



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΡΟΧΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ GIS

ΘΕΟΔΩΡΑ Ζ. ΑΝΔΡΙΚΟΠΟΥΛΟΥ

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

Αθήνα, Μάρτιος 2021

Περιεχόμενα

Executive summary.....	xvii
Materials and Methods.....	xviii
Study area.....	xviii
Data used.....	xix
Hydrometeorological analysis.....	xix
Hydrological modelling.....	xx
Results and discussion.....	xxvii
Conclusions.....	xxxv
Selected References.....	xxxviii
1 Εισαγωγή.....	40
1.1 Γενικά.....	40
1.1.1 Υδρολογικά μοντέλα.....	40
1.1.2 Τύποι μοντέλων.....	40
1.1.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις κατανεμημένων μοντέλων.....	43
1.2 Αντικείμενο Εργασίας.....	45
1.3 Διάρθρωση Εργασίας.....	45
2 Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα.....	47
2.1 Γενικά στοιχεία.....	47
2.1.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.....	47
2.1.2 Γεωμορφολογία περιοχής.....	48
2.1.3 Κλιματικά χαρακτηριστικά.....	50
2.1.4 Ιστορικό Πλημμυρών.....	50
2.2 Δεδομένα.....	51
2.2.1 Γεωχωρικά Δεδομένα.....	51
2.2.2 Βροχομετρικά Δεδομένα και δεδομένα παροχής.....	57
2.2.1 Επεισόδια Βροχής.....	58
2.2.2 Λογισμικά.....	59

3	Μεθοδολογία μοντελοποίησης της διεργασίας βροχής - απορροής	61
3.1	Γενική επισκόπηση μεθοδολογίας	61
3.2	Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχοπτώσης	61
3.2.1	Η Μέθοδος Thiessen	62
3.2.2	Η Μέθοδος IDW	63
3.3	Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS - CN	64
3.4	Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν	68
3.4.1	Μοντέλο ΜΥΓ από ανάλυση επεισοδίων ζευγών βροχής - απορροής	68
3.4.2	Μοντέλο ΜΥΓ μέσω ισόχρονων καμπυλών.....	71
3.4.3	Κατανεμημένο μοντέλο	78
4	Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	83
4.1	Εισαγωγή.....	83
4.2	Σύγκριση μεθόδων επιφανειακής ολοκλήρωσης της βροχής.....	83
4.3	Προσομοιώσεις επεισοδίων	86
4.3.1	Επεισόδιο 1 - 01/03/2013	87
4.3.2	Επεισόδιο 2 - 01/03/2014	89
4.3.3	Επεισόδιο 3 - 23/01/2015	91
4.3.4	Επεισόδιο 4 - 26/02/2015	93
4.3.5	Επεισόδιο 5 - 05/03/2015	95
4.4	Συζήτηση αποτελεσμάτων	97
5	Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα.....	101
5.1	Σύνοψη.....	101
5.2	Συμπεράσματα	101
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	104
	Αναφορές.....	106

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης	47
Πίνακας 2.2: Χωρικές καρτεσιανές συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών	58
Πίνακας 2.3: Επιλεγμένα επεισόδια βροχής για προσομοίωση.....	59
Πίνακας 3.1: Συντελεστές Thiessen ανά σταθμό.....	63
Πίνακας 3.2: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Καββαδά, 2012, μετά από επεξεργασία)	73
Πίνακας 3.3: Ταχύτητα ροής εντός υδρογραφικού δικτύου	76
Πίνακας 4.1: Ιστορικά επεισόδια βροχής.....	83
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 1	88
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 2.....	90
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 3.....	92
Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 4.....	94
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 5.....	96
Πίνακας 4.7: Εκτίμηση παροχής αιχμής με χρήση μοντέλου βροχής - απορροής.....	97
Πίνακας 4.8: Εκτίμηση χρόνου αιχμής με χρήση μοντέλου βροχής - απορροής.....	98

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Περιοχή μελέτης, όμοροι Καλλικρατικοί Δήμοι και Υδατικά Διαμερίσματα	48
Σχήμα 2.2: Γεωμορφολογική άποψη περιοχής μελέτης	49
Σχήμα 2.3: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), υδρογραφικό δίκτυο και βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής μελέτης	52
Σχήμα 2.4: Κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης κατά Corine	53
Σχήμα 2.5: Κατανομή χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2018 για την περιοχή μελέτης	54
Σχήμα 2.6: Κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης	55
Σχήμα 2.7: Κατηγορίες εδάφους της περιοχής μελέτης	57
Σχήμα 3.1: Τιμές CN για την περιοχή μελέτης	68
Σχήμα 3.2: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα (Προέλευση: ΔΕΗ)	70
Σχήμα 3.3: : Στάδια υλοποίησης μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS	72
Σχήμα 3.4: Ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας στη θέση Καρύταινα	76
Σχήμα 3.5: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών	77
Σχήμα 3.6: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα (Προέλευση: ΔΕΗ)	77
Σχήμα 3.7: Δομή κατανεμημένου μοντέλου	79
Σχήμα 3.8: Κωδικοποίηση διαδικασίας υπολογισμού αθροιστικής βροχόπτωσης	79
Σχήμα 3.9: Κωδικοποίηση διαδικασίας ομαδοποίησης κυττάρων με βάση το χρόνο απορροής	80
Σχήμα 3.10: Κωδικοποίηση διαδικασίας εκτίμησης απωλειών και ενεργού βροχόπτωσης	80
Σχήμα 3.11: Προσέγγιση διόδευσης ροής κυττάρου στην έξοδο της λεκάνης απορροής	81
Σχήμα 3.12: Κωδικοποίηση διαδικασίας υπολογισμού απορροής στην έξοδο της ΛΑΠ	82
Σχήμα 4.1: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 1 ..	84
Σχήμα 4.2: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 2 ..	84
Σχήμα 4.3: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 3 ..	85
Σχήμα 4.4: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 4 ..	85
Σχήμα 4.5: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 5 ..	86
Σχήμα 4.6: Χρόνοι απορροής στη ΛΑΠ της Καρύταινας	87

Σχήμα 4.7: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 1	88
Σχήμα 4.8: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 1	89
Σχήμα 4.9: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 2	90
Σχήμα 4.10: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 2	91
Σχήμα 4.11: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 3	92
Σχήμα 4.12: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 3	93
Σχήμα 4.13: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 4	94
Σχήμα 4.14: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 4	95
Σχήμα 4.15: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 5	96
Σχήμα 4.16: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 5	97

List of Figures

Figure 1: Study area, Karitaina watershed	xix
Figure 2: Flow chart of time - area method	xxiii
Figure 3: Unit hydrograph from rainfall - runoff observations analysis (Source: HPPC)	xxiv
Figure 4: Unit hydrograph from time - area diagram method	xxiv
Figure 5: Effective rainfall estimation flow chart.....	xxv
Figure 6: Time lag approach	xxvi
Figure 7: Streamflow estimation flow chart	xxvi
Figure 8: Surface rainfall - Event 1	xxvii
Figure 9: Surface rainfall - Event 2	xxviii
Figure 10: Surface rainfall - Event 3	xxviii
Figure 11: Surface rainfall - Event 4	xxix
Figure 12: Surface rainfall - Event 5	xxix
Figure 13: Flow hydrograph of Karitaina position, event 1	xxxi
Figure 14: Flow hydrograph of Karitaina position, event 2.....	xxxii
Figure 15: Flow hydrograph of Karitaina position, event 3.....	xxxiii
Figure 16: Flow hydrograph of Karitaina position, event 4.....	xxxiv
Figure 17: Flow hydrograph of Karitaina position, event 5.....	xxxv

List of Tables

Table 1: Selected events	xx
Table 2: Flow hydrograph features - Event 1.....	xxxix
Table 3: Flow hydrograph features - Event 2.....	xxxix
Table 4: Flow hydrograph features - Event 3.....	xxxix
Table 5: Flow hydrograph features - Event 4.....	xxxix
Table 6: Flow hydrograph features - Event 5.....	xxxix

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ευάγγελο Μπαλά, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής εργασίας, τις σημαντικές επισημάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της, καθώς και την καθοδήγησή του στο πλαίσιο της εξαιρετικής συνεργασίας μας.

Παράλληλα, ευχαριστώ τους κ. Ηλία Παλακωνσταντή, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και κ. Βασίλειο Τσιχριντζή, Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους στο αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

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

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

Θεοδώρα Ζ. Ανδρικοπούλου

Αθήνα, 2021

«Άριστον μὲν ὕδωρ»

Πίνδαρος

Περίληψη

Η χρήση ομοιωμάτων που στοχεύουν στη βέλτιστη αναπαράσταση μέρους ή του συνόλου του υδρολογικού κύκλου είναι ευρέως διαδεδομένη στους τομείς αξιοποίησης και διαχείρισης των υδατικών πόρων. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός πλήρως κατανεμημένου μοντέλου βροχής - απορροής για την προσομοίωση ιστορικών επεισοδίων βροχής που προκάλεσαν πλημμύρα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) λαμβάνοντας υπόψη το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και άλλα γεωχωρικά δεδομένα και προγραμματισμού (ArcPy). Μέσω του μοντέλου και αξιοποιώντας τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών υπολογίζεται η απορροή σε κάθε εικονοστοιχείο, η οποία στη συνέχεια διοδεύεται υδρολογικά στην έξοδο της λεκάνης. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του άνω ρου του Αλφειού ποταμού με σημείο εκφόρτισης στην περιοχή της Καρύταινας, που εντάσσεται στο μεγαλύτερο τμήμα της στην ΠΕ Αρκαδίας. Η ανάλυση βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης που καταγράφηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης τα οποία στη συνέχεια ανάγονται χωρικά σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης με ωριαίο χρονικό βήμα. Η επίδοση του μοντέλου εκτιμάται συγκριτικά με δύο συγκεντρωτικά μοντέλα, ένα ανεπτυγμένο με τεχνικές GIS και ένα βασισμένο στο μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε από ιστορικά επεισόδια βροχής - απορροής. Τέλος, τα αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων όσον αφορά στην απόκριση της υδρολογικής λεκάνης σε συγκεκριμένα επεισόδια βροχής συγκρίνονται και αξιολογούνται με γνώμονα το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα των επεισοδίων που επιλέχθηκαν προς διερεύνηση.

Λέξεις κλειδιά: Λεκάνη απορροής, επεισόδιο βροχόπτωσης, κατανεμημένο μοντέλο, βροχή - απορροή, Καρύταινα, Αλφειός, ισόχρονες καμπύλες, GIS, ArcPy

Abstract

Hydrological modelling is a widely used tool that aims to supply information from a particular location as close as possible to the actual hydrological dynamics of a river basin through the mathematical representation of the hydrological processes. Models can also help watershed managers in the control of extreme events such as floods or in the assessment of water resources availability. In this master thesis, the development and application of a fully distributed rainfall – runoff model, to be used in flood related simulations is performed. The model utilizes the time–area diagram theory in order to calculate and route the runoff of each grid to the basin’s outlet. The selected study area is the upper part of the Alfeios river basin, the Karitaina basin, located in southern Greece, while historic rainfall data from regional raingauges were used, which were interpolated through GIS tools into spatially gridded rainfall fields, with a one-hour temporal scale. The performance of the distributed model was evaluated through its comparison with two lumped models, one based on GIS techniques and the other one based on the unit hydrograph derived from historical rainfall – runoff events. Finally, the abovementioned models were also compared and evaluated with the observed hydrograph of the studied event. The results showed that the distributed model performed well and that the deviations with the lumped models only highlight the effect of incorporating the spatial variability of the rainfall field.

Key words: Watershed, historic event, distributed model, rainfall – runoff, Karitaina, Alfeios River, isochrones, runoff time, GIS, ArcPy

Executive summary

Introduction

Hydrological models are nowadays considered as an important and necessary tool for water and environment resource management. According to Sorooshian et al. (2008), a model is a simplified representation of real world system. The best model is the one which gives results close to reality with the use of least parameters and model complexity. Models are mainly used for predicting system behaviour and understanding various hydrological processes. A model consists of various parameters that define the characteristics of the model. A runoff model can be defined as a set of equations that helps in the estimation of runoff as a function of various parameters used for describing watershed characteristics. The two fundamental inputs required for all models are rainfall data and drainage area. Along with these, water basin characteristics like soil properties, vegetation cover, watershed topography, soil moisture content, characteristics of ground water aquifer are also considered (Devi et al., 2015).

In this master thesis the development and application of a fully distributed rainfall – runoff model, to be used in flood related simulations is performed. The model utilizes the time – area diagram theory in order to calculate and route the runoff of each grid to the basin’s outlet. The selected study area is the upper part of the Alfeios river catchment, the Karitaina basin, located in southern Greece, while historic rainfall data from regional raingauges were used, which were interpolated through GIS tools into spatially gridded rainfall fields, with a one-hour temporal scale. The performance of the distributed model is evaluated through its comparison with two lumped models, one based on GIS techniques and the other one based on the unit hydrograph derived from historical rainfall – runoff events. Finally, the abovementioned models are also compared and evaluated with the observed hydrograph of the studied event. The conclusions of this study highlight the importance of model’s parameters in its performance and constitute a basis for further research in the context of considering spatial distributed rainfall datasets in hydrological modelling for forecasting and water resource management purposes.

Materials and Methods

Study area

The Karitaina Basin is the upper part of the Alfeios river basin located in Southern Greece, in the center of the Peloponnesus prefecture (Fig. 1). The basin is surrounded by Mount Taygetus in the south, Mount Lykaion on the west and Mount Mainalo on the northeast, while its outlet is located in the northwest of the basin, near the Karitaina settlement. The basin total area is 871 km², while the mean, maximum and lowest elevation heights are 762 m, 1878 m and 273 m, respectively. Within the basin lies the agricultural plane of Megalopolis, as well as, the large Megalopolis lignite excavation site, which produces nearly 8% of the lignite production of Greece and covers a total of 2.4% of the basin. Based on the 2018 CORINE Land Cover (CLC) dataset classification, the dominant land uses are forest and semi natural areas, 64% of the basin, while 32% of the basin, mostly in the lowlands, is covered by high agriculture activity. The most significant stream is the Alfeios river, whose source lie in the Mount Taygetus, while the smaller Elissonas stream springs from Mount Mainalo and joins Alfeios near the Megalopoli settlement (Figure 1). The basin has a nearly symmetric shape, close to an oval shape rather than an elongated shape, which has the effect of generating hydrographs with steep rising limb; as a result, high peak discharges are often observed.

In regard with the precipitation depth, the mean annual rainfall is approximately 900 mm with higher values observed in the mountainous parts of the basin.

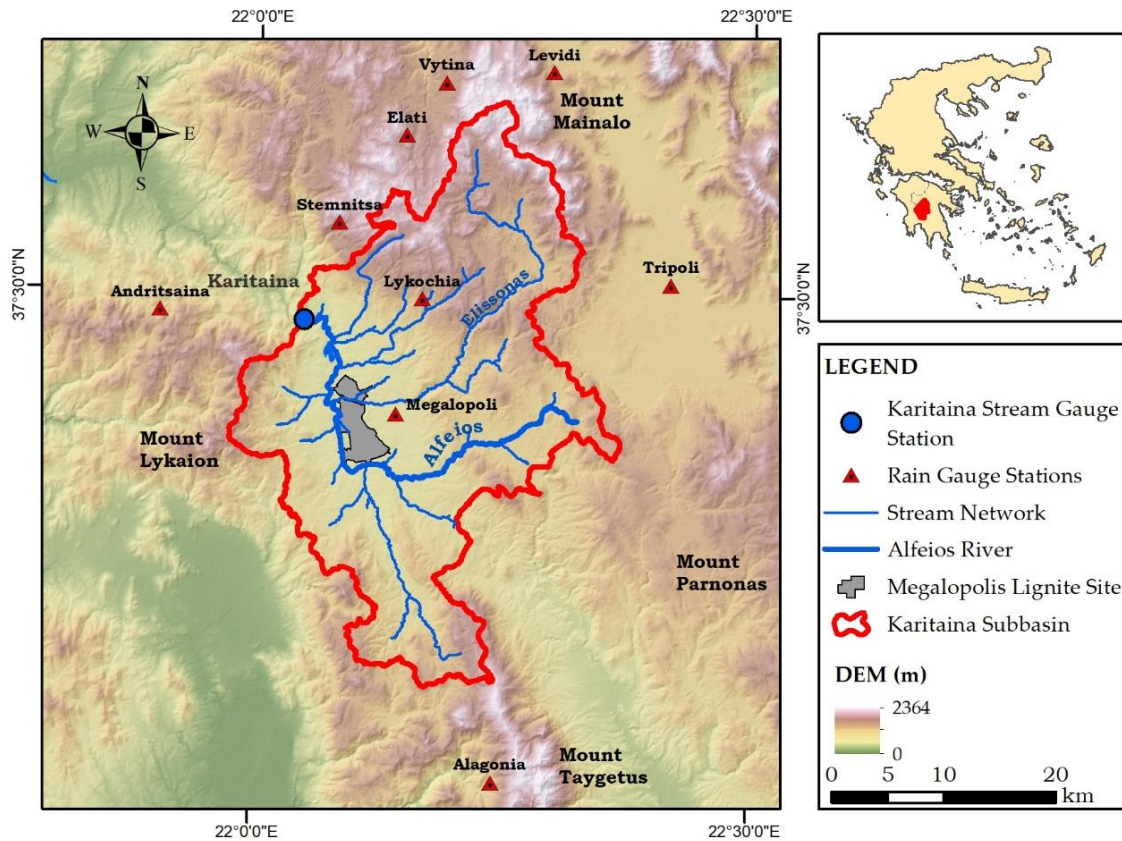


Figure 1: Study area, Karitaina watershed

Data used

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

Further investigation is based on the available hydro-meteorological data of the recent historic flood events occurred within the study area. More specifically, the 10 - min rainfall measurements of the adjacent to the catchment area rain gauges, depicted in Figure 1, were used. In addition, streamflow data derived from water level measurements by applying the rating curve method were also available for the employed rainfall events.

Hydrometeorological analysis

Rainfall data series were provided by NOANN (Lagouvardos et al., 2017) and they concern 10 - minute rainfall measurements (in mm/10min). Nine stations used namely Alagonia, Andritsaina, Elati, Levidi, Lykochia, Megalopoli, Stemnitsa, Tripoli and

Vytina. During the data analysis and processing, it was observed that the availability in rainfall measurements for all events is not systematic for all stations. More specifically, there are not precipitation observations from Elati and Levidi stations for the first two historic events.

The rainfall events selected for further analysis along with the the corresponding total precipitation and the duration are presented in Table 1.

Table 1: Selected events

Event Number	Event Date	Total Rainfall (Thiessen) (mm)	Rainfall Duration (h)
1	1/3/2013	33.04	15
2	1/3/2014	46.58	24
3	23/01/2015	78.79	39
4	26/02/2015	40.38	26
5	5/3/2015	41.17	28

Hydrological analysis for the employed events is based on three rainfall - runoff models; a GIS - based fully distributed model and two lumped models founded on the theory of unit hydrograph.

Hydrological modelling

Spatial interpolation of rainfall

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

Thiessen polygon is a commonly used methodology for computing the mean areal precipitation for a catchment from rain gauge observations which was presented by Thiessen (1911). The method is found on the assumption that measured amounts at any station can be applied halfway to the next station in any direction, which means that for any point rainfall is equal to the observed rainfall at the closest gauge. The weights of the rain gauges are computed by their relative areas, which are estimated with the Thiessen polygon network. The polygons are formed by the perpendicular bisectors of the lines joining nearby stations. The area of each polygon is used to weight

the rainfall amount of the station in the center of the polygon. If the amount for any station is missing, the polygon must be changed. The limitation of the method is that Thiessen polygons are unable to consider orographic differences in rainfall distributions (Schumann, 1998).

IDW is a type of deterministic method widely applied in spatial modelling. The estimation is based upon weighted averages, which are proportional to the inverse of the distance between the interpolated and measured points. Weighting is assigned to data using a weighting power that controls how the weighting factors drop off as the distance from a grid node increases. More specifically, as the distance increases, weights diminish, especially when the value of the power parameter rises. Nearby stations have a heavier weight and, therefore, more influence on the estimation. The main factor affecting the accuracy of inverse distance interpolator is the value of the power parameter. In addition, the size of the neighborhood and the number of neighbors are also relevant to the accuracy of the results.

Effective rainfall estimation - SCS method

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

Rainfall - runoff models

UH from rainfall - runoff observations analysis

Unit hydrograph is a direct runoff hydrograph resulting from one unit (one cm) of constant intensity uniform rainfall occurring over the entire watershed. The concept of unit hydrograph is based on linear systems theory and follow the principles of superposition and proportionality. The unit hydrograph represents a discrete transfer function for effective rainfall to reach the basin outlet, lumped to the scale of the catchment.

In this model, the UH derived from rainfall - runoff observations analysis by HPPC for the Karitaina basin, is used. The unit hydrograph along with the surface rainfall

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

The total discharge at the outlet of the basin is calculated by adding the base flow, which represents the water seeping into the stream from groundwater, helping to keep water in streams during droughts.

Isochrone model

The second model developed and applied in the present study is based on the time - area diagram method which is used in order to determine the unit hydrograph.

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

Derivation of the time - area diagram requires knowledge of the soil roughness, the terrain slope, as well as the distribution of flow directions and velocities over the watershed (Muzik, 1996). The flow chart of the method applied is presented in the following figure (Figure 2) and was mainly executed in GIS environment.

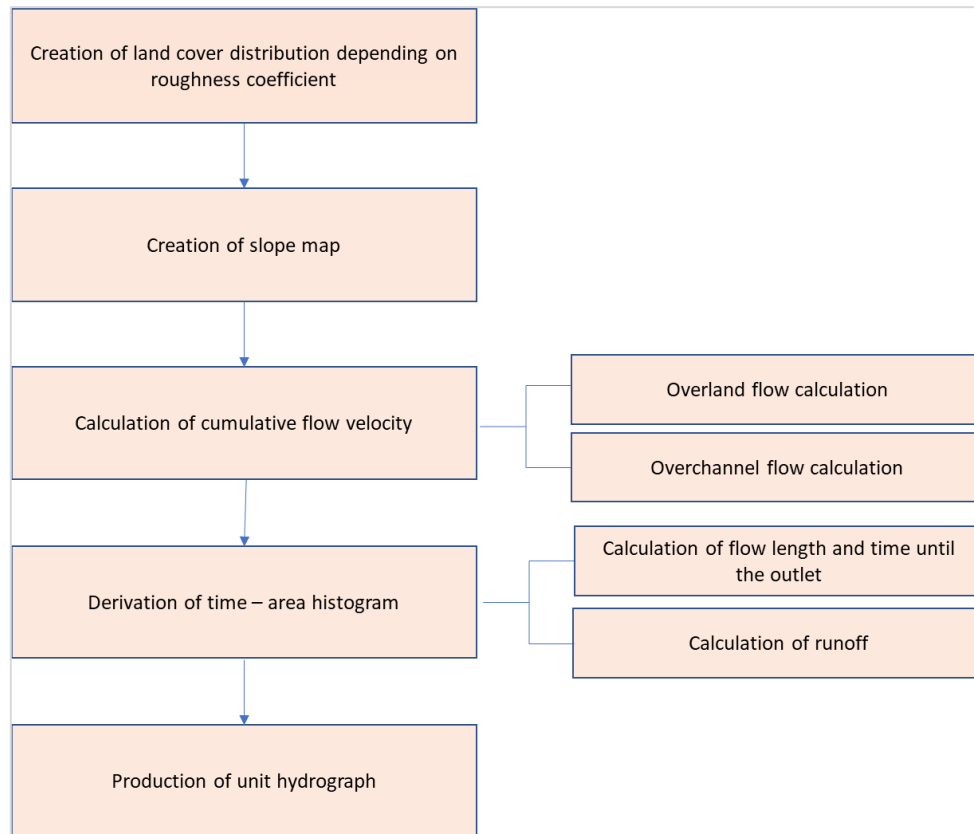


Figure 2: Flow chart of time - area method

The model was manually calibrated to approach the UH obtained from rainfall - runoff observations analysis that is used as a separate model for the simulation of historic events that have taken place within the study area. In particular, the calibration concerns the overchannel velocities employed for each segment of the stream network according to Strahler's stream ordering method. As it is shown in the following figures (Figure 3, Figure 4), the two hydrographs are very close which is also verified by the Nash - Suttcliffe efficiency coefficient that equals to 0.93.

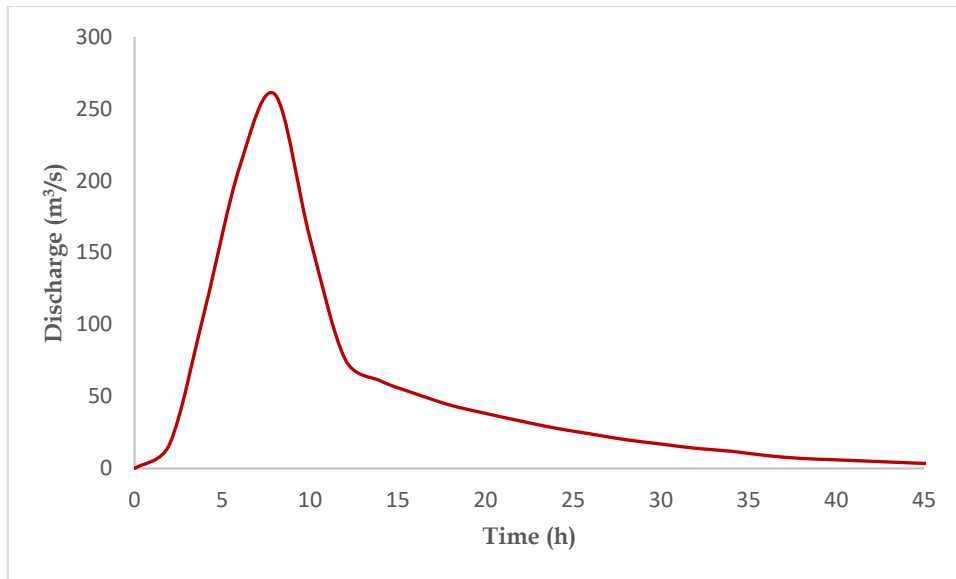


Figure 3: Unit hydrograph from rainfall - runoff observations analysis (Source: HPPC)

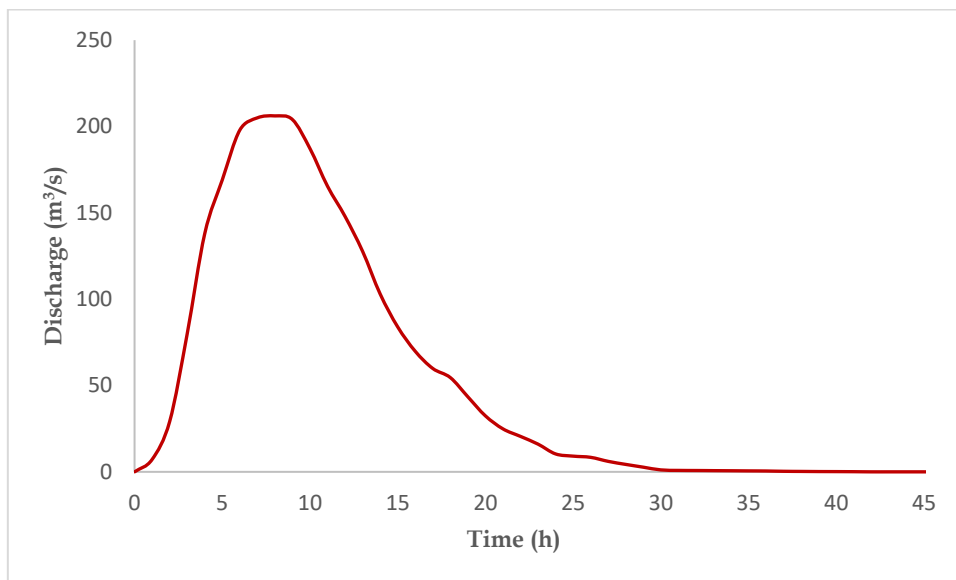


Figure 4: Unit hydrograph from time - area diagram method

The derived UH is afterwards used as described in the previous model to calculate the flow hydrograph in the outlet of the catchment for a given rainfall event and according to the UH theory.

Fully distributed model

The last model developed is a fully distributed GIS - based rainfall - runoff model that constitutes the core of the present master thesis where the most effort has been invested. The main difference between the abovementioned models and this model is related to the spatial scale of the input data which is lumped in the former and gridded in the latter approach. The flow chart of the model's structure is depicted in the following figures.

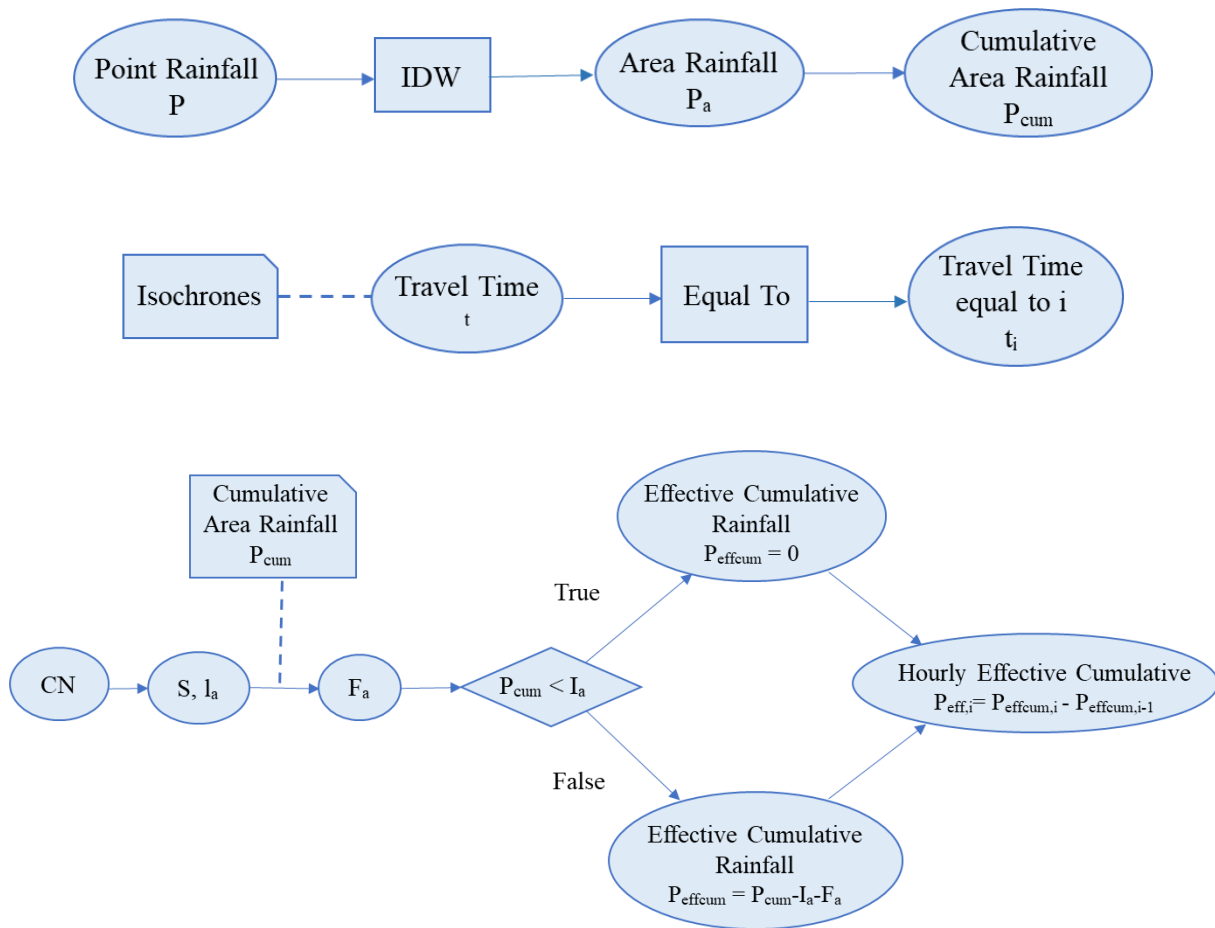


Figure 5: Effective rainfall estimation flow chart

The direct runoff hydrograph can then be calculated for each cell using the previously developed series of spatially distributed excess rainfall and the cell travel time estimated through time - area diagram method as described above. The downstream hydrograph is the computed outflow, with each ordinate equal to an earlier inflow ordinate translated (lagged in time) by the specified duration e.g. 1 hour as it is shown in Figure 6. Then, the sum of all distributed direct runoff hydrographs is be used to create the total direct runoff hydrograph of the basin. The steps followed in ArcPy environment are shown in Figure 7.

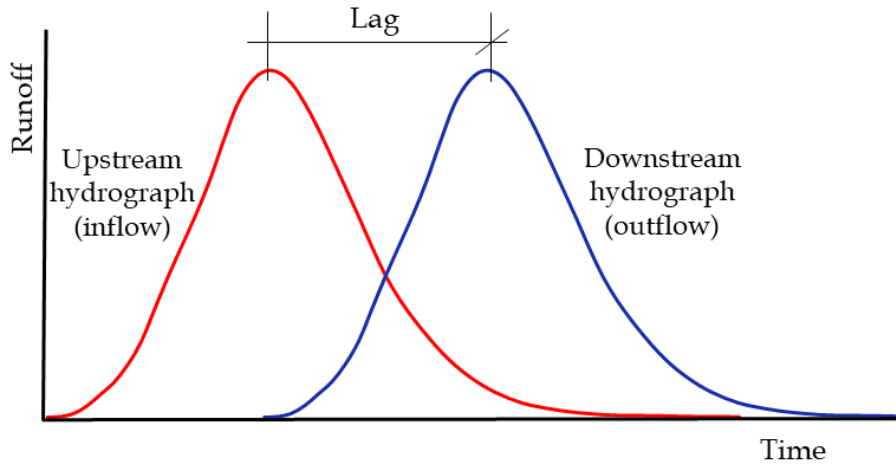


Figure 6: Time lag approach

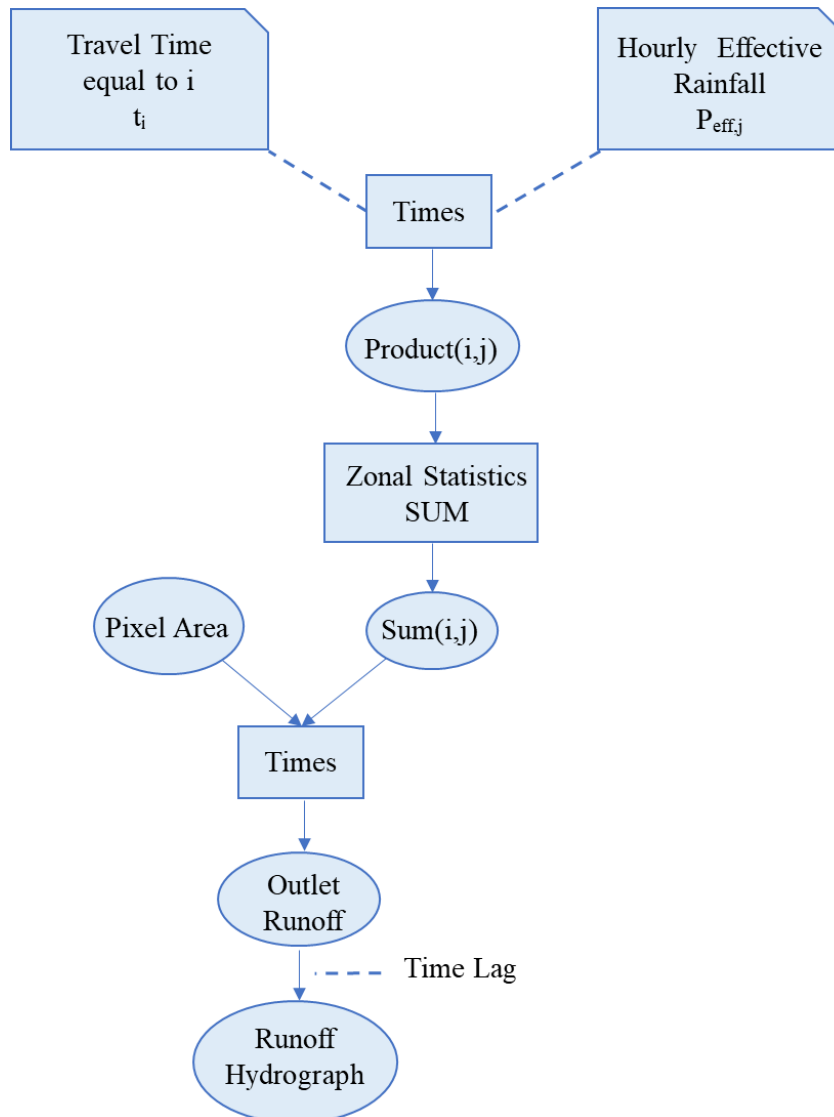


Figure 7: Streamflow estimation flow chart

Results and discussion

The first part of the analysis concerns the estimation of the surface rainfall using the Thiessen and IDW interpolation methods. According to the following figures (Figure 8 - Figure 12), in the three of the five events investigated the deviation occurred between the two methods is perceptible. However, the two methods lead to quite similar areal precipitation estimation regarding the events 3 and 4. In the majority of the cases, Thiessen polygons integration method calculates higher rainfall values during the first approximately 10 hours whereas lower heights are estimated for the next hours of the event in comparison with the corresponding values derived from the IDW formula.

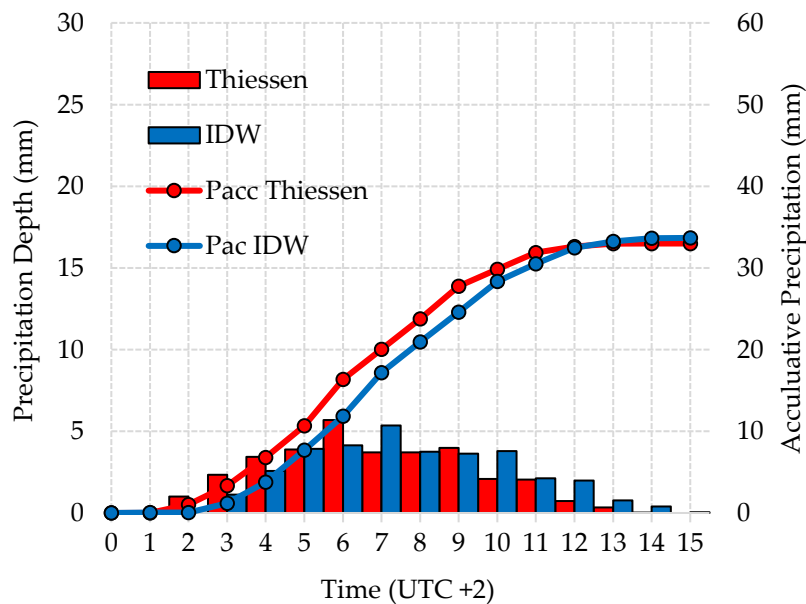


Figure 8: Surface rainfall - Event 1

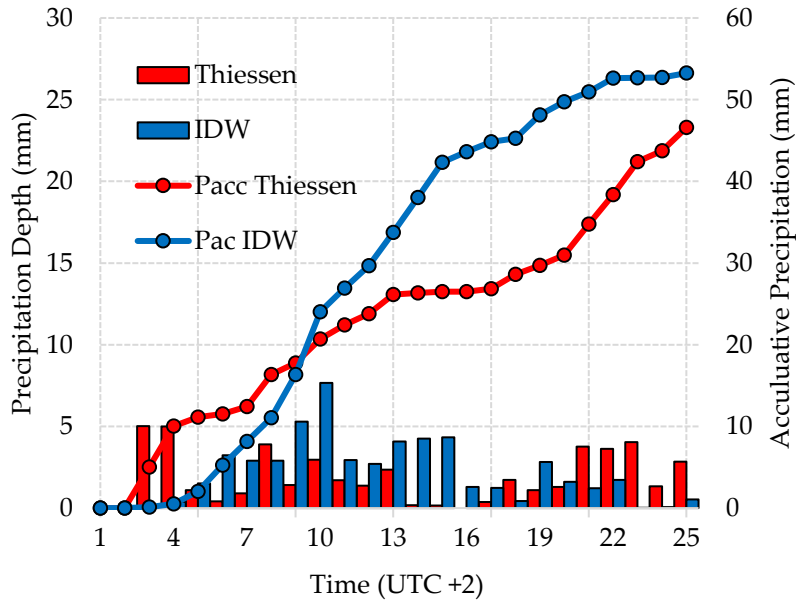


Figure 9: Surface rainfall - Event 2

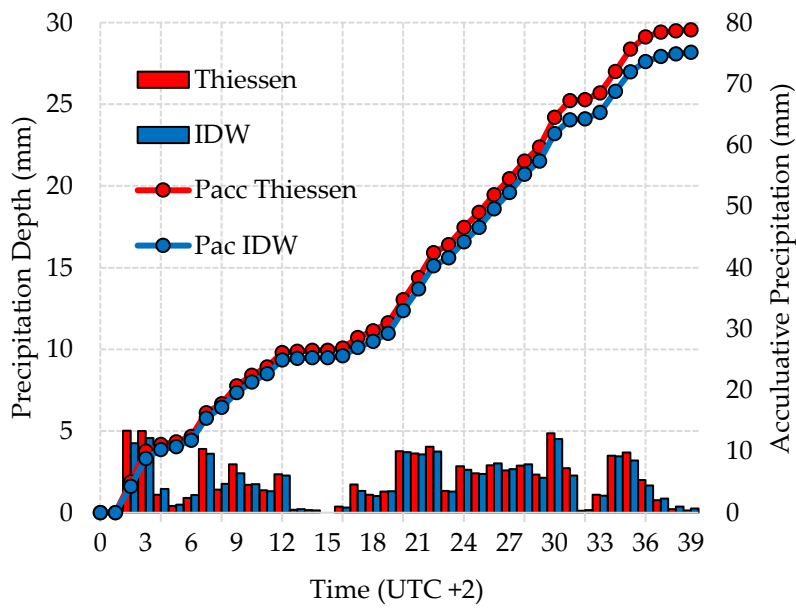


Figure 10: Surface rainfall - Event 3

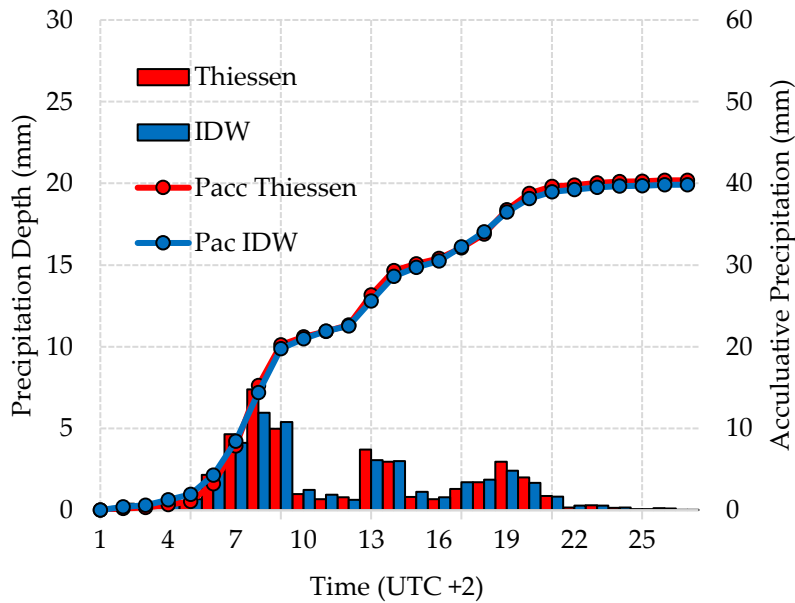


Figure 11: Surface rainfall - Event 4

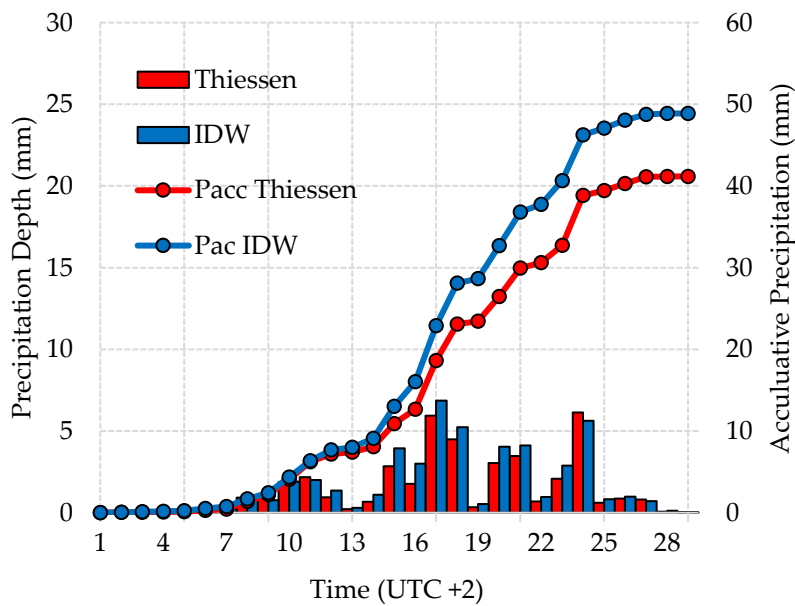


Figure 12: Surface rainfall - Event 5

Finally, the IDW method was selected for the estimation of the areal precipitation within the Karitaina catchment that was followingly used as input in the hydrological modelling procedure.

Hydrological losses were calculated according to the SCS - CN method. The CN grid employed in the fully distributed model was estimated based on the CN tables for mean conditions of soil moisture depending on the soil type. Regarding the two lumped models, the mean value of the gridded CN was considered in a way to represent the whole basin.

The results derived from the simulation of the examined rainfall events by applying the three models described in methodology section, are presented in Figure 13 – Figure 17. In addition, the main characteristics of the resulting flow hydrographs are showed in Table 2 – Table 6.

In 60% of the episodes examined, the fully distributed model approaches the observed peak flow with 90% or grater accuracy, while the corresponding rate applying the isochrones model or the model of UH derived from rainfall – runoff measurements is achieved in 40% and 20% of the episodes selected, respectively.

In regards with the performance of the models in the peak time simulation, the fully distributed model leads to an underestimation of 15% on average in 4 out of 5 episodes and an overestimation of 27% in the episode that occurred on 05/03/2015. The ischrone curve model in 80% of the episodes approaches the observed peak time by more than 92%, while the given UH model by more than 95%. The great adaptation of the given UH model to the observed values is probably justified by the fact that the given UH have been calibrated based on observed data, so it performs better in terms of the peak time simulation.

The flood volume of the simulated flow hydrographs is mostly lower than the observed.

The behavior of the two lumped models shows significant similarities, as can be seen from the results, which was to be expected, as the UH produced using the time – area diagram method was calibrated in order to approach the given UH derived from field observations.

Table 2: Flow hydrograph features - Event 1

Event 1 - 01/03/2013					
Model	Total rainfall (mm)	Losses (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (h)	Volume (hm ³)
Distributed	33.68	30.35	119.69	16	5.05
Isochrones	33.68	26.51	146.32	18	6.24
UH	33.68	26.51	151.51	18	6.27
Observed			125.86	19	7.39

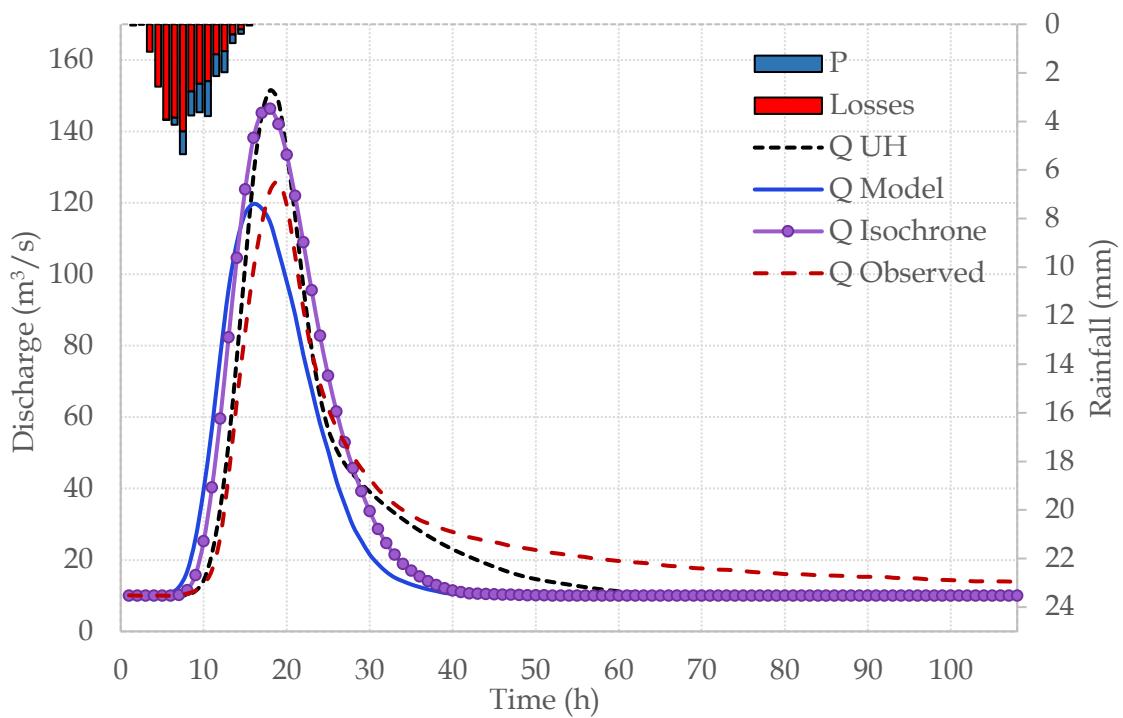


Figure 13: Flow hydrograph of Karitaina position, event 1

Table 3: Flow hydrograph features - Event 2

Event 2 - 01/03/2014					
Model	Total rainfall (mm)	Losses (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (h)	Volume (hm ³)
Distributed	53.25	42.37	245.89	18	13.16
Isochrones	53.25	35.21	288.06	22	15.72
UH	53.25	35.21	268.36	20	15.78
Observed			300.81	21	15.81

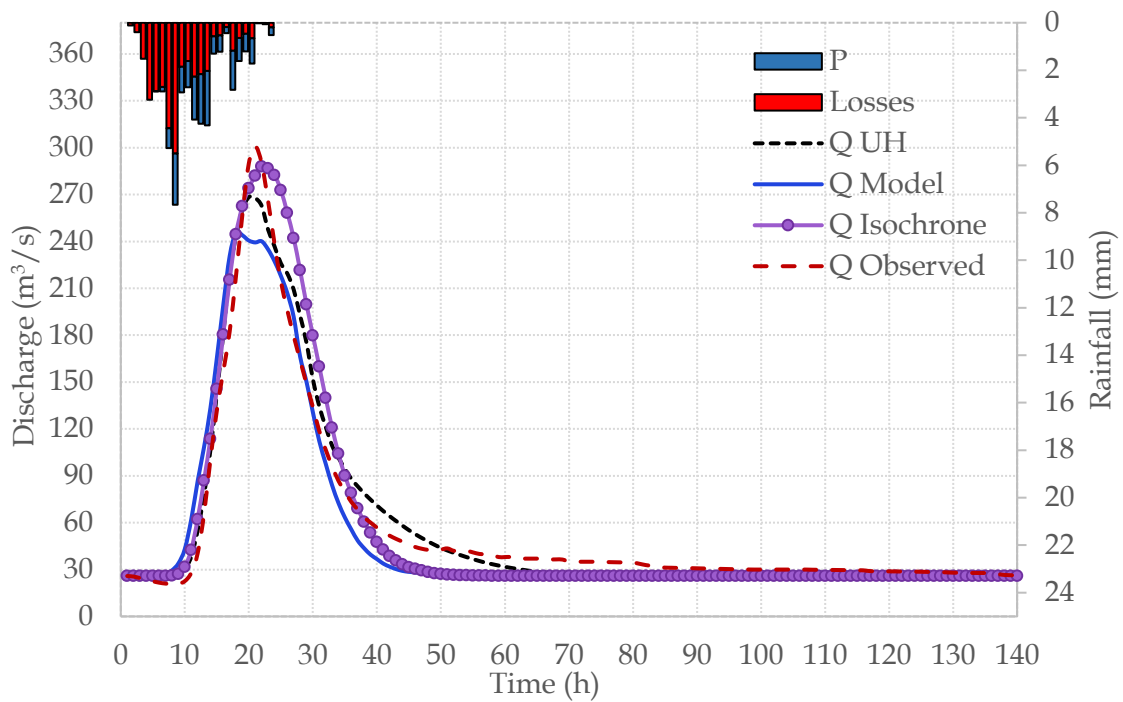


Figure 14: Flow hydrograph of Karitaina position, event 2

Table 4: Flow hydrograph features - Event 3

Event 3 - 23/01/2015					
Model	Total rainfall (mm)	Losses (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (h)	Volume (hm ³)
Distributed	75.12	52.77	180.41	32	10.19
Isochrones	75.12	47.21	335.07	39	24.31
UH	75.12	47.21	296.87	38	24.41
Observed			164.4	39	15.95

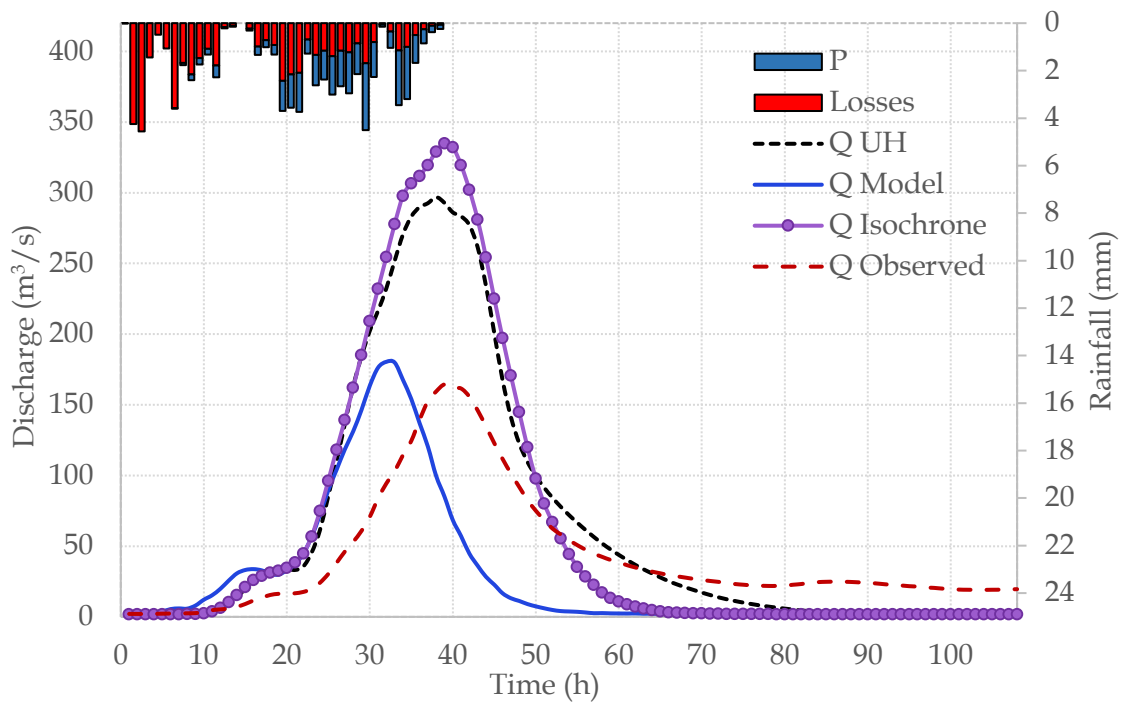


Figure 15: Flow hydrograph of Karitaina position, event 3

Table 5: Flow hydrograph features - Event 4

Event 4 - 26/02/2015					
Model	Total rainfall (mm)	Losses (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (h)	Volume (hm ³)
Distributed	39.83	34.61	110.08	23	4.56
Isochrones	39.83	33.14	133.19	24	5.84
UH	39.83	33.14	125.92	25	5.86
Observed			144.04	26	9.34

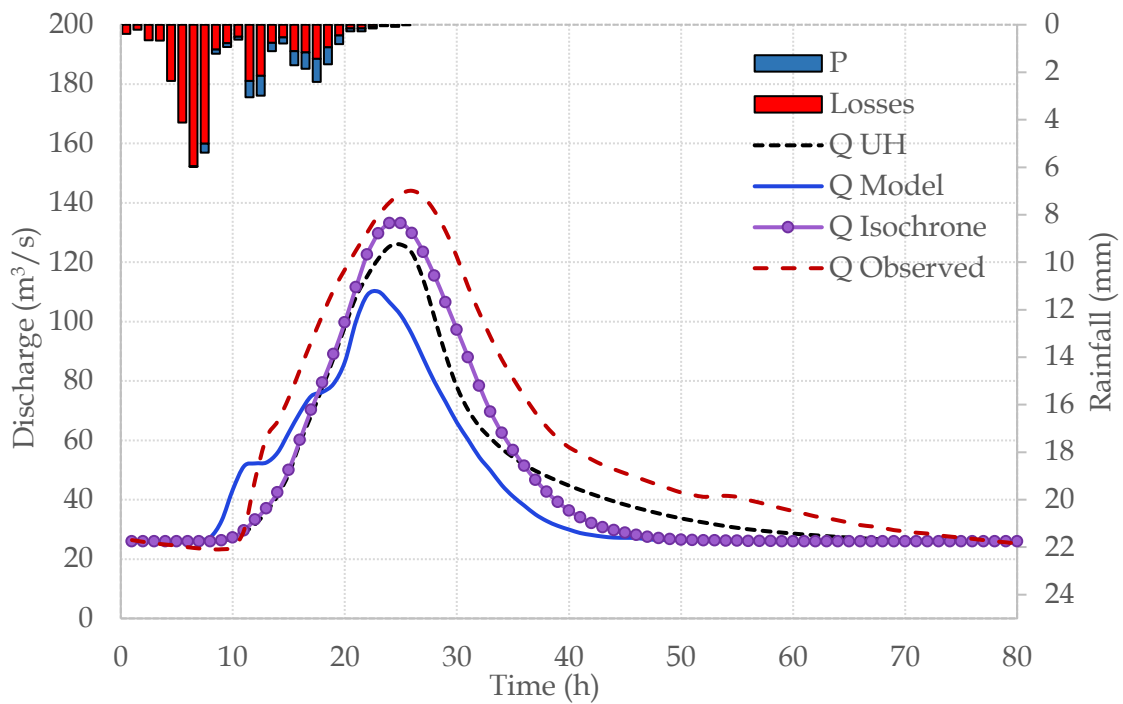


Figure 16: Flow hydrograph of Karitaina position, event 4

Table 6: Flow hydrograph features – Event 5

Event 5 - 05/03/2015					
Model	Total rainfall (mm)	Losses (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Peak time (h)	Volume (hm ³)
Distributed	48.87	40.81	169.52	28	7.05
Isochrones	48.87	37.63	221.63	29	9.79
UH	48.87	37.63	210.29	29	9.75
Observed			166.74	22	11.08

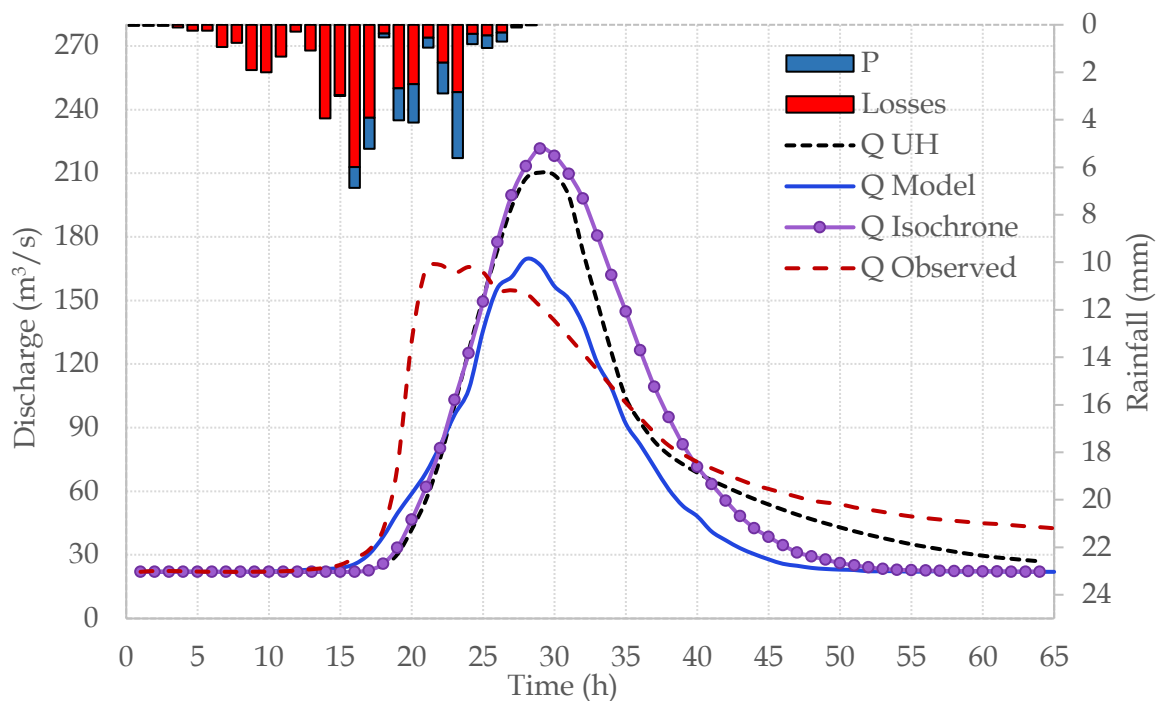


Figure 17: Flow hydrograph of Karitaina position, event 5

Conclusions

The objective of this master thesis was to develop and implement a fully distributed hydrological model for the simulation of historic rainfall – runoff events occurred in Karitaina basin. Alongside, two lumped models were used for the simulation of the same events and a comparison between simulated and observed flow hydrographs was made. The main findings are summarized as follows:

- The spatial discretization of rainfall significantly differentiates the response of the hydrological model used to simulate the rainfall-runoff process.
- Surface precipitation varies depending on the surface integration method applied to the same rainfall episode.

- The accuracy of the results of the methods and models applied in the present work depends on the quality of the available data, as well as the process of adjusting certain parameters to the study area.
- Hydrological losses is a crucial parameter for any rainfall - runoff model that affect the response of the entire catchment, including maximum flow and peak time. The correct allocation of the spatially distributed CN coefficient within the catchment is also significant.
- Regarding the peak discharge, there is a discrepancy between simulated and observed value at a rate of 11.6%, 33% and 30% on average, applying the distributed model, the isochrone model and the UH model, respectively.
- The peak time of the observed flood hydrograph is approached more correctly by a lumped model. The deviation rate for the three models averages 17.4%, 9.9% and 9.7% for the distributed, the isochrone and the UH model, respectively. In the majority of simulations the model deviation concerns an underestimation of the peak runoff time.
- Based on the simulations results, there is an extensive agreement of the ascending part of the curve between the simulated and the observed runoff hydrograph. From the shape of this part the sensitivity of the distributed model to the rainfall variable becomes apparent.

As an overall conclusion, the effect of the spatial discretization of the rainfall on the form of the runoff hydrograph resulting at the outlet of the hydrological basin is highlighted. In addition, the use of accurate data related to geomorphology and soil moisture conditions, as well as the availability of high-precision rainfall and runoff datasets are also key factors regarding the final performance of the hydrological model in terms of representing the natural system. Hence, further investigation should be conducted concerning the appliance of a GIS - based distributed model for forecasting and water resource management purposes.

Selected References

- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp.4-16
- Muzik, I., 1996. A GIS-derived distributed unit hydrograph. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 235, pp.453-460
- Muzik, I., 1996. Flood modelling with GIS- derived distributed unit hydrographs. *Hydrological processes*, 10(10), pp.1401-1409
- Schumann, A., H., 1998. Thiessen Polygon BT-Encyclopedia of Hydrology and Lakes
- SCS, U., 1972. National engineering handbook. Hydrology Section, 4
- Singh, K., P., 1976. Unit hydrographs-A comparative study 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 12(2), pp.381-392
- Singh, V., P., 1992. Elementary Hydrology, Prentice Hall. *New Jersey*
- Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7), pp.1082-1089

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

1.1.1 Υδρολογικά μοντέλα

Στη σύγχρονη εποχή έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα υδρολογικά μοντέλα ανά τον κόσμο που αποσκοπούν στην εκτίμηση της επίδρασης του κλίματος και των συνθηκών εδάφους στην υδρολογία και τους υδατικούς πόρους. Κάθε μοντέλο διαθέτει τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά. Φυσικές παράμετροι όπως η βροχόπτωση, η θερμοκρασία αέρα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η τοπογραφία, η βλάστηση και η υδρογεωλογία αποτελούν ενδεικτικά δεδομένα εισόδου ενός υδρολογικού μοντέλου.

Σύμφωνα με τους Sorooshian et al. (2008), ένα μοντέλο είναι μια απλοποιημένη αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος. Βέλτιστο μοντέλο είναι αυτό που εξασφαλίζει αποτελέσματα κοντά στην πραγματικότητα με τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων και με το μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας. Μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος και την κατανόηση διαφόρων υδρολογικών διεργασιών. Ένα μοντέλο αποτελείται από διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου. Ως μοντέλο απορροής μπορεί να οριστεί ένα σύνολο εξισώσεων που βοηθούν στην εκτίμηση της απορροής ως συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής. Οι δύο σημαντικές εισοδοί που απαιτούνται για όλα τα μοντέλα είναι δεδομένα βροχόπτωσης και αποστράγγισης. Επιπλέον αυτών, χαρακτηριστικά της λεκάνης όπως ιδιότητες εδάφους, κάλυψη βλάστησης, τοπογραφία λεκάνης απορροής, περιεχόμενο υγρασίας εδάφους, χαρακτηριστικά του υπόγειου υδροφορέα λαμβάνονται επίσης υπόψη. Τα υδρολογικά μοντέλα θεωρούνται σήμερα ένα σημαντικό και απαραίτητο εργαλείο για τη διαχείριση υδατικών πόρων και περιβάλλοντος (Devi et al., 2015).

1.1.2 Τύποι μοντέλων

Τα μοντέλα βροχής - απορροής ταξινομούνται με βάση τα δεδομένα εισόδου και τις παραμέτρους του μοντέλου, καθώς και την έκταση των φυσικών αρχών που εφαρμόζονται σε αυτό. Μπορούν να ταξινομηθούν σε ενιαία και κατανεμημένα μοντέλα με κριτήριο το αν οι παράμετροι που χρησιμοποιούν αποτελούν συνάρτηση του χώρου και του χρόνου, αντίστοιχα, και σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά μοντέλα με βάση άλλα κριτήρια. Το ντετερμινιστικό μοντέλο θα δώσει την ίδια έξοδο για μοναδικό σύνολο δεδομένων εισόδου, ενώ στα στοχαστικά μοντέλα, διαφορετικά

αποτελέσματα μπορούν να παραχθούν για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων εισόδου. Σύμφωνα με τους Moradkhani και Sorooshian (2008) στα ενιαία μοντέλα, ολόκληρη η λεκάνη απορροής του ποταμού θεωρείται ενιαία μονάδα όπου η χωρική μεταβλητότητα αγνοείται και ως εκ τούτου οι έξοδοι δημιουργούνται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι χωρικές διεργασίες. Αντίθετα, ένα καταναμημένο μοντέλο μπορεί να κάνει προβλέψεις καταναμημένες στο χώρο διαιρώντας ολόκληρη την λεκάνη απορροής σε μικρές μονάδες, συνήθως τετραγωνικά κελιά ή τριγωνικά ακανόνιστο πλέγμα, έτσι ώστε οι παράμετροι, οι εισοδοί και οι έξοδοι να μπορούν να διαφέρουν χωρικά (Devi et al., 2015). Μια ειδική κατηγορία καταναμημένων μοντέλων αποτελούν τα ημι-καταναμημένα μοντέλα. Η ανάπτυξη των ημι-καταναμημένων μοντέλων βασίζεται στη διαίρεση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες χρησιμοποιώντας απλές ή πιο εξελιγμένες μεθόδους, καθεμία από τις οποίες διαθέτει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά και ένα μοναδικό σημείο εκφόρτισης που μπορεί να είναι είτε ένας κόμβος είτε μια άλλη υπολεκάνη. Κάθε υπολεκάνη απορροής έχει το δικό της φυσικό και υδρολογικό καθεστώς, το οποίο διαμορφώνουν στοιχεία όπως η θέση, η έκταση, η κλίση, η αδιαπερατότητα και λοιπά χαρακτηριστικά εδάφους και δημιουργεί απορροή από δεδομένα εισόδου χωρικά ομοιόμορφης βροχόπτωσης (Beven 2012). Στα οφέλη ενός ημι-καταναμημένου μοντέλου συγκαταλέγεται ο μικρός υπολογιστικός χρόνος και η ικανότητα χρήσης λιγότερων δεδομένων και λιγότερων παραμέτρων από ένα καταναμημένο μοντέλο (Pechlivanidis et al., 2011). Ένα μειονέκτημα είναι ο χειρισμός των δεδομένων εισόδου. Για παράδειγμα, τα χωρικά καταναμημένα δεδομένα βροχόπτωσης πρέπει να υπολογίζονται κατά μέσο όρο εντός της υποζώνης ή τα δεδομένα βροχομετρικού σταθμού σε συγκεκριμένες τοποθεσίες πρέπει να διανέμονται στην περιοχή χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Thiessen Polygon.

Μια άλλη ταξινόμηση είναι στατικά και δυναμικά μοντέλα με βάση τον παράγοντα του χρόνου. Το στατικό μοντέλο αποκλείει το χρόνο, ενώ το δυναμικό μοντέλο τον περιλαμβάνει. Οι Sorooshian et al. (2008) είχαν ταξινομήσει τα μοντέλα σε αυτά που περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (event-based models) και αυτά που προσομοιώνουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα, όπως η λεκάνη απορροής (continuous models). Τα πρώτα παράγουν έξοδο μόνο για συγκεκριμένα χρονικές περιόδους, ενώ τα τελευταία παράγουν αποτελέσματα σε συνεχή χρόνο. Το TOPMODEL είναι ένα ημι-καταναμημένο εννοιολογικό μοντέλο που χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους για την υποδιαίρεση της λεκάνης απορροής. Ωστόσο, μοντέλα όπως το SWAT

χρησιμοποιούν υδραυλικές μονάδες απόκρισης για να διαιρέσουν περαιτέρω μια λεκάνη απορροής (Sitterson , 2017).

Μία από τις πιο σημαντικές κατηγοριοποιήσεις μοντέλων είναι τα εμπειρικά, τα εννοιολογικά και τα μοντέλα φυσικής βάσης (Chow et al. 2005, Nyeko 2014). Τα εμπειρικά είναι μοντέλα προσανατολισμένα στην παρατήρηση, τα οποία λαμβάνουν μόνο τις πληροφορίες από τα υπάρχοντα δεδομένα μη λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες του υδρολογικού συστήματος και ως εκ τούτου τα μοντέλα αυτά καλούνται επίσης data - driven μοντέλα. Περιλαμβάνουν μαθηματικές εξισώσεις που προέρχονται από παράλληλες χρονοσειρές εισόδου και εξόδου και όχι από τις φυσικές διεργασίες της λεκάνης απορροής. Αυτά τα μοντέλα ισχύουν μόνο εντός των ορίων της λεκάνης. Το μοναδιαίο υδρογράφημα ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. Μέθοδοι βασισμένες στις αρχές της στατιστικής χρησιμοποιούν μοντέλα παλινδρόμησης και συσχέτισης και αξιοποιούνται για την εύρεση της συνάρτησιακής σχέσης μεταξύ εισόδων και εξόδων. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural network) και η παλινδρόμηση με ασαφή μοντέλα (fuzzy regression) είναι μερικές τεχνικές μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται σε μεθόδους υδροπληροφορικής.

Τα εννοιολογικά ή αλλιώς παραμετρικά μοντέλα, περιγράφουν όλες τις συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Αποτελούνται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων δεξαμενών που αντιπροσωπεύουν τα φυσικά στοιχεία σε μια λεκάνη απορροής στην οποία επαναφορτίζονται από βροχοπτώσεις και διήθηση και εκκενώνονται με εξάτμιση, απορροή και αποστράγγιση. Στη συγκεκριμένη κατηγορία μοντέλων χρησιμοποιούνται ημι-εμπειρικές εξισώσεις και οι παράμετροι του μοντέλου αξιολογούνται όχι μόνο από δεδομένα πεδίου αλλά και μέσω βαθμονόμησης, για την οποία απαιτείται μεγάλος όγκος ιστορικών μετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων. Πολλά εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας. Το Stanford Watershed Model IV (SWM) είναι το πρώτο μεγάλο εννοιολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Crawford και Linsley το 1966 με 16 έως 20 παραμέτρους, ενώ ευρέως διαδεδομένο είναι και το εννοιολογικό μοντέλο Soil Moisture Accounting Portion (SAC-SMA).

Τα μοντέλα φυσικής βάσης αποτελούν μια μαθηματικά εξιδανικευμένη αναπαράσταση του πραγματικού φαινομένου. Ονομάζονται επίσης μηχανιστικά μοντέλα τα οποία ενσωματώνουν τις αρχές των φυσικών διεργασιών και χρησιμοποιούν μεταβλητές κατάστασης που είναι μετρήσιμες και είναι συναρτήσεις τόσο του χρόνου όσο και του χώρου. Οι υδρολογικές διεργασίες της κίνησης του νερού

σε αυτού του είδους τα μοντέλα αντιπροσωπεύονται από εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών (Devi et al., 2015). Δεν απαιτούν εκτεταμένα υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα για τη βαθμονόμησή τους, καθώς είναι τα μοναδικά που δε βασίζονται σε μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, για την προσαρμογή των παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται κατάλληλα για την εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις (ungauged watersheds), κάτι που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των υδρολογικών επιστημών τα τελευταία έτη (Λουκάς, 2017). Ωστόσο, για την αξιολόγησή τους απαιτείται μεγάλος αριθμός παραμέτρων που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, το αρχικό βάθος νερού, η τοπογραφία, η τοπολογία και οι διαστάσεις του ποταμού (Abbott et al. 1986 a). Το μοντέλο φυσικής βάσης μπορεί να ξεπεράσει ορισμένες αδυναμίες των άλλων δύο μοντέλων λόγω της χρήσης παραμέτρων που έχουν φυσική ερμηνεία. Επιπλέον, μπορεί να παρέχει πολλές πληροφορίες έξω από το όριο και μπορεί να εφαρμοστεί για ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων. Το μοντέλο SHE / MIKE SHE ανήκει σε αυτήν την κατηγορία (Abbott et al. 1986 a, b). Συνήθως, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες έρευνες, όπως η εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλίμα, τη φυτοκάλυψη ή τις χρήσεις γης, ενώ συχνά συνδυάζονται με υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων στο νερό και το έδαφος, καθώς και μοντέλα μεταφοράς φερτών. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την πρόγνωση και προσομοίωση της απορροής, είναι υπολογιστικά ασύμφορη και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προγνώσεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα (Λουκάς, 2017).

1.1.3 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις κατανεμημένων μοντέλων

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η ανάπτυξη και χρήση κατανεμημένων υδρολογικών μοντέλων με ποικίλους βαθμούς πολυπλοκότητας για την αντιμετώπιση ενός ευρέος φάσματος επιστημονικών ερωτημάτων (Kampf and Burges, 2007; Smith and Gupta, 2012). Τα πλεονεκτήματα των κατανεμημένων μοντέλων επεκτείνονται πέρα από τη δυνατότητα καλύτερης προσομοίωσης της ροής στην εξόδο της λεκάνης και προσομοίωσης της ροής σε θέσεις εντός αυτής. Για παράδειγμα, τα κατανεμημένα μοντέλα μπορούν να αποτελέσουν το θεμέλιο περιβαλλοντικών μοντέλων συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προσομοιώνουν την ποιότητα του νερού, τη μεταφορά ιζημάτων, την αποκατάσταση υγροτόπων ή την

ανάπτυξη φυτών και τη βελτίωση των πρακτικών άρδευσης. Αυτά τα περιβαλλοντικά μοντέλα παρέχουν πληροφορίες καθοριστικές για τη λήψη αποφάσεων στη διαχείριση υδατικών πόρων. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα με τα οποία συνδέεται, η ανάπτυξη κατανεμημένων μοντέλων συνοδεύεται ταυτόχρονα από ποκίλες προκλήσεις. Η επιλογή της πλέον κατάλληλης χωρικής και χρονικής ανάλυσης στην οποία θα γίνει η κατανεμημένη υδρολογική μοντελοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα δεδομένων και ταυτόχρονα την πρόκληση της ελάχιστης δυνατής παραβίασης των φυσικών/εννοιολογικών παραδοχών του μοντέλου είναι μία απο αυτές. Επιπλέον, η ελλιπής διαθεσιμότητα δεδομένων εισόδου με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση είναι ακόμη ένα ζήτημα προς διερεύνηση στην ανάπτυξη και εφαρμογή κατανεμημένων μοντέλων. Για παράδειγμα, δεν έχει διευκρινιστεί η σημασία της εφαρμογής κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου ανάλυσης 10 m όταν τα δεδομένα βροχόπτωσης που εισάγονται σε αυτό αντιστοιχούν στη μέση βροχόπτωση. Όπως έχει αποδειχθεί, κάθε μοντέλο παρουσιάζει ατέλειες και αδυναμίες. Επομένως, οι παράμετροι οποιουδήποτε μοντέλου επιδέχονται διόρθωση προκειμένου να παραχθούν βελτιωμένα αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, το ερώτημα πώς εκτιμώνται ή ακόμη βαθμονομούνται οι πυλυαρίθμες σε πολλές περιπτώσεις παράμετροι ενός κατανεμημένου μοντέλου, παραμένει. Τέλος, σε πολλές λεκάνες δεν υπάρχουν επαρκή διαθέσιμα δεδομένα για την αξιολόγηση της απόδοσης της κατανεμημένης μοντελοποίησης.

Τα αποτελέσματα του Distributed Model Intercomparison Project (DMIP) (Reed et al., 2004) έδειξαν ότι σε ορισμένες λεκάνες, τα κατανεμημένα μοντέλα δεν αποδίδουν σε κάθε περίπτωση καλύτερα συγκριτικά με τα συγκεντρβτικά μοντέλα (lumped models) όσον αφορά στην προσομοίωση της ροής στην έξοδο λεκάνης απορροής. Η αντικειμενική αξιολόγηση της ικανότητας των κατανεμημένων μοντέλων να δίνουν προβλέψεις για διαφορετικά σενάρια απαιτεί ένα σύνολο δεδομένων που περιέχουν κατανεμημένη πληροφορία σχετικά με την εδαφική υγρασία, την κατάσταση των υπογείων υδάτων και τη ροή σε εσωτερικά σημεία της υδρολογικής λεκάνης. Ισως, όπως πρότεινε ο Refsgaard (1996), μόνο η χρήση αυτού του σετ δεδομένων είναι ικανή να επιβεβαιώσει την αξιοπιστία του κατανεμημένου μοντέλου. Επιπλέον των δεδομένων επαλήθευσης απαιτούνται μέθοδοι προσδιορισμού και αξιολόγησης των κατανεμημένων παραμέτρων (Moreda et al., 2006).

1.2 Αντικείμενο Εργασίας

Οι εγγενείς περιορισμοί που συνδέονται με τις τεχνικές διεξαγωγής υδρομετρήσεων και σχετίζονται με την πληρότητα των παραγόμενων δεδομένων τόσο σε χωρική όσο και χρονική κλίμακα, καθιστούν την ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων βροχής - απορροής αναγκαία. Η παραπάνω μοντελοποίηση αποτελεί ένα μέσο προεκβολής των των διαθέσιμων δεδομένων στο χώρο και στο χρόνο, ιδιαίτερα σε λεκάνες απορροής όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης ποικίλων παραγόντων και αλλαγών πάνω σε αυτήν. Απώτερος στόχος της πρόβλεψης μέσω μοντέλων είναι η παροχή στοιχείων που θα συνεισφέρουν σε ορθότερες αποφάσεις στους τομείς υδρολογικού σχεδιασμού, προστασίας από πλημμύρες, μείωσης της ρύπανσης και γενικότερα διαχείρισης και διασφάλισης των υδατικών πόρων.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός πλήρως καταναμημένου μοντέλου βροχής - απορροής για την προσομοίωση ιστορικών επεισοδίων βροχής. Η ανάλυση διενεργείται στη λεκάνη απορροής της Καρύταινας στη δυτική Πελοπόννησο, η οποία αποτελεί υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Αλφειού Ποταμού. Μέσω του μοντέλου υπολογίζεται η απορροή σε κάθε εικονοστοιχείο του DEM, η οποία στη συνέχεια διοδεύεται στην έξοδο της λεκάνης. Η υδρολογική ανάλυση βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης τα οποία ακολούθως ανάγονται χωρικά και χρονικά σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης με χρονικό βήμα μίας ώρας. Η επίδοση του μοντέλου όσον αφορά στην προσομοίωση της απόκρισης της λεκάνης σε συγκεκριμένα επεισόδια βροχής εκτιμάται συγκριτικά με δύο συγκεντρωτικά μοντέλα, καθώς και με παρατηρήσεις πεδίου.

Στα πρωτότυπα σημεία της εργασίας συγκαταλέγεται η αξιοποίηση και ανάλυση ιστορικών επεισοδίων βροχής καταναμημένης χωρικής κλίμακας με χρήση τεχνικών GIS. Η επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων και ο υπολογισμός της απορροής διεξάγεται πλέον σε επίπεδο εικοστοιχείου και όχι σε επίπεδο λεκάνης, όπως συνηθίζεται σε μοντέλα προσομοίωσης των διεργασιών βροχής - απορροής. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας δύναται να αξιοποιηθούν περαιτέρω για την προσαρμογή και εφαρμογή του μοντέλου σε περιοχές όπου δεν υπάρχει διαθεσιμότητα ιστορικών παρατηρήσεων παροχής.

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Το **πρώτο** κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στα μαθηματικά μοντέλα γενικά και στα υδρολογικά μοντέλα ειδικότερα, τους διάφορους τύπους, τα πλεονεκτήματα και τις

αδυναμίες ορισμένων εξ αυτών. Παράλληλα, γίνεται αναφορά σε ευρέως διαδεδομένα μοντέλα στην προσομοίωση των διεργασιών βροχής - απορροής, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου διατυπώνεται το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωση αυτής.

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

Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς το μεθοδολογικό πλαίσιο της ανάπτυξης και εφαρμογής του κατανεμημένου μοντέλου βροχής - απορροής που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας έρευνας αλλά και των δύο συγκεντρωτικών μοντέλων. Αρχικά, παρουσιάζεται η δομή του κάθε μοντέλου και οριοθετείται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων στις οποίες θεμελιώνεται. Ακολούθως, παρουσιάζονται και αναλύονται οι συνιστώσες του μοντέλου και οι παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή του. Τέλος, εκτελούνται προσομοιώσεις για επιλεγμένα ιστορικά επεισόδια βροχόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με ταυτόχρονη επεξήγησή τους και σύντομο σχολιασμό. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κατανεμημένου μοντέλου βροχής - απορροής σε αντιπαραβολή με τα αντίστοιχα δύο ενιαίων μοντέλων και τα παρατηρημένα.

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

2 Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα

2.1 Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Αλφειού ποταμού στο βορειοδυτικό τμήμα της Πελοποννήσου. Οι έντονες βροχοπτώσεις και τα σημαντικά προβλήματα που προκαλούνται συχνά στην περιοχή λόγω πλημμυρικών επεισοδίων συνηγορούν στην επιλογή της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής ως υπό εξέταση περιοχή.

2.1.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

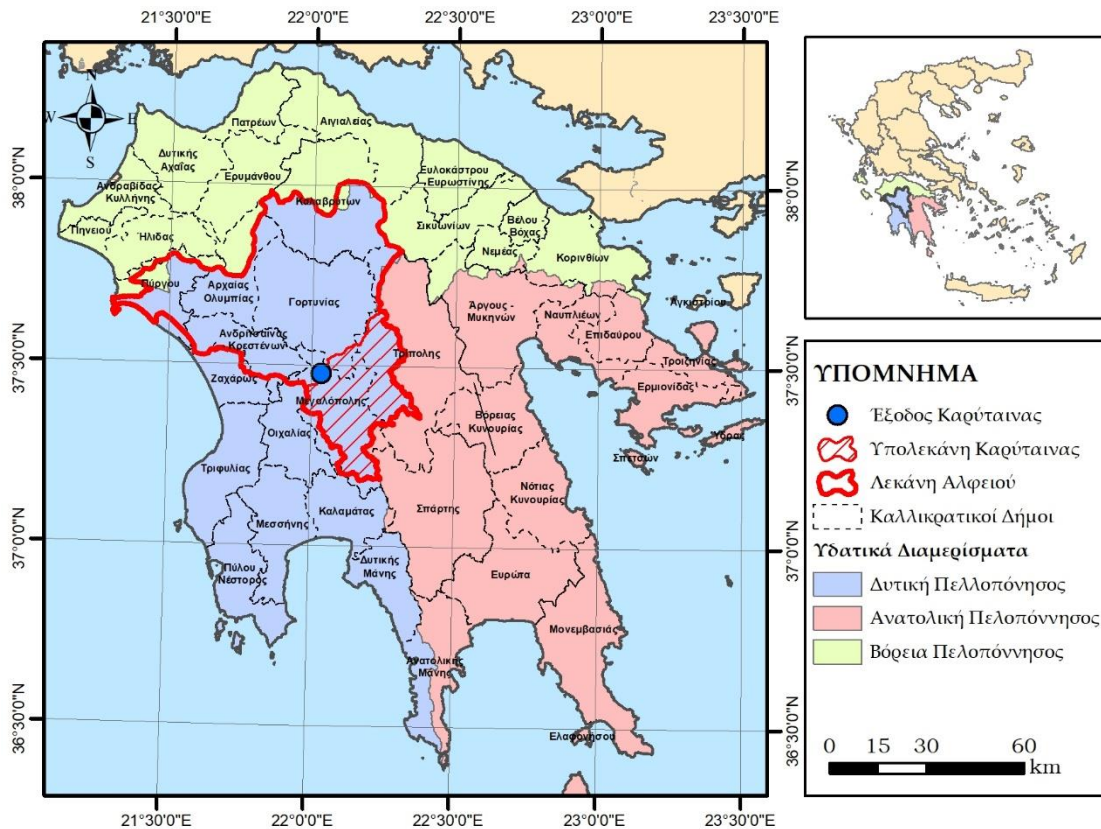
Η λεκάνη απορροής τοποθετείται γεωγραφικά στο βορειοδυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος της Πελοποννήσου και αποτελεί υπολεκάνη του Αλφειού ποταμού (Σχήμα 2.1). Η έξοδος της λεκάνης βρίσκεται στη θέση Καρύταινα. Εκτείνεται μεταξύ γεωγραφικού μήκους 22°39'E - 22°70'E και γεωγραφικού πλάτους 37°66'N - 37°19'N. Η έκταση που καλύπτει είναι ίση με 871 km², ενώ το μήκος του ποταμού είναι 53 km.

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

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

Έκταση Λεκάνης (km ²)	Μέσο Υψόμετρο (m)	Μέγιστο Υψόμετρο (m)	Ελάχιστο Υψόμετρο (m)	Μέση Κλίση (°)
871.22	761.85	1877.90	272.55	15.28

Η ΛΑΠ της Καρύταινας, περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του Δήμου Μεγαλόπολης, και τμήματα των Δήμων Τρίπολης και Γορτυνίας. Η γεωγραφική θέση και τα όρια της περιοχής μελέτης σε σχέση με τους όμορους Καλλικρατικούς Δήμους παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.

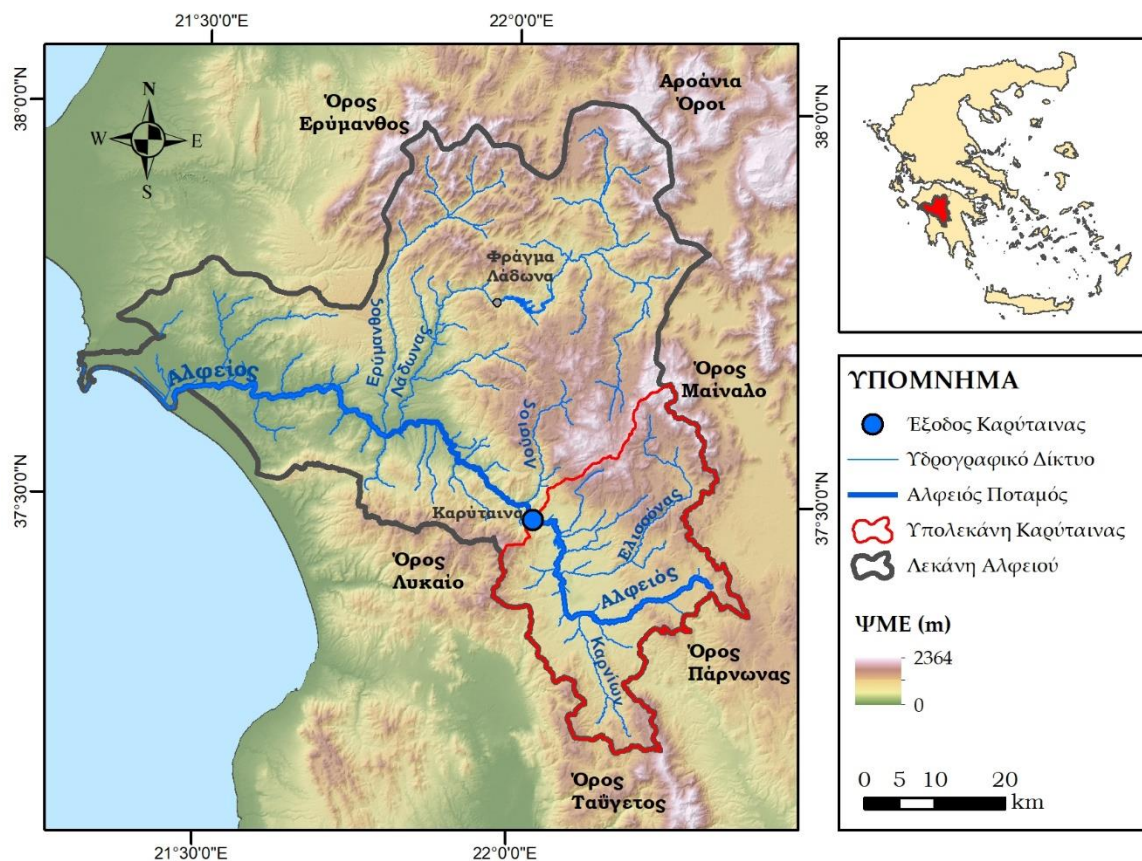


Σχήμα 2.1: Περιοχή μελέτης, όμοροι Καλλικρατικοί Δήμοι και Υδατικά Διαμερίσματα

Το Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ) Δυτικής Πελοποννήσου εκτείνεται γεωγραφικά στη δυτική και νοτιοδυτική Πελοπόννησο και από διοικητικής άποψης περιλαμβάνει εξ ολοκλήρου ή εν μέρει τις Περιφερειακές Ενότητες Αρκαδίας, Ηλείας, Αχαΐας, Μεσσηνίας και Λακωνίας. (Σχήμα 2.1). Η συνολική έκταση του διαμερίσματος είναι 7234 km² και ο πληθυσμός του, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ του 2001, ανέρχεται σε 331180 κατοίκους.

2.1.2 Γεωμορφολογία περιοχής

Το ΥΔ 01 στο οποίο εντάσσεται η περιοχή μελέτης οριοθετείται βόρεια από τους ορεινούς όγκους Ερυμάνθου και Αροανίων, ανατολικά από το Μαίναλο και τον Ταΰγετο, νότια από το Μεσσηνιακό Κόλπο και δυτικά από το Ιόνιο Πέλαγος και τον Κυπαρισσιακό Κόλπο (Σχήμα 2.2). Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο του ΥΔ είναι ορεινό στο ανατολικό και στο εσωτερικό του τμήμα με υψόμετρα από 600 έως 2400 m, λοφώδες και ημιορεινό στην περίμετρο του (100 – 600 m) και πεδινό στις παραλιακές ζώνες και στις κοιλάδες των ποταμών. Οι πεδινές εκτάσεις είναι περίπου το 13% της έκτασης του ΥΔ και έχουν αναπτυχθεί στον κάμπο του Αλφειού, στην παραλιακή ζώνη Πύργου – Πύλου, στον κάμπο της Μεσσηνίας και στο υψίπεδο της Μεγαλόπολης.



Σχήμα 2.2: Γεωμορφολογική άποψη περιοχής μελέτης

Το εν λόγω ΥΔ συγκροτείται από τις υδρολογικές λεκάνες του Ποταμού Αλφειού και Πάμισου – Νέδοντος – Νέδα, με επιφάνειες 3810 km² και 3425 km², αντίστοιχα. Η ΛΑΠ Αλφειού περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη του Αλφειού έκτασης 3568 km² και δύο παράκτιες λεκάνες χωρίς σημαντικούς ποταμούς, τη λεκάνη που βρίσκεται η λιμνοθάλασσα Καϊάφα (165.8 km²) και βόρεια αυτής τη λεκάνη της αποξηραμένης λίμνης Αγουλινίτσας (756 km²) (ΕΓΥ, 2013).

Ειδικότερα, η ΛΑΠ Αλφειού, η οποία περικλείει τη λεκάνη της Καρύταινας, περιλαμβάνει τμήματα των Περιφερειών Πελοποννήσου και Δυτικής Ελλάδας με ποσοστά έκτασης 53.7% και 46.3% αντίστοιχα. Ο Αλφειός είναι ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Ελλάδας με μήκος περίπου 127 km. Σημαντικοί παραπόταμοι του Αλφειού είναι οι Λάδωνας, Ευρύμανθος, Σελινόντας, Λεστενίτσας, Λούσιος. Ο ποταμός Αλφειός πηγάζει από την ορεινή Αρκαδία και ακολουθώντας πορεία δυτική – βόρειο δυτική εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος στον Κυπαρισσιακό κόλπο. Χαρακτηριστική στην περιοχή είναι η τεχνητή λίμνη Λάδωνα έκτασης 3,048 km² που δημιουργήθηκε έπειτα από κατασκευή φράγματος στον ποταμό Λάδωνα.

2.1.3 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Γενικά η Πελοπόννησος διαθέτει μεσογειακό κλίμα, το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με την περιοχή και το υψόμετρό της. Είναι ήπιο και ζεστό στα παράλια και κρύο στο εσωτερικό. Το κλίμα των ορεινών περιοχών είναι υγρό κατά τη διάρκεια του χειμώνα και σχετικά ξηρό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το μέσο ετήσιο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΥΔ της Δυτικής Πελοποννήσου φτάνει τα 900 mm, με μία χαρακτηριστική αύξηση κατά την περίοδο μεταξύ Νοεμβρίου - Φεβρουαρίου (υπερβαίνει τα 100 mm ανά μήνα). Το καλοκαίρι, το κλίμα είναι ξηρό, με το ύψος των βροχοπτώσεων να μην ξεπερνά τα 20 - 40 mm μηνιαίως.

Πιο συγκεκριμένα, τα κατακρημνίσματα στην περιοχή της ΛΑΠ Αλφειού είναι αρκετά σημαντικά και φτάνουν περίπου τα 1058 mm ετησίως. Στις ορεινές περιοχές της Αρκαδίας το ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 1000 mm και 1200 mm, ενώ στο κεντρικό τμήμα της ΛΑΠ και στα παράλια φτάνει τα 1000 mm. Οι βροχές είναι μικρότερες προς τα ανατολικά και σημαντικότερες στις περιοχές μεγαλύτερου υψομέτρου, λόγω της σαφούς συσχέτισης που παρατηρείται μεταξύ της βροχόπτωσης και του υψομέτρου. Τα ανωτέρω μέσα ετήσια κατακρημνίσματα αντιστοιχούν κατά προσέγγιση σε έναν όγκο 8112 hm³ νερού ανά έτος, το οποίο τροφοδοτεί τον υδρολογικό κύκλο της λεκάνης. Έντονες βροχοπτώσεις σημειώνονται κατά τους μήνες Οκτώβριο ως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο.

Σύμφωνα με σταθμούς της ΛΑΠ Αλφειού, η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται από 3 έως 26 °C με τις χαμηλότερες και μέσες θερμοκρασίες να σημειώνονται την περίοδο από Οκτώβριο έως Μάιο και τις υψηλότερες τιμές τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο.

2.1.4 Ιστορικό Πλημμυρών

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από σημαντικό ιστορικό πλημμυρικών επεισοδίων. Στις κυριότερες πλημμύρες συγκαταλέγονται και αυτές που σημειώθηκαν στις 1/1/2003 επηρεάζοντας τις περιοχές της Μεγαλόπολης, του Ραψοματίου, του Καμποχωρίου, της Καμάρας και των Πανναιών και στις 17/11/2007 προκαλώντας προβλήματα στις περιοχές της Καρύταινας, του Αλφειού, του Λεονταρίου, της Ποταμιάς και της Τουρκολέκας. Σύμφωνα με το πιο πρόσφατο ιστορικό της περιοχής, οι ισχυρότερες καταιγίδες της τελευταίας δεκαετίας που συνδέονται με φαινόμενα πλημμύρας του ποταμού Αλφειού σημειώθηκαν στις:

- 05/02/2012
- 30/12/2012
- 16/01/2013
- 01/03/2013
- 23/11/2013
- 24/01/2014
- 01/03/2014
- 23/01/2015
- 26/02/2015
- 05/03/2015
- 26/03/2015
- 12/01/2019

Τα παραπάνω επεισόδια προκάλεσαν ποικίλες καταστροφές σε αγροκίες, καλλιέργειες και αντιπλημμυρικά έργα, όπως υποστηρικτικά αναχώματα για την αποφυγή της διείσδυσης του νερού σε κατοικημένες περιοχές. Η πλειονότητα των πρόσφατων πλημμυρικών επεισοδίων εμφανίζεται στη γεωργική περιοχή, όπου τα δύο κύρια υδατορεύματα συνδέουν το ορεινό βορειοανατολικό και νότιο τμήμα της λεκάνης.

2.2 Δεδομένα

2.2.1 Γεωχωρικά Δεδομένα

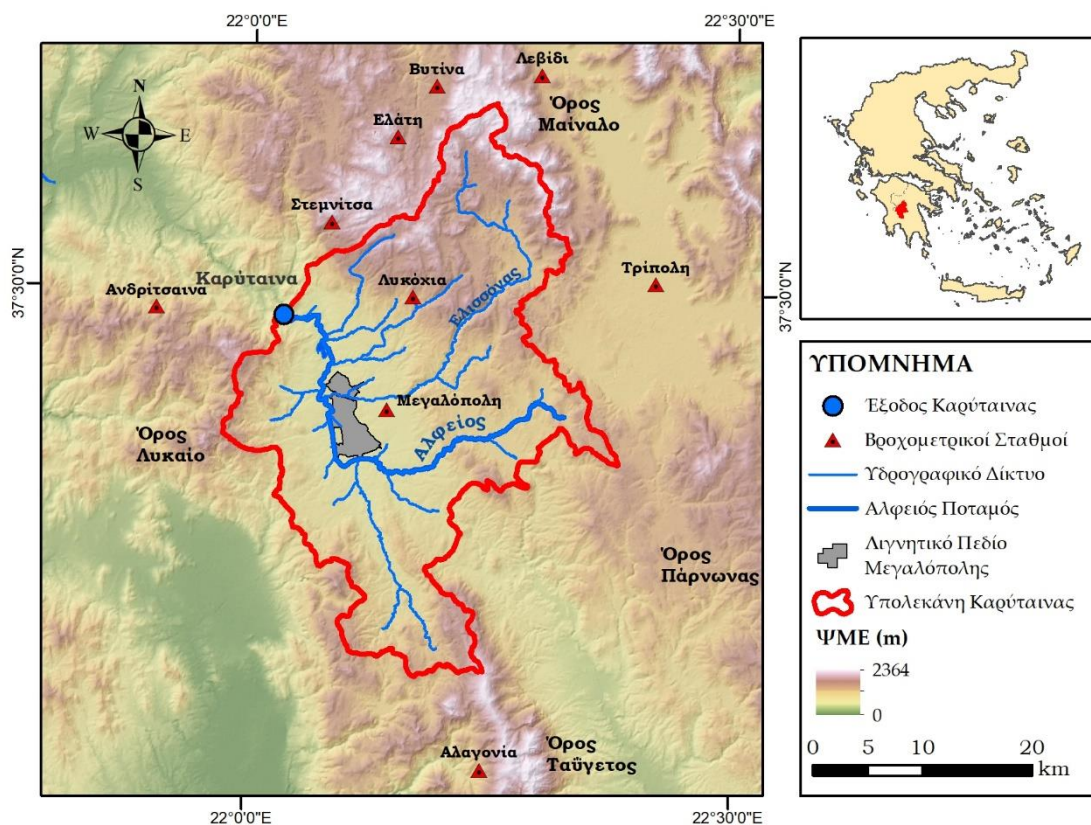
Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση και δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές σε περιβάλλον GIS παρουσιάζονται παρακάτω:

Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) χορηγήθηκε από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδος (Ο.Κ.Χ.Ε.) σε αρχείο raster με μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος 5.00 m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600 m × 3600 m, με περιμετρική επικάλυψη 300 m, και ακολουθούν τη διανομή ΕΓΣΑ87 κλίμακας 1:5000. Ο τύπος των αρχείων είναι img. Η γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος είναι $RMSE_z \leq 2.00$ m και η απόλυτη ακρίβεια ≤ 3.92 m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Μετά την εισαγωγή του DEM στο πρόγραμμα ArcGIS, γίνεται προσαρμογή του στα όρια της περιοχής μελέτης και κατάλληλη διόρθωση, οπότε προκύπτει ο χάρτης υψομέτρων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.

Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο προέκυψε με βάση το DEM, έπειτα από υδρολογική ανάλυση και διόρθωση με χρήση υποβάθρου δορυφορικών εικόνων. Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής χαρακτηρίζεται από πολυσχιδές υδρογραφικό δίκτυο με κύριο ποταμό που τη διασχίζει τον Αλφειό, ο οποίος πηγάζει από τον Ταύγετο, ενώ ο αμέσως μικρότερος ποταμός Ελισσώνας πηγάζει από το όρος Μαίναλο και συμβάλλει στον Αλφειό στην περιοχή του οικισμού της Μεγαλόπολης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

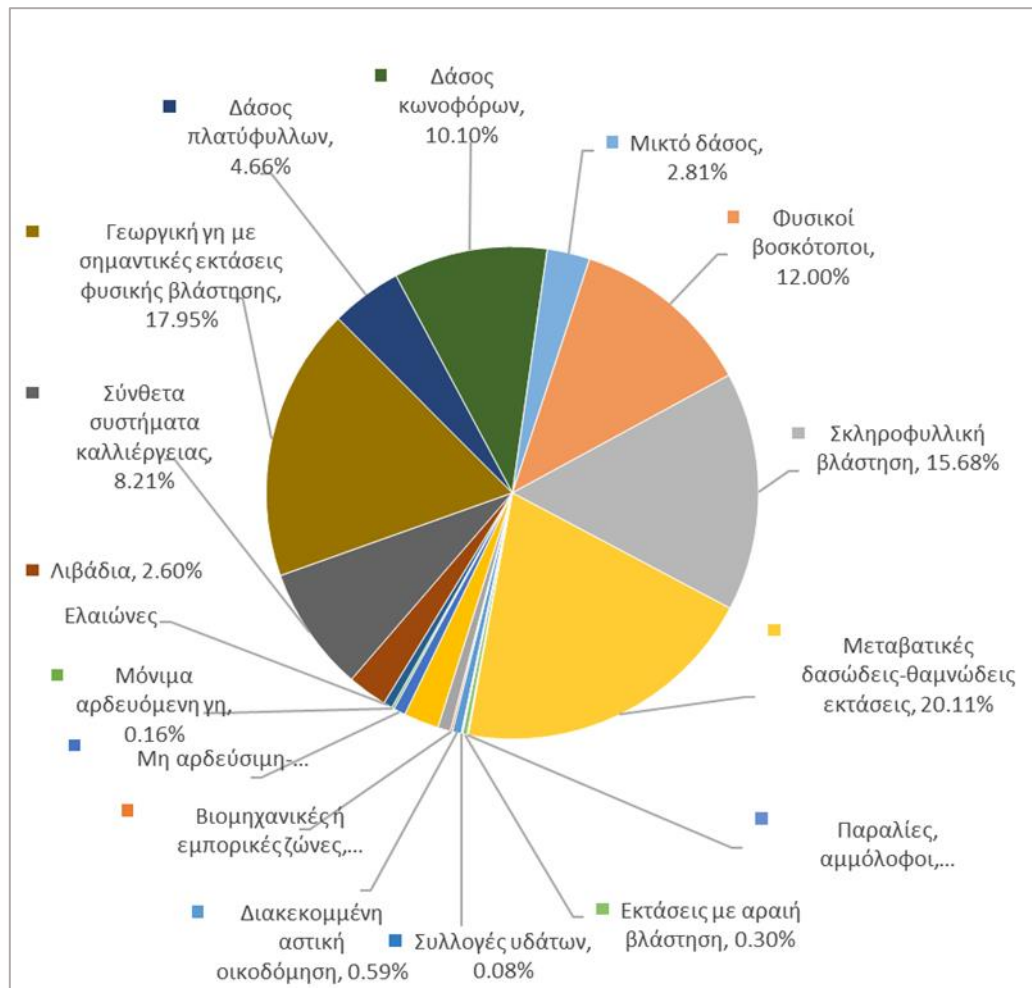


Σχήμα 2.3: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), υδρογραφικό δίκτυο και βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής μελέτης

Κάλυψη γης

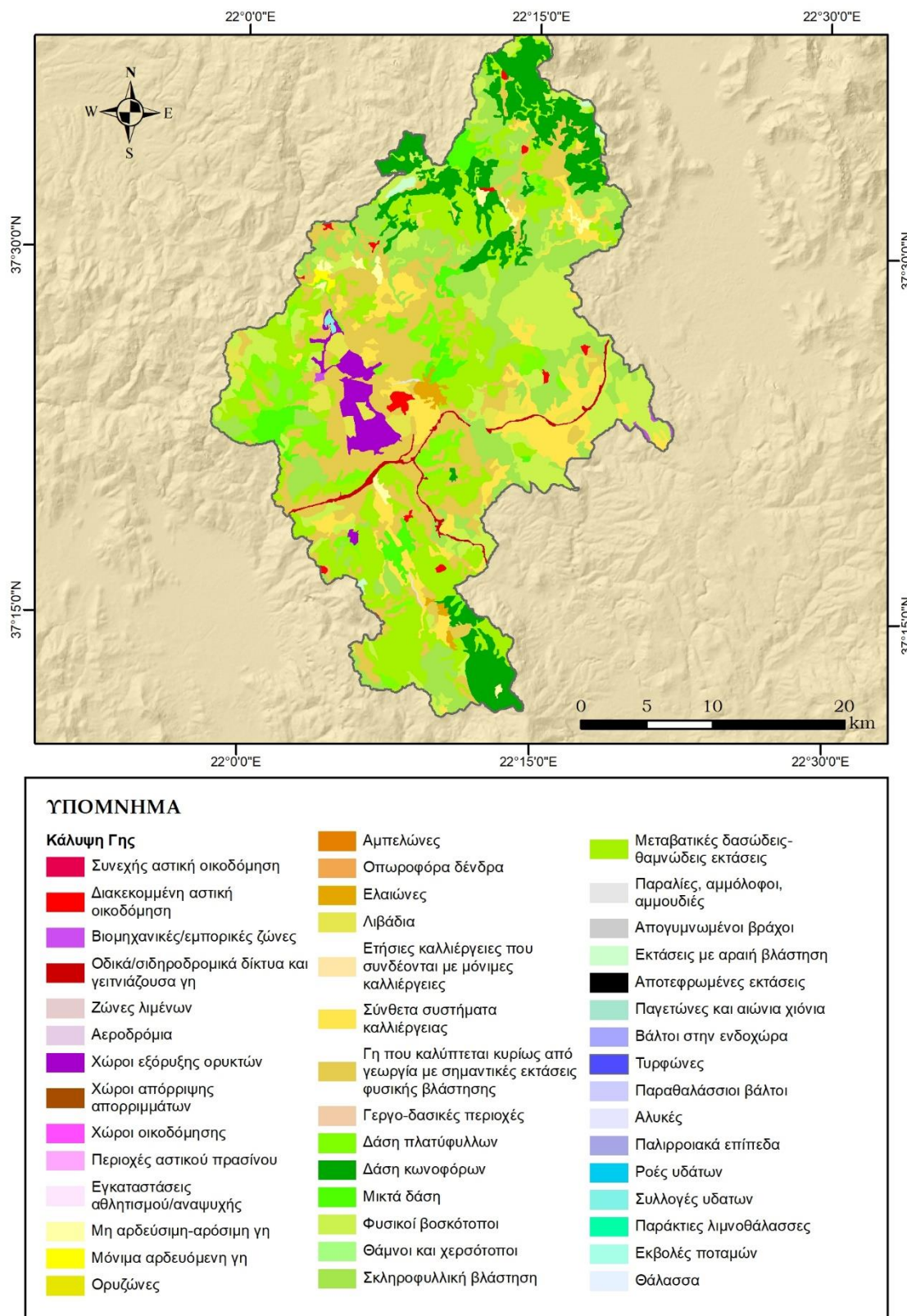
Η κατανομή των χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης βασίστηκε στο Corine Land Cover 2018. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί, η εξεταζόμενη περιοχή καλύπτεται από θαμνώδη και ποώδη βλάστηση σε ποσοστό 48% (φυσικοί βοσκοτόποι 12%, σκληροφυλλική βλάστηση 16%, μεταβατικές δασώδεις – θαμνώδεις εκτάσεις 20%), γεωργική γη σε ποσοστό 26%, δάση και δασικές εκτάσεις σε ποσοστό 18%, ενώ ένα 2.4% αντιστοιχεί στο λιγνιτικό πεδίο στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Το υπολειπόμενο 6% της επιφάνειας αντιστοιχεί σε λιβάδια, ελαιώνες και λοιπές χρήσεις. Η φυσική βλάστηση συναντάται κυρίως στις ορεινές και ημιορεινές ζώνες, ενώ οι

καλλιεργήσιμες εκτάσεις συγκεντρώνονται στις πεδινές ζώνες της περιοχής. Ο αστικός ιστός καταλαμβάνει μόλις το 1% της συνολικής επιφάνειας. Αναλυτικά η ποσοστιαία κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Κατανομή κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης κατά Corine

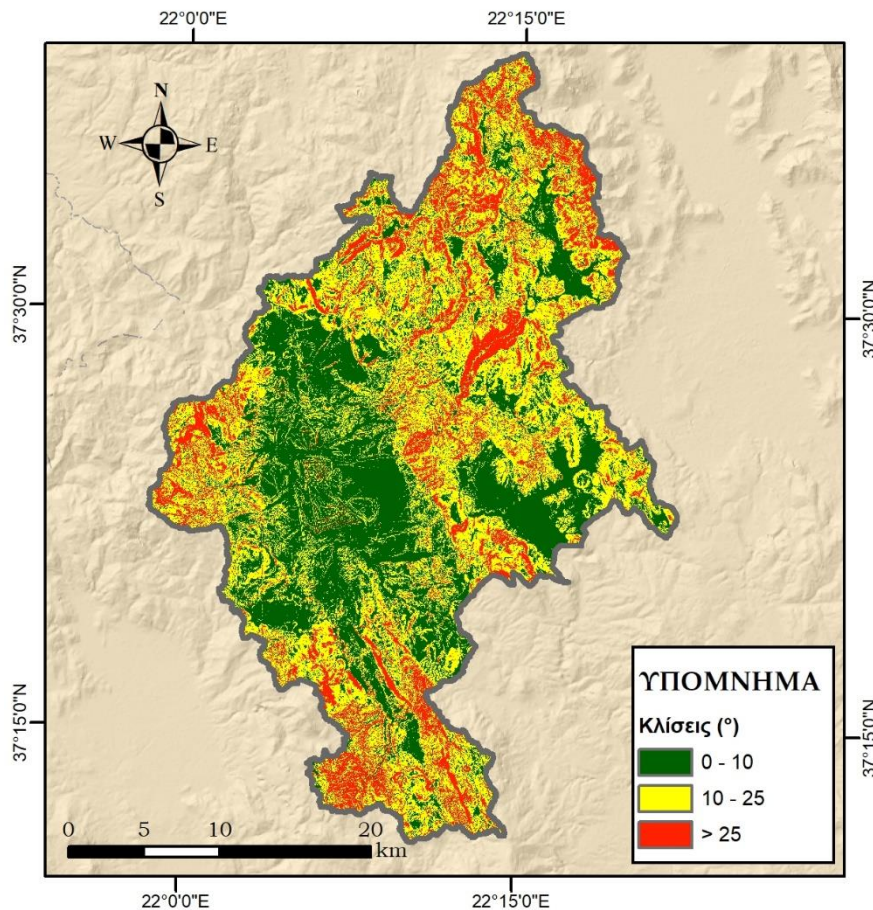
Κάθε κάλυψη γης αντιστοιχίζεται με έναν συντελεστή τραχύτητας (k) έτσι ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα ροής των υδάτων, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Υψηλές τιμές τραχύτητας αποδίδονται σε περιοχές αστικής δόμησης και εξόρυξης ορυκτών, ενώ ζώνες με ανεπτυγμένη βλάστηση και δασικό χαρακτήρα αντιστοιχίζονται με μικρότερες τιμές τραχύτητας.



Σχήμα 2.5: Κατανομή χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2018 για την περιοχή μελέτης

Κλίσεις εδάφους

Με χρήση του εργαλείου Slope του ArcGIS εισάγοντας ως δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, δημιουργείται ο χάρτης κλίσεων γης για ολόκληρη τη λεκάνη μελέτης. Παρατηρείται ότι οι κλίσεις του εδάφους κυμαίνονται από 0° έως 84.53°, ενώ η μέση κλίση της λεκάνης απορροής υπολογίζεται ίση με 15.28°. Οι κλίσεις που προκύπτουν ταξινομήθηκαν σε τρεις κλάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης

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

Τύπος εδάφους

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

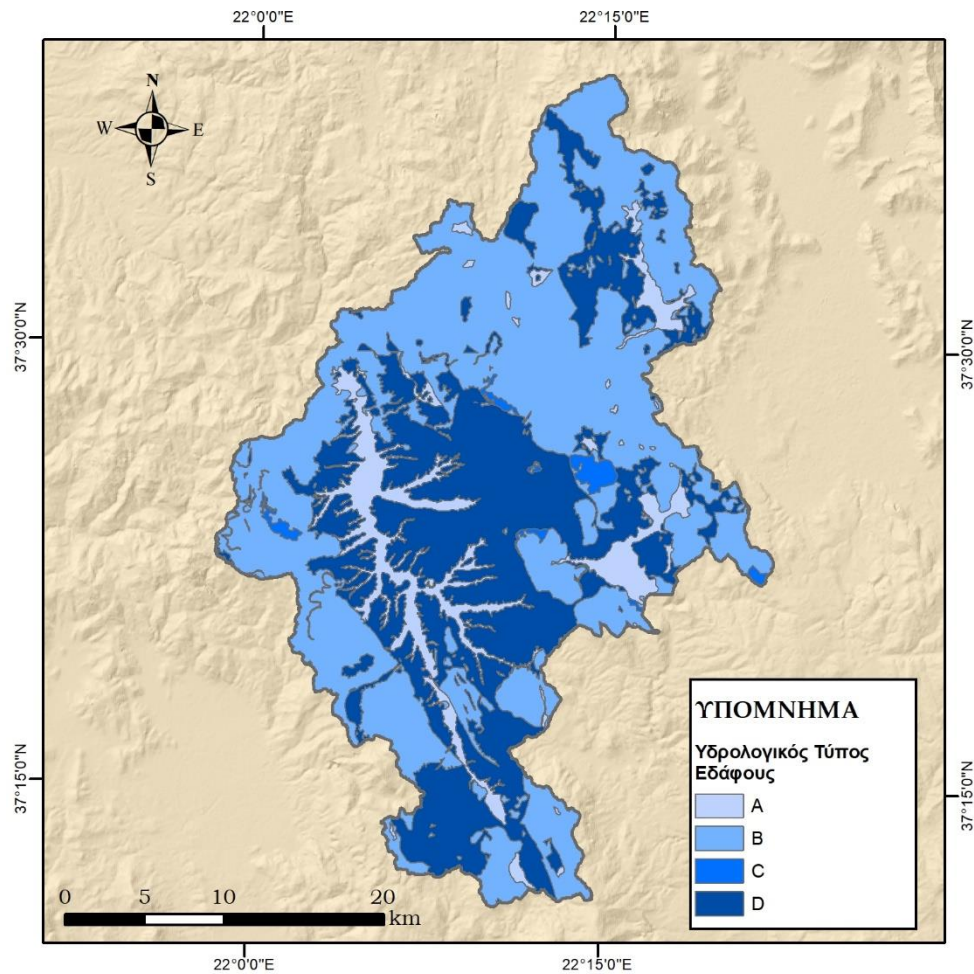
A. Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.

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

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

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

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



Σχήμα 2.7: Κατηγορίες εδάφους της περιοχής μελέτης ανάλογα με τον τύπο και την υδρολογική κατάσταση

2.2.2 Βροχομετρικά Δεδομένα και δεδομένα παροχής

Η ανάλυση βασίστηκε σε πραγματικές καταγραφές βροχομετρικών σταθμών που ανήκουν στο Αυτόματο Δίκτυο Μετεωρολογικών Σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOAAN). Το δίκτυο παρέχει υψηλής ποιότητας τιμές βροχόπτωσης για δεδομένο χρονικό βήμα 10 λεπτών (Lagouvardos et al. 2017). Για την περιοχή μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αξιοποιήθηκαν εννέα βροχομετρικοί σταθμοί εντός και πέριξ αυτής στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.3 της ενότητας 2.2.1 τα κυριότερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Χωρικές καρτεσιανές συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών

Σταθμός	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
Αλαγονία	343840.70	4107863.36	765
Ανδρίτσοινα	314338.17	4150269.35	731
Ελάτη	336422.35	4165756.25	1207
Λεβίδι	349621.92	4171325.69	853
Λυκόχια	337773.00	4151112.59	870
Μεγαλόπολη	335363.25	4140781.32	432
Στεμνίτσα	330377.84	4157967.28	1094
Τρίπολη	359988.97	4152250.57	650
Βοτίνια	339990.20	4170408.60	1013

Τα δεδομένα βροχόπτωσης περιέχουν ημερομηνία και ώρα καταγραφής με το αντίστοιχο ύψος βροχής σε χιλιοστά ανά χρονικό βήμα. Καθώς κάποιοι από τους παραπάνω βροχομετρικούς σταθμούς προστέθηκαν πρόσφατα στο δίκτυο, δεν υπάρχουν δεδομένα καταγραφών από όλους τους σταθμούς για όλα τα επεισόδια που μελετήθηκαν.

Η παροχή (Q) στην έξοδο της λεκάνης απορροής της Καρύταινας υπολογίστηκε με βάση σταθμημετρικά δεδομένα (H) μέσω της καμπύλης στάθμης - παροχής. Τα δεδομένα στάθμης προήλθαν από μετρήσεις της ΔΕΗ. Η μαθηματική περιγραφή της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται ακολούθως (Bournas, 2021):

$$Q = 7.798 H^{1.906}$$

Η παραγόμενη χρονοσειρά παροχής για κάθε επεισόδιο βροχής με χρονικό βήμα 20 min μετασχηματίστηκε σε χρονοσειρά ωριαίων τιμών παροχής, η οποία αξιοποιήθηκε σε τελικό στάδιο για σύγκριση με το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα που προέκυψε από την εφαρμογή υδρολογικού μοντέλου.

2.2.1 Επεισόδια Βροχής

Στο πλαίσιο της υδρολογικής ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη πέντε από τα ιστορικά επεισόδια τα οποία παρουσιάζονται στην ενότητα 2.1.5. Η επιλογή των επεισοδίων γίνεται με βάση τη σημαντικότητα του επεισοδίου ως προς το ύψος, τη διάρκεια και

τις συνέπειες της βροχοπτώσης, καθώς και την πληρότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Αξιολογώντας τις παραπάνω παραμέτρους, επιλέγονται τα επεισόδια του Πίνακα 2.3.

Κατά τη διαδικασία επιλογής, απορρίφθηκαν αρχικά τα επεισόδια που συνέβησαν πριν τα μέσα του 2010, καθώς στους περισσότερους σταθμούς, οι καταγραφές ξεκινούν μεταγενέστερα. Επιπρόσθετα, για τα πλέον πρόσφατα επεισόδια του έτους 2018 δε βρέθηκαν διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα κατά το χρονικό διάστημα εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Ως απόρροια των παραπάνω, η υδρολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τις ιστορικές πλημμύρες που τοποθετούνται χρονικά μεταξύ των ετών 2013 και 2015.

Το συνολικό ύψος και η διάρκεια βροχής, όπως προέκυψαν άμεσα από τις δεκάλεπτες (ιστορικές) καταγραφές των σταθμών για το κάθε πλημμυρικό συμβάν, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα..

Πίνακας 2.3: Επιλεγμένα επεισόδια βροχής για προσομοίωση

Αριθμός Επεισοδίου	Ημ/νία	Συνολικό Ύψος Βροχής (Thiessen)	Διάρκεια βροχοπτώσης (h)
1	01/03/2013	33.04	15
2	01/03/2014	46.58	24
3	23/01/2015	78.79	39
4	26/02/2015	40.38	26
5	05/03/2015	41.17	28

2.2.2 Λογισμικά

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ ή GIS) και προγραμματισμού σε γλώσσα Python, συγκεκριμένα σε ArcPy, η οποία είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό ArcGIS.

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

- Παρεμβολή και επιφανειακή ολοκλήρωση υδρολογικών μεταβλητών
- Εισερχόμενη ακτινοβολία και δυνητική διάρκεια ηλιοφάνειας σε λεκάνη— απορροής, λαμβάνοντας υπόψη την σκίαση και τις κλίσεις του ανάγλυφου
- Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής

- Εξαγωγή υδρολογικών ιδιοτήτων λεκάνης απορροής με βάση τον κάρναβο του υψομέτρου (συγκέντρωση ροής, υδρογραφικό δίκτυο)
- Υποβοήθηση της κατάρτισης μοναδιαίου υδρογραφήματος
- Χωροχρονική εκτίμηση πλημμυρών
- Συσχέτιση απορροής με δεδομένα λεκάνης (εδαφολογία, φυτοκάλυψη, γεωλογία, χρήσεις γης κλπ.)

Η ArcPy είναι ένα πρόσθετο του λογισμικού ArcGIS στόχος του οποίου είναι να δημιουργήσει τον ακρογωνιαίο λίθο για έναν χρήσιμο και παραγωγικό τρόπο εκτέλεσης ανάλυσης γεωγραφικών δεδομένων, μετατροπής και διαχείρισης δεδομένων, καθώς και αυτοματοποίησης χαρτών με την Python. Το συγκεκριμένο πακέτο παρέχει μια πλούσια και εγγενή εμπειρία Python που προσφέρει ολοκλήρωση κώδικα και τεκμηρίωση αναφοράς για κάθε συνάρτηση, οντότητα και κλάση. Η πρόσθετη δύναμη που συνδέεται με τη χρήση της ArcPy είναι το γεγονός ότι η Python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού γενικού σκοπού, φιλική προς το χρήστη και με ελεύθερη πρόσβαση. Το πακέτο ArcPy είναι κατάλληλο για διαδραστική εργασία και αρκετά ισχυρό για να επιτρέπει την κωδικοποίηση σύνθετων εφαρμογών. Επιπλέον, προσφέρει πρόσβαση σε εργαλεία γεωεπεξεργασίας του ArcGIS και διεξαγωγής εργασιών μεταξύ ψηφιδωτών αρχείων (αρχεία raster).

Η αυτοματοποίηση και εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου των απαραίτητων διεργασιών μεταξύ ψηφιδωτών αρχείων (αρχεία raster) και του χρόνου εκτέλεσης πολλαπλών προσομοιώσεων, που επιτεύχθηκε σε σημαντικό βαθμό μέσω της σύνταξης προγραμματιστικού κώδικα σε περιβάλλον ArcPy, συνδυάστηκε με τη χρήση του εργαλείου Model Builder του ArcGIS.

Ακόμη μία επέκταση του προγράμματος ArcGIS, η εργαλειοθήκη, HEC - GeoHMS (USACE, 2013), αξιοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας για τον υπολογισμό υδρολογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων της περιοχής μελέτης.

3 Μεθοδολογία μοντελοποίησης της διεργασίας βροχής - απορροής

3.1 Γενική επισκόπηση μεθοδολογίας

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα τρία μοντέλα βροχής - απορροής τα οποία αξιοποιήθηκαν περαιτέρω στο πλαίσιο της υδρολογικής ανάλυσης στην περιοχή μελέτης και αναλύονται τα στάδια υλοποίησής τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρό τους. Ειδικότερα, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε ένα πλήρως καταναμημένο μοντέλο σε περιβάλλον GIS και δύο συγκεντρωτικά μοντέλα βασισμένα στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στο καταναμημένο μοντέλο, καθώς αυτό αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Απαραίτητο δεδομένο εισόδου και στα τρία μοντέλα, όπως και σε κάθε μοντέλο βροχής - απορροής, είναι η χρονοσειρά βροχόπτωσης η οποία, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.3, προκύπτει από σημειακές καταγραφές των βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης ανά τακτά χρονικά διαστήματα, στη συγκεκριμένη περίπτωση ανά 10 min. Προκειμένου οι σημειακές παρατηρήσεις βροχόπτωσης να αξιοποιηθούν στην υδρολογική ανάλυση, καθίσταται αναγκαία η αναγωγή τους σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής. Με βάση την επιφανειακή βροχόπτωση γίνεται στη συνέχεια προδιορισμός της ενεργού βροχόπτωσης με αφαίρεση των υδρολογικών απωλειών. Οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση των παραπάνω διεργασιών παρουσιάζονται ακολούθως.

3.2 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχόπτωσης

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

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης, οι οποίες δύνανται να διαχωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1997). Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την

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

3.2.1 Η Μέθοδος Thiessen

Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen είναι μια εξαιρετικά απλή μέθοδος για την αναγωγή των μετρήσεων ενός βροχομετρικού δικτύου στο χώρο και τον υπολογισμό του μέσου ισοδυνάμου ύψους κατακρημνίσεων σε μία περιοχή. Σύμφωνα με τη μέθοδο Thiessen, η συνολική επιφάνεια A χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i μία ανά σταθμό, έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^k A_i = A \quad (3.1)$$

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

$$w_i = \frac{A_i}{A} \quad (3.2)$$

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

Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη αλλαγής του συστήματος των πολυγώνων όταν προστίθεται ή αφαιρείται ένας σταθμός, καθώς επίσης και το

γεγονός ότι δε λαμβάνονται υπόψη οι τοπογραφικές ιδιομορφίες του ανάγλυφου (ορεογραφικές επιδράσεις) (Νικολακόπουλος, 2015).

Οι συντελεστές βάρους κατά Thiessen των σταθμών της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Συντελεστές Thiessen ανά σταθμό

Βροχομετρικός Σταθμός	Συντελεστής Thiessen
Αλαγονία	0.069
Ανδρίτσαινα	0.023
Ελάτη	0.022
Λεβίδι	0.034
Λυκόχια	0.252
Μεγαλόπολη	0.472
Στεμνίτσα	0.053
Τρίπολη	0.049
Βυτίνα	0.025

3.2.2 Η Μέθοδος IDW

Η σταθμισμένη παρεμβολή αντίστροφης απόστασης (inverse distance weighted interpolation - IDW) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους παρεμβολής τοπικής γειννίασης. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην υπόθεση, ότι κάθε διακριτό σημείο επηρεάζει τις τιμές των γειτονικών του σημείων, μέχρι μια ορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι τιμές των σημείων με απουσία δειγματοληπτικών δεδομένων υπολογίζονται από συναρτήσεις με διαφορετικές παραμέτρους και η διασύνδεση μεταξύ αυτών των συναρτήσεων προσδιορίζεται μόνο με κάποιες προσεγγίσεις (Νικολακόπουλος, 2015).

Πρόκειται για μία ντετερμινιστική μέθοδο που εφαρμόζεται ευρέως στη χωρική μοντελοποίηση. Η εκτίμηση βασίζεται σε σταθμισμένους μέσους όρους, οι οποίοι είναι ανάλογοι με το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ των σημείων παρεμβολής και μέτρησης (Shepard 1968). Ο γενικός τύπος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (3.3)$$

Όπου $\hat{Z}(s_0)$, η εκτιμώμενη τιμή του Z στο S_0 , $Z(S_i)$ η μετρημένη τιμή που βρίσκεται στο S_i , λ_i το βάρος του $Z(S_i)$ και n ο αριθμός των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση. Το βάρος υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση.

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i^P}\right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^P}\right)} \quad (3.4)$$

Όπου d_i , η απόσταση μεταξύ S_0 και S_i , P μία παράμετρος δύναμης και ο αριθμός του δείγματος των σημείων που αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση. Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου IDW είναι η τιμή της παραμέτρου δύναμης. Καθώς αυξάνεται η απόσταση, τα βάρη μειώνονται, ειδικά όταν αυξάνεται η τιμή του εκθέτη. Οι κοντινοί σταθμοί έχουν μεγαλύτερο βάρος και, επομένως, μεγαλύτερη επιρροή στην εκτίμηση (Isaaks 1989, Nalder and Wein 1998; Johnston 2004). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου IDW είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε κατάσταση, ενώ η μέθοδος Kriging απαιτεί επαρκή ποσότητα δεδομένων για την παραγωγή ενός αξιόπιστου διαγράμματος ημι-διασποράς (Wagner et al., 2012). Ωστόσο, η μέθοδος IDW έχει το μειονέκτημα ότι όταν χρησιμοποιείται για δεδομένα με ετερογενή χωρική πυκνότητα, χαρακτηρίζεται συχνά από μειωμένη ακρίβεια και ανεπιθύμητα τεχνητά δεδομένα παρεμβολής, τα οποία οφείλονται σε φαινόμενα «bull's-eye» (τοπικές ακραίες τιμές δεδομένων).

3.3 Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS - CN

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

Για δεδομένο υετόγραμμα, η ενεργός βροχοπτώση εκτιμάται με τη μέθοδο SCS-CN, η οποία αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (1972, αναφέρεται πλέον ως Natural Resources Conservation Service, NRCS) και είναι από τις πλέον διαδεδομένες παγκοσμίως. Οι Mishra et al. (2004), Kadam et al. (2012), Saravanan and Manjula (2015), Vinithra και Yeshodha (2016) και Bhura et al. (2015) έχουν εφαρμόσει τη συγκεκριμένη μέθοδο σε προγενέστερες έρευνες. Η χρήση της μεθόδου στο πλαίσιο πλήρως κατανεμημένων μοντέλων βροχής - απορροής σε περιβάλλον GIS επιβεβαιώνεται από τις έρευνες των Jain (1996), Nash and Sutcliffe (1970), Sameer Shaded and Mohammad Almasri (2010). Η μέθοδος περιγράφει τη χρονική εξέλιξη

των ελλειμμάτων, εφαρμόζοντας μια απλή αλλά ρεαλιστική εννοιολογική διαδικασία, που βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (U.S. Department of the Interior, 1977):

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

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

$$P_e = \begin{cases} 0 & , P \leq 0.2 S \\ \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} & , P > 0.2 S \end{cases} \quad (3.5)$$

Όπου:

P_e : το ενεργό ύψος βροχής

P : το συνολικό ύψος βροχής

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

$$S \text{ (mm)} = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.6)$$

Οι αρχικές απώλειες, αντιπροσωπεύουν το ποσό της κατακρήμνισης που διηθείται ή αποθηκεύεται στη λεκάνη απορροής πριν την έναρξη της επιφανειακής απορροής, λόγω φυτοκάλυψης ή εδαφικών κοιλωμάτων. Η υδαταποθήκευση λόγω φυτοκάλυψης είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης της κατακρήμνισης από την εδαφική κάλυψη, ενώ η υδαταποθήκευση λόγω εδαφικών κοιλωμάτων είναι αποτέλεσμα των κοιλοτήτων στην τοπογραφία της λεκάνης: το νερό παγιδεύεται σε αυτές και στην συνέχεια διηθείται ή εξατμίζεται.

Η σχέση (3.5) μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, οπότε προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου.

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

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

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

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

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

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

Στη συνέχεια, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας:

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

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

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

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

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

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

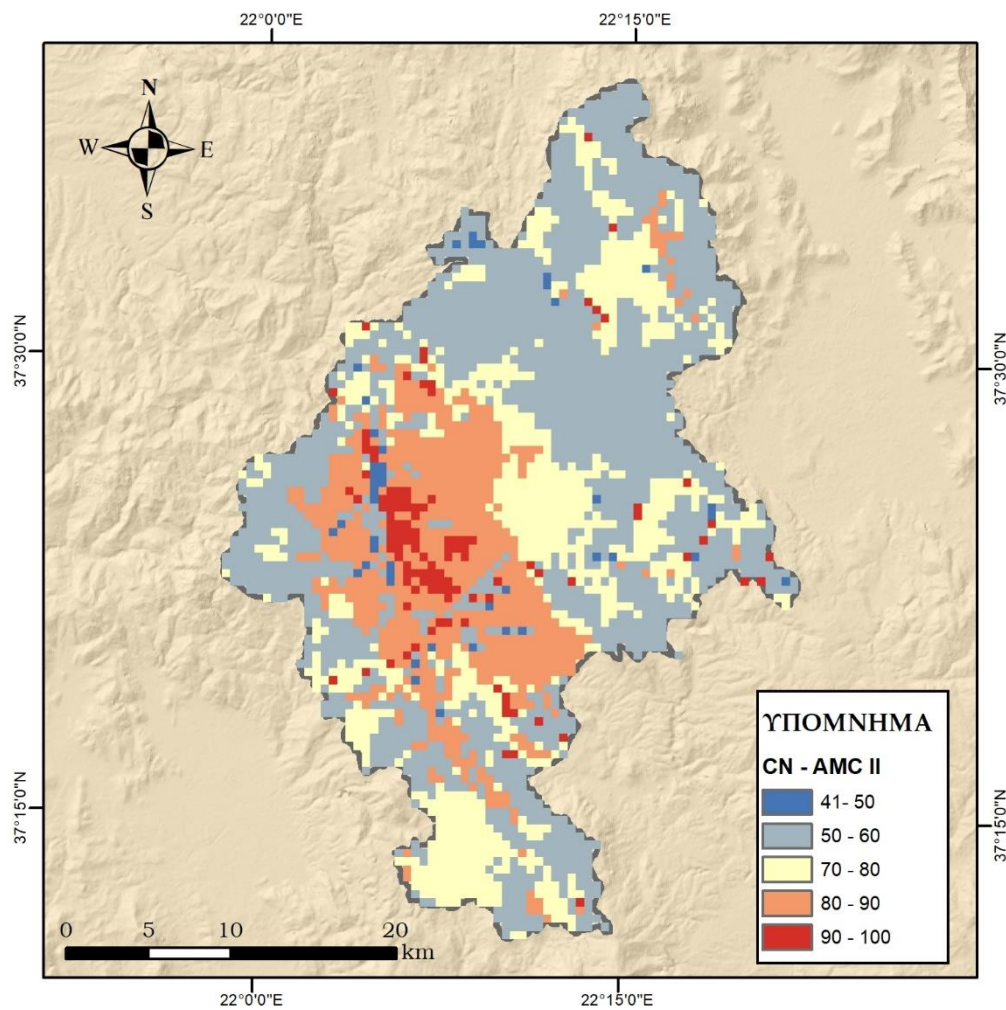
Συνεπώς, με γνωστή τη μέση τιμή του CN εκτιμάται η τιμή της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης της υπολεκάνης μέσω της σχέσης (3.6), που αντιστοιχεί στο μέσο υδρολογικό σενάριο. Για τις άλλες συνθήκες προηγούμενης υγρασίας, που αντιστοιχούν στα ευμενή και δυσμενή υδρολογικά σενάρια, αντίστοιχα, εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις αναγωγής:

$$CN_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (3.7)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (3.8)$$

Στην παρούσα εργασία λαμβάνοντας υπόψη τους πίνακες που δίνουν την τιμή του CN ανάλογα με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τη διαπερατότητα του εδάφους για μέσες συνθήκες υγρασίας, προκύπτει ο κánaβος των CN που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.

Πιο συγκεκριμένα, ως CN στα συγκεντρωτικά μοντέλα τέθηκε η τιμή 72, αντιπροσωπευτική για όλη τη λεκάνη απορροής και ίση με τη μέση τιμή των κατανεμημένων CN που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο κατανεμημένης χωρικής κλίμακας.



Σχήμα 3.1: Τιμές CN για την περιοχή μελέτης

3.4 Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

3.4.1 Μοντέλο ΜΥΓ από ανάλυση επεισοδίων ζευγών βροχής - απορροής

Κατά τον Sherman (1932), μοναδιαίο υδρογράφημα καλείται το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους (10 mm) και συγκεκριμένης διάρκειας, η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
2. Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.

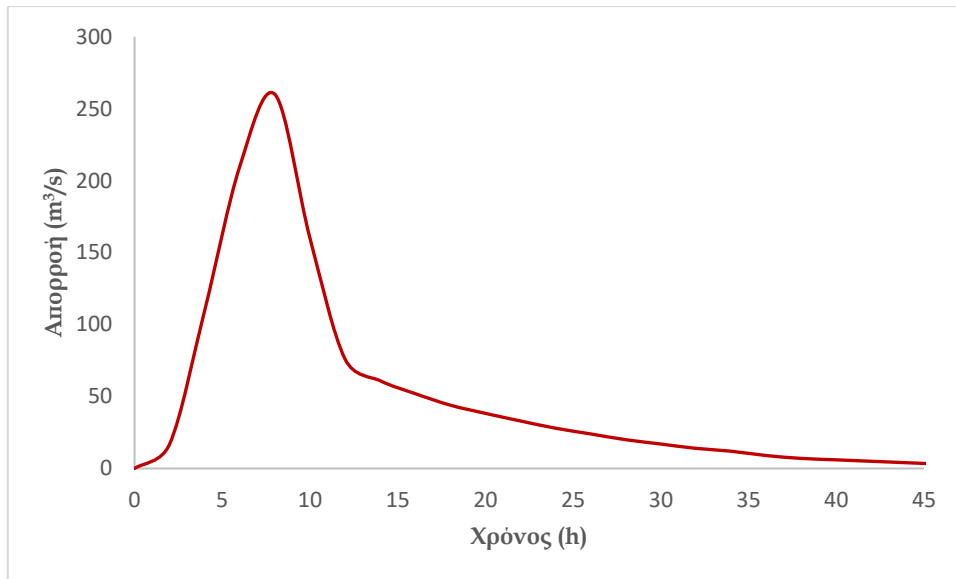
3. Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

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

Οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων. Η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντίστοιχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

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

Το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ λαμβάνει ως δεδομένο εισόδου τιμές βροχόπτωσης και αξιοποιώντας το ΜΥΓ που προέκυψε από μετρήσεις πεδίου στη θέση της Καρύταινας και ήταν διαθέσιμο προς χρήση γίνεται μετασχηματισμός της βροχής σε απορροή και διόδευση της τελευταίας στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης. Το εν λόγω ΜΥΓ απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα (Προέλευση: ΔΕΗ)

Αρχικά, οι δεκάλεπτες μετρήσεις βροχόπτωσης ανά σταθμό μετατρέπονται σε παρατηρήσεις με χρονικό βήμα μιας ώρας. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή τους στο GIS και υλοποιείται επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής για κάθε χρονικό βήμα εφαρμόζοντας τη μέθοδο ολοκλήρωσης αντιστρόφων αποστάσεων (Inverse Distance Weighting - IDW). Η ωριαία χρονοσειρά βροχόπτωσης που εισάγεται τελικά στο μοντέλο προκύπτει από τη μέση τιμή του κανάβου επιφανειακής βροχόπτωσης για κάθε χρονικό βήμα.

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

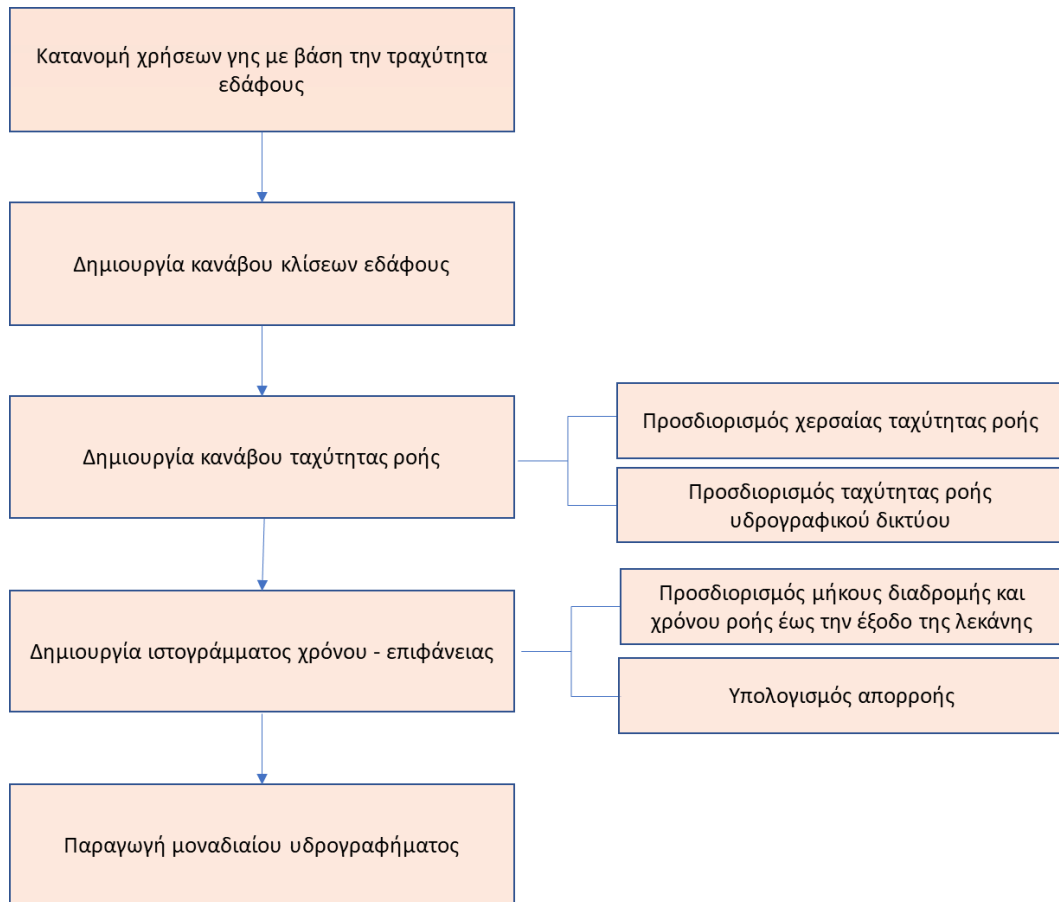
3.4.2 Μοντέλο ΜΥΓ μέσω ισόχρονων καμπυλών

Η μέθοδος χρόνου - επιφάνειας βασίζεται στο ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας που εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (McCuen, 1989 και Odeh, 2015). Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες (Χριστοφίδης, 2008).

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

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

Η ανάπτυξη του μοντέλου των ισόχρονων καμπυλών, έγινε σε περιβάλλον GIS με τη βοήθεια των λογισμικών ArcGIS και HEC-GeoHMS, ενώ ακολούθως παρήχθη το αντίστοιχο μοναδιαίο υδρογράφημα. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), η κατανομή του υδρογραφικού δικτύου και ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2018). Τα στάδια υλοποίησης της μεθόδου παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 3.3 και αναλύονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.3: : Στάδια υλοποίησης μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS

Αρχικά, αποδίδεται στις επιφανειακές καλύψεις κατά Corine ένα εύρος τιμών του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους (k) που αντιστοιχεί στην κάθε κατηγορία χρήσης γης, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους εισάγονται πολλαπλασιασμένες επί 100 ($k100$), ώστε να είναι ακέραιοι αριθμοί σύμφωνα με το συντακτικό του λογισμικού κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, ωστόσο, αυτό διορθώνεται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Το μέγεθος του κάθε φατνίου ορίζεται να είναι 5 m x 5 m για να συμπίπτει με το μέγεθος των φατνίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους σε σχέση με την κάλυψη γης (Προέλευση: Καββαδά, 2012, μετά από επεξεργασία)

Κωδικός (Corine)	Περιγραφή	Συντελεστής k100
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	115
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	115
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιαζουσα γη	115
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	115
211	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	50
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	50
223	Ελαιώνες	19
231	Λιβάδια	43
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	37
243	Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	30
311	Δάσος πλατύφυλλων	15
312	Δάσος κωνοφόρων	37
313	Μικτό δάσος	30
321	Φυσικοί βοσκότοποι	30
322	Θάμνοι και χερσότοποι	25
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	60
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	43
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	55
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	149
512	Συλλογές υδάτων	30

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

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

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

$$V\left(\frac{m}{s}\right) = k * \sqrt{S\left(\frac{m}{m}\right)} \quad (3.9)$$

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

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

Η κατασκευή του κανάβου της ποτάμιας ταχύτητας ροής ή ταχύτητας ροής του υδρογραφικού δικτύου προϋποθέτει την εκτέλεση μιας ακολουθίας διεργασιών. Αρχικά, δημιουργείται ο κανάβος κατεύθυνσης ροής μέσω του εργαλείου Flow Direction που απεικονίζει την κατεύθυνση του νερού κάθε φατνίου προς αυτό από τα οκτώ γειτονικά του με τη μεγαλύτερη κλίση. Με δεδομένο τον χάρτη κατεύθυνσης ροής δημιουργείται ο κανάβος συγκέντρωσης ροής μέσω του εργαλείου Flow Accumulation που υπολογίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν σε κάθε φατνίο. Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ένα κατώφλι στο πλήθος των κελιών που απορρέουν σε ένα κελί πάνω από το οποίο το συγκεκριμένο κελί αποτελεί τμήμα του υδρογραφικού δικτύου, έχει δηλαδή μεγάλη συγκέντρωση ροής. Έτσι, ανάλογα με την τιμή του κατώφλιου διαφοροποιείται το τελικό αποτέλεσμα με τις μεγάλες τιμές να οδηγούν σε αραιό υδρογραφικό δίκτυο ενώ μικρές σε πιο πυκνό υδρογραφικό δίκτυο. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, ορίστηκε ως κατώφλι επιφάνεια ίση με 3 km², η οποία αντιστοιχεί σε 120000 εικονοστοιχεία.

Επόμενο στάδιο αποτελεί η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου σε τάξεις με τη μέθοδο Strahler η οποία επιτυγχάνεται στο ArcGIS με χρήση του εργαλείου Stream Order. Σύμφωνα με τον Strahler (1957) κάθε κλάδος ενός υδρογραφικού δικτύου που δε δέχεται νερά άλλων μικρότερων υδατορευμάτων ονομάζεται κλάδος 1^{ης} τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη συμβολή δύο κλάδων 1^{ης} τάξης ονομάζεται κλάδος 2^{ης} τάξης, ο κλάδος που προκύπτει από την ένωση δύο κλάδων 2^{ης} τάξης ονομάζεται 3^{ης} τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει διατηρεί την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους.

Αφού έχει προηγηθεί η ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου, κάθε κλάδος του απομονώνεται και αντιστοιχίζεται με μία τιμή που αντιπροσωπεύει την ταχύτητα ροής σε αυτόν, ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκει. Με ενοποίηση των επιμέρους ταξινομημένων κλάδων που φέρουν την αντίστοιχη ταχύτητα ροής προκύπτει μέσω του εργαλείου Raster Calculator ο κανάβος ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου. Ακολουθεί η σύνθεση των δύο κανάβων της χερσαίας και της υδρογραφικής ροής και πάλι με τη βοήθεια του Raster Calculator, οπότε εξάγεται ο κανάβος των αθροιστικών ταχυτήτων ροής (velocity).

Σε αυτό το σημείο υπολογίζεται ο κανάβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής που αποδίδει το χρόνο που χρειάζεται κάθε φατνίο έως την έξοδο της λεκάνης. Για τη

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

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

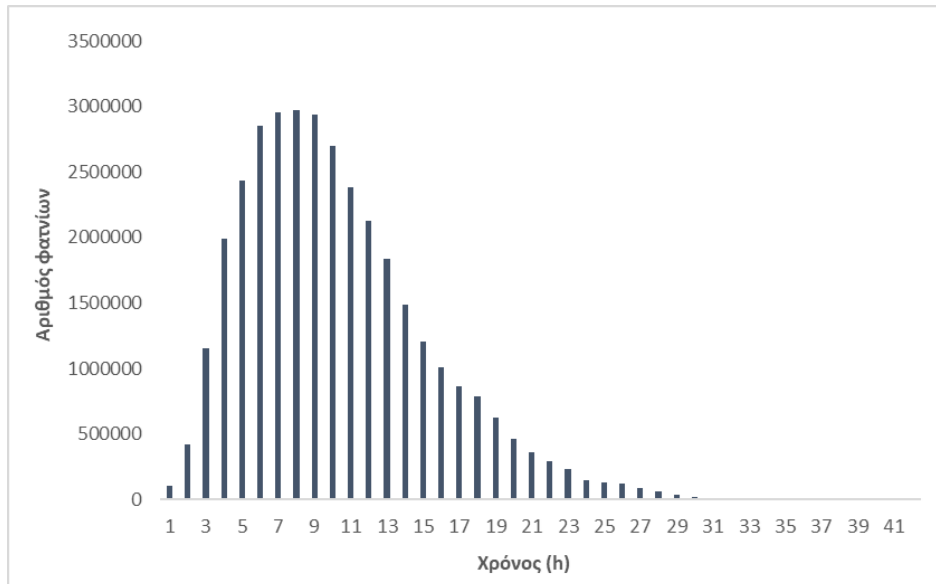
Με δεδομένο το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας, το οποίο απεικονίζει το πλήθος των φατνίων της λεκάνης που αποφορτίζονται στην έξοδο σε κάθε χρονικό βήμα, γίνεται υπολογισμός της απορροής. Ειδικότερα, εάν η βροχοπτώση μοναδιαίου ύψους (10 mm) πολλαπλασιαστεί με τις διαστάσεις του κάθε εικονοστοιχείου (5 x 5 m) και με το πλήθος των φατνίων που απορρέουν την πρώτη ώρα, υπολογίζεται η παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης την πρώτη ώρα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τις επόμενες ώρες ορίζοντας κάθε φορά την ώρα της απορροής (1^η, 2^η, 3^η κοκ) και δημιουργείται, τελικά, ένας πίνακας που περιέχει την ώρα απορροής και τις αντίστοιχες τιμές της απορροής που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης σε κάθε χρονικό βήμα. Από τον πίνακα αυτόν παράγεται το αντίστοιχο γράφημα το οποίο αποτελεί και το αντίστοιχο ζητούμενο ΜΥΓ στη θέση ενδιαφέροντος.

Με εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας στην περιοχή μελέτης, προκύπτει ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι τέταρτης τάξης. Οι ταχύτητες που αποδόθηκαν για τη ροή του νερού εντός του υδρογραφικού δικτύου ανά κλάδο προέκυψαν έπειτα από χειροκίνητη βαθμονόμηση, έτσι ώστε το παραγόμενο με βάση τη μέθοδο χρόνου - επιφάνειας ΜΥΓ να προσεγγίζει το αντίστοιχο ΜΥΓ που προέκυψε από μετρήσεις πεδίου και αξιοποιήθηκε ως ξεχωριστό μοντέλο, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2.1. Οι τιμές των ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.3: Ταχύτητα ροής εντός υδρογραφικού δικτύου

Τάξη υδατορεύματος	Ταχύτητα ροής (m/s)
1η	1.7
2η	1.8
3η	1.9
4η	2.0

Ως χρονικό βήμα ανάλυσης επιλέχθηκε η μία ώρα και το παραγόμενο ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

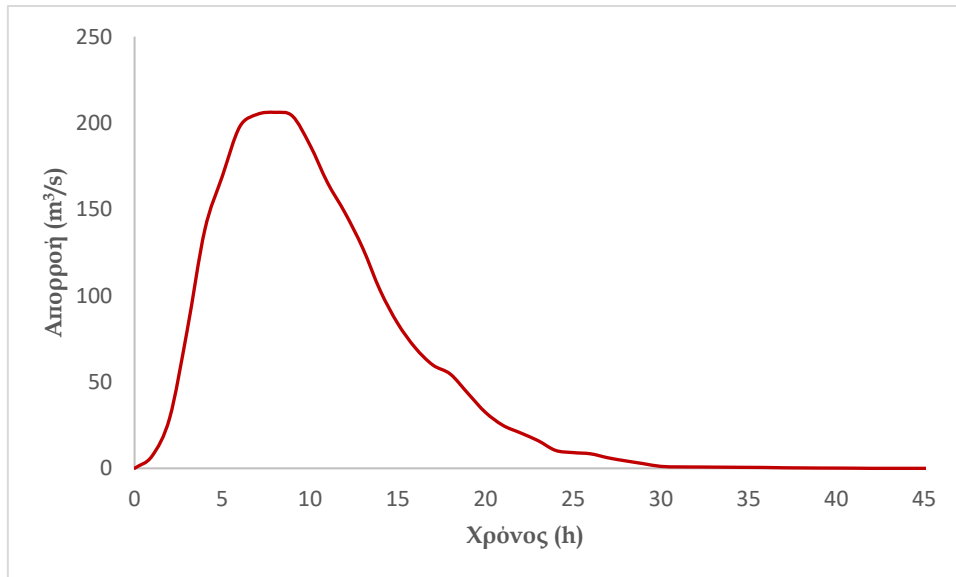


Σχήμα 3.4: Ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας στη θέση Καρύταινα

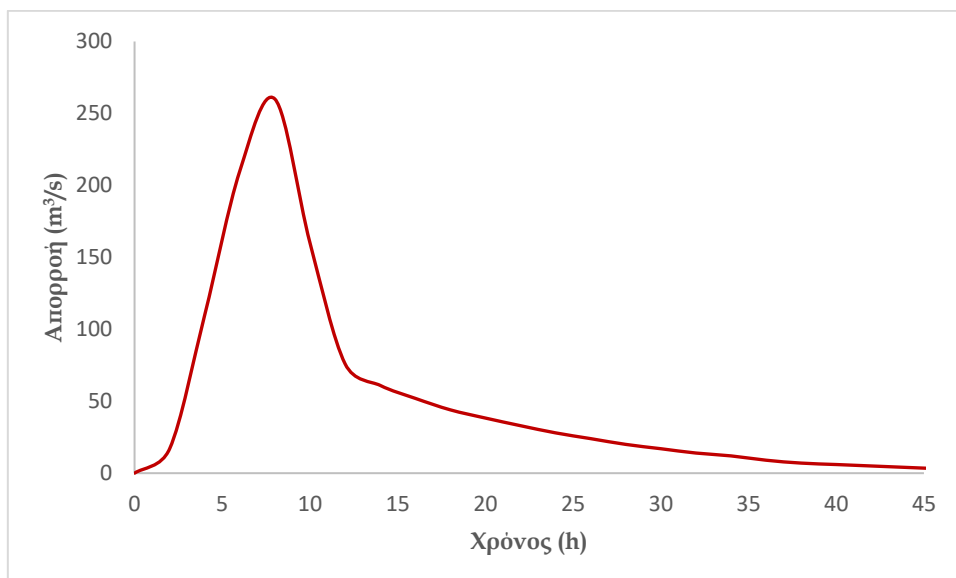
Με δεδομένο το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας παράγεται τελικά το ΜΥΓ στη θέση της Καρύταινας, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζοντας το πλήθος των εικονοστοιχείων που απορρέουν με την επιφάνεια κάθε εικονοστοιχείου ανάλογα με την ανάλυση του αρχικού DEM και με το αντίστοιχο ύψος βροχής, δημιουργείται το μοναδιαίο υδρογράφημα για τη λεκάνη απορροής. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των φασνίων με την επιφάνεια κυττάρου ήτοι 5 m x 5 m, καθώς και με το ύψος βροχής 10 mm που αντιστοιχεί εξ' ορισμού στο ΜΥΓ και διαιρώντας με 3600 s, προκύπτει η παροχή σε m³/s.

Όπως γίνεται εμφανές από τα σχετικά υδρογραφήματα, το ΜΥΓ που προκύπτει εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών (Σχήμα 3.5) προσεγγίζει

σημαντικά το ΜΥΓ που προήλθε από ανάλυση ζευγών βροχής - απορροής (Σχήμα 3.6). Το υψηλό ποσοστό προσαρμογής προσομοιωμένων με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών και πραγματικών στοιχείων αποδεικνύεται και από τον υψηλό συντελεστή αποδοτικότητας Nash - Suttcliffe, ο οποίος υπολογίζεται ίσος με 0.93, τιμή πλησίον της μονάδας.



Σχήμα 3.5: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών



Σχήμα 3.6: Μοναδιαίο υδρογράφημα στη θέση Καρύταινα (Προέλευση: ΔΕΗ)

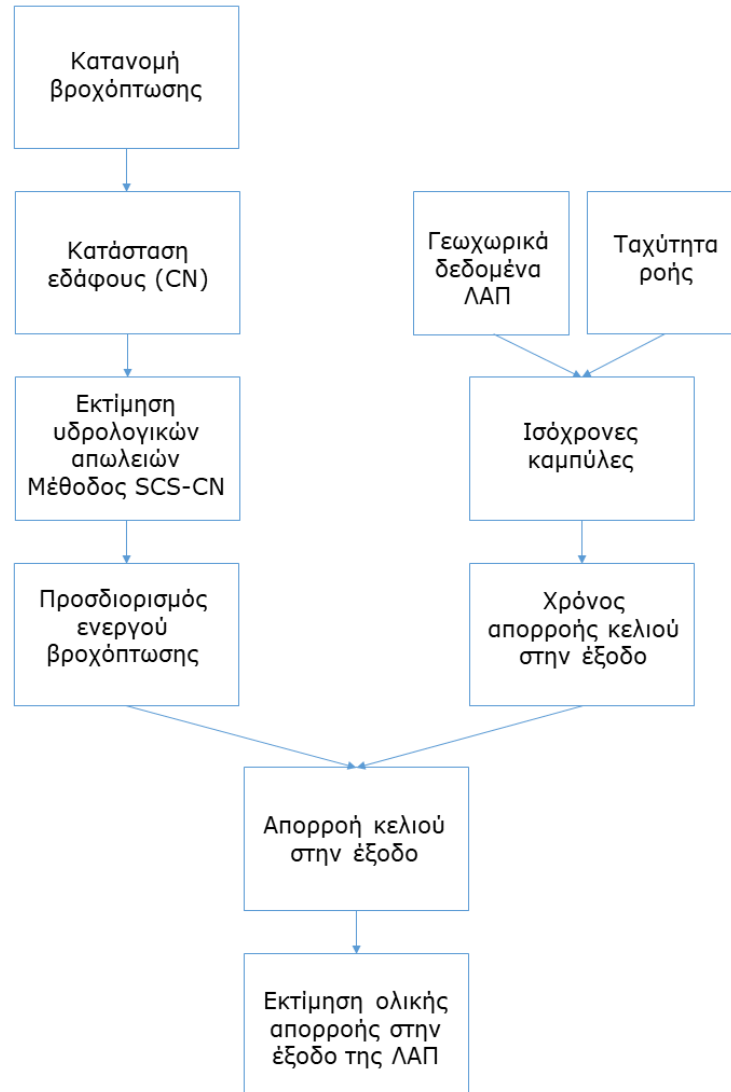
Στη συνέχεια, εισάγονται στο μοντέλο τα δεδομένα βροχόπτωσης και ακολουθώντας διαδικασία αντίστοιχη με την αναφερθείσα στο χωρίο 3.4.1 προκύπτει το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής.

3.4.3 Κατανεμημένο μοντέλο

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε όπως παρουσιάζεται ακολούθως και το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας διαφοροποιείται από τα δύο προηγούμενα ως προς τη χωρική κλίμακα. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα πλήρως κατανεμημένο μοντέλο βροχής – απορροής στο οποίο γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας, ήτοι κύτταρα, δεδομένης ισοδιάστασης. Η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων ή φυσικών ιδιοτήτων. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή του μοντέλου και οι μέθοδοι που αξιοποιούνται κατά την υλοποίηση των απαιτούμενων υδρολογικών διεργασιών.

Το μοντέλο λαμβάνει ως δεδομένο εισόδο τον κάναβο βροχόπτωσης, ενώ ως παράμετροι του μοντέλου λαμβάνονται ο χρόνος απορροής κάθε κυττάρου στην έξοδο της λεκάνης, όπως υπολογίστηκε με βάση τις ισόχρονες καμπύλες, και ο αριθμός καμπύλης (CN) που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών. Το αποτέλεσμα του μοντέλου είναι το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης που παρήχθη από το υπό μελέτη επεισόδιο βροχής.

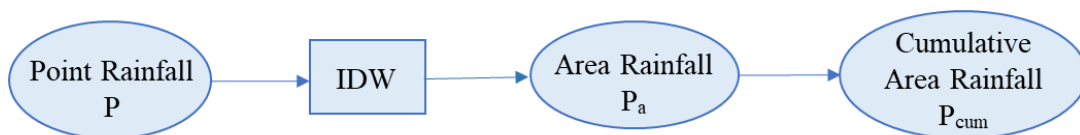
Η διαμόρφωση του μοντέλου γίνεται με κωδικοποίηση σε περιβάλλον ArcPy, όπου είναι δυνατή η εκτέλεση σύνθετων διεργασιών μεταξύ αρχείων raster αξιοποιώντας τα διαθέσιμα εργαλεία του λογισμικού ArcGIS.



Σχήμα 3.7: Δομή κατανεμημένου μοντέλου

Εκτίμηση ενεργού βροχόπτωσης

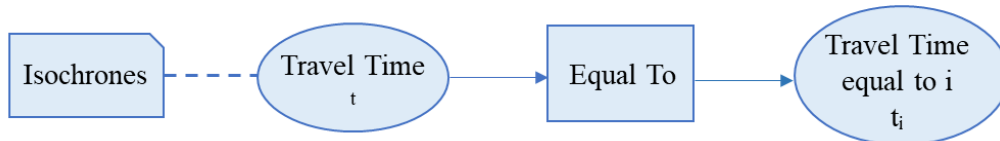
Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιείται επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης με τη μέθοδο IDW όπου ορίζεται διάσταση κυττάρου του παραγόμενου κανάβου ίση με 500 m x 500 m.



Σχήμα 3.8: Κωδικοποίηση διαδικασίας υπολογισμού αθροιστικής βροχόπτωσης

Ακολούθως, υπολογίζεται ο κανάβος της αθροιστικής βροχόπτωσης ανά χρονικό βήμα με χρήση του εργαλείου Raster Calculator προσθέτοντας την επιφανειακή βροχόπτωση

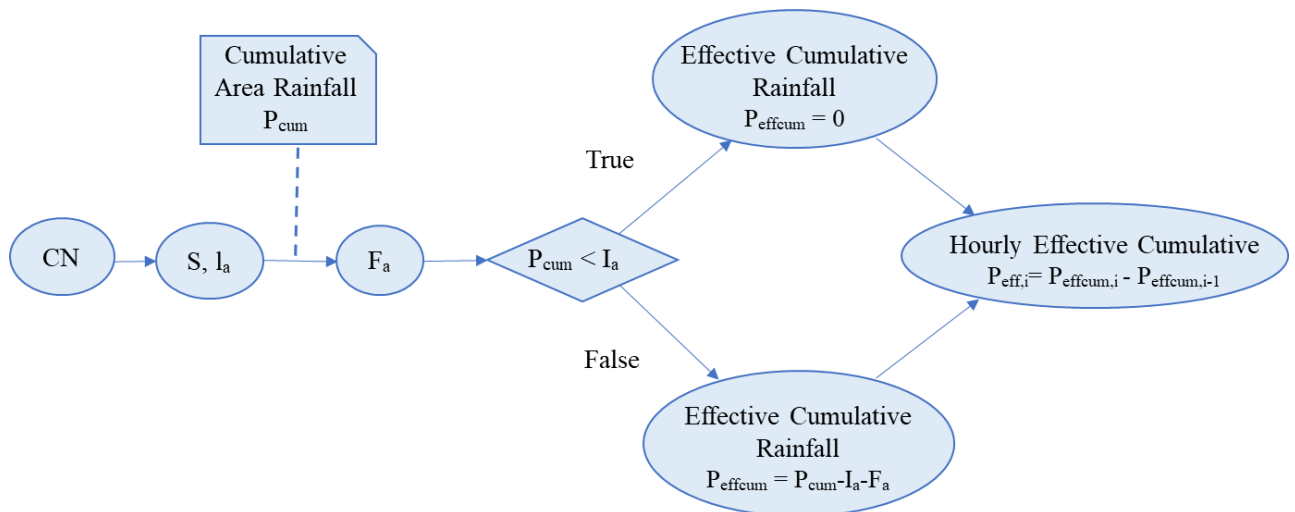
του βήματος που μελετάται στην αθροιστική βροχή του προηγούμενου βήματος (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.9: Κωδικοποίηση διαδικασίας ομαδοποίησης κυττάρων με βάση το χρόνο απορροής

Με δεδομένο το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας της λεκάνης, το οποίο υπολογίστηκε σε προηγούμενο στάδιο, απομονώνονται τα εικονοστοιχεία που απορρέουν σε κάθε χρονικό βήμα. Ειδικότερα, δημιουργείται ένας κάναβος για κάθε ώρα, τα κελιά του οποίου λαμβάνουν την τιμή 0 ή 1 στην περίπτωση που δεν απορρέουν ή απορρέουν τη συγκεκριμένη ώρα, αντίστοιχα. Η παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται στο GIS με χρήση του εργαλείου Equal to, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο κάναβος με τις τιμές της παραμέτρου S με βάση τη σχέση (3.6), καθώς και ο κάναβος των αρχικών απωλειών I_a ως το 20% της παραμέτρου S με χρήση του εργαλείου Raster Calculator.



Σχήμα 3.10: Κωδικοποίηση διαδικασίας εκτίμησης απωλειών και ενεργού βροχοπτώσης

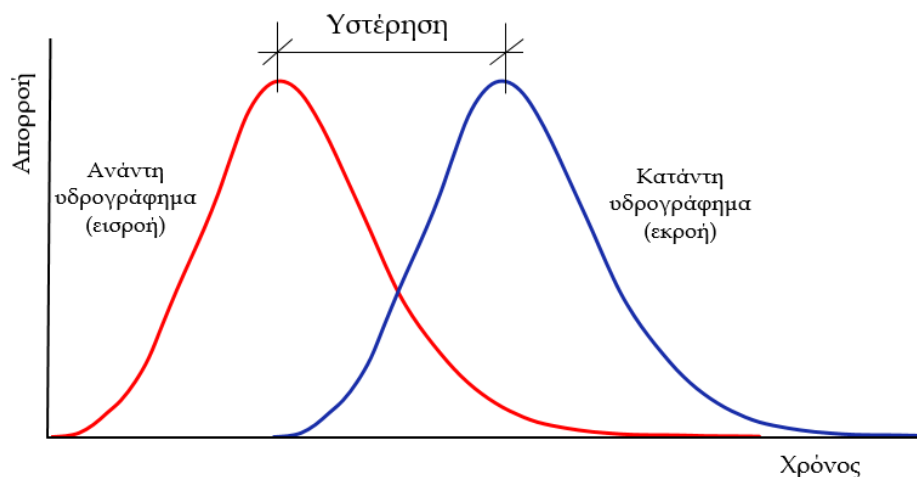
Σύμφωνα με τις παραδοχές της μεθόδου SCS - CN που αναφέρθηκαν στο σχετικό υποκεφάλαιο, στην περίπτωση που η αθροιστική βροχοπτώση (P) σε δεδομένο χρονικό βήμα είναι μικρότερη από τις αρχικές απώλειες (I_a), όλος ο όγκος νερού χάνεται σε αρχικές απώλειες, επομένως, η ενεργός βροχοπτώση είναι μηδενική. Όταν η αθροιστική βροχοπτώση γίνει μεγαλύτερη από τις αρχικές απώλειες, τότε υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα η ποσότητα F_a που αντιστοιχεί στις επιπλέον απώλειες σύμφωνα με την εξίσωση (3.10).

$$F_a(mm) = S \left(\frac{P - I_a}{P - I_a + S} \right) \quad (3.10)$$

Έχοντας υπολογίσει τις δύο συνιστώσες των απωλειών σε κάθε χρονικό βήμα, η αθροιστική ενεργός βροχόπτωση προκύπτει από την έκφραση $P - I_a - F_a$ για κάθε χρονικό βήμα. Καταλήγοντας, προσδιορίζεται η επιφανειακή ενεργός βροχόπτωση αφαιρώντας από την αθροιστική ενεργό βροχόπτωση κάθε χρονικού βήματος την αντίστοιχη τιμή του προηγούμενου χρονικού βήματος. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται σε περιβάλλον arcpy θέτοντας τις κατάλληλες συνθήκες και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τη μορφή αρχείου raster (Σχήμα 3.10).

Υπολογισμός απορροής

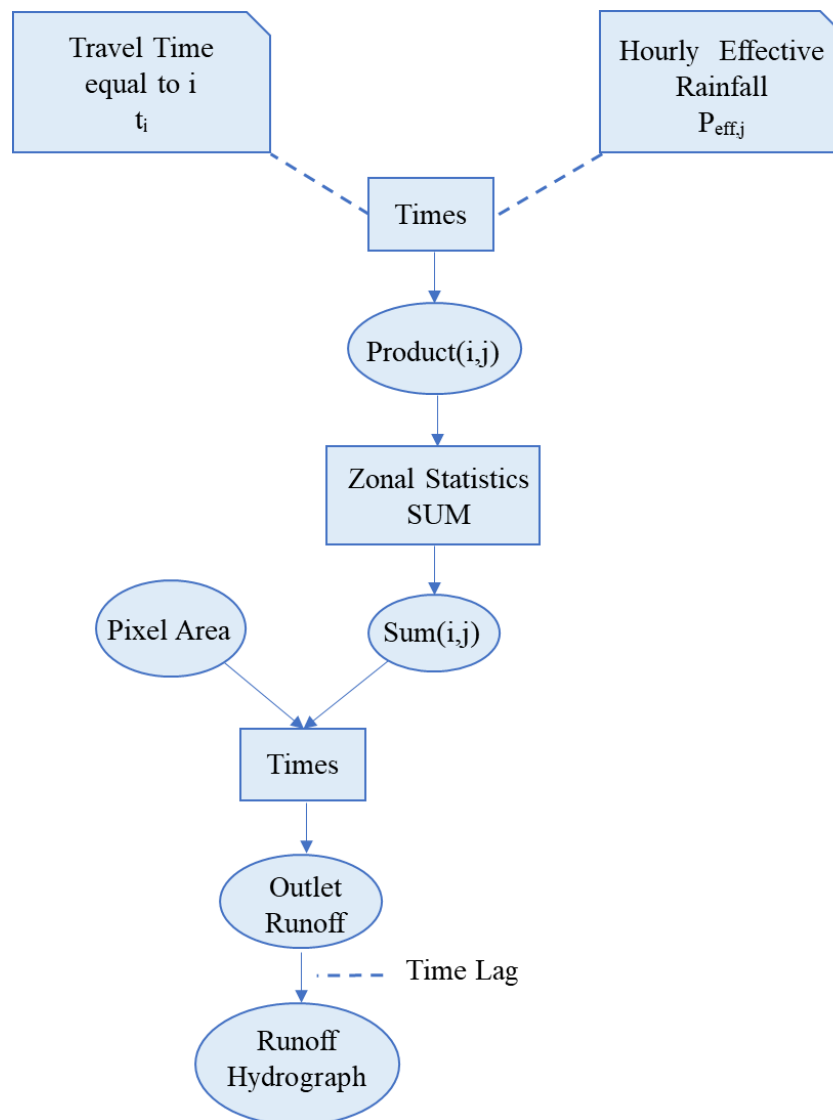
Με δεδομένα την χρονοσειρά ενεργού βροχόπτωσης και το χρόνο απορροής κάθε κυττάρου του ΨΜΕ στην έξοδο της λεκάνης σε κάθε χρονικό βήμα (ισόχρονες καμπύλες), υπολογίζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο κάθε φατνίου και γίνεται διόδευσή αυτού στην έξοδο της λεκάνης. Η επαλληλία των επιμέρους υδρογραφημάτων που προκύπτουν συνιστά το συνολικό πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Για τη διόδευση της παροχής κάθε κυττάρου στο σημείο εκφόρτισης της λεκάνης υιοθετείται η προσέγγιση που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Προσέγγιση διόδευσης ροής κυττάρου στην έξοδο της λεκάνης απορροής

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω υλοποιείται προγραμματιστικά ακολουθώντας τα βήματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12. Αναλυτικότερα, γίνεται υπολογισμός όλων των πιθανών γινομένων των εικονοστοιχείων που απορρέουν στο χρονικό βήμα i με την ενεργό βροχόπτωση κάθε χρονικού βήματος j οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα αρχεία μορφής raster. Στη συνέχεια, για μεμονωμένο προκύπτον raster γίνεται άθροιση των τιμών που φέρει κάθε φατνίο του, οπότε

προκύπτει μία τιμή η οποία πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια του κυττάρου (Pixel Area) αποτελεί τη συνολική παροχή στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Με κατάλληλο συνδυασμό των τιμών που προκύπτουν από τα επιμέρους raster, ανάλογα με την ώρα βροχής που εξετάζεται και την επιφάνεια που απορρέει στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη χρονική υστέρηση (Time lag) από βήμα σε βήμα, προκύπτει τελικά το πλημμυρογράφημα εξόδου για όλη τη λεκάνη απορροής που προκλήθηκε από το υπό μελέτη επεισόδιο βροχόπτωσης.



Σχήμα 3.12: Κωδικοποίηση διαδικασίας υπολογισμού απορροής στην έξοδο της ΛΑΠ

4 Αποτελέσματα - Συζήτηση

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής ανάλυσης που διενεργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Η εν λόγω ανάλυση αφορά σε ιστορικά επεισόδια βροχόπτωσης που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης κατά την τελευταία δεκαετία, τα οποία διακρίνονται στον Πίνακα 4.1.

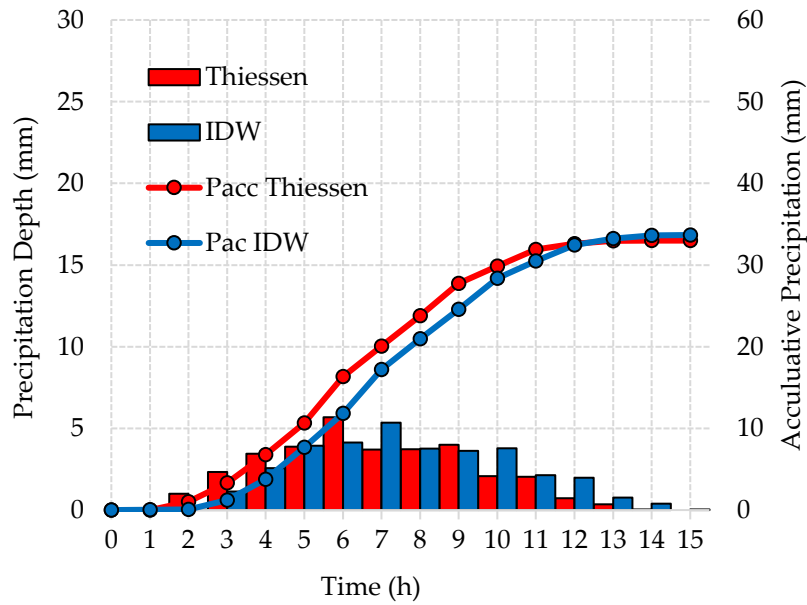
Πίνακας 4.1: Ιστορικά επεισόδια βροχής

Αριθμός Επεισοδίου	Ημ/νία	Συνολικό Ύψος Βροχής (Thiessen)	Διάρκεια βροχόπτωσης (h)
1	01/03/2013	33.04	15
2	01/03/2014	46.58	24
3	23/01/2015	78.79	39
4	26/02/2015	40.38	26
5	05/03/2015	41.17	28

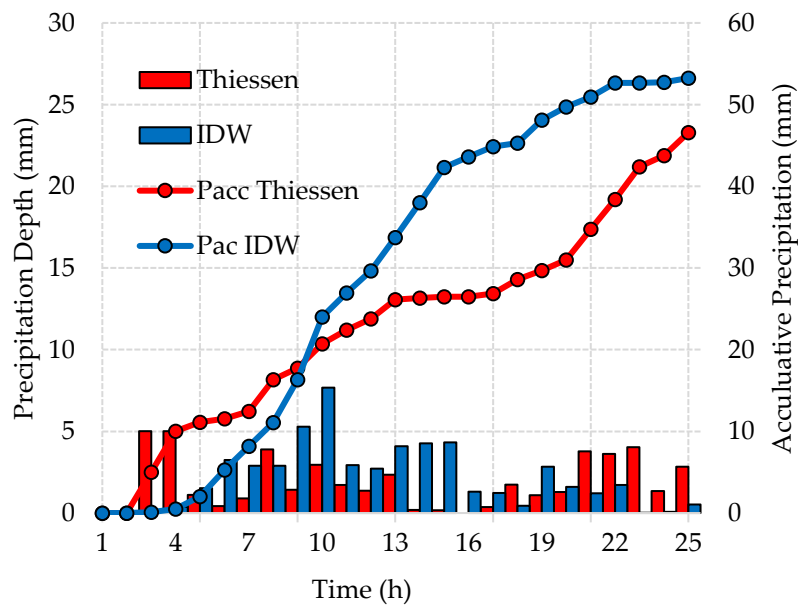
4.2 Σύγκριση μεθόδων επιφανειακής ολοκλήρωσης της βροχής

Η επιφανειακή αναγωγή των σημειακών καταγραφών βροχόπτωσης για τα παραπάνω επεισόδια βροχής υλοποιήθηκε με δύο μεθόδους: τη μέθοδο πολυγώνων Thiessen και τη μέθοδο αντιστρόφων αποστάσεων (IDW). Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα συνολικά ωριαία ύψη βροχής και η αθροιστική βροχόπτωση ανά επεισόδιο βροχής για τη λεκάνη απορροής της Καρύταινας, όπως υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους.

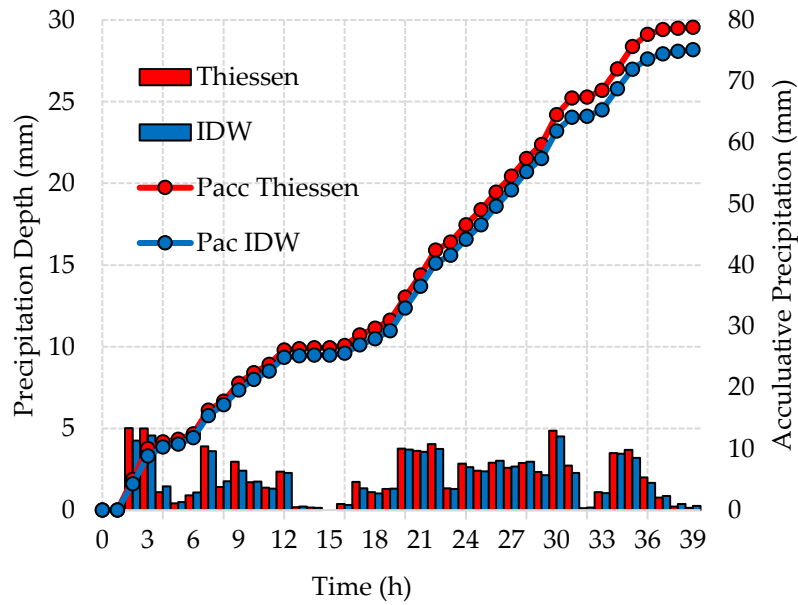
Στην πλειονότητα των επεισοδίων παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Ιδιαίτερα αντιληπτή είναι η διαφορά αυτή στα επεισόδια 2 και 5. Ειδικότερα, στα επεισόδια 1, 2 και 5 υπολογίζονται υψηλότερα ύψη βροχής με τη μέθοδο Thiessen τις πρώτες 10 ώρες κατά προσέγγιση και χαμηλότερα τις επόμενες συγκριτικά με τη μέθοδο IDW, σύμφωνα με τα Σχήματα 4.1, 4.2 και 4.5. Ωστόσο, στα επεισόδια 3 (Σχήμα 4.3) και 4 (Σχήμα 4.4) οι εκτιμήσεις της επιφανειακής βροχόπτωσης με τις δύο μεθόδους συνάδουν σχεδόν στο απόλυτο, ενώ η ελάχιστη απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ τους οφείλεται στις υψηλότερες τιμές βροχής που δίνει η μέθοδος Thiessen.



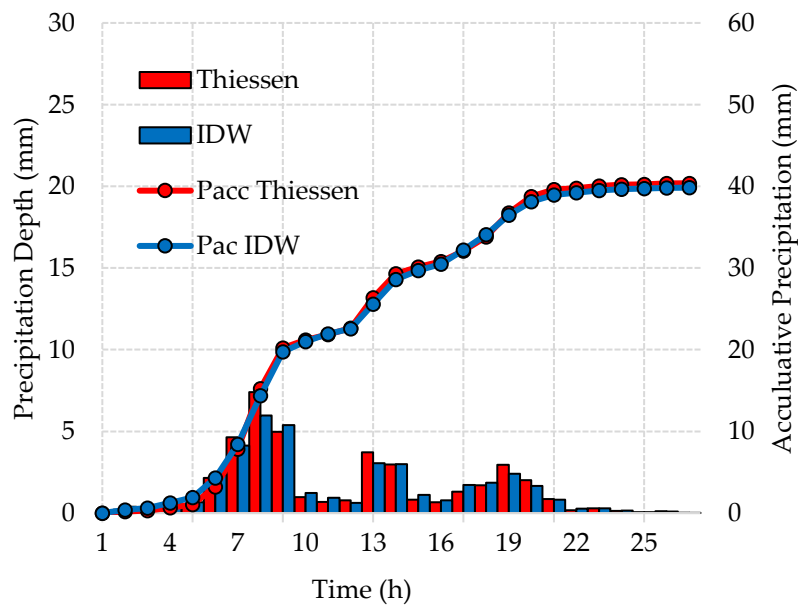
Σχήμα 4.1: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW - Επεισόδιο 1



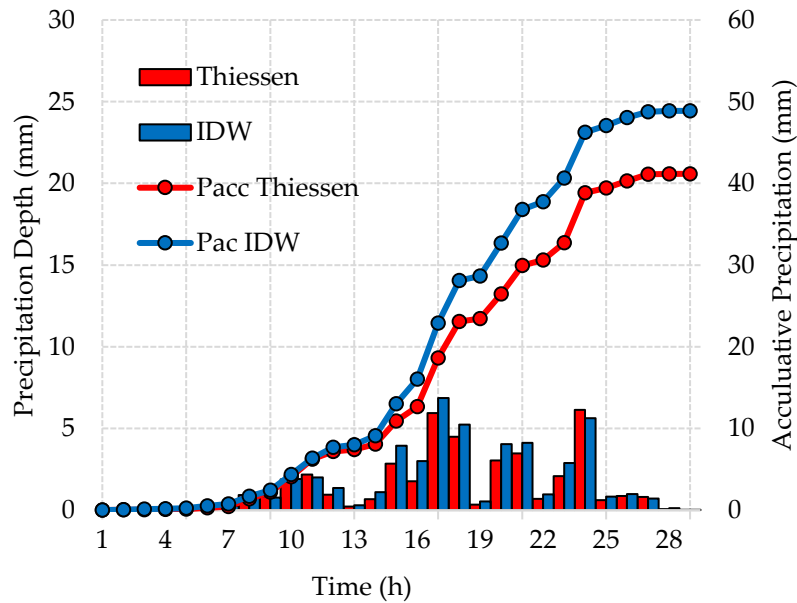
Σχήμα 4.2: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW - Επεισόδιο 2



Σχήμα 4.3: Επιφανειακή βροχοπτώση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 3



Σχήμα 4.4: Επιφανειακή βροχοπτώση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 4

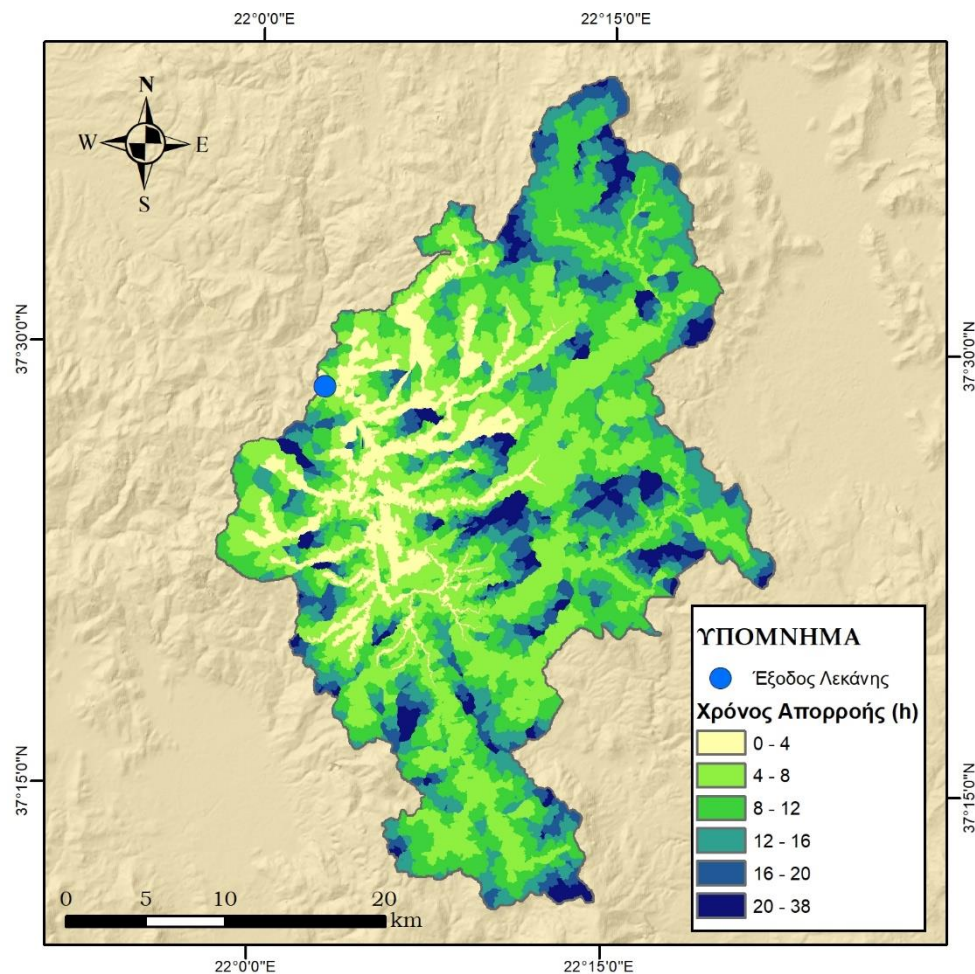


Σχήμα 4.5: Επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen και κατά IDW – Επεισόδιο 5

4.3 Προσομοιώσεις επεισοδίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης των επιλεγμένων επεισοδίων στη ΛΑΠ της Καρύταινας ανά επεισόδιο βροχής. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται η αθροιστική επιφανειακή κατανομή της βροχόπτωσης και των συνολικών απωλειών στην έκταση της περιοχής μελέτης, καθώς και τα πλημμυρογράφημα στην έξοδο της ΛΑΠ, Καρύταινα, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του πλήρως κατανεμημένου μοντέλου (Model), των ισόχρονων καμπυλών (Isochrone) και της θεωρίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος για δεδομένο ΜΥΓ (UH). Επιπλέον, στο ίδιο γράφημα αναπαρίσταται η παρατηρημένη χρονοσειρά παροχών (Observed) για το αντίστοιχο ιστορικό επεισόδιο. Στον δευτερεύοντα οριζόντιο άξονα του ίδιου γραφήματος απεικονίζεται η επιφανειακή βροχόπτωση που προκάλεσε το συγκεκριμένο πλημμυρογράφημα. Τέλος, παρουσιάζονται πινακοποιημένα τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε υδρογραφήματος.

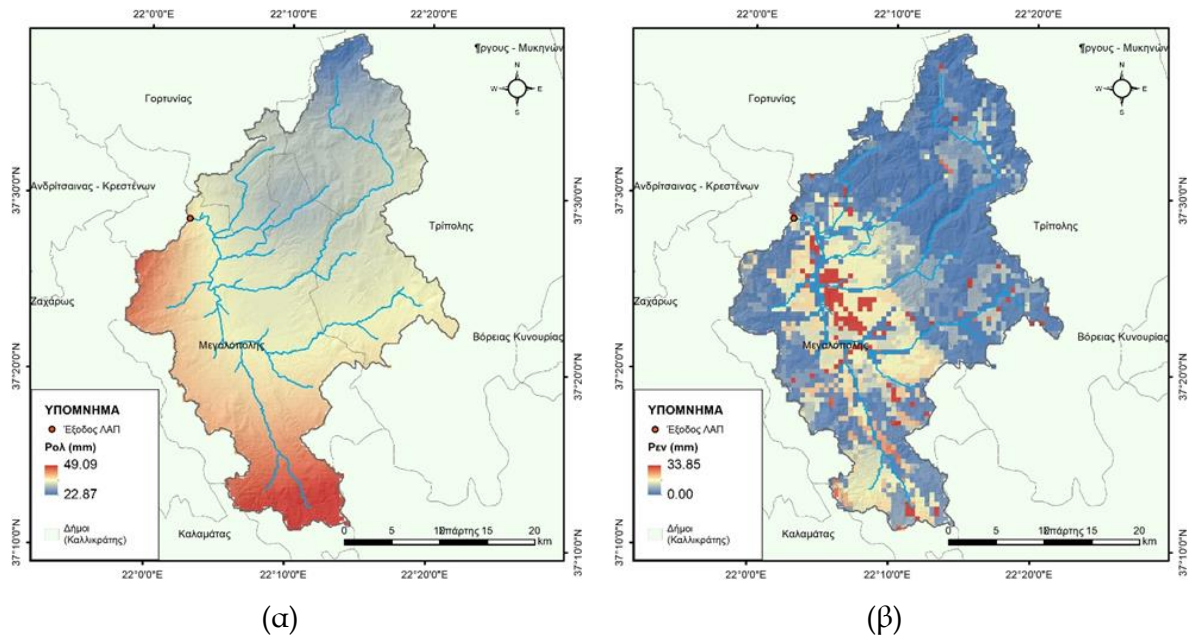
Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται οι χρόνοι απορροής στην έξοδο της λεκάνης, όπως υπολογίστηκαν από την εφαρμογή των ισόχρονων καμπυλών.



Σχήμα 4.6: Χρόνοι απορροής στη ΛΑΠ της Καρύταινας

4.3.1 Επεισόδιο 1 - 01/03/2013

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.7, υψηλότερα ύψη βροχής εντοπίζονται στο νότιο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, ενώ χαμηλότερη είναι η βροχόπτωση στα βόρεια και ανατολικά τμήματα της περιοχής μελέτης. Το νερό που δέχονται οι περιοχές με τα υψηλότερα κατακρημνίσματα απορρέει σχετικά νωρίς στην έξοδο της λεκάνης, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6, γεγονός που δικαιολογεί το χρονικά μετατοπισμένο πλημμυρογράφημα που προέκυψε από την εφαρμογή του καταναμημένου μοντέλου σε σχέση με το αντίστοιχο παρατηρημένο (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.7: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση - Επεισόδιο 1

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος - Επεισόδιο 1

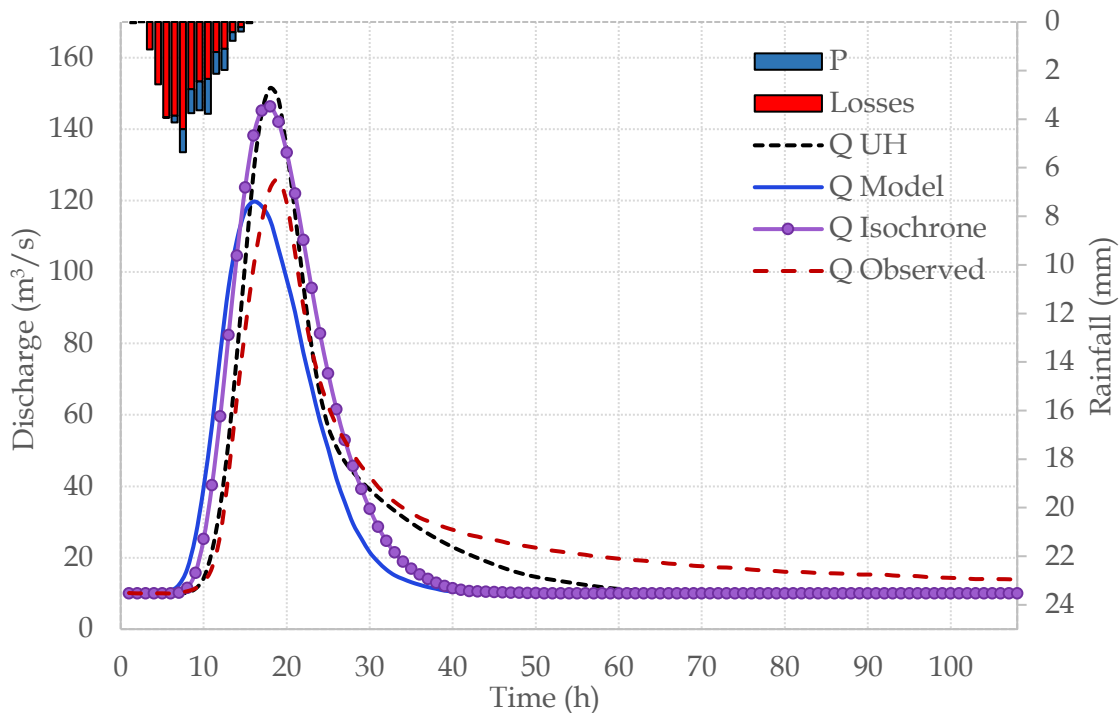
Επεισόδιο 1 - 01/03/2013					
Μοντέλο	Ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Κατανεμημένο	33.68	30.35	119.69	16	5.05
Ισόχρονες	33.68	26.51	146.32	18	6.24
ΜΥΓ	33.68	26.51	151.51	18	6.27
Παρατηρημένο			125.86	19	7.39

Αναφορικά με την προσομοίωση της παροχής αιχμής, το μοντέλο οδηγεί σε υποεκτίμηση της τιμής της κατά 5%, η οποία εμφανίζεται τρεις ώρες νωρίτερα σε σχέση με την πραγματική. Η απόκλιση μεταξύ πραγματικού και προσομοιωμένου πλημμυρογραφήματος είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση εφαρμογής συγκεντρωτικού μοντέλου βροχής - απορροής, καθώς παρατηρείται υπερεκτίμηση της παροχής αιχμής κατά 16% και 20% εφαρμόζοντας το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών και του ΜΥΓ, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην προσέγγιση του χρόνου εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής, η επίδοση των μοντέλων αδιαμέριστης χωρικής κλίμακας είναι καλύτερη συγκριτικά με το κατανεμημένο μοντέλο, όπως γίνεται εμφανές από τον Πίνακα 4.2. Η απόκλιση στην εκτίμηση της παροχής αιχμής μεταξύ του κατανεμημένου και των συγκεντρωτικών μοντέλων δικαιολογείται από τη διαφορά στην ενεργό βροχόπτωση.

Η θεώρηση ενιαίου CN που έγινε στα συγκεντρωτικά μοντέλα οδήγησε σε λιγότερες απώλειες συγκριτικά με το κατανεμημένο μοντέλο, όπου εφαρμόστηκε χωρική διακριτοποίηση του CN.

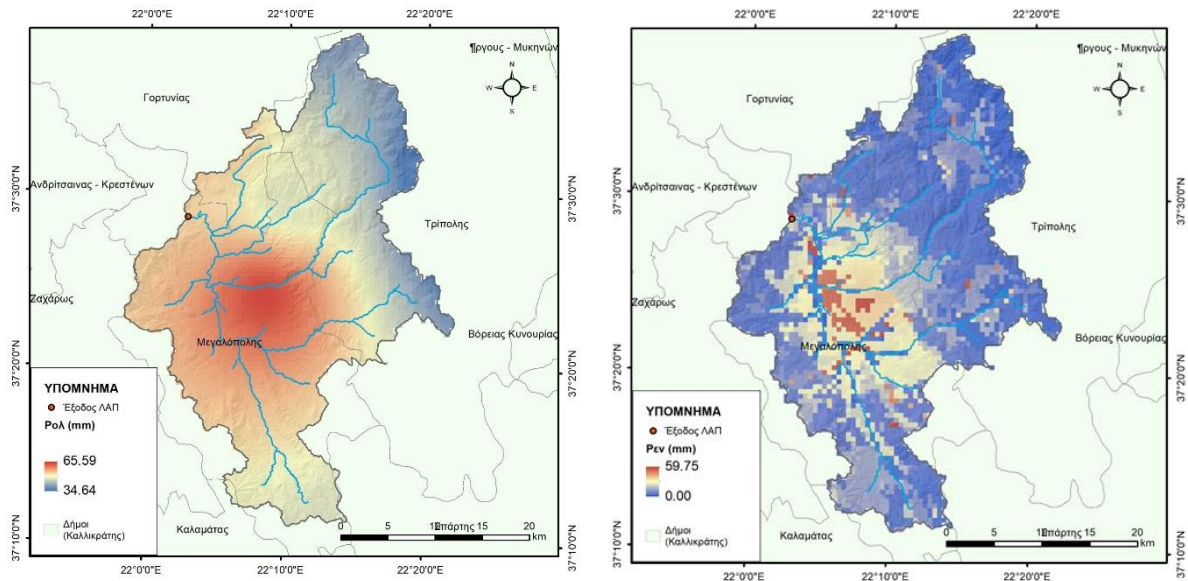
Η κλίση του ανοδικού κλάδου του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος συμφωνεί σε μεγάλο ποσοστό με την αντίστοιχη των πλημμυρογραφημάτων που παράχθηκαν από την εφαρμογή μοντέλου, με την καλύτερη προσέγγιση να επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας το μοντέλο του δεδομένου ΜΥΓ. Ο πλημμυρικός όγκος προσεγγίζεται ορθότερα με το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ.



Σχήμα 4.8: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα - Επεισόδιο 1

4.3.2 Επεισόδιο 2 - 01/03/2014

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.9, υψηλότερα ύψη βροχής εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, ενώ χαμηλότερη είναι η βροχόπτωση στα βόρεια και ανατολικά τμήματα της περιοχής μελέτης.



(α) (β)
Σχήμα 4.9: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 2

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος – Επεισόδιο 2

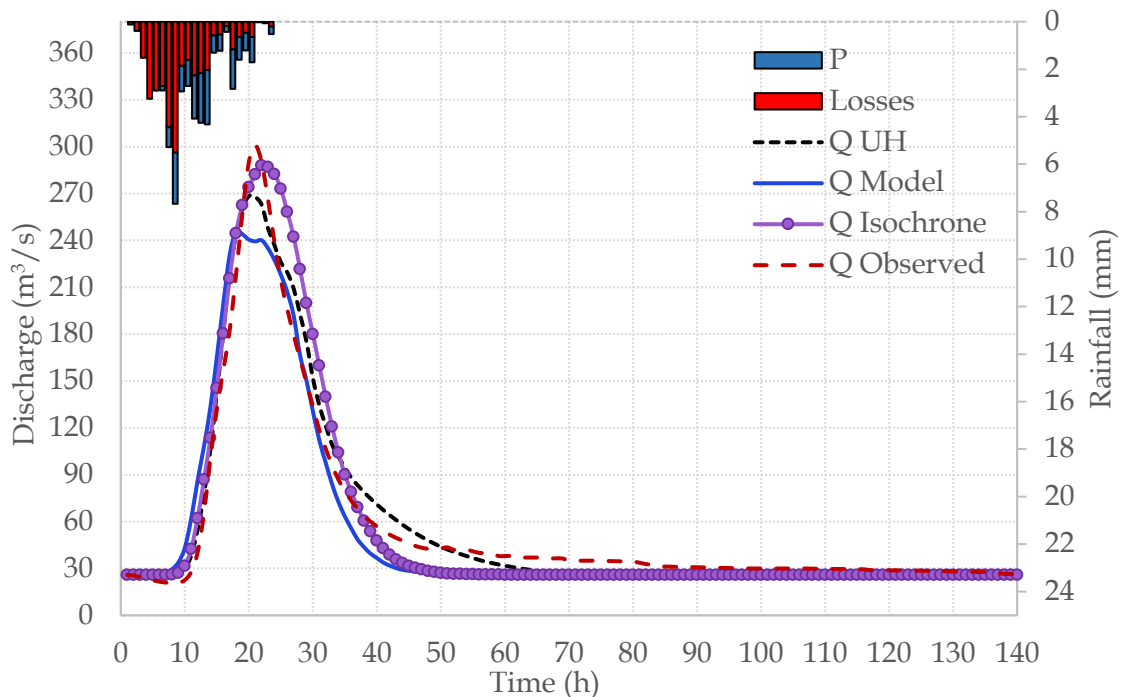
Επεισόδιο 2 - 01/03/2014					
Μοντέλο	Ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Κατανεμημένο	53.25	42.37	245.89	18	13.16
Ισόχρονες	53.25	35.21	288.06	22	15.72
ΜΥΓ	53.25	35.21	268.36	20	15.78
Παρατηρημένο			300.81	21	15.81

Με βάση το Σχήμα 4.10 και τον Πίνακα 4.3, η πλημμυρική αιχμή προσεγγίζεται ορθότερα από το μοντέλο των ισόχρονων, με απόκλιση της τάξης του 4%, η οποία αυξάνεται σε 11% και 18% στην περίπτωση εφαρμογής του ΜΥΓ και του κατανεμημένου μοντέλου, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στο χρόνο αιχμής, το μοντέλο των ισόχρονων οδηγεί σε υπερεκτίμησή του κατά 5%, ενώ η προσέγγισή του με βάση το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ και το κατανεμημένο μοντέλο αποκλίνει από τον πραγματικό με ποσοστά υποεκτίμησης 5% και 14%, αντίστοιχα. Αριθμητικά, τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε υδρογραφήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Επιπλέον, παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό συμφωνία του ανοδικού κλάδου των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων με τον αντίστοιχο κλάδο του παρατηρημένου

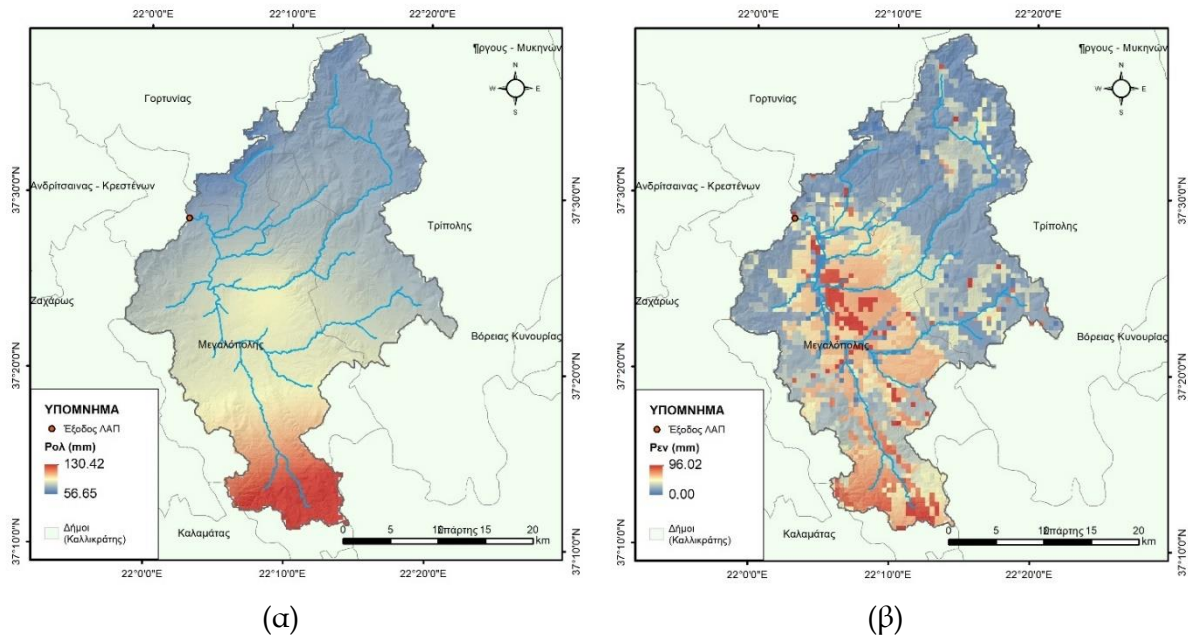
πλημμυρογράφηματος. Ο πλημμυρικός όγκος προσεγγίζεται σχεδόν στο 100% στην περίπτωση των συγκεντρωτικών μοντέλων και σε ποσοστό 83% με την εφαρμογή του καταναμημένου μοντέλου.



Σχήμα 4.10: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα - Επεισόδιο 2

4.3.3 Επεισόδιο 3 - 23/01/2015

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.11, υψηλότερα ύψη βροχής εντοπίζονται στο νότιο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, τα οποία μειώνονται βαθμιαία στην κατεύθυνση προς το βόρειο τμήμα της. Το νερό που δέχονται οι περιοχές με τα υψηλότερα κατακρημνίσματα απορρέει σχετικά νωρίς στην έξοδο της λεκάνης, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6, γεγονός που δικαιολογεί το χρονικά μετατοπισμένο πλημμυρογράφημα που προέκυψε από την εφαρμογή του καταναμημένου μοντέλου σε σχέση με το αντίστοιχο παρατηρημένο (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.11: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 3

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος – Επεισόδιο 3

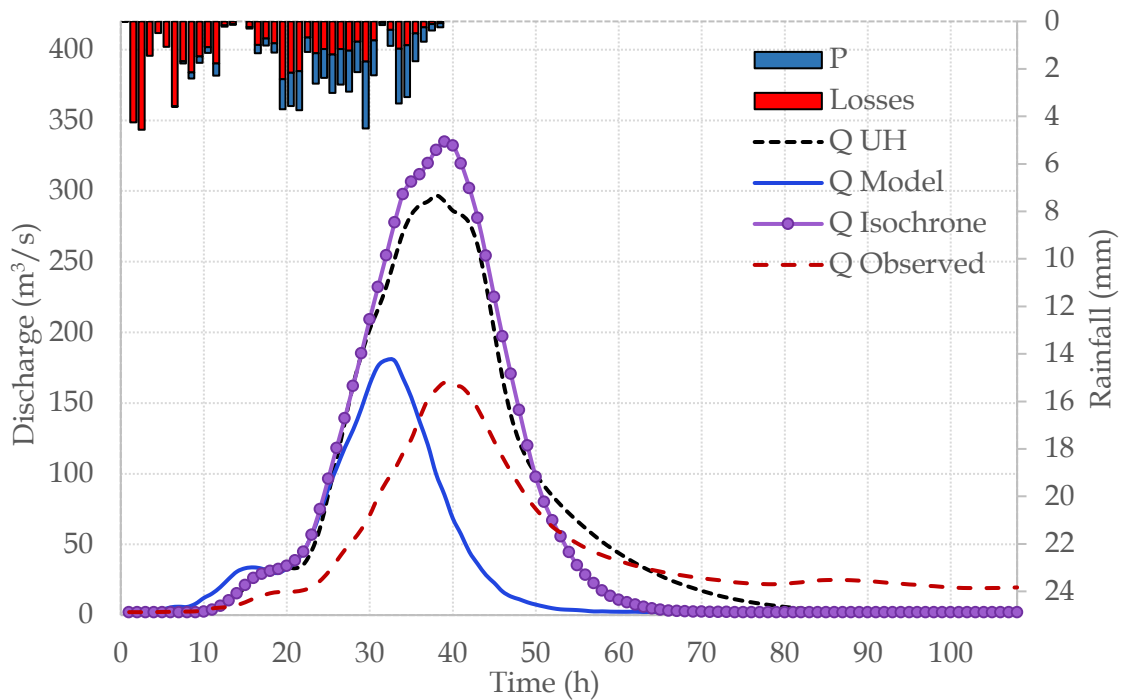
Επεισόδιο 3 - 23/01/2015					
Μοντέλο	Ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Κατανεμημένο	75.12	52.77	180.41	32	10.19
Ισόχρονες	75.12	47.21	335.07	39	24.31
ΜΥΓ	75.12	47.21	296.87	38	24.41
Παρατηρημένο			164.4	39	15.95

Με βάση το Σχήμα 4.12, το κατανεμημένο μοντέλο προσομοιώνει αποτελεσματικά την παροχή αιχμής, σε αντίθεση με τα συγκεντρωτικά μοντέλα τα οποία παρουσιάζουν σημαντική αδυναμία στην προσομοίωση της μέγιστης παροχής.

Ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής προσεγγίζεται σχεδόν στο απόλυτο, με βάση τα δύο συγκεντρωτικά μοντέλα, ενώ το κατανεμημένο μοντέλο, οδηγεί σε υποεκτίμησή του κατά επτά ώρες. Αριθμητικά, τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε υδρογραφήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Η κλίση του ανοδικού κλάδου του υδρογραφήματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του παρατηρημένου και για τα τρία μοντέλα, με πιο αισθητή την απόκλιση των συγκεντρωτικών μοντέλων. Η προσέγγιση του πλημμυρικού όγκου με βάση το κατανεμημένο μοντέλο επιτυγχάνεται σε ποσοστό 64%, ενώ μέσω της προσομοίωσης

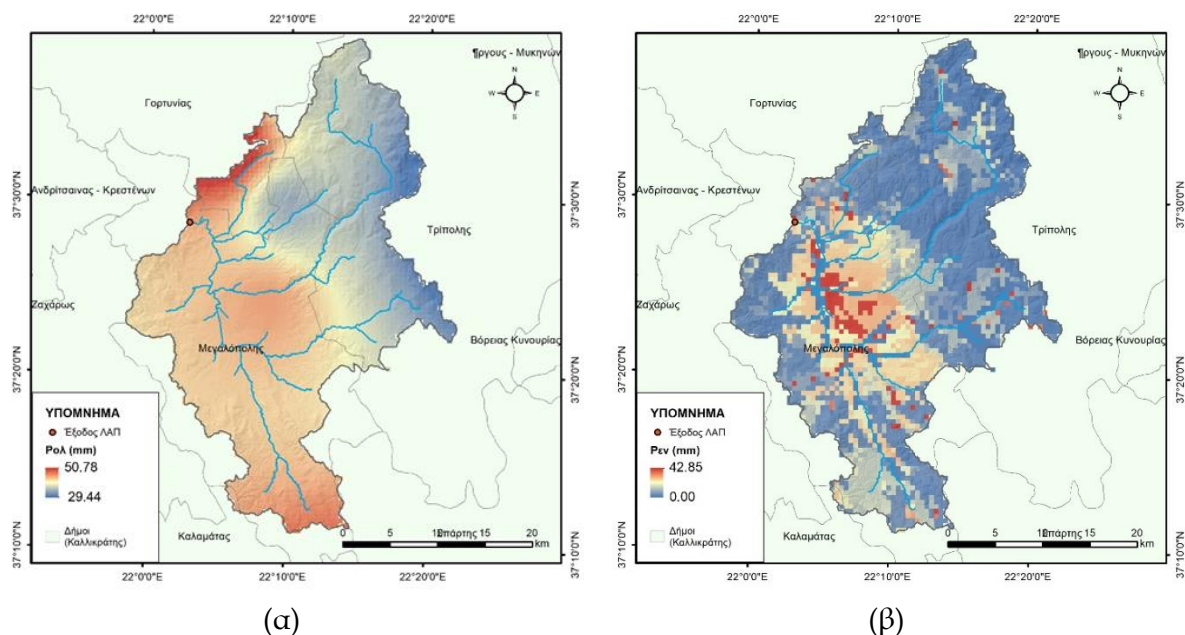
του επεισοδίου με συγκεντρωτικό μοντέλο παράγονται πλημμυρογράφηματα όγκου μεγαλύτερου του παρατηρημένου κατά 50%.



Σχήμα 4.12: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα - Επεισόδιο 3

4.3.4 Επεισόδιο 4 - 26/02/2015

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13, υψηλά ύψη βροχής σημειώθηκαν κοντά στην έξοδο της λεκάνης, καθώς και στο κεντρικό και νότια τμήμα της, ενώ μικρότερα κατακρημνίσματα κατέγραψαν οι σταθμοί στα βόρεια και βορειοανατολικά της υδρολογικής λεκάνης. Το νερό που δέχονται οι περιοχές με τα υψηλότερα κατακρημνίσματα απορρέει σχετικά νωρίς στην έξοδο της λεκάνης, σύμφωνα με το Σχήμα 4.6, γεγονός που δικαιολογεί το χρονικά μετατοπισμένο πλημμυρογράφημα που προέκυψε από την εφαρμογή του κατανεμημένου μοντέλου σε σχέση με το αντίστοιχο παρατηρημένο (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.13: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχοπτώση – Επεισόδιο 4

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος – Επεισόδιο 4

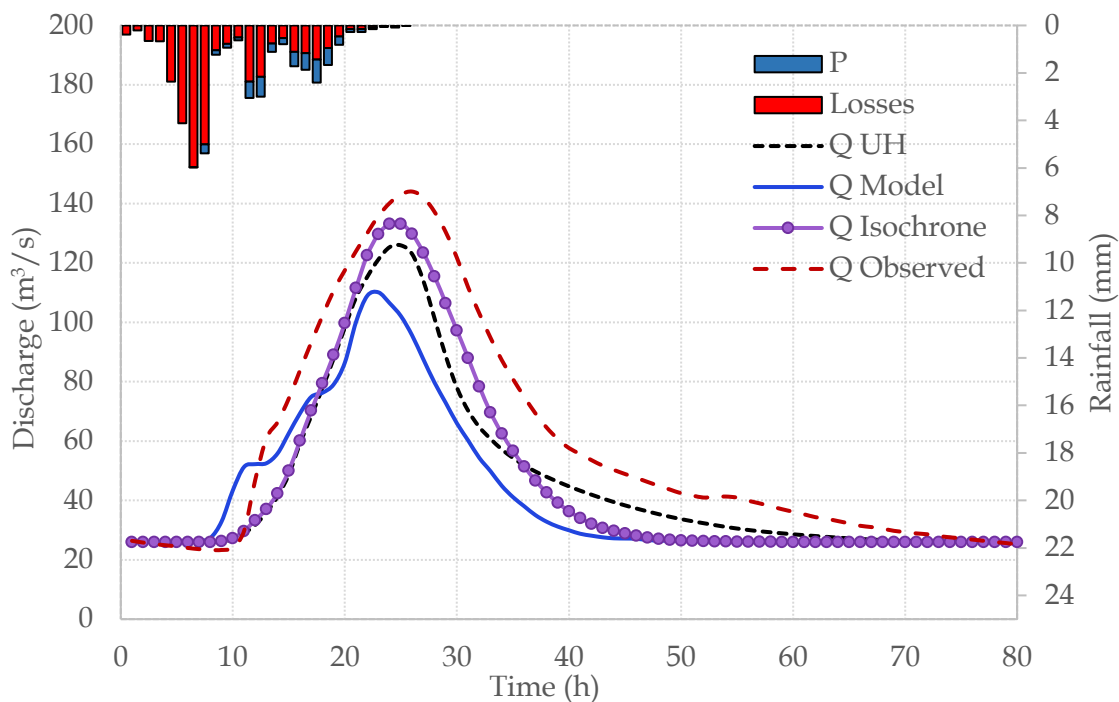
Επεισόδιο 4 - 26/02/2015					
Μοντέλο	Ολικό ύψος βροχοπτώσης (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Κατανεμημένο	39.83	34.61	110.08	23	4.56
Ισόχρονες	39.83	33.14	133.19	24	5.84
ΜΥΓ	39.83	33.14	125.92	25	5.86
Παρατηρημένο			144.04	26	9.34

Λαμβάνοντας υπόψη τα γραφήματα του Σχήματος 4.14 και τις τιμές του Πίνακα 4.5, προκύπτει ότι τα μοντέλα των ισόχρονων και του ΜΥΓ προσομοιώνουν σε ικανοποιητικό βαθμό την παροχή αιχμής, ενώ το κατανεμημένο μοντέλο οδηγεί σε υποεκτίμηση της πλημμυρικής παροχής κατά 23.6%.

Όσον αφορά στην προσέγγιση του χρόνου αιχμής, και τα τρία μοντέλα που εφαρμόστηκαν πλησιάζουν την πραγματική τιμή, με το μοντέλο του ΜΥΓ να υπερέχει έναντι των άλλων δύο. Αριθμητικά, τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε υδρογραφήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Τα προσομοιωμένα με χρήση συγκεντρωτικού μοντέλου πλημμυρογραφήματα παρουσιάζουν σημαντική ομοιότητα σε σχέση με το παρατηρημένο αναφορικά με την κλίση του ανοδικού τους κλάδου. Αντίθετα, η ενσωμάτωση της χωρικής διακριτότητας της βροχής στην υδρολογική ανάλυση καθιστά το μοντέλο πιο ευαίσθητο στην

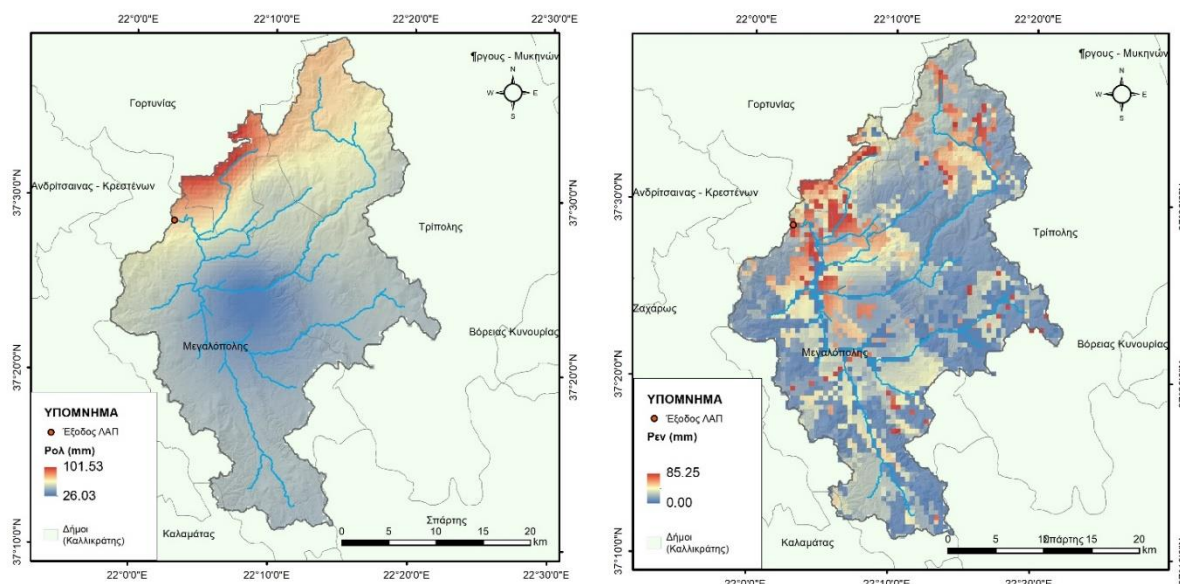
εναλλαγή του ύψους βροχής, όπως αποδεικνύεται από τα μικρά άλματα που εμφανίζονται στον ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος του καταμεμημένου μοντέλου. Η διακύμανση της παροχής σε αυτά τα σημεία προέρχεται από την ύπαρξη συνεχόμενων σχεδόν μηδενικών ωριαίων παρατηρήσεων βροχής, όπως αποδεικνύεται από το αντίστοιχο υετόγραμμα, οπότε και μειώνεται η απορροή έως να εμφανιστούν και πάλι μη μηδενικές παρατηρήσεις βροχής και η καμπύλη ανόδου να γίνει ξανά αύξουσα συνάρτηση του χρόνου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και σε άλλα επεισόδια, ωστόσο δεν είναι εξίσου εμφανές λόγω της μεγάλης διάρκειας απορροής.



Σχήμα 4.14: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα - Επεισόδιο 4

4.3.5 Επεισόδιο 5 - 05/03/2015

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.15 (α), οι περιοχές βόρεια και βορειοανατολικά της Καρύταινας δέχονται το μεγαλύτερο όγκο βροχής. Μετά την αφαίρεση των απωλειών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15 (β), η αθροιστική ενεργός βροχοπτώση είναι υψηλότερη στις αντίστοιχες περιοχές και επιπλέον στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης που εκτείνεται γύρω από το κύριο υδατόρευμα. Καθώς η περισσότερη βροχή συγκεντρώνεται εκτός από το κεντρικό τμήμα και σε απομακρυσμένες από την έξοδο περιοχές στα βόρεια της λεκάνης οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλους χρόνους απορροής, η προσομοιωμένη αιχμή εμφανίζεται με χρονική καθυστέρηση σε σχέση με την παρατηρημένη.



(α) (β)
 Σχήμα 4.15: Ολική (α) και ενεργός (β) βροχόπτωση – Επεισόδιο 5

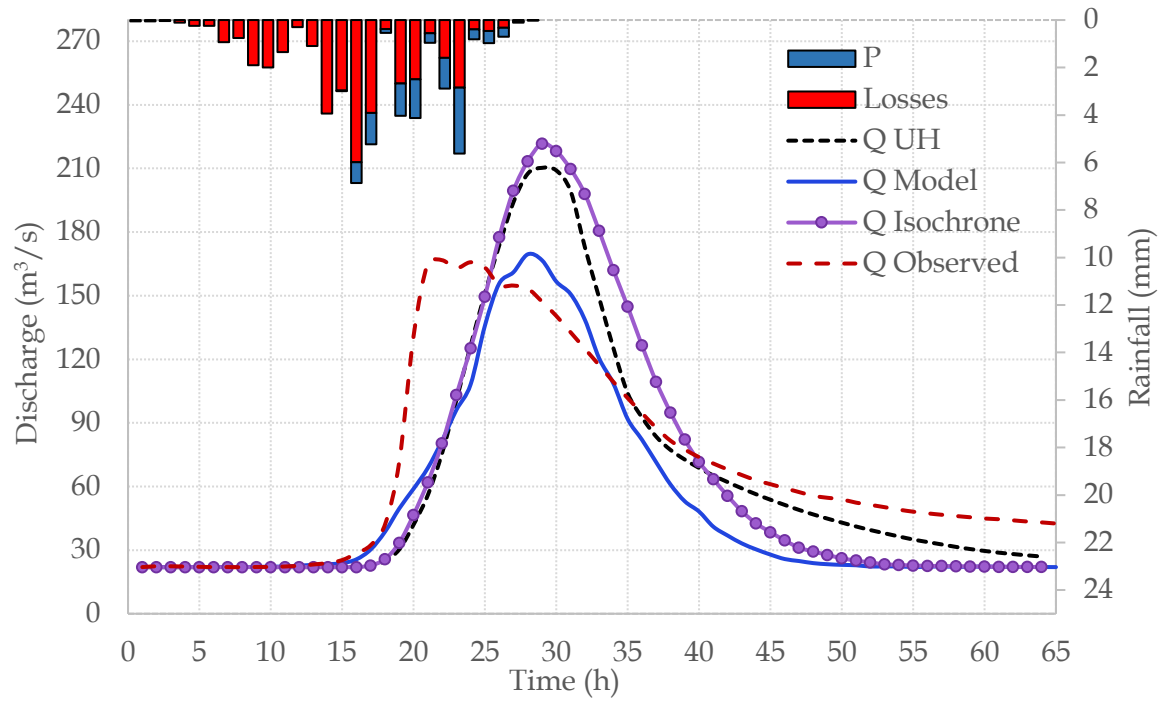
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματος – Επεισόδιο 5

Επεισόδιο 5 - 05/03/2015					
Μοντέλο	Ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	Συνολικές απώλειες (mm)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος αιχμής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Κατανεμημένο	48.87	40.81	169.52	28	7.05
Ισόχρονες	48.87	37.63	221.63	29	9.79
ΜΥΓ	48.87	37.63	210.29	29	9.75
Παρατηρημένο			166.74	22	11.08

Με βάση τον Πίνακα 4.6 και το Σχήμα 4.16, στην προσομοίωση του συγκεκριμένου επεισοδίου το πλήρως κατανεμημένο μοντέλο προσεγγίζει σε ποσοστό 98% την παρατηρημένη παροχή αιχμής, ενώ τα μοντέλα των ισόχρονων και του δεδομένου ΜΥΓ οδηγούν σε υπερεκτίμηση της τιμής αυτής κατά 33% και 26%, αντίστοιχα. Η υπερεκτίμηση της παροχής οφείλεται στο μικρότερο ποσοστό απωλειών και, επομένως, τη μεγαλύτερη ενεργό βροχόπτωση που λαμβάνεται υπόψη στα συγκεντρωτικά μοντέλα.

Αναφορικά με το χρόνο αιχμής, παρατηρείται απόκλιση μεταξύ του προσομοιωμένου και του παρατηρημένου κατά 27%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό υπερεκτίμησης εφαρμόζοντας τα δύο συγκεντρωτικά μοντέλα φτάνει το 32%.

Ο ανοδικός κλάδος του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος είναι πιο απότομος σε σχέση με τον ανοδικό κλάδο των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων. Ο πλημμυρικός όγκος υποεκτιμάται σε σχέση με τον πραγματικό σε ποσοστό 36% και 9.8% στην περίπτωση εφαρμογής κατανεμημένου και συγκεντρωτικού μοντέλου, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.16: Πλημμυρογράφημα στη θέση Καρύταινα – Επεισόδιο 5

4.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Ανακεφαλαιωτικά, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3 και συνοψίζονται στον Πίνακα 4.7 και τον Πίνακα 4.8, αξίζει να επισημανθούν ορισμένα σημεία για τη γενικότερη κατανόηση της συμπεριφοράς των τριών μοντέλων.

Πίνακας 4.7: Εκτίμηση παροχής αιχμής με χρήση μοντέλου βροχής - απορροής

Επεισόδιο	Ολικό ύψος βροχοπτώσης (mm)	Διάρκεια Βροχής (h)	Παροχή Αιχμής (m ³ /s)		Διαφορά Παροχής Αιχμής (%)	
			Παρατηρημένο	Κατανεμημένο	Ισόχρονες	ΜΥΓ
1	34	15	125.86	-4.9%	16.3%	20.4%
2	53	24	300.81	-18.3%	-4.2%	-10.8%
3	75	39	164.40	9.7%	103.8%	80.6%
4	40	26	144.04	-23.6%	-7.5%	-12.6%
5	49	28	166.74	1.7%	32.9%	26.1%

Πίνακας 4.8: Εκτίμηση χρόνου αιχμής με χρήση μοντέλου βροχής - απορροής

Επεισόδιο	Ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)	Διάρκεια Βροχής (h)	Χρόνος Αιχμής (h)		Διαφορά Χρόνου Αιχμής (%)		
			Παρατηρημένο	Καταναμημένο	Ισόχρονες	ΜΥΓ	
1	34	15	19	-15.8%	-5.3%	-5.3%	
2	53	24	21	-14.3%	4.8%	-4.8%	
3	75	39	39	-17.9%	0.0%	-2.6%	
4	40	26	26	-11.5%	-7.7%	-3.8%	
5	49	28	22	27.3%	31.8%	31.8%	

Στο σύνολο των επεισοδίων βροχής που αναλύθηκαν, τα συγκεντρωτικά μοντέλα οδήγησαν σε μεγαλύτερες τιμές παροχής αιχμής και πλημμυρικού όγκου συγκριτικά με το καταναμημένο μοντέλο, γεγονός που οφείλεται στο μικρότερο ποσοστό απωλειών που προέκυψε σε αυτά από την παραδοχή ενιαίου CN σε όλη τη λεκάνη απορροής και ίσου με τη μέση τιμή των χωρικά καταναμημένων CN.

Στις περιπτώσεις που τα μεγαλύτερα ύψη βροχής σημειώθηκαν στα κεντρικά και νότια τμήματα της υδρολογικής λεκάνης (επεισόδια 1, 2, 3 και 4), η αιχμή τείνει να εμφανίζεται νωρίτερα σε σχέση με την παρατηρημένη για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Η συστηματική αυτή υποεκτίμηση του χρόνου αιχμής εξηγείται από το μικρό χρόνο που απαιτείται για να απορρεύσει ο όγκος νερού που δέχονται οι εν λόγω περιοχές στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Στο 60% των επεισοδίων που εξετάστηκαν, το πλήρως καταναμημένο μοντέλο προσεγγίζει την παρατηρημένη παροχή αιχμής σε ποσοστό μεγαλύτερο ή ίσο του 90%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό προσέγγισης εφαρμόζοντας το μοντέλο των ισόχρονων ή του δεδομένου ΜΥΓ επιτυγχάνεται στο 40% και στο 20% των επιλεγμένων προς υδρολογική προσομοίωση επεισοδίων, αντίστοιχα.

Αναφορικά με την επίδοση των μοντέλων στην προσομοίωση του χρόνου αιχμής, το πλήρως καταναμημένο μοντέλο οδηγεί σε υποεκτίμηση της τάξης του 15% κατά μέσο όρο στα 4 από τα 5 επεισόδια και υπερεκτίμηση κατά 27% στο επεισόδιο που σημειώθηκε στις 05/03/2015. Το μοντέλο των ισόχρονων καμψλών στο 80% των επεισοδίων προσεγγίζει τον παρατηρημένο χρόνο αιχμής σε ποσοστό μεγαλύτερο του 92%, ενώ το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ σε ποσοστό μεγαλύτερο του 95%. Η καλή προσαρμογή του μοντέλου του δεδομένου ΜΥΓ στις παρατηρημένες τιμές οφείλεται ενδεχομένως στο γεγονός ότι το δεδομένο ΜΥΓ βαθμονομήθηκε με βάση πραγματικά

δεδομένα, επομένως εμφανίζει καλύτερη απόκριση όσον αφορά στην προσομοίωση του χρόνου αιχμής.

Ο πλημμυρικός όγκος που προκύπτει από την προσομοίωση επεισοδίων βροχής με τη χρήση μοντέλου είναι ως επί το πλείστον μικρότερος του παρατηρημένου. Παρατηρώντας τη μορφή των πλημμυρογραφήματων, εντοπίζεται σημαντική διαφοροποίηση στον καθοδικό κλάδο του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος η οποία αυξάνει τον τελικό υδάτινο όγκο στην έξοδο.

Η συμπεριφορά των δύο συγκεντρωτικών μοντέλων παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες, όπως γίνεται φανερό παρατηρώντας τα αποτελέσματα, το οποίο ήταν αναμενόμενο, καθώς το ΜΥΓ που παράχθηκε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών προέκυψε με χειροκίνητη βαθμονόμηση των ταχυτήτων ροής, ώστε να προσεγγίζει το δεδομένο ΜΥΓ που έχει προκύψει από μετρήσεις πεδίου.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα συγκεντρωτικά μοντέλα ανταποκρίνονται σε κάποιο βαθμό στην προσομοίωση όλων των επεισοδίων που μελετήθηκαν, με εξαίρεση το επεισόδιο που καταγράφηκε στις 23/01/2015, για το οποίο η εκτίμηση αποκλίνει κατά πολύ από την πραγματικότητα. Το κατανεμημένο μοντέλο, αντίθετα, οδηγεί σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στο συγκεκριμένο συμβάν, ενώ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την προσομοίωση όλων των επεισοδίων. Στο συγκεκριμένο επεισόδιο τα μεγαλύτερα ύψη βροχής σημειώθηκαν στα κεντρικά και νότια τμήματα της λεκάνης, περιοχές κοντά στην έξοδο και στο κύριο υδατόρευμα, αντίστοιχα, γεγονός το οποίο αιτιολογεί τη νωρίτερη απόκριση της λεκάνης στην περίπτωση εφαρμογής του κατανεμημένου μοντέλου.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι στο επεισόδιο που εκδηλώθηκε στις 05/03/2015 (επεισόδιο 5), όπου η περισσότερη βροχή έπεσε στα βόρεια και κεντρικά της λεκάνης απορροής, τα μοντέλα δίνουν υψηλότερη αιχμή, η οποία εμφανίζεται με υστέρηση κάποιων ωρών, σε σύγκριση με την πλημμυρική παροχή του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος. Οι περιοχές αυτές, σύμφωνα με το Σχήμα 3.1, χαρακτηρίζονται από μεσαίες προς υψηλές τιμές CN, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή, ενώ όσον αφορά στα βόρεια τμήματα αυτά είναι αρκετά απομακρυσμένα από το κύριο υδατόρευμα, επομένως το νερό που δέχονται κατευθύνεται με χαμηλότερη ταχύτητα προς την έξοδο, γεγονός που εξηγεί εν μέρει τη χρονική υστέρηση που παρατηρείται μεταξύ προσομοιωμένου και παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι με την ενσωμάτωση της χωρικής διακριτοποίησης της μεταβλητής της βροχόπτωσης στο μοντέλο βροχής - απορροής δεν εξασφαλίζονται καλύτερα αποτελέσματα από αυτά ενός συγκεντρωτικού μοντέλου που λαμβάνει ως δεδομένο εισόδο μια μέση τιμή βροχόπτωσης, αντιπροσωπευτική για όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης. Στην περίπτωση του κατανεμημένου μοντέλου αυξάνεται ο αριθμός των παραμέτρων και κατ' επέκταση ο βαθμός αβεβαιότητας που εμπεριέχεται σε αυτό. Επιπροσθέτως, παράγοντες όπως το μέγεθος της λεκάνης απορροής και η χωρική ανομοιομορφία της βροχής είναι καθοριστικοί για την επίδοση του μοντέλου. Σημαντική είναι, επίσης, η επίδραση της χωρικής κατανομής των υδρομετεωρολογικών σταθμών, καθώς και της ορθότητας και επάρκειας των διαθέσιμων δεδομένων καταγραφών τους. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η επίδοση ενός κατανεμημένου μοντέλου στην προσομοίωση και πρόβλεψη της υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής σε ένα δεδομένο επεισόδιο βροχόπτωσης είναι συνισταμένη ποικίλων παραγόντων.

Τέλος, αξίζει να ληφθεί υπόψη ότι ο παράγοντας της αβεβαιότητας και του σφάλματος υπεισέρχεται όχι μόνο στη διαδικασία μοντελοποίησης μιας διεργασίας, αλλά και στην ίδια τη μέτρηση πεδίου, με βάση την οποία αξιολογείται η ακρίβεια του μοντέλου. Επομένως, τα αποτελέσματα της σύγκρισης προσομοιωμένων και πραγματικών τιμών για περιορισμένο αριθμό ιστορικών επεισοδίων συνεισφέρουν στη διαμόρφωση μιας σφαιρικής εικόνας όσον αφορά στη συμπεριφορά του εκάστοτε μοντέλου και όχι στον απόλυτο χαρακτηρισμό του ως κατάλληλο ή μη κατάλληλο.

5 Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα

5.1 Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε ένα πλήρως καταναμημένο μοντέλο βροχής - απορροής με χρήση τεχνικών GIS. Σκοπός του μοντέλου είναι η πρόβλεψη της υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής σε επεισόδια βροχής ικανά να προκαλέσουν πλημμύρα. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής της Καρύταινας, τμήμα της ευρύτερης λεκάνης του Αλφειού ποταμού, η οποία ανήκει γεωγραφικά στο υδατικό διαμέρισμα της Δυτικής Πελοποννήσου. Η αυτοματοποίηση και ο προγραμματισμός των απαραίτητων διεργασιών επιτυγχάνεται σε περιβάλλον GIS και ArcPy. Το μοντέλο λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου το DEM και έναν κানাβο βροχόπτωσης και μέσω μιας σειράς διεργασιών μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή, παράγει το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης με χρονικό βήμα μίας ώρας. Ο κানাβος βροχόπτωσης προέκυψε από την επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών παρατηρήσεων βροχομετρικών σταθμών με εφαρμογή της μεθόδου IDW. Η μετατροπή της καταναμημένης βροχής σε απορροή έγινε αξιοποιώντας τη μέθοδο χρόνου - επιφάνειας. Συμπληρωματικά, αναπτύχθηκαν δύο συγκεντρωτικά μοντέλα βροχής - απορροής χρονικής διακριτοποίησης μίας ώρας τα οποία δε λαμβάνουν υπόψη τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, ενώ η δομή τους θεμελιώνεται στη θεωρία των ισόχρονων καμπυλών και του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν αξιοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση πέντε ιστορικών επεισοδίων για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμες παρατηρήσεις βροχόπτωσης, καθώς επίσης και δεδομένα παροχής. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ελέγχθηκε η προσαρμογή του προσομοιωμένου με τη χρήση μοντέλου πλημμυρογραφήματος στο πραγματικό υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Τέλος, διενεργήθηκε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, η οποία οδήγησε σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα που μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

5.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός πλήρως καταναμημένου μοντέλου βροχής - απορροής με χρήση μεθόδων ΣΓΠ για την προσομοίωση ιστορικών πλημμυρικών επεισοδίων στη λεκάνη απορροής της Καρύταινας, υπολεκάνη της υδρολογικής λεκάνης του Αλφειού

ποταμού στη δυτική Πελοπόννησο. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν δύο συγκεντρωτικά υδρολογικά μοντέλα τα οποία, ακολούθως, εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση των ίδιων επεισοδίων βροχής. Τα κυριότερα συμπεράσματα από τη συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων τόσο μεταξύ τους όσο και με την πραγματική απόκριση της λεκάνης απορροής συνοψίζονται παρακάτω:

- Η χωρική διακριτοποίηση της βροχόπτωσης σε επίπεδο κυττάρου διαφοροποιεί σημαντικά την απόκριση του υδρολογικού μοντέλου που εφαρμόζεται για την προσομοίωση των διεργασιών βροχής - απορροής.
- Η επιφανειακή βροχόπτωση διαφοροποιείται ανάλογα με τη μέθοδο επιφανειακής ολοκλήρωσης που εφαρμόζεται για το ίδιο επεισόδιο βροχής και για δεδομένη λεκάνη απορροής.
- Η ορθότητα των αποτελεσμάτων των μεθόδων και των μοντέλων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία εξαρτάται από την ακρίβεια των διαθέσιμων δεδομένων, καθώς και από τη διαδικασία ρύθμισης ορισμένων παραμέτρων για την εξεταζόμενη περιοχή μελέτης.
- Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η παράμετρος των υδρολογικών απωλειών, καθώς μικρή μεταβολή στην τιμή της δύναται να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση ολόκληρης της λεκάνης απορροής, συμπεριλαμβανομένης της παροχής αιχμής και του χρόνου στον οποίο εκείνη εμφανίζεται. Κατά τον προσδιορισμό των υδρολογικών απωλειών με τη μέθοδο SCS - CN, η απόδοση της ορθής τιμής του συντελεστή CN ανά κύτταρο είναι καθοριστικής σημασίας.
- Στο σύνολο των επεισοδίων βροχής που μελετήθηκαν, οι συνολικές υδρολογικές απώλειες είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση εφαρμογής του κατανεμημένου μοντέλου οδηγώντας συστηματικά σε χαμηλότερη ενεργό βροχόπτωση και μικρότερους πλημμυρικούς όγκους σε σύγκριση με τα ενιαία μοντέλα.
- Το κατανεμημένο μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην προσομοίωση του φυσικού συστήματος σε όλα τα επεισόδια βροχής που μελετήθηκαν, με δεδομένο ότι δεν έχει διενεργηθεί βαθμονόμηση της παραμέτρου των απωλειών του μοντέλου. Τα δύο συγκεντρωτικά μοντέλα παρουσιάζουν σημαντική αδυναμία στην εκτίμηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής σε ένα από τα πέντε ιστορικά επεισόδια που επιλέχθηκαν για υδρολογική προσομοίωση.

- Η απόκριση των δύο συγκεντρωτικών μοντέλων που βασίζονται στις αρχές του ΜΥΓ είναι παρόμοια, γεγονός αναμενόμενο, καθώς το ΜΥΓ που προέκυψε από τη μέθοδο χρόνου - επιφάνειας (μοντέλο ισόχρονων καμπυλών) βαθμονομήθηκε έτσι ώστε να προσεγγίζει ικανοποιητικά το παρατηρημένο ΜΥΓ (μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ) για τη λεκάνη απορροή της Καρύταινας.
- Αναφορικά με την παροχή αιχμής παρατηρείται απόκλιση μεταξύ προσομοιωμένης και παρατηρημένης τιμής σε ποσοστό 11.6%, 33% και 30% κατά μέσο όρο εφαρμόζοντας το κατανεμημένο μοντέλο, το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών και το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ, αντίστοιχα.
- Ο χρόνος αιχμής του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος προσεγγίζεται ορθότερα με εφαρμογή συγκεντρωτικού μοντέλου. Το ποσοστό απόκλισης για τα τρία μοντέλα ανέρχεται σε 17.4%, 9.9% και 9.7% κατά μέσο όρο για το κατανεμημένο μοντέλο, το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών και το μοντέλο δεδομένου ΜΥΓ, αντίστοιχα. Στην πλειονότητα των σεναρίων προσομοίωσης η απόκλιση του μοντέλου αφορά υποεκτίμηση του χρόνου εμφάνισης της παροχής αιχμής, η οποία οδηγεί σε προβλέψεις υπέρ της ασφαλείας.
- Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό συμφωνία του ανοδικού κλάδου μεταξύ προσομοιωμένου και παρατηρημένου υδρογραφήματος απορροής. Από τη μορφή του ανιόντος κλάδου γίνεται εμφανής η ευαισθησία του κατανεμημένου μοντέλου στη μεταβλητή της βροχόπτωσης.
- Στη ζώνη του λιγνιτικού πεδίου της Μεγαλόπολης, η οποία εντάσσεται στις περιοχές που δέχονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής στα επεισόδια που προσομοιώθηκαν, η απορροή στην έξοδο είναι άμεση και οι υδρολογικές απώλειες χαμηλές, λόγω της αδιαπερατότητας της εδαφικής επιφάνειας.

Καταλήγοντας, με βάση την υδρολογική προσομοίωση ιστορικών επεισοδίων πλημμύρας με χρήση κατανεμημένου και συγκεντρωτικού μοντέλου που διενεργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, γίνεται φανερό η επίδραση της χωρικής ανομοιομορφίας της βροχόπτωσης στη μορφή του υδρογραφήματος απορροής που προκύπτει στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης. Επιπροσθέτως, αναδεικνύεται η σημασία της παραμέτρου των υδρολογικών απωλειών και του τρόπου εκτίμησής τους κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης των διεργασιών βροχής - απορροής. Η αξιοποίηση ορθών δεδομένων σχετικών με τη γεωμορφολογία και τις

συνθήκες υγρασίας του εδάφους, αλλά και η διαθεσιμότητα υψηλής ακρίβειας παρατηρήσεων βροχόπτωσης και δεδομένων παροχής συνιστούν, επίσης, παράγοντες πρωτεύουσας σημασίας για την τελική επίδοση του υδρολογικού μοντέλου ως προς την αναπαράσταση του φυσικού συστήματος που αποσκοπούν να προσομοιώσουν.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι κατά τη μοντελοποίηση των διεργασιών βροχής - απορροής η παράμετρος των υδρολογικών απωλειών είναι καθοριστική. Επομένως, στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας προτείνεται η βαθμονόμηση (calibration) της συγκεκριμένης παραμέτρου όσον αφορά στο καταναμημένο μοντέλο, η οποία συνίσταται τόσο στην επιλογή κατάλληλων τιμών CN όσο και αρχικών απωλειών. Στη συνέχεια, μέσω της διαδικασίας της επαλήθευσης (validation), είναι δυνατό να διαπιστωθεί αν το εν λόγω μοντέλο αποτελεί αντιπροσωπευτική αναπαράσταση του συστήματος που προσομοιώνει. Με αυτόν τον τρόπο αναμένεται βελτίωση της ακρίβειας προσαρμογής των προσομοιωμένων τιμών στις αντίστοιχες παρατηρημένες.

Σε επόμενο στάδιο, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εφαρμογή του καταναμημένου μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σε εναλλακτική λεκάνη απορροής, ώστε να αναδειχθεί η προσαρμοστικότητά του στη μεταβολή των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών, αλλά και οι πιθανές αδυναμίες του. Ακόμη, προτείνεται η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου για την προσομοίωση επιπλέον ιστορικών επεισοδίων, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα ή δεδομένα radar. Παράλληλα, μπορεί να διερευνηθεί η εφαρμογή κανάβου πρόγνωσης βροχής στο μοντέλο για σκοπούς πρόγνωσης βροχής στο πλαίσιο ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης

Η χωρική ανάλυση της μεταβλητής της βροχής αποτελεί ακόμη μία συνιστώσα του μοντέλου που δύναται να διερευνηθεί περαιτέρω. Πιο συγκεκριμένα, η θεώρηση κανάβου βροχής με διάσταση φατνίου μικρότερη ή μεγαλύτερη από 500 m × 500 m που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, ενδεχομένως οδηγήσει σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τη μεταβολή που προκαλείται στην επίδοση αλλά και στον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης.

Συμπληρωματικά, στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας σχετικής με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας κρίνεται σκόπιμη η χρήση διαφορετικού καταναμημένου υδρολογικού μοντέλου για την προσομοίωση των επιλεγμένων ιστορικών επεισοδίων

βροχής και η συγκριτική αξιολόγηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που διενεργήθηκε και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.2 του παρόντος.

Προτείνεται, τέλος, η διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας στις παραμέτρους του κατανεμημένου μοντέλου, ενώ η αξιοποίηση υψηλότερης ποιότητας δεδομένων εισόδου σε αυτό κρίνεται εξίσου σημαντική, καθώς θα συνεισφέρει στην αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Αναφορές

- Ελληνική Βιβλιογραφία

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ), 2013. Σχέδιο Διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), Αθήνα, Ελλάδα

Καββαδά, Ο., 2012. Ανάπτυξη μοντέλου βροχής - απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα
Φεβρουάριος 2012

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., 2016, Τεχνική Υδρολογία, 4η έκδ, ημερομηνία προσπέλασης 10/01/2021,

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

Λουκάς, Α., 2017. Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Υδρολογική Προσομοίωση και Πρόγνωση, ΠΘ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος

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

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

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

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

Χριστοφίδης, Α., Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής - απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2008

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ημερομηνία προσπέλασης: 15/01/2021
<https://floods.ypeka.gr/>

- Διεθνής Βιβλιογραφία

- Abbott, M., B., Bathrust, J., C., Cunge, J., A., O'Connell, P., E. and Rasmussen, J., 1986b. An introduction to European hydrological system - systeme hydrologique Europeen (SHE) Part 2. Structure of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87, 61-77
- Bournas, A., 2021. Increasing the Efficiency of the Sacramento Model on Event Basis in a Mountainous River Basin, *Environmental Processes*, (accepted, awaiting publication)
- Beven, Keith, J., 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, West Sussex
- Bhura, C., S., Singh, N. P., Mori, P. R., Prakash, I., & Mehmood, K., 2015. Estimation of surface runoff for Ahmedabad urban area using SCS-CN method and GIS. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 1(11), 411-416
Technol Eng 1(11):2349-2784
- Chow, V., T., Maidment, D., R., Mays, L., W., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 572 pages
- Chow, V., T., Maidment, D., R., Mays, L., W., 2005. *Applied hydrology*, McGraw-Hill New York, computational experiments. *Proc R Soc London A* 457:157-189
- Clark, C., O., 1945, Storage and the unit hydrograph. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 69, No. 9, pp. 1333-1360), ASCE
- Devi, G., K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007
- Dooge, J., C., 1959. A general theory of the unit hydrograph. *Journal of geophysical research*, 64(2), pp.241-256
- Jain, M., K., 1996. GIS based rainfall, runoff modelling for Hemavathi Catchment, NIH Report CS/AR-22/96-97. National Institute of Hydrology, Roorkee
- Kadam, A., K., Kale, S., S., Pande, N., N., Pawar, N., J., & Sankhua, R., N., 2012. Identifying potential rainwater harvesting sites of a semi-arid, basaltic region of Western India, using SCS-CN method. *Water resources management*, 26(9), 2537-2554

- Kampf, S., K., Burges, S., J., 2007. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resour. Res.* 43 (5)
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K. and Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geoscience Data Journal*, 4(1), pp.4-16
- McCuen, R., H., 1989. *Hydrologic analysis and design*. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs
- Mishra, S., K., Jain, M., K., Singh, V., P., 2004. Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture. *Water Resources Management*, 18:567-589, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands
- Moradkhani, H. and Sorooshian, S., 2008. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. *Hydrological modeling and the water cycle*. Springer. 291 p. ISBN 978-3-540-77842-4
- Moreda, F., Koren, V., Zhang, Z., Reed, S., & Smith, M., 2006. Parameterization of distributed hydrological models: learning from the experiences of lumped modeling. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 218-237
- Nash J., E., Sutcliffe J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290
- Nyeko, M., 2014. Hydrologic modelling of data scarce basin with SWAT Model: Capabilities and Limitations. *Water Resources Management*, 29(1), 81-94
- Odeh, T., Rödiger, T., Geyer, S., Schirmer, M., 2015. Hydrological modelling of a heterogeneous catchment using an integrated approach of remote sensing, a geographic information system and hydrologic response units: the case study of Wadi Zerka Ma'in catchment area, north east of the Dead Sea. *Environ Earth Sci* 73(7):3309-3326
- Pechlivanidis, I., G., Jackson, B., M., McIntyre, N. R., & Wheeler, H. S., 2011. Catchment Scale Hydrological Modelling: A Review of Model Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214

- Saghafian, B., Julien, P. and Rajaie, H., 2002. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), pp.193-203
- Sameer, S., Mohammad, A., 2010. Application of GISbased SCS-CN method in West Bank catchments. *Palestine Water Science and Engineering*, 3(1), 1-13
- Saravanan, S., Manjula, R., 2015. Geomorphology based semi-distributed approach for modeling rainfall-runoff modeling using GIS. *Aquat Proc* 4:908-916
- SCS, U., 1972. National engineering handbook. Hydrology Section, 4
- Sharma, K., D., Sorooshian, S. and Wheeler, H., 2008. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York: Cambridge University Press. 223 p. ISBN-13 978-0-511-37710-5
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M., & Avant, B., 2017. An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. US Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/600/R-17/482
- Strahler, A., N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp.913-920
- Smith, M., Gupta, H., 2012. The distributed model intercomparison project (DMIP) - phase 2 experiments in the Oklahoma Region, USA. *J. Hydrol.* 418-419, 1-2
- US Army Corps of Engineers (USACE), 2013. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-HMS: User's Manual, Version 10.1, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA; Available online: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf (accessed on 15 February 2021)
- U.S. Department of the Interior, 1977. Bureau of Reclamation, Design of Arch Dams, U.S. Government Printing Office, Denver, CO
- Vinithra, R., Yeshodha, L., 2016. Rainfall-runoff modelling using SCS-CN method: a case study of Krishnagiri District, Tamilnadu. *Int J Sci Res* 5(3):2319-7064
- Wagner, P., D., Fiener, P., Wilken, F., Kumar, S., Schneider, K., 2012. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *J Hydrol.* 464-465:388-400