



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΤΟ
ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ**

Μαρίνα Δεβελέκου

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

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vi
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	xiv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
Introduction.....	xvi
Thesis Outline	xvi
Materials and Methods	xvi
Study area.....	xvi
Data used.....	xvii
Multicriteria Analysis.....	xvii
Hydrological Analysis.....	xxii
Hydraulic Simulation	xxiv
Results and discussion.....	xxv
Multicriteria Analysis.....	xxv
Hydrological Analysis.....	xxvi
Hydraulic Simulation	xxx
Conclusions.....	xxxii
Selected References	xxxiv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.1.1 Η πλημμύρα ως φυσική καταστροφή.....	1
1.1.2 Διακινδύνευση και επικινδυνότητα πλημμυρών.....	2
1.1.3 Νομικό πλαίσιο – Η Οδηγία 2007/60.....	3
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	8
2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	8
2.1.1 Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	8
2.1.2 Γεωλογία και Υδρογεωλογία	13
2.1.3 Κλιματικά στοιχεία	14
2.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	18
2.2.1 Διοικητική δομή	18
2.2.2 Πληθυσμός	18
2.2.3 Οικονομία.....	19

2.2.4 Χρήσεις γης.....	21
2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ.....	23
2.3.1 Ιστορικές πλημμύρες και ΖΔΥΚ.....	23
2.3.2 Μηχανισμοί πλημμύρας στην περιοχή μελέτης	25
2.3.3 Παρατηρήσεις επί των ληφθέντων αντιπλημμυρικών μέτρων στην περιοχή μελέτης.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	28
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	28
3.1.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών – Λογισμικό Arc-GIS.....	28
3.1.2 Λογισμικό HEC – RAS.....	29
3.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	32
3.2.1 Υδρογραφικό δίκτυο	32
3.2.2 Λεκάνες και υπολεκάνες απορροής.....	34
3.3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	34
3.3.1 Πολυκριτηριακή ανάλυση και Σ.Γ.Π.	34
3.3.2 Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process – AHP)	35
3.3.3 Ανάλυση δομής προβλήματος	38
3.3.4 Επιλογή κριτηρίων.....	39
3.3.4 Υλοποίηση και σύνθεση κριτηρίων.....	42
3.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	48
3.4.1 Επιλογή και εξαγωγή υπολεκανών για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης	48
3.4.2 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος	49
3.4.3 Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	50
3.4.4 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder	53
3.4.5 Μέθοδος Αδιάστατου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος SCS.....	55
3.4.6 Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS	56
3.5 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	59
3.5.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	59
3.5.2 Υδραυλική προσομοίωση σε θέσεις ενδιαφέροντος.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	66
4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	66
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	68
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	80

5.1 ΣΥΝΟΨΗ.....	80
5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	80
5.3 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	82
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	84

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Ανδρικοπούλου, 2019).....	5
Σχήμα 2.1: Μορφολογικά χαρακτηριστικά του ΥΔ Κρήτης (ΕΛ13) (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας και Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).....	8
Σχήμα 2.2: Λεκάνες απορροής στην περιοχή μελέτης και όμοροι Δήμοι κατά Καλλικράτη (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	9
Σχήμα 2.3: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Γαζανού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	10
Σχήμα 2.4: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Ξεροπόταμου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	11
Σχήμα 2.5: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Γιόφυρου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	12
Σχήμα 2.6: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Κατσαμπαδιανού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	13
Σχήμα 2.7: Ελάχιστη, μέση και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία)	15
Σχήμα 2.8: Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) και μέσες μέρες βροχής στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία).....	16
Σχήμα 2.9: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (Kt) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία).....	17
Σχήμα 2.10: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία (%) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία).....	17
Σχήμα 2.11: Πληθυσμός ανά Π.Ε. της Κρήτης (Δεδομένα από απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2011, ίδια επεξεργασία).....	18
Σχήμα 2.12: Πληθυσμός ανά Δήμο στην Π.Ε. Ηρακλείου Κρήτης (Δεδομένα από απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2011, ίδια επεξεργασία)	19
Σχήμα 2.13: Εξέλιξη πληθυσμού μέσα στις δεκαετίες για το νομό Ηρακλείου, την Περιφέρεια Κρήτης και το σύνολο της χώρας (Δεδομένα από ΕΛ.ΣΤΑΤ., ίδια επεξεργασία)	19
Σχήμα 2.14: Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine στην περιοχή μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)	21

Σχήμα 2.15: Ποσοστιαία κατανομή κάλυψης γης κατά Corine 2012 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	22
Σχήμα 2.16: Ιστορικό πλημμυρών στο βόρειο τμήμα της Π.Ε. Ηρακλείου και Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου (δεδομένα από greka.gr, ίδια επεξεργασία)	23
Σχήμα 2.17: Υποσκαφή πασσαλότοιχου (αριστερά) και πλημμύρα εγκαταστάσεων ΒΙΟΚΑ Ηρακλείου (δεξιά) ως αποτέλεσμα της πλημμύρας στις 13/01/2015 (Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018)	25
Σχήμα 3.1: Συστατικά στοιχεία ενός Σ.Γ.Π. (Κάβουρας κ.α., 2016, ίδια επεξεργασία)	28
Σχήμα 3.2: Χαρτογράφηση της παγκόσμιας εξάπλωσης της πανδημίας COVID-19 μέσω συστημάτων web-GIS. Το στιγμιότυπο λήφθηκε στις 2 Απριλίου 2020.	29
Σχήμα 3.3: Επεξήγηση κανάβου διεύθυνσης ροής (Πηγή: Τσούλος κ.α. (2015), ίδια επεξεργασία)	32
Σχήμα 3.4: Επεξήγηση κανάβου συγκεντρωτικής ροής (Πηγή: pro.arcgis.com)	33
Σχήμα 3.5: Ανάλυση δομής προβλήματος (Πηγή: ίδια επεξεργασία)	39
Σχήμα 3.6: Μονοκριτηριακή πλημμυρική επιδεκτικότητα για τα πέντε εξεταζόμενα κριτήρια κατόπιν τυποποίησής τους (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	44
Σχήμα 3.7: Σενάρια πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	45
Σχήμα 3.8: Κατανομή κοινωνικής και οικονομικής τρωτότητας στην περιοχή μελέτης ..	47
Σχήμα 3.9: Χάρτης τρωτότητας της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	47
Σχήμα 3.10: Σημεία προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης και χάραξη υπολεκανών για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης	49
Σχήμα 3.11: Υλοποίηση μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)	51
Σχήμα 3.12: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018)	55
Σχήμα 3.13: Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της SCS (Πηγή: www.nrcs.usda.gov)	56
Σχήμα 3.14: Υετογράφημα με χρήση της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ για T=100 χρόνια και d=12h	58
Σχήμα 3.15: Υπολεκάνη του Γιόφυρου στο περιβάλλον HEC - HMS	59
Σχήμα 3.16: Λεκάνη Γαζανού στο περιβάλλον RAS – Mapper του HEC - RAS	61
Σχήμα 3.17: Λεκάνη Γαζανού στο περιβάλλον Geometry Data Editor του HEC - RAS	62

Σχήμα 3.18: Ορισμός συνοριακών συνθηκών στον Unsteady Flow Data Editor του HEC - RAS.....	63
Σχήμα 3.19: Εισαγωγή πλημμυρογραφήματος ως ανάντη συνοριακή συνθήκη στο Unsteady Flow Data Editor του HEC - RAS.....	64
Σχήμα 3.20: Το περιβάλλον του Unsteady Flow Analysis Editor του HEC – RAS.....	65
Σχήμα 4.1: Χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης για τρία διαφορετικά σενάρια πολυκριτηριακής ανάλυσης.	67
Σχήμα 4.2: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Γαζανού με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	68
Σχήμα 4.3: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Ξεροπόταμου με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	68
Σχήμα 4.4: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Γιόφυρου με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	69
Σχήμα 4.5: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Κατσαμπαδιανού με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	69
Σχήμα 4.6: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Γαζανού	70
Σχήμα 4.7: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Ξεροπόταμου	71
Σχήμα 4.8: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Γιόφυρου.....	71
Σχήμα 4.9: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Κατσαμπαδιανού	72
Σχήμα 4.10: Κατηγορίες χρήσης γης κατά Corine 2012 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)	73
Σχήμα 4.11: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γαζανού.....	75
Σχήμα 4.12: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γαζανού.....	75
Σχήμα 4.13: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ρέματος Ξεροπόταμου	76
Σχήμα 4.14: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ρέματος Ξεροπόταμου	76
Σχήμα 4.15: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γιόφυρου	77
Σχήμα 4.16: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ποταμού Γιόφυρου	77
Σχήμα 4.17: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ρέματος Κατσαμπαδιανού.....	78
Σχήμα 4.18: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ρέματος Κατσαμπαδιανού	78

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά στοιχεία για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης.....	9
Πίνακας 2.2: Κατανομή σε κατηγορίες χρήσης γης ανά λεκάνη απορροής	22
Πίνακας 2.3: Ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή μελέτης (Δεδομένα από Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018, ίδια επεξεργασία).....	24
Πίνακας 3.1: Θεμελιώδης κλίμακα σύγκρισης ζευγών (Saaty, 1977)(Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	36
Πίνακας 3.2: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 1)	40
Πίνακας 3.3: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 2)	41
Πίνακας 3.4: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 3)	41
Πίνακας 3.5: Συντελεστής αδιαπερατότητας για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine	42
Πίνακας 3.6: Συντελεστής οικονομικής τρωτότητας για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine.....	46
Πίνακας 3.7: Τοπογραφικά στοιχεία για τις υπολεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης	48
Πίνακας 3.8: Συντελεστής τραχύτητας k100 για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine (Δεδομένα από Καββαδά, 2012, ίδια επεξεργασία).....	52
Πίνακας 3.9: Δεδομένα εισόδου για την υδρολογική ανάλυση των υπολεκανών για τα υδρολογικά μοντέλα του ΜΥΓ κατά Snyder και SCS	57
Πίνακας 3.10: Παράμετροι όμβριας Καμπύλης Σταθμού Ηρακλείου.....	58
Πίνακας 3.11: Τιμές συντελεστή n Manning για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine (Δεδομένα από Huang, 2005, ίδια επεξεργασία).....	60
Πίνακας 3.12: Χαρακτηριστικά υδραυλικής ανάλυσης για τα τμήματα του υδρογραφικού των τεσσάρων λεκανών απορροής της περιοχής μελέτης	62
Πίνακας 4.1: Μονάδα ειδικής απορροής σε μονάδες για τις τέσσερις υπολεκάνες με βάση τις παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων και με χρήση τριών μοντέλων βροχής- απορροής.....	73

LIST OF FIGURES

Figure 1: Digital Elevation Model and stream network of the study area	xvii
Figure 2: Problem structure.....	xix
Figure 3: Standardized criteria.....	xx
Figure 4: Standardized aspects of Vulnerability	xxi
Figure 5: Three scenarios of flood hazard	xxi
Figure 6: Total Vulnerability map	xxii
Figure 7: Production of Unit Hydrograph using time-area method	xxiii
Figure 8: Design precipitation based on Alternating Block Method	xxiii
Figure 9: Simulation points and subbasins of the study area.....	xxiv
Figure 10: Risk maps for three different scenarios.....	xxvi
Figure 11: Unit Hydrograph of Gazanos subbasin calculated using Time-Area method	xxvii
Figure 12: Unit Hydrograph of Kseropotamos subbasin calculated using Time-Area method	xxvii
Figure 13: Unit Hydrograph of Giofiros subbasin calculated using Time-Area method.	xxvii
Figure 14: Unit Hydrograph of Katsabadianos subbasin calculated using Time-Area method	xxviii
Figure 15: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Gazanos basin	xxviii
Figure 16: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Kseropotamos basin.....	xxix
Figure 17: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Giofiros basin	xxix
Figure 18: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Katsabadianos basin.....	xxix
Figure 19: Maximum depth and velocity of Gazanos floodplain.....	xxxi
Figure 20: Maximum depth and velocity of Kseropotamos floodplain.....	xxxi
Figure 21: Maximum depth and velocity of Giofiros floodplain.....	xxxi
Figure 22: Maximum depth and velocity of Katsabadianos floodplain.....	xxxii

LIST OF TABLES

Table 1: Topographic characteristics of each basin of the study area	xvii
Table 2: Square pairwise comparison matrix and final weights of the criteria (scenario 1)	xix
Table 3: Scale for pairwise comparison (Saaty, 1977)	xix
Table 4: Topographic characteristics of the four subbasins	xxiv
Table 5: Specific flow rate of the four subbasins.....	xxx

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχάς τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγησή του, τις επισημάνσεις σε καίρια σημεία της εργασίας, αλλά και για όλη τη γνώση που μου μετέδωσε συνολικά μέσω αυτού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Τσιχριντζή Καθηγητή της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και τον κ. Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στην κ. Αιμιλία Θεοχάρη, Υποψήφια Διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη συνεχή υποστήριξή της, το χρόνο που διέθεσε και συνολικά τη συμβολή της, η οποία ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι μου στάθηκαν και με υπέμειναν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πλημμύρες αποτελούν την πιο συχνή και δαπανηρή φυσική καταστροφή για τις περισσότερες χώρες του κόσμου. Το φυσικό αυτό φαινόμενο δεν μπορεί να αποτραπεί πλήρως, παρόλα αυτά επιβάλλεται η κατάστρωση διαχειριστικών σχεδίων για την πρόληψη και την προστασία από πλημμύρες.

Η περιοχή μελέτης της εργασίας εκτείνεται στο βόρειο τμήμα της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου Κρήτης. Πρόκειται για τέσσερις λεκάνες απορροής οι οποίες αντιστοιχούν στα υδατορεύματα του Γαζανού, Ξεροπόταμου, Γιόφυρου και Κατσαμπαδιανού με έκταση 180, 49, 184 και 42 km² αντίστοιχα.

Στόχος της εργασίας είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης. Το πρώτο μέρος της μεθοδολογίας που υιοθετήθηκε χρησιμοποιεί εργαλεία πολυκριτηριακής ανάλυσης για τον εντοπισμό των περιοχών με υψηλή επιδεκτικότητα σε πλημμύρες, αναλύοντας τόσο τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης για την εκτίμηση της επικινδυνότητας όσο και χαρακτηριστικά τα οποία αφορούν στον πληθυσμό και την οικονομία για την ποσοτικοποίηση της κοινωνικής και οικονομικής συνιστώσας της τρωτότητας. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται υδρολογική ανάλυση με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών για την εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος το οποίο θα εφαρμοστεί για την προσομοίωση του μηχανισμού βροχής – απορροής σε τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος. Το τρίτο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει υδραυλική προσομοίωση στις θέσεις αυτές με χρήση του λογισμικού HEC-RAS για την εκτίμηση της έκτασης του πλημμυρικού πεδίου, το βάθος και την ταχύτητα ροής σε αυτό.

Η μεθοδολογία οδηγεί σε ικανοποιητική αναγνώριση των πλημμυρικών πεδίων, όπως απαιτείται στα πλαίσια της διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης. Στα πλεονεκτήματά της ανήκουν αφενός το γεγονός ότι για την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται δεδομένα στα οποία υπάρχει εύκολη πρόσβαση ή παράγονται επίσης με απλό τρόπο και αφετέρου η προσπάθεια απόδοσης της τρωτότητας και μάλιστα σε διπλό επίπεδο, τόσο κοινωνικό όσο και οικονομικό. Το τελευταίο στοιχείο βρίσκεται σε σύμπνοια με τη λογική της Οδηγίας 2007/60, η οποία προκρίνει τη συμπερίληψη των δυνητικών συνεπειών στα Σχέδια Διαχείρισης πλημμυρών.

Λέξεις – κλειδιά: Πλημμύρα, πλημμυρικός κίνδυνος, ισόχρονες καμπύλες, πολυκριτηριακή ανάλυση, GIS, HEC-RAS, Κρήτη, Ηράκλειο, Γαζανός, Γιόφυρος, Ξεροπόταμος, Κατσαμπαδιανός

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The increase in damage due to natural disasters is related to the number of people who live and work in the affected areas and where their property is accumulated (Hanak & Korytarova, 2014), while river flooding is reportedly the most widespread and savage natural disaster, affecting most countries around the globe (Zwenzner & Voigt, 2008). These natural phenomena may be impossible to prevent, but at the same time it is essential that measures are being taken to protect both human lives and activities that could be set at stake. In this context, 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 carry out a preliminary assessment, so that river basins and associated coastal areas that are at risk of flooding are identified. For such zones, flood risk maps should be drawn up and flood risk management plans should be established, with a view to avoiding and reducing the adverse impacts of floods.

The scope of this thesis is assessing flood risk in the river basins of north-western Heraklion. In the first part of the thesis, a GIS-based spatial multicriteria analysis is conducted in order to identify the flood prone areas. Given the areas that are at risk of flooding, hydrological analysis is performed on the unit hydrograph theory that is applied to simulate rainfall – runoff process in four subbasins. The third part of the thesis includes the hydraulic simulation using HEC-RAS software. The adopted methodology results in the identification of the floodplains, as required for the integrated flood risk management, forecasting and mitigation that is within the frame of future research.

Thesis Outline

The thesis is structured in 5 chapters with the following content:

Chapter 1: Introduction

Chapter 2: Study area presentation

Chapter 3: Methodology

Chapter 4: Results

Chapter 5: Conclusions

Materials and Methods

Study area

The study area consists of four subbasins (Gazanos, Kseropotamos, Giofiros and Katsabadianos eastbound) which are located at the northwestern part of the prefecture of Heraklion. It is located between the longitude 24°54'E - 25°11'E and the latitude 35°6'N - 35°21'N. The study area covers an area of about 456 km². Elevation ranges from 0 to 1859 m with a mean elevation of 427 m. In regard with the precipitation depth, the mean annual rainfall is approximately 485 mm. The predominant land cover types according to Corine Land Cover classification (2012) is olive groves (31.6%) and vineyards (20.9%). Topographic characteristics of each basin separately are depicted in Table 1.

Table 1: Topographic characteristics of each basin of the study area

	<i>Gazanós basin</i>	<i>Kseropotamos basin</i>	<i>Giofiros basin</i>	<i>Katsabadianos basin</i>
<i>Area (km²)</i>	181	49	184	42
<i>Maximum elevation (m)</i>	1859	1778	915	811
<i>Minimum elevation (m)</i>	0	0	0	4
<i>Mean elevation (m)</i>	549	478	331	264
<i>Mean slope (°)</i>	20	20	17	14

Data used

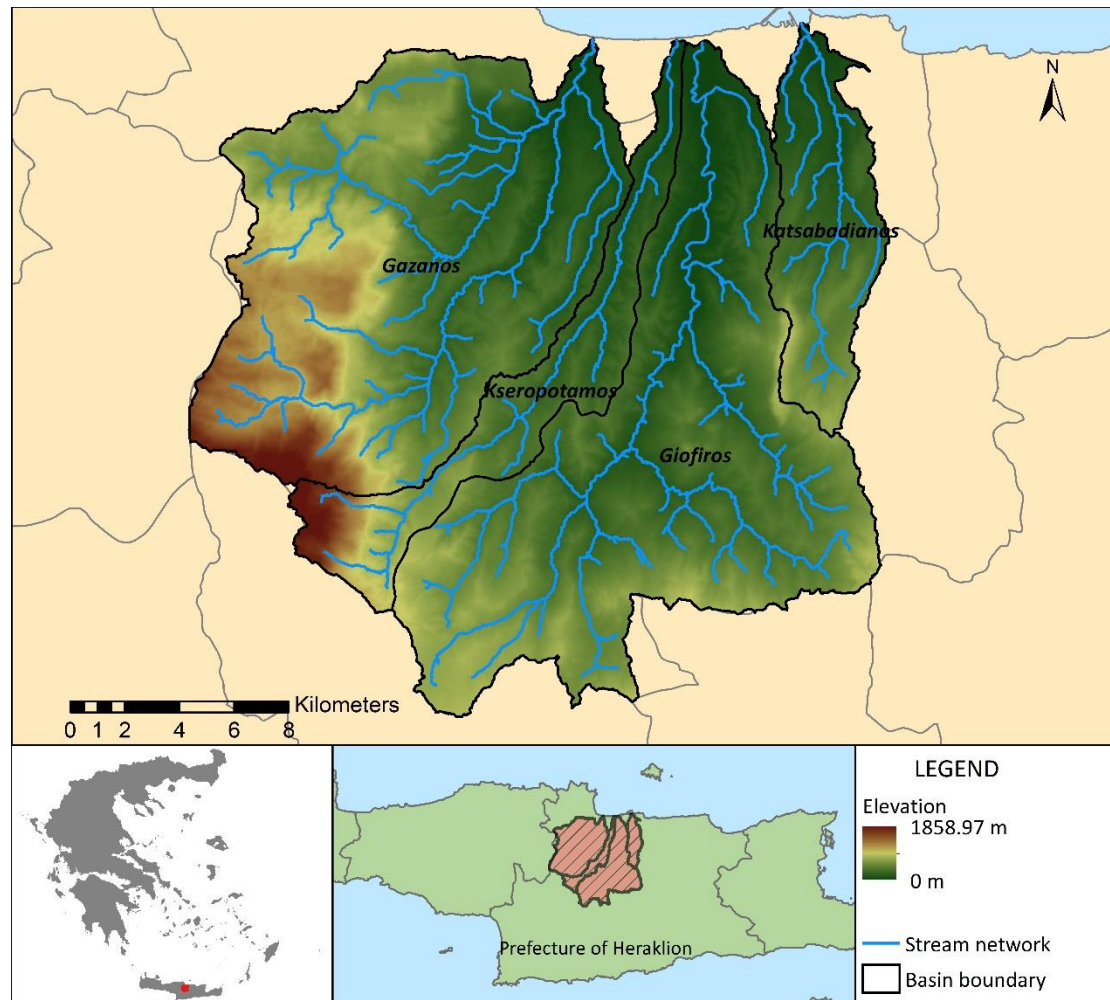


Figure 1: Digital Elevation Model and stream network of the study area

The datasets on 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. The DEM (Figure 1) was provided by the National Cadaster 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.

Multicriteria Analysis

A GIS-based spatial multicriteria analysis method has been implemented for the identification of the potentially flood prone areas. Multi-Criteria Analysis (MCA) is a useful

tool that is used to analyse a series of alternatives using several different criteria with a view to ranking them from the most preferable to the least preferable one. In this method, instead of different alternatives it is space itself that is being evaluated based on its susceptibility to flooding. The MCA method applied is Analytical Hierarchy Process (AHP). In AHP the decision-making process is based on analyzing the problem structure and dividing the problem into parts, which may be further divided to form a hierarchy of issues. Such a hierarchical ordering can often help to simplify the problem and make it more understandable for the decision maker. The adopted method can be described through the following steps:

1. Deconstructing the problem and building a hierarchical order. This is when criteria are being carefully selected so that the studied phenomenon is properly described.
2. Spatial representation of each criterion using GIS.
3. Creating the pairwise comparison matrix – Consistency Ratio – Calculation of the weights of the criteria.
4. Building and organizing all necessary spatial datasets in GIS.
5. Calculation of weighted criteria.
6. Overlaying all weighted criteria.
7. Overview of the results – Sensitivity analysis.

Flood risk can be expressed as the synthesis of two factors: flood hazard and vulnerability. Flood hazard can be represented using five different criteria: Elevation, Slope, Imperviousness, Rainfall and Distance to stream. Vulnerability is also considered using two different aspects: social and economic. The complete problem structure is illustrated in Figure 2.

Each criterion shall obtain a different weight after using the AHP MCA method, based on the pairwise comparison of all criteria. The process is depicted in Table 2. The pairwise comparison is based on the fundamental comparison scale introduced by Saaty in 1977 (Table 3). The resulting weighting factors were verified with the Consistency Ratio approach (CR) according to which, CR should not overcome 10%.

The process is repeated two more times which results in a total of three different scenarios, representing different points of view. The above-mentioned method is only applied to the criteria of which flood hazard consists, even though it could also be applied to the aspects of vulnerability (for example in case the environmental aspect was taken into account, resulting in more than two criteria).

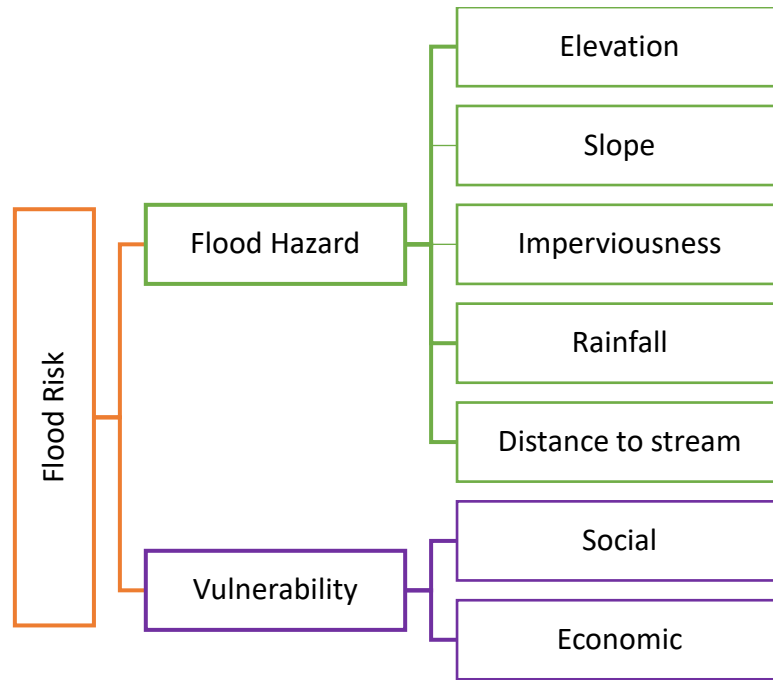


Figure 2: Problem structure

Table 2: Square pairwise comparison matrix and final weights of the criteria (scenario 1)

	RAINFALL	SLOPE	IMPERVIOUSNESS	ELEVATION	DISTANCE	W_i
RAINFALL	1	1/4	1/6	1	1/4	0.058
SLOPE	4	1	1	7	1/2	0.258
IMPERVIOUSNESS	6	1	1	6	2	0.350
ELEVATION	1	1/7	1/6	1	1/6	0.049
DISTANCE	4	2	1/2	6	1	0.285

Table 3: Scale for pairwise comparison (Saaty, 1977)

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

All derived features have the same spatial resolution (5x5 m cell size) and were calculated as standardized criteria within the scale from zero to one, indicating low to high susceptibility to floods, respectively.

Figures 3 and 4 present the selected criteria and their standardized spatial distribution over the study area regarding flood hazard and vulnerability, respectively.

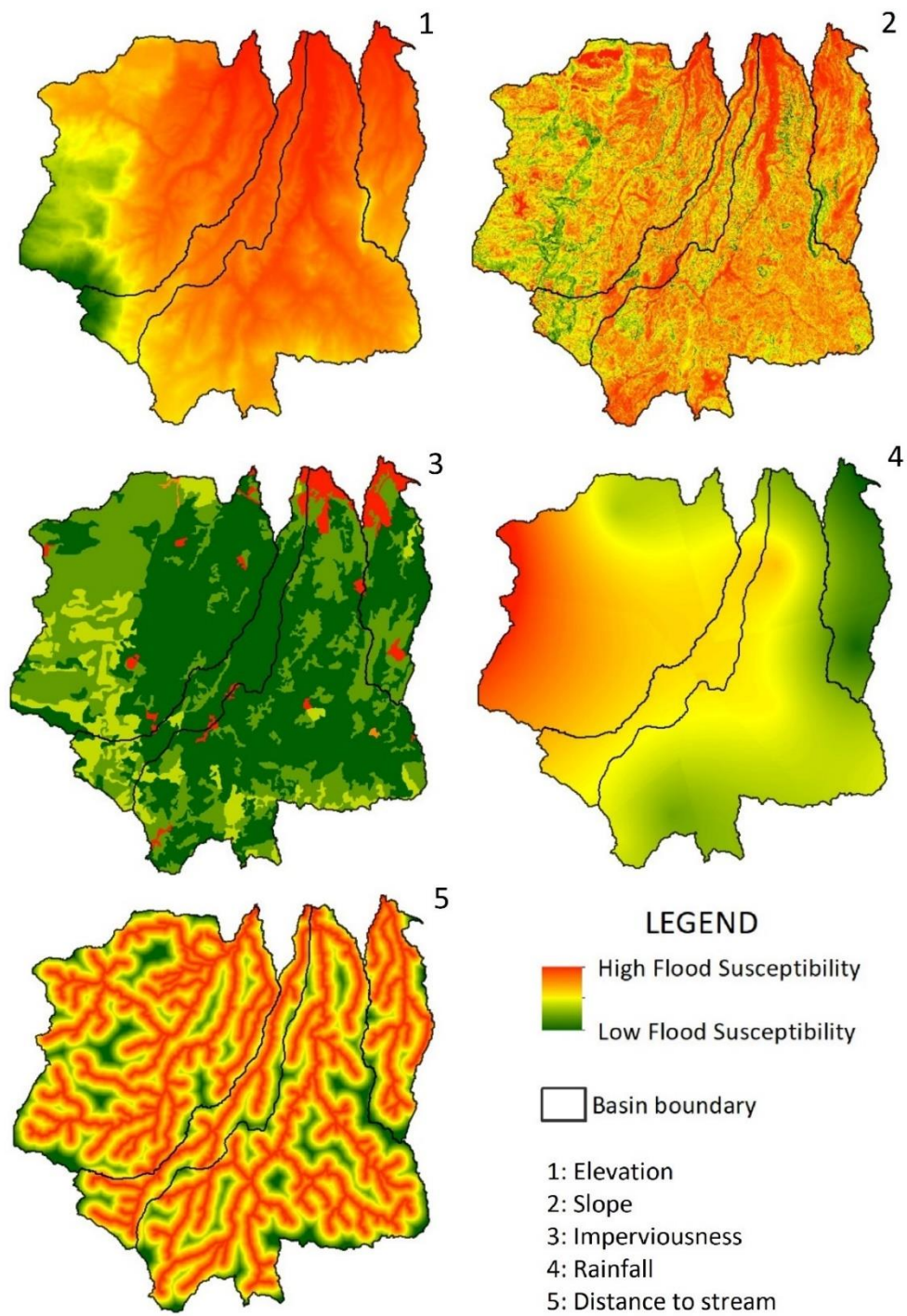


Figure 3: Standardized criteria

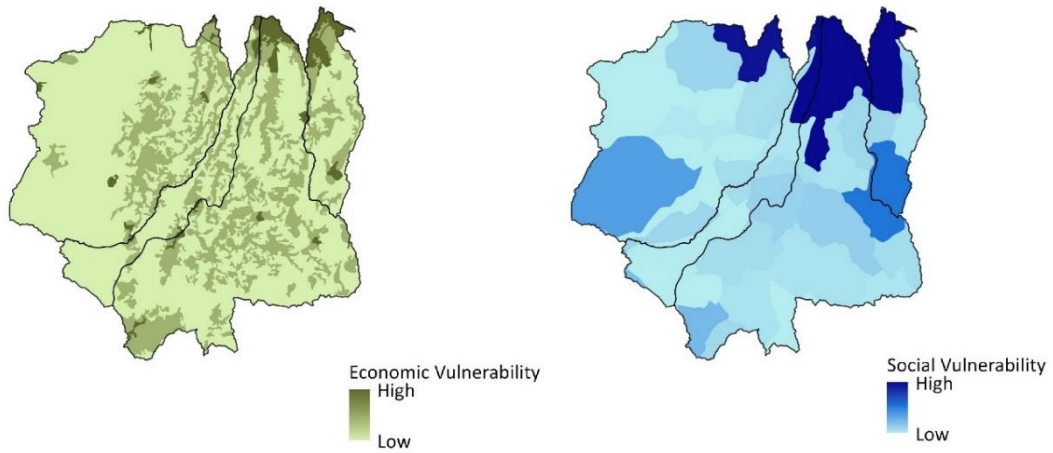


Figure 4: Standardized aspects of Vulnerability

Figure 5 and Figure 6 depict the three different scenarios of flood hazard and total vulnerability, respectively.

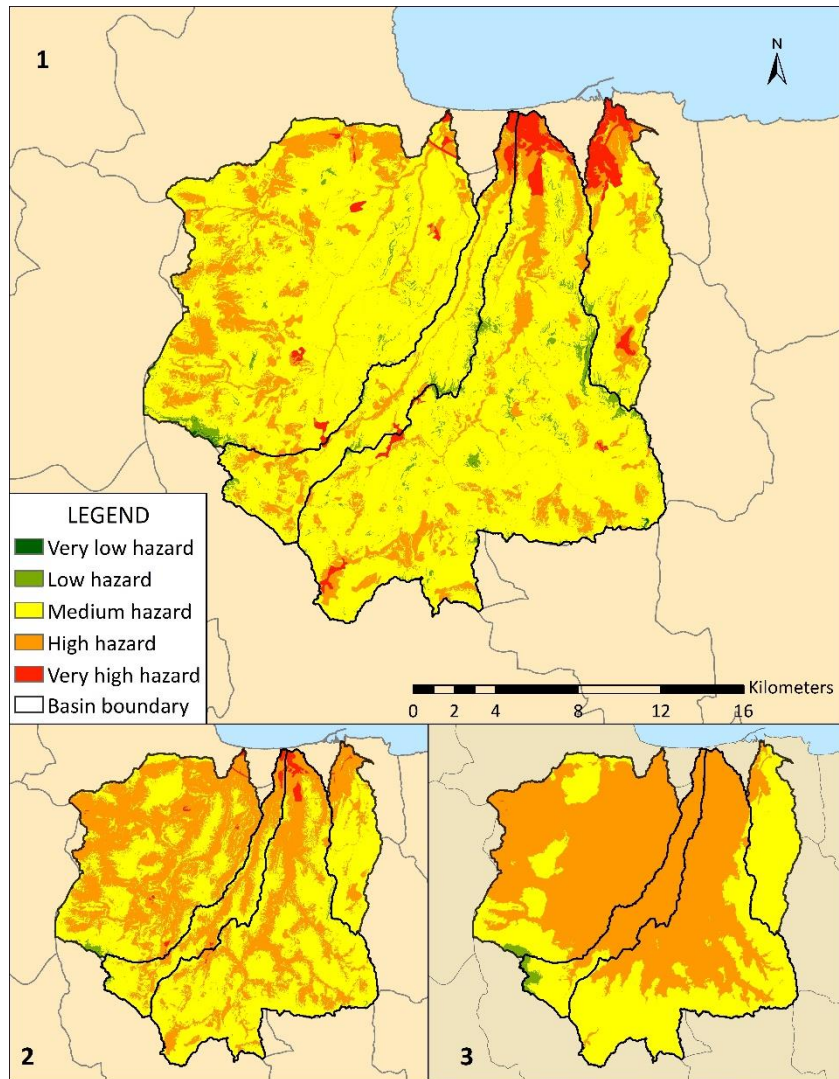


Figure 5: Three scenarios of flood hazard

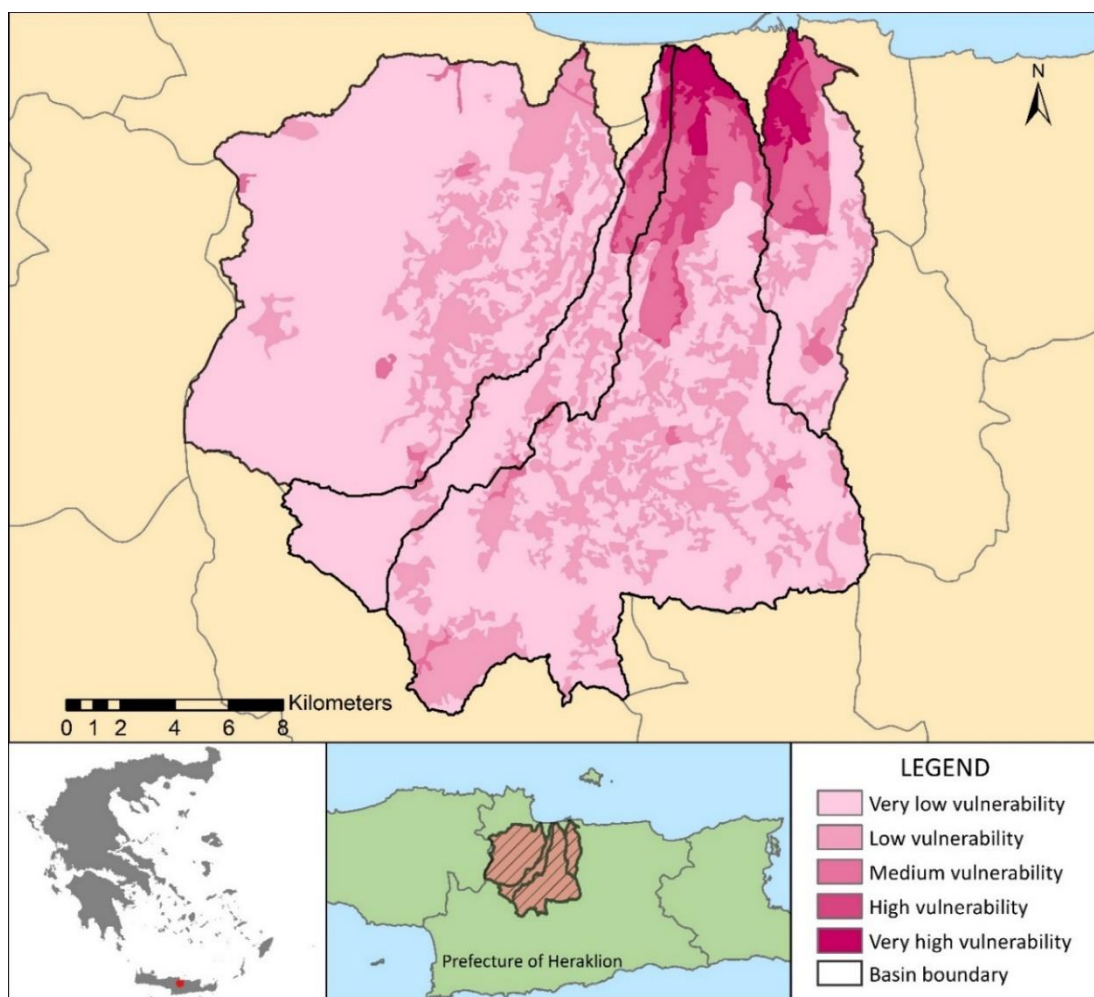


Figure 6: Total Vulnerability map

Hydrological Analysis

The hydrological analysis 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.

The time-area methods are based on the recognition of the importance of the time distribution of rainfall on runoff (Singh, 1992). The basic idea of such methods is the time-area histogram, which represents the distribution of partial watershed areas contributing to runoff at the basin outlet as function of travel time. These areas are bounded by isochrones curves. An “isochrone” is a contour that joins those areas over the watershed that are of the same travel time to the basin outlet. The isochrones cannot cross one another, they cannot close and can only originate or terminate on the watershed boundary (Singh, 1992).

The flow chart of the adopted method is depicted in Figure 7.

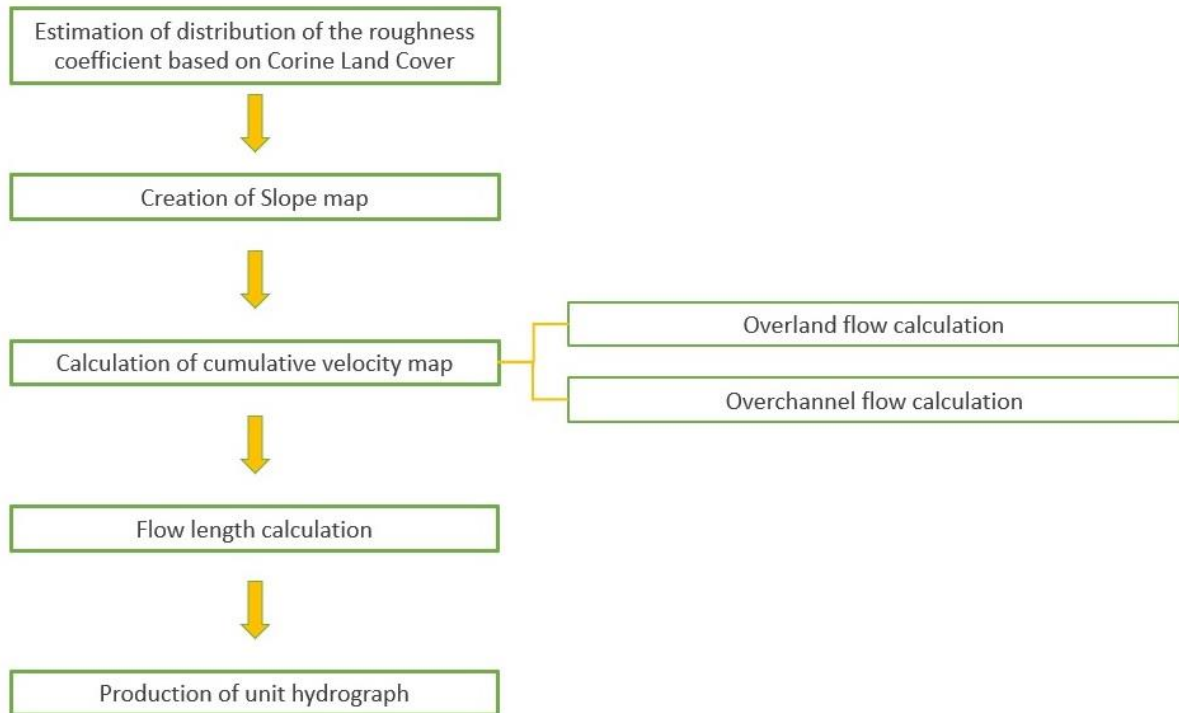


Figure 7: Production of Unit Hydrograph using time-area method

Rainfall data are required to estimate the discharge at the outlet of the basin, hence create a flood hydrograph. For that purpose, the intensity-duration-frequency (IDF) curves are applied using a return period of 100 years and duration of precipitation of 12 hours. The distribution of the precipitation applied is being calculated using the Alternating Block Method. Time distribution is an important factor that can affect the results of the rainfall-runoff analysis (Na & Yoo, 2018). The applied design precipitation is presented in Figure 8.

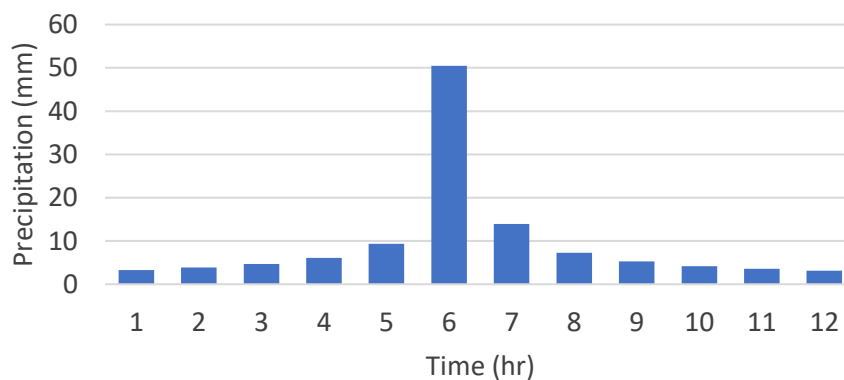


Figure 8: Design precipitation based on Alternating Block Method

Spatial data (i.e. DEM and stream network) as well as the Unit Hydrograph of each subbasin and the design precipitation are imported into HEC-HMS for the completion of the hydrological analysis. Hydrological losses are assumed to be constant (3 mm/hr). Other than the Unit Hydrograph, another two methods are being applied: Snyder Synthetic Unit Hydrograph and SCS Unit Hydrograph, for comparison purposes. The final

products of the process are three flood hydrographs for each subbasin. The topographic characteristics of the subbasins are presented in Table 4. The subbasins and the simulation points are depicted in Figure 9.

Table 4: Topographic characteristics of the four subbasins

	<i>Gazanos subbasin</i>	<i>Kseropotamos subbasin</i>	<i>Giofiros subbasin</i>	<i>Katsabadianos subbasin</i>
<i>Area (km²)</i>	75	41	169	32
<i>Maximum elevation (m)</i>	1859	1778	915	811
<i>Minimum elevation (m)</i>	48	86	18	35
<i>Mean elevation (m)</i>	747	562	352	315
<i>Mean slope (°)</i>	23	21	17	16

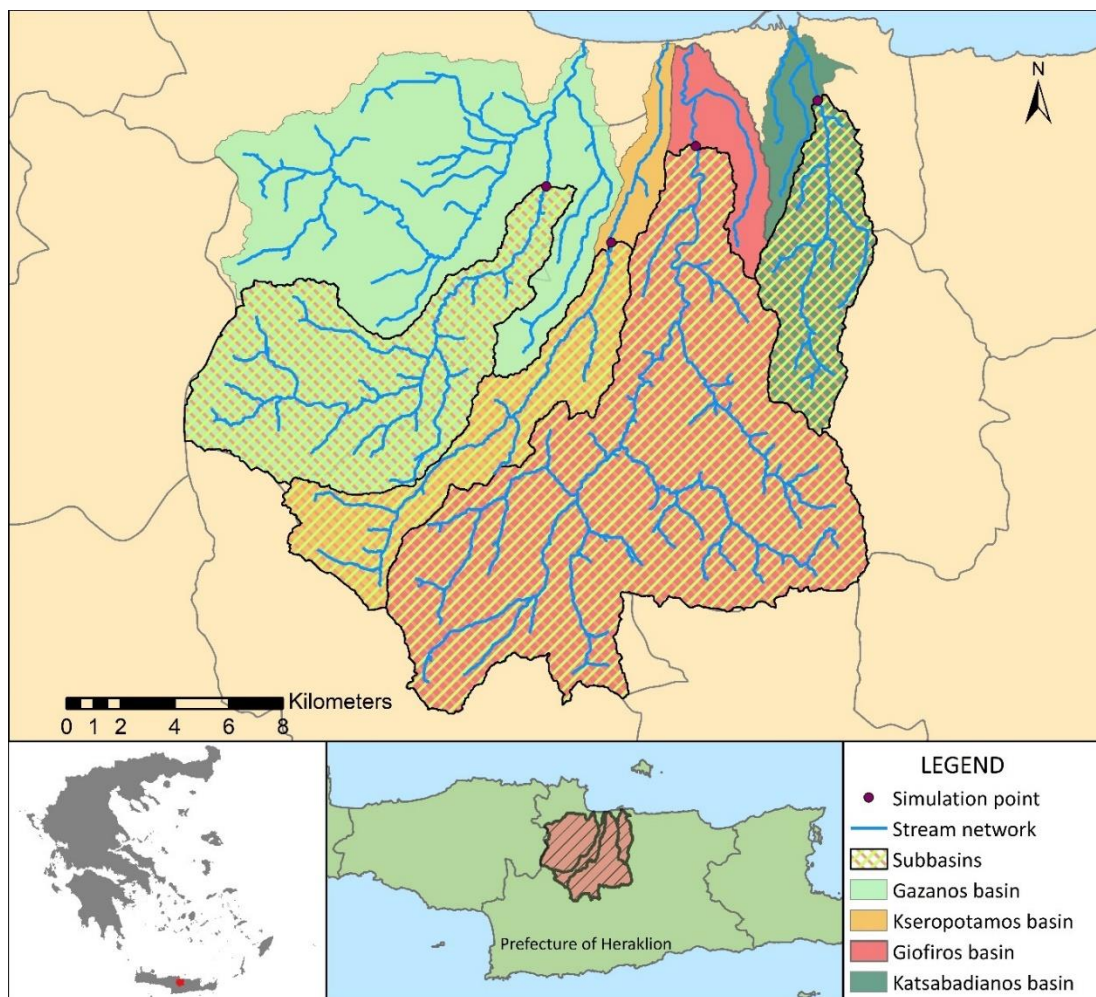


Figure 9: Simulation points and subbasins of the study area

Hydraulic Simulation

Hydraulic simulation is conducted in four positions within the initial study area, each one belonging to one of the four basins consisting the study area. The area upstream of the simulation point is the object of the hydrological analysis. Downstream of all four simulation points a 2D hydrodynamic unsteady analysis is conducted using HEC-RAS 5.0.7. HEC – RAS is a free hydraulic model which can also be used for one-dimensional steady

and unsteady flow hydraulic computations. Regarding unsteady flow computations, Saint-Venant Equations' numerical solution is approximated using an implicit finite difference approach through the computational Box Scheme (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

The terrain, the stream network and the land use are imported. The terrain was defined by the Digital Elevation Model of 5x5 m pixel size resolution and the land use layer is based on the Corine Land Cover (2012) shapefile, in order to integrate Manning's roughness coefficient. As an upper boundary condition, the corresponding flood hydrograph is imported, calculated using the Time-Area method in a previous stage. Finally, maps for the maximum depth and maximum velocity are produced for the resulting floodplain area.

Results and discussion

Multicriteria Analysis

The first part of the adopted methodology consists on the application of an MCA method in order to define the areas that are prone to flooding based on the topography of the study area. Three different scenarios are being constructed expressing different possible points of view, so that the subjectivity of the process is evaluated.

The products of this process are three flood risk maps, that are depicted in Figure 10.

According to all three maps, the parts of all basins that are downstream on the north have higher flood risk. This is a logical result, concerning the susceptibility to flooding of the northern parts (low elevation, low slopes, high imperviousness due to urban land cover and high vulnerability both economically and socially, because of the activities developed). Regarding the area on the south and especially the south-west part of the study area on the foothills of Psiloritis mountain, that has the lowest flood risk over the examined area. That can be explained by the fact that even though the rainfall is extremely high at this zone, all other criteria contribute to a low flood risk evaluation (high elevation, high slopes, low imperviousness as a result of the vegetation and low vulnerability both economically and socially). A few small areas posing as an exception to that description belong to discontinuous urban fabric according to Corine Land Cover (2012) and have a high risk rating mainly because of high vulnerability and imperviousness.

The three risk maps are not profoundly different from one another, as a result of the fact that they consist on two parts, hazard and vulnerability and the latter is only once calculated. In other words, all maps are 50% the same. That means that the risk maps are an insufficient tool for the evaluation of the subjectivity of the adopted MCA method, whereas hazard maps could be more useful.

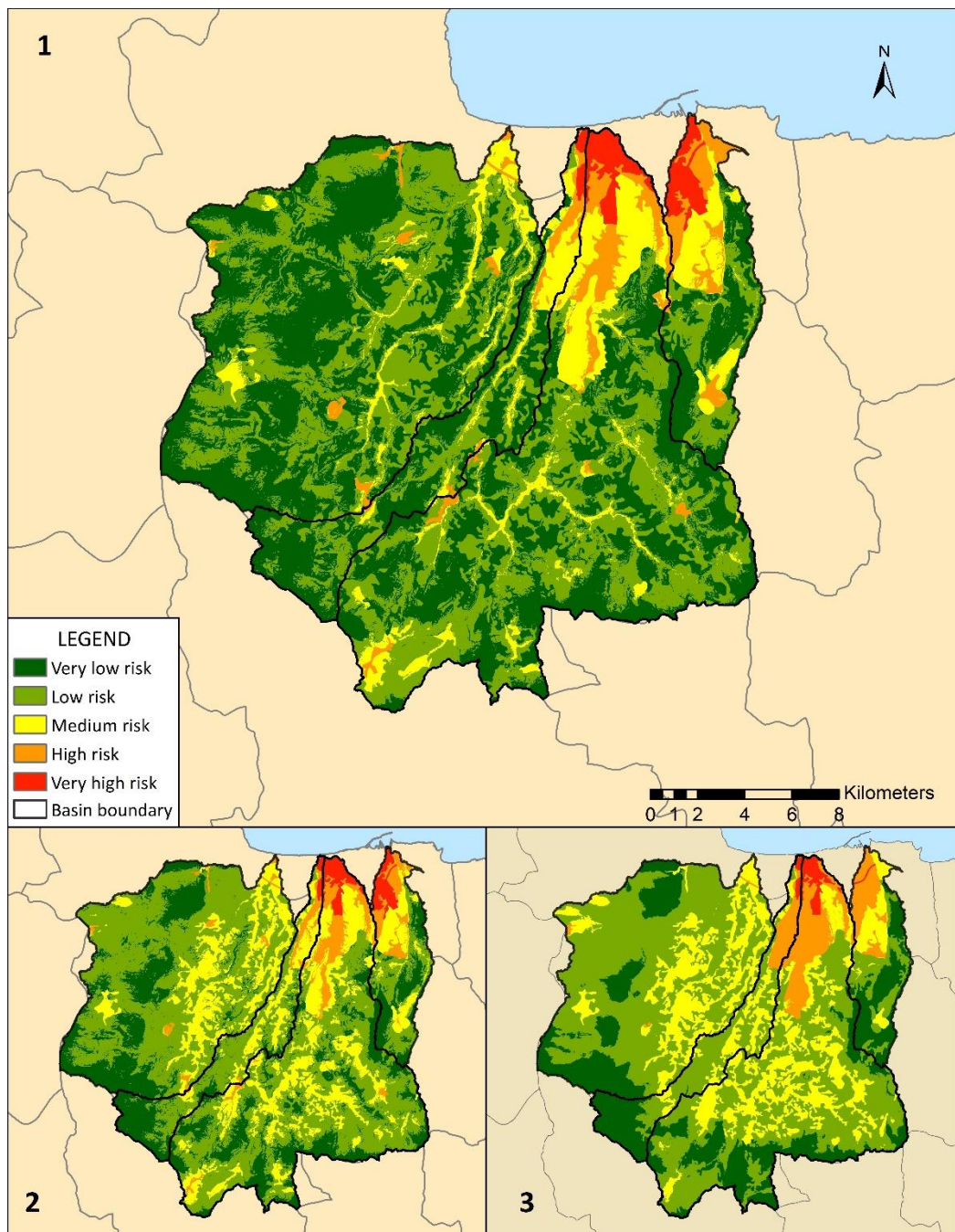


Figure 10: Risk maps for three different scenarios

Hydrological Analysis

Time-area method is applied on each subbasin, hence four Unit Hydrographs are produced and depicted in Figures 11 to 14.

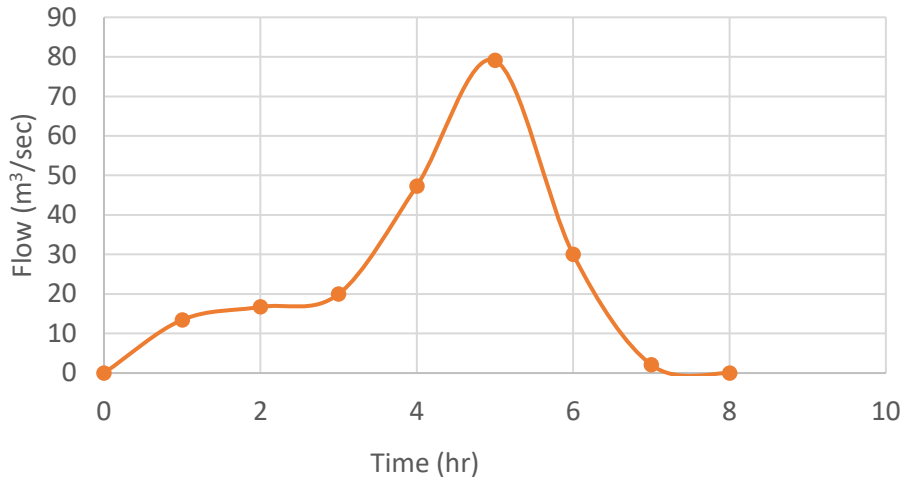


Figure 11: Unit Hydrograph of Gazanos subbasin calculated using Time-Area method

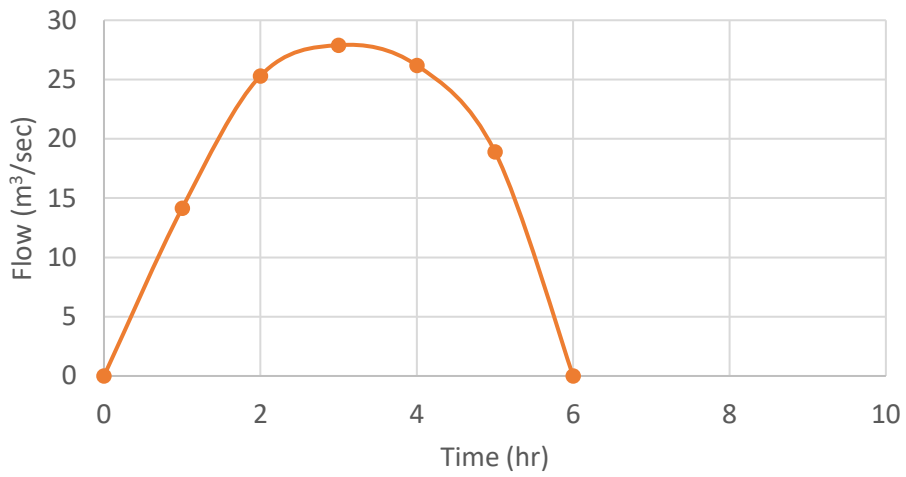


Figure 12: Unit Hydrograph of Kseropotamos subbasin calculated using Time-Area method

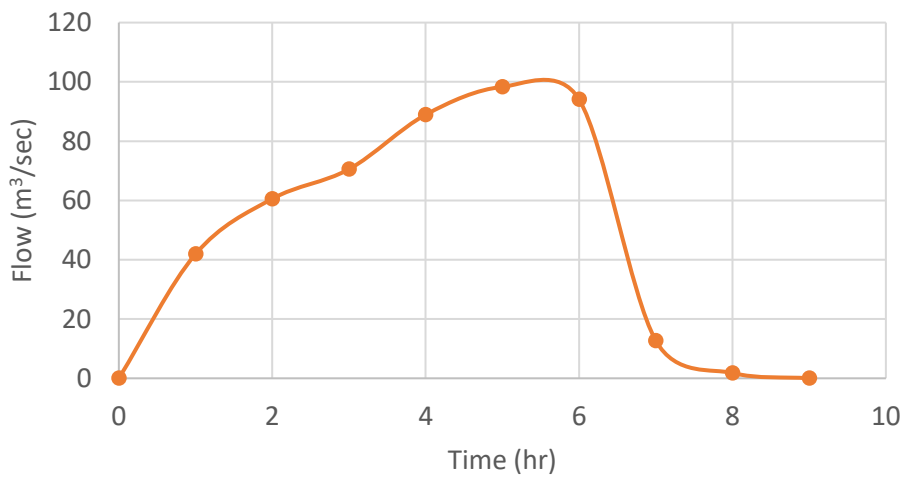


Figure 13: Unit Hydrograph of Giofiros subbasin calculated using Time-Area method

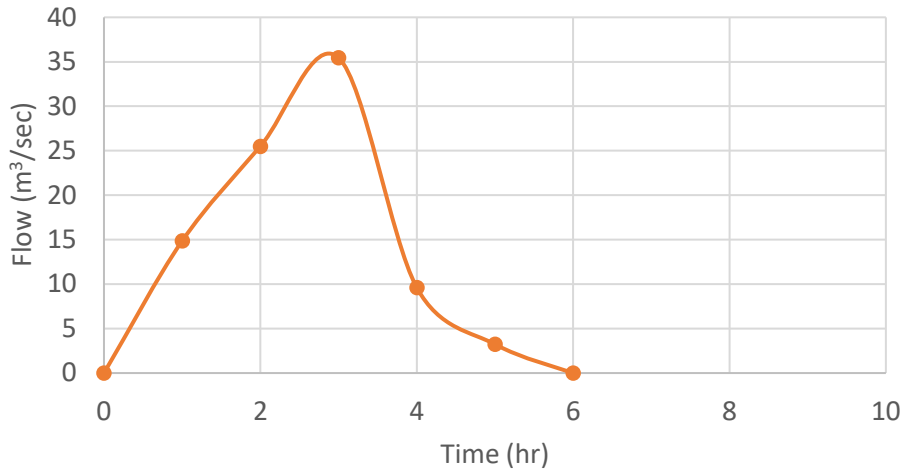


Figure 14: Unit Hydrograph of Katsabadianos subbasin calculated using Time-Area method

The results above are considered to be reasonable. Among the four subbasins, Giofiros subbasin is where the maximum peak discharge is calculated (98.3 m³/s). The next higher peak discharge is calculated in Gazanos subbasin (79.1 m³/s), whereas Katsabadianos and Kseropotamos seem to have similar peak values (35.5 and 27.9 m³/s respectively). The shape of the hydrographs depends on two factors; the morphology of the basin and the characteristics of the precipitation applied. Since it is the same precipitation data that are being applied to all basins, the morphology of the basins shapes the UH. The results show that the area of the basins has great impact on the peak discharge values.

At the next stage, spatial data and UH of each subbasin as well as the design precipitation are imported into HEC-HMS. Other than the UH calculated with the time-area method, another two methods (Snyder Synthetic UH and SCS UH) are being applied. Three different flood hydrographs are produced for each subbasin; each one using a different method.

The different flood hydrographs per subbasin are presented in Figures 15 to 18.

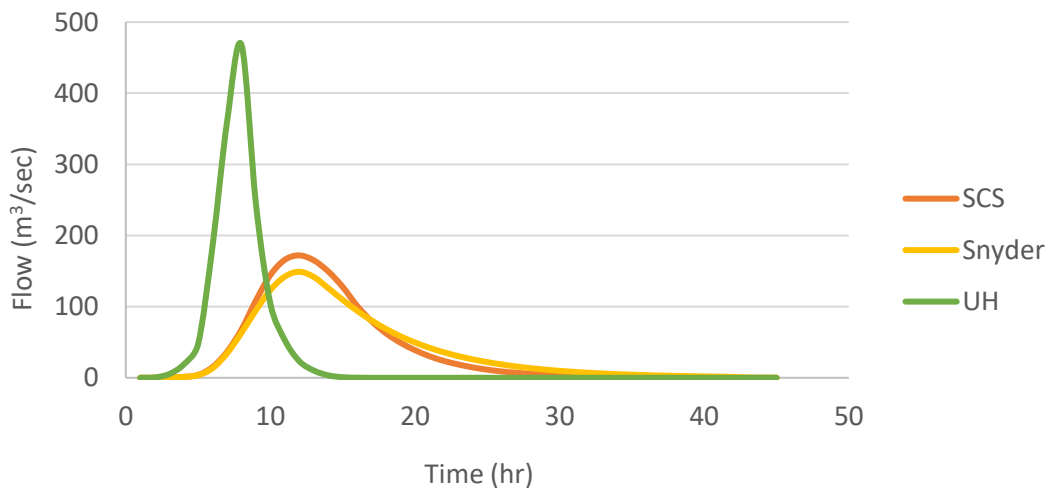


Figure 15: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Gazanos basin

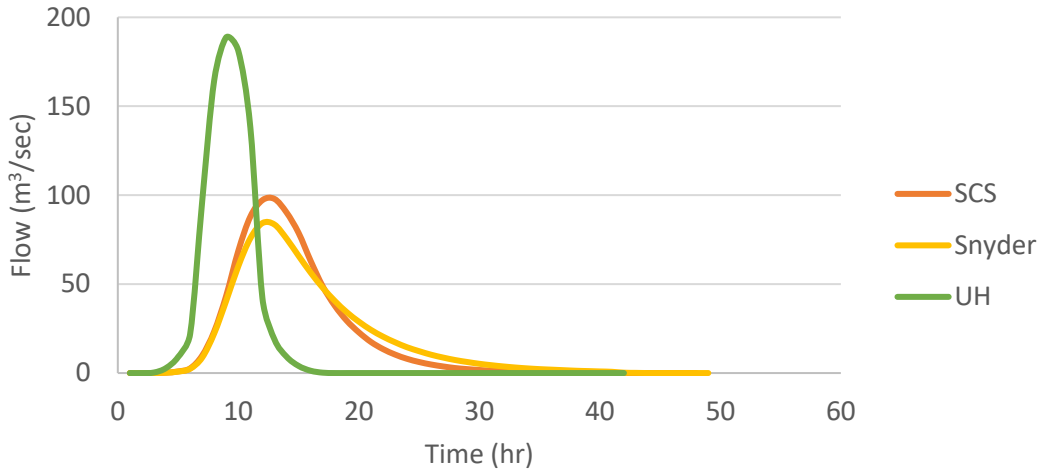


Figure 16: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Kseropotamos basin

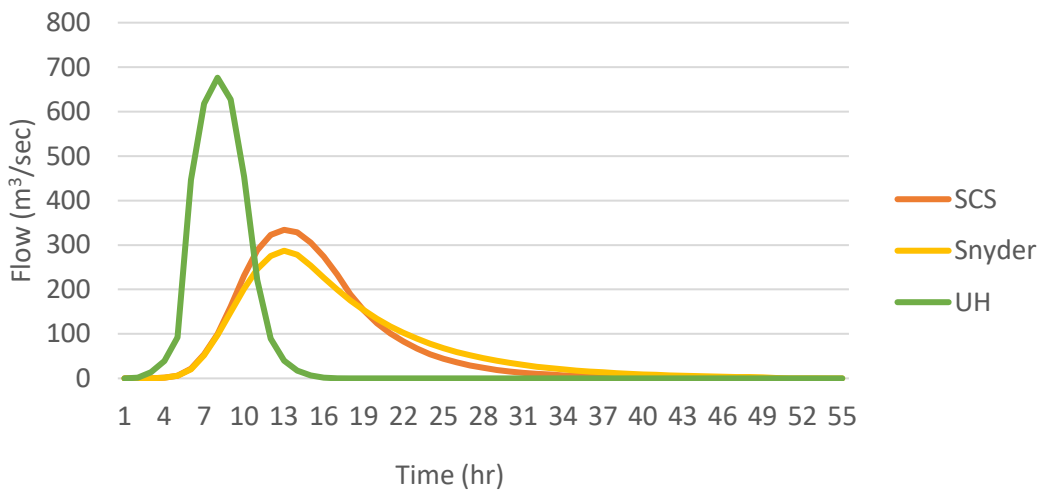


Figure 17: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Giofiros basin

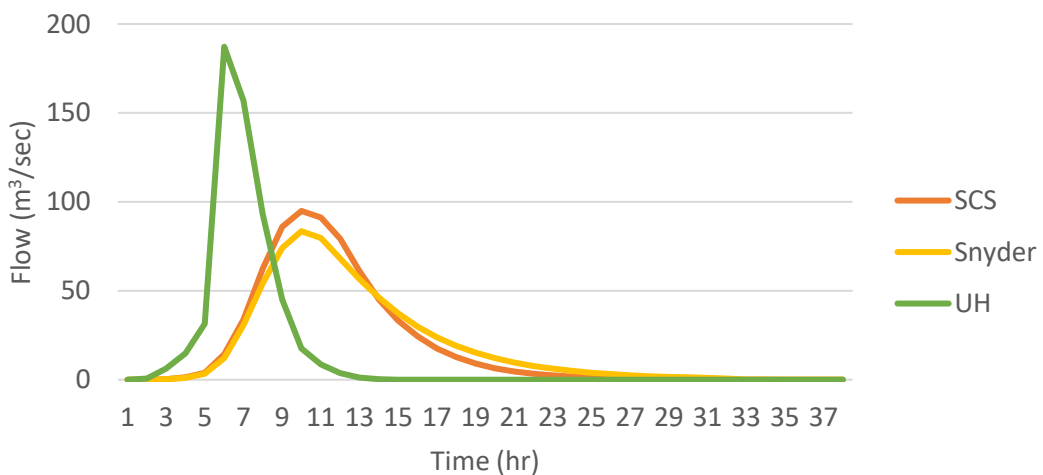


Figure 18: Flood hydrographs using three methods (SCS, Snyder and Time-area) at the simulation point of Katsabadianos basin

While examining the same model (for instance, the time-area method) it is evident that there is an important range of the value of peak discharge among the different basins (from 676.2 to 187.2 m³/s), which is connected to the area of the basins. That is a logical result, since the greater the area of the basin the greater the total volume of water that flows towards the outlet of the basin.

Based on the flood hydrographs, there seems to be a specific pattern followed by every applied method, regardless of the basin. The flood hydrograph produced with the time-area method has a higher peak discharge and that value occurs earlier than according to the other two models.

It is assumed that the results of the time-area method are more reliable. This method may be more time-consuming and require more data, nevertheless it is more analytical and allows the possibility of adjustments for a more precise modelling.

In order to better compare the results of the time-area model for each basin, specific flow rate is calculated by dividing the peak discharge by the area of the examined subbasin. The results are presented in Table 5.

Table 5: Specific flow rate of the four subbasins

	<i>Gazanos subbasin</i>	<i>Kseropotamos subbasin</i>	<i>Giofiros subbasin</i>	<i>Katsabadianos subbasin</i>
<i>Area (km²)</i>	75	41	169	32
<i>Specific flow rate (m³/s/km²)</i>	6.23	4.66	4.01	5.86

Specific flow rate seems to depend on the area of the basin, in a manner that a smaller basin has a higher specific flow rate, with the exception of Gazanos subbasin. This subbasin displays higher overland velocity as a result of the high values of slope (especially upstream in the south) and the lower values of roughness in comparison to the other subbasins that are mainly covered by olive groves and vineyards.

Hydraulic Simulation

The floodplain of each stream is simulated through a 2D hydrodynamic unsteady analysis. The flood hydrographs presented above are imported into HEC-RAS as an upper boundary condition. Maximum depth and maximum velocity of the floodplains are depicted in Figures 19 to 22.

According to the results of the hydraulic analysis, Giofiros stream is the one with the widest floodplain. Such an overflowing could cause important damage to the nearby village of Finikia (824 habitants), to the agricultural holdings and also the infrastructure of the waste water treatment plant. The results show that river flow is mostly accumulated within the riverbed regarding the streams of Gazanos and Kseropotamos. Flow velocity is also quite low for all examined streams, with the exception of the area along the riverbed. The affected areas mostly consist of olive groves and vineyards for both of these streams. An exaggerated floodplain was mainly noted in the simulation of Katsabadianos stream.

The quality of data used (DEM and Manning coefficient) is a decisive factor to an accurate floodplain simulation.

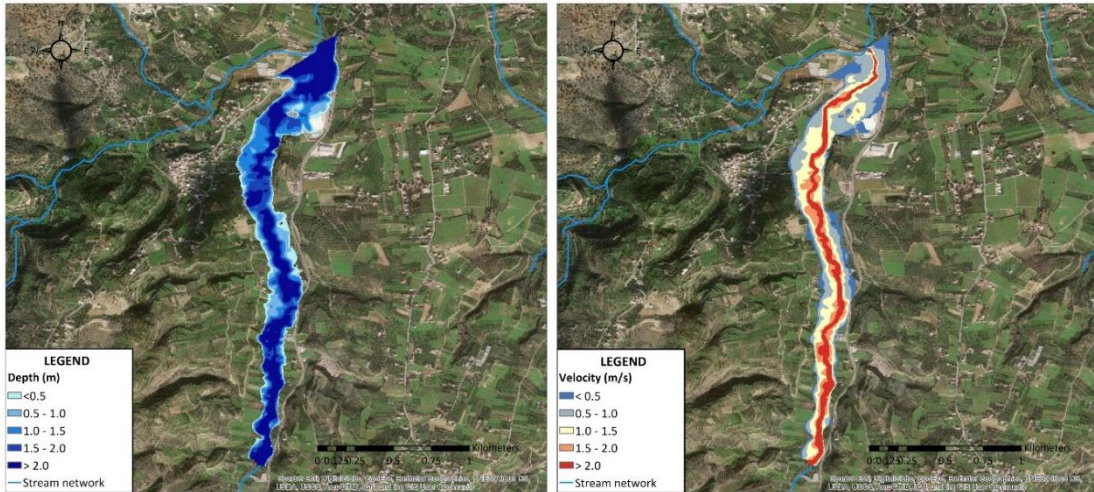


Figure 19: Maximum depth and velocity of Gazanos floodplain

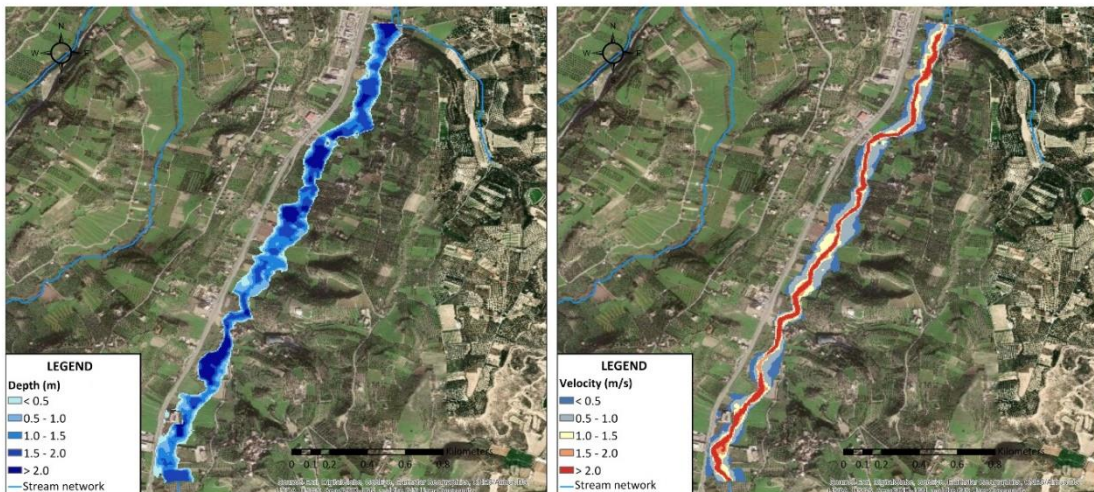


Figure 20: Maximum depth and velocity of Kseropotamos floodplain

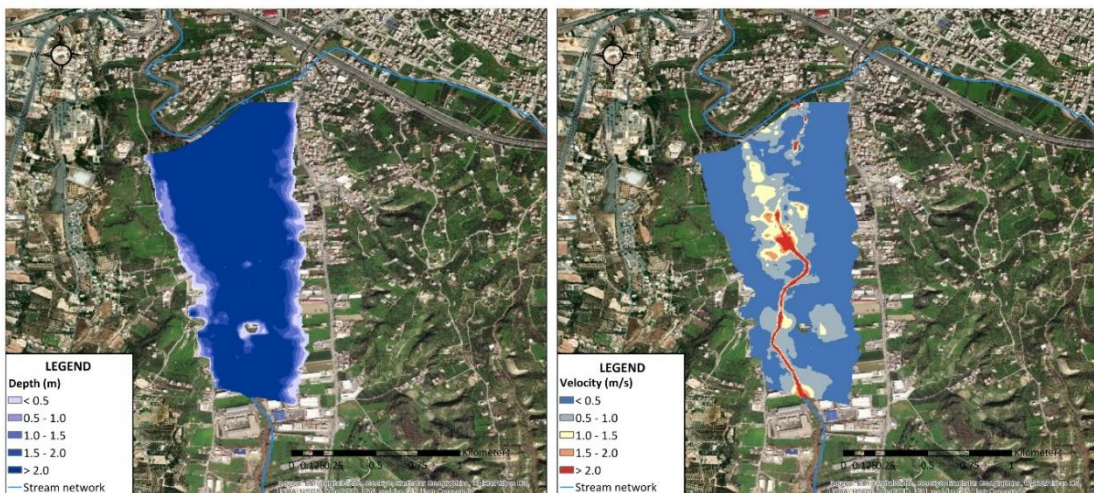


Figure 21: Maximum depth and velocity of Giofiros floodplain

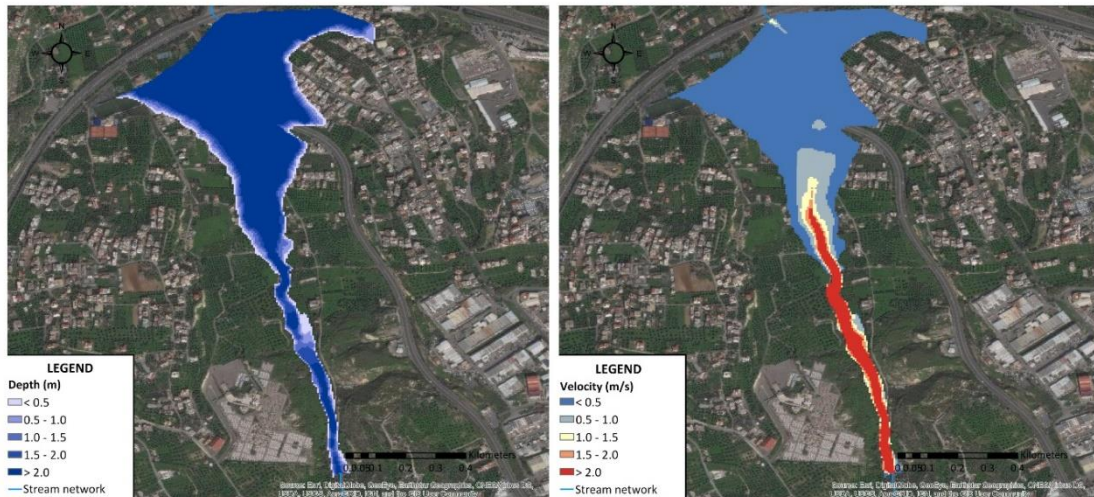


Figure 22: Maximum depth and velocity of Katsabadianos floodplain

Conclusions

The scope of this thesis was the development and implementation of an integrated methodology for flood risk assessment in the northwestern part of the Prefecture of Heraklion. The applied methodology consists of three stages: preliminary flood risk assessment using spatial MCA, hydrological analysis using Time-Area method and 2D hydraulic analysis for the simulation of the maximum area, depth and velocity of the floodplain. The main findings are summarized below:

- Flooding in the study area is mainly caused by the overflowing of Giofiros stream. The other streams do not seem to affect extensive areas.
- The north part of the case study shows the highest flood hazard, as a result of the low elevation, low slopes and high imperviousness that occur in the area. Both social and economic vulnerability also show high values in that part of the study area, because of the fact that the main land cover is urban fabric. Thus, flood risk (as an overlay of both vulnerability and hazard) is very high in the northern part of the study area.
- Land cover is a decisive factor for the production of flood risk map, according to the method applied, since it affects the final result in numeral ways. It is included in calculation of imperviousness and both aspects of vulnerability. In addition to that, it is also used for the estimation of the roughness across the simulation area during hydraulic analysis.
- Considering possible negative impact of flooding when assessing flood susceptibility not only accords with the spirit of the Directive 2007/60, but can only be an extremely useful tool for the identification of the areas in need of further examination and protection.
- Time-area method provides satisfactory results. The fact that it allows the possibility of adjustments for a more precise modelling is a great advantage of the method. The results of Snyder and SCS methods are considered less reliable. Peak discharge may be underestimated when using these two methods.
- Among the four subbasins, Giofiros subbasin is where the maximum peak discharge is calculated. The area of the basins seems to contribute greatly to that result.

- Regarding the results of the hydraulic analysis, Giofiros seems to have the greatest floodplain. Gazanos and Kseropotamos' floodplains are less extensive and only cover agricultural areas, whereas Giofiros' floodplain also includes a village and the infrastructure of a waste water treatment plant, which has been reportedly affected by flooding in the past. Katsabadianos' flood plain may be overestimated by the hydraulic simulation.

- The accuracy of the results of the hydraulic simulation depends on the accuracy and precision of the data used. The resolution of the DEM imported can greatly impact the floodplain map. Another important factor contributing to the accuracy of the results is the values adopted for Manning's roughness coefficient.

Even though the results presented in this thesis are considered to be satisfactory, this approach has much potential for further improvement and research:

- Flood hazard criteria: there are numerous different approaches to the identification of the factors that cause flooding. Soil type and vegetation characteristics are two criteria that are not implemented in this thesis, but could possibly contribute especially since the study area's main land cover is agricultural.
- Vulnerability: other studies also consider the environmental aspect of vulnerability, as a third criterion. The quantification of vulnerability could have been approached in a more detailed way, given that there had been access to such spatial data.
- Urbanization scenarios: it is evident that land cover plays a key role both to flood hazard and vulnerability. Adopting different urbanization scenarios could shed more light to that and possibly plan ahead, since Heraklion city reportedly expands horizontally over the years.
- Design precipitation: in the framework of future research the implementation of hydraulic analysis for specific flood events could be of great help to the evaluation of the results.
- Manning's coefficient: a sensitivity analysis is suggested so that the contribution of Manning's roughness coefficient to the results of the hydraulic analysis is further investigated.
- Flood control: the implementation of more scenarios is suggested so that possible measures taken can be evaluated. Measures such as embankments, extended detention basins and permeable pavements could be beneficial especially for basins that often cause flooding, like Giofiros basin.

Selected References

EC (2007) Directive on the assessment and management of flood risks (2007/60/EC), Official J, L288, The European Parliament and the Council of the European Union, Brussels.

Hanak T., Korytarova J. (2014) Risk zoning in the context of insurance: comparison of flood, snow load, windstorm and hailstorm, *J Appl Eng Sci* 12:137–144

Na W., Yoo C. (2018) Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea, *Water*

Saaty T. L. (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, *J. Math. Psychology*, 15, pp. 234–281, 2018.

Singh V.P. (1992) *Elementary Hydrology*, Prentice Hall, New Jersey

U.S. Army Corps of Engineers (2016) *River Analysis System HEC-RAS. User's Manual, Version 5.0.*, U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, USA.

Zwenzner H., Voigt S. (2008) Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 5, 2951–2973.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

1.1.1 Η πλημμύρα ως φυσική καταστροφή

Από τη δεκαετία του '90 έχει αναπτυχθεί αξιοσημείωτη έρευνα και διεύρυνση της ανθρώπινης γνώσης όσον αφορά στην κατανόηση των μηχανισμών των φυσικών καταστροφών (Smith, 2003). Οι ποτάμιες πλημμύρες είναι η πιο συχνή και δαπανηρή φυσική καταστροφή και πλήττει τις περισσότερες χώρες του κόσμου (Zwenzner & Voigt, 2008). Μόνο κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες του 20ού αιώνα καταγράφονται 2156 πλημμύρες, εξαιτίας των οποίων επήλθαν 206303 απώλειες ανθρώπινων ζώων, ενώ οι οικονομικές απώλειες εκτιμώνται σε 386 δισεκατομμύρια δολάρια (Guha-Sapir et. al., 2004). Οι συνέπειες μιας πλημμύρας εκτιμάται ότι αποτελούν συνάρτηση του πλήθους των ανθρώπων που κατοικούν και εργάζονται στις πληγείσες περιοχές, καθώς και της παρουσίας που αυτοί συγκεντρώνουν (Hanak & Korytarova, 2014)

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60 ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Αυτό περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρέματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης. Ένας άλλος ορισμός με ειδική αναφορά στις ποτάμιες πλημμύρες χαρακτηρίζει ως πλημμύρα το γεγονός κατά το οποίο η άμεση απορροή (επιφανειακή και ταχεία υπεδάφεια) είναι τόσο σημαντική ώστε η συνολική παροχή να υπερβαίνει την διοχετευτική ικανότητα του υδατορεύματος και να κατακλύζει τις γύρω περιοχές με όλες τις δυσμενείς συνέπειες που ακολουθούν (Τσακίρης, 1995).

Ήδη από την αρχαιότητα καταγράφονται εκδηλώσεις πλημμυρικών φαινομένων σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου κυρίως υπό τη μορφή μύθων (κατακλυσμικοί μύθοι), όπου διάφορες θεότητες τιμωρούν πολιτισμούς στέλνοντας μια ισχυρή πλημμύρα για να τους καταστρέψει. Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη και για τα πρώτα σχέδια διαχείρισης πλημμυρών. Γνωστό παράδειγμα αποτελεί το πλημμυρικό πεδίο του Νείλου, το οποίο βέβαια όφειλε σε μεγάλο βαθμό την αγροτική του ανάπτυξη στα εύφορα εδάφη λόγω μιας μορφής ιλύος που άφηναν πίσω τους τα νερά του ποταμού. Το διαχειριστικό σχέδιο όσον αφορά στην αρχαία Αίγυπτο περιλάμβανε αφενός τον ορισμό της εκάστοτε ιδιοκτησίας, μιας και τα όρια των αγροτεμαχίων εξαφανίζονταν μετά την απόσυρση των νερών, αφετέρου την ανάπτυξη τεχνολογίας μέτρησης της στάθμης του ποταμού (νειλόμετρα) και την εκτίμηση της επικινδυνότητας της κάθε χρονιάς όσον αφορά στα πλημμυρικά όρια (Μπέλλος, 2015).

Οι παράγοντες που οδηγούν στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων ποικίλλουν ανάλογα και με την εξεταζόμενη περιοχή. Τέτοιοι είναι οι έντονες βροχοπτώσεις στις πηγές των ποταμών, το λιώσιμο του χιονιού και η αλλαγή χρήσης γης (όπως μέσω

αποδάσωσης ή αστικοποίησης μιας περιοχής). Μια πλημμύρα από φυσικά αίτια μπορεί να παρουσιάσει είτε βραδεία εξέλιξη είτε να εκδηλωθεί ως ξαφνική πλημμύρα (flash flood), φαινόμενο σύνηθες για τον Ελλαδικό χώρο. Η ξαφνική πλημμύρα είναι αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών διαταραχών, οι οποίες συνοδεύονται από ραγδαίες βροχοπτώσεις, με μεγάλους όγκους βροχής σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι ξαφνικές πλημμύρες συνδέονται με καταιγίδες οι οποίες είτε κινούνται αργά είτε κινούνται πάνω απ' την ίδια περιοχή. Εμφανίζονται σε ένα χρονικό διάστημα λίγων ωρών ή και λιγότερο και έχουν ως αποτέλεσμα την ταχεία ύψωση της στάθμης του νερού, το οποίο στο πέρασμά του μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές. Τα περισσότερα θύματα εξαιτίας πλημμυρών προέρχονται από ξαφνικές πλημμύρες (Ανδρικοπούλου, 2019).

Εξετάζοντας περαιτέρω τις δυνητικές επιπτώσεις των πλημμυρών το ΥΠΕΚΑ αναφέρει:

- Επιπτώσεις στην ασφάλεια και την υγεία των πολιτών: πέραν του κινδύνου για την ίδια την ανθρώπινη ζωή, οι πλημμύρες μπορεί να επιφέρουν σοβαρές κοινωνικές επιπτώσεις με ζημίες στη λειτουργία σημαντικών υποδομών (π.χ. σχολεία, γηροκομεία, Πανεπιστήμια) εφόσον αυτά είναι τρωτά απέναντι στην πλημμύρα.
- Οικονομικές επιπτώσεις: σε ακίνητες (οικισμοί, πόλεις, οικίες στον περιαστικό χώρο) και κινητές ιδιοκτησίες (π.χ. αυτοκίνητα) σε εμπορικές τουριστικές, βιομηχανικές και αγροτικές δραστηριότητες και σε υποδομές μεταφορών (οδικών, σιδηροδρομικών, αεροδρομίων).
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: στο φυσικό περιβάλλον και τη βιοποικιλότητα της περιοχής από την πλημμύρα ή από ρύπανση λόγω της πλημμύρας.
- Πολιτιστικές επιπτώσεις: σε μνημεία πολιτισμού τα οποία ενδέχεται να είναι τρωτά απέναντι στην πλημμύρα.

1.1.2 Διακινδύνευση και επικινδυνότητα πλημμυρών

Επισημαίνεται ότι η έννοια της πλημμυρικής επικινδυνότητας αφορά μόνο στην έκταση και το βάθος ροής της πλημμύρας, σε αντίθεση με την έννοια του πλημμυρικού κινδύνου, η οποία λαμβάνει υπόψη τις συνέπειες στον πληθυσμό, την οικονομία και το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα και με βάση τον ορισμό που παρέχει η Οδηγία 2007/60 ως διακινδύνευση πλημμύρας ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα μια πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με αυτή την πλημμύρα (συνέπειες στο περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες).

Εν γένει η διακινδύνευση (risk) αναφέρεται στις εκτιμώμενες απώλειες (όπως η θνησιμότητα και οι οικονομικές ζημίες) λόγω μιας συγκεκριμένης επικινδυνότητας (hazard) (εν προκειμένω το βάθος ροής και η έκταση της πλημμύρας) στην οποία εκτίθεται κάποιο ορισμένο στοιχείο (π.χ. ένα κτίριο).

Κατά τα παραπάνω, η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης συνιστά ακρογωνιαίο λίθο για το μετριασμό των πλημμυρικών επιπτώσεων, καθώς βοηθά τη διαδικασία

λήψης απόφασης για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων, αλλά και τον ορθολογικό σχεδιασμό έργων και μέτρων με στόχο την προστασία ζώων, περιουσιών, υποδομών φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος (Τσακίρης, 2007).

Σημειώνεται επιπλέον, πως ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία οι τεχνικοί όροι “hazard” και “risk” αντιμετωπίζονται με ένα συγκεκριμένο τρόπο, στην ελληνική βιβλιογραφία η απόδοσή τους ποικίλλει, με αποτέλεσμα διαφορετικοί ερευνητές να χρησιμοποιούν τον ίδιο όρο στα ελληνικά για να αποδώσουν διαφορετική έννοια. Στις προδιαγραφές μελετών για τα Σχέδια Διαχείρισης Κίνδυνων Πλημμυράς λεκανών απορροής ποταμών των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας του ΥΠΕΚΑ, οι έννοιες του flood hazard μεταφράζεται ως επικινδυνότητα πλημμύρας, ενώ η έννοια του flood risk ως κίνδυνος πλημμύρας.

1.1.3 Νομικό πλαίσιο – Η Οδηγία 2007/60

Στις 23 Οκτωβρίου του 2007 εκδόθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο η Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση διακινδύνευσης πλημμύρας. Αυτή στηρίχτηκε στις παρακάτω θεωρήσεις:

- Οι πλημμύρες μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημιές στο περιβάλλον.
- Ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες, καθώς και η κλιματική αλλαγή συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επέλευσης πλημμυρικών φαινομένων.
- Είναι σκόπιμη η επιδίωξη μείωσης της διακινδύνευσης των συνεπειών των πλημμυρών.
- Τα μέτρα απέναντι στην πλημμυρική διακινδύνευση θα πρέπει να οριστούν σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
- Ο συντονισμός μεταξύ των κρατών μελών καθώς και η συνεργασία με τρίτες χώρες μπορεί να βελτιώσει το επίπεδο προστασίας από τις πλημμύρες.
- Στην Κοινότητα σημειώνονται διαφορετικοί τύποι πλημμύρας και ως εκ τούτου το κάθε κράτος μέλος οφείλει να λάβει υπόψη τις τοπικές συνθήκες ώστε να ορίσει τους στόχους της διαχείρισης διακινδύνευσης πλημμύρας.
- Οι κίνδυνοι πλημμύρας σε ορισμένες περιοχές εντός της κοινότητας μπορούν να θεωρηθούν ήσσονος σημασίας (π.χ. ακατοίκητες περιοχές με περιορισμένους οικονομικούς πόρους).
- Είναι απαραίτητη η κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και διακινδύνευσης πλημμύρας με συμπερίληψη των δυνητικών αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με διαφορετικά σενάρια πλημμύρας καθώς και με ενδεχόμενες πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης ως συνέπεια πλημμύρας.
- Σε συνέχεια της εκτίμησης της διακινδύνευσης πλημμύρας προτείνεται η καθιέρωση σχεδίων διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, τα οποία θα πρέπει να παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες της αντίστοιχης περιοχής.

- Τα σχέδια αυτά διαχείρισης θα πρέπει να εστιάζουν στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα.

Ως στόχος της Οδηγίας τέθηκε η θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση της διακινδύνευσης πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, τον πολιτισμό και τις οικονομικές δραστηριότητες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η Οδηγία 2007/60 ενισχύει το δικαίωμα των πολιτών της Ε.Ε. για πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικές με τα φαινόμενα, αλλά και συμμετοχή στη διαδικασία σχεδιασμού, αφού προβλέπεται η σύνταξη Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας με τα έργα, τα μέτρα και τις ενέργειες που απαιτούνται, τα οποία και υπόκεινται σε δημόσια διαβούλευση.

Η Οδηγία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο μέσω της Κ.Υ.Α. Η.Π. 31822/1542/Ε103/21.7.2010 και περιλαμβάνει τις παρακάτω κυρίως δράσεις - υποχρεώσεις των κρατών μελών, οι οποίες επικαιροποιούνται ανά εξαετία:

- Προκαταρκτική Αξιολόγηση των Κινδύνων Πλημμύρας (ΠΑΚΠ)
- Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας
- Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ)

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την παράγραφο 3 της Οδηγίας οι χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας (Flood Hazard Maps) καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές οι οποίες θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια:

- I) Πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- II) Πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναληψιμότητας ≥ 100 χρόνια)
- III) Πλημμύρες υψηλής πιθανότητας

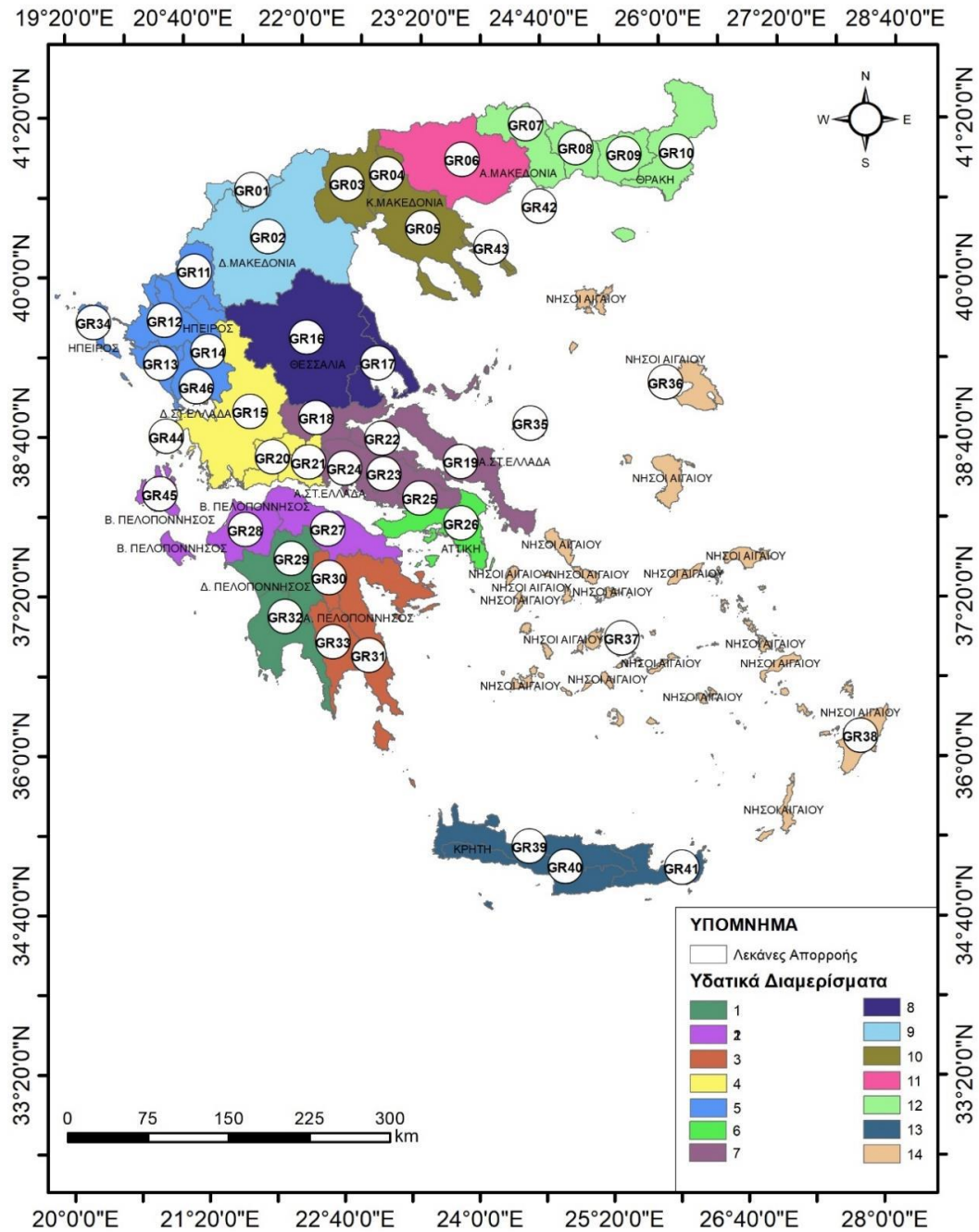
Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- I) Η έκταση της πλημμύρας
- II) Το βάθος νερού ή η στάθμη
- III) Η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων

Αντίστοιχα με τα παραπάνω, οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου (ή διακινδύνευσης) (Flood Risk Maps) περιλαμβάνουν τις δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις των πλημμυρών για κάθε σενάριο της παραγράφου 3 όπως έχουν ήδη περιγραφεί. Οι επιπτώσεις αυτές καταγράφονται ως εξής:

- I) Ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν.
- II) Τύπος οικονομικής δραστηριότητας που ενδέχεται να πληγεί.
- III) Εγκαταστάσεις σε σχέση με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές οι οποίες ενδέχεται να πληγούν.

IV) άλλες πληροφορίες οι οποίες κρίνονται χρήσιμες, όπως η επισήμανση περιοχών όπου υπάρχει ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.



Σχήμα 1.1: Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Ανδρικοπούλου, 2019)

Τέλος, τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (Σ.Δ.Κ.Π.) αποτελούν βασικό εργαλείο προγραμματισμού δράσεων για την αντιμετώπιση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Τα Σ.Δ.Κ.Π. καταρτίζονται σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος για τις περιοχές όπου υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή όπου είναι πιθανόν αυτή να

σημειωθεί (σύμφωνα με το άρθρο 7 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ). Ένα Σ.Δ.Κ.Π. περιλαμβάνει τους στόχους για τη διαχείριση της πλημμυρικής επικινδυνότητας επικεντρωμένους στη μείωση των δυνητικών αρνητικών επιπτώσεων της πλημμύρας στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομία. Κατά την κατάστροψη ενός τέτοιου σχεδίου λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων περιοχών ώστε οι λύσεις που παρέχονται να είναι οι ενδεδειγμένες για τη συγκεκριμένη περιοχή ανάλογα με τις ανάγκες της, ενώ επιβάλλεται ο συντονισμός εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών.

Σύμφωνα με την Κ.Υ.Α. Η.Π. 31822/1542/Ε103/2010, 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. Με την υπ' αριθμόν 706/16.07.2010 (ΦΕΚ 1383 Β'/02.09.2012) απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων έχουν καθοριστεί σε επίπεδο χώρας 46 Λεκάνες Απορροής Ποταμών, οι οποίες υπάγονται σε 14 Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών (Υδατικά Διαμερίσματα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης με χρήση χωρικής πολυκριτηριακής ανάλυσης και άλλων υδρολογικών μεθόδων και εργαλείων. Με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και πολυκριτηριακής ανάλυσης καταρτίζεται χάρτης πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών, ο οποίος προκύπτει μέσω της σύνθεσης των κριτηρίων (ως χωρικών επιθεμάτων στο ArcGIS) με αντίστοιχα βάρη για το κάθε ένα. Στη συνέχεια, εντοπίζονται περιοχές υψηλής επικινδυνότητας του παραχθέντα χάρτη και γίνεται εκτίμηση του πλημμυρικού πεδίου με υδραυλική προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS 2D. Μέσω της υδραυλικής προσομοίωσης εκτιμώνται η έκταση, το βάθος και οι ταχύτητες ροής του πλημμυρικού πεδίου, στοιχεία απαραίτητα για την εκτίμηση της έντασης του φαινομένου της πλημμύρας και των κοινωνικο-οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιφέρει, αλλά και για την κατάστροψη σχεδίων αντιπλημμυρικού σχεδιασμού, είτε πρόκειται για τεχνικά έργα είτε για μη κατασκευαστικά μέτρα (προειδοποίησης κ.α).

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

- Το **πρώτο κεφάλαιο** χρησιμεύει ως μια εισαγωγή στην πλημμύρα ως φυσικό φαινόμενο, στα γενεσιουργά της αίτια και τα χαρακτηριστικά της ιδίως στον ελλαδικό χώρο. Ορίζονται έννοιες όπως η διακινδύνευση και η επικινδυνότητα πλημμυρών και γίνεται αναφορά στο θεσμικό πλαίσιο που αναφέρεται στα πλημμυρικά φαινόμενα. Τέλος, αποσαφηνίζεται ο στόχος και το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωσή της.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφεται η περιοχή μελέτης. Αρχικά αναλύονται τα φυσικά της χαρακτηριστικά με έμφαση στη γεωμορφολογία, τη γεωλογία αλλά και το κλίμα και τα υδατικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται

ορισμένα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά τα οποία σχετίζονται με τη διοικητική δομή, τον πληθυσμό, την οικονομία και τις χρήσεις γης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με στοιχεία για το ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή μελέτης.

- Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναλύεται εκτενώς η μεθοδολογία η οποία εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Αρχικά περιγράφονται τα περιβάλλοντα τα οποία υποστήριξαν την εφαρμογή της μεθοδολογίας, δηλαδή τα λογισμικά ArcGIS και HEC-RAS. Στη συνέχεια, αναλύεται η γεωμορφολογική ανάλυση η οποία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και άλλων αντίστοιχων παραγώγων τα οποία απαιτούνται για την υλοποίηση της μεθοδολογίας. Όσον αφορά στην πολυκριτηριακή ανάλυση, περιγράφεται η μέθοδος AHP η οποία και επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία καθώς και τα κριτήρια και ο τρόπος που αυτά επιλέχθηκαν και συντέθηκαν. Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της υδρολογικής ανάλυσης, η οποία έγινε επίσης σε περιβάλλον GIS με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών για την εξαγωγή των μοναδιαίων υδρογραφημάτων, τα οποία περιγράφουν το μηχανισμό βροχής - απορροής. Η βροχή σχεδιασμού υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα όμβριων καμπυλών και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την υλοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης με τη βοήθεια του λογισμικού HEC – RAS για την δισδιάστατη ανάλυση του πλημμυρικού πεδίου.
- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους σταδίων της εργασίας. Αρχικά μεταφέρονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης, δηλαδή οι χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης για την περιοχή μελέτης. Όσον αφορά στην υδρολογική ανάλυση, παρουσιάζονται τα μοναδιαία υδρογραφήματα για τις εξεταζόμενες υπολεκάνες και στη συνέχεια τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα μετά την εφαρμογή της βροχής σχεδιασμού στο περιβάλλον του HEC-HMS. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης, δηλαδή οι χάρτες των πλημμυρικών πεδίων, οι οποίοι αποδίδουν χωρική πληροφορία για την έκταση, τα μέγιστα βάθη και ταχύτητες στα προσομοιούμενα τμήματα των υδατορευμάτων.
- Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται αρχικά μια σύνοψη της μεθοδολογίας η οποία εφαρμόστηκε στην περιοχή και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας. Τέλος απαριθμούνται θέματα τα οποία δεν υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, αλλά προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση τους.

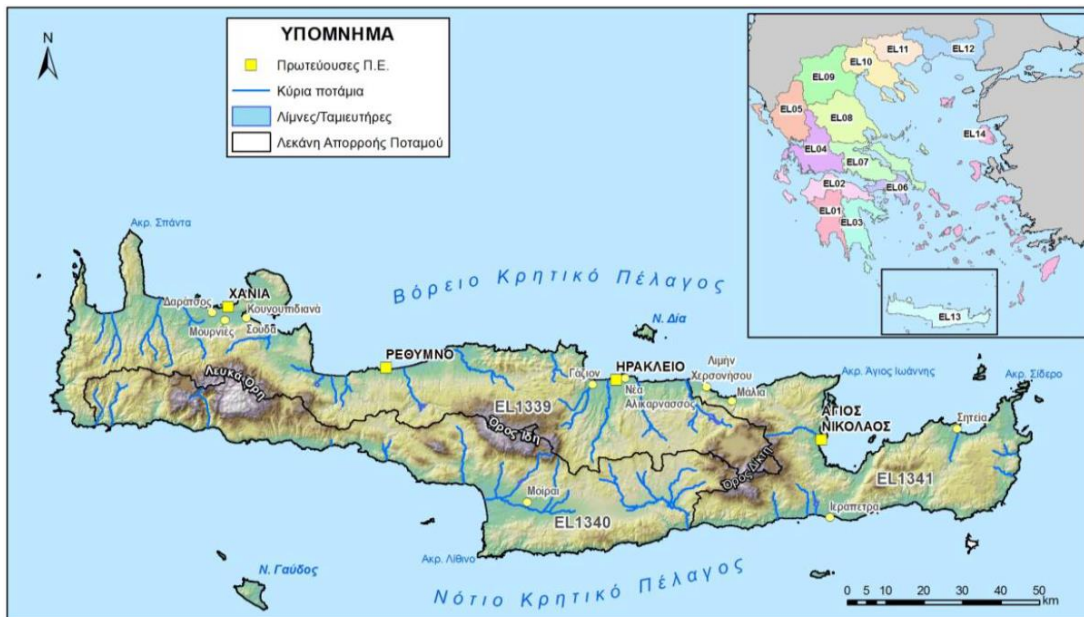
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.1.1 Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Το ΥΔ13 «Κρήτη» είναι το νοτιότερο Υδατικό Διαμέρισμα της χώρας και αποτελείται από την ομώνυμη μεγαλόνησο μαζί με τα μικρά νησιά που βρίσκονται γύρω από αυτήν, με κυριότερα τη Γαύδο και το Δία (Σχήμα 2.1). Περιλαμβάνει τις Περιφερειακές Ενότητες Χανίων, Ρεθύμνης, Ηρακλείου και Λασιθίου. Η συνολική έκτασή του είναι 8345 km² ενώ η ακτογραμμή του ανέρχεται στα 1306 km συμπεριλαμβανομένων των μικρότερων νησιών (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Όσον αφορά στη γεωμορφολογία του, το νησί χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο ενώ αναγνωρίζονται τέσσερα μεγάλα ορεινά συγκροτήματα. Η γεωμορφολογία του νησιού σφραγίζεται από την ύπαρξη πλήθους σπηλαίων, φαραγγιών, αλλά και οροπεδίων (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).



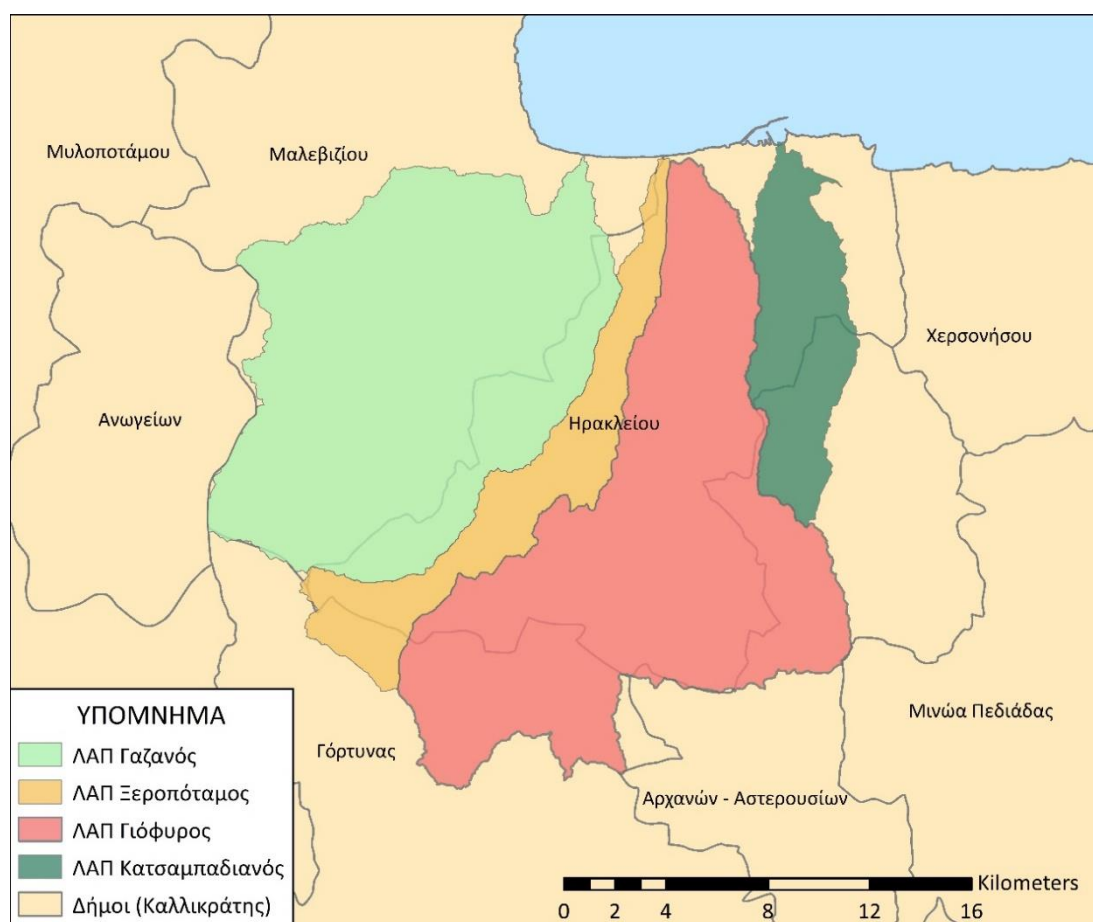
Σχήμα 2.1: Μορφολογικά χαρακτηριστικά του ΥΔ Κρήτης (EL13) (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας και Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτείνεται εντός των ορίων της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου και συγκεκριμένα στο βορειοδυτικό τμήμα της, ενώ υδρολογικά ανήκει στη ΛΑΠ ρεμάτων βορείου τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου (GR39), όπως αυτή ορίστηκε σύμφωνα με την απόφαση 706/16-7-2010 (ΦΕΚ 1383B/2-9-2010 και ΦΕΚ 1572B/28-9-2010) της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων.

Η περιοχή αποτελείται από τέσσερις γειτνιαζουσες λεκάνες απορροής, οι οποίες αντιστοιχούν στα υδατορεύματα Γαζανού, Ξεροπόταμου, Γιόφυρου και Κατσαμπαδιανού

(ή Σιλαμιανού). Η συνολική έκταση και των τεσσάρων λεκανών είναι 456 km². Το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι στα 427 m, ενώ το μέγιστο φτάνει τα 1859 m και εντοπίζεται στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης όπου αναπτύσσεται ο υψηλότερος ορεινός όγκος του νησιού, ο Ψηλορείτης (ή Ίδη). Η περιοχή μελέτης εκτείνεται μεταξύ γεωγραφικού μήκους 24°54'Ε - 25°11'Ε και γεωγραφικού πλάτους 35°6'Ν - 35°21'Ν.

Διοικητικά η περιοχή μελέτης ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα (Π.Ε.) Ηρακλείου και περικλείει τμήματα των δήμων Μαλεβιζίου, Ηρακλείου, Γόρτυνας και Αρχανών-Αστερουσίων. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι τέσσερις λεκάνες απορροής οι οποίες αποτελούν την περιοχή μελέτης, καθώς και οι όμοροι Δήμοι κατά Καλλικράτη.



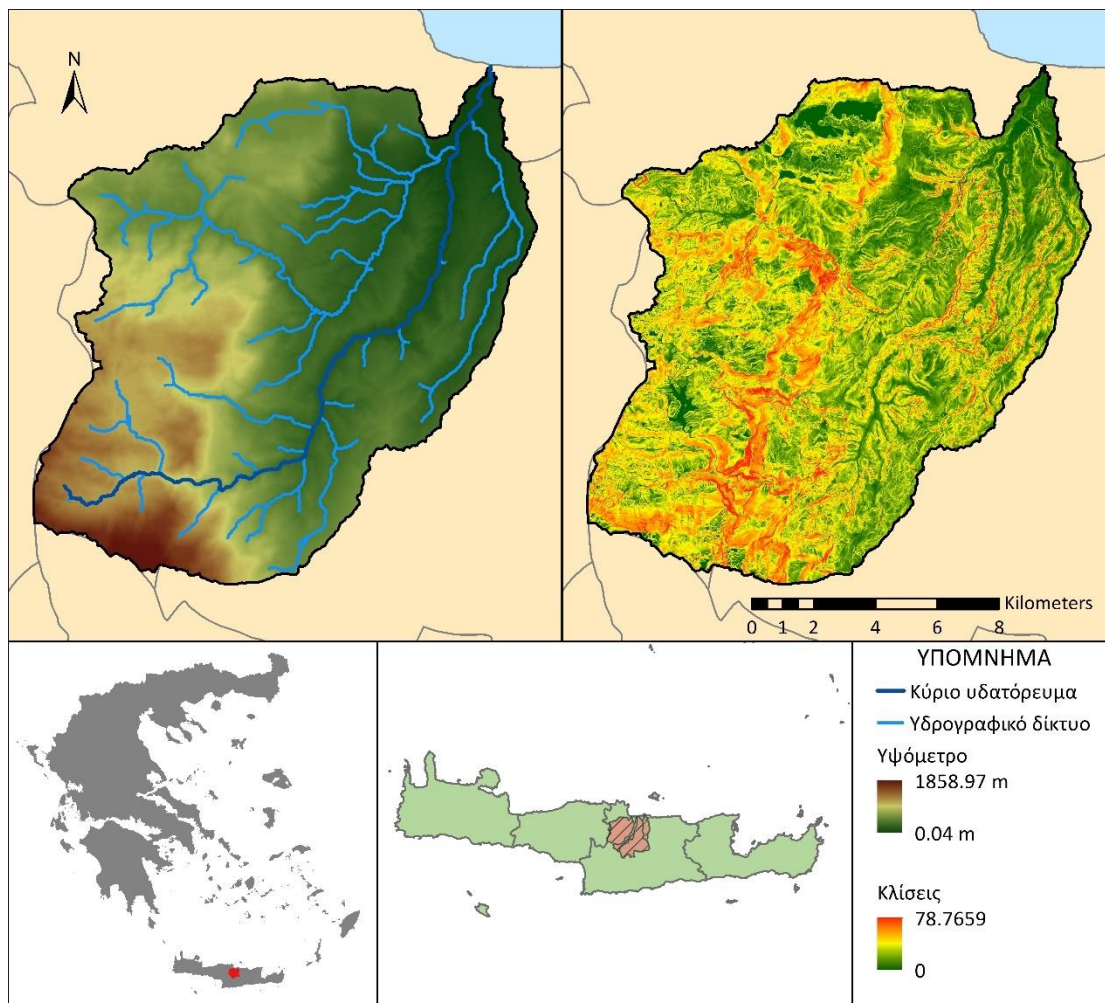
Σχήμα 2.2: Λεκάνες απορροής στην περιοχή μελέτης και όμοροι Δήμοι κατά Καλλικράτη (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αναλυτικά τοπογραφικά στοιχεία για κάθε λεκάνη απορροής χωριστά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά στοιχεία για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης

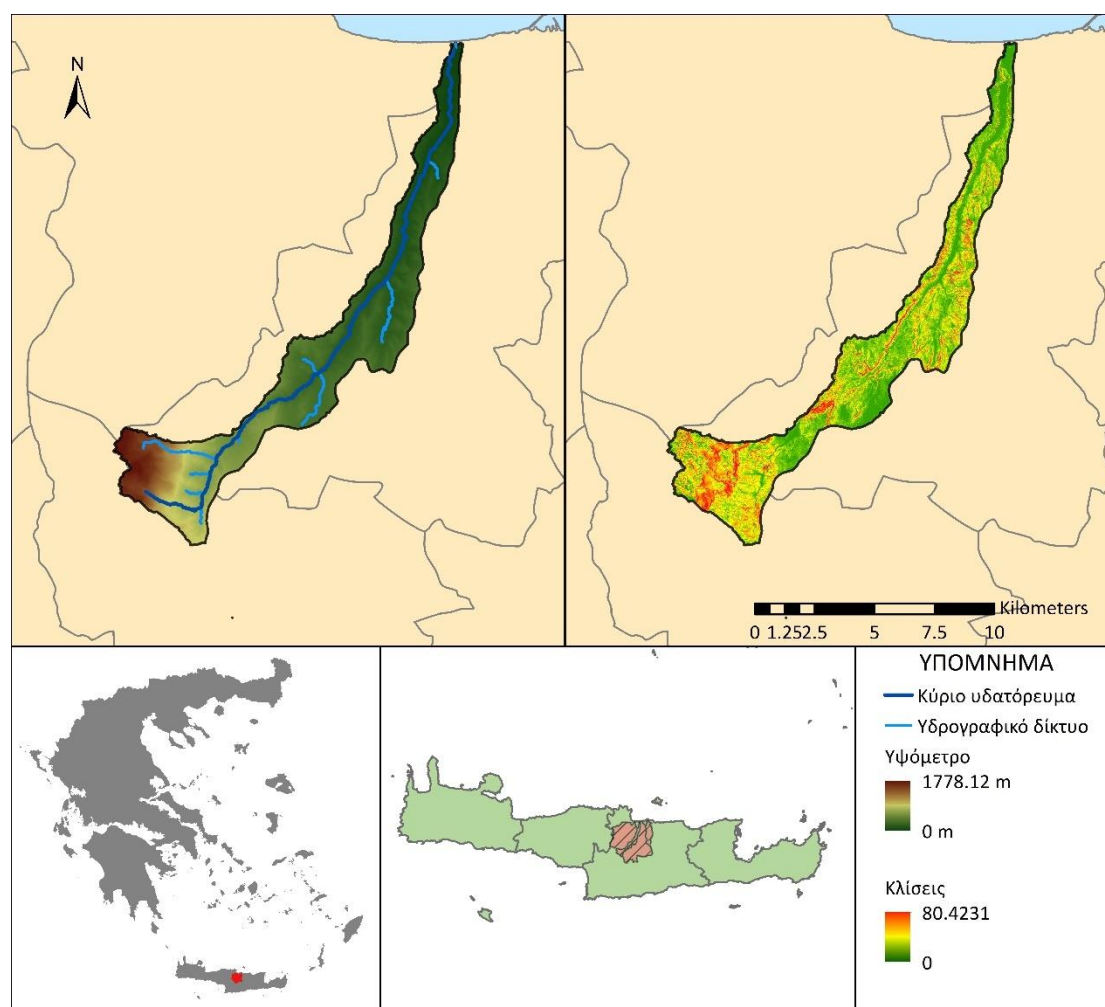
	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γιόφυρος	Κατσαμπαδιανός
Έκταση (km ²)	181	49	184	42
Μέγιστο υψόμετρο (m)	1859	1778	915	811
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	0	0	0	4
Μέσο υψόμετρο (m)	549	478	331	264
Μέση κλίση (°)	20	20	17	14

Όσον αφορά στον Γαζανό, αυτός είναι ένας από τα μεγαλύτερα επιφανειακά υδάτινα σώματα της Κρήτης. Η λεκάνη απορροής του υπολογίζεται στα 181 km². Το υδατόρευμα ξεκινά από θαμνώδη περιοχή σε υψόμετρο 1081 m και κατευθύνεται ανατολικά σε θαμνώδεις περιοχές. Περνά νότια του Κρουσώνα και στη συνέχεια ακολουθεί πορεία προς τα βορειοανατολικά διασχίζοντας ελαιώνες και αμπελώνες. Περνά ανατολικά του Καβροχωρίου, διασχίζει την επαρχιακή οδό Γαζίου-Καμαρίου, την ΠΕΠ Ηρακλείου-Ρεθύμνου, τον ΒΟΑΚ και εκβάλλει τελικά στην παραλία του Σκαφιδάρá. Το κύριο υδατόρευμα έχει μήκος 29 km, ενώ σημαντικός συμβάλλον κλάδος είναι το υδατόρευμα Φλέγα. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι λεπτής υφής μέχρι το ύψος του οικισμού Κρουσώνα αφού μέχρι εκεί υπάρχουν κυρίως μάργες οι οποίες εμφανίζουν χαμηλή περατότητα. Νοτιότερα και δυτικότερα όπου δεσπόζουν μεγάλες ασβεστολιθικές εμφανίσεις δημιουργούνται βαθιές χαράδρες με μικρές διακλαδώσεις, όπως το φαράγγι του Κρουσώνα και το φαράγγι Βρωμόνερο (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Διοικητικά ανήκει κατά κύριο λόγο στο Δήμο Μαλεβιζίου και κατά μικρό μέρος στο Δήμο Ηρακλείου. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι χάρτες υψομέτρων και κλίσεων καθώς και η αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης Γαζανού.



Σχήμα 2.3: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Γαζανού (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

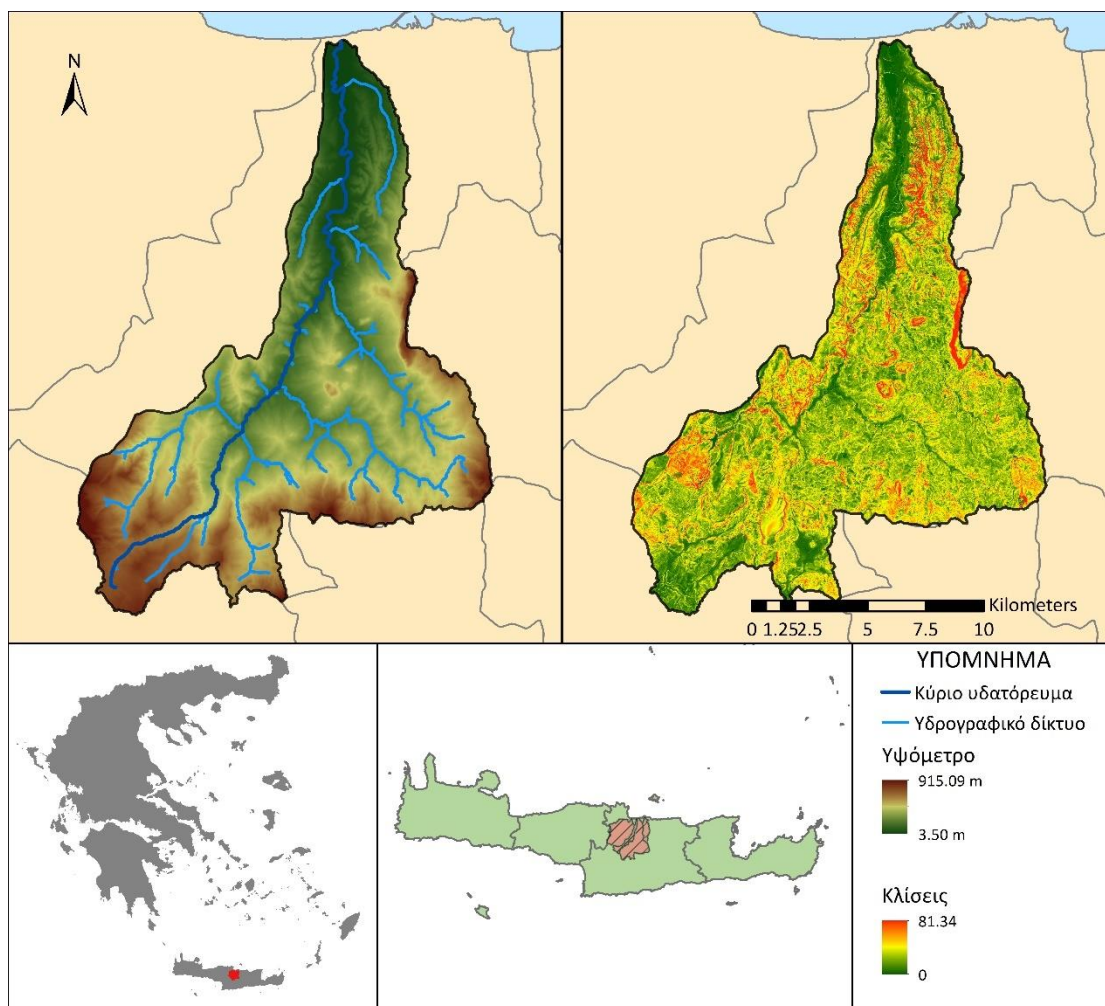
Σχετικά με το υδατόρευμα του Ξεροπόταμου, αυτό έχει μήκος περίπου 29 km και η λεκάνη απορροής του υπολογίζεται στα 49 km². Ξεκινά από ορεινή περιοχή σε υψόμετρο 1610 m και κατευθύνεται νοτιοανατολικά. Έπειτα συνεχίζει βορειοανατολικά διασχίζοντας ελαιώνες και αμπελώνες, περνάει ανατολικά των Άνω Ασιτών και πλησιάζοντας στην πόλη του Ηρακλείου διασχίζει τον ΒΟΑΚ και φτάνει μέχρι την εκβολή του δίπλα στο Παγκρήτιο στάδιο. Το σχήμα της λεκάνης είναι στενό και επίμηκες και το υδρογραφικό δίκτυο πολύ αραιό, αφού περιλαμβάνει περιορισμένα ρέματα πέραν του κύριου υδατορεύματος και αυτό κυρίως στα νοτιοδυτικά όπου συγκεντρώνονται ορισμένοι κλάδοι τροφοδοσίας, οι οποίοι ακολουθούν τις κύριες τεκτονικές γραμμές της περιοχής (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Διοικητικά ανήκει κατά κύριο λόγο στο Δήμο Ηρακλείου, ενώ μικρά τμήματα της λεκάνης ανήκουν στους Δήμους Μαλεβιζίου και Γόρτυνας. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται οι χάρτες υψομέτρων και κλίσεων καθώς και η αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης Ξεροπόταμου.



Σχήμα 2.4: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Ξεροπόταμου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Ο Γιόφυρος είναι ένα από τα μεγαλύτερα επιφανειακά υδάτινα σώματα της Κρήτης και η λεκάνη απορροής του είναι η μεγαλύτερη στην περιοχή μελέτης. Το κύριο υδατόρευμα έχει μήκος περίπου 35 km και η λεκάνη απορροής έχει έκταση 184 km². Σημαντικοί

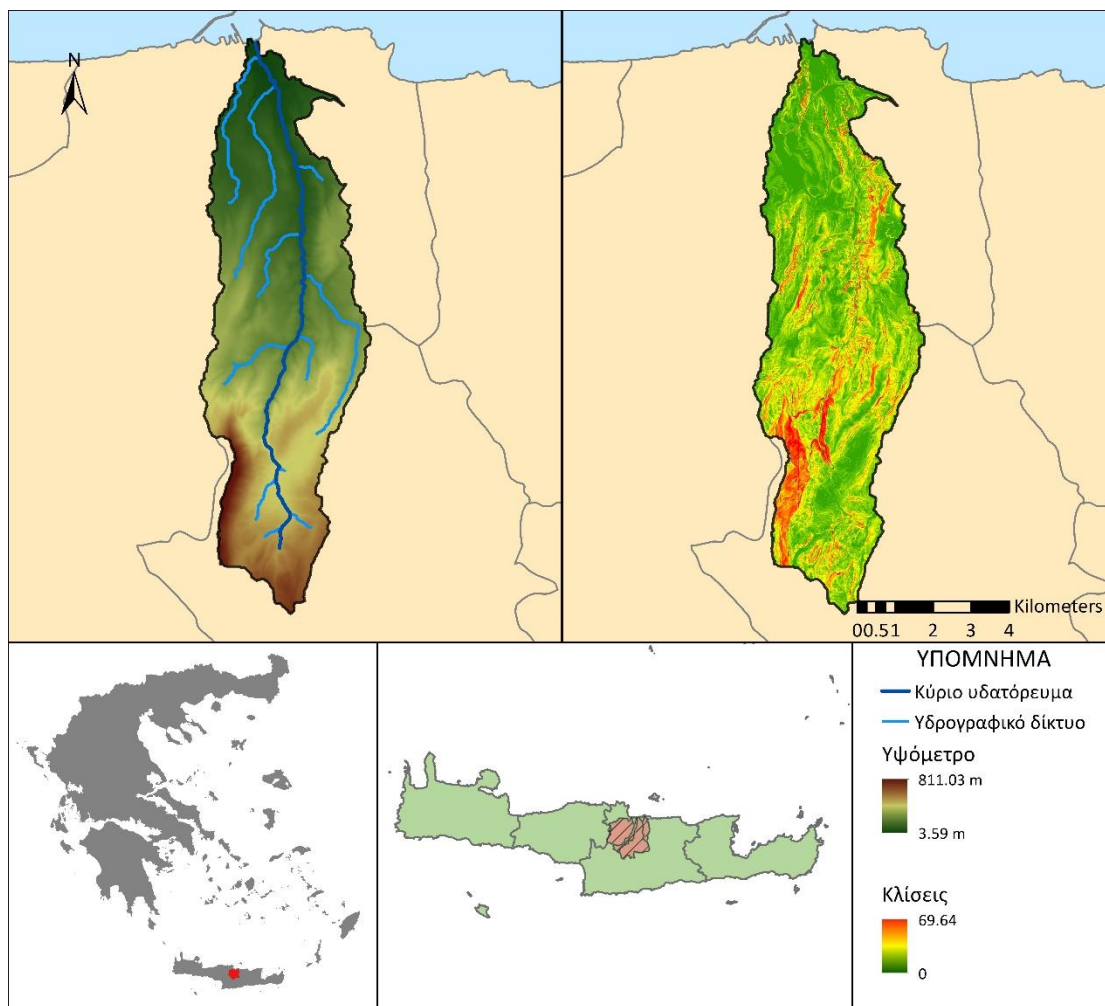
συμβάλλοντες κλάδοι είναι ο Διακονιάρης και ο Χαλαυριανός. Το κύριο υδατόρευμα του Γιόφυρου ξεκινάει από περιοχή καλλιέργειας αμπελιού σε υψόμετρο 680 m και στη συνέχεια κατευθύνεται βορειοανατολικά. Περνάει ανατολικά της Αγ. Βαρβάρας και συνεχίζει μέχρι τον Κάμπο όπου η κατεύθυνσή του γίνεται βόρεια. Στην αστική περιοχή πριν συναντήσει τον ΒΟΑΚ παρουσιάζει έντονους μαιανδρισμούς. Εκβάλλει στη θάλασσα στην περιοχή του Παγκρήτιου σταδίου. Το υδρογραφικό δίκτυο της εν λόγω λεκάνης είναι λεπτής υφής. Μόνο γύρω από το λόφο στις Πάνω Αρχάνες, ο οποίος καλύπτεται από ασβεστολιθικά πετρώματα υπάρχουν δυο μικρές χαράδρες με λίγες διακλαδώσεις (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Διοικητικά ανήκει κυρίως στο Δήμο Ηρακλείου, ενώ μικρότερα τμήματα ανήκουν στους Δήμους Γόρτυνας και Αρχανών-Αστερουσίων στα νότια και νοτιοανατολικά αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι χάρτες υψομέτρων και κλίσεων καθώς και η αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης Γιόφυρου.



Σχήμα 2.5: Χάρτης υψομέτρων, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Γιόφυρου (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Τέλος, αναφορικά με τη λεκάνη του Κατσαμπαδιανού αυτή έχει έκταση 42 km², ενώ το κύριο υδατόρευμα έχει μήκος 16 km. Ξεκινά λίγο βόρεια του Βαθύπετρου σε υψόμετρο 607 m και κατευθύνεται βόρεια. Διασχίζει τις Άνω Αρχάνες και συνεχίζει βόρεια,

διερχόμενο από θαμνώδεις περιοχές και ελαιώνες. Περνά ανατολικά της Κνωσσού και εισέρχεται σε αστική περιοχή με κατεύθυνση βορειοδυτική. Διασχίζει τον ΒΟΑΚ και μετά από 450 m συναντά τη λεωφόρο Στέλιου Καζαντζίδα. Στη θέση αυτή εισέρχεται σε δίδυμη κιβωτοειδή διατομή και μέσω αυτής καταλήγει στη θάλασσα στην περιοχή του λιμανιού του Ηρακλείου (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Διοικητικά ανήκει στους Δήμους Ηρακλείου και Αρχανών-Αστερουσίων. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι χάρτες υψομέτρων και κλίσεων καθώς και η αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης Κατσαμπαδιανού.



Σχήμα 2.6: Χάρτης υψομέτρου, κλίσεων και υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής Κατσαμπαδιανού (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

2.1.2 Γεωλογία και Υδρογεωλογία

Η Κρήτη αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Το αλλόχθονο σύστημα αποτελείται από αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με την ακόλουθη

σειρά, από το κατώτερο προς το ανώτερο (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018):

- Ανθρακικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου
- Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών
- Ζώνη Τρίπολης
- Ζώνη Πίνδου
- Πελαγονική ζώνη – Οφιολιθικό κάλυμμα

Η γεωλογική δομή του νησιού αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους και δολομίτες και δευτερευόντως από σχιστόλιθους και φυλλίτες. Νεότερα ιζήματα τα οποία αποτέθηκαν μέσα στα βυθίσματα τα οποία δημιουργήθηκαν έχουν μικρότερη συμμετοχή.

Νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης αναπτύσσεται ο όγκος του Ψηλορείτη, ο οποίος αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Στα βαθύτερα στρώματα περιλαμβάνονται οι πλακώδεις μεταμορφωμένοι ασβεστόλιθοι της Ιονίου ζώνης, ενώ στα ανώτερα στρώματα απαντώνται ασβεστόλιθοι και δολομίτες της ζώνης της Τρίπολης. Μεταξύ των δυο ασβεστολιθικών σειρών παρεμβάλλεται η σχιστολιθική σειρά των Φυλλιτών. Από την άλλη, η λεκάνη του Ηρακλείου αποτελείται από νεογενείς σχηματισμούς: γκρι μάργες και κροκαλοπαγή του Τορτονίου, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και γύψους του Μεσσηνίου και κίτρινες μάργες του Πλειόκαινου (Μπεζές, 1992).

Από υδρογεωλογική σκοπιά ειδική μνεία απαιτείται να γίνει στο υδροφόρο σύστημα του Αλμυρού Ηρακλείου το οποίο αναπτύσσεται στην ασβεστολιθική μάζα του Ψηλορείτη. Το σύστημα αυτό πήρε την ονομασία του από την ομώνυμη πηγή, η οποία βρίσκεται στα όρια της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα της λεκάνης του Γαζανού. Η πηγή αναβλύζει σε υψόμετρο 1.5 έως 3.0 m στην επαφή Νεογενών αποθέσεων με ασβεστόλιθους Τριπόλεως και σημειώνει παροχές από 3.5 έως 40 m³/sec. Το νερό της πηγής είναι γενικά υφάλμυρο και ακατάλληλο τόσο για ύδρευση όσο και για άρδευση και ως εκ τούτου εκρέει πρακτικά ανεκμετάλλευτο στη θάλασσα (Μπαλτζάκη, 2006). Η υδρογεωλογία της περιοχής είναι ιδιαίτερα σύνθετη και ασαφής, με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές να διατυπώνουν διαφορετικές απόψεις για τα όρια και τον μηχανισμό τροφοδοσίας της πηγής (Σταθόπουλος, 2010).

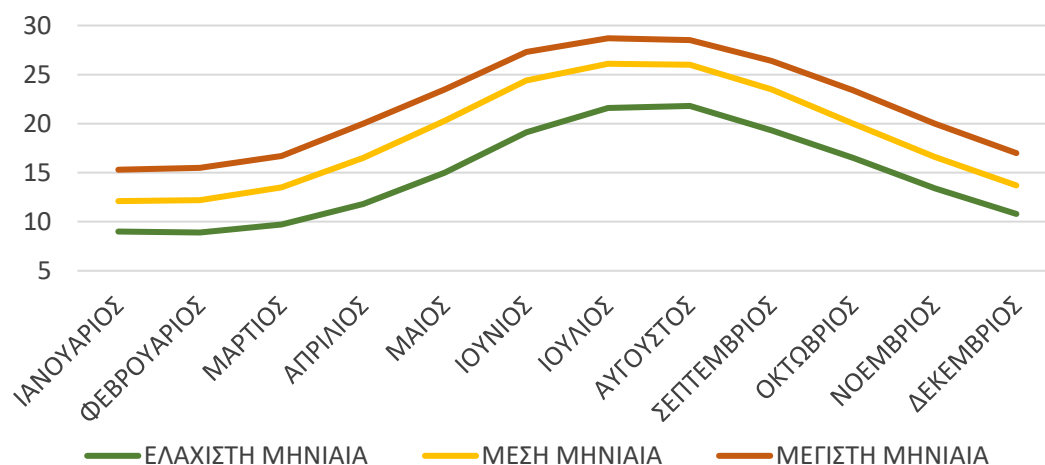
2.1.3 Κλιματικά στοιχεία

Ο τύπος κλίματος της Κρήτης είναι ένας μεταβατικός, ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Διαφορετικοί τύποι κλίματος απαντώνται και σε διαφορετικές υψομετρικές ζώνες (Τυρογιάννης, 2018).

Η πεδινή ζώνη της Κρήτης κλιματικά συνιστά μετάβαση από το μεσογειακό στο ημιορεινό κλίμα και χαρακτηρίζεται από χαμηλό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιο χειμώνα και μεγάλης διάρκειας ξηρή περίοδο. Το θέρος, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ανέμων είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από Ιούνιο έως Σεπτέμβριο, με θερμότερους

μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Στην περιοχή δεν παρατηρείται παγετός, η θερμοκρασία σπάνια πέφτει υπό του 0°C και οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι ήπιες. Στην ορεινή ζώνη συναντώνται μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις και η μέση θερμοκρασία είναι 2 με 3°C χαμηλότερη σε σχέση με την πεδινή ζώνη (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

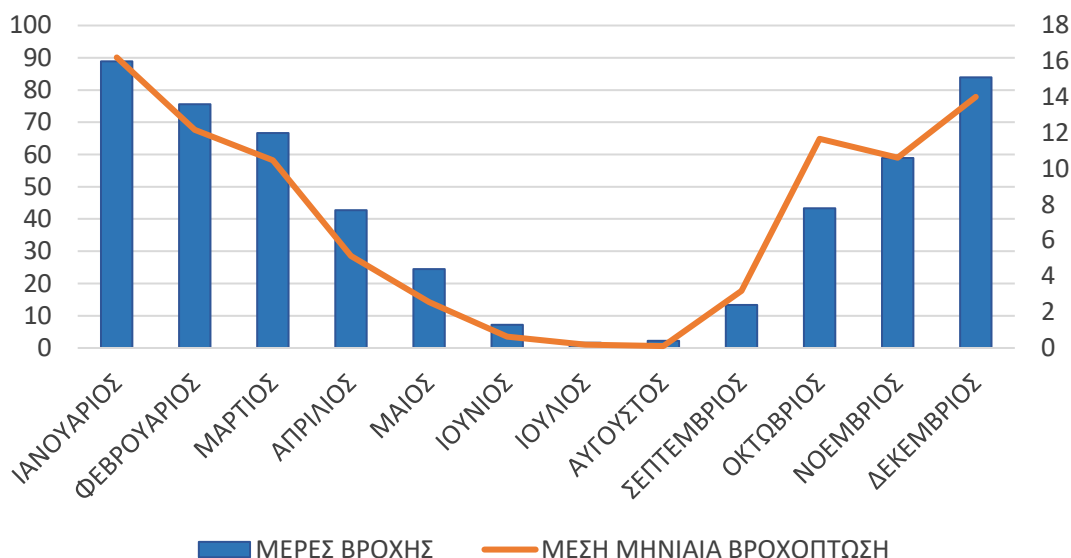
Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται η ελάχιστη, μέση και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της ΕΜΥ στο Ηράκλειο Κρήτης.



Σχήμα 2.7: Ελάχιστη, μέση και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία)

Γενικά η Κρήτη παρουσιάζει έντονη ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχής τόσο γεωγραφικά (από ανατολικά προς δυτικά) όσο και φυσιογραφικά (πεδινά προς ορεινά) με βροχοβαθμίδα που από ορισμένους μελετητές υπολογίζεται σε 61 mm/100m, μια απ' τις μεγαλύτερες της Ελλάδας. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη το Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και Αύγουστο οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη (Προύντζος, 2013). Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο Υ.Δ. ανέρχεται σε 927 mm, τα οποία αντιστοιχούν σε 7.69 δις. m³ κατακρημνισμάτων σε ετήσια βάση, απ' τα οποία τουλάχιστον το 60% χάνεται ως εξατμισοδιαπνοή. Η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα νότια προς τα βόρεια. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής ανέρχεται σε 90 περίπου ημέρες (δηλαδή λιγότερο από 25% του έτους) (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Σύμφωνα με το σταθμό του Ηρακλείου η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 485 mm εκ των οποίων τα 360 mm (δηλαδή το 75%) καρακρημνίζονται τους μήνες από Οκτώβριο έως και Φεβρουάριο.

Στο Σχήμα 2.8 που ακολουθεί καταγράφονται η μέση μηνιαία βροχόπτωση και οι μέσες μέρες βροχής με βάση τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Ηρακλείου.

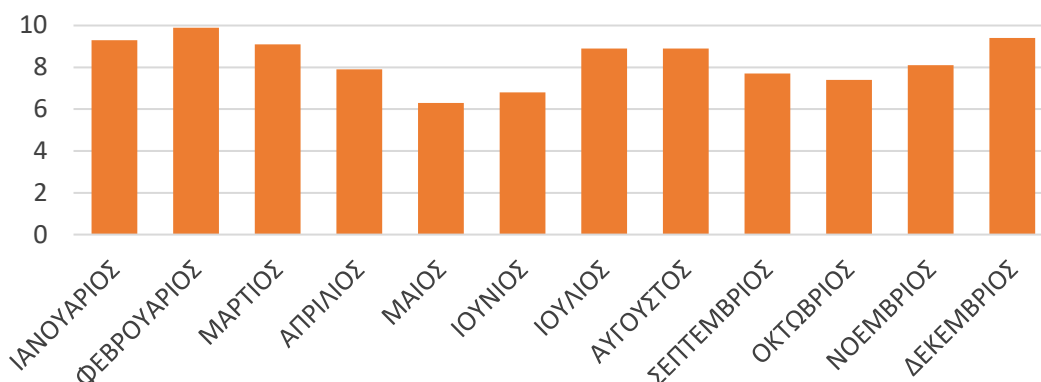


Σχήμα 2.8: Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) και μέσες μέρες βροχής στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία)

Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλή σε ολόκληρο το νησί. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας εκτιμάται σε 2.700 περίπου ώρες για τη βόρεια Κρήτη (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Επικρατέστεροι άνεμοι στο νησί είναι οι βόρειοι και βορειοδυτικοί και αυτό ισχύει όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ η νηνεμία για τα πεδινά ανέρχεται στο 20% και για τα ορεινά στο 30%. Με βάση τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της ΕΜΥ στο Ηράκλειο Κρήτης η μέση μηνιαία διεύθυνση ανέμου εκτιμάται ότι είναι βορειοδυτική για το διάστημα από Μάρτιο έως και Οκτώβριο και νότια για τους υπόλοιπους τέσσερις μήνες του έτους. Στη δυτική Κρήτη, η μέγιστη ένταση παρατηρείται τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο και είναι της τάξης των 4 m/s. Ισχυροί άνεμοι (δηλαδή έντασης άνω των 6 Beaufort) πνέουν για 30 έως 80 ημέρες (μέσος αριθμός ημερών) και τέτοιας έντασης άνεμοι καταγράφονται συχνότερα σε μετεωρολογικούς σταθμούς στα παράλια, απ' ό,τι στα ορεινά. Ημέρες με ανέμους άνω των 8 Beaufort (ορμητικός άνεμος) καταγράφονται πολύ λιγότερες (1-2.5) (Τυρογιάννης, 2018).

Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου της ΕΜΥ.



Σχήμα 2.9: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (Kt) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία)

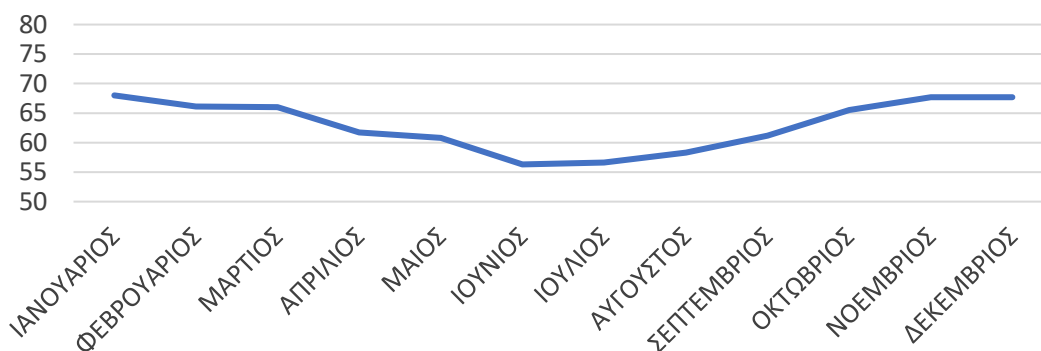
Η μέση νέφωση κυμαίνεται μεταξύ 5 όγδοα τον Ιανουάριο και 0.6 με 1 όγδοα τον Ιούλιο. Ο μέσος αριθμός αίθριων ημερών (νέφωση κάτω από 1.5 όγδοα) κυμαίνεται μεταξύ τριών ημερών (τον Ιανουάριο) και 28 ημερών (τον Ιούλιο) στις πεδινές περιοχές.

Η ομίχλη (όπως και η πάχνη) είναι επίσης εξαιρετικά σπάνια στην Κρήτη. Ο μέσος συνολικός αριθμός ημερών ομίχλης είναι ίσος με λιγότερο από 1 ημέρα για τις πεδινές περιοχές και περίπου 15 ημέρες για τις ορεινές.

Αντίθετα, συχνότερη είναι η εμφάνιση υδροσταγόνων πάνω στις επιφάνειες του εδάφους. Ο μέσος συνολικός αριθμός ημερών δρόσου ανέρχεται στο Ηράκλειο σε 45.2 ημέρες ενώ στις ορεινές περιοχές με μεγαλύτερο αριθμό ημερών ομίχλης, ο αριθμός ημερών δρόσου είναι μικρότερος.

Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία είναι σε ολόκληρη την βόρεια Κρήτη ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο, ενώ στη νότια Κρήτη η ελάχιστη μέση μηνιαία σχετική υγρασία εμφανίζεται τον Ιούλιο. Στη βόρεια Κρήτη η μέση ελάχιστη σχετική υγρασία μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζεται η εξέλιξη της μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας μέσα στο έτος σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου της ΕΜΥ.



Σχήμα 2.10: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία (%) στο σταθμό Ηρακλείου της ΕΜΥ (Δεδομένα από hms.gr, ίδια επεξεργασία)

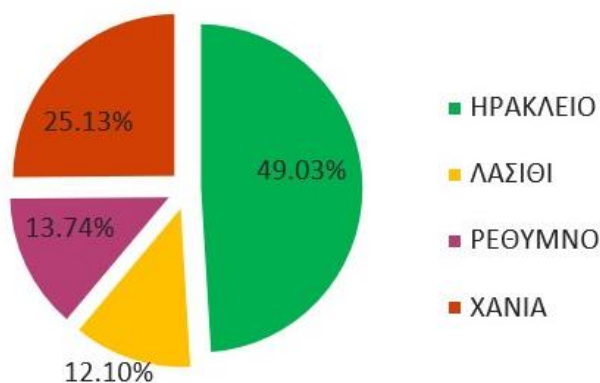
2.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.2.1 Διοικητική δομή

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης είναι το νοτιότερο διαμέρισμα της χώρας και περιλαμβάνει όλη την Περιφέρεια Κρήτης, η οποία αποτελείται από τέσσερις Περιφερειακές Ενότητες (Π.Ε.): Χανίων, Ηρακλείου, Ρεθύμνου και Λασιθίου. Η Π.Ε. Ηρακλείου, στην οποία εντάσσεται η περιοχή μελέτης, διαιρείται διοικητικά σε οκτώ Δήμους: Ηρακλείου, Χερσονήσου, Μαλεβιζίου, Φαιστού, Μινώα Πεδιάδας, Αρχανών Αστερουσίων, Γόρτυνας και Βιάννου. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης ανήκει στους δήμους Μαλεβιζίου (το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης Γαζανού), Ηρακλείου (τμήματα όλων των λεκανών ανήκουν σε αυτόν το δήμο), Γόρτυνας (ένα μικρό τμήμα των λεκανών Ξεροπόταμου και Γιόφυρου ανήκουν σε αυτόν) και Αρχανών-Αστερουσίων (σε αυτόν ανήκει σε μεγάλο ποσοστό η λεκάνη Κατσαμπαδιανού και ένα μέρος της λεκάνης Γιόφυρου).

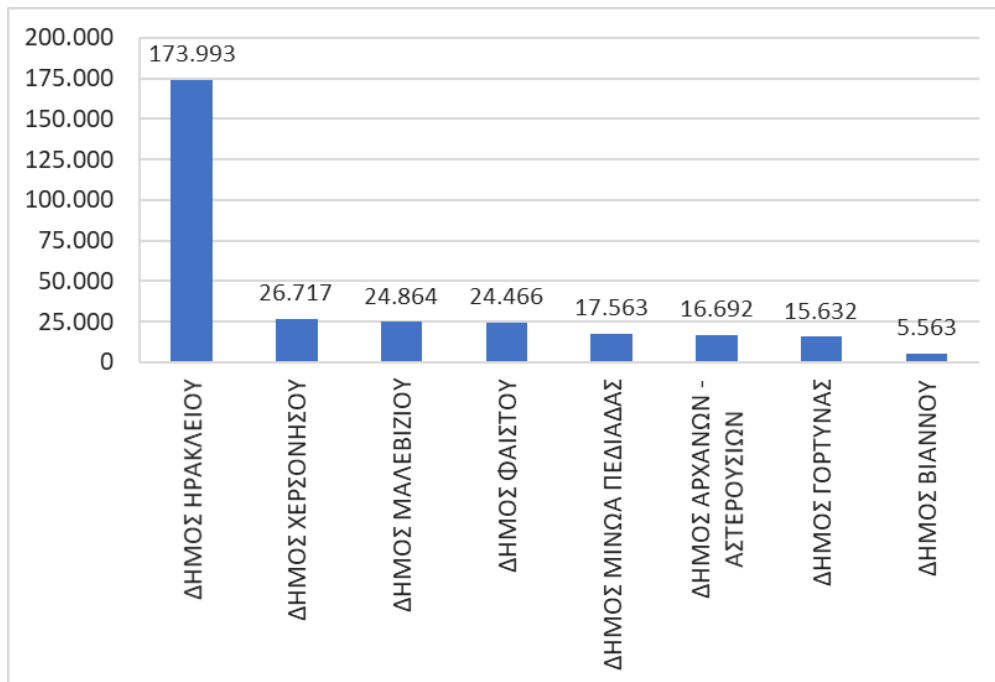
2.2.2 Πληθυσμός

Ο πληθυσμός του νησιού συνιστά το 5.76% του συνολικού πληθυσμού της χώρας με βάση την απογραφή του 2011. Ο αριθμός του καταγεγραμμένου πληθυσμού στην ίδια απογραφή ανέρχεται σε 623065 κατοίκους. Στο Σχήμα 2.11 απεικονίζεται η κατανομή του πληθυσμού αυτού στις επιμέρους περιφερειακές ενότητες, ενώ στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η κατανομή του πληθυσμού της Π.Ε. Ηρακλείου στους Δήμους στους οποίους χωρίζεται.

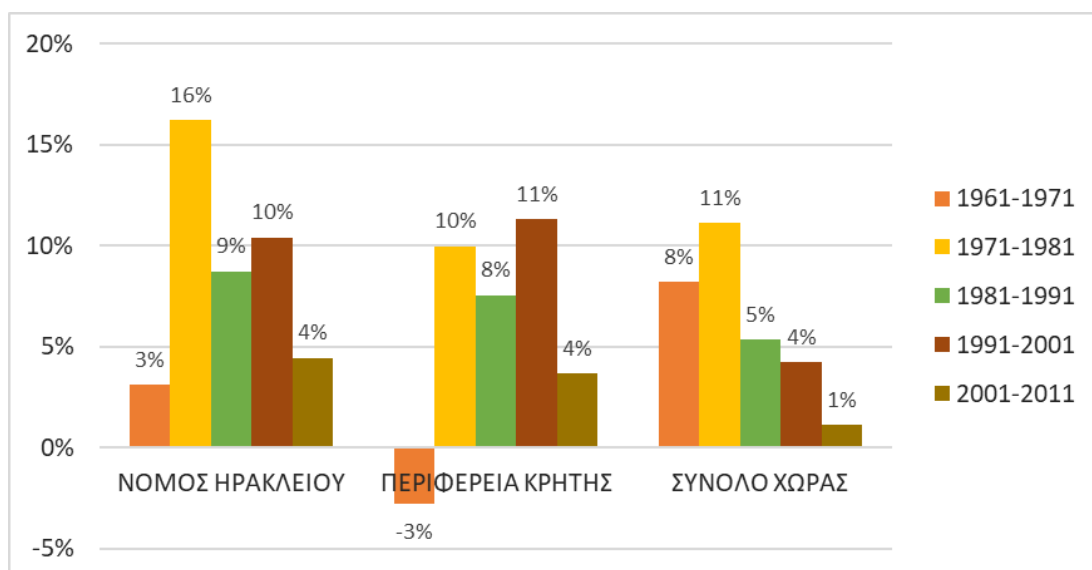


Σχήμα 2.11: Πληθυσμός ανά Π.Ε. της Κρήτης (Δεδομένα από απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2011, ίδια επεξεργασία)

Μια ενδιαφέρουσα σύγκριση γίνεται και στο Σχήμα 2.13 όπου απεικονίζεται η εξέλιξη του πληθυσμού ανά δεκαετία από το 1961 έως το 2011 σε τρία επίπεδα: σε επίπεδο περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου, σε επίπεδο περιφέρειας Κρήτης και σε επίπεδο χώρας. Σύμφωνα με το διάγραμμα, ο νομός Ηρακλείου (πλέον, Π.Ε. Ηρακλείου) έχει διαρκώς υψηλότερα ποσοστά αύξησης πληθυσμού σε σχέση με το σύνολο της χώρας και για τα 50 έτη που εξετάζονται και ιδιαίτερα τη δεκαετία 1971-1981 ο πληθυσμός αυξήθηκε κατά 16% σε σχέση με την προηγούμενη δεκαετία. Η περιφέρεια Κρήτης ομοίως παρουσιάζει υψηλή αύξηση πληθυσμού (υψηλότερη από τους ρυθμούς αύξησης σε επίπεδο χώρας) τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, δηλαδή μετά το 1981.



Σχήμα 2.12: Πληθυσμός ανά Δήμο στην Π.Ε. Ηρακλείου Κρήτης (Δεδομένα από απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2011, ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 2.13: Εξέλιξη πληθυσμού μέσα στις δεκαετίες για το νομό Ηρακλείου, την Περιφέρεια Κρήτης και το σύνολο της χώρας (Δεδομένα από ΕΛ.ΣΤΑΤ., ίδια επεξεργασία)

2.2.3 Οικονομία

Η Περιφέρεια Κρήτης αναπτύχθηκε με ταχείς ρυθμούς, άνω του μέσου εθνικού όρου, για μακρά χρονική περίοδο και βελτίωσε τη θέση της στην ελληνική οικονομία την περίοδο 2005-2009 (Περιφέρεια Κρήτης, 2013). Σημαντικό είναι το στοιχείο ότι συμμετέχει στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π.) της χώρας σε ποσοστό της τάξεως του 5%. Συγκεκριμένα, για το έτος 2008, σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία των Περιφερειακών Λογαριασμών της Εθνικής Στατιστικής Αρχής, το Α.Ε.Π. της Κρήτης ανήλθε σε 12 854

εκατομμύρια ευρώ ή ποσοστό 5.4% του εθνικού Α.Ε.Π. (236 917 εκατ. ευρώ). Η Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου, ως πολυπληθέστερη Ενότητα, έχει την υψηλότερη συμμετοχή (52.06%) στο περιφερειακό Α.Ε.Π. (Περιφέρεια Κρήτης, 2012).

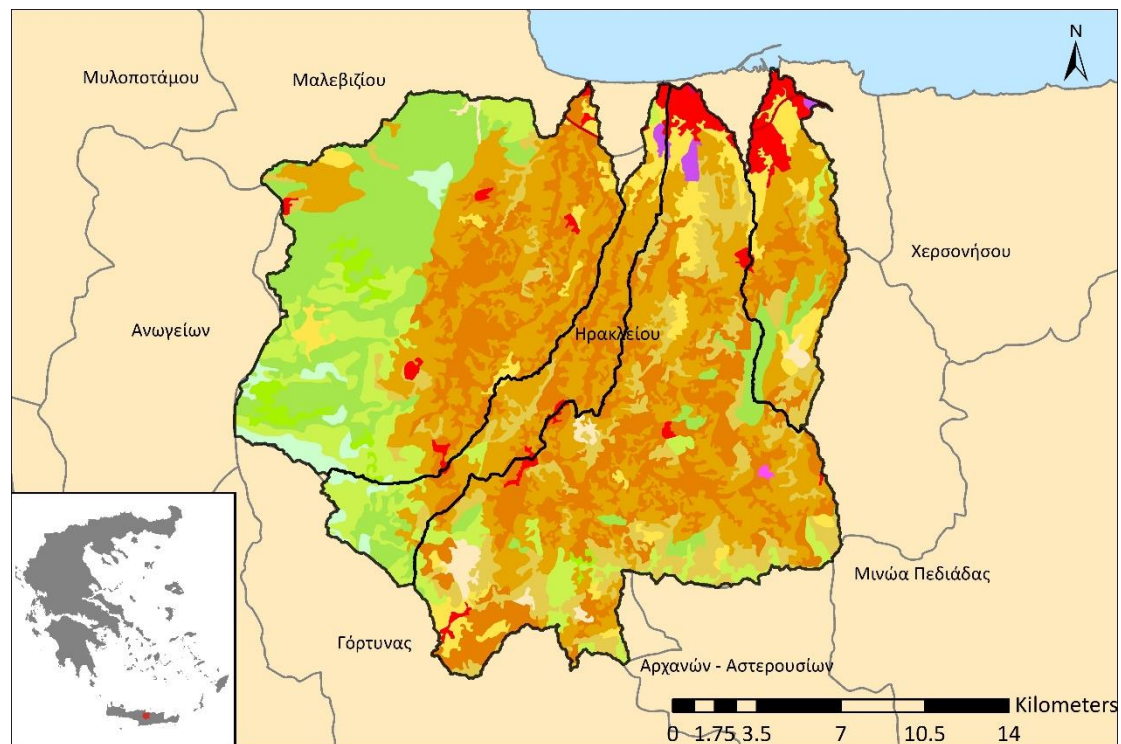
Ο κλάδος του τουρισμού και του εμπορίου έχει ενισχυθεί τα τελευταία χρόνια, ενώ κατέχει και τη σημαντικότερη συνεισφορά στην προστιθέμενη αξία των προϊόντων της Κρήτης (40,34%). Παρόλα αυτά η έντονη σύνδεση της οικονομίας του νησιού με τους συγκεκριμένους κλάδους δημιουργεί προβλήματα, καθώς οι κλάδοι αυτοί παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα, με δεδομένο ότι η τουριστική περίοδος αφορά κυρίως τους μήνες Μάιο μέχρι Σεπτέμβριο. Ταυτόχρονα, η τουριστική κίνηση δεν διαχέεται ικανοποιητικά προς τους οικισμούς της ενδοχώρας (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Σε αντίθεση με τον τουρισμό, σημαντική υποχώρηση έχει παρουσιάσει ο Πρωτογενής τομέας, καθώς το ποσοστό συνεισφοράς του στην περιφερειακή προστιθέμενη αξία έχει μειωθεί σχεδόν κατά το ήμισυ από το 2000 έως το 2008 (από 10 σε 5.50%). Το ποσοστό των αρδεύσιμων εκτάσεων στην Κρήτη είναι πολύ χαμηλότερο του μέσου όρου της Ελλάδας, ενώ η δομή των καλλιεργειών χαρακτηρίζεται από έμφαση σε παραδοσιακές καλλιέργειες, ατελείς υποδομές, μικρό και διάσπαρτο κλήρο. Διάσπαρτη είναι επίσης και η κτηνοτροφία, με ελάχιστες οργανωμένες κτηνοτροφικές μονάδες (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Όσον αφορά στο Δευτερογενή τομέα, αυτός κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα αντιμετωπίζοντας προβλήματα εκσυγχρονισμού της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά και προβλήματα στην οργάνωση εμπορικών δικτύων, για την προώθηση των τοπικών προϊόντων. Χαρακτηριστικό είναι άλλωστε ότι η Κρήτη διαθέτει λιγότερο από το 2% της βαριάς βιομηχανίας της χώρας. Ο κατασκευαστικός κλάδος, αν και έχει συρρικνωθεί κατά την οικονομική κρίση, την προηγούμενη περίοδο είχε γνωρίσει ανάπτυξη, κυρίως μέσω της ανάπτυξης του τουριστικού κλάδου (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Στον Τριτογενή τομέα (Περιφέρεια Κρήτης, 2012) η ποσοστιαία συνεισφορά της Κρήτης είναι σχετικά χαμηλή (4.50%). Στην Π.Ε. Ηρακλείου παράγεται περίπου το 50% της περιφερειακής προστιθέμενης αξίας. Η Κρήτη αποτελεί κέντρο ανάπτυξης της ναυτιλίας, ενώ έντονη είναι και η ερευνητική δραστηριότητα, αφού από το 1980 και μετά ιδρύθηκαν στην Κρήτη ισχυρές μεταφορικές και ναυτιλιακές εταιρίες, αλλά και Πανεπιστήμια, Πολυτεχνικές σχολές και Τεχνολογικά Ιδρύματα, καθώς και σημαντικά Ερευνητικά Κέντρα (Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας, ΕΛΚΕΘΕ κλπ.).

2.2.4 Χρήσεις γης

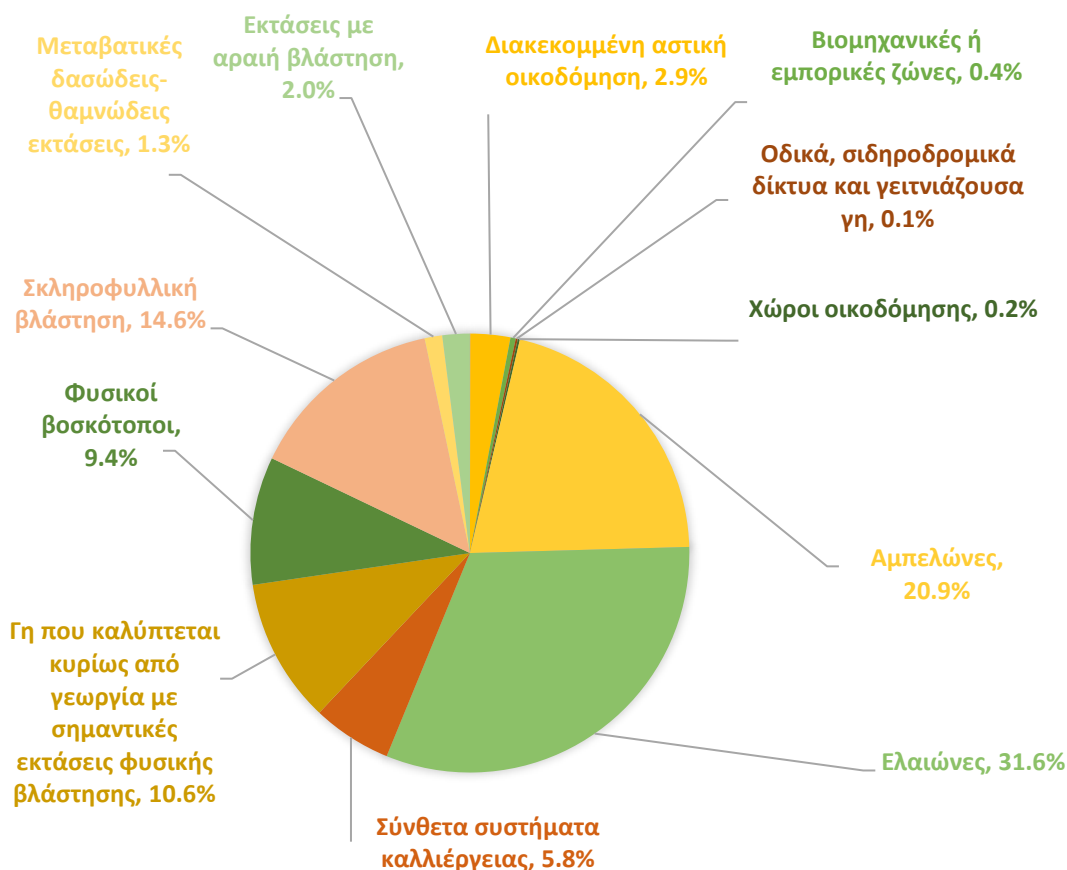


ΥΠΟΜΝΗΜΑ

■ Συνεχής αστική οικοδόμηση	■ Οπωροφόρα δένδρα	■ Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
■ Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	■ Ελαιώνες	■ Παράλιες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
■ Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	■ Λιβάδια	■ Απογυμνωμένοι βράχοι
■ Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	■ Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	■ Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
■ Ζώνες λιμένων	■ Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	■ Αποτεφρωμένες εκτάσεις
■ Αεροδρόμια	■ Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	■ Παγετώνες και αιώνια χιόνια
■ Χώροι εξόρυξης ορυκτών	■ Γεργο-δασικές περιοχές	■ Βάλτοι στην ενδοχώρα
■ Χώροι απόρριψης απορριμμάτων	■ Δάση πλατύφυλλων	■ Τυρφώνες
■ Χώροι οικοδόμησης	■ Δάση κωνοφόρων	■ Παραθαλάσσιοι βάλτοι
■ Περιοχές αστικού πρασίνου	■ Μικτά δάση	■ Αλυκές
■ Εγκαταστάσεις αθλητισμού/αναψυχής	■ Φυσικοί βοσκότοποι	■ Παλιρροιακά επίπεδα
■ Μη αρδεύσιμη-αρδύσιμη γη	■ Θάμνοι και χερσότοποι	■ Ροές υδάτων
■ Μόνιμα αρδευόμενη γη	■ Σκληροφυλλική βλάστηση	■ Συλλογές υδάτων
■ Ορυζώνες		■ Παράκτιες λιμνοθάλασσες
■ Αμπελώνες		■ Εκβολές ποταμών
		■ Θάλασσα

Σχήμα 2.14: Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine στην περιοχή μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης (Corine Land Cover 2012) (Σχήμα 2.14), η εξεταζόμενη περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως αγροτική, αφού οι αστικές χρήσεις καταλαμβάνουν λιγότερο από το 4% της συνολικής έκτασης. Πάνω από το μισό της έκτασης καταλαμβάνεται από αμπελώνες και ελαιώνες (21% και 32% αντίστοιχα), ενώ συνολικά οι αγροτικές χρήσεις καταλαμβάνουν το 69% της περιοχής μελέτης. Οι υπόλοιπες εκτάσεις έχουν δασικό χαρακτήρα σε ποσοστό κάλυψης 27%. Αναλυτικά η ποσοστιαία κατανομή ανά χρήση γης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Ποσοστιαία κατανομή κάλυψης γης κατά Corine 2012 (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Εξετάζοντας τις επιμέρους λεκάνες χωριστά, παρατηρείται ότι σε όλες υπερिशύουν η αγροτική και δασική χρήση. Η λεκάνη απορροής με τον εντονότερο αστικό χαρακτήρα είναι αυτή του Κατσαμπαδιανού. Η λεκάνη του Γαζανού διαφοροποιείται σε σχέση με τις υπόλοιπες υπό την έννοια ότι η έκταση μοιράζεται με ίσο τρόπο μεταξύ της δασικής και της αγροτικής χρήσης, ενώ στις υπόλοιπες λεκάνες η αγροτική χρήση καταλαμβάνει πάνω από το 70% της έκτασής τους. Πάντως και για τις τέσσερις λεκάνες οι ελαιώνες και οι αμπελώνες καλύπτουν από 43% (για τη λιγότερο αγροτική λεκάνη του Γαζανού) έως 60% (στη λεκάνη Ξεροπόταμου) της συνολικής έκτασης.

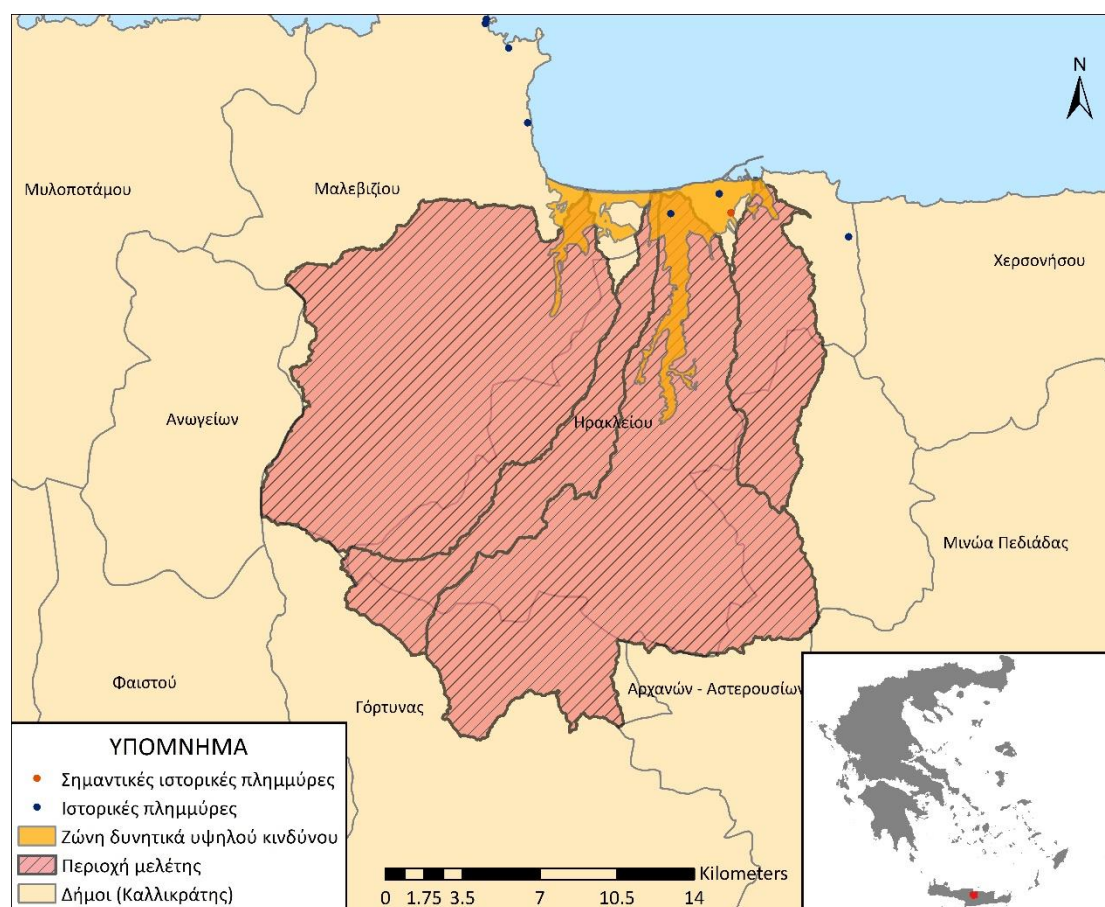
Τα στοιχεία ποσοστιαίας κατανομής σε κατηγορίες χρήσης γης ανά λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Κατανομή σε κατηγορίες χρήσης γης ανά λεκάνη απορροής

	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γόφυρος	Κατσαμπαδιανός
Αστική χρήση	1.43%	3.07%	3.59%	14.28%
Δασική χρήση	49.21%	26.67%	9.68%	11.21%
Αγροτική χρήση	49.36%	70.26%	86.73%	74.51%

2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

2.3.1 Ιστορικές πλημμύρες και ΖΔΥΚ



Σχήμα 2.16: Ιστορικό πλημμυρών στο βόρειο τμήμα της Π.Ε. Ηρακλείου και Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου (δεδομένα από greka.gr, ίδια επεξεργασία)

Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται το ιστορικό πλημμυρών και οι Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚ) στην ευρύτερη περιοχή της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης.

Κατάντη της περιοχής μελέτης καταγράφονται σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ τρεις θέσεις, οι οποίες έχουν πληγεί από πλημμύρα, δυο εκ των οποίων αναφέρονται στο ίδιο συμβάν το οποίο όμως θεωρείται ότι έπληξε παραπάνω από μια θέσεις. Σημειώνεται ότι κατά το στάδιο της προκαταρκτικής αξιολόγησης ορισμένες πλημμύρες χαρακτηρίστηκαν ως «σημαντικές» με κριτήριο τις συνέπειές τους είτε σε επίπεδο ανθρώπινων θυμάτων είτε ύψους οικονομικών αποζημιώσεων, είτε μεγέθους κατακλυζόμενης έκτασης. Σε ό,τι αφορά την εξεταζόμενη περιοχή, υπάρχει μια καταγραφή σημαντικής πλημμύρας. Τα παραπάνω γεγονότα καταγράφονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή μελέτης (Δεδομένα από Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018, ίδια επεξεργασία)

Θέση	Ημερομηνία	Σημαντικότητα
Γιόφυρος	16/01/1994	-
Ηράκλειο	16/01/1994	ΝΑΙ
Ηράκλειο	06/11/2004	-

Η ΖΔΥΚ ορίστηκε με γνώμονα την επιδεκτικότητα της περιοχής σε πλημμύρα αλλά και τη σημασία των δυνητικών συνεπειών από μελλοντικές πλημμύρες:

- Το πρώτο υλοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη το κατά πόσο οι εξεταζόμενες περιοχές βρίσκονται σε θέσεις προσχωματικών αποθέσεων και την ύπαρξη χαμηλών κλίσεων (κάτω από 2%).
- Το δεύτερο υλοποιήθηκε εκτιμώντας ότι οι αρνητικές συνέπειες θα έχουν ιδιαίτερη σημασία εφόσον το πλημμυρικό συμβάν λάβει χώρα στην ευρύτερη περιοχή πόλεων, βιομηχανικών ζωνών, γεωργικών εκτάσεων με ιδιαίτερη οικονομική αξία, παραγωγικών μονάδων που ενδέχεται να προκαλέσουν ρύπανση, προστατευόμενων περιοχών, μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και υποδομών (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Η ΖΔΥΚ έχει έκταση 27 km² και περιλαμβάνει κυρίως τις παραλιακές περιοχές στα βόρεια της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου και τις ζώνες εκατέρωθεν των ποταμών Γαζανού και Γιόφυρου. Η πόλη του Ηρακλείου καταλαμβάνει μεγάλο μέρος της ΖΔΥΚ, ενώ η περιοχή ανήκει διοικητικά στους Δήμους Ηρακλείου και Μαλεβιζίου (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Το γεγονός το οποίο έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 1994 αφορά στον ποταμό Γιόφυρο. Η υπερχειλίση επήλθε ύστερα από καταγεγραμμένη βροχή 24 ωρών και ύψος 185 mm σύμφωνα με τον βροχογράφο του σταθμού της Αγ. Βαρβάρας. Το ύψος των ζημιών της συγκεκριμένης πλημμύρας εκτιμήθηκε στα 2 δις δραχμές και περιλαμβάνει τον κατακλυσμό 3000 στρεμμάτων με αμπέλια, την πλημμύρα υπογείων κατοικιών και τον πνιγμό χιλιάδων ζώων στους στάβλους. Το γεγονός του 2004 το οποίο επίσης καταγράφεται συνδέεται με μεγάλες υλικές ζημιές σε σπίτια, βιοτεχνίες, αγροκαλλιέργειες και ζημιές στο οδικό δίκτυο και τα δίκτυα του ΟΤΕ και της ΔΕΗ (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Προσφάτως, στις 13/01/2014 καταγράφονται νέες πλημμύρες στην περιοχή του Ηρακλείου από υπερχειλίση του Γιόφυρου και του παραποτάμου του Δρακουλιάρη στις περιοχές Φοινικιάς, Μαλάδων και Γιόφυρου, από τις οποίες κινδύνεψαν και κάτοικοι, ενώ σημειώθηκαν υλικές ζημιές σε οικίες, καλλιέργειες και δίκτυα υποδομών (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Τις ίδιες ημέρες του επόμενου έτους και συγκεκριμένα την 13/01/2015 σημειώθηκε νέα πλημμύρα μετά από βροχή 24 ωρών και ύψους βροχής 101.2 mm και την επόμενη ημέρα 42 mm αντίστοιχα, σύμφωνα με το βροχομετρικό σταθμό στα Σταυράκια Ηρακλείου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ως αποτέλεσμα αυτών παρουσιάστηκαν σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του ΒΙΟΚΑ Ηρακλείου, όταν ο υφιστάμενος πασσαλότοιχος ο οποίος οριοθετεί τις εγκαταστάσεις με την κοίτη του χειμάρρου υποσκάφθηκε από τα νερά της πλημμύρας και εισήλθε στις εγκαταστάσεις οι οποίες χρειάστηκε να διακόψουν για κάποιες μέρες τη λειτουργία τους (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Στο Σχήμα 2.17 απεικονίζονται οι συνέπειες της συγκεκριμένης πλημμύρας στις εγκαταστάσεις του ΒΙΟΚΑ Ηρακλείου (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).



Σχήμα 2.17: Υποσκαφή πασσαλότοιχου (αριστερά) και πλημμύρα εγκαταστάσεων ΒΙΟΚΑ Ηρακλείου (δεξιά) ως αποτέλεσμα της πλημμύρας στις 13/01/2015 (Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018)

2.3.2 Μηχανισμοί πλημμύρας στην περιοχή μελέτης

Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (2018) η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων από τις υπερχειλίσεις του Γιόφυρου οφείλονται κυρίως σε:

- Ανεπάρκεια διατομών υφιστάμενων γεφυρών (αναφέρονται επί παραδείγματι οι γέφυρες Φοινικιάς και Δρακουλιάρη).
- Έντονα φαινόμενα καταπάτησης της κοίτης με μπαζώματα τόσο στις αστικές περιοχές όσο και σε αυτές με έντονη αγροτική εκμετάλλευση.
- Έντονη βλάστηση στην πεδινή κοίτη (καλαμιές κυρίως) και δυσχερής πρόσβαση για καθαρισμό.
- Έντονη δόμηση στις παρόχθιες περιοχές.

Η πλημμύρα προκαλείται συνήθως και εκτενέστερα στην πεδινή κοίτη του Γιόφυρου, ενώ όταν πραγματοποιούνται μεγάλες καταιγίδες, μεγάλες ποσότητες φερτών υλών μεταφέρονται προς τα κατόντη ως αποτέλεσμα της διάβρωσης των οχθών και των παρόχθιων εκτάσεων στα ορεινά τμήματα της λεκάνης. Ο Γιόφυρος έχει οριοθετηθεί με έργα αντιπλημμυρικής προστασίας στο πρώτο τμήμα της πεδινής κοίτης του και σε μήκος 5 km από την εκβολή στη θάλασσα (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Όσον αφορά στο υδατόρευμα του Ξεροπόταμου, αυτό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για τις δυτικές συνοικίες της πόλης του Ηρακλείου, εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτό διέρχεται από κατοικημένες περιοχές, ενώ η κοίτη του είναι περιορισμένων διαστάσεων (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Επιπλέον σημειώνονται καταπατήσεις της πεδινής κοίτης και στενώσεις λόγω ύπαρξης ιδιοκτησιών, όπως επίσης και η ύπαρξη πυκνής βλάστησης και φερτών υλών που δυσχεραίνουν την απορροή, όπως συμβαίνει και στον ποταμό Γιόφυρο. Σχετική μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε από τον ΟΑΝΑΚ πρότεινε την κατασκευή δυο φραγμάτων για την ανάσχεση πλημμύρας: το φράγμα του Πρινιά (Ασιτών) για το οποίο έχει ολοκληρωθεί μελέτη και το φράγμα των Δαφνών, για το οποίο δεν έχει υλοποιηθεί μελέτη (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Σε σχέση με το ρέμα του Κατσαμπαδιανού (ή Σιλαμιανός) αυτός δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα, ενώ έχει προηγηθεί διευθέτηση προ 25ετίας στην εκβολή του με δίδυμο πλακοσκεπή οχετό σε μήκος 600 m, στα πλαίσια της κατασκευής του δρόμου Ηράκλειο-Βιάννος (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Όσον αφορά στο Γαζανό ποταμό, ο μηχανισμός πλημμύρας δεν περιγράφεται στο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (2018), ενώ και δημοσιογραφικά δεν υπάρχουν καταγραφές για σημαντικές πλημμυρικές εκδηλώσεις, παρά μόνο για τις προσπάθειες τακτικού καθαρισμού του ποταμού. Παρόλα αυτά σημειώνεται ότι οι περιοχές εκατέρωθεν του ποταμού στο πεδινό του τμήμα ανήκουν στη ΖΔΥΚ της χαμηλής ζώνης λεκανών ρεμάτων Ηρακλείου.

2.3.3 Παρατηρήσεις επί των ληφθέντων αντιπλημμυρικών μέτρων στην περιοχή μελέτης

Στη λεκάνη του Γιόφυρου και συγκεκριμένα για την προστασία του ευπαθούς πεδινού τμήματός της έχει μελετηθεί κατά το παρελθόν η υλοποίηση έργων ορεινής υδρονομίας τα οποία περιλαμβάνουν το φράγμα στη θέση Λαδούκο του Δήμου Τεμένους, έντεκα λεκάνες εκτόνωσης πλημμυρικών αιχμών (φραγμάτων ανάσχεσης) και δεκαπέντε λεκάνες συγκράτησης φερτών (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Στην Π.Ε. Ηρακλείου κατά την τριετία 2001-2004 κατασκευάστηκαν αντιπλημμυρικά έργα συνολικού προϋπολογισμού άνω των 3 εκ. ευρώ. Η παρεχόμενη προστασία, όπως προκύπτει από τη συχνή και καταστροφική εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων, δεν

είναι ικανοποιητική. Κατά το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (2018) απαιτείται συνολική θεώρηση για λήψη μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας σε διαφορετικές θέσεις σε όλη την έκταση της λεκάνης. Σημειώνεται τέλος, ότι τα έργα ορεινής υδρονομίας είναι περιορισμένα συνολικά στην περιοχή (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

3.1.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών – Λογισμικό Arc-GIS

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), γνωστά ευρύτερα ως GIS (Geographical Information Systems) διαχειρίζονται αποτελεσματικά την χωρική πληροφορία και τα περιγραφικά δεδομένα που μπορούν να συσχετιστούν με αυτή. Σύμφωνα με τους Κάβουρα κ.α. (2016) ένα σύστημα GIS δεν είναι απλώς ένα πακέτο λογισμικού, αλλά ένα σύνθετο σύστημα που αποτελείται από επιμέρους συστατικά στοιχεία (Σχήμα 3.1):

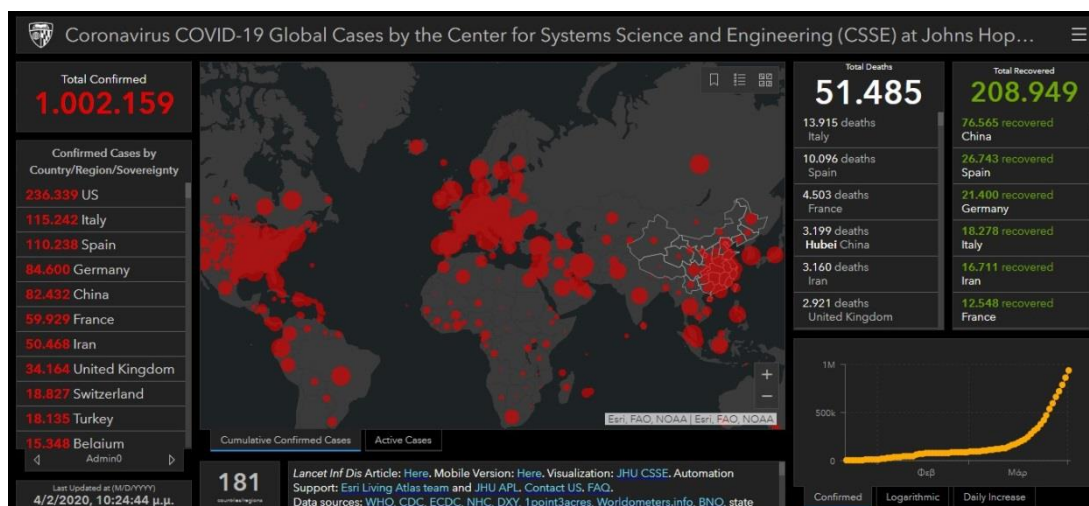
- το σύστημα του υπολογιστή, δηλαδή το υλικό (hardware) και το λειτουργικό σύστημα (operating system),
- το λογισμικό (software),
- τα χωρικά δεδομένα,
- τις διαδικασίες διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων και
- τους χρήστες.



Σχήμα 3.1: Συστατικά στοιχεία ενός Σ.Γ.Π. (Κάβουρας κ.α., 2016, ίδια επεξεργασία)

Τα Σ.Γ.Π. βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα της υγείας και των κοινωνικών υπηρεσιών, των φυσικών πόρων, των μεταφορών, των τεχνικών υποδομών, των επιχειρήσεων και πολλών ακόμη και αξιοποιούνται για την εξυπηρέτηση πολλών διαφορετικών επιστημονικών κλάδων, όπως οι επιστήμες υγείας, η γεωλογία, η δασολογία, οι επιστήμες περιβάλλοντος, η βιολογία κ.α.. Ο κλάδος της υγείας, ο οποίος αναφέρθηκε και πρώτος είναι εκείνος στον οποίο καταγράφεται η πρώτη χωρική ανάλυση (Κάβουρας κ.α., 2016). Αυτή πραγματοποιήθηκε από τον γιατρό και πατέρα της επιδημιολογίας John Snow, ο οποίος προσπάθησε να αναλύσει τις θέσεις όπου παρατηρήθηκαν θάνατοι από

χολέρα στην περιοχή του Λονδίνου στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, δημιουργώντας έναν από τους πρώτους χάρτες κουκίδων (dot density map). Αξίζει για λόγους σύγκρισης να αναφερθεί ως ένα αντίστοιχο σύγχρονο προϊόν, η χαρτογράφηση της εξάπλωσης της πανδημίας του COVID-19 με χρήση συστημάτων web-GIS, η οποία εξελίχθηκε την ίδια περίοδο με τη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το περιβάλλον της σχετικής πλατφόρμας του πανεπιστημίου Johns Hopkins:



Σχήμα 3.2: Χαρτογράφηση της παγκόσμιας εξάπλωσης της πανδημίας COVID-19 μέσω συστημάτων web-GIS. Το στιγμιότυπο λήφθηκε στις 2 Απριλίου 2020.

Η ιδέα της οργάνωσης και συστηματοποίησης της γεωγραφικής πληροφορίας με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1960 από τον Roger Tomlinson με την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος απογραφής των ορίων της γης (Canada Geographic Information System – CGIS), ενώ σχεδόν παράλληλες προσπάθειες ανάπτυξης τέτοιων λογισμικών ξεκίνησαν και στο Harvard Graduate School of Design. Από εκεί ξεκίνησαν σημαντικές προσωπικότητες στο χώρο της ανάπτυξης συστημάτων εμπορικού λογισμικού, μεταξύ των οποίων και ο Jack Dangermond ο οποίος αργότερα ίδρυσε την Environmental Systems Research Institute (ESRI) (Κάβουρας κ.α., 2016).

Η εταιρεία ESRI καταλαμβάνει σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς έχοντας αναπτύξει λογισμικά προϊόντα που συνθέτουν ένα πλήρες Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Το ArcGIS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας (έκδοση Desktop 10.5.1), είναι το πιο διαδεδομένο στην Ελλάδα και το εξωτερικό προϊόν λογισμικού GIS.

3.1.2 Λογισμικό HEC – RAS

Το λογισμικό HEC-RAS είναι ένα λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (U.S. Army Corps of Engineers – U.S.A.C.E.) και χρησιμοποιείται για την υδραυλική ανάλυση ποταμών σε μόνιμες και μη συνθήκες. Αποτελείται από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη (Graphical User Interface – GUI), τον πυρήνα υδραυλικών αναλύσεων, ενώ παρέχει δυνατότητες αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων, καθώς και εργαλεία αναπαράστασης και

επεξεργασίας αποτελεσμάτων. Το σύστημα διαθέτει τέσσερις κατηγορίες μονοδιάστατης υδραυλικής ανάλυσης ποταμού:

- μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων,
- μη μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων,
- προσομοίωση φερτών με μεταβαλλόμενα όρια και
- ανάλυση ποιότητας νερού.

Επιπλέον παρέχονται πρόσθετες λειτουργίες οι οποίες 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, υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας χάρτη με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών που εμφανίστηκαν σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης και καθ' όλη τη διάρκειά της (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Το HEC-RAS σχεδιάστηκε ώστε να εκτελεί μονοδιάστατη (1D), δισδιάστατη (2D) ή συνδυασμένη μονοδιάστατη και δισδιάστατη (1D/2D) υδραυλική ανάλυση ποταμών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται υδραυλική προσομοίωση σε δυο διαστάσεις. Η επίλυση της δισδιάστατης ροής βασίζεται στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης, οι οποίες αποτελούν μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης μάζας και της αρχής διατήρησης της ορμής, αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις Navier – Stokes περιγράφουν την κίνηση των ρευστών στις τρεις διαστάσεις. Για τη μοντελοποίηση πλημμύρας σε δισδιάστατο επίπεδο γίνονται ορισμένες απλοποιήσεις. Μια απλοποιημένη μορφή εκφράζεται μέσω των εξισώσεων Saint – Venant οι οποίες στηρίζονται στις παραδοχές ασυμπίεστης ροής, ομοιόμορφης πυκνότητας και υδροστατικής πίεσης του ρευστού. Σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, η διαφορική μορφή της εξίσωσης ρηχών υδάτων διατήρησης μάζας (συνέχειας) περιγράφεται στην Εξίσωση 3.1:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3.1)$$

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 της ταχύτητας στην x και y διεύθυνση αντίστοιχα και

q (m³/s): η εισερχόμενη ροή (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Οι 2D εξισώσεις ποσότητας κίνησης (ορμής) ρηχών υδάτων (Saint Venant) για τη x και την y διεύθυνση αντίστοιχα περιγράφονται στις παρακάτω Εξισώσεις 3.2, 3.3:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (3.3)$$

Όπου:

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

g (m/s²): η επιτάχυνση της βαρύτητας,

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

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

f (s⁻¹): η παράμετρος Coriolis (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Σε ορισμένες περιπτώσεις ροής ρηχών υδάτων οι όροι που περιλαμβάνουν την επιτάχυνση της βαρύτητας και τον συντελεστή τριβής στον πυθμένα είναι κυρίαρχοι στις εξισώσεις κίνησης, ενώ το ιξώδες, η παράμετρος Coriolis, η μεταγωγική επιτάχυνση και η τοπική επιτάχυνση μπορούν να αγνοηθούν (Ανδρικοπούλου, 2019). Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση κίνησης ανάγεται στη δισδιάστατη μορφή των εξισώσεων κύματος διάχυσης (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 (Σαρχάνη, 2018):

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f u \quad (3.4)$$

$$-g \frac{\partial H}{\partial y} = c_f v \quad (3.5)$$

Η 1D υδραυλική ανάλυση ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ποιοτικά στοιχεία διατομών, καθώς και για συστήματα ανοιχτών αγωγών καθορισμένης διατομής. Το 1D μοντέλο χρησιμοποιείται επιπλέον για την ανάλυση περιοχών με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις, οι οποίες συνδέονται γενικά με μικρό πεδίο κατάκλισης πλημμύρας. Τέτοια ανάλυση προτιμάται επίσης σε περιπτώσεις ύπαρξης τεχνικών έργων στην περιοχή μελέτης, διότι αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με τη δισδιάστατη ανάλυση.

Όσον αφορά στη 2D ανάλυση, αυτή ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) καθώς και για την προσομοίωση περιοχών με ηπιότερες κλίσεις, οι οποίες συχνά συνδέονται με εκτεταμένο πλημμυρικό πεδίο. Αυτού του τύπου η ανάλυση συστήνεται για περιπτώσεις έντονης κίνησης της ροής σε δυο διευθύνσεις, όπως και όταν προκύπτει ανάγκη ανάλυσης ταχύτητας ροής πλησίον τεχνικών έργων. Τέλος, η 2D υδραυλική ανάλυση χρησιμεύει για την ανάλυση θραύσης φράγματος ή αναχώματος, όπου η ροή απότομα αποκτά πολλές κατευθύνσεις.

Η 1D/2D υδραυλική ανάλυση εφαρμόζεται κυρίως για την ανάλυση συστημάτων που περιλαμβάνουν αστικό και μη αστικό περιβάλλον, όπου δηλαδή αξιοποιείται η μονοδιάστατη ανάλυση για την προσομοίωση της ροής εντός τους υδρογραφικού δικτύου και δισδιάστατη για την ανάλυση των πεδινών εκτάσεων.

3.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.2.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Για την υλοποίηση της γεωμορφολογικής ανάλυσης έγινε χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) και συγκεκριμένα το λογισμικό ArcGIS της ESRI σε συνδυασμό με την πρόσθετη εφαρμογή HEC – GeoHMS της U.S. Army Corps of Engineers.

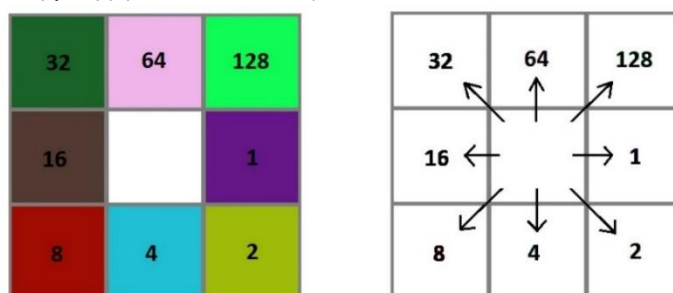
Χορηγήθηκαν από την υπηρεσία του Κτηματολόγιο Α.Ε. κανονικοποιημένα αρχεία raster που αποτελούν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την περιοχή της Κρήτης. Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) έχει μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος 5.00 m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600 m X 3600 m, με περιμετρική 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%.

Αρχικά το Ψ.Μ.Ε. μέσω της εργαλειοθήκης του ArcMap και συγκεκριμένα της εντολής “Extract by Mask” κόβεται στα όρια της Π.Ε. Ηρακλείου, το οποίο βρέθηκε από την ιστοσελίδα geodata.gov.gr σε αρχείο μορφής shapefile. Στη συνέχεια για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της εξεταζόμενης περιοχής αξιοποιείται η εργαλειοθήκη του add-on HEC – GeoHMS:

- Πλήρωση βυθισμάτων (Fill Sinks)

Σε αυτό το βήμα προσομοιώνεται η πλήρωση τυχόν βυθισμάτων που υπάρχουν στο Ψ.Μ.Ε. και η οποία προηγείται της κίνησης του νερού προς τα κατάντη. Έτσι η ροή δεν διακόπτεται από τον «εγκλωβισμό» νερού σε κάποιο σημείο με υψόμετρο χαμηλότερο από τα 8 κελιά γύρω του. Χωρίς αυτή τη διεργασία η ανάλυση δε μπορεί να δώσει σωστά αποτελέσματα. Η τιμή του υψόμετρου τέτοιων κελιών, τα οποία αντιστοιχούν σε κοιλάτηδες τίθενται ίσα με τα αμέσως μικρότερα γειτονικά τους υψόμετρα.

- Κατεύθυνση ροής (Flow Direction)



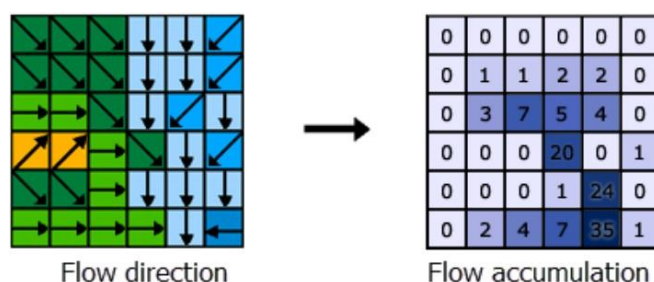
Σχήμα 3.3: Επεξήγηση κανάβου διεύθυνσης ροής (Πηγή: Τσούλος κ.α. (2015), ίδια επεξεργασία)

Μέσω αυτής της διαδικασίας ορίζεται η κατεύθυνση κατά την οποία πραγματοποιείται η ροή. Ο κανάβος που προέκυψε ως προϊόν της προηγούμενης διεργασίας αξιοποιείται ως δεδομένο εισόδου. Κάθε φαντίο του Ψ.Μ.Ε. εξετάζεται σε σχέση με τα γειτονικά και υπολογίζονται οι κλίσεις με βάση τις υψομετρικές διαφορές. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζεται η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, η οποία είναι και η διεύθυνση απορροής του νερού στην επιφάνεια του εδάφους, οπότε το φαντίο κωδικοποιείται αναλόγως

λαμβάνοντας μία από τις τιμές 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 και 128 (Σχήμα 3.3.). Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε κανονικοποιημένη δομή (raster) ως κানাβος κατεύθυνσης ροής (flow direction grid) (Τσούλος, Σκοπελίτη και Στάμου, 2015).

- Συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation)

Σε αυτό το βήμα υπολογίζεται ο αριθμός των φατνίων τα οποία απορρέουν αθροιστικά (συγκεντρωτικά) σε κάθε κελί. Για την εξαγωγή αυτής της πληροφορίας ως δεδομένο εισόδου αξιοποιείται ο κানাβος κατεύθυνσης ροής που προέκυψε κατά την προηγούμενη διαδικασία. Το εμβαδόν της ανάντη έκτασης η οποία απορρέει στο εξεταζόμενο φατνίο υπολογίζεται ως το γινόμενο του πλήθους τους επί το εμβαδόν των κελιών (Σχήμα 3.4). Τα κελιά που βρίσκονται στις μισγάγγειες θα έχουν υψηλές τιμές συγκέντρωσης ροής, ενώ αυτά που προσομοιώνουν τους υδροκρίτες θα έχουν μηδενικές τιμές. Τελικό προϊόν είναι ο κানাβος συγκέντρωσης ροής (flow accumulation grid).



Σχήμα 3.4: Επεξήγηση κανάβου συγκεντρωτικής ροής (Πηγή: pro.arcgis.com)

- Ορισμός υδατορευμάτων (Stream Definition)

Σε αυτό το στάδιο ορίζονται τα κελιά τα οποία θα συναποτελέσουν το υδρογραφικό δίκτυο. Αυτό γίνεται ορίζοντας ένα «κατώφλι» ως προς την τιμή συγκέντρωσης ροής. Κάθε φατνίο που συγκεντρώνει απορροή πάνω από το όριο αυτό θεωρείται μέρος του υδρογραφικού δικτύου. Όσο μικρότερη είναι η τιμή που θα οριστεί ως κατώφλι τόσο πυκνότερο θα είναι το υδρογραφικό δίκτυο που θα παραχθεί και αντίστοιχα ένα μικρότερο κατώφλι οδηγεί σε ένα πιο αραιό υδρογραφικό δίκτυο. Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται ο κানাβος ρεμάτων, ένα αρχείο δομής raster (stream grid).

- Κατάτμηση υδρογραφικού δικτύου (Stream Segmentation)

Σε αυτό το βήμα ο κানাβος ρεμάτων που προέκυψε παραπάνω χωρίζεται σε επιμέρους κλάδους. Στα σημεία συμβολών δημιουργούνται κόμβοι και ανάμεσα σε δυο κόμβους ορίζεται ένα μοναδικό τμήμα του υδρογραφικού (κλάδος). Τελικό προϊόν της διαδικασίας είναι ο κানাβος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (stream link grid).

- Διανυσματοποίηση υδρογραφικού δικτύου (Drainage Line Processing)

Μέσω αυτής της διαδικασίας παράγεται το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική (vector) δομή. Ως δεδομένο εισόδου χρησιμοποιείται ο κানাβος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και ο καναβος κατεύθυνσης ροής που έχουν παραχθεί σε προηγούμενα βήματα.

3.2.2 Λεκάνες και υπολεκάνες απορροής

Επιπροσθέτως και παραμένοντας στο περιβάλλον του ArcGIS υλοποιούνται τα παρακάτω βήματα τα οποία αποσκοπούν στον ορισμό των υπολεκανών εντός της περιοχής μελέτης.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται παρέχονται και πάλι από την εργαλειοθήκη του HEC - GeoHMS του U.S. Army Corps of Engineers.

- Χάραξη λεκανών απορροής (Catchment Grid Delineation)

Κατά αυτή τη διαδικασία χαράσσονται οι λεκάνες απορροής της εξεταζόμενης έκτασης. Σε κάθε επιμέρους κλάδο του υδρογραφικού δικτύου που εντοπίστηκε (stream link grid) χαράσσεται υδροκρίτης αξιοποιώντας τη γεωπληροφορία από τον κανάβο διεύθυνσης απορροής (flow direction grid) ο οποίος έχει ήδη παραχθεί. Το προϊόν του βήματος αυτού είναι ένας κανάβος με κελιά που ομαδοποιούνται στην έκταση της υπολεκάνης του κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου (catchment grid).

- Δημιουργία πολυγώνων λεκανών απορροής (Catchment Polygon Processing)

Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τη διανυσματοποίηση του κανάβου με τις υπολεκάνες όπως προέκυψε από το προηγούμενο βήμα.

3.3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.3.1 Πολυκριτηριακή ανάλυση και Σ.Γ.Π.

Καθημερινά ένα άτομο ή μια κοινωνική ομάδα μπορεί να λαμβάνουν αποφάσεις, έχοντας υπόψιν πολλές διαφορετικές εναλλακτικές επιλογές και συνυπολογίζοντας διαφορετικά κριτήρια. Η συνθετότητα των προβλημάτων, με πολλούς διαφορετικούς και αλληλοσυγκρουόμενους παράγοντες, αναδεικνύει την ανάγκη τυποποίησης αυτής της διαδικασίας – της διαδικασίας λήψης απόφασης. Η πολυκριτηριακή ανάλυση έχει ως κύριο στόχο τη διαμόρφωση τυποποιημένων διαδικασιών οι οποίες θα βοηθήσουν τους αποφασίζοντες στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015).

Η πλημμύρα αναγνωρίζεται ως ένα πολύπλοκο φαινόμενο και ως εκ τούτου μεθοδολογίες οι οποίες σχετίζονται με τη θεωρία αβεβαιότητας και την πολυκριτηριακή αξιολόγηση κρίνονται ως οι πλέον κατάλληλες στη μελέτη πλημμυρών (Yeganeh & Sabri, 2014). Οι συμβατικές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι ευρέως μη χωρικές (aspatial) και χρησιμοποιούν συνήθως μέσες τιμές ή κατάλληλα εκτιμημένες τιμές. Μια τέτοια θεώρηση δεν εξασφαλίζει τη σωστή χωρική κατανομή της πληροφορίας, γεγονός το οποίο οδηγεί συχνά σε σημαντική αλλοίωση των αποτελεσμάτων της έρευνας (Σιδηροπούλου, 2011).

Η χωρική πολυκριτηριακή ανάλυση (Spatial Multi-Criteria Analysis - SMCA), η οποία περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον van Herwijnen (1999) είναι ένα σχετικά νέο επιστημονικό πεδίο, το οποίο εξελίσσεται παράλληλα με την περαιτέρω ανάπτυξη των Σ.Γ.Π.. Συγκεκριμένα, για το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, η επεξεργασία χωρικών

δεδομένων από κοινού με τις ιδιότητες, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα για την αποτελεσματική εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης (Wang et al., 2011).

Ένα άλλο πεδίο με το οποίο συνδυάζεται συχνά η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι η Ασαφής Λογική (fuzzy logic), η οποία εισήχθη το 1965 από τον Lotfi Zadeh, καθηγητή του Πανεπιστημίου του Berkley, και περιγράφει μια διαφορετική αντίληψη σε σχέση με την Αριστοτελική λογική. Η Ασαφής Λογική αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο επίλυσης προβλημάτων, το οποίο μεταξύ άλλων, χρησιμεύει στην εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας διφορούμενες ή ανακριβείς πληροφορίες (Παπαδόπουλος, 2006). Κατά τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης συχνά υιοθετούνται ποιοτικά κριτήρια ή απαιτείται η σύγκριση της σημαντικότητας διαφορετικών κριτηρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις η Ασαφής Λογική παρέχει τυποποιημένα εργαλεία για τη συμπερίληψη τέτοιων ποιοτικών εκτιμήσεων με τρόπο ο οποίος μειώνει την υποκειμενικότητα και οδηγεί σε λιγότερο επισφαλείς αποφάσεις (Theochari et al., 2019). Πολλές εργασίες με αντικείμενο συναφές με της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιούν πολυκριτηριακές μεθόδους οι οποίες αξιοποιούν ασαφή σύνολα για να αποδώσουν την επιδεκτικότητα της περιοχής μελέτης σε πλημμύρες (Feloni, 2019, Wang et al., 2011, Παραϊοαννου et al., 2015, Yeganeh & Sabri, 2014).

3.3.2 Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process – AHP)

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η οποία προτάθηκε από τον T.L. Saaty (Saaty, 1977, Saaty, 1987) και είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, ενώ υιοθετεί τον σταθμισμένο γραμμικό συνδυασμό (WLC). Πρόκειται για μια αναλυτική μέθοδο η οποία περιέχει μαθηματική και λογική αιτιολόγηση για τη διαδικασία λήψης απόφασης και στοχεύει στη μαθηματικοποίηση των σκέψεων και διαισθήσεων του υπεύθυνου λήψης απόφασης. Το πρόβλημα δομείται σε μια ιεραρχία, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητά του μέσω της αποδόμησής του σε υπο-προβλήματα.

Τα στάδια υλοποίησης της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας είναι (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015):

- Αποδόμηση του προβλήματος μέσα από ένα ιεραρχικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από τις βασικές συνιστώσες του.
- Συγκριτική αξιολόγηση κάθε κριτηρίου.
- Σύνθεση των αξιολογημένων κριτηρίων για την παραγωγή τελικών αποτελεσμάτων.
- Εύρεση βέλτιστης λύσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος δεν είναι η εύρεση μιας βέλτιστης λύσης, αλλά ο προσδιορισμός της χωρικής κατανομής της πλημμυρικής επιδεκτικότητας στην περιοχή μελέτης. Επί της ουσίας, κάθε φαντίο raster αντιπροσωπεύει μια διαφορετική «εναλλακτική» (alternative) και αξιολογείται ως τέτοια σύμφωνα με τα διάφορα κριτήρια. Για την υλοποίηση αυτού, υιοθετήθηκε ένα μοντέλο πολυκριτηριακής

ανάλυσης το οποίο συνδυάζει τη μεθοδολογία AHP και τα συστήματα GIS, ακολουθώντας την παρακάτω λογική (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015):

1. Αποδόμηση του προβλήματος και καθορισμός ιεραρχικής δομής του προβλήματος. Εδώ γίνεται ο προσδιορισμός των κριτηρίων και υποκριτηρίων και αποφασίζεται ο τρόπος που τα επιμέρους στοιχεία της ιεραρχίας συσχετίζονται μεταξύ τους.
2. Προσδιορισμός επιθεμάτων GIS. Τα προαναφερθέντα κριτήρια αντιστοιχίζονται σε χωρικά θεματικά επίπεδα.
3. Παραγωγή πινάκων σύγκρισης – Έλεγχος ασυνέπειας – Υπολογισμός συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων. Σε αυτό το βήμα γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των κριτηρίων.
4. Δημιουργία και οργάνωση των χωρικών βάσεων δεδομένων σε περιβάλλον GIS.
5. Διαμόρφωση σταθμισμένων κριτηρίων ως αποτέλεσμα των δυο προηγούμενων βημάτων.
6. Σύνθεση σταθμισμένων κριτηρίων για την αποτίμηση του φαινομένου σε κάθε χωρική μονάδα στην περιοχή μελέτης.
7. Έλεγχος αποτελεσμάτων – Ανάλυση ευαισθησίας.

Το στάδιο της αξιολόγησης στηρίζεται στην ανά ζεύγη σύγκριση (pair wise comparison) των επιμέρους κριτηρίων σύμφωνα με την υποκειμενική (προσωπική, εμπειρική, βιβλιογραφική, κλπ.) άποψη του ερευνητή ως προς τη σχέση σημαντικότητας που έχουν μεταξύ τους τα εξεταζόμενα κριτήρια. Αυτό πραγματοποιείται σύμφωνα με τη θεμελιώδη κλίμακα σύγκρισης που έχει εισάγει ο Saaty και παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1: Θεμελιώδης κλίμακα σύγκρισης ζευγών (Saaty, 1977)(Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Ένταση σχετικής σημαντικότητας	Λεκτική περιγραφή
1	Εξίσου σημαντικό
2	Εξίσου έως μέτρια πιο σημαντικό
3	Μέτρια πιο σημαντικό
4	Μέτρια έως ισχυρά πιο σημαντικό
5	Ισχυρά πιο σημαντικό
6	Ισχυρά έως πολύ ισχυρά πιο σημαντικό
7	Πολύ ισχυρά πιο σημαντικό
8	Πολύ ισχυρά έως εξαιρετικά πιο σημαντικό
9	Εξαιρετικά πιο σημαντικό

Η παραπάνω τεχνική σύγκριση ζευγών συμβάλλει στον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων. Όταν υπάρχουν πολλά κριτήρια, τα βάρη συνήθως κανονικοποιούνται έτσι ώστε να αθροίζονται στη μονάδα. Στην περίπτωση κριτηρίων η πλήθους, ένα σύνολο βαρών ορίζεται ως εξής:

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

$$\sum w_j = 1$$

Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού βαρών, ένα άτομο ή μια ομάδα συγκρίνει με κάθε πιθανό συνδυασμό και μεταφέρει τις βαθμολογίες σε ζεύγη στο μητρώο συγκρίσεων. Αν το μητρώο είναι συμμετρικό, αρκεί η συμπλήρωση μόνο του ενός τριγώνου (είτε πάνω είτε κάτω από τη διαγώνιο) και τα υπόλοιπα κελιά συμπληρώνονται βάσει αυτού. Στη συνέχεια, αθροίζονται οι τιμές κάθε στήλης του μητρώου συγκρίσεων και κάθε στοιχείο του μητρώου διαιρείται με το άθροισμα της στήλης που προέκυψε. Έτσι δημιουργείται το κανονικοποιημένο μητρώο συγκρίσεων. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των στοιχείων για κάθε σειρά του κανονικοποιημένου μητρώου και οι μέσοι όροι που προκύπτουν αποτελούν τους συντελεστές βάρους των κριτηρίων.

Η μέθοδος ολοκληρώνεται με την ανάλυση συνέπειας της σύγκρισης των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν. Ο λόγος συνέπειας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα οι αξιολογήσεις στο μητρώο συγκρίσεων να έχουν γίνει με τυχαίο τρόπο. Σύμφωνα με τον Saaty, μητρώα συντελεστών βάρους που οδηγούν σε λόγο συνέπειας άνω του 10% απαιτείται να επανεκτιμηθούν (Χαλκιάς και Γκούσια, 2015).

Η εκτίμηση του λόγου συνέπειας γίνεται όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3.6:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.6)$$

Όπου:

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

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

Ο παραπάνω δείκτης υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση 3.7:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3.7)$$

Όπου:

λ : Η ιδιοτιμή του πίνακα

n: Το πλήθος των κριτηρίων

Για την ορθολογική αξιολόγηση με διαφορετικά κριτήρια, απαιτείται η απόδοση για αυτά να γίνεται στην ίδια κλίμακα. Για το λόγο αυτό γίνεται τυποποίηση των κριτηρίων με βάση τις Εξισώσεις 3.8 και 3.9:

$$x_i = \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.8)$$

$$x_i = 1 - \frac{(FV_i - FV_{min})}{(FV_{max} - FV_{min})} \cdot SR \quad (3.9)$$

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

Για την τυποποίηση ενός κριτηρίου επιλέγεται είτε η Εξίσωση 3.8 είτε η 3.9 ανάλογα με το αν πρόκειται για αύξον ή φθίνον κριτήριο αντίστοιχα. Ως αύξον περιγράφεται το κριτήριο το οποίο όσο μεγαλύτερη είναι η αξιολόγησή του τόσο σημαντικότερη είναι η συμμετοχή του στο εξεταζόμενο φαινόμενο. Για παράδειγμα, στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όπου μελετάται η επιδεκτικότητα μιας περιοχής σε πλημμύρες, το κριτήριο της αδιαπερατότητας θεωρείται αύξον (όσο αυξάνεται η αδιαπερατότητα τόσο αυξάνεται η επιδεκτικότητα σε πλημμύρες), ενώ το κριτήριο των κλίσεων είναι φθίνον (όσο αυξάνονται οι κλίσεις τόσο μειώνεται η επιδεκτικότητα σε πλημμύρες). Για τα υπόλοιπα κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη στη συγκεκριμένη εργασία, η βροχόπτωση είναι αύξον, ενώ το υψόμετρο και η απόσταση από υδατόρευμα φθίνοντα.

Για την ολοκλήρωση της πολυκριτηριακής ανάλυσης απαιτείται ένα τελευταίο βήμα που αφορά στη σύνθεση των επιμέρους μονοκριτηριακών αποδόσεων, σύμφωνα με τους συντελεστές βάρους, οι οποίοι προέκυψαν σε προηγούμενο βήμα. Αυτό πραγματοποιείται σύμφωνα με τον σταθμισμένο γραμμικό συνδυασμό (WLC) και η υλοποίησή του παρουσιάζεται στην Εξίσωση 3.10:

$$FS = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (3.10)$$

Όπου:

FS: Η τελική τιμή για κάθε κελί

w_i : Το βάρος του κριτηρίου i

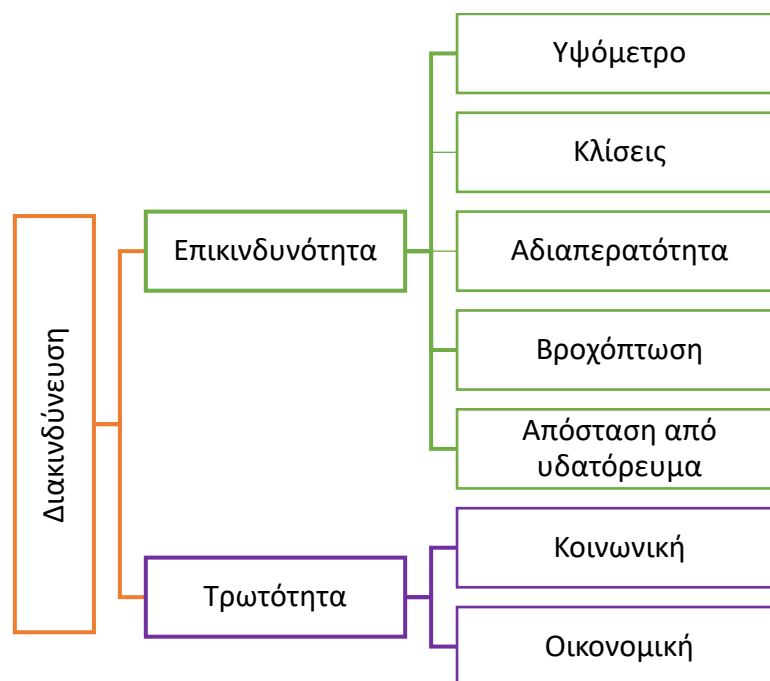
x_i : Η τυποποιημένη τιμή του κριτηρίου i

3.3.3 Ανάλυση δομής προβλήματος

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το πρώτο βήμα για την υλοποίηση του μοντέλου πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η αποδόμηση του προβλήματος μέσω του καθορισμού της ιεραρχικής του δομής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της κατανομής της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης.

Γίνεται η θεώρηση ότι η πλημμυρική διακινδύνευση (flood risk) αποτελείται από δυο συνιστώσες, την επικινδυνότητα πλημμυρών (flood hazard) και την τρωτότητα (vulnerability) της εξεταζόμενης περιοχής. Κάθε μια από αυτές τις συνιστώσες αναλύεται σε επιμέρους κριτήρια τα οποία καθορίζουν την επιδεκτικότητα σε πλημμύρες.

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η ανάλυση δομής του προβλήματος όπως προέκυψε μετά και την επιλογή κριτηρίων η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.4.



Σχήμα 3.5: Ανάλυση δομής προβλήματος (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.4 Επιλογή κριτηρίων

Κριτήρια για την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας

Για την εκτίμηση των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών απαιτείται ο εντοπισμός και η καταγραφή εκείνων των παραγόντων, οι οποίοι συντελούν στην ανάπτυξη πλημμυρικών εκδηλώσεων στην εξεταζόμενη περιοχή. Μια σημαντική παρατήρηση η οποία εξάγεται μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα είναι ότι από πλευράς μελετητών δεν υπάρχει πάντα συμφωνία ως προς το ποιοι είναι τελικώς οι καθοριστικοί παράγοντες. Η πληθώρα διαφορετικών απόψεων και ιεραρχήσεων αποτυπώνει ακριβώς την πολυπλοκότητα αυτού του φυσικού φαινομένου.

Παρόλα αυτά, η διαδικασία επιλογής των κριτηρίων τα οποία λαμβάνονται υπόψη είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η συμπερίληψη ή μη ενός κριτηρίου μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Τα κριτήρια πρέπει να επιλεγούν με τρόπο ώστε αφενός να καλύπτουν όλες τις πλευρές του προβλήματος, αφετέρου το πλήθος τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε κατά το δυνατόν να μειώνεται η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αξιολόγησης (Keeney and Raiffa, 1993).

Στη βιβλιογραφία καταγράφονται αναλύσεις οι οποίες αντιμετωπίζουν με πολύ διαφορετικό τρόπο τα κριτήρια, με περιπτώσεις όπου κάποια ιεραρχούνται ως άκρως σημαντικά από ορισμένους μελετητές, ενώ από άλλους λιγότερο ή παραλείπονται και εντελώς (χαρακτηριστικό παράδειγμα ως προς αυτό αποτελεί το κριτήριο υψόμετρου – elevation). Προστίθεται με άλλα λόγια ένα βασικό στοιχείο αβεβαιότητας στη διαδικασία

κατάστρωσης ενός Σχεδίου Διαχείρισης Πλημμυρικού Κινδύνου, το οποίο σχετίζεται με το βαθμό στον οποίο αφενός γίνεται κατανοητός και αφετέρου αλγοριθμοποιείται ο τρόπος με τον οποίο προκαλούνται οι πλημμύρες.

Τελικά, για την εκτίμηση των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών έγινε επιλογή των εξής πέντε κριτηρίων:

- Υψόμετρο
- Κλίσεις Εδάφους
- Αδιαπερατότητα
- Βροχόπτωση
- Απόσταση από υδατόρευμα

Ορισμένα άλλα κριτήρια τα οποία αξιοποίησαν άλλες μελέτες με αντίστοιχο αντικείμενο μετά από βιβλιογραφική έρευνα είναι:

- ο τύπος εδάφους (Zelenakova et al., 2018),
- το γεωλογικό υπόβαθρο (Vojtek & Vojtekova, 2019),
- η απόσταση από άλλα υδάτινα σώματα πέραν του υδρογραφικού δικτύου (π.χ. λίμνες) (Siddayao et al., 2015),
- η κατακόρυφη απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα (Fernandez & Lutz, 2010),
- η απόσταση από γεωλογικά ρήγματα (Vojtekova & Vojtek, 2020),
- τα χαρακτηριστικά της βλάστησης στην περιοχή (Χατζηδάκη, 2013),
- η ενδεχόμενη ύπαρξη τεχνικών έργων για την ανάσχεση πλημμύρας (π.χ. αναχώματα) (Wang et al., 2011) και
- το κριτήριο της κρίσιμης πλευράς, το οποίο συνεκτιμά τη διεύθυνση της πλευράς εισόδου των καταιγίδων στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής και τη σχετική ως προς αυτήν διεύθυνση των πρηνών (Μουσάδης, 2018).

Πίνακας 3.2: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 1)

	<i>ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ</i>	<i>ΚΛΙΣΗ</i>	<i>ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ</i>	<i>ΥΨΟΜΕΤΡΟ</i>	<i>ΑΠΟΣΤΑΣΗ</i>	<i>W_i</i>
<i>ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ</i>	1	1/4	1/6	1	1/4	0.058
<i>ΚΛΙΣΗ</i>	4	1	1	7	1/2	0.258
<i>ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ</i>	6	1	1	6	2	0.350
<i>ΥΨΟΜΕΤΡΟ</i>	1	1/7	1/6	1	1/6	0.049
<i>ΑΠΟΣΤΑΣΗ</i>	4	2	1/2	6	1	0.285

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται το μητρώο συγκρίσεων τα στοιχεία του οποίου αποτελούν τις εκτιμήσεις που αποδόθηκαν κατά τη διαδικασία σύγκρισης των κριτηρίων ανά ζεύγη. Στην τελευταία στήλη παρουσιάζονται οι συντελεστές βάρους οι οποίοι αποδίδονται ανά κριτήριο.

Το μητρώο σύγκρισης κριτηρίων συμπληρώθηκε με την αντίληψη ότι τα κριτήρια τα οποία παίζουν το μεγαλύτερο ρόλο στην εκδήλωση πλημμυρών είναι αυτά της κλίσης, της αδιαπερατότητας και της απόστασης από υδατορεύματα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πολυκριτηριακή ανάλυση και η συγκεκριμένη μέθοδος (AHP) διατηρεί υποκειμενικό χαρακτήρα. Για το λόγο αυτό, έχει ιδιαίτερη αξία μια διαδικασία ελέγχου των αποτελεσμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο καταστρώθηκαν δυο επιπλέον σενάρια στα οποία τα κριτήρια αξιολογούνται με διαφορετικό τρόπο. Στο σενάριο 2 όλα τα κριτήρια θεωρούνται ισάξια και αποδίδεται σε αυτά συντελεστής βάρους 20%. Στο σενάριο 3 έγινε η αντίστροφη θεώρηση σε σχέση με το αρχικό σενάριο 1, υιοθετείται δηλαδή η άποψη ότι το κριτήριο του υψομέτρου και της βροχόπτωσης είναι τα σημαντικότερα. Τα αντίστοιχα μητρώα σύγκρισης και οι συντελεστές βάρους παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.3 και 3.4 που ακολουθούν. Σημειώνεται ότι ο δείκτης CR της Εξίσωσης 3.6 για τα τρία σενάρια υπολογίστηκε σε 0.04, 0.00 και 0.034 αντίστοιχα. Όλες οι τιμές είναι κάτω του 0.10 και ως εκ τούτου θεωρούνται αποδεκτές.

Πίνακας 3.3: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 2)

	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	ΚΛΙΣΗ	ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	W_i
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	1	1	1	1	1	0.20
ΚΛΙΣΗ	1	1	1	1	1	0.20
ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	1	1	1	1	1	0.20
ΥΨΟΜΕΤΡΟ	1	1	1	1	1	0.20
ΑΠΟΣΤΑΣΗ	1	1	1	1	1	0.20

Πίνακας 3.4: Μητρώο σύγκρισης κριτηρίων ανά ζεύγη και συντελεστές βάρους ανά κριτήριο (Σενάριο 3)

	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	ΚΛΙΣΗ	ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	W_i
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	1	8	9	1	8	0.415
ΚΛΙΣΗ	1/8	1	1/2	1/9	1/3	0.037
ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	1/9	2	1	1/8	1	0.058
ΥΨΟΜΕΤΡΟ	1	9	8	1	9	0.423
ΑΠΟΣΤΑΣΗ	1/8	3	1	1/9	1	0.067

Κριτήρια για την εκτίμηση της τρωτότητας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής γίνεται η θεώρηση ότι η τρωτότητα έχει δυο συνιστώσες, την κοινωνική και την οικονομική. Η πρώτη λαμβάνει υπόψη τις δυνητικές συνέπειες τις οποίες θα είχε μια πιθανή πλημμύρα στις κοινωνίες της περιοχής μελέτης, ενώ η δεύτερη τις δυνητικές οικονομικές απώλειες. Ένα τρίτο κριτήριο το οποίο δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία αλλά υιοθετείται σε ορισμένες άλλες μελέτες αντίστοιχου αντικειμένου είναι το περιβαλλοντικό κριτήριο. Σημειώνεται επίσης ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δυο κριτήρια/συνιστώσες της τρωτότητας είναι ισάξιες, επομένως αποδίδεται σε καθεμιά βάρους 50%.

3.3.4 Υλοποίηση και σύνθεση κριτηρίων

Κριτήρια πλημμυρικής επικινδυνότητας

Το πρώτο κριτήριο το οποίο υλοποιήθηκε ήταν αυτό του υψομέτρου μέσω του αρχείου DEM το οποίο διορθώθηκε με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2. Το κριτήριο είναι φθίνον και ως εκ τούτου τυποποιήθηκε με βάση την Εξίσωση 3.9.

Το κριτήριο των κλίσεων υλοποιείται αξιοποιώντας το αρχείο DEM για την περιοχή μελέτης και με εκμετάλλευση του αντίστοιχου εργαλείου της εργαλειοθήκης του ArcMap (Slope). Πρόκειται για φθίνον κριτήριο και για το λόγο αυτό τυποποιείται μέσω της Εξίσωσης 3.9.

Πίνακας 3.5: Συντελεστής αδιαπερατότητας για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine

Κωδικός	Περιγραφή	Τιμή
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	1
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.9
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.9
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	1
123	Ζώνες λιμένων	1
124	Αεροδρόμια	1
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.8
133	Χώροι οικοδόμησης	0.8
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.6
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	0.4
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.6
221	Αμπελώνες	0.3
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.3
223	Ελαιώνες	0.3
231	Λιβάδια	0.3
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.5
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.5
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.2
312	Δάσος κωνοφόρων	0.3
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.6
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
512	Συλλογές υδάτων	1
523	Θάλασσα	1

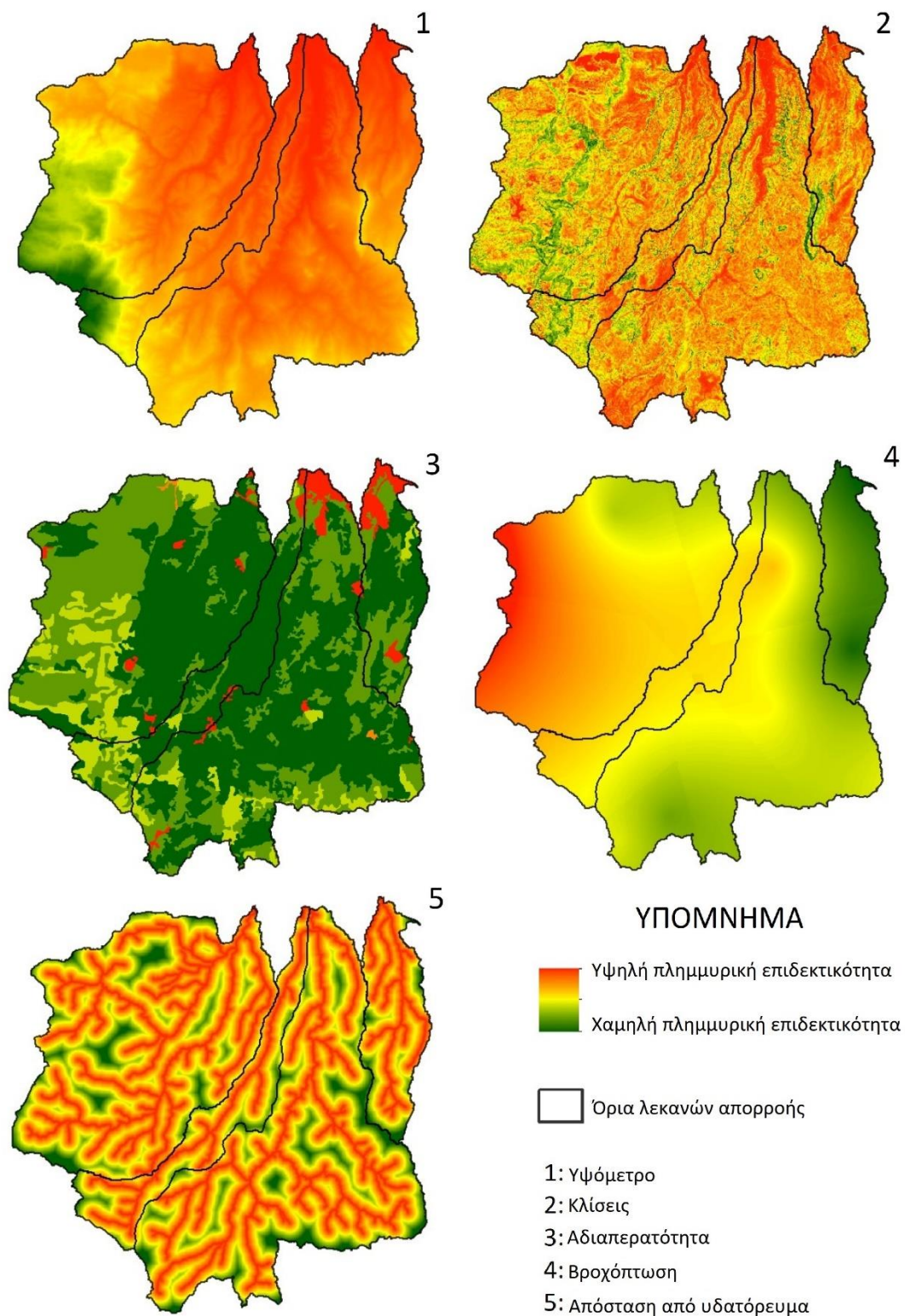
Για την υλοποίηση του κριτηρίου της αδιαπερατότητας αξιοποιείται η χωρική πληροφορία του Corine Land Cover (2012). Στις διαφορετικές κατηγορίες χρήσεων γης αποδίδεται διαφορετική τιμή για τον συντελεστή αδιαπερατότητας, σύμφωνα με τον

Πίνακα 3.5. Το κριτήριο της αδιαπερατότητας είναι αύξον και τυποποιείται μέσω της Εξίσωσης 3.8.

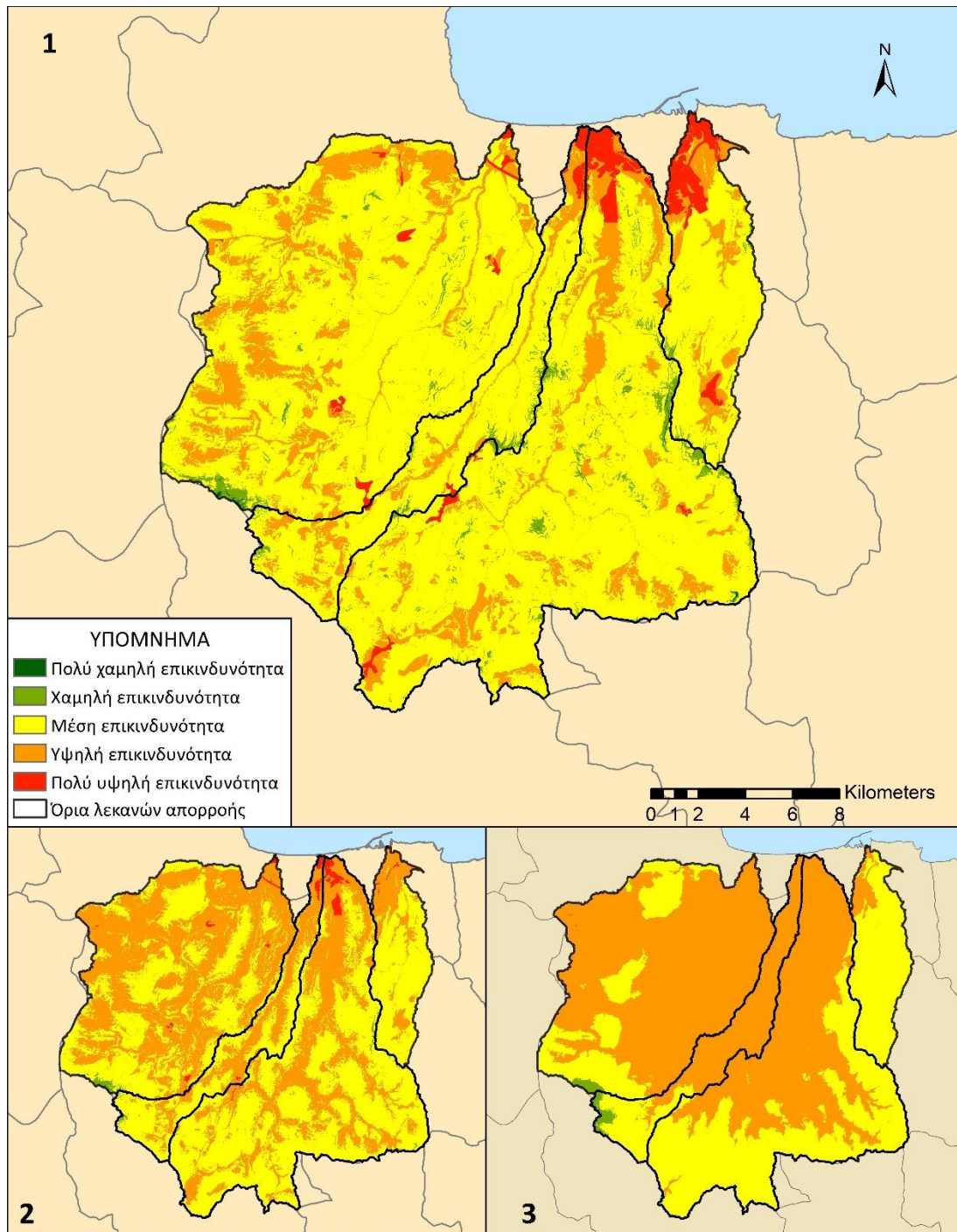
Για την υλοποίηση του κριτηρίου της βροχόπτωσης, από την ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας αξιοποιήθηκαν αρχεία τα οποία περιέχουν χωρικά δεδομένα για τη θέση μετεωρολογικών σταθμών στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης καθώς και δεδομένα για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών. Με βάση αυτές υπολογίζεται η ένταση βροχής διάρκειας εικοσιτετραώρου για κάθε σταθμό για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται τυπική περίοδος επαναφοράς 20 έτη. Με δεδομένη την ένταση υπολογίζεται άμεσα το ύψος βροχής. Τα δεδομένα που προκύπτουν ενσωματώνονται ως επίθεμα στο ArcMap, συνιστούν όμως σημειακά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχής με τη μέθοδο Kriging. Η βροχόπτωση είναι αύξον κριτήριο και για το λόγο αυτό τυποποιήθηκε μέσω της Εξίσωσης 3.8.

Τέλος, υλοποιείται το κριτήριο της απόστασης από υδατόρευμα, έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία χαρτογράφησης και διόρθωσης του υδρογραφικού δικτύου, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 και με αξιοποίηση του εργαλείου εντοπισμού της ευκλείδειας απόστασης από την εργαλειοθήκη του ArcMap (Euclidean Distance). Το κριτήριο είναι φθίνον και τυποποιείται μέσω της Εξίσωσης 3.9.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η μονοκριτηριακή απόδοση για όλα τα παραπάνω κριτήρια, ενώ στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η σύνθεση των αποδόσεων αυτών σύμφωνα με τα τρία σενάρια που προέκυψαν από την πολυκριτηριακή ανάλυση. Πρόκειται για τρεις διαφορετικές εκτιμήσεις για τη διακύμανση της πλημμυρικής επικινδυνότητας (flood hazard) στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 3.6: Μονοκριτηριακή πλημμυρική επιδεκτικότητα για τα πέντε εξεταζόμενα κριτήρια κατόπιν τυποποίησής τους (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Σχήμα 3.7: Σενάρια πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Κριτήρια τρωτότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην παρούσα εργασία γίνεται η θεώρηση ότι η τρωτότητα στην περιοχή μελέτης έχει δυο συνιστώσες, την κοινωνική και την οικονομική.

Όσον αφορά στην κοινωνική τρωτότητα αυτή υλοποιείται μέσω αρχείου το οποίο παρέχει εκτίμηση για την κατανάλωση ενέργειας από νοικοκυριά. Με αυτόν τον τρόπο θεωρείται ότι αποδίδεται η κατανομή του πληθυσμού στην περιοχή μελέτης. Το αρχείο

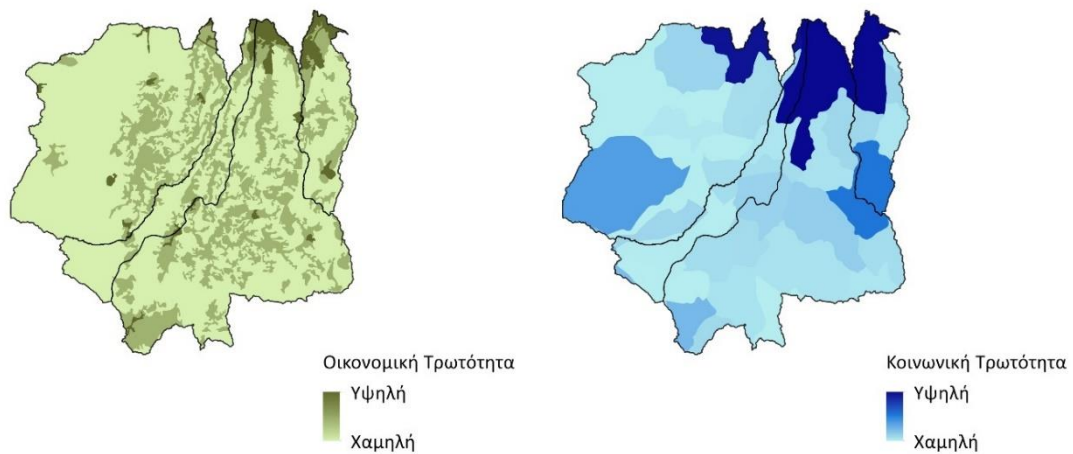
με τα χωρικά δεδομένα αποκτήθηκε μέσω της ιστοσελίδας geodata.gov.gr. Το κριτήριο είναι αύξον και τυποποιείται με βάση την Εξίσωση 3.8.

Το οικονομικό κριτήριο περιγράφει τις δυνητικές οικονομικές απώλειες από ενδεχόμενη πλημμύρα. Για την υλοποίησή του αξιοποιείται η χωρική πληροφορία του χάρτη χρήσεων γης Corine. Στις διαφορετικές κατηγορίες χρήσεων γης αποδίδονται τιμές για το δυνητικό κόστος κατά προσέγγιση σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6.

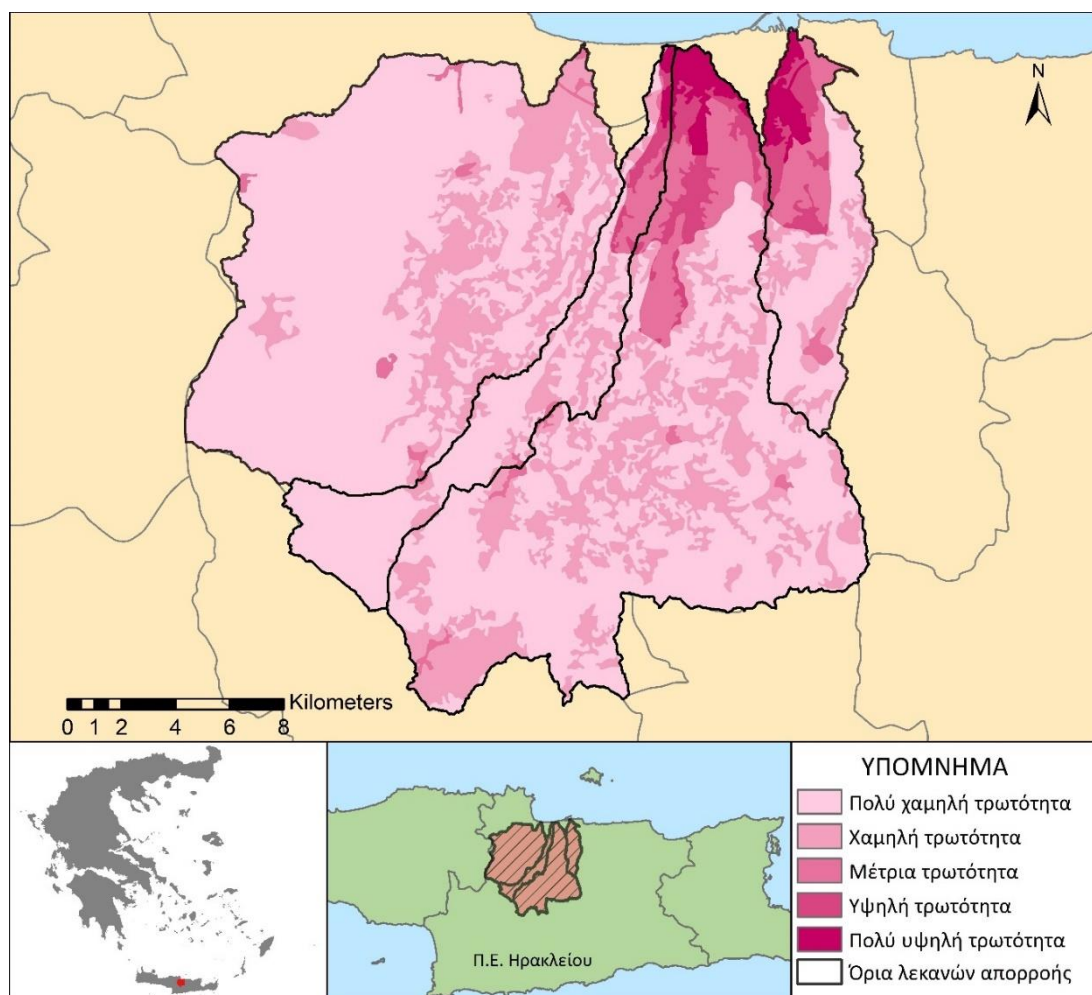
Πίνακας 3.6: Συντελεστής οικονομικής τρωτότητας για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine

Κωδικός	Περιγραφή	Τιμή
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	1
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.9
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	1
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	1
123	Ζώνες λιμένων	1
124	Αεροδρόμια	1
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.8
133	Χώροι οικοδόμησης	0.8
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.6
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	0.2
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.5
221	Αμπελώνες	0.5
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.5
223	Ελαιώνες	0.2
231	Λιβάδια	0.2
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.5
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.2
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.2
312	Δάσος κωνοφόρων	0.2
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.1
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.1
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	0.1
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.2
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.1
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.1
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.1
512	Συλλογές υδάτων	0.1
523	Θάλασσα	0.1

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η μονοκριτηριακή απόδοση για την κοινωνική και οικονομική τρωτότητα, ενώ στο Σχήμα 3.9 η σύνθεσή τους, δηλαδή ο χάρτης τρωτότητας της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 3.8: Κατανομή κοινωνικής και οικονομικής τρωτότητας στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 3.9: Χάρτης τρωτότητας της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

3.4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.4.1 Επιλογή και εξαγωγή υπολεκανών για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης

Για κάθε μια από τις τέσσερις λεκάνες οι οποίες αποτελούν την περιοχή μελέτης γίνεται επιλογή κατάλληλης θέσης με βάση την οποία χαράσσεται η αντίστοιχη υπολεκάνη. Η θέση καλείται σημείο προσομοίωσης. Η υδρολογική ανάλυση αφορά την ανάντη λεκάνη η οποία απορρέει στη συγκεκριμένη θέση και έχει ως αποτέλεσμα ένα πλημμυρογράφημα το οποίο χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση στην περιοχή κατάντη του σημείου προσομοίωσης.

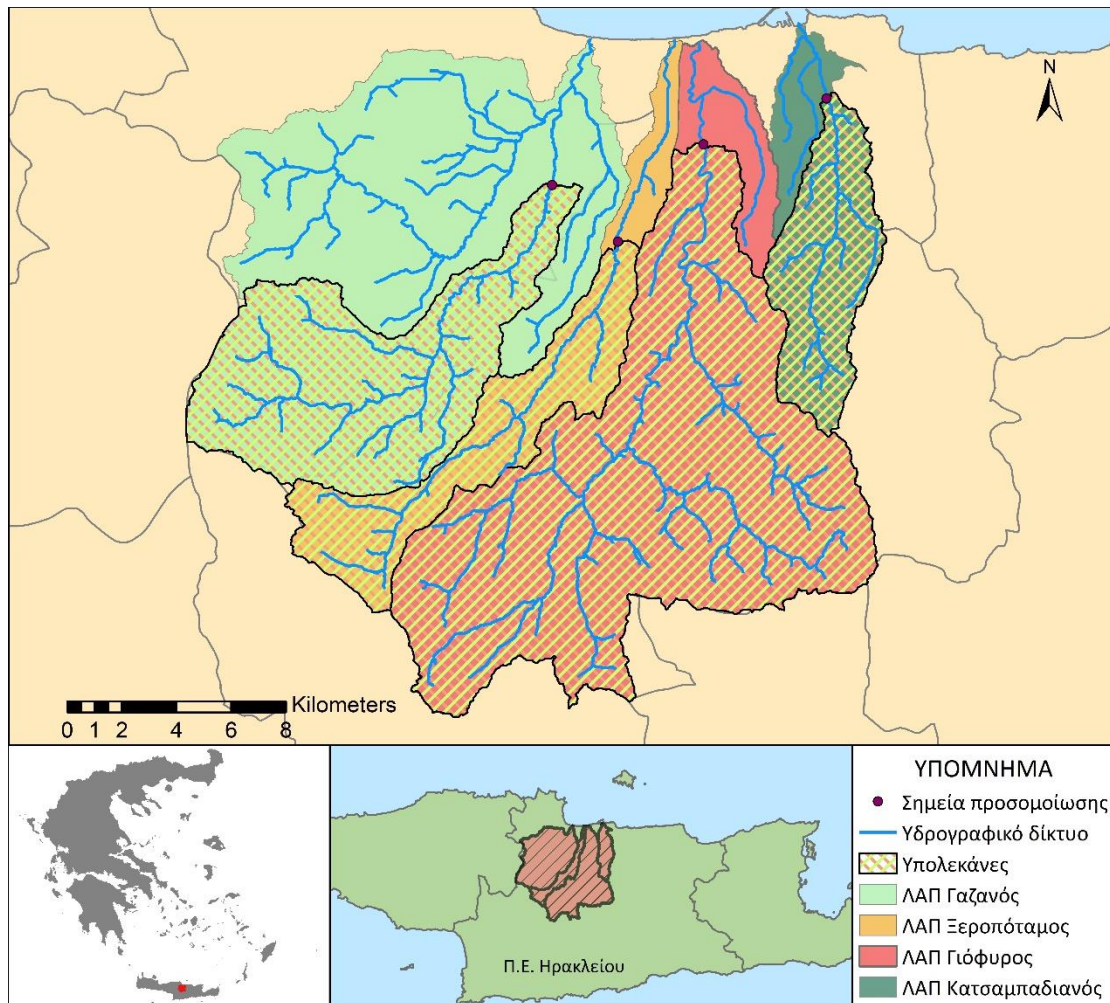
Η επιλογή του κατάλληλου σημείου προσομοίωσης λαμβάνει υπόψη πρώτα και κύρια το να βρίσκεται ανάντη περιοχών υψηλής διακινδύνευσης, για τις οποίες έχει μεγαλύτερη σημασία η υλοποίηση υδραυλικής προσομοίωσης και χαρτογράφησης του πλημμυρικού πεδίου. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης η οποία περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.3.

Η χάραξη των υπολεκανών υλοποιείται με τη χρήση Σ.Γ.Π. και συγκεκριμένα σε περιβάλλον ArcGIS με χρήση του πρόσθετου HEC – GeoHMS. Αρχικά επιλέγεται η εντολή Start a new project όπου δίνεται όνομα στο αντίστοιχο αρχείο. Με το project αντιστοιχίζονται όλα τα προϊόντα της γεωμορφολογικής ανάλυσης, όπως το DEM, ο κάρναβος κατεύθυνσης ροής, το υδρογραφικό δίκτυο κ.λ.π. μέσω της εντολής Data Management. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το εργαλείο Add project points για τον ορισμό των σημείων προσομοίωσης. Αυτές αποτελούν τα σημεία εξόδου των αντίστοιχων υπολεκανών οι οποίες παράγονται όταν επιλέγεται η εντολή Generate Project.

Τα σημεία τα οποία επιλέγονται τελικώς και οι αντίστοιχες υπολεκάνες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10 και τα τοπογραφικά τους χαρακτηριστικά καταγράφονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Τοπογραφικά στοιχεία για τις υπολεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης

	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γιόφυρος	Κατσαμπαδιανός
Έκταση (km ²)	75	41	169	32
Μέγιστο υψόμετρο (m)	1859	1778	915	811
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	48	86	18	35
Μέσο υψόμετρο (m)	747	562	352	315
Μέση κλίση (°)	23	21	17	16



Σχήμα 3.10: Σημεία προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης και χάραξη υπολεκανών για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης

3.4.2 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο το οποίο χρησιμεύει στην περιγραφή του μηχανισμού βροχής – απορροής είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥΓ) το οποίο εισήχθηκε στην υδρολογική ανάλυση από τον Sherman (1932). Κατά τον Sherman, μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα το οποίο προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους 10mm, η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση.

Η μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

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

Οι παραπάνω παραδοχές μόνο κατά προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι ικανοποιούνται από μια φυσική υδρολογική λεκάνη (Wilson, 1990; Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

- Όσον αφορά στην πρώτη παραδοχή, η αποθηκευτική ικανότητα των ρεμάτων αυξάνεται όσο ανεβαίνει η στάθμη του νερού. Επομένως, για βροχές ίσης διάρκειας όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχής τόσο περισσότερο νερό αποθηκεύεται. Το αποθηκευμένο νερό απορρέει μετά την παύση της βροχής, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου της άμεσης απορροής. Ως εκ τούτου αναμένεται διακύμανση ως προς το χρόνο απορροής ανάλογα με την ένταση της βροχής.

- Όσον αφορά στη δεύτερη παραδοχή, αυτή θεωρείται εξ αρχής αβάσιμη. Οι βροχές οι οποίες έχουν προηγηθεί του εξεταζόμενου γεγονότος επηρεάζουν την απορροή, ακόμα και αν έπεσαν αρκετό χρόνο νωρίτερα. Για το λόγο αυτό, το MYG μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην άμεση απορροή, δηλαδή στην απορροή η οποία μένει αφαιρουμένης της βασικής απορροής. Ακόμα κι έτσι, η εφαρμογή του κριτηρίου κρίνεται σχετική μιας και η άμεση απορροή εξαρτάται από το επίπεδο υγρασίας του εδάφους και το ποσοστό πληρώσεως των κοιλοτήτων του εδάφους πριν τη βροχή.

- Όσον αφορά στην τρίτη παραδοχή, αυτή μπορεί πράγματι να θεωρηθεί ότι ισχύει, αφού δεν αναμένονται ουσιαστικές αλλαγές στην κατάσταση μιας υδρολογικής λεκάνης μέσα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα, εκτός κι αν υπάρξει επέμβαση του ανθρώπου (με κατασκευή έργων, αλλαγή χρήσεων γης κ.λ.π.).

Οι αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι (Μπέλλος, 2006):

A) Αρχή της επαλληλίας: Το συνολικό υδρογράφημα απορροής που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των υδρογραφημάτων απορροής των επιμέρους βροχοπτώσεων, κατάλληλα μετατοπισμένων ώστε η αρχή τους να συμπίπτει με την έναρξη της αντίστοιχης βροχής.

B) Αρχή της αναλογίας: Δυο βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης παράγουν υδρογραφήματα με ίδια χρονική βάση αλλά οι τεταγμένες για κάθε χρονική στιγμή έχουν λόγο ίσο με το λόγο των εντάσεών τους.

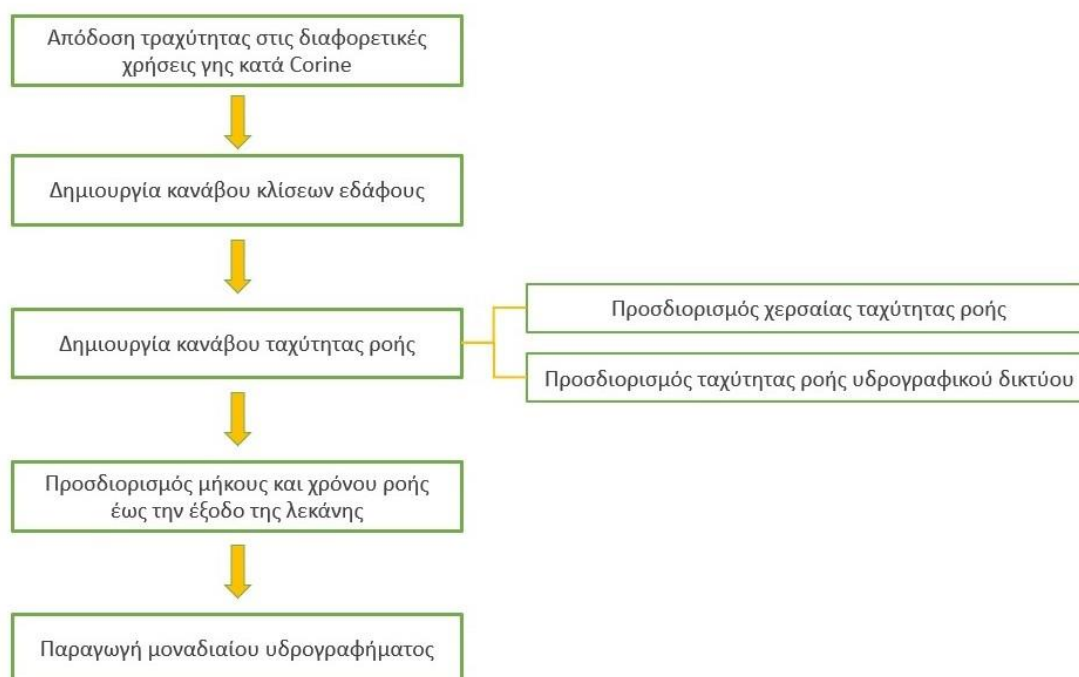
3.4.3 Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών

Η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών βασίζεται στη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης, η οποία συνεισφέρει στην απορροή κατά ένα συγκεκριμένο διάστημα (McCuen, 1998). Επομένως, η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες οι οποίες ονομάζονται ισόχρονες (Χριστοφίδης, 2008). Με τον όρο ισόχρονες καμπύλες περιγράφεται εκείνος ο γεωμετρικός τόπος των σημείων από τα οποία η απορροή ισαπέχει χρονικά μέχρι την έξοδο της λεκάνης (Καββαδά, 2012). Οι καμπύλες αυτές αφενός δε μπορούν να διασταυρωθούν μεταξύ τους, αφού η καθεμιά εκφράζει διαφορετική χρονική απόσταση από την έξοδο της λεκάνης, αφετέρου δύναται να εκτείνονται μόνο εντός των ορίων της λεκάνης απορροής (Dooge, 1959). Η μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί 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.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών χρησιμοποιείται για την παραγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη βοήθεια των λογισμικών ArcGIS και HEC-GeoHMS.

Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), το υδρογραφικό δίκτυο όπως προέκυψε από τη γεωμορφολογική ανάλυση η οποία περιγράφεται σε προηγούμενη παράγραφο και ο χάρτης χρήσεων γης Corine. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος, μια για κάθε λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης. Οι θέσεις αυτές επιλέγονται με βάση το χάρτη πλημμυρικής διακινδύνευσης ο οποίος προέκυψε από την πολυκριτηριακή ανάλυση.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιγράφεται στο Σχήμα 3.11:



Σχήμα 3.11: Υλοποίηση μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αρχικά σε κάθε κατηγορία χρήσης γης κατά Corine αποδίδεται μια τιμή για το συντελεστή τραχύτητας εδάφους k σύμφωνα με τον Πίνακα 3.8 και παράγεται το αντίστοιχο αρχείο δομής raster. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας εδάφους πολλαπλασιάζονται επί 100 ($k100$), έτσι ώστε να είναι ακέραιοι αριθμοί σύμφωνα με τη δομή του λογισμικού στο αρχικό στάδιο των υπολογισμών, ωστόσο αυτό διορθώνεται στη συνέχεια της διαδικασίας. Το μέγεθος κάθε φατνίου ορίζεται να είναι 5x5 m ώστε να συμπίπτει με το μέγεθος των φατνίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Στη συνέχεια παράγεται ο κানাβος κλίσεων για την περιοχή μελέτης με χρήση του εργαλείου Slope του ArcGIS, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής. Η ταχύτητα ροής διακρίνεται σε χερσαία (overland) και ποτάμια (overchannel). Η χερσαία ροή εξαρτάται από την κλίση εδάφους και την τραχύτητά του, ενώ η ποτάμια

προκύπτει σε συνάρτηση με την χερσαία ταχύτητα ροής, αλλά και την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου (Ανδρικοπούλου, 2018).

Πίνακας 3.8: Συντελεστής τραχύτητας k100 για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine (Δεδομένα από Καββαδά, 2012, ίδια επεξεργασία)

Κωδικός	Περιγραφή	Τιμή
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 εξόρυξης ορυκτών	115
133	Χώροι οικοδόμησης	115
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	60
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	50
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	50
221	Αμπελώνες	19
222	Οπωροφόρα δέντρα	19
223	Ελαιώνες	19
231	Λιβάδια	43
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	37
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	30
311	Δάσος πλατύφυλλων	15
312	Δάσος κωνοφόρων	15
321	Φυσικοί βοσκότοποι	37
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	30
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	25
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	60
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	43
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	55
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	60
512	Συλλογές υδάτων	30
523	Θάλασσα	21

Οι ταχύτητες χερσαίας ροής υπολογίζονται για κάθε φαντίο με βάση τη σχέση (Μαμάσης, 2007):

$$V(m/s) = k \cdot \sqrt{S}(m/m) \quad (3.11)$$

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

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται στο περιβάλλον του ArcMap και με χρήση του εργαλείου Raster Calculator του ArcToolbox, το οποίο υλοποιεί μαθηματικές πράξεις μεταξύ επιπέδων χωρικής πληροφορίας δομής raster, αλλά και αριθμών. Το προϊόν της παραπάνω διαδικασίας είναι ο κানাβος χερσαίας ροής. Για την υλοποίηση του κανάβου ποτάμιας ροής, αρχικά, δημιουργείται ο κানাβος κατεύθυνσης ροής μέσω του εργαλείου

Flow Direction, για την απόδοση της κατεύθυνσης ροής για κάθε φατνίο προς τα οκτώ γειτονικά του με κριτήριο τη μέγιστη κλίση. Στη συνέχεια και χάρη στο εργαλείο Flow Accumulation, υλοποιείται ο κλάδος συγκέντρωσης ροής, ο οποίος υπολογίζει για κάθε φατνίο το πλήθος των φατνίων τα οποία απορρέουν σε αυτό. Ύστερα, ο χρήστης επιλέγει κατώφλι ως προς το πλήθος των κελιών τα οποία απαιτείται να απορρέουν στο εξεταζόμενο φατνίο, ώστε αυτό να θεωρηθεί ότι ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο. Μετά την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, γίνεται ιεράρχηση των κλάδων σε τάξεις με τη μέθοδο Strahler. Στο περιβάλλον του ArcGIS αυτό πραγματοποιείται με την εντολή Stream Order.

Η ταξινόμηση κατά Strahler εκτιμά ως 1^{ης} τάξης εκείνους τους κλάδους του υδρογραφικού, οι οποίοι δε δέχονται απορροή από άλλα μικρότερα υδατορεύματα. Σε κάθε συμβολή δυο κλάδων 1^{ης} τάξης προκύπτει κλάδος 2^{ης} τάξης, ενώ στη συμβολή δυο κλάδων 2^{ης} τάξης προκύπτει κλάδος 3^{ης} τάξης κ.ο.κ. Στη συμβολή δυο κλάδων διαφορετικής τάξης ο κλάδος που προκύπτει διατηρεί τη μεγαλύτερη από τις τάξεις των συμβαλλόμενων κλάδων (Strahler, 1957).

Το οργανωμένο σε τάξεις υδρογραφικό δίκτυο που προκύπτει είναι ένα αρχείο δομής raster, το οποίο στη συνέχεια και με χρήση του εργαλείου Raster Calculator πολλαπλασιάζεται με το αρχείο raster της χερσαίας ροής. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ο κλάδος ταχύτητας ροής του υδρογραφικού δικτύου, ο οποίος συντίθεται με τον κλάδο της χερσαίας ροής. Με τον παραπάνω τρόπο εξάγεται ο κλάδος αθροιστικών ταχυτήτων ροής.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο κλάδος συγκεντρωτικών χρόνων ροής, ο οποίος εκτιμά για κάθε φατνίο το χρόνο που χρειάζεται το νερό για να φτάσει από αυτό στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Αυτό υλοποιείται με χρήση του εργαλείου Flow Length του ArcToolbox το οποίο υπολογίζει το μήκος διαδρομής του κάθε φατνίου έως την έξοδο, έχοντας ως δεδομένο εισόδου την κατεύθυνση ροής, η οποία έχει ήδη υπολογιστεί. Για την απόδοση αυτής της απόστασης σε μονάδες χρόνου, εισάγεται ως βάρος μια παράμετρος η οποία υπολογίζεται ως το αντίστροφο της αθροιστικής ταχύτητας ροής. Με αυτό τον τρόπο η χωρική απόσταση κάθε φατνίου μετατρέπεται σε χρονική. Έτσι παράγονται οι ισόχρονες καμπύλες, οι οποίες αποτυπώνουν το γεωμετρικό τόπο των σημείων που απορρέουν ταυτόχρονα στην έξοδο της λεκάνης.

Αυτό το επίθεμα ταξινομείται σε κλάσεις (εν προκειμένω, ανά ώρα) και γίνεται εξαγωγή του πίνακα των χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο πινακοποιείται το σύνολο των φατνίων τα οποία απορρέουν ανά ώρα. Για την παραγωγή του ΜΥΓ η βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους (10 mm) πολλαπλασιάζεται με τις διαστάσεις του κάθε φατνίου (5x5 m) και στη συνέχεια με το πλήθος των φατνίων που απορρέουν για την κάθε κλάση, δηλαδή για το κάθε χρονικό βήμα. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται χωριστά για κάθε μια από τις τέσσερις υπολεκάνες στην περιοχή μελέτης.

3.4.4 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder

Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούν συνθετικά ΜΥΓ είναι εμπειρικές και συνήθως αξιοποιούνται σε θέσεις όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Η μέθοδος Snyder είναι η πιο

γνωστή μέθοδος και προέκυψε μέσα από αναλύσεις μεγάλου πλήθους βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στη Βόρεια Αμερική (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

Η μέθοδος προσδιορίζει το χρόνο υστέρησης t_p , την αιχμή Q_p , το χρόνο βάσης T , καθώς και τα πλάτη του ΜΥΓ W_{50} και W_{75} για χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής, αντίστοιχα (McCuen, 1998).

Οι εξισώσεις που διέπουν τη μέθοδο είναι οι εξής:

$$t_p = C_t(L_{ca}L)^{0.3} \quad (hr) \quad (3.12)$$

$$Q_p = C_p \frac{640 \cdot A}{t_p} \quad (ft^3/sec) \quad (3.13)$$

$$T = 3 + 3 \cdot \left(\frac{t_p}{24}\right) \quad (ημέρες) \quad (3.14)$$

Όπου:

L_{ca} : η απόσταση του παροχομετρικού σταθμού στην έξοδο της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης, η οποία μετριέται κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορεύματος ως το πλησιέστερο στο κέντρο βάρους σημείο (mi).

L : η απόσταση του σταθμού έως τον υδροκρίτη, η οποία μετριέται επίσης κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος (mi).

C_t : συντελεστής ο οποίος αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και κυμαίνεται μεταξύ 1.80 και 2.20. Σε λεκάνες με έντονες κλίσεις, η τιμή του τείνει στη χαμηλότερη τιμή.

C_p : συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.56 και 0.69.

A : η έκταση της λεκάνης (mi^2)

T : η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Ελάχιστη τιμή οι 3 ημέρες με βάση την εξίσωση.

Ο χρόνος υστέρησης μετριέται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης t_R συνδέεται με τη χρονική υστέρηση t_p με βάση την παρακάτω σχέση:

$$t_R = t_p/5.5 \quad (3.15)$$

Αν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια t'_R μεγαλύτερη της t_R ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$t'_p = t_p + \frac{(t'_R - t_R)}{4} \quad (3.16)$$

Τα πλάτη του ΜΥΓ στο 50% και το 75% της αιχμής δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

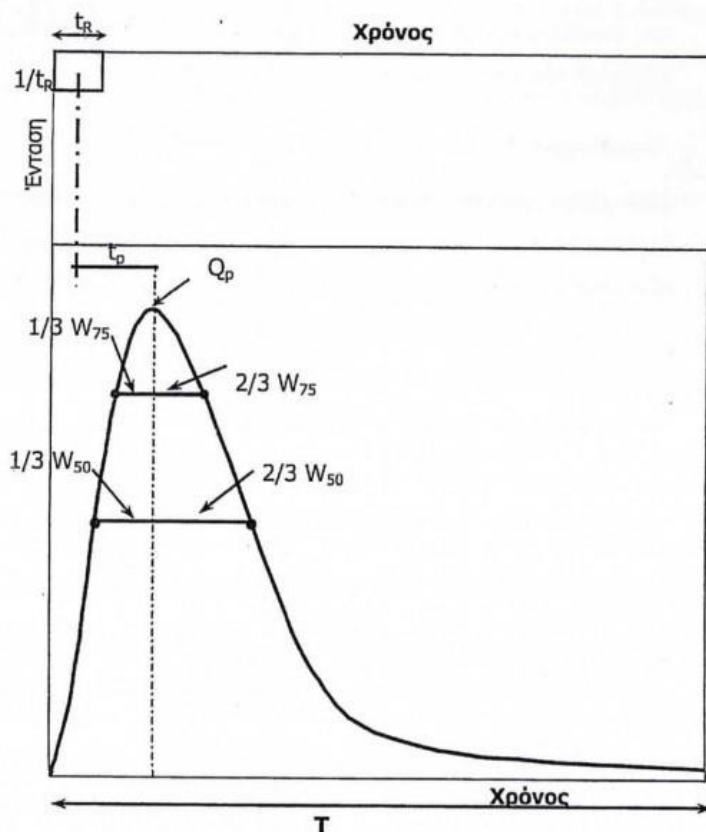
$$W_{50} = \frac{830}{q_p^{1.1}} \quad (3.17)$$

$$W_{75} = \frac{470}{q_p^{1.1}} \quad (3.18)$$

Όπου:

$$q_p = \frac{Q_p}{A} \quad (3.19)$$

Με τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών γίνεται η χάραξη του συνθετικού υδρογραφήματος.



Σχήμα 3.12: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018)

3.4.5 Μέθοδος Αδιάστατου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος SCS

Η μέθοδος βασίστηκε στην ανάλυση μεγάλου πλήθους μοναδιαίων υδρογραφημάτων από το Soil Conservation Service (το οποίο πλέον φέρει την ονομασία Natural Resources Conservation Service). Το αδιάστατο υδρογράφημα της S.C.S. είναι ένα συνθετικό ΜΥΓ, όπου στην τεταγμένη εκφράζεται ο λόγος της παροχής προς την παροχή αιχμής (Q_p), ενώ στην τετμημένη ο λόγος του χρόνου προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος (t_p) (Τσακίρης, 2013). Ο όγκος απορροής στον ανοδικό κλάδο αντιστοιχεί στο 37.5% του συνολικού όγκου (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Με δεδομένα την παροχή αιχμής και τη χρονική επιβράδυνση για συγκεκριμένη διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης, το ΜΥΓ μπορεί να εκτιμηθεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα για μια δεδομένη λεκάνη, σύμφωνα με τις εξισώσεις που ακολουθούν (Τσακίρης, 2013):

$$Q_p = \frac{2.08 \cdot A}{t_p} \quad (3.20)$$

$$t_p = \frac{t_0}{2} + t_L \quad (3.21)$$

Όπου:

Q_p : η παροχή αιχμής (m^3/s) του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

A: η επιφάνεια της λεκάνης απορροής (km^2)

t_p : ο χρόνος που παρατηρείται η μέγιστη παροχή – χρόνος αιχμής (hr)

t_0 : η διάρκεια του περισσεύματος βροχής (hr)

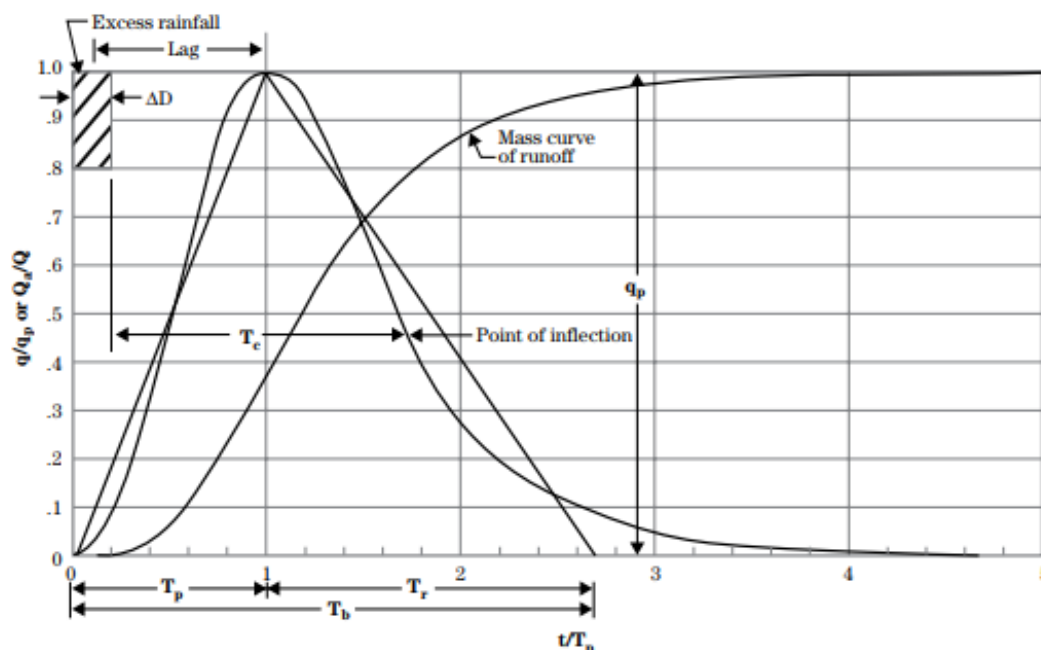
t_L : ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης (hr), δηλαδή ο χρόνος μεταξύ του κέντρου μάζας του υετογράμματος και της αιχμής πλημμύρας, που συνήθως υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.22:

$$t_L = 0.6 \cdot t_c \quad (3.22)$$

Όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής (hr).

Ανάμεσα στο χρόνο αιχμής t_p και στο χρόνο υστέρησης t_L , υφίσταται η Εξίσωση 3.23, με την οποία υπολογίζεται ο χρόνος αποχώρησης, t_r :

$$t_r = 1.67 \cdot t_p \quad (3.23)$$



Σχήμα 3.13: Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της SCS (Πηγή: www.nrcs.usda.gov)

3.4.6 Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS

Το HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) είναι ένα λογισμικό, το οποίο προσομοιώνει το μηχανισμό βροχής – απορροής και σχεδιάστηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (U.S. Army Corps of Engineers – U.S.A.C.E.). Το μοντέλο έχει εφαρμογή σε λεκάνες αγροτικές ή και αστικές ή ημιαστικές, μικρές ή μεγάλες (Τσιτρούλης, 2015).

Στο περιβάλλον του λογισμικού κατασκευάζεται ένα μοντέλο λεκάνης ακολουθώντας το διαχωρισμό του υδρολογικού κύκλου σε επιμέρους μέρη με δυνατότητα επεξεργασίας του καθενός χωριστά. Ένα μαθηματικό μοντέλο αναπαριστά την κάθε συνιστώσα, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι επιλογές του χρήστη για την προσομοίωση της κάθε συνιστώσας είναι αρκετές (Τουτζιάρη, 2012).

Ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται τα όρια της αντίστοιχης υπολεκάνης, το υδρογραφικό της δίκτυο και το σημείο προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά εξάγονται από το ArcGIS σε μορφή .shp. Εντός του HEC – GeoHMS υλοποιείται ένα Project ανά υπολεκάνη και στη συνέχεια τα αντίστοιχα μοντέλα για κάθε project.

Το πρώτο μοντέλο που κατασκευάζεται είναι το Basin Model, όπου φορτώνονται τα χωρικά επιθέματα (Map Layers) για την αντίστοιχη λεκάνη και στη συνέχεια κατασκευάζεται και ονοματίζεται η υπολεκάνη με το εργαλείο Subbasin Creation Tool. Αντίστοιχα, κατασκευάζεται η έξοδος της υπολεκάνης με το Sink Creation Tool στο σημείο προσομοίωσης, καθώς αποτελεί την έξοδο της λεκάνης. Αφού κατασκευάζονται αυτά, επιλέγεται η υπολεκάνη και της αποδίδονται κάποια χαρακτηριστικά, όπως η έκταση (Area), η μέθοδος απωλειών (Loss method), το μοντέλο βροχής – απορροής (Transform method) και γίνεται σύνδεση της λεκάνης με την έξοδό της.

Στη συνέχεια, επιλέγονται τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού απωλειών. Η μέθοδος που υιοθετείται είναι ο δείκτης Φ, μια από τις πιο γνωστές μεθόδους. Σύμφωνα με αυτή, ο συνολικός όγκος απωλειών κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα του επεισοδίου (Μιμίκου και Μπαλάς, 2018). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας γίνεται η παραδοχή ότι ο ρυθμός απωλειών είναι σταθερός και ίσος με 3 mm/hr.

Ανάλογα με το μοντέλο βροχής – απορροής το οποίο επιλέγεται από το χρήστη χρειάζεται να συμπληρωθούν ο χρόνος υστέρησης σε λεπτά εφόσον επιλεγεί η μέθοδος του αδιάστατου ΜΥΓ της SCS, ο χρόνος υστέρησης σε ώρες και ο συντελεστής αιχμής C_p εφόσον επιλεγεί η μέθοδος του συνθετικού ΜΥΓ κατά Snyder ή η χρονοσειρά παροχών εφόσον επιλεγεί από το χρήστη να εισάγει ο ίδιος κάποιο ΜΥΓ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία και για λόγους σύγκρισης υλοποιήθηκαν και οι τρεις μέθοδοι.

Πίνακας 3.9: Δεδομένα εισόδου για την υδρολογική ανάλυση των υπολεκανών για τα υδρολογικά μοντέλα του ΜΥΓ κατά Snyder και SCS

	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γιόφυρος	Κατσαμπαδιανός
<i>Standard lag (hr)</i>	5.70	5.27	6.87	3.93
<i>Peaking coefficient</i>	0.60	0.60	0.60	0.60
<i>Lag time (min)</i>	342	316	412	237

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την υλοποίηση του μετεωρολογικού μοντέλου, το οποίο πραγματοποιείται μέσω του Meteorologic Model Manager. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας εισάγεται ένα συγκεκριμένο υετογράφημα (Specified Hyetograph).

Για την παραγωγή του υετογραφήματος εφαρμόζεται στην κάθε υπολεκάνη βροχή διάρκειας 12 ωρών με περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Χρησιμοποιείται η όμβρια

καμπύλη για το σταθμό Ηρακλείου, η οποία υπολογίζει την ένταση της βροχής με βάση την Εξίσωση 3.24:

$$i(d, T) = \frac{\lambda \cdot (T^k - \psi)}{(1 + \frac{d}{\theta})^\eta} \quad (3.24)$$

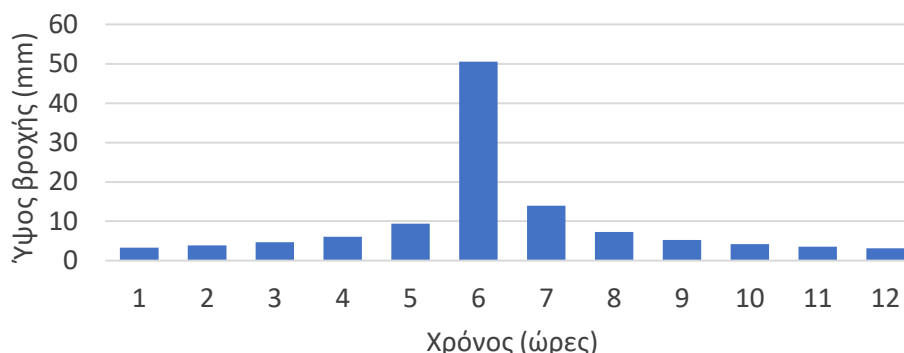
Πίνακας 3.10: Παράμετροι όμβριας Καμπύλης Σταθμού Ηρακλείου

ΥΔ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ	κ	λ	ψ	θ	H
GR13	596	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	0.145	191.3	0.501	0.093	0.691

Η ένταση της βροχόπτωσης σχεδιασμού για T=100 χρόνια υπολογίζεται $i = 9.60 \text{ mm/hr}$. Η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου βροχής-απορροής (Na & Yoo, 2018). Στη συγκεκριμένη εργασία για την εκτίμηση της χρονικής κατανομής της βροχής χρησιμοποιείται η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (Alternating Block Method), σύμφωνα με την οποία η βροχόπτωση διάρκειας d και περιόδου επαναφοράς T κατανέμεται ως εξής μέσα στη διάρκειά της: Από την σχέση έντασης – διάρκειας – περιόδου επαναφοράς και γνωρίζοντας ότι το ύψος βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασης επί την διάρκεια της, για βροχοπτώσεις της ίδιας περιόδου επαναφοράς T ισχύει:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-\eta} \quad (3.25)$$

Με βάση την Εξίσωση 3.25 υπολογίζονται τα αθροιστικά ύψη βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές τους που είναι τα ύψη βροχής κάθε χρονικού βήματος. Τα ύψη βροχής τοποθετούνται σε φθίνουσα σειρά και ύστερα η κατανομή μεταβάλλεται ώστε το μεγαλύτερο ύψος βροχής να βρίσκεται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της Μεθόδου των Εναλλασσόμενων Μπλοκ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Υετογράφημα με χρήση της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ για T=100 χρόνια και d=12h

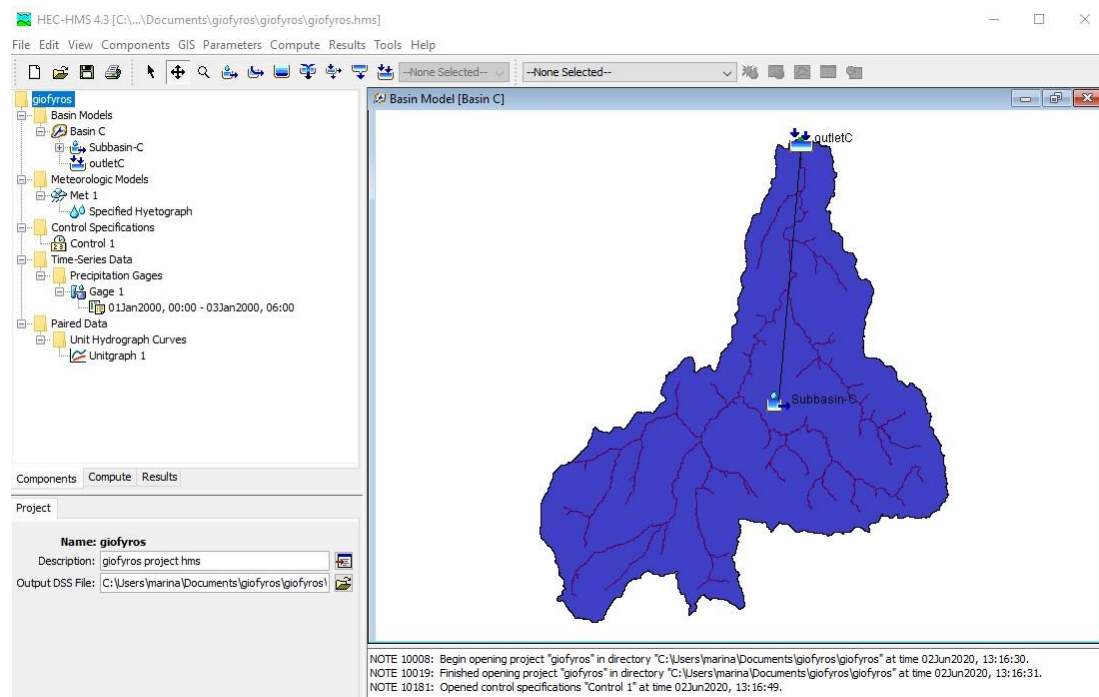
Το υετογράφημα εισάγεται στο HEC – HMS στο Component το οποίο διαχειρίζεται δεδομένα χρονοσειρών (“Time-series data”) και συγκεκριμένα στην κατηγορία “Precipitation Gages” και ύστερα αυτό συνδέεται με το μετεωρολογικό μοντέλο.

Για την προσομοίωση με χρήση του μοντέλου όπου συγκεκριμένο ΜΥΓ (εν προκειμένω εκείνο το οποίο προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου ισόχρονων καμπυλών) εισάγεται από το χρήστη, αξιοποιείται ένα ακόμα Component, το Paired data, μέσω του οποίου πέρα από ένα ΜΥΓ μπορεί να γίνει εισαγωγή δεδομένων όπως συναρτήσεις στάθμης – απορροής, κατανομής αθροιστικών πιθανοτήτων κ.α.

Το τελευταίο βήμα πριν τον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων είναι ο ορισμός της χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης, το οποίο υλοποιείται μέσω του αρχείου προσομοιώσεων (Control specifications).

Η υλοποίηση της προσομοίωσης γίνεται μέσω της εντολής Compute. Για κάθε λεκάνη υλοποιούνται τρία διαφορετικά σενάρια, ένα ανά μοντέλο βροχής απορροής.

Το περιβάλλον του λογισμικού και η δομή των Components όπως υλοποιήθηκε για την υπολεκάνη του Γιόφυρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Υπολεκάνη του Γιόφυρου στο περιβάλλον HEC - HMS

3.5 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

3.5.1 Εισαγωγή δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την υλοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης είναι τα διανυσματικά αρχεία των ορίων της λεκάνης απορροής και της αντίστοιχης υπολεκάνης, του υδρογραφικού της λεκάνης και των κατηγοριών χρήσεων γης κατά Corine. Το τελευταίο πριν την εισαγωγή του στο λογισμικό HEC-RAS πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να προστεθεί ένα ακόμη πεδίο (field) στον πίνακα με τα

χαρακτηριστικά του (Attribute Table) ώστε να αποδίδει τιμές για το συντελεστή Manning ανά κωδικό χρήσης γης για την απόδοση της διαφορετικής τραχύτητας εδάφους. Οι τιμές του συντελεστή Manning εκτιμώνται διαφορετικά ανά κατηγορία χρήσης από διαφορετικές μελέτες. Για την παρούσα εργασία υιοθετούνται οι τιμές που προτείνει ο Huang (2005) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11. Πέραν των διανυσματικών αρχείων απαιτείται η εισαγωγή του κανονικοποιημένου (raster) αρχείου του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, το οποίο εξάγεται από το περιβάλλον του ArcGIS σε μορφή tiff για να εισαχθεί στο HEC - RAS.

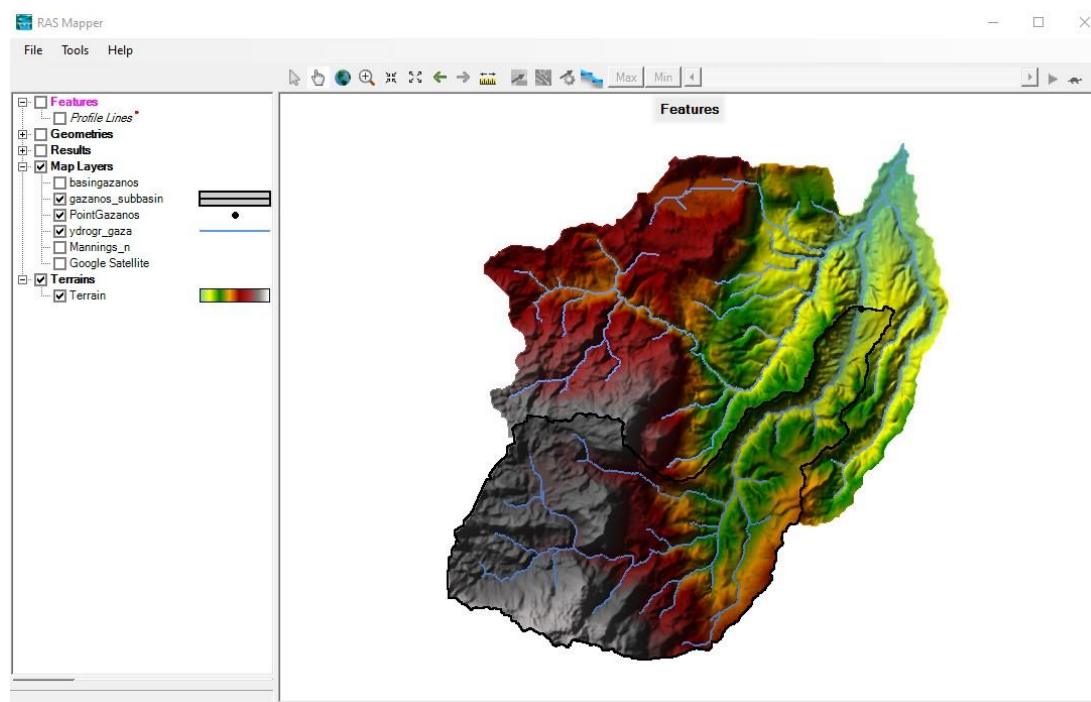
Πίνακας 3.11: Τιμές συντελεστή η Manning για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine (Δεδομένα από Huang, 2005, ίδια επεξεργασία)

Κωδικός	Περιγραφή	Τιμή
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.20
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.20
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0.015
123	Ζώνες λιμένων	0.054
124	Αεροδρόμια	0.054
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.12
133	Χώροι οικοδόμησης	0.12
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.073
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.035
221	Αμπελώνες	0.10
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.15
223	Ελαιώνες	0.15
231	Λιβάδια	0.035
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.05
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.12
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.12
312	Δάσος κωνοφόρων	0.20
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.033
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	0.085
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.045
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.05
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.045
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.033
512	Συλλογές υδάτων	0.03
523	Θάλασσα	0.03

Τέλος αξιοποιείται ως δεδομένο εισόδου για κάθε εξεταζόμενο τμήμα του υδρογραφικού το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα, το οποίο υπολογίστηκε μέσω του λογισμικού HEC – HMS για κάθε μια από τις λεκάνες τις περιοχής μελέτης.

3.5.2 Υδραυλική προσομοίωση σε θέσεις ενδιαφέροντος

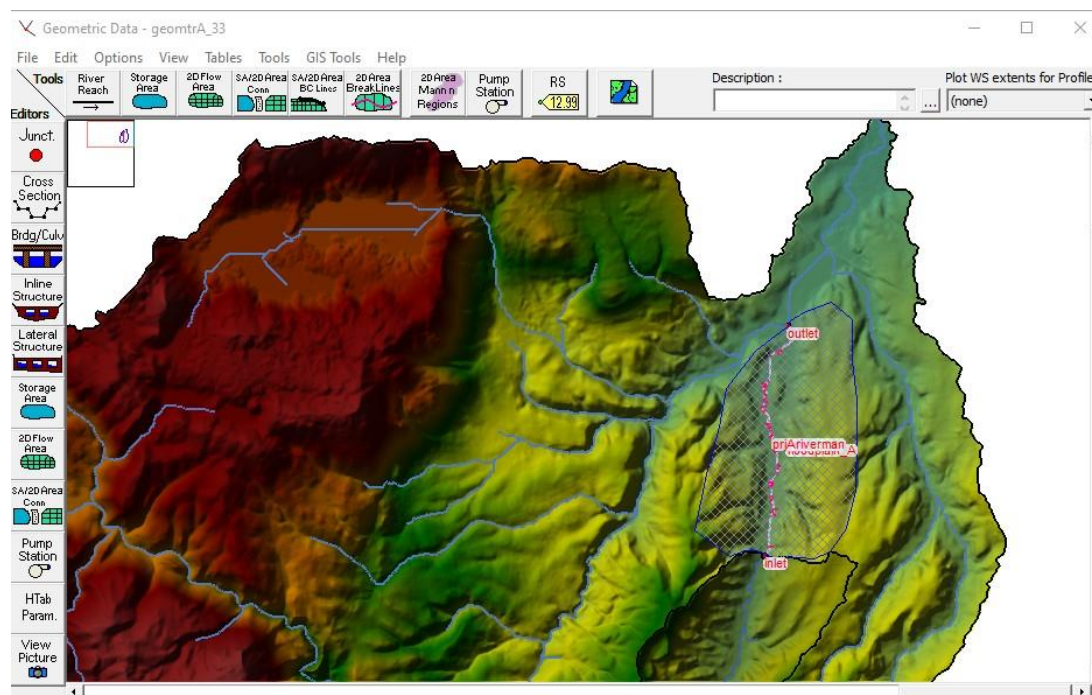
Αρχικά δημιουργείται ένα νέο Project για κάθε περιοχή που εξετάζεται. Αξιοποιώντας το RAS Mapper φορτώνονται τα δεδομένα εισόδου. Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το περιβάλλον του RAS – Mapper όπου έχουν φορτωθεί για τη λεκάνη του Γαζανού όλα τα απαραίτητα αρχεία.



Σχήμα 3.16: Λεκάνη Γαζανού στο περιβάλλον RAS – Mapper του HEC - RAS

Στη συνέχεια, παράγεται ένα αρχείο γεωμετρίας στον Geometric Data Editor για κάθε σημείο προσομοίωσης κατάντη της οποίας πραγματοποιείται η υδραυλική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα χαράσσεται η περιοχή προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το εργαλείο 2D Flow Area και δημιουργείται το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του εργαλείου Force Mesh Recomputation. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει υφιστάμενο τεχνικό έργο αυτό εντάσσεται χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα εργαλεία στο παράθυρο του Geometric Data Editor. Επιπλέον, με χρήση του εργαλείου 2D Area Boundary Conditions Lines ο χρήστης υποδεικνύει εκείνες τις θέσεις στις οποίες ισχύουν οι οριακές συνθήκες, δηλαδή οι θέσεις ανάντη και κατάντη της περιοχής στην οποία γίνεται η υδραυλική προσομοίωση. Παραμένοντας στο περιβάλλον του Geometric Data Editor δίνεται η επιλογή στο χρήστη να περιγράψει την περιοχή η οποία ανήκει στο εξεταζόμενο ποτάμι και να αποδώσει σε αυτή διαφορετική τιμή ως προς το συντελεστή n Manning. Συγκεκριμένα στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδίδεται η τιμή 0.03. Μια ακόμα πολύ χρήσιμη δυνατότητα που δίνεται από το λογισμικό είναι η διόρθωση του υπολογιστικού πλέγματος (mesh) με χρήση γραμμών θλάσης (breaklines) για την κατά το δυνατόν προσαρμοσμένη στην τοπογραφία του υδατορεύματος ανάλυση. Χωρίς το εργαλείο αυτό, για τη βελτίωση της ακρίβειας της ανάλυσης θα απαιτείτο η πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο θα αύξανε πολύ τον υπολογιστικό φόρτο για την υλοποίηση της ανάλυσης.

Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζεται το προϊόν της παραπάνω διαδικασίας για τη λεκάνη του Γαζανού στο περιβάλλον του Geometric Data Editor.



Σχήμα 3.17: Λεκάνη Γαζανού στο περιβάλλον Geometry Data Editor του HEC - RAS

Στον Πίνακα 3.12 παρουσιάζεται το μήκος κάθε προσομοιούμενου κλάδου του υδρογραφικού και το πλήθος των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος. Κάθε φατνίο έχει διαστάσεις 10x10 m και το κέντρο του είναι το υπολογιστικό σημείο.

Πίνακας 3.12: Χαρακτηριστικά υδραυλικής ανάλυσης για τα τμήματα του υδρογραφικού των τεσσάρων λεκανών απορροής της περιοχής μελέτης

	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γιόφυρος	Κατσαμπαδιανός
Μήκος υδατορεύματος (m)	3434	3126	1950	1694
Μέση κλίση υδατορεύματος	0.0085	0.010	0.0085	0.0077
Πλήθος φατνίων	43551	18951	27682	12747
Μέσο εμβαδόν φατνίου(m ²)	100.10	98.39	99.89	100.10

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή κι επεξεργασία της γεωμετρίας της περιοχής στο περιβάλλον του Unsteady Flow Data Editor αποδίδονται οι συνοριακές συνθήκες για την περιοχή προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει τον ορισμό των θέσεων ανάντη και κατόντη της περιοχής υδραυλικής προσομοίωσης στο περιβάλλον του Geometry Data Editor μέσω ευθύγραμμων τμημάτων κατά μήκος του υδατορεύματος και με χρήση του εργαλείου 2D Area Boundary Conditions Lines. Στις θέσεις αυτές συνδέονται στη συνέχεια οι συνοριακές συνθήκες, επιλέγοντας από τα παρακάτω:

- Υδρογράφημα στάθμης (Stage Hydrograph), το οποίο μπορεί να οριστεί είτε ως ανάντη είτε ως κατόντη συνοριακή συνθήκη.

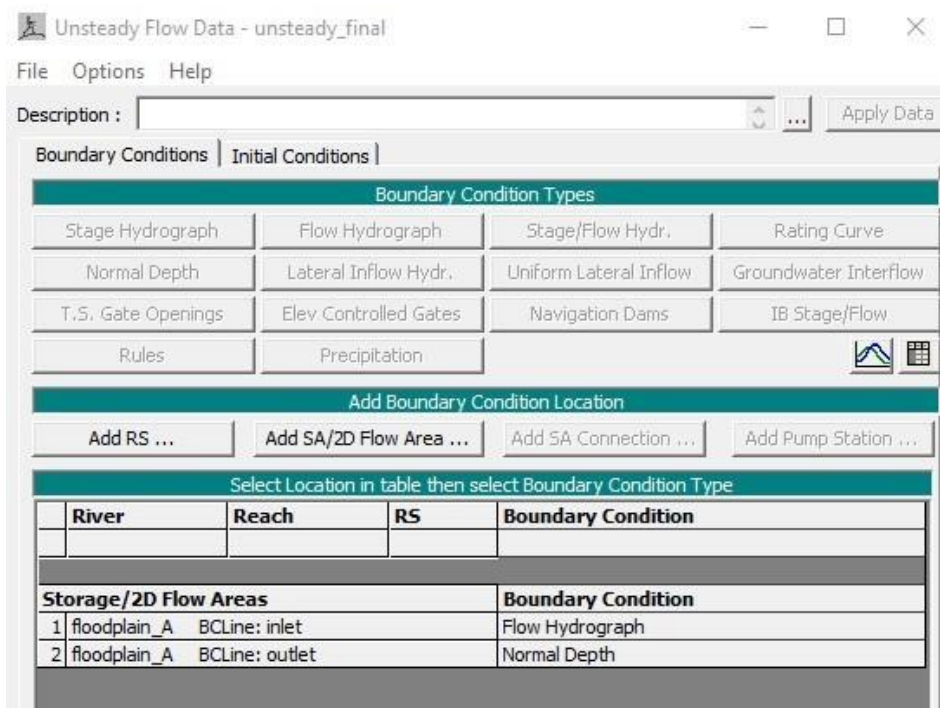
- Υδρογράφημα παροχής (Flow Hydrograph), το οποίο επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ανάντη και ως κατάντη συνθήκη.

- Υδρογράφημα στάθμης – παροχής (Stage – Flow Hydrograph), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως ανάντη είτε ως κατάντη οριακή συνθήκη και το οποίο χρησιμεύει ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα στάθμης και επιχειρείται η πρόβλεψη πλημμύρας.

- Καμπύλη στάθμης – παροχής (Rating Curve), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα κατάντη.

Ως ανάντη συνοριακή συνθήκη και για τις τέσσερις υπολεκάνες ορίζεται το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα εισόδου, όπως αυτό προέκυψε από τη διαδικασία της υδρολογικής ανάλυσης σε περιβάλλον HEC-HMS και συγκεκριμένα με εκείνο το πλημμυρογράφημα που προέκυψε με δεδομένο εισόδου το ΜΥΓ το οποίο παράχθηκε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών. Επιπλέον συμπληρώνεται η ημερομηνία και ο χρόνος έναρξης του πλημμυρογραφήματος, όπως και η κλίση της γραμμής ενέργειας, η οποία τίθεται ίση με 0.05. Ως κατάντη συνοριακή συνθήκη ορίζεται το ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth) το οποίο υπολογίζεται με δεδομένο εισόδου το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής, η οποία για όλα τα υδατορεύματα είχε τιμές κοντά στο 0.01. Σύμφωνα με αυτή τη συνοριακή συνθήκη μια τιμή στάθμης ορίζεται για κάθε τιμή παροχής ανά διατομή, η οποία υπολογίζεται από το πρόγραμμα με επίλυση της εξίσωσης του Manning.

Τα παραπάνω επαναλαμβάνονται για τις τέσσερις προσομοιούμενες περιοχές χωριστά στο περιβάλλον του Unsteady Flow Data Editor, το οποίο φαίνεται στα Σχήματα 3.18 και 3.19.



Σχήμα 3.18: Ορισμός συνοριακών συνθηκών στον Unsteady Flow Data Editor του HEC - RAS

SA: floodplain_A BCLine: inlet

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: Time:

Fixed Start Time: Date: 01JAN2000 Time: 00:00

No. Ordinates

Hydrograph Data			
No.	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m ³ /s)
1	31Dec1999 2400	00:00	0
2	01Jan2000 0100	01:00	0.5
3	01Jan2000 0200	02:00	5.3
4	01Jan2000 0300	03:00	18.7
5	01Jan2000 0400	04:00	47.3
6	01Jan2000 0500	05:00	185.5
7	01Jan2000 0600	06:00	359.6
8	01Jan2000 0700	07:00	467.9
9	01Jan2000 0800	08:00	244
10	01Jan2000 0900	09:00	103.8
11	01Jan2000 1000	10:00	52.8
12	01Jan2000 1100	11:00	23.3
13	01Jan2000 1200	12:00	10.2
14	01Jan2000 1300	13:00	3.4
15	01Jan2000 1400	14:00	0.8

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

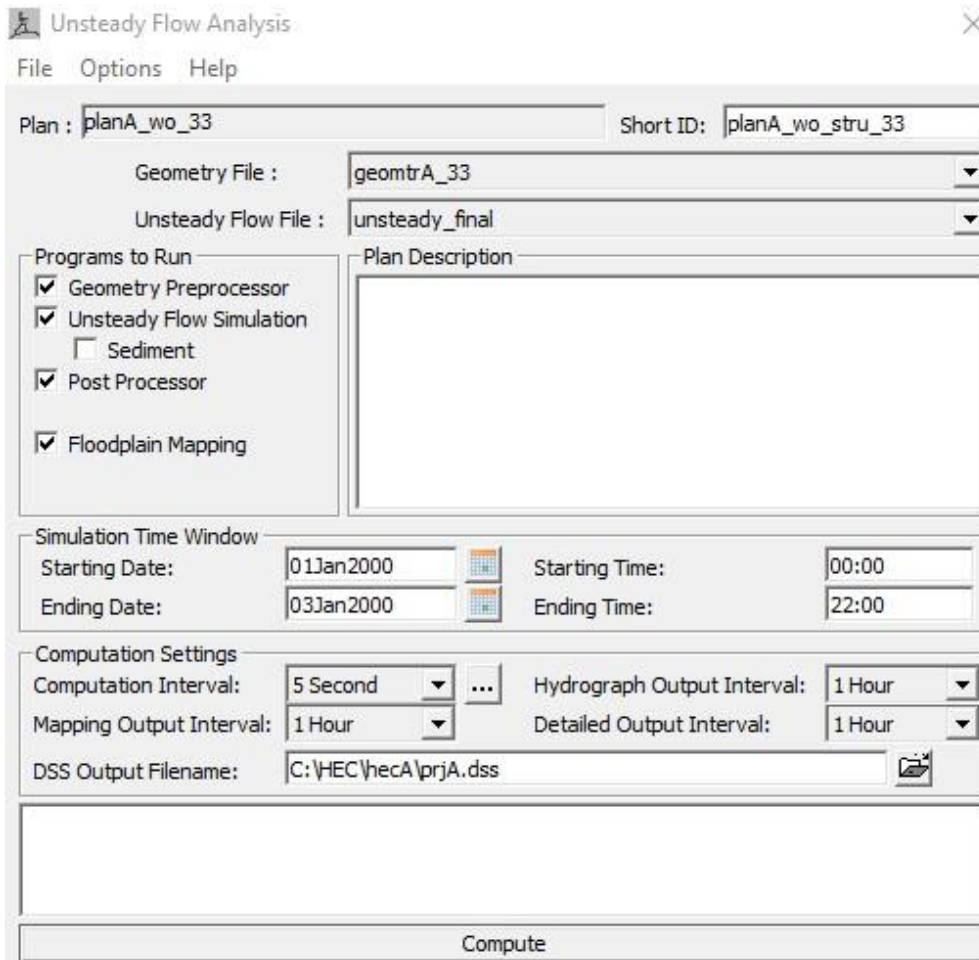
Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.05 TW Check

Σχήμα 3.19: Εισαγωγή πλημμυρογραφήματος ως ανάντη συνοριακή συνθήκη στο Unsteady Flow Data Editor του HEC - RAS

Τέλος, δημιουργείται ένα αρχείο εκτέλεσης της υδραυλικής προσομοίωσης (Plan) στο περιβάλλον του Unsteady Flow Analysis Editor. Σε αυτό το στάδιο ο χρήστης συνδέει επί της ουσίας τα επιμέρους στάδια, δηλαδή το αρχείο γεωμετρίας και το αρχείο των συνοριακών συνθηκών μη μόνιμης ροής. Επιπλέον ορίζονται οι ημερομηνίες και ώρες έναρξης και λήξης της προσομοίωσης σε αντιστοιχία με αυτούς του πλημμυρογραφήματος της προσομοιούμενης περιοχής. Ενεργοποιείται η εκτέλεση της προεπεξεργασίας της γεωμετρίας (Geometry Preprocessor) για την επιτάχυνση των υπολογισμών της μη μόνιμης ροής, προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow Simulation), μετεπεξεργασίας της μη μόνιμης ροής (Post Processor) για τον υπολογισμό λεπτομερών υδραυλικών πληροφοριών σε σχέση με το ύψος ροής και τη ροή, για ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής, αλλά και απεικόνισης του πεδίου πλημμύρας σε σχετικό χάρτη (Floodplain Mapping). Ως χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών ορίζεται το διάστημα των 5 sec, ενώ για την εξαγωγή χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων τίθεται χρονικό βήμα ίσο με 1 hr. Το περιβάλλον του Unsteady Flow Analysis Editor με τις παραπάνω επιλογές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Το περιβάλλον του Unsteady Flow Analysis Editor του HEC – RAS

Μετά την ολοκλήρωση των υδραυλικών υπολογισμών τα αποτελέσματα καταγράφονται στο περιβάλλον του RAS Mapper, όπου παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής τους για περαιτέρω επεξεργασία με άλλα λογισμικά GIS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ

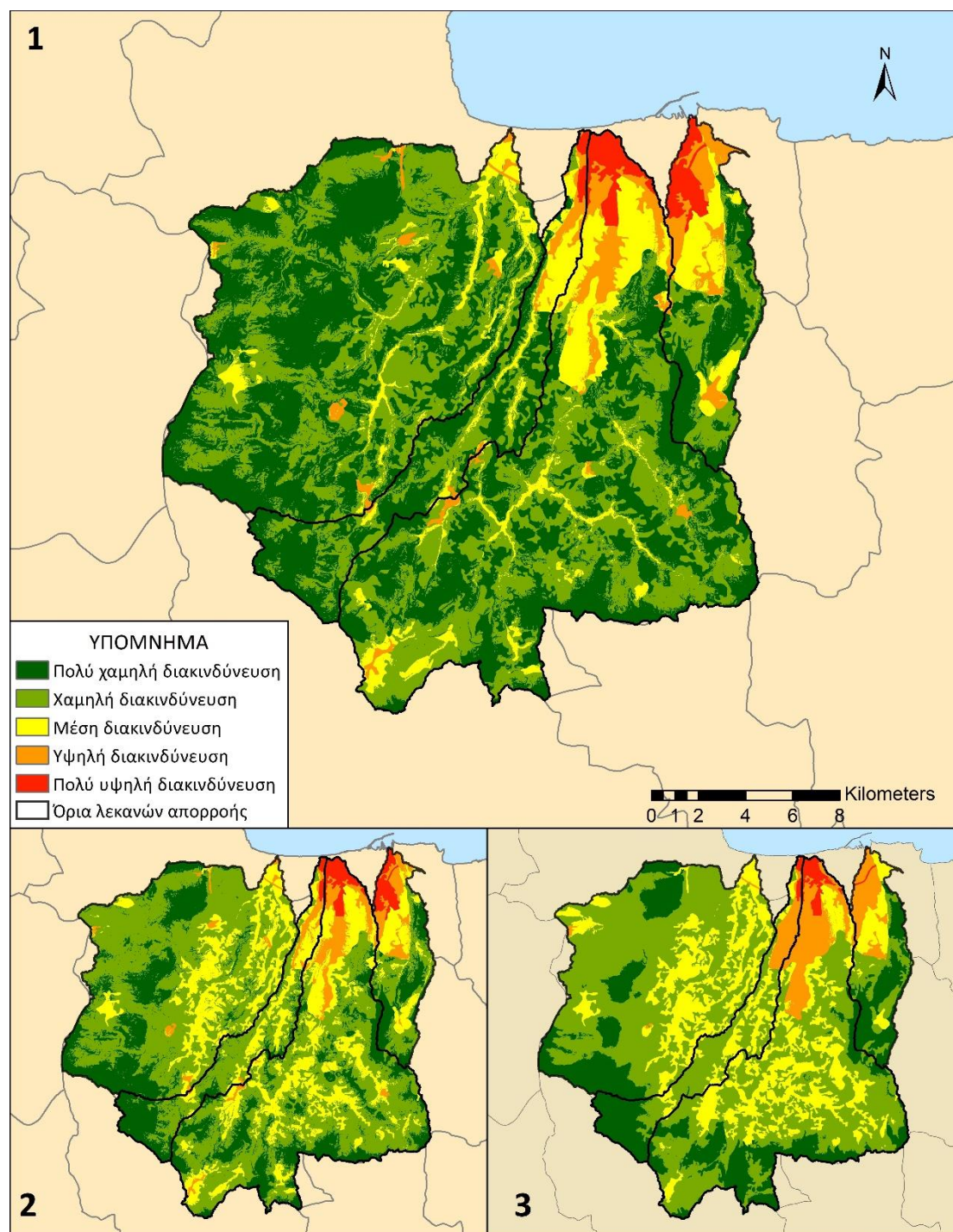
Με βάση την πολυκριτηριακή ανάλυση η οποία εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης για τη σύνθεση των παραγόντων οι οποίοι παίζουν ρόλο στην εκδήλωση πλημμυρών, αλλά και της τρωτότητας (κοινωνικής και οικονομικής) της περιοχής καταγράφονται τρία σενάρια πλημμυρικής διακινδύνευσης, τα οποία περιγράφουν διαφορετικές πιθανές θεωρήσεις επί των παραγόντων οι οποίοι αυξάνουν την πλημμυρική επικινδυνότητα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και των τριών σεναρίων, η πλημμυρική διακινδύνευση και για τις τέσσερις εξεταζόμενες λεκάνες αυξάνει προς τα βόρεια και παραλιακά. Το αποτέλεσμα κρίνεται λογικό, διότι εκεί συνυπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι αυξάνουν την επιδεκτικότητα σε πλημμύρα, όπως χαμηλές κλίσεις, χαμηλό υψόμετρο, μεγάλη αδιαπερατότητα λόγω των αστικών χρήσεων γης που συγκεντρώνονται κυρίως σε εκείνη την περιοχή, αλλά και την αυξημένη τρωτότητα κοινωνική και οικονομική που υπάρχει, αφού η περιοχή ανήκει στο πιο πυκνοκατοικημένο Δημοτικό Διαμέρισμα. Η λεκάνη η οποία εμφανίζει υψηλή ή και πολύ υψηλή διακινδύνευση στη μεγαλύτερη έκταση είναι αυτή του Γιόφυρου, αποτέλεσμα το οποίο επίσης χαρακτηρίζεται ως εύλογο διότι πρόκειται για μια λεκάνη με σημαντικό ιστορικό πλημμυρών. Η πιο χαμηλή διακινδύνευση εμφανίζεται στα νότια και ιδίως στα νοτιοδυτικά. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται επίσης ως λογικό, διότι στους πρόποδες του Ψηλορείτη οι κλίσεις είναι έντονες, το υψόμετρο υψηλό, η αδιαπερατότητα χαμηλή (λόγω της αυξημένης διηθητικής ικανότητας που παρέχει η πυκνή βλάστηση) και η τρωτότητα χαμηλή όσον αφορά τόσο το κοινωνικό όσο και το οικονομικό της σκέλος.

Πέραν των παραλίων λίγες είναι οι περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται ως υψηλής και πολύ υψηλής διακινδύνευσης (γεγονός το οποίο ισχύει και για τα τρία σενάρια). Οι περιπτώσεις στις οποίες συμβαίνει αυτό αφορούν σε οικισμούς οι οποίοι αυξάνουν την τρωτότητα της εξεταζόμενης χωρικής μονάδας κατακόρυφα, αφού επιδρούν και στο οικονομικό και στο κοινωνικό σκέλος. Τέτοια παραδείγματα είναι οι οικισμοί Κρουσώνας, Τύλισος και Κάτω Ασίτες στη λεκάνη του Γιόφυρου, οι Δάφνες και η Παλιανή στη λεκάνη του Ξεροπόταμου, το Τέμενος και η Αγία Βαρβάρα στη λεκάνη του Γιόφυρου και οι Αρχάνες στη λεκάνη του Κατσαμπαδιανού. Γενικά, οι χρήσεις γης λειτουργούν καταλυτικά στο χαρτογραφικό αποτέλεσμα διότι επηρεάζουν και την οικονομική τρωτότητα και το κριτήριο της αδιαπερατότητας οπότε έχουν ένα βάρος συμμετοχής στον τελικό χάρτη άνω του 25%.

Το γεγονός ότι η διακύμανση της πλημμυρικής διακινδύνευσης δεν διαφέρει ιδιαίτερα μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων έχει να κάνει με το ότι η διακινδύνευση υπολογίζεται ως το ημίθροισμα της πλημμυρικής επικινδυνότητας και της τρωτότητας. Από τη στιγμή που η τρωτότητα υπολογίζεται άπαξ και χρησιμοποιείται το ίδιο προϊόν για την παραγωγή των τριών σεναρίων διακινδύνευσης είναι λογικό η διακύμανση των αποτελεσμάτων να είναι μικρή διότι στηρίζεται μόνο στη συνιστώσα της επικινδυνότητας (hazard). Οι χάρτες επικινδυνότητας οι οποίοι παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο αποδεικνύουν τη διαφοροποίηση την οποία μπορεί να προκαλέσει η υποκειμενικότητα στην εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η εκτίμηση για την πλημμυρική διακινδύνευση στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με τα τρία διαφορετικά σενάρια πολυκριτηριακής ανάλυσης.

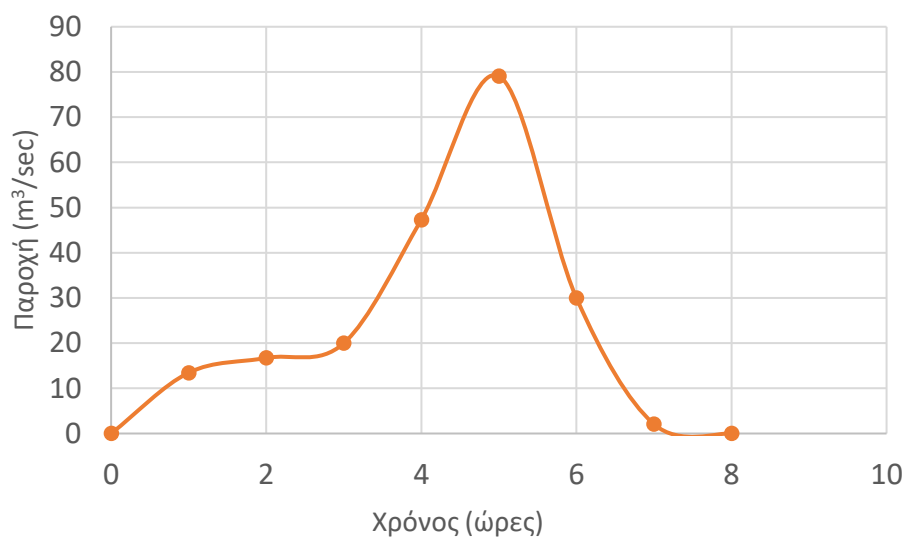


Σχήμα 4.1: Χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης για τρία διαφορετικά σενάρια πολυκριτηριακής ανάλυσης.

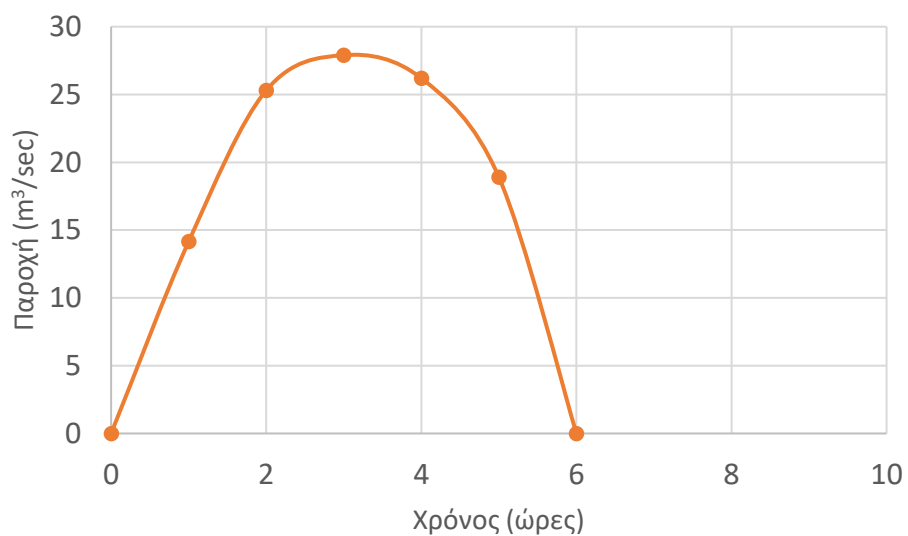
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με του ΥΠΕΚΑ, το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό και για τα τρία σενάρια. Ιδίως το σενάριο το οποίο υιοθετείται (σενάριο 1) «εντοπίζει» όλες τις ΖΔΥΚ και αποδίδει υψηλές και πολύ υψηλές τιμές διακινδύνευσης. Το τρίτο σενάριο ίσως είναι το πιο άστοχο διότι εμφανίζει μια ιδιαίτερα διευρυμένη περιοχή υψηλής διακινδύνευσης στα παράλια των λεκανών Ξεροπόταμου και Γιόφυρου,

γεγονός το οποίο δεν ευνοεί τον εντοπισμό των πλέον ευάλωτων περιοχών. Επίσης τα σενάρια 2 και 3 αποδίδουν μια γενικευμένη μέτρια διακινδύνευση. Αυτό συνιστά μειονέκτημα διότι δυσχεραίνουν τον εντοπισμό των προβληματικών περιοχών.

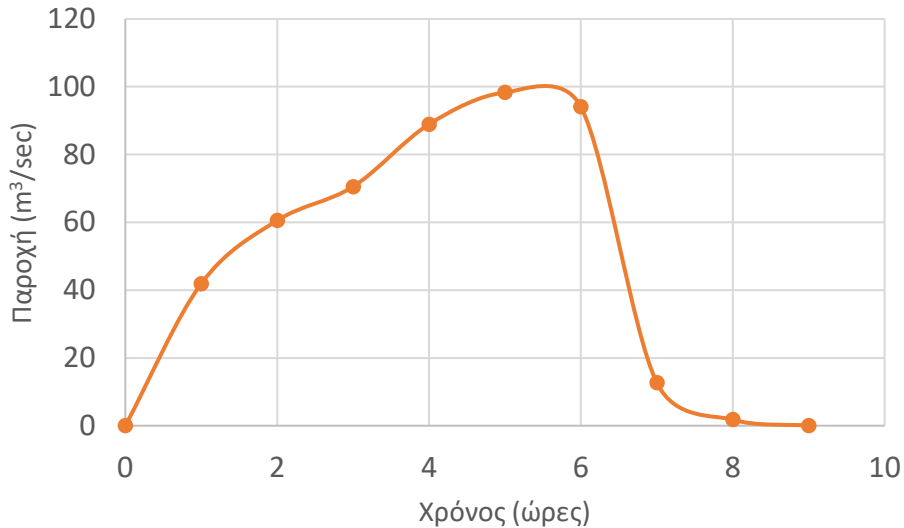
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



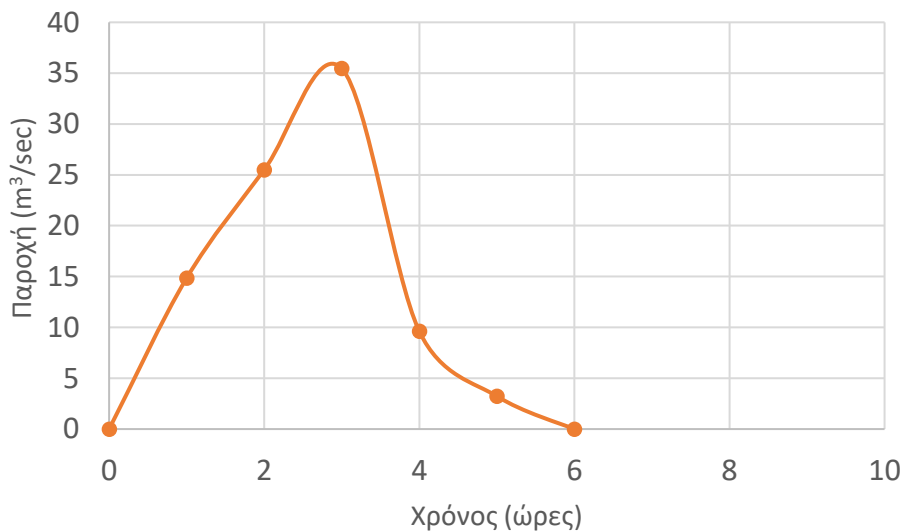
Σχήμα 4.2: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Γαζανού με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών



Σχήμα 4.3: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Ξεροπόταμου με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών



Σχήμα 4.4: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Γιόφυρου με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών



Σχήμα 4.5: ΜΥΓ για την υπολεκάνη του Κατσαμπαδιανού με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών

Με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, παράγονται για τις τέσσερις υπολεκάνες της περιοχής μελέτης τα αντίστοιχα Μοναδιαία Υδρογραφήματα (ΜΥΓ). Αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.2 έως 4.5.

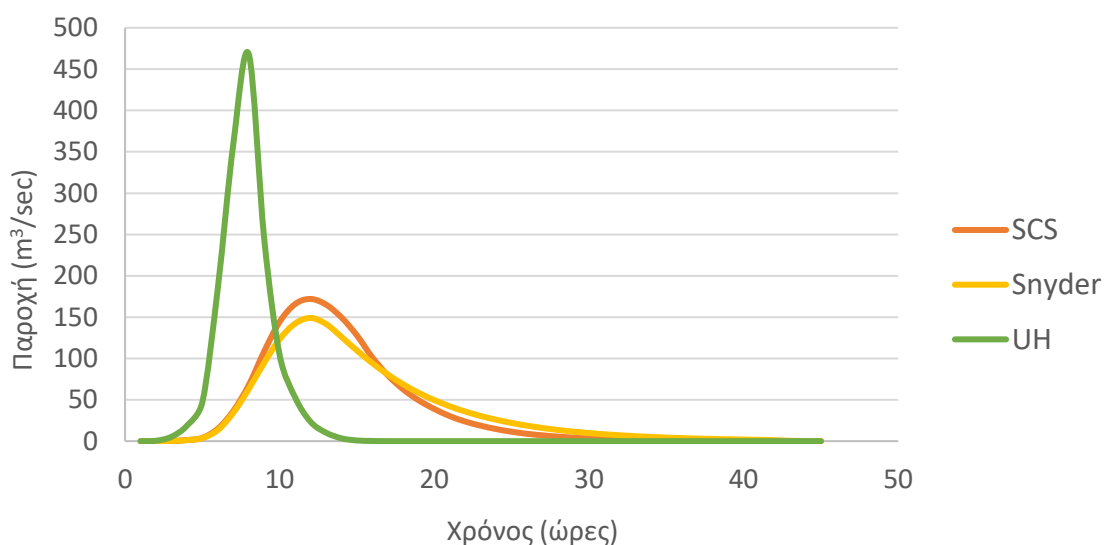
Τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται λογικά. Η μέγιστη παροχή αιχμής εμφανίζεται στην υπολεκάνη του Γιόφυρου και εκτιμάται στα $98.3 \text{ m}^3/\text{s}$ και ακολουθούν η υπολεκάνη του Γαζανού με παροχή αιχμής $79.1 \text{ m}^3/\text{s}$, η υπολεκάνη Κατσαμπαδιανού με παροχή $35.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και τέλος η υπολεκάνη του Ξεροπόταμου με παροχή $27.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Το σχήμα του ΜΥΓ επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και της βροχόπτωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση σε όλες τις λεκάνες έχει εφαρμοστεί η ίδια βροχή, αφού πρόκειται για βροχή διάρκειας 1 ώρας και συνολικού ύψους 10mm, κατά τον ορισμό του ΜΥΓ. Επομένως τα διαφορετικά σχήματα σε κάθε υπολεκάνη (και άρα και

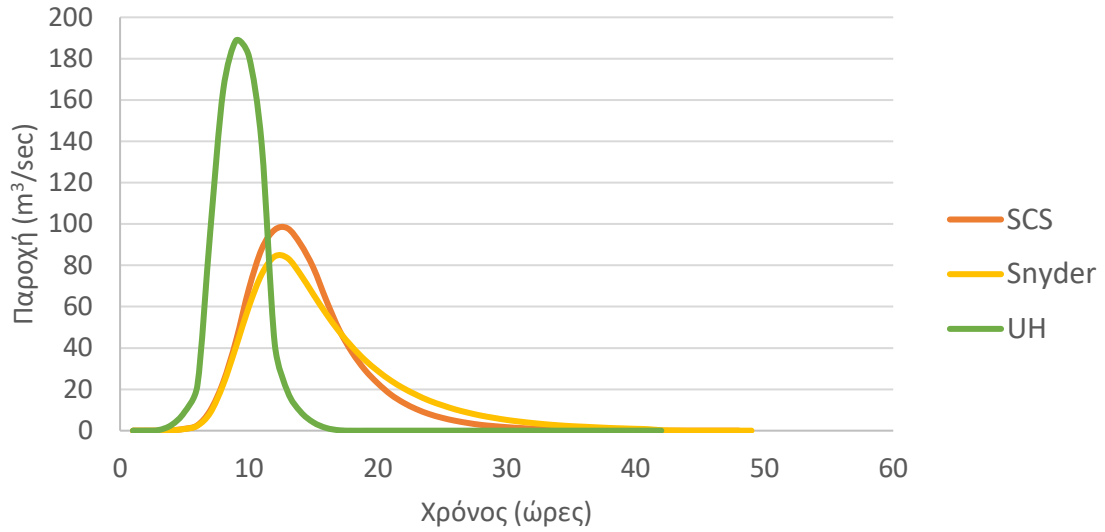
οι διαφορετικές παροχές αιχμής) σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων λεκανών. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η έκταση της λεκάνης, το σχήμα της, οι κλίσεις, ο τύπος του εδάφους, οι χρήσεις γης και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (Chow et al, 1988). Όσον αφορά στην έκταση της λεκάνης, πράγματι η κατάταξη των παροχών αιχμής ακολουθεί την έκτασή τους με εξαίρεση τις δυο μικρότερες υπολεκάνες (Ξεροπόταμου και Κατσαμπαδιανού) οι οποίες έχουν άλλωστε μικρή διαφορά στην έκταση (41 και 32 km² αντίστοιχα).

Οι χρόνοι βάσης των ΜΥΓ κυμαίνονται μεταξύ 6 και 9 ωρών, ακολουθώντας την ταξινόμηση ανά έκταση. Αντίστοιχα και ο χρόνος αιχμής είναι 3 ώρες για τις δυο μικρότερες υπολεκάνες και 5 ώρες για τις 2 μεγαλύτερες.

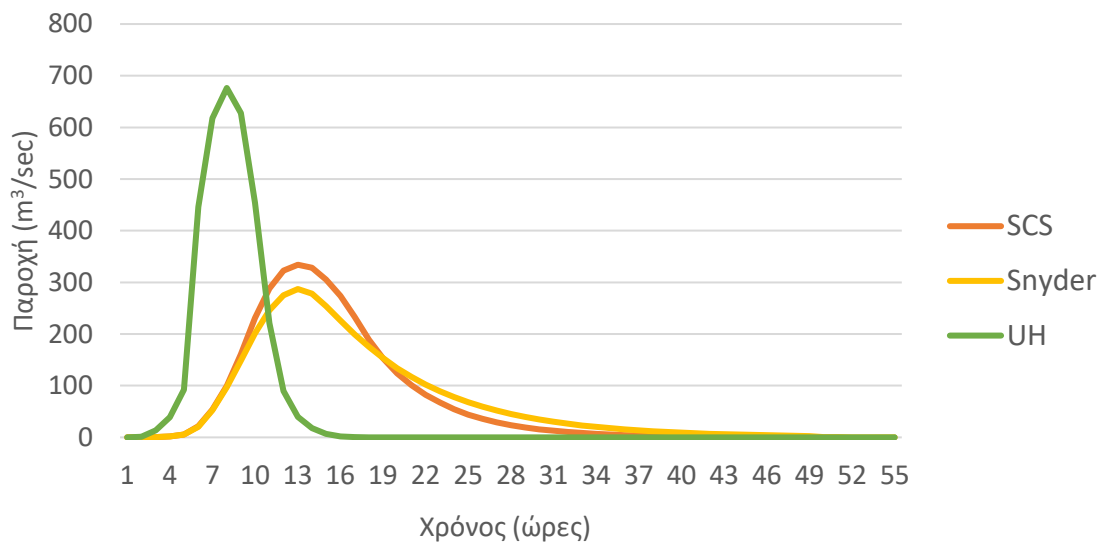
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται στις υπολεκάνες βροχή 12 ωρών και περιόδου επαναφοράς 100 χρόνων σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της όμβριας καμπύλης για το σταθμό Ηρακλείου. Επιλέγονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι για την περιγραφή του μηχανισμού βροχής απορροής: η μέθοδος SCS, η Snyder και το ΜΥΓ όπως υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου ισόχρονων καμπυλών. Έτσι, τελικά προκύπτουν τρία πλημμυρογραφήματα ανά υπολεκάνη, ένα για κάθε χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Στα Σχήματα 4.6 έως 4.9 παρουσιάζονται αυτά τα πλημμυρογραφήματα για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη.



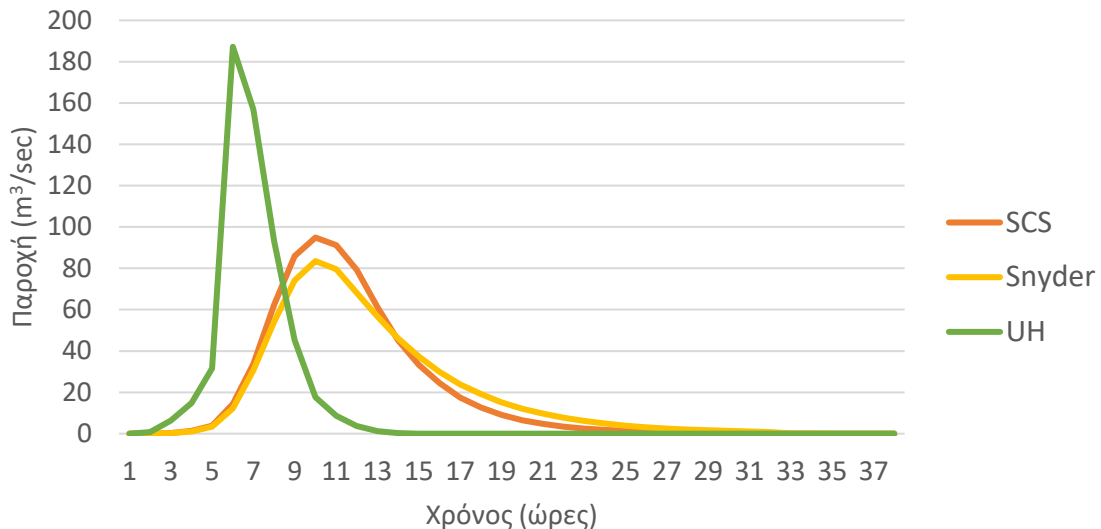
Σχήμα 4.6: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Γαζανού



Σχήμα 4.7: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Ξεροπόταμου



Σχήμα 4.8: Πλημμυρογραφήματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Γιόφυρου



Σχήμα 4.9: Πλημμυρογράφηματα με τρεις μεθόδους (SCS, Snyder και ισόχρονες καμπύλες) στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης του Κατσαμπαδιανού

Εξετάζοντας την υπολεκάνη του Γαζανού, παρατηρείται ότι το πλημμυρογράφημα παρουσιάζει παροχή αιχμής $467.9 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 8 ώρες σύμφωνα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών, ενώ σύμφωνα με τα άλλα δυο μοντέλα η αιχμή είναι στα 149 και $172 \text{ m}^3/\text{s}$ (για τη Snyder και την SCS αντίστοιχα) και συμβαίνει στις 12 ώρες.

Όσον αφορά στην υπολεκάνη του Ξεροπόταμου, το πλημμυρογράφημα παρουσιάζει παροχή αιχμής $188.8 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 8 ώρες σύμφωνα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών, ενώ σύμφωνα με τα μοντέλα του Snyder και της SCS η αιχμή είναι στα 84.3 και $97.9 \text{ m}^3/\text{s}$ αντίστοιχα και εμφανίζεται στις 11 ώρες και 12 ώρες αντίστοιχα.

Για την υπολεκάνη του Γιόφυρου, η παροχή αιχμής εκτιμάται στα $676.2 \text{ m}^3/\text{s}$ και συμβαίνει στις 8 ώρες σύμφωνα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών, ενώ σύμφωνα με τα μοντέλα του Snyder και της SCS η αιχμή εμφανίζεται στις 13 ώρες και η παροχή αιχμής υπολογίζεται στα 287.1 και $334.1 \text{ m}^3/\text{s}$ αντίστοιχα.

Τέλος, εξετάζοντας την υπολεκάνη του Κατσαμπαδιανού, παρατηρείται ότι το πλημμυρογράφημα παρουσιάζει παροχή αιχμής $187.2 \text{ m}^3/\text{s}$ στις 6 ώρες σύμφωνα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών, ενώ σύμφωνα με τη Snyder και την SCS η αιχμή είναι στα 83.5 και $94.9 \text{ m}^3/\text{s}$ αντίστοιχα και συμβαίνει στις 10 ώρες.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα τρία μοντέλα εφαρμόζουν με κοινό τρόπο στις 4 λεκάνες υπό την έννοια ότι η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών εμφανίζει την υψηλότερη παροχή αιχμής και μάλιστα σε μικρότερο χρόνο, ακολουθούμενη από τις άλλες δυο. Επιπλέον, μεταξύ των μεθόδων SCS και Snyder η πρώτη εμφανίζει μεγαλύτερη αιχμή, παραμένοντας όμως στην ίδια τάξη μεγέθους. Ο χρόνος αιχμής για αυτές τις δυο μεθόδους είναι ο ίδιος για τις τρεις από τις τέσσερις υπολεκάνες, ενώ για τη λεκάνη του Ξεροπόταμου η αιχμή υπολογίζεται νωρίτερα κατά μια ώρα σύμφωνα με τη μέθοδο Snyder σε σχέση με το αποτέλεσμα της SCS.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι μέθοδοι SCS και Snyder υποτιμούν την παροχή αιχμής στις εξεταζόμενες λεκάνες. Αντίθετα, η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών μπορεί

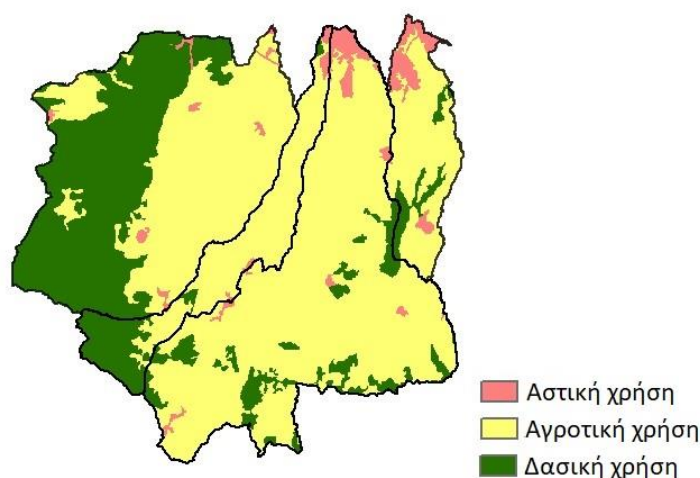
να χρησιμοποιεί περισσότερα δεδομένα και είναι πιο χρονοβόρα, υπολογίζει όμως το μοναδιαίο υδρογράφημα με τρόπο αναλυτικό, ο οποίος επιτρέπει στο μελετητή να παρέμβει στη μέθοδο και να προσαρμόσει τις μεταβλητές για την βέλτιστη περιγραφή του μηχανισμού βροχής – απορροής. Για το λόγο αυτό, οι υδραυλικοί υπολογισμοί στην παρούσα εργασία έχουν ως δεδομένο εισόδου το πλημμυρογράφημα όπως προέκυψε από τη μέθοδο ισόχρονων καμπυλών.

Για την περαιτέρω εξαγωγή υδρολογικής πληροφορίας υπολογίζεται με βάση τις παροχές αιχμής των παραπάνω πλημμυρογραφημάτων και τις εκτάσεις των υπολεκάνων η μονάδα ειδικής απορροής για κάθε υπολεκάνη και για κάθε μια από τις τρεις μεθόδους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Μονάδα ειδικής απορροής σε μονάδες για τις τέσσερις υπολεκάνες με βάση τις παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων και με χρήση τριών μοντέλων βροχής- απορροής

	Γαζανός	Ξεροπόταμος	Γιόφυρος	Κατσαμπαδιανός
Έκταση (km ²)	75	41	169	32
Ειδική απορροή (m ³ /s/km ²)	6.23	4.66	4.01	5.86

Η ειδική απορροή σε μια μικρής έκτασης λεκάνη αναμένεται να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με μια λεκάνη μεγαλύτερης έκτασης. Αυτό επιβεβαιώνεται γενικώς και στην περιοχή μελέτης, με εξαίρεση την υπολεκάνη του Γαζανού, η οποία ενώ είναι η δεύτερη μεγαλύτερη σε έκταση εξεταζόμενη υπολεκάνη έχει τη μεγαλύτερη ειδική απορροή. Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα είναι ερμηνεύσιμο αφού πρόκειται για τη λεκάνη με τη μεγαλύτερη χερσαία ροή. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι είναι η υπολεκάνη με τις μεγαλύτερες κλίσεις (με μέση κλίση 23°), αφετέρου δε είναι η μόνη λεκάνη της οποίας οι χρήσεις γης περιλαμβάνουν τη δασική σε τόσο μεγάλο ποσοστό (50%). Όλες οι υπόλοιπες λεκάνες καλύπτονται από αγροτικές χρήσεις σε ποσοστό άνω του 70% της έκτασής τους και συγκεκριμένα από ελαιώνες και αμπελώνες, όπου αποδίδονται χαμηλές τιμές συντελεστή k και επομένως υψηλότερη τραχύτητα.



Σχήμα 4.10: Κατηγορίες χρήσης γης κατά Corine 2012 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Η κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης κατά Corine (2012) στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

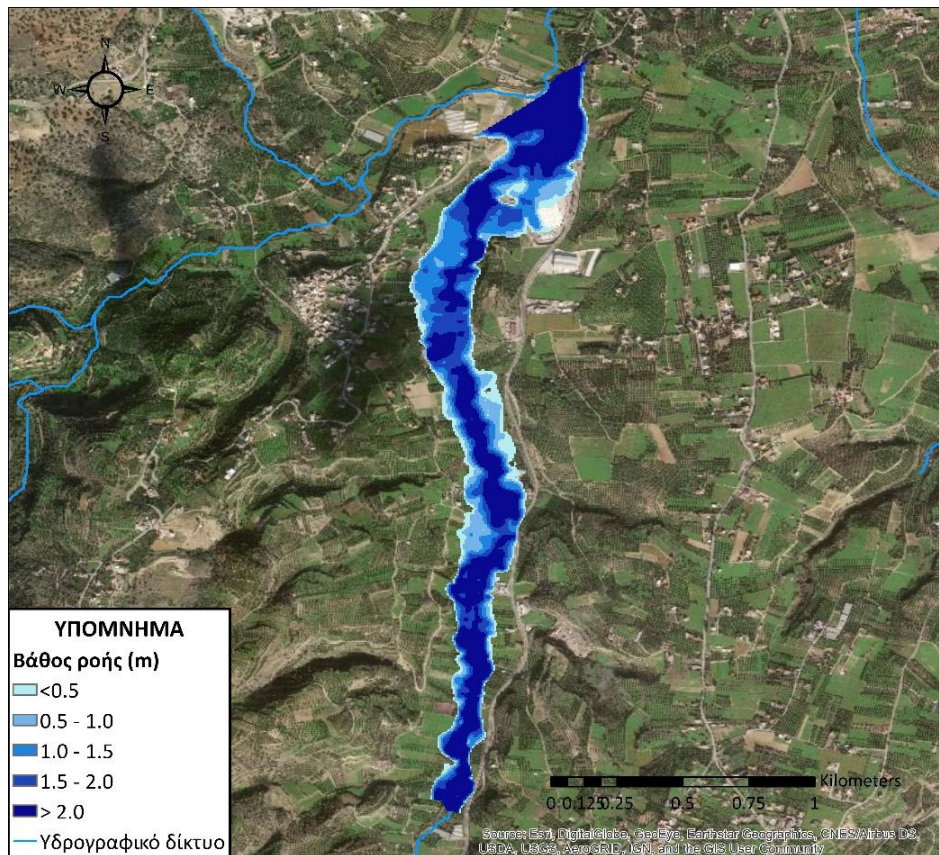
Κατάντη των σημείων προσομοίωσης ξεκινάει η υδραυλική ανάλυση η οποία πραγματοποιείται σε δυο διαστάσεις και σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Στα τέσσερα συνολικά σημεία προσομοίωσης εισάγονται ως ανάντη συνοριακή συνθήκη τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα, όπως παρουσιάζονται παραπάνω.

Στα Σχήματα 4.11 έως 4.18 καταγράφονται τα μέγιστα βάθη ροής και οι μέγιστες ταχύτητες κατά μήκος των προσομοιούμενων τμημάτων των υδατορευμάτων.

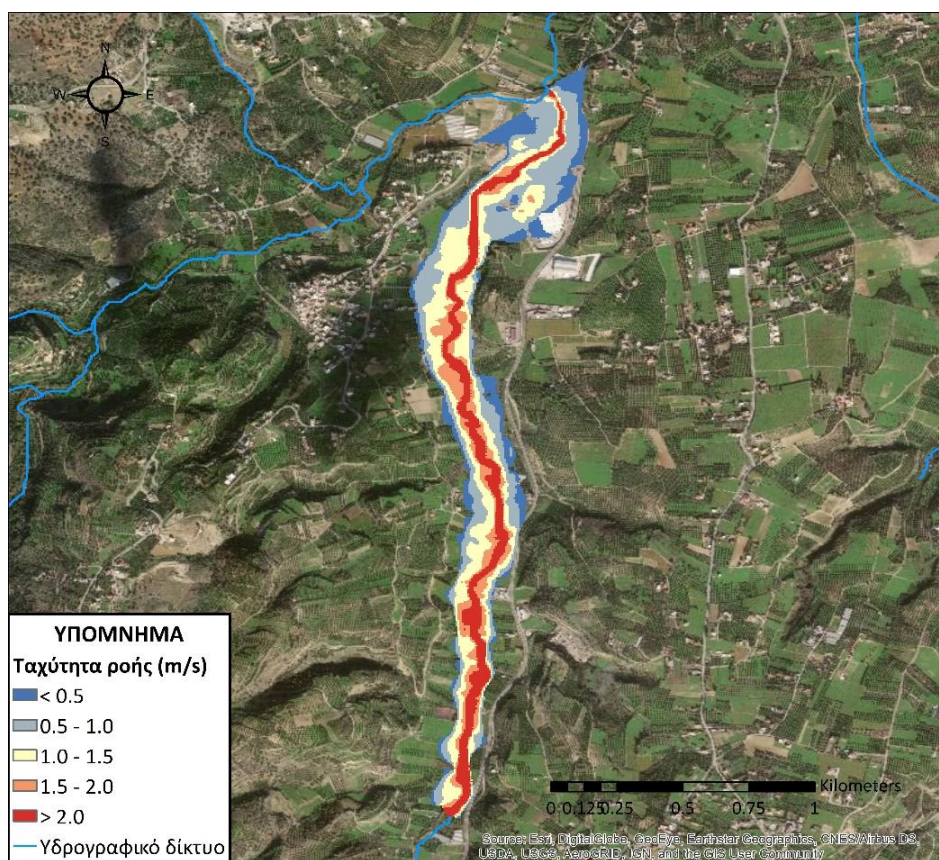
Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι τα βάθη ροής είναι υψηλά κυρίως εντός της κοίτης των υδατορευμάτων όσον αφορά το Γαζανό και τον Ξεροπόταμο. Οι ταχύτητες ροής σε όλα τα εξεταζόμενα τμήματα είναι σχετικά χαμηλές με εξαίρεση την περιοχή των κυρίως υδατορευμάτων.

Είναι εμφανές ότι το υδατόρευμα του Γιόφυρου είναι αυτό το οποίο έχει το πλέον διευρυμένο πλημμυρικό πεδίο και μάλιστα με υψηλά βάθη. Επιπλέον πρόκειται για υδατόρευμα του οποίου η υπερχείλιση δύναται να προκαλέσει μεγάλες ζημιές, αφού εντός του πεδίου κατάκλισης βρίσκεται ο οικισμός Φοινικιά με πληθυσμό 824 κατοίκων σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2011 και αρκετές γεωργικές εκμεταλλεύσεις στην περιοχή (θερμοκήπια κ.λ.π.), αλλά και ο ΒΙΟ.ΚΑ. Ηρακλείου.

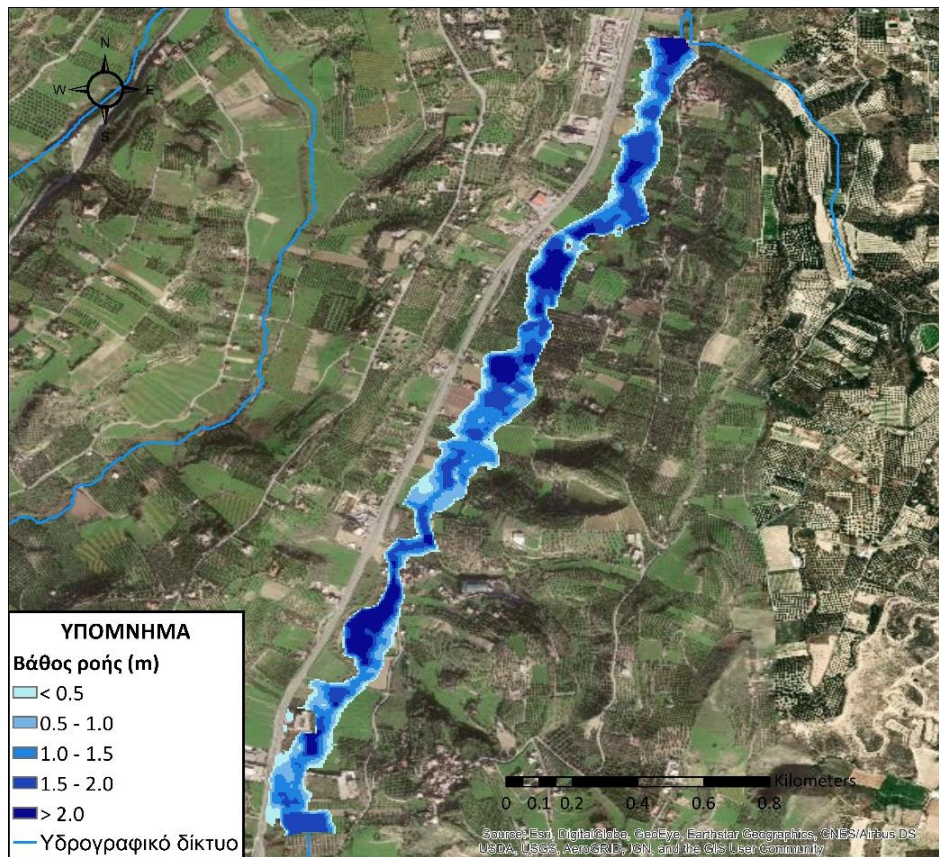
Όσον αφορά στο πεδίο κατάκλισης του Γαζανού, αυτό περιλαμβάνει σχεδόν αποκλειστικά αγροτικές περιοχές (κυρίως αμπελώνες). Ομοίως, το πλημμυρικό πεδίο του Ξεροπόταμου περιλαμβάνει κυρίως αμπελώνες - ελαιώνες και λίγα κτήρια. Τέλος, το πεδίο κατάκλισης του Κατσαμπαδιανού καταλαμβάνει κυρίως γεωργικές εκτάσεις, αλλά και σημαντικό τμήμα της Νέας Αλικαρνασσού (ασυνεχής αστικός ιστός). Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης του ΥΠΕΚΑ ο Κατσαμπαδιανός δεν εμφανίζει ιδιαίτερα προβλήματα, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας υπερεκτιμούν ενδεχομένως το πλημμυρικό πεδίο του συγκεκριμένου υδατορεύματος.



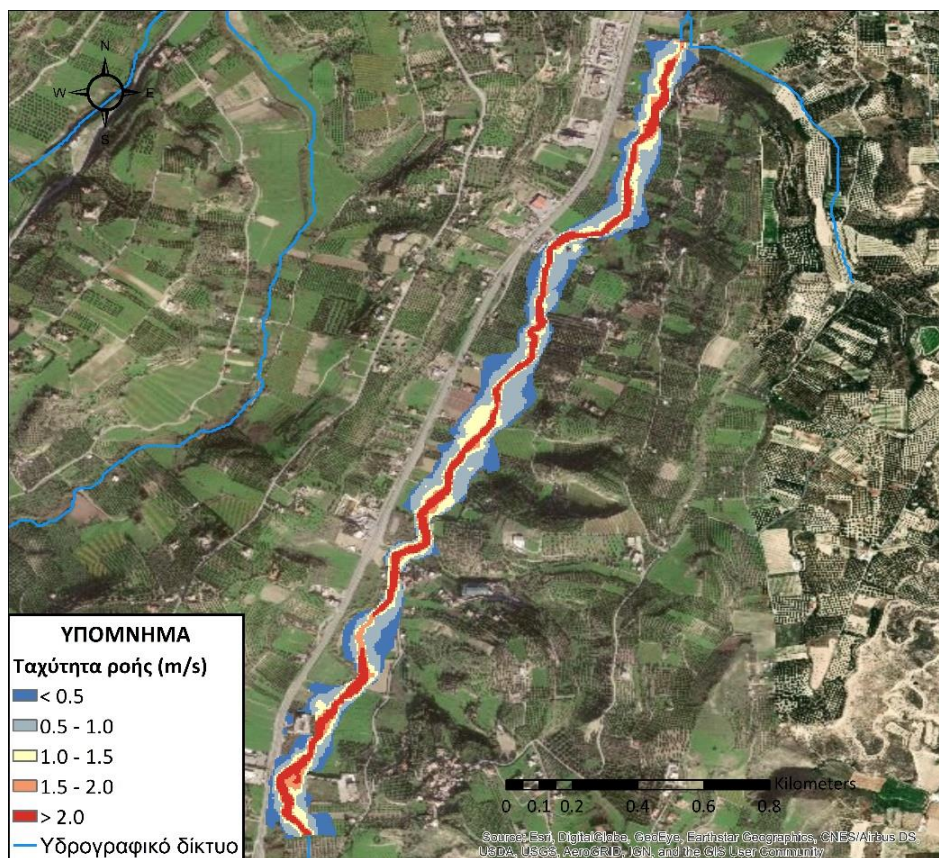
Σχήμα 4.11: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γαζανού



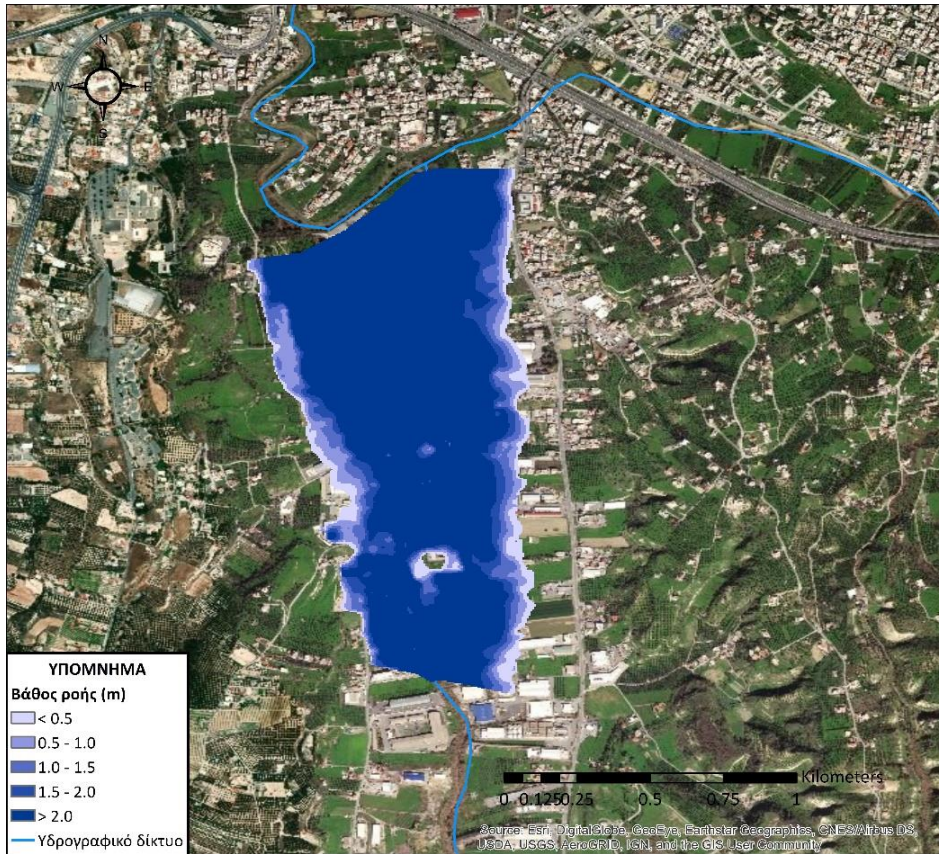
Σχήμα 4.12: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γαζανού



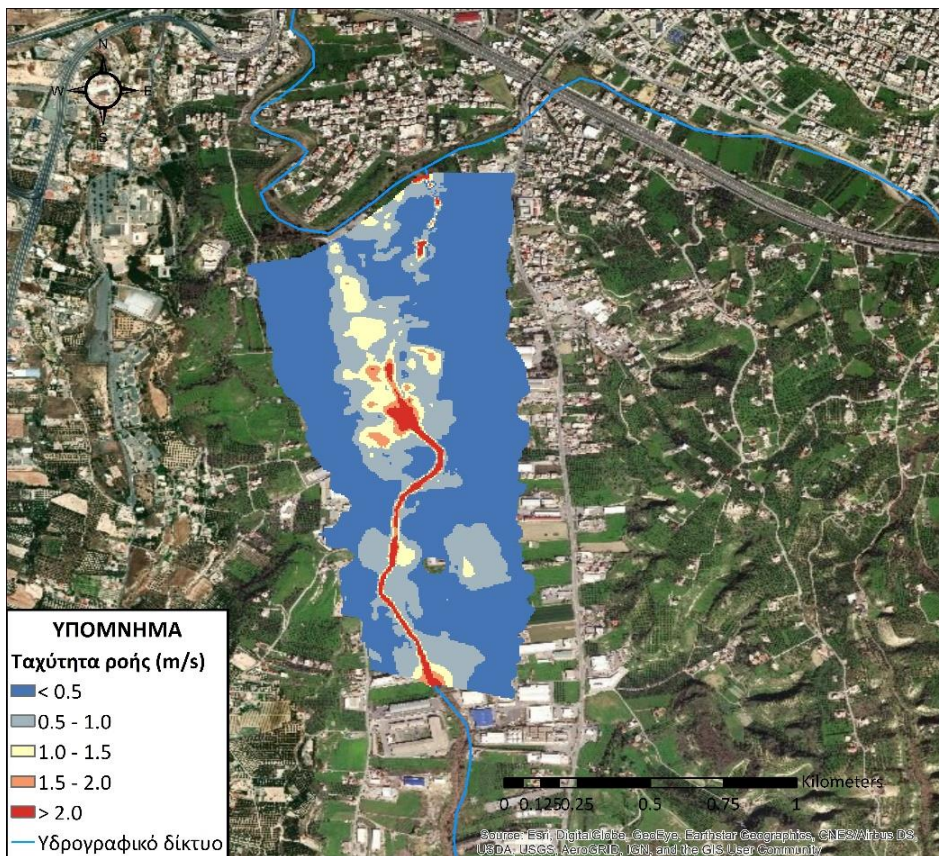
Σχήμα 4.13: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ρέματος Ξεροπόταμου



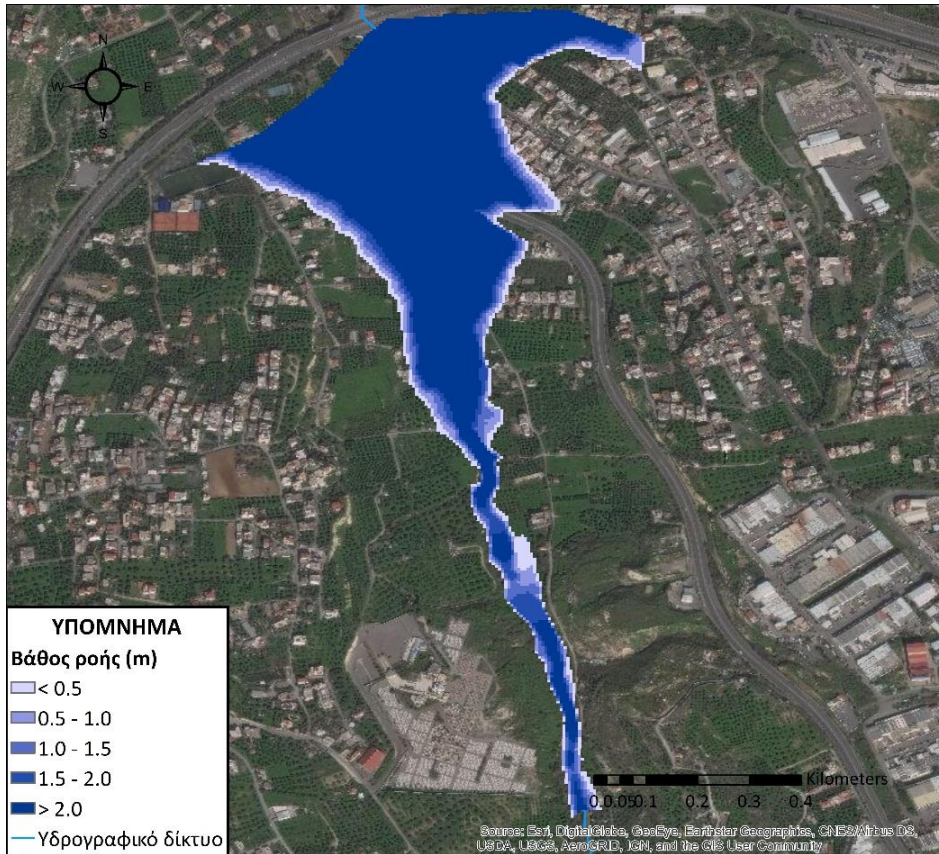
Σχήμα 4.14: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ρέματος Ξεροπόταμου



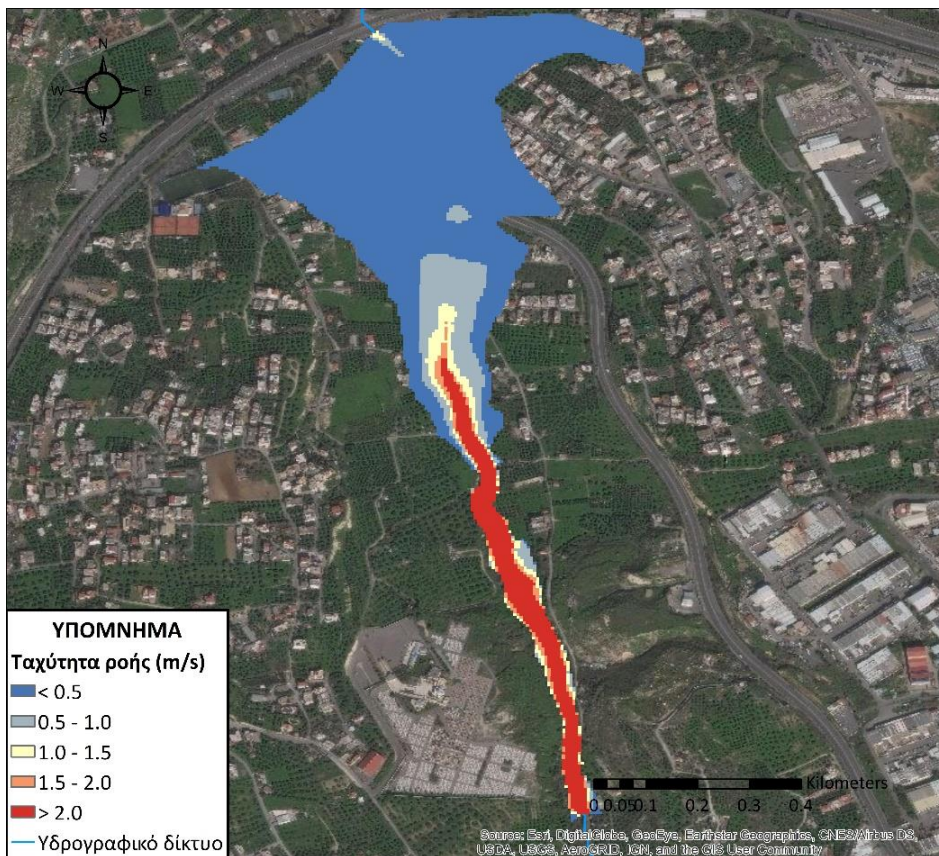
Σχήμα 4.15: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ποταμού Γιόφυρου



Σχήμα 4.16: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ποταμού Γιόφυρου



Σχήμα 4.17: Μέγιστα βάθη πεδίου πλημμύρας ρέματος Κατσαμπαδιανού



Σχήμα 4.18: Μέγιστες ταχύτητες πεδίου πλημμύρας ρέματος Κατσαμπαδιανού

Σε σχέση με την υδραυλική προσομοίωση αξίζει να σημειωθεί η σημασία της ποιότητας των δεδομένων για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, η ανάλυση του DEM δύναται να επηρεάσει τα αποτελέσματα, αφού ένα αδρό DEM το οποίο αδυνατεί να περιγράψει με ακρίβεια τη γεωμετρία του υδατορεύματος ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρά σφάλματα (Ανδρικοπούλου, 2019).

Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα άρδην είναι ο συντελεστής τραχύτητας εδαφών (συντελεστής Manning). Για την απόδοση τιμών υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία η οποία όμως έχει μεγάλο εύρος προτεινόμενων τιμών. Η τελική επιλογή επαφίεται στο μελετητή και μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε η διερεύνηση του πλημμυρικής διακινδύνευσης στο βορειοδυτικό τμήμα της Π.Ε. Ηρακλείου. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τέσσερεις ανεξάρτητες λεκάνες απορροής. Αρχικά, έγινε μια προκαταρκτική εκτίμηση της διακύμανσης της διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης λαμβάνοντας υπόψη αφενός την πλημμυρική επικινδυνότητα και αφετέρου την τρωτότητα της εξεταζόμενης περιοχής. Η πλημμυρική επικινδυνότητα ποσοτικοποιήθηκε μέσω πέντε κριτηρίων με χρήση της πολυκριτηριακής μεθόδου AHP, ενώ η τρωτότητα θεωρήθηκε ότι έχει δυο συνιστώσες, την κοινωνική και την οικονομική. Η παραπάνω διαδικασία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS. Στη συνέχεια και με βάση τους χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης έγινε επιλογή τεσσάρων θέσεων ενδιαφέροντος, μια για κάθε εξεταζόμενο υδατόρευμα. Για τις λεκάνες οι οποίες απορρέουν στα σημεία προσομοίωσης εφαρμόστηκε η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος και την περιγραφή του μηχανισμού βροχής απορροής. Παράλληλα παράχθηκε η καταιγίδα σχεδιασμού με συνδυασμό των δεδομένων από την όμβρια καμπύλη του σταθμού Ηρακλείου και τη μέθοδο εναλλασσόμενων μπλοκ. Πρόκειται για βροχόπτωση διάρκειας 12 ωρών και περιόδου επαναφοράς 100 ετών. Σε περιβάλλον HEC-HMS για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη παράχθηκε το πλημμυρογράφημα το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου για το τμήμα του υδατορεύματος κατάντη του σημείου προσομοίωσης, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η υδραυλική ανάλυση με χρήση του λογισμικού HEC-RAS.

5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη διερεύνηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης εξάγονται τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- Αρχικά συμπεραίνεται ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προκαταρκτική εκτίμηση της διακύμανσης της πλημμυρικής διακινδύνευσης σε ευρείες περιοχές. Τα αποτελέσματά της υποδεικνύουν στο μελετητή εκείνες τις θέσεις οι οποίες έχουν αυξημένη επιδεκτικότητα σε πλημμύρες για τη διενέργεια λεπτομερέστερης ανάλυσης με υδρολογικά και υδραυλικά εργαλεία.

- Πέραν των αντικειμενικών παραγόντων οι οποίοι οδηγούν στην εκδήλωση πλημμυρών είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ενδεχόμενες αρνητικές επιπτώσεις μιας δυνητικής πλημμύρας, δηλαδή η τρωτότητα της εξεταζόμενης περιοχής. Η συμπερίληψη της τρωτότητας βρίσκεται στο πνεύμα της Οδηγίας 2007/60 για τις πλημμύρες και προσθέτει ένα πολύ σημαντικό «φίλτρο» στο μελετητή για τον εντοπισμό των περιοχών οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης και προστασίας.

- Η ποιότητα και ορθότητα των τελικών αποτελεσμάτων της υδραυλικής ανάλυσης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την ανάλυση των δεδομένων εισόδου. Συγκεκριμένα, η ανάλυση του DEM δύναται να επηρεάσει τα αποτελέσματα, αφού ένα αδρό DEM το οποίο αδυνατεί να περιγράψει με ακρίβεια τη γεωμετρία του

υδατορεύματος ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρά σφάλματα (Ανδρικοπούλου, 2019). Ένας επιπλέον παράγοντας ο οποίος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα είναι ο συντελεστής τραχύτητας εδαφών (συντελεστής Manning). Υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία για την απόδοση τιμών, η οποία όμως προτείνει διαφορετικές τιμές με έντονες διακυμάνσεις. Η τελική επιλογή επαφίεται στο μελετητή και μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

5.3 ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στην περιοχή μελέτης οδηγεί στα παρακάτω ειδικότερα συμπεράσματα:

- Τα προβλήματα τα οποία εμφανίζονται στην εξεταζόμενη περιοχή όσον αφορά τις πλημμύρες σύμφωνα με το ιστορικό κυρίως οφείλονται στην υπερχειλίση του υδατορεύματος του Γιόφυρου. Τα υπόλοιπα υδατορεύματα δεν δημιουργούν τόσο συχνά προβλήματα στην περιοχή.

- Οι περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν την υψηλότερη πλημμυρική επικινδυνότητα είναι αυτές στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, δηλαδή τα τμήματα κοντά στην έξοδο των λεκανών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα τμήματα αυτά το υψόμετρο είναι χαμηλό, όπως και οι κλίσεις, ενώ η αδιαπερατότητα υψηλή, αφού πρόκειται για περιοχή με κύρια χρήση την αστική. Η τρωτότητα είναι επίσης υψηλή στις συγκεκριμένες περιοχές λόγω του γεγονότος ότι στις πόλεις συγκεντρώνεται ο πληθυσμός και μαζί οι περιουσίες και οι οικονομικές δραστηριότητές του, με αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών των δυο συνιστωσών της τρωτότητας οι οποίες λήφθηκαν υπόψη (κοινωνική και οικονομική).

- Οι χρήσεις γης διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στο τελικό χαρτογραφικό αποτέλεσμα διότι συνδέονται με πολλαπλούς τρόπους με την πλημμυρική διακινδύνευση, επηρεάζοντας και το κριτήριο της αδιαπερατότητας, αλλά και τις δυο συνιστώσες της τρωτότητας. Επιπλέον, από τον χάρτη χρήσεων γης του Corine εξάγεται πληροφορία η οποία εφαρμόζεται και στο στάδιο της υδραυλικής ανάλυσης, με αντιστοίχιση των διαφορετικών κατηγοριών με διαφορετικές τιμές του συντελεστή Manning. Τα παραπάνω σημαίνουν αφενός πως μια ενδεχόμενη αλλαγή στις χρήσεις γης (π.χ. περαιτέρω επέκταση του αστικού ιστού) επηρεάζει σημαντικά τη διακύμανση του διακινδύνευσης στην περιοχή μελέτης, αφετέρου ότι η ποιότητα, η ακρίβεια και η ορθότητα των δεδομένων του Corine έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία των προϊόντων της διαδικασίας και μάλιστα σε διαφορετικά στάδιά της.

- Όσον αφορά στην εφαρμογή της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών για την παραγωγή μοναδιαίων υδρογραφημάτων, αυτή κρίνεται ικανοποιητική. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημά της σε σχέση με τις μεθόδους του Snyder και της SCS είναι το γεγονός πως κατά την εφαρμογή, δίνεται στο μελετητή η δυνατότητα προσαρμογής των δεδομένων για την ακριβέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της λεκάνης. Οι άλλες δυο μέθοδοι θεωρείται ότι υποεκτιμούν την πλημμυρική αιχμή και παρουσιάζουν μια χρονική υστέρηση στην πλημμυρική αιχμή σε σχέση με τα αποτελέσματα της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών.

- Από τις τέσσερεις εξεταζόμενες υπολεκάνες, η μεγαλύτερη πλημμυρική αιχμή σύμφωνα με τα πλημμυρογράφημα εμφανίζεται στο Γιόφυρο. Τα αποτελέσματα επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την έκταση της λεκάνης. Παρόλα αυτά εξετάζοντας την πλημμυρική αιχμή σε μονάδες ειδικής απορροής, διαιρώντας δηλαδή με την έκταση της εξεταζόμενης λεκάνης, η υπολεκάνη του Γαζανού κατατάσσεται πρώτη. Αυτό σχετίζεται με τις έντονες κλίσεις της λεκάνης και τη διαφοροποίηση που παρουσιάζει ως προς τις χρήσεις γης σε σχέση με τις άλλες λεκάνες απορροής.

- Όσον αφορά στην υδραυλική προσομοίωση, το πιο ευρύ πλημμυρικό πεδίο εντοπίζεται κατά μήκος του Γιόφυρου. Στα υδατορεύματα Γαζανού και Ξεροπόταμου δε σημειώνεται μεγάλης έκτασης πλημμύρα, ενώ στις δυνητικά πληγείσες περιοχές κατά βάση περιλαμβάνονται αμπελώνες και ελαιώνες. Στο πλημμυρικό πεδίο του Γιόφυρου περιλαμβάνονται εκτάσεις όπου εδράζεται ο οικισμός Φοινικιά, αλλά και οι εγκαταστάσεις του ΒΙΟ.ΚΑ Ηρακλείου. Πράγματι η περιοχή έχει πληγεί στο παρελθόν. Σε σχέση με το πλημμυρικό πεδίο του Κατσαμπαδιανού, αυτό έχει ενδεχομένως υπερεκτιμηθεί, αφού πρόκειται για υδατόρευμα το οποίο δεν προκαλεί συχνά προβλήματα στην πραγματικότητα, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης. Παρόλα αυτά σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης το πλημμυρικό του πεδίο είναι αρκετά ευρύ και καλύπτει και τμήμα του αστικού ιστού στην περιοχή της Νέας Αλικαρνασσού.

5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας προέκυψαν τα παρακάτω ζητήματα, τα οποία εκτιμάται πως χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Κριτήρια πλημμυρικής επικινδυνότητας: η σχετική βιβλιογραφία αποδεικνύει ότι υπάρχει έντονη πολυγωνμία σε σχέση με το ποιοι είναι οι παράγοντες οι οποίοι συνδέονται με την εκδήλωση πλημμυρών και άρα ποια είναι εκείνα τα κριτήρια τα οποία απαιτείται να ληφθούν υπόψη ώστε να αποδοθεί η πλημμυρική επικινδυνότητα ικανοποιητικά. Δυο κριτήρια τα οποία δε λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία αλλά παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι ο εδαφικός τύπος και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης στην περιοχή.
- Εκτίμηση τρωτότητας: στην παρούσα εργασία έγινε η παραδοχή ότι η τρωτότητα της περιοχής όσον αφορά στις πλημμύρες έχει δυο σκέλη, το κοινωνικό και το οικονομικό. Ορισμένοι μελετητές λαμβάνουν υπόψη και την περιβαλλοντική συνιστώσα η οποία θα είχε επίσης ενδιαφέρον να συμπεριληφθεί. Όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση της τρωτότητας θα είχε ενδεχομένως νόημα μια ανάλυση σε λεπτομερέστερη κλίμακα. Για παράδειγμα το κοινωνικό κριτήριο υλοποιήθηκε με δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ μια άλλη επιλογή θα ήταν η ψηφιοποίηση των ορίων των οικισμών στην περιοχή και, με διεύρυνση των ορίων αυτών (buffer zone), η απόδοση χαρακτηριστικών κοινωνικής τρωτότητας στα επιμέρους πολύγωνα. Επιπλέον στοιχείο θα μπορούσε να ήταν η ψηφιοποίηση σημαντικών δημόσιων κτηρίων στην περιοχή (νοσοκομεία, σχολεία, εγκαταστάσεις της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας κ.α.). Όσον αφορά στην υλοποίηση της οικονομικής συνιστώσας, η οποία στην προκειμένη περίπτωση έγινε μέσω των χρήσεων γης κατά Corine, αυτή θα ήταν σαφώς πιο αντιπροσωπευτική εάν

υπήρχαν αναλυτικότερα χωρικά δεδομένα για την οικονομική δραστηριότητα στην περιοχή.

- Σενάρια αστικοποίησης: οι χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης είναι καθοριστικές για την πλημμυρική επικινδυνότητα αλλά και την τρωτότητα. Ως εκ τούτου θα είχε ενδιαφέρον η υλοποίηση σεναρίων αστικοποίησης της περιοχής.
- Βροχή σχεδιασμού: στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας προτείνεται η εκτέλεση υδραυλικών προσομοιώσεων για συγκεκριμένα ιστορικά επεισόδια βροχής, η οποία θα βοηθούσε την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας, ειδικότερα στην περίπτωση όπου υπάρχουν δορυφορικές εικόνες για τη σύγκριση των τελικών χαρτογραφικών προϊόντων.
- Συντελεστής τραχύτητας εδάφους (Manning): ο συντελεστής Manning καθορίζει σημαντικά τα αποτελέσματα της υδραυλικής ανάλυσης, επομένως θα είχε μεγάλη αξία η διερεύνηση της επίδρασής του με την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας.
- Αντιπλημμυρικά έργα: κρίνεται σκόπιμη η εξέταση επιπλέον σεναρίων για τη διερεύνηση της επίδρασης τυχόν έργων, όπως αναχώματα, λίμνες συγκράτησης ομβρίων, περατά πεζοδρόμια, ιδίως σε λεκάνες απορροής οι οποίες προκαλούν επανειλημμένως σημαντικές πλημμύρες, όπως είναι αυτή του Γιόφυρου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδρικοπούλου Θ. (2019) Ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου – Η περίπτωση του Πηνειού ποταμού, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Καββαδά Ο. (2012) Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Κάβουρας Μ., Δάρρα Α., Κονταξάκη Σ., Τομαή Ε. (2016) Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας - Αρχές και Τεχνολογίες, [ηλεκτρ. βιβλ.], Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/6392>

Μαμάσης Ν. (2007) Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, Δ.Π.Μ.Σ. Ε.Τ.Υ.Π., Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α. (2018) Τεχνική Υδρολογία, 6^η έκδ., Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Μουσαδάης Ι. (2018) Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένης μεθοδολογίας σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών. «Η περίπτωση της Αττικής», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μπαλτζάκη Α. (2006) Γεωλογική και υδρογεωλογική διερεύνηση της πηγής Αλμυρού στο Ηράκλειο Κρήτης, Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Χανιά.

Μπεζές Κ. (1992) Υδρογεωλογική μελέτη ευρύτερης περιοχής Τυλίσου – Νομού Ηρακλείου Κρήτης, Δήμος Ηρακλείου – Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ηρακλείου, Ηράκλειο.

Μπέλλος Κ. (2006) Στοιχεία Τεχνικής Υδρολογίας, Εκπαιδευτικό υλικό Δ.Π.Θ., Ξάνθη

Μπέλλος Β. (2015) Προσομοίωση πλημμύρας σε φυσικό ανάγλυφο για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

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)

Παπαδόπουλος Β. (2006) Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος «Εφαρμογές της Ασαφούς Λογικής σε θέματα Πολιτικού Μηχανικού», Δ.Π.Θ., Ξάνθη

Προύντζος Σ. (2013) Χαρακτηρισμός λιμναίων και πηγαίων υδατικών συστημάτων στη δυτική Κρήτη με βάση την Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

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.

Σιδηροπούλου Δ. (2011) Πολυκριτηριακή ανάλυση στη λήψη απόφασης για την χωροθέτηση Γενικού Νοσοκομείου. Εφαρμογή στον Ν. Θεσσαλονίκης με χρήση ΓΣΠ, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Α.Π.Θ..

Σταθόπουλος Ν. (2010) Αξιολόγηση υδατικού δυναμικού της καρστικής υφάλμυρης πηγής του Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, Στάδιο Ι, 1^η Φάση, Παραδοτέο 1, Ανάλυση χαρακτηριστικών περιοχής και μηχανισμών πλημμύρας, Τεχνική έκθεση. (2018), Διαθέσιμο στο: https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr13/Report/EL13_P01-T1.pdf

Τουτζιάρη Μ. (2012) Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας – Εφαρμογή στο Σαρανταπόταμο Ελευσίνας, Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Τσακίρης Γ. (1995) Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσακίρης Γ. (2007) Συστημική προσέγγιση στην ανάλυση των φυσικών κινδύνων και των φυσικών καταστροφών.

Τσακίρης Γ. (2013) Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσιτρούλης Ι. (2015) Εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στη λεκάνη του Γαλλικού ποταμού με τη χρήση του κώδικα HEC – RAS, Μεταπτυχιακή εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Τσούλος Λ., Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ. (2015) Χαρτογραφική Σύθεση και Απόδοση σε Ψηφιακό Περιβάλλον, [ηλεκτρ. βιβλ.], Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2506>

Τυρογιάννης Β. (2018) Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση σε περιβάλλον GIS του Υ.Δ. Κρήτης (GR13), Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017) 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (EL13).

Χαλκιάς Χ., Γκούσια Μ. (2015) Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής, [ηλεκτρ. βιβλ.], Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4548>

Χατζηδάκη Α. (2013) Πολυκριτηριακή Ανάλυση σε περιβάλλον GIS για την χαρτογράφηση της πλημμύρας στην Βόρεια Ελλάδα, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Χριστοφίδης Α.Δ. (2008) Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chow V.T., Maidment D., Mays L. W. (1988) Applied Hydrology, McGraw Hill.

- Dooge J.C. (1959) A general theory of the unit hydrograph, *Journal of geophysical research*, 64(2), 241-256.
- Feloni E. (2019) Assessment of flood induced by heavy rainfall using advanced methodologies, as a premise for an integrated flood early warning system - the case of Attica region, PhD Dissertation, NTUA.
- Fernandez D., Lutz M. (2010) Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis, *Engineering Geology*, 111, 90-98.
- Guha-Sapir D., Hargitt D., Hoyois P. (2004) Thirty years of natural disaster 1974–2003: the numbers, Presses universitaires de Louvain, Belgium.
- Hanak T., Korytarova J. (2014) Risk zoning in the context of insurance: comparison of flood, snow load, windstorm and hailstorm, *J Appl Eng Sci* 12:137–144
- Keeney R.L., Raiffa H. (1993) Decisions with multiple objectives—preferences and value tradeoffs, Cambridge University Press, Cambridge.
- McCuen R.H. (1998) Hydrologic Analysis and Design, 2nd Edition.
- Na W., Yoo C. (2018) Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea, *Water*.
- Papaioannou G., Vasiliades L., Loukas A. (2015) Multi-Criteria Analysis Framework for Potential Flood Prone Areas Mapping, *Water Resour Manage* 29(399).
- Saaty T. L. (1977,1987) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, *J. Math. Psychology*, 15, pp. 234–281, 2018.
- Sherman L.K. (1932) Streamflow from Rainfall by the Unit-graph Method, *Engineering News Record*, 108.
- Sidayao G., Valdez S., Fernandez P. (2015) Modeling Flood Risk for an Urban CBD Using AHP and GIS, *International Journal of Information and Education Technology*, 5.
- Singh V.P. (1992) *Elementary Hydrology*, Prentice Hall, New Jersey
- Smith K. (2003) *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*, Routledge
- Strahler A.N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp.913-920.
- Theochari A.-P., Feloni E., Bournas A., Karpouzou D., Baltas E. (2019) Multi-criteria decision making and GIS techniques in the design of a stream gauging network, *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 15(4), pp.358-377.
- U.S. Army Corps of Engineers (2016) *River Analysis System HEC-RAS. User's Manual, Version 5.0.*, U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, USA.
- Van Herwijnen M. (1999) Spatial decision support for environmental management, PhD thesis, Vrije Universiteit.

Vojtek M., Vojteková J. (2019) Flood Susceptibility Mapping on a National Scale in Slovakia Using the Analytical Hierarchy Process, *Water*, 11, 364.

Vojteková J., Vojtek M. (2020) Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11, 131-148, 10.1080/19475705.2020.1713233.

Wang Y., Li Z., Tang Z., Zeng G. (2011) A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China, *Water Resources Management*.

Wilson E.M. (1990) *Engineering Hydrology*, Palgrave, London.

Yeganeh N., Sabri S. (2014) Flood Vulnerability Assessment in Iskandar Malaysia Using Multi-criteria Evaluation and Fuzzy Logic, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8, 1794-1806, 10.19026/rjaset.8.1167.

Zelenakova M., Dobos E., Kováčová L., Vágó J., Abu-hashim M., Fijko R., Purcz P. (2018) Flood vulnerability assessment of Bodva cross-border river basin, *Acta Geologica Slovaca*, 23.

Zwenzner H., Voigt S. (2008) Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 5, 2951–2973.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

floods.ypeka.gr, Τελευταία προσπέλαση: 17/5/2020

geodata.gov.gr, Τελευταία προσπέλαση: 17/5/2020

hnms.gr, Τελευταία προσπέλαση: 17/5/2020

land.copernicus.eu/acl_users, Τελευταία προσπέλαση: 18/5/2020

www.nrcs.usda.gov, Τελευταία προσπέλαση: 31/5/2020

pro.arcgis.com, Τελευταία προσπέλαση: 17/5/2020

statistics.gr, Τελευταία προσπέλαση: 17/5/2020