

Results and discussion

The first part of the analysis concerns the GIS-based MCDM for the flood prone areas identification. Pairwise comparison application and analysis produced the relative weights of the study factors. Table 4 (in the Materials and Methods section) presents these weights and denote that the most important factors that increase the level of flood vulnerability are the slope and the land use. Hence, flood prone areas identification depends mainly on these two factors. The composition of all the standardized criteria is achieved using the weighted linear combination (WLC) approach that is incorporated into the ArcGIS environment. As a result, the final map that depicts the flood vulnerable areas is created. In order to classify the classes (low-high) of potentially flood prone areas, the Natural Breaks (Jenks) method is applied and compared to the manual clustering technique. Three classes for potentially flood prone areas are determined: 1) Low, 2) Medium, 3) High.

As shown in Figure 5, the most prone areas are located in the lowlands, while a lower percentage represent the areas that are standing close to the rivers. On the contrast, areas that are tended to be on the higher grounds and further away from the high drainage density areas are potentially susceptible to "low" to "medium" level of flood hazard.

Additionally, the classification technique that is followed is a decisive fact that influences significantly the flood vulnerability mapping. More specifically, by setting stricter boundaries in the high-risk class, areas that are prone to high flooding vulnerability are limited in urbanized land and impervious surfaces, which leads to an underestimation of the real spatial distribution of the flood hazard (Figure 5.3). Conversely, the most prone areas extend to a larger scale in the case of broadening the relevant class (Figure 5.1). A mean situation is depicted in Figure 5.2, where the most critical areas in terms of flooding occurrence are associated with low elevation, mild slope profile, urban fabric, whereas riparian mountainous areas are excluded. Hence it is considered more rational comparing to the other clustering scenarios as better represents the flood risk in the whole study area. However, despite the different distribution of the flood hazard depending on the classification method applied, it is obvious as an overall conclusion that downstream lowland zones subject to the highest risk of inundation event.

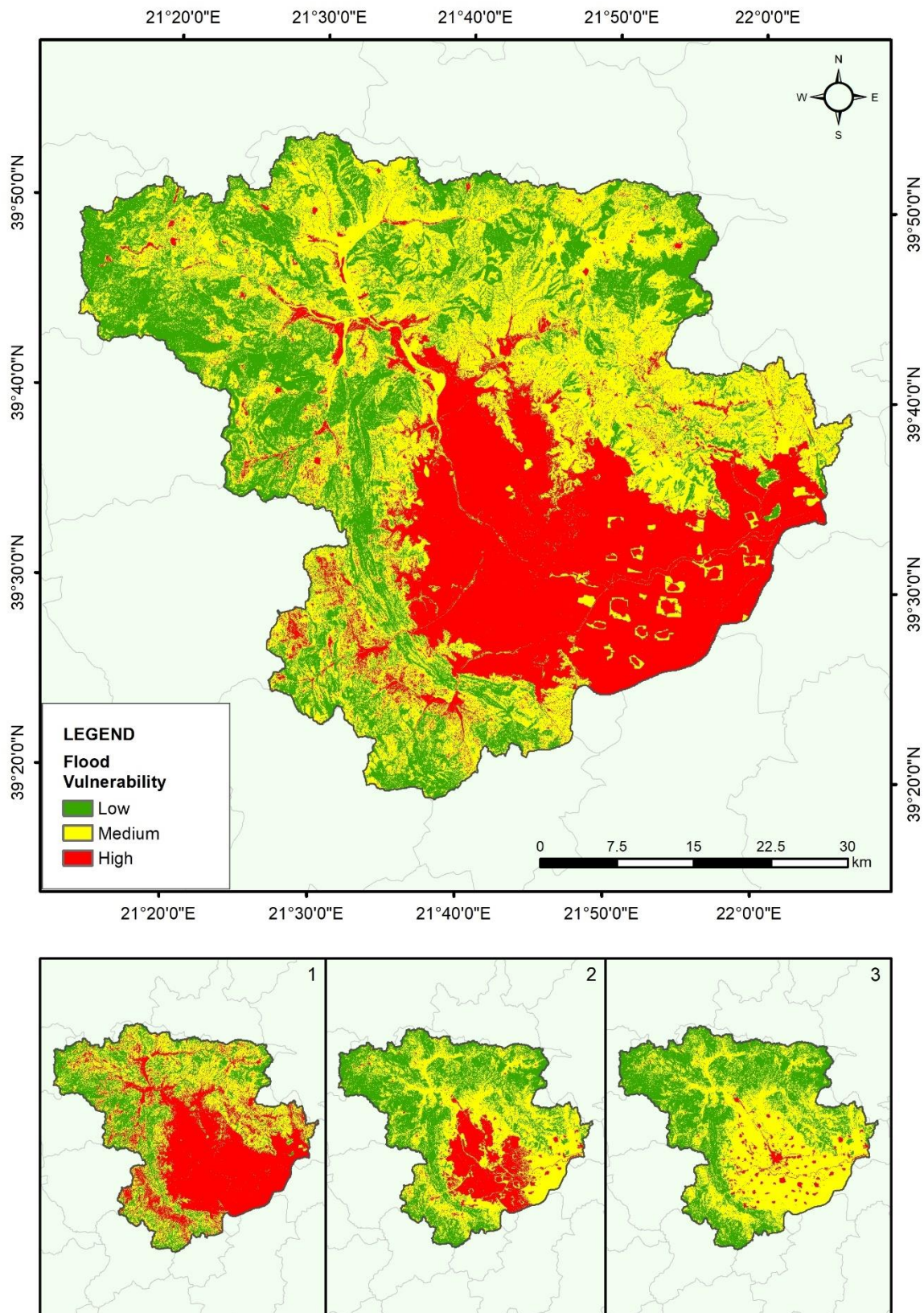


Figure 5: Flood vulnerability map with Natural Breaks and manual classification alternatives (5.1, 5.2, 5.3)

Analysis and interpretation of hydrometeorological data showed that most events are of high frequency (low return period). More precisely, the return periods of the most of historic events examined are estimated equal to as less than one year.

Within the flood analysis approach a hydrological analysis was applied in order to simulate the rainfall – runoff model at catchment scale. More specifically four subbasins of the Ali Efenti catchment were considered, namely Kalabaka, Pili, Mouzaki and Nomi (upstream), as described previously. For each of them the unit hydrograph was determined using the Time – Area Diagram method combined with GIS and HEC-GeoHMS techniques by creating the corresponding time – area histogram. An indicative time – area histogram (number of cells vs time) created in GIS concerning the basin of Kalabaka is presented in Figure 6.

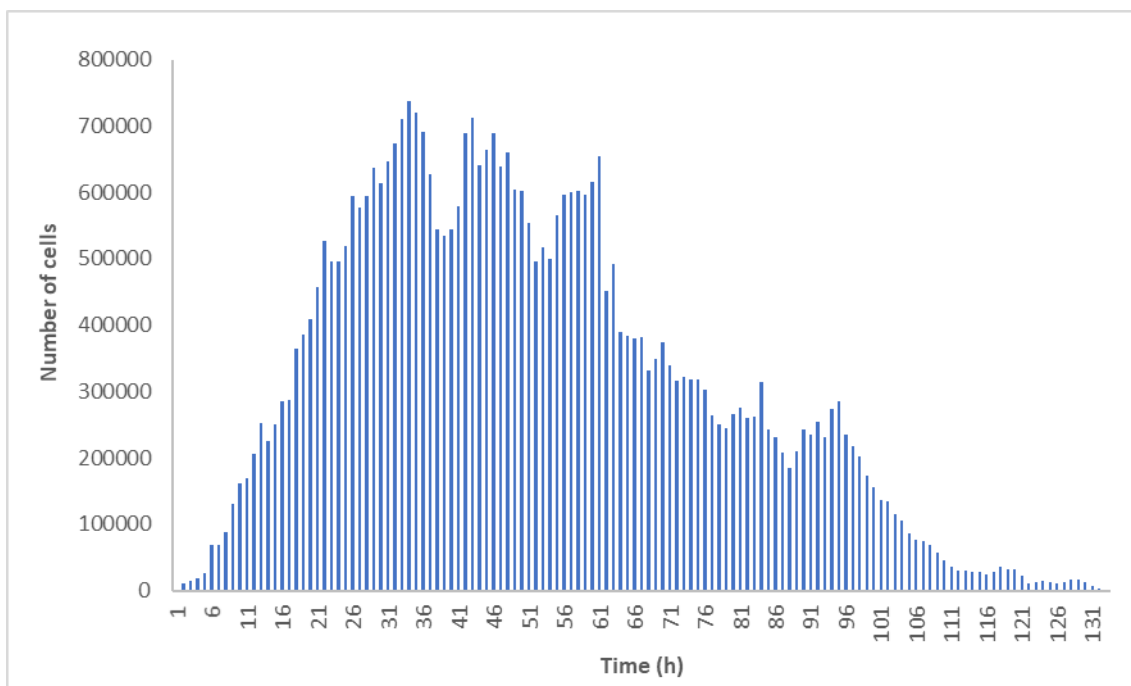


Figure 6: Time – area histogram of Kalabaka position

However, in the case of Pili basin the results of this method were not satisfactory as the method was not capable for simulating the rainfall-runoff process in the basin, and, thus hydrologic measurements from the PPC were used to calculate the unit hydrographs (UH). The resulting UHs for the four basins are presented in Figure 7.

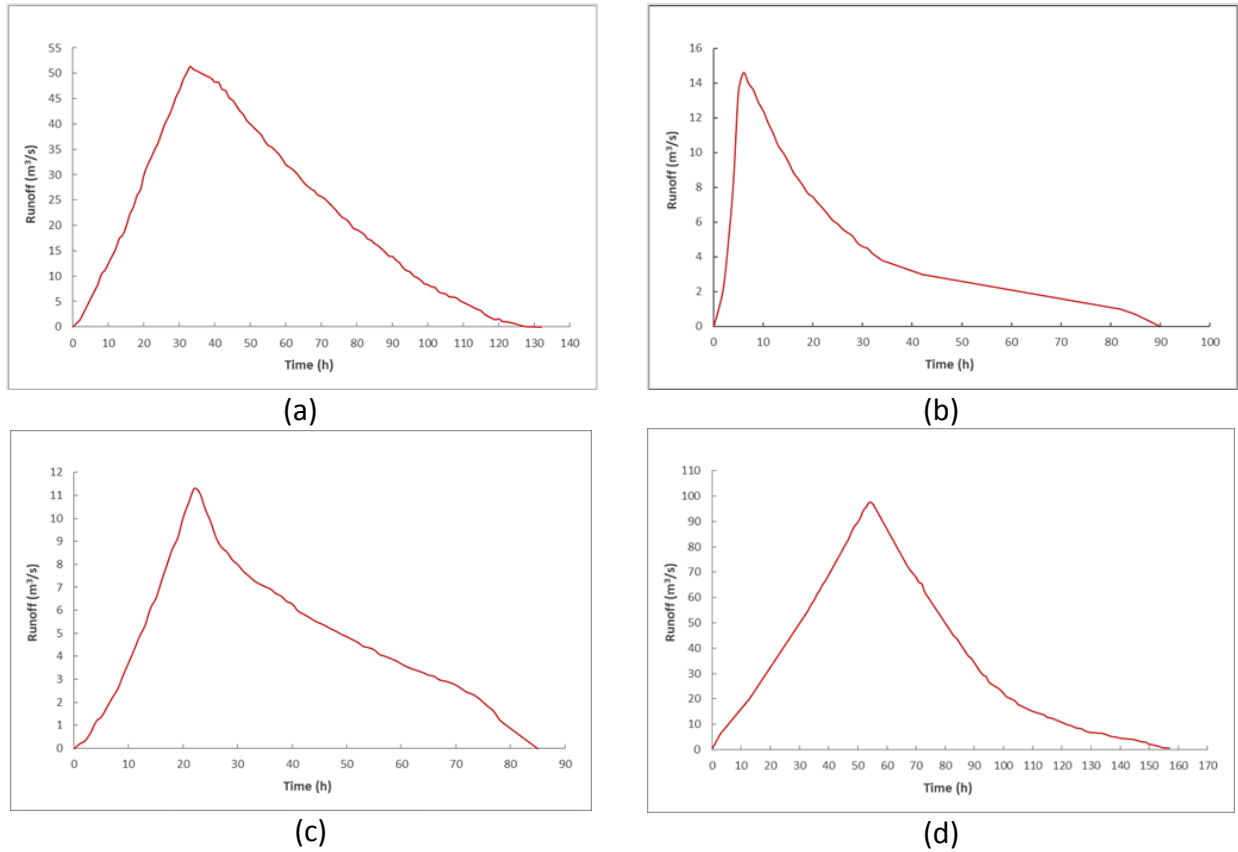


Figure 7: Unit hydrographs for the basins of Kalabaka (a), Pili (b), Mouzaki (c) and Nomi, upstream (d)

According to the derived UH, the highest runoff as well as the longest peak time is noticed in Nomi basin, which dominates in size, while the ascending part of the curve appears lower gradient in comparison with the basins of Kalabaka, Pili and Mouzaki.

Unit hydrographs are subsequently used for analyzing and deriving flood hydrographs, resulting from a known storm that differs for each subbasin. Historical rainfall data from three storm events were considered, occurred at 01/02/2015, 22/05/2016 and 09/09/2016. The derived flow hydrographs of the examined basins (Kalabaka, Pili, Mouzaki and Nomi, upstream) are presented in Figure 8 – Figure 19.

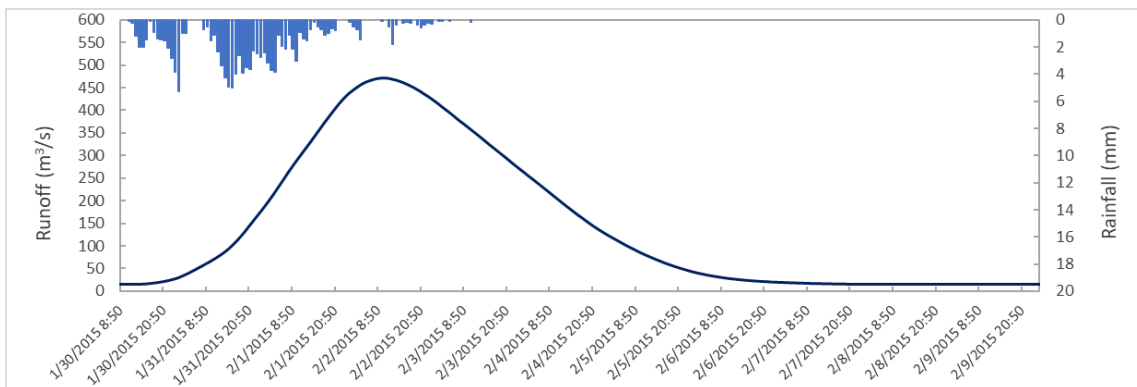


Figure 8: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 01/02/2015

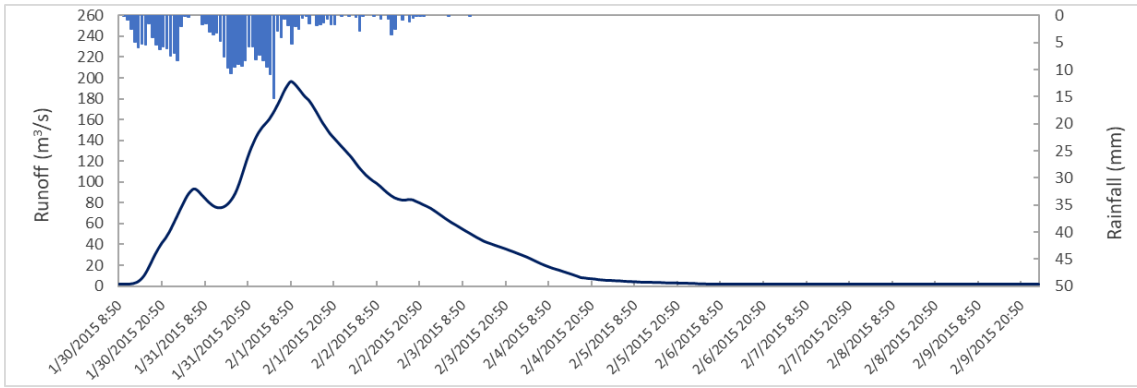


Figure 9: Flow hydrograph of Pili position, event: 01/02/2015

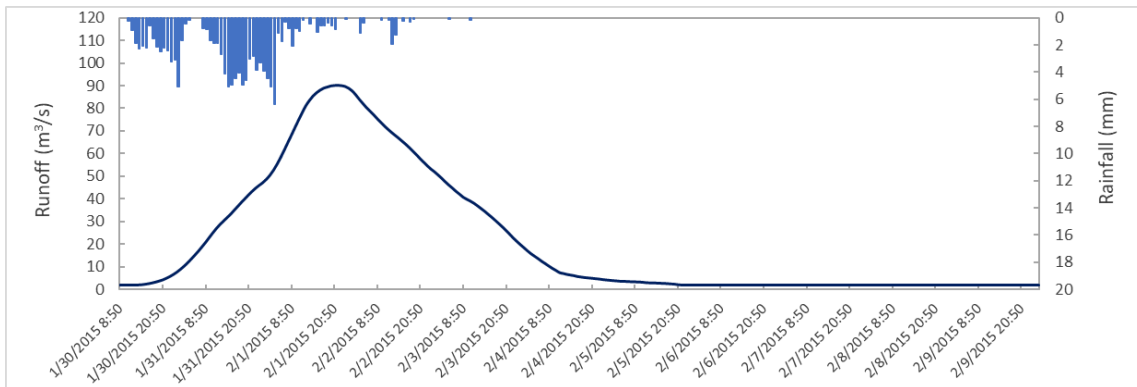


Figure 10: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 01/02/2015

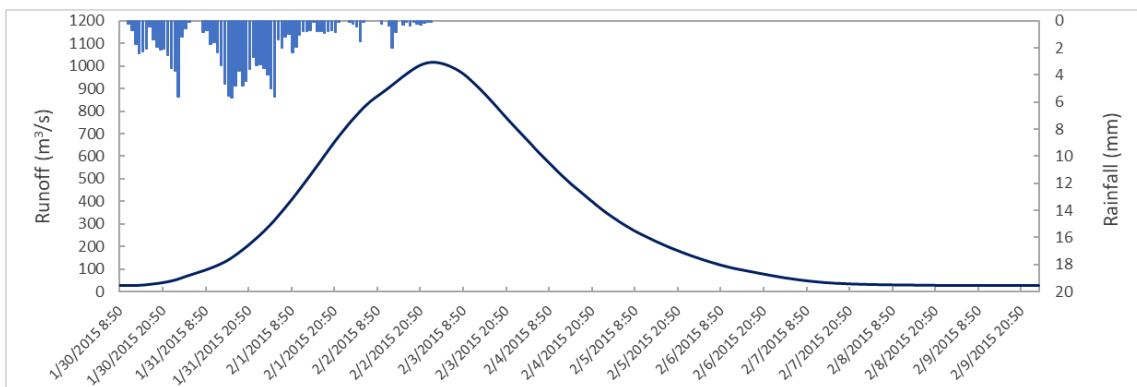


Figure 11: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 01/02/2015

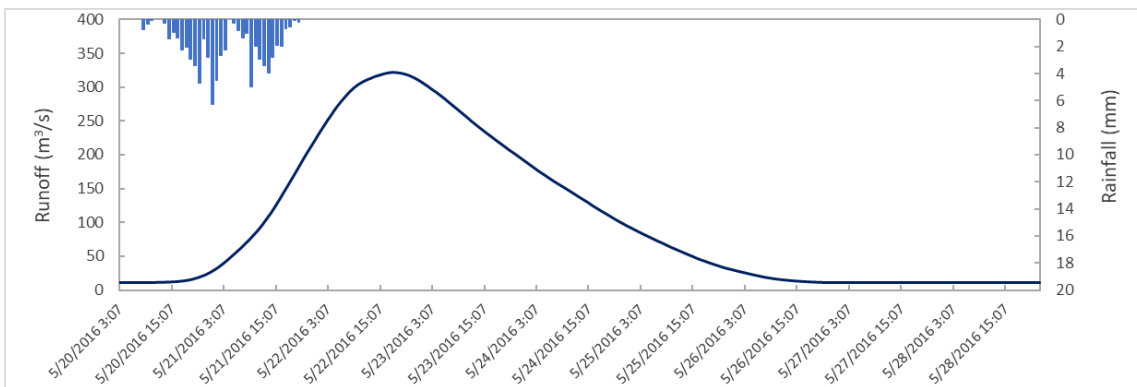


Figure 12: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 22/05/2016

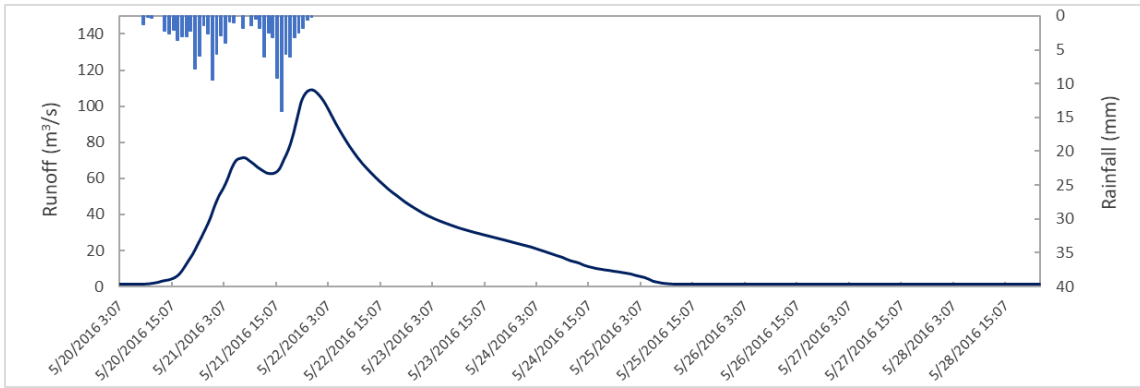


Figure 13: Flow hydrograph of Pili position, event: 22/05/2016

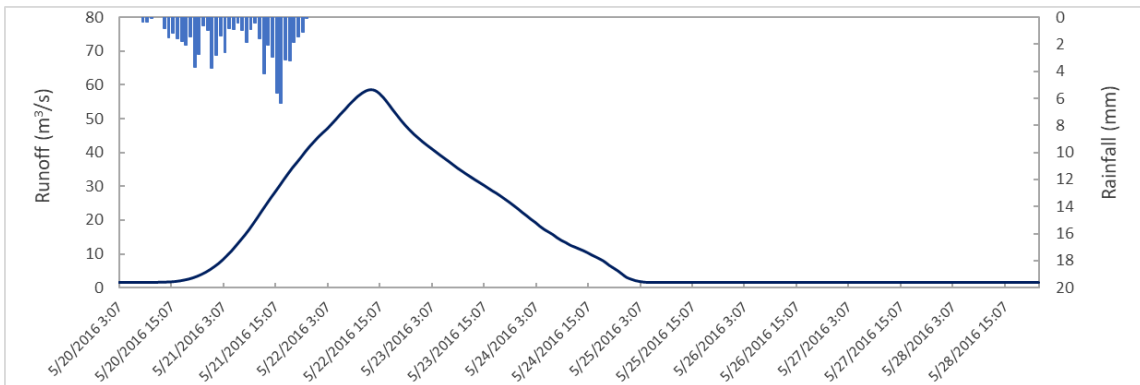


Figure 14: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 22/05/2016

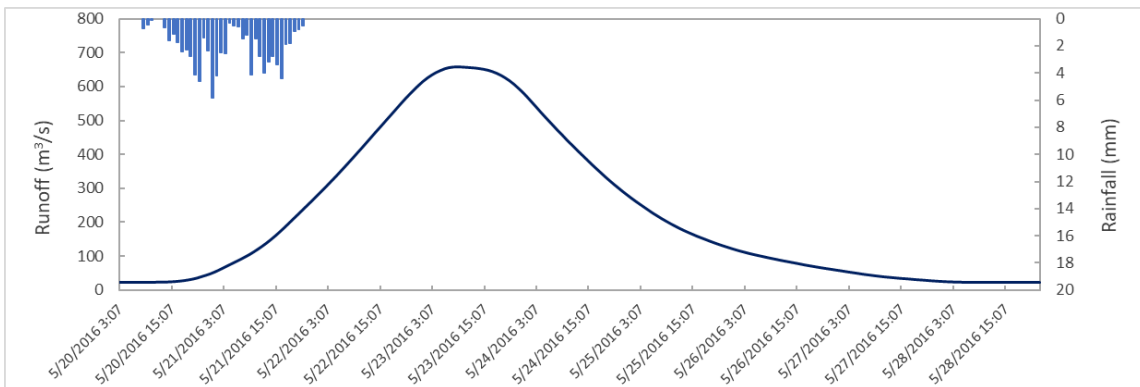


Figure 15: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 22/05/2016

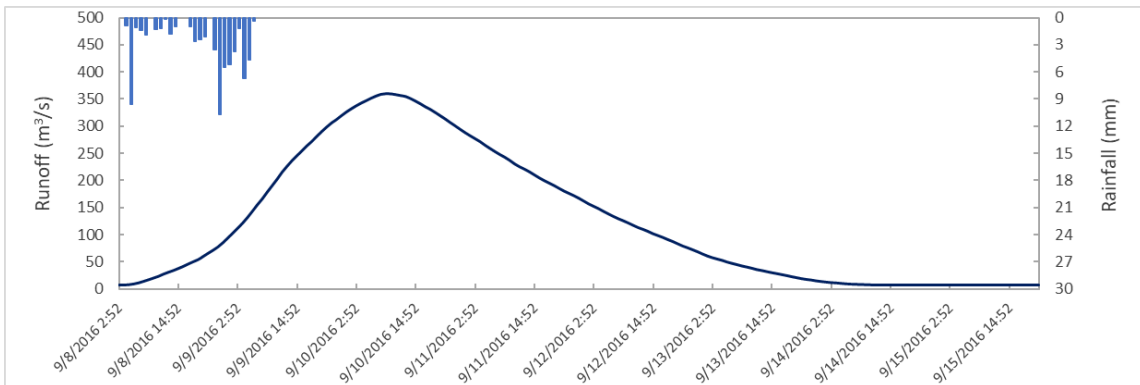


Figure 16: Flow hydrograph of Kalabaka position, event: 09/09/2016

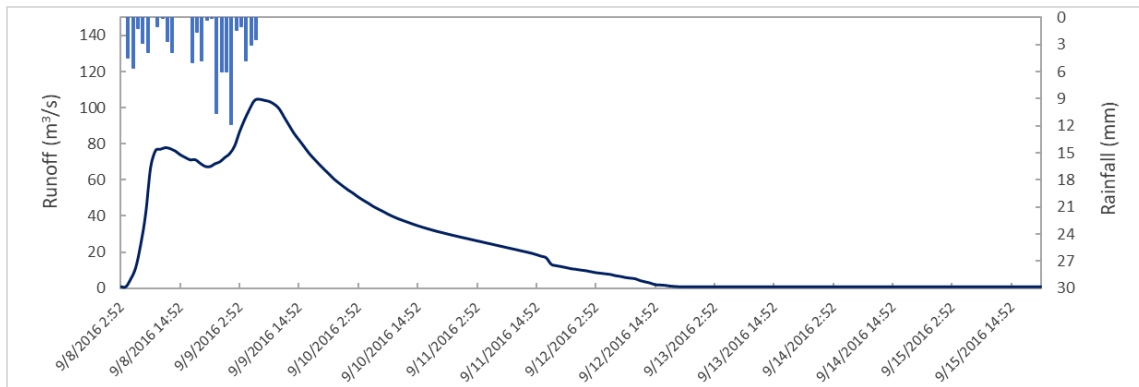


Figure 17: Flow hydrograph of Pili position, event: 09/09/2016

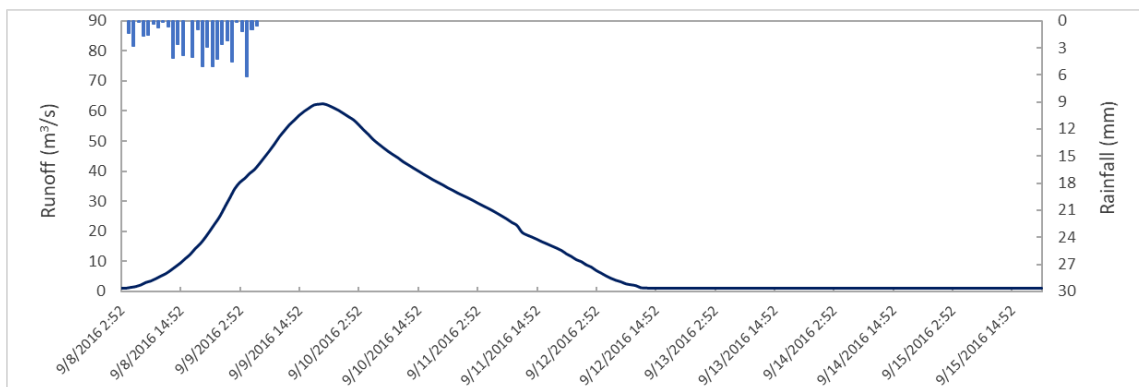


Figure 18: Flow hydrograph of Mouzaki position, event: 09/09/2016

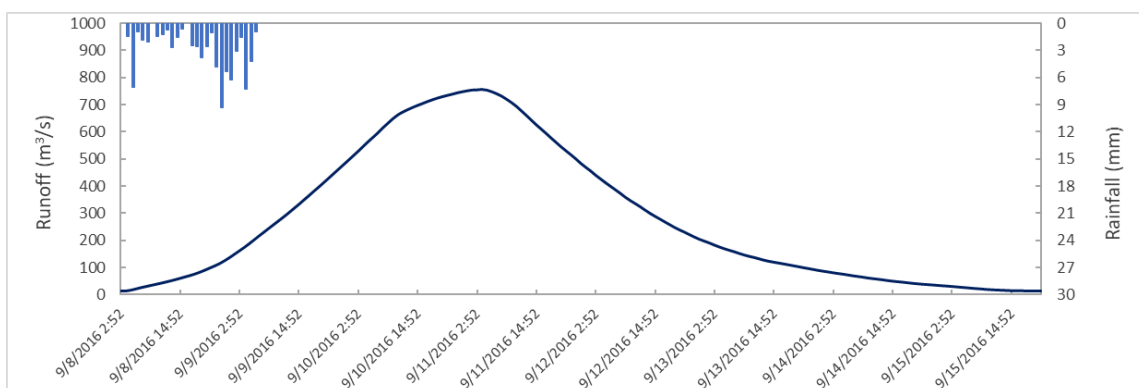


Figure 19: Flow hydrograph of Nomi (upstream) position, event: 09/09/2016

The hydrodynamic simulation, which was performed based on available input data regarding land use distribution, manning coefficient values and the flood hydrographs of the strongest event (01/02/2015) as determined in the previous step, denotes a general overestimation in the flood inundation extent. An exaggerated floodplain was mainly noted in the simulation area close to Nomi settlement, where the quality of data used (DEM, Manning coefficient) constitutes a decisive factor due to the prevailing low elevation and mild to zero slopes. In regard with the 2D flow areas downstream the basins of Kalabaka, Pili and Mouzaki, hydraulic analysis showed that inundation flow is accumulated mostly within the riverbed. Thus, the areas close to the river including settlements and cultivated land are not put in jeopardy by

this specific rainfall event. Besides, the high slopes facilitate the runoff process to the outlet of the catchment.

Additional attempts that were made in case of Nomi to amend the derived results showed that the model could not overcome the inaccuracies/deficiencies in DEM and Manning values. Highly varying values of the Manning's roughness coefficient give a similar picture of flood conditions. In fact, flood wave transition is intensively influenced by the floodplain topography, as inaccurately defined by the DEM. The latter is improperly coarse in the plain, in particular along and at the banks of the river, as noted through further geospatial observation and analysis. Alongside, incorrect rises of land surface and blurred river bank boundaries have been detected.

Hydraulic analysis results for the three positions are depicted in Figures 20-25. According to the resulting maps, simulation in the first position of interest, named Kalabaka, showed that in the upper and middle part there is an overflow of the river which is expanded over the adjacent agricultural areas where low flow depths are observed (about 0.2 m). On the opposite, the simulation conducted downstream of Pili and Mouzaki positions for the same event showed that flood is not expanded out of the river banks, in the riparian areas. Alongside, generally relatively low flow velocities emerged apart from the main river, as it is shown in the corresponding maps, which is expected due to the relatively high frequency of the examined events.

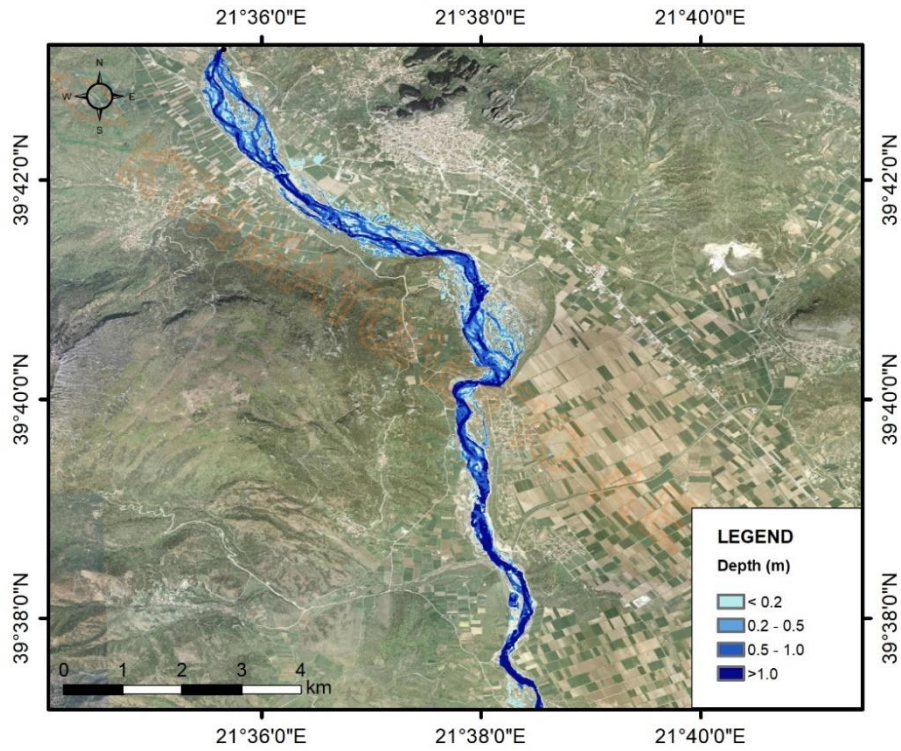


Figure 20: Maximum flow depth downstream the basin of Kalabaka

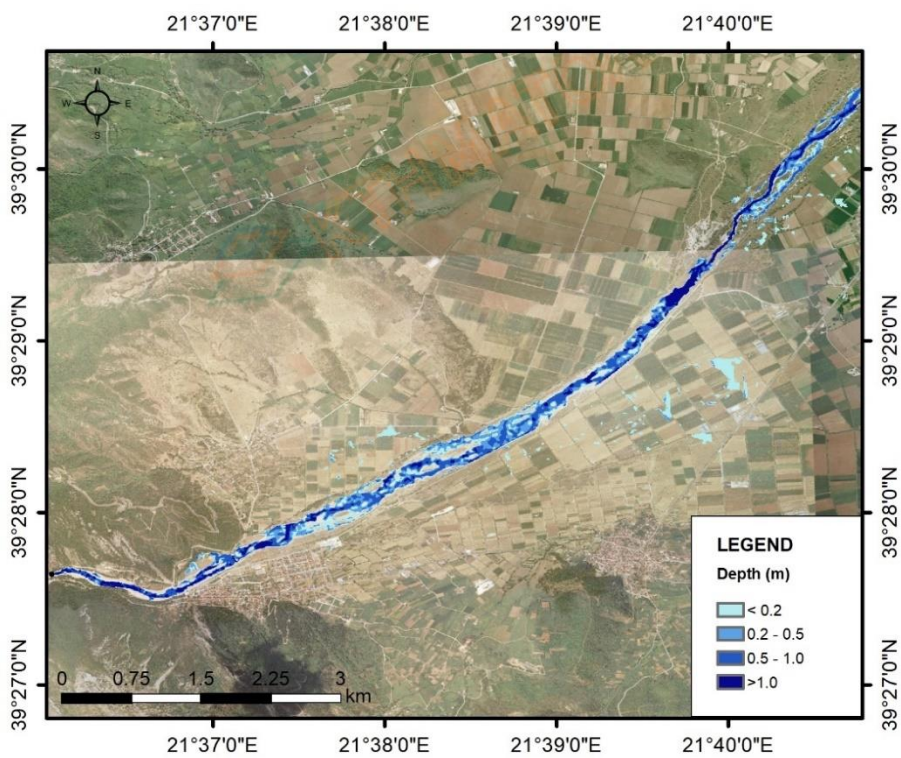


Figure 21: Maximum flow depth downstream the basin of Pili

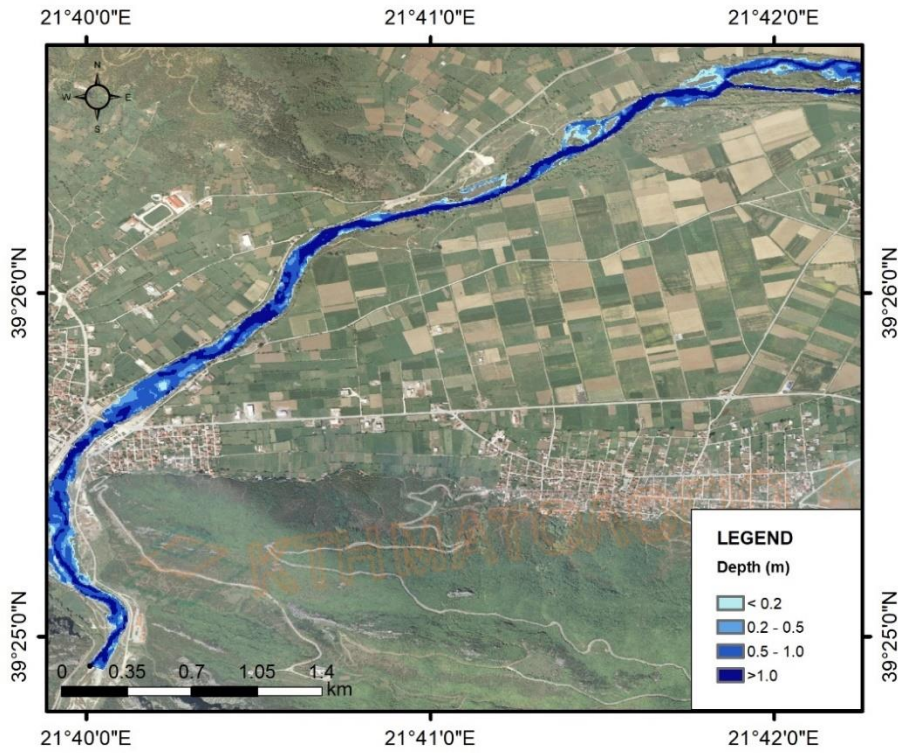


Figure 22: Maximum flow depth downstream the basin of Mouzaki

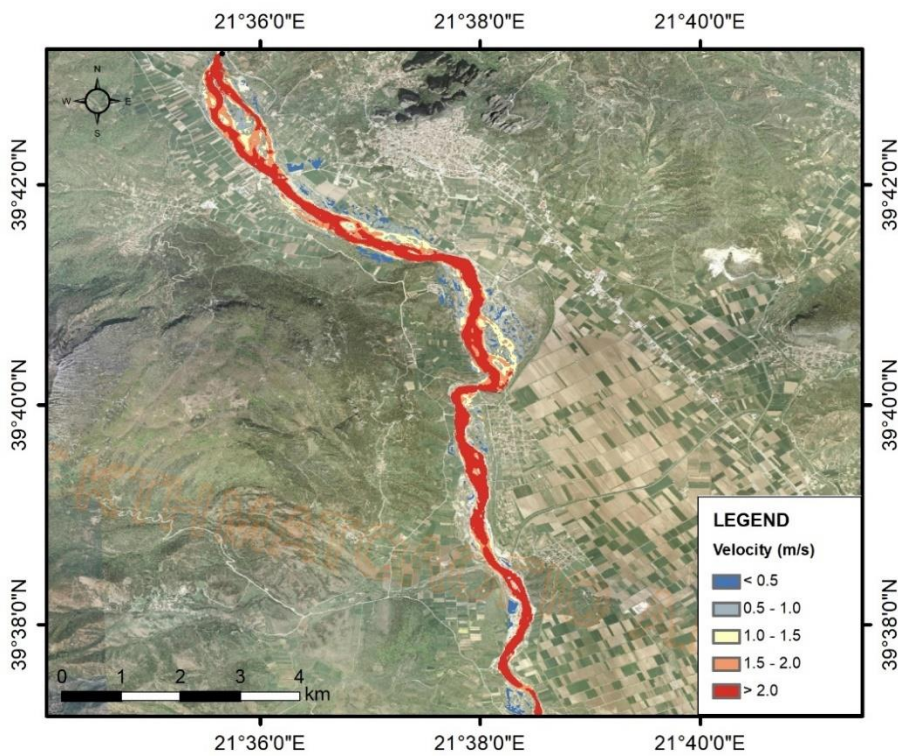


Figure 23: Maximum flow velocity downstream the basin of Kalabaka

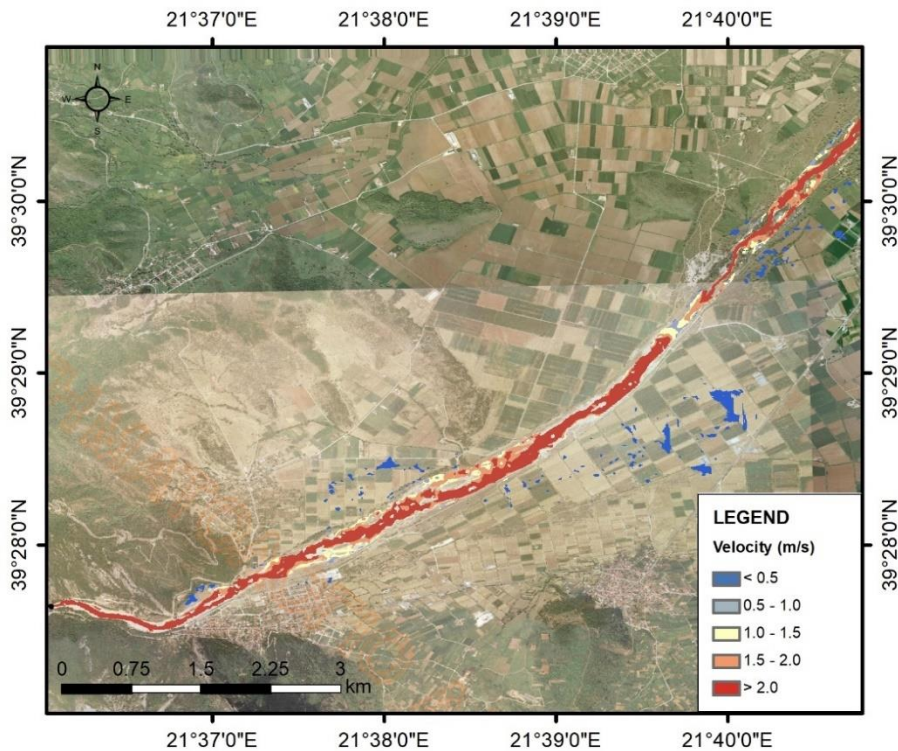


Figure 24: Maximum flow velocity downstream the basin of Pili

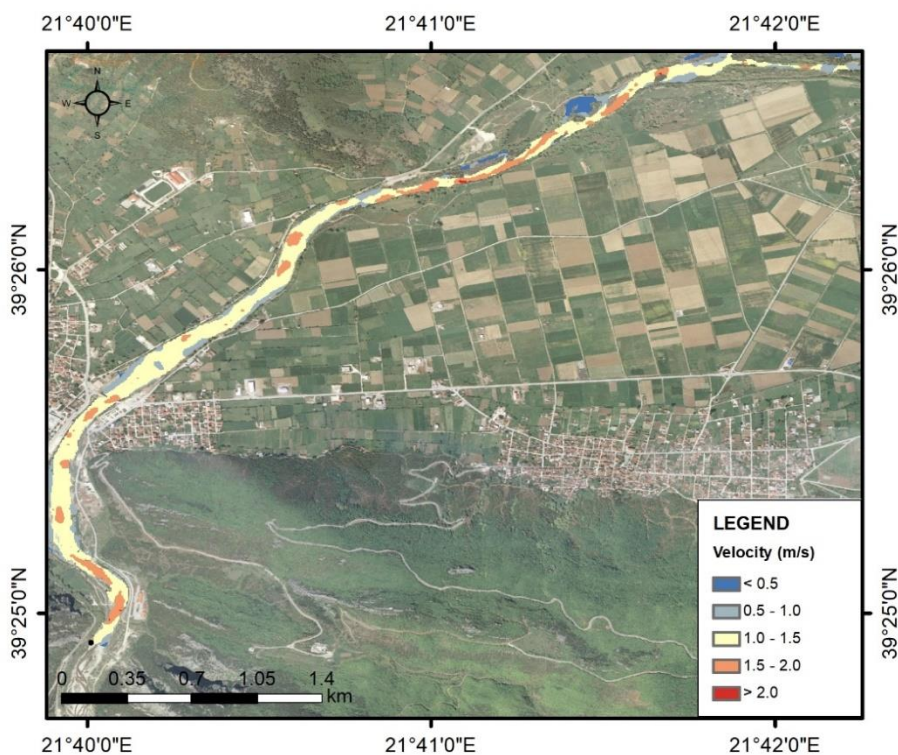


Figure 25: Maximum flow velocity downstream the basin of Mouzaki

Conclusions

The objective of this diploma thesis was to develop and implement an integrated methodology regarding flood risk assessment for frequent flood events occurring in Ali – Efenti catchment. The analysis includes hydrometeorological, hydrological and hydraulic aspects of flood risk analysis and management and the main findings are summarized as follows:

- During the investigation of the flood history relevant to the study area it was found that the main impacts derived from flood events concern the agricultural land and the road network.
- The MCDM followed for the identification of flood prone areas showed an extended vulnerable area in the lowlands, however, estimations are driven by the technique followed for flood vulnerability classification.
- The hydrometeorological analysis of recent rainfall events inducing flooding revealed that most of them are characterized by high cumulative precipitation and duration, but they are related to low return period.
- The time-area diagram method was a satisfactory approach to determine the UH for the most subbasins.
- The basin of Nomi (upstream) is characterized by lower hydrological losses due to the lower presence of forests and higher contribution of agricultural land, resulting in an increased CN value, in comparison with the rest basins.
- The derived flood hydrographs show that the highest values of both the runoff and the flood volumes correspond to the basin of Nomi, primarily due to its considerable size and the intense presence of flat lowland areas. On top of that, higher runoff peaks and larger volumes were caused from the event with the longest duration and the highest total precipitation.
- Hydraulic analysis that provides maximum water velocity and depth values showed, via the corresponding mapping, that flooding associated with the Kalabaka, Pili and Mouzaki downstream areas, occurs mainly within the river banks, thus adjacent urbanized and cultivated areas are not at risk. However, the analysis near Nomi settlement demonstrated weakness mainly due to deficiencies and limitations of the DEM and uncertainty in the Manning coefficient determination, especially in the lowlands and inside the mainstream.
- As an overall conclusion, there is an increased flood vulnerability in the lowlands, which is explicitly verified by the flood history of the area. Hence, further investigation should be conducted concerning the following impacts, as well as, coordinate

mitigation actions in order for the vulnerable areas to be protected, also after considering the impact of more extreme rainfall events.

Selected References

- Drobne, S. and Lisec, A., 2009. Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, 33(4)
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp.4-16
- Muzik, I., 1996. A GIS-derived distributed unit hydrograph. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 235, pp.453-460
- Muzik, I., 1996. Flood modelling with GIS-derived distributed unit hydrographs. *Hydrological processes*, 10(10), pp.1401-1409
- Saleh, A., Ghobad, R. and Noredin, R., 2011. Evaluation of HEC-HMS methods in surface runoff simulation (Case study: Kan watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*, pp.1316-1322
- Schumann, A.H., 1998. Thiessen Polygon BT—Encyclopedia of Hydrology and Lakes
- SCS, U., 1972. National engineering handbook. Hydrology Section, 4
- Singh, K.P., 1976. Unit hydrographs—A comparative study 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 12(2), pp.381-392
- Singh, V.P., 1992. Elementary Hydrology, Prentice Hall. *New Jersey*
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7), pp.1082-1089
- USACE, HEC-RAS River Analysis System, User's Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, 2016

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

1.1.1 Οι πλημμύρες ως φυσικές καταστροφές

Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα, αφού συνήθως προέρχονται από μετεωρολογικές καταστάσεις, όμως συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης, φυσικού ή ανθρωπογενούς, δεν μπορεί να διοχετεύσει τον όγκο νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση. Τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν πλημμύρες δεν μπορούν να ελεγχθούν, αλλά οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής είναι δυνατόν να τροποποιηθούν με την ανθρώπινη επέμβαση.

Σύμφωνα με τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, οι πλημμύρες αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή, μετά τις δασικές πυρκαγιές. Πλημμύρα συμβαίνει λόγω ραγδαίων βροχοπτώσεων και ισχυρών καταιγίδων, από την αύξηση της στάθμης των ποταμών ή από την τήξη του χιονιού, καθώς επίσης και από υποχώρηση φραγμάτων και στην περίπτωση αυτή οι συνέπειες είναι πολύ μεγάλες.

Η πλημμύρα από φυσικά αίτια είτε παρουσιάζει βραδεία εξέλιξη είτε ανήκει στην κατηγορία της ξαφνικής πλημμύρας (flashflood), που είναι και το πιο συνηθισμένο φαινόμενο στην Ελλάδα. Στον ελληνικό χώρο οι πλημμύρες οφείλονται σε καταρρακτώδεις βροχές, οι οποίες συνοδεύουν τη διέλευση υφέσεων.

Η ξαφνική πλημμύρα είναι αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών διαταραχών, οι οποίες συνοδεύονται από ραγδαίες βροχοπτώσεις, με μεγάλα ποσά βροχής σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι ξαφνικές πλημμύρες προκαλούνται από καταιγίδες που κινούνται αργά ή κινούνται πάνω από την ίδια περιοχή. Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν σε μία ξαφνική πλημμύρα, όπως η ένταση της βροχής και η διάρκειά της, η τοπογραφία, οι συνθήκες του εδάφους, η φυτοκάλυψη, η καταστροφή των δασών καθώς και η αστικοποίηση. Οι ξαφνικές πλημμύρες εμφανίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα λίγων ωρών ή λιγότερο και έχουν σαν αποτέλεσμα ταχεία ύψωση νερού, το οποίο στο πέρασμά του μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι πλημμύρες που έχουν σαν αίτιο τις βροχοπτώσεις, μπορεί να προκαλέσουν καταστροφικές κατολισθήσεις εδαφών (λασποροές). Τα περισσότερα θύματα εξαιτίας πλημμυρών προέρχονται από τις ξαφνικές πλημμύρες.

Ένα σπανιότερα εμφανιζόμενο είδος πλημμύρας στην Ελλάδα είναι η παράκτια πλημμύρα, η οποία εμφανίζεται στις παράκτιες περιοχές λόγω του κυματισμού της θάλασσας ή μιας μεγάλης λίμνης. Ο κυματισμός προκαλείται συνήθως από τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν

στην περιοχή, ενώ σπάνια μπορεί να εμφανιστούν και θαλάσσια κύματα βαρύτητας. Διαδίδονται στην επιφάνεια της θάλασσας με ταχύτητα η οποία εξαρτάται από το πάχος του νερού της θάλασσας και είναι της τάξης των 200m/s. Κατά την διάδοσή τους μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες νερού από τον χώρο γένεσής τους σε άλλους χώρους. Τα μεγαλύτερα θαλάσσια κύματα βαρύτητας προκαλούν σημαντικές καταστροφές και γίνονται αισθητά σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Όπως προαναφέρθηκε, η πλημμύρα αποτελεί ένα απρόβλεπτο φυσικό φαινόμενο που συνοδεύεται από σημαντικές επιπτώσεις στους τομείς της δημόσιας υγείας, του περιβάλλοντος, του πολιτισμού και της οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα, οι κυριότερες δυνητικές επιπτώσεις από την πλημμύρα, σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ, είναι οι εξής:

- επιπτώσεις στην ασφάλεια και υγεία των πολιτών: πέραν του κινδύνου για την ανθρώπινη ζωή, περιλαμβάνουν κοινωνικές επιπτώσεις από την πλημμύρα και ζημιές στην λειτουργία σημαντικών κοινωφελών υποδομών (π.χ. δίκτυα κοινής ωφέλειας, νοσοκομεία, γηροκομεία, σχολεία και Πανεπιστήμια), εφόσον αυτά είναι ευπαθή στην πλημμύρα
- οικονομικές επιπτώσεις: στην αξία ακινήτων (οικισμοί, πόλεις, οικίες στον περιαστικό χώρο) και κινητών ιδιοκτησιών (π.χ. αυτοκίνητα, βαρέα οχήματα μεταφοράς), σε εμπορικές, τουριστικές, βιομηχανικές και αγροτικές δραστηριότητες και σε υποδομές μεταφορών (οδικών, σιδηροδρομικών, αεροδρομίων)
- περιβαλλοντικές επιπτώσεις, δηλαδή επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και τη βιοποικιλότητα της περιοχής από την πλημμύρα ή από ρύπανση λόγω της πλημμύρας, και
- πολιτιστικές επιπτώσεις: επιπτώσεις στα μνημεία, εφόσον αυτά είναι ευπαθή στη πλημμύρα.

1.1.2 Θεσμικό Πλαίσιο για τις Πλημμύρες

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε σε ισχύ την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, αναγνωρίζοντας μεταξύ άλλων, ότι:

- Οι πλημμύρες μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και καταστροφές στο περιβάλλον, να θέσουν σοβαρά σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη και να υπονομεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες της Κοινότητας.
- Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν.

- Ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες και η αλλαγή του κλίματος, συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επέλευσης φαινομένων πλημμύρας, με αντίστοιχη αύξηση των αρνητικών τους επιπτώσεων.

Σκοπός της οδηγίας είναι η θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα.

Ειδικότερα, σύμφωνα με την οδηγία 2007/60/ΕΚ ως «πλημμύρα» ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, είναι στεγνό και δεν καλύπτεται από νερό. Οι πλημμυρικοί αυτοί όγκοι νερού προέρχονται από την τοπική βροχόπτωση, την υπερχειλίση ποταμών, ορεινούς χειμάρρους, εφήμερα ρέματα της Μεσογείου και την εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης. Στην ίδια οδηγία, ως «επικινδυνότητα πλημμύρας» ορίζεται η δυνατότητα εμφάνισης πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους) που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης και ως «κίνδυνος πλημμύρας» η συνάρτηση της πιθανότητας εμφάνισης του φυσικού φαινομένου και της επίδρασης που θα έχει στην ανθρώπινη κοινωνία, την υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτήν την πλημμύρα.

Παράλληλα, προσδιορίζονται οι περιοχές όπου είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα ως οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται είτε σε θέσεις προσχωματικών αποθέσεων, είτε σε έδαφος με κλίση μικρότερη από 2%, ενώ, για κάθε υδατικό διαμέρισμα, η παρούσα Οδηγία καθορίζει τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας ως τη γεωγραφική τομή των περιοχών με δυνητικά σημαντικές συνέπειες από μελλοντικές πλημμύρες και των περιοχών που είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα.

Οι βασικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ χωρίζονται σε τρία στάδια:

1. Προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής των ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες και προσδιορισμός των περιοχών όπου υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα (Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας), σύμφωνα με τα άρθρα 4 και 5 της Οδηγίας.

2. Κατάρτιση Χαρτών Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας για τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας, σύμφωνα με το άρθρο 6 της Οδηγίας.
3. Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, σύμφωνα με το άρθρο 7 της Οδηγίας. Τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας καλύπτουν όλες τις πτυχές της διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας εστιαζόμενα στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων πλημμυρών και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής του ποταμού.

Ειδικότερα, σύμφωνα με την παράγραφο 3 της παρούσας Οδηγίας, οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας (Flood Hazard Map) καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν όσον αφορά στα ακόλουθα σενάρια:

- α) πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- β) πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναληψιμότητας ≥ 100 χρόνια)
- γ) πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση

Για κάθε σενάριο που εκτίθεται στην παράγραφο 3, παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- α) η έκταση της πλημμύρας
- β) το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση
- γ) ανάλογα με την περίπτωση, η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων.

Αντίστοιχα, οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας (Flood Risk Map) περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των σεναρίων της παραγράφου 3 και εκφράζονται ως εξής:

- α) ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν
- β) τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί
- γ) εγκαταστάσεις κατά τα αναφερόμενα στο παράρτημα I της οδηγίας 96/61/EK του Συμβουλίου, της 24ης Σεπτεμβρίου 1996, σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες ορίζονται στο παράρτημα IV, σημείο 1, σημεία i), iii) και v) της οδηγίας 2000/60/EK και ενδέχεται να πληγούν

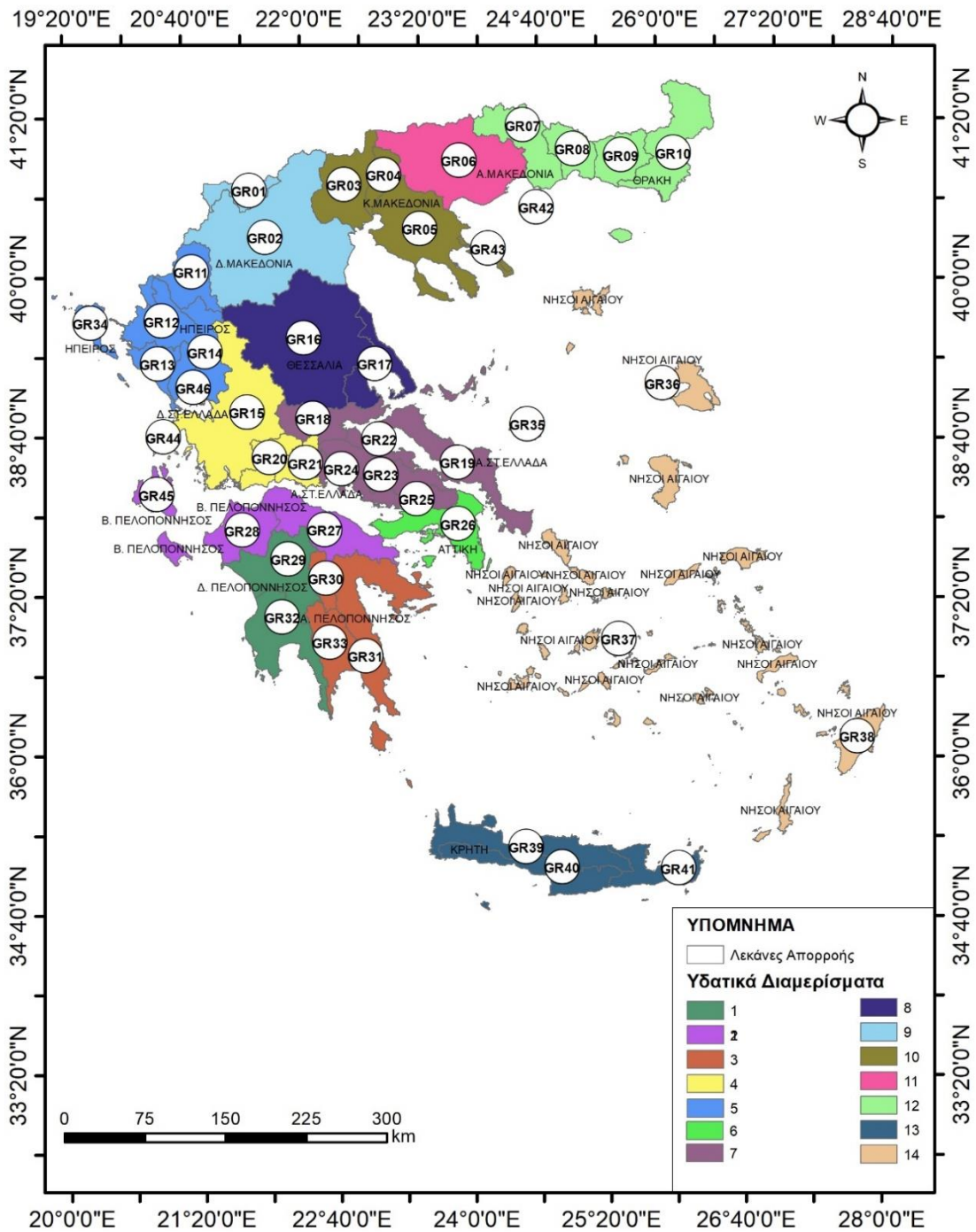
δ) άλλες πληροφορίες τις οποίες το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Τέλος, το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) αποτελεί βασικό εργαλείο προγραμματισμού δράσεων για την αντιμετώπιση των κινδύνων πλημμύρας και κεντρικό μηχανισμό αναφοράς της χώρας προς την ΕΕ. Τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας καταρτίζονται σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος (Περιοχή Λεκανών Απορροής Ποταμών), για τις περιοχές που υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα σύμφωνα με το άρθρο 7 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Στο ΣΔΚΠ τίθενται οι στόχοι για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας εστιάζοντας στη μείωση των δυνητικά αρνητικών συνεπειών που οι πλημμύρες έχουν στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα και επίσης, αν κριθεί σκόπιμο σε μη διαρθρωτικές πρωτοβουλίες και/ή στην μείωση των πιθανοτήτων πλημμύρας. Επιπλέον, για τη σύνταξή του λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν ώστε να παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των περιοχών αυτών, εξασφαλίζοντας παράλληλα συναφή συντονισμό εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών και προωθώντας την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν θεσπισθεί με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά συστήματα. Παράλληλα, καλύπτει όλες τις πτυχές της διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας εστιαζόμενο στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα, συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων πλημμυρών και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και λαμβανομένων υπόψη των χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής του ποταμού. Επιπλέον, δύναται να περιλαμβάνει την προώθηση βιώσιμων πρακτικών χρήσης γης, βελτίωση της συγκράτησης υδάτων καθώς και την ελεγχόμενη κατάκλυση ορισμένων περιοχών σε περίπτωση πλημμύρας.

Σύμφωνα με την Κ.Υ.Α. Η.Π. 31822/1542/Ε103/2010, όπως τροποποιήθηκε και ισχύει, η γεωγραφική μονάδα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ είναι οι Περιοχές Λεκάνης Απορροής - που αντιστοιχούν στον όρο Υδατικά Διαμερίσματα του άρθρου 3 του Π.Δ. 51/2007 - η ίδια γεωγραφική μονάδα εφαρμογής και της Οδηγίας 200/60/ΕΚ για τα Νερά.

Με την υπ. αριθμ. 706/16.07.2010 (ΦΕΚ 1383 Β'/02.09.2012) απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων όπως διορθώθηκε και ισχύει, έχουν καθοριστεί σε επίπεδο χώρας σαράντα έξι (46) Λεκάνες Απορροής Ποταμών, οι οποίες υπάγονται σε δεκατέσσερις (14)

Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών (Υδατικά Διαμερίσματα), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.1):



Σχήμα 1.1: Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

1.2 Αντικείμενο Εργασίας και Σημεία Πρωτοτυπίας

Το έντονο και ανομοιογενές ανάγλυφο σε συνδυασμό με τη σημαντική γεωγραφική μεταβλητότητα του κλιματικού προφίλ, συντελούν στην εμφάνιση επεισοδίων πλημμύρας στον ελλαδικό χώρο. Παράλληλα, η εξάπλωση του αστικού ιστού ακόμη και εντός περιοχών ευάλωτων σε πλημμύρα, όπως παράκτιες περιοχές, περιοχές γειτνιάζουσες σε υδάτινο αποδέκτη αλλά και σε δέλτα ποταμών, επιτείνει την αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου στη χώρα. Στην πλειονότητά τους οι πλημμύρες στην Ελλάδα εκδηλώνονται με τη μορφή ξαφνικής πλημμύρας, η οποία προκαλείται λόγω ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης και επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις σε πολλές περιοχές. Στις συχνά προσβαλλόμενες από πλημμύρα περιοχές συγκαταλέγεται και η λεκάνη απορροής του Πηνειού Ποταμού στο βορειοδυτικό τμήμα της Θεσσαλίας, Αλή Εφέντη, η οποία αποτελεί υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Πηνειού και περιοχή μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην παραπάνω λεκάνη απορροής, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης και άλλων υδρολογικών μεθόδων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συνίσταται σε τέσσερα βασικά στάδια. Αρχικά, γίνεται προσδιορισμός των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών εντός της λεκάνης μελέτης. Με δεδομένες τις θέσεις υψηλού κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας, γίνεται υδρολογική και υδραυλική ανάλυση σε κάποιες από αυτές, αξιοποιώντας το πρόσφατο ιστορικό πλημμυρών και τα αντίστοιχα διαθέσιμα υδρομετεωρολογικά δεδομένα. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, εξήχθησαν συμπεράσματα για τις πλημμυρικά ευάλωτες περιοχές της υπό εξέταση λεκάνης απορροής.

Στα πρωτότυπα σημεία της εργασίας περιλαμβάνεται η αξιοποίηση πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων στην ανάλυση, γεγονός που καθιστά τόσο την προσέγγιση όσο και τα συμπεράσματα που εξάγονται πιο ρεαλιστικά. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δύναται να αξιολογηθούν άμεσα με βάση το υπάρχον ιστορικό, ενώ αντιστοιχούν σε επεισόδια υψηλής συχνότητας, που παρατηρούνται στην περιοχή σχεδόν σε ετήσια βάση. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας δύναται να αξιοποιηθούν στην κατεύθυνση της λήψης μέτρων προστασίας και πρόβλεψης στις περιοχές που είναι αποδεδειγμένα ευάλωτες σε πλημμυρικά φαινόμενα.

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Το **πρώτο** κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στο φαινόμενο της πλημμύρας, την έντασή του στον ελλαδικό χώρο, τις αιτίες πρόκλησης και τις επιπτώσεις του σε διάφορους τομείς. Παράλληλα, παρατίθεται το ισχύον θεσμικό πλαίσιο που αφορά στην αξιολόγηση και τη

διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου διατυπώνεται το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωση αυτής.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης με έμφαση στα γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της, τις χρήσεις γης και το κλιματικό καθεστώς. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα γεωχωρικά και υδρομετεωρολογικά δεδομένα βάσει των οποίων πραγματοποιείται η ανάλυση που ακολουθεί.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναπτύσσεται εκτενώς το μεθοδολογικό πλαίσιο της ολοκληρωμένης προσέγγισης πλημμυρικού κινδύνου που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας έρευνας. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης καθώς και της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης με βάση τις οποίες γίνεται ο καθορισμός των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών εντός της λεκάνης απορροής. Ακολούθως, παρουσιάζονται και αναλύονται τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Στη συνέχεια, περιγράφονται η υδρομετεωρολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τα σημαντικότερα ιστορικά πλημμυρικά επεισόδια που έχουν καταγραφεί τα τελευταία έτη στην περιοχή μελέτης και η υδρολογική ανάλυση για τρία από αυτά. Τέλος, υλοποιείται η υδραυλική προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS για μία ιστορική πλημμύρα σε ορισμένες θέσεις ενδιαφέροντος.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με ταυτόχρονη επεξήγησή τους και σύντομο σχολιασμό. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και τα αποτελέσματα της υδρολογικής και υδραυλικής ανάλυσης.

Το **πέμπτο** κεφάλαιο περιλαμβάνει τα κυριότερα συμπεράσματα της διερεύνησης, έπειτα από μια συνοπτική επισκόπηση. Στο τέλος του κεφαλαίου διατυπώνονται ακόμη προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σχετική με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

2 Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα

2.1 Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη, στο βορειοδυτικό τμήμα της Θεσσαλίας. Οι έντονες βροχοπτώσεις και τα σημαντικά προβλήματα που προκαλούνται συχνά στην περιοχή λόγω πλημμυρικών επεισοδίων συνηγορούν στην επιλογή της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής ως υπό εξέταση περιοχή.

2.1.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

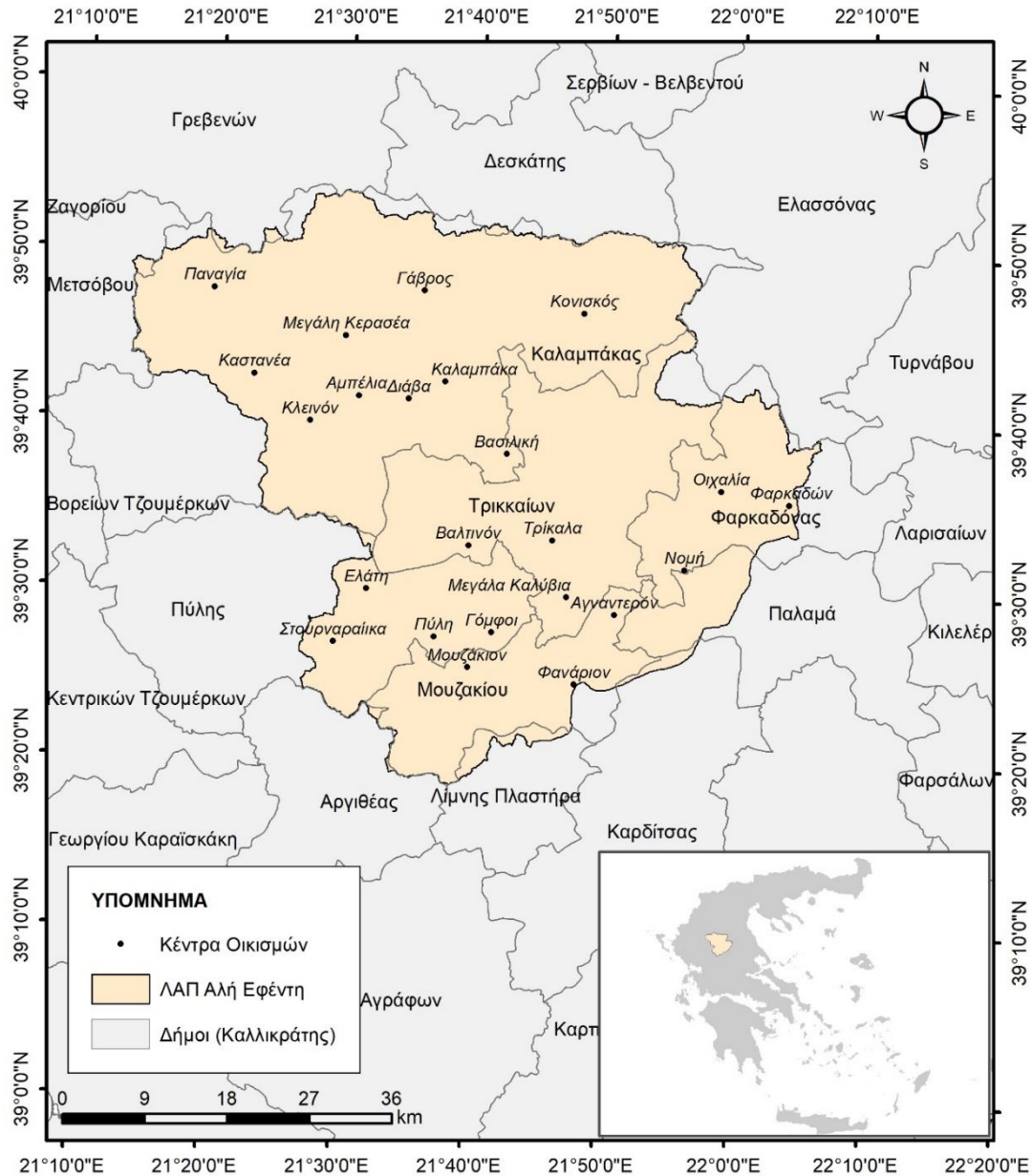
Η λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη τοποθετείται γεωγραφικά στο βορειοδυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας και αποτελεί υπολεκάνη του Πηνειού ποταμού (Σχήμα 2.1). Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει το τμήμα του Πηνειού που ορίζεται από τη θέση Αλή Εφέντη στα ανάντη, όπου βρίσκεται η ομώνυμη γέφυρα και ο αντίστοιχος υδρομετρικός σταθμός, και τη θέση Αμυγδαλιά στα κατόντη. Εκτείνεται μεταξύ γεωγραφικού μήκους 21°13'E - 22°6'E και γεωγραφικού πλάτους 39°53'N - 39°18'N. Η έκταση που καλύπτει είναι ίση με 2806 km², ενώ το μήκος του ποταμού είναι 144.81 km.

Ορισμένα από τα κυριότερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

Έκταση Λεκάνης (km ²)	Μέσο Υψόμετρο (m)	Μέγιστο Υψόμετρο (m)	Ελάχιστο Υψόμετρο (m)	Μέση Κλίση (°)
2805.71	554.07	2205.01	83.996	15.42

Η γεωγραφική θέση και τα όρια της περιοχής μελέτης σε σχέση με τους όμορους Καλλικρατικούς Δήμους παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.1: Περιοχή μελέτης, όμοροι Καλλικρατικοί Δήμοι και κέντρα οικισμών (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

Το Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ) Θεσσαλίας περιλαμβάνει το σύνολο της Περιφέρειας Θεσσαλίας – εκτός από τα νησιά των Σποράδων, ένα μικρό τμήμα δυτικά που ανήκει στο ΥΔ 04, ένα μικρό τμήμα του ΥΔ 07 στα νότια και ένα μικρό τμήμα βόρεια που ανήκει στο ΥΔ 09 - και το νότιο τμήμα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (περιοχή Πλαταμώνα) (Σχήμα 1.1). Συγκεκριμένα περιλαμβάνει το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της ΠΕ Τρικάλων, το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της ΠΕ Καρδίτσας, την ΠΕ Μαγνησίας και Σποράδων εκτός από τα νησιά των Σποράδων, το σύνολο της ΠΕ Λάρισας, ένα μικρό τμήμα στο βόρειο μέρος της ΠΕ Φθιώτιδας, ένα μικρό νότιο τμήμα της ΠΕ Πιερίας και ένα μικρό τμήμα της ΠΕ Γρεβενών. Η

συνολική έκταση του διαμερίσματος είναι 13140 km² και ο πληθυσμός του, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ του 2011 είναι 731700, παρουσιάζοντας μείωση 2.5% σε σχέση με την απογραφή του 2001 όπου ήταν 750445 κάτοικοι.

Διοικητικά η περιοχή μελέτης ανήκει στις Περιφερειακές Ενότητες Τρικάλων και Καρδίτσας, της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η Περιφερειακή Ενότητα Γρεβενών, της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, καταλαμβάνει μόνο κάποιες ελάχιστες ορεινές εκτάσεις στα βόρεια της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τη διοικητική μεταρρύθμιση “Καλλικράτης” (Νόμος 3852/2010), η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει 8 δήμους και τμήματα δήμων. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τους δήμους Τρικκαίων, Μετεώρων, και τμήματα των δήμων Πύλης και Φαρκαδόνας της ΠΕ Τρικάλων και το δήμο Μουζακίου και τμήματα των δήμων Παλαμά, Πλαστήρα και Καρδίτσας της ΠΕ Καρδίτσας.

2.1.2 Γεωμορφολογία περιοχής

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει το βορειοδυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Οριοθετείται περιμετρικά από την οροσειρά της Πίνδου και το Κερκότιον όρος (οροσειρά Κόζιακα) στα δυτικά, τα Χάσια και τα Αντιχάσια Όρη στα βόρεια και βορειοανατολικά και τα όρη του Ζάρκου στα ανατολικά. Οι παραπάνω οροσειρές περιβάλλουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της περιοχής μελέτης, που αποτελεί υποενότητα της δυτικής πεδιάδας της Θεσσαλίας. Το έντονο ανάγλυφο και οι απότομες κλίσεις αποτελούν χαρακτηριστικό της περιοχής μελέτης. Με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το μέγιστο υψόμετρο που παρατηρείται στην περιοχή ανέρχεται σε 2205 m στα ορεινά τμήματα, στην περιοχή της Πίνδου και το ελάχιστο σε 84 m κοντά στην περιοχή εξόδου της λεκάνης μελέτης, ενώ το μέσο υψόμετρο της υδρολογικής λεκάνης απορροής είναι 554.1 m.

Η κύρια υδρολογική λεκάνη του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας είναι εκείνη του Πηνειού ποταμού, με επιφάνεια στη θέση Πυργετός, κοντά στις εκβολές στο Θερμαϊκό κόλπο, έκτασης ίσης με περίπου 9500 km². Κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού είναι προς τα νότια ο Ενιπέας, ο Φαρσαλιώτης, ο Σοφαδίτης (στον οποίο κατασκευάστηκε το φράγμα Σμοκόβου) και ο Καλέντζης (που δέχεται τα νερά από την εκτροπή του ποταμού Ταυρωπού μέσω του ταμιευτήρα Πλαστήρα), προς τα δυτικά ο Πορταϊκός, ο Πάμισος ή Πλιούρης και το Μουργκάνι και προς τα βόρεια ο Ληθαίος που διασχίζει την πόλη των Τρικάλων, ο Νεοχωρίτης και ο Τιταρήσιος. Στη λεκάνη απορροής (ΛΑΠ) Πηνειού εντάσσεται και η κλειστή λεκάνη της λίμνης Κάρλας έκτασης 1050 km², το σύστημα της οποίας βρίσκεται υπό διαμόρφωση, με ένα σύστημα τάφρων αμφίδρομης ροής προς και από τον Πηνειό για αντιπλημμυρική προστασία των πεδινών καλλιεργημένων εκτάσεων.

Εντός του ορίου της λεκάνης μελέτης, στον Πηνειό συμβάλλουν το Μαλακασιώτικο ρέμα και οι ποταμοί Κλεινοβίτικος και Ίωνας στα βόρεια, οι ποταμοί Πορταϊκός και Πάμισος (Πλιούρης) στα δυτικά, οι ποταμοί Ληθαιός και Νεοχωρίτης στα ανατολικά και το Μέγα Ρέμα στα νότια, με το νότιο όριο της περιοχής μελέτης να είναι ο υδροκρίτης της λεκάνης απορροής του Μεγάλου Ρέματος.



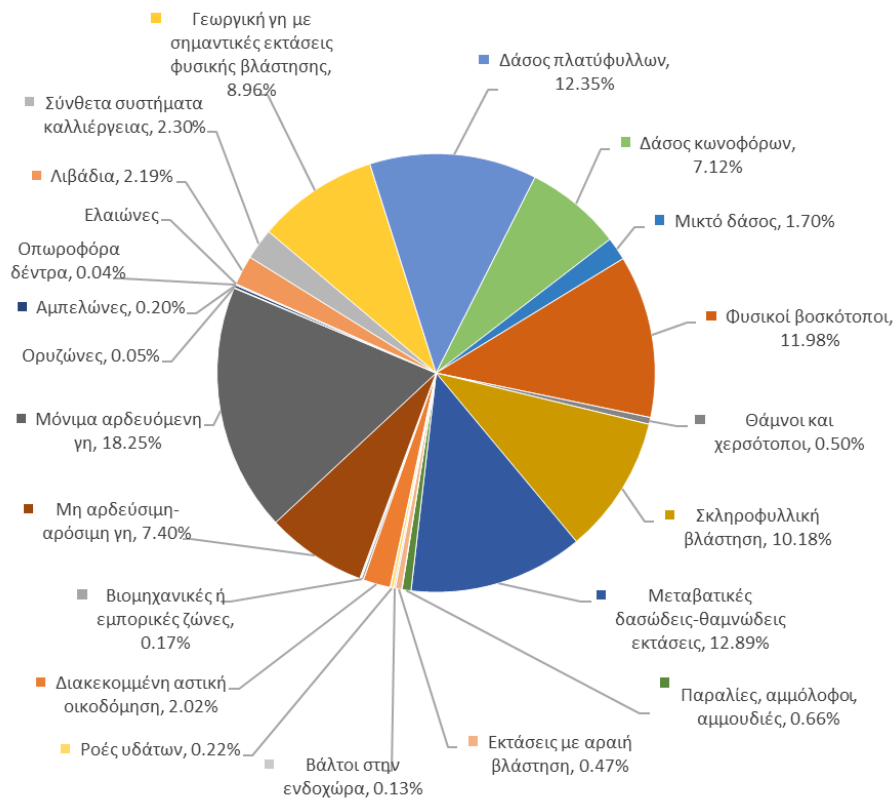
Σχήμα 2.2: Λεκάνες απορροής Θεσσαλίας (Πηγή: ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006)

Το έδαφος της ΠΕ Τρικάλων είναι στη μεγαλύτερη έκτασή του ορεινό, με όλα τα στοιχεία του ορεινού τοπίου, όπως απότομες κλίσεις, έντονη χιονοκάλυψη και αραιοκατοίκηση. Το μέσο υψόμετρο του συνόλου ξεπερνά τα 200 m, σε ορισμένες μάλιστα περιοχές είναι μεγαλύτερο των 2000 m (περιοχή της Πίνδου). Οι ορεινές και ημιορεινές εκτάσεις καταλαμβάνουν τα 8/10 της ΠΕ. Οι πεδινές εκτάσεις φτάνουν σε 555.7 km², οι ημιορεινές σε 378 km² και οι ορεινές σε 2440 km². Λόγω της γεωμορφολογίας της, η ΠΕ καλύπτεται στο μεγαλύτερο ποσοστό του από δάση (30%) ή από βοσκότοπους (42%) και μόνο το 20% αποτελείται από γεωργικές εκτάσεις, ενώ το υπόλοιπο 8% είναι διάφορες άλλες μορφές (οικισμοί 3.51%, υδάτινες εκτάσεις 1.66% και λοιπές εκτάσεις 3.30%). Οι βοσκότοποι καταλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής έκτασης της ΠΕ, η οποία στην πλειοψηφία τους είναι ορεινοί (δασικοί).

2.1.3 Χρήσεις Γης

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης (Corine Land Cover, 2012), η εξεταζόμενη περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως αγροτική, καθώς οι αστικές χρήσεις γης καταλαμβάνουν μόλις το 2.06% της συνολικής έκτασης. Ο δασικός χαρακτήρας κυριαρχεί στην περιοχή με τις δασώδεις

εκτάσεις και τους βοσκοτόπους να συνιστούν περίπου το μισό της συνολικής επιφάνειας. Η υπόλοιπη επιφάνεια καλύπτεται κυρίως από γεωργική γη και αρδευόμενες εκτάσεις. Ένα μικρό μόνο ποσοστό αντιπροσωπεύει τους υγροτόπους και τα επιφανειακά υδάτινα σώματα. Αναλυτικά η ποσοστιαία κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης κατά Corine (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Ο έντονος δασικός και γεωργοκτηνοτροφικός χαρακτήρας της περιοχής μαζί με τη μικρή βιομηχανική παραγωγή καθορίζουν τη μορφή απασχόλησης στην ΠΕ. Στην περιοχή Καλαμπάκας - Μετεώρων - Πύλης και των γύρω χωριών, λόγω των ποικίλων δραστηριοτήτων, η απασχόληση καλύπτει και τους τρεις τομείς της οικονομίας, με σημαντικό ποσοστό απασχολούμενων, πλήρως και αποκλειστικά, με τον τουρισμό κυρίως στην Καλαμπάκα και το Καστράκι, λόγω των Μετεώρων. Στη ζώνη του Ασπροποτάμου εξαιτίας του έντονου δασικού χαρακτήρα η εργασία σχετίζεται κυρίως με τα δάση, την κτηνοτροφία και τον τουρισμό. Στο σύμπλεγμα Χασίων - Αντιχασίων, οι κάτοικοι απασχολούνται κυρίως στους κλάδοι της γεωργίας και της κτηνοτροφίας. Στην υπόλοιπη πεδινή περιοχή οι κάτοικοι ασχολούνται με τη γεωργία (δυναμικές καλλιέργειες, γεωργικές επιχειρήσεις, θερμοκήπια κ.λπ.). Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων της πόλης των Τρικάλων απασχολείται με την

παροχή υπηρεσιών (εμπόριο, υπηρεσίες, μικρές και μεσαίες βιοτεχνίες, οικοδομές κλπ.), ενώ ένα μεγάλο τμήμα αυτών εργάζονται στις βιομηχανίες της περιοχής. Ο μεγαλύτερος αριθμός των κατοίκων απασχολείται στον Αγροτικό Τομέα (Απογραφή ΕΛΣΤΑΤ, 2001).

2.1.4 Βροχομετρικά χαρακτηριστικά

Το δυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας, το οποίο συμπίπτει σχεδόν με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα, έχει ηπειρωτικό κλίμα στην κεντρική πεδινή περιοχή και ορεινό κλίμα στις ορεινές περιμετρικές περιοχές.

Από υδρολογικής άποψης, η μέση ετήσια κατακρήμνιση στη Θεσσαλία υπολογίζεται ίση με 686.8 mm (για την περίοδο 1980-81 έως 2000-01), με μικρότερα κατακρημνίσματα να καταγράφονται στα κεντρικά πεδινά, ενώ σημαντικά υψηλότερα στην ορεινή περιφέρεια, κυρίως στα δυτικά. Ενδεικτικά, στα δυτικά ορεινά τμήματα του νομού Τρικάλων το ετήσιο ύψος φτάνει και υπερβαίνει τα 1200 mm, ενώ στα πεδινά κυμαίνεται μεταξύ 400 - 600 mm. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στους σταθμούς των Τρικάλων, των Μετεώρων και της Ελάτης, την ίδια περίοδο, υπολογίστηκε ίση με 707.1 mm, 745.8 mm και 1633.7 mm, αντίστοιχα. Η περίοδος Οκτωβρίου - Ιανουαρίου είναι η πιο βροχερή του έτους, ενώ η περίοδος Ιουλίου - Αυγούστου η πιο ξηρή. Στα ανατολικά του διαμερίσματος εμφανίζεται ξηρή περίοδος 4 - 5 μηνών, ενώ στα κεντρικά - δυτικά πεδινά 2 - 4 μηνών και στα δυτικά ορεινά 1 - 2 μηνών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).

Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στις ορεινές εκτάσεις του διαμερίσματος, και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι περισσότερες καταγραφές αναφέρονται στην περίοδο Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου. Ωστόσο, στα βορειοδυτικά του διαμερίσματος, όπου βρίσκεται η περιοχή μελέτης, χιονοπτώσεις σημειώνονται από τις αρχές Σεπτεμβρίου έως σε κάποιες περιπτώσεις και τις αρχές Ιουλίου. Συγκριτικά, ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών με χιόνι είναι 6.2 στα Τρίκαλα και 4 στη Λάρισα. Επιπλέον, το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας πλήττεται συχνά από χαλαζοπτώσεις. Στα βόρεια εκδηλώνονται κυρίως κατά την περίοδο Μαΐου-Ιουνίου, ενώ στα νοτιοανατολικά κατά την περίοδο Φεβρουαρίου – Απριλίου.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία του υδατικού διαμερίσματος έχει υπολογιστεί ίση με 14.3 °C, η μέση ελάχιστη είναι ίση με 5 °C, ενώ η μέση μέγιστη 16.4 °C. Επομένως, προκύπτει ένα μέσο ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος σχεδόν 12°C. Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες του έτους, ενώ ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος οι ψυχρότεροι. Φαινόμενα παγετού εκδηλώνονται συχνά την περίοδο Νοεμβρίου – Απριλίου, με μέσο ετήσιο αριθμό ημερών παγετού στα Τρίκαλα τις 33.8, στο Βόλο τις 9.2 και στη Λάρισα τις 35.5

ημέρες. Η μέση ετήσια νέφωση κυμαίνεται από 4 έως 5 βαθμίδες. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στα δυτικά και οι χαμηλότερες στα ανατολικά. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία έχει μετρηθεί μεταξύ 63.5 και 71.3%. Η μέση ταχύτητα ανέμου είναι σχετικά μικρή στις εσωτερικές περιοχές (Λάρισα, Τρίκαλα), σε σύγκριση με τις παραλιακές περιοχές (Αγχίαλος), οι οποίες επηρεάζονται από την παρουσία της θάλασσας. Η επικρατούσα φορά των ανέμων είναι δυτική στα Τρίκαλα, έναντι βορειοδυτικής και νότιας στο Βόλο και ανατολικής στη Λάρισα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).

2.1.5 Ιστορικό Πλημμυρών

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από σημαντικό ιστορικό πλημμυρικών επεισοδίων. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει σε μία από τις πιο καταστροφικές πλημμύρες στην ιστορία της Ελλάδας, που σημειώθηκε στις 04/09/1907 στην περιοχή των Τρικάλων, εντός της περιοχής μελέτης. Η μεγάλη πλημμύρα του Ληθαίου ποταμού έπληξε ανεπανόρθωτα την πόλη των Τρικάλων και των χωριών που βρίσκονταν κατά μήκος της κοίτης του Ληθαίου, στο ανατολικό όριο της Δυτικής Θεσσαλίας. Το ορμητικό κύμα που προκλήθηκε στον ποταμό άφησε πίσω του έναν αριθμό θυμάτων, χιλιάδες άστεγους, πλήθος νεκρών ζώων, χαμένες ιδιοκτησίες και ολοσχερή καταστροφή της γεωργικής και κτηνοτροφικής παραγωγής των χωριών στις όχθες του ποταμού.

Οι κυριότερες πλημμύρες των τελευταίων ετών που σημειώθηκαν στην περιοχή έρευνας παρουσιάζονται παρακάτω:

- 21/04/2006: Ισχυρή καταιγίδα που προκάλεσε προβλήματα στην Καλαμπάκα.
- 11/09/2010: Πλημμύρησαν περίπου 5000 στρέμματα καλλιεργήσιμης και μη έκτασης στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου Φαρκαδόνας. Προβλήματα και στην εθνική οδό Τρικάλων – Λάρισας.
- 15/04/2012: Πλημμύρα σε Νομή και Πελλιναίους.
- 30/12/2012: Πλημμύρες σε Τρίκαλα και Φαρκαδόνα.
- 12/11/2013: Προβλήματα στη Καλαμπάκα, λόγω έντονης βροχόπτωσης μεγάλης διάρκειας (30 ώρες).
- 01/02/2015: Πλημμύρες, κατολισθήσεις και πτώσεις δέντρων λόγω έντονων βροχοπτώσεων, στους Δήμους Πύλης, Φαρκαδόνας και συγκεκριμένα στη Νομή, Μετεώρων και Τρικκαίων, της ΠΕ Τρικάλων. Συγκεκριμένα, υπήρξαν καταπτώσεις βράχων στη μικρή γέφυρα εξόδου της Πύλης προς το Περτούλι, καθώς και βλάβες στον οδικό άξονα Πύλης – Μεσοχώρας. Στο Δήμο Φαρκαδόνας και στη Νομή - Κεραμίδι, ενισχύθηκαν τα αναχώματα προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή νερού

από τον Ενιππέα ποταμό προς τους παρακείμενους οικισμούς, ενώ στα Μετέωρα, σημειώθηκαν καταπτώσεις βράχων στην ευρύτερη περιοχή των Ιερών Μονών των Μετεώρων. Στο Δήμο Τρικκαίων προκλήθηκε υπερχειλίση του ποταμού στην ευρύτερη περιοχή Μεγάλων Καλυβίων προς Μαγούλα Καρδίτσας, εκεί όπου συναντώνται οι ποταμοί Πάμισος και Πηνειός.

- 16/01/2016: Κατάρρευση γέφυρας Διάβας από τα ορμητικά νερά λόγω έντονων βροχοπτώσεων.
- 22/05/2016: Πλημμύρα στη Φαρκαδόνα. Σοβαρά προβλήματα εκδηλώθηκαν στον κάμπο της Καρδίτσας, σε Σοφάδες, Παλαμά, Ιτέα και σε άλλες περιοχές. Προβλήματα καταγράφηκαν, ακόμα, στη Φαρκαδόνα Τρικάλων, στα Φάρσαλα κι άλλους δήμους του Νομού Λάρισας που συνδέονται με καταστροφές στις γεωργικές καλλιέργειες (βαμβάκι, σιτηρά, ντομάτες).
- 23/08/2016: Πλημμύρα στην Πύλη, λόγω έντονης βροχόπτωσης μικρής διάρκειας (30' λεπτών). Προβλήματα στη θέση «Κακούρι» της Πύλης.
- 09/09/2016: Πλημμύρες στα χωριά Ρίζωμα, Πλάτανος και Φωτάδα. Αποκλείστηκε το χωριό Αμπέλια Κλεινόβου (ορεινή Καλαμπάκα), λόγω πτώσης γέφυρας και απροσπέλαστων δρόμων. Πολλές καταστροφές καταγράφηκαν και στη Διάβα, καθώς όλα τα κάθετα προς τον Πηνειό ρέματα υπερχειλίσαν με αποτέλεσμα να πλημμυρίσει η περιοχή «Αλώνια». Ακόμα, στη Διάβα φούσκωσε το κεντρικό ρέμα που ξεκινάει από τα «Πλατάνια» και καταλήγει στην περιοχή «Σελιγκάτα» υπερχειλίζοντας στο σημείο της γέφυρας, στην είσοδο του χωριού. Η κυκλοφορία στο Επαρχιακό Οδικό Δίκτυο Καλαμπάκας – Αμπελίων – Κλεινόβου και Καλαμπάκας – Καστανιάς διακόπηκε, καθώς τα κάθετα ρέματα φούσκωσαν από το υπερβολικό νερό με αποτέλεσμα να πλημμυρίσει η ευρύτερη περιοχή.
- 09/03/2017: Πλημμύρες στα Σερβωτά.
- 16/11/2017: Προβλήματα στα ορεινά της Καλαμπάκας, λόγω έντονης βροχόπτωσης. Το 4ο Δημοτικό Σχολείο Καλαμπάκας πλημμύρισε. Στη γέφυρα του Πηνειού στο Βαλομάνδρι, άνοδος της στάθμης του ποταμού.
- 13/01/2018: Υπερχειλίση του Πηνειού ποταμού στην περιοχή της Φαρκαδόνας. Διακοπή κυκλοφορίας στην οδό που συνδέει τον Κλοκοτό με το όμορο διαμέρισμα Μαραθέας, όπου τα νερά σκέπασαν τη γέφυρα που ενώνει τα δύο χωριά της Φαρκαδόνας και του Παλαμά. Πλημμύρισε ο κάμπος της Φαρκαδόνας και τα νερά σκέπασαν ακόμη και το γήπεδο ποδοσφαίρου του δημοτικού διαμερίσματος Πηνειάδας, που απέχει αρκετά μέτρα μακριά από την κοίτη του Πηνειού.

- 24/02/2018: Όλοι οι παραπόταμοι του Πηνειού υπερχείλισαν, ενώ και ο ίδιος σε πολλά σημεία είχε φτάσει πάνω από τα όρια. Αναχώματα υποχώρησαν και πλημμύρισαν καλλιεργήσιμες εκτάσεις χιλιάδων στρεμμάτων, ειδικότερα στην περιοχή του Δήμου Φαρκαδόνας.
- 26.07.2018: Ισχυρή καταιγίδα, αλλά και χαλαζόπτωση, στην Καλαμπάκα μέχρι και το ύψος της Βασιλικής με αποτέλεσμα μικρής διάρκειας διακοπή της κυκλοφορίας στην ΕΟ Τρικάλων – Καλαμπάκας.

2.2 Δεδομένα

Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ ή GIS), τα οποία διαχειρίζονται με χρήση υπολογιστών την τοπογραφική και άλλη γεωγραφικά κατανομημένη πληροφορία (αντικαθιστώντας τους παραδοσιακούς χάρτες με ψηφιακά αρχεία), επιτρέπει την αντιμετώπιση ποικίλων υδρολογικών προβλημάτων. Οι τεχνικές που υποστηρίζονται από τα ΣΓΠ επιτρέπουν την υλοποίηση εφαρμογών όπως (Μαμάσης, 2014):

Παρεμβολή και επιφανειακή ολοκλήρωση υδρολογικών μεταβλητών

- Εισερχόμενη ακτινοβολία και δυνητική διάρκεια ηλιοφάνειας σε λεκάνη— απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την σκίαση και τις κλίσεις του ανάγλυφου
- Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής
- Εξαγωγή υδρολογικών ιδιοτήτων λεκάνης απορροής με βάση τον κάρναβο του— υψομέτρου (συγκέντρωση ροής, υδρογραφικό δίκτυο)
- Υποβοήθηση της κατάρτισης μοναδιαίου υδρογραφήματος
- Χωροχρονική εκτίμηση πλημμυρών
- Συσχέτιση απορροής με δεδομένα λεκάνης (εδαφολογία, φυτοκάλυψη, γεωλογία, χρήσεις γης κλπ.)

2.2.1 Γεωχωρικά Δεδομένα

Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση και δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές σε περιβάλλον GIS παρουσιάζονται παρακάτω:

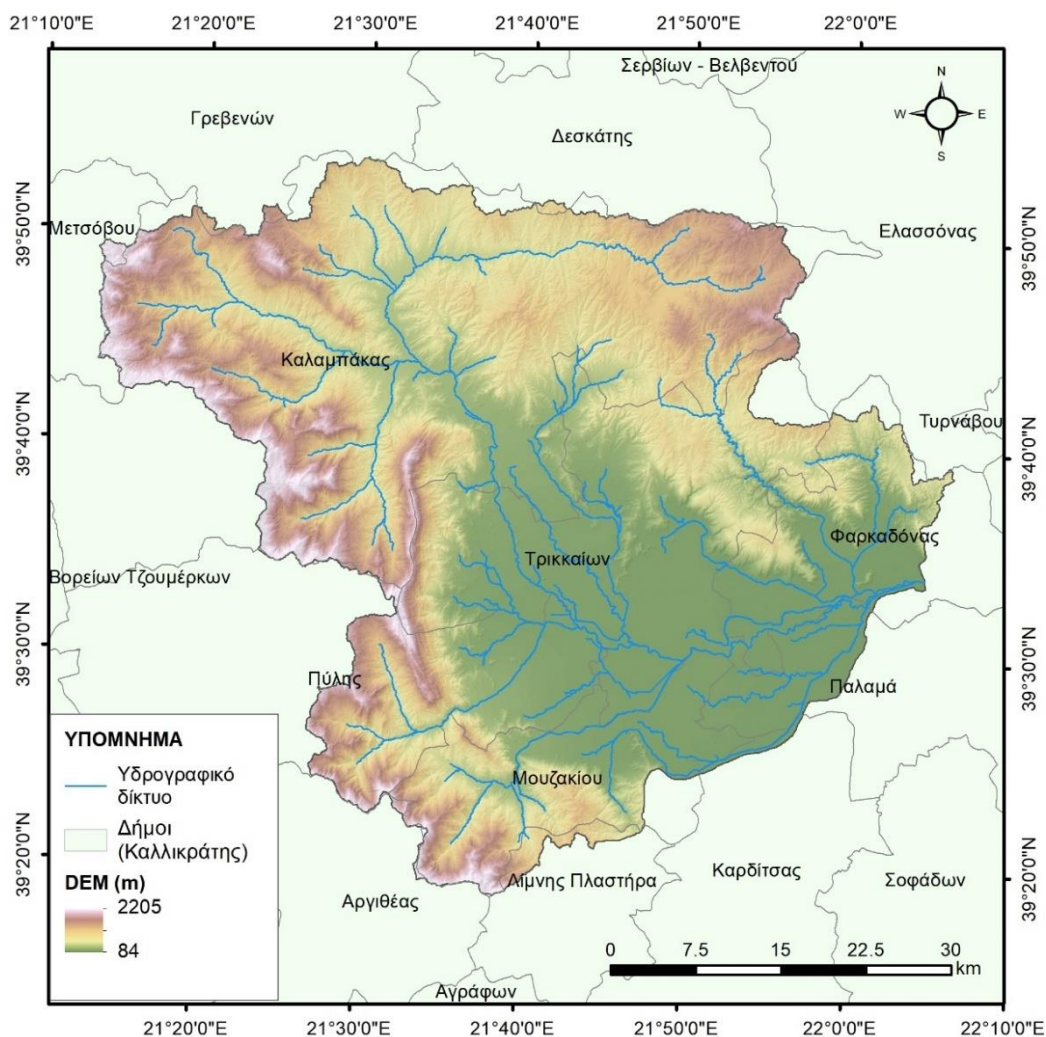
Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) χορηγήθηκε από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδος (Ο.Κ.Χ.Ε.) σε αρχείο raster με μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος 5.00 m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600 m × 3600 m, με περιμετρική επικάλυψη 300 m, και ακολουθούν τη διανομή ΕΓΣΑ87 κλίμακας 1:5000. Ο τύπος των αρχείων είναι img. Η γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος είναι $RMSEz \leq 2.00$ m και η

απόλυτη ακρίβεια ≤ 3.92 m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Μετά την εισαγωγή του DEM στο πρόγραμμα ArcGIS, γίνεται προσαρμογή του στα όρια της περιοχής μελέτης και κατάλληλη διόρθωση, οπότε προκύπτει ο χάρτης υψομέτρων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.

Υδρογραφικό δίκτυο

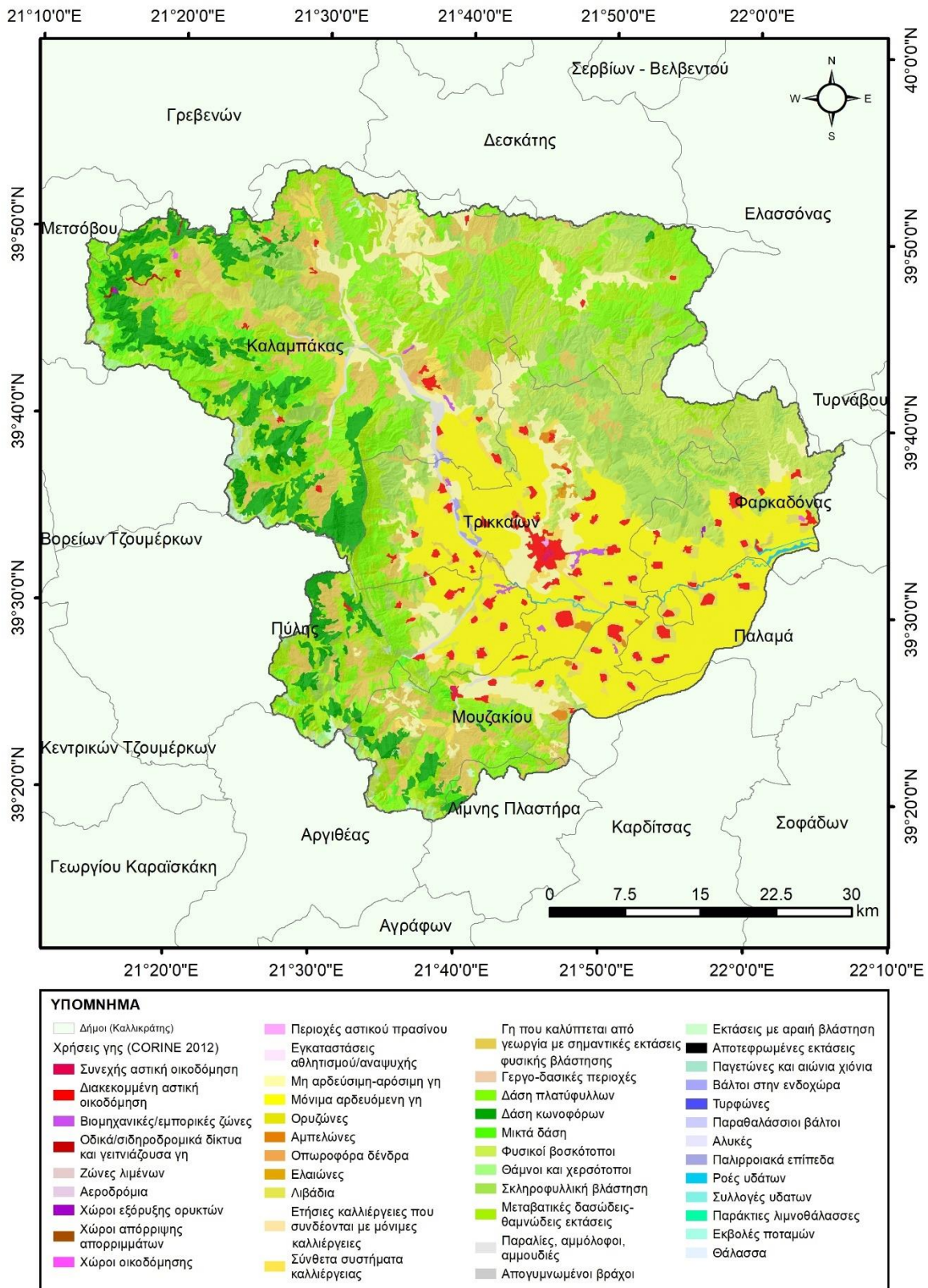
Το υδρογραφικό δίκτυο προέκυψε με βάση το DEM, έπειτα από υδρολογική ανάλυση και διόρθωση με χρήση υποβάθρου δορυφορικών εικόνων. Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής χαρακτηρίζεται από πολυσχιδές υδρογραφικό δίκτυο με κύριο ποταμό που τη διασχίζει, τον Πηνειό, στον οποίο συμβάλλουν πολυάριθμοι δευτερεύοντες ποταμοί και υδατορεύματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

Χρήσεις γης

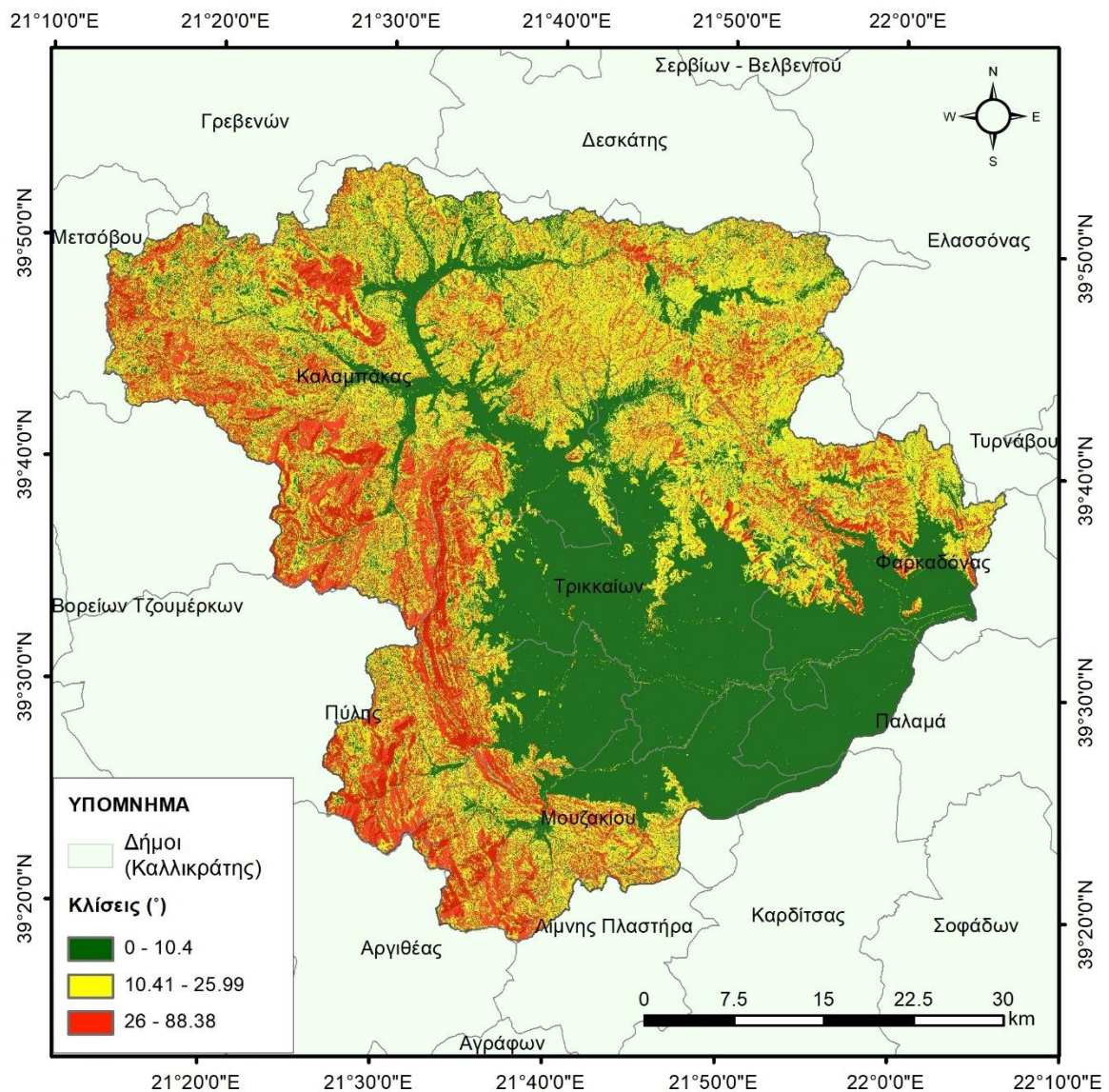
Η κατανομή των χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης βασίστηκε στο Corine Land Cover 2012. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. που ακολουθεί, περιμετρικά με εξαίρεση το νοτιοανατολικό τμήμα, η περιοχή μελέτης καλύπτεται κυρίως από δάση, φυσικούς βοσκοτόπους, ενώ παράλληλα συναντάται συνδυασμός ποώδους και θαμνώδους βλάστησης. Το κεντρικό και νοτιοανατολικό πεδινό τμήμα καλύπτεται στο μεγαλύτερο μέρος του από μόνιμα αρδευόμενα αλλά και μη αρδευσιμη αρόσιμη γη, γεωργικές εκτάσεις, καθώς και καλλιέργειες. Ένα μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής έκτασης αντιστοιχεί σε ασυνεχή αστικό ιστό, στα πεδινά κυρίως τμήματα της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 2.5: Κατανομή χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2012 για την περιοχή μελέτης (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

Κλίσεις εδάφους

Με χρήση του εργαλείου Slope του ArcGIS εισάγοντας ως δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, δημιουργείται ο χάρτης κλίσεων γης για ολόκληρη τη λεκάνη μελέτης. Παρατηρείται ότι οι κλίσεις του εδάφους κυμαίνονται από 0° έως 88.38°, ενώ η μέση κλίση της λεκάνης απορροής υπολογίζεται ίση με 15.42°. Οι κλίσεις που προκύπτουν ταξινομήθηκαν σε τρεις κλάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 2.6), η περιοχή χαρακτηρίζεται γενικά από υψηλές κλίσεις στο δυτικό τμήμα της και μέσες στο βόρειο. Στο κεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα εμφανίζονται κατά βάση χαμηλές κλίσεις, οι οποίες σε κάποιες πεδινές περιοχές μηδενίζονται.

Τύπος εδάφους

Το δεδομένο αυτό αφορά στην κατανομή των υποπεριοχών που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης ως προς την εδαφολογία. Ανάλογα με τον τύπο εδάφους και την υδρολογική κατάσταση τα εδάφη κατατάσσονται στην κατηγορία A, B, C, D σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012):

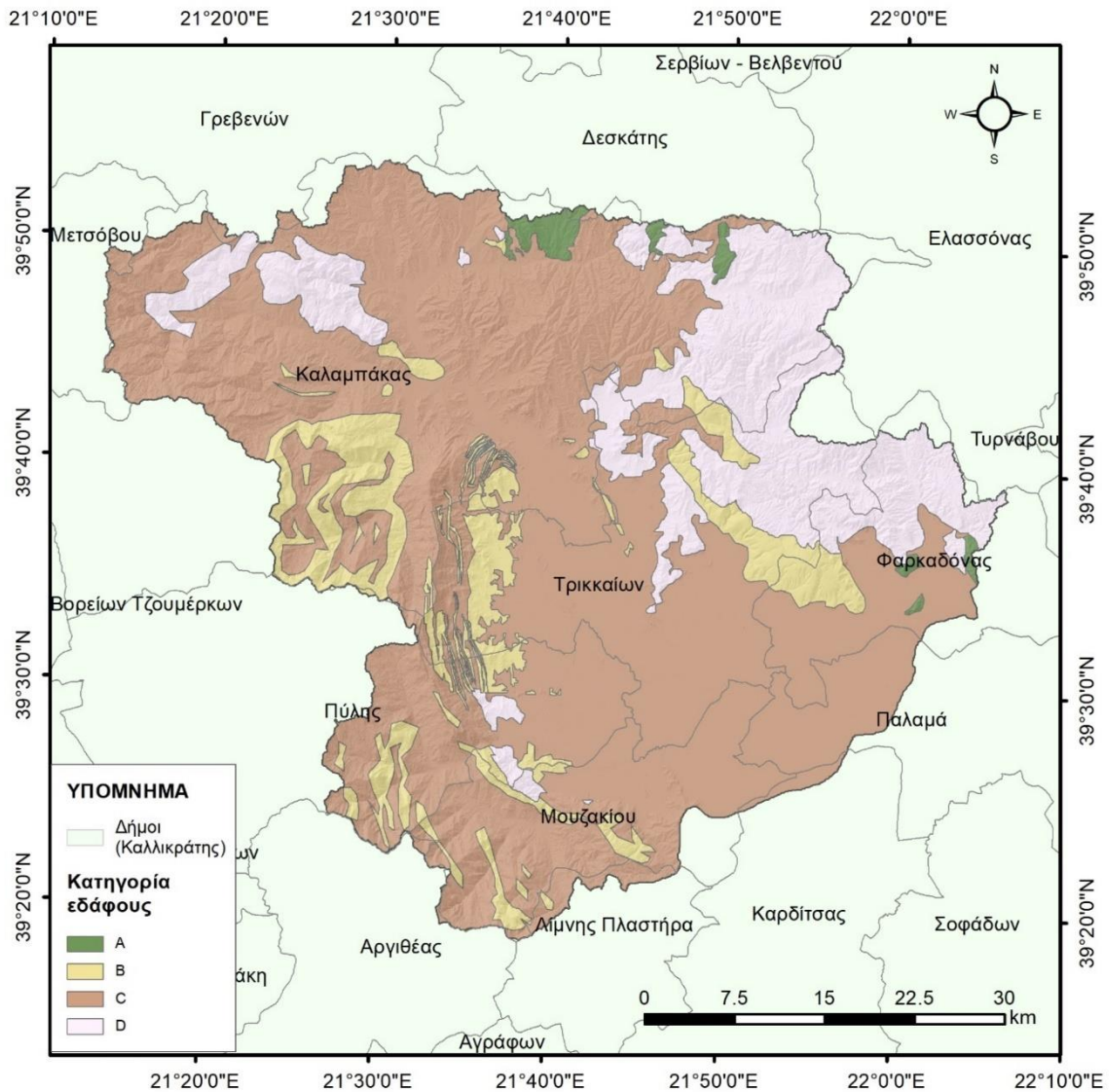
A. Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.

B. Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.

C. Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.

D. Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέραστο υλικό.

Ο διαχωρισμός του εδάφους στις παραπάνω κατηγορίες απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 που ακολουθεί. Παρατηρείται ότι ο κυρίαρχος τύπος εδάφους που συναντάται στην περιοχή μελέτης είναι κατηγορίας C, η οποία αντιστοιχεί σε αργλικούς εδαφικούς σχηματισμούς χαμηλής διηθητικής ικανότητας. Ακολουθούν σε πυκνότητα εμφάνισης τα εδάφη κατηγορίας D και B, ενώ σε ένα πολύ μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας της περιοχής εντοπίζεται έδαφος κατηγορίας A.



Σχήμα 2.7: Κατηγορίες εδάφους της περιοχής μελέτης ανάλογα με τον τύπο και την υδρολογική κατάσταση (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

2.2.2 Βροχομετρικά Δεδομένα

Η ανάλυση βασίστηκε σε πραγματικές καταγραφές βροχομετρικών σταθμών που ανήκουν στο Αυτόματο Δίκτυο Μετεωρολογικών Σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOAAN). Για την περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν οι βροχομετρικοί σταθμοί στις θέσεις που φαίνονται στον Πίνακα 2.2, εντός και πέριξ αυτής.

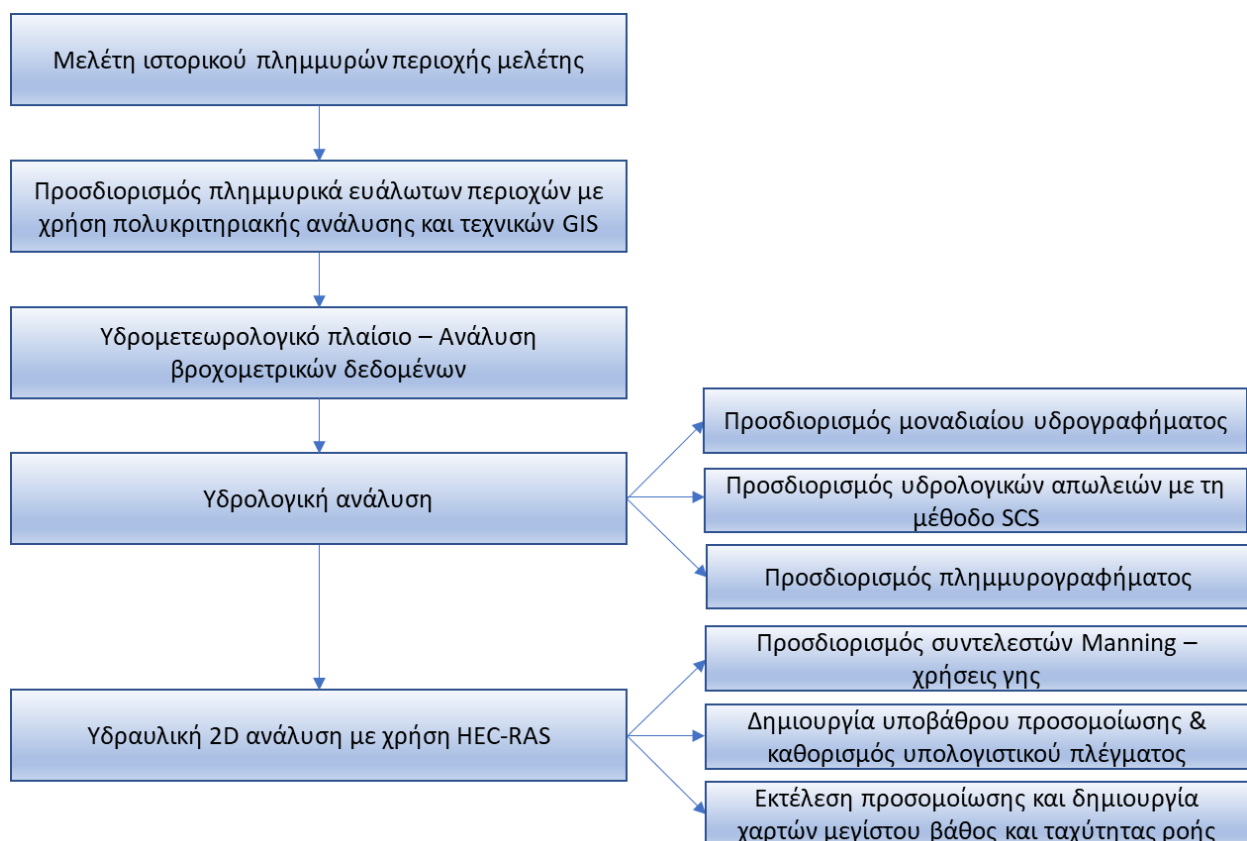
Πίνακας 2.2: Χωρικές καρτεσιανές συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών

Σταθμός	Υδατικό Διαμέρισμα	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
ΜΕΤΣΟΒΟ	ΥΔ05	258893	4405552	1240.0
ΠΕΡΤΟΥΛΙ	ΥΔ04	282121	4380478	1170.0
ΚΑΡΔΙΤΣΑ	ΥΔ08	321757	4359103	91.0
ΤΡΙΚΑΛΑ	ΥΔ08	307901	4379795	163.0
ΚΟΝΙΣΚΟΣ	ΥΔ08	311401	4405624	832.0
ΛΑΡΙΣΑ	ΥΔ08	368210	4387785	82.0
ΠΛΑΣΤΗΡΑ	ΥΔ08	309364	4345156	860.0
ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	ΥΔ08	296548	4397861	238.0
ΓΑΡΔΙΚΙ	ΥΔ08	264221	4380290	1105.0

3 Μεθοδολογία ολοκληρωμένης προσέγγισης στη μελέτη του πλημμυρικού κινδύνου

3.1 Γενική επισκόπηση μεθοδολογίας

Τα στάδια υλοποίησης της ολοκληρωμένης προσέγγισης κινδύνου πλημμύρας που ακολουθήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί. Σε πρώτο στάδιο γίνεται συλλογή και μελέτη των ιστορικών επεισοδίων πλημμύρας που σχετίζονται με την περιοχή μελέτης. Ακολουθεί η εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS για τον εντοπισμό των περιοχών με την υψηλότερη επιδεκτικότητα σε πλημμύρα. Συνδυάζοντας το παραπάνω ιστορικό με τα διαθέσιμα υδρομετεωρολογικά δεδομένα των κοντινότερων σταθμών γίνεται ανάλυση αυτών και στη συνέχεια επιλέγονται ορισμένα από αυτά για την υδρολογικά ανάλυση που έπεται. Η υδρολογική ανάλυση πραγματοποιείται σε θέσεις που σχετίζονται με τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τελικό στάδιο της προσέγγισης εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου είναι η υδραυλική ανάλυση σε θέσεις ενδιαφέροντος για την απεικόνιση της έκτασης της πλημμύρας που προκλήθηκε από το δυσμενέστερο ιστορικό επεισόδιο βροχόπτωσης.



Σχήμα 3.1: Πλαίσιο ολοκληρωμένης προσέγγισης στη διαχείριση κινδύνου πλημμύρας

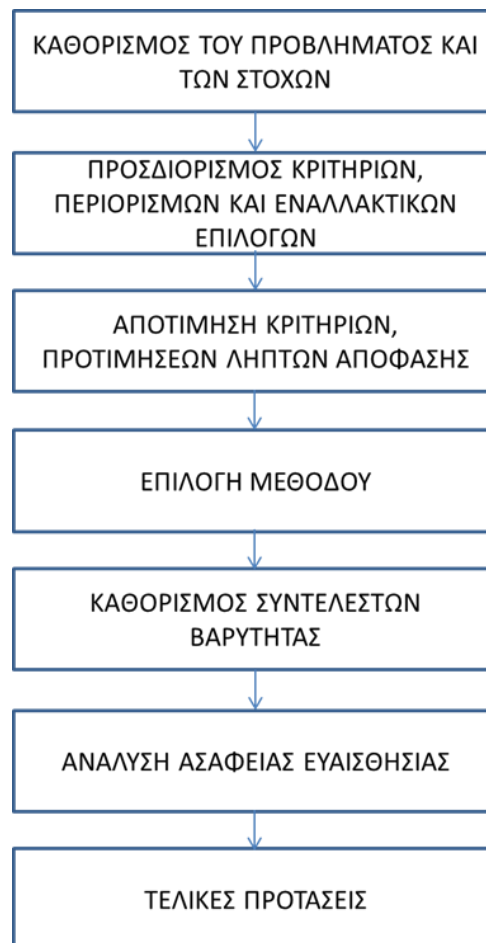
3.2 Πολυκριτηριακή Ανάλυση για τον καθορισμό πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών

3.2.1 Πολυκριτηριακή ανάλυση και ΣΓΠ

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων (MCDA) είναι μια προσέγγιση και ταυτόχρονα ένα σύνολο τεχνικών με σκοπό την απόκτηση μιας συνολικής ταξινόμησης εναλλακτικών επιλογών από την περισσότερο προτιμητέα προς τη λιγότερο προτιμητέα επιλογή κατά φθίνουσα επίδοση. Οι επιλογές ενδέχεται να διαφέρουν ως προς το βαθμό στον οποίο ικανοποιούν κάποιους στόχους/κριτήρια, ενώ καμία επιλογή δε θα είναι προφανώς βέλτιστη στην επίτευξη όλων των στόχων (Dodgson, 2009).

Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τους λήπτες αποφάσεων οι οποίοι καλούνται να διαχειριστούν μεγάλο όγκο πληροφοριών προκειμένου να δώσουν λύση σε πολύπλοκα προβλήματα.

Η υλοποίηση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων βασίζεται στα στάδια που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Στάδια υλοποίησης μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (Πρόελευση: Χαλκιάς, 2015, μετά από επεξεργασία)

3.2.2 Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP)

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι με τους οποίους μπορούν να συνδυαστούν τα κριτήρια απόφασης στην MCDM. Ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (WLC) και οι παραλλαγές του απαιτούν άθροιση των σταθμισμένων κριτηρίων. Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), αποτελεί μια υιοθέτηση του WLC. Στον πυρήνα της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) βρίσκεται μια μέθοδος μετατροπής υποκειμενικών εκτιμήσεων σχετικής σημασίας σε ένα σύνολο γενικών βαθμολογιών ή βαρών. Η μέθοδος προτάθηκε αρχικά από τον Saaty (Saaty, 1977, Saaty 1987) και είναι αποδεδειγμένα μία από τις ευρύτερα εφαρμοζόμενες μεθόδους MCDA, ενώ έχει εφαρμοστεί και από τους Zahedi, Golden et al. και Shim. Ωστόσο, ταυτόχρονα, έχει δεχτεί έντονη κριτική από έναν κύκλο ειδικών στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Έχουν γίνει, επίσης, προσπάθειες ανάπτυξης παρόμοιων μεθόδων οι οποίες διατηρούν τα πλεονεκτήματα της AHP και ξεπερνούν ορισμένα τρωτά σημεία της, όπως η αβεβαιότητα των αποφάσεων. (Dodgson, 2009).

Αποτελεί μία αναλυτική μέθοδο που περιέχει μαθηματική και λογική αιτιολόγηση για τη λήψη αποφάσεων και συμβάλλει στη μετατροπή των σκέψεων και διαισθήσεων του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων σε αριθμητικές αξιολογήσεις. Επιπλέον, δομεί το πρόβλημα σε μια ιεραρχία, με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητάς του μέσα από την αποδόμηση σε υπο-προβλήματα. Γενικά, αποτελεί υπολογιστική θεωρία, η οποία χρησιμοποιεί τόσο παραγωγική όσο και επαγωγική λογική λαμβάνοντας υπόψη πολλούς διαφορετικούς παράγοντες ταυτόχρονα (Χαλκιάς, 2015).

Τα στάδια υλοποίησης της μεθόδου AHP είναι τα εξής (Χαλκιάς, 2015):

1. Αποδόμηση του μελετώμενου προβλήματος σ' ένα ιεραρχικό (ή δικτυακό) μοντέλο, το οποίο απαρτίζεται από τις βασικές συνιστώσες του επιτρέποντας τις συγκρίσεις κατά ζεύγη.
2. Συγκριτική αξιολόγηση κάθε συνιστώσας- κριτηρίου.
3. Σύνθεση των αξιολογημένων κριτηρίων με σκοπό την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.
4. Εύρεση βέλτιστης/ επιθυμητής επιλογής.

Έτσι, προηγείται η ιεράρχηση του προβλήματος με τον καθορισμό των βασικών κριτηρίων με βάση τα οποία θα γίνει η ανάλυση, ακολουθεί η συγκριτική κατάταξη των κριτηρίων σύμφωνα με την κρίση των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων και τέλος, πραγματοποιείται η σύνθεση αυτών, ώστε να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα ως η βέλτιστη εναλλακτική λύση σε ότι αφορά στις προτεραιότητες και τους στόχους που έχουν τεθεί από τον ερευνητή.

Το στάδιο της αξιολόγησης βασίζεται στην ιδέα των συγκρίσεων ανά ζεύγη (pair wise comparisons) των επιμέρους κριτηρίων σύμφωνα με την υποκειμενική (προσωπική, εμπειρική, βιβλιογραφική, έρευνα πεδίου, κλπ.) άποψη του ερευνητή, ως προς την σχέση σημαντικότητας που έχουν οι παράγοντες μεταξύ τους. Η σύγκριση ανά ζεύγη γίνεται σύμφωνα με την θεμελιώδη κλίμακα σύγκρισης που έχει εισάγει ο Saaty και φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Στην τεχνική του Saaty, τα βάρη προέρχονται από μια σειρά πράξεων ενός τετραγώνου αμοιβαίου μητρώου συγκρίσιμων ζευγών μεταξύ των κριτηρίων. Οι συγκρίσεις αφορούν την συγγενή σημασία των δύο κριτηρίων που συνδέονται με τον προσδιορισμό της καταλληλότητας για τον επιδιωκόμενο στόχο. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε έξω από το λογισμικό GIS χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αναλυτικών πηγών και η πρώτη χρήση της με εφαρμογή GIS ήταν το 1991 (Samo Drobne and Anka Lisec, 2009).

Πίνακας 3.1: Θεμελιώδης κλίμακα σύγκρισης ζευγών (Saaty, 1977) (Προέλευση: Samo Drobne and Anka Lisec, 2009, μετά από προσαρμογή)

Ένταση της σχετικής σημασίας	Ορισμός
1	Εξίσου σημαντικό
2	Εξίσου έως μέτρια σημαντικό
3	Μέτρια σημαντικό
4	Μέτρια έως ισχυρά σημαντικό
5	Ισχυρά σημαντικό
6	Ισχυρά έως πολύ ισχυρά σημαντικό
7	Πολύ ισχυρά σημαντικό
8	Πολύ ισχυρά έως εξαιρετικά σημαντικό
9	Εξαιρετικά σημαντικό

Τελικά, η παραπάνω τεχνική σύγκρισης ζευγών θα συμβάλλει στην ανάπτυξη των βαρών των κριτηρίων. Όταν υπάρχουν πολλά κριτήρια, τότε τα βάρη συνήθως κανονικοποιούνται, έτσι ώστε να αθροίζονται στη μονάδα.

Στην περίπτωση n κριτηρίων, ένα σύνολο βαρών ορίζεται ως εξής:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n) \text{ και}$$

$$\sum w_j = 1$$

Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού βαρών, ένα άτομο ή μια ομάδα συγκρίνει κάθε πιθανή αντιστοίχιση και εισάγει τις βαθμολογίες σε ζεύγη του μητρώου συγκρίσεων. Αν το μητρώο είναι συμμετρικό, αρκεί η συμπλήρωση μόνο του κατώτερου τριγώνου. Τα υπόλοιπα κελιά είναι απλά ορισμένα βάσει του κατώτερου τριγώνου.

Για την εκτίμηση του βάρους κάθε κριτηρίου ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Αθροίζονται οι τιμές κάθε στήλης του μητρώου συγκρίσεων.
2. Διαιρείται κάθε στοιχείο του μητρώου συγκρίσεων με το άθροισμα της στήλης του που προέκυψε προηγουμένως, οπότε δημιουργείται το κανονικοποιημένο μητρώο συγκρίσεων.
3. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων για κάθε σειρά του κανονικοποιημένου μητρώου συγκρίσεων. Οι μέσοι όροι που προκύπτουν αποτελούν τους συντελεστές βάρους των κριτηρίων (Samo Drobne and Anka Lisec, 2009).

Η μέθοδος ολοκληρώνεται με την ανάλυση συνέπειας της σύγκρισης των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν. Ο λόγος συνέπειας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα οι εκτιμήσεις του μητρώου συγκρίσεων να έχουν γίνει με τυχαίο τρόπο. Σύμφωνα με τον Saaty, μητρώα συντελεστών βάρους που οδηγούν σε λόγο συνέπειας που υπερβαίνει το 10% απαιτείται να επανεκτιμηθούν, ενώ αντίθετα για λόγο συνέπειας που δεν ξεπερνά την τιμή του 10% ($CR \leq 0.10$) η ιεράρχηση και η σχέση σύγκρισης που έχει πραγματοποιηθεί μεταξύ των πρωτογενών παραγόντων θεωρείται λογική και οι συντελεστές βάρους αποδεκτοί (Χαλκιάς, 2015).

Η εκτίμηση του λόγου συνέπειας γίνεται από την Εξίσωση 3.1:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.1)$$

Όπου:

RI: Ο τυχαίος δείκτης συνέπειας του τυχαία παραγόμενου μητρώου συγκρίσεων και εξαρτάται από τον αριθμό των κριτηρίων.

CI: Ο δείκτης συνέπειας που παρέχει ένα μέτρο απόκλισης από τη συνέπεια.

Ο παραπάνω δείκτης (CI) υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση 3.2:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

Όπου:

λ : Η ιδιοτιμή του πίνακα

n: Ο αριθμός των κριτηρίων

Στο σημείο αυτό γίνεται αναγωγή των κριτηρίων σε κοινή κλίμακα επιλέγοντας μεταξύ της τυποποίησης και της ταξινόμησης των δεδομένων προκειμένου να προκύψουν συγκρίσιμα μεγέθη για κάθε κριτήριο.

Ο Voogd (1983) επανεξέτασε μια ποικιλία διαδικασιών για τυποποίηση, χρησιμοποιώντας συνήθως τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές ως σημεία κλιμάκωσης. Μία σχετική προσέγγιση δίνουν οι Εξισώσεις (3.3), (3.4) ανάλογα για το αν πρόκειται για αύξον ή φθίνον κριτήριο:

$$x_i = \frac{(FV_i - FV_{\min})}{(FV_{\max} - FV_{\min})} \cdot SR \quad (3.3)$$

ή

$$x_i = 1 - \frac{(FV_i - FV_{\min})}{(FV_{\max} - FV_{\min})} \cdot SR \quad (3.4)$$

Όπου:

FV_i : Η ακατέργαστη τιμή του κριτηρίου i

FV_{\min} : Η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου i

FV_{\max} : Η μέγιστη τιμή του κριτηρίου i

SR: Το τυποποιημένο φάσμα με τιμές από 0 έως 1

Η Εξίσωση 3.4 χρησιμοποιείται σε κριτήρια τα οποία εμφανίζουν τη σημαντικότερη τιμή τους στην ελάχιστη τιμή (φθίνον κριτήριο), όπως συμβαίνει στην κλίση όταν χρησιμοποιείται για κριτήριο στον προσδιορισμό πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών. Αντίθετα, σε κριτήρια των οποίων η σπουδαιότητα αυξάνεται με αύξηση της τιμής τους (αύξον κριτήριο), χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3.3. Στη διερεύνηση των κρίσιμων περιοχών σε κίνδυνο πλημμύρας τέτοια κριτήρια είναι η βροχόπτωση και η αδιαπερατότητα.

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της πολυκριτηριακής ανάλυσης συνίσταται στη σύνθεση των επιμέρους κριτηρίων έπειτα από τη στάθμισή τους, σύμφωνα με τους προσδιορισμένους συντελεστές βάρους. Ο σταθμισμένος γραμμικός συνδυασμός (WLC) ή απλά πρόσθετο βάρους ενσωματώνεται στο περιβάλλον του ArcGIS σύμφωνα με την Εξίσωση 3.5, οπότε προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης.

$$FS = \sum_{i=1}^{i=n} w_i x_i \quad (3.5)$$

Όπου:

FS: Η τελική τιμή για κάθε κελί

w_i : Το βάρος του κριτηρίου i

x_i : Η τυποποιημένη τιμή του κριτηρίου i

Σε περιπτώσεις, όπου ισχύουν επίσης οι περιορισμοί Boolean, η διαδικασία μπορεί να τροποποιηθεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή FS με τους συντελεστές των προϊόντων των περιορισμών, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3.6:

$$FS' = \sum_{i=1}^{i=n} w_i x_i \cdot \Pi c_i \quad (3.6)$$

Όπου:

c_i : Οι περιορισμοί

3.2.3 Επιλογή Κριτηρίων Προβλήματος

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, οι παράγοντες που εξετάστηκαν για τον καθορισμό των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών είναι οι χρήσεις γης, η κλίση εδάφους, το υψόμετρο, η βροχοπτώση, ο τύπος εδάφους, καθώς και η αδιαπερατότητα του εδάφους.

Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τον εντοπισμό των πλημμυρικά ευάλωτων ζωνών. (Norman et al., 2010). Κατά τον Rahmati (2015), η κατανομή τους επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα ορισμένες από τις υδρολογικές διεργασίες, όπως η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή και η παραγωγή απορροής. Ειδικότερα, περιοχές με πυκνή βλάστηση συνδέονται με χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας, καθώς παρουσιάζουν αυξημένη διηθητική ικανότητα, η οποία οδηγεί, τελικά, σε χαμηλή επιφανειακή απορροή. Από την άλλη πλευρά, οι αστικοί ιστοί και τα οδικά δίκτυα, που συνιστούν αδιαπέραστες επιφάνειες και γυμνά εδάφη, αυξάνουν την απορροή των καταιγίδων (Tehrany et al., 2014).

Κλίση

Η κλίση εδάφους είναι ένα από τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά της περιοχής που επηρεάζει την απόκρισή της σε πλημμυρικά γεγονότα. Περιοχές με μεγάλες κλίσεις δε διατρέχουν υψηλό κίνδυνο πλημμύρας, καθώς δε σημειώνεται τοπική συγκέντρωση ροής, αλλά το νερό οδηγείται μέσω της βαρύτητας προς τις χαμηλότερες κλίσεις, στις οποίες ο κίνδυνος πλημμύρας είναι εξαιρετικά υψηλός. Επιπροσθέτως, η κλίση αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον εντοπισμό εκείνων των ζωνών που είναι ευάλωτες σε φαινόμενα πλημμύρας, καθώς συνδέεται με τον προσδιορισμό της ταχύτητας ροής του νερού. Ειδικότερα, πολύ επίπεδες επιφάνειες με χαμηλές κλίσεις, όπου παρατηρείται εκτεταμένη συγκέντρωση νερού και χαμηλές ταχύτητες ροής, διατρέχουν υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης

πλημμύρας. Στην περίπτωση αυτή προκειμένου να προληφθούν επακόλουθες καταστροφές, ένα σημαντικό μέρος της επιφανειακής απορροής κρίνεται σκόπιμο να διατεθεί για προσωρινή αποθήκευση (USDA, 1986).

Υψόμετρο

Σύμφωνα και με τους Fernández and Lutz (2010), το υψόμετρο πάντοτε διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον εντοπισμό των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρα και στη χαρτογράφηση της πλημμυρικής επιδεκτικότητας. Από τη μία πλευρά, τοπογραφικοί παράγοντες όπως το υψόμετρο έχουν άμεση επίδραση στο μέγεθος της ροής, καθώς σε περιοχές υψηλού υψομέτρου σημειώνονται πιο έντονες βροχοπτώσεις. Από την άλλη πλευρά, οι κατάντη περιοχές είναι περισσότερο ευάλωτες σε πλημμύρα, καθώς συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Οι περιοχές αυτές έχουν ως επί το πλείστον χαμηλό υψόμετρο (Masoud, 2012).

Η σημαντική επίδραση του υψομέτρου στη διάδοση της πλημμύρας έχει επισημανθεί και από τους Stieglitz et al. (1997), σύμφωνα με τους οποίους η παράμετρος αυτή έχει καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο της κίνησης της επιφανειακής απορροής και στο βάθος της πλημμύρας. Τέλος, διαφορετικά υψόμετρα επιφέρουν αλλαγές στα κλιματικά χαρακτηριστικά, οι οποίες ευθύνονται για διαφοροποιήσεις στη βλάστηση και τις εδαφολογικές συνθήκες και κατ' επέκταση στην πλημμυρική επιδεκτικότητα των επιμέρους περιοχών (Aniqa, 1985).

Βροχόπτωση

Η βροχόπτωση είναι η κύρια αιτία πρόκλησης πλημμύρας. Επεισόδια ισχυρής βροχόπτωσης μπορεί να οδηγήσουν σε πλημμύρα όταν τα ποτάμια συστήματα δεν μπορούν πλέον να μεταφέρουν την περίσσεια νερού προς τα κατάντη. Καθώς η απορροή σχετίζεται με την ποσότητα που κατακρημνίζεται, μεγαλύτερες ποσότητες κατακρημνισμάτων αυξάνουν τον όγκο απορροής. Ως εκ τούτου η υψηλότερη κατακρήμνιση οδηγεί σε υψηλότερη πλημμυρική επικινδυνότητα (Rincon et al., 2018). Βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας ευθύνονται συχνά για την εκδήλωση αιφνίδιων πλημμυρικών φαινομένων (flashflood), σε αντίθεση με βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας και ίδιου ύψους βροχής, όπου το ενδεχόμενο πλημμύρας είναι λιγότερο πιθανό.

Τύπος εδάφους

Η γεωλογία παίζει κυρίαρχο ρόλο στις μελέτες τρωτότητας και κινδύνου πλημμύρας λόγω των διαφορετικών ευαισθησιών των λιθολογικών μονάδων σε ενεργές υδρολογικές

διεργασίες. Η λιθολογία θεωρείται κρίσιμος παράγοντας στις χωρικές και χρονικές μεταβολές της υδρολογικής λεκάνης απορροής και της παραγωγής ιζημάτων (Miller et al., 1990). Περιοχές με πολύ ανθεκτικά πετρώματα ή εξαιρετικά διαπερατό υπόστρωμα συνδέονται με χαμηλή επιφανειακή απορροή (Zelik et al., 2012). Επιπλέον, το γεωλογικό υπέδαφος και ιδιαίτερα οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, τόσο από άποψη διαβρωσιμότητας όσο και διαπερατότητας, είναι φυσικοί παράγοντες ουσιώδεις για τον προσδιορισμό του κινδύνου πλημμύρας (Stefanidis and Stathis, 2013).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Cosby et al. (1984), η διήθηση του νερού εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του εδάφους, με ιδιαίτερη έμφαση στη σύσταση αυτού, ελέγχοντας την παραγωγή των διεργασιών της επιφανειακής απορροής και πλημμύρας

Αδιαπερατότητα

Οι αδιαπέραστες επιφάνειες (κτίρια, δρόμοι και χώροι στάθμευσης) χαρακτηρίζονται από χαμηλή ικανότητα διήθησης και η απορροή από τις πλακόστρωτες περιοχές συμβάλλει σημαντικά στη συνολική απορροή. Η αστικοποίηση συνήθως οδηγεί σε μείωση του χρόνου υστέρησης, αύξηση του ύψους αιχμής και αύξηση της συνολικής απορροής για μια συγκεκριμένη πλημμύρα (Murck et al., 1996).

Συγκεντρωτικά τα κριτήρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Κριτήρια προσδιορισμού των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών

Ονομασία κριτηρίου	Περιγραφή
C1	Χρήσεις γης
C2	Κλίση
C3	Υψόμετρο
C4	Βροχόπτωση
C5	Εδαφολογία/Υδρολογικός τύπος εδάφους
C6	Αδιαπερατότητα

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται το μητρώο συγκρίσεων, τα στοιχεία του οποίου αποτελούν τις εκτιμήσεις που αποδόθηκαν κατά τη διαδικασία σύγκρισης των κριτηρίων μεταξύ τους ανά ζεύγη.

Πίνακας 3.3: Μητρώο συγκρίσεων των κριτηρίων κατά ζεύγη

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1/3	4	2	4	2
C2	3	1	5	4	5	2
C3	1/4	1/5	1	1/3	1/2	1/2
C4	1/2	1/4	3	1	4	1/2
C5	1/4	1/5	2	1/4	1	1/2
C6	1/2	1/2	2	2	2	1

Τελικά, προκύπτουν οι συντελεστές βάρους και οι δείκτες της ανάλυσης συνέπειας που φαίνονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.4: Συντελεστές βάρους των εξεταζόμενων κριτηρίων με εφαρμογή της ΑΗΡ

Ονομασία κριτηρίου	Περιγραφή	Συντελεστής βαρύτητας (w_i)
C1	Χρήσεις γης	0.218
C2	Κλίση εδάφους	0.378
C3	Υψόμετρο	0.054
C4	Βροχόπτωση	0.139
C5	Τύπος εδάφους	0.068
C6	Αδιαπερατότητα	0.149

Πίνακας 3.5: Μέσος δείκτης συνέπειας (CI), λόγος συνέπειας (CR) και τυχαίος δείκτης συνέπειας (RI) της ΑΗΡ

Δείκτης	Τιμή
CI	0.068
RI	1.24
CR	0.055

Σύνθεση κριτηρίων σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS)

Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης, ο χάρτης χρήσεων γης (Corine 2012), η κατανομή των κλίσεων του εδάφους και η κατανομή της βροχόπτωσης.

Επιπρόσθετα, στο επίπεδο πληροφορίας που αφορά στην εδαφολογική κατάταξη στις κατηγορίες A, B, C, D, προστίθεται ένα επιπλέον πεδίο με τιμές 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, αντίστοιχα, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η συσχέτιση της διηθητικής ικανότητας των εδαφών κάθε κατηγορίας με το ενδεχόμενο εκδήλωσης πλημμύρας στην περιοχή. Έτσι, στους σχεδόν αδιαπέραστους εδαφικούς σχηματισμούς της κατηγορίας D αποδίδεται η τιμή 1.0, καθώς εκεί το ενδεχόμενο πλημμύρας είναι ιδιαίτερα αυξημένο, ενώ στα εδάφη που κατατάσσονται στην A κατηγορία τίθεται η τιμή 0.25, λόγω του μειωμένου κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας σε αυτά. Ακολουθώντας την ίδια λογική διαβάθμισης αποδίδονται οι ενδιάμεσες τιμές 0.5 και 0.75 για τα εδάφη που ανήκουν στις κατηγορίες B και C, αντίστοιχα.

Για το κριτήριο της βροχόπτωσης αξιοποιούνται οι όμβριες καμπύλες των σταθμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης που έχουν καταρτιστεί και είναι διαθέσιμες στο αρχείο του ΥΠΕΚΑ. Με βάση αυτές υπολογίζεται η ένταση βροχής διάρκειας εικοσιτετραώρου για κάθε σταθμό για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Στην παρούσα έρευνα επιλέγεται τυπική περίοδος επαναφοράς 20 έτη, επομένως, με δεδομένη την ένταση, υπολογίζεται άμεσα το ύψος βροχής. Τα ύψη που προκύπτουν ενσωματώνονται σαν νέο επίπεδο πληροφορίας στο GIS που αντιπροσωπεύει τη βροχόπτωση. Στη συνέχεια, γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχής με τη μέθοδο Kriging, η οποία σε περιβάλλον GIS επιτυγχάνεται με χρήση του ομώνυμου εργαλείου.

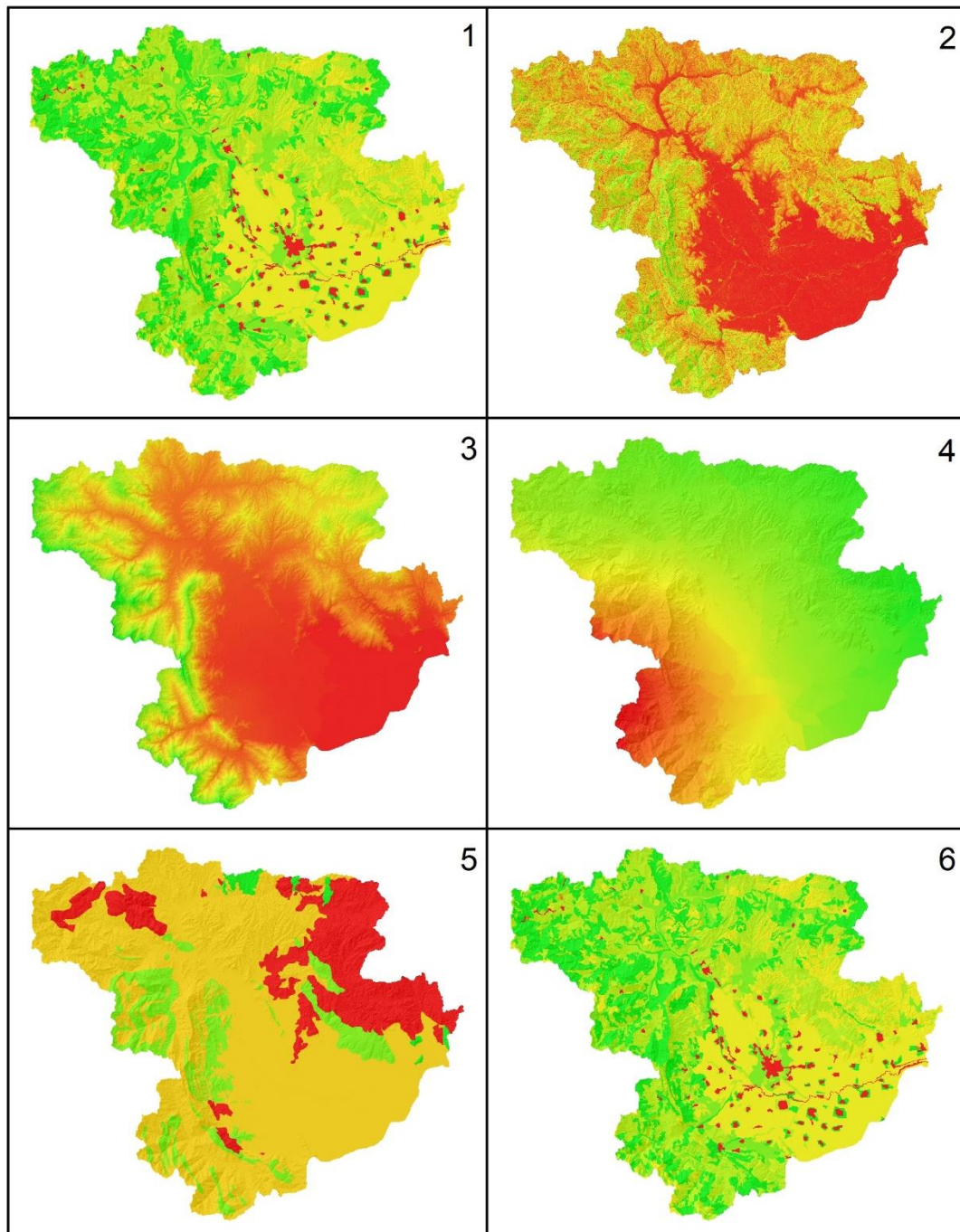
Το κριτήριο της αδιαπερατότητας συνδυάστηκε στην ανάλυση με το επίπεδο των χρήσεων γης αντιστοιχίζοντας μία τιμή – δείκτη από 0 έως 1 που αντιπροσωπεύει την αδιαπερατότητα σε κάθε κατηγορία χρήσης γης. Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε αδιαπέρατες επιφάνειες (συνεχής δόμηση, συγκοινωνιακά δίκτυα, κα.), όπου ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι αυξημένος λόγω της τοπικής συγκέντρωσης ροής. Από την άλλη πλευρά, επιφάνειες με πυκνή βλάστηση που χαρακτηρίζονται από υψηλή διηθητική ικανότητα αντιστοιχίζονται σε τιμές που πλησιάζουν το μηδέν, καθώς δε διατρέχουν υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης πλημμύρας. Οι τιμές που αποδόθηκαν στον εν λόγω συντελεστή ανάλογα με την κάλυψη γης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Συντελεστής αδιαπερατότητας σε σχέση με τις κατηγορίες χρήσεων γης του Corine

Κωδικός (Corine)	Περιγραφή	Τιμή
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	1.0
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.9
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.9
123	Ζώνες λιμένων	1.0
124	Αεροδρόμια	1.0
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	1.0
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0.8
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	0.9
133	Χώροι οικοδόμησης	0.8
141	Περιοχές αστικού πρασίνου	0.6
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.6
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	0.4
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.6
213	Ορυζώνες	0.4
221	Αμπελώνες	0.3
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.3
223	Ελαιώνες	0.3
231	Λιβάδια	0.3
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	0.3
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.5
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.5
244	Γεωργο-δασικές περιοχές	0.2
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.2
312	Δάσος κωνοφόρων	0.3
313	Μικτό δάσος	0.3
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.6
322	Θάμνοι και χερσότοποι	0.4
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.5
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	0.5
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.3
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.6
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.4
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.8
335	Παγετώνες και αιώνια χιόνια	0.8
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	1.0
412	Τυρφώνες	0.9
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.8
422	Αλυκές	0.9
423	Παλιρροιακά επίπεδα	0.9
511	Ροές υδάτων	1.0
512	Συλλογές υδάτων	1.0
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	1.0
522	Εκβολές ποταμών	1.0
523	Θάλασσα	1.0

Ακολουθεί η τυποποίηση όλων των επιπέδων πληροφορίας που αντιστοιχούν στα έξι κριτήρια της πολυκριτηριακής ανάλυσης, σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.3 και 3.4 της ενότητας

3.2.2 σε περιβάλλον GIS, με χρήση του εργαλείου Raster Calculator. Το εύρος SR του τυποποιημένου φάσματος κριτηρίων στη συγκεκριμένη μελέτη ισούται με τη μονάδα. Τα κριτήρια έπειτα από τυποποίηση φαίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 3.3.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Πλημμυρική Επιδεκτικότητα



- 1. Χρήσεις γης
- 2. Κλίση
- 3. Υψόμετρο

- 4. Βροχόπτωση
- 5. Τύπος εδάφους
- 6. Αδιαπερατότητα

Σχήμα 3.3: Χάρτες κριτηρίων μετά την τυποποίηση (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο κανόνας απόφασης WLC στα τυποποιημένα πλέον κριτήρια για την εκτίμηση κινδύνου πλημμύρας, οπότε προκύπτει ο τελικός χάρτης των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών. Στο χάρτη που δημιουργείται, κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε μία τελική βαθμολογία (FS) με τιμή εντός του διαστήματος [0,1] που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του κινδύνου σε αυτό. Υψηλές τιμές εκφράζουν υψηλό κίνδυνο, ενώ μικρότερες τιμές, χαμηλό. Η άθροιση των σταθμισμένων κριτηρίων (WLC) επιτυγχάνεται μέσω του εργαλείου Raster Calculator που πραγματοποιεί πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας (raster) και αριθμών.

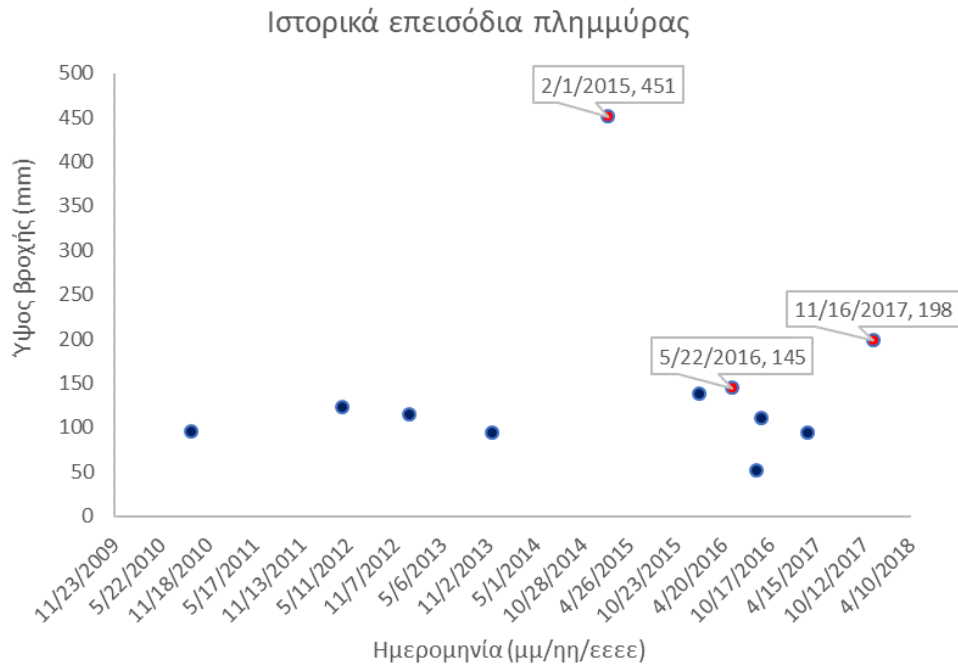
Για λόγους καλύτερης οπτικοποίησης του αποτελέσματος και εποπτείας των κρίσιμων περιοχών γίνεται ομαδοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν σε κατηγορίες κινδύνου. (Classification). Οι κλάσεις που δημιουργούνται αντιστοιχούν σε περιοχές με χαμηλή, μεσαία και υψηλή πλημμυρική επιδεκτικότητα.

3.3 Υδρομετεωρολογική Ανάλυση πρόσφατων πλημμυρών

3.3.1 Επεξεργασία Δεδομένων

Αρχικά έγινε επιλογή μεταξύ των πλημμυρικών επεισοδίων που προαναφέρθηκαν στην ενότητα 2.1.5 συνδυάζοντας το ιστορικό πλημμυρών και τις διαθέσιμες καταγραφές των βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Τα βροχομετρικά δεδομένα προήλθαν από τις μετρήσεις σταθμών του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΔ08), Ηπείρου (ΥΔ05) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ04) και συγκεκριμένα από τους σταθμούς Τρίκαλα (ΥΔ08), Καρδίτσα (ΥΔ08), Λάρισα (ΥΔ08), Γαρδίκι (ΥΔ08), Καλαμπάκα (ΥΔ08), Πλαστήρα (ΥΔ08), Κονισκός (ΥΔ08), Μέτσοβο (ΥΔ05) και Περτούλι (ΥΔ04).

Κατά τη διαδικασία επιλογής, απορρίφθηκαν αρχικά τα επεισόδια που συνέβησαν πριν τα μέσα του 2010, καθώς στους περισσότερους σταθμούς, οι καταγραφές ξεκινούν μεταγενέστερα. Επιπρόσθετα, για τα πλέον πρόσφατα επεισόδια του έτους 2018 δε βρέθηκαν διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα κατά το χρονικό διάστημα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ως απόρροια των παραπάνω, η υδρομετεωρολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τις ιστορικές πλημμύρες που τοποθετούνται χρονικά στο δεύτερο μισό του 2010 έως και τα τέλη του 2017. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται τα ιστορικά επεισόδια που επιλέχθηκαν. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται τα επεισόδια των οποίων τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για την υδρολογική και υδραυλική ανάλυση που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4: Ιστορικά επεισόδια βροχής στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη συνέχεια, για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο από τα παραπάνω προσδιορίστηκαν το συνολικό ύψος βροχής, η διάρκεια βροχής και η περίοδος επαναφοράς για διάρκειες βροχόπτωσης 1, 2, 6, 12, 24 και 48 ωρών. Το συνολικό ύψος βροχής καθώς και η διάρκεια βροχής προέκυψαν άμεσα από τις δεκάλεπτες (ιστορικές) καταγραφές των σταθμών για το κάθε πλημμυρικό συμβάν.

Η περίοδος επαναφοράς προέκυψε από τις όμβριες καμπύλες ανά σταθμό σύμφωνα με την εξίσωση 3.7, αφότου υπολογίστηκε η μέγιστη ένταση για διάρκειες βροχής 1, 2, 6, 12, 24 και 48 ωρών.

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^{\kappa} - \psi')}{(1 + \frac{d}{\theta})^{\eta}} \quad (3.7)$$

Όπου:

κ παράμετρος σχήματος

λ' παράμετρος κλίμακας

ψ' παράμετρος θέσης της συνάρτησης κατανομής

θ, η παράμετροι της συνάρτησης διάρκειας

Οι παράμετροι των όμβριων καμπυλών για κάθε σταθμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Παράμετροι όμβριων καμπυλών ανά βροχομετρικό σταθμό
(Πηγή: <https://floods.ypeka.gr/>)

Σταθμός	Παράμετροι όμβριων καμπυλών				
	λ'	ψ'	θ	η	κ
ΜΕΤΣΟΒΟ	63.200	0.431	0.334	0.627	0.123
ΠΕΡΤΟΥΛΙ	348.800	0.866	0.334	0.627	0.036
ΚΑΡΔΙΤΣΑ	179.800	0.394	0.042	0.639	0.205
ΤΡΙΚΑΛΑ	561.300	0.812	0.042	0.639	0.092
ΚΟΝΙΣΚΟΣ	544.200	0.786	0.042	0.639	0.092
ΛΑΡΙΣΑ	245.300	0.586	0.042	0.639	0.205
ΠΛΑΣΤΗΡΑ	994.100	0.815	0.042	0.639	0.038
ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	431.800	0.685	0.042	0.639	0.092
ΓΑΡΔΙΚΙ	392.800	0.891	0.334	0.627	0.036

Σημ.: Οι παράμετροι των όμβριων καμπυλών στους σταθμούς Καλαμπάκα, Πλαστήρα και Γαρδίκι, στις θέσεις των οποίων δεν έχουν καταρτιστεί εξισώσεις όμβριων καμπυλών, βασίστηκαν στις αντίστοιχες του κοντινότερου σταθμού για τον οποίο υπάρχουν καταρτισμένες όμβριες καμπύλες. Χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή, οι παράμετροι των σταθμών Μετέωρα, Φράγμα Πλαστήρα και Κατάφυτο, αντίστοιχα.

Στις περιπτώσεις απώλειας βροχομετρικών παρατηρήσεων λόγω βλάβης του σταθμού έγινε συμπλήρωσή τους με τη μέθοδο των αντιστρόφων αποστάσεων.

3.3.2 Αντικείμενο υδρομετεωρολογικής ανάλυσης

Από το αρχείο με όλες τις δεκάλεπτες καταγεγραμμένες παρατηρήσεις των σταθμών απομονώθηκαν αυτές που αφορούσαν στην περίοδο των ιστορικών πλημμυρικών επεισοδίων που επιλέχθηκαν προς ανάλυση. Ειδικότερα, για κάθε επεισόδιο δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel στο οποίο εισάχθηκαν σε τρεις στήλες η ημερομηνία καταγραφής, η ώρα και το ύψος βροχής σε mm, αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλους τους σταθμούς που φέρουν διαθέσιμες παρατηρήσεις στο χρονικό διάστημα εκδήλωσης του συγκεκριμένου επεισοδίου. Το συνολικό ύψος βροχής προκύπτει άμεσα με άθροιση των δεκάλεπτων παρατηρήσεων από την αρχή έως το τέλος του επεισοδίου. Η χρονική διάρκεια του επεισοδίου καθορίζεται με βάση την πρώτη μη μηδενική καταγραφή σε κοντινή, προγενέστερη ημέρα από αυτή του πλημμυρικού

επεισοδίου από την οποία και ύστερα υπάρχουν συνεχόμενες μη μηδενικές παρατηρήσεις, έως και την εμφάνιση αλληπάληλων διαδοχικών μηδενικών παρατηρήσεων που σηματοδοτούν το τέλος του επεισοδίου, κάποιες ώρες ή μέρες αργότερα.

Στη συνέχεια, οι δεκάλεπτες καταγραφές για τα εν λόγω επεισόδια μετατράπηκαν σε ωριαίες σημειακές παρατηρήσεις βροχής ανά σταθμό.

3.4 Υδρολογική Ανάλυση για επιλεγμένα επεισόδια

3.4.1 Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο ισόχρονων καμπυλών (Time - Area Diagram)

Υπάρχει πληθώρα υδρολογικών μοντέλων που μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος ενός επεισοδίου βροχής. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Κατά τον Sherman (1932), μοναδιαίο υδρογράφημα καλείται το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους (10 mm) και συγκεκριμένης διάρκειας, η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
2. Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.
3. Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται από τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες (Wilson, 1990; Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

Οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων. Η χρονική αρχή

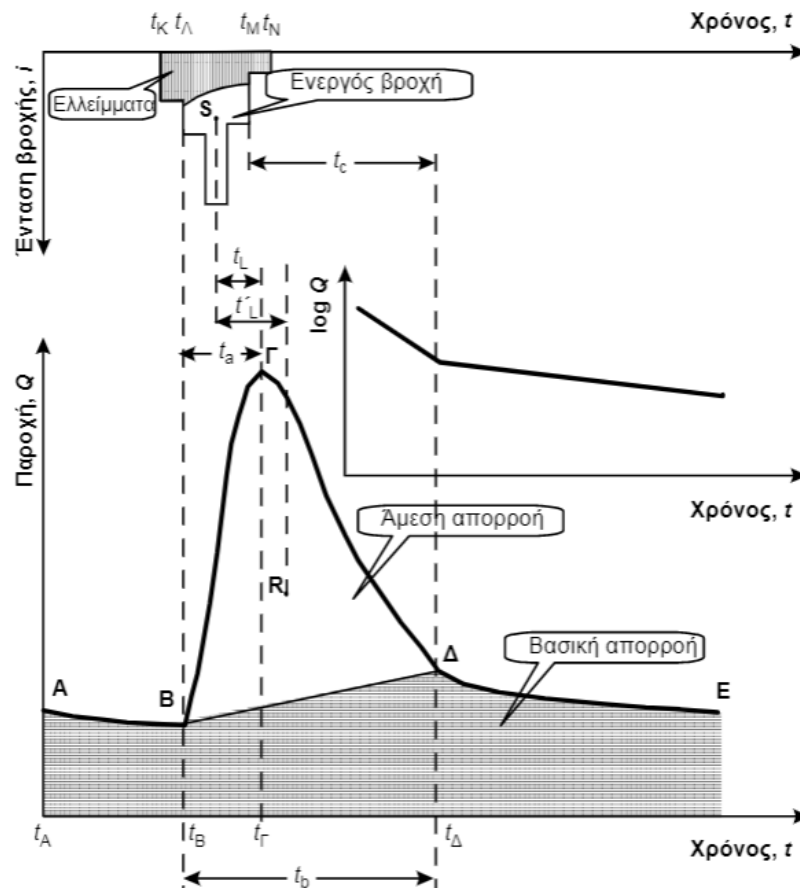
των επιμέρους υδρογραφήματων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντίστοιχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

Ως υδρογράφημα απορροής ορίζεται το διάγραμμα της παροχής του υδατορεύματος ως συνάρτηση του χρόνου σε μία συγκεκριμένη θέση του υδατορεύματος.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ένα τυπικό υδρογράφημα ενός πλημμυρικού επεισοδίου, καθώς και το υετογράφημα της βροχής που προκάλεσε την πλημμύρα. Ο κλάδος AB του υδρογραφήματος αντιπροσωπεύει τη βασική ροή του ποταμού, η οποία είναι διαρκής. Στο χρόνο $t_A \equiv t_B$ που ξεκινά η ενεργός βροχόπτωση, η παροχή του υδατορεύματος αρχίζει να αυξάνεται με έντονο ρυθμό, έως το χρόνο t_r , όπου εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της. Ο χρόνος t_r καλείται χρόνος αιχμής και είναι ο χρόνος μεταξύ του σημείου έναρξης του υδρογραφήματος και της αιχμής του και για σχετικά σύντομα και απλής δομής επεισόδια βροχής έπεται, συνήθως, της λήξης της ενεργού βροχής. Για μεγαλύτερης διάρκειας και απλής δομής επεισόδια βροχής ο χρόνος αιχμής μπορεί να ταυτίζεται με το χρόνο λήξης της ενεργού βροχής t_M . Ο κλάδος ΒΓ του υδρογραφήματος ονομάζεται ανοδικός κλάδος, το σημείο Γ ονομάζεται αιχμή του υδρογραφήματος και η αντίστοιχη παροχή, παροχή αιχμής. Ακολουθεί μείωση της παροχής που απεικονίζεται στον καθοδικό κλάδο ΓΔ. Στο χρόνο t_D σταματάει η άμεση απορροή, συνεχίζει, όμως, η βασική απορροή, σχηματίζοντας ένα νέο κλάδο στείρευσης, τον κλάδο ΔΕ.

Ανακεφαλαιωτικά, η άμεση απορροή πραγματοποιείται μόνο στο χρονικό διάστημα (t_B, t_D) , ενώ η βασική απορροή είναι διαρκής. Η διάρκεια $t_b := t_D - t_B$ καλείται διάρκεια πλημμύρας ή χρόνος βάσης. Χαρακτηριστικές διάρκειες του υδρογραφήματος είναι, ακόμη, ο χρόνος ανόδου, $t_a := t_r - t_B$ και ο χρόνος υστέρησης ή χρόνος υστέρησης αιχμής $t_L := t_r - t_s$, όπου t_s ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους S του ενεργού υετογραφήματος. Αυστηρότερα, ο χρόνος υστέρησης ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στα κέντρα βάρους του υδρογραφήματος άμεσης απορροής και του ενεργού υετογραφήματος, δηλαδή $t'_L := t_r - t_s$, όπου t_r ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους R του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, για διάκριση ο χρόνος t'_L αναφέρεται και ως κεντροβαρικός χρόνος υστέρησης. Σύμφωνα με τον Nash (1959), ο χρόνος υστέρησης t'_L , αποτελεί, χαρακτηριστικό της λεκάνης και όχι ενός μεμονωμένου υδρογραφήματός της. Ωστόσο, απλοποιητικά έχει επικρατήσει, αντί του t'_L να χρησιμοποιείται το μέγεθος t_L το οποίο, όμως, δε μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστικό της λεκάνης, αφού εξαρτάται και από τη μορφή του υετογραφήματος (Dingman, 1994). Μια άλλη κατά προσέγγιση αναλλοίωτη διάρκεια, είναι ο χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής ο οποίος εκφράζει το χρόνο που απαιτείται για να φθάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το πιο απομακρυσμένο υδραυλικά σημείο

της λεκάνης στη διατομή εξόδου. Ο χρόνος συγκέντρωσης εμφανίζεται στο Σχήμα 3.5, ως η χρονική απόσταση από τη λήξη της ενεργούς βροχής μέχρι τη λήξη της άμεσης απορροής, δηλαδή $t_c := t_\Delta - t_M$.



Σχήμα 3.5: Σκαρίφημα τυπικού υδρογραφήματος απορροής με το αντίστοιχο υετογράφημα (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016)

Σύμφωνα με τον Παπαζαφειρίου (1983), η χρονική κατανομή της απορροής, η οποία εκφράζεται από το σχήμα του υδρογραφήματος, επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες, καθώς επίσης και από τα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος διαμορφώνεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλεί την απορροή, ενώ η καμπύλη καθόδου είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της βροχής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

Η Μέθοδος των Ισόχρονων Καμπυλών

Η μέθοδος χρόνου - επιφάνειας βασίζεται στο ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας που εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου

(McCuern, 1989). Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες (Χριστοφίδης, 2008).

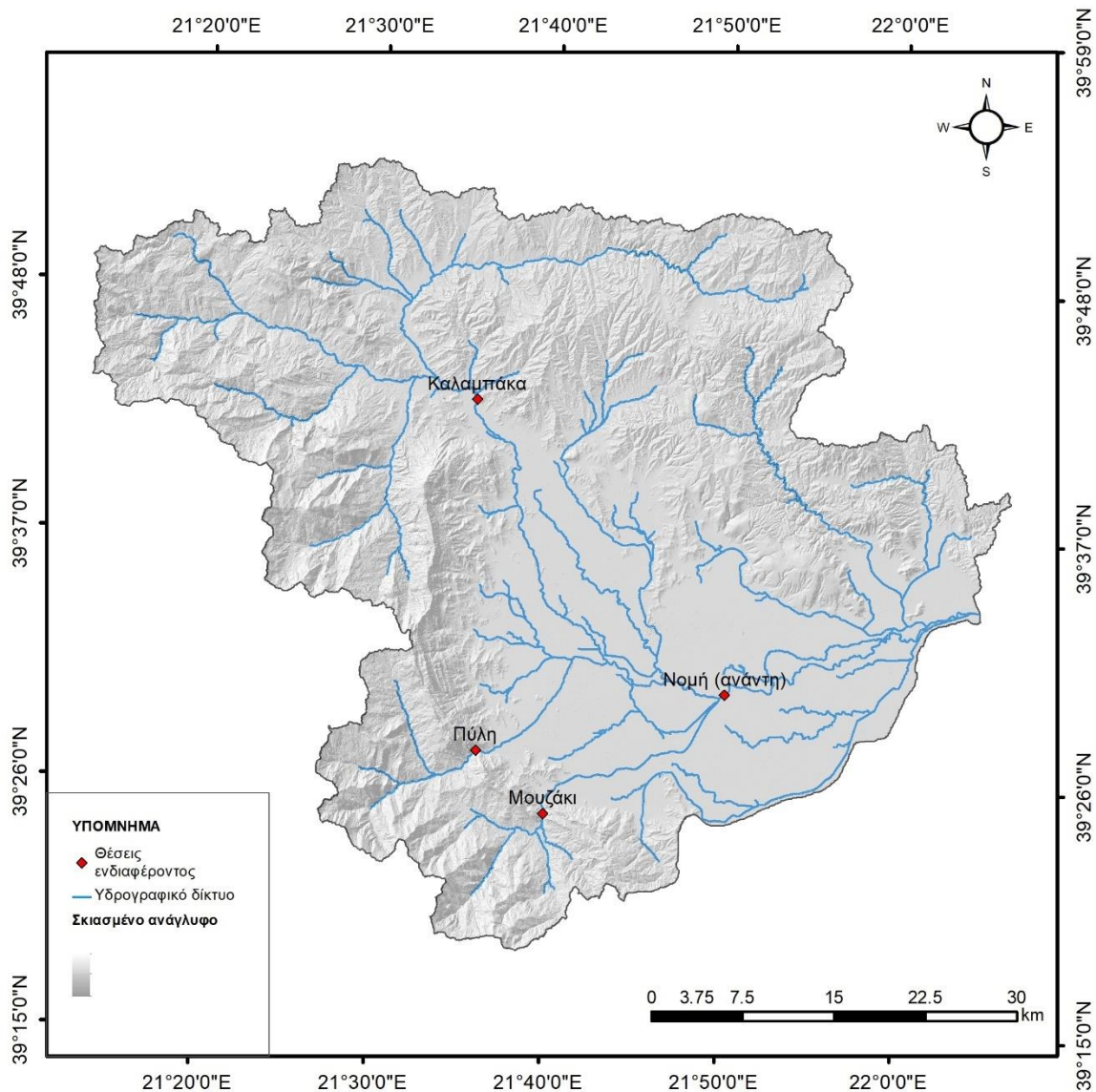
Ειδικότερα, με τον όρο ισόχρονες καμπύλες καλείται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής που πέφτουν εντός της λεκάνης απέχουν χρονικά την ίδια απόσταση από την έξοδο της λεκάνης (Καββαδά, 2012). Οι ισόχρονες καμπύλες δε δύναται να διασταυρωθούν μεταξύ τους, καθώς η καθεμία περιλαμβάνει σημεία διαφορετικής χρονικής απόστασης από την έξοδο της λεκάνης και μπορούν να εκτείνονται μόνο εντός των ορίων της λεκάνης (Dooge, 1959).

Το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών χρησιμοποιείται για το μετασχηματισμό της ενεργού βροχόπτωσης σε απορροή λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που απαιτείται για να καταλήξει το νερό από κάθε σημείο της λεκάνης στην έξοδό της. Για το σκοπό αυτό παράγεται το ιστογράμμα χρόνου – επιφάνειας της υπό μελέτη λεκάνης, το οποίο απεικονίζει τη σχέση του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας. Ο Clark (1945) ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τη μέθοδο του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας, σκοπός της οποίας είναι η εύρεση του γεωμετρικού τόπου των σημείων που απορρέουν την ίδια χρονική στιγμή. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης και κατά συνέπεια κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογή μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους λεκάνες. Επιπλέον, ισχύουν οι δύο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας, το οποίο σημαίνει ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μία και μοναδική συνάρτηση, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχόπτωσης (Sagafian et al., 2002).

Στην παρούσα εργασία, η παραγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS, με τη βοήθεια των λογισμικών ArcGIS και HEC-GeoHMS.

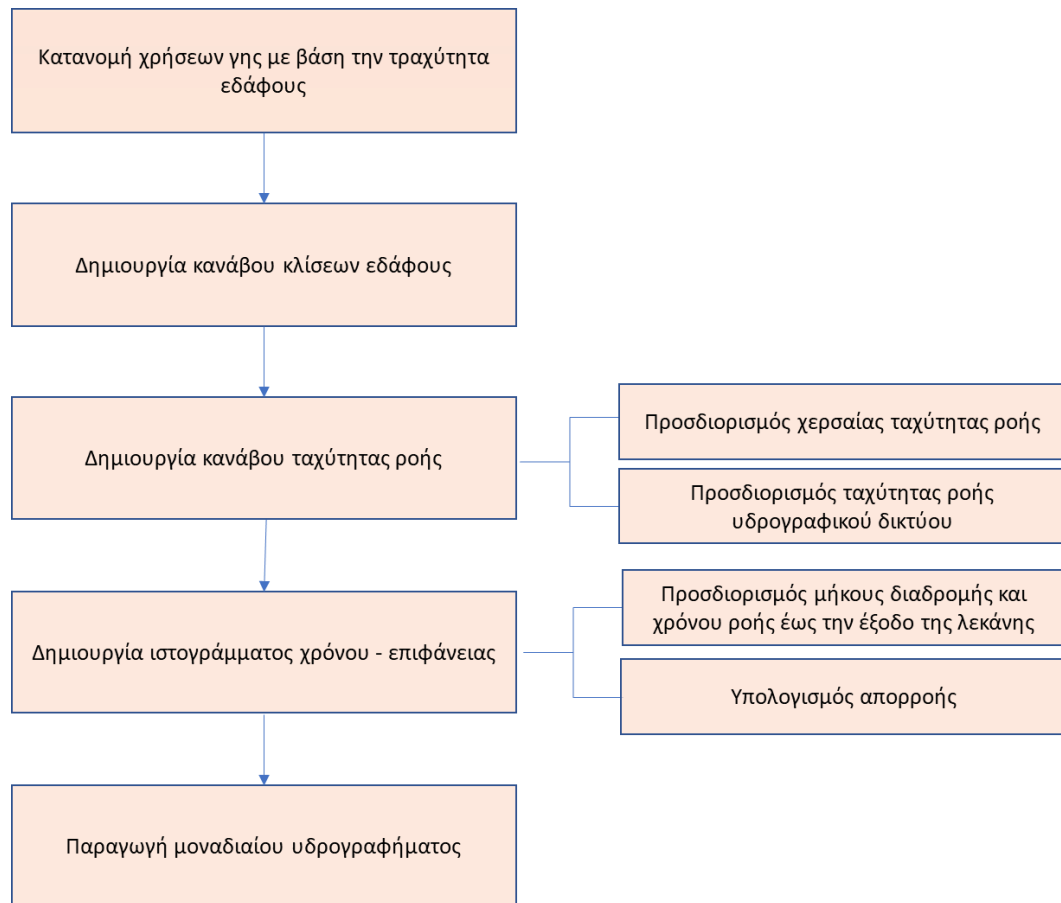
Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), η κατανομή του υδρογραφικού δικτύου και ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2012). Η διαδικασία προσδιορισμού του μοναδιαίου υδρογραφήματος εφαρμόστηκε σε τέσσερις θέσεις υδατορεύματος εντός της υδρολογικής λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη. Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν με βάση τόσο του χάρτη των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών που προέκυψε από την πολυκριτηριακή ανάλυση όσο και από το ιστορικό πλημμυρικών επεισοδίων, ενώ συνεκτιμήθηκε και το κριτήριο της εγγύτητας σε οικισμό. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι θέσεις με τα ονόματα Καλαμπάκα, Πύλη, Μουζάκι και Νομή, στα βόρεια, νοτιοδυτικά, νότια

και νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο χάρτη του ακόλουθου σχήματος (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Θέσεις ενδιαφέροντος για την υδρολογική ανάλυση (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει συνοπτικά τα εξής στάδια, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια:



Σχήμα 3.7: Στάδια υλοποίησης μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS

Αρχικά, αποδίδεται στις επιφανειακές καλύψεις κατά Corine ένα εύρος τιμών του γίνεται μετασχηματισμός του χάρτη χρήσεων γης σε αρχείο raster ανάλογα με το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους (k) που αντιστοιχεί στην κάθε κατηγορία χρήσης γης, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.8. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους εισάγονται πολλαπλασιασμένες επί 100 ($k100$), ώστε να είναι ακέραιοι αριθμοί σύμφωνα με το συντακτικό του λογισμικού κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, ωστόσο, αυτό διορθώνεται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Το μέγεθος του κάθε φατνίου ορίζεται να είναι 5x5 m για να συμπίπτει με το μέγεθος των φατνίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Πίνακας 3.8: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Καββαδά, 2012, μετά από επεξεργασία)

Κωδικός (Corine)	Περιγραφή	Συντελεστής κ100
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	115
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	115
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	115
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	115
123	Ζώνες λιμένων	115
124	Αεροδρόμια	115
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	115
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	115
133	Χώροι οικοδόμησης	115
141	Περιοχές αστικού πρασίνου	60
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	60
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	50
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	50
213	Ορυζώνες	50
221	Αμπελώνες	19
222	Οπωροφόρα δέντρα	19
223	Ελαιώνες	19
231	Λιβάδια	43
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	37
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	37
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	30
244	Γεωργο-δασικές περιοχές	25
311	Δάσος πλατύφυλλων	15
312	Δάσος κωνοφόρων	37
313	Μικτό δάσος	30
321	Φυσικοί βοσκότοποι	30
322	Θάμνοι και χερσότοποι	25
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	60
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	43
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	55
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	60
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	149
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	37
335	Παγετώνες και αιώνια χιόνια	37
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	37
412	Τυρφώνες	37
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	37
422	Αλυκές	37
423	Παλιρροιακά επίπεδα	37
511	Ροές υδάτων	30
512	Συλλογές υδάτων	30
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	21
522	Εκβολές ποταμών	21
523	Θάλασσα	21

Επιπλέον, δημιουργείται ο κάρναβος κλίσεων της περιοχής μελέτης με τη χρήση του εργαλείου Slope του ArcGIS, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί έπειτα στον υπολογισμό της ταχύτητας ροής.

Η ταχύτητα ροής διακρίνεται σε χερσαία (overland flow) και ποτάμια (overchannel flow). Η χερσαία ροή εξαρτάται από την κλίση του εδάφους καθώς και τις χρήσεις γης της περιοχής, ενώ η ποτάμια ροή προκύπτει συναρτήσει της χερσαίας ταχύτητας ροής λαμβάνοντας υπόψη την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου.

Οι ταχύτητες χερσαίας ροής υπολογίζονται από τη σχέση (Μαμάσης, 2007):

$$V\left(\frac{m}{s}\right) = k * \sqrt{S}\left(\frac{m}{m}\right) \quad (3.8)$$

Όπου k ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους και S η κλίση του εδάφους.

Σε περιβάλλον ΣΓΠ ο υπολογισμός αυτός γίνεται με χρήση του εργαλείου Raster Calculator του λογισμικού ArcGIS, το οποίο επιτρέπει τις αριθμητικές πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας και αριθμών. Έτσι, δημιουργείται ένα νέο ψηφιδωτό επίπεδο που αποτελεί τον κάρναβο χερσαίας ροής.

Η κατασκευή του κάρναβου της ποτάμιας ταχύτητας ροής ή ταχύτητας ροής του υδρογραφικού δικτύου προϋποθέτει την εκτέλεση μιας ακολουθίας διεργασιών. Αρχικά, δημιουργείται ο κάρναβος κατεύθυνσης ροής μέσω του εργαλείου Flow Direction που απεικονίζει την κατεύθυνση του νερού κάθε φατνίου προς αυτό από τα οκτώ γειτονικά του με τη μεγαλύτερη κλίση. Με δεδομένο τον χάρτη κατεύθυνσης ροής δημιουργείται ο κάρναβος συγκέντρωσης ροής μέσω του εργαλείου Flow Accumulation που υπολογίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν σε κάθε φατνίο. Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ένα κατώφλι στο πλήθος των κελιών που απορρέουν σε ένα κελί πάνω από το οποίο το συγκεκριμένο κελί αποτελεί τμήμα του υδρογραφικού δικτύου, έχει δηλαδή μεγάλη συγκέντρωση ροής. Έτσι, ανάλογα με την τιμή του κατωφλίου διαφοροποιείται το τελικό αποτέλεσμα με τις μεγάλες τιμές να οδηγούν σε αραιό υδρογραφικό δίκτυο ενώ μικρές σε πιο πυκνό υδρογραφικό δίκτυο. Επόμενο στάδιο αποτελεί η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου σε τάξεις με τη μέθοδο Strahler η οποία επιτυγχάνεται στο ArcGIS με χρήση του εργαλείου Stream Order.

Σύμφωνα με τον Strahler (1957) κάθε κλάδος ενός υδρογραφικού δικτύου που δε δέχεται νερά άλλων μικρότερων υδατορευμάτων ονομάζεται κλάδος 1^{ης} τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη συμβολή δύο κλάδων 1^{ης} τάξης ονομάζεται κλάδος 2^{ης} τάξης, ο κλάδος που προκύπτει από την ένωση δύο κλάδων 2^{ης} τάξης ονομάζεται 3^{ης} τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση

που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει διατηρεί την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους.

Αφού έχει προηγηθεί η ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου γίνεται πολλαπλασιασμός του επιπέδου που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα με τον κλίμακα χερσαίας ταχύτητας ροής, οπότε προκύπτει μέσω του εργαλείου Raster Calculator ο κλίμακας ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου. Ακολουθεί η σύνθεση των δύο κλίμακων της χερσαίας και της υδρογραφικής ροής και πάλι με τη βοήθεια του Raster Calculator, οπότε εξάγεται ο κλίμακας των αθροιστικών ταχυτήτων ροής (velocity).

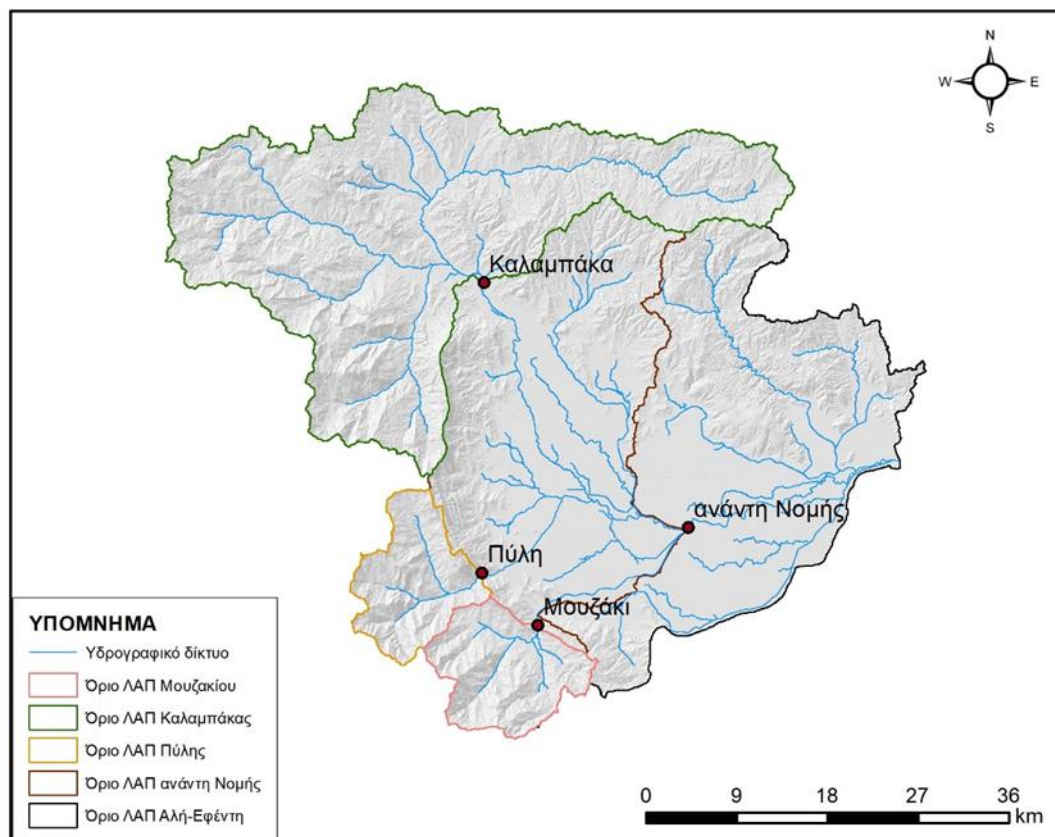
Οι παραπάνω διεργασίες εκτελούνται σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής. Για λόγους καλύτερης εποπτείας των αποτελεσμάτων και μείωσης του χρόνου εκτέλεσης των διάφορων διεργασιών οι επόμενες διεργασίες γίνονται σε επίπεδο υπολεκάνης.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται διαχωρισμός της λεκάνης μελέτης σε υπολεκάνες, όπως διαμορφώνονται από το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής, με χρήση του εργαλείου Catchment Grid Delineation του λογισμικού HEC-GeoHMS, για να δημιουργηθεί τελικά ένα διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας μέσω του εργαλείου Catchment Polygon Processing του ίδιου λογισμικού, που απεικονίζει τις υπολεκάνες σε διακριτά πολύγωνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

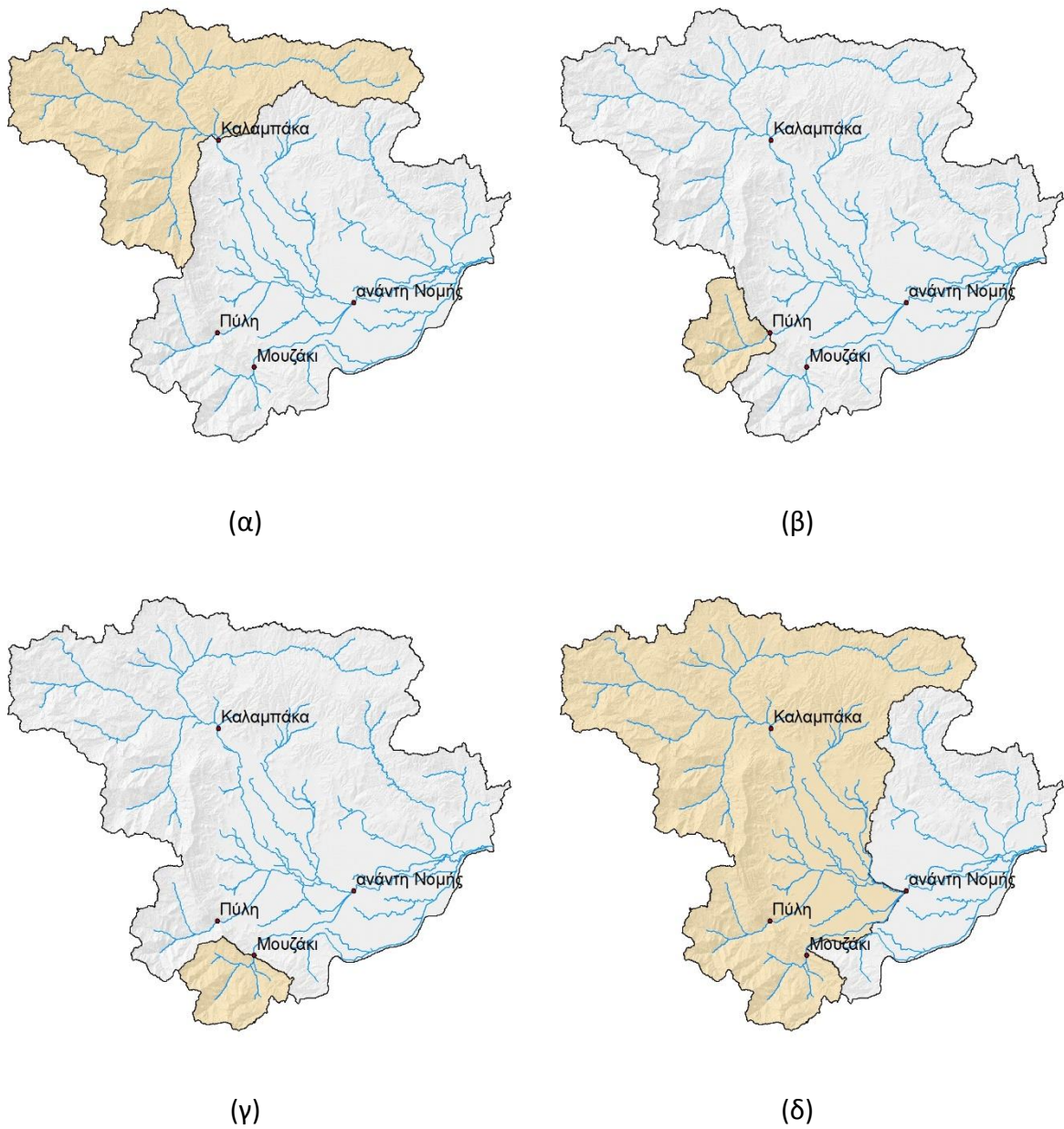


Σχήμα 3.8: Υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Μετά τον καθορισμό των σημείων ενδιαφέροντος (θέσεις εξαγωγής ΜΥΓ), όπως περιγράφηκε παραπάνω, απομονώνονται οι υπολεκάνες απορροής που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο στα ανάντη καθενός από τα τέσσερα επιλεγμένα σημεία και εντός του ορίου της λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη, με χρήση του εργαλείου Generate Project του HEC-GeoHMS. Μέσω του εργαλείου Basin Merge γίνεται ένωση των επιμέρους υπολεκανών σε μία ενιαία υπολεκάνη για κάθε θέση, οπότε προκύπτουν οι λεκάνες που παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Όρια λεκανών απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και Νομής (θέση ανάντη οικισμού) (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Σχήμα 3.10: Λεκάνες απορροής (α) Καλαμπάκας, (β) Πύλης, (γ) Μουζακίου και (δ) ανάντη Νομής (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στον Πίνακα 3.9 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα κυριότερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των λεκανών που δημιουργήθηκαν με την παραπάνω διαδικασία.

Πίνακας 3.9: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και ανάντη Νομής

Όνομασία Λεκάνης	Έκταση (km ²)	Μέσο Υψόμετρο (m)	Μέση Κλίση (°)
Καλαμπάκα	1016.12	840.05	48.32
Πύλη	132.88	950.80	66.10
Μουζάκι	143.49	816.14	58.63
Νομή (ανάντη)	2017.65	656.76	42.16

Οι διαδικασίες που παρουσιάζονται ακολούθως επαναλαμβάνονται για τις τέσσερις νέες λεκάνες (υπολεκάνες της αρχικής υδρολογικής λεκάνης Αλή Εφέντη) ξεχωριστά, αφού όπως προαναφέρθηκε, εκτελούνται στο όριο καθεμίας από αυτές. Απαραίτητη ενέργεια για το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των προηγούμενων διεργασιών που αφορούσαν σε όλη τη λεκάνη με τα επόμενα που αναφέρονται σε μέρος αυτής είναι η περικοπή των πρώτων στο αντίστοιχο όριο. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση του εργαλείου Extract By Mask.

Σε αυτό το σημείο υπολογίζεται ο κánaβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής που αποδίδει το χρόνο που χρειάζεται κάθε φατνίο έως την έξοδο της λεκάνης. Για τη δημιουργία του χρησιμοποιείται το εργαλείο Flow Length το οποίο υπολογίζει το μήκος διαδρομής του κάθε φατνίου έως την έξοδο της λεκάνης λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση ροής που έχει ήδη υπολογιστεί. Προκειμένου να προκύψουν οι χρόνοι ροής εισάγεται στην εντολή Flow Length μία παράμετρος ως βάρος που αντιστοιχεί στο αντίστροφο της αθροιστικής ταχύτητας ροής. Έτσι, το μήκος διαδρομής πολλαπλασιασμένο με το αντίστροφο της ταχύτητας εκφράζει το χρόνο ροής του κάθε φατνίου. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται οι ισόχρονες καμπύλες, οι οποίες αποτυπώνουν το γεωμετρικό τόπο των σημείων που απορρέουν την ίδια χρονική στιγμή από την έξοδο της λεκάνης.

Από τον κánaβο που προκύπτει, προσδιορίζεται το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας, ανάλογα με το χρονικό βήμα που επιλέγει ο χρήστης, αθροίζοντας τα εμβαδά των επιμέρους τμημάτων μεταξύ των ισόχρονων καμπυλών. Σε περιβάλλον GIS αυτό υλοποιείται μέσω του εργαλείου Reclassify και στη συνέχεια γίνεται εξαγωγή του ιστογράμματος που προκύπτει σε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel.

Με δεδομένο το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας, το οποίο απεικονίζει το πλήθος των φατνίων της λεκάνης που αποφορτίζονται στην έξοδο σε κάθε χρονικό βήμα, γίνεται υπολογισμός της απορροής. Ειδικότερα, εάν η βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους (10mm)

πολλαπλασιαστεί με τις διαστάσεις του κάθε εικονοστοιχείου (5 x 5 m) και με το πλήθος των φατνίων που απορρέουν την πρώτη ώρα, υπολογίζεται η παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης την πρώτη ώρα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τις επόμενες ώρες ορίζοντας κάθε φορά την ώρα της απορροής (1^η, 2^η, 3^η κοκ) και δημιουργείται, τελικά, ένας πίνακας που περιέχει την ώρα απορροής και τις αντίστοιχες τιμές της απορροής που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης σε κάθε χρονικό βήμα. Από τον πίνακα αυτόν παράγεται το αντίστοιχο γράφημα το οποίο αποτελεί και το αντίστοιχο ζητούμενο ΜΥΓ.

3.4.2 Υδρολογική ανάλυση για ιστορικά πλημμυρικά επεισόδια της περιοχής

Στο χωρίο αυτό περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής του πλημμυρογραφήματος στην έξοδο καθεμίας από τις τέσσερις λεκάνες απορροής που θεωρήθηκαν στην ενότητα 3.4.1 και για τις οποίες προσδιορίστηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα, όπως αναλύθηκε στο ίδιο χωρίο.

Στο πλαίσιο της υδρολογικής ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη τρία από τα έντεκα ιστορικά επεισόδια τα οποία παρουσιάζονται στην ενότητα 3.3.1. Η επιλογή των επεισοδίων γίνεται με βάση τη σημαντικότητα του επεισοδίου ως προς το ύψος, τη διάρκεια και τις συνέπειες της βροχόπτωσης, καθώς και την πληρότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Αξιολογώντας τις παραπάνω παραμέτρους, επιλέγονται τα εξής επεισόδια:

- 01/02/2015
- 22/05/2016
- 09/09/2016

Υπολογισμός βροχόπτωσης στη λεκάνη - Η Μέθοδος Thiessen

Οι μετρήσεις βροχόπτωσης λαμβάνονται από τους βροχογράφους που είναι εγκατεστημένοι στους σταθμούς και επομένως αντιπροσωπεύουν το σημείο στο οποίο μετρήθηκε η βροχόπτωση. Προκειμένου να γίνει αναγωγή των σημειακών μετρήσεων σε επιφανειακή βροχόπτωση, η οποία αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη λεκάνη απορροής που εξετάζεται, εφαρμόζονται μέθοδοι επιφανειακής ολοκλήρωσης.

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης, οι οποίες δύναται να διαχωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1997). Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen, η μέθοδος δύο αξόνων του Bethlahmy και η μέθοδος βέλτιστης ολοκλήρωσης (Kriging). Αντίθετα, οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας εκτιμούν αρχικά τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην υπό

εξέταση περιοχή και ακολούθως υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η μέθοδος των ισοϋέτιων, η μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής, η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, η μέθοδος πολυτετραγωνικής παρεμβολής, καθώς και αυτές των ελαχίστων τετραγώνων με πολυώνυμα, των πολυωνύμων Lagrange, της προσαρμογής Spline και της βέλτιστης παρεμβολής (Kriging). Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί, η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται πρωτίστως από την πυκνότητα της σημειακής πληροφορίας: η ολοκλήρωση είναι τόσο επιτυχής όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών. Δυστυχώς, τα δίκτυα δεν είναι συνήθως αρκετά πυκνά, ενώ σε ορισμένες δυσπρόσιτες περιοχές οι σταθμοί σπανίζουν (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης με πολύγωνα Thiessen. Σύμφωνα με την κλασική αυτή μέθοδο, η συνολική επιφάνεια A χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i μία ανά σταθμό, έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^k A_i = A \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή:

$$w_i = \frac{A_i}{A} \quad (3.10)$$

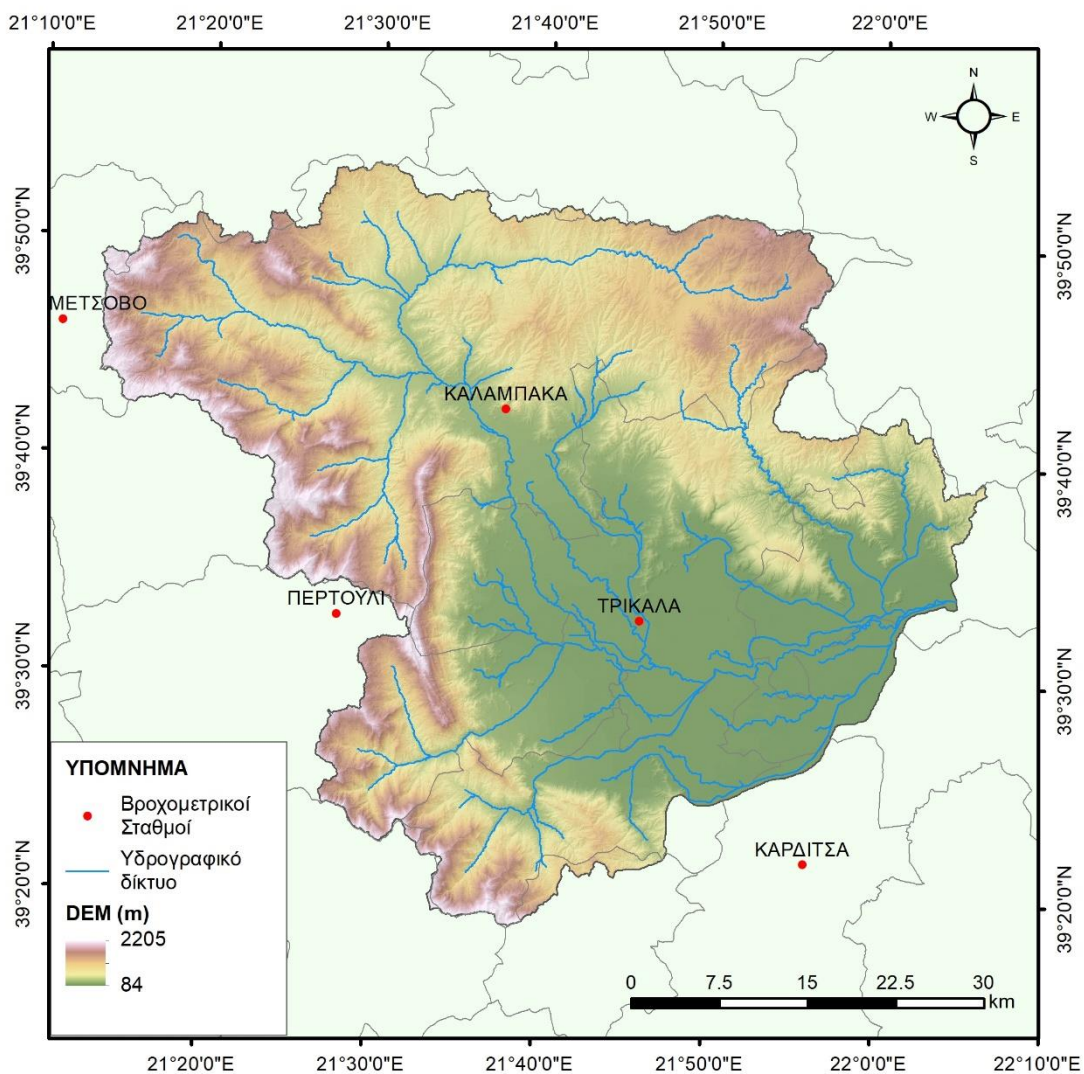
Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί άμεσα σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη, δημιουργώντας έτσι τα γνωστά πολύγωνα Thiessen (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

Ο σχηματισμός των πολυγώνων Thiessen στο όριο της λεκάνης γίνεται σε περιβάλλον GIS με χρήση του εργαλείου Create Thiessen Polygon, οπότε και δημιουργείται ένα νέο αρχείο raster. Η πληροφορία της επιφάνειας κάθε πολυγώνου περιέχεται στον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών (Attribute Table) του νέου αυτού αρχείου και με βάση αυτήν υπολογίζεται το βάρος του ύψους της βροχής του (στάθμιση) στο κέντρο του πολυγώνου κάθε βροχομετρικού σταθμού, ως ο λόγος της επιφάνειας του συγκεκριμένου πολυγώνου προς τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης. Παράλληλα, γίνεται η παραδοχή ότι η έκταση που

καλύπτει κάθε πολύγωνο δέχεται σε κάθε σημείο της τόση βροχή όση και ο βροχομετρικός σταθμός που βρίσκεται μέσα στο πολύγωνο. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται το ύψος βροχής για κάθε πολύγωνο, ενώ το άθροισμα των υψών βροχής των πολυγώνων της λεκάνης δίνει το συνολικό ύψος βροχής που δέχεται η λεκάνη απορροής.

Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη αλλαγής του συστήματος των πολυγώνων όταν προστίθεται ή αφαιρείται ένας σταθμός, καθώς επίσης και το γεγονός ότι δε λαμβάνονται υπόψη οι τοπογραφικές ιδιομορφίες του ανάγλυφου (ορεογραφικές επιδράσεις) (Νικολακόπουλος, 2015).

Η σχετική θέση των σταθμών που λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Βροχομετρικοί σταθμοί (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Οι συντελεστές βάρους κατά Thiessen, όπως προκύπτουν ανά λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10: Συντελεστές Thiessen για κάθε λεκάνη μελέτης

Λεκάνη Απορροής	Βροχομετρικός Σταθμός				
	Μέτσοβο	Περτούλι	Καρδίτσα	Τρίκαλα	Καλαμπάκα
Καλαμπάκα	0.25	0.15	-	-	0.60
Πύλη	-	1.00	-	-	-
Μουζάκι	-	0.42	0.20	0.38	-
Νομή (ανάντη)	0.11	0.31	0.03	0.10	0.44

Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές του Πίνακα 3.10, υπολογίζεται το σταθμισμένο υψόμετρο κάθε λεκάνης και συγκρίνεται με το μέσο υψόμετρο αυτής, το οποίο προκύπτει άμεσα από το αντίστοιχο DEM. Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει ότι το σταθμισμένο υψόμετρο δεν αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με το μέσο υψόμετρο, επομένως, δεν απαιτείται υψομετρική αναγωγή της επιφανειακής βροχόπτωσης.

Για λόγους συμβατότητας με τα μοναδιαία υδρογραφήματα της προηγούμενης ενότητας (3.4.1) τα οποία παράχθηκαν για διάρκεια βροχής μίας ώρας, η συνολική βροχόπτωση υπολογίζεται σε επίπεδο ώρας.

Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS - CN

Ο μετασχηματισμός της βροχόπτωσης σχεδιασμού σε πλημμυρική απορροή γίνεται με αφαίρεση των υδρολογικών απωλειών, δηλαδή του τμήματος της βροχής που αρχικά κατακρατείται στο έδαφος και τη βλάστηση και, στη συνέχεια, είτε εξατμίζεται είτε διηθείται. Γνωρίζοντας τη χρονική εξέλιξη του επεισοδίου βροχής (στην προκειμένη περίπτωση, μέσω των παρατηρημένων επεισοδίων) και τα συνολικά ελλείμματα, μπορεί να προσδιοριστεί το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, που είναι γνωστό ως ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall) ή πλεόνασμα βροχόπτωσης (rainfall excess).

Για δεδομένο υετόγραμμα, η ενεργός βροχόπτωση εκτιμάται με τη μέθοδο SCS-CN, η οποία αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (1972, αναφέρεται πλέον ως Natural Resources Conservation Service, NRCS) και είναι από τις πλέον διαδεδομένες παγκοσμίως. Η μέθοδος περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των ελλειμμάτων, εφαρμόζοντας μια απλή αλλά ρεαλιστική εννοιολογική διαδικασία, που βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (U.S. Department of the Interior, 1977)

- Για ένα αρχικό διάστημα t_{a0} , όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης h_{a0} μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο t_{a0} , το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής h_e δε δύναται να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος $h - h_{a0}$, όπου h το ολικό ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού h_{a0} , ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , η οποία καλείται μέγιστη δυνητική κατακράτηση (potential maximum retention).
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_{a0}$, οι λόγοι του ενεργού (καθαρού) ύψους βροχής h_e και του ελλειμματικού μείον το αρχικό έλλειμμα ($h - h_{a0}$), προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ($h - h_{a0}$ και S , αντίστοιχα), είναι ίσοι.

Βάσει των παραπάνω παραδοχών και με την υπόθεση ότι $h_{a0} = 0.2 S$, προκύπτει η ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & , h \leq 0.2 S \\ \frac{(h - 0.2 S)^2}{h + 0.8 S} & , h > 0.2 S \end{cases} \quad (3.11)$$

Όπου:

h_e : το ενεργό ύψος βροχής

h : το συνολικό ύψος βροχής

S : παράμετρος που εκτιμάται εμπειρικά και συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης απορροής CN σύμφωνα με τη σχέση:

$$S (mm) = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.12)$$

Η σχέση (3.11) μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, οπότε προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου.

Ο αριθμός καμπύλης απορροής (runoff curve number, CN) είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος της λεκάνης απορροής, που προτάθηκε από την Soil Conservation Service (SCS, 1972) προκειμένου να συμπυκνώσει τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σε μια μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, που αποτελεί δεδομένο εισόδου της μεθόδου SCS-CN (η μέθοδος εφαρμόζεται για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων στο πλαίσιο της υδρολογικής μοντελοποίησης). Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100 και

επηρεάζεται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης, και την υδρολογική κατάσταση της λεκάνης.

Αρχικά, η SCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη διαπερατότητά τους:

Ομάδα A: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.

Ομάδα B: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι, εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας:

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Οι παραπάνω τιμές έχουν προκύψει από μεγάλο αριθμό παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ, και θεωρείται ότι έχουν πιθανότητα υπέρβασης 10, 50 και 90% (για υγρές, μέσες και ξηρές συνθήκες, αντίστοιχα).

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης (Chow et al., 1988).

Για μέσες υδρολογικές συνθήκες, η παράμετρος CN εκτιμάται ως η μέση τιμή των κατανεμημένων CN, που θεωρείται αντιπροσωπευτική των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της υπολεκάνης.

Συνεπώς, με γνωστή τη μέση τιμή του CN, εκτιμάται, μέσω της (3.12), η τιμή της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης της υπολεκάνης, που αντιστοιχεί στο μέσο υδρολογικό σενάριο. Για

τις άλλες συνθήκες προηγούμενης υγρασίας, που αντιστοιχούν στα ευμενή και δυσμενή υδρολογικά σενάρια, αντίστοιχα, εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις αναγωγής:

$$CN_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (3.13)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (3.14)$$

Στη συγκεκριμένη έρευνα και σύμφωνα με τους πίνακες που δίνουν την τιμή του CN ανάλογα με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής για το μέσο σενάριο, προκύπτουν οι αριθμοί καμπύλης απορροής για υγρές συνθήκες που φαίνονται στον Πίνακα 3.11 για κάθε μία από τις τέσσερις λεκάνες που μελετώνται.

Πίνακας 3.11: Συντελεστές καμπύλης απορροής ανά λεκάνη

Λεκάνη Απορροής	CN _{II}	S (mm)	CN _{III}	S' (mm)
Καλαμπάκα	73	93.95	86.15	40.85
Πύλη	75	84.67	87.34	36.81
Μουζάκι	77	75.87	88.51	32.99
Νομή (ανάντη)	80	63.50	90.20	27.61

Με εφαρμογή της εξίσωσης 3.11 προκύπτουν, τελικά, οι ολικές υδρολογικές απώλειες για κάθε επεισόδιο βροχής, ως η διαφορά της ενεργού βροχόπτωσης από το συνολικό ύψος βροχής.

Μετά την ποσοτικοποίηση των συνολικών υδρολογικών απωλειών εφαρμόζεται το μοντέλο αρχικής απώλειας και ελλείμματος με σταθερό ρυθμό (Initial and constant - rateloss model) προκειμένου να γίνει κατανομή τους στο χρόνο διάρκειας του εκάστοτε επεισοδίου βροχόπτωσης. Η βασική ιδέα του μοντέλου των αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών συνίσταται στο ότι ο μέγιστος δυνατός ρυθμός των απωλειών της βροχόπτωσης παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος (Feldman, 2000).

Οι αρχικές απώλειες, αντιπροσωπεύουν το ποσό της κατακρήμισης που διηθείται ή αποθηκεύεται στη λεκάνη απορροής πριν την έναρξη της επιφανειακής απορροής, λόγω φυτοκάλυψης ή εδαφικών κοιλωμάτων. Η υδαταποθήκευση λόγω φυτοκάλυψης είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης της κατακρήμισης από την εδαφική κάλυψη, ενώ η υδαταποθήκευση λόγω εδαφικών κοιλωμάτων είναι αποτέλεσμα των κοιλοτήτων στην

τοπογραφία της λεκάνης: το νερό παγιδεύεται σε αυτές και στην συνέχεια διηθείται ή εξατμίζεται.

Το ποσοστό των σταθερών απωλειών εκφράζει το ποσό της διήθησης το οποίο εμφανίζεται εφόσον έχουν καθοριστεί οι αρχικές απώλειες και είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του επεισοδίου.

Το μοντέλο των αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών περιλαμβάνει μία παράμετρο - το σταθερό ρυθμό - και μία αρχική συνθήκη - το αρχικό έλλειμμα. Οι παράμετροι αυτοί αναπαριστούν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και των χρήσεων γης και την αρχική τους κατάσταση. Αν η λεκάνη είναι σε κορεσμένη κατάσταση τότε οι αρχικές απώλειες είναι μηδενικές. Αντίθετα, στην περίπτωση ξηρής υδρολογικής κατάστασης της λεκάνης, οι αρχικές απώλειες αυξάνονται, καθώς αντιστοιχούν στη μέγιστη βροχόπτωση που μπορεί να σημειωθεί χωρίς να υπάρξει απορροή. Σύμφωνα με τα αμερικανικά πρότυπα (πίνακας από τον EM 1110-2-1417) το αρχικό έλλειμμα συνιστά το 10 - 20% της συνολικής βροχόπτωσης σε δασώδεις περιοχές, ενώ κυμαίνεται από 0.1 ίντσες (0.254 cm) έως 0.2 ίντσες (0.508 cm) σε αστικές περιοχές (Viessman, 1977). Ο σταθερός ρυθμός απωλειών εκφράζει την τελική διηθητική ικανότητα του εδάφους (Saleh, 2011).

Στον Πίνακα 3.13 παρουσιάζεται το εύρος των απωλειών ανάλογα με την κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 3.12: Ρυθμός υδρολογικών απωλειών ανά κατηγορία εδάφους (Προέλευση: SCS, 1986, Skaggs and Khaheel, 1982, μετά από επεξεργασία)

Εδαφική ομάδα	Περιγραφή	Εύρος απωλειών (in/h)
A	Βαθεία άμμος, βαθιές απώλειες, συγκεντρώσεις λάσπης	0.3 – 0.45
B	Ρηχός ασβεστίτικος πηλός, αμμώδης άργιλος	0.15 - 0.3
C	Συγκεντρώσεις αργίλου, εδάφη με χαμηλό οργανικό περιεχόμενο και γενικά αργιλικά εδάφη	0.05 - 0.015
D	Εδάφη που διογκώνονται σημαντικά στην υγρασία, πλαστικές άργιλοι και ορισμένα αλατώδη εδάφη	0.00 - 0.05

Στην παρούσα μελέτη και σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, θεωρούνται αρχικές απώλειες (απώλειες πρώτης ώρας) ίσες με το 20% της συνολικής βροχόπτωσης, ενώ το υπόλοιπο 80% των απωλειών κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στο χρόνο.

Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος

Η ενεργός βροχόπτωση που εκτιμάται με τη μέθοδο SCS-CN αντιπροσωπεύει την χωρικά ομοιόμορφη επιφανειακή απορροή που παράγεται σε όλη την έκταση της λεκάνης. Η απορροή αυτή διοδεύεται μέσω του υδρογραφικού δικτύου καθώς και μέσω άλλων διαδρομών - όπως υπεδάφια, ως υποδερμική ροή - έως τον κόμβο εξόδου της. Ο χωροχρονικός μετασχηματισμός της απορροής σε πλημμυρική παροχή στην έξοδο της λεκάνης γίνεται με εφαρμογή της θεωρίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η αρχή της αναλογίας για κάθε επιμέρους βροχόπτωση διάρκειας 1h, οπότε προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές της απορροής σε στήλες. Κάθε επιμέρους επεισόδιο είναι μετατοπισμένο χρονικά από το προηγούμενο κατά 1h. Οι τεταγμένες του καθαρού πλημμυρογραφήματος προκύπτουν με οριζόντια άθροιση των γραμμών του πίνακα που έχει δημιουργηθεί (Αρχή της Επαλληλίας), ενώ για το συνολικό πλημμυρογράφημα προστίθεται σε κάθε τεταγμένη η τιμή της βασικής ροής της λεκάνης.

Ως βασική ροή καλείται η απορροή που σχηματίζει τη βασική (μόνιμη) ροή των ρευμάτων και περιλαμβάνει το υπόλοιπο της υπεδάφιας (βραδεία υπεδάφια) και την υπόγεια απορροή (Μπαλτάς και Μαμάσης, 2009). Πρόκειται, δηλαδή, για μια ελάχιστη τιμή ροής, η οποία διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ώστε να εξασφαλίζεται η συνθήκη μη μηδενικής παροχής. Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ, στις μελέτες πλημμυρών ως βασική ροή θεωρείται συνήθως, μια σταθερή τιμή ίση με τη μέση ετήσια παροχή του ποταμού (ή τη μέση παροχή του υγρότερου μήνα). Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα έρευνα, για την εκτίμηση της βασικής απορροής εφαρμόζεται η τιμή της ειδικής παροχής που προτείνεται στο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για τη λεκάνη Αλή Εφέντη ($0.014 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) πολλαπλασιάζοντας με την έκταση της λεκάνης.

Είναι γνωστό ότι η βασική ροή εξαρτάται από το ποσό της κατακρήμνισης και είναι αυξημένη τις χρονιές που σημειώνονται ισχυρές βροχοπτώσεις. Επιπλέον, η τιμή της διαφοροποιείται με το μήνα και την εποχή, ανάλογα το πόσο υγρή είναι. Στο πλαίσιο αυτό αποδίδεται η τιμή ειδικής παροχής $0.014 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ στο επεισόδιο του Φεβρουαρίου, καθώς πρόκειται για έναν πολύ υγρό μήνα, ενώ οι τιμές $0.011 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ και $0.007 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ για τα επεισόδια που σημειώθηκαν τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο, αντίστοιχα. Η σημαντική απορροή η οποία εκτός των κατακρήμνισεων οφείλεται στο λιώσιμο των πάγων των χειμερινών μηνών - χαμηλότερη, ωστόσο, συγκριτικά με του Φεβρουαρίου, καθιστά το Μάιο έναν αρκετά υγρό

μήνα, ενώ ο Σεπτέμβριος αποτελεί έναν λιγότερο υγρό μήνα. Οι τιμές της ειδικής παροχής που εφαρμόζονται στην ανάλυση φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.14).

Πίνακας 3.13: Τιμές ειδικής παροχής στον Πηνειό ποταμό ανάλογα με την εποχικότητα

Επεισόδιο Βροχόπτωσης	Ειδική παροχή (m ³ /s/km ²)
01/02/2015	0.014
22/05/2016	0.011
09/09/2016	0.007

Με πολλαπλασιασμό της ειδικής παροχής με την έκταση της λεκάνης, προκύπτει τελικά η βασική απορροή για κάθε επεισόδιο και για κάθε λεκάνη απορροής.

3.5 Υδραυλική προσομοίωση

3.5.1 Το λογισμικό HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (USACE) και χρησιμοποιείται για την υδραυλική ανάλυση ποταμών σε μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες. Είναι σχεδιασμένο για διαδραστική χρήση καθώς και για χρήση σε επίπεδο δικτύου υπολογιστών. Το σύστημα του λογισμικού αποτελείται από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη (GUI), τον πυρήνα υδραυλικών αναλύσεων, ενώ επιπλέον παρέχει δυνατότητες αποθήκευσης και διαχείρισης των δεδομένων, καθώς και εργαλεία αναπαράστασης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Η πλατφόρμα του λογισμικού παρέχει τέσσερις κατηγορίες μονοδιάστατης υδραυλικής ανάλυσης ποταμών: μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων, μη μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων, προσομοίωση μεταφοράς φερτών με μεταβαλλόμενα όρια, και ανάλυση ποιότητας νερού. Πέραν αυτών, η πλατφόρμα περιέχει πρόσθετες λειτουργίες που ενεργοποιούνται μετά την επίλυση και υπολογισμό του προφίλ επιφανειακών υδάτων. Σε αυτές περιλαμβάνεται και η χαρτογραφική απεικόνιση των υπολογισμένων παραμέτρων της προσομοίωσης, όπως το βάθος του ύδατος, η στάθμη του και η ταχύτητά του, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή εντός του χρονικού παραθύρου προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, είναι δυνατή η δημιουργία χάρτη με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των παραπάνω μεγεθών που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης (USACE, 2016).

Το λογισμικό είναι σχεδιασμένο να εκτελεί μονοδιάστατη (1D), διδιάστατη (2D), ή συνδυασμένη μονοδιάστατη και διδιάστατη (1D/2D) υδραυλική ανάλυση ποταμών. Στην

παρούσα έρευνα πραγματοποιείται υδραυλική προσομοίωση σε δύο διαστάσεις. Η επίλυση της διδιάστατης ροής βασίζεται στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης, οι οποίες αποτελούν τη μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας και της αρχής διατήρησης της ορμής, αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις Navier - Stokes περιγράφουν την κίνηση των ρευστών στις τρεις διαστάσεις. Στο πλαίσιο της 2D υδραυλικής μοντελοποίησης πλημμύρας σε ποταμό εφαρμόζονται περαιτέρω απλοποιήσεις. Μία απλουστευμένη μορφή τους αποτελούν οι εξισώσεις Saint-Venant που ανήκουν στην κατηγορία των εξισώσεων ρηχών υδάτων (Shallow Water equations) και οι οποίες στηρίζονται στις παραδοχές ασυμπιεστής ροής, ομοιόμορφης πυκνότητας και υδροστατικής πίεσης του ρευστού. Σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, η διαφορική μορφή της εξίσωσης ρηχών υδάτων διατήρησης μάζας (συνέχειας) είναι η εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3.15)$$

Όπου:

t: ο χρόνος

H (x, y, t) (m): το υψόμετρο της στάθμης του ύδατος,

h (x, y, t) (m): το βάθος του ύδατος,

u, v (m/s): οι συνιστώσες ταχύτητας στην x και y διεύθυνση αντίστοιχα, και

q (m³/s): η εισερχόμενη ροή (USACE, 2016).

Οι 2D εξισώσεις ποσότητας κίνησης (ορμής) ρηχών υδάτων (Saint Venant), για τη x και y διεύθυνση αντίστοιχα, περιγράφονται με τις σχέσεις 3.16 και 3.17:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (3.17)$$

Όπου:

u, v (m/s): οι συνιστώσες ταχύτητας στη x και y διεύθυνση, αντίστοιχα,

g (m/s²): η επιτάχυνση της βαρύτητας,

H (x, y, t) (m): το υψόμετρο της στάθμης του νερού,

ν_i (m²/s): ο συντελεστής οριζόντιου κινηματικού ιξώδους,

c_f (s⁻¹): ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα, και

f (s⁻¹): η παράμετρος Coriolis (USACE, 2016).

Σε ορισμένες περιπτώσεις ροής ρηχών υδάτων οι όροι που περιλαμβάνουν την επιτάχυνση της βαρύτητας και το συντελεστή τριβής στον πυθμένα είναι κυρίαρχοι στις εξισώσεις κίνησης, ενώ το ιξώδες, η παράμετρος Coriolis, η μεταγωγική επιτάχυνση και η τοπική επιτάχυνση μπορούν να αμεληθούν. Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση κίνησης ανάγεται στη διδιάστατη μορφή των εξισώσεων ορμής Διάχυσης Κύματος (Diffusion Wave Approximation). Ο συνδυασμός της παραπάνω εξίσωσης με την αρχή διατήρησης της μάζας οδηγεί στη δημιουργία ενός μοντέλου εξισώσεων γνωστό ως Diffusion Wave Approximation of the Shallow Water (DSW) equations, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις (3.18), (3.19) (USACE, 2016, Σαρχάνη, 2018):

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f u \quad (3.18)$$

$$-g \frac{\partial H}{\partial y} = c_f v \quad (3.19)$$

Η 1D υδραυλική ανάλυση ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ποιοτικά στοιχεία διατομών, καθώς και για συστήματα ανοιχτών αγωγών καθορισμένης διατομής. Το 1D μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται ακόμη για την ανάλυση περιοχών με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις, οι οποίες σχετίζονται εν γένει με μικρό πεδίο κατάκλισης πλημμύρας. Προτιμητέα είναι η επιλογή αυτής της ανάλυσης και σε περιπτώσεις ύπαρξης τεχνικών έργων στην περιοχή προσομοίωσης, αφού αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκριτικά με τη διδιάστατη ανάλυση.

Η 2D υδραυλική ανάλυση ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM), καθώς και για προσομοιώσεις περιοχών με χαμηλές κλίσεις, οι οποίες συνδέονται συνήθως με εκτεταμένο πλημμυρικό πεδίο. Η 2D υδραυλική ανάλυση κρίνεται επίσης κατάλληλη σε περιπτώσεις έντονης κίνησης της ροής σε δύο κατευθύνσεις, καθώς και όταν προκύπτει ανάγκη ανάλυσης ταχύτητας ροής πλησίον τεχνικών έργων. Τέλος, το 2D μοντέλο προσομοίωσης εφαρμόζεται για την ανάλυση θραύσης φράγματος ή αναχώματος, όπου η ροή απότομα αποκτά πολλές κατευθύνσεις

Η 1D/2D υδραυλική ανάλυση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση συστημάτων που περιλαμβάνουν αστικό και μη αστικό περιβάλλον, όπου εφαρμόζεται 1D ανάλυση εντός του

υδρογραφικού δικτύου, ενώ για την ανάλυση των πεδινών εκτάσεων επιλέγεται το 2D μοντέλο.

3.5.2 Υδραυλική προσομοίωση σε θέσεις ενδιαφέροντος

Με δεδομένο το πλημμυρογράφημα στις θέσεις Καλαμπάκα, Πύλη, Μουζάκι και ανάντη του οικισμού της Νομής επιχειρείται ο καθορισμός του πλημμυρικού πεδίου κατάντη των παραπάνω θέσεων για το δυσμενέστερο ιστορικό επεισόδιο βροχής (01/02/2015). Για το σκοπό αυτό, γίνεται χρήση του διδιάστατου μοντέλου υδραυλικής προσομοίωσης του λογισμικού HEC-RAS 5.0.7. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται υδραυλική ανάλυση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

Ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο χρησιμοποιούνται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), η κατανομή των χρήσεων γης (Corine) που συνδέεται με το συντελεστή τραχύτητας του Manning (n), καθώς και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, εισάγεται και το αρχείο που περιέχει τα σημεία που αντιστοιχούν στις θέσεις ενδιαφέροντος. Το DEM και ο χάρτης χρήσεων γης κατά Corine βρίσκονται στη μορφή αρχείων raster και έχουν δημιουργηθεί σε περιβάλλον GIS με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.1.

Ειδικότερα, στο αρχείο κατανομής των χρήσεων γης και συγκεκριμένα στον πίνακα χαρακτηριστικών του, εισάγεται ένα νέο πεδίο οι τιμές του οποίου αντιστοιχούν στο συντελεστή Manning. Η διαφοροποίηση στην τιμή του συντελεστή τραχύτητας σε σχέση με τη χρήση γης ακολουθεί την κατηγοριοποίηση που προτείνει ο Huang (2005) και φαίνεται στον Πίνακα 3.15.

Πίνακας 3.14: Συντελεστής τραχύτητας Manning σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Huang, 2015, μετά από επεξεργασία)

Κωδικός (Corine)	Περιγραφή	Συντελεστής τραχύτητας (Manning)
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.200
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.200
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γεινιάζουσα γη	0.015
123	Ζώνες λιμένων	0.054
124	Αεροδρόμια	0.054
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0.120
132	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	0.120
133	Χώροι οικοδόμησης	0.120
141	Περιοχές αστικού πρασίνου	0.100
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.073
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδεύσιμη γη	0.035
213	Ορυζώνες	0.035
221	Αμπελώνες	0.100
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.150
223	Ελαιώνες	0.150
231	Λιβάδια	0.035
241	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	0.035
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.050
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.120
244	Γεωργο-δασικές περιοχές	0.050
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.120
312	Δάσος κωνοφόρων	0.200
313	Μικτό δάσος	0.200
321	Φυσιικοί βοσκότοποι	0.033
322	Θάμνοι και χερσότοποι	0.033
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	0.085
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.045
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.050
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.045
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.033
335	Παγετώνες και αιώνια χιόνια	0.026
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.050
412	Τυρφώνες	0.050
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.045
422	Αλυκές	0.045
423	Παλιρροιακά επίπεδα	0.045
511	Ροές υδάτων	0.030
512	Συλλογές υδάτων	0.030
521	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	0.030
522	Εκβολές ποταμών	0.030
523	Θάλασσα	0.030

Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο project και φορτώνονται τα παραπάνω δεδομένα εισόδου στον RAS Mapper. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα αρχείο γεωμετρίας στον Geometric Data editor για κάθε θέση ενδιαφέροντος κατάντη της οποίας θα γίνει υδραυλική προσομοίωση. Ειδικότερα, χαράσσεται μέσω του εργαλείου 2D Flow Area του Geometric Data η περιοχή προσομοίωσης για κάθε μία από τις θέσεις ξεχωριστά και δημιουργείται το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του εργαλείου Force Mesh Recomputation. Η έκταση της περιοχής που πρόκειται να αναλυθεί έγκειται στην κρίση και τις ερευνητικές απαιτήσεις του χρήστη.

Στην περίπτωση υπάρχοντος τεχνικού έργου, όπως γέφυρας ή φράγματος στην περιοχή προσομοίωσης, γίνεται ένταξή του στην ανάλυση αξιοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία στο παράθυρο του Geometric Data editor.

Απαραίτητο δεδομένο για την υδραυλική ανάλυση είναι ο καθορισμός των οριακών συνθηκών του 2D πεδίου προσομοίωσης που διαμορφώθηκε στο προηγούμενο βήμα. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι θέσεις ανάντη και κατάντη της περιοχής υδραυλικής προσομοίωσης με τη μορφή ευθυγράμμων τμημάτων, μέσω του εργαλείου 2D Area Boundary Conditions Lines. Για συνθήκες μη μόνιμης ροής, υφίστανται οι παρακάτω επιλογές οριακών συνθηκών:

- Υδρογράφημα στάθμης (Stage Hydrograph), είτε σαν ανάντη είτε σαν κατάντη οριακή συνθήκη
- Υδρογράφημα παροχής (Flow Hydrograph), είτε στα ανάντη είτε στα κατάντη
- Υδρογράφημα στάθμης – παροχής (Stage – Flow Hydrograph), το οποίο μπορεί επίσης να ορισθεί είτε στα ανάντη είτε στα κατάντη και το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα στάθμης και είναι επιθυμητή μια πρόβλεψη πλημμύρας.
- Καμπύλη στάθμης – παροχής (Rating Curve), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα κατάντη

Ως οριακή συνθήκη μη μόνιμης ροής στην ανάντη διατομή του εξεταζόμενου τμήματος του Πηνειού ποταμού εισάγεται το αντίστοιχο υδρογράφημα απορροής (πλημμυρογράφημα) που υπολογίστηκε κατά την υδρολογική ανάλυση, όπως περιγράφεται στο χωρίο 3.4.2 του παρόντος. Παράλληλα, ορίζονται η ημερομηνία και ο χρόνος έναρξης της προσομοίωσης ίσοι με την ημερομηνία και το χρόνο έναρξης του υδρογραφήματος απορροής, αντίστοιχα, καθώς και η κλίση της γραμμής ενέργειας, η οποία τίθεται ίση με 0.01. Όσον αφορά στη διατομή κατάντη της περιοχής προσομοίωσης επιλέγεται η οριακή συνθήκη του ομοιόμορφου

βάθους, σύμφωνα με την οποία προκύπτει μία τιμή στάθμης για κάθε τιμή παροχής ανά διατομή, που υπολογίζεται από το πρόγραμμα με επίλυση της εξίσωσης του Manning. Για τη συνθήκη κανονικού βάθους ορίζεται, επιπλέον, ο ρυθμός απωλειών λόγω τριβής ίσος με 0,01. Η καταχώρηση και αποθήκευση του αρχείου των οριακών συνθηκών στο σύστημα του λογισμικού γίνεται στην καρτέλα Unsteady Flow Data επιλέγοντας τις οριακές συνθήκες Flow Hydrograph για την ανάντη και Normal Depth για την κατάντη διατομή.

Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος ξεχωριστά.

Τέλος, δημιουργείται ένα αρχείο εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης στον Unsteady Flow Analysis editor, το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται ως νέο plan. Στο στάδιο αυτό ορίζεται από το χρήστη το αρχείο γεωμετρίας, καθώς και το αρχείο των οριακών συνθηκών μη μόνιμης ροής. Επιπρόσθετα, εισάγονται οι ημερομηνίες και οι χρόνοι έναρξης - λήξης της προσομοίωσης σε πλήρη αντιστοιχία με αυτούς του πλημμυρογραφήματος της περιχής που προσομοιώνεται. Επιλέγεται η εκτέλεση προεπεξεργασίας της γεωμετρίας, ώστε να επιταχυνθούν οι υπολογισμοί της μη μόνιμης ροής, προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής, μετεπεξεργασίας της μη μόνιμης ροής, για τον υπολογισμό λεπτομερών υδραυλικών πληροφοριών σχετικά με το ύψος ροής και τη ροή, για ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής, αλλά και απεικόνιση του πεδίου πλημμύρας σε σχετικό χάρτη.

Ως χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών ορίζεται το διάστημα των 2 sec, ενώ για την εξαγωγή χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων τίθεται χρονικό βήμα ίσο με 10 min. Παράλληλα, επιλέγεται το χρονικό βήμα των εξαγόμενων υδρογραφήματων και των λεπτομερών αποτελεσμάτων ίσο με 10 min και 1 h, αντίστοιχα.

Τελικό στάδιο πριν την εκτέλεση και ολοκλήρωση της υδραυλικής προσομοίωσης είναι η εισαγωγή των σχετικών παραμέτρων της προσομοίωσης όπως είναι ο χρόνος προσομοίωσης (ίδιος με αυτόν του πλημμυρογραφήματος εισόδου), το χρονικό βήμα υπολογισμών καθώς και το χρονικό βήμα των αποτελεσμάτων.

Μετά το πέρας των υδραυλικών υπολογισμών τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζονται στον RAS Mapper, ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας χαρτών για κάθε μέγεθος που υπολογίστηκε κατά την ανάλυση.

4 Αποτελέσματα - Συζήτηση

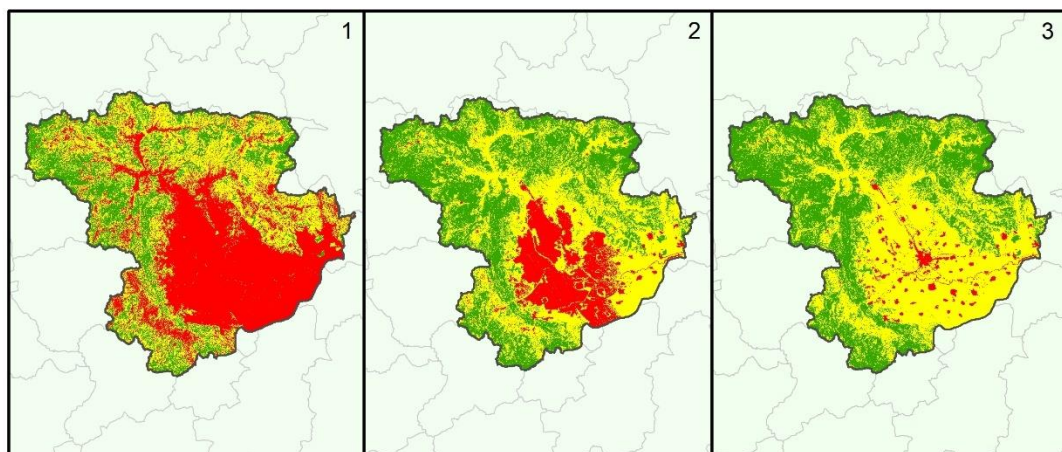
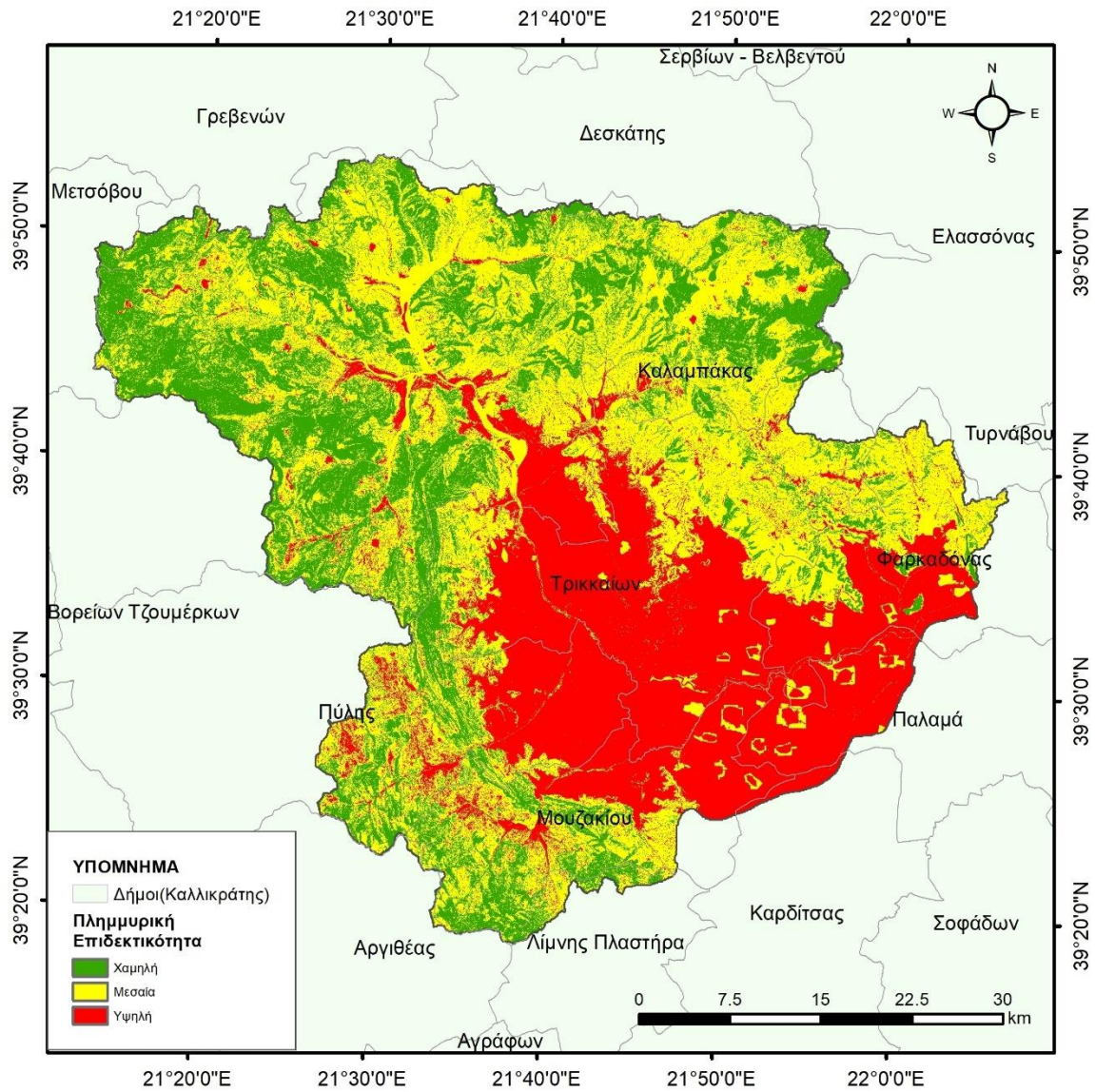
4.1 Καθορισμός πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών

Με βάση την πολυκριτηριακή ανάλυση που εφαρμόστηκε για την κατάλληλη συσχέτιση των επιμέρους κριτηρίων που επηρεάζουν την επιδεκτικότητα μια περιοχής σε πλημμύρα, προκύπτει ότι ο υψηλότερος κίνδυνος εμφάνισης πλημμύρας εντοπίζεται στα πεδινά κατάντη τμήματα της υδρολογικής λεκάνης, όπου εμφανίζονται χαμηλό υψόμετρο και σχεδόν μηδενικές κλίσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, οι εκτάσεις αυτές συγκεντρώνονται στο κεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, το οποίο αντιπροσωπεύει τον υψηλό κίνδυνο. Στην κατηγορία υψηλού κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας ανήκουν ακόμη οι περιοχές εντός υδρογραφικού δικτύου, καθώς και περιοχές με τοπική συγκέντρωση ροής, όπως βυθίσματα/καταβόθρες άτακτα κατανομημένα στα ορεινά τμήματα της λεκάνης.

Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι υπάρχει συσχέτιση υψηλής αδιαπερατότητας και ύπαρξης αστικού ιστού, γεγονός που καθιστά πλημμυρικά ευάλωτους τους περισσότερους οικισμούς. Συγκεκριμένα, στη ζώνη των περισσότερο ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρα περιλαμβάνεται η πόλη των Τρικάλων, οι οικισμοί Πηγή του Δήμου Πύλης της ΠΕ Τρικάλων και Αγναντερό του Δήμου Παμίσου της ΠΕ Καρδίτσας, τα χωριά Γλινός και Σερβωτά, καθώς και η κωμόπολη Νομή, του Δήμου Φαρκαδόνας.

Αντίθετα, οι ορεινές στην πλειονότητά τους εκτάσεις που απεικονίζονται με αποχρώσεις του πράσινου αντιστοιχούν στις λιγότερο ευάλωτες περιοχές από πλευράς πλημμυρικής τρωτότητας. Οι απότομες κλίσεις σε συνδυασμό με την αυξημένη διηθητική ικανότητα του εδάφους λόγω της παρουσίας πυκνής βλάστησης συμβάλλουν στη μείωση του κινδύνου εκδήλωσης πλημμύρας σε αυτές, παρά τη μεγάλη κατακρήμνιση που σημειώνεται στα υψηλά υψόμετρα.

Η παρουσία μικρών περιοχών μεσαίας πλημμυρικής επιδεκτικότητας (κίτρινο χρώμα) περιμετρικά των οικισμών που εντάσσονται στην κρίσιμη ζώνη είναι αναμενόμενη, καθώς πρόκειται για περιοχές με σύνθετες καλλιέργειες οι οποίες κατά το στάδιο τυποποίησης των κριτηρίων και συγκεκριμένα του κριτηρίου των χρήσεων γης, βαθμονομήθηκαν με συντελεστή 0.5 ως προς την αδιαπερατότητα.



Σχήμα 4.1: Χάρτης πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών και υποπεριπτώσεις εναλλακτικής ταξινόμησης 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η ομαδοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν στις κατηγορίες κινδύνου του Σχήματος 4.1 έγινε με τη μέθοδο Natural Breaks. Οι κλάσεις που δημιουργούνται αντιστοιχούν σε περιοχές με χαμηλή, μεσαία και υψηλή πλημμυρική επιδεκτικότητα. Παρατηρείται ότι με αλλαγή των ορίων των κλάσεων κινδύνου διαφοροποιείται και το τελικό αποτέλεσμα, η έκταση δηλαδή των ευάλωτων σε πλημμύρα ζωνών. Συγκεκριμένα, εάν διευρυνθεί η υψηλότερη κλάση, διευρύνεται και το φάσμα των κρίσιμων περιοχών (Σχήμα 4.1.1), ενώ ορίζοντας πιο αυστηρά την κλάση του υψηλού κινδύνου οι κρίσιμες περιοχές περιορίζονται στα τμήματα ασυνεχούς αστικής δόμησης και στις αδιαπέραστες επιφάνειες (Σχήμα 4.1.3). Μια ενδιάμεση και πιο ρεαλιστική κατάσταση απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.2.

Ο χάρτης των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών του Σχήματος 4.1 που παρήχθη με εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης συγκρίθηκε με τον αντίστοιχο χάρτη που προτείνεται στο Σχέδιο Διαχείρισης Πλημμυρών από το ΥΠΕΚΑ για το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας και εντοπίστηκε ταύτιση τους σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, πιθανή απόκλιση των αποτελεσμάτων δε συνεπάγεται ανακριβή ή λανθασμένη ανάλυση του ερευνητή αλλά, αντίθετα, αναδεικνύει τις πτυχές μιας διαφορετικής προσέγγισης. Εξάλλου, πρόκειται για μία μέθοδο (πολυκριτηριακή) που εμπεριέχει εξαρχής τον παράγοντα της αβεβαιότητας, καθώς στηρίζεται στην κρίση του μελετητή και, επομένως, είναι αναμενόμενη η εξαγωγή διαφορετικών λύσεων ανά μελέτη περίπτωσης.

4.2 Υδρομετεωρολογική ανάλυση

Η υδρομετεωρολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τα κυριότερα ιστορικά επεισόδια βροχής που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης την περίοδο Σεπτεμβρίου 2010 έως Νοεμβρίου 2017. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε το συνολικό ύψος βροχής, η διάρκεια βροχόπτωσης και η περίοδος επαναφοράς για κάθε επεισόδιο, όπως αυτό καταγράφηκε από κάθε σταθμό. Ενδεικτικά, στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται το μέγιστο συνολικό ύψος βροχής και η μέγιστη διάρκεια βροχής για κάθε επεισόδιο. Τα μεγέθη αυτά δεν προέρχονται κατ' ανάγκη από δεδομένα του ίδιου σταθμού, αλλά από αυτόν που οδήγησε στις υψηλότερες τιμές ύψους και διάρκειας βροχής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4.1 και 4.2 που ακολουθούν.

Πίνακας 4.1: Μέγιστες τιμές συνολικού ύψους και διάρκειας σημειακής βροχόπτωσης για τα επιλεγμένα επεισόδια

Πλημμυρικό επεισόδιο	Συνολικό ύψος βροχόπτωσης $h_{ολ}$ (mm)	Διάρκεια βροχόπτωσης d (h)
11.09.2010	96.0	25.0
15.04.2012	122.6	39.7
30.12.2012	114.6	82.5
12.11.2013	95.0	126.0
01.02.2015	301.4	96.3
16.01.2016	138.8	37.5
22.05.2016	145.0	51.3
23.08.2016	51.2	6.0
09.09.2016	110.4	27.17
09.03.2017	95.0	90.5
16.11.2017	198.0	37.33

Παρατηρείται ότι το πιο ισχυρό επεισόδιο σημειώθηκε την 01/02/2015, όπου το συνολικό ύψος βροχής ανήλθε στα 301 mm σε διάρκεια 89 h στη θέση του σταθμού Περτούλι, ενώ στο Μέτσοβο, σύμφωνα με τις καταγραφές του σταθμού, το επεισόδιο διήρκησε 96 h και έδωσε συνολικά 266 mm βροχής. Τα ύψη αυτά είναι ιδιαίτερα υψηλά και αντιστοιχούν σε μεγάλη περίοδο επαναφοράς. Αντίθετα, οι χαμηλότερες συγκριτικά παρατηρήσεις των υπολοίπων σταθμών για το συγκεκριμένο επεισόδιο αντιστοιχούν σε μικρές τιμές περιόδου επαναφοράς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Περίοδοι επαναφοράς ιστορικών επεισοδίων για διαφορετικές διάρκειες βροχής

Επεισόδιο	Σταθμός	Περίοδος επαναφοράς (T) σε έτη για διάρκεια βροχόπτωσης d =					
		1 h	2 h	6 h	12 h	24 h	48 h
11.09.2010	ΤΡΙΚΑΛΑ	3.61	5.3	9.96	12.95	9.01	
	ΛΑΡΙΣΑ	0.24	0.25	0.4	0.53	0.36	
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.74	0.86	0.99	0.58	0.29	
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.79	0.76	0.77	0.66	0.35	
	ΚΟΝΙΣΚΟΣ	1.17	0.86	0.82	1.81	2.37	
	ΓΑΡΔΙΚΙ	0.38	0.57	0.4	0.36	0.23	
15.04.2012	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.24	0.32	0.30	0.30	0.25	
	ΛΑΡΙΣΑ	0.11	0.13	0.11	0.10	0.09	
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.12	0.10	0.22	0.45	0.35	
	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.02	0.03	0.05	0.10	0.27	
	ΓΑΡΔΙΚΙ	1.36	3.19	6.89	9.27	6.74	
30.12.2012	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.35	0.54	1.45	2.37	2.62	1.45
	ΛΑΡΙΣΑ	0.31	0.38	0.55	0.66	0.71	0.47
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.04	0.10	0.48	0.60	0.80	0.87
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.09	0.09	0.21	0.63	0.90	0.39
	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.02	0.03	0.17	0.41	0.58	0.26
	ΓΑΡΔΙΚΙ	0.21	0.19	0.14	0.12	0.19	0.19
12.11.2013	ΤΡΙΚΑΛΑ	1.57	1.04	0.67	0.61	0.44	0.66
	ΛΑΡΙΣΑ	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	2.26	4.59	5.65	2.85	1.28	1.26
	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.03	0.02	0.04	0.05	0.05	0.08
	ΓΑΡΔΙΚΙ	0.21	0.19	0.14	0.12	0.19	0.19
	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.21	0.21	0.28	0.40	0.49	0.50
01.02.2015	ΛΑΡΙΣΑ	0.18	0.16	0.15	0.15	0.20	0.17
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	0.07	0.09	0.21	0.34	0.37	0.37
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	0.04	0.06	0.07	0.09	0.18	0.19
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.92	1.57	4.12	26.65	75.34	273.65
	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.45	0.45	1.90	6.75	41.56	166.89
	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.24	0.30	0.55	0.67	0.70	
16.01.2016	ΛΑΡΙΣΑ	0.46	0.58	0.98	0.71	0.49	
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	0.09	0.15	0.32	0.66	0.66	
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	0.11	0.18	0.52	0.97	0.66	
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.14	0.20	0.29	0.72	3.06	
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.02	0.04	0.12	0.13	0.10	
	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.18	0.43	1.43	10.52	36.47	
22.05.2016	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.60	0.65	1.16	2.16	4.40	2.91
	ΛΑΡΙΣΑ	0.11	0.11	0.15	0.17	0.24	0.24
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	0.14	0.14	0.44	0.82	2.76	1.30
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	0.51	1.06	2.58	4.92	5.91	4.31
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.71	0.76	1.11	1.39	5.05	5.28
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.04	0.04	0.12	0.37	0.81	1.39
23.08.2016	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.24	0.34	0.39	0.43	1.53	1.07
	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.96	0.61	0.36			
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	0.03	0.04	0.04			
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	9.07	7.51	7.95			
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.29	0.15	0.11			
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	0.51	0.28	0.08			
09.09.2016	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.02	0.02	0.01			
	ΤΡΙΚΑΛΑ	1.20	0.77	0.88	1.58	1.82	
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	1.88	1.76	5.75	11.93	12.08	
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	5.45	9.65	5.10	11.22	6.58	
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.44	0.37	0.97	1.91	2.73	
	ΠΛΑΣΤΗΡΑ	4.05	1.22	0.43	2.32	1.51	
09.03.2017	ΜΕΤΣΟΒΟ	5.95	3.08	1.51	0.68	0.70	
	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.26	0.26	0.24	0.35	0.38	0.35
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	0.08	0.10	0.17	0.30	0.35	0.59
	ΛΑΡΙΣΑ	0.24	0.35	0.34	0.37	0.33	0.33
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.07	0.08	0.09	0.14	0.24	0.28
16.11.2017	ΜΕΤΣΟΒΟ	0.01	0.01	0.02	0.03	0.10	0.08
	ΤΡΙΚΑΛΑ	0.86	1.43	2.60	1.81	1.92	
	ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	7.78	16.93	16.55	44.64	68.46	
	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	0.42	0.25	0.12	0.09	0.08	
	ΛΑΡΙΣΑ	0.41	0.48	0.28	0.22	0.32	
	ΠΕΡΤΟΥΛΙ	0.44	0.26	0.21	0.31	0.31	
ΜΕΤΣΟΒΟ	0.07	0.05	0.01	0.02	0.05		

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.2, οι τιμές των περιόδων επαναφοράς είναι στην πλειονότητά τους αρκετά χαμηλές, το οποίο είναι λογικό, καθώς πρόκειται για συχνά φαινόμενα, υψηλής πιθανότητας υπέρβασης.

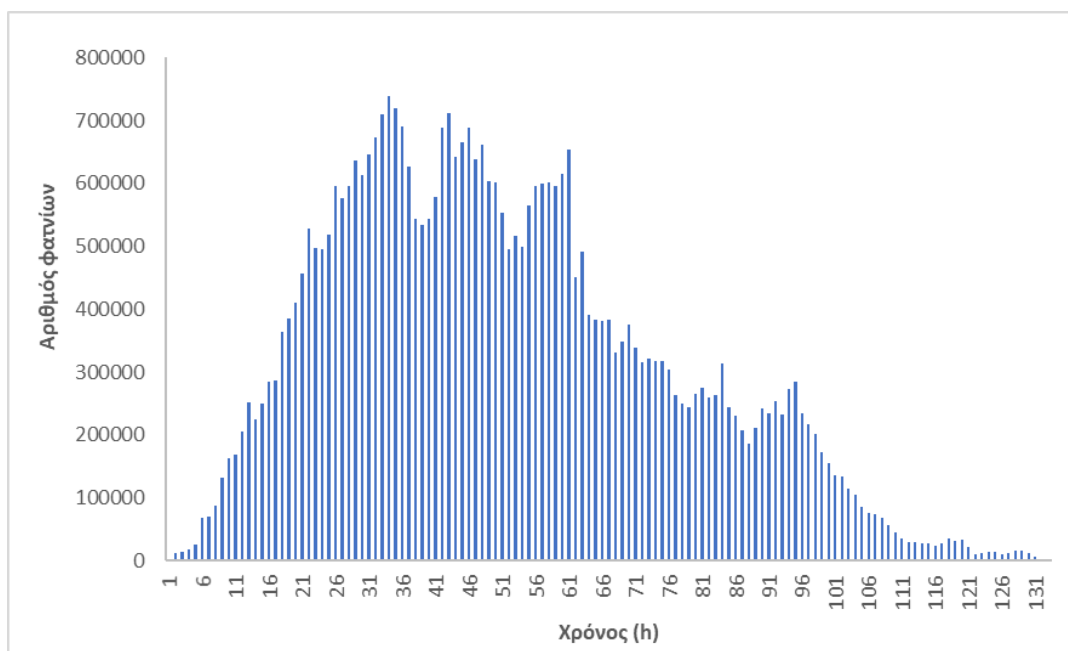
Η διαφοροποίηση της περιόδου επαναφοράς σε επίπεδο σταθμού, για το ίδιο επεισόδιο και την ίδια διάρκεια βροχής εξηγείται τόσο από τη διαφορετική θέση του κάθε σταθμού, η οποία συνδέεται με χωρική μεταβλητότητα της κατακρήμνισης λόγω διαφορετικών τοπικών κλιματολογικών χαρακτηριστικών, όσο και από τις διαφορετικές παραμέτρους των όμβριων καμπυλών. Αναφορικά με την επίδραση της διάρκειας βροχής στην τιμή της περιόδου επαναφοράς, δεν παρατηρείται κάποια συστηματικότητα.

4.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά επεισοδίων – Πλημμυρογραφήματα

Η υδρολογική ανάλυση έγινε για τις λεκάνες απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου, και ανάντη Νομής με βάση τα παρακάτω ιστορικά επεισόδια βροχής:

- 01/02/2015
- 22/05/2016
- 09/09/2016

Ως υδρολογικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα, ο υπολογισμός του οποίου έγινε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών. Με βάση το αντίστοιχο ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας παράγεται το μοναδιαίο υδρογράφημα για κάθε θέση ενδιαφέροντος. Ενδεικτικά, το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας που προέκυψε για τη λεκάνη απορροής της Καλαμπάκας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

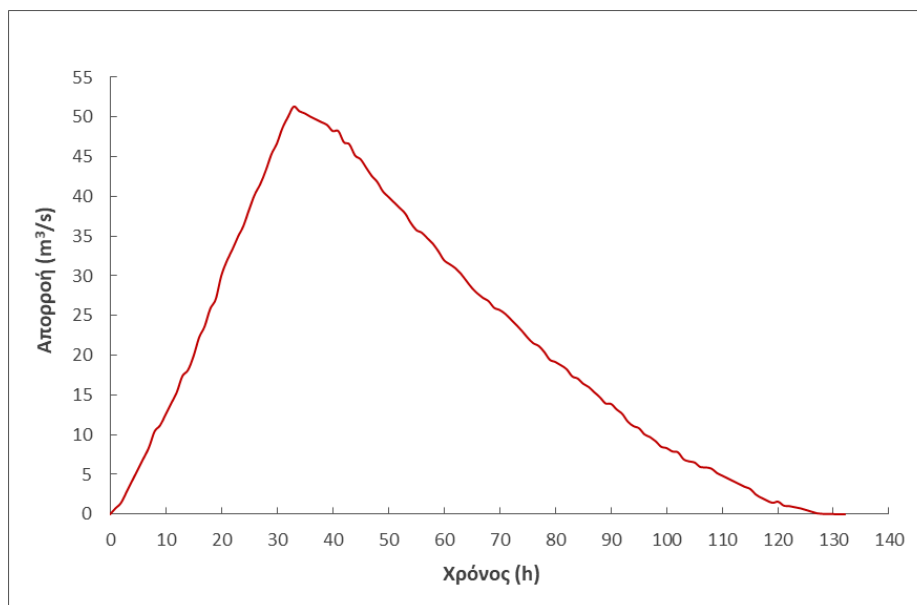


Σχήμα 4.2: Ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας στη θέση Καλαμπάκα

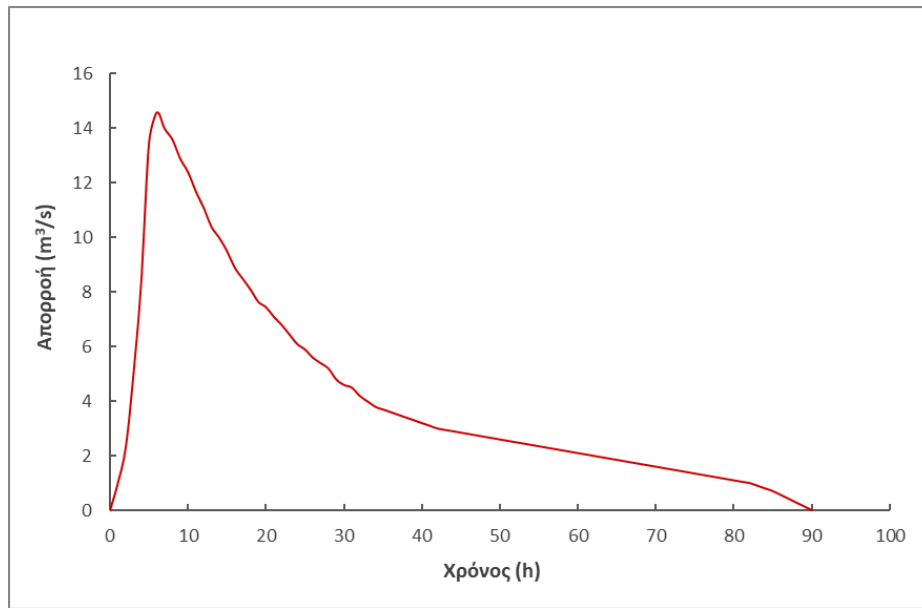
Το μοναδιαίο υδρογράφημα αναφέρεται εξ' ορισμού σε ύψος βροχής 10 mm. Συνεπώς, με πολλαπλασιασμό του πλήθους των εικονοστοιχείων που απορρέουν με την επιφάνεια κάθε εικονοστοιχείου ανάλογα με την ανάλυση του αρχικού DEM και με το αντίστοιχο ύψος βροχής, δημιουργείται το μοναδιαίο υδρογράφημα για τη λεκάνη απορροής. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των φατνίων με την επιφάνεια φατνίου που είναι 5x5 m και με το ύψος βροχής 0.01 m και διαιρώντας με 3600 s, προκύπτει η παροχή σε m³/s.

Τα μοναδιαία υδρογραφήματα που προέκυψαν με την παραπάνω μέθοδο και έπειτα από εξομάλυνση στις θέσεις Καλαμπάκα, Μουζάκι και ανάντη του οικισμού της Νομής, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3, 4.5, 4.6, αντίστοιχα.

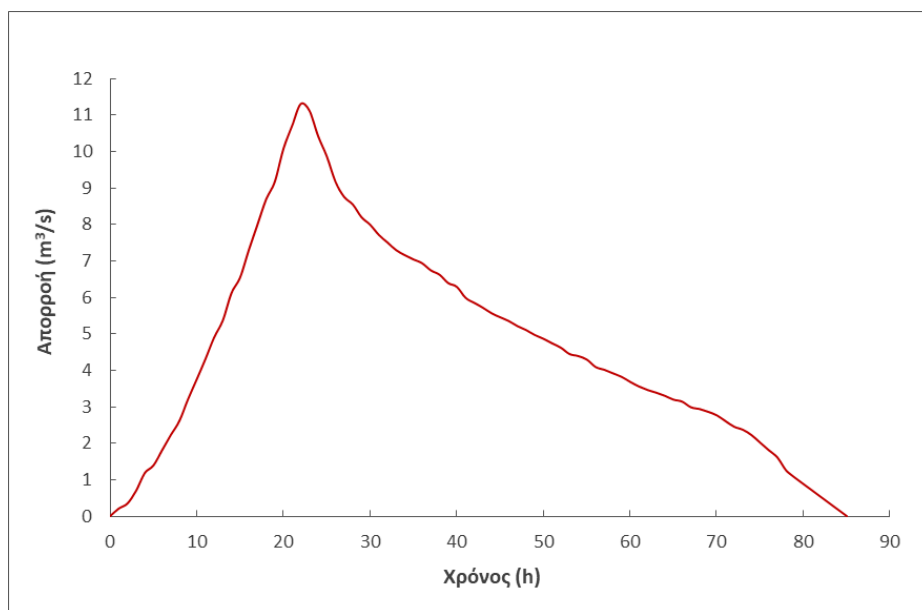
Στην περίπτωση της Πύλης η εφαρμογή της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών οδήγησε σε μη ικανοποιητικό αποτέλεσμα, λόγω των ιδιαίτερων μορφολογικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής και κυρίως το νοτιοανατολικό τμήμα της. Καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος δε δύναται να προσομοιώσει ικανοποιητικά το φαινόμενο βροχής - απορροής, για τη λεκάνη της Πύλης αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα απορροής που προέκυψαν από μετρήσεις της ΔΕΗ και το μοναδιαίο υδρογράφημα που φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



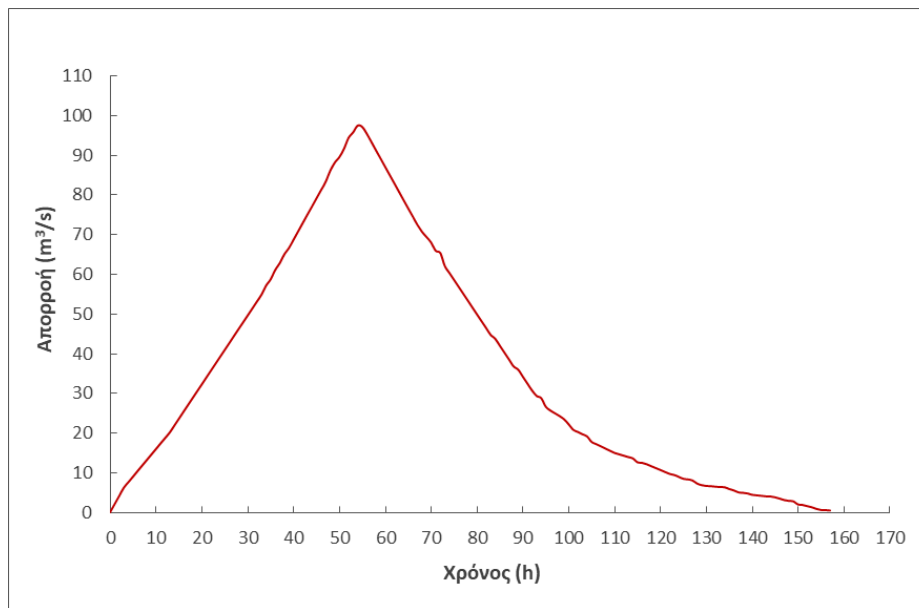
Σχήμα 4.3: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα



Σχήμα 4.4: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Πύλη (Προέλευση: ΔΕΗ, μετά από προσαρμογή)



Σχήμα 4.5: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Μουζάκι



Σχήμα 4.6: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής

Η παροχή αιχμής που προέκυψε στη λεκάνη απορροής της Καλαμπάκας είναι ίση με $51.26 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο χρόνος αιχμής ίσος με 33 h. Η παροχή αιχμής στη λεκάνη απορροής της Πύλης είναι ίση με $14.6 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο χρόνος αιχμής ίσος με 6 h. Στο Μουζάκι, τα αντίστοιχα μεγέθη του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι $11.3 \text{ m}^3/\text{s}$ και 22 h. Τέλος, στη λεκάνη ανάντη της Νομής προέκυψε παροχή αιχμής $97.2 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνος αιχμής 54 h.

Όπως αναμενόταν, τόσο η παροχή αιχμής όσο και η διάρκεια του ΜΥΓ που αντιστοιχεί στη λεκάνη της Νομής (ανάντη οικισμού) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με το ΜΥΓ οποιαδήποτε άλλης λεκάνης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη έκταση της συγκεκριμένης λεκάνης (2018 km^2 περίπου) έναντι των υπολοίπων (1016 , 133 και 143 km^2 περίπου), καθώς υπάρχει συσχέτιση της παροχής και της έκτασης μέσω του αριθμού φατνίων που περιέχονται σε αυτήν. Επιπρόσθετα, μία μεγαλύτερης έκτασης υδρολογική λεκάνη είναι δέκτης μεγαλύτερων ποσών κατακρημνισμάτων, σε σχέση με μία λεκάνη μικρότερου μεγέθους. Ως εκ τούτου, η διάρκεια, το ύψος της αιχμής και η άμεση απορροή γενικότερα, είναι μεγαλύτερα. Από την άλλη πλευρά, παρότι το υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης της Νομής είναι αρκετά πυκνό, περιλαμβάνει ρεύματα αρκετά απομακρυσμένα από την έξοδό της, στα οποία η διαδρομή που χρειάζεται να καλύψει το νερό μέχρι να απορρεύσει αυξάνεται, αυξάνοντας κατ' επέκταση και το χρόνο αιχμής του υδρογραφήματος. Ως απότοκο των παραπάνω, ανάντη του οικισμού της Νομής, παρατηρείται μεγαλύτερη παροχή αιχμής, αλλά λιγότερο απότομη κλίση του ανοδικού κλάδου λόγω σχήματος λεκάνης, συγκριτικά με τα ΜΥΓ των υπόλοιπων λεκανών απορροής που μελετήθηκαν. Ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά παροχής αιχμής οι λεκάνες Καλαμπάκας, Πύλης και Μουζακίου.

Παρατηρείται ακόμη, ότι ο ανοδικός κλάδος του ΜΥΓ στη θέση της Πύλης είναι πιο απότομος σε σχέση με τον αντίστοιχο στο Μουζάκι, παρά το ότι είναι ίδιας τάξης μεγέθους με εκτάσεις 133 και 144 km², αντίστοιχα. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην τοπογραφική μεταβλητότητα των λεκανών ανάντη των συγκεκριμένων θέσεων. Ειδικότερα, το ορεινό προφίλ στην περιοχή της Πύλης, με τα υψηλότερα υψόμετρα και τις πιο έντονες κλίσεις σε σχέση με το Μουζάκι, οδηγεί σε μικρότερους χρόνους απορροής και, επομένως, μικρότερο χρόνο αιχμής.

Ο μετασχηματισμός της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή γίνεται με αφαίρεση των υδρολογικών απωλειών, οι οποίες υπολογίστηκαν με τη μέθοδο SCS και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Όπως προκύπτει, στη λεκάνη απορροής πλησίον της Νομής προκύπτουν οι λιγότερες απώλειες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην μικρότερη ποσοστιαία κάλυψη από δάση σε σχέση με τις άλλες τρεις, με αποτέλεσμα να διηθούνται μικρότερες ποσότητες νερού και να απορρέει μεγαλύτερος όγκος από την έξοδό της. Παράλληλα, παρατηρείται ότι οι υδρολογικές απώλειες επηρεάζονται και από το συνολικό ύψος κατακρήμνισης. Πιο συγκεκριμένα, για την ίδια λεκάνη απορροής (ίδιος CN) σε κάποιο ορεινό τμήμα που πιθανώς θα σημειώνονται μεγαλύτερα ύψη βροχής αναμένεται οι απώλειες να είναι μικρότερες συγκριτικά με ένα πεδινό τμήμα της.

Πίνακας 4.3: Συνολικές υδρολογικές απώλειες ανά επεισόδιο βροχής

Επεισόδιο	Λεκάνη Απορροής	Συνολική βροχόπτωση (mm)	Ενεργός βροχόπτωση (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)
1/2/2015	Καλαμπάκα	145.99	106.313	39.68
	Πύλη	301.4	261.322	40.08
	Μουζάκι	148.97	115.591	33.38
	ανάντη Νομής	154.15	125.345	28.81
22/05/2016	Καλαμπάκα	88.28	53.06	35.22
	Πύλη	145	105.98	39.02
	Μουζάκι	86.97	56.71	30.25
	ανάντη Νομής	93.37	65.93	27.44
9/9/2016	Καλαμπάκα	96.45	60.35	36.09
	Πύλη	108	73.68	34.32
	Μουζάκι	83.13	53.48	29.65
	ανάντη Νομής	96.89	70.17	26.72

Τα επεισόδια στα οποία βασίστηκε η υδρολογική και υδραυλική ανάλυση που ακολούθησε, καθώς και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά επεισοδίων βροχής για τις λεκάνες απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και ανάντη Νομής

Επεισόδιο	Λεκάνη Απορροής	Διάρκεια επεισοδίου			Συνολικό ύψος βροχής (mm)
		Ημερομηνία - Ώρα		(h)	
		Έναρξη	Λήξη		
1/2/2015	Καλαμπάκα	30/01/2015 8:50	3/02/2015 11:50	100	145.99
	Πύλη	30/01/2015 8:50	3/02/2015 2:50	91	301.4
	Μουζάκι	30/01/2015 8:50	3/02/2015 2:50	91	148.97
	ανάντη Νομής	30/01/2015 8:50	3/02/2015 11:50	100	154.15
22/5/2016	Καλαμπάκα	20/05/2016 3:00	22/05/2016 7:00	53	88.28
	Πύλη	20/05/2016 3:00	22/05/2016 7:00	53	145
	Μουζάκι	20/05/2016 3:00	22/05/2016 9:00	55	86.97
	ανάντη Νομής	20/05/2016 3:00	22/05/2016 9:00	55	93.37
9/9/2016	Καλαμπάκα	8/09/2016 2:50	9/09/2016 6:50	29	96.45
	Πύλη	8/09/2016 2:50	9/09/2016 6:50	29	108
	Μουζάκι	8/09/2016 2:50	9/09/2016 6:50	29	83.13
	ανάντη Νομής	8/09/2016 2:50	9/09/2016 6:50	29	96.89

Τα πλημμυρογράφημα που προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση στην έξοδο των λεκανών απορροής Καλαμπάκας, Πύλης, Μουζακίου και Νομής μαζί με τα αντίστοιχα υετογράμματα για τα τρία επεισόδια βροχής, απεικονίζονται στα Σχήματα 4.7 – 4.18 που ακολουθούν.

Στους Πίνακες 4.5 - 4.7 παρουσιάζονται η παροχή αιχμής, ο χρόνος αιχμής και ο πλημμυρικός όγκος, όπως προέκυψαν κατά την υδρολογική ανάλυση των τριών ιστορικών επεισοδίων στις λεκάνες απορροής της Καλαμπάκας, της Πύλης, του Μουζακίου και ανάντη της Νομής.

Ο μικρότερος πλημμυρικός όγκος που προκύπτει αναφέρεται στην υδρολογική λεκάνη Μουζακίου. Μεταξύ των τριών επεισοδίων ο ελάχιστος όγκος απορροής παρατηρήθηκε στις 22/05/2016 και υπολογίστηκε ίσος με $\sim 18 \text{ hm}^3$.

Ως προς τα επεισόδια που εξετάστηκαν, διαπιστώνεται ότι το επεισόδιο που σημειώθηκε στις 01/02/2015 είναι εκείνο που έδωσε το δυσμενέστερο και ως προς τα τρία χαρακτηριστικά μεγέθη (παροχή αιχμής, χρόνος αιχμής, πλημμυρικός όγκος) πλημμυρογράφημα και αφορά στη λεκάνη απορροής της Νομής. Ακολουθούν σε σειρά μειούμενης σφοδρότητας ως προς τα πλημμυρικά μεγέθη τα επεισόδια που καταγράφηκαν στις 09/09/2016 και 22/05/2016. Τη μέρα εκείνη σημειώθηκαν μεγάλες τιμές κατακρήμνισης σε χρονικό διάστημα 30 ωρών, με αποτέλεσμα η αιχμή του πλημμυρογράφηματος να έχει αυξημένη τιμή σε σχέση με τη βροχή που σημειώθηκε στις 22/05/2016, η οποία είχε μεγαλύτερη διάρκεια και ελαφρώς μεγαλύτερα ύψη βροχής.

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 01/02/2015

01/02/15			
Λεκάνη Απορροής	$Q_{αιχ}$ (m ³ /s)	$t_{αιχ}$ (h)	$V_{πλημ}$ (hm ³)
Καλαμπάκα	471.91	74	121.64
Πύλη	196.82	48	36.78
Μουζάκι	90.06	61	18.17
ανάντη Νομής	1018.18	88	270.72

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 22/05/2016

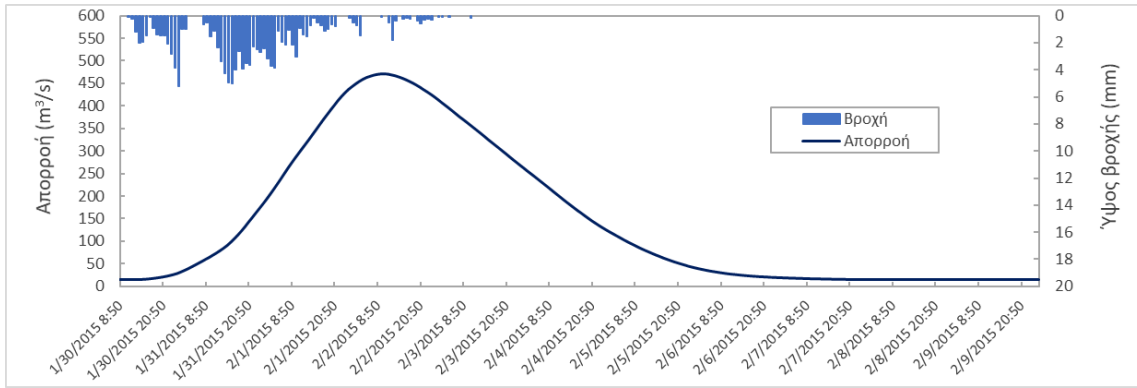
22/05/16			
Λεκάνη Απορροής	$Q_{αιχ}$ (m ³ /s)	$t_{αιχ}$ (h)	$V_{πλημ}$ (hm ³)
Καλαμπάκα	325.55	63	69.96
Πύλη	109.61	44	16.38
Μουζάκι	58.91	58	9.91
ανάντη Νομής	658.24	78	155.76

Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος κάθε λεκάνης για το ιστορικό επεισόδιο 09/09/2016

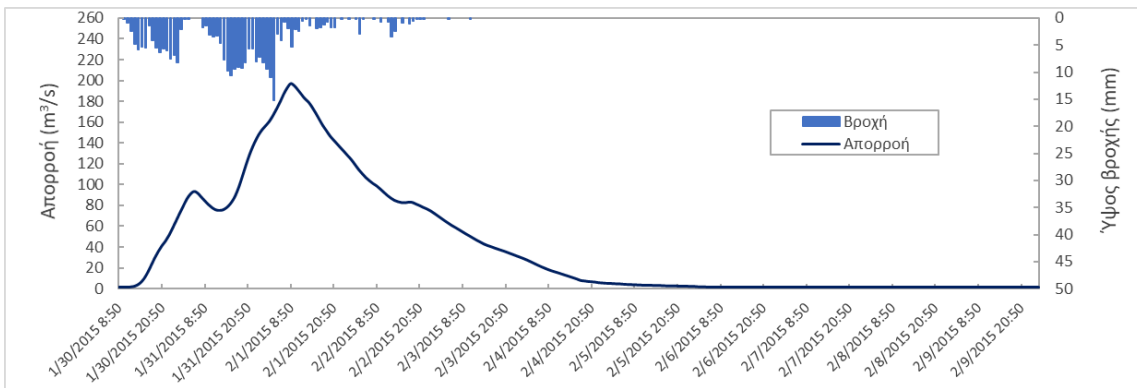
09/09/16			
Λεκάνη Απορροής	$Q_{αιχ}$ (m ³ /s)	$t_{αιχ}$ (h)	$V_{πλημ}$ (hm ³)
Καλαμπάκα	360.30	54	79.35
Πύλη	104.71	28	16.68
Μουζάκι	62.35	41	10.54
ανάντη Νομής	757.08	73	180.40

Συγκεκριμένα, στην υδρολογική λεκάνη ανάντη της Νομής παρατηρούνται εμφανώς αυξημένες τιμές τόσο της απορροής αιχμής όσο και του πλημμυρικού όγκου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λεκάνες, για κάθε ιστορικό επεισόδιο βροχής. Οι πολύ χαμηλές κλίσεις σε συνδυασμό με το χαμηλό έως και μηδενικό υψόμετρο κάποιων περιοχών εντός της λεκάνης συμβάλλουν στη συγκέντρωση μεγάλων όγκων νερού σε αυτή.

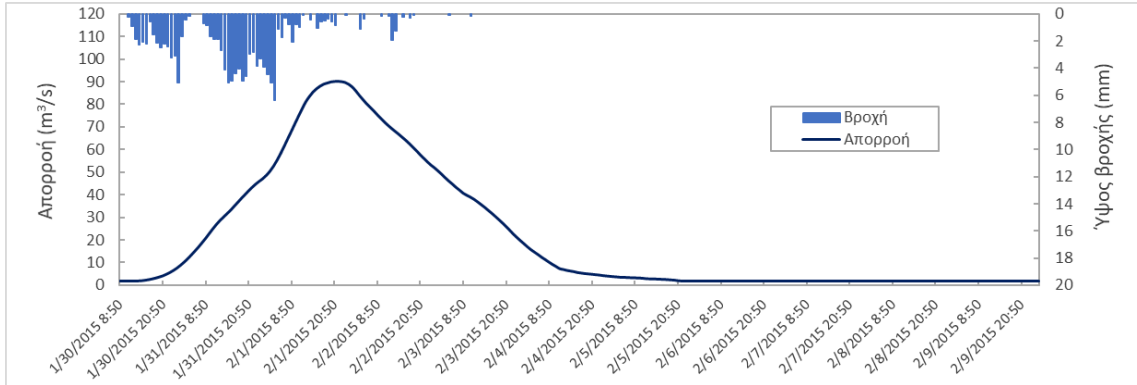
Από τη μορφή του πλημμυρογραφήματος προκύπτει, ακόμη, ότι στην ίδια λεκάνη απαιτείται και ο περισσότερος χρόνος ώσπου να μηδενιστεί η άμεση απορροή σε σχέση με τις άλλες τρεις, για το ίδιο επεισόδιο βροχής. Η σημαντικά μεγαλύτερη χρονική διάρκεια του υδρογραφήματος απορροής οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υπεροχή της συγκεκριμένης υδρολογικής λεκάνης ως προς την έκταση, καθώς μία συγκεκριμένη βροχή που πέφτει σε μεγαλύτερη λεκάνη οδηγεί σε υδρογράφημα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Γενικότερα, παρατηρείται ότι όσο πιο κατάντη βρίσκεται η λεκάνη τόσο αυξάνεται ο χρόνος αιχμής αλλά και η διάρκεια του πλημμυρογραφήματος.



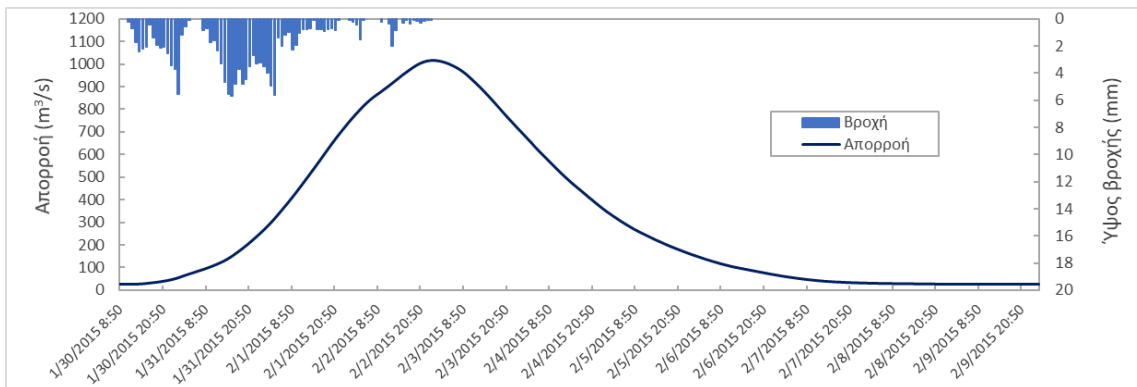
Σχήμα 4.7: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 01/02/2015



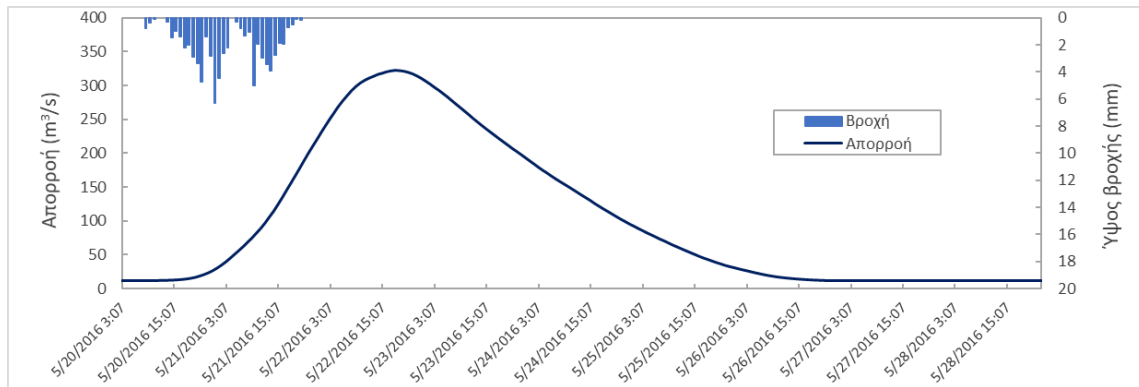
Σχήμα 4.8: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 01/02/2015



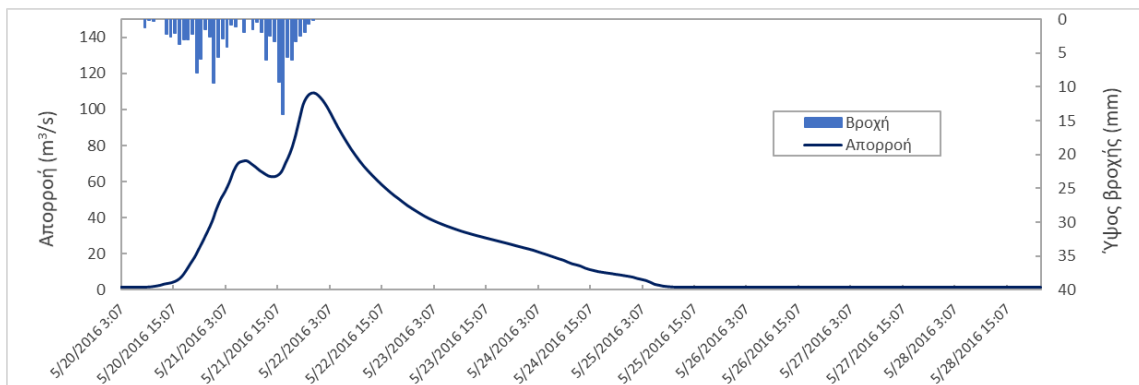
Σχήμα 4.9: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 01/02/2015



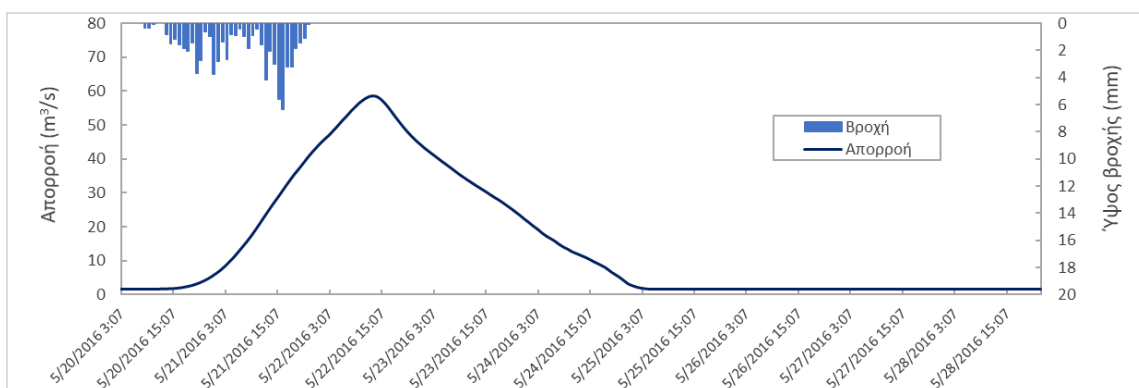
Σχήμα 4.10: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 01/02/2015



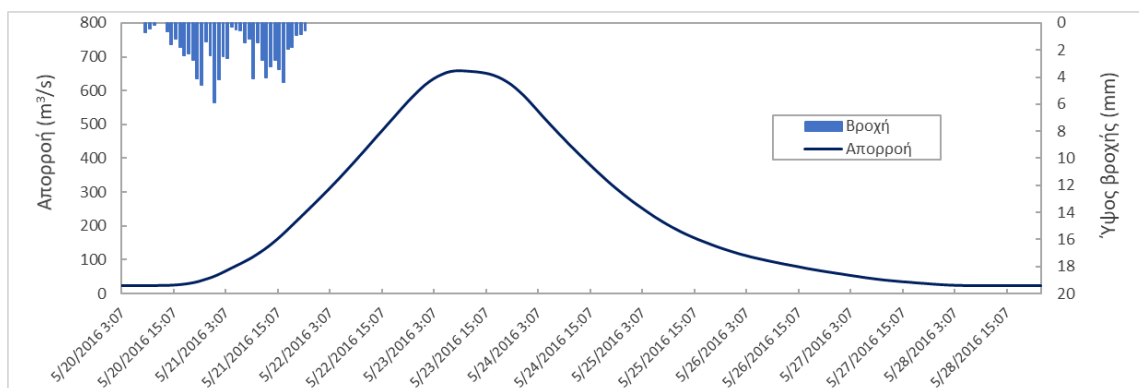
Σχήμα 4.11: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 22/05/2016



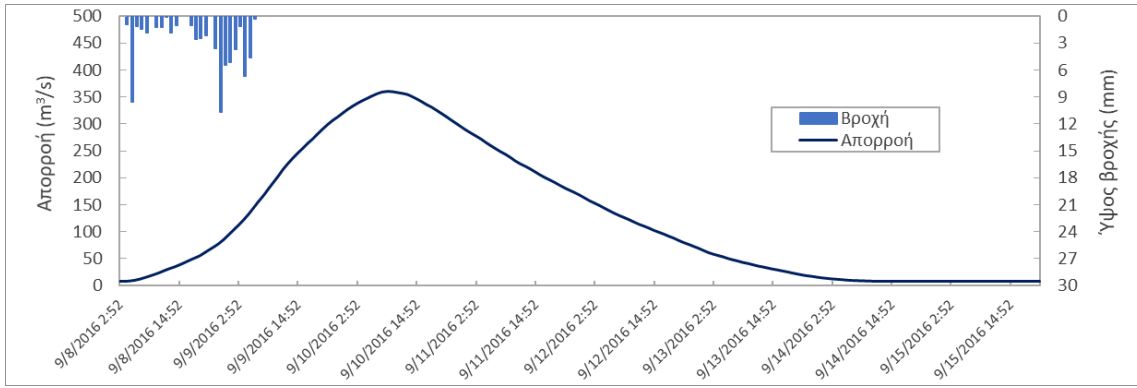
Σχήμα 4.12: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 22/05/2016



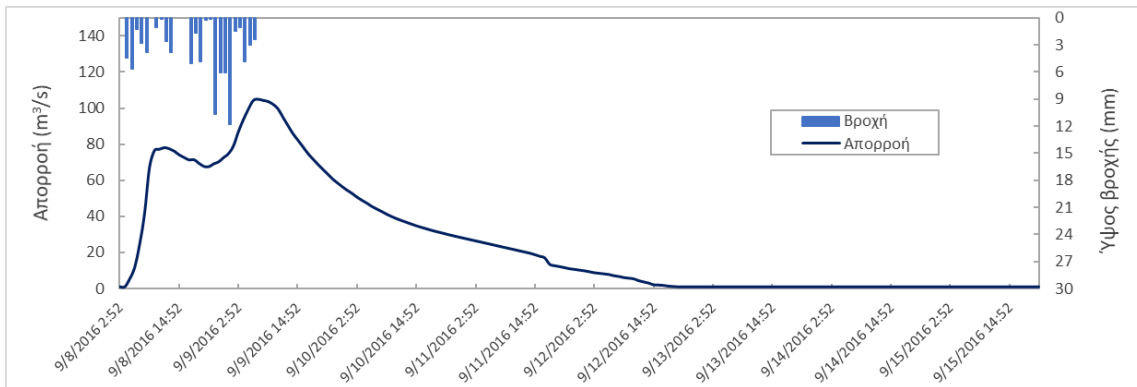
Σχήμα 4.13: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 22/05/2016



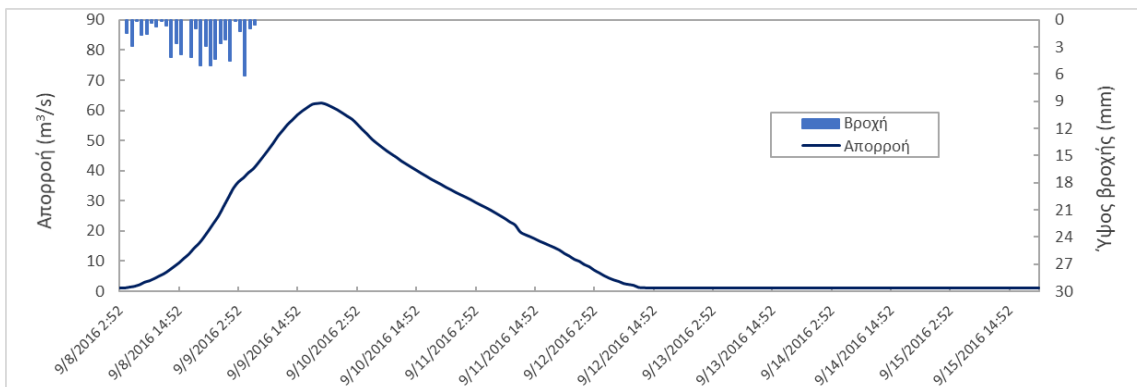
Σχήμα 4.14: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 22/05/2016



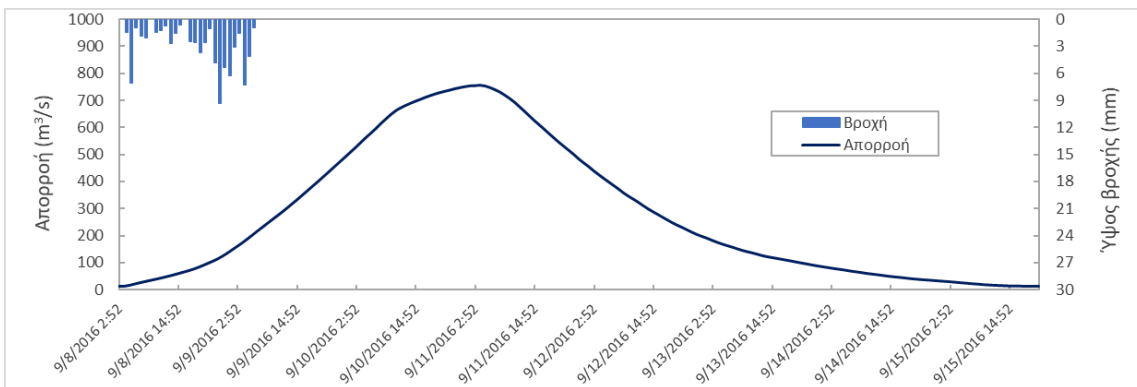
Σχήμα 4.15: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καλαμπάκα για το επεισόδιο 09/09/2016



Σχήμα 4.16: Πλημμυρογράφημα στη θέση Πύλη για το επεισόδιο 09/09/2016



Σχήμα 4.17: Πλημμυρογράφημα στη θέση Μουζάκι για το επεισόδιο 09/09/2016



Σχήμα 4.18: Πλημμυρογράφημα στη θέση ανάντη Νομής για το επεισόδιο 09/09/2016

Αξίζει ακόμη να γίνει αναφορά στο μικρό άλμα που εμφανίζεται στον ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος απορροής που προέκυψε στη θέση Πύλη. Η διακύμανση της παροχής σε αυτό το σημείο προέρχεται από την ύπαρξη συνεχόμενων μηδενικών και σχεδόν μηδενικών ωριαίων παρατηρήσεων βροχής, όπως αποδεικνύεται από το αντίστοιχο υετόγραμμα, οπότε και μειώνεται η απορροή έως να εμφανιστούν και πάλι μη μηδενικές παρατηρήσεις βροχής και η καμπύλη ανόδου να γίνει ξανά αύξουσα συνάρτηση του χρόνου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και σε άλλες λεκάνες όπως αυτή της Καλαμπάκας, ωστόσο δεν είναι εξίσου εμφανές λόγω της μεγάλης διάρκειας απορροής.

4.4 Υδραυλική προσομοίωση

Η υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής πραγματοποιείται για το δυσμενέστερο πλημμυρικό επεισόδιο, το οποίο συνέβη στις 01/02/2015 έπειτα από έντονη βροχόπτωση. Σύμφωνα με στοιχεία των αρμόδιων αρχών και του τοπικού τύπου το εν λόγω επεισόδιο προκάλεσε σοβαρά προβλήματα στις πόλεις των Τρικάλων και της Καρδίτσας. Οι δυσμενείς επιπτώσεις από την υπερχειλίση του Πηνειού ποταμού αφορούσαν κυρίως σε καταστροφές αστικών υποδομών και καλλιεργήσιμων εκτάσεων, αφήνοντας ανεπηρέαστους τους οικισμούς, οι οποίοι απείχαν από τη ζώνη επιρροής της πλημμύρας.

Πιο συγκεκριμένα, στο χωριό Παραπόταμος Τρικάλων το νερό πλησίασε τα πρώτα σπίτια του χωριού και όλο το αγρόκτημα πλημμύρισε. Χαρακτηριστική εικόνα, τα νερά του Πηνειού που οριακά ακούμπησαν το διάζωμα της παλιάς γέφυρας στη θέση Καραβόπορος. Στη γέφυρα του Πορταϊκού ποταμού η στάθμη ανήλθε σε υψηλό επίπεδο θέτοντας σε κίνδυνο κοντινές βιομηχανίες. Επιπλέον, στα Μεγάλα Καλύβια Τρικάλων, χιλιάδες στρέμματα καλλιεργήσιμης γης πλημμύρισαν. Προκλήθηκε, ακόμη, διακοπή της επαρχιακής οδού προς Μαγούλα Καρδίτσας και στο σημείο κατασκευάστηκε πρόχειρο ανάχωμα, το οποίο ακολούθως ενισχύθηκε λόγω περαιτέρω αύξησης της στάθμης από τα νερά του Πάμισου, παραπόταμο του Πηνειού. Παράλληλα, στη γέφυρα του Πηνειού, στα όρια των δύο Νομών, έγινε εγκιβωτισμός αγωγού προκειμένου να μην ξεφύγει η ροή προς το Αγναντερό Καρδίτσας. Τέλος, στο Βαλομάνδρι και τα Ρόγκια, ενισχύθηκε το ανάχωμα, λόγω της συνεχόμενης ανόδου της στάθμης στις περιοχές αυτές. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται τμήμα του Πηνειού ποταμού στα κατάντη της λεκάνης απορροής υπό συνθήκες κανονικής ροής και υπό συνθήκες πλημμύρας, όπως αυτή εκδηλώθηκε την 01/02/2015.

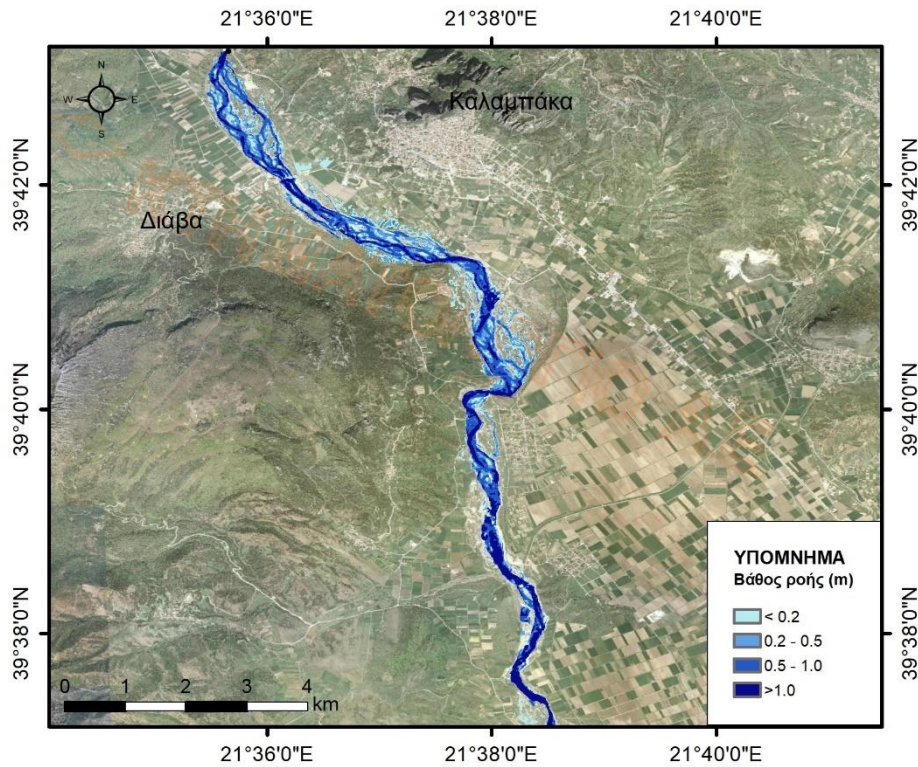


Εικόνα 1: Τμήμα του Πηνειού ποταμού (α) σε συνθήκες κανονικής ροής και (β) σε φαινόμενο πλημμύρας (01/02/2015) (Πηγή: Τύπος)

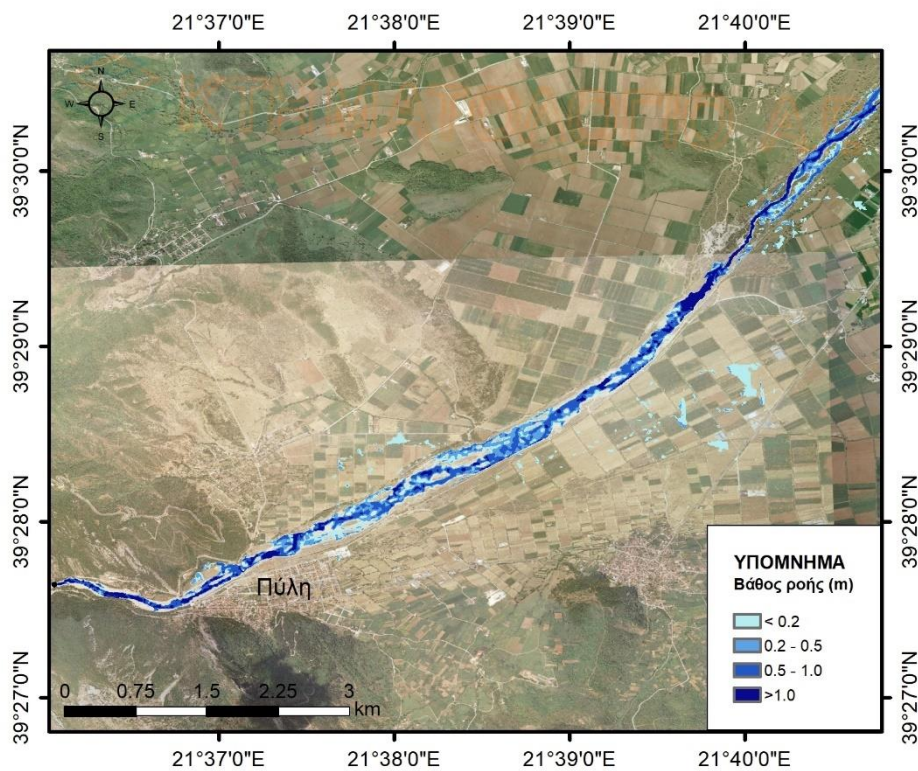
Στα Σχήματα 4.19 – 4.27 φαίνονται οι χάρτες με τις μέγιστες ταχύτητες και τα μέγιστα βάθη ροής, όπως προέκυψαν από την 2D υδραυλική ανάλυση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, για τις τέσσερις θέσεις που μελετήθηκαν και για το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής.

Όπως προέκυψε από την υδραυλική προσομοίωση για την περιοχή κατάντη της Καλαμπάκας, παρατηρείται υπερχειλίση του ποταμού στο ανάντη και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής με αποτέλεσμα την εξάπλωση της ροής στις παρακείμενες αγροτικές εκτάσεις. Τα βάθη, ωστόσο, που αναπτύσσονται λόγω αυτής της ροής είναι σχετικά μικρά, της τάξης των 0.2 m. Αντίθετα, στις περιοχές προσομοίωσης κατάντη της Πύλης και του Μουζακίου δεν παρατηρείται υπερχειλίση του ποταμού. Παράλληλα, όπως φαίνεται στους αντίστοιχους χάρτες, γενικά αναπτύσσονται χαμηλές ταχύτητες ροής με εξαίρεση την περιοχή του κύριου υδατορεύματος, γεγονός που παρατηρείται συστηματικά σε όλες τις περιοχές προσομοίωσης. Οι σχετικά χαμηλές ταχύτητες ροής που προκύπτουν κατά την υδραυλική ανάλυση εξηγούνται λόγω της υψηλής συχνότητας εμφάνισης των εξεταζόμενων επεισοδίων.

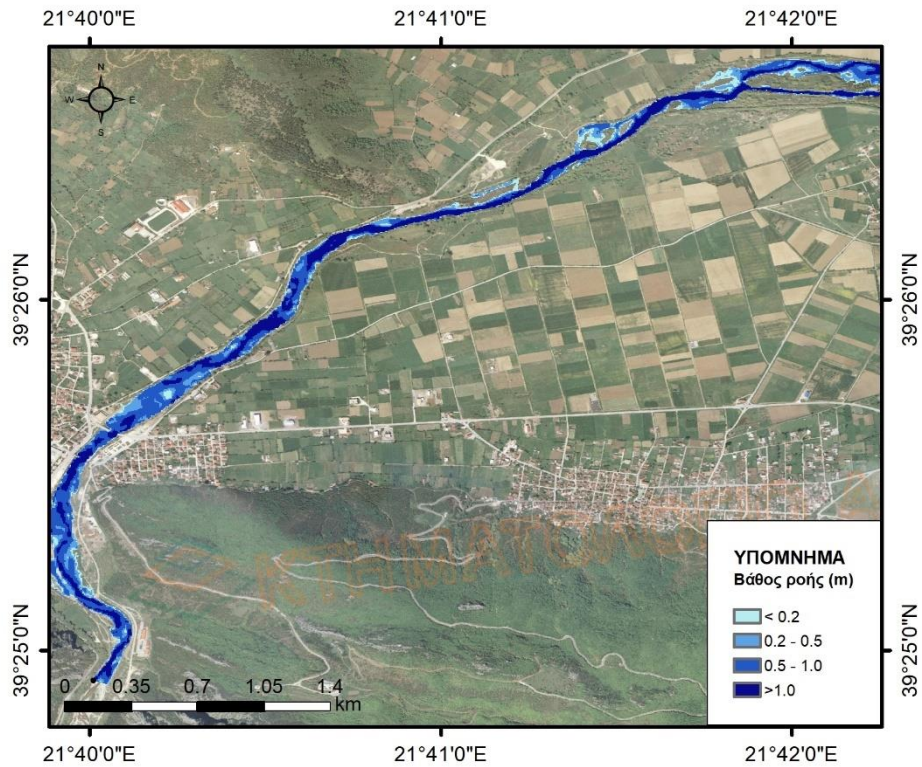
Συμπερασματικά, κατάντη των θέσεων Καλαμπάκας, Πύλης και Μουζακίου η ροή βρίσκεται στο μεγαλύτερο μέρος της εντός της κύριας κοίτης του ρέματος και δεν παρατηρείται εξάπλωση αυτής στις παραποτάμιες περιοχές, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οικισμούς, γεγονός το οποίο επαληθεύεται και από το ιστορικό που περιγράφηκε παραπάνω.



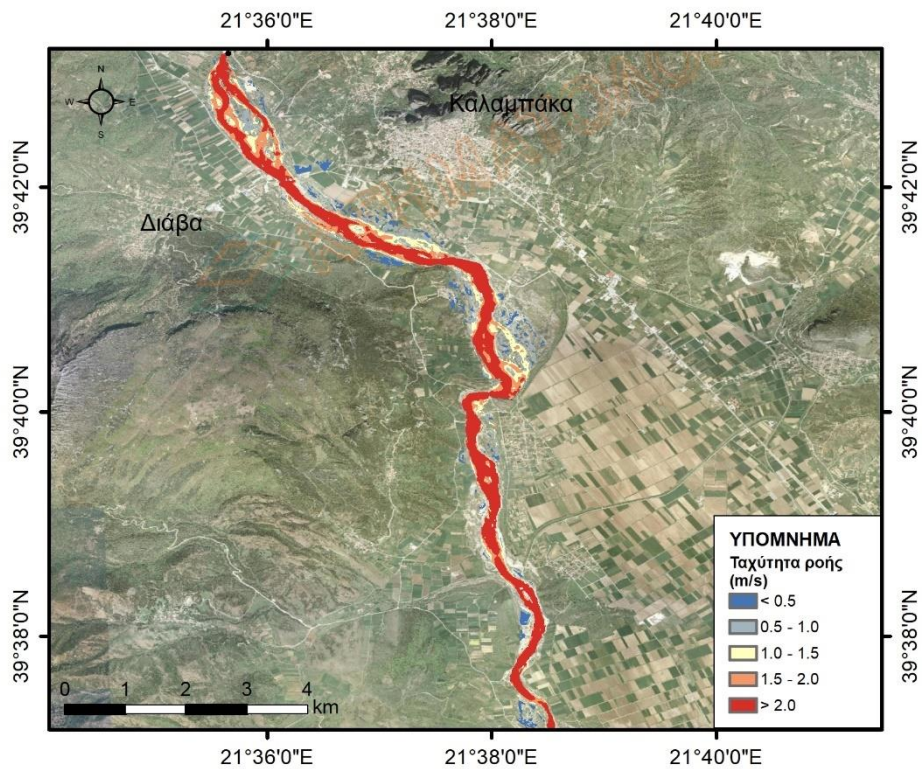
Σχήμα 4.19: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Καλαμπάκας



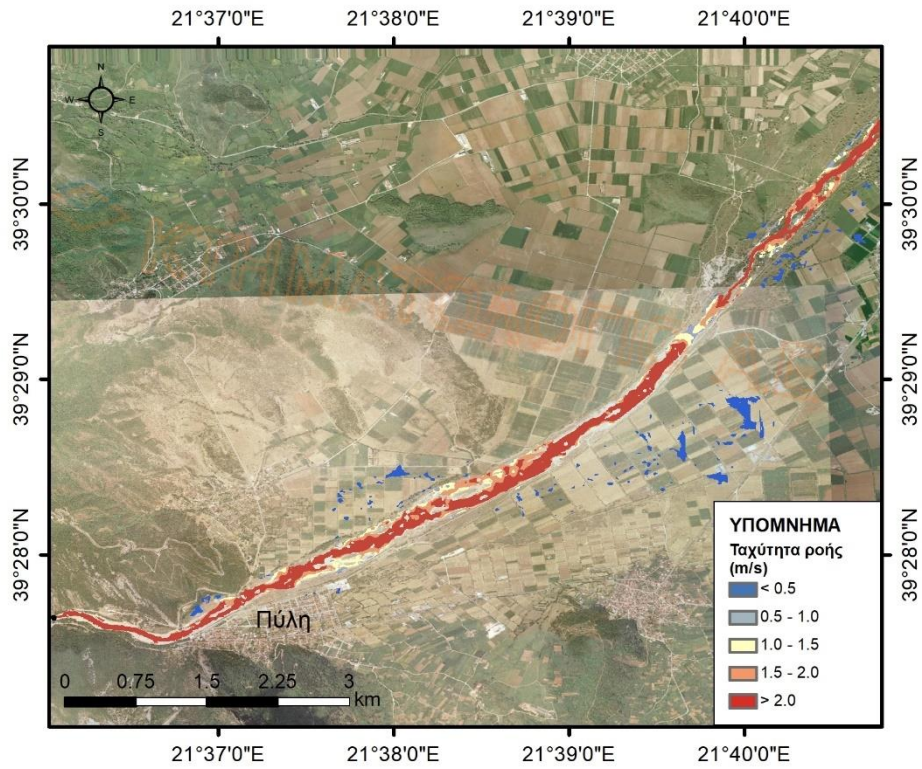
Σχήμα 4.20: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Πύλης



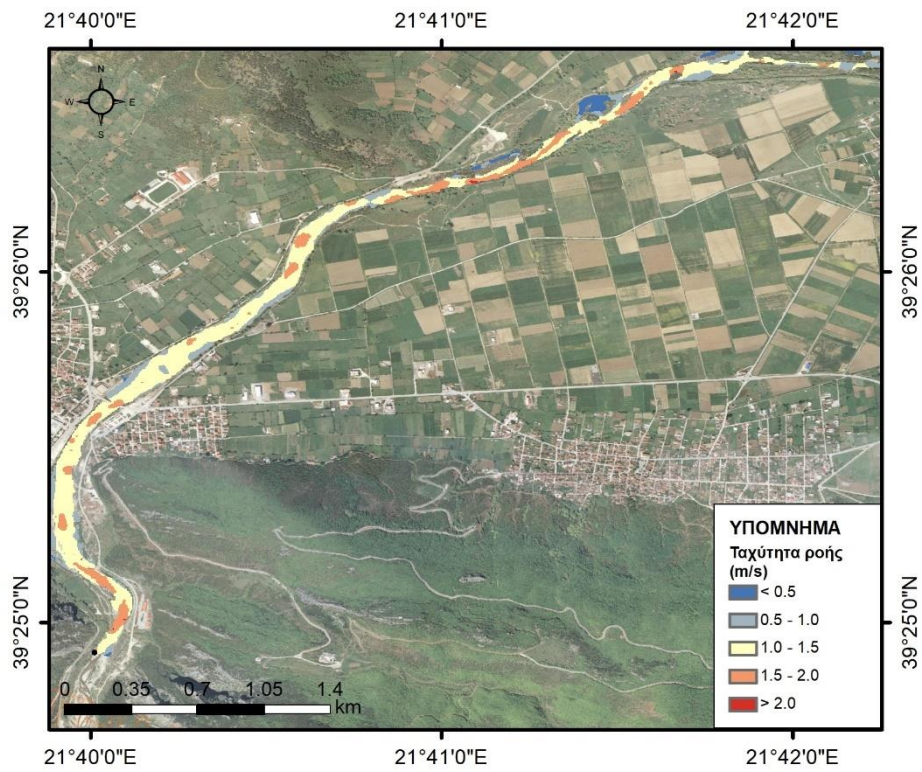
Σχήμα 4.21: : Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Μουζακίου



Σχήμα 4.22: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Καλαμπάκας



Σχήμα 4.23: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Πύλης



Σχήμα 4.24: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας κατάντη της λεκάνης απορροής Μουζακίου

Σχετικά με την υδραυλική προσομοίωση, αξίζει να επισημανθεί η σημασία της ποιότητας των δεδομένων στην εξαγωγή ορθών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η ορθότητα των αποτελεσμάτων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα του DEM καθώς και την ποιότητα των διατομών του υδρογραφικού δικτύου. Ένα αδρό DEM που δεν περιγράφει με ακρίβεια τη διατομή του κύριου υδατορεύματος δύναται να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της ενδεχόμενης αποθηκευτικότητας του νερού εντός της κοίτης και τη δημιουργία μεγάλων πλημμυρικών πεδίων. Ένα εξίσου καθοριστικό για την ποιότητα των αποτελεσμάτων στοιχείο εισόδου στο μοντέλο της υδραυλικής ανάλυσης είναι ο συντελεστής της τραχύτητας των εδαφών (συντελεστής Manning) εντός της περιοχής μελέτης, για τον καθορισμό και τη βαθμονόμηση του οποίου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή.

Η ευαισθησία του μοντέλου στα παραπάνω δεδομένα γίνεται εμφανής στην ανάλυση της περιοχής της Νομής, όπου τόσο η ποιότητα του DEM όσο και ο καθορισμός των συντελεστών τραχύτητας είναι καθοριστικοί, κυρίως στις χαμηλές κλίσεις. Παρά τις διορθωτικές ενέργειες που έγιναν για την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα δεν κρίνονται αρκούντως ικανοποιητικά.

5 Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα

5.1 Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη προσέγγιση του κινδύνου πλημμύρας στη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη, τμήμα της λεκάνης Πηνειού, η οποία ανήκει γεωγραφικά στο βορειοδυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Αρχικά, αναλύθηκε το πρόσφατο ιστορικό πλημμυρών που συνδέεται με την περιοχή, ενώ στη συνέχεια έγινε προσδιορισμός των πλημμυρικά ευάλωτων ζωνών της περιοχής μελέτης με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης και τεχνικών GIS. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων που σχετίζονται με τα επεισόδια πλημμύρας τα οποία έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή μελέτης κατά την τελευταία δεκαετία. Τρία από αυτά αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μοντέλου βροχής – απορροής που υλοποιήθηκε σε επόμενο στάδιο. Ειδικότερα, παράχθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα σε τέσσερις θέσεις του κύριου υδατορεύματος του υδρογραφικού δικτύου π. Πηνειού, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό των αντίστοιχων υδρολογικών λεκανών ανάντη των παραπάνω θέσεων. Συνδυάζοντας το εκάστοτε μοναδιαίο υδρογράφημα αξιοποιώντας την αρχή της αναλογίας και την αρχή της επαλληλίας, με τα δεδομένα βροχής των επιλεγμένων πλημμυρικών επεισοδίων προέκυψε το υδρογράφημα απορροής (πλημμυρογράφημα) της αντίστοιχης λεκάνης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου στην υδραυλική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε κατάντη των θέσεων προσδιορισμού του υδρογραφήματος απορροής, για το δυσμενέστερο επεισόδιο.

5.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε η ολοκληρωμένη διερεύνηση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, Αλή Εφέντη, η οποία χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη γεωμορφολογία που συνδυάζει χαμηλές κλίσεις, εναλλαγή υψομέτρων και μαιανδρική μορφή υδρογραφικού δικτύου. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις που σημειώνονται τακτικά στο δυτικό της τμήμα έχουν διαμορφώσει ένα σημαντικό ιστορικό πλημμυρών που περιλαμβάνει ισχυρά επεισόδια βροχόπτωσης συχνά συνοδευόμενα από καταστροφές σε υποδομές όπως οδικά δίκτυα και τεχνικά έργα, αλλά και σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις η αξιοποίηση των οποίων αποτελεί το βασικό πόρο εισοδήματος για τους κατοίκους της ευρύτερης περιοχής. Επομένως, η διερεύνηση του κινδύνου πλημμύρας στη συγκεκριμένη περιοχή είναι καθοριστικής σημασίας.

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Κατά τη μελέτη του ιστορικού πλημμυρών διαπιστώθηκε ότι οι περισσότερες καταστροφές λόγω πλημμύρας στην περιοχή ενδιαφέροντος αφορούν στις εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης, τις υποδομές και τις οδικές συνδέσεις, προκαλώντας κατ'επέκταση γενικότερα προβλήματα στην εύρυθμη λειτουργία των ευπαθών περιοχών.
- Οι ευάλωτες περιοχές σε πλημμύρα, όπως προέκυψαν από την πολυκριτηριακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, συνδυάζουν χαμηλό υψόμετρο, ήπιες έως μηδενικές κλίσεις, αδιαπέραστες επιφάνειες, καθώς και μαιανδρικής κοίτης υδατορεύματα που ευνοούν την ανάπτυξη στερεοαποθέσεων. Οι κύριες χρήσεις γης σε αυτές τις περιοχές συνδέονται με αγροτικές και γεωργικές δραστηριότητες, καθώς αφορούν στο πλέον πεδινό τμήμα της περιοχής μελέτης.
- Τα αποτελέσματα της υδρομετεωρολογικής ανάλυσης ιστορικών επεισοδίων βροχής στην περιοχή μελέτης καταδεικνύουν ότι τα πλημμυρικά επεισόδια εμφανίζουν έντονη επαναληψιμότητα. Μάλιστα, από την ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων στη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη προέκυψε ότι η πλειονότητα των πρόσφατων καταγεγραμμένων επεισοδίων πλημμύρας αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς μικρότερη του ενός έτους με ορισμένες εξαιρέσεις που αντιπροσωπεύουν πιο ακραία, μικρότερης συχνότητας επεισόδια στην περιοχή.
- Η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών που εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των ΜΥΓ οδήγησε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την πλειονότητα των θέσεων ενδιαφέροντος.
- Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού των υδρολογικών απωλειών παρατηρήθηκε ότι στη λεκάνη ανάντη του οικισμού της Νομής αναπτύσσονται λιγότερες απώλειες τόσο λόγω των χρήσεων γης που επικρατούν και οδηγούν σε αυξημένο αριθμό καμπύλης όσο και των μεγαλύτερων ποσοτήτων κατακρημνισμάτων που δέχεται, συγκριτικά με τις υπόλοιπες λεκάνες.
- Η υδρολογική προσομοίωση με χρήση του μοντέλου βροχής – απορροής που προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών έδειξε ότι η λεκάνη απορροής ανάντη της Νομής εμφανίζει υψηλότερες πλημμυρικές αιχμές και μεγαλύτερους πλημμυρικούς όγκους συγκριτικά με τις λεκάνες της Καλαμπάκας,

της Πύλης και του Μουζακίου, πρωτίστως λόγω της υπεροχής της σε έκταση αλλά και του πεδινού χαρακτήρα της.

- Η περαιτέρω διερεύνηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας μέσω υδραυλικής προσομοίωσης για το δυσμενέστερο ιστορικό επεισόδιο έδειξε πως, για τα συνήθη πλημμυρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή, η ροή βρίσκεται κατά βάση εντός της κύριας κοίτης του τμήματος του ποταμού, όπως ερευνήθηκε σε τρεις θέσεις ενδιαφέροντος (πλησίον Καλαμπάκας, Πύλης και Μουζακίου). Ωστόσο, στην περιοχή κατάντη του οικισμού Νομή, η υδραυλική προσομοίωση για το ίδιο επεισόδιο οδήγησε σε λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω ατελειών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ιδιαίτερα σε περιοχές ηπίων κλίσεων. Παρά τη μειωμένη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και με βάση τις επαναληπτικές προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για τη διόρθωσή τους, έγινε φανερό ότι η συγκεκριμένη περιοχή είναι επιδεκτική σε πλημμύρα. Ειδικότερα, προέκυψε ότι το πλημμυρικό πεδίο εξαπλώνεται και εκτός του ρου του ποταμού, θέτοντας σε κίνδυνο παραποτάμιας και εν γένει παρακείμενες περιοχές, ενώ στην ακτίνα επιρροής της πλημμύρας φαίνεται να εντάσσονται αστικές ζώνες και εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης.

Καταλήγοντας, με βάση την ολοκληρωμένη προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, γίνεται φανερό πως το ενδιαφέρον πρέπει να στραφεί στις κατάντη περιοχές της λεκάνης απορροής, οι οποίες είναι οι πλέον ευάλωτες σε πλημμυρικό συμβάν. Προς την κατεύθυνση αυτή είναι σκόπιμη η περαιτέρω έρευνα που θα οδηγήσει σε συντονισμένη δράση αρχών και πολιτών για την αποτελεσματική πρόληψη και διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου τόσο σε επίπεδο πολεοδομικού σχεδιασμού και μέτρων προστασίας όσο και ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας προτείνεται η επιλογή εναλλακτικών κριτηρίων για τον καθορισμό των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών, καθώς και η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων ταξινόμησης των κλάσεων κινδύνου, ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση των παραπάνω στην τελική εκτίμηση των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών.

Όσον αφορά στην υδρολογική ανάλυση, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σενάρια για τη διερεύνηση της μεταβολής της μορφής του ΜΥΓ με αλλαγή κάποιων χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, όπως με αλλαγή της τιμής που ορίζεται από το χρήστη ως κατώφλι στον

κάναβο συγκέντρωσης ροής. Στο σενάριο μείωσης της τιμής αυτής, δηλαδή αύξησης της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, το παραγόμενο υδρογράφημα αναμένεται να παρουσιάζει υψηλότερη αιχμή, καθώς σημειώνεται έντονη συγκέντρωση ροής λόγω των συχνών συμβολών μεταξύ των ρεμάτων και ταυτόχρονα χαμηλότερο χρόνο συρροής που εξηγείται από το γεγονός ότι το νερό κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε υδάτινη επιφάνεια συγκριτικά με μία χερσαία και στην περίπτωση αυτή υπάρχει πληθώρα υδατορευμάτων που ευνοούν την κίνηση προς την έξοδο. Παράλληλα, προτείνεται η διερεύνηση της ίδιας περίπτωσης μελέτης με εφαρμογή άλλου υδρολογικού μοντέλου αντί του μοναδιαίου υδρογραφήματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Επιπλέον, στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας σχετικής με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι σκόπιμη η εκτέλεση υδραυλικών προσομοιώσεων και για άλλα ιστορικά επεισόδια και σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, καθώς και η προσομοίωση συγκεκριμένων ιστορικών πλημμυρών για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες που θα αποτελέσουν βάση αξιολόγησης. Προτείνεται, τέλος, η διερεύνηση σεναρίων που αφορούν στην πρόληψη των αρνητικών επιπτώσεων της πλημμύρας σε ευάλωτες περιοχές και σχετίζονται με κατασκευαστικά ή μη μέτρα όπως αναχώματα, τεχνητές λεκάνες και λίμνες συγκράτησης ομβρίων, περατά πεζοδρόμια, αστικούς υγροβιότοπους. Η αξιοποίηση υψηλότερης ποιότητας δεδομένων (π.χ. μεγαλύτερη ακρίβεια υψομετρικού υποβάθρου με μικρότερη διάσταση φατνίου) κρίνεται εξίσου σημαντική.

Αναφορές

- Ελληνική Βιβλιογραφία

Αποστολόπουλος, Ι., 2016, *Σύγκριση μεθόδων μοναδιαίου υδρογραφήματος σε λεκάνες απορροής της Κεντρικής Ελλάδας*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Οκτώβριος 2016

Καββαδά, Ο., 2012, *Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα*

Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Φεβρουάριος 2012

Κοινοπραξία Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Κεντρικής & Δυτικής Ελλάδος, 2005α. Έκθεση Επιφανειακής Υδρολογίας, *Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου, Θεσσαλίας και Αττικής: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (08)*, Φάση Α, Τεύχος 08-A-II-1-v2, ΥΠΑΝ, Αθήνα

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., 2016, *Τεχνική Υδρολογία*, 4η έκδ, ημερομηνία προσπέλασης 10 Ιουνίου 2019,

https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/5888/1/00_master_document-KOY.pdf

Μαμάσης, Ν., 2007. Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, ΕΜΠ, Αθήνα

Μαμάσης, Ν., 2014. Πλημμύρες – Υδρολογικές Εφαρμογές με τη χρήση GIS. Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, ΕΜΠ, Αθήνα.

Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012, *Τεχνική Υδρολογία*, 5^η έκδ, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Μπαλτάς, Ε., και Μαμάσης, Ν., 2009. Υδρογραφήματα – Διόδευση – Στερεοπαροχή, Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Τεχνική Υδρολογία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα

Νικολακόπουλος, Κ., Κατσάνου, Κ., Λαμπράκης, Ν., 2015. *Υδρολογία με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και δεδομένων τηλεπισκόπησης*, Αθήνα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, <http://hdl.handle.net/11419/2520>

Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο σύμφωνα με την τροποποίηση ΚΥΑ 177772/924/2017 (ΦΕΚ 2140 Β'/20)

- Παπαζαφειρίου, Ζ., 1983, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. ΑΠΘ, Αθήνα
- Πιπίνη, Μ., 2017, *Διερεύνηση πλημμυρικού κινδύνου σε περιοχή του Ποταμού Καλαμά*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Οκτώβριος 2017
- Σαρχάνη, Σ., 2018, «*Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων υδρολογικής προσομοίωσης πλημμυρικού γεγονότος & προσομοίωσης υδραυλικού κύματος σε μια μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη*», Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα Οκτώβριος 2018
- Χαλκιάς, Χ., Γκούσια, Μ., 2015, *Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής*, 157 σελίδες, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, ημερομηνία προσπέλασης 16 Απριλίου 2019, <http://hdl.handle.net/11419/4547>
- Χριστοφίδης, Α., *Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2008
- Διεθνής Βιβλιογραφία
- Aniya, M., 1985. Landslide-susceptibility mapping in the Amahata river basin, Japan. *Annals of the Association of American Geographers*, 75(1), pp.102-114
- Çelik, H.E., Coskun, G., Cigizoglu, H.K., Ağiralioğlu, N., Aydın, A. and Esin, A.I., 2012. The analysis of 2004 flood on Kozdere Stream in Istanbul. *Natural hazards*, 63(2), pp.461-477
- Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*, 572 pages, McGraw-Hill, 1988
- Clark, C. O., 1945, Storage and the unit hydrograph. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 69, No. 9, pp. 1333-1360), ASCE
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B. and Ginn, T., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water resources research*, 20(6), pp.682-690
- Cronshey, R., 1986. Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, *Soil Conservation Service, Engineering Division*
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994
- Dodgson, J.S., Spackman, M., Pearman, A. and Phillips, L.D., 2009. Multi-criteria analysis: a manual

- Dooge, J.C., 1959. A general theory of the unit hydrograph. *Journal of geophysical research*, 64(2), pp.241-256
- Drobne, S. and Lisec, A., 2009. Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, 33(4). Wilson, E.M., 1990. *Engineering Hydrology*
- Fernández, D.S. and Lutz, M.A., 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), pp.90-98
- Huang, Y., 2005. *Appropriate modeling for integrated flood risk assessment* (p. 176). The Netherlands: University of Twente
- Kia, M.B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A.R., Sulaiman, W.N.A. and Moradi, A., 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(1), pp.251-264
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp.4-16
- Norman, L.M., Huth, H., Levick, L., Shea Burns, I., Phillip Guertin, D., Lara-Valencia, F. and Semmens, D., 2010. Flood hazard awareness and hydrologic modelling at Ambos Nogales, United States–Mexico border. *Journal of Flood Risk Management*, 3(2), pp.151-165
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Zeinivand, H., 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), pp.42-7
- Rincón, D., Khan, U. and Armenakis, C., 2018. Flood risk mapping using GIS and multi-criteria analysis: A greater Toronto area case study. *Geosciences*, 8(8), p.275
- Saghafian, B., Julien, P. and Rajaie, H. 2002, Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), pp.193-203
- Saleh, A., Ghobad, R. and Noredin, R., 2011. Evaluation of HEC-HMS methods in surface runoff simulation (Case study: Kan watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*, pp.1316-1322

- SCS, U., 1972. National engineering handbook. *Hydrology Section*, 4
- Stefanidis, S. and Stathis, D., 2013. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural hazards*, 68(2), pp.569-585
- Stieglitz, M., Rind, D., Famiglietti, J. and Rosenzweig, C., 1997. An efficient approach to modeling the topographic control of surface hydrology for regional and global climate modeling. *Journal of Climate*, 10(1), pp.118-13
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp.913-920
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N., 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504, pp.69-79
- USACE, 1994, Engineering and Design, *Flood - runoff analysis*, Engineer Manual, viewed 3 June 2019
- USACE, HEC-RAS River Analysis System, User's Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, 2016
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, U.S. Government Printing Office, Denver, CO, 1977
- Viessman, W., Knapp, J. and Lewis, G.L., 1977, *Introduction to Hydrology*, IEP-Dun-Donnelley
- Διαδικτυακές Πηγές
- Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, ημερομηνία προσπέλασης: 05/07/2019, <https://www.civilprotection.gr/el/%CF%80%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%BC%CF%8D%CF%81%CE%B5%CF%82> Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ημερομηνία προσπέλασης: 05/07/2019 <https://floods.ypeka.gr/>
- Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων Λεκάνης Απορροής π.Πηνειού Α. ΦΥΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ, ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, 2006
- METEO, ημερομηνία προσπέλασης: 05/05/2019, <http://stratus.meteo.noa.gr/front>
- Τουριστική αγορά Επιμελητηρίου Τρικάλων, ημερομηνία προσπέλασης 10/04/2019, <http://www.meteorabooking.gr/trikala/tourism/articles/article.jsp?context=1504&categoryid=17384>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ημερομηνία προσπέλασης: 20/06/2019,
<https://floods.ypeka.gr/>