



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**«Εφαρμογή συγκεντρωτικού και ημικατανεμημένου  
μοντέλου σε υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού και  
ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων υδρολογικής  
διόδευσης.»**

**Χαράλαμπος Σ. Δήμος  
Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.**

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

**Δ.Π.Μ.Σ.  
«Επιστήμη  
& Τεχνολογία  
Υδατικών  
Πόρων»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2019**



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## Μεταπτυχιακή Εργασία

«Εφαρμογή συγκεντρωτικού και ημικατανεμημένου μοντέλου σε υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων υδρολογικής διόδευσης.»

Χαράλαμπος Σ. Δήμος

Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

1 Αικατερίνη Νάνου, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

2 Βασίλειος Τσιχριτζής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

3 Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση του και γενικότερα τη σημαντική συμβολή του στην εκπόνηση της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα Απόλλωνα Μπουρνά για την βοήθεια του και τις συμβουλές του. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ακόμη ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου και φίλους μου για την υποστήριξη τους την ανταλλαγή ιδεών και την δημιουργία ενός ευχάριστου κλίματος κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας. Τέλος, οφείλω ένα ευχαριστώ στην οικογένεια μου, για την αμέριστη υποστήριξη τους και την υπομονή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της υδρολογικής προσομοίωσης επεισοδίων βροχής απορροής, εφαρμόζοντας το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο μοντέλο και η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων υδρολογικής διόδευσης στο ημικατανεμημένο μοντέλο και του χρονικού βήματος της προσομοίωσης. Στόχος της είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων που θα βοηθήσουν σε ακριβέστερη υδρολογική προσομοίωση επεισοδίων βροχής απορροής, ειδικότερα σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απορροών.

Η έρευνα έλαβε χώρα σε υπολεκάνη του Σπερχειού ποταμού, εμβαδού 1128 km<sup>2</sup> και συγκεκριμένα στο τμήμα ανάντη της γέφυρας των Κομποτάδων. Η εφαρμογή των δύο μοντέλων χωρικής ανάλυσης έγινε σε τρία διαφορετικά επεισόδια βροχής απορροής τα οποία δημιούργησαν εκτεταμένες πλημμύρες κατάντη της περιοχής μελέτης και έλαβαν χώρα την 6/2/2012, την 1/2/2015 και την 10/1/2019, ενώ για την ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε το επεισόδιο του έτους 2012. Ως δεδομένα βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις σε βροχομετρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής, που παρακολουθούνται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Για την υδρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική πλατφόρμα HEC-HMS. Η άμεση απορροή υπολογίστηκε σύμφωνα με το μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder, ενώ για την εκτίμηση των απωλειών βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS. Η κατανομή της βροχόπτωσης έγινε σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen. Στο ημικατανεμημένο μοντέλο η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις υπολεκάνες, με κριτήρια τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, την κατανομή της βροχόπτωσης, το μέσο υψόμετρο, τις χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Η διόδευση των πλημμυρογραφημάτων των ανάντη υπολεκανών στην έξοδο της περιοχής μελέτης έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου Muskingum.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα τελικά πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του συγκεντρωτικού και του ημικατανεμημένου μοντέλου στα τρία επεισόδια βροχόπτωσης, οι οποίες αφορούσαν την παροχή αιχμής, τον χρόνο υστέρησης και τον πλημμυρικό όγκο των τελικών πλημμυρογραφημάτων. Αξιοσημείωτα είναι και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας, σύμφωνα με τα οποία η παράμετρος K επηρεάζει σημαντικά το τελικό πλημμυρογράφημα, ενώ η παράμετρος X και το χρονικό βήμα δεν παρουσίασαν την ίδια ευαισθησία σε ενδεχόμενες μεταβολές τους.

## ABSTRACT

The present study investigates the impact on the hydrological simulation of rainfall runoff events, by applying different basin spatial structure as in lumped and semi-distributed models. Moreover in the semi-distributed model where a routing method is required, the impact of the hydrological routing parameters of the Muskingum method as well as the simulation step time on simulated flood hydrographs, is investigated, by applying a sensitivity analysis on these parameters. The aim of this study is to further understand the effects of the different spatial interpretation of a basin and reach to conclusions regarding the calibration of the basins parameters especially in cases where no outflow data are available that will lead eventually to more accurate future hydrological predictions.

The study area is a subbasin of the the Sperchios river basin, located in central Greece, and specifically upstream the Kompotades bridge, near the Kompotades settlement with a total area of 1128 km<sup>2</sup>. The datasets used in this analysis consist of precipitation data of four stations, Lamia, Mavro Lithari, Myriki and Makrakomi provided by the National Observatory of Athens station network as well as the digital terrain model, the land use (Corine Land Cover 2018) and soil maps of the study area. The hydrologic simulations were performed using two different spatial analysis models, a lumped and a semi-distributed model, for three different rainfall events occurred on 6/2/2012, 1/2/2015 and 10/1/2019 which caused extensive flooding downstream the Kompotades Bridge, while the sensitivity analysis was performed for the 2012 event alone.

The hydrological simulations were carried out using the HEC-HMS software. The Snyder unit hydrograph was used to transform rainfall into runoff, while, the SCS runoff Curve Number method was used to estimate the precipitation losses. The mean area precipitation among the subbasins was calculated using the Thiessen polygons method. In the semi-distributed model, the basin was divided into three subbasins, considering the soil characteristics, the precipitation distribution, the mean altitude, the land use and the hydrographic network. The flood hydrographs of the upstream subbasins were then routed to the basin outlet using the Muskingum hydrological routing method. The results showed, significant differences between the final flood hydrographs that were estimated using the lumped and the semi-distributed models. Moreover, the sensitivity analysis gave remarkable findings, according to which the parameter K has a much more significant impact on the final flood hydrograph than what the parameter X and the time step have.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>EXTENDED SUMMARY .....</b>	<b>12</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>27</b>
1.1 Αντικείμενο Εργασίας .....	29
1.2 Διάρθρωση Εργασίας.....	30
1.3 Κατάλογος Λογισμικών Εργασίας.....	30
<b>2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>	<b>32</b>
2.1 Εισαγωγή .....	32
2.2 Γεωμορφολογία – Υδρογραφία .....	33
2.3 Γεωλογία - Υδρογεωλογία.....	34
2.4 Χρήσεις Γης .....	35
2.5 Δίκτυο Υδρομετεωρολογικών Μετρήσεων .....	36
2.6 Ιστορικό πλημμυρών – Λεκάνη απορροής Σπερχειού.....	38
2.7 Υφιστάμενα Αντιπλημμυρικά Έργα.....	39
2.8 Γεωμορφολογική Ανάλυση .....	41
2.8.1 Εισαγωγή.....	41
2.8.2 Επεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.....	41
2.8.3 Οριοθέτηση Περιοχής Μελέτης – Λεκανών Απορροής.....	45
<b>3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ HEC-HMS.....</b>	<b>48</b>
3.1 Εισαγωγή – Υδρολογικά Μοντέλα .....	48
3.2 Η υπολογιστική πλατφόρμα HEC-HMS.....	49
3.3 Μοντέλο Λεκάνης Απορροής .....	50
3.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο .....	51
3.5 Εκτίμηση Υδρολογικών Απωλειών .....	54

3.5.1	Η μέθοδος SCS.....	54
3.5.2	Υπολογισμός Curve Number.....	58
3.6	Υπολογισμός Άμεσης Απορροής – Μοναδιαίο Υδρογράφημα.....	62
3.6.1	Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder.....	62
3.6.2	Εφαρμογή Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder.....	64
3.7	Μοντέλο Εκτίμησης Βασικής Απορροής .....	65
3.8	Μοντέλο Υδρολογικής Διόδευσης.....	66
3.8.1	Γενικά - Υδρολογική Μέθοδος Muskingum.....	66
3.8.2	Εκτίμηση των παραμέτρων της μεθόδου Muskingum.....	68
3.9	Καθορισμός Χρόνου Προσομοίωσης .....	70
<b>4.</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΡΟΧΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ –</b>	
	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>71</b>
4.1	Προσομοίωση Βροχής Απορροής.....	71
4.1.1	Επεισόδιο της 6/2/2012 .....	73
4.1.2	Επεισόδιο της 1/2/2015 .....	75
4.1.3	Επεισόδιο της 10/1/2019 .....	77
4.2	Ανάλυση Ευαισθησίας.....	80
4.2.1	Γενικά – Μέθοδος “once at a time”.....	80
4.2.2	Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου X .....	81
4.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου K .....	86
4.2.4	Ανάλυση ευαισθησίας του χρονικού βήματος προσομοίωσης.....	91
4.3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	93
<b>5.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>97</b>
5.1	Σύνοψη.....	97
5.2	Συμπεράσματα.....	97
5.3	Μελλοντική Έρευνα .....	99
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>101</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Περιοχή Μελέτης .....	32
Σχήμα 2-2: ΨΜΕ και υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης του Σπερχειού ποταμού .....	34
Σχήμα 2-3: Γεωλογία (Ψωμάδης, 2010).....	35
Σχήμα 2-4: Χρήσεις Γης.....	36
Σχήμα 2-5: Υδρομετεωρολογικοί Σταθμοί Περιοχής Μελέτης .....	37
Σχήμα 2-6: Διάγραμμα Ροής Επεξεργασίας Ψ.Μ.Ε.....	42
Σχήμα 2-7: Κάναβος Διεύθυνσης Απορροής Σπερχειού .....	42
Σχήμα 2-8: Αποτέλεσμα της διαδικασίας Catchment grid delineation.....	43
Σχήμα 2-9: Υδρογραφικό Δίκτυο Σπερχειού σε Διανυσματική Μορφή.....	44
Σχήμα 2-10: Συνολική λεκάνη που προέκυψε από το εργαλείο Adjoint Catchments .....	44
Σχήμα 2-11: Ενιαία Λεκάνη Απορροής – Συγκεντρωτικό Μοντέλο .....	45
Σχήμα 2-12: Υπολεκάνες - Semi-distributed Model.....	46
Σχήμα 2-13: Δομή Ημικατανεμημένου Μοντέλου σε περιβάλλον HEC-HMS .....	47
Σχήμα 3-1: Αναπαράσταση δομής της πλατφόρμας HEC-HMS ( Μπαλτάς, 2018).....	50
Σχήμα 3-2: Συγκεντρωτικό Μοντέλο HEC-HMS .....	50
Σχήμα 3-3: Ημικατανεμημένο Μοντέλο HEC-HMS .....	51
Σχήμα 3-4: Πολύγωνα Thiessen - Περιοχή Μελέτης.....	52
Σχήμα 3-5: Δημιουργία Μετεωρολογικού Μοντέλου - Εισαγωγή Συντελεστών Thiessen..	54
Σχήμα 3-6: Ταξινομημένες Χρήσεις Γης .....	58
Σχήμα 3-7: Εδαφολογικός χάρτης περιοχής μελέτης .....	59
Σχήμα 3-8: Κάναβος Curve Numbers .....	60
Σχήμα 3-9: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012) .....	64
Σχήμα 3-10: Εισαγωγή των παραμέτρων του ΜΥΓ κατά Snyder στο HEC-HMS.....	65
Σχήμα 3-11: Διαχωρισμός αποθηκευτικότητας υδατορεύματος σε πρισματική και σφηνοειδή (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012) .....	67
Σχήμα 3-12: Διοδευμένα υδρογραφήματα για χαρακτηριστικές τιμές του X (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).....	68
Σχήμα 3-13: Εισαγωγή των παραμέτρων της μεθόδου Muskingum στο HEC-HMS .....	70



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Ιστορικά Πλημμυρικά Επεισόδια .....	38
Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Περιοχής Μελέτης (Ενιαία Λεκάνη) .....	46
Πίνακας 2-3: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Υπολεκανών Απορροής .....	47
Πίνακας 3-1: Επεισόδια Βροχής-Απορροής.....	52
Πίνακας 3-2: Συντελεστές Thiessen - Συγκεντρωτικό Μοντέλο .....	53
Πίνακας 3-3: Συντελεστές Thiessen - Ημικατανεμημένο Μοντέλο.....	53
Πίνακας 3-4: Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους (SCS, 1972) .....	56
Πίνακας 3-5: Αριθμός καμπύλης απορροής CN για αρχική κατάσταση υγρασίας Π (Wanielista, 1978).....	57
Πίνακας 3-6: Curve Numbers Λεκανών Απορροής – Υδρολογική Κατάσταση II.....	60
Πίνακας 3-7: Κατηγορία CN ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο .....	61
Πίνακας 3-8: Αρχικές Απώλειες ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο .....	61
Πίνακας 3-9: Curve Numbers ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο .....	62
Πίνακας 3-10: Παράμετροι Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder .....	65
Πίνακας 3-11: Εκτιμώμενες παράμετροι-Αποτελέσματα Υπολογισμών Μεθόδου Muskingum.....	69
Πίνακας 4-1: Επεισόδια Βροχής-Απορροής.....	71
Πίνακας 4-2: Συνολικό ύψος βροχής ανά επεισόδιο ανά λεκάνη απορροής .....	71
Πίνακας 4-3: Συνολικό Ύψος Βροχής προηγούμενων 5 ημερών ανά επεισόδιο και ανά λεκάνη .....	72
Πίνακας 4-4: Μέγιστη ωριαία ένταση ανά επεισόδιο ανά περιοχή μελέτης .....	72
Πίνακας 4-5: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 6/2/2012 ..74	
Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 1/2/2015 ..77	
Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 10/1/2019 79	
Πίνακας 4-8: Τιμές της παραμέτρου X σε κάθε κλάδο .....	82
Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X .....	82
Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X .....	84
Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X .....	85

Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X .....	86
Πίνακας 4-13: Τιμές της παραμέτρου K(hr) - Ανάλυση ευαισθησίας.....	87
Πίνακας 4-14: Αριθμός Υποκλάδων - Ανάλυση ευαισθησίας.....	87
Πίνακας 4-15: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Έξοδος περιοχής μελέτης .....	88
Πίνακας 4-16: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων .....	89
Πίνακας 4-17: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr).....	90
Πίνακας 4-18: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Έξοδος Κλάδου R3 .....	91
Πίνακας 4-19: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφημάτων .....	92

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Διάγραμμα 4-1: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 6/2/2012 ...	73
Διάγραμμα 4-2: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 6/2/2012 .....	73
Διάγραμμα 4-3: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων για τα 2 μοντέλα - Επεισόδιο 6/2/2012 .....	74
Διάγραμμα 4-4: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 1/2/2015 ...	75
Διάγραμμα 4-5: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 1/2/2015 .....	76
Διάγραμμα 4-6: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων - Επεισόδιο 1/2/2015 .....	76
Διάγραμμα 4-7: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 10/1/2019 ..	78
Διάγραμμα 4-8: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 10/1/2019 .....	78
Διάγραμμα 4-9: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων - Επεισόδιο 10/1/2019 .....	79
Διάγραμμα 4-10: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης - Ανάλυση ευαισθησίας X.....	83
Διάγραμμα 4-11: Παροχές Αιχμής – Ανάλυση Ευαισθησίας X.....	83
Διάγραμμα 4-12: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1 - Ανάλυση ευαισθησίας X.....	84
Διάγραμμα 4-13: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R2 - Ανάλυση ευαισθησίας X.....	85

Διάγραμμα 4-14: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R3 - Ανάλυση ευαισθησίας X.....	86
Διάγραμμα 4-15: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr).....	87
Διάγραμμα 4-16: Παροχές Αιχμής - Ανάλυση Ευαισθησίας K.....	88
Διάγραμμα 4-17: Χρόνος Αιχμής - Ανάλυση Ευαισθησίας K.....	88
Διάγραμμα 4-18: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr).....	89
Διάγραμμα 4-19: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R2 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr).....	90
Διάγραμμα 4-20: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R3 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr).....	91
Διάγραμμα 4-21: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για διαφορετικό χρονικό βήμα προσομοίωσης.....	92
Διάγραμμα 4-22: Παροχές Αιχμής Πλημμυρογραφημάτων για διαφορετικό χρονικό βήμα προσομοίωσης.....	93

## **EXTENDED SUMMARY**

### **Introduction**

Flood is defined as a great flowing or overflowing of water, especially over land not usually submerged. Floods count for 43% of all natural disasters and apart from intensive rainfall the main causes are climate change, land use change and anthropogenic interventions (Baltas, 2018). Flood management is a global concern that has gained in recent times additional scientific interest and particular social significance, due to its relation to climate change, as well as, the increasing negative social, economic and environmental impacts of the flood events. It is therefore necessary to avert these flood events by applying various preventive measures. Preventive measures are divided into two major types, the structural measures and non-structural. Structural measures consist of mitigating the total flood volume via the construction of dams, reservoirs or just protecting the vulnerable areas with the construction of levees, weirs and bund walls. Non-structural measures consist of mainly policy measures such as legislation, EU 2007/60 directive, which can have an impact on the climate change effect thus reducing intensive rain occurring in the longterm, but also these measures consist also of providing the necessary management tools and information systems to mitigate the flood the impact.

The flood management designs rely heavily on the use of hydrological models to assess the flood impact on a specific basin. The amount of data these models require are determined by the model structure but reliable rainfall and runoff data are key data for performing correct calibration of the models and thus decreasing the amount of uncertainty involved in the predictions. Rainfall data are easily available because they are technically and economically easier to be measured while runoff data are much harder to obtain. The lack of runoff data increases the uncertainty of the hydrograph estimations but nonetheless various new methods can be used to reach to desirable results. One method is to use of appropriate models such as conceptual models, to transform rainfall to runoff where their parameters are conception based and can be estimated based on the basins geomorphological characteristics. Finally by exploring the impact of the spatial variability of the basin, one can lead to more accurate parameter estimations and thus to more accurate hydrograph estimations.

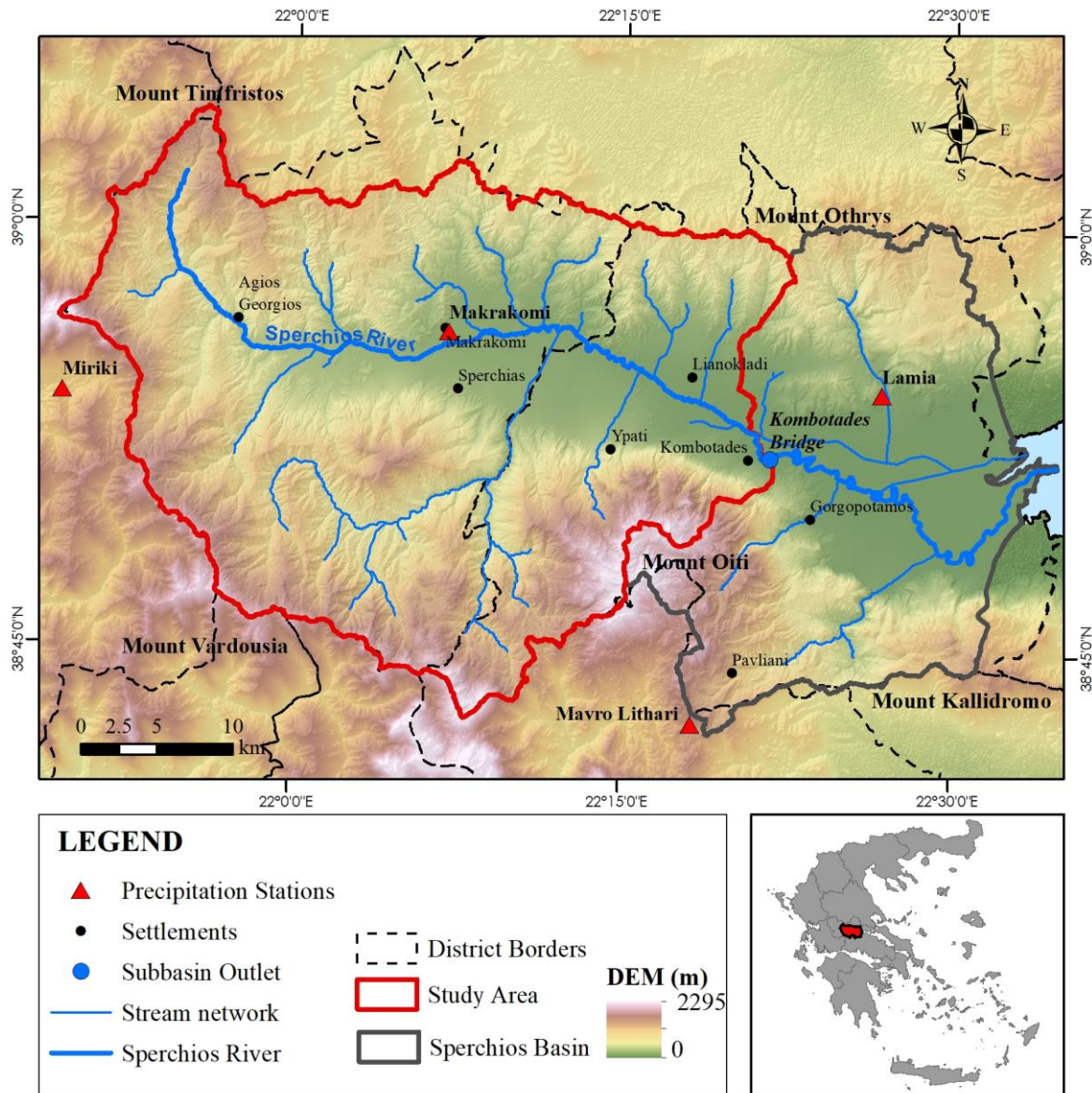
The present study investigates the impact on the hydrological simulation of rainfall runoff events, by applying different basin spatial structure as in lumped and semi-distributed models. Moreover in the semi-distributed model where a routing method is required, the impact of the hydrological routing parameters of the Muskingum method as well as the simulation step time on simulated flood hydrographs, is investigated, by applying a sensitivity analysis on these parameters. The aim of this study is to further understand the effects of the different spatial interpretation of a basin and reach to conclusions regarding the calibration of the basins parameters especially in cases where no outflow data are available that will lead eventually to more accurate future hydrological predictions.

### **Study Area – Datasets**

The study area is a subbasin of the Sperchios river basin and specifically upstream the Kompotades bridge, near the Kompotades settlement. The Sperchios river basin is located in East Central Greece. It is surrounded by Mount Timfristos on the west, the Maliakos gulf on the east, Mount Othris on the north and by the mountain ranges of Vardoussia, Oiti and Kalidromo on the south. The total river basin area is 1830 km<sup>2</sup>, with an average altitude of 626 m. The Sperchios river length is 80 km and its springs are located on the eastern slopes of Timfristos at the location of Agios Georgios.

The study area is constituted by a subbasin, of approximately 62% of the Sperchios basin area, defined by the Kompotades Bridge on the east as its outlet, Figure 1, with a total area of 1128 km<sup>2</sup>. Administratively, the study area lies mostly within the municipality of Makrakomi, while a small percentage falls within the municipality of Lamia. This subbasin was selected because of the high frequency of flood events occurring downstream the Kompotades Bridge as well as the increased vulnerability of the downstream area since high agricultural activity is found.

The largest part of the study area is mountainous and as a result the dominant land use is forests. In the lowlands, the main form of land cover is the agricultural, where organized crop systems are found. The geological formations that are mainly found within the study area are Pindos flysch, whereas other formations include Alluvial Rupids, Alluvial Deposits, Pindos Limestones and Ophioliths. Hydrogeologically the study area is covered by impermeable, semipermeable, alluvial and karstic formations.

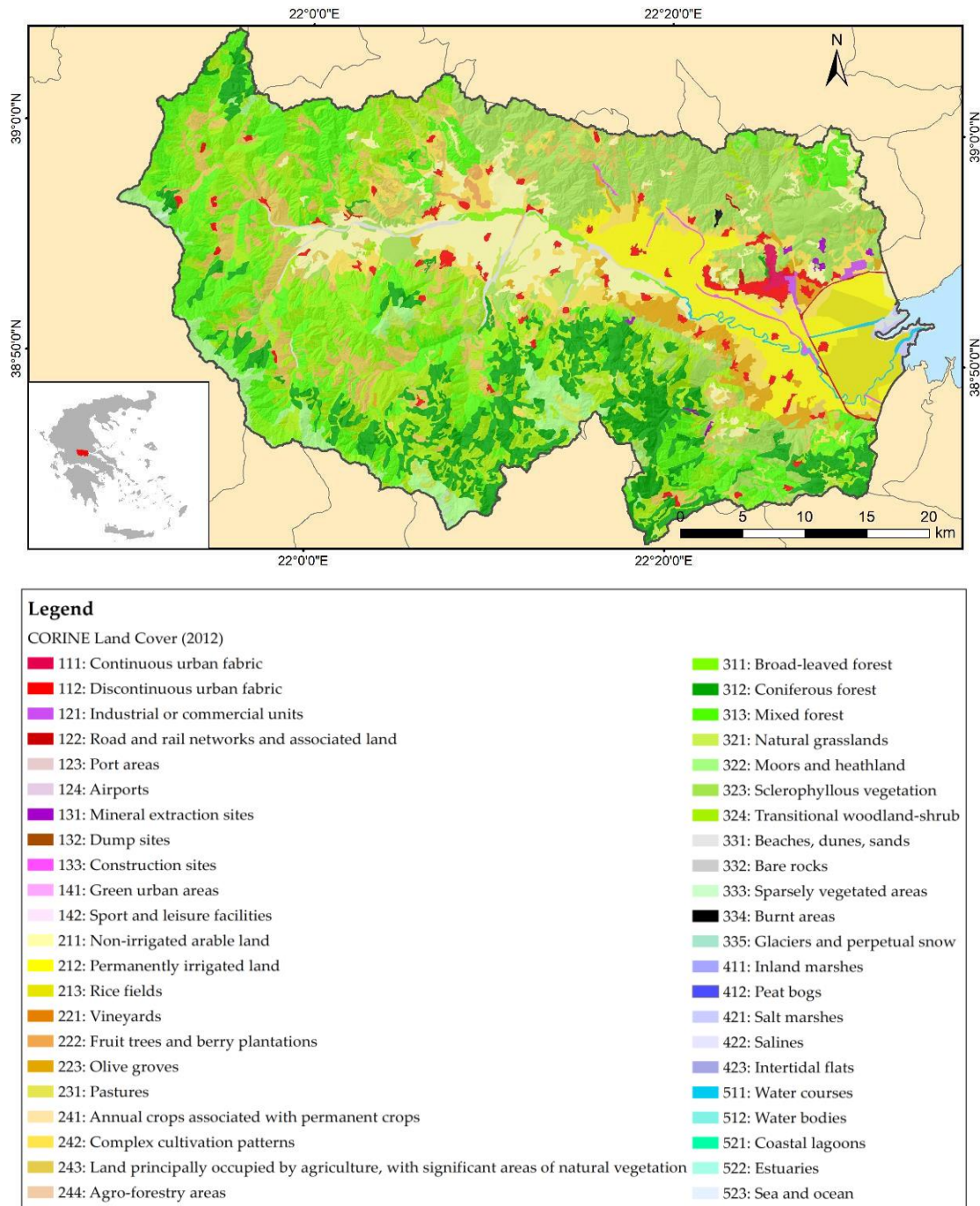


**Figure 1: Study Area**

The Sperchios Basin is the highest average rainfall in East Central Greece. The average annual rainfall in the basin is 905.6 mm, with an average annual runoff volume of 693.1 hm<sup>3</sup> or 378.8 mm. The rainfall on the basin has decreased over the last 20 years, with its average value now being close to 600 hm<sup>3</sup> (Kavvada, 2012).

In the greater area of Sperchios basin, 14 active rain gauge stations can be found, half of which lie within the study area. For this research work, only four stations were used since they provided accurate data of recent flood events with a high time resolution, 10minute time steps. The precipitation data used, were collected from the rain gauges in Lamia, Mavro Lithari, Myriki and Makrakomi, of the National Observatory of Athens (NOA) Station network, Figure 1.

The Digital Elevation Model (DEM) used for the hydrological simulations, was provided by the National Cadastre & Mapping Agency S.A. and it features a 5x5m grid elevation dataset. The Corine Land Cover (CLC) dataset for 2012 was used to analyze land cover and land use patterns, Figure 2. The largest part of the study area is mountainous and as a result the dominant land use is forests. In the lowlands, the main form of land cover is the agricultural, where organized crop systems are found.



**Figure 2: Land Use, Sperchios Basin, CLC 2012**

In order to carry out the simulations, specific flood events were selected that caused severe flooding within the study area. Specifically, the rainfall-runoff events that took place on 6/2/2012, 1/2/2015 and 10/1/2019 were selected. For the 2015 and 2019 events, rainfall data were available at all four of the above-mentioned rain gauges (Lamia, Mavro Lithari, Myriki, Makrakomi), while no rainfall data were available from the Lamia station for the 2012 event. The three events characteristics such as the starting date and duration are presented in Table 3, while in Table 4 the total rainfall height for each model scheme, lumped and semi-distributed, for each subbasin, are presented. No runoff data were available, suitable for event-based rainfall-runoff simulations.

**Table 1: Rainfall Events Studied**

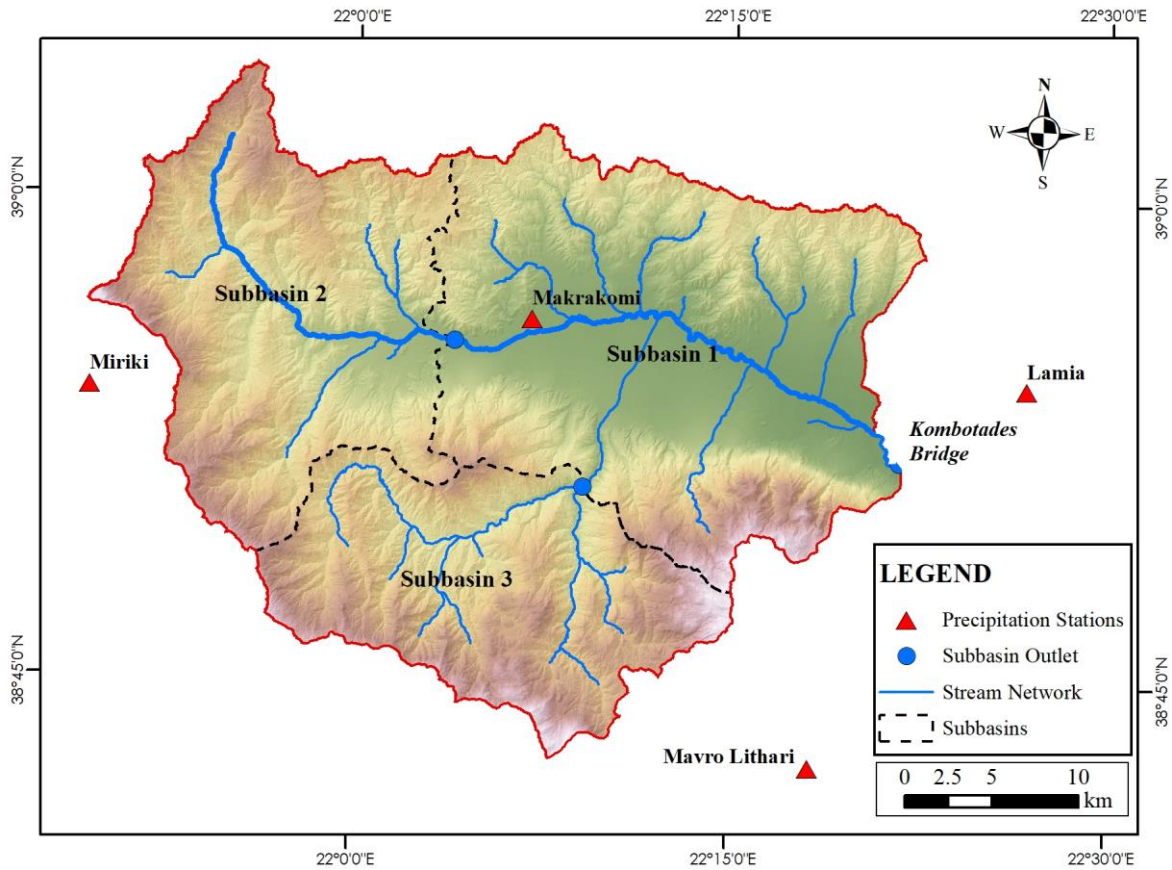
Event Code Name	Event Date	Starting Date	Starting Time	Ending Time	Rainfall duration (h)	Number of rain gauges
<b>E2012</b>	06-02-2012	06-02-2012	4:00	23:00	68	3
<b>E2015</b>	01-02-2015	30-01-2015	7:00	23:00	89	4
<b>E2019</b>	10-01-2019	09-01-2019	10:00	20:00	83	4

## **Methodology**

The hydrological simulations were performed with the use of the HEC-HMS software. HEC-HMS is a widely used software developed by the U.S. Army Corps of Engineers. It is designed to solve a wide range of hydrological simulations such as the analysis of large aquatic systems, the analysis of rainfall events and the analysis of qualitative characteristics of runoff. HEC-HMS is a simulation interface platform which includes sub-model selection such as the meteorological model, the hydrological losses model, surface runoff calculation model, basic runoff calculation model and hydrological routing model.

The two different model schemes were used in this study to perform the hydrological simulations were the lumped and the semi-distributed model. In the lumped model, the entire study area is treated as a single basin, while in the semi-distributed model the study area is divided into three subbasins, Figure 2, each with different geomorphological characteristics as shown in Table 2.





**Figure 2: Subbasins of the Study Area**

**Table 2: Geomorphological characteristics of the studied subbasins**

	Lumped	Subbasin 1	Subbasin 2	Subbasin 3
Area (km <sup>2</sup> )	1128 km <sup>2</sup>	509	340	279
Maximum river length (km)	68.50 km	20	13	9
Maximum river length from the basin centroid (km)	33 km	45	34	35
Maximum altitude (m)	2294.50 m	2111	2251	2295
Minimum altitude (m)	18 m	18	173	260
Mean altitude (m)	718 m	440	837	1079

### **Meteorological model method**

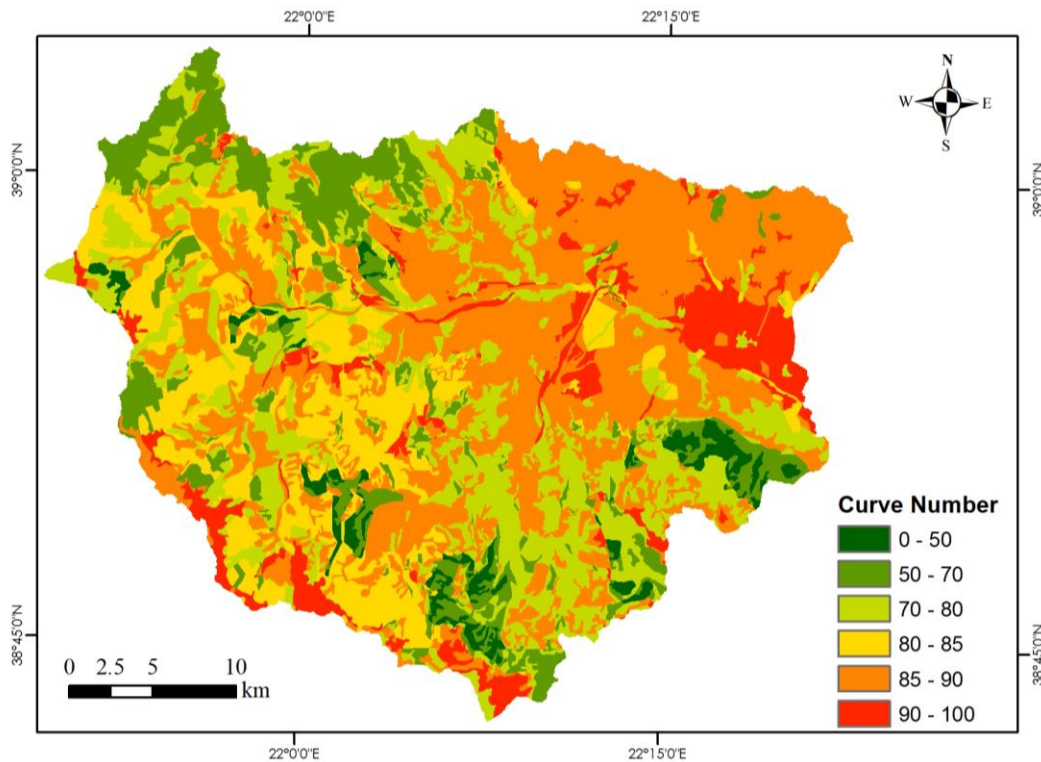
The meteorological model is intended to determine the precipitation timeseries loaded in the model. The most common method is the use of gauge weights where the rainfall data per station is input and the corresponding weights are calculated. The station weights were calculated for each subbasin using the Thiessen polygons method in a GIS environment. The total average rainfall height for each subbasin per event is shown in Table 3.

**Table 3: Total average rainfall height**

Event Code Name	Lumped Model (mm)	Subbasin 1 (mm)	Subbasin 2 (mm)	Subbasin 3 (mm)
<b>E2012</b>	80	91	49	97
<b>E2015</b>	81	49	119	93
<b>E2019</b>	72	72	72	72

### Hydrological losses method

For the estimation of hydrological losses, the SCS Curve Number Method was used. Specifically, the method calculates the height of the rain surplus from three variables: the height of the rain, the initial deficits and the hydrologic soil-vegetation complex expressed by a dimensional number and the runoff curve number (CN). The CN number is calculated based on the hydrological type of soil, the land use and the total amount of precipitation of the previous days. The values of this variable are first calculated from table values based on the combination of soil type and land use, while the total amount of precipitation of the previous days defines the average soil moisture conditions. The Curve Number raster map, for antecedent moisture condition (AMC II), can be seen in Figure 3.



**Figure 3: Curve Number Raster**

The CN for each subbasin is then calculated as the average value of all grid cells within each subbasin and then adjusted based on the soil moisture conditions for each event, calculating CN for either AMC I, II and III, conditions. The results can be seen in Table 4.

**Table 4: Curve Number Value for each Subbain per Rain Event**

<b>Event Code Name</b>	<b>Lumped Model</b>	<b>Subbasin 1</b>	<b>Subbasin 2</b>	<b>Subbasin 3</b>
Event 2012	85	84	91	79
Event 2015	81	84	79	79
Event 2019	81	84	79	79

### **Transform method**

In both models, the Snyder synthetic unit hydrograph was used to transform rainfall into runoff. The Snyder unit hydrograph is a widely used synthetic hydrograph production method, which resulted from analyzing large numbers of rainfall data in the Appalachian region of North America. To calculate the method parameters it is necessary first to calculate various geospatial characteristics of each subbasin such as the longest river distance (Lca), the distance of the center of gravity of each basin along the main watershed to the outlet of (L), as well as the Cp and Ct parameters. The Lca, L characteristics were calculated using GIS tools, while the Cp and Ct parameters were estimated based on the topographic and soil characteristics of each catchment. The parameters of the Snyder unit hydrograph for each subbasin along as the calculated lag time and peak value, are shown in Table 5.

**Table 5: Snyder Unit Hydrograph Parameters**

	<b>Lumped Model</b>	<b>Subbasin 1</b>	<b>Subbasin 2</b>	<b>Subbasin 3</b>
Basin Area (km <sup>2</sup> )	1128	509	340	278
Lca (km)	33	20	13	9
L (km)	68.5	45	34	35
Ct	1.85	1.85	1.85	1.85
Cp	0.67	0.67	0.67	0.67
tp (hr)	14	11	9	8
T(days)	5	4	4	4
Qp (m <sup>3</sup> /sec)	147.5	88	72	67

## Routing method

In the semi-distributed model, a routing method is required in order to estimate the flood hydrograph at the outlet of the basin, the Kompotades Bridge. In this study, the Muskingum hydrological routing method was used thus the parameters X and K were estimated. As there were no runoff data available in order to calculate the Muskingum method parameters for each river segment, their values were estimated based on their geomorphological characteristics. Specifically, the criteria for selecting parameter X and stream velocity V (m/s), were the slope of the stream and its width. Parameter K(hr) is then calculated by dividing the length of each river segment, with the corresponding estimated velocity. Finally, in order for the Muskingum method to be correctly solved within the HEC-HMS software, it is necessary to define a number of subreaches for each reach. According to the user's manual proposal (Scharffenberg, 2016) a good approximation is the ratio of the length of each river to the product of their wave speed over the simulation time step, which was 1hour. In the semi-distributed model, there were three parts of the river in which flood hydrographs were routed. The estimated parameters for each river segment are shown in Table 6.

**Table 6: Muskingum Method Parameters**

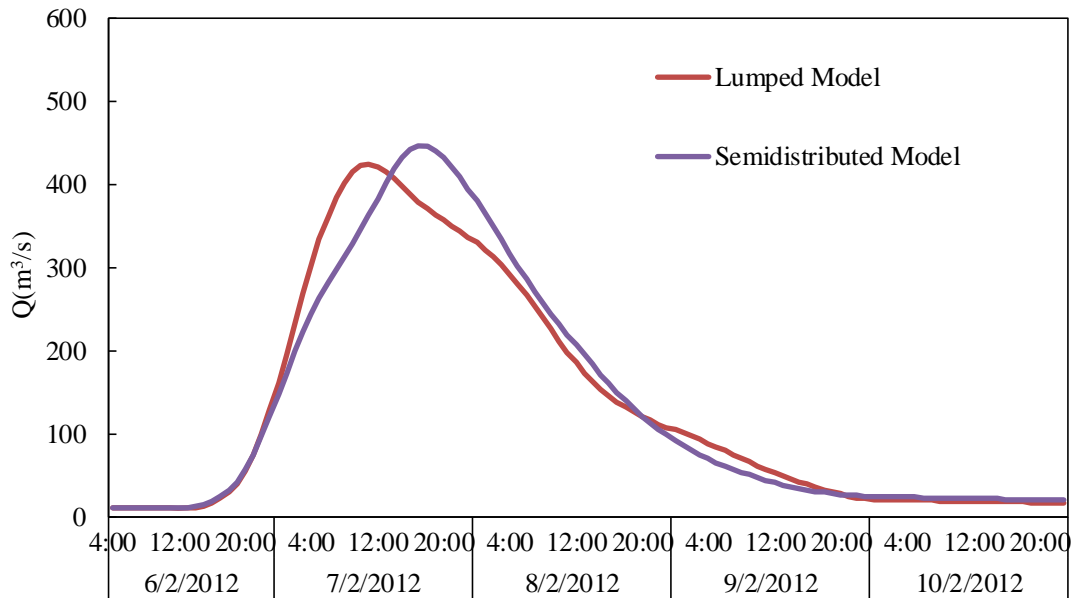
River Segment	X	V (m/s)	River Length (km)	K(hr)	Subreaches (1h)
R1	0.2	0.8	14.73	5.1	5
R2	0.3	0.9	12.89	4	4
R3	0.15	0.7	21.97	8.7	9

## Results

### Simulations with Lumped and Semi-distributed Model

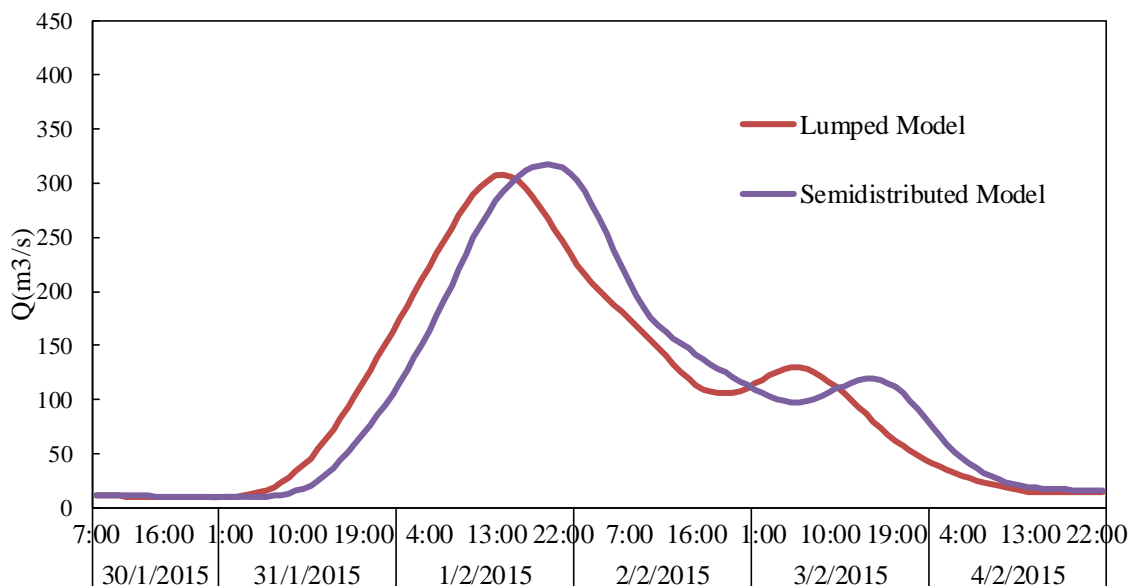
The hydrological simulations were performed for each event using the lumped and semi-distributed models. The estimated hydrographs at the Kombotades bridge outlet for each event, E2012, E2015 and E2019 are presented in the following Figures 4, 5 and 6 accordingly.

The results of the 2012 event, Figure 4, show that the flood hydrograph generated with the semi-distributed model has a greater peak discharge by 22.10 m<sup>3</sup>/s and a greater flood volume by 552936 m<sup>3</sup> than the lumped model. Additionally, the flood hydrograph obtained from the semi-distributed model has a longer lag time, since the peak discharge of the flood hydrograph takes place six hours later than the peak discharge of the lumped model.



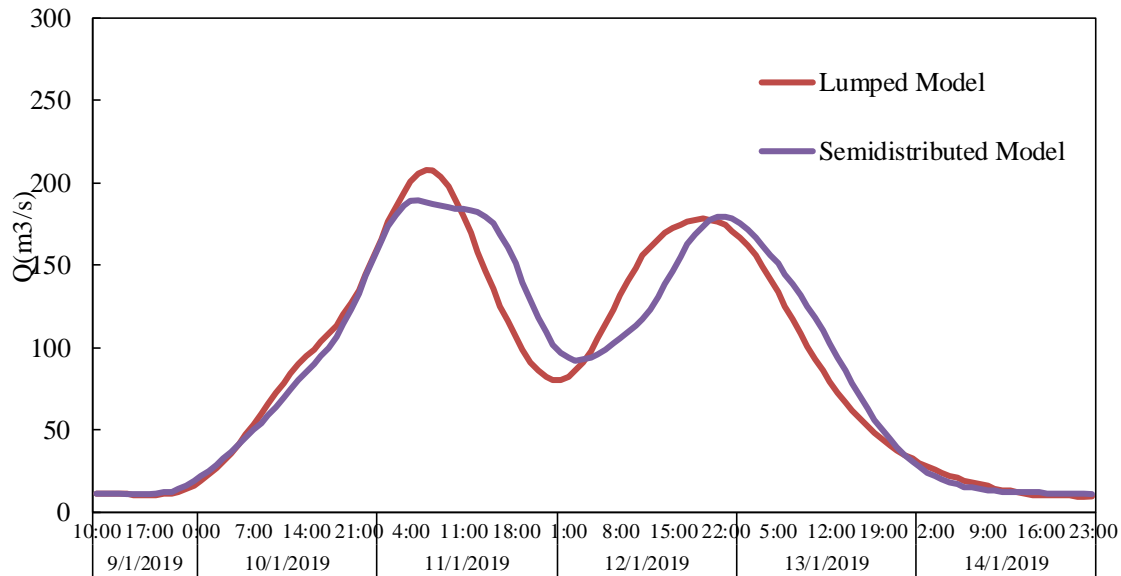
**Figure 4: Flood hydrographs on Kompotades Bridge – Event 2012**

The results of the 2015 event, Figure 5, are similar to those of the 2012 event. As shown in figure 5, the flood hydrograph of the semi-distributed model has a greater peak discharge and a greater volume while its peak discharge takes place later than the one from the lumped model. Specifically, the flood hydrograph of the semi-distributed model has a greater peak discharge by  $9.80 \text{ m}^3 / \text{s}$  and a larger flood volume by  $1952201 \text{ m}^3$  than the lumped model.



**Figure 5: Flood hydrographs on Kompotades Bridge - Event 2015**

In addition, the flood hydrograph obtained from the semi-distributed model has a longer lag time, as the peak discharge of the flood hydrograph takes place six hours later from the peak discharge of the lumped model.



**Figure 6: Flood hydrographs on Kompotades Bridge - Event 2019**

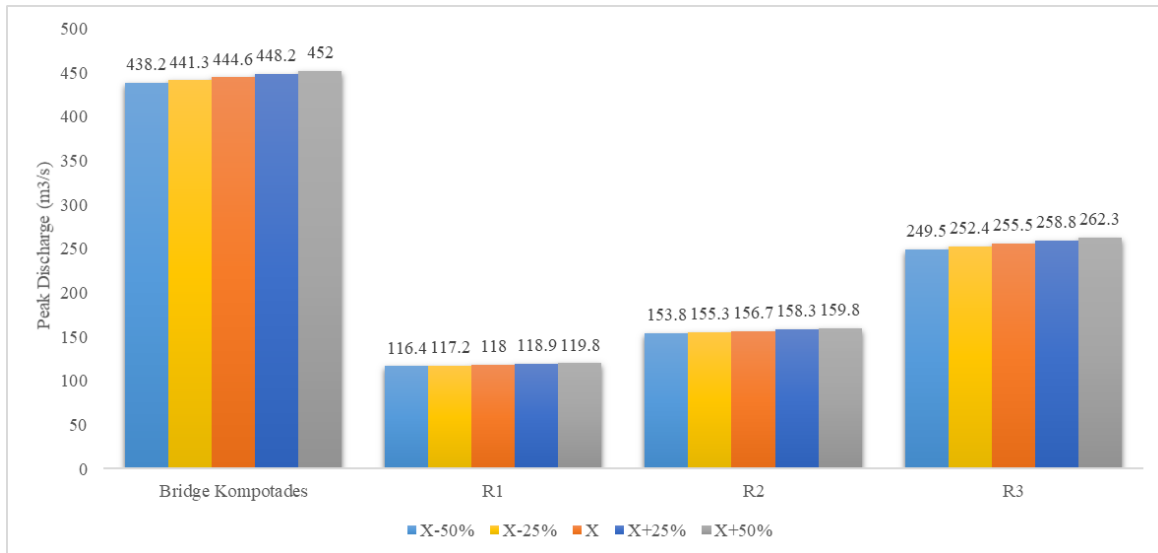
The results of the simulation of the 2019 event, Figure 6, differ from the previous ones and show that the lumped model has a greater peak discharge by  $18.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , but a smaller flood volume of  $1083302 \text{ m}^3$  than the semi-distributed model. It also has a longer lag time from the hydrograph of the semi-distributed model. This event is the only one of the three selected in which the peak discharge of the lumped model exceeds the one of the semi-distributed while the time to peak takes place in a later time.

### **Sensitivity Analysis**

The sensitivity analysis was applied on the X, K parameters of the Muskingum method and the time step of the simulation using the one at a time method (OAT). The 2012 event was chosen to perform the analysis on, since it provided with the highest peak flow. For each simulation, the value of one of the parameters was changed by a certain percentage for all subbasins simultaneously and the effect on the output was then evaluated. The results for each parameter are as follows:

#### ***Parameter X***

For the sensitivity analysis of the parameter X, a  $\pm 25\%$  and a  $\pm 50\%$  change were applied to the initial estimated value. The change in the peak discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) at the output of the basin, as well as, the outputs of each subbasin are shown in the Figure 7.

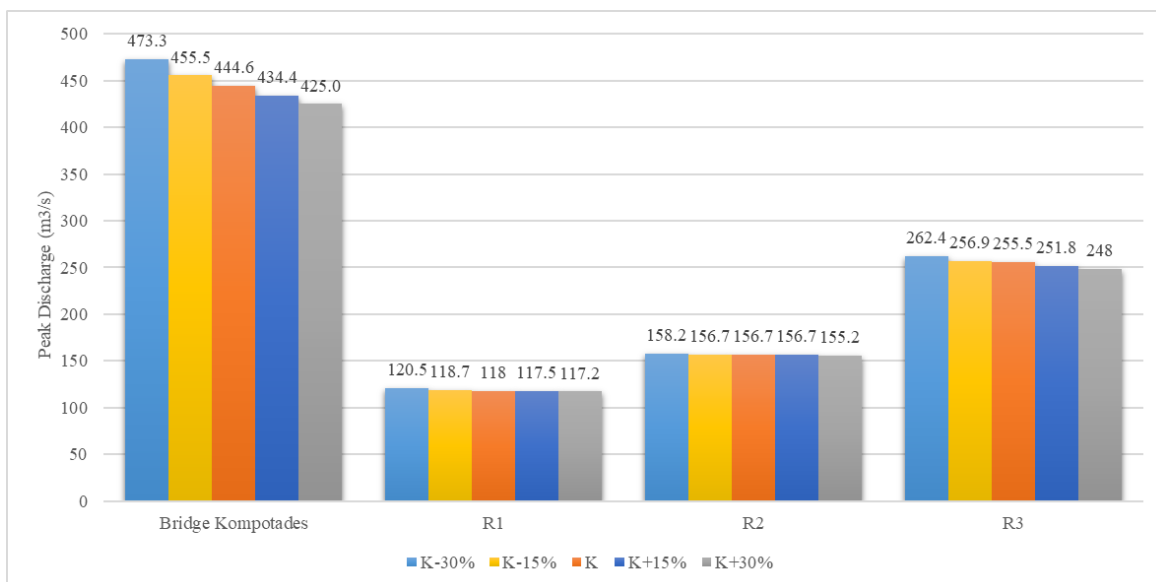


**Figure 7: Qmax(m<sup>3</sup>/s) - Sensitivity Analysis X**

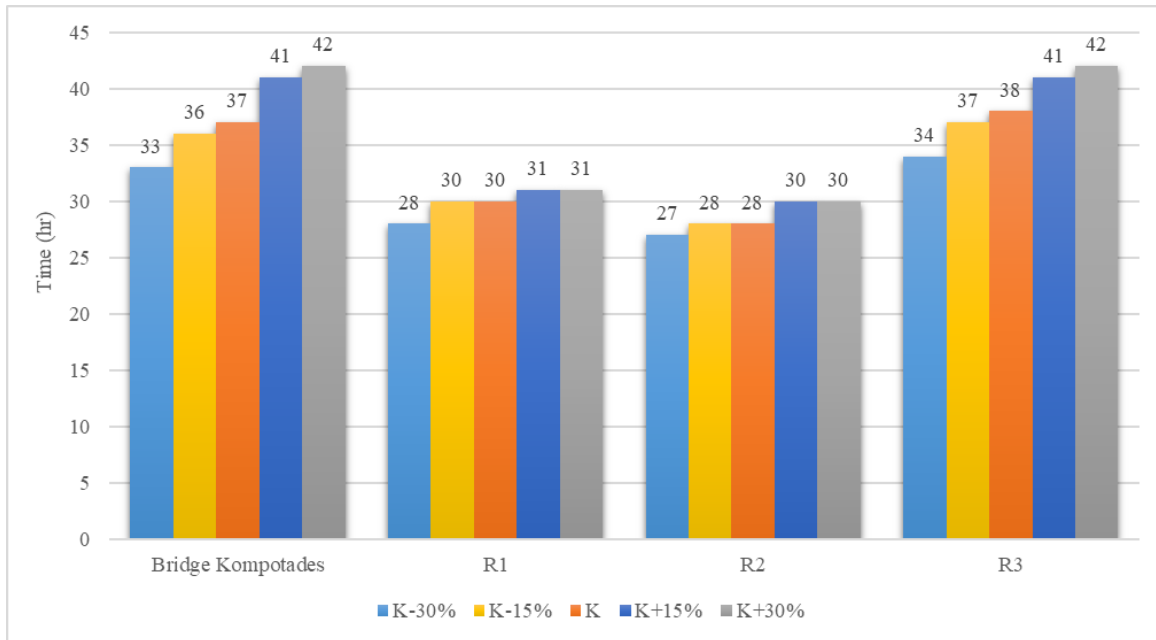
The parameter X affected slightly the peak discharge value, while the time to peak did not change at all. The largest difference in the peak discharge value is located at the basin output, (Kompotades Bridge), while out of the river sections, the biggest change occurred at R3.

### ***Parameter K***

For the sensitivity analysis of the parameter K, a  $\pm 15\%$  and a  $\pm 30\%$  change were applied to the initial estimated value used. The change in the peak discharge (m<sup>3</sup>/s) at the output of the basin, as well as, the outputs of each subbasin are shown in Figure 8, while the change in the time to peak are shown in Figure 9.



**Figure 8: Qmax(m<sup>3</sup>/s) - Sensitivity Analysis K**



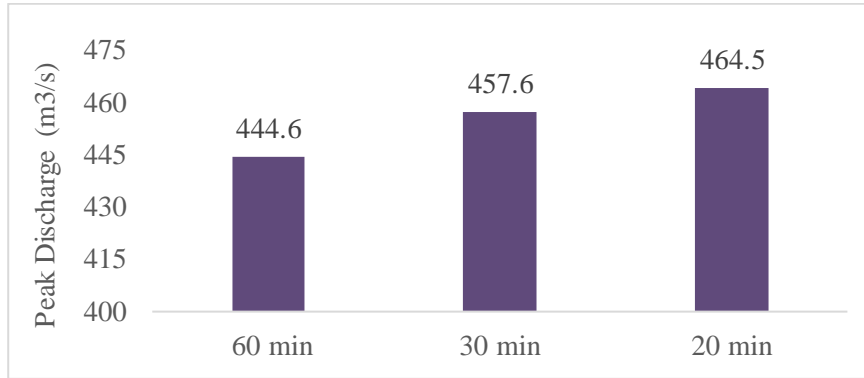
**Figure 9: Time of peak discharge - Sensitivity Analysis K**

As shown, parameter K affects both the time and value of the peak discharge more than parameter X. The largest changes for both the peak discharge and the time when it took place, are located at the outlet of the study area (Kompotades Bridge), while out of the river sections, the largest change occurred at R3. While the change in the peak discharge is similar in all points, concerning the time to peak, a small variation can be noted since river segments R1 and R2 do not change evenly with segment R3 or the basin outlet at bridge kombotades.

### ***Simulation time step***

All the simulations in this study were performed using a one hour calculation step. This time step was selected based on the size of the study area, the computational time and the rainfall time step. Since the rainfall data were available at 10 minute intervals, it was considered appropriate to perform simulations using a shorter time step, in order to evaluate the effect of the time step value on the routing method. Specifically, three simulations were performed, one using a time step of one hour, one using a step of 30 minutes and one using a step of 20 minutes. The change in the peak discharge ( $m^3/s$ ) at the outlet of the study area is presented in the Figure 10.





**Figure 10: Qmax(m<sup>3</sup>/s) - Sensitivity Analysis Time Step**

According to the results above, the time step of the calculations affects the overall result, since a 30-minute time step changed the peak discharge rate on the Kompotades bridge by 2.9%, while for a 20-minute time step it was changed by 4.4%. The time at which the peak discharge occurred remains constant.

## Conclusions

The results showed significant differences between the final flood hydrographs derived from the lumped and the semi-distributed model. Furthermore, the sensitivity analysis showed remarkable findings, such as that the parameter K has a particularly important role in the generated flood hydrographs, in contrast to parameter X and the time step that affected it much less. The main findings can be summarized as follows:

- Differences observed in the flood hydrographs generated from the semi-distributed and the lumped model, are mainly due to the spatial heterogeneity of the rainfall that is taken into account in the semi-distributed model and the hydrological routing performed.
- The results from the semi-distributed model are deemed more accurate than those of the lumped, because the spatial heterogeneity of rainfall is taken into account.
- The parameter X of Muskingum method affects only the peak discharge, while the time to peak remains unchanged.
- The parameter X has a small impact on the final flood hydrograph even for a large percentage change of its value, such as the 50% change applied in this study.
- Changes in the peak discharge are proportional to the corresponding changes in parameter X.

- The parameter K affects greatly both the peak discharge and the time to peak of the generated hydrograph.
- In short river segments, the impact of parameter K on the peak discharge is almost negligible and the impact on the time to peak is rather small. However, in longer river segments the impact on peak discharge and timing is deemed significant.
- In long river segments, the influence of parameter K on the peak discharge value is greater than that of parameter X, even though parameter X reflects the flood wave attenuation according to the Muskingum method.
- The greater change in peak discharge and time to peak values was observed in the flood hydrograph generated at the output of the study area. This change is not only due to the influence of parameter K on the peak discharge rate of the hydrograph, but is also mainly due to the influence of K on the time that the flood hydrographs of subbasins 2 and 3 collide with the hydrograph of the subbasin 1.
- As the simulation time step decreases, the peak discharge increases, while the time to peak shifts lightly.
- If high time resolution rainfall data are available, performing the hydrologic simulation in shorter time steps, will mostly lead to more accurate results.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Τα κύρια αίτια τους είναι οι κλιματολογικές μεταβολές, η αλλαγή των χρήσεων γης και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Μπαλτάς, 2018).

Τα πλημμυρικά φαινόμενα αντιστοιχούν περίπου στο 43% του συνόλου των πλημμυρικών καταστροφών. Η διαχείριση των πλημμυρών, είναι ένα παγκόσμια και διαχρονικά σημαντικό αντικείμενο που τις τελευταίες δεκαετίες έχει αποκτήσει πρόσθετο επιστημονικό ενδιαφέρον και ιδιαίτερη κοινωνική σημασία λόγω της συσχέτισής του με την κλιματική αλλαγή και τις αυξανόμενες αρνητικές κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι είναι αναγκαία η αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων με την εφαρμογή διάφορων μέτρων πρόληψης. Τα μέτρα πρόληψης χωρίζονται σε δύο είδη, τα «Σκληρά» (hard) δομικά μέτρα και τα «Μαλακά» (soft) μέτρα πολιτικής (Σκιάς, 2016). Τα «Μαλακά» μέτρα, είναι μη κατασκευαστικά μέτρα και αφορούν μέτρα όπως η διατήρηση των δασών, η οργάνωση των φορέων και η ενημέρωση των πολιτών. Τα «Σκληρά» μέτρα, αφορούν κυρίως κατασκευαστικά μέτρα, όπως αντιπλημμυρικοί ταμιευτήρες, αναχώματα και εκτροπές ποταμών.

Ο υδρολογικός σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση αντιπλημμυρικών έργων απαιτεί αξιόπιστη εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών που αντιστοιχούν σε μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Η εκτίμηση αυτή απαιτεί τη διαθεσιμότητα μεγάλου μήκους χρονοσειρών σε μικρή χρονική κλίμακα (ημερήσια, ωριαία). Συνήθως χρησιμοποιούνται δεδομένα βροχοπτώσεων, τα οποία εν συνεχεία μετατρέπονται σε πλημμυρικές παροχές, αφού αυτές είναι πιο εύκολα διαθέσιμες, έχουν μεγαλύτερο μήκος από αυτό των παροχών και είναι πιο αξιόπιστες καθώς η μέτρηση της βροχόπτωσης είναι ευκολότερη και τεχνικά πιο απλή από αυτή της μέτρησης των παροχών (Μπαριάμης, 2013).

Επομένως είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός της βροχής σε απορροή με την χρήση μοντέλων. Υπάρχει μεγάλο πλήθος υδρολογικών μοντέλων τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τον σκοπό της ανάλυσης, τα απαιτούμενα δεδομένα, τον αριθμό και την φύση των παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν. Η επιλογή του πλέον κατάλληλου μοντέλου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που εξαρτάται από τους παραπάνω παράγοντες σε συνδυασμό με την φύση της περιοχή μελέτης και ιδιαίτερα τα διαθέσιμα δεδομένα. Πολλές φορές εφαρμόζονται μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τύπους λεκανών άλλων χωρών, επομένως δεν

λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες των λεκανών απορροής της Ελλάδας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσομοίωση βροχής – απορροής σε λεκάνες που δεν διαθέτουν δεδομένα απορροής, οι οποίες απαντώνται συχνά στον Ελλαδικό χώρο, με αποτέλεσμα την αυξανόμενη δυσκολία βαθμονόμησης και επαλήθευσης των μοντέλων ώστε να προσομοιώνουν το φαινόμενο με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις αφορούν και την χωρική διάσταση της λεκάνης απορροής, όπως την κατάτμηση της σε επιμέρους μικρότερα τμήματα, τα οποία περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, με αποτέλεσμα την μείωση της αβεβαιότητας της τελικής πρόβλεψης στα σημεία ενδιαφέροντος. Τα μοντέλα ως προς τη χωρική κατανομή των δεδομένων χωρίζονται σε:

- **Ενιαία ή Συγκεντρωτικά (Lumped).** Στα συγκεκριμένα μοντέλα η περιοχή μελέτης θεωρείται ως ενιαία οντότητα στην οποία κατανέμονται ομοιόμορφα τα μεγέθη εισόδου και εξόδου.
- **Ημικατανεμημένα (Semi-distributed).** Στα εν λόγω μοντέλα η περιοχή μελέτης (λεκάνη απορροής) χωρίζεται σε επιμέρους υπολεκάνες απορροής με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Στην κάθε υπολεκάνη κατανέμονται ομοιόμορφα τα μεγέθη εισόδου και εξόδου και η κάθε μία έχει διαφορετικές χρονοσειρές εισόδου και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.
- **Κατανεμημένα (Distributed).** Τα κατανεμημένα μοντέλα, βασίζονται στην χωρική κατανομή των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Σε αυτά η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρά τμήματα και δημιουργείται ένας κানাβος στοιχείων (pixels).

Η χρήση του ημικατανεμημένου και του κατανεμημένου μοντέλου απαιτεί την εφαρμογή ενός μοντέλου υδρολογικής διόδευσης, προκειμένου τα πλημμυρογραφήματα των ανάντη υπολεκανών να διοδεύονται στο σημείο ενδιαφέροντος. Ο υπολογισμός των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες μεθόδους για την διόδευση των πλημμυρογραφημάτων, απαιτεί την χρήση δεδομένων απορροών τα οποία δεν είναι συχνά διαθέσιμα, με αποτέλεσμα αυτές οι παράμετροι να επιλέγονται βιβλιογραφικά ή εφαρμόζοντας κάποια κριτήρια. Τα κριτήρια επιλογής των παραμέτρων της υδρολογικής διόδευσης και ο ρόλος των παραμέτρων στο τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ιδιαίτερα σε προσομοιώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απορροών.

## 1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή μοντέλων διαφορετικής χωρικής ανάλυσης για την υδρολογική προσομοίωση διάφορων επεισοδίων βροχής απορροής, η διερεύνηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν και η σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε το συγκεντρωτικό ή ενιαίο μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η περιοχή μελέτης αντιμετωπίζεται ως μία ενιαία οντότητα και το ημικαταναμημένο, με βάση το οποίο η περιοχή έρευνας χωρίζεται σε επιμέρους υπολεκάνες. Επιπλέον στην περίπτωση του ημικαταναμημένου μοντέλου, επιχειρήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων της μεθόδου υδρολογικής διόδευσης Muskingum καθώς και του χρονικού βήματος της προσομοίωσης με σκοπό την κατανόηση της επιρροής τους στο τελικό πλημμυρογράφημα.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού και συγκεκριμένα ανάντη της γέφυρας των Κομποτάδων, πλησίον του οικισμού Κομποτάδες, συνολικού εμβαδού 1128 km<sup>2</sup>. Τα διαθέσιμα δεδομένα περιλαμβάνουν, χρονοσειρές βροχόπτωσης υψηλής χρονικής ανάλυσης από τέσσερεις βροχομετρικούς σταθμούς του δικτύου NOAAN (Lagouvardos et al, 2017) και συγκεκριμένα της Λαμίας, του Μαύρου Λιθαριού, της Μυρικής και της Μακρακώμης, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ), οι χρήσεις γης και ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Οι προσομοιώσεις με τα δύο μοντέλα έγιναν για τρία διαφορετικά επεισόδια βροχόπτωσης, τα οποία έλαβαν χώρα τα έτη 2012, 2015, 2019 και προκάλεσαν εκτεταμένες πλημμύρες. Για την ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε το επεισόδιο του έτους 2012.

Για την πραγματοποίηση της γεωμορφολογικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS (ArcMap 10.3) σε συνδυασμό με την εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS (Hydrologic Engineering Center, 2013), ενώ για την εκτέλεση των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική πλατφόρμα HEC-HMS. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder (Snyder, 1938) για την μετατροπή της βροχής σε απορροή το οποίο έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στον Ελληνικό χώρο, (Bournas, 2019), και η μέθοδος SCS για την εκτίμηση των απωλειών. Στο ημικαταναμημένο μοντέλο η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις υπολεκάνες, με κριτήρια τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, την κατανομή της βροχόπτωσης, το μέσο υψόμετρο, τις χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Η διόδευση των πλημμυρογραφημάτων στην έξοδο της περιοχής μελέτης έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου υδρολογικής διόδευσης Muskingum.

## 1.2 Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια εκ των οποίων το ένα είναι η εν λόγω εισαγωγή. Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- **Εισαγωγή**
- **Περιοχή Μελέτης – Γεωμορφολογική Ανάλυση**

Παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και η ευρύτερη λεκάνη απορροής στην οποία ανήκει. Γίνεται κυρίως γεωμορφολογική και υδρολογική παρουσίαση της και των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον παρουσιάζεται η γεωμορφολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την παραγωγή των απαραίτητων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην υδρολογική προσομοίωση των επιμέρους επεισοδίων.
- **Εφαρμογή της πλατφόρμας HEC HMS**

Παρουσιάζεται η υπολογιστική πλατφόρμα HEC HMS που χρησιμοποιήθηκε και οι επιμέρους μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την πραγματοποίηση της υδρολογικής προσομοίωσης των επεισοδίων.
- **Προσομοίωση Βροχής Απορροής – Ανάλυση Ευαισθησίας – Ανάλυση Αποτελεσμάτων**

Παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν με τη χρήση του ενιαίου και του ημικατανεμημένου μοντέλου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας στις παραμέτρους της μεθόδου Muskingum και στο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.
- **Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα**

Γίνεται συνοπτική αναφορά στο αντικείμενο και τη διάρθρωση της εργασίας, παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

## 1.3 Κατάλογος Λογισμικών Εργασίας

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι τα εξής:

- **ArcGIS** (Geographic Information System), πρόγραμμα επεξεργασίας και διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών.
- **HEC – GeoHMS** (Geospatial Hydrologic Modeling Extension), επέκταση του προγράμματος ArcGIS για τον υπολογισμό υδρολογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων μιας περιοχής.

- **HEC – DSSVue** (Data Storage System), πρόγραμμα αποθήκευσης και διαχείρισης υδρολογικών δεδομένων.
- **HEC – HMS** (Hydrologic Modeling System), πλατφόρμα υδρολογικών προσομοιώσεων.
- **Microsoft Office** (Word, Excel, PowerPoint).

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 2.1 Εισαγωγή

Ο Σπερχειός ποταμός ανήκει στην Περιφέρεια Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και συγκεκριμένα στην Περιφερειακή Ενότητα Φθιώτιδας. Το όνομα του πηγάζει από το ρήμα «σπέρχω» που σημαίνει «κινούμαι με ορμή». Οριοθετείται ανατολικά από την ακτογραμμή του Μαλιακού κόλπου, δυτικά από το όρος Τυμφρηστός, βόρεια από το όρος Όθρυς, και νότια από τους ορεινούς όγκους των Βαρδουσίων, της Οίτης και του Καλλίδρομου. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής είναι 1830 km<sup>2</sup>, ενώ το μέσο υψόμετρό της ανέρχεται σε 626 m. Η κύρια μισγάγγεια του ξεκινά από τις ανατολικές κλιείς του Τυμφρήστου στις θέση Άγιος Γεώργιος και έχει μήκος 80 km (Ευθυμίου κ.α., 2005).



Σχήμα 2-1: Περιοχή Μελέτης



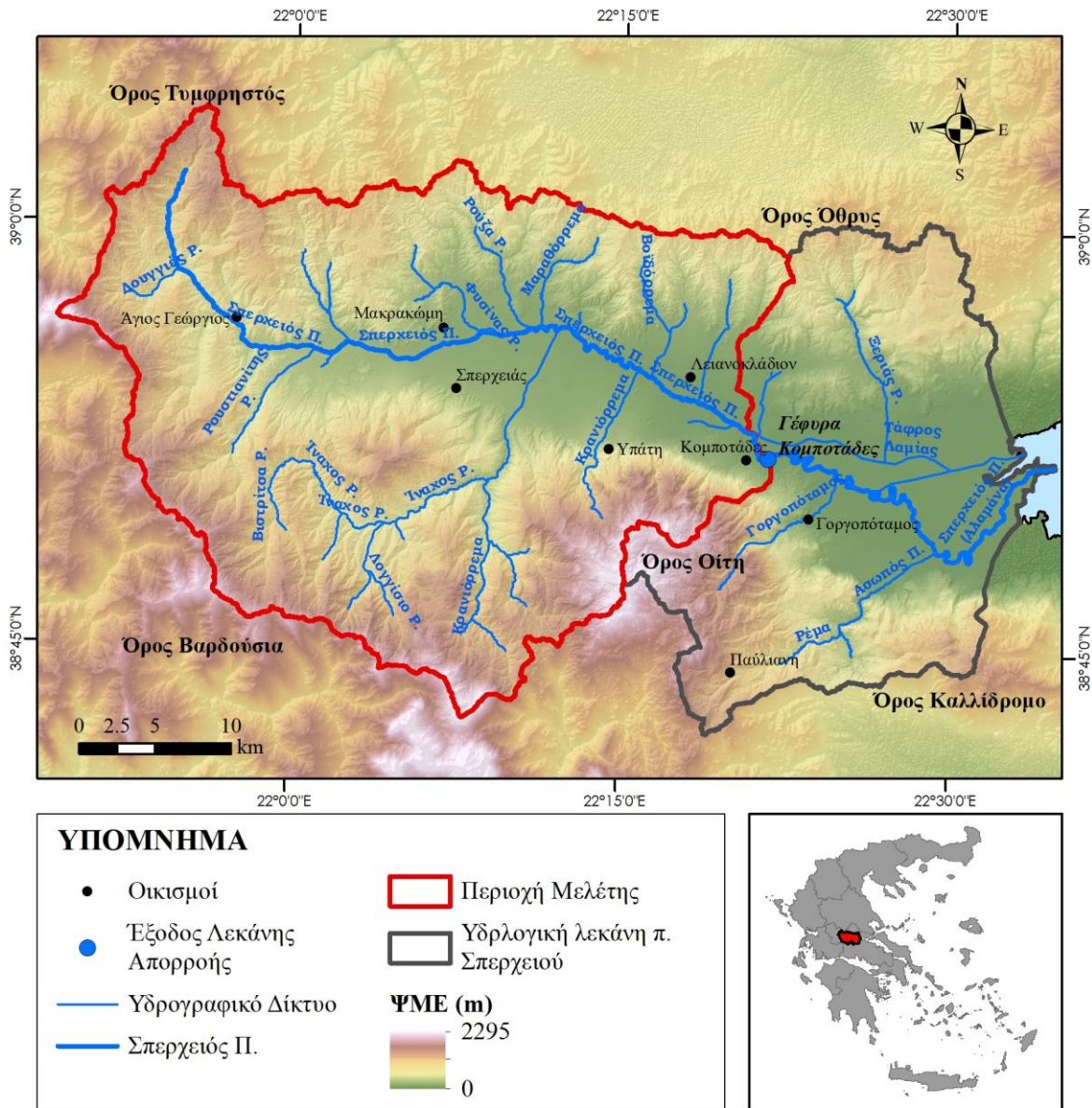
Η περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1, και αποτελεί περίπου το 62% της έκτασης της λεκάνης απορροής του Σπερχειού. Ο υδροκρίτης της ορίζεται δυτικά από το όρος Τυμφρηστός, βόρεια από το όρος Όθρυς, νότια από τα όρη των Βαρδουσίων, του Καλλίδρομου και τα Οίτης και ανατολικά η εν λόγω περιοχή διακόπτεται στο σημείο της γέφυρας των Κομποτάδων, πλησίον του οικισμού Κομποτάδες. Η έκταση της περιοχής μελέτης είναι 1128 km<sup>2</sup>. Διοικητικά το μεγαλύτερο μέρος της ανήκει στον Δήμο Μακρακώμης και το υπόλοιπο στον Δήμο Λαμιέων, ενώ το σύνολο της ανήκει στην Περιφέρεια Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε με γνώμονα την γεωγραφία της περιοχής και το ιστορικό πλημμυρών. Κατάντη της γέφυρας Κομποτάδων, ο Σπερχειός ποταμός εμφανίζει έντονους μαιανδρισμούς οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία πλημμυρών στην κατάντη περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονη αγροτική δραστηριότητα, (Bournas, 2019). Είναι σημαντικό η υδρολογική ανάλυση για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής να γίνεται σε θέση ανάντη της ευάλωτης περιοχής ώστε να υπάρχει γνώση της πλημμυρικής αιχμής που πρέπει να αντιμετωπισθεί από διάφορα κατασκευαστικά έργα χρησιμοποιώντας υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης.

## **2.2 Γεωμορφολογία – Υδρογραφία**

Ο Σπερχειός ποταμός πηγάζει από τις χαράδρες του όρους Τυμφρηστού στα δυτικά και εκρέουν σε αυτόν γύρω στους εξήντα ποταμούς και χειμάρρους. Το μήκος της κεντρικής κοίτης του Σπερχειού είναι 80 km, ενώ το τμήμα της κεντρικής κοίτης εντός της περιοχής μελέτης είναι περίπου 63 km. Η μέση κλίση κυμαίνεται κοντά στο 0.5% στις πεδινές περιοχές και 13% στο ορεινό τμήμα. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης είναι 718 m, το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής είναι 2295m, ενώ το ελάχιστο 17m. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε, είναι αυτό που μας παρείχε η Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε διαστάσεων φατνίου 5x5 m.

Ο Σπερχειός έχει υψηλή στάθμη κατά τους χειμερινούς μήνες και χαμηλή κατά τους θερινούς. Κατά μήκος της κοίτης του συναντάται παρόχθια δεινρόδης βλάστηση, που αποτελείται κυρίως από πλατάνια, ιτιές και ασπρόλευκες. Λόγω της μορφολογίας της περιοχής, αλλά και των άφθονων βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σπερχειού είναι πλούσιο. Αρκετοί παραπόταμοι και ρέματα ρέουν στην κύρια κοίτη. Οι κύριοι κλάδοι που συνθέτουν το υδρογραφικό δίκτυο είναι η ανατολική και η δυτική Βιστρίτσα, ο Ρουσιανίτης, ο Ίναχος και ο Λουγγιές. Η

γεωμορφολογία και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2.



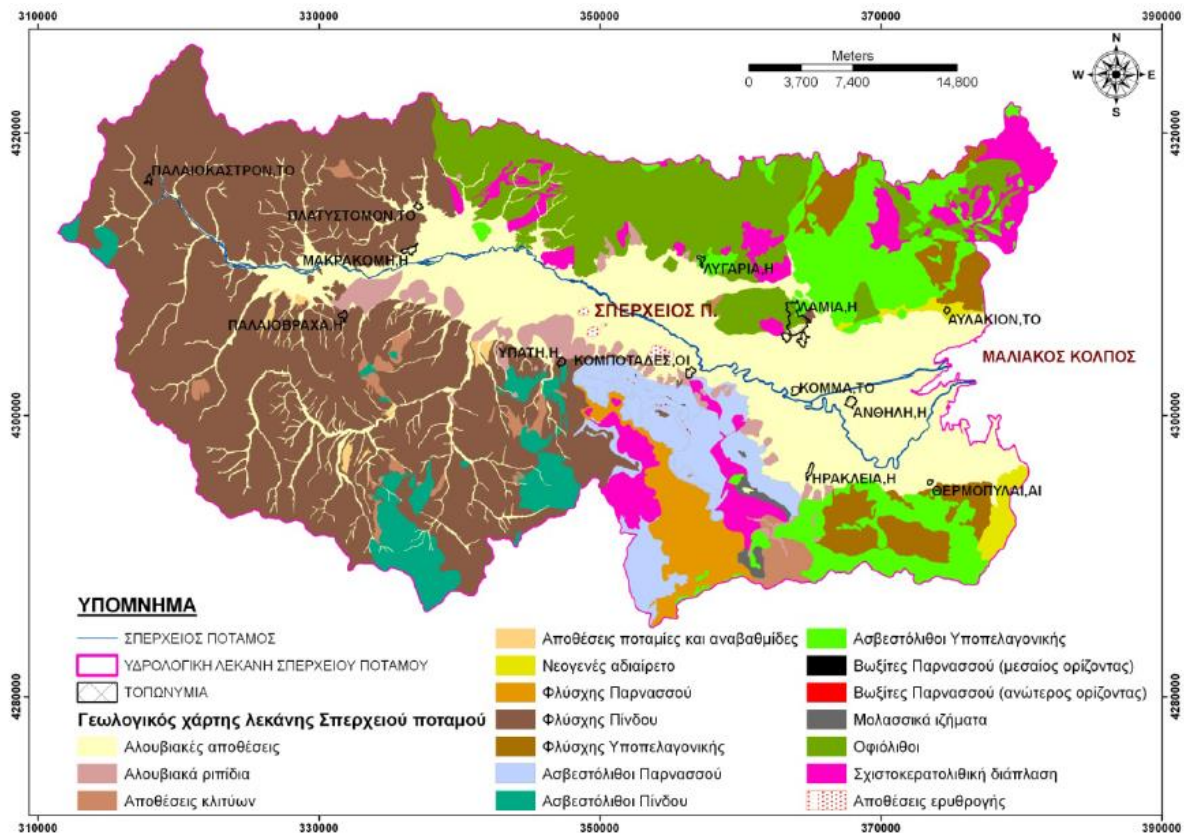
Σχήμα 2-2: ΨΜΕ και υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης του Σπερχειού ποταμού

### 2.3 Γεωλογία - Υδρογεωλογία

Στην περιοχή μελέτης οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται κυρίως είναι Φλύσχης Πίνδου κατά κύριο λόγο, ενώ οι υπόλοιποι σχηματισμοί είναι Αλουβιακά Ρυτίδια, Αλουβιακές Αποθέσεις, Ασβεστόλιθοι Πίνδου και Οφιόλιθοι. Οι σχηματισμοί στην ευρύτερη περιοχή παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-3.

Από υδρογεωλογικής άποψης, η περιοχή μελέτης καλύπτεται από αδιαπέρατους, ημιπερατούς, προσχωματικούς και καρστικούς σχηματισμούς. Στους αδιαπέρατους

σηματισμούς που καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής, κατατάσσονται οι σχηματισμοί σχιστοκερατολιθικής διάπλασης, οι σχηματισμοί του φλύσχη (εκτός των κροκαλοπαγών και των ασβεστολιθικών ενδιαστρώσεων), οι παλιότερες αποθέσεις ιλυαργίλων του Σπερχειού καθώς και οι ασβεστολιθικοί τόφοι των αποθέσεων των θερμών πηγών.

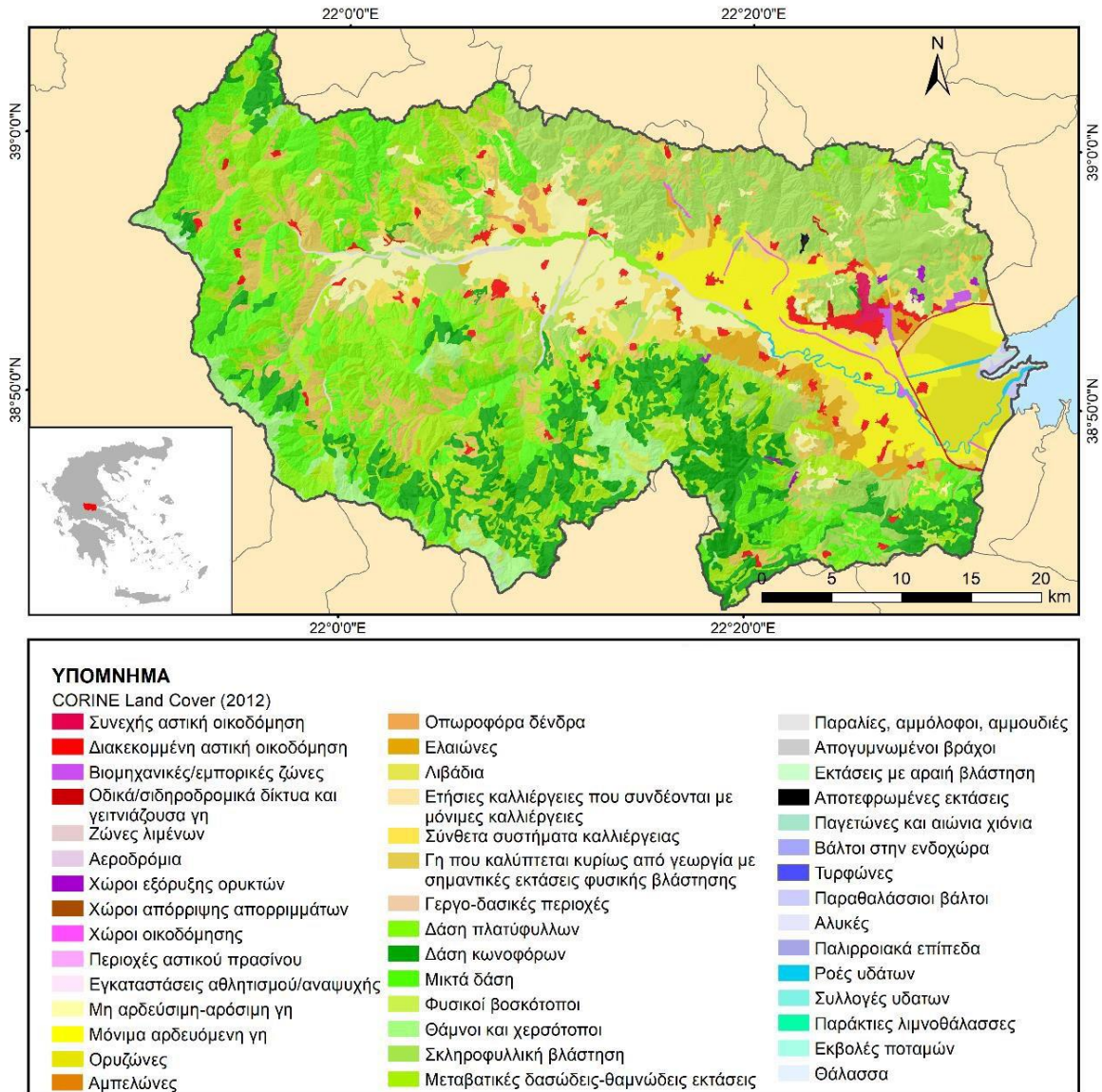


Σχήμα 2-3: Γεωλογία (Ψωμάδης, 2010)

## 2.4 Χρήσεις Γης

Για την ανάλυση των μορφών κάλυψης και χρήσεων γης στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε το σύνολο γεωχωρικών δεδομένων Corine Land Cover (CLC) για το έτος 2012 (Büttner, 2014) που διατίθενται μέσω του προγράμματος Copernicus (Copernicus Programme, 2018). Το Corine Land Cover αποτελεί μία ταξινόμηση των χρήσεων γης σε 44 κατηγορίες. Το CLC παράγεται κυρίως με φωτοερμηνεία δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας. Στη συνέχεια, ύστερα από τροποποιήσεις από τις αρμόδιες αρχές κάθε κράτους που συμμετέχει στο πρόγραμμα, οι χάρτες κάλυψης γης μετατρέπονται σε χάρτες χρήσεων γης.

Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης, καθώς αποτελεί κατά το μεγαλύτερο μέρος της το ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού, καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος από δασικές εκτάσεις. Στο πεδινό της τμήμα κύρια μορφή κάλυψης γης είναι η αγροτική γη, με οργανωμένα συστήματα καλλιέργειών. Οι χρήσεις γης σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του Σπερχειού παρουσιάζονται στο σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4: Χρήσεις Γης

## 2.5 Δίκτυο Υδρομετεωρολογικών Μετρήσεων

Από άποψη επιφανειακού υδατικού δυναμικού, η λεκάνη του Σπερχειού είναι η πλουσιότερη της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη ανέρχεται σε 905.6 mm, ενώ η μέση ετήσια απορροή της εκτιμάται σε 693.1 hm<sup>3</sup> ή 378.8 mm. Κατά την

τελευταία εικοσαετία παρατηρείται μείωση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης, με τη μέση τιμή της να κυμαίνεται πλέον κοντά στα 600 hm<sup>3</sup> (Καβαδά, 2012).

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης υπάρχουν 14 βροχομετρικοί σταθμοί, εκ των οποίων οι μισοί βρίσκονται εντός της λεκάνης απορροής του Σπερχείου, Σχήμα 2-5. Τα κριτήρια για την επιλογή των σταθμών των οποίων τα δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν ήταν η διαθεσιμότητα δεδομένων την τελευταία δεκαετία και η υψηλή χρονική ανάλυση αυτών. Οι βροχομετρικοί σταθμοί που τελικά επιλέχθηκαν ανήκουν στο δίκτυο NOAAN του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) και συγκεκριμένα είναι οι σταθμοί: Λαμία, Μυρική, Μακρακώμη και Μαύρο Λιθάρι, χρονικής ανάλυσης 10 λεπτών. Μετρήσεις απορροών που απαιτούνται για τις ανάγκες ανάλυσης επεισοδίων βροχής – απορροής, δηλαδή μικρής χρονικής ανάλυσης, δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2-5: Υδρομετεωρολογικοί Σταθμοί Περιοχής Μελέτης

## 2.6 Ιστορικό πλημμυρών – Λεκάνη απορροής Σπερχειού

Οι πλημμύρες στην περιοχή μελέτης αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή καταστροφή μετά από τις δασικές πυρκαγιές (Ψωμιάδης, 2010). Πλημμύρες στην περιοχή έρευνας έχουν σημειωθεί λόγω έντονης βροχόπτωσης, αλλά και από την απότομη τήξη χιονιού που είχαν σαν αποτέλεσμα την υπερχειλίση του Σπερχειού και την πρόκληση βλαβών σε γέφυρες, αγροτεμάχια και οικισμούς (Ψωμιάδης, 2010). Οι συχνές και με μεγάλες επιπτώσεις πλημμύρες στην περιοχή μελέτης, αλλά κυρίως κατάντη αυτής είναι ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περιοχή για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα πλημμυρικά επεισόδια που έλαβαν χώρα εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Σπερχειού την περασμένη 20ετία.

**Πίνακας 2-1: Ιστορικά Πλημμυρικά Επεισόδια**

<b>Ημερομηνία</b>	<b>Πλημμύρες</b>
10.05.1998	Πλημμύρα στον οικισμό Φραντζή.
23.11.1998	Πλημμύρα στους οικισμούς Ανθήλη και Λειανοκλάδι.
25.12.2001	Πλημμύρα στον οικισμό Φραντζή.
20.04.2002	Πλημμύρα στον οικισμό Γοργοποτάμου.
31.01.2003	Υπερχειλίση του Σπερχειού, με αποτέλεσμα τη διακοπή της κυκλοφορίας από Λαμία προς Υπάτη και από Λαμία προς Γοργοπόταμο, λόγω προβλημάτων στατικότητας στις δύο γέφυρες. Πλημμύρησαν επίσης περίπου 1000 στρέμματα στα χωριά Φραντζή και Κωσταλέξη και Λειανοκλάδι.
28.05.2004	Πλημμύρα στον οικισμό Ανθήλη.
21.04.2006	Πλημμύρα στον οικισμό Λειανοκλάδι.
20.11.2008	Πλημμύρα στους οικισμούς Ανθήλη, Φραντζή και Κωσταλέξη.
14.01.2009	Πλημμύρα στον οικισμό Φραντζή.
06.02.2012	Πλημμύρα από έντονη βροχόπτωση που έπληξε τα χωριά Φραντζή, Ανθήλη, Κόμμα, Καστρί.

01.02.2015	<p>Υπερχείλιση Σπερχειού λόγω έντονης βροχόπτωσης με αποτέλεσμα προβλήματα στον οικισμό Κόμμα και τη διακοπή κυκλοφορίας στη γέφυρα στο Καστρί, αλλά και στο σιδηροδρομικό δίκτυο Αθήνας – Θεσσαλονίκης σε σημείο της περιοχής έρευνας. Προβλήματα κυκλοφορίας υπήρχαν επίσης:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• στην Επ. Ο. Λαμίας – Γοργοποτάμου, στην Επ. Ο. Λειανοκλαδίου – Κωσταλεξίου,</li> <li>• στην Επ. Ο. Κωσταλεξίου-Λουτρών Υπάτης από το Δ.Δ. Κομποτάδων ως τη γέφυρα Σπερχειού (προς Σ.Σ. Λειανοκλαδίου),</li> <li>• στην Επ. Ο. Υπάτης-Σπερχειάδας, στη γέφυρα Βίστριζας (όρια Τ.Κ. Υπάτης) λόγω κινδύνου καθίζησης οδοστρώματος από αυξημένη ροή.</li> </ul> <p>Τέλος, παραπλεύρως του Σπερχειού πλημμύρισαν περίπου 700 στρέμματα αγροτικών εκτάσεων.</p>
09.09.2016	<p>Πλημμύρα από έντονη βροχόπτωση που είχε σαν αποτέλεσμα καταστροφές στα χωριά Σταυρός και Αμούρι, καθώς και στο Σ.Σ. στο Λειανοκλάδι.</p>
03.08.2018	<p>Πλημμύρα από έντονη βροχόπτωση με αποτέλεσμα ζημιές στο χωριό Στίρφακα, ΒΔ του Σταυρού, που ανήκει στη Δ.Ε. Λειανοκλαδίου. Είχε προηγηθεί έντονο επεισόδιο βροχόπτωσης στις 29 Ιουλίου με ζημιές μικρότερης έκτασης.</p>
10.01.2019	<p>Άνοδος της στάθμης του Σπερχειού, διακοπή της κυκλοφορίας σε τμήματα του οδικού δικτύου, πλημμύρα στην ΕΟ Λαμίας-Καρπενησίου.</p>

## 2.7 Υφιστάμενα Αντιπλημμυρικά Έργα

Εντός της λεκάνης απορροής του Σπερχειού έχουν κατασκευαστεί διάφορα αντιπλημμυρικά και αποστραγγιστικά έργα, καθώς στην περιοχή παρουσιάζονται έντονες πλημμυρικές απορροές, που σε μερικές περιπτώσεις προκαλούν καταστροφές κυρίως στις παρόχθιες αρδευτικές εκτάσεις. Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων, του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2017), υπάρχουν τα παρακάτω υφιστάμενα αντιπλημμυρικά έργα στην περιοχή μελέτης:

1. Τάφος Λαμίας. Κατασκευάστηκε το 1944 από τους Γερμανούς ως αντιπλημμυρικό έργο και αποχετεύει τα νερά λόγω υπερχείλισης του Σπερχειού στη χαμηλή περιοχή της κοιλάδας, μετά το χωριό Κομποτάδες και τα νερά του χειμάρρου Ξηριά. Ακολουθεί την πορεία ανάμεσα στο Λειανοκλάδι και στη Νέα Εθνική Οδό, και αφού διασχίσει την περιοχή του αρδευτικού δικτύου Ανθήλης – Μεγάλης Βρύσης εκβάλλει στο Μαλιακό Κόλπο, ακολουθώντας πορεία παράλληλη με τη νέα κοίτη του Σπερχειού.

2. Τη δεκαετία του 1950 πραγματοποιήθηκε ο εγκιβωτισμός του Σπερχειού ποταμού ανάμεσα στη σιδηροδρομική γέφυρα και τη γέφυρα του χωριού Κόμμα. Αποτελείται από ένα συνεχές αριστερό ανάχωμα μήκους 5 km περίπου, το οποίο περιλαμβάνει σε απόσταση 700 m κατάντη της σιδηροδρομικής γέφυρας και ένα σημείο εσκεμμένης θραύσης για την προστασία σε περιπτώσεις εξαιρετικά μεγάλης πλημμύρας. Επίσης, αποτελείται και από ένα δεξιό ανάχωμα, το οποίο διακόπτεται στη συμβολή του Γοργοποτάμου.
3. Τεχνητή κοίτη των εκβολών του Σπερχειού, κατασκευάστηκε το 1957-1958 στο ύψος του οικισμού Κόμμα για αντιπλημμυρική προστασία. Σε εκείνο το σημείο ο Σπερχειός διαχωρίζεται στη νέα τεχνητή κοίτη, γνωστή και ως Εκτροπή Σπερχειού και στη φυσική κοίτη που εκβάλλει στο Μαλιακό Κόλπο νοτιότερα. Σκοπός του έργου η απαλλαγή της κοίτης της Αλαμάνας από το μεγαλύτερο κομμάτι των υδάτων που απειλούσαν τον οικισμό Κόμμα και η διόδευση αυτών στη θάλασσα. Η τεχνητή κοίτη είναι ευθύγραμμη, έχει μήκος 9 km, διατομή τραπεζοειδή και παροχετευτικότητα 300 m<sup>3</sup>/sec.
4. Το 1980 και το 1981 πραγματοποιήθηκαν έργα συντηρήσεως, δηλαδή καθαρισμού, εκβάθυνσης και διαπλάτυνσης της παλιάς και της νέας κοίτης του Σπερχειού Ποταμού. Επίσης πραγματοποιήθηκε καθαρισμών των μπαγκινών από την υδροχαρή βλάστηση. Αντίστοιχα έργα έλαβαν χώρα στο τμήμα του Σπερχειού από τη σιδηροδρομική γραμμή έως το ύψος του οικισμού Αμούρι και ανάντη αυτού μέχρι τη γέφυρα στα Λουτρά Υπάτης. Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή αναχωμάτων μικρού μήκους και η επένδυση με συρματοκιβώτια σε διάφορες θέσεις του Σπερχειού, καθώς και ο καθαρισμός της κοίτης του.
5. Το 2000-2001 πραγματοποιήθηκαν έργα διαπλάτυνσης στον αγωγό εκτροπής – υπερχειλιστή του Σπερχειού ποταμού, με αποτέλεσμα το πλάτος του να είναι πλέον 90 m.
6. Το 2007 ξεκίνησε η κατασκευή νέου μεριστή στο σημείο αφετηρίας του υπερχειλιστή του Σπερχειού (νέα τεχνητή κοίτη) και κατασκευή πολλαπλών οχετών κάτω από το έργο της νέας σιδηροδρομικής γραμμής, ούτως ώστε να διασφαλιστούν η νέα διπλή σιδηροδρομική γραμμή, η νέα ΠΑΘΕ και οι οικισμοί Ανθήλη, Μοσχοχώρι και Κόμμα στις περιόδους έντονης παροχής του Σπερχειού ποταμού.
7. Επίσης στην περιοχή ενδιαφέροντος έχουν κατασκευαστεί σε πολλούς οικισμούς αρδευτικά έργα και συγκεκριμένα στους οικισμούς:
  - Δαμάστας, αρδευόμενη έκταση: 0.652 km<sup>2</sup>,
  - Μεξιατών, αρδευόμενη έκταση: 12.50 km<sup>2</sup>,



- Μοσχοχωρίου, αρδευόμενη έκταση: 9.00 km<sup>2</sup>,
- Φραντζή, αρδευόμενη έκταση: 2.60 km<sup>2</sup>,
- Αμουρίου – Λειανοκλαδίου – Ζηλευτού, αρδευόμενη έκταση: 10.00 km<sup>2</sup>,
- Μεξιατών – Κομποτάδων (Α' φάση), αρδευόμενη έκταση: 18.00 km<sup>2</sup>.

## **2.8 Γεωμορφολογική Ανάλυση**

### **2.8.1 Εισαγωγή**

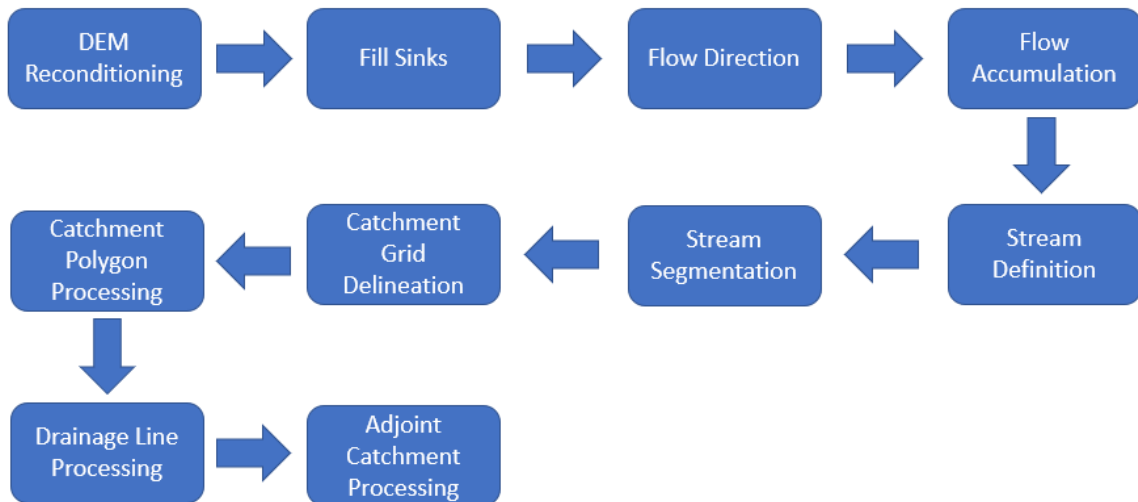
Για την πραγματοποίηση των υδρολογικών προσομοιώσεων, απαιτείται ο υπολογισμός διαφόρων γεωμορφολογικών και υδρολογικών στοιχείων της περιοχής μελέτης τα οποία συνήθως δεν είναι γνωστά. Ο υπολογισμός αυτών των στοιχείων είναι δυνατό να γίνει με τη χρήση ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση των λογισμικών ArcGis, ArcMap, και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, η οποία αποτελεί μία πρόσθετη εργαλειοθήκη για τον υπολογισμό υδρολογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων μιας περιοχής.

Στο πρόγραμμα εισήχθησαν ως δεδομένα εισόδου το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ανάλυση 5x5 m (E.K.X.A. A.E.), ο χάρτης χρήσεων γης Corine Land Cover 2012 και ο Εδαφολογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης (Υ.Π.Ε.Κ.Α.). Με την ολοκλήρωση του συνόλου της διαδικασίας επεξεργασίας και υπολογισμού των γεωμορφολογικών και υδρολογικών στοιχείων, προέκυψαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης, την κατανομή της βροχόπτωσης την εφαρμογή των μοναδιαίων υδρογραφημάτων για την μετατροπή της βροχής σε απορροή και άλλων υδρολογικών διεργασιών που θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Η γεωμορφολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε αρχικά σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του Σπερχειού και στη συνέχεια επικεντρώθηκε στην έκταση της περιοχής μελέτης.

### **2.8.2 Επεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους**

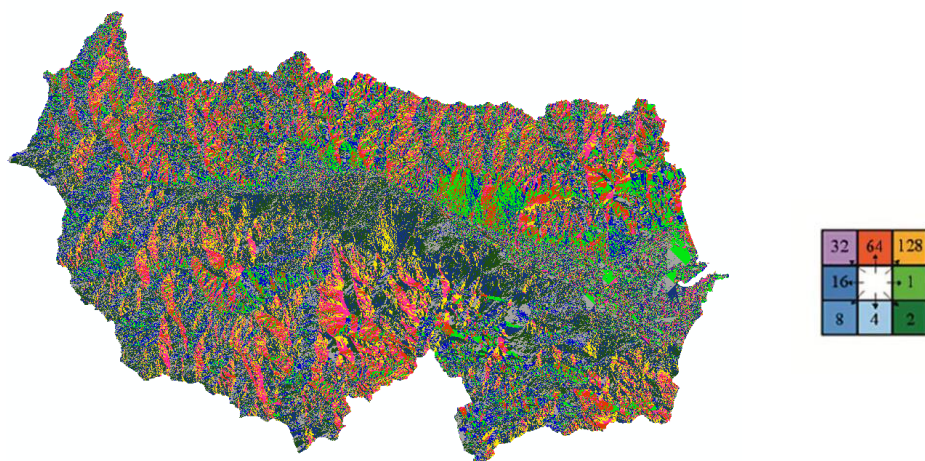
Προκειμένου να παραχθούν τα απαιτούμενα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική προσομοίωση, είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής εφαρμόζοντας μία δενδριτικού τύπου διαδικασία (Fleming & Doan, 2013). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS και περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 2-6) .



**Σχήμα 2-6: Διάγραμμα Ροής Επεξεργασίας Ψ.Μ.Ε.**

Τα εργαλεία που εφαρμόστηκαν και παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής, αναλύονται παρακάτω:

- **DEM Reconditioning:** Τροποποιεί τα κελιά του ψηφιακού μοντέλου εδάφους με σκοπό τη διόρθωση λανθασμένων υψομέτρων κατά την υψομετρική αποτύπωση.
- **Fill Sinks:** Διορθώνει τα βυθίσματα αυξάνοντας τοπικά το υψόμετρο των φατνίων στο επίπεδο της περιβάλλουσας περιοχής.
- **Flow Direction:** Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου εργαλείου δείχνει την κατεύθυνση της ροής σε κάθε φατνίο, χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Για την παραγωγή του κανάβου κατευθύνσεων απορροής, χρησιμοποιείται το Μοντέλο Απορροής 8 Διευθύνσεων (Jensen & Domingue, 1988), (Σχήμα 2-7).



**Σχήμα 2-7: Κανάβος Διεύθυνσης Απορροής Σπερχειού**

- **Flow Accumulation:** Με το συγκεκριμένο εργαλείο, υπολογίζεται ο αριθμός των ανάντη φατνίων που απορρέει σε ένα συγκεκριμένο φατνίο. Η περιοχή που απορρέει στον εν λόγω φατνίο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη τιμή της συγκέντρωσης ροής με το εμβαδόν του φατνίου.
- **Stream Definition:** Με αυτό το εργαλείο ταξινομούνται όλα τα φατνία με συγκέντρωση ροής μεγαλύτερη από το όριο που έχει οριστεί από τον χρήστη ως φατνία που ανήκουν σε ένα υδατόρευμα. Στην παρούσα εργασία δεν επιλέχθηκε ως όριο αριθμός φατνίων, αλλά η ελάχιστη έκταση των ανάντη λεκανών απορροής που εκβάλλει σε κάθε φατνίο και συγκεκριμένα το όριο που επιλέχθηκε είναι 5km<sup>2</sup>, το οποίο προτείνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία.
- **Stream Segmentation:** Με το συγκεκριμένο εργαλείο διαχωρίζεται το δίκτυο υδατορεύματος σε τμήματα. Τμήματα του υδατορεύματος είναι τα σημεία εκείνα που συνδέουν επιτυχώς δύο κόμβους.
- **Catchment Grid Delineation:** Με αυτό το εργαλείο οριοθετείται μια υπολεκάνη για κάθε τμήμα του υδατορεύματος. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8.



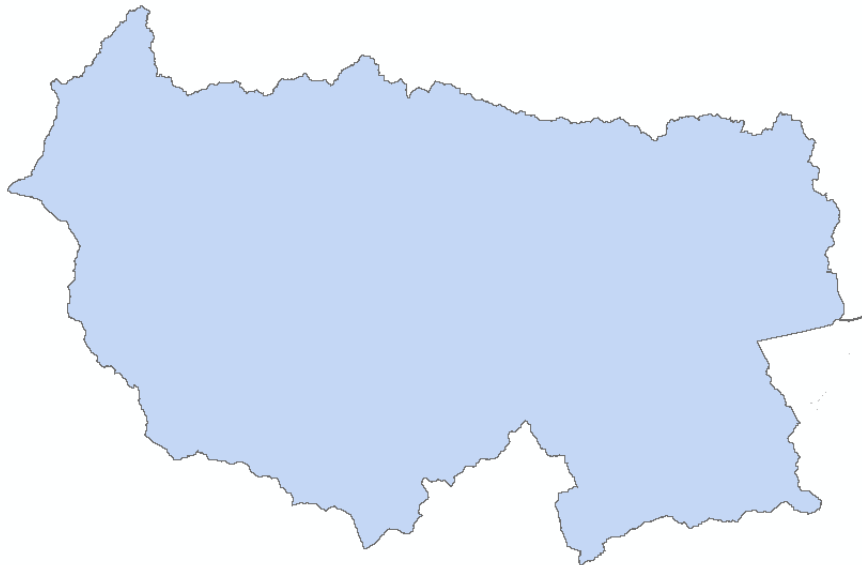
**Σχήμα 2-8: Αποτέλεσμα της διαδικασίας Catchment grid delineation**

- **Catchment Polygon Processing:** Μετατρέπει τον κανάβο του προηγούμενου βήματος σε διανυσματική μορφή.
- **Drainage Line Processing:** Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή κανάβου σε διανυσματική μορφή (Σχήμα 2-9).



**Σχήμα 2-9: Υδρογραφικό Δίκτυο Σπερχειού σε Διανυσματική Μορφή**

- Adjoint Catchment Processing: Συναθροίζει τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε διακλάδωση του υδατορεύματος. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στο σχήμα 2-10.



**Σχήμα 2-10: Συνολική λεκάνη που προέκυψε από το εργαλείο Adjoint Catchments**

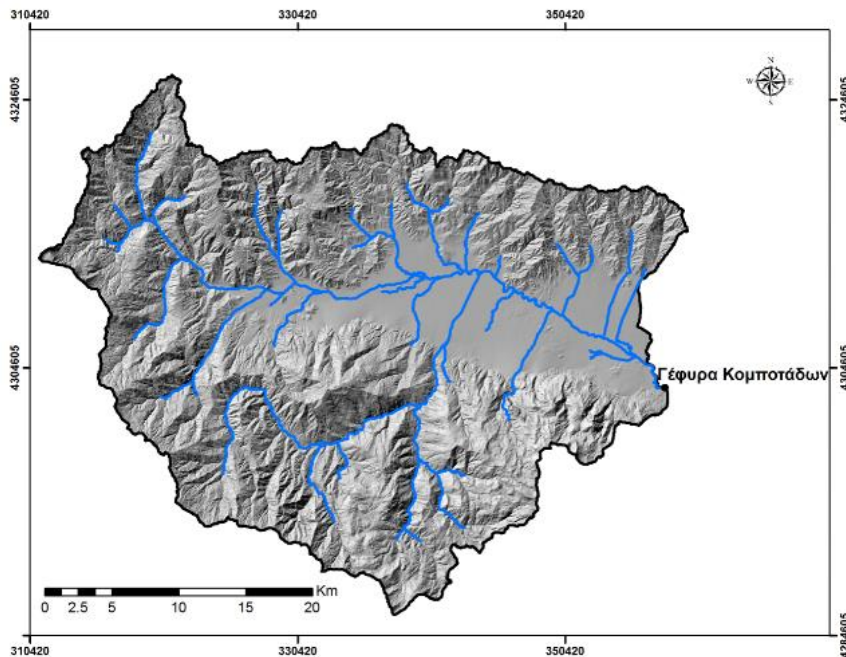
Όπως είναι εμφανές, το προαναφερθέν εργαλείο, δεν κατάφερε να σχεδιάσει ικανοποιητικά το όριο της λεκάνης απορροής του Σπερχειού, στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα. Το εν λόγω αποτέλεσμα προέκυψε λόγω χαμηλής ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους στην συγκεκριμένη περιοχή, αλλά διορθώθηκε ψηφιοποιώντας το με τη χρήση δορυφορικών απεικονίσεων.

### 2.8.3 Οριοθέτηση Περιοχής Μελέτης – Λεκανών Απορροής

Η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης και ο καθορισμός των λεκανών απορροής που αποτελούν αυτή, αποτελεί σημαντικό μέρος της γεωμορφολογικής ανάλυσης. Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού, ανάντη της Γέφυρας των Κομποτάδων. Συνεπώς για τη συνέχεια της γεωμορφολογικής ανάλυσης απομονώθηκε το τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού που αποτελεί την περιοχή μελέτης. Δημιουργήθηκαν δύο ξεχωριστά μοντέλα, το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο. Στο συγκεντρωτικό, όλες οι υπολεκάνες που είχαν δημιουργηθεί ενοποιήθηκαν σε μια ενιαία, ενώ στο ημικατανεμημένο ύστερα από επεξεργασία προέκυψαν τρεις υπολεκάνες εντός της περιοχής μελέτης με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μία.

#### Συγκεντρωτικό (Lumped) Μοντέλο

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η περιοχή μελέτης εξετάστηκε ως μία ενιαία λεκάνη απορροής με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά σε όλη την έκταση της, με έξοδο την Γέφυρα των Κομποτάδων. Η λεκάνη απορροής του συγκεντρωτικού μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11: Ενιαία Λεκάνη Απορροής – Συγκεντρωτικό Μοντέλο

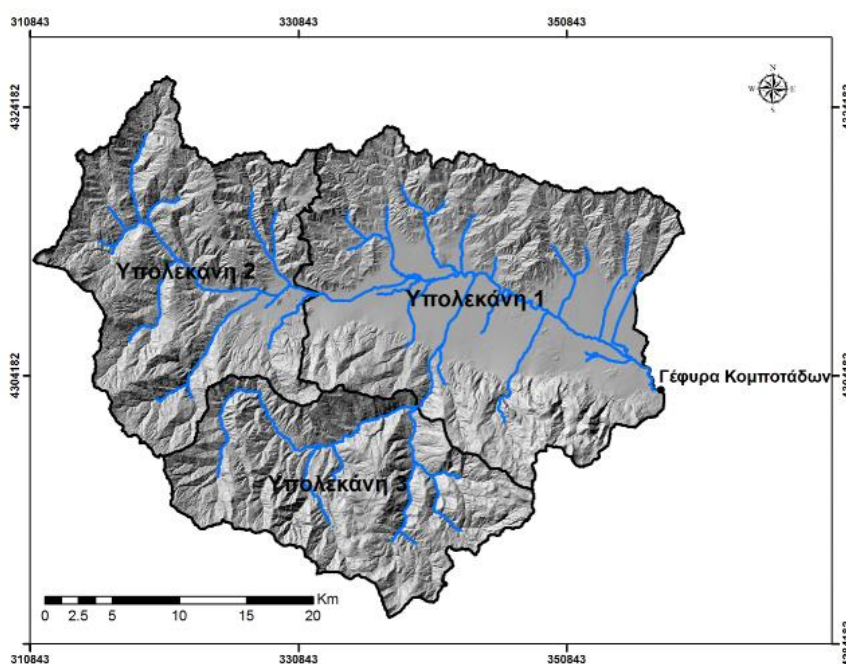
Με τη χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, υπολογίστηκαν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και διάφορα στοιχεία του υδρογραφικού δικτύου της, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 2-2.

**Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Περιοχής Μελέτης (Ενιαία Λεκάνη)**

Μέγεθος	Τιμή	
Έκταση Λεκάνης Απορροής	1128	km <sup>2</sup>
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής	68.50	km
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής από το κεντροίδες της λεκάνης απορροής	33	km
Μέγιστο Υψόμετρο	2294.50	m
Ελάχιστο Υψόμετρο	18	m
Μέσο Υψόμετρο	718	m

### Ημικατανεμημένο (Semi-distributed) Μοντέλο

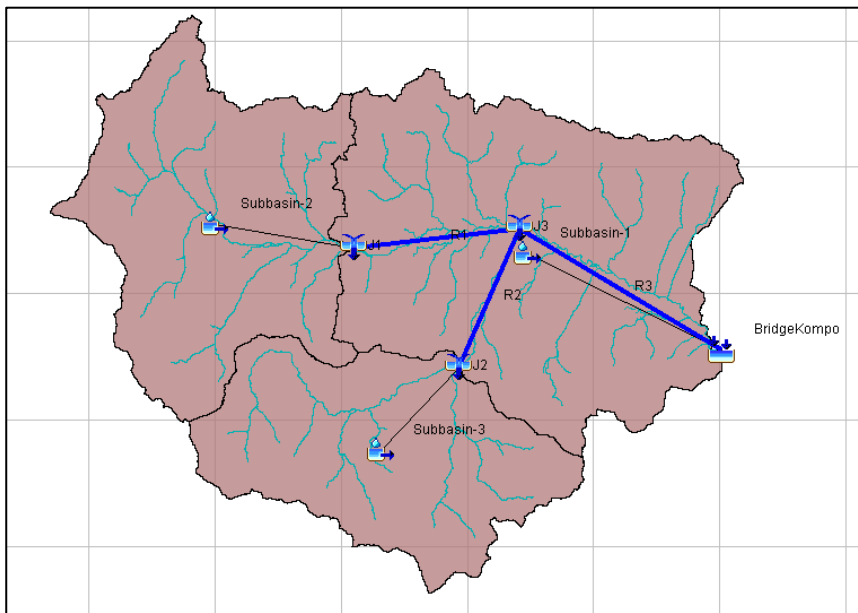
Στο ημικατανεμημένο μοντέλο η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε επιμέρους υπολεκάνες, οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους με σκοπό την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων λόγω του συνυπολογισμού της ανομοιομορφίας των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Τα κριτήρια για την διαίρεση της περιοχής μελέτης σε διάφορες υπολεκάνες ήταν πέντε, το μέσο υψόμετρο, η βροχόπτωση, οι εδαφολογικές κατηγορίες, οι χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Οι υπολεκάνες που προέκυψαν είναι τρεις και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2-12: Υπολεκάνες - Semi-distributed Model**

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν κάποια τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου τους. Σε αυτή την περίπτωση προέκυψαν τα

χαρακτηριστικά ξεχωριστά για την κάθε υπολεκάνη και επίσης υπολογίστηκαν τα μήκη των ποταμών στα οποία διοδεύτηκαν τα πλημμυρογραφήματα των δύο ανάντη υπολεκανών (Υπολεκάνη 2, Υπολεκάνη 3), προκειμένου να προκύψει το τελικό πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης. Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται η δομή του ημικαταναμημένου μοντέλου προσομοίωσης και συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι τρεις υπολεκάνες απορροής, η έξοδος της περιοχής μελέτης, καθώς και τα τμήματα του υδρογραφικού δικτύου (R1,R2,R3), εντός της υπολεκάνης 1. Τα χαρακτηριστικά των υπολεκανών που υπολογίστηκαν με τη χρήση του εργαλείου HEC-GeoHMS καθώς και των επιμέρους κύριων κλάδων R1, R2, R3 για κάθε υπολεκάνη παρατίθενται στον Πίνακα 2-3.



**Σχήμα 2-13: Δομή Ημικαταναμημένου Μοντέλου σε περιβάλλον HEC-HMS**

**Πίνακας 2-3: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Υπολεκανών Απορροής**

Μέγεθος	Υπολεκάνη 1	Υπολεκάνη 2	Υπολεκάνη 3
Έκταση Λεκάνης Απορροής (km <sup>2</sup> )	509	340	279
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής (km)	20	13	9
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής από το κεντροϊδές της λεκάνης απορροής (km)	45	34	35
Μέγιστο Υψόμετρο (m)	2111	2251	2295
Ελάχιστο Υψόμετρο (m)	18	173	260
Μέσο Υψόμετρο (m)	440	837	1079
Μήκος Κυρίου Κλάδου R	14.72 km	12.87 Km	21.97 Km

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ HEC-HMS

#### 3.1 Εισαγωγή – Υδρολογικά Μοντέλα

Η τυχαιότητα και η πολυπλοκότητα που ενέχουν οι υδρολογικές μεταβλητές, καθώς και η δυσκολία για καταγραφή δεδομένων παροχής, οδήγησαν στην κατασκευή μοντέλων για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της βροχής και τον υπολογισμό των παροχών.

Υδρολογικό μοντέλο είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 2013). Τα υδρολογικά μοντέλα ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ. Τα πιο γνωστά υδρολογικά μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς τον χρόνο της προσομοίωσης και ως προς την χωρική κατανομή των δεδομένων. Τα μοντέλα ως προς τον χρόνο προσομοίωσης χωρίζονται σε:

- Μοντέλα ενός μεμονωμένου υδρολογικού επεισοδίου (Βροχής – Απορροής). Είναι τα μοντέλα που περιλαμβάνουν ως είσοδο ένα μεμονωμένο επεισόδιο βροχής και ως έξοδο ένα υδρογράφημα απορροής.
- Συνεχή μοντέλα. Είναι τα μοντέλα που περιλαμβάνουν ως είσοδο μία ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών.

Τα μοντέλα ως προς τη χωρική κατανομή των δεδομένων χωρίζονται σε Συγκεντρωτικά (Lumped), Ημικατανεμημένα (Semi-distributed) και Κατανεμημένα (Distributed). Στα συγκεντρωτικά μοντέλα η περιοχή μελέτης θεωρείται ως ενιαία οντότητα στην οποία κατανέμονται ομοιόμορφα τα μεγέθη εισόδου και εξόδου. Στα ημικατανεμημένα μοντέλα η περιοχή μελέτης (λεκάνη απορροής) χωρίζεται σε επιμέρους υπολεκάνες απορροής με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Στην κάθε υπολεκάνη κατανέμονται ομοιόμορφα τα μεγέθη εισόδου και εξόδου και η κάθε μία έχει διαφορετικές χρονοσειρές εισόδου και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Ενώ τα κατανεμημένα μοντέλα, βασίζονται στην χωρική κατανομή των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Σε αυτά η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρά τμήματα και δημιουργείται ένας κানাβος στοιχείων (pixels).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε χρήση του μοντέλου βροχής – απορροής. Συγκεκριμένα έγινε προσομοίωση διαφορετικών επεισοδίων βροχόπτωσης, αρχικά



θεωρώντας την περιοχή μελέτης ως ενιαία οντότητα (lumped) και στη συνέχεια διαιρώντας τη σε επί μέρους υπολεκάνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μεταξύ τους και ανάλυση αυτών, καθώς και των δύο διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης. Για την εφαρμογή της προσομοίωσης των επεισοδίων χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική πλατφόρμα HEC HMS.

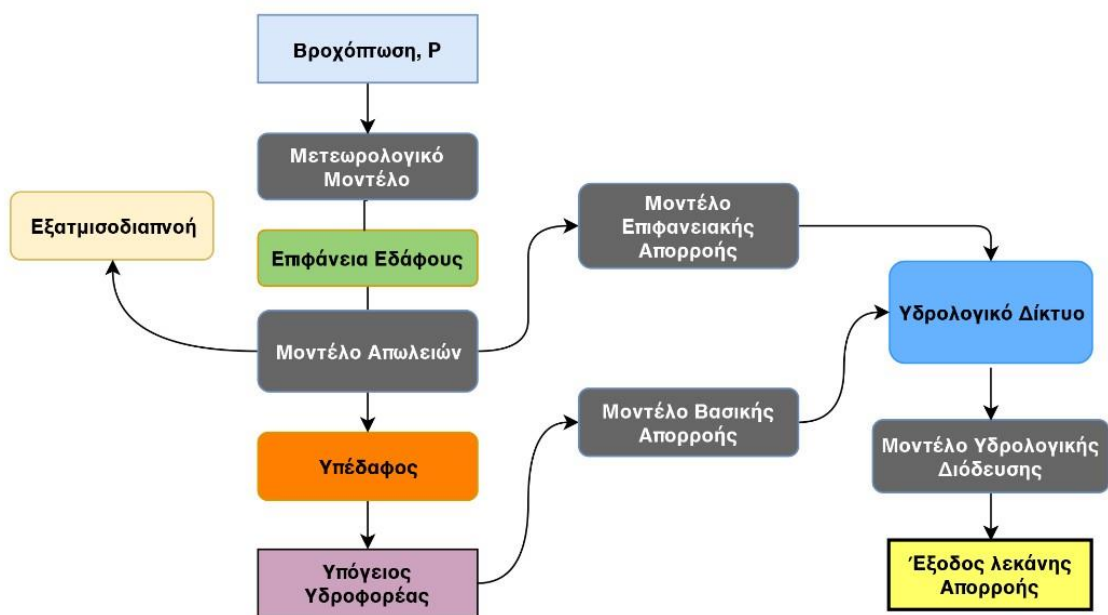
### **3.2 Η υπολογιστική πλατφόρμα HEC-HMS**

Το HEC-HMS είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη υπηρεσία στρατού, U.S. Army Corp of Engineers. Έχει σχεδιαστεί ώστε να επιλύει ένα ευρύ φάσμα υδρολογικών προσομοιώσεων όπως η ανάλυση μεγάλων υδάτινων συστημάτων, η ανάλυση επεισοδίων βροχής, η ανάλυση ποιοτικών χαρακτηριστικών της απορροής και η προσομοίωση μεταφοράς φερτών. Το HEC-HMS είναι μια πλατφόρμα διασύνδεσης μοντέλων για τον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων και περιλαμβάνει:

- Μοντέλο λεκάνης απορροής
- Μετεωρολογικό μοντέλο,
- Μοντέλο υπολογισμού υδρολογικών απωλειών,
- Μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής,
- Μοντέλο υπολογισμού βασικής απορροής
- Μοντέλο υδρολογικής διόδευσης.

Στο σχήμα 3-1, παρουσιάζεται μια γενική μορφή του τρόπου προσομοίωσης μιας λεκάνης απορροής, χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μοντέλα μέσα από την πλατφόρμα του HEC-HMS.

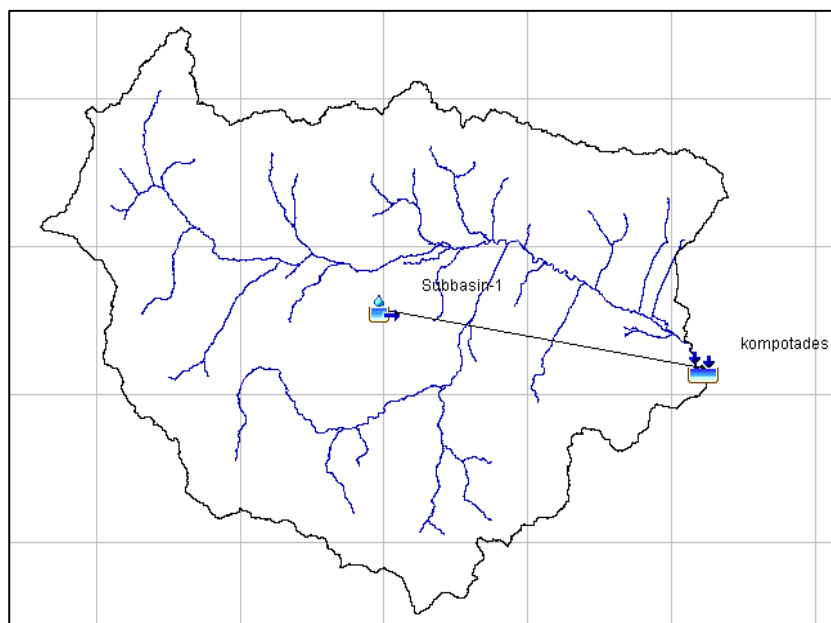
Για καθεμία από τις κατηγορίες των μοντέλων, μια σειρά από επιμέρους μεθόδους είναι διαθέσιμες προς χρήση ανάλογα με την κρίση του χρήστη και σε σχέση με τα διαθέσιμα δεδομένα. Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για κάθε μοντέλο είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή κάθε μεθόδου και η εμπειρία του χειριστή, με τη λογική ότι ο χειριστής είναι ικανός να κρίνει τη δυνατότητα απόκλισης κάποιων μεθόδων για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους μοντέλα που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση των επεισοδίων και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ένα από αυτά.



Σχήμα 3-1: Αναπαράσταση δομής της πλατφόρμας HEC-HMS ( Μπαλτάς, 2018)

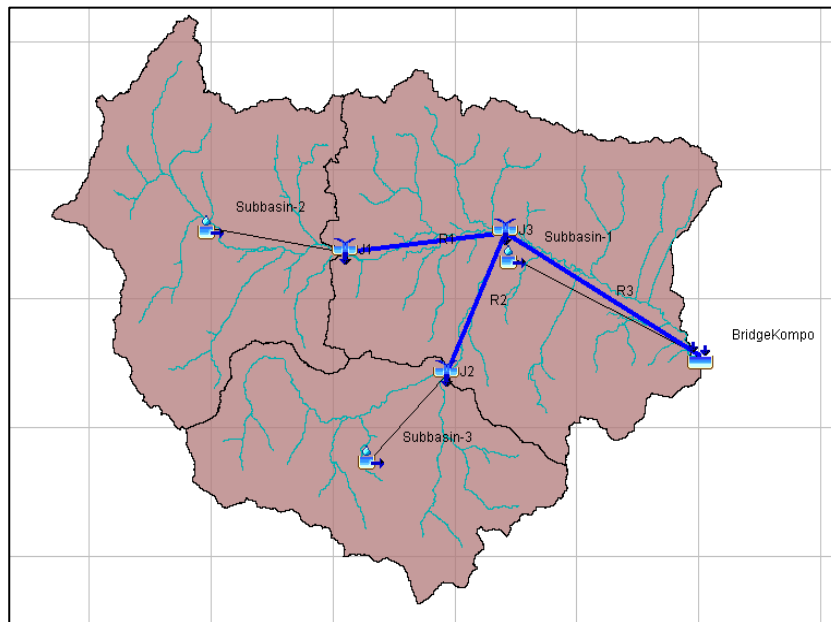
### 3.3 Μοντέλο Λεκάνης Απορροής

Αρχικά έγινε η εισαγωγή του μοντέλου λεκάνης απορροής που προέκυψε από το Hec-GeoHms, το οποίο εμπεριέχει τη δομή του μοντέλου (υπολεκάνες, έξοδος, κλπ.) και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του μοντέλου, όπως αυτά υπολογίστηκαν σε περιβάλλον Gis με τη βοήθεια του HEC - GeoHMS. Στα σχήματα 3-2 και 3-3 παρουσιάζονται αντίστοιχα το συγκεντρωτικό και το ημικαταναμημένο μοντέλο.



Σχήμα 3-2: Συγκεντρωτικό Μοντέλο HEC-HMS

Στο συγκεντρωτικό μοντέλο η περιοχή μελέτης αποτελεί μία ενιαία λεκάνη απορροής με έξοδο την γέφυρα των Κομποτάδων. Το τελικό πλημμυρογράφημα υπολογίστηκε άμεσα στην έξοδο της περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 3-3: Ημικαταναεμημένο Μοντέλο HEC-HMS**

Στο ημικαταναεμημένο μοντέλο η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις υπολεκάνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, έχοντας ως κριτήρια το μέσο υψόμετρο, τη βροχόπτωση, τις εδαφολογικές κατηγορίες, τις χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Το πλημμυρογράφημα που προκύπτει από την υπολεκάνη 1 υπολογίστηκε άμεσα στην έξοδο της περιοχής μελέτης, ενώ τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3, διεδεύτηκαν αρχικά μέσω των κλάδων του ποταμού R1 και R2 αντίστοιχα και έπειτα διεδεύτηκαν και τα δύο μέσω του κλάδου R3 στην έξοδο της περιοχής μελέτης.

### **3.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο**

Το μετεωρολογικό μοντέλο έχει σκοπό την προετοιμασία των μετεωρολογικών ορίων για τις υπολεκάνες. Περιλαμβάνει κυρίως την κατακρήμνιση αλλά και προαιρετικά, σε περιπτώσεις συνεχούς προσομοίωσης, μεθόδους υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής και τήξης χιονιού. Προσφέρονται επτά διαφορετικές μέθοδοι αναφορικά με το εφαρμοζόμενο μετεωρολογικό μοντέλο. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η χρήση βαρών δεδομένων βροχομετρικών σταθμών (gauge weights), όπου εισάγονται τα δεδομένα βροχόπτωσης ανά σταθμό, ενώ ορίζονται τα αντίστοιχα βάρη. Άλλες μέθοδοι που προσφέρονται για άλλες

μορφές δεδομένων, όπως π.χ. κατανεμημένη βροχόπτωση από δεδομένα ραντάρ (gridded precipitation), ή σε θεωρητικές καταιγίδες που προκύπτουν ύστερα από στατιστική επεξεργασία. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος των βαρών δεδομένων βροχομετρικών σταθμών. Τα βάρη υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Thiessen σε περιβάλλον GIS. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα πολύγωνα Thiessen στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 3-4: Πολύγωνα Thiessen - Περιοχή Μελέτης**

Για το συγκεντρωτικό μοντέλο υπολογίστηκε το βάρος του κάθε σταθμού, διαιρώντας την περιοχή επιρροής του κάθε σταθμού στην περιοχή μελέτης με το συνολικό εμβαδόν της περιοχής μελέτης. Ο υπολογισμός των βαρών των σταθμών για τις υπολεκάνες του ημικατανεμημένου μοντέλου, έγινε με παρόμοιο τρόπο, αποκόπτοντας το αποτέλεσμα των πολυγώνων Thiessen στα όρια της κάθε υπολεκάνης και υπολογίζοντας τα βάρη όπως προαναφέρθηκε.

Τα επεισόδια βροχής απορροής που επιλέχθηκαν είναι αυτά τα οποία έλαβαν χώρα την 6/2/2012, την 1/2/2015 και την 10/1/2019 και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3-1: Επεισόδια Βροχής-Απορροής**

A/A	Ημερομηνία Επεισοδίου	Ημερομηνία έναρξης	Ώρα έναρξης	Ώρα λήξης	Διάρκεια Βροχόπτωσης (h)	Αριθμός Σταθμών
<b>E2012</b>	6/2/2012	6/2/2012	4:00	23:00	68	3
<b>E2015</b>	1/2/2015	30/1/2015	7:00	23:00	89	4
<b>E2019</b>	10/1/2019	9/1/2019	10:00	20:00	83	4

Καθώς για τον υδρομετεωρολογικό σταθμό Λαμία δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης για το επεισόδιο που έλαβε χώρα το έτος 2012 υπολογίστηκαν δύο διαφορετικά μετεωρολογικά μοντέλα, το ένα συμπεριλαμβάνοντας τον σταθμό της Λαμίας και το δεύτερο χωρίς αυτόν. Τα μετεωρολογικά μοντέλα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 3-2 και 3-3.

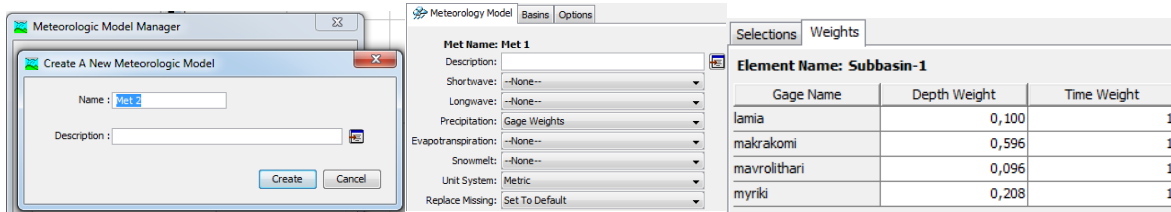
**Πίνακας 3-2: Συντελεστές Thiessen - Συγκεντρωτικό Μοντέλο**

<b>Συντελεστές Thiessen – Συγκεντρωτικό Μοντέλο</b>			
<b>Βάρη με τον σταθμό Λαμία</b>		<b>Βάρη χωρίς τον σταθμό Λαμία</b>	
	<b>Βάρη</b>		<b>Βάρη</b>
Λαμία	0.100	Μακρακώμη	0.673
Μακρακώμη	0.596	Μαύρο λιθάρι	0.119
Μαύρο λιθάρι	0.096	Μυρική	0.208
Μυρική	0.208		

**Πίνακας 3-3: Συντελεστές Thiessen - Ημικατανεμημένο Μοντέλο**

<b>Συντελεστές Thiessen – Ημικατανεμημένο Μοντέλο – Βάρη με τον σταθμό Λαμία</b>					
<b>Υπολεκάνη 1</b>	<b>Βάρη</b>	<b>Υπολεκάνη 2</b>	<b>Βάρη</b>	<b>Υπολεκάνη 3</b>	<b>Βάρη</b>
Λαμία	0.222	Μακρακώμη	0.403	Μακρακώμη	0.581
Μακρακώμη	0.733	Μυρική	0.597	Μαύρο Λιθάρι	0.305
Μαύρο Λιθάρι	0.045			Μυρική	0.114
<b>Συντελεστές Thiessen – Ημικατανεμημένο Μοντέλο – Βάρη χωρίς τον σταθμό Λαμία</b>					
<b>Υπολεκάνη 1</b>	<b>Βάρη</b>	<b>Υπολεκάνη 2</b>	<b>Βάρη</b>	<b>Υπολεκάνη 3</b>	<b>Βάρη</b>
Μακρακώμη	0.90	Μακρακώμη	0.40	Μακρακώμη	0.58
Μαύρο Λιθάρι	0.10	Μυρική	0.60	Μαύρο Λιθάρι	0.31
				Μυρική	0.11

Μετά από τον υπολογισμό των συντελεστών κατά Thiessen, εισήχθησαν οι βροχομετρικοί σταθμοί από το μενού εισαγωγής (Components – Time Series Data Manager – New ) και δημιουργήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο από το μενού (Components – Meteorologic Manager – New ) επιλέγοντας όσο αφορά τη βροχόπτωση τη μέθοδο των βαρών βροχομετρικών σταθμών (Gage Weights). Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την προσομοίωση και με τα δύο μοντέλα. Παρακάτω παρουσιάζεται με εικόνες η ολοκλήρωση της διαδικασίας για τη δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου.



Σχήμα 3-5: Δημιουργία Μετεωρολογικού Μοντέλου - Εισαγωγή Συντελεστών Thiessen

### 3.5 Εκτίμηση Υδρολογικών Απωλειών

#### 3.5.1 Η μέθοδος SCS

Οι υδρολογικές απώλειες οφείλονται κυρίως στη διήθηση, την παρεμπόδιση και την κατακράτηση, οδηγούν στη σημαντική μείωση της απορροής σε μία λεκάνη και είναι απαραίτητο να υπολογιστούν και να ληφθούν υπ' όψιν σε οποιαδήποτε προσομοίωση. Οι διαδικασίες που οδηγούν στις απώλειες βροχόπτωσης προσομοιάζονται με έναν ενοποιημένο τρόπο από το HEC-HMS μέσω μιας μεθόδου υπολογισμού απωλειών που ορίζεται για κάθε υπολεκάνη. Η εν λόγω πλατφόρμα παρέχει πέντε διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης απωλειών, εκ των οποίων στην συγκεκριμένη εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος κατά SCS (SCS, 1972). Η SCS έχει αναπτύξει μια μέθοδο (1972), η οποία με τη χρήση του αριθμού καμπύλης (Curve Number) υπολογίζει τα υδρολογικά ελλείματα. Συγκεκριμένα η μέθοδος υπολογίζει το ύψος του περισσεύματος βροχής από τρεις μεταβλητές: το ύψος βροχής, τα αρχικά ελλείματα και το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους – φυτοκάλυψης που εκφράζεται από έναν αδιάστατο αριθμό, τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (runoff curve number), ο οποίος παίρνει τιμές από 0 έως 100. Ο αριθμός CN προκύπτει με βάση τον υδρολογικό τύπο του εδάφους (διηθητικότητα), την κάλυψη, τον τρόπο διαχείρισης της γης καθώς και την προηγούμενη κατάσταση απορροής. Οι τιμές του αριθμού αυτού λαμβάνονται από πίνακες για διάφορα σύμπλοκα εδαφικών τύπων εδάφους και κάλυψης του εδάφους, σύμφωνα με τις μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο υπολογίζεται το ενεργό ύψος βροχής με την ακόλουθη σχέση:

$$he = \begin{cases} 0 & \text{για } he > S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8S} & \text{για } he < S \end{cases}$$

Για  $he < 0.2S$  τότε  $he = 0$

Η μέγιστη δυνατή κατακράτηση  $S$  συνδέεται με τον αδιάστατο αριθμό καμπύλης CN σύμφωνα με τη παρακάτω εξίσωση:

$$S(mm) = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right), \quad 0 \leq CN \leq 100$$

Από μελέτη αποτελεσμάτων μικρών πειραματικών λεκανών, προέκυψε ότι οι αρχικές απώλειες ισούνται με το 20% της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης  $S$ . Συνεπώς προτείνεται για τη μέθοδο να ληφθεί:

$$Ia = 0.2S$$

Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή 0.2 του λόγου των αρχικών απωλειών  $Ia$  προς τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση  $S$ , θεωρείται ασυνήθιστα υψηλή (Baltas et al. 2007), με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση των αρχικών απωλειών. Επομένως στη συγκεκριμένη εργασία για όλες τις προσομοιώσεις θα ληφθεί ως τιμή του προαναφερθέντος λόγου το 0.1.

Οι αριθμοί καμπύλης  $CN$  εξάγονται από πίνακες ανάλογα με τον υδρολογικό τύπο του εδάφους (διηθητικότητα), την κάλυψη, τον τρόπο διαχείρισης της γης καθώς και την προηγούμενη κατάσταση απορροής. Τα εδάφη κατατάσσονται ανάλογα με τη διαπερατότητά τους στις Κατηγορίες A, B, C, ή D με βάση τα παρακάτω κριτήρια (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

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

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

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

Κατηγορία 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 αδιαπέρατο υλικό.

Οι αριθμοί καμπύλης  $CN$ , διαχωρίζονται και ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Οι συνθήκες υγρασίας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

- Κατάσταση I: Η κατάσταση κατά την οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άρωση ή καλλιέργεια.
- Κατάσταση II: Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές

λεκάνες απορροής.

- Κατάσταση III: Αν έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες πέντε ημέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Η επιλογή της κατηγορίας εδαφικής υγρασίας, γίνεται κυρίως με κριτήριο το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων πέντε ημερών στην περιοχή. Με βάση τη μέθοδο SCS η επιλογή γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3-4: Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους (SCS, 1972)**

Κατηγορία	Συνολικό ύψος βροχής των 5 προηγούμενων ημερών (mm)	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος Βλάστησης
I	<13	<35
II	13 έως 28	35 έως 53
III	>28	>53

Το σύμπλοκο εδάφους – φυτοκάλυψης που αντιπροσωπεύει τον τύπο του εδάφους από υδρολογική άποψη και την κατηγορία φυτοκάλυψης και χρήσης γης μπορεί να εκφρασθεί με τον αριθμό καμπύλης απορροής CN. Η SCS πινακοποίησε τους CN για μία ποικιλία συνθηκών με βάση την εδαφική κατηγορία, τις χρήσεις γης και την εδαφική υγρασία. Επειδή οι χρήσεις γης που χρησιμοποιούνται σε αυτό τον πίνακα, δεν είναι αντιπροσωπευτικές για την Ελλάδα, προτείνεται από τη βιβλιογραφία (Τσακίρης, 2013) η χρήση του πίνακα του Wanielista (Wanielista, 1978). Ο προαναφερθέν πίνακας για κατηγορία υγρασίας του εδάφους II, παρουσιάζεται παρακάτω.

Για τους άλλους δύο τύπους συνθηκών υγρασίας γίνεται αναγωγή του CN, με βάση τις σχέσεις:

$$CN_I = \frac{0,42CN_{II}}{1 - 0,0058CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{2,3CN_{II}}{1 + 0,013CN_{II}}$$



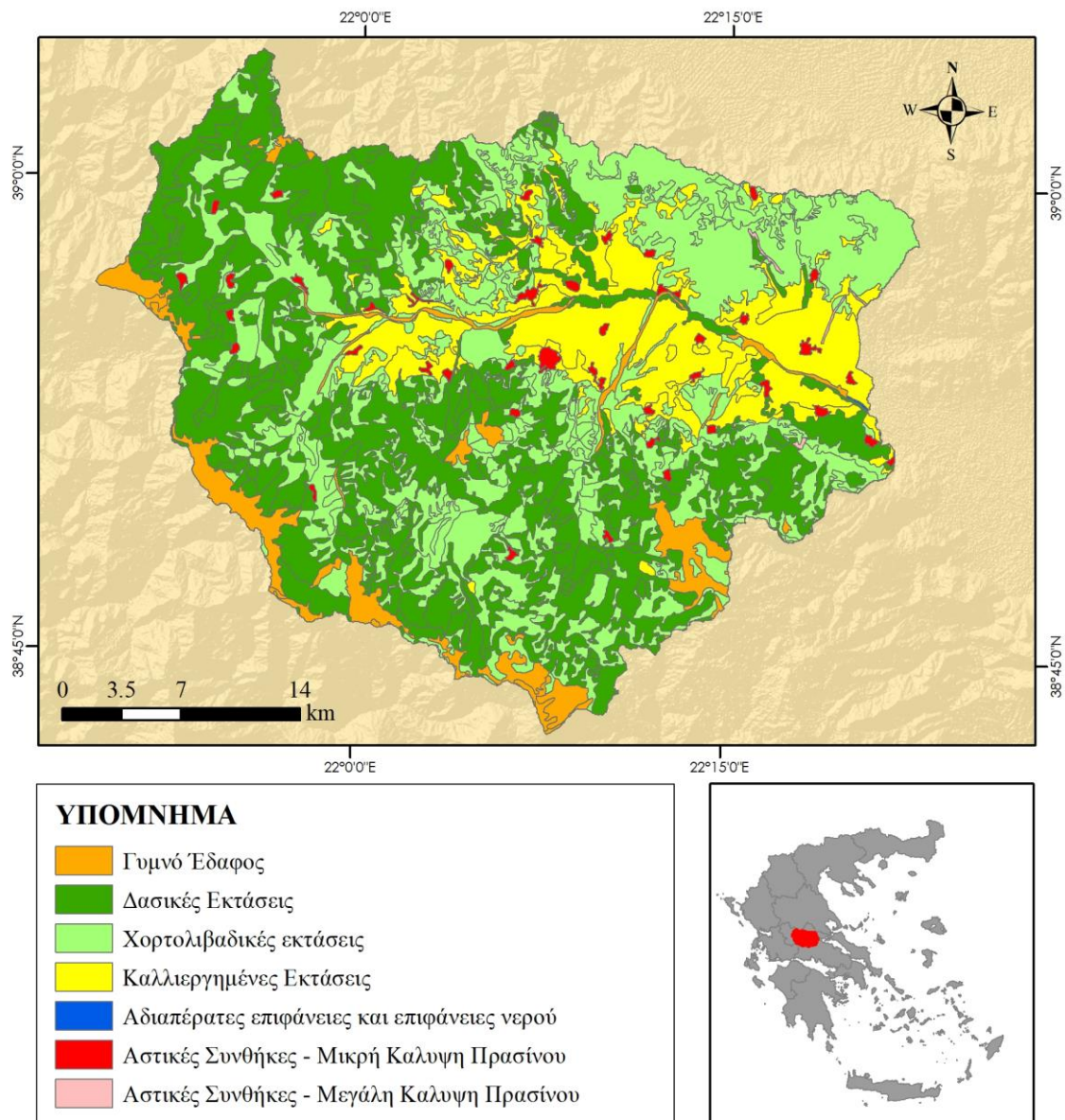
**Πίνακας 3-5: Αριθμός καμπύλης απορροής CN για αρχική κατάσταση υγρασίας II (Wanielista, 1978)**

Χρήσεις Γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις				
• Χωρίς έργα συντήρησης	72	81	88	91
• Με έργα συντήρησης	62	71	78	81
Ορεινοί βοσκότοποι				
• Κακή κατάσταση	68	79	86	89
• Καλή κατάσταση	39	61	74	80
Λιβαδικές εκτάσεις				
• Καλή κατάσταση	30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις				
• Αραιή συστάδα	45	66	77	83
• Πυκνή συστάδα	25	55	70	77
Ελεύθερες εκτάσεις, γήπεδα γκολφ, πάρκα				
• Καλή κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 75% της έκτασης	39	61	74	80
• Μέτρια κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 50% της περιοχής	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατες)	89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)	81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές				
Μέσο μέγεθος οικοπέδου				
Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας				
<500	65	77	85	90
1000	40	61	75	83
1500	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Χώροι πάρκινγκ, στέγες, κ.λ.π.	98	98	98	98
Δρόμοι				
• με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων	98	98	98	98
• χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
• χωματόδρομοι	72	82	87	89
Αστικές συνθήκες				
• Γυμνό έδαφος	77	86	91	94
• Κήποι ή θάμνοι	72	81	88	91
• Μεγάλη κάλυψη με πράσινο (>75% της διαπερατής περιοχής)	39	61	74	80
• Μέτρια κάλυψη πρασίνου (50-75% της διαπερατής περιοχής)	49	69	79	84
• Μικρή κάλυψη πρασίνου (<50% της διαπερατής περιοχής)	68	79	86	89
• Άλση	36	60	73	79

### 3.5.2 Υπολογισμός Curve Number

Η διαδικασία υπολογισμού των Curve Numbers έγινε με την χρήση εργαλείων GIS, υπολογίζοντας τον αριθμό καμπύλης ανά φατνίο, για το σύνολο της λεκάνης και ύστερα υπολογίζοντας τον σταθμισμένο μέσο όρο για κάθε υπολεκάνη.

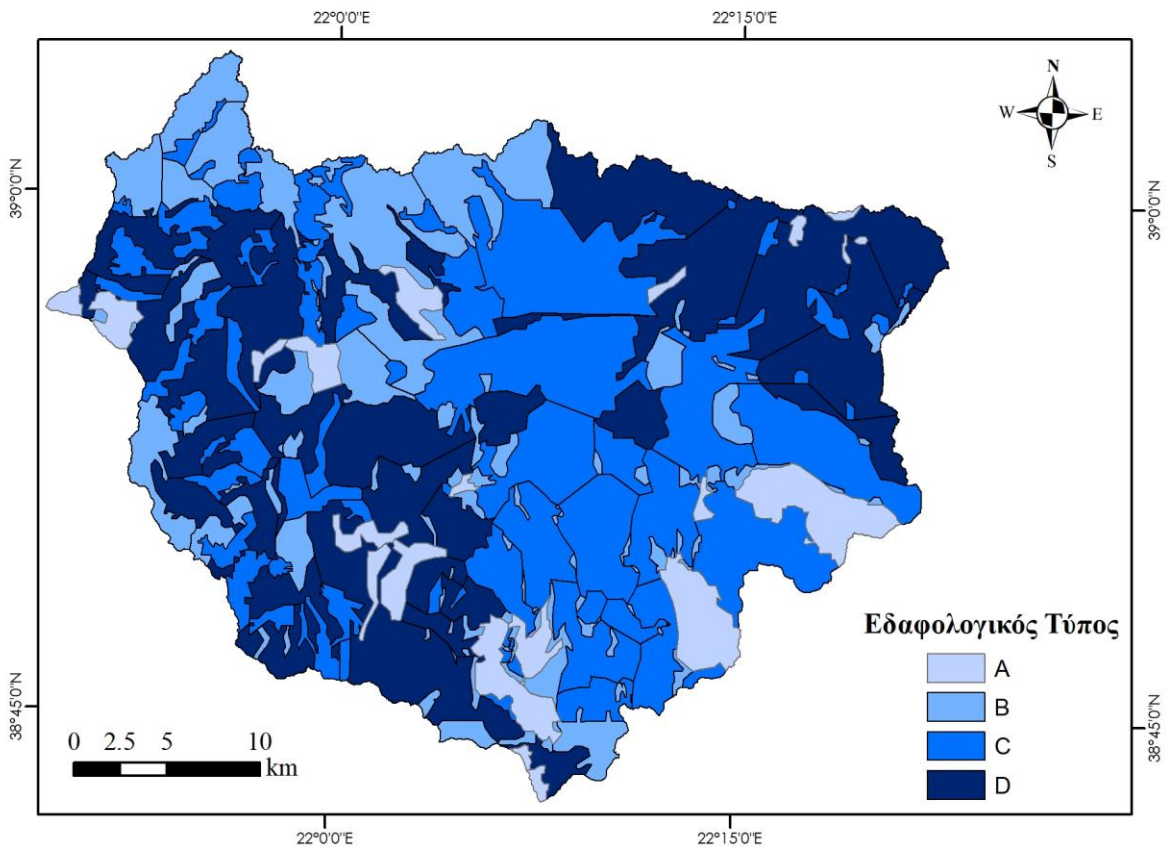
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, για την ανάλυση των μορφών κάλυψης και χρήσεων γης στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε το σύνολο γεωχωρικών δεδομένων Corine Land Cover, το οποίο ταξινομεί τις χρήσεις γης σε 44 κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες δεν ταυτίζονται με τις κατηγορίες χρήσεων γης που χρησιμοποιούνται από την μέθοδο SCS, επομένως έγινε μια ταξινόμηση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης και προέκυψαν επτά διαφορετικές κατηγορίες χρήσεων γης (Σχήμα 3-6).



Σχήμα 3-6: Ταξινομημένες Χρήσεις Γης

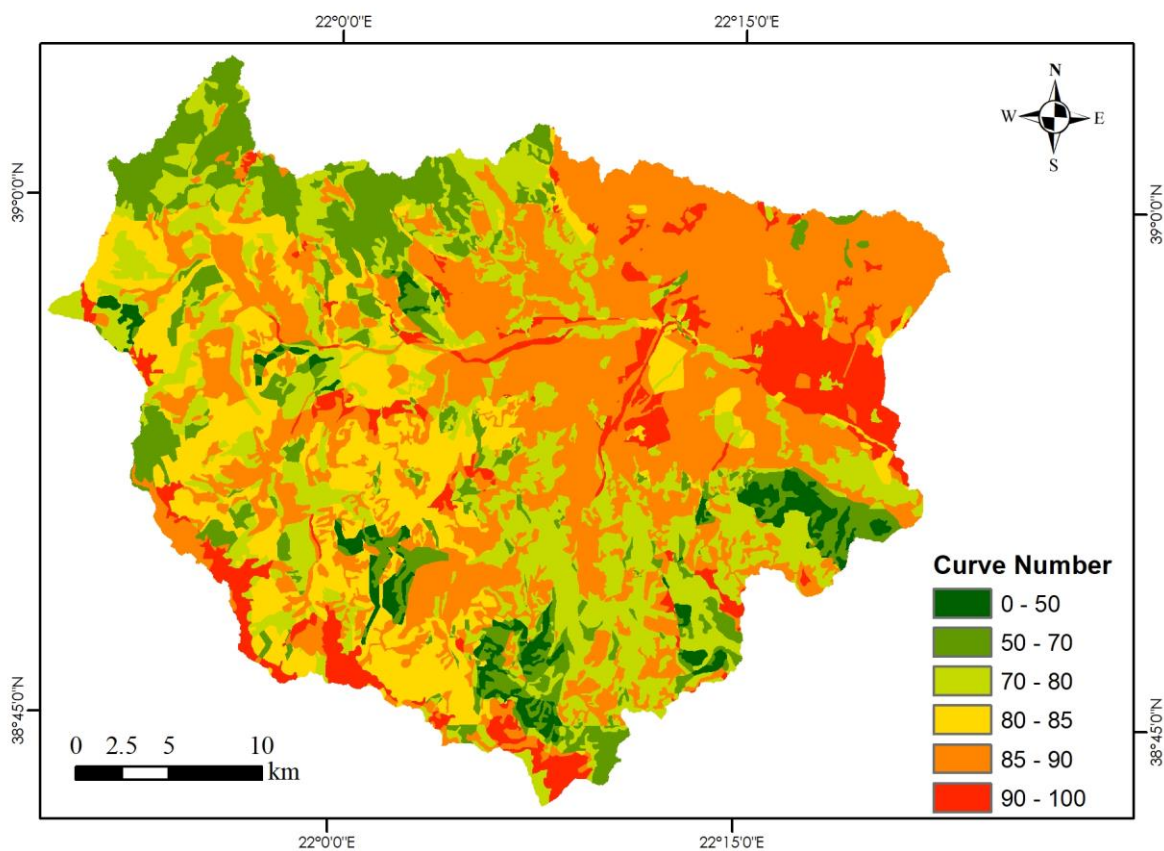
Για την εύρεση των εδαφολογικών κατηγοριών (A,B,C,D) της περιοχής μελέτης, ψηφιοποιήθηκε ο εδαφολογικός χάρτης του Υ.Π.Ε.Κ.Α. της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Ο εδαφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με κατηγοριοποίηση των εδαφών με βάση τις τέσσερις κατηγορίες A,B,C,D, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7.

Με τη χρήση του εργαλείου “intersection” του ArcGis, έγινε τομή του αρχείου του εδαφολογικού χάρτη και του αρχείου των ταξινομημένων χρήσεων γης και προέκυψε ένα νέο αρχείο, στον πίνακα ιδιοτήτων του οποίου είχε αντιστοιχηθεί σε κάθε τμήμα η χρήση γης με τον εδαφολογικό τύπο.



**Σχήμα 3-7: Εδαφολογικός χάρτης περιοχής μελέτης**

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Wanielista, 1978) και συγκεκριμένα τον πίνακα 3-5, γίνεται υπολογισμός των τιμών των κελιών του χάρτη με βάση την αντιστοίχισή τους για κάθε εδαφολογικό τύπο, A,B,C,D, και την αντίστοιχη κατηγορία χρήσεων γης. Με τη χρήση των αντίστοιχων εργαλείων της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, υπολογίστηκε ένας κλίμακας με τις τιμές της παραμέτρου CN για υδρολογική κατάσταση II, ακολουθώντας την διαδικασία που παρουσιάστηκε από τον Venkatesh Merwade (Merwade, 2012), Σχήμα 3-8.



**Σχήμα 3-8: Κανάβος Curve Numbers**

Τέλος υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών του κανάβου και προέκυψε ο μέσος Curve Number της περιοχής μελέτης. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον υπολογισμό των Curve Numbers των τριών υπολεκανών του ημικατανεμημένου μοντέλου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3-6: Curve Numbers Λεκανών Απορροής – Υδρολογική Κατάσταση II**

ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	CN
Ενιαία λεκάνη	81
Υπολεκάνη 1	84
Υπολεκάνη 2	79
Υπολεκάνη 3	79

Για κάθε επεισόδιο βροχής και κάθε υπολεκάνη η κατηγορία του CN είναι διαφορετική, καθώς εξαρτάται και από την υγρασία του εδάφους τη μέρα έναρξης του επεισοδίου, η οποία μπορεί να υπολογιστεί με βάση το συνολικό ύψος βροχόπτωσης τις προηγούμενες πέντε ημέρες. Οι κατηγορίες του CN, ανά επεισόδιο και ανά λεκάνη απορροής παρατίθενται στον

πίνακα 3-7. Για το επεισόδιο του 2012 και την προσομοίωση του συγκεντρωτικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε Σταθμισμένος Μέσος Όρος (Σ.Μ.Ο.) των CN των κατηγοριών II και III, για να προκύψει ο τελικός CN, καθώς αυτό ήταν το μόνο επεισόδιο, στο οποίο στην υπολεκάνη 2, υπολογιζόταν CN κατηγορίας III. Για το επεισόδιο του έτους 2019 η βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών ήταν 0 mm και θα έπρεπε να είχε επιλεγεί κατηγορία Curve Number I, αλλά λήφθηκε υπ' όψιν η χρονική περίοδος του επεισοδίου και η διεθνής βιβλιογραφία, σύμφωνα με τα οποία τελικά επιλέχθηκε η κατηγορία II για τους Curve Numbers του συγκεκριμένου επεισοδίου.

**Πίνακας 3-7: Κατηγορία CN ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο**

<b>Κατηγορία CN</b>	Επεισόδιο 2012	Επεισόδιο 2015	Επεισόδιο 2019
Ενιαία λεκάνη	Σ.Μ.Ο. II, III	II	II
Υπολεκάνη 1	II	II	II
Υπολεκάνη 2	III	II	II
Υπολεκάνη 3	II	II	II

Οι αρχικές απώλειες ανά επεισόδιο και ανά λεκάνη απορροής που υπολογίστηκαν, επιλέγοντας η τιμή του λόγου των αρχικών απωλειών Ia προς τη μέγιστη δυνητική κατακράτηση S να είναι 0.1, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 3-8: Αρχικές Απώλειες ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο**

<b>Αρχικές Απώλειες (mm)</b>	Επεισόδιο 2012	Επεισόδιο 2015	Επεισόδιο 2019
Ενιαία λεκάνη	4.6	6.0	6.0
Υπολεκάνη 1	5.0	5.0	5.0
Υπολεκάνη 2	2.6	6.9	6.9
Υπολεκάνη 3	6.8	6.8	6.8

Στον πίνακα 3-9 παρατίθενται οι αριθμοί CN οι οποίοι υπολογίστηκαν ανά επεισόδιο και ανά λεκάνη απορροής, σύμφωνα με τις κατηγορίες που προέκυψαν στον πίνακα 3-7. Αυτοί είναι και οι τελικοί αριθμοί καμπύλης απορροής που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

**Πίνακας 3-9: Curve Numbers ανά Λεκάνη Απορροής και Επεισόδιο**

CN	Επεισόδιο 2012	Επεισόδιο 2015	Επεισόδιο 2019
Ενιαία Λεκάνη	85	81	81
Υπολεκάνη 1	84	84	84
Υπολεκάνη 2	91	79	79
Υπολεκάνη 3	79	79	79

### **3.6 Υπολογισμός Άμεσης Απορροής – Μοναδιαίο Υδρογράφημα**

#### **3.6.1 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder**

Άμεση είναι η απορροή που εισέρχεται στα υδατορεύματα αμέσως μετά την βροχόπτωση και αποτελείται από την επιφανειακή απορροή, την απευθείας βροχόπτωση επί των υδατορευμάτων και μέρος της υπεδάφιας απορροής. Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση της άμεσης απορροής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται σε συγκεκριμένη διάρκεια περισσέυματος βροχής. Συγκεκριμένα ως Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας βροχής διάρκειας περισσέυματος  $t_R$  ομοιόμορφα κατανεμημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσευμα βροχής 10 mm.

Οι δύο βασικές αρχές που διέπουν τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

**Αρχή της αναλογίας** σύμφωνα με την οποία δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις 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 (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

**Αρχή της επαλληλίας** σύμφωνα με την οποία το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες ίσες με το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατα Snyder. Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Είναι μέθοδοι εμπειρικές και μεγάλη σημασία έχει η ρύθμιση των παραμέτρων που υπάρχουν στις σχέσεις υπολογισμού της αιχμής και του χρόνου διάρκειας μεταξύ του κέντρου βάρους της βροχής και της αιχμής. Η

μέθοδος Snyder, είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους κατασκευής συνθετικού υδρογραφήματος, η οποία προέκυψε από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στη Βόρεια Αμερική.

Οι εξισώσεις που διέπουν το συνθετικό υδρογράφημα του Snyder είναι :

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

$$Q_p = C_p \frac{640A}{t_p} \text{ (ft}^3\text{/s)}$$

$$T = 3 + 3 \left( \frac{t_p}{24} \right) \text{ (days)}$$

Όπου :

$L_{ca}$  = η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής στην έξοδο της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορεύματος έως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (miles)

$L$  = η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, που μετριέται κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος (miles)

$C_t$  = αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 1.8 έως 2.2. Για λεκάνες μεγάλων κλίσεων η τιμή του  $C_t$  τείνει προς τη χαμηλότερη τιμή.

$C_p$  = αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 0.56 έως 0.69.

$A$  = η έκταση της λεκάνης ( $mi^2$ )

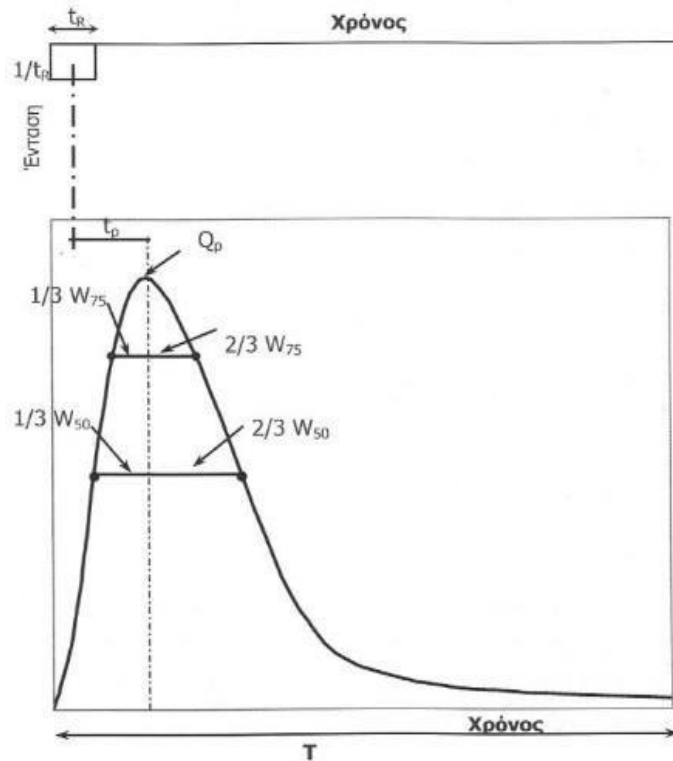
$T$  = η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Η εξίσωση δίνει μία ελάχιστη τιμή ίση με 3 ημέρες.

Ο χρόνος υστέρησης μετράται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος, Σχήμα 3-9. Η διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης  $t_R$  συνδέεται με τη χρονική υστέρηση με τη σχέση:

$$t_R = t_p/5,5$$

Εάν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια βροχόπτωσης  $t_R'$  μεγαλύτερη της  $t_R$ , ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται από νέα εξίσωση διορθώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t'_p = t_{p+} \frac{(t'_R - t_R)}{4}$$



Σχήμα 3-9: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012)

Τα πλάτη του ΜΥΓ στο 50% και 75% της αιχμής,  $W_{50}$  και  $W_{75}$ , δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = \frac{830}{q_p^{1,1}}$$

$$W_{75} = \frac{470}{q_p^{1,1}}$$

### 3.6.2 Εφαρμογή Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder, για την προσομοίωση της άμεσης απορροής. Οι απαραίτητες παράμετροι υπολογίστηκαν για κάθε λεκάνη απορροής, με τη χρήση του εργαλείου HEC-GeoHMS όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο δύο. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε η μεγαλύτερη απόσταση υδροκρίτη έως την έξοδο κάθε λεκάνης ( $L_{ca}$ ), καθώς και η απόσταση του κέντρου βάρους της κάθε λεκάνης κατά μήκος του κύριου υδατορέματος έως την έξοδο της ( $L$ ). Οι παράμετροι  $C_p$  και  $C_i$ , εξαρτώνται από τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, επιλέχθηκαν με βάση αυτά τα κριτήρια και θεωρούνται σταθερές

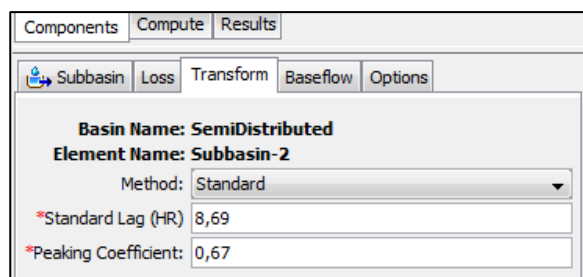


για όλες τις λεκάνες απορροής. Οι τιμές των παραμέτρων του μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Snyder, παρουσιάζονται στον πίνακα 3-10.

**Πίνακας 3-10: Παράμετροι Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder**

SNYDER	Ενιαία Λεκάνη (Lumped)	Υπολεκάνη 1	Υπολεκάνη 2	Υπολεκάνη 3
Εμβαδόν (km <sup>2</sup> )	1128	509	340	279
Lca (km)	33	20	13	9
L (km)	68.50	45	34	35
Ct	1.85	1.85	1.85	1.85
Cp	0.67	0.67	0.67	0.67
tp (hr)	14	11	9	8
T(days)	5	4	4	3
Qp (m <sup>3</sup> /sec)	147.50	88	72	67

Στο HEC HMS εισήχθησαν για κάθε λεκάνη απορροής ο χρόνος υστέρησης  $t_p$  και ο συντελεστής  $C_p$ , που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η εισαγωγή των δύο παραμέτρων έγινε ξεχωριστά για κάθε λεκάνη απορροής στο πεδίο Transform, Σχήμα 3-10.



**Σχήμα 3-10: Εισαγωγή των παραμέτρων του ΜΥΓ κατά Snyder στο HEC-HMS**

### 3.7 Μοντέλο Εκτίμησης Βασικής Απορροής

Για την εκτίμηση της βασικής απορροής επιλέχθηκε το μοντέλο εκθετικά μειούμενης ροής (Recession method), που ορίζει την εκθετική μείωση της βασικής απορροής στο χρόνο μετά το επεισόδιο βροχής. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε λόγω της μικρής της απαίτησης σε δεδομένα, καθώς απαιτείται μόνο η εκχώρηση της αρχικής βασικής απορροής, της σταθεράς εκθετικής μείωσης και του λόγου απορροής προς την αιχμή. Σε περιπτώσεις εξέτασης επεισοδίων βροχής, όπως στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η βασική απορροή

αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της παροχής αιχμής και δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Η αρχική βασική απορροή εκτιμήθηκε για κάθε υπολεκάνη χρησιμοποιώντας μια τιμή ειδικής απορροής. Για την ενιαία λεκάνη του συγκεντρωτικού μοντέλου αλλά και για τις επιμέρους υπολεκάνες του ημικαταμεμημένου μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες αρχικές τιμές παραμέτρων και συγκεκριμένα ειδική απορροή επιλέχθηκε η τιμή  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , ως σταθερά εκθετικής μείωσης επιλέχθηκε η τιμή 0.8 και ως λόγος απορροής προς την αιχμή επιλέχθηκε η τιμή 0.05.

### 3.8 Μοντέλο Υδρολογικής Διόδευσης

#### 3.8.1 Γενικά - Υδρολογική Μέθοδος Muskingum

Οι μεθοδολογίες διόδευσης πλημμύρας διαμέσου τμήματος ποταμού είναι 2 και συγκεκριμένα:

- **Η υδρολογική**, η οποία βασίζει την πρόβλεψη εξέλιξης της πλημμύρας στην εξίσωση της συνέχειας και σε μια συνάρτηση της χωρητικότητας του συστήματος. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν δεδομένα της πλημμύρας εισόδου και προβλέπουν τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας εξόδου.
- **Η υδραυλική**, η οποία βασίζει τη μαθηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της πλημμύρας στην χρησιμοποίηση των εξισώσεων ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς (Εξισώσεις Saint Venant). Οι μέθοδοι αυτές δίνουν όλες τις πληροφορίες κατά τη διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός υδρογραφικού δικτύου, απαιτούν όμως στοιχεία που σπάνια είναι γνωστά. Επίσης οι απλοποιήσεις των εξισώσεων που γίνονται ανατρέπουν σε ένα βαθμό την ακρίβεια τους.

Συγκριτικά οι υδραυλικές μέθοδοι συνήθως επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις υδρολογικές, απαιτούν όμως πολλά και αξιόπιστα δεδομένα και έχουν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο (Μιμίκου & Μπαλάς, 2012). Στην παρούσα εργασία ως μέθοδος διόδευσης χρησιμοποιήθηκε η απλή υδρολογική μέθοδος Muskingum. Η μέθοδος Muskingum χρησιμοποιεί την απλοποιημένη εξίσωση συνέχειας σε ένα τμήμα ποταμού:

$$\bar{I} - \bar{Q} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Όπου:

I = εισροή στο τμήμα του ποταμού

$Q$  = εκροή στο τμήμα του ποταμού

$S$  = αποθήκευση στο τμήμα του ποταμού

Σύμφωνα με τη μέθοδο Muskingum η συνολική αποθήκευση του υδατορεύματος μπορεί να θεωρηθεί ίση με το άθροισμα της πρισματικής αποθήκευσης και της σφηνοειδούς αποθήκευσης, Σχήμα 3-11, και μπορεί να απλοποιηθεί σύμφωνα με τον (McCarthy, 1938) στην ακόλουθη γραμμική εξίσωση (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012):

$$S_{ολ} = S_{πρισμ} + S_{σφην} = KQ + Kx(I - Q) = K[xI + (1 - x)Q]$$

Από τις δύο προαναφερθείσες εξισώσεις, προκύπτει η γενική μορφή της εξίσωσης Muskingum:

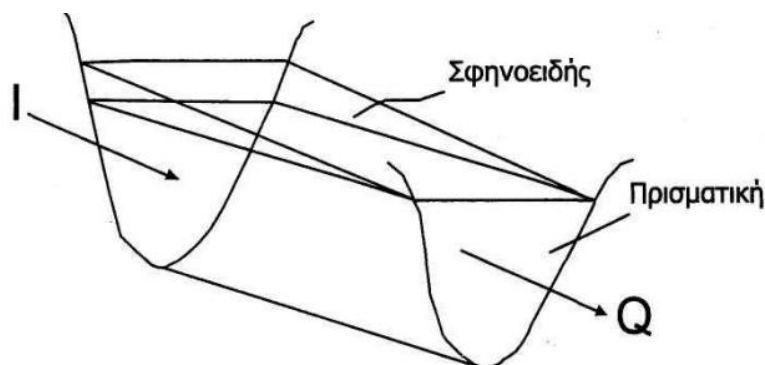
$$Q_{j+1} = C_0 I_{j+1} + C_1 I_j + C_2 Q_j$$

Όπου οι συντελεστές  $C_0$ ,  $C_1$  και  $C_2$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

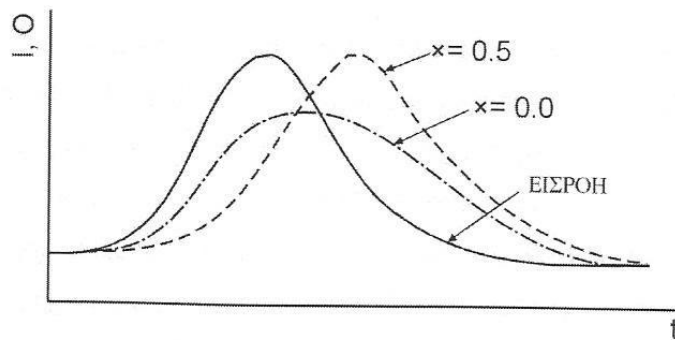


**Σχήμα 3-11: Διαχωρισμός αποθηκευτικότητας υδατορεύματος σε πρισματική και σφηνοειδή (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012)**

Η παράμετρος  $K$  εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το συγκεκριμένο τμήμα του ποταμού και είναι ίση περίπου με τη χρονική απόσταση των

αιχμών των πλημμυρογραφήματων εισόδου και εξόδου (Feldman, 2000). Μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας  $V(m/s)$ .

Η παράμετρος  $X$  είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την εξασθένηση του πλημμυρικού κύματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 0.5 με τις μεγάλες τιμές να αντιστοιχούν σε μικρή εξασθένηση. Εκφράζει επίσης τη συμμετοχή της εισροής και της εκροής στην αποθηκευτικότητα του τμήματος του υδατορεύματος. Στο Σχήμα 3-12, παρουσιάζονται διόδευμένα υδρογραφήματα για χαρακτηριστικές τιμές του  $X$ .



**Σχήμα 3-12: Διόδευμένα υδρογραφήματα για χαρακτηριστικές τιμές του  $X$  (Μιμίκου & Μπαλλάς, 2012)**

Όταν οι στάθμες σε ένα τμήμα ποταμού καθορίζονται αποκλειστικά από την παροχή στο κατάντη άκρο, όπως στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα, η τιμή του συντελεστή  $X$  είναι ίση με το 0. Όταν η απορροή στο ανάντη άκρο συμμετέχει στον καθορισμό του προφίλ της υδάτινης επιφάνειας, σχηματίζοντας τη σφηνοειδή αποθήκευση, η τιμή του  $X$  αυξάνεται και φτάνει το 0.5 σε ομοιόμορφους αγωγούς όπου η εισροή και η εκροή συμμετέχουν εξίσου. Ευστάθεια της μεθόδου Muskingum επιτυγχάνεται εάν η τιμή του βήματος  $\Delta t$  κυμαίνεται ανάμεσα στο  $2KX$  και  $2K(1-X)$ .

### **3.8.2 Εκτίμηση των παραμέτρων της μεθόδου Muskingum**

Η υδρολογική μέθοδος διόδευσης Muskingum χρησιμοποιήθηκε μόνο στο ημικατανεμημένο μοντέλο, προκειμένου να διόδευτούν τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3 στην έξοδο της περιοχής μελέτης. Στο ημικατανεμημένο μοντέλο υπάρχουν τρία κύρια υδατορεύματα, μέσω των οποίων έγινε η διόδευση των πλημμυρογραφήματων των ανάντη υπολεκανών. Καθώς δεν υπήρχαν τα πλημμυρογραφήματα εξόδου της περιοχής μελέτης προκειμένου να υπολογιστούν οι παράμετροι της μεθόδου Muskingum για το κάθε υδατόρευμα, ήταν αναγκαία η εκτίμηση τους, με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και των

υδατορευμάτων. Συγκεκριμένα τα κριτήρια για την επιλογή των  $X$  και  $V(m/s)$  ήταν η κλίση του υδατορεύματος και το πλάτος του. Όσο μεγαλύτερες οι κλίσεις και όσο μικρότερο το πλάτος του υδατορεύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του υδατορεύματος και τόσο μικρότερη η εξασθένιση του πλημμυρογραφήματος, δηλαδή τόσο μεγαλύτερο το  $X$ . Αντιθέτως όσο μικρότερη είναι η κλίση του υδατορεύματος και όσο μεγαλύτερο το πλάτος του, τόσο μικρότερη η ταχύτητα του και τόσο μεγαλύτερη η εξασθένιση του πλημμυρογραφήματος, δηλαδή τόσο μικρότερο το  $X$ . Για την επιλογή της παραμέτρου  $X$ , λήφθηκε επίσης υπ' όψιν ότι σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία προτείνεται η τιμή 0.2. Η παράμετρος  $K$  για κάθε υδατόρευμα, υπολογίστηκε διαιρώντας το μήκος του κάθε υδατορεύματος, το οποίο μετρήθηκε με τη χρήση GIS, με την αντίστοιχη εκτιμώμενη ταχύτητα σε ώρες, προκειμένου να προκύψει σε ώρες η παράμετρος  $K$ , δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται το πλημμυρογράφημα να μεταφερθεί στην έξοδο. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η επίλυση της μεθόδου Muskingum, είναι αναγκαίο να οριστεί ο αριθμός των τμημάτων του υδατορεύματος (subreaches). Σύμφωνα με πρόταση του εγχειριδίου χρήσης (Scharffenberg, 2016) μια καλή προσέγγιση είναι ο λόγος του μήκους του υδατορεύματος προς το γινόμενο της ταχύτητας τους κύματος επί το χρονικό βήμα προσομοίωσης, που στην παρούσα εργασία είναι 1h. Οι εκτιμώμενες παράμετροι και τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον πίνακα 3-11.

**Πίνακας 3-11: Εκτιμώμενες παράμετροι-Αποτελέσματα Υπολογισμών Μεθόδου Muskingum**

Υδατόρευμα	$X$	$V$ (m/s)	Μήκος υδατορεύματος(m)	$K$ (hr)	Subreaches (1h)
R1	0.2	0.8	14726	5.1	5
R2	0.3	0.9	12868	4.0	4
R3	0.15	0.7	21969	8.7	9

Η εισαγωγή των παραμέτρων της υδρολογικής μεθόδου Muskingum στο HEC-HMS γίνεται μέσω του μενού του HEC-HMS , Parameters – Routing Muskingum και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-13.

Reach	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
R1	5,1	0,2	5
R2	4	0,3	4
R3	8,7	0,15	9

Σχήμα 3-13: Εισαγωγή των παραμέτρων της μεθόδου Muskingum στο HEC-HMS

### 3.9 Καθορισμός Χρόνου Προσομοίωσης

Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας καθορίστηκε ως χρονικό βήμα των προσομοιώσεων η μία ώρα. Ο συγκεκριμένος χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν τη χρονική ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης η οποία ήταν αρκετά υψηλή, καθώς τα δεδομένα βροχόπτωσης ήταν διαθέσιμα για βήμα δέκα λεπτών και το μέγεθος της περιοχής μελέτης. Θεωρήθηκε ότι για το μέγεθος της περιοχής το χρονικό βήμα της μίας ώρας είναι ικανοποιητικό. Ο χρόνος έναρξης των προσομοιώσεων για όλα τα επεισόδια βροχόπτωσης καθορίστηκε ως ο χρόνος έναρξης του κάθε επεισοδίου βροχής, αντιθέτως ο χρόνος λήξης της προσομοίωσης καθορίστηκε αρκετά μεταγενέστερα από το χρόνο λήξης του κάθε επεισοδίου, έτσι ώστε κατά τον χρόνο λήξης η παροχή στο σημείο εξόδου, να έχει επανέλθει στα επίπεδα της βασικής απορροής.

## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΡΟΧΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Προσομοίωση Βροχής Απορροής

Για την προσομοίωση επεισοδίων βροχής απορροής, επιλέχθηκαν πλημμυρικά επεισόδια σύμφωνα με το ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή, τα οποία είχαν λάβει χώρα την περασμένη δεκαετία, προκάλεσαν εκτεταμένες πλημμύρες και για τα οποία μας παρείχαν οι αρμόδιες υπηρεσίες δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα επεισόδια βροχής-απορροής, τα οποία έλαβαν χώρα την 6/2/2012, την 1/2/2015 και την 10/1/2019. Για τα επεισόδια των ετών 2015 και 2019, ήταν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης και στους τέσσερις υδρομετεωρολογικούς σταθμούς που προαναφέρθηκαν (Λαμία, Μαύρο Λιθάρι, Μυρική, Μακρακώμη), ενώ για το επεισόδιο του έτους 2012 δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης για τον σταθμό της Λαμίας. Επιπλέον δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα απορροής για τα προαναφερθέντα επεισόδια. Τα τρία επεισόδια παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

**Πίνακας 4-1: Επεισόδια Βροχής-Απορροής**

A/A	Ημερομηνία Επεισοδίου	Ημερομηνία έναρξης	Ώρα έναρξης	Ώρα λήξης	Διάρκεια Βροχόπτωσης (h)	Αριθμός Σταθμών
<b>E2012</b>	6/2/2012	6/2/2012	4:00	23:00	68	3
<b>E2015</b>	1/2/2015	30/1/2015	7:00	23:00	89	4
<b>E2019</b>	10/1/2019	9/1/2019	10:00	20:00	83	4

Σύμφωνα με τον πίνακα 4-1 και τα τρία επεισόδια έλαβαν χώρα την χειμερινή περίοδο, κατά την οποία η βροχόπτωση είναι αυξημένη και το έδαφος συνήθως κορεσμένο. Το επεισόδιο του 2012 είχε την μικρότερη διάρκεια, ενώ την μεγαλύτερη είχε το επεισόδιο του 2015. Για την περιοχή μελέτης ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα τεσσάρων σταθμών, εκτός από το επεισόδιο του 2012 όπου διαθέσιμα ήταν τα δεδομένα τριών σταθμών.

**Πίνακας 4-2: Συνολικό ύψος βροχής ανά επεισόδιο ανά λεκάνη απορροής**

A/A	Ενιαία Λεκάνη (mm)	Υπολεκάνη 1 (mm)	Υπολεκάνη 2 (mm)	Υπολεκάνη 3 (mm)
<b>E2012</b>	80	91	49	97
<b>E2015</b>	81	49	119	93
<b>E2019</b>	72	72	72	72

Στο σύνολο της περιοχής μελέτης η μεγαλύτερη συνολική βροχόπτωση παρουσιάστηκε στο επεισόδιο του 2015 με μικρή διαφορά από το επεισόδιο του 2012. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνολική βροχόπτωση καθώς και ότι το επεισόδιο του 2012 είχε μικρότερη διάρκεια από τα άλλα δύο, αιτιολογούνται οι μεγάλες επιπτώσεις που είχε το εν λόγω επεισόδιο καθώς και η έκταση του. Όσο αφορά το επεισόδιο του 2019 παρατηρούμε ότι η βροχόπτωση ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής, καθώς σε όλες τις υπολεκάνες η συνολική βροχόπτωση ήταν στο ίδιο επίπεδο. Αντιθέτως στα άλλα δύο επεισόδια υπήρχε σημαντική ανομοιομορφία στην βροχόπτωση.

**Πίνακας 4-3: Συνολικό Ύψος Βροχής προηγούμενων 5 ημερών ανά επεισόδιο και ανά λεκάνη**

A/A	Ενιαία Λεκάνη (mm)	Υπολεκάνη 1 (mm)	Υπολεκάνη 2 (mm)	Υπολεκάνη 3 (mm)
<b>E2012</b>	29	24	38	26
<b>E2015</b>	14	15	13	14
<b>E2019</b>	0	0	0	0

Από τα δεδομένα βροχόπτωσης των προηγούμενων πέντε ημερών στην περιοχή προκύπτει ότι στο επεισόδιο του 2012, το έδαφος ήταν αρκετά κορεσμένο. Για το επεισόδιο του 2019 αν και η βροχόπτωση των προηγούμενων ημερών ήταν μηδενική λήφθηκε υπ' όψιν η χρονική περίοδος του επεισοδίου και η διεθνής βιβλιογραφία, σύμφωνα με τα οποία τελικά επιλέχθηκε η κατηγορία II για τους Curve Numbers του συγκεκριμένου επεισοδίου.

**Πίνακας 4-4: Μέγιστη ωριαία ένταση ανά επεισόδιο ανά περιοχή μελέτης**

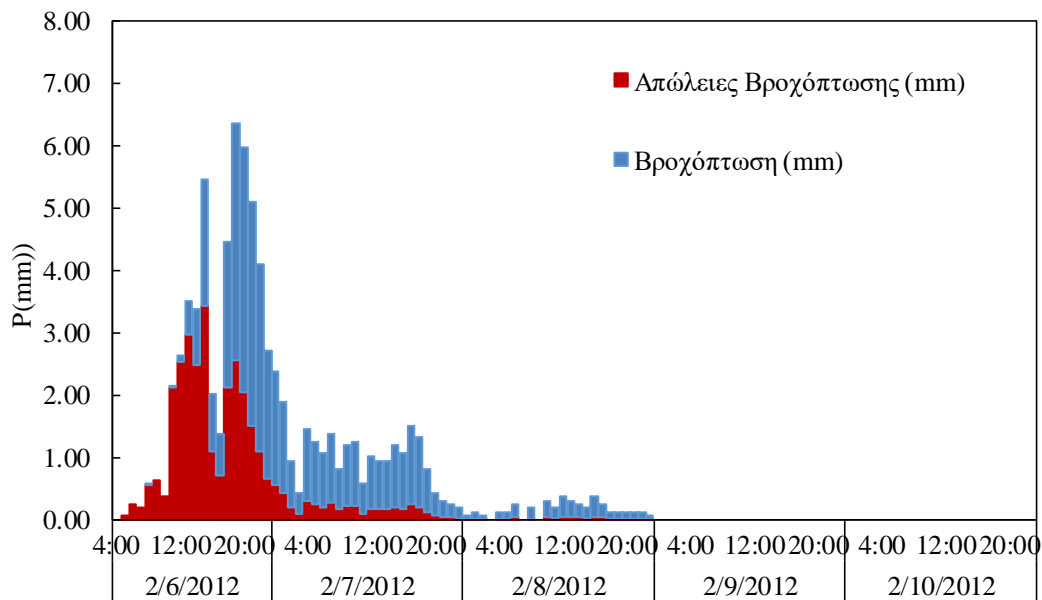
A/A	Ενιαία Λεκάνη (mm/h)	Υπολεκάνη 1 (mm/h)	Υπολεκάνη 2 (mm/h)	Υπολεκάνη 3 (mm/h)
<b>E2012</b>	7.6	8.9	5.6	7.7
<b>E2015</b>	3.4	3.1	4	3.9
<b>E2019</b>	3.6	3.6	3.6	3.6

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση διαγραμματικά των επεισοδίων βροχής απορροής, και ανάλυση τους με βάση κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη, επίσης παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κάθε επεισοδίου, συγκεκριμένα τα τελικά πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης και χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών.



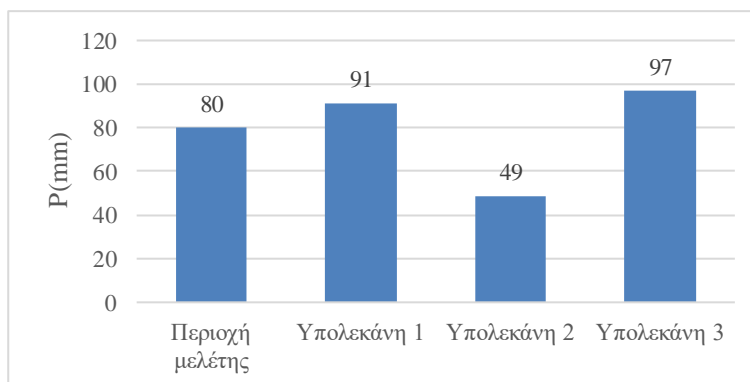
#### 4.1.1 Επεισόδιο της 6/2/2012

Το πλημμυρικό επεισόδιο που καταγράφηκε στις 6/2/2012 εκδηλώθηκε από επεισόδιο βροχής που έλαβε χώρα από τις 04:00 στις 6/2/2012 και είχε διάρκεια 68 ώρες. Για το συγκεκριμένο επεισόδιο ήταν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης, από τους σταθμούς της Μυρικής, του Μαύρου Λιθариού και της Μακρακώμης. Η βροχόπτωση καθώς και οι απώλειες αυτής για το συγκεκριμένο επεισόδιο στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-1.



Διάγραμμα 4-1: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 6/2/2012

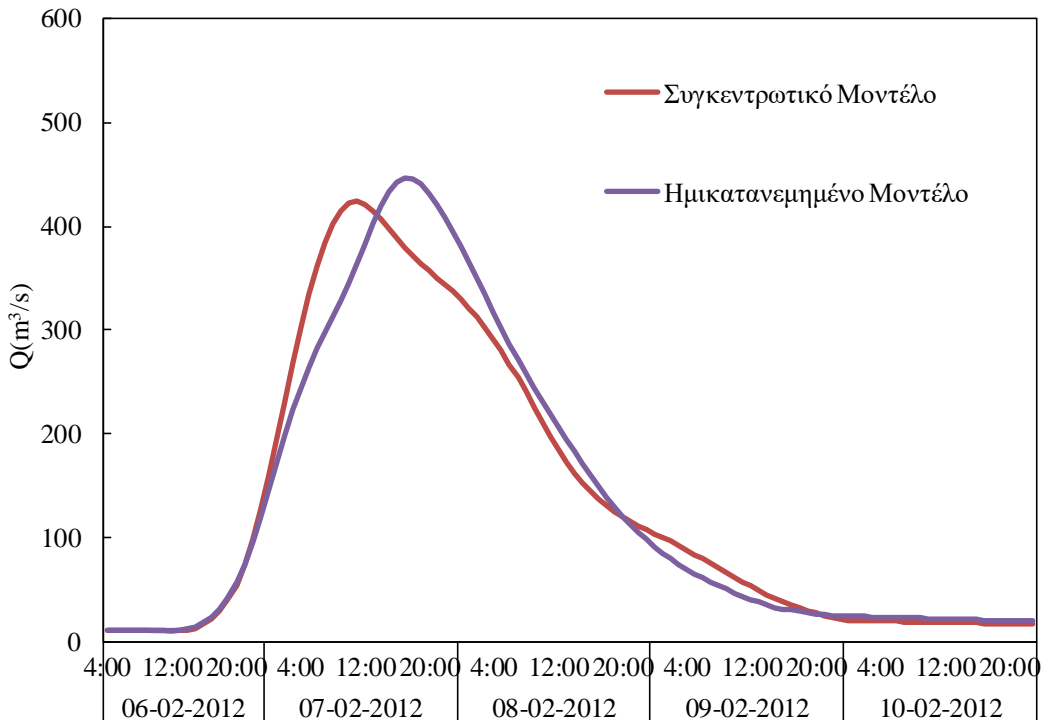
Στο διάγραμμα 4-2 παρουσιάζονται τα συνολικά ύψη βροχής για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και για την κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά. Όπως φαίνεται υπάρχει σημαντική χωρική ανομοιομορφία στην βροχόπτωση. Η υπολεκάνη 3 η οποία έχει το μεγαλύτερο μέσο υψόμετρο είναι αυτή με την μεγαλύτερη συνολική βροχόπτωση.



Διάγραμμα 4-2: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 6/2/2012

Αναλυτικότερα στο συγκεκριμένο επεισόδιο το συνολικό επιφανειακό ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης ήταν 80 mm, στην πρώτη υπολεκάνη 91 mm, στην δεύτερη υπολεκάνη 49 mm και στην τρίτη υπολεκάνη 97 mm. Η μέγιστη ωριαία ένταση στην περιοχή μελέτης είναι 7.6 mm/h, στην υπολεκάνη 1 8.9 mm/h, στην υπολεκάνη 2 8.9 mm/h και στην υπολεκάνη 3 7.7 mm/h.

#### Αποτελέσματα Προσομοίωσης



**Διάγραμμα 4-3: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων για τα 2 μοντέλα - Επεισόδιο 6/2/2012**

Τα δύο πλημμυρογραφήματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, όπως η διαφορά στην παροχή αιχμής, τον πλημμυρικό όγκο και τον χρόνο που λαμβάνει χώρα αυτή. Αριθμητικά κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 4-5.

**Πίνακας 4-5: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 6/2/2012**

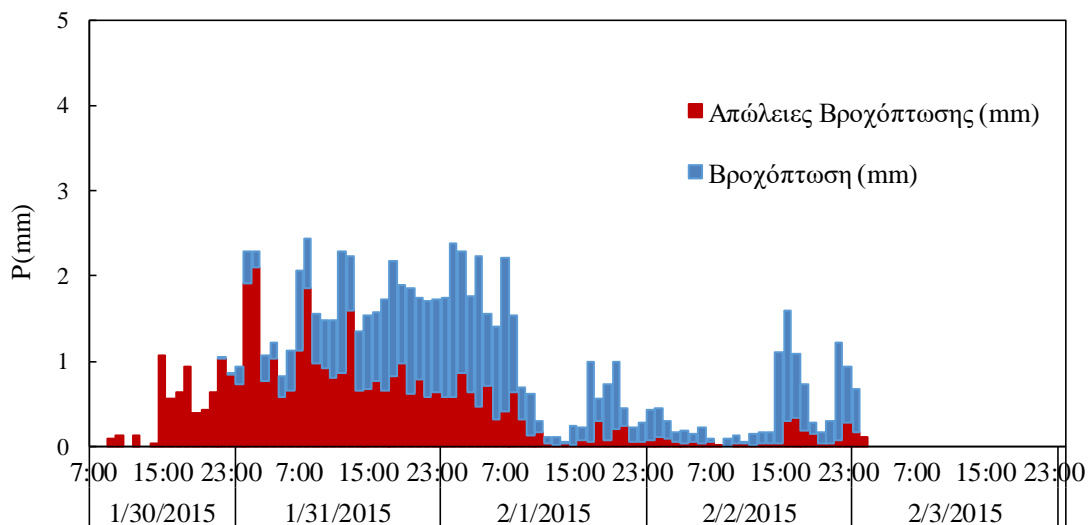
Επεισόδιο 6/2/2012		
Μοντέλο	Ημικατανεμημένο	Συγκεντρωτικό
Παροχή Αιχμής (m <sup>3</sup> /sec)	446.4	424.3
Χρόνος Αιχμής (hr)	37	31
Πλημμυρικός όγκος (m <sup>3</sup> )	61071173	60518237

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το πλημμυρογράφημα του ημικατανεμημένου μοντέλου έχει μεγαλύτερη παροχή αιχμής κατά  $22.1 \text{ m}^3/\text{s}$  και μεγαλύτερο πλημμυρικό όγκο κατά  $552936 \text{ m}^3$ . Επιπλέον το πλημμυρογράφημα που προκύπτει από το ημικατανεμημένο μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, καθώς η παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος λαμβάνει χώρα έξι ώρες μετά από αυτή του συγκεντρωτικού μοντέλου.

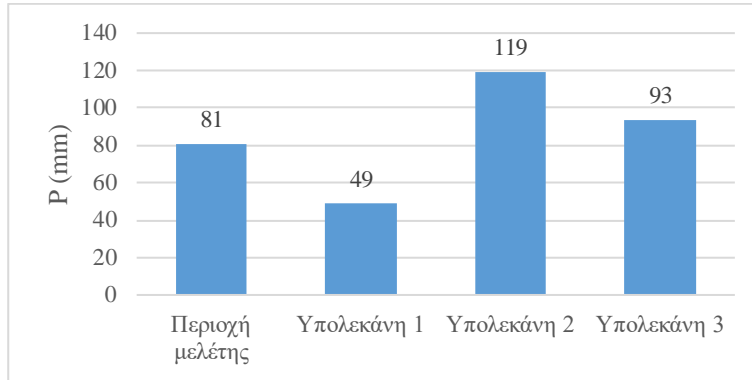
#### 4.1.2 Επεισόδιο της 1/2/2015

Το πλημμυρικό επεισόδιο που καταγράφηκε την 1/2/2015 εκδηλώθηκε από επεισόδιο βροχής που έλαβε χώρα από τις 07:00 στις 30/1/2015 και είχε διάρκεια 89 ώρες. Για το συγκεκριμένο επεισόδιο ήταν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης, από τους σταθμούς της Μυρικής, του Μαύρου Λιθαριού, της Λαμίας και της Μακρακώμης. Η βροχόπτωση καθώς και οι απώλειες αυτής για το συγκεκριμένο επεισόδιο στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-4.

Στο διάγραμμα 4-5 παρουσιάζονται τα συνολικά ύψη βροχής για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και για την κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά. Υπάρχει σημαντική χωρική ανομοιομορφία στην βροχόπτωση. Οι υπολεκάνες 2 και 3 οι οποίες είναι αυτές με το μεγαλύτερο μέσο υψόμετρο, παρουσιάζουν σημαντική διαφορά με την υπολεκάνη 1, η οποία είναι η πιο πεδινή.



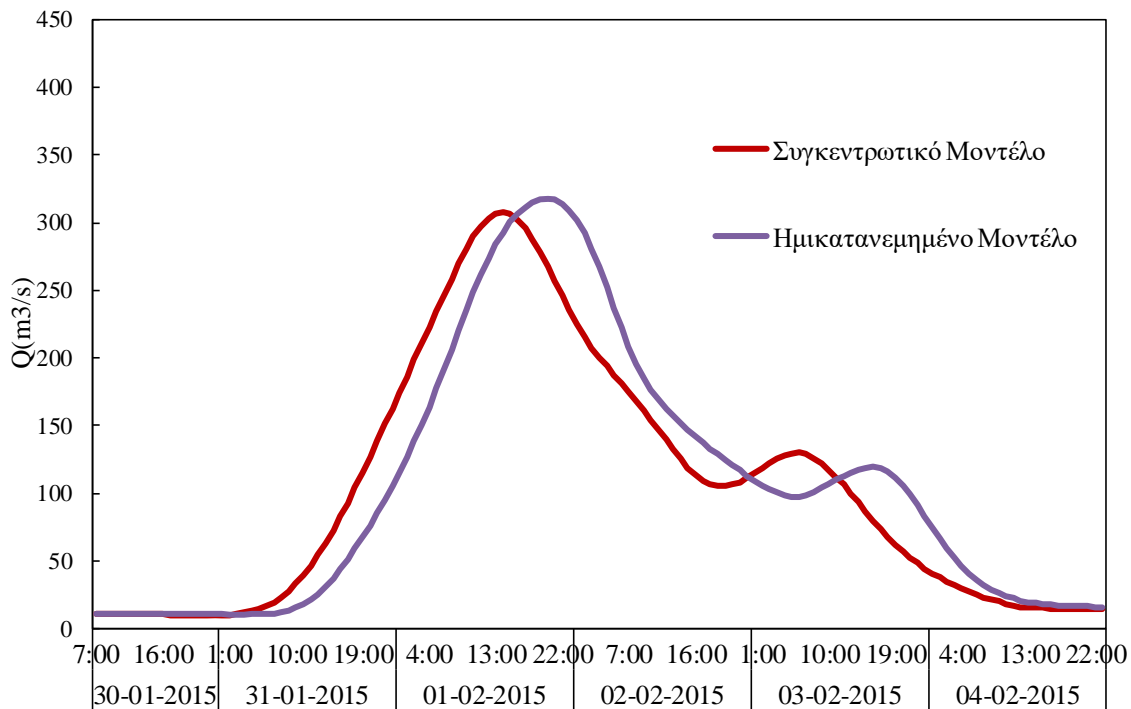
Διάγραμμα 4-4: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 1/2/2015



**Διάγραμμα 4-5: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 1/2/2015**

Αναλυτικότερα στο συγκεκριμένο επεισόδιο το συνολικό επιφανειακό ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης ήταν 81 mm, στην πρώτη υπολεκάνη 49 mm, στην δεύτερη υπολεκάνη 119 mm και στην τρίτη υπολεκάνη 93 mm. Η μέγιστη ωριαία ένταση στην περιοχή μελέτης ήταν 3.4 mm/h, στην υπολεκάνη 1 3.1 mm/h, στην υπολεκάνη 2 4.0 mm/h και στην υπολεκάνη 3 3.9 mm/h.

#### Αποτελέσματα Προσομοίωσης



**Διάγραμμα 4-6: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων - Επεισόδιο 1/2/2015**

Τα δύο πλημμυρογραφήματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, όπως η διαφορά στην παροχή αιχμής και στον χρόνο που λαμβάνει χώρα αυτή. Οι συγκεκριμένες διαφορές είναι

όμοιες με αυτές από τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα του επεισοδίου του έτους 2012. Αριθμητικά κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 4-6.

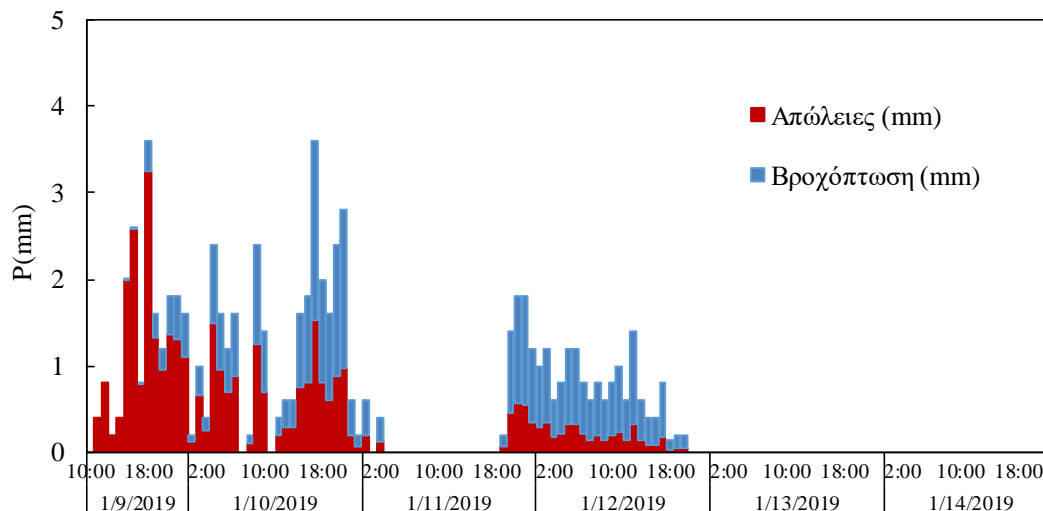
**Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 1/2/2015**

Επεισόδιο 1/2/2015		
Μοντέλο	Ημικατανεμημένο	Συγκεντρωτικό
Παροχή Αιχμής (m <sup>3</sup> /sec)	317.6	307.8
Χρόνος Αιχμής (hr)	61	55
Πλημμυρικός όγκος (m <sup>3</sup> )	56185028	54232826

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4-6 και τον πίνακα 4-6, το πλημμυρογράφημα του ημικατανεμημένου μοντέλου έχει μεγαλύτερη παροχή αιχμής κατά 9.8 m<sup>3</sup>/s και μεγαλύτερο πλημμυρικό όγκο κατά 1952201 m<sup>3</sup>. Επιπλέον το πλημμυρογράφημα που προκύπτει από το ημικατανεμημένο μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, καθώς η παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος λαμβάνει χώρα 6 ώρες μετά από αυτή του συγκεντρωτικού μοντέλου. Η διαφορά στον χρόνο που λαμβάνει χώρα ο χρόνος αιχμής στα δύο πλημμυρογραφήματα είναι κοινή με την αντίστοιχη για το επεισόδιο της 6/2/2012.

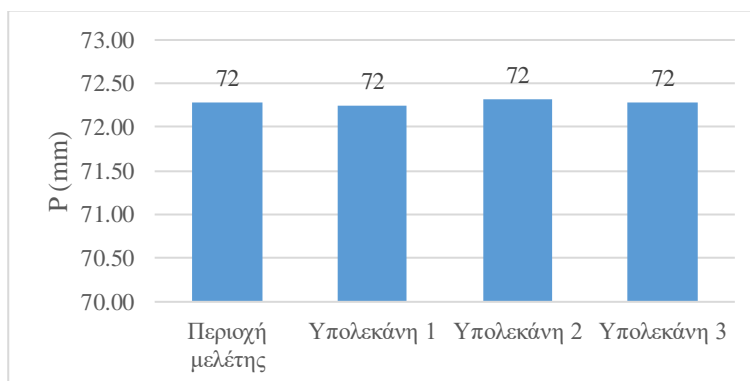
#### **4.1.3 Επεισόδιο της 10/1/2019**

Το πλημμυρικό επεισόδιο που καταγράφηκε στις 10/1/2019 εκδηλώθηκε από επεισόδιο βροχής που έλαβε χώρα από τις 10:00 στις 9/1/2019 και είχε διάρκεια 83 ώρες. Για το συγκεκριμένο επεισόδιο ήταν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης, από τους σταθμούς της Μυρικής, του Μαύρου Λιθαιριού, της Λαμίας και της Μακρακώμης. Η βροχόπτωση καθώς και οι απώλειες αυτής για το συγκεκριμένο επεισόδιο στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-7.



**Διάγραμμα 4-7: Βροχόπτωση – Απώλειες στην Περιοχή Μελέτης - Επεισόδιο 10/1/2019**

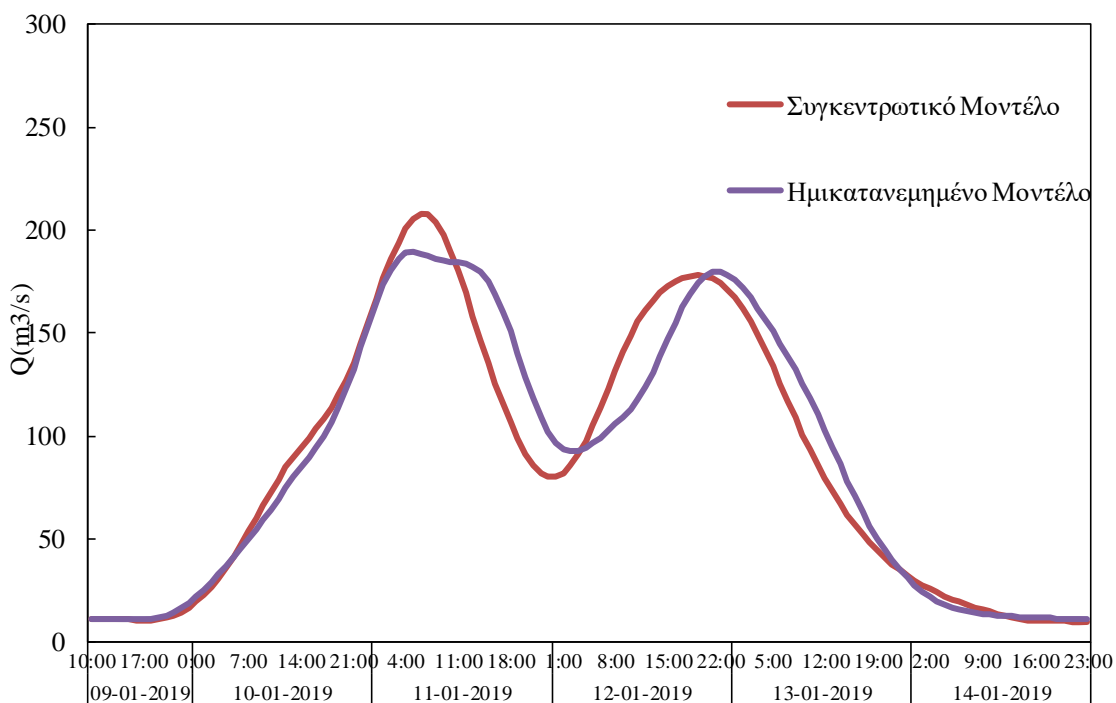
Στο διάγραμμα 4-8 παρουσιάζονται τα συνολικά ύψη βροχής για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και για την κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά.



**Διάγραμμα 4-8: Συνολική Βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής - Επεισόδιο 10/1/2019**

Το συγκεκριμένο είναι το μόνο επεισόδιο στο οποίο υπάρχει σημαντική ομοιομορφία στην βροχόπτωση. Αναλυτικότερα στο συγκεκριμένο επεισόδιο το συνολικό επιφανειακό ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης ήταν 72 mm και αντίστοιχα 72 mm στην κάθε υπολεκάνη. Η μέγιστη ωριαία ένταση στην περιοχή μελέτης ήταν 3.6 mm/h και σε κάθε υπολεκάνη.

### Αποτελέσματα Προσομοίωσης



**Διάγραμμα 4-9: Πλημμυρογραφήματα στην γέφυρα των Κομποτάδων - Επεισόδιο 10/1/2019**

Τα δύο πλημμυρογραφήματα έχουν σημαντικές διαφορές, όπως η διαφορά στην παροχή αιχμής και στον χρόνο που λαμβάνει χώρα αυτή. Το συγκεκριμένο επεισόδιο είναι το μόνο στο οποίο το πλημμυρογράφημα του συγκεντρωτικού μοντέλου έχει μεγαλύτερη παροχή αιχμής και η οποία λαμβάνει χώρα σε μεταγενέστερο χρόνο από αυτή του ημικατανεμημένου. Αριθμητικά κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 4-7. Σύμφωνα με το διάγραμμα 4-9 και τον πίνακα 4-7, το πλημμυρογράφημα του συγκεντρωτικού μοντέλου έχει μεγαλύτερη παροχή αιχμής κατά 18.4 m<sup>3</sup>/s, αλλά μικρότερο πλημμυρικό όγκο κατά 1083302 m<sup>3</sup>.

**Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων - Επεισόδιο 10/1/2019**

Επεισόδιο 10/1/2019		
Μοντέλο	Ημικατανεμημένο	Συγκεντρωτικό
Παροχή Αιχμής (m <sup>3</sup> /sec)	189.4	207.8
Χρόνος Αιχμής (hr)	43	44
Πλημμυρικός όγκος (m <sup>3</sup> )	45983930	44900628

Το πλημμυρογράφημα που προκύπτει από το συγκεντρωτικό μοντέλο, ως προς την παροχή αιχμής παρουσιάζει μεγαλύτερη χρονική υστέρηση, καθώς η παροχή αιχμής του

πλημμυρογραφήματος λαμβάνει χώρα μία ώρα μετά από αυτή του ημικατανεμημένου μοντέλου. Το συγκεκριμένο επεισόδιο είναι το μοναδικό από τα τρία που επιλέχθηκαν στο οποίο η παροχή αιχμής του συγκεντρωτικού μοντέλου ξεπερνά αυτή του ημικατανεμημένου και πραγματοποιείται μεταγενέστερα από αυτή του ημικατανεμημένου.

## **4.2 Ανάλυση Ευαισθησίας**

### **4.2.1 Γενικά – Μέθοδος “once at a time”**

Η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση αβεβαιότητας εξετάζουν την επίπτωση της μεταβολής παραμέτρων στα αποτελέσματα. Σκοπός τους είναι ο υπολογισμός της επίπτωσης των λαθών σε παραμέτρους εισόδου στα αποτελέσματα εξόδου. Στην ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλονται οι παράμετροι εισόδου και υπολογίζονται οι επιπτώσεις στο αποτέλεσμα. Μια απλή μέθοδος είναι η μεταβολή μιας μόνο παραμέτρου κάθε φορά, συνήθως ποσοσοστιαία και ο έλεγχος της μεταβολής των αποτελεσμάτων. Στην ανάλυση αβεβαιότητας χρησιμοποιούνται πιθανοτικές κατανομές των παραμέτρων εισόδου για να υπολογιστούν οι κατανομές των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Αρχικά ανακαλύπτεται η συνάρτηση πιθανότητας από την οποία προέρχεται η παράμετρος εισόδου και επιλέγοντας τυχαία στοιχεία από αυτή την κατανομή υπολογίζεται η συνάρτηση πιθανότητας των αποτελεσμάτων.

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να χρησιμεύσει στην επίτευξη των εξής στόχων (Pannell, 1997):

- Δοκιμές ευρωστίας (robustness) των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου, υπό την παρουσία της αβεβαιότητας.
- Περαιτέρω κατανόηση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών εισόδου και εξόδου σε ένα σύστημα ή μοντέλο.
- Μείωση της αβεβαιότητας μέσω του προσδιορισμού των δεδομένων εισόδου του μοντέλου που προκαλούν σημαντική αβεβαιότητα στο παραγόμενο αποτέλεσμα.
- Αναζήτηση σφαλμάτων σε ένα μοντέλο.
- Απλούστευση του μοντέλου με τη διόρθωση των δεδομένων εισόδου τα οποία δεν έχουν καμία επίδραση στο αποτέλεσμα, ή αναγνωρίζοντας και αφαιρώντας περιττά τμήματα της δομής του μοντέλου.
- Ενίσχυση της επικοινωνίας μεταξύ των δημιουργών του μοντέλου με υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.



- Η εύρεση περιοχής στο πεδίο ορισμού των παραγόντων εισόδου, για την οποία το αποτέλεσμα είναι είτε μέγιστο είτε ελάχιστο, είτε πληροί κάποιο βέλτιστο κριτήριο (βελτιστοποίηση και μέθοδος Monte Carlo).

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος “Once at a time” – OAT. Στην εν λόγω μέθοδο μεταβάλλεται μία μόνο παράμετρος κάθε φορά και υπολογίζεται η επίδραση της μεταβολής στο τελικό αποτέλεσμα. Πιο αναλυτικά κάθε φορά μεταβάλλεται μια μόνο μεταβλητή εντός των ορίων περιορισμού διατηρώντας σταθερές τις άλλες. Στη συνέχεια για να ελεγχθεί και η επιρροή άλλων μεταβλητών στο τελικό αποτέλεσμα, επαναφέρεται η προηγούμενη μεταβλητή στην αρχική της τιμή και μεταβάλλεται μία άλλη με τον ίδιο τρόπο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν διερευνά όλο το πεδίο τιμών των μεταβλητών εισόδου και δεν ελέγχει την ταυτόχρονη μεταβολή μεταβλητών με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανιχνεύσει την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου.

Στην παρούσα εργασία, θα ελεγχθούν οι εξής μεταβλητές εισόδου:

- Η παράμετρος X της μεθόδου υδρολογικής διόδευσης Muskingum.
- Η παράμετρος K της μεθόδου υδρολογικής διόδευσης Muskingum.
- Το χρονικό βήμα υπολογισμών της προσομοίωσης.

Οι παράμετροι X και K της μεθόδου Muskingum στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία δεν ήταν δυνατό να υπολογιστούν καθώς δεν εντοπίστηκαν δεδομένα απορροών για τα προαναφερθέντα επεισόδια βροχόπτωσης, αλλά επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπ’ όψιν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού και της λεκάνης απορροής. Συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να εξεταστεί η επιρροή ενδεχόμενης μεταβολής τους στο τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον εφόσον τα δεδομένα βροχόπτωσης των σταθμών για τα τρία επεισόδια είχαν μετρηθεί σε 10λεπτο βήμα, ενώ οι προσομοιώσεις έγιναν σε ωριαίο χρονικό βήμα, κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστεί η μεταβολή των αποτελεσμάτων σε ενδεχόμενη μείωση του χρονικού βήματος. Για την ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε το επεισόδιο που έλαβε χώρα στις 6/2/2012.

#### **4.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου X**

Στο ημικαταμεμημένο μοντέλο καθορίστηκαν τρεις κλάδοι ποταμού (R1, R2, R3), όπου στον R1 διοδεύτηκε μέχρι την είσοδο του κλάδου R3 το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης 1, στον κλάδο R2 διοδεύτηκε μέχρι την είσοδο του κλάδου R3 το

πλημμυρογράφημα στην έξοδο της υπολεκάνης 2 και στον κλάδο R3 διοδεύτηκαν τα πλημμυρογραφήματα τα οποία έχουν ήδη διοδευτεί μέχρι την είσοδο του κλάδου R3.

Στην συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας, μεταβαλλόταν ποσοστιαία η τιμή της παραμέτρου X, ταυτόχρονα σε όλους τους κλάδους και εξεταζόταν το αποτέλεσμα στην έξοδο της περιοχής μελέτης, αλλά και στην έξοδο του κάθε κλάδου ποταμού. Καθώς από τις πρώτες δοκιμές ήταν εμφανές ότι η επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα για μικρές μεταβολές της παραμέτρου X ήταν ανεπαίσθητη, η τελική ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για μεταβολές του X κατά 25% και 50%. Οι τιμές της παραμέτρου X για τις αντίστοιχες μεταβολές του παρουσιάζονται στον πίνακα 4-8.

**Πίνακας 4-8: Τιμές της παραμέτρου X σε κάθε κλάδο**

Τιμές της παραμέτρου X στην ανάλυση ευαισθησίας					
	-50%	-25%	X	25%	50%
R1	0.10	0.15	0.2	0.25	0.30
R2	0.15	0.23	0.3	0.38	0.45
R3	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23

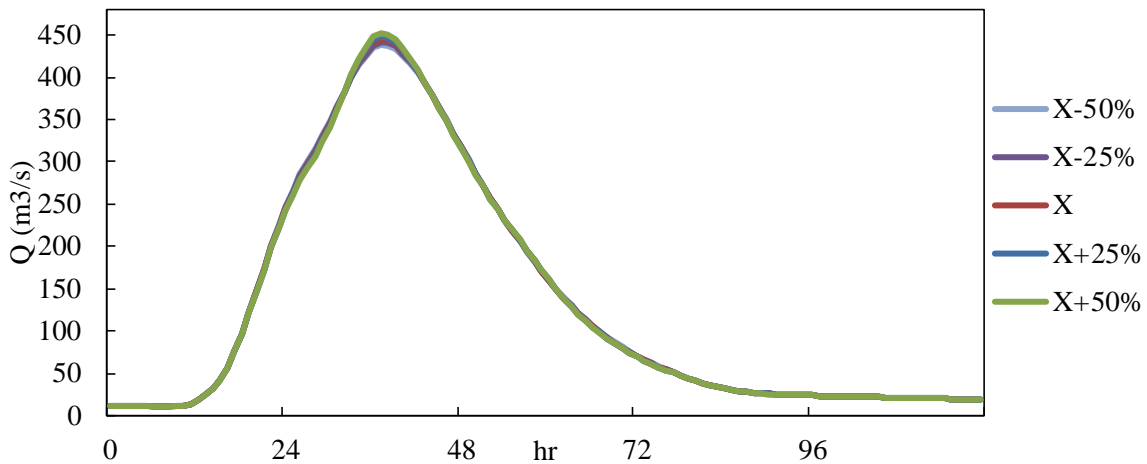
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας της παραμέτρου X, για το επεισόδιο που έλαβε χώρα στις 6/2/2012. Συγκεκριμένα παρατίθενται τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν στην έξοδο της περιοχής μελέτης (Γέφυρα Κομποτάδων), και στην έξοδο του κάθε κλάδου ποταμού, επιπλέον παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών.

#### **Έξοδος Περιοχής Μελέτης (Γέφυρα Κομποτάδων)**

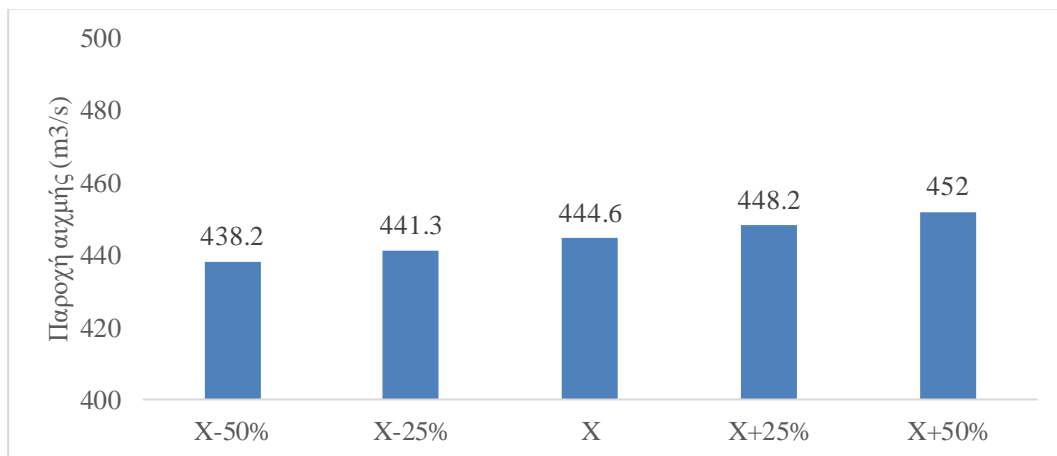
Στο διάγραμμα 4-10 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου X, ενώ στον πίνακα 4-9 και στο διάγραμμα 4-11 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.

**Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X**

Γέφυρα Κομποτάδων (Έξοδος περιοχής μελέτης)			
	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>Q<sub>max</sub></sub> (h)	ΔQ (%)
x-50%	438.2	37	-1.44
x-25%	441.3	37	-0.74
x	444.6	37	0
x+25%	448.2	37	0.81
x+50%	452	37	1.66



**Διάγραμμα 4-10: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης - Ανάλυση ευαισθησίας X**



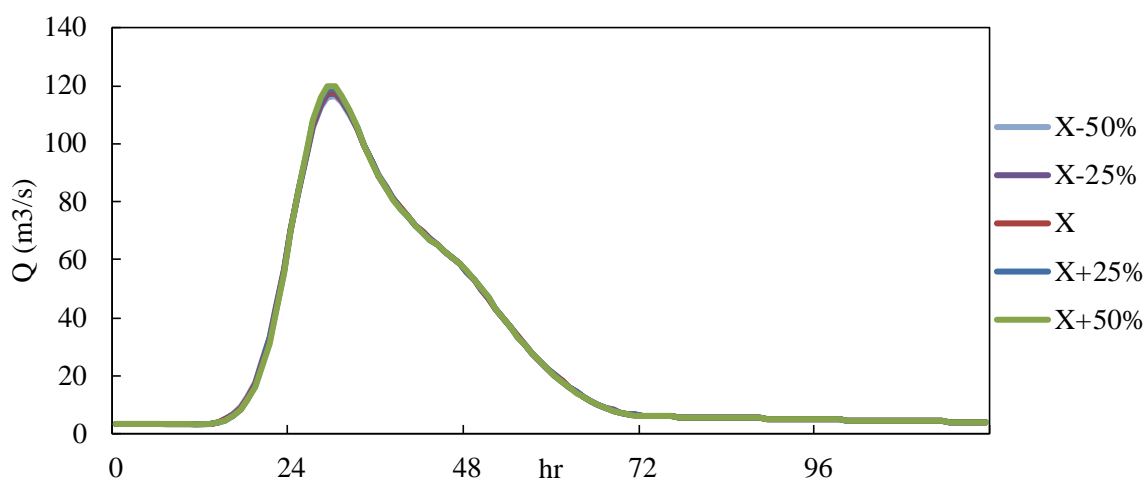
**Διάγραμμα 4-11: Παροχές Αιχμής – Ανάλυση Ευαισθησίας X**

Παρατηρείται πως ενώ οι τιμές της παραμέτρου X είναι σημαντικές, η επιρροή τους στο τελικό πλημμυρογράφημα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά αν ληφθεί υπ' όψιν το μέγεθος του πλημμυρογραφήματος. Ο χρόνος της παροχής αιχμής παραμένει σταθερός για οποιαδήποτε μεταβολή της παραμέτρου X. Τέλος σημειώνεται πως οι μεταβολές στην παροχή αιχμής είναι σχετικά γραμμικές με τις αντίστοιχες μεταβολές της παραμέτρου X.

### **Αποτελέσματα Ανά Κλάδο Ποταμού**

#### **Κλάδος Ποταμού R1**

Στο διάγραμμα 4-12 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλαδου R1, για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου X, ενώ στο πίνακα 4-10 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



Διάγραμμα 4-12: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1 - Ανάλυση ευαισθησίας X

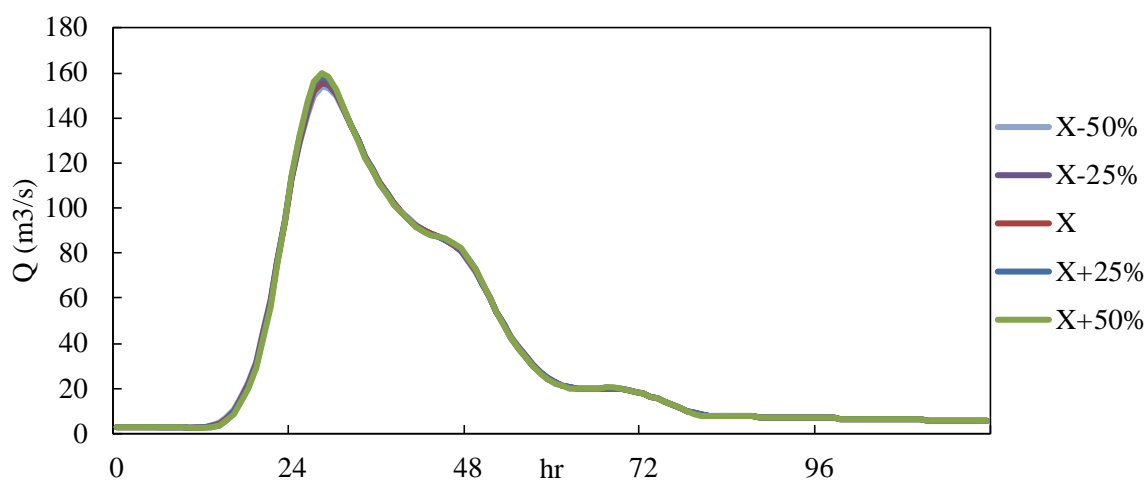
Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X

Έξοδος Κλάδου Ποταμού R1			
	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$t_{Q_{max}}$ (h)	$\Delta Q$ (%)
x-50%	116.4	30	-1.36
x-25%	117.2	30	-0.7
x	118	30	0.0
x+25%	118.9	30	0.8
x+50%	119.8	30	1.53

Οι μεταβολές του X είναι αρκετά υψηλές, αλλά η επιρροή στο πλημμυρογράφημα είναι μικρή. Σε απόλυτους αριθμούς η μεταβολή της παροχής αιχμής είναι σχεδόν ανεπαίσθητη. Ο χρόνος της παροχής αιχμής παραμένει σταθερός για οποιαδήποτε μεταβολή της παραμέτρου X.

### Κλάδος Ποταμού R2

Στο διάγραμμα 4-13 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλαδου R2 για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου X, ενώ στο πίνακα 4-11 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



**Διάγραμμα 4-13: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R2 - Ανάλυση ευαισθησίας X**

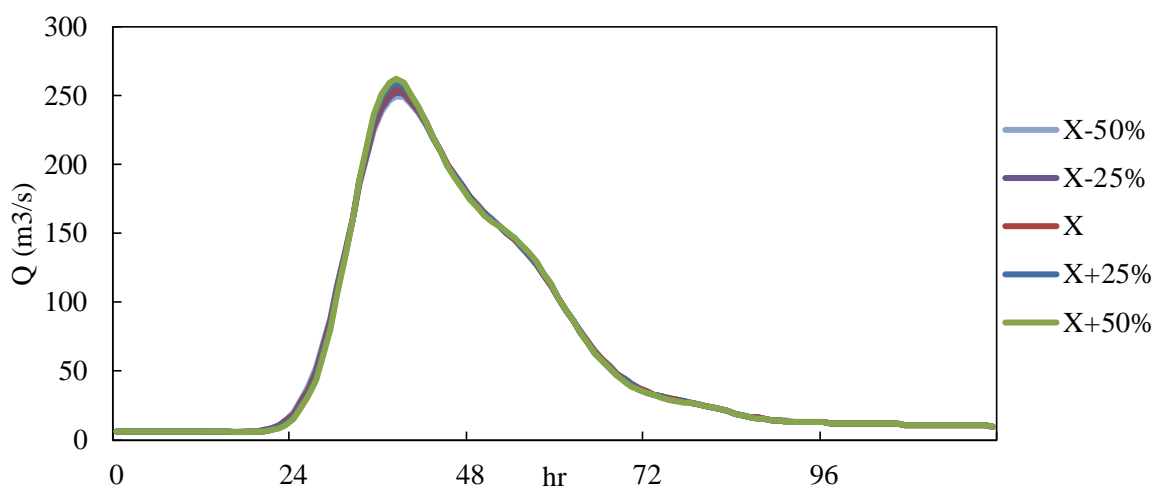
Οι μεταβολές του X είναι αρκετά υψηλές, αλλά η επιρροή στο πλημμυρογράφημα είναι μικρή. Σε απόλυτους αριθμούς η μεταβολή της παροχής αιχμής είναι πολύ χαμηλή, όπως και στον κλάδο R1. Ο χρόνος της παροχής αιχμής παραμένει σταθερός για οποιαδήποτε μεταβολή της παραμέτρου X.

**Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X**

Έξοδος Κλάδου Ποταμού R2			
	$Q_{max}$ (m³/s)	$t_{Q_{max}}$ (h)	$\Delta Q$ (%)
x-50%	153.8	28	-1.85
x-25%	155.3	28	-0.9
x	156.7	28	0.0
x+25%	158.3	28	1.0
x+50%	159.8	28	1.98

### Κλάδος Ποταμού R3

Στο διάγραμμα 4-14 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R3, για ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της παραμέτρου X, ενώ στο πίνακα 4-12 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



**Διάγραμμα 4-14:** Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R3 - Ανάλυση ευαισθησίας X

**Πίνακας 4-12:** Χαρακτηριστικά Μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση Ευαισθησίας X

Έξοδος Κλάδου Ποταμού R3			
	$Q_{max}$ (m³/s)	$t_{Q_{max}}$ (h)	$\Delta Q$ (%)
x-50%	249.5	38	-2.35
x-25%	252.4	38	-1.21
x	255.5	38	0.00
x+25%	258.8	38	1.29
x+50%	262.3	38	2.66

Στον συγκεκριμένο κλάδο παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή στην παροχή αιχμής από όλους τους κλάδους, αλλά και από την έξοδο της περιοχής μελέτης. Η εν λόγω μεταβολή οφείλεται κατά ένα ποσοστό και στην εξασθένιση που έχουν υποστεί ήδη τα πλημμυρογραφήματα στους κλάδους R1 και R2, όταν εισέρχονται στον κλάδο R3.

#### 4.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου K

Όπως στην προαναφερθείσα ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου X και στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας μεταβαλλόταν ποσοστιαία η τιμή της παραμέτρου K(hr), ταυτόχρονα σε όλους τους κλάδους του ποταμού και εξεταζόταν το αποτέλεσμα στην έξοδο της περιοχής μελέτης, αλλά και στην έξοδο του κάθε κλάδου ποταμού. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε η μεταβολή της παραμέτρου K να πραγματοποιείται κατά 15% και 30%, καθώς από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι μεταβολές στην παράμετρο K(hr), επηρέαζαν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Οι τιμές της παραμέτρου K(hr) για τις αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές της παρουσιάζονται στον πίνακα 4-13.

**Πίνακας 4-13: Τιμές της παραμέτρου K(hr) - Ανάλυση ευαισθησίας**

Τιμές της παραμέτρου K(hr) - Ανάλυση Ευαισθησίας					
	-30%	-15%	K(hr)	15%	30%
R1	3.6	4.3	5.1	5.9	6.6
R2	2.8	3.4	4.0	4.6	5.2
R3	6.1	7.4	8.7	10.0	11.3

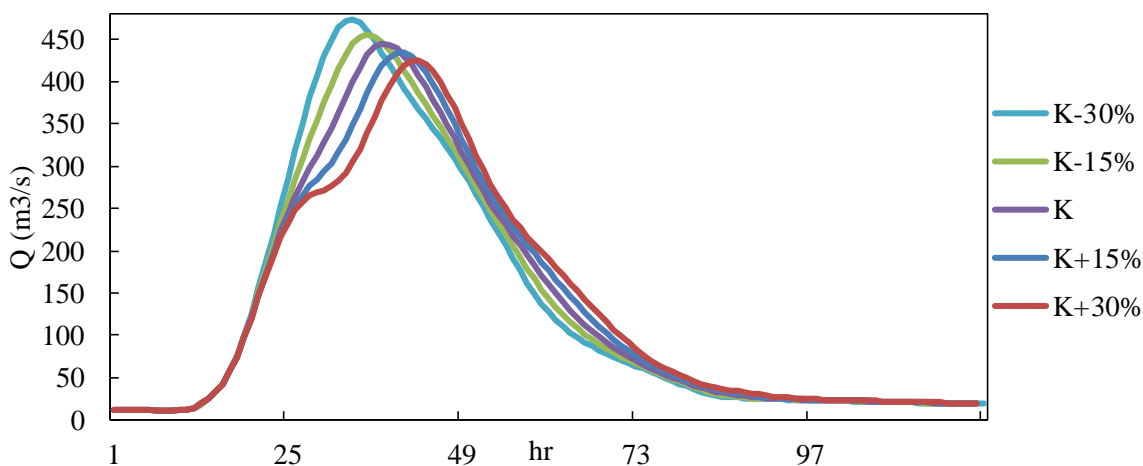
**Πίνακας 4-14: Αριθμός Υποκλάδων - Ανάλυση ευαισθησίας**

Subreaches					
	-30%	-15%	K(hr)	15%	30%
R1	4	4	5	6	7
R2	3	3	4	5	5
R3	6	7	9	10	11

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας της παραμέτρου K, για το επεισόδιο που έλαβε χώρα στις 6/2/2012. Συγκεκριμένα παρατίθενται τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν στην έξοδο της περιοχής μελέτης (Γέφυρα Κομποτάδων), και στην έξοδο του κάθε κλάδου ποταμού, επιπλέον παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών.

#### **Έξοδος Περιοχής Μελέτης (Γέφυρα Κομποτάδων)**

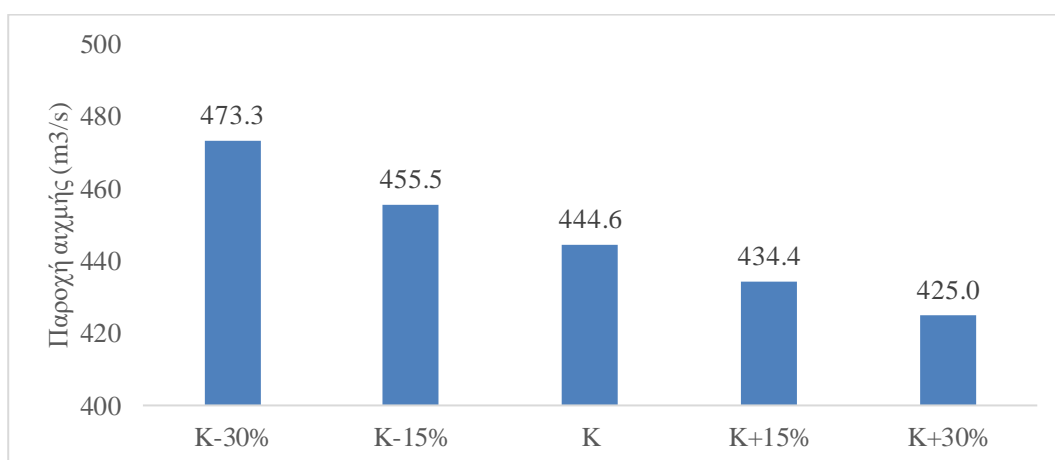
Στο διάγραμμα 4-15 παρουσιάζεται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης, για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου K, ενώ στο πίνακα 4-15 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



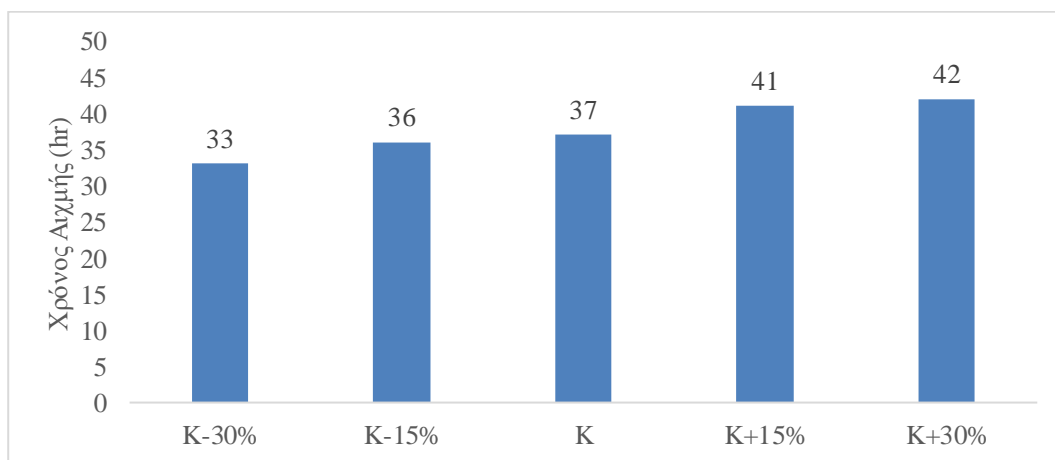
**Διάγραμμα 4-15: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr)**

**Πίνακας 4-15: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Έξοδος περιοχής μελέτης**

Γέφυρα Κομποτάδων (Έξοδος περιοχής μελέτης)				
	Q <sub>max</sub>	t (h)	ΔQ <sub>max</sub> (%)	Δt (h)
K-30%	473.3	33	6.5	-4
K-15%	455.5	36	2.5	-1
K	444.6	37	0.0	0
K+15%	434.4	41	-2.3	4
K+30%	425	42	-4.4	5



**Διάγραμμα 4-16: Παροχές Αιχμής - Ανάλυση Ευαισθησίας K**



**Διάγραμμα 4-17: Χρόνος Αιχμής - Ανάλυση Ευαισθησίας K**

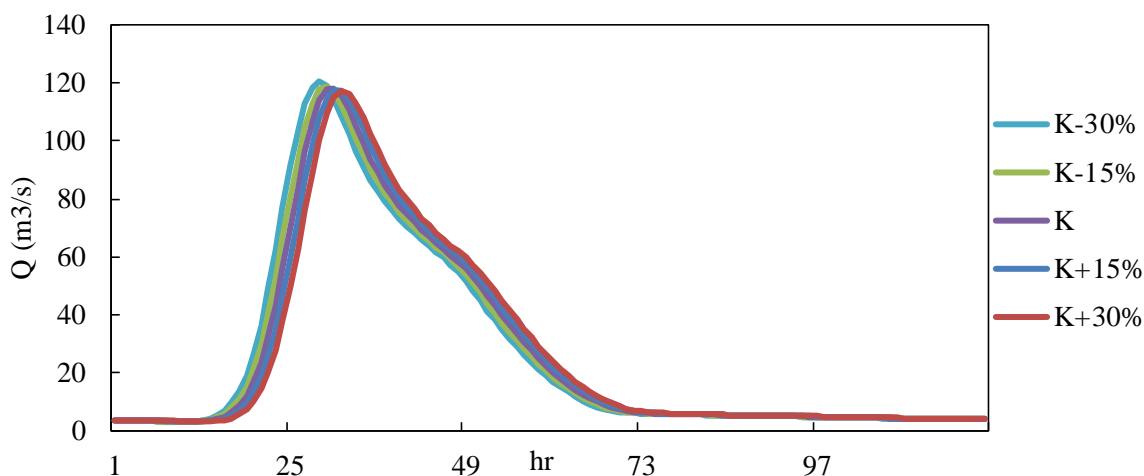
Η παροχή αιχμής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την παράμετρο K, ενώ αντίθετα με την παράμετρο X είναι ευθέως ανάλογη. Η παράμετρος K εκτός από την παροχή αιχμής, επηρεάζει κυρίως τον χρόνο που αυτή θα λάβει χώρα, καθώς η ίδια η παράμετρος εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το συγκεκριμένο τμήμα ποταμού. Οι μεταβολές στον χρόνο της αιχμής είναι σημαντικές για οποιαδήποτε μεταβολή του K.



## Αποτελέσματα Ανά Κλάδο Ποταμού

### Κλάδος Ποταμού R1

Στο διάγραμμα 4-18 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1, για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου K, ενώ στο πίνακα 4-16 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



Διάγραμμα 4-18: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr)

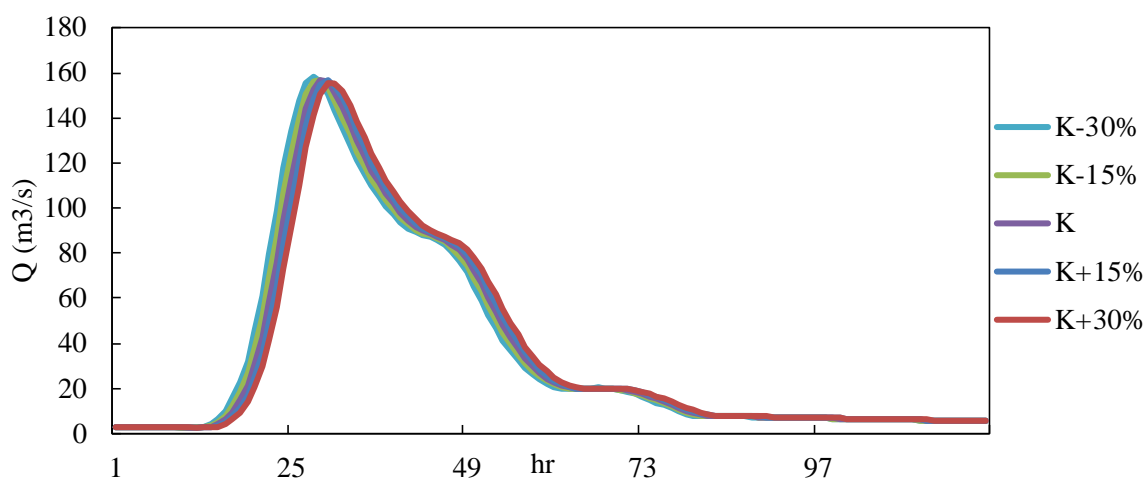
Πίνακας 4-16: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων

Έξοδος Κλάδου Ποταμού R1				
	Q <sub>max</sub>	t (h)	ΔQ <sub>max</sub> (%)	Δt (h)
K-30%	120.5	28	2.1	-2
K-15%	118.7	30	0.6	0
K	118	30	0.0	0
K+15%	117.5	31	-0.4	1
K+30%	117.2	31	-0.7	1

Ο συγκεκριμένος κλάδος είναι αυτός με το μικρότερο μήκος από τους τρεις, επομένως και η επιρροή του στο διόδευμένο πλημμυρογράφημα είναι η μικρότερη, ειδικά στον χρόνο της αιχμής.

### Κλάδος Ποταμού R2

Στο διάγραμμα 4-19 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R2, για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου K, ενώ στο πίνακα 4-17 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



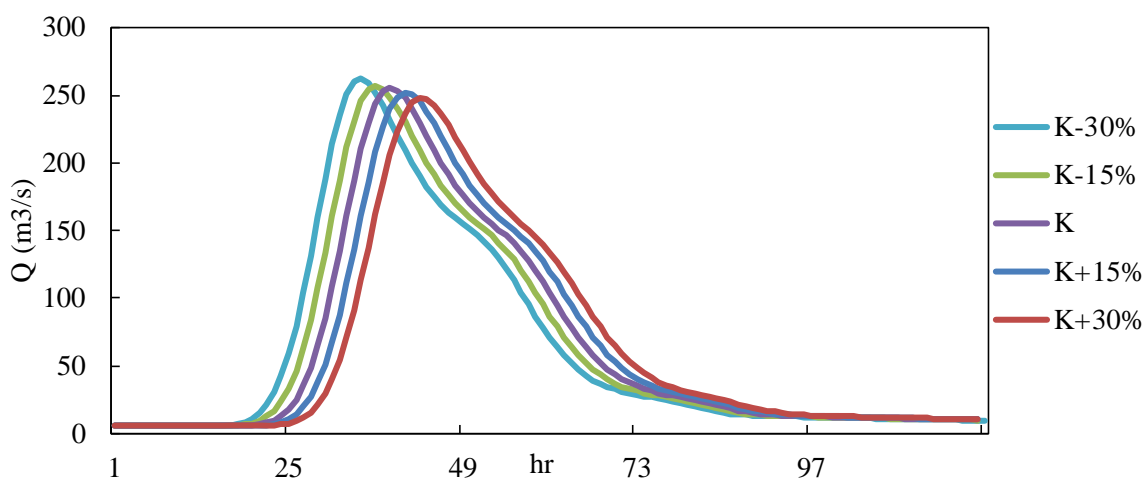
**Διάγραμμα 4-19: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R2 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr)**

**Πίνακας 4-17: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr)**

Έξοδος Κλάδου Ποταμού R2				
	Q <sub>max</sub>	t (h)	ΔQ <sub>max</sub> (%)	Δt (h)
K-30%	158.2	27	1.0	-1
K-15%	156.7	28	0.0	0
K	156.7	28	0.0	0
K+15%	156.7	30	0.0	2
K+30%	155.2	30	-1.0	2

### Κλάδος Ποταμού R3

Στο διάγραμμα 4-20 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R1, για ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής της παραμέτρου K, ενώ στο πίνακα 4-18 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη.



**Διάγραμμα 4-20: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο του κλάδου R3 - Ανάλυση ευαισθησίας K(hr)**

**Πίνακας 4-18: Χαρακτηριστικά μεγέθη Πλημμυρογραφημάτων - Έξοδος Κλάδου R3**

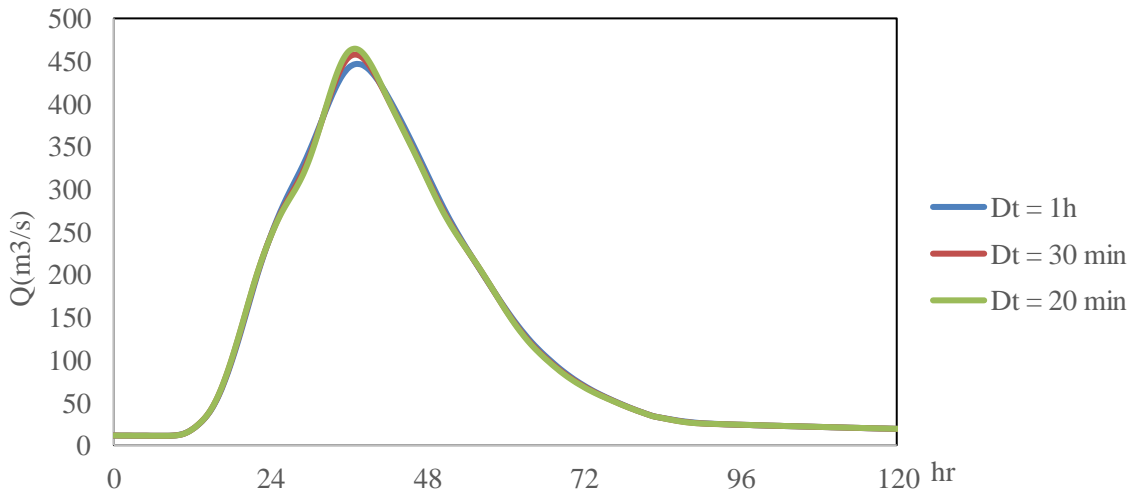
Έξοδος Κλάδου Ποταμού R3				
	Qmax	t (h)	ΔQmax (%)	Δt (h)
K-30%	262.4	34	2.7	-4
K-15%	256.9	37	0.5	-1
K	255.5	38	0.0	0
K+15%	251.8	41	-1.4	3
K+30%	248	42	-2.9	4

Ο συγκεκριμένος κλάδος είναι αυτός με το μεγαλύτερο μήκος από τους τρεις και σε αυτόν διοδεύονται τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3, επομένως είναι αυτός με την μεγαλύτερη επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα.

#### 4.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας του χρονικού βήματος προσομοίωσης

Οι προσομοιώσεις στην παρούσα διπλωματική που αφορούσαν τη σύγκριση του ημικατανομημένου και του συγκεντρωτικού μοντέλου και τις προαναφερθείσες αναλύσεις ευαισθησίας, έγιναν χρησιμοποιώντας ως χρονικό βήμα υπολογισμού την μία ώρα. Ο συγκεκριμένος χρόνος επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγεθος της περιοχής μελέτης, τον υπολογιστικό χρόνο και το βήμα των δεδομένων βροχόπτωσης. Ο συγκεκριμένος χρόνος θεωρήθηκε ότι θα οδηγούσε σε αξιόπιστα αποτελέσματα με βάση με τα παραπάνω κριτήρια. Εφόσον τα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης είχαν χρονικό βήμα 10 λεπτά, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνουν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας μικρότερο χρονικό βήμα, προκειμένου να αξιολογηθεί η επιλογή του χρονικού βήματος και να συγκριθούν τα αποτελέσματα για

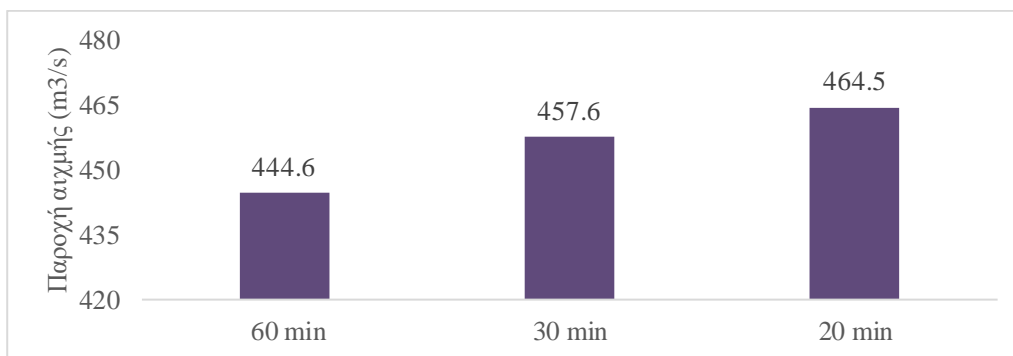
διαφορετικά χρονικά βήματα. Η παρούσα ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε όπως και οι προηγούμενες στο επεισόδιο που έλαβε χώρα στις 6/2/2012. Για την παρούσα ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις, μία με χρονικό βήμα υπολογισμών μία ώρα, μία με βήμα 30 λεπτά και μία με βήμα 20 λεπτά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω.



**Διάγραμμα 4-21: Πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης για διαφορετικό χρονικό βήμα προσομοίωσης**

**Πίνακας 4-19: Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφημάτων**

Χρονικό Βήμα	$Q_{\max}(\text{m}^3/\text{s})$	$T_{Q_{\max}}(\text{hr})$	$\Delta Q$ (%)
60 min	444.6	37	0
30 min	457.6	37	2.9
20 min	464.5	37	4.4



**Διάγραμμα 4-22: Παροχές Αιχμής Πλημμυρογραφημάτων για διαφορετικό χρονικό βήμα προσομοίωσης**

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, το χρονικό βήμα των υπολογισμών επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, καθώς συγκεκριμένα για χρονικό βήμα 30 λεπτών η παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος στην γέφυρα των Κομποτάδων μεταβάλλεται κατά 2.9%, ενώ για χρονικό βήμα 20 λεπτών μεταβάλλεται κατά 4.4%.

### 4.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

#### Εφαρμογή Συγκεντρωτικού και Ημικατανεμημένου Μοντέλου

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τριών επεισοδίων με τα δύο μοντέλα, το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο, προέκυψαν κοινές διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των πλημμυρογραφημάτων των επεισοδίων των ετών 2012 και 2015, ενώ στο επεισόδιο του έτους 2019 τα αποτελέσματα διαφέρουν. Συγκεκριμένα στα δύο επεισόδια των ετών 2012 και 2015 παρατηρήθηκε αυξημένη παροχή αιχμής και πλημμυρικός όγκος στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το ημικατανεμημένο μοντέλο σε σχέση με το συγκεντρωτικό. Επιπλέον η παροχή αιχμής λαμβάνει χώρα έξι ώρες μετά από αυτή του πλημμυρογραφήματος του συγκεντρωτικού μοντέλου και στα δύο επεισόδια. Αντιθέτως στο επεισόδιο του έτους 2019 η παροχή αιχμής του συγκεντρωτικού μοντέλου ξεπέρασε αυτή του ημικατανεμημένου και έλαβε χώρα μεταγενέστερα από αυτή του ημικατανεμημένου. Ο πλημμυρικός όγκος που προέκυψε από το ημικατανεμημένο μοντέλο, παρέμεινε σε υψηλότερα επίπεδα.

Η διαφορά που παρατηρείται στα πλημμυρογραφήματα του έτους 2019 σε σχέση με αυτά των άλλων ετών οφείλεται στην χρονική υστέρηση, η οποία μεταβάλλεται λόγω της διόδευσης των πλημμυρογραφημάτων των ανάντη υπολεκανών στο ημικατανεμημένο μοντέλο. Αυτή η χρονική «καθυστέρηση» των πλημμυρογραφημάτων των υπολεκανών 2 και 3, έχει ως αποτέλεσμα να μην συναντιόνται χρονικά η παροχή αιχμής του

πλημμυρογραφήματος της υπολεκάνης 1, με την παροχή αιχμής των διοδευμένων πλημμυρογραφήματων, κατά συνέπεια η παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος είναι μικρότερη. Ενώ στα πλημμυρογραφήματα των δύο άλλων ετών, αυτή η σύμπτωση των δύο παροχών αιχμής οδηγεί σε μεγαλύτερες παροχές αιχμής, σε συνδυασμό με την ακριβέστερη κατανομή της βροχόπτωσης.

Το ημικατανεμημένο μοντέλο σε σχέση με το συγκεντρωτικό, λαμβάνει υπ' όψιν την χωρική ανομοιομορφία της βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών του εδάφους και τους υπεδάφους, καθώς η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε υπολεκάνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μία. Με αυτό τον τρόπο γίνεται καλύτερη προσέγγιση της βροχόπτωσης, αλλά και των απωλειών αυτής στην περιοχή μελέτης. Συνεπώς προκύπτει ότι το ημικατανεμημένο μοντέλο οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με το συγκεντρωτικό.

### **Ανάλυση Ευαισθησίας παραμέτρου X**

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας της παραμέτρου X, προκύπτει ότι οι μεταβολές στο τελικό πλημμυρογράφημα στην έξοδο τη περιοχής μελέτης είναι πολύ μικρές, ακόμα και για μεγάλες μεταβολές αυτής, όπως η μεταβολή κατά 50%. Οι μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές στην παροχή αιχμής παρουσιάστηκαν στην έξοδο του κλάδου R3, οι οποίες οφείλονται και στην εξασθένηση που έχουν υποστεί ήδη τα πλημμυρογραφήματα στους κλάδους R1 και R2, όταν εισέρχονται στον κλάδο R3. Στους κλάδους R2 και R1 οι μεταβολές ήταν ανεπαίσθητες. Η μεγαλύτερη μεταβολή σε απόλυτους αριθμούς στην παροχή αιχμής πραγματοποιήθηκε στα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της περιοχής μελέτης.

Η μεταβολή στην παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος που προκλήθηκε από την ταυτόχρονη μεταβολή κατά 50% της παραμέτρου X στους 3 κλάδους ποταμών ήταν μικρότερη των 10 m<sup>3</sup>/s. Οι μεταβολές ποσοστιαία δεν ξεπερνούσαν το 1.66%, σε σχέση με την παροχή αιχμής του αρχικού πλημμυρογραφήματος η οποία ήταν της τάξης των 444.6 m<sup>3</sup>/s. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μεταβολές της παροχής αιχμής για τις αντίστοιχες μεταβολές της παραμέτρου X παρουσιάζουν αναλογικότητα. Συμπερασματικά προκύπτει ότι η παράμετρος X της υδρολογικής μεθόδου Muskingum δεν επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα όταν πρόκειται για πλημμυρικά επεισόδια και προσομοιώσεις βροχής απορροής. Συνεπώς σε περίπτωση αδυναμίας υπολογισμού της εν λόγω παραμέτρου και επιλογής της με βιβλιογραφικά κριτήρια, δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στο τελικό

αποτέλεσμα. Τέλος η παράμετρος X επηρεάζει μόνο την παροχή αιχμής και τον τρόπο που ο ίδιος πλημμυρικός όγκος μεταφέρεται στον χρόνο και όχι τον χρόνο που αυτή λαμβάνει χώρα.

### **Ανάλυση Ευαισθησίας παραμέτρου K**

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας της παραμέτρου K, παρατηρείται ότι η εν λόγω παράμετρος επηρεάζει εκτός από τον χρόνο που λαμβάνει χώρα η παροχή αιχμής και το μέγεθος της παροχής αιχμής. Σε ποταμούς μικρού μήκους, όπως οι κλάδοι R1 και R2, η επιρροή στην παροχή αιχμής ήταν σχεδόν ανεπαίσθητη και η επιρροή στον χρόνο που λαμβάνει χώρα μικρή. Ενώ σε ποταμούς μεγαλύτερου μήκους όπως ο κλάδος R3, η επιρροή στην παροχή αιχμής και στον χρόνο αυτής ήταν αρκετά μεγαλύτερη, συνεπώς το μήκος του ποταμού που διοδεύεται το πλημμυρογράφημα παίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα. Επίσης σε περιπτώσεις ποταμών μεγάλου μήκους η επιρροή του K στην παροχή αιχμής είναι μεγαλύτερη από αυτή του X, παρόλο που η παράμετρος X εκφράζει την εξασθένιση του πλημμυρικού κύματος. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι στον κλάδο R3 μεταβολή του K κατά 30% οδήγησε σε μεγαλύτερη μεταβολή της παροχής αιχμής απ' ότι η μεταβολή της παραμέτρου X κατά 50%.

Η μεγαλύτερη μεταβολή στην παροχή αιχμής αλλά και στον χρόνο αυτής, παρατηρήθηκε στο τελικό πλημμυρογράφημα, στην έξοδο της περιοχής μελέτης (Γέφυρα Κομποτάδων). Συγκεκριμένα για αύξηση του K κατά 30% η παροχή αιχμής μεταβλήθηκε κατά -4.4%, για μείωση του K κατά 30%, μεταβλήθηκε κατά 6.5%, ενώ ο χρόνος αιχμής μεταβλήθηκε κατά 5 και 4 ώρες αντίστοιχα. Η εν λόγω μεταβολή στην παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος δεν οφείλεται μόνο στην επιρροή της παραμέτρου K(hr) στην παροχή αιχμής του διοδευμένου πλημμυρογραφήματος, αλλά κατά κύριο λόγο οφείλεται στην επιρροή του K(hr) στον χρόνο μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος, καθώς αυτός επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο που τα διοδευμένα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3, συναντούν το πλημμυρογράφημα της υπολεκάνης 1, το οποίο υπολογίζεται άμεσα στην έξοδο της περιοχής μελέτης. Ο χρόνος που η παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος λαμβάνει χώρα, επηρεάζεται κυρίως από τη μεταβολή στον χρόνο μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος στον κλάδο R3, ο οποίος είναι ο κλάδος του ποταμού με το μεγαλύτερο μήκος που διοδεύονται τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3 μαζί. Καταλήγοντας η επιρροή της παραμέτρου K(hr) της υδρολογικής διόδευσης Muskingum είναι ιδιαίτερα σημαντική στο τελικό αποτέλεσμα, συνεπώς είναι ιδιαίτερης

σημασίας να υπάρχουν μετρήσεις απορροών, προκειμένου να μπορεί να υπολογιστεί η εν λόγω παράμετρος. Η επιλογή της μόνο με γεωμορφολογικά κριτήρια καλό είναι να είναι ιδιαίτερα προσεκτική, έχοντας γνώση της επιρροής της στο αποτέλεσμα.

### **Ανάλυση Ευαισθησίας Χρονικού βήματος προσομοίωσης**

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, όσο μειώνεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης τόσο αυξάνεται η παροχή αιχμής, ενώ ο χρόνος που λαμβάνει χώρα αυτή παραμένει σταθερός. Αυτή η αύξηση της παροχής αιχμής οφείλεται στο γεγονός ότι λαμβάνεται υπ' όψιν η διακύμανση της βροχόπτωσης εντός του χρονικού διαστήματος της μίας ώρας. Συγκεκριμένα στο χρονικό βήμα των 30 min υπήρξε μια αύξηση στην παροχή αιχμής κατά 2.9% σε σχέση με την παροχή αιχμής του χρονικού βήματος της μίας ώρας, ενώ στο χρονικό βήμα των 20 min υπήρξε αύξηση κατά 4.4%.

Συμπεραίνεται ότι το χρονικό βήμα προσομοίωσης επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, καθώς οι διαφορές μεταξύ των πλημμυρογραφημάτων που προέκυψαν δεν είναι αμελητέες παρόλο που δεν είναι μεγάλες. Επιπλέον όσο μικρότερο γίνεται το χρονικό βήμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση στην παροχή αιχμής. Οι συγκεκριμένες διαφορές που παρατηρήθηκαν δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το αποτέλεσμα της προσομοίωσης όταν πρόκειται για πλημμυρικά επεισόδια, αλλά η πραγματοποίηση της προσομοίωσης σε μικρότερο χρονικό βήμα, σε περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα υψηλότερης χρονικής ανάλυσης, οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα. Καταλήγοντας, στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας στην οποία ήταν διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης χρονικού βήματος 10 λεπτών, η χρησιμοποίηση μικρότερου χρονικού βήματος από αυτό της μίας ώρας θα οδηγούσε σε ακριβέστερα αποτελέσματα, αλλά λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγεθος της περιοχής μελέτης και το γεγονός ότι προσομοιώνεται πλημμυρικό επεισόδιο, τα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά.



## **5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **5.1 Σύνοψη**

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της υδρολογικής προσομοίωσης επεισοδίων βροχής απορροής, εφαρμόζοντας διαφορετικά μοντέλα χωρικής ανάλυσης (συγκεντρωτικό, ημικατανεμημένο) και η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων X, K υδρολογικής διόδευσης στο ημικατανεμημένο μοντέλο και του χρονικού βήματος της προσομοίωσης. Ως περιοχή μελέτης, επιλέχθηκε τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού και συγκεκριμένα το τμήμα ανάντη της γέφυρας των Κομποτάδων, πλησίον του οικισμού Κομποτάδες, εμβαδού 1128 km<sup>2</sup>. Η επιλογή της έγινε με γνώμονα την γεωγραφία της περιοχής και το ιστορικό πλημμυρών.

Για την εφαρμογή της υδρολογικής προσομοίωσης των επεισοδίων χρησιμοποιήθηκε η υπολογιστική πλατφόρμα HEC-HMS. Επιλέχθηκαν τρία επεισόδια βροχής απορροής τα οποία δημιούργησαν εκτεταμένες πλημμύρες εντός της περιοχής μελέτης και κατάντη αυτής και έλαβαν χώρα την 6/2/2012, την 1/2/2015 και την 10/1/2019. Η εφαρμογή του συγκεντρωτικού και του ημικατανεμημένου μοντέλου έγινε και στα τρία επεισόδια, ενώ για την ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκε το επεισόδιο του έτους 2012.

Για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής, εφαρμόστηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder, ενώ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS για την εκτίμηση των απωλειών βροχόπτωσης. Η κατανομή της βροχόπτωσης έγινε σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen. Στο ημικατανεμημένο μοντέλο η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις υπολεκάνες, με κριτήρια τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, την κατανομή της βροχόπτωσης, το μέσο υψόμετρο, τις χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Η διόδευση των πλημμυρογραφημάτων των ανάντη υπολεκάνων στην έξοδο της περιοχής μελέτης έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου Muskingum.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση των επεισοδίων με την εφαρμογή των διαφορετικών μοντέλων χωρικής ανάλυσης και την ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### **5.2 Συμπεράσματα**

Βάσει των αποτελεσμάτων προέκυψαν σημαντικές διαφορές στα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των επεισοδίων βροχής απορροής με το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο μοντέλο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα

της ανάλυσης ευαισθησίας, σύμφωνα με τα οποία η μεταβολή της παραμέτρου  $K$  έχει μεγάλη επίδραση στο τελικό πλημμυρογράφημα, σε αντίθεση με την παράμετρο  $X$  και το χρονικό βήμα προσομοίωσης. Τα κύρια συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο μοντέλο, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην χωρική ανομοιομορφία της βροχόπτωσης η οποία λαμβάνεται υπ' όψιν στο ημικατανεμημένο μοντέλο και στην υδρολογική διόδευση που πραγματοποιείται σε αυτό.
- Τα αποτελέσματα από την υδρολογική προσομοίωση με την εφαρμογή του ημικατανεμημένου μοντέλου θεωρούνται ακριβέστερα από αυτά του συγκεντρωτικού, επειδή λαμβάνεται υπ' όψιν η χωρική ανομοιομορφία της βροχόπτωσης και των απωλειών αυτής.
- Η παράμετρος  $X$  της μεθόδου Muskingum επηρεάζει μόνο την παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος, ενώ ο χρόνος που αυτή λαμβάνει χώρα παραμένει σταθερός, για οποιαδήποτε μεταβολή της παραμέτρου.
- Η παράμετρος  $X$  έχει μικρή επίδραση στο τελικό πλημμυρογράφημα, ακόμα και για μεγάλες μεταβολές της τιμής της, όπως η μεταβολή που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.
- Οι μεταβολές στην παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος είναι ανάλογες σε σχέση με τις αντίστοιχες μεταβολές της παραμέτρου  $X$ , ενώ 25% αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου  $X$ , μεταβάλλει την παροχή αιχμής κατά 0.8% περίπου.
- Η παράμετρος  $K$  επηρεάζει σημαντικά την παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος, αλλά και τον χρόνο που αυτή λαμβάνει χώρα.
- Σε μικρού μήκους ποταμούς η επιρροή της παραμέτρου  $K$  στην παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος είναι σχεδόν αμελητέα και στον χρόνο που αυτή λαμβάνει χώρα όχι ιδιαίτερα σημαντική. Αντιθέτως σε μεγάλου μήκους ποταμούς η επιρροή στα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- Σε μεγάλου μήκους ποταμούς η επίδραση της παραμέτρου  $K$ , στην παροχή αιχμής του τελικού πλημμυρογραφήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή της παραμέτρου  $X$ , παρά το γεγονός ότι η παράμετρος  $X$  αντανάκλα την εξασθένηση των πλημμυρικών κυμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο Muskingum.

- Στην ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου  $K$ , η μεγαλύτερη μεταβολή της παροχής αιχμής και του χρόνου που αυτή λαμβάνει χώρα παρατηρήθηκε στο πλημμυρογράφημα στην έξοδο της περιοχής μελέτης. Η μεταβολή αυτή δεν οφείλεται μόνο στην επίδραση της παραμέτρου  $K$  στην παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος, αλλά οφείλεται κυρίως στην επίδραση της παραμέτρου  $K$  στον χρόνο που τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών 2 και 3, συναντούν το πλημμυρογράφημα της υπολεκάνης 1.
- Καθώς το βήμα του χρόνου προσομοίωσης μειώνεται, η παροχή αιχμής αυξάνεται, ενώ ο χρόνος αυτής μεταβάλλεται ανεπαίσθητα.
- Τα δεδομένα βροχόπτωσης υψηλότερης χρονικής ανάλυσης οδηγούν σε πιο ακριβή αποτελέσματα.

### 5.3 Μελλοντική Έρευνα

Με βάση την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στην διερεύνηση των εξής προτάσεων:

- Εφαρμογή του κατανεμημένου (distributed) μοντέλου στην περιοχή μελέτης για ένα από τα επεισόδια της παρούσας εργασίας και σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν με αυτά του ημικατανεμημένου και του συγκεντρωτικού μοντέλου. Καθώς η ανομοιομορφία των δεδομένων και των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης θα λαμβάνεται ακόμα περισσότερο υπ' όψιν, αναμένονται πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Προσομοίωση επεισοδίων βροχής απορροής, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απορροών στην έξοδο της περιοχής μελέτης εφαρμόζοντας τα τρία μοντέλα χωρικής ανάλυσης, προκειμένου να είναι δυνατή η βαθμονόμηση τους. Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας που προκύπτει από την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων, σε σχέση με τη βαθμονόμηση αυτών θα οδηγούσε σε σημαντικά συμπεράσματα για την παρούσα εργασία.
- Χρήση διαφορετικής μέθοδου διόδευσης, όπως η υδρολογική μέθοδος διόδευσης Muskingum-Cunge και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους, ενώ θα μπορούσε να διερευνηθεί η ευαισθησία των παραμέτρων της μεθόδου Muskingum-Cunge.
- Εφαρμογή και σύγκριση διαφορετικών μοντέλων βροχής – απορροής είτε μέσα από την πλατφόρμα HEC-HMS είτε χρησιμοποιώντας άλλα μοντέλα όπως

TOPMODEL, SAC-SMA, AWBM, κ.α. και αξιολόγηση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων σε λεκάνες απορροής εντός του Ελληνικού χώρου.

- Πραγματοποίηση υδραυλικών προσομοιώσεων, κατάντη της γέφυρας των Κομποτάδων, χρησιμοποιώντας τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από το συγκεντρωτικό και το ημικατανεμημένο μοντέλο, αλλά και αυτά που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $X$ ,  $K$  και εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή των παραμέτρων και των μοντέλων στην έκταση του πλημμυρικού πεδίου.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη Βιβλιογραφία

Arlen D. Feldman, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, March 2000.

Baltas, E.A., Dervos, N.A. and Mimikou, M.A., Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece, European Geosciences Union, 2007.

Bournas A., Feloni E. Baltas E., Hydrological and hydraulic modelling for a severe flood event in Sperchios River Basin, 16th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST), Rhodes, Greece, 2019.

Büttner, G., CORINE land cover and land cover change products. In Land Use and Land Cover Mapping in Europe, Springer, Dordrecht, pp. 55-74, 2014.

Copernicus Programme, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corineland-cover-general-description> and <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>, 2018

Hydrologic Engineering Center (US), HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual - version 10.1. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2013.

Lagouvardos K., Kotroni V., Bezes A., Koletsis I., Kopania T., Lykoudis S., Mazarakis N., Papagiannaki K., Vougioukas S., The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database, Athens, 2017.

Matthew J. Fleming, James H. Doan, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 10.1, February 2013.

McCarthy, G.T., The unit hydrograph and flood routing, Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering, 1938.

Merwade, V., Creating SCS Curve Number Grid using HEC-GeoHMS, School of Civil Engineering, Purdue University, 2012.

Jenson S.K., Domingue J.O., Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, 1988.

Pannel, D.J., Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies, *Agricultural Economics* 16: 139-152, 1997.

SCS (Soil Conservation Service), National Engineering Handbook, Section 4, U.S., Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.

Snyder, F.F., 1938. Synthetic unit - graphs. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 19(1), pp.447-454.

Scharffenberg, W.A., Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 3.5, August 2016.

Soil Conservation Service (SCS), National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Department of Agriculture, Washington, 1972.

Wanielista, M.P., Stormwater Management, Quantity and Quality, Ann Arbor Science, Ann Arbor, 1978.

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής πληροφορίας, <http://www.hydroscope.gr>, 2019

E.K.X.A. A.E., <http://www.ktimatologio.gr/Pages/News.aspx?id=297>, 2019

Ευθυμίου, Γ., Μερτζάνης Α., Σαπουντζής Μ., Ζακυνθινός Γ., Ανθρωπογενείς επιδράσεις στο δέλτα του ποταμού Σπερχειού – μέτρα προστασίας, ανάδειξης και διαχείρισης των φυσικών οικοσυστημάτων, HELECO, TEE, Αθήνα, 2005.

Καββαδά, Ο., Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Αθήνα, 2012.

Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλάς, Ε.Α., Τεχνική Υδρολογία, 5<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2012.

Μπαλάς, Ε.Α., Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά έργα, Τομέας – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018.

Μπαριάμης, Γ.Ε., Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας, Αθήνα, 2013.

Σκιάς Σ., Διαφάνειες μαθήματος Ολοκληρωμένη Διαχείριση Πλημμυρών, Ξάνθη, 2016.

Τσακίρης Γ., Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών, Αθήνα, 2013.

Τσούλος Λ., Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ., Χαρτογραφική Σύνθεση & Απόδοση σε Ψηφιακό Περιβάλλον, Αθήνα, 2015.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων (Υ.Π.Ε.Κ.Α), <http://floods.ypeka.gr>.

Ψωμιάδης, Π.Ε., Έρευνα γεωμορφολογικών και περιβαλλοντικών μεταβολών στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού με χρήση Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2010.