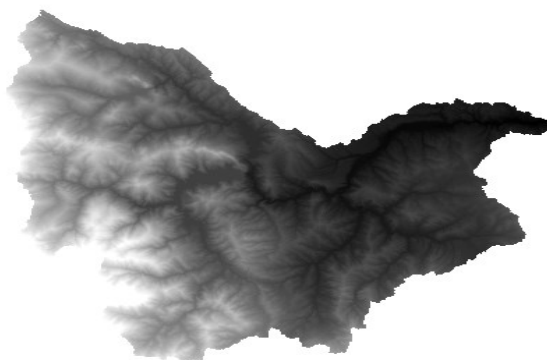




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ
ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΟΥ
ΒΕΝΕΤΙΚΟΥ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στη Σχολή των Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Βασίλειου Τσιχριντζή. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Τσιχριντζή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κούρτη Ιωάννη, για την υποδειγματική και καθοριστική συνεργασία, όσο και για την προθυμία και υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς επίσης και τον κ. Ναλμπάντη και τον κ. Βαγγέλη. Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συνεχή υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός υδρολογικού μοντέλου με στόχο τη μελέτη της λεκάνης απορροής του ποταμού Βενέτικου κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκαν δύο σενάρια, το πρώτο σενάριο σχετίζεται με την αύξηση (10%, 20%, 30%) και μείωση (10%, 20%, 30%) της βροχόπτωσης και το δεύτερο σενάριο αφορά την αύξηση του αστικού ιστού εντός της λεκάνης απορροής. Η υπό μελέτη περιοχή είναι η υπολεκάνη απορροής του ποταμού Αλιάκμονα (Βενέτικος) επιφάνειας 852 km² η οποία γεωγραφικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Γρεβενών. Η υδρολογική επεξεργασία και ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS μέσω της επέκτασης HECGeoHMS και η υδρολογική προσομοίωση, για όλα τα σενάρια, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής αξιοποιήθηκε η όμβρια καμπύλη που έχει προταθεί για το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας (EL09) από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης με αποτέλεσμα να υπολογιστούν τα πλημμυρικά υδρογραφήματα σχεδιασμού, για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς ($T = 5, 10, 25, 50, 100$ έτη) και επιλεγμένες διάρκειες βροχόπτωσης ($t = 6, 12, 24$ ώρες). Η χρονική κατανομή του ύψους βροχόπτωσης πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method). Η μέθοδος που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του ύψους περισσέυματος της βροχής ήταν η μέθοδος Soil Conservation Service των ΗΠΑ (SCS-CN) και για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του αδιάστατου Μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS. Μέσω του λογισμικού HEC-HMS και των μεθόδων που προαναφέρθηκαν υπολογίστηκαν τα υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς διάρκειες βροχόπτωσης σύμφωνα με την προαναφερθείσα όμβρια καμπύλη. Στην συνέχεια για το πρώτο σενάριο πραγματοποιήθηκε αύξηση κατά 10%, 20%, 30% καθώς και αντίστοιχη μείωση κατά 10%, 20%, 30% της βροχόπτωσης για διάρκεια βροχόπτωσης $t=24$ ώρες και περιόδους επαναφοράς $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη και υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα πλημμυρικά υδρογραφήματα. Τέλος, για το δεύτερο σενάριο αυξήθηκε η έκταση του αστικού ιστού, έγινε επαναυπολογισμός του αριθμού CN και υπολογίστηκαν εκ νέου τα πλημμυρικά υδρογραφήματα. Συμπερασματικά για την υπάρχουσα κατάσταση, η αιχμή κυμαίνεται από 60.5 m³/s έως 541.55 m³/s για περιόδους επαναφοράς από 5 έτη έως 100 έτη, αντίστοιχα. Ο πλημμυρικός όγκος κυμαίνεται από 2.92 mm έως 34.18 mm ενώ μετά το πρώτο σενάριο δηλαδή την αύξηση (10%, 20%, 30%) και μείωση (10%, 20%, 30%) της βροχόπτωσης, η αιχμή κυμαίνεται από 59.89 m³ /s έως 897.2 m³ /s και ο πλημμυρικός όγκος κυμαίνεται από 3.68 mm έως 56.62 mm. Αντίστοιχα, με βάση τα αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου, δηλαδή την αύξηση του αστικού ιστού, η παροχή αιχμής

κυμαίνεται από $66.3\text{m}^3/\text{s}$ έως $558.3\text{ m}^3/\text{s}$ και ο πλημμυρικός όγκος κυμαίνεται από 3.2 mm έως 35.10 mm . Εν κατακλείδι, οι αυξομειώσεις στην ένταση της βροχής επηρεάζουν σημαντικά την υδρολογική συμπεριφορά φυσικών λεκανών, ιδίως στις μεσογειακές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε απότομες αλλαγές του ύψους βροχόπτωσης λόγω του κλίματός τους. Τέτοια περιοχή αποτελεί και η περιοχή μελέτης, η λεκάνη απορροής του Βενέτικου. Επιπροσθέτως η αύξηση του αστικού ιστού και η κάλυψη όλο και μεγαλύτερων εκτάσεων γης από υλικά που μειώνουν την διαπερατότητα του εδάφους έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής απορροής.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the development of a hydrological model with the aim of studying the Venetikos river basin under changing conditions. For this reason, two scenarios were created. The first scenario involves changes in precipitation depth (10%, 20%, 30%, both increase and decrease), while the second scenario is associated with increase of the urban land cover within the basin. The study area is a sub-basin of the Aliakmon River (Venetikos) with an area of approximately 852 km², geographically belonging to the Regional Unit of Grevena. Hydrological processing and analysis were carried out using the ArcGIS software and more specifically by utilizing the HECGeoHMS extension. Hydrological simulation for all scenarios took place using the HEC-HMS software. For all the simulations, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve proposed for the Western Macedonia River Basin District (EL09) by the Special Secretariat for Water in the previous (1st cycle) Flood Risk Management Plans was utilized. Hydrologic analysis took place for return periods $T = 5, 10, 25, 50,$ and 100 years and rainfall durations of 6, 12, and 24 hours. The temporal distribution of rainfall depth was performed using the Alternating Block Method. Finally, the Soil Conservation Service Curve Number method (SCS-CN) was utilized for calculating rainfall excess while the dimensionless SCS Unit Hydrograph method was used for calculating surface runoff. Through the HEC-HMS software and the aforementioned methods, hydrographs at the outlet of the basin were calculated for different return periods and rainfall durations according to the aforementioned IDF curve. As already mentioned, under the first scenario, an increase of 10%, 20%, 30%, and a corresponding decrease of 10%, 20%, 30% in precipitation depth for a duration of 24 hours and different return periods (i.e., $T = 5, 10, 25, 50, 100$ years) were simulated, and the respective flood hydrographs were calculated. Similarly, for the second scenario involving the increase in urban land, the urban area was expanded, the CN number was recalculated, and flood hydrographs at the basin outlet were recalculated and compared to the existing condition. For the existing condition, the peak flow ranges from 60.5 m³/s to 541.55 m³/s for return periods from 5 years to 100 years, respectively, the flood volume ranges from 2.92 mm to 34.18 mm. After the first scenario (precipitation variations), the peak flow ranges from 59.89 m³/s to 897.2 m³/s, and the flood volume ranges from 3.68 mm to 56.62 mm. Similarly, based on the results of the second scenario (urban land increase), the peak flow ranges from 66.3 m³/s to 558.3 m³/s, and the flood volume ranges from 3.2 mm to 35.10 mm. In conclusion, changes in rainfall intensity can significantly affect the hydrological cycle and as a result the behavior of natural basins, especially in Mediterranean regions susceptible to abrupt changes in rainfall due to their climate. The study area, the Venetikos drainage basin, is such a region. Additionally, the urban area expansion and the

covering of larger land areas with hard materials that reduce soil permeability result in increased surface runoff.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	19
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	19
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	21
2.1 Γενικά.....	21
2.1.1 Υδρολογία.....	22
2.2 Ορισμοί.....	24
2.4 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη.....	25
2.5 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα.....	25
2.3 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου.....	26
2.4 Θεσμικό Πλαίσιο.....	28
2.5 Υδρολογικά μοντέλα.....	29
2.6 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	30
2.7 Λογισμικό HEC-HMS.....	30
2.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	32
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ.....	37
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	37
3.2 Γεωγραφική θέση-Τοπογραφικά χαρακτηριστικά.....	38
3.2.1 Γεωλογικά και Εδαφολογικά Δεδομένα.....	42
3.2.2 Χρήσεις Γης.....	43
3.2.3 Κλιματολογικές συνθήκες.....	44
3.2.4 Χλωρίδα -Πανίδα.....	45
3.3 Γεωμορφολογική και Υδρολογική ανάλυση της λεκάνης.....	46
3.3.1. Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	47
3.3.2 Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing) ..	47
3.3.3 Επιλογή και επεξεργασία λεκάνης απορροής.....	55
3.3.4 Δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS.....	58
3.3.5 Απώλειες Βροχής.....	59
3.3.6 Πρότυπο βασικής ροής και πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος.....	70
3.4 Μοντέλο λεκάνης απορροής στο πρόγραμμα HEC-HMS.....	71

3.4.1 Διεργασίες και προετοιμασία προσομοίωσης στο HEC-HMS	72
3.5 Σενάρια	73
3.5.1 Σενάριο αύξησης/μείωσης της βροχόπτωσης	74
3.5.2 Σενάριο αύξησης της αστικοποίησης	74
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	77
4.1. Υετογράμματα με βάση τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ	77
4.2. Πλημμυρογραφήματα των αποτελεσμάτων του HEC-HMS	86
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
5.1 Γενικά	115
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της παρούσας εργασίας	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	121

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Παγκόσμια κατανομή νερού (https://deyael.gr/)	21
Εικόνα 2.2: Υδρολογικός κύκλος (Πηγή: www.usgs.gov)	23
Εικόνα 2.3: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 – 1990 ανά υδατικό διαμέρισμα (Πηγή: ΕΤΥΜΠ)	26
Εικόνα 2.4: Σχεδιάγραμμα διεργασιών βιβλιογραφικής ανασκόπησης	33
Εικόνα 3.1: Ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας για την λεκάνη απορροής του Βενέτικου Πηγή: (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2012)	38
Εικόνα 3.2 : Γεφύρι του Καγκέλια (Πηγή: www.visitgrevena.gr)	39
Εικόνα 3.3: Γεφύρι της Πορτίτσας (Πηγή: www.petrinagefiria.com)	39
Εικόνα 3.4: Γεφύρι του Αζίζ Αγά (Πηγή: www.petrinagefiria.com)	40
Εικόνα 3.5: Γεφύρι του Σταυροπόταμου (Πηγή: www.visitgrevena.gr)	40
Εικόνα 3.6: Γεφύρι του Σπανού (Πηγή: www.culture.gov.gr)	41
Εικόνα 3.7: Γεφύρι της Αλατόπετρας (Πηγή: www.petrinagefiria.com)	41
Εικόνα 3.8: Γεωλογικός Χάρτης περιοχής μελέτης	43
Εικόνα 3.9: Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής της λεκάνης απορροής του Βενέτικου (Corine Land Cover 2018)	44
Εικόνα 3.10: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης	48
Εικόνα 3.11: Διάγραμμα ροής προ επεξεργασίας ΨΜΕ	48
Εικόνα 3.12: ΨΜΕ μετά την διόρθωση των ψευδών βυθισμάτων	49
Εικόνα 3.13: Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013)	50
Εικόνα 3.14: Κάναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013)	50
Εικόνα 3.15: Κάναβος διευθύνσεων απορροής περιοχής μελέτης	51

Εικόνα 3.16: Κάναβος πλήθους φατνίων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013).....	51
Εικόνα 3.17: Κάναβος συγκεντρωτικής ροής	52
Εικόνα 3.18: Δημιουργία υπολεκανών για την περιοχή μελέτης	53
Εικόνα 3.19: Μετατροπή υπολεκανών σε διανυσματική μορφή	54
Εικόνα 3.20: Μετατροπή υδρογραφικού δικτύου σε διανυσματική μορφή.....	54
Εικόνα 3.21:Ορισμός λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ARCGIS με χρήση της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS	55
Εικόνα 3.22: Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης	56
Εικόνα 3.23: Χάρτης υψομέτρων της περιοχής μελέτης.....	57
Εικόνα 3.24: Υπολεκάνες απορροής της υπό μελέτης περιοχή.....	58
Εικόνα 3.25: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN	64
Εικόνα 3.26:Υπολογισμός συντελεστή παραμέτρου σχήματος κ σε περιβάλλον ArcMap	67
Εικόνα 3.27: Μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS	72
Εικόνα 3.28: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN μετά την αύξηση του αστικού ιστού	75

Εικόνα 4.1: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	77
Εικόνα 4.2: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	78
Εικόνα 4.3: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	78
Εικόνα 4.4: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	79
Εικόνα 4.5: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	79
Εικόνα 4.6: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	80
Εικόνα 4.7: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	81
Εικόνα 4.8: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	81
Εικόνα 4.9: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	82

Εικόνα 4.10: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	82
Εικόνα 4.11: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	83
Εικόνα 4.12: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	84
Εικόνα 4.13: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	84
Εικόνα 4.14: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου	85
Εικόνα 4.15: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	85
Εικόνα 4.16: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες.....	87
Εικόνα 4.17: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες.....	88
Εικόνα 4.18: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες.....	88
Εικόνα 4.19: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες.....	89
Εικόνα 4.20: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες.....	90
Εικόνα 4.21: Συγκεντρικό πλημμυρικό υδρογράφημα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες	91
Εικόνα 4.22: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%	92
Εικόνα 4.23: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%.....	93
Εικόνα 4.24: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας	

βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%	94
Εικόνα 4.25: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%	95
Εικόνα 4.26: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%	95
Εικόνα 4.27: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες μετά την αύξηση στην βροχόπτωση κατά 30%	96
Εικόνα 4.28: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%	97
Εικόνα 4.29: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%	98
Εικόνα 4.30: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%	99
Εικόνα 4.31: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%	99
Εικόνα 4.32: Συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%	100
Εικόνα 4.33: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες μετά την μείωση στην βροχόπτωση κατά 30%	101
Εικόνα 4.34: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες πριν (a) και (b) μετά την αύξηση στην βροχόπτωση κατά 30%	102
Εικόνα 4.35: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες πριν (a) και μετά (b) την μείωση στην βροχόπτωση κατά 30%	103
Εικόνα 4.36: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού	105
Εικόνα 4.37: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού	106

Εικόνα 4.38: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	107
Εικόνα 4.39: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	107
Εικόνα 4.40: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	108
Εικόνα 4.41: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 5, 10, 25, 50, 100$ ετών και $t=24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	109
Εικόνα 4.42: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T= 5, 10, 25, 50, 100$ ετών και $t=24$ ώρες πριν (a) και μετά (b) την αύξηση τους αστικού ιστού.	110
Εικόνα 4.43: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 5$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	111
Εικόνα 4.44: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 10$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	112
Εικόνα 4.45: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 25$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	112
Εικόνα 4.46: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 50$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	113
Εικόνα 4.47: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για $T= 100$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	113
Εικόνα Π1: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	121
Εικόνα Π2: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	121
Εικόνα Π3: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	122
Εικόνα Π4: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	122
Εικόνα Π5: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	123
Εικόνα Π6: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	123
Εικόνα Π7: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.	124

Εικόνα Π65: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	153
Εικόνα Π66: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	153
Εικόνα Π67: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	154
Εικόνα Π68: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	154
Εικόνα Π69: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	155
Εικόνα Π70: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού	155

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής νερού (Gleick, 1996)	21
Πίνακας 2: Η πληθυσμιακή εξέλιξη του νομού Γρεβενών (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ1 2011)	37
Πίνακας 3: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης	59
Πίνακας 4: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους (Τσακίρης 1995)	61
Πίνακας 5: Κατάταξη εδαφών από υδρολογική άποψη (Τσακίρης 1995)	62
Πίνακας 6: Αριθμοί καμπύλης απορροής CN (ΥΠΕΚΑ)	62
Πίνακας 7: Ο σταθμισμένος μέσος όρος της καμπύλης απορροής CN (Curve Number) για την κάθε υπολεκάνη απορροής	64
Πίνακας 8: Χρόνοι συγκέντρωσης και υστέρησης και χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής	66
Πίνακας 9: Υπολογισμένοι συντελεστές τις όμβριας καμπύλης	68
Πίνακας 10: Σημειακή βροχόπτωση ανά περίοδο επαναφοράς και χρονική διάρκεια βροχόπτωσης	68
Πίνακας 11: Οι τιμές της σημειακής βροχόπτωσης μετά την σταδιακή αύξηση και μείωση αυτής για $t=24$ και $T=5,10,25,50,100$	74
Πίνακας 12: Αρχικές Τιμές CN και νέες CN μετά την αύξηση της αστικοποίησης	75
Πίνακας 13: Μέγιστο και συνολικό ύψος βροχόπτωσης για $t = 6, 12$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη με αύξηση βροχόπτωσης 10% και 20% και με μείωση της βροχόπτωσής 10% και 20%.	86

Πίνακας 14: Μέγιστο και συνολικό ύψος βροχόπτωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη με αύξηση βροχόπτωσης 10% και 20% και με μείωση της βροχόπτωσής 10% και 20% .	86
Πίνακας 15: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 6$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη.	91
Πίνακας 16: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 12$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη.	91
Πίνακας 17: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10% .	104
Πίνακας 18: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20% .	104
Πίνακας 19: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% .	104
Πίνακας 20: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20% .	105
Πίνακας 21: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 6$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	110
Πίνακας 22: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t = 12$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την αύξηση του αστικού ιστού.	110

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν υπαρκτό κίνδυνο και μια διαρκή απειλή για πολλές περιοχές (Πουλτσάκης, 2021). Ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρείται μια αυξητική τάση στις πλημμύρες (Βαρσάμη, 2014), με τις επιπτώσεις τους να είναι όλο και πιο σοβαρές (Οδηγία 2007/60/ΕΚ). Για την αντιμετώπιση αυτού του αυξανόμενου προβλήματος, εφαρμόζεται η Οδηγία 2007/60/ΕΚ, που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Ο στόχος της Οδηγίας είναι η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες (Οδηγία 2007/60/ΕΚ).

Ένα επεισόδιο βροχής, ικανό να επιφέρει πλημμυρικά φαινόμενα, μπορεί να μετριαστεί από μια δασωμένη λεκάνη απορροής, καθώς αυτή έχει την δυνατότητα να συγκρατεί σημαντικό ύψος βροχής (Βαρσάμη, 2014). Συνεπώς, η εκδήλωση πλημμύρας είναι πιθανότερη να συμβεί σε μία λεκάνη η οποία έχει πρόσφατα αποψιλωθεί και αναπτυχθεί αστικός ιστός, επιδρώντας καθοριστικά στην υδρολογική της συμπεριφορά. Επιπρόσθετα λόγω της συνεχούς μεταβολής του κλίματος είναι σύνηθες φαινόμενο η εκδήλωση καταιγίδων, με πολύ υψηλά ποσοστά βροχόπτωσης, και κατά συνέπεια και πλημμυρικών φαινομένων (Βαρσάμη, 2014).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η δημιουργία ενός ημικαταναμημένου, εννοιολογικού μοντέλου με σκοπό την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Βενέτικου. Η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System) όπως και η ανάλυση της μεταβολής του υδρολογικού καθεστώτος μετά από σταδιακές αυξήσεις και μειώσεις της βροχόπτωσης καθώς και μετά από την αύξηση του αστικού ιστού.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση του θέματος και παρουσιάζεται η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρέχεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, περιλαμβάνοντας τον ορισμό των πλημμύρων, το πλημμυρικό καθεστώς που επικρατεί στην Ελλάδα και την Ευρώπη, καθώς και τα βασικά στοιχεία της

κοινοτικής οδηγίας και του θεσμικού πλαισίου για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου (Οδηγία 2007/60/ΕΚ). Επίσης, περιγράφονται τα προγράμματα/λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική προσομοίωση καθώς επίσης και μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή της περιοχής μελέτης, συμπεριλαμβανομένων χαρτών για τις χρήσεις γης και τους τύπους εδαφών. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται υδρολογική ανάλυση και προσομοίωση της λεκάνης απορροής καθώς και η διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν σε περιβάλλον ARC-GIS και HEC-HMS. Τέλος, παρουσιάζονται τα δύο σενάρια που αναπτύχθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής και γίνεται σύγκριση αυτών με τα δύο σενάρια μέσω των πλημμυρογραφημάτων και υετογραμμάτων.

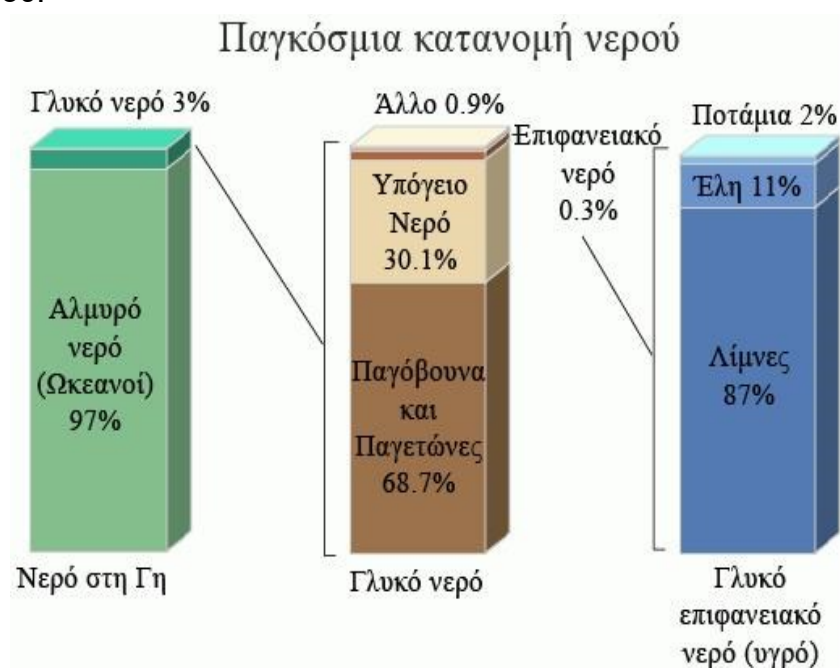
Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η εξαγωγή συμπερασμάτων και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο παράρτημα της εργασίας παρατίθενται υετογράμματα και πλημμυρογραφήματα για διαφορετικές διάρκειες βροχόπτωσης και περιόδους επαναφοράς πριν και μετά την εφαρμογή των σεναρίων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Γενικά

Το νερό αποτελεί το σημαντικότερο ίσως αγαθό για την επιβίωση του ανθρώπου. Σε παγκόσμια κλίμακα η συνολική ποσότητα του νερού ανέρχεται σε 1,386 εκατομμύρια km³ (Chow et al., 1988). Η ποσότητα που είναι άμεσα διαθέσιμη στον άνθρωπο για χρήση αποτελεί μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού του όγκου, αφού ο κύριος όγκος του νερού είναι υφάλμυρο ή αποθηκευμένο σε παγετώνες και σε υπόγειους υδροφορείς (Chow et al., 1988). Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η παγκόσμια κατανομή του νερού στις διάφορες μορφές του.



Εικόνα 2.1: Παγκόσμια κατανομή νερού (<https://deyael.gr/>)

Είναι λοιπόν αντιληπτό ότι το διαθέσιμο γλυκό νερό αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό σε σχέση με το σύνολο του παγκόσμιου νερού κάτι το οποίο δημιουργεί την ανάγκη της ορθολογικής διαχείρισης του, καθώς επίσης και της αποθήκευσής του. Στο Πίνακα 1 φαίνεται αναλυτικότερα η εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής του νερού και οι κατηγορίες του.

Πίνακας 1: Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής νερού (Gleick, 1996)

Μορφή νερού	Όγκος νερού (km ³)	Ποσοστό γλυκού νερού (%)	Ποσοστό συνολικού νερού (%)
Ωκεανοί, Θάλασσες και Κόλπο	1,338,000,000	-	96.5
Παγόβουνα, Παγετώνες και Μόνιμο Χιόνι	24,064,000	68.7	1.74
Υπόγειο νερό	23,400,000	-	1.7
Γλυκό	10,530,000	30.1	0.76
Αλμυρό	12,870,000	-	0.94
Εδαφική Υγρασία	16,500	0.05	0.001
Εδαφικός πάγος και Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300,000	0.86	0.022
Λίμνες	176,400	-	0.013
Γλυκές	91,000	0.26	0.007
Αλμυρές	85,400	-	0.006
Ατμόσφαιρα	12,900	0.04	0.001
Έλη	11,470	0.03	0.0008
Ποταμοί	2,120	0.006	0.0002
Βιολογικό νερό	1,120	0.003	0.0001
Σύνολο	1,386,000,000	-	100

2.1.1 Υδρολογία

Σύμφωνα με ένα γενικά αποδεκτό ορισμό, Υδρολογία (Hydrology) είναι η επιστήμη του γήινου νερού και περιλαμβάνει την εμφάνιση, κυκλοφορία και κατανομή του, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον (Τσακίρης 2013). Από τον παραπάνω ορισμό συμπεραίνουμε ότι η υδρολογία περιλαμβάνει όλο τον υδρολογικό κύκλο. Το νερό κυκλοφορεί συνεχώς περί και εντός του εδάφους και της ατμόσφαιρας σε διαφορετικές φυσικές καταστάσεις και αυτή η κυκλοφορία αναφέρεται ως υδρολογικός κύκλος (www.usgs.gov). Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα. Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια διατηρώντας την παγκόσμια ποσότητα του νερού, σε όλες τις φάσεις που αυτό βρίσκεται συνολικά, σταθερή. Ο κύκλος του νερού διακρίνεται στις εξής φάσεις (Εικόνα 2.2) (www.usgs.gov):

- Αποθήκευση νερού στη θάλασσα,
- Εξάτμιση,
- Διαπνοή,
- Εξάχνωση,
- Αποθήκευση νερού στην ατμόσφαιρα,
- Συμπύκνωση,
- Κατακρήμνισματα,
- Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια,
- Απορροή νερού από το λιώσιμο του χιονιού και των πάγων,
- Επιφανειακή απορροή,
- Ροή σε υδατορεύματα,
- Αποθήκευση γλυκού νερού,
- Διήθηση,
- Αποθήκευση υπόγειου νερού,
- Εκφόρτιση υπόγειου νερού (βασική απορροή),
- Πηγές.



Εικόνα 2.2:Υδρολογικός κύκλος (Πηγή: www.usgs.gov)

2.2 Ορισμοί

Υδατορεύματα ή υδατορέματα (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): (μη πλεύσιμοι ποταμοί, χείμαρροι, ρέματα και ρυάκια): οι φυσικές ή διευθετημένες διαμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους που είναι κύριοι αποδέκτες των υδάτων της επιφανειακής απορροής και διασφαλίζουν την διόδευσή τους προς άλλους αποδέκτες σε χαμηλότερες στάθμες. Στην έννοια του υδατορεύματος δεν περιλαμβάνονται τα εγγειοβελτιωτικά έργα όπως αρδευτικές και αποστραγγιστικές τάφροι καθώς και οι πλεύσιμοι ποταμοί.

Κοίτη (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): η φυσική ή διευθετημένη διαμόρφωση του εδάφους στην οποία ρέει μόνιμα ή περιοδικά νερό του υδατορεύματος. Δεν περιλαμβάνονται στην έννοια αυτή οι περιοχές μόνιμης ή περιοδικής κατάκλυσης των υγροτόπων.

Όχθη (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): η γραμμή που ενώνει τα άνω άκρα κάθε πρηνούς της κοίτης (φρύδι), όπου αυτή αποτελεί διακριτό μορφολογικό στοιχείο του περιβάλλοντος χώρου του υδατορεύματος.

Λεκάνη απορροής (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): το σύνολο της τοπογραφικής επιφάνειας που αποστραγγίζεται από αυτό το υδατόρευμα και τους παραποτάμους του. Κάθε λεκάνη απορροής περιορίζεται και χωρίζεται από τις άλλες που την περιβάλλουν από τον υδροκρίτη, που ακολουθεί τις κορυφογραμμές του εδαφικού ανάγλυφου

Ζώνη πλημμύρας (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): η εδαφική περιοχή η οποία κατακλύζεται από τα πλημμυρικά νερά για συγκεκριμένη κάθε φορά περίοδο επαναφοράς και περικλείεται από τις γραμμές πλημμύρας.

Πλημμύρα (Νόμος 4258/ΦΕΚ Α): Η προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν υφίσταται. Περιλαμβάνει πλημμύρες από:

- ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους και υδατορεύματα εφήμερης ροής
- εκφορτίσεις πηγών
- συστήματα απορροής όμβριων και παντορροϊκά δίκτυα ανύψωση της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων.

Πλημμυρική επικινδυνότητα: Η εμφάνιση πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους), που αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011).

Πλημμυρική διακινδύνευση: Οι δυνητικές αρνητικές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με την συγκεκριμένη πλημμύρα, στο συγκεκριμένο χώρο (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011).

2.4 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της κλιματικής αλλαγής, που οφείλεται κυρίως στην αύξηση θερμοκρασίας του πλανήτη Γη, προβλέπονται ακραία υδρολογικά φαινόμενα, τα οποία θα είναι συχνότερα και πιο καταστροφικά. Υδρολογικές έρευνες για την Ευρώπη, δείχνουν ότι δεν υπάρχει τάση σε ολόκληρη την ήπειρο σχετικά με περιστατικά πλημμυρών, βροχοπτώσεων ή ετήσια μέγιστα απορροής (Parrotty, et al., 2018). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι: η απότομη άνοδος της στάθμης των υδάτων τον χειμώνα 1994-1995, η οποία έπληξε την Ιταλία, τη Γερμανία, το Βέλγιο, τη Γαλλία και τις Κάτω Χώρες, η Βόρεια Ευρώπη πλήττεται από πλήθος καταιγίδων και πιο συγκεκριμένα κάθε χρόνο 100 κυκλώνες πλήττουν τα βρετανικά νησιά και τέλος το καλοκαίρι του 1997, η υπερχειλίση του ποταμού Oder έπληξε πολύ σοβαρά την Κεντρική Ευρώπη (European Environment Agency, 2018).

Οι περιοχές της Ευρώπης που είναι οι πιο ευάλωτες σε πλημμυρικά επεισόδια είναι οι Μεσογειακές ακτές, οι παραθαλάσσιες πεδιάδες της Βόρειας Γερμανίας, η κεντρική Ιρλανδία, οι κοιλάδες του Ρήνου, του Σηκουάνα και του Λίγηρα, μερικές παραθαλάσσιες περιοχές της Πορτογαλίας, οι χαμηλές περιοχές της Ολλανδίας, του Πο στην Ιταλία, οι κοιλάδες των Άλπεων (αλπικά λιβάδια) και οι κοιλάδες του Δούναβη στη Ρουμανία, και του Δούναβη και της Τίσζα στην Ουγγαρία (Γιαννόπουλος κ.α., 2008).

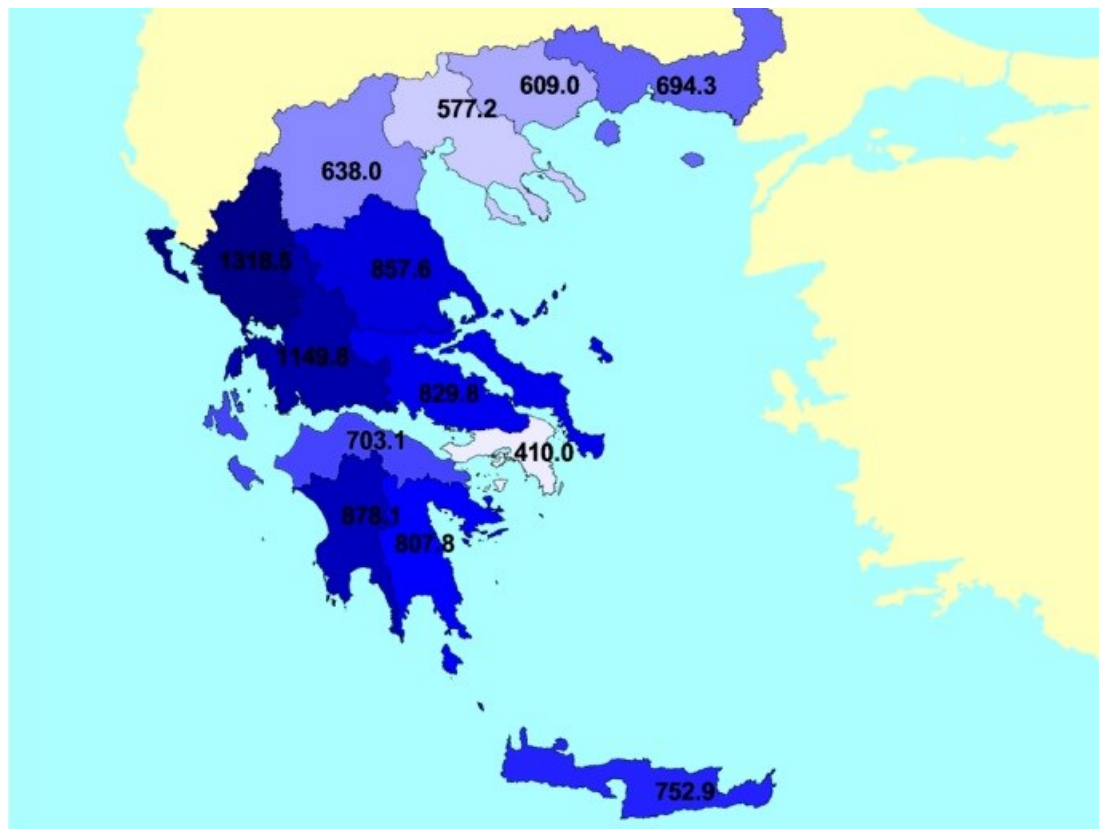
Οι κύριοι λόγοι για τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στην Ευρώπη είναι οι εξής: (Witt and Siegel, 2000).

- Ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή η ανάπτυξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις πλημμυρικές ζώνες κινδύνου. Επίσης, η ακατάλληλη διαχείριση των ποταμών και των κατασκευών σε περιοχές που κινδυνεύουν από πλημμύρες. Τέλος, η εντεινόμενη απερέμωση της ηπείρου, που είναι παραδομένη στο δραστικό περιορισμό των φυσικών οικοσυστημάτων και τη μαζική κοπή δένδρων, στις πυρκαγιές και σε δραστηριότητες που βλάπτουν το φυσικό περιβάλλον.
- Η μεταβολή του κλίματος, με πιθανή την αύξηση της έντασης και της συχνότητας εμφάνισης-ακραίων καιρικών φαινομένων και τη δυνητική άνοδο της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.

2.5 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη γεωγραφική μεταβλητότητα των κλιματικών στοιχείων της λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να πλήττεται από έντονα πλημμυρικά γεγονότα (Λέκκας 2009). Η οροσειρά της Πίνδου που διασχίζει τη χώρα από βορειοδυτικά προς νότια, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες βροχόπτωσης και απορροής στην Ελλάδα. Η μέση ετήσια

βροχόπτωση ξεπερνάει τα 1,800 mm στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας, ενώ στα ανατολικά διαμερίσματα της χώρας η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμη και στα 400 mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 (ΕΤΥΜΠ).



Εικόνα 2.3: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 – 1990 ανά υδατικό διαμέρισμα (Πηγή: ΕΤΥΜΠ)

Το μέγιστο 24ωρο ύψος βροχής για βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς 50 χρόνων μπορεί να φτάσει τα 175 mm στη δυτική Ελλάδα, μειώνεται στα 100 mm ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου και αυξάνεται ξανά στα 175 mm για τα νησιά του ανατολικού Αιγαίου (ΕΤΥΜΠ). Η τελευταία διαπίστωση εξηγεί τις πιο συχνές περιόδους ξηρασίας στο ανατολικό μέρος της χώρας καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου, όπου τα προβλήματα ελλείψεως νερού είναι σχεδόν μόνιμα. Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι εξαιρετικά γεγονότα πλημμυρών είναι ιδιαίτερα σπάνια στο σχετικά ξηρό ανατολικό μέρος της Ελλάδας. Αντίθετα, λόγω του κλιματικού καθεστώτος, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και την επιφανειακή βλάστηση, παρατηρούνται περισσότερες καταστροφικές πλημμύρες στην ανατολική Ελλάδα από ότι στην "υγρή" δυτική Ελλάδα.

2.3 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας 2007/60 είναι να βοηθήσει τα Κράτη Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) στην πρόληψη, τον περιορισμό και την

αντιμετώπιση των πλημμυρών. Με την οδηγία αυτή δημιουργήθηκε το ευρωπαϊκό πλαίσιο για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, το οποίο επεκτείνει και συντονίζεται στενά με την Οδηγία Πλαίσιο (2000/60/EK) για τους υδατικούς πόρους.

Με αυτό τον τρόπο επιβάλλεται η ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης λεκανών απορροής κάθε ποταμού, με στόχο την δημιουργία μίας καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης (Οδηγία 2000/60/EK) καθώς επίσης και την μείωση των επιπτώσεων από γεγονότα πλημμύρας (Οδηγία 2007/60/EK). Για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας της Οδηγίας 2007/60 είναι απαραίτητη η δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και κινδύνων πλημμύρας στους οποίους θα εμφανίζονται οι μελλοντικές αρνητικές συνέπειες πλημμύρας καθώς και ενημέρωση σχετικά με εν γένει μελλοντικές πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης ως αποτέλεσμα μίας πλημμύρας. Οι χάρτες αυτοί αποτελούν το μέσο ενημέρωσης και μια χρήσιμη βάση για τον καθορισμό και τη λήψη οικονομικών, τεχνικών αλλά και πολιτικών αποφάσεων αναφορικά με τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη μέλη της Ε.Ε. θα πρέπει να αναπρογραμματίσουν τις ενέργειες που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των κινδύνων μίας πλημμύρας.

Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας θα πρέπει να επικεντρώνονται στην πρόληψη, στην προστασία και στην ετοιμότητα. Τα σχέδια αυτά θα πρέπει να αποσκοπούν στη διατήρηση και αποκατάσταση πλημμυρικών περιοχών καθώς και στην λήψη μέτρων πρόληψης και μείωσης των ζημιών που προκαλούνται στην υγεία των ανθρώπων, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στην οικονομική δραστηριότητα.

Η αξιολόγηση κινδύνου πλημμύρας η οποία βασίζεται σε διαθέσιμες πληροφορίες, όπως καταγραφές και μελέτες για μακροπρόθεσμες εξελίξεις, ιδίως επιπτώσεις από την αλλαγή του κλίματος στην περίπτωση πλημμυρών, διεξάγεται για να αξιολογηθούν οι δυνητικοί κίνδυνοι. Η αξιολόγηση εμπεριέχει τα ακόλουθα:

- Χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του εκάστοτε ποταμού στην ανάλογη κλίμακα, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα όρια των λεκανών και των υπολεκανών απορροής ποταμών, οι οποίοι παρουσιάζουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης.
- Ιστορική περιγραφή των πλημμυρών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν έντονες αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, σε οικονομικό και βιοτικό επίπεδο, καθώς και στο περιβάλλον. Εφόσον αξιολογηθεί η πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων, καταγράφεται η έκταση της πλημμύρας, των οδών αποστράγγισης και εκτιμώνται οι αρνητικές επιπτώσεις που προκάλεσαν.
- Εκτίμηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των μελλοντικών πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική

κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα. Για αυτό τον λόγο λαμβάνονται υπόψιν η τοπογραφία, η θέση των υδατορρευμάτων και τα γενικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, η αποτελεσματικότητα των υφισταμένων τεχνητών υποδομών προστασίας από τις πλημμύρες, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες εξελίξεις, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων της αλλαγής του κλίματος.

Τέλος, για την μείωση της πιθανότητας πλημμύρας και των συνεπειών αυτής είναι απαραίτητο να προτείνονται μέτρα που θα εστιάζουν στις χρήσεις γης, αποτρέποντας όπως για παράδειγμα την οικοδόμηση σε περιοχές επιρρεπείς σε πλημμύρες.

Μία άλλη σημαντική πτυχή των σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας είναι η ανάγκη προετοιμασίας του πληθυσμού για το ενδεχόμενο της πλημμύρας. Τέλος, οι εκτιμήσεις επικινδυνότητας για πλημμυρικά φαινόμενα θα επανεξετάζονται και θα αναπροσαρμόζονται και πρέπει να συμπεριλαμβάνουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

2.4 Θεσμικό Πλαίσιο

Στην Ελλάδα θεσπίστηκε ο Νόμος 3199/03 για τη σύγχρονη διαχείριση των υδάτων, που ουσιαστικά αποτέλεσε την προσπάθεια διατύπωσης και εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο (2000/60) σύμφωνα με το Ελληνικό δίκαιο. Οι άξονες που ακολούθησε σε μεγάλο βαθμό είναι σύμφωνα με αυτούς της Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου. Τα 5 κύρια κεφάλαια που αποτελούν τον νόμο κατά σειρά είναι:

- Βασικές έννοιες προστασίας και διαχείρισης των υδάτων
- Πεδίο εφαρμογής
- Φορείς και αρμόδια όργανα
- Προστασία και διαχείριση των υδάτων
- Βέλτιστη χρήση των Υδάτων
- Εφαρμογή και κυρώσεις

Ο Νόμος 3199/03 αποτελεί το σημαντικότερο θεσμικό εργαλείο για την ολοκληρωμένη και βιώσιμη προστασία και διαχείριση των υδατικών πόρων. Η κοινή υπουργική απόφαση που υπεγράφη τον Ιούνιο του 2010 ενσωματώνει όλες τις κατευθύνσεις της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στο Ελληνικό Δίκαιο. Οι βασικοί άξονες της ΚΥΑ είναι:

- Στο Κεφάλαιο Α' 'Γενικές Διατάξεις', γίνεται αναφορά, μεταξύ άλλων, σε

ορισμούς σχετικά με τις πλημμύρες καθώς και στις αρμόδιες αρχές για την εφαρμογή αυτής.

- Στο Κεφάλαιο Β' 'Ειδικές Διατάξεις Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας', τα πιο σημαντικά είναι τα 4, 5, 6, όπου αφορούν στην Προκαταρκτική Αξιολόγηση, τους Χάρτες Επικινδυνότητας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας και στα Σχέδια Διαχείρισης.
- Στο Κεφάλαιο Γ' 'Τελικές Διατάξεις', στο άρθρο 11 και πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο Α παρατίθενται το παράρτημα, τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, τα στοιχεία των πρώτων σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας και τέλος η περιγραφή της εφαρμογής του σχεδίου.

2.5 Υδρολογικά μοντέλα

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης των υπαρχόντων μοντέλων με βάση: την προσέγγιση μοντελοποίησης, την κατανομή των χωρικών δεδομένων, την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τη σχέση μεταξύ των εισροών και των εκροών (Pullar and Springer, 2000). Ο υδρολόγος μηχανικός καλείται να δώσει απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα, τα οποία σχετίζονται με την κίνηση του νερού και την επίδραση στις υφιστάμενες κατασκευές (Γκιόκας 2009). Κλασικό πεδίο ενδιαφέροντος αποτελεί η εξέταση της σχέσης βροχής – απορροής, που ενδεχομένως οδηγεί στην εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, επειδή σπανίως υπάρχουν επαρκή δεδομένα, γίνονται εκτιμήσεις, είτε για τη συμπλήρωση στοιχείων, είτε για την εκτίμηση της μελλοντικής εξέλιξης ενός φαινομένου. Σε τέτοιες περιπτώσεις δημιουργούνται μοντέλα τα οποία δίνουν πληροφορίες συσχετίζοντας κάτι γνωστό - input (π.χ. ένα συγκεκριμένο επεισόδιο βροχόπτωσης) με κάτι άγνωστο - output (π.χ. όγκος απορροής που συνεπάγεται το επεισόδιο αυτό). Η έννοια του υδρολογικού μοντέλου θα μπορούσε να αποδοθεί ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων, που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της υετόπτωσης σε απορροή (Λουκάς και Μυλόπουλος, 2005). Γενικά, η λογική της ανάπτυξης και εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, ακολουθεί τα εξής πέντε βήματα (Γκιόκας 2009):

- Προσδιορίζονται οι παράμετροι, που θα ληφθούν υπόψη, αξιολογώντας τη σημασία και τη βαρύτητα που έχουν.
- Χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις για την περιγραφή των διαδικασιών του υδρολογικού συστήματος, οι λύσεις των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων βάσει διαθέσιμων δεδομένων.
- Προετοιμάζονται τα δεδομένα (μετεωρολογικά και υδρολογικά καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη υδρολογικής λεκάνης) που

- θα χρησιμοποιηθούν.
- Το σύστημα βαθμονομείται με βάση διαθέσιμα δεδομένα πεδίου, όπως για παράδειγμα μετρημένες παροχές ποταμών.
 - Τέλος, εκτελείται το υδρολογικό μοντέλο για την προσομοίωση της απόκρισης της υδρολογικής λεκάνης.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) αποτελούν ένα κατανοητό και εύχρηστο λογισμικό περιβάλλον για την οργάνωση και επεξεργασία των αρχείων εισόδου σε λογισμικά υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης. Η υδρολογική μοντελοποίηση περιλαμβάνει πολλά υπομοντέλα τα οποία πρέπει να είναι συμβατά με μια κοινή βάση δεδομένων καθώς υπάρχουν πολλές διεργασίες εντός του υδρολογικού κύκλου. (Maidment, 2002)

2.6 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω προγράμματα Η/Υ στις αντίστοιχες εκδόσεις:

- Microsoft Office 2007
- Google Earth
- ArcGis 10.5: ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για εργασίες με χάρτες και άλλα γεωγραφικά στοιχεία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και την χρήση χαρτών, για την σύνθεση γεωγραφικών δεδομένων και την διαχείριση βάσεων δεδομένων GIS, και είναι κατασκευής της εταιρείας ESRI.
- HEC-GeoHMS: πρόκειται για μία επέκταση της υδρολογικής μοντελοποίησης η οποία αναπτύχθηκε ως εργαλειοθήκη γεωχωρικής υδρολογίας. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία των στοιχείων εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS, είναι κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).
- HEC-HMS: πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης (Hydrology Modeling system) παραγωγής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

2.7 Λογισμικό HEC-HMS

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο που σχεδιάστηκε από το Σώμα του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of

Engineer) για την προσομοίωση των διεργασιών βροχόπτωσης-απορροής σε λεκάνες απορροής με δενδροειδή μορφή. Εφαρμόζεται τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες απορροής όσο σε αστικές ή ημιαστικές λεκάνες. Τα υδρογραφήματα που παράγονται από το μοντέλο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες :

- Διαθεσιμότητας υδατικών πόρων.
- Συνέπειες μελλοντικής αστικοποίησης λεκάνης απορροής
- Πρόγνωσης πλημμυρών
- Σχεδιασμού αντιμετώπισης καταστροφών από πλημμύρες
- Διευθέτησης περιοχής κατάκλισης πλημμύρας
- Σχεδιασμού υπερχειλιστών πλημμύρας

Στο πρόγραμμα αυτό, ένα μοντέλο λεκάνης κατασκευάζεται με το διαχωρισμό του υδρολογικού κύκλου σε επιμέρους μέρη με δυνατότητα επεξεργασίας του καθενός χωριστά. Κάθε συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου αναπαρίσταται με ένα μαθηματικό μοντέλο. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετές οι επιλογές του χρήστη για την προσομοίωση της κάθε συνιστώσας. Η επιλογή για την εφαρμογή της πιο κατάλληλης μεθόδου, είναι απόρροια της γνώσης του φυσικού συστήματος, των στόχων της υδρολογικής μελέτης καθώς και της κρίσης και της εμπειρίας του ερευνητή (Flening and Scharffenberg, 2010). Το πρόγραμμα περιλαμβάνει μία βάση δεδομένων, η οποία δέχεται δεδομένα εισόδου και εξάγει αποτελέσματα με χρήση διάφορων ενσωματωμένων εργαλείων. Τα βασικά μέρη είναι το μοντέλο λεκάνης απορροής όπως έχει σχηματιστεί στο HEC-GeoHMS, και το μετεωρολογικό μοντέλο. Το μοντέλο λεκάνης απορροής απεικονίζει τα υδρολογικά στοιχεία συνδέοντάς τα σε δενδροειδές δίκτυο, με τη διαδικασία υπολογισμού να ξεκινά από τα ανάντη προς τα κατόντη. Στο πρόγραμμα διατίθενται διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής και της διόδευσης πλημμύρας. Ο χρήστης επιλέγει πιο μαθηματικό πρότυπο θα χρησιμοποιήσει δεδομένου των συνθηκών και των διαθέσιμων στοιχείων. Τα υδρογραφήματα που παράγει μπορούν είτε άμεσα ή σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες διαθεσιμότητας νερού, αστικής απορροής, πρόβλεψης απορροής, επίδρασης μελλοντικής αστικοποίησης κ.α. (US Army Corps of Engineers, 2018).

Ενδεικτικά αναφέρονται τα μαθηματικά πρότυπα των παραπάνω διεργασιών.

Εκτίμηση απωλειών :

- Initial constant (δείκτης ϕ)

- SCS Curve Number
- Gridded SCS Curve Number
- Exponential (εκθετική συνάρτηση του χρόνου)
- Green-Ampt

Υπολογισμός Επιφανειακής Απορροής :

- Μοναδιαίο Υδρογράφημα
- Snyder
- SCS
- Clark Instantaneous Unit Hydrograph
- Ορισμένο από τον χρήστη

Βασική Ροή:

- Recession method (εκθετικά μειούμενη)
- Σταθερή ροή
- Linear reservoir method (εκφόρτιση διηθούμενου νερού στο υδατόρρευμα με διατήρηση μάζας)

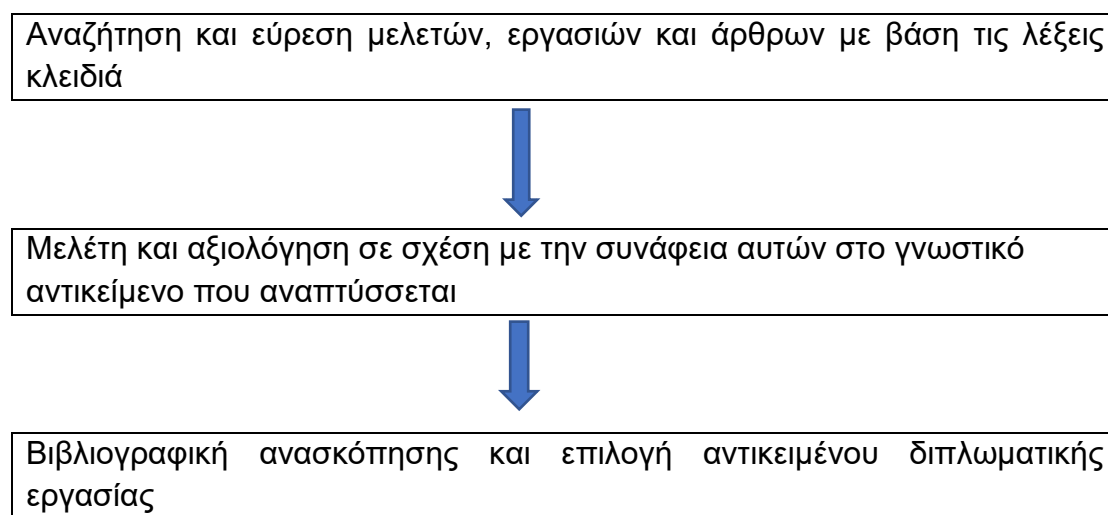
Διόδευση

- Lag method (Μέθοδος καθυστέρησης – όχι εξασθένησης πλημμυρικού κύματος)
- Muskingum
- Kinematic Wave
- Muskingum-Cunge

2.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία αποτελείται από τρία στάδια: την αναζήτηση άρθρων, μελετών κ.λπ., σχετικών με την παρούσα εργασία, την ανάκτηση και τη μελέτη των συγκεκριμένων κειμένων, και τέλος τη σύνθεση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Οι μηχανές αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των εργασιών και μελετών είναι το Google Scholar, Scopus, NTUA Library. Οι κύριες λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για την αναζήτηση είναι: Λεκάνη απορροής Βενέτικου, υδρολογική προσομοίωση, λογισμικό HEC-HMS, σενάρια κλιματικών αλλαγών, πλημμυρικά φαινόμενα, αύξηση αστικού ιστού, υδρολογική απόκριση κ.λπ. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου όπως επίσης και η χρήση του λογισμικού HEC-HMS για την δημιουργία του υδρολογικού μοντέλου και της προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης σε πληθώρα διπλωματικών εργασιών, μεταπτυχιακών διπλωματικών εργασιών καθώς επίσης και σε άρθρα και μελέτες. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η διαδικασία σύνθεσης της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



Εικόνα 2.4: Σχεδιάγραμμα διεργασιών βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Ο Τζέμης (2016) πραγματοποίησε υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS και HEC-RAS για την λεκάνη απορροής του ρέματος Χαλανδρίου για χρονικές διάρκειες $t=6$ και 12 ώρες και περιόδους επαναφοράς $T= 2, 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ένα σχετικά περιορισμένο πεδίο πλημμυρικών κατακλίσεων όπως επίσης και μία μικρή αύξηση της έκτασης αυτών με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Η αξιολόγηση της βαρύτητας των παραμέτρων στη λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου (ανάλυση ευαισθησίας) πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου διακύμανσης μιας παραμέτρου τη φορά (One at a Time-OAT). Τα αποτελέσματα, για τα υδρολογικά σενάρια που εξετάστηκαν, έδειξαν ότι το ρέμα του Χαλανδρίου δεν αντιμετωπίζει έντονες αρνητικές συνέπειες από γεγονότα πλημμυρικής κατάκλυσης παρά μόνο τα αυθαίρετα κτίσματα στις όχθες του ρέματος.

Η Κουρουπάκη (2021) χρησιμοποίησε το λογισμικό HEC-HMS για την δημιουργία του υδρολογικού μοντέλου του ρέματος του Σταλού στα Χανιά, Κρήτη. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να εξετάσει κατά πόσο η έντονη αστικοποίηση καθώς και η αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων προκαλούν επικίνδυνα πλημμυρικά γεγονότα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα μελλοντικό σενάριο έντονης αστικοποίησης και παράλληλης αύξησης του ύψους βροχόπτωσης κατά 5% και 10% θα οδηγήσει στη συγκέντρωση μεγάλου όγκου επιφανειακού νερού και την εμφάνιση πλημμύρας.

Ο Τσακσάρας (2019) δημιούργησε ένα ενιαίο υδρολογικό μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης για την λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου, σε ημερήσιο χρονικό βήμα, κάνοντας χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Για τον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης της λεκάνης ακολούθησε την μέθοδο Thiessen. Η εξαμυσοδιαπνοή υπολογίστηκε με τη μέθοδο Hargreaves-Samani. Για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές παροχής στην έξοδο της λεκάνης οι οποίες προέκυψαν από μετρήσεις στάθμης, μέσω της αυτόματης ρύθμισης που υπάρχει ενσωματωμένη στο λογισμικό του HEC-HMS, και σε συνδυασμό με την εμπειρική μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (trial and error method). Όσον αφορά την εκτίμηση της παροχής, παρατηρήθηκε μια υποεκτίμηση της προσομοιωμένης παροχής έναντι της μετρημένης παροχής κυρίως για τις μικρές παροχές. Αντιθέτως, παρουσιάστηκε μια υπερεκτίμηση των μεγάλων τιμών (αιχμών) των προσομοιωμένων παροχών σε σχέση με τις μετρημένες παροχές. Ανεξάρτητα από τις τιμές όμως, οι μεταβολές των προσομοιωμένων παροχών προσομοίασαν αρκετά αυτές των μετρημένων παροχών οπότε τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Τέλος, ανέφερε μια καλή χρονική συσχέτιση των βροχοπτώσεων με τις υπολογισμένες και μετρημένες παροχές, αφού μετά από κάθε βροχόπτωση ακολουθεί και μια μεγάλη αιχμή στις παροχές του ποταμού.

Η Γιάννιου (2015) πραγματοποίησε ανάλυση πλημμυρικού κινδύνου στην πόλη του Ρέθυμνου Κρήτης χρησιμοποιώντας τα λογισμικά HEC-HMS και HEC-RAS με τελικό στόχο την εξαγωγή χαρτών πλημμυρικής κατάκλισης για τέσσερις περιόδους επαναφοράς $T= 20, 50, 100, 1000$ έτη, και ενός παρατηρημένου επεισοδίου βροχής (10ης Νοεμβρίου 1999). Τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν για τις παροχές αιχμής ήταν ότι αυτές αυξάνονταν με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Η σύγκριση των πλημμυρικών πεδίων για τις πέντε περιόδους επαναφοράς συνάγει το συμπέρασμα ότι λόγω των σχετικά έντονων κλίσεων της περιοχής δεν παρατηρείται αύξηση του εμβαδού της κατακλιζόμενης έκτασης με την αυξανόμενη μέγιστη πλημμυρική παροχή.

Ο Αποστολόπουλος (2016) στη διπλωματική του εργασία συνέκρινε διάφορα σύνθετα μοναδιαία υδρογραφήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως για εξαγωγή υδρολογικής πληροφορίας σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Οι

λεκάνες απορροής οι οποίες εξετάστηκαν ήταν του Αλή Εφέντη με έκταση 2,778 km², του Πορταϊκού με έκταση 134 km², και η λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου με έκταση 851 km². Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: μέθοδος Snyder, η μέθοδος SCS, η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών, η μέθοδος IUH CLARK και η μέθοδος Sierra Nevada. Η σύγκριση κατέδειξε σημαντική ανομοιομορφία μεταξύ των αποτελεσμάτων των επιμέρους μεθόδων και απόκλιση αυτών από τα υπολογισμένα ΜΥΓ. Όσον αφορά την λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μεθόδων δείχνουν ότι η παροχή αιχμής δεν υπερεκτιμάται, αντίθετα υποεκτιμάται με την χρήση των μεθόδων κατάρτισης συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων σε σχέση με μετρήσεις βροχομετρικών σταθμών, κάτι που δεν παρατηρήθηκε σε καμία περίπτωση στις λεκάνες Αλή Εφέντη και Πορταϊκού.

Ο Baltas (2009) ανέλυσε τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στο υδρολογικό καθεστώς και στους υδατικούς πόρους της λεκάνης απορροής του ποταμού Βενέτικου. Για αυτό το λόγο δημιούργησε ένα ενιαίο μηνιαίο υδρολογικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου το οποίο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας ιστορικά υδρομετεωρολογικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν μείωση των μέσων τιμών καλοκαιρινής και χειμερινής απορροής. Επιπλέον, αύξηση παρατηρήθηκε στην δυνητική και πραγματική εξατμισοδιαπνοή σαν αποτέλεσμα της ανόδου της θερμοκρασίας. Τέλος, παρατηρήθηκε μετατόπιση της υγρής περιόδου προς τον Δεκέμβριο με κίνδυνο την αύξηση της ξηράς περιόδου.

Οι Francisco et al. (1998) παραθέτουν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την χρήση GIS σε συνδυασμό με το υδρολογικό μοντέλο HEC-2 για τον υπολογισμό πλημμυρισμένων περιοχών, στη λεκάνη απορροής Livramento, Πορτογαλία. Σκοπός τους ήταν να αποδείξουν την αποτελεσματικότητά αυτού του μοντέλου σε συνδυασμό με την χρήση GIS. Τα συμπεράσματα έδειξαν ότι η σύζευξη υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων με GIS είναι πολύ γόνιμη για την μελέτη λεκανών απορροής

Οι Gumindoga et al. (2015) προσπάθησαν να προσδιορίσουν τη δυνατότητα εφαρμογής ενός συνδυασμού υδρολογικών μετρήσεων και δεδομένων τηλεπισκόπησης, όπως ψηφιακών μοντέλων εδάφους, χαρτών χρήσεων γης και γεωλογικών χαρτών, για την πρόβλεψη της απορροής στην λεκάνη της Ζαμβέζης, Ζιμπάμπουε, χρησιμοποιώντας το λογισμικό HEC-HMS. Τα συμπεράσματα έδειξαν ότι ακόμα και σε περιοχές που δεν υπάρχουν μετρήσεις και ιστορικά δεδομένα, αυτός ο τρόπος φέρνει θετικά αποτελέσματα και μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο για την πρόβλεψη μελλοντικών πλημμυρών.

Οι Gül et al. (2009) χρησιμοποίησαν τα λογισμικά HEC-RAS και HEC-HMS για να προσομοιώσουν τη λεκάνη απορροής του ποταμού Bostanli, Τουρκία, μια περιοχή που είχε αντιμετωπίσει έντονα προβλήματα από πλημμυρικά γεγονότα. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η κατασκευή φράγματος

όπως σχεδιάστηκε, θα είχε θετικό αντίκτυπο ως μέτρο ελέγχου των ενδεχόμενων πλημμυρών.

Οι Knebl et al. (2005) εξέτασαν την λεκάνη απορροής του ποταμού San Antonio, Texas, με στόχο τη δημιουργία ενός ενιαίου υδρολογικού μοντέλου για τις πλημμύρες. Για την υλοποίηση αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά HEC-HMS και HEC-RAS για ένα επεισόδιο έντονης βροχόπτωσης το οποίο έπληξε την λεκάνη απορροής το έτος 2002. Η σύγκριση της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης με δορυφορικές εικόνες της περιοχής παρουσίασε μεγάλη ακρίβεια και απέδειξε ότι είναι ένα σημαντικό εργαλείο για μελέτες πλημμύρας σε κλίμακα πόλης, νομού ακόμα και περιφέρειας.

Ο Goodel (2005) χρησιμοποίησε το λογισμικό HEC-HMS ώστε να προσομοιώσει μια λεκάνη μικρής έκτασης και έντονου ανάγλυφου, ενός ποταμού στο Oregon. Ο στόχος του ήταν να μελετήσει την δημιουργία δύο φραγμάτων τα οποία θα συμβάλουν στην αποθήκευση νερού με σκοπό την άρδευση. Τα αποτελέσματα έδειξαν την αναγκαιότητα της κατασκευής αυτών των φραγμάτων για την αποφυγή μελλοντικών πλημμυρών.

Οι Ahmad et al. (2010) μελέτησαν την πλημμυρική ζώνη Nullah Lai στο Πακιστάν και την αναγκαιότητα της εκτίμησης των ενδεχόμενων καταστροφών από ένα έντονο επεισόδιο βροχής με τη χρήση των προγραμμάτων HEC-HMS και HEC-RAS. Τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής, σε συνδυασμό με το υδρολογικό μοντέλο που δημιούργησαν, τους βοήθησαν να εκτιμήσουν με ακρίβεια τις καταστροφές μιας ενδεχόμενης πλημμύρας.

Συμπερασματικά, η χρήση του λογισμικού HEC-HMS έχει αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την υδρολογική προσομοίωση λεκανών απορροής και για την υλοποίηση διαφορετικών σεναρίων. Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι απαραίτητα για την ανάλυση, κατανόηση και πρόβλεψη στην συμπεριφορά των υδρολογικών διεργασιών σε χωρική και χρονική κλίμακα.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ

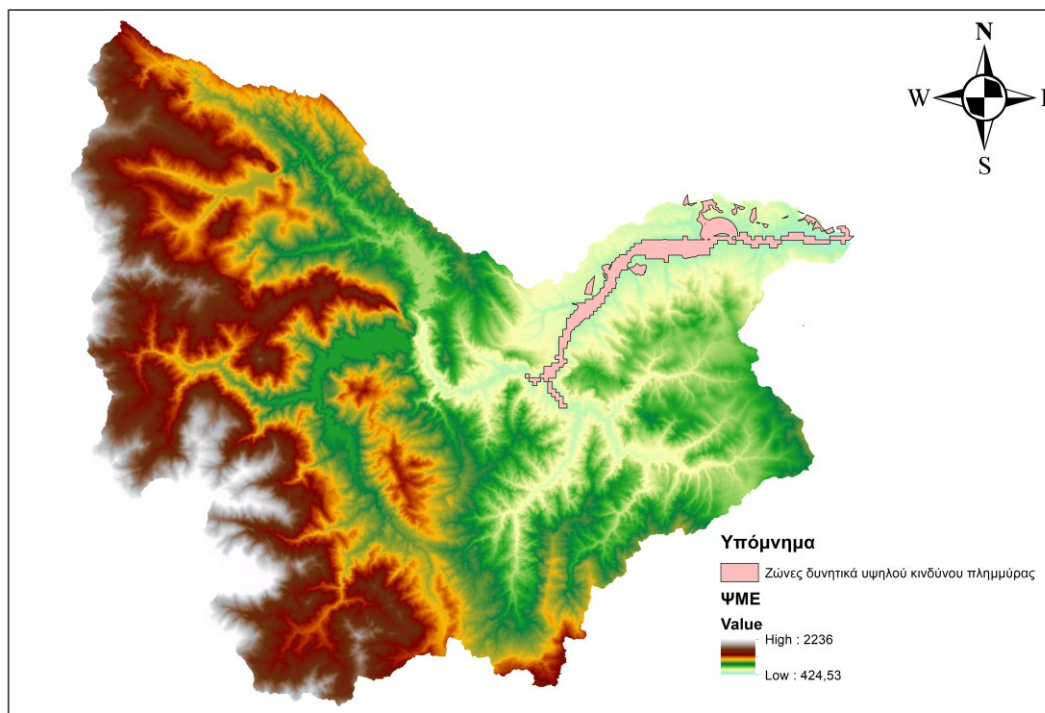
3.1 Γενικά Στοιχεία

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου υπάγεται διοικητικά στην Περιφερειακή Ενότητα Γρεβενών. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται σχεδόν αποκλειστικά στο Νομό Γρεβενών εκτός από ένα μικρό νότιο κομμάτι της λεκάνης που ανήκει στο Νομό Ιωαννίνων. Ολόκληρη σχεδόν η έκταση του Νομού Γρεβενών αποτελεί τμήμα της λεκάνης του Αλιάκμονα ποταμού και ειδικότερα της υπολεκάνης του Βενετικού ποταμού. Ο νομός Γρεβενών παρουσιάζει έντονο φαινόμενο εγκατάλειψης καθώς ο πληθυσμός του μειώνεται όπως δείχνουν και τα στοιχεία της πρόσφατης απογραφής (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Η πληθυσμιακή εξέλιξη του νομού Γρεβενών (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ1 2021)

Έτος	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Έκταση (km ²)	Πυκνότητα (κατοίκους/ km ²)	Ποσοστό Μείωσης Πληθυσμού
1991	36,797	2290	16	-
2001	32,567	2290	15	11,5%
2011	31,757	2290	14	2,5%
2021	26,645	2290	12	16.1%

Η περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη πλημμυρικής διερεύνησης κυρίως λόγω του έντονου ανάγλυφου της. Η πιο πρόσφατη και σημαντική πλημμύρα πραγματοποιήθηκε το Ιούλιο 2019 με αποτέλεσμα πολλές καταστροφές τόσο σε υποδομές του αστικού ιστού όσο και σε καλλιέργειες και κτηνοτροφικές μονάδες (Τσακσάρας, 2019). Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζονται οι ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου για την λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας.



Εικόνα 3.1: Ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας για την λεκάνη απορροής του Βενέτικου Πηγής: (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2012)

3.2 Γεωγραφική θέση-Τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σαν περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η υπολεκάνη απορροής του ποταμού Αλιάκμονα (Βενέτικος) επιφάνειας 852 km². Γεωγραφικά βρίσκεται στην βόρεια Ελλάδα, ενώ συνορεύει από το νότο με τη Θεσσαλία και τη δυτική πλευρά με την Ήπειρο. Βόρεια – ανατολικά συνορεύει με την Περιφερειακή Ενότητα Κοζάνης και με ένα μικρό τμήμα της Καστοριάς και έχει σχεδόν κυκλικό σχήμα.

Αποτελεί ένα εξαιρετικής ομορφιάς τοπίο καθώς ο ποταμός Βενετικός ενώνει την ορεινή Ήπειρο με την πεδινή έκταση των Γρεβενών.

Σχηματίζεται από μικρότερης έκτασης ποτάμια και ρυάκια τα οποία πηγάζουν από τα βουνά Βασιλίτσα και Αυγό, στα σύνορα με τον νομό Ιωαννίνων. Σημαντικότεροι παραπόταμοι του Βενέτικου είναι ο Βελονιάς, ο Σμιξιώτικος, ο Ασπροπόταμος, ο Σταυροπόταμος, ο Λούμνιτσα, ο Τρανός Λάκκος και ο Αγιουάρας. Στη νότια πλευρά της πόλης των Γρεβενών ρέει ανάμεσα σε κατακόρυφους κροκαλοπαγείς βράχους και στην συμβολή με τον οδικό άξονα που συνδέει τα Γρεβενά με την Καλαμπάκα σχηματίζει τις ξακουστές «Πύλες του Βενέτικου». Ανατολικά και πιο συγκεκριμένα κοντά στο χωριό Αγάπη ενώνεται με τον Αλιάκμονα. Οι εκτάσεις περιμετρικά από τον Βενέτικο

αποτελούνται από μολασσικούς σχηματισμούς και αλλουβιακές αποθέσεις. Έντονη είναι και η ύπαρξη χλωρίδας και πανίδας στην περιοχή καθώς ο ποταμός σχηματίζει ποικίλους βιοτόπους. Φαράγγια, κοιλάδες και πυκνά δάση θα συναντήσει κανείς στις όχθες του, σε μια μαγευτική διαδρομή, που κάποιος μπορεί να γευτεί μέσω της δραστηριότητας της πεζοπορίας και του ράφτινγκ. Τα πολλά τοξωτά γεφύρια κατασκευασμένα από πέτρα είναι ένα άλλο αξιοθέατο του ποταμού Βενέτικου τα οποία αποτελούν κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς της περιοχής και έχουν αποτελέσει πόλο έλξης για τους επισκέπτες (www.naturagraeca.com), όπως το γεφύρι του Καγκέλια (Εικόνα 3.2), της Πορτίτσας (Εικόνα 3.3), του Αζίζ Αγά (Εικόνα 3.4), του Σταυροπόταμου (Εικόνα 3.5), του Σπανού (Εικόνα 3.6), και της Αλατόπετρας (Εικόνα 3.7). (www.visitgrevena.gr)



Εικόνα 3.2: Γεφύρι του Καγκέλια (Πηγή: www.visitgrevena.gr)



Εικόνα 3.3: Γεφύρι της Πορτίτσας(Πηγή: www.petrinagafiria.com)



Εικόνα 3.4: Γεφύρι του Αζίζ Αγά (Πηγή: www.petrinagefiria.com)



Εικόνα 3.5: Γεφύρι του Σταυροπόταμου (Πηγή: www.visitgrevena.gr)



Εικόνα 3.6: Γεφύρι του Σπανού (Πηγή: www.culture.gov.gr)



Εικόνα 3.7: Γεφύρι της Αλατόπετρας (Πηγή: www.petrinagefiria.com)

3.2.1 Γεωλογικά και Εδαφολογικά Δεδομένα

Στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Βενέτικου συναντώνται ως επί το πλείστον ψαμμίτες, μάργες και πολυγενή κροκαλοπαγή ασβεστολιθικής και οφιολιθικής προέλευσης που ανήκουν στη μολάσσα Μετεώρων (ΙΓΜΕ,2010). Τα κροκαλοπαγή, οι κυανές και κίτρινες μάργες, οι ψαμμίτες, οι άργιλοι και τα τοπικά οφιολιθικά κροκαλοπαγή και λατυποπαγή που ανήκουν στη μολάσσα Κηπουριού. Τέλος, κυριαρχεί και η μολάσσα της Κρανιάς που αναφέρεται σε κροκαλοπαγή και κροκαλολατυποπαγή, σε ψαμμίτες και ψαμμιτικές μάργες και σε κυανές μάργες. Γύρω από την κοίτη του ποταμού Βενέτικου υπάρχουν κροκάλες, αμμοχάλικες διαφόρου μεγέθους και λιθολογικής σύστασης όπως οφιολιθικές, ασβεστολιθικές, σχιστολιθικές χαλαζιακές κ.α. Υπάρχουν λεπτόκοκκα αργιλικά υλικά που εναλλάσσονται είτε συμμετέχουν στα προηγούμενα που αναφέρθηκαν. Αυτά οφείλονται σε παλαιές και σύγχρονες ποτάμιες αλλουβιακές αποθέσεις και το πάχος τους μπορεί να φτάσει και τα 10 μέτρα. Παρατηρείται λόγω του καλού βαθμού στρογγυλοποίησης στις κροκάλες να υπάρχει μεγάλη διαδρομή μεταφοράς (ΙΓΜΕ, 2010). Οι αμμοχαλικώδεις ενστρώσεις παρουσιάζονται τις περισσότερες φορές καθαρές και κάποιες φορές παρουσιάζουν λεπτόκοκκα αργιλικά υλικά (ΙΓΜΕ, 2010). Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελείται από τη μολάσσα Μετεώρων στην έξοδο της λεκάνης ενώ στα ανάντη παρατηρούνται λιμναίες αποθέσεις που συνίσταται από χαλαρά κροκαλοπαγή, κυανοπράσινες και ερυθρές αργίλους και χαλαρούς ψαμμίτες καθώς και τμήματα του φλύσχη της ζώνης της Πίνδου (Zarris et al. 2007). Στις περιοχές των Γρεβενών, όπου αναπτύσσονται τα μη υδατοπερατά πετρώματα των μολασσικών ιζημάτων, που στερούνται έστω και υποτυπώδους πορώδους, δεν έχουμε ανάπτυξη υπόγειων υδροφορέων. Μεγάλοι και εκτεταμένοι προσχωματικοί υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται στους Τεταρτογενείς σχηματισμούς της λεκάνης των Γρεβενών, ενώ στους Νεογενείς σχηματισμούς οι υπόγειοι υδροφορείς απουσιάζουν λόγω του μικρού πορώδους των ιζημάτων αυτών (ΙΓΜΕ, 2010).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Εικόνα 3.8) όπου J αφορά ιουράσια πετρώματα, K αφορά κρητιδικά πετρώματα, Mzi αφορά αδιαίρετα μεσοζωικά πετρώματα, N αφορά νεογενή πετρώματα, Pg αφορά παλαιογενή πετρώματα και Tκ αφορά τριτογενή κρητιδικά πετρώματα.

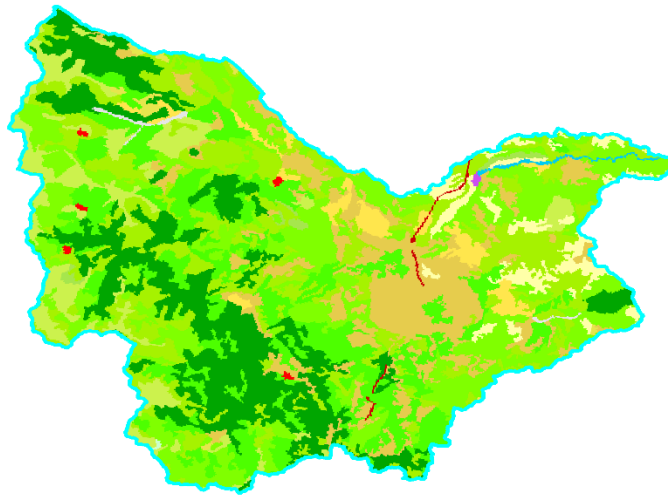


Εικόνα 3.8:Γεωλογικός Χάρτης περιοχής μελέτης

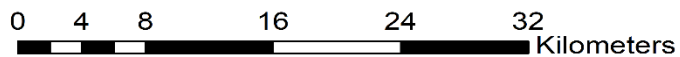
3.2.2 Χρήσεις Γης

Οι χρήσεις γης της λεκάνης του Βενέτικου χαρακτηρίζονται από τη μονοκαλλιέργεια σιτηρών, ενώ σε κάποιες περιοχές υπάρχει και η καλλιέργεια καπνών. Η ολοκληρωτική επικράτηση των αροτραίων καλλιεργειών και ειδικότερα των χειμερινών σιτηρών οφείλεται κυρίως στο χαμηλό ποσοστό των αρδευόμενων εκτάσεων. Δεύτερη σημαντική καλλιέργεια είναι τα κτηνοτροφικά φυτά και κυρίως ο σανός. Αυτός χρησιμοποιείται για την εκτροφή ζώων. Στον Ν. Γρεβενών επικρατούν τα σιτηρά και πιο συγκεκριμένα μόνο στο Δήμο Γρεβενών δηλώθηκαν 85.000 περίπου στρέμματα σιτηρά, 4500 στρέμματα όσπρια και 19.000 στρέμματα κτηνοτροφικά φυτά. Οι υπόλοιπες εκτάσεις των καλλιεργειών και τα αντίστοιχα ποσοστά είναι πολύ μικρά και καλύπτουν προφανώς την ίδια κατανάλωση της περιοχής. Στις ημιορεινές περιοχές των Γρεβενών έχει αναπτυχθεί η κτηνοτροφία, με την οποία ασχολείται μεγάλο μέρος του πληθυσμού, όμως περιορίζεται σε εκτατική και εποχιακή κτηνοτροφία με αποτέλεσμα την χαμηλή παραγωγικότητα του κλάδου (Επιχειρησιακό σχέδιο Δ. Γρεβενών 2012-2014, 2011) (Εικόνα 3.9).

Χάρτης Χρήσεων Γης



- Υπόμνημα**
Χρήσεις Γης
Περιγραφή
- Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
 - Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες
 - Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφείς χερσαίες δραστηριότητες
 - Μη αρδύσιμη αρδύσιμη γη
 - Λιβάδια
 - Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
 - Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις
 - Δάσος πλατύφυλλων
 - Δάσος κωνοφόρων
 - Μικτό Δάσος
 - Φυσικοί Βοσκότοποι
 - Σκληροφυλλική βλάστηση
 - Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις
 - Παραλίες αμμώδους αμμουδιάς
 - Γυμνά βράχια
 - Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
 - Ροές υδάτων



Εικόνα 3.9:Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής της λεκάνης απορροής του Βενέτικου (Corine Land Cover 2018)

3.2.3 Κλιματολογικές συνθήκες

Το κλίμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως υγρό-ύψυγρο. Στο ορεινό τμήμα, κοντά στην Πίνδο το κλίμα έχει ημιαλπικό χαρακτήρα, με ύψος βροχοπτώσεων μεγαλύτερο των 950 mm. Και σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή στις εποχές του έτους. Στο ημιορεινό τμήμα, το κλίμα χαρακτηρίζεται ως μεσοευρωπαϊκό, με ανομοιόμορφη κατανομή των βροχοπτώσεων και ξηρή περίοδο από τον Απρίλιο μέχρι και Οκτώβριο. Το ανατολικό και χαμηλότερο τμήμα της περιοχής το κλίμα χαρακτηρίζεται ηπειρωτικό, με χαμηλές θερμοκρασίες το χειμώνα (μέχρι και $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$), δροσερό καλοκαίρι και ύψος βροχοπτώσεων κάτω των 650 mm, ανομοιόμορφης κατανομής. Για μια

σύντομη περιγραφή των κλιματικών συνθηκών της περιοχής αναφέρονται τα παρακάτω στοιχεία:

- Μέση ετήσια θερμοκρασία: 15-17 °C
- Μέση ετήσια σχετικής υγρασία: 67,5-72,5 %
- Μέση ετήσια νέφωση: 5,2
- Μέση ετήσια βροχόπτωση 600-1200 mm
- Διανομή μέσης σχετικής υγρασίας το Δεκέμβριο: 80-82,5%
- Διανομή μέσης σχετικής υγρασίας τον Ιούλιο: 55-60%
- Πρώτος μερικός παγετός: 1η Νοεμβρίου
- Επικρατούντες άνεμοι: βορειοδυτικοί

3.2.4 Χλωρίδα -Πανίδα

Τα παρόχθια δάση του Βενέτικου αποτελούνται από σκλήθρα, ιπιές, φράξους και πλατάνια, ενώ σε όλο το μήκος του κινείται σε δασωμένες πλαγιές με τα έλατα να δίνουν τη θέση τους στις βελανιδιές και αυτές στα πυξάρια. Γύρω από το ποτάμι μπορεί κανείς να ανακαλύψει πολλά σημαντικά είδη της χλωρίδας των Γρεβενών (<http://www.naturagraeca.com>). Από αυτά ξεχωρίζουν η *Actaea spicata*, ο *Stachys scardica*, το *Delphinium fissum*, το *Anthericum liliago*, το αγριόσκορδο *Allium amethystinum*, η *Scutellaria columnae*, το κολχικό *Colchicum autumnale*, ο κρίκος *Crocus sieberi sublimis*, ο γάλανθος *Galanthus reginae-olgae*, η *Digitalis grandiflora*, ο *Petasites hybridus*, η ίριδα *Iris sintenisii*, η *Primula vulgaris*, το αγριογαρύφαλλο *Dianthus deltoides degenii*, η *Cymbalaria microcalyx*, το υδροχαρές *Lythrum salicaria*, η *Agrimonia eupatoria*, η 55 *Silene atropurpurea* και οι ορχιδέες *Cephalanthera damasonium*, *Epipactis helleborine*, *Himantoglossum caprinum*, *Dactylorhiza saccifera*, *Orchis purpurea*, *Ophrys apifera*, *O. zeusii*, *O. epirotica*, κ.ά. (<http://www.naturagraeca.com>).

Η ορνιθοπανίδα της περιοχής είναι πολύ πλούσια. Στις γύρω όχθες, μόνιμη είναι η παρουσία από σταχτοσουσουράδες και νεροκότσυφες, ενώ συχνά εμφανίζονται και άλλα παρυδάτια είδη, όπως σταχτοτσικνιάδες, λευκοτσικνιάδες, κορμοράνοι, μπεκατσίνια, αλκυόνες και ακτίτες. Από τα αρπακτικά ξεχωρίζει η παρουσία του σπάνιου ασπροπάρη, ενώ ακολουθούν είδη, όπως γερακίνες, φιδαιοί, σφηκιάρηδες, πετρίτες, ξεφτέρια, βραχοκίρκινεζα, μπούφοι, χουχουριστές και κουκουβάγιες. Η υπόλοιπη ορνιθοπανίδα περιλαμβάνει είδη, όπως γυδοβύζια, φάσσες, διάφορους δρυοκολάπτες, δεντροσταρήθρες, συκοφάγους, αετομάχους, κάργιες, κίσσες, βραχοσοπανάκους, γαλαζοκότσυφες, τσίχλες, γερακότσιχλες, θαμνοτσιροβάκους, φυλλοσκόπους, κοκκοθραύστες, σιρλοτσίχλονα, χρυσοβασιλίσκους, κ.ά. Η ερπετοπανίδα περιλαμβάνει είδη, όπως σαλαμάνδρες, γραικοβάτραχους, βαλκανοβάτραχους, φρύνους, πρασινόφρυνους, κονάκια, πρασινόσαυρες, σαύρες της Ρούμελης, σιλιβούτια,

τοιχογουστέρες, νερόφιδα, λιμνόφιδα, σαΐτες, λαφιάτες, δεντρογαλιές και κοινές οχιές. Στα πυκνά δάση που περιβάλλουν τον Βενέτικο ζούνε μεγάλα θηλαστικά, όπως αρκούδες και λύκοι. Η πανίδα των θηλαστικών συμπληρώνεται με αγριόγατους, αγριόχοιρους, νυφίτσες, κουνάβια, ασβούς, αλεπούδες, λαγούς, δασομυξούς, δεντρομυξούς και σκίουρους. Τέλος, σε όλο το μήκος του ποταμού ζούνε υγιείς πληθυσμοί από βίδρες. Η ιχθυοπανίδα του ποταμού Βενέτικου περιλαμβάνει περίπου 12 είδη ψαριών. Μερικά από αυτά είναι το ευρωπαϊκό τσιρωνάκι (*Alburnoides bipunctatus*), η βαλκανική μπριάνα (*Barbus balcanicus*), ο βίνος (*Barbatula barbatula*), ο σύρτης (*Chondrostoma vardarense*), η μακεδονική βελονίτσα (*Cobitis vardarensis*), η τούρνα (*Esox lucius*), ο βουλγαροκωβιός (*Gobio bulgaricus*), το μαυροτσιρώνι (*Pachychilon macedonicum*), η χρυσοβελονίτσα (*Sabanejewia balcanica*), η ποταμοσαλιάρα (*Salaria fluviatilis*), η ψευδορασμπόρα (*Pseudorasbora parva*), η μαλαμίδα (*Vimba melanops*), το τσιρώνι (*Rutilus rutilus*), το θεσσαλόσιρκο (*Alburnus thessalicus*), η ιονική πέστροφα (*Salmo farioides*) και η πέστροφα Πελαγονίας (*Salmo pelagonicus*) (<http://www.naturagraeca.com>). Σε πολλά σημεία, το ποτάμι είναι πολύ ήρεμο και έτσι μπορεί κανείς, κατά τους 3 καλοκαιρινούς μήνες, να βουτήξει με μια μάσκα και να παρατηρήσει αυτά τα είδη στο ενδιαίτημα τους (<http://www.naturagraeca.com>).

3.3 Γεωμορφολογική και Υδρολογική ανάλυση της λεκάνης

Η γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcMap, με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Το HEC-GeoHMS αποτελεί μια προέκταση (extension) του λογισμικού ArcMap της ESRI και διατίθεται ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων που ανήκει στο Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). Με τη βοήθεια αυτού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις λεκάνες και τα ρέματα και κατ' επέκταση να παράγει τα απαραίτητα αρχεία εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS. Τα αρχεία εισόδου στο HEC-GeoHMS είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο υδρογεωλογικός χάρτης, ο χάρτης χρήσεων γης καθώς και άλλα αρχεία χωρικών δεδομένων σε διανυσματική μορφή, όπως αυτό του υδρογραφικού δικτύου. Με τη διαδικασία η οποία θα αναλυθεί παρακάτω, παράγονται δύο αρχεία, τα οποία αποτελούν τα αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS. Συγκεκριμένα εξάγονται τα εξής:

- Αρχείο χάρτη (background map), στον οποίο οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης.
- Αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model), το οποίο περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης. Τα

υπόλοιπα αρχεία που απαιτούνται για τη λειτουργία του HEC-HMS είναι το μετεωρολογικό μοντέλο, τα παρατηρούμενα πλημμυρογραφήματα, αν υπάρχουν διαθέσιμα, και κάποιες παράμετροι για την εφαρμογή των μαθηματικών ομοιωμάτων του προγράμματος.

Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται στο HEC-GeoHMS είναι:

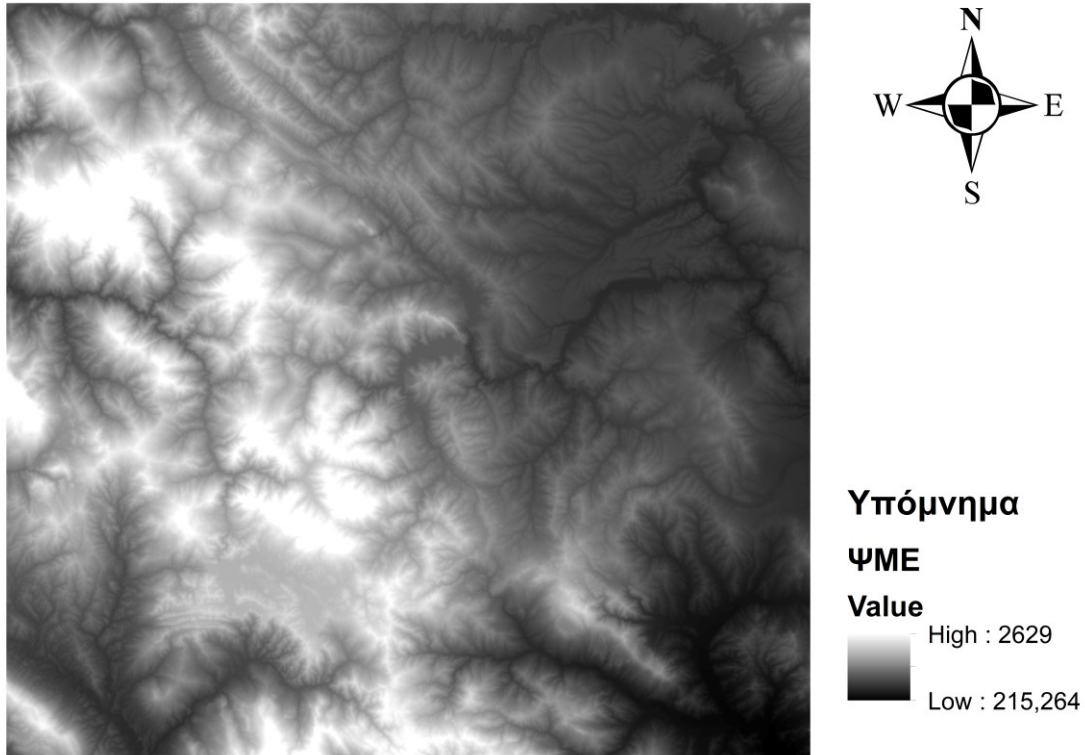
1. Η προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)
2. Ο ορισμός της υπολεκάνης μελέτης (project) που θα εισαχθεί στο HEC-HMS (HMS Project Setup)
3. Η επεξεργασία της λεκάνης απορροής (Basin Processing)
4. Ο υπολογισμός και προσδιορισμός των υδρολογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων (Stream and Watershed Characteristics)
5. Τέλος, η προετοιμασία του αρχείου λεκάνης απορροής για εισαγωγή στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (HEC-HMS Model Files)

3.3.1. Παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Τα αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα ArcMap αποτέλεσαν τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ) της ΕΚΧΑ. Η περιοχή ενδιαφέροντος εμφανίζεται σε πολλές διαφορετικές εικόνες οπότε ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού μοντέλου εδάφους, το οποίο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της εντολής mosaic dataset του ArcMap.

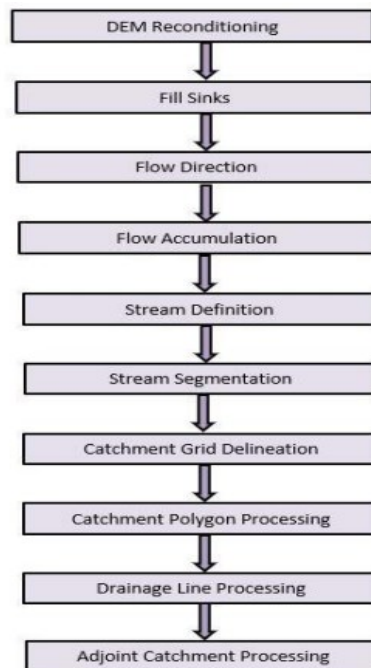
3.3.2 Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)

Προκειμένου να ξεκινήσει η επεξεργασία στο HEC-GeoHMS, απαιτείται η προεπεξεργασία των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Εικόνα 3.10) που δημιουργήθηκε με προαναφερθείσα διαδικασία στο υπό κεφαλαίο 3.3.1.



Εικόνα 3.10: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης

Στη συνέχεια περιγράφονται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία προ επεξεργασίας του εδάφους με την σειρά που φαίνονται στην Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα ροής προ επεξεργασίας ΨΜΕ

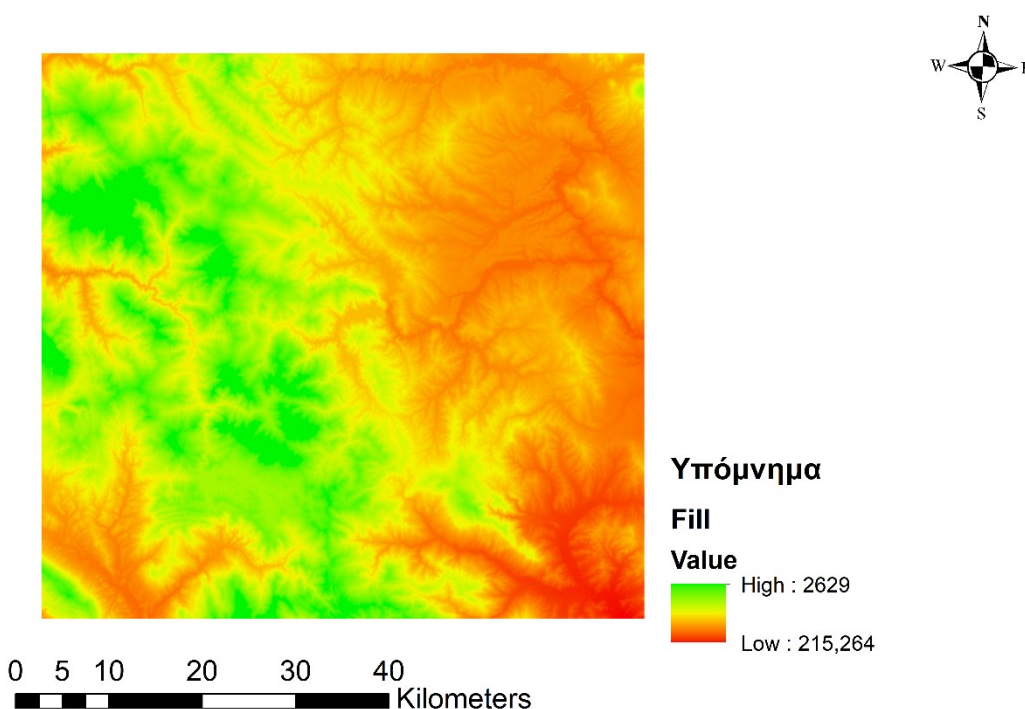
Αναλυτικά οι εντολές παρουσιάζονται παρακάτω.

➤ DEM Reconditioning

Με αυτή την εντολή τροποποιείται το έδαφος με την ανακατανομή των κελιών του κανάβου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, κατά μήκος των ρεμάτων, με σκοπό τη διόρθωση ελλειπών ή λανθασμένων υψομέτρων που προέκυψαν κατά την υψομετρική αποτύπωση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ακριβέστερη αποτύπωση της κοίτης του ποταμού.

➤ Fill Sinks

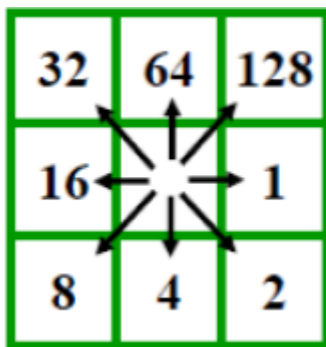
Κατά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προκύπτουν ψευδή βυθίσματα στο ανάγλυφο. Ως βύθισμα, θεωρείται ένα ή περισσότερα φατνία, γύρω από τα οποία υπάρχουν φατνία με υψηλότερο υψόμετρο. Τα βυθίσματα αυτά διορθώνονται ώστε να μην απομονώνουν τμήματα της λεκάνης που δημιουργούν προβλήματα στη μετέπειτα διαδικασία εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013) (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: ΨΜΕ μετά την διόρθωση των ψευδών βυθισμάτων

➤ Flow direction

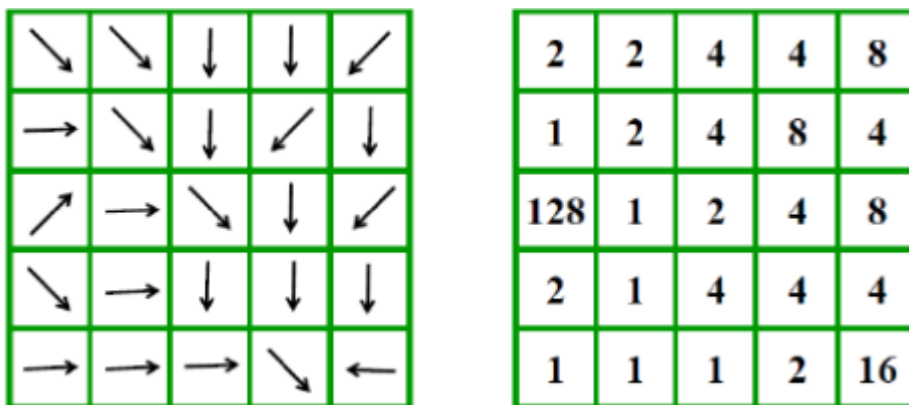
Εν συνεχεία, δημιουργείται ο κανάβος διεύθυνσης απορροής. Εφαρμόζεται στον κανάβο υψομέτρου και υπολογίζει για κάθε φατνίο προς τα που θα κατευθυνθεί η ροή. Η βασική αρχή του κανάβου απορροής είναι ότι η απορροή ξεκινά από κάθε φατνίο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα και μόνο φατνίο από τα 8 γειτονικά του, ανάλογα με τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Η κλίση μεταξύ δύο γειτονικών φατνίων υπολογίζεται ως η διαφορά των υψομέτρων τους διαιρεμένη με το 1, αν το εν λόγω φατνίο βρίσκεται οριζόντια ή κάθετα του αρχικού, ή διαιρεμένη με το 1/2 αν βρίσκεται διαγώνια. Ανάλογα με τη διεύθυνση της απορροής, κάθε φατνίο παίρνει μια τιμή όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 3.13 (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013).



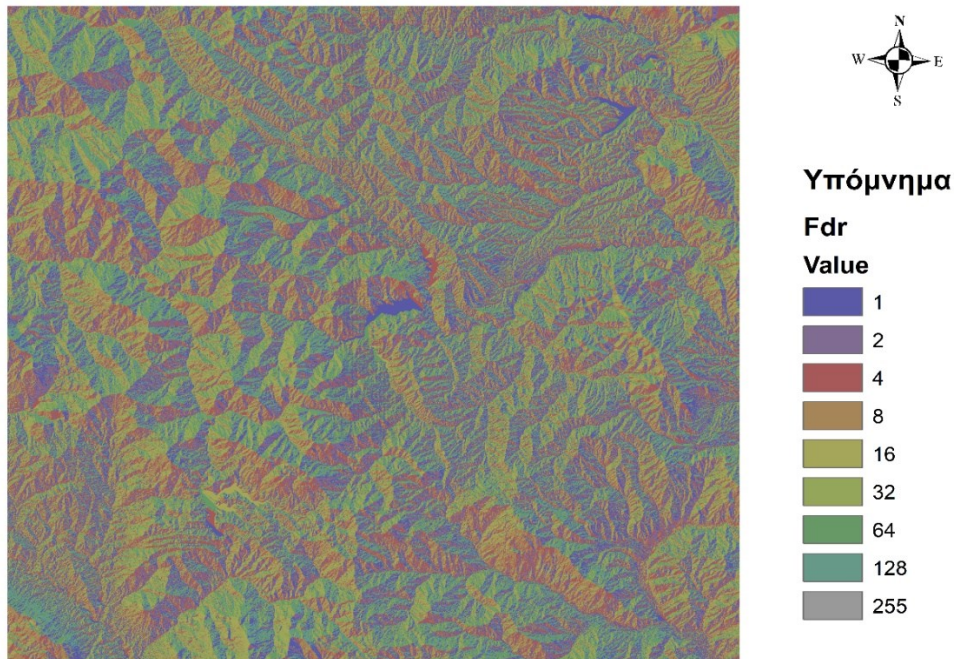
1= ανατολικά, 2= νοτιοανατολικά
 4= νότια, 8= νοτιοδυτικά
 16=δυτικά, 32= βορειοδυτικά
 64= βόρεια, 128= βορειοανατολικά

Εικόνα 3.13: Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013)

Τελικά σύμφωνα με την παρακάτω κωδικοποίηση (Εικόνα 3.14), προκύπτει ο κανάβος διεύθυνσης απορροής, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.15.



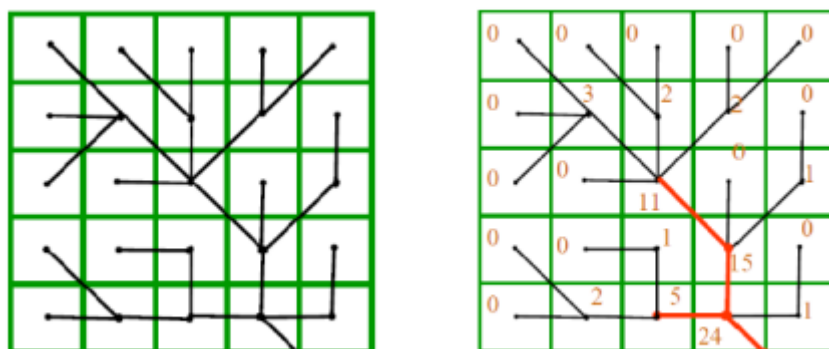
Εικόνα 3.14: Κανάβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013)



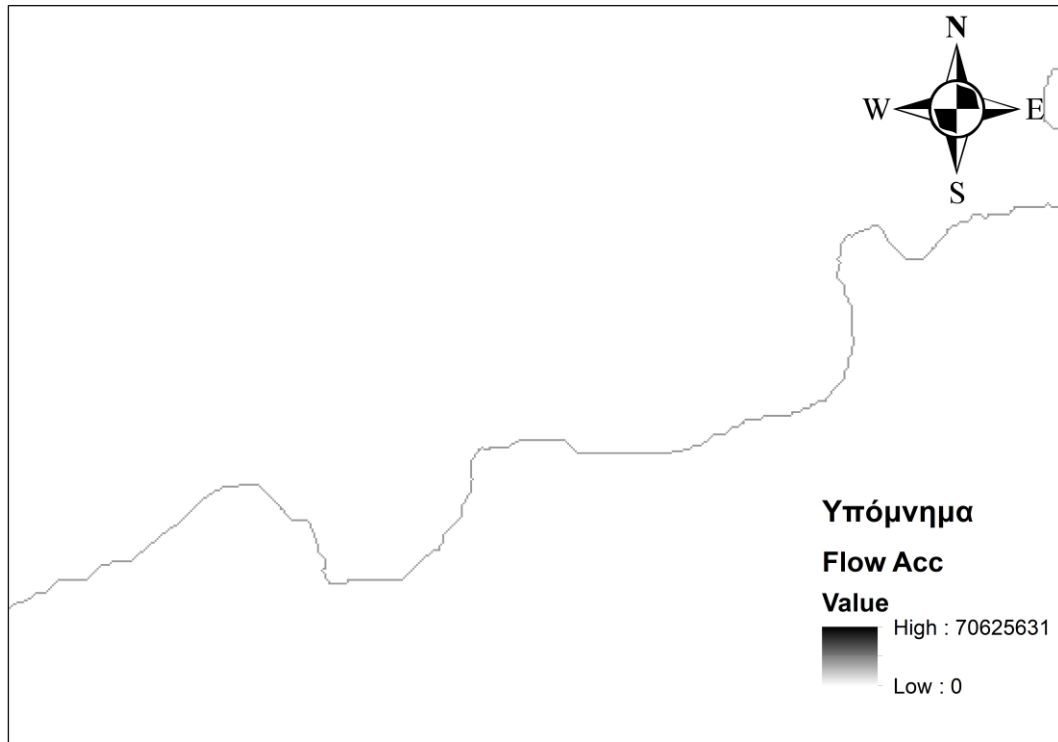
Εικόνα 3.15: Κανάβος διευθύνσεων απορροής περιοχής μελέτης

➤ Flow accumulation

Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του κανάβου συγκεντρωτικής ροής και ακολούθως η δημιουργία του κανάβου της συγκεντρωτικής ροής. Η συγκεντρωτική ροή κάθε φατνίου του κανάβου ισούται με το άθροισμα των γειτονικών φατνίων που απορρέουν σε αυτό. Τα φατνία με τις μηδενικές τιμές αντιστοιχούν στις κορυφογραμμές ενώ αυτά με υψηλές τιμές αντιστοιχούν στις μισγάγγειες (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013) (Εικόνα 3.16). Στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζεται ο κανάβος που παράχθηκε.



Εικόνα 3.16: Κανάβος πλήθους φατνίων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2013)



Εικόνα 3.17: Κάναβος συγκεντρωτικής ροής

➤ Stream definition

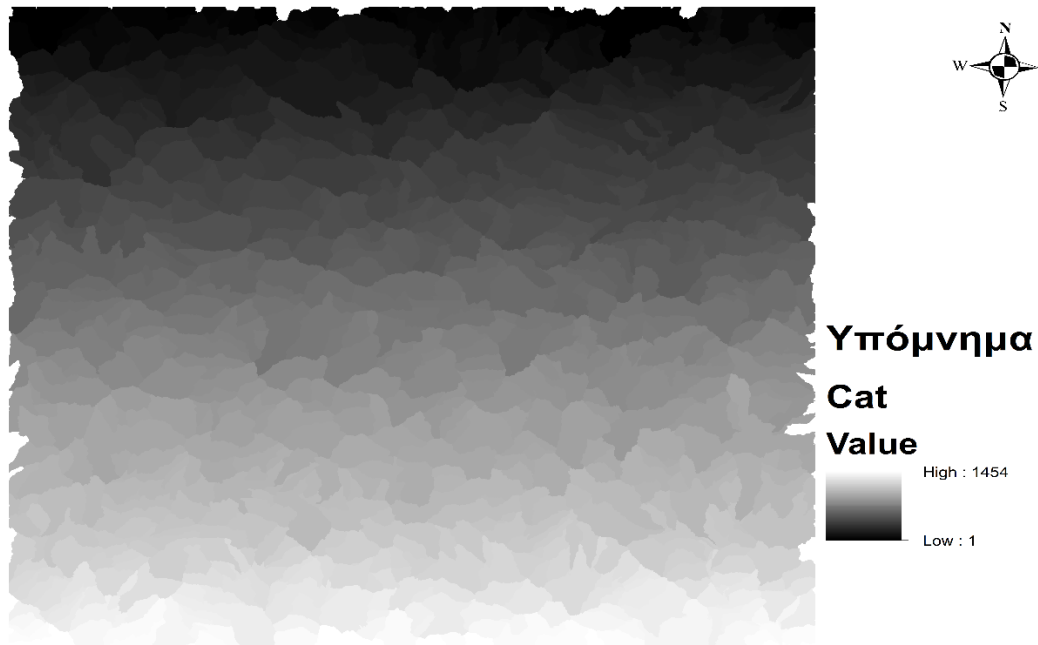
Μέσω της συγκεκριμένης εντολής δημιουργείται ένας κάναβος υδατορευμάτων έχοντας ως στοιχεία εισαγωγής τον κάναβο της συγκεντρωτικής απορροής και ένα κατώφλι (threshold). Το κατώφλι είναι μια τιμή η οποία επιλέγεται εμπειρικά από το χρήστη. Ουσιαστικά, επιλέγονται τα κελιά που έχουν συσσώρευση ροής μεγαλύτερη από το οριζόμενο κατώφλι. Μικρή τιμή κατωφλίου οδηγεί σε πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο και σε περισσότερες οριοθετημένες λεκάνες (Fleming and Doan, 2013). Το κριτήριο επιλογής της τιμής του κατωφλίου είναι να δημιουργούνται αρκετές λεκάνες σε σχέση με αυτές που μας ενδιαφέρουν καθώς επίσης και να είναι ευδιάκριτα τα ποτάμια που παρουσιάζονται σε χάρτες κλίμακας 1:500.000.

➤ Stream segmentation:

Με την χρήση αυτής της εντολής γίνεται ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου που προκύπτει μέσω μίας μεθόδου αρίθμησης των τμημάτων που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο.

➤ Catchment grid delineation

Με την εντολή αυτή δημιουργούνται υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.18.



Εικόνα 3.18: Δημιουργία υπολεκανών για την περιοχή μελέτης

➤ Catchment polygon processing

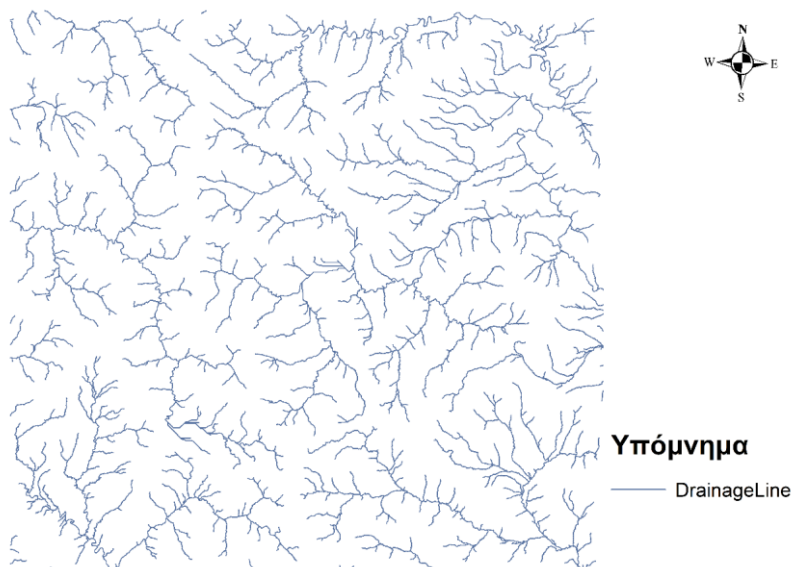
Οι υπολεκάνες που δημιουργήθηκαν στο παραπάνω βήμα μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.19: Μετατροπή υπολεκανών σε διανυσματική μορφή

➤ Drainage line processing

Αντίστοιχα όπως και στο προηγούμενο βήμα μετατρέπεται το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή κανάβου σε διανυσματική μορφή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20.



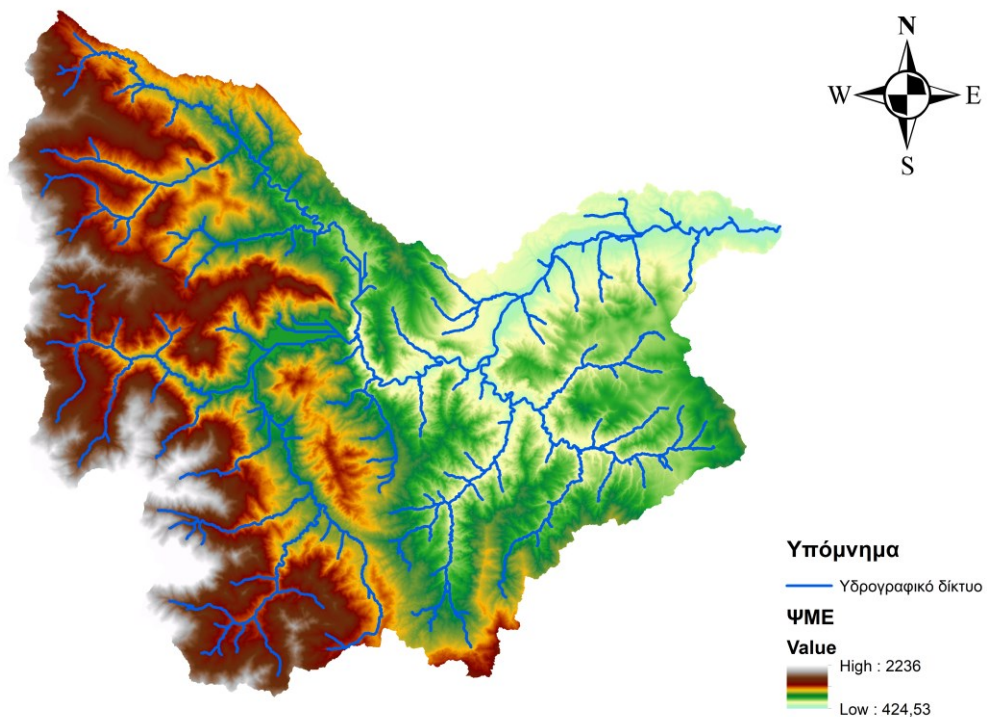
Εικόνα 3.20: Μετατροπή υδρογραφικού δικτύου σε διανυσματική μορφή

➤ Adjoint catchment processing

Με την συγκεκριμένη εντολή αθροίζονται οι ανάντη υπολεκάνες για κάθε συμβολή του υδατορεύματος χωρίς να της προσφέρει κάποια παραπάνω υδρολογική πληροφορία.

3.3.3 Επιλογή και επεξεργασία λεκάνης απορροής.

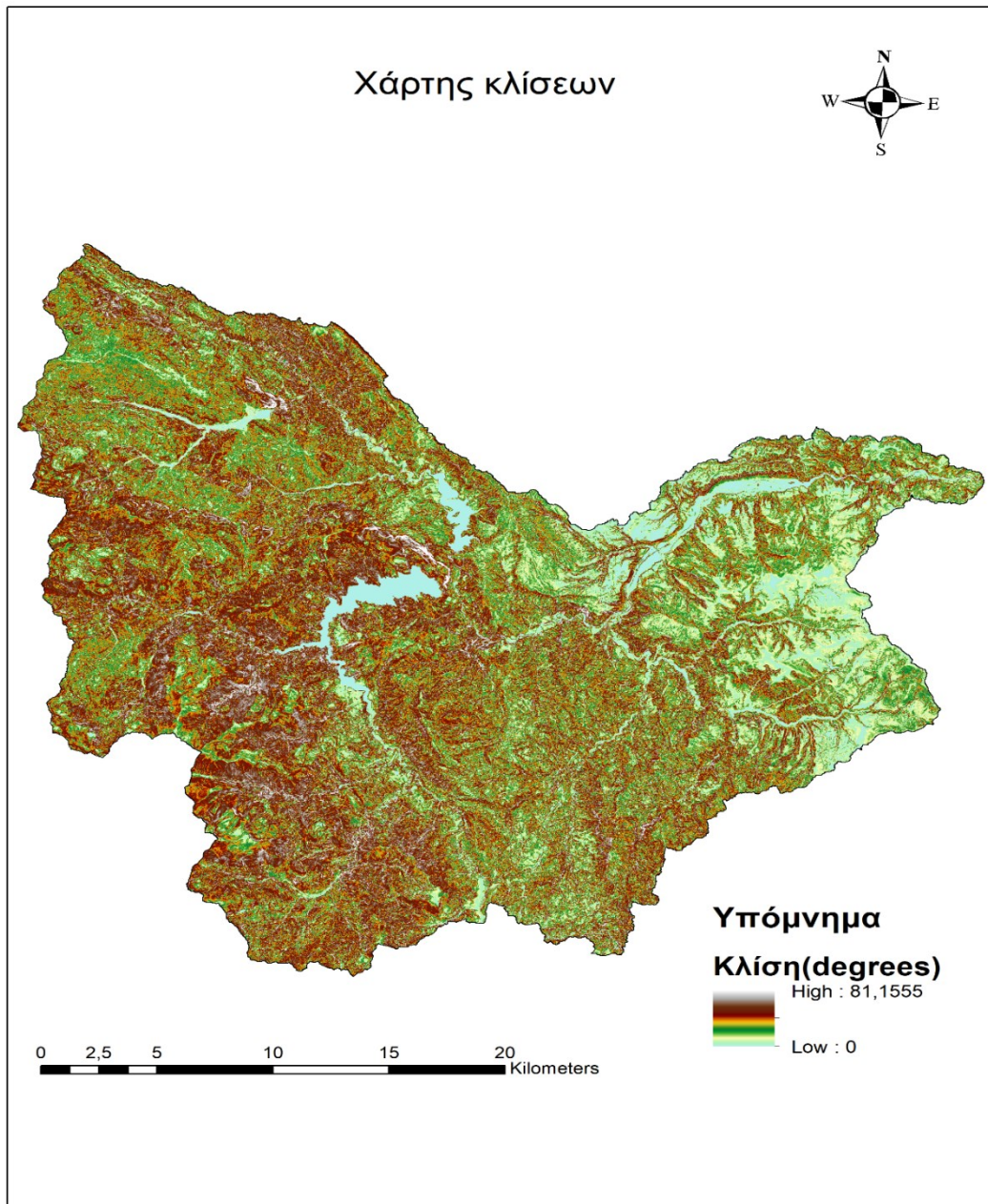
Μετά το πέρας της προ επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου της περιοχής, ορίζεται η λεκάνη απορροής που θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διπλωματική. Για αυτό τον λόγο, ως σημείο εξόδου (Project point) επιλέγεται το επιθυμητό σημείο της εξόδου της περιοχής μελέτης και στην συνέχεια μέσω της εντολής Generate project παράγεται η λεκάνη απορροής ανάντη του σημείου αυτού (Εικόνα 3.21).



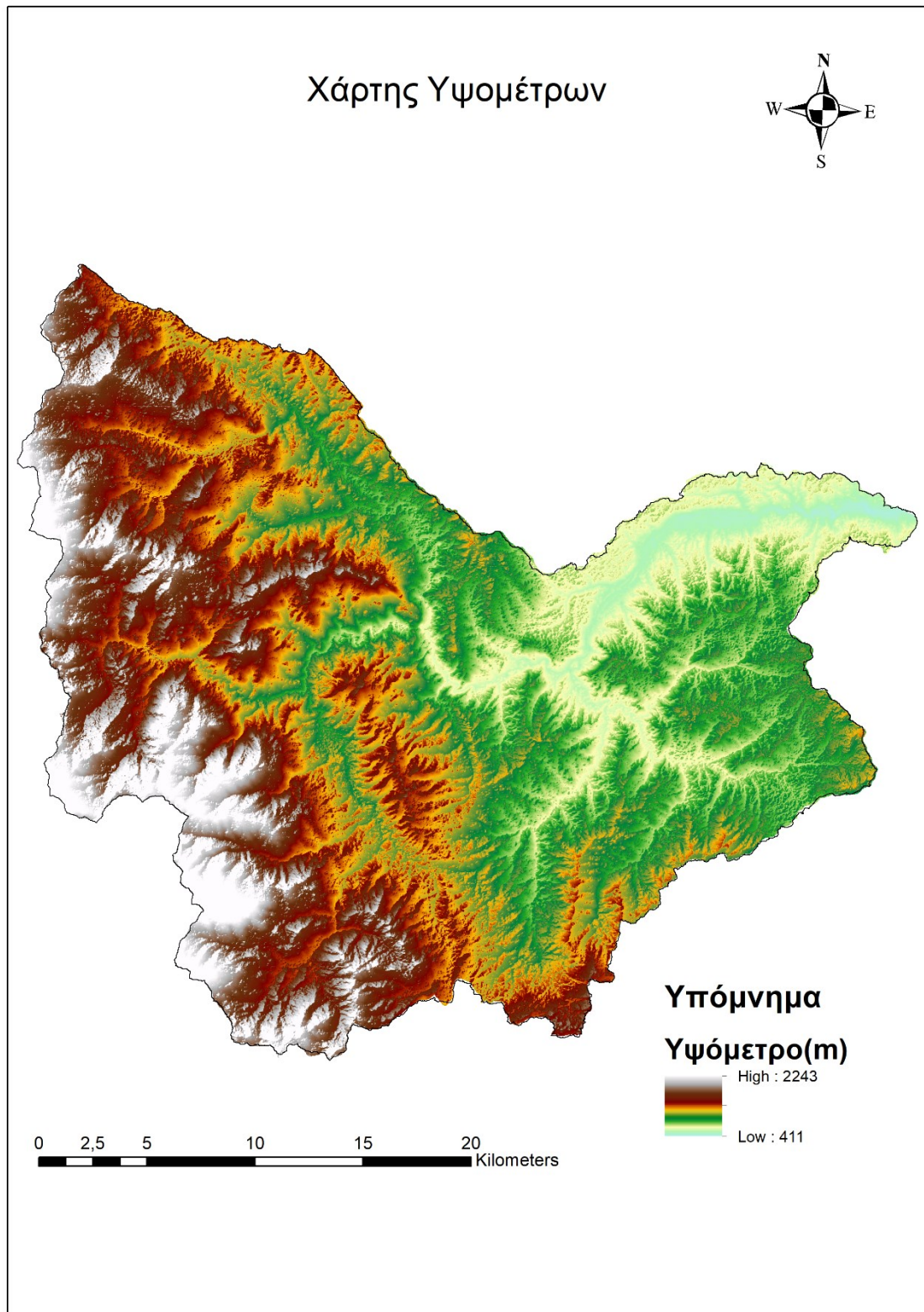
Εικόνα 3.21:Ορισμός λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ARCGIS με χρήση της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS

Στην συνέχεια, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε υπολεκάνες μελέτης. Για την παρούσα διπλωματική εργασία χωρίστηκε σε 4 υπολεκάνες. Η επιλογή του

αριθμού υπολεκανών και ο διαχωρισμός αυτών πραγματοποιείται στα σημεία όπου παρατηρείται απότομη αλλαγή υψομέτρων και κλίσεων ή σε σημεία ενδιαφέροντος όπως φράγματα και λίμνες. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος χάρτης κλίσεων όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.22 και ο αντίστοιχος χάρτης υψομέτρων όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.23 όπου οι κλίσεις κυμαίνονται από 0° έως και 82° και το υψόμετρο από 424 m. έως 2243 m.

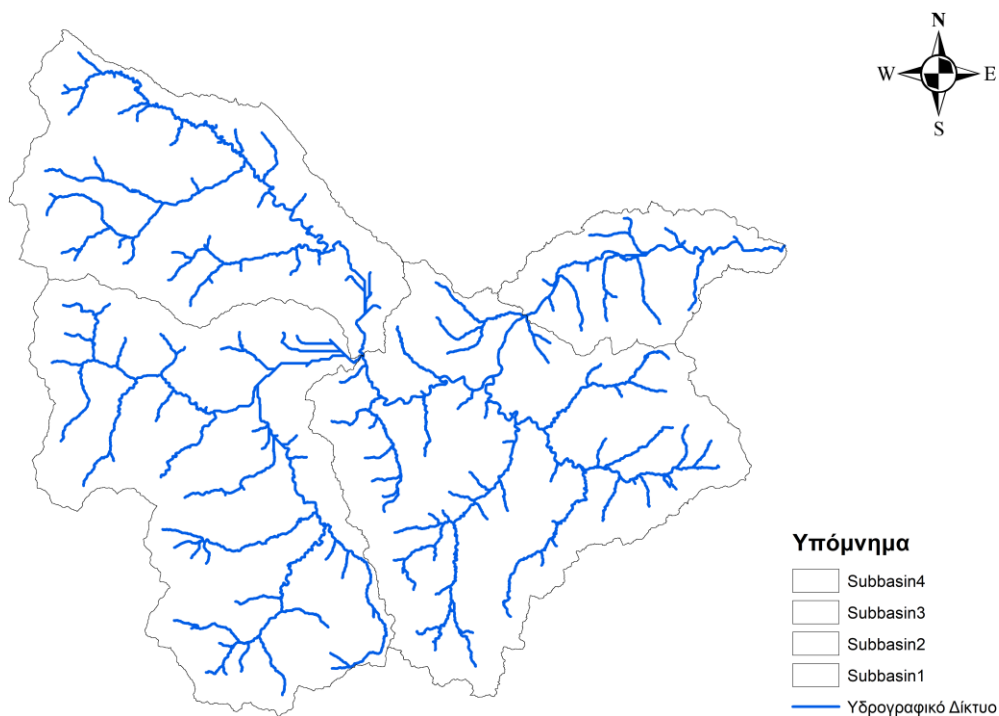


Εικόνα 3.22: Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης



Εικόνα 3.23: Χάρτης υψομέτρων της περιοχής μελέτης

Τελικά η περιοχή μελέτης με τον ακριβή αριθμό των υπολεκανών διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.24.



Εικόνα 3.24: Υπολεκάνες απορροής της υπό μελέτης περιοχής.

Η έκταση των υπολεκανών Subbasin1, Subbasin2, Subbasin3 και Subbasin4 είναι αντίστοιχα 201.80 km², 283.90 km², 260.67 km² και 106.08 km². Το συνολικό μήκος κλάδων υδρογραφικού δικτύου είναι 521.8 km.

3.3.4 Δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS

Μετά την ολοκλήρωση της επιλογής των υπόλεκανών απορροής ακολουθεί ο υπολογισμός τοπογραφικών χαρακτηριστικών των υπολεκανών, απαραίτητα στο μετέπειτα υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων, με την εντολή Basin Characteristics του μενού του HEC-GeoHMS.

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα παρακάτω:

- Το μήκος των τμημάτων του ποταμού
- Η κλίση του ποταμού
- Οι κλίσεις των υπολεκανών
- Το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης

- Το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής της υπολεκάνης μέχρι την έξοδο
- Το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδό της.

Στον Πίνακα 3 παρατίθενται ενδεικτικά οι τιμές των παραπάνω μεγεθών για το σύνολο της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Μέγεθος	Τιμή
Εμβαδόν	852.45 km ²
Μήκος κύριας μισγάγγειας	40.14 km
Συνολικό μήκος κλάδων υδρογραφικού δικτύου	521.846 km
Μέση κλίση μισγάγγειας	4.6925 %

Στην συνέχεια για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης πραγματοποιείται επιλογή των προτύπων μέσω της εντολής Hydrologic Parameters. Για την παρούσα εργασία αυτά εισήχθησαν κατευθείαν στο πρόγραμμα HEC-HMC καθώς δίνεται αυτή η δυνατότητα. Τέλος, για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου ακολουθούνται οι επόμενες εντολές μέσω του Μενού HMS:

- Map to HMS units: Τροποποίηση των δεδομένων σε μεγέθη συμβατά στο HMS
- Check Data: Έλεγχος δεδομένων ως προς την ορθότητα τους
- HMS Schematic: Σχηματισμός του υδρολογικού δικτύου και της συνδεσιμότητα των κόμβων και των διάυλων
- HMS Legend: Αντιστοίχιση κόμβων και διάυλων με εικονίδια
- Add Coordinates: Εισαγωγή συντεταγμένων στους κόμβους και στους διάυλους
- Prepare Data For Model Export: Δημιουργία του μοντέλου λεκάνης
- Background Shape File – Basin File: Εξαγωγή της λεκάνης απορροής σε μονάδες συμβατές για στο περιβάλλον HEC-HMS
- Create HEC-HMS Project: Δημιουργία τελικού συνόλου δεδομένων σε μορφή αρχείου κατάλληλη για την εισόδο του στο HEC-HMS

3.3.5 Απώλειες Βροχής

Οι απώλειες στα υδρολογικά μοντέλα αναφέρονται σε διάφορες διαδικασίες μέσω των οποίων το νερό απομακρύνεται από το σύστημα. Αυτές οι απώλειες είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της συνολικής υδατικής ισορροπίας σε ένα υδρολογικό σύστημα καθώς και την ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης του συστήματος.

3.3.5.1 Εκτίμηση του περισσεύματος βροχής με την μέθοδο SCS

Στην παρούσα εργασία και με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα επιλέχθηκε σαν πρότυπο υπολογισμού των απωλειών βροχής η μέθοδος SCS. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου απαιτεί τον υπολογισμό του αριθμού CN (Curve Number) για κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται με τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και μπορεί να εκτιμηθεί είτε με χρήση δεδομένων βροχόπτωσης, είτε μέσω πινάκων που έχουν καταρτιστεί για το σκοπό αυτό. Η απουσία μετρήσεων για τις διάφορες απώλειες αποτελεί ένα σημαντικό και δύσκολο πρόβλημα για τον υπολογισμό του περισσεύματος βροχής. Με στόχο την επίλυση αυτού του προβλήματος η υπηρεσία Soil Conservation Service των ΗΠΑ ανέπτυξε μια μέθοδο υπολογισμού του ύψους περισσεύματος της βροχής από μια συγκεκριμένου ύψους βροχή με τη βοήθεια των παρακάτω παραμέτρων:

- Ύψος βροχής
- Αρχικής κατάσταση υγρασίας του εδάφους
- Υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους καλύμματος

Σύμφωνα με τη μέθοδο της SCS εκτιμάται ότι οι αρχικές απώλειες συγκράτησης και εξάτμισης είναι το 20 % των συνολικών απωλειών (S), δηλαδή της διαφοράς μεταξύ ύψους βροχής (h_r) και ύψους περισσεύματος βροχής (h_R). Σύμφωνα με τη μέθοδο (Τσακίρης 2013):

$$h_R=0, \text{ για } h_r \leq 0.2S \quad (3.1)$$

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r - 0.8S)}, \text{ για } h_r > 0.2S \quad (3.2)$$

όπου:

h_R : το ενεργό ύψος βροχής, mm

h_r : το συνολικό ύψος βροχής, mm

S : δυνητικά μέγιστη κατακράτηση, m

Οι συνολικές απώλειες εκφράζονται με μια παράμετρο, διατυπωμένη ως αριθμός καμπύλης (*CN*), με την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (3.3)$$

όπου:

CN: ο αριθμός καμπύλης

S= δυνητικά μέγιστη κατακράτηση, m

Λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό ύψος βροχής των πέντε τελευταίων ημερών διακρίνονται τρεις κατηγορίες που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους (Πίνακας 4). Η πρώτη κατηγορία αφορά στη χαμηλή υγρασία του εδάφους, η δεύτερη στη μεσαία και η τρίτη στην υψηλή υγρασία εδάφους.

Πίνακας 4: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους (Τσακίρης 1995)

Κατηγορία	Συνολικό Ύψος Βροχής των τελευταίων 5 ημερών (mm)	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος Βλάστησης
I	< 13	< 35
II	13 - 28	35 - 53
III	> 28	> 53

Οι συνθήκες εδαφικής υγρασίας για κάθε κατηγορία (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006) είναι:

- Κατηγορία I: Τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άροση ή καλλιέργεια.
- Κατηγορία II: Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές λεκάνες απορροής.
- Κατηγορία III: Έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες μέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Στην συνέχεια, με σκοπό τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης *CN*, η μέθοδος SCS κατατάσσει τα εδάφη με βάση τη διαπερατότητα τους σε τέσσερις

κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές με βάση την υδρολογική τους συμπεριφορά φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Κατάταξη εδαφών από υδρολογική άποψη (Τσακίρης 1995)

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
A	Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη
B	Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφράς σύστασης εδάφη
C	Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν εδάφη μέσης μέχρι βαριάς σύνθεσης
D	Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή αδιαπέρατο στρώμα

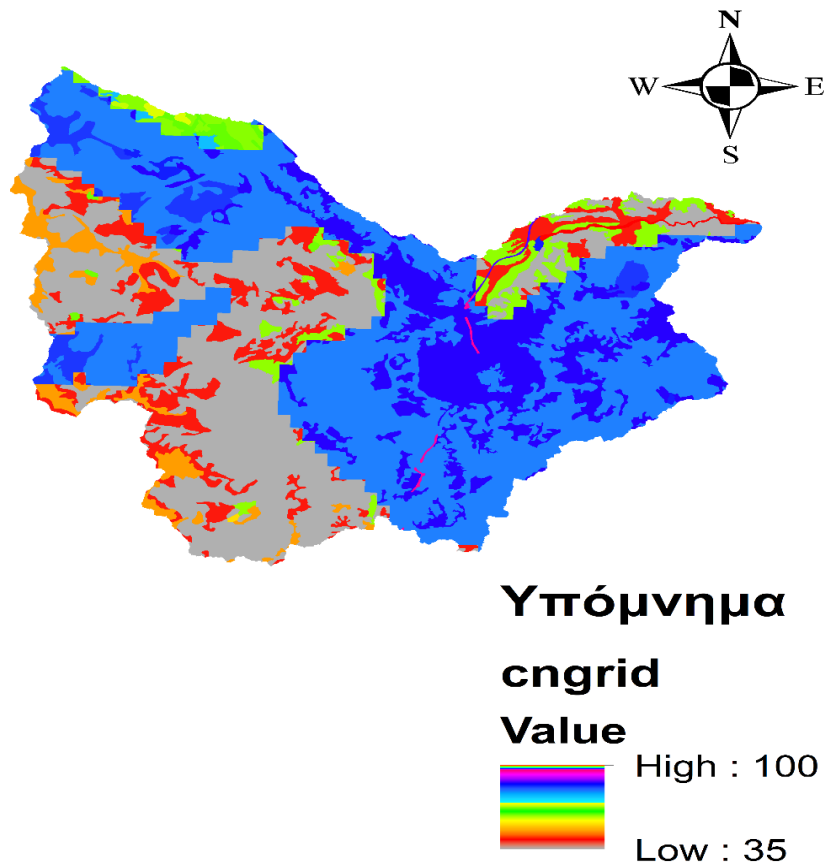
Τέλος, για τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης (CN) απαραίτητη είναι η δημιουργία του χάρτη των χρήσεων γης (Εικόνα 3.9) και η γνώση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης. Για την δημιουργία του χάρτη χρήσεων γης έγινε εισαγωγή στο GIS ο αντίστοιχος χάρτης Corine Land Cover 2018 και αφού προσαρμόστηκε μόνο για τα πολύγωνα της περιοχής μελέτης, αποδόθηκε σε κάθε χρήση γης μια συγκεκριμένη τιμή για τις 4 κατηγορίες διαπερατότητας (A,B,C,D) σύμφωνα με τους αριθμούς καμπύλης απορροής CN (Πίνακας 6) για την περιοχή μελέτης (ΥΠΕΚΑ- Σχέδιο Διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας (EL09)).

Πίνακας 6:Αριθμοί καμπύλης απορροής CN (ΥΠΕΚΑ).

Κωδικός CORINE	Περιγραφή	A	B	C	D
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	66	77	83	86
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	58	90	93	94
122	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	87	92	94	95
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	67	76	83	86
231	Λιβάδια	54	70	80	85

Κωδικός CORINE	Περιγραφή	A	B	C	D
242	Σύνθετες καλλιέργειες	67	76	83	86
243	Γεωργικές εκτάσεις μαζί με τμήματα φυσικής βλάστησης	67	76	83	86
311	Δάσος πλατύφυλλων	35	61	74	80
312	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80
313	Μικτό δάσος	35	61	74	80
321	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	64	80
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές	42	62	74	80
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80
511	Υδατορρέυματα	100	100	100	100

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω και με την χρήση του HEC-GeoHMS και της εντολής Generate CN grid υπολογίστηκε ο τελικός κλίμακας με τις τιμές CN για όλη την λεκάνη (Εικόνα 3.25) καθώς και στην συνέχεια ο σταθμισμένος μέσος όρος για κάθε υπολεκάνη (Πίνακας 7)



Εικόνα 3.25: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN

Πίνακας 7: Ο σταθμισμένος μέσος όρος της καμπύλης απορροής *CN* (Curve Number) για την κάθε υπολεκάνη απορροής

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	Curve Number
SUBBASIN-1	67.69
SUBBASIN-2	49.95
SUBBASIN-3	74.05
SUBBASIN-4	61.48

3.3.5.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS

Η SCS των ΗΠΑ πρότείνει τη χρήση συνθετικών υδρογραφημάτων, όπως το καμπυλόγραμμα και το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα (Τσακίρης 2013). Η μέθοδος του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος που προτάθηκε από την

υπηρεσία SCS (Soil Conservation Service) των ΗΠΑ, που είναι ένα από τα διαθέσιμα μοντέλα μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή στο λογισμικό HEC-HMS, έχει δημιουργηθεί μέσα από την ανάλυση ενός αριθμού μοναδιαίων υδρογραφημάτων για υδρολογικές λεκάνες, που καλύπτουν ένα μεγάλο αριθμό γεωγραφικών περιοχών (Τσακίρης 2013).

Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS αναπαρίσταται ως ένα γράφημα, όπου οι συντεταγμένες εκφράζονται ως ο λόγος της ροής (U) προς την κορυφή (U_p), και η κλίση εκφράζεται ως ο λόγος του χρόνου προς τον χρόνο που εμφανίζεται η μέγιστη ροή (t_p) (Τσακίρης 2013). Το αδιάστατο υδρογράφημα γίνεται μοναδιαίο συγκεκριμένης διάρκειας με γνωστές τις τιμές των U_p και t_p (Τσακίρης 2013).

3.3.5.3 Υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης (Εξίσωση Giandotti)

Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε ο εμπειρικός τύπος Giandotti (Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές, ΠΔ 696/74) όπως φαίνεται παρακάτω:

$$t_c = \frac{(4\sqrt{A}) + 1,5L}{0,8\sqrt{\Delta H}} \quad (3.4)$$

όπου:

t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης (h)

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

L : η απόσταση κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος μέχρι την έξοδο της λεκάνης απορροής (km)

ΔH : η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψομέτρου της λεκάνης και της κοίτης του ρεύματος στην έξοδο της λεκάνης (m)

Ο υπολογισμός του χρόνου υστέρησης t_L δηλαδή του χρόνου μεταξύ της αιχμής πλυμμύρας και του κέντρου μάζας του υετογράμματος, πραγματοποιήθηκε μέσω τις παρακάτω σχέσης (Τσακίρης 2013).

$$t_L = 0.6 \cdot t_c \quad (3.5)$$

όπου:

t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής (h)

Οι υπολογισμένοι χρόνοι συγκέντρωσης και υστέρησης καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται παρακάτω Πίνακα 8.

Πίνακας 8:Χρόνοι συγκέντρωσης και υστέρησης και χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής

Παράμετρος	Μονάδες	Τιμή
Έκταση	(km ²)	852.45
Μήκος κύριας Μισογάγγειας	(km)	40.14
Μέσο υψόμετρο λεκάνης	(m)	1018.49
Υψόμετρο εξόδου λεκάνης	(m)	424.53
Χρόνος συγκέντρωσης (Giandotti)	(h)	9.08
Χρόνος συγκέντρωσης (Giandotti)	(min)	545
Χρόνος υστέρησης (Giandotti)	(min)	363

3.3.5.4 Επιλογή όμβριας καμπύλης

Απαραίτητο στοιχείο στην μελέτη και εκτίμηση των παροχών των όμβριων υδάτων είναι η χωροχρονική εξέλιξη των βροχοπτώσεων καθώς και η παρακολούθηση της κατανομής τους (Λαζάρου, 2019). Στην παρούσα εργασία, λόγω απουσίας δεδομένων βροχομετρίας, αποφασίσθηκε η επιλογή της μεθόδου του καθορισμένου υετογραφήματος (user-specified hyetograph). Ως αρχικό στοιχείο για την ανάλυση θα πρέπει να ληφθεί μια όμβρια καμπύλη για την περιοχή. Για την επιλογή της όμβριας καμπύλης χρησιμοποιήθηκε αυτή που καταρτίσθηκε για το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας (EL09) από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων. Η όμβρια καμπύλη που επιλέχθηκε είναι της μορφής:

$$i = \frac{\lambda \left\{ \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right]^{-\kappa} - \psi \right\}}{\left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^{\eta}} \quad (3.6)$$

όπου,

i : ένταση βροχόπτωσης, mm/h

T : περίοδος επαναφοράς, έτη

d : διάρκεια βροχόπτωσης, h

λ': συντελεστής παραμέτρου κλίμακας

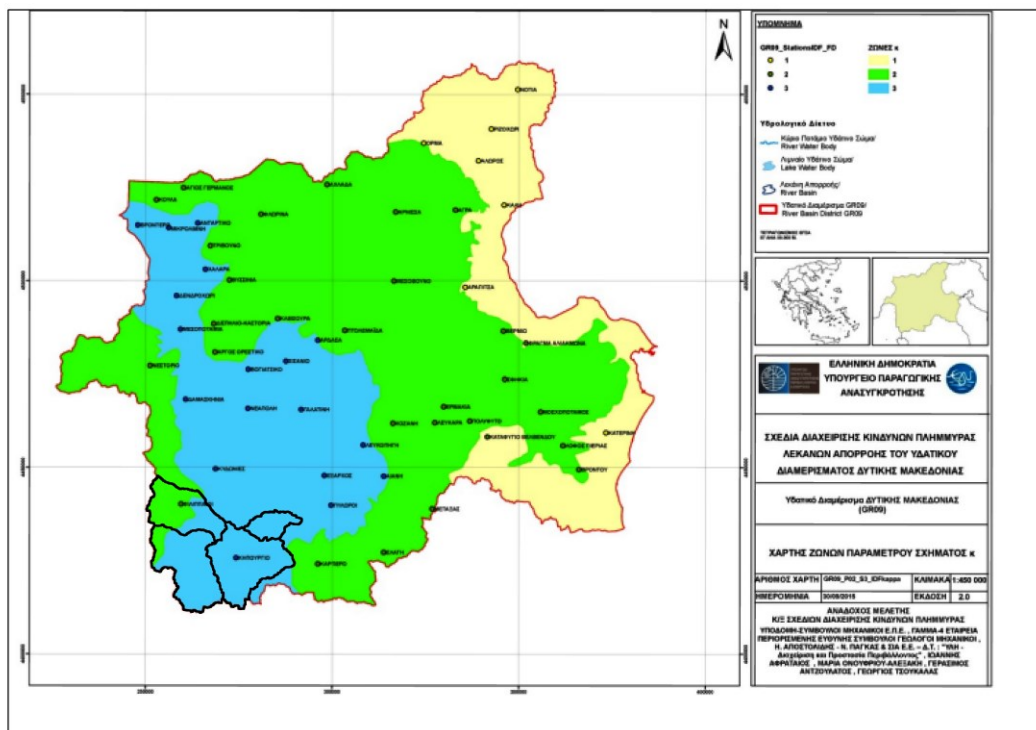
ψ': συντελεστής παραμέτρου θέσης

κ: συντελεστής παραμέτρου σχήματος

θ: σημειακή παράμετρος

η: σημειακή παράμετρος

Οι συντελεστές λ', ψ', κ ελήφθησαν από τους αντίστοιχους αναρτημένους χάρτες που δημιουργήθηκαν από Ειδική Γραμματεία Υδάτων για το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας (EL09) και η εκτίμηση των οποίων έλαβε χώρα με στατιστικές μεθόδους και πιο συγκεκριμένα με την μέθοδο των ροπών. Για την εξαγωγή των τιμών των συντελεστών λ', ψ', κ για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, σε περιβάλλον ArcGis έγινε γεωαναφορά και ψηφιοποίηση των τριών χαρτών, ένα για κάθε συντελεστή. Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν τα εμβαδά που καταλαμβάνει η περιοχή μελέτης για τις διαφορετικές τιμές του κάθε συντελεστή, όπως ενδεικτικά φαίνεται στην Εικόνα 3.26 για τον υπολογισμό του συντελεστή κ και οι υπολεκάνες στην περιοχή μελέτης. Η τελική τιμή της παραμέτρου κ υπολογίστηκε ως 0.074.



Εικόνα 3.26:Υπολογισμός συντελεστή παραμέτρου σχήματος κ σε περιβάλλον ArcMap

Τέλος, υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος για όλους τους συντελεστές. Οι συντελεστές θ και η έχουν υπολογιστεί και δίνονται ενιαία για όλο το υδατικό διαμέρισμα. Ο υπολογισμός τους έχει πραγματοποιηθεί με την χρήση της αριθμητικής βελτιστοποίησης οπότε δεν έγινε καμία μεταβολή σε αυτούς στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στο Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι τελικοί συντελεστές οι οποίοι επιλέχθηκαν για τη υπό μελέτη λεκάνη.

Πίνακας 9: Υπολογισμένοι συντελεστές τις όμβριας καμπύλης

Συντελεστές	Τιμή
λ'	343.612
ψ'	0.684
κ	0.074
θ	0.076
η	0.686

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζεται το ύψος σημειακής βροχόπτωσης ανά περίοδο επαναφοράς (5, 10, 25, 50, 100 έτη) και ανά χρονική διάρκεια βροχόπτωσης (1, 2, 3, 6, 12, 24 h). Κυμαίνεται από 24.3 mm έως 126.8 mm για διάρκειες βροχόπτωσης από 1 h έως 24 h και περιόδους επαναφοράς από 5 έτη έως 100 έτη

Πίνακας 10: Σημειακή βροχόπτωση ανά περίοδο επαναφοράς T και διάρκεια βροχόπτωσης

Διάρκεια (h)	Σημειακή βροχόπτωση (mm)				
	T=5 έτη	T=10 έτη	T=25 έτη	T=50 έτη	T=100 έτη
1	24.3	27.8	32.7	36.5	40.5
2	30.9	35.5	41.6	46.5	51.6
3	35.4	40.6	47.7	53.3	59.1
6	44.38	51.0	59.8	66.8	74.1
12	55.4	63.6	74.7	83.4	92.5
24	75.9	87.2	102.3	114.3	126.8

3.3.5.5 Χρονική κατανομή βροχόπτωσης με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ (Alternating Block Method)

Η αξιοποίηση της όμβριας καμπύλης οδηγεί στην κατάρτιση υετογραφήματος σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής, όπως αναλύεται

ακολουθως. Αναπτύχθηκαν υετογράμματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς και συγκεκριμένα για 5, 10, 25, 50 και 100 έτη. Σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method, Chow et al. 1988), η βροχόπτωση διάρκειας d και περιόδου επαναφοράς T κατανέμεται ως εξής μέσα στη διάρκειά της. Από τη σχέση έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς της μορφής της σχέσης και γνωρίζοντας ότι το ύψος βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασης επί τη διάρκειά της, για βροχοπτώσεις της ίδιας περιόδου επαναφοράς T , προκύπτει η σχέση (Chow et al. 1988):

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-\mu} \quad (3.7)$$

όπου,

t_1 : η χρονική στιγμή, hr

t_2 : η συνολική διάρκεια, hr

h_1 : το ύψος βροχόπτωσης τη χρονική στιγμή, mm

h_2 : το συνολικό ύψος βροχόπτωσης, mm

μ : συντελεστής

Με βάση τη σχέση υπολογίζονται τα ύψη βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας (μέσα στη συνολική διάρκεια). Τα ύψη αυτά είναι αθροιστικά. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές τους που είναι τα ύψη βροχής κάθε χρονικού διαστήματος και κατόπιν γίνεται η κατανομή τους ως εξής: Το μεγαλύτερο ύψος τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά και ούτω καθεξής.

Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος και έντονο ανάγλυφο και με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά επιλέγεται η 6ωρη, η 12ωρη και η 24ωρη βροχή. Αναπτύχθηκαν υετογράμματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς και συγκεκριμένα για 5, 10, 25, 50 και 100 έτη. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζονται συνολικά 15 υετογραφήματα σχεδιασμού (3 για κάθε περίοδο επαναφοράς) και άλλα 30 υετογραφήματα σχεδιασμού (6 για κάθε περίοδο επαναφοράς) μετά την υλοποίηση του πρώτου σεναρίου δηλαδή την αύξηση και μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%, 20%, 30%).

3.3.6 Πρότυπο βασικής ροής και πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος

➤ Πρότυπο βασικής ροής

Στην παρούσα υδρολογική ανάλυση, απουσία μετρήσεων και δεδομένων για την προσομοίωση της βασικής ροής, επιλέχθηκε να μην ενσωματωθεί η βασική ροή στο υδρολογικό μοντέλο.

➤ Πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος η απλοποιημένη μέθοδος Muskingum. Για κάθε ξεχωριστό τμήμα υδατορεύματος ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων διόδευσης με τον παρακάτω τρόπο (McCarthy, 1938).

Αρχικά υπολογίζεται για κάθε τμήμα υδατορεύματος το μήκος του σε περιβάλλον GIS και ως ταχύτητα του κύματος θεωρήθηκε ταχύτητα ίση με 1 m/s. Με βάση το εγχειρίδιο χρήσης που παρέχει το πρόγραμμα HEC-HMS για την προσέγγιση της παραμέτρου K προτείνεται ο λόγος του μήκους υδατορεύματος προς την ταχύτητα του κύματος όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση.

$$K = \frac{L}{3600V} \quad (3.8)$$

όπου:

K : παράμετρος, h

L : μέγιστο μήκος υδατορεύματος, m

V : μέση ταχύτητα ροής, m/s

Στην συνέχεια, για πολύ μεγάλα μήκη υδατορεύματος πραγματοποιείται διαχωρισμός σε επιπλέον τμήματα ίσου μήκους έτσι ώστε να ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη (Yuan and Qaiser, 2011):

$$2K < \Delta t < K \quad (3.9)$$

όπου:

K : παράμετρος, h

Δt : χρονικό βήμα προσομοίωσης, min

Ο αριθμός των υπορευμάτων για κάθε τμήμα του υδατορεύματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$n = \text{int} \left[2x \frac{L}{\Delta t} \right] + 1 \quad (3.10)$$

όπου:

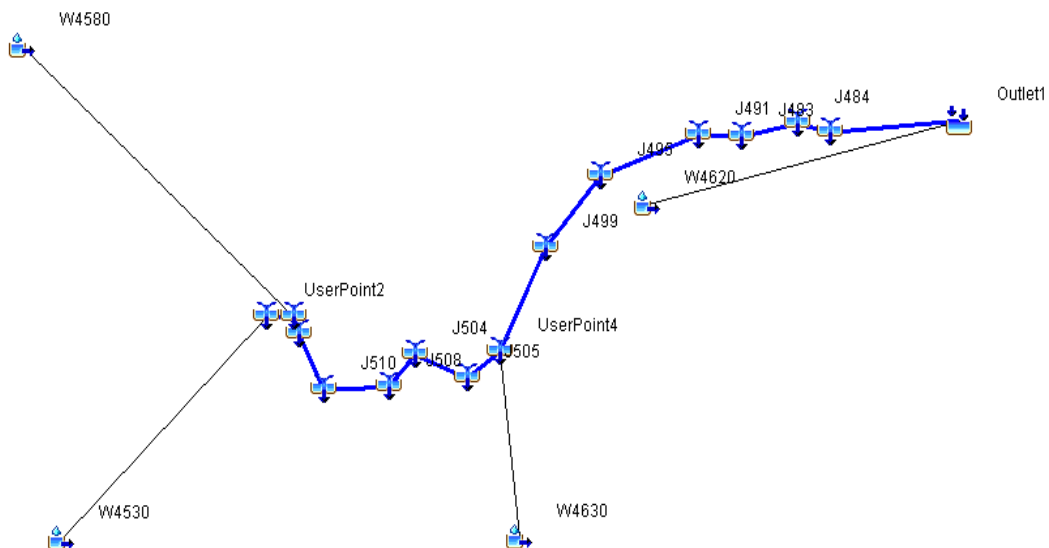
x : παράμετρος μεθόδου διόδευσης

L : μήκος υδατορεύματος από την έξοδο μιας λεκάνης μέχρι την επόμενη, m

V : ταχύτητα ροής, 1 m/s

3.4 Μοντέλο λεκάνης απορροής στο πρόγραμμα HEC-HMS

Αρχικά μέσω της εντολής Import εισάγεται το basin model δηλαδή το μοντέλο της λεκάνης απορροής όπως αυτό δημιουργήθηκε στο GIS με την χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.3. Στο περιβάλλον HEC-HMS δίνεται η δυνατότητα προβολής του χάρτη της λεκάνης καθώς και των ποταμών με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 3.27). Οι υπολεκάνες απορροής μετονομάστηκαν σε W4580, W4530, W4630, W4620, αυτόματα, καθώς και όλα τα υπόλοιπα υδρολογικά στοιχεία κατά την διάρκεια προετοιμασίας των αρχείων εισόδου σε περιβάλλον GIS.



Εικόνα 3.27: Μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS

3.4.1 Διεργασίες και προετοιμασία προσομοίωσης στο HEC-HMS

Η δημιουργία μετεωρολογικών μοντέλων είναι μια από τις βασικές λειτουργίες που παρέχονται στο HEC-HMS. Η κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου εισάγει τα στοιχεία της μετεωρολογικής πληροφορίας που ενσωματώνει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν 15 μετεωρολογικά μοντέλα το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετική περίοδο επαναφοράς (5, 10, 25, 50 και 100 έτη) και διαφορετική διάρκεια βροχόπτωσης (6, 12 και 24 ώρες). Στην συνέχεια για την εκτέλεση του πρώτου σενάριου δημιουργήθηκαν και για τις 6 μεταβολές της βροχόπτωσης 15 μετεωρολογικά μοντέλα, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετική περίοδο επαναφοράς (5, 10, 25, 50 και 100 έτη) για διάρκεια βροχόπτωσης 24 ώρες. Για την δημιουργία του δεύτερου σεναρίου, αύξηση της αστικοποίησης, μετά τον επαναπροσδιορισμένο του αριθμού καμπύλης CN δημιουργήθηκαν 15 μετεωρολογικά μοντέλα το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετική περίοδο επαναφοράς (5, 10, 25, 50 και 100 έτη) και διαφορετική διάρκεια βροχόπτωσης (6, 12 και 24 ώρες). Τα σενάρια περιγράφονται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του μετεωρολογικού μοντέλου επιλέγεται η εντολή Components → Meteorologic Manager. Έπειτα, ορίζεται, από τον χρήστη, το χρονικό βήμα που στην παρούσα εργασία ήταν τα 10 λεπτά καθώς επίσης και η έναρξη και η λήξη του επεισοδίου βροχόπτωσης. Η διαδικασία

αυτή εκτελείται μέσω της εντολής: Components → Control Specifications Manager.

Εν συνεχεία, μέσω της εντολής: Components → Time-Series Data manager εισήχθησαν τα βροχομετρικά δεδομένα, που υπολογίσθηκαν με βάση την όμβρια καμπύλη που επιλέξαμε για την λεκάνη απορροής και διαμορφώθηκαν από την εφαρμογή της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Σημειώνεται ότι για να δεχθεί το μετεωρολογικό μοντέλο τα δεδομένα της βροχόπτωσης γίνεται αντιστοίχιση αυτών με το μοντέλο της λεκάνης απορροής. Στην τελευταία φάση πριν την εκτέλεση των υπολογισμών, το HEC-HMS ζητά από το χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο προσομοίωσης, στο οποίο καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και τα δεδομένα εισόδου, που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα βήματα. Η ενεργοποίηση της εντολής γίνεται μέσω του μενού Component → Control specifications manager.

Αφού έχουν προετοιμαστεί όλα τα αρχεία εισόδου στο HEC-HMS, ξεκινάνε οι διαδικασίες της προσομοίωσης και η παραγωγή αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν το υδρογράφημα κάθε λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών και άμεσης απορροής. Η υπολογιστική διαδικασία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη δημιουργία ενός αρχείου υπολογισμών, το οποίο θα εκτελέσει το πρόγραμμα. Σε αυτό ορίζεται το μοντέλο λεκάνης απορροής και το μετεωρολογικό μοντέλο που θα ληφθεί υπόψη κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης και πραγματοποιείται μέσω της εντολής Compute → Simulation Run Manager. Τέλος, με την εντολή Compute/ Select Run, εκτελείται η προσομοίωση.

3.5 Σενάρια

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερη αύξηση στην συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα. Η υδρολογική απόκριση των λεκανών απορροής και κατά συνέπεια οι πλημμύρες που μπορεί να προκληθούν δεν είναι εύκολο να κατηγοριοποιηθούν λόγω των πολυποίκιλων αιτιών που μπορούν να τις προκαλέσουν και των παραγόντων, που επηρεάζουν την εξέλιξή τους, όπως είναι ο τόπος και η διάρκειά τους. Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζει την εξέλιξη τους είναι η εντατική αστικοποίηση περιοχών με κατάληψη του φυσικού τους περιβάλλοντος, ένα φαινόμενο το οποίο τροποποιεί την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής (Γιάννου, 2015). Ένας ακόμα από τους πιο σημαντικούς δυναμικούς παράγοντες στην εκδήλωση πλημμυρών είναι η ένταση της βροχόπτωσης (Amadio et al., 2003). Στον Ελλαδικό χώρο παρατηρείται έντονη διακύμανση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, με τη δυτική Ελλάδα να παρουσιάζει αυξημένες βροχοπτώσεις σε σύγκριση με την υπόλοιπη Ελλάδα (Τσακσάρας Δ, 2019). Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν δύο σενάρια, τα οποία θα

αναλυθούν παρακάτω, το πρώτο με μια σταδιακή αύξηση και μείωση της βροχόπτωσης και το δεύτερο με αύξηση της αστικοποίησης. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μια σύγκριση στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής του Βενέτικου.

3.5.1 Σενάριο αύξησης/μείωσης της βροχόπτωσης.

Για την υλοποίηση αυτού του σεναρίου αρχικά επιλέχθηκε η τιμή της αύξησης ή της μείωσης που θα πραγματοποιηθεί στην βροχόπτωση. Επιλέχθηκε μία σταδιακή αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%, 20%, 30% και μια αντίστοιχη μείωση κατά 10%, 20%, 30%. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν, όπως φαίνεται στον Πίνακα 10, εκ νέου τα νέα ύψη βροχής για χρονική διάρκεια $t = 24$ h και περιόδους επαναφοράς $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη.

Ακολούθησε η δημιουργία των νέων υετογραμμάτων με την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής και τέλος με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στο HEC-HMS ξαναυπολογίστηκαν η παροχή αιχμής, ο όγκος απορροής και σχεδιάστηκαν τα νέα πλημμυρικά υδρογραφήματα για διάρκεια $t = 24$ h και περιόδους επαναφοράς $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 (Πίνακας 11).

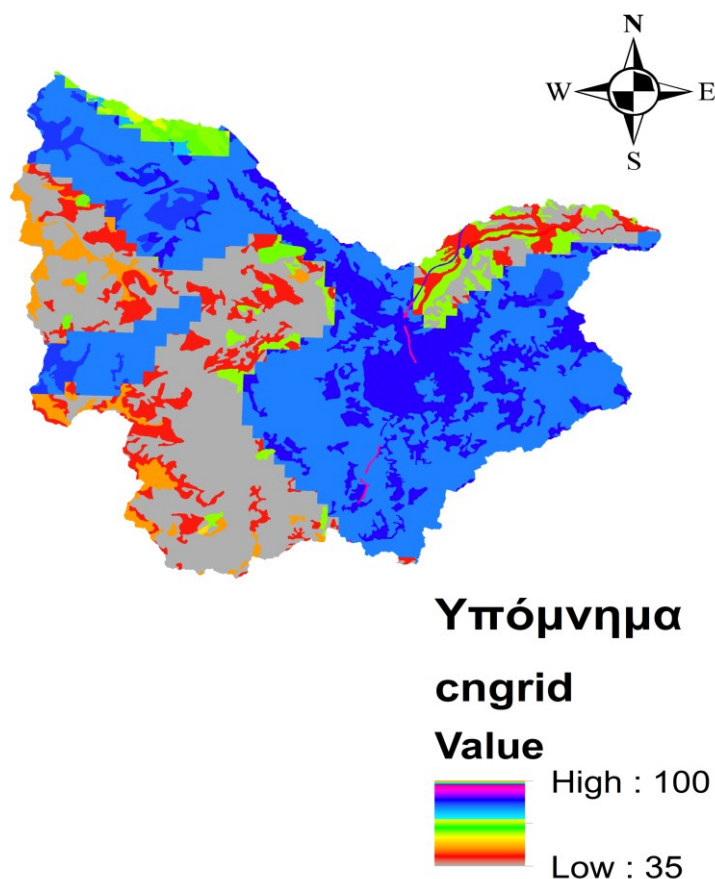
Πίνακας 11: Οι τιμές της σημειακής βροχόπτωσης μετά την σταδιακή αύξηση και μείωση αυτής για $t = 24$ h και $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη

Ποσοστιαία Μεταβολή	Σημειακή βροχόπτωση (mm)				
	T=5 έτη	T=10 έτη	T=25 έτη	T=50 έτη	T=100 έτη
0%	69.0	79.3	93.0	103.9	115.3
10%	75.9	87.2	102.3	114.3	126.8
20%	82.8	95.1	111.6	124.7	138.3
30%	89.7	103.0	120.9	135.1	149.8
-10%	62.1	71.3	83.7	93.5	103.7
-20%	55.2	63.4	74.4	83.1	92.2
-30%	48.3	55.5	65.1	72.7	80.7

3.5.2 Σενάριο αύξησης της αστικοποίησης

Για την πραγματοποίηση αυτού του σεναρίου αρχικά έγινε μια αύξηση του αστικού ιστού, χειροκίνητα, σε περιβάλλον GIS της περιοχής μελέτης συνολικής έκτασης από $1,98$ km^2 σε $4,22$ km^2 . Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον

επαναυπολογισμό του αριθμού καμπύλης CN (Εικόνα 3.28) για κάθε υπολεκάνη απορροής ξεχωριστά με την μεθοδολογία που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 3.3. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 12.



Εικόνα 3.28: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN μετά την αύξηση του αστικού ιστού

Πίνακας 12: Αρχικές Τιμές CN και νέες CN μετά την αύξηση της αστικοποίησης

Υπολεκάνη	Αρχικές τιμές Curve Number	Νέες τιμές Curve Number	Ποσοστιαία μεταβολή (%)
SUBBASIN-1	67.69	69.35	2.4
SUBBASIN-2	49.95	52.10	4.3

SUBBASIN-3	74.05	75.01	1.3
SUBBASIN-4	61.48	61.48	0.0

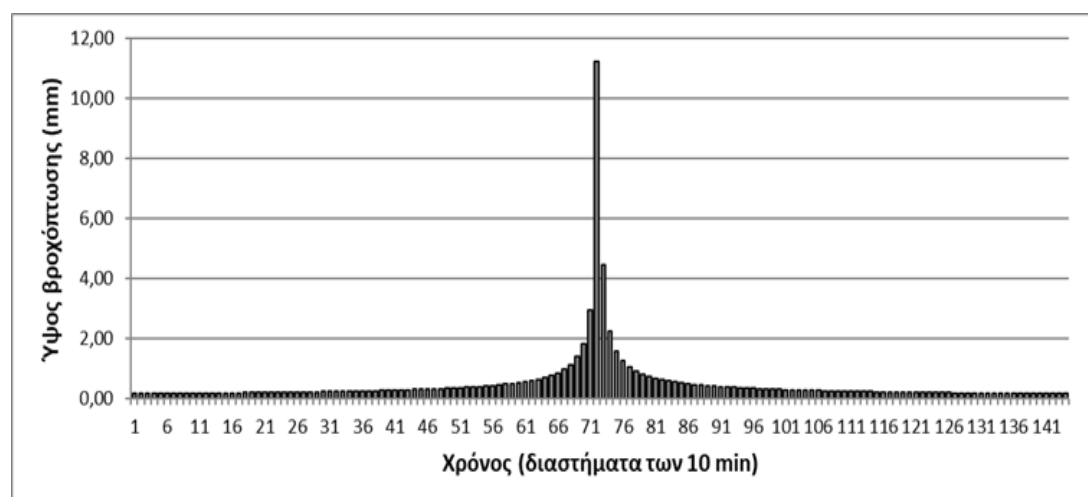
Ο αριθμός καμπύλης CN της υπολεκάνης 4 (SUBBASIN-4) δεν άλλαξε καθώς στην συγκεκριμένη υπολεκάνη δεν υπήρχε αστικός ιστός οπότε και δεν μεταβλήθηκε. Στην συνέχεια, ακολούθησε η δημιουργία των νέων υετογραμμάτων με την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής και τέλος με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στο HEC-HMS ξαναυπολογίστηκαν η παροχή αιχμής, ο όγκος απορροής και σχεδιάστηκαν τα νέα πλημμυρικά υδρογραφήματα για διάρκειες $t = 6, 12$ και 24 ώρες και για περιόδους επαναφοράς $T = 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Υετογράμματα με βάση τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ

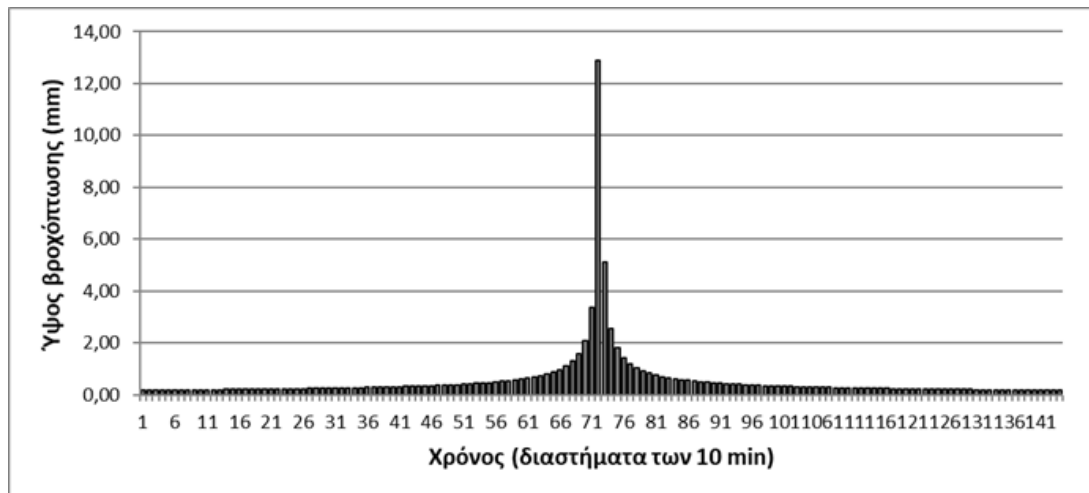
Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογράμματα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού 5 ετών (Εικόνα 4.1), 10 ετών (Εικόνα 4.2), 25 ετών (Εικόνα 4.3), 50 ετών (Εικόνα 4.4), 100 ετών (Εικόνα 4.5) και για διάρκεια βροχόπτωσης 24 h. Τα υετογράμματα για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 25, 50, και 100 έτη και για διάρκειες βροχόπτωσης $t = 6$ ώρες και 12 ώρες παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π1 έως Εικόνα Π10).

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται το υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 11.23 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 69.0 mm.



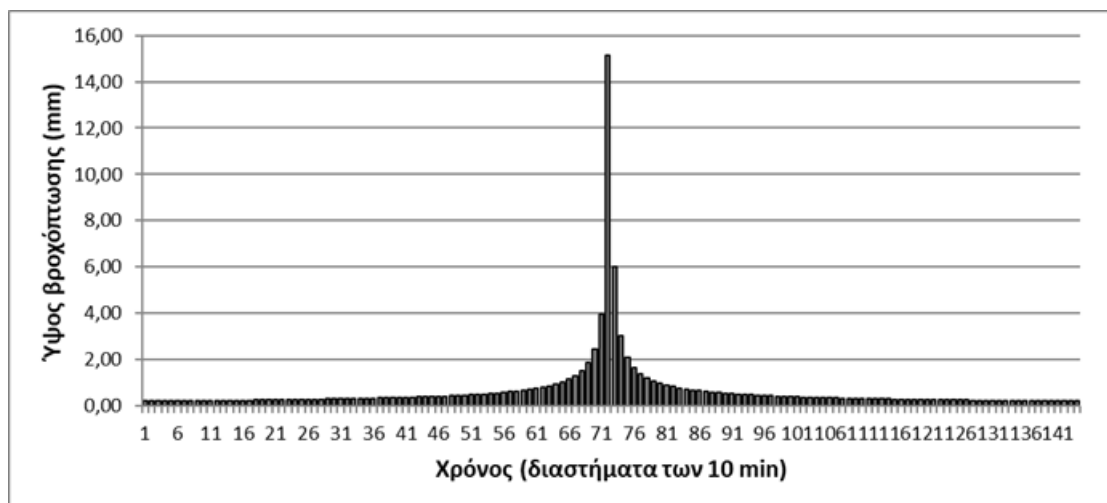
Εικόνα 4.1: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται το υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 12.9 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 79.3 mm.



Εικόνα 4.2: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

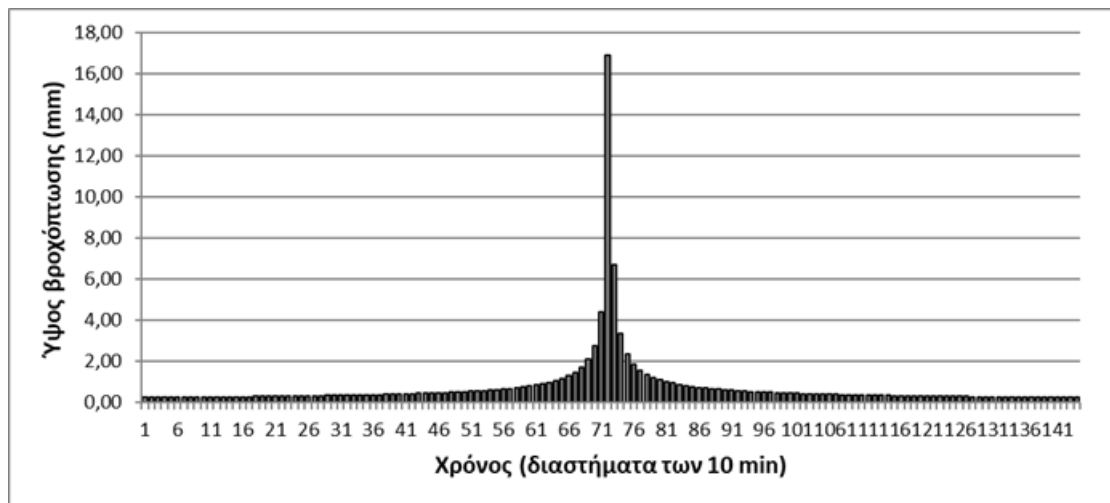
Στην Εικόνα 4.3 απεικονίζεται το υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 15.3 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 93.0 mm.



Εικόνα 4.3: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

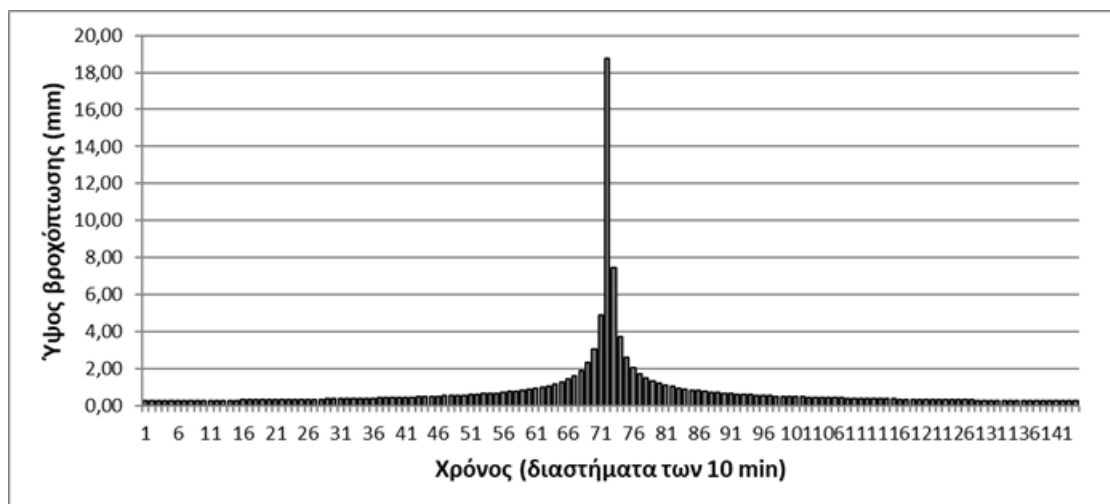
Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζεται το υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη

απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 19.9 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 103.9 mm.



Εικόνα 4.4: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

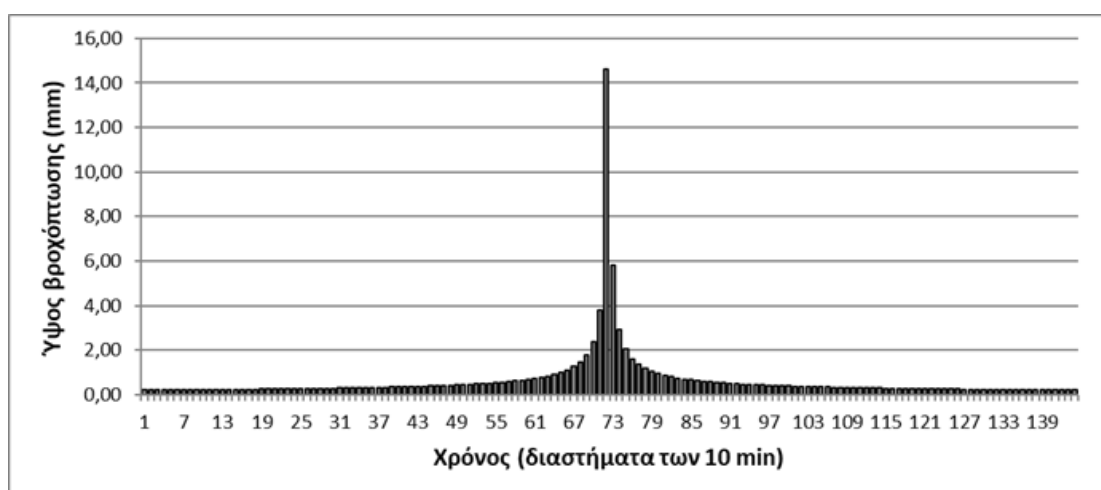
Στην Εικόνα 4.5 απεικονίζεται το υετόγραμμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 18.75 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 115.3 mm.



Εικόνα 4.5: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

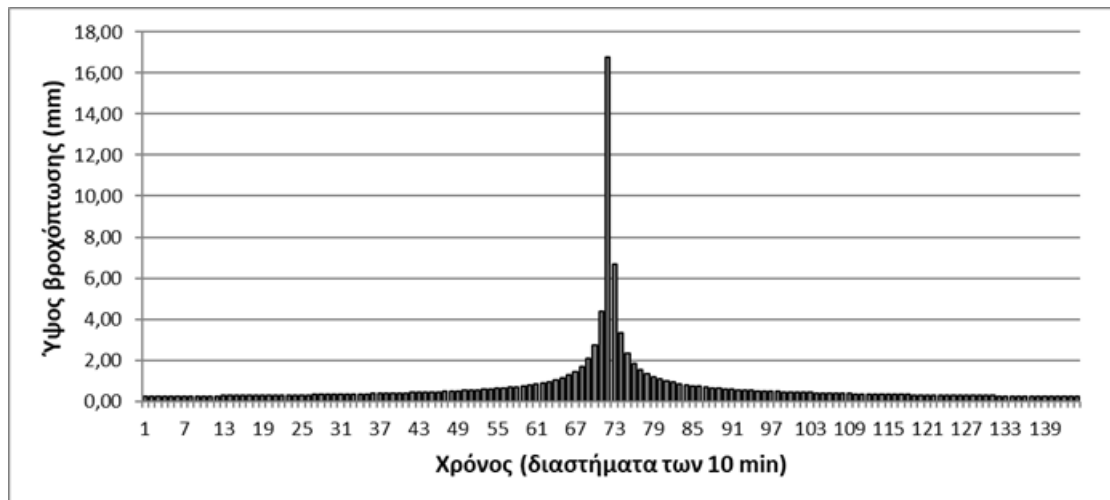
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογράμματα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού 5 ετών (Εικόνα 4.6), 10 ετών (Εικόνα 4.7), 25 ετών (Εικόνα 4.8), 50 ετών (Εικόνα 4.9), 100 ετών (Εικόνα 4.10), για διάρκεια βροχόπτωσης 24 h με αύξηση 30% που πραγματοποιήθηκε στο πρώτο σενάριο. Τα υετογράμματα για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 25, 50, και 100 έτη και για διάρκειες βροχόπτωσης $t = 6$ ώρες και 12 ώρες με αύξηση 30% παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π11 έως Εικόνα Π20).

Στην Εικόνα 4.6 απεικονίζεται το υετόγραμμα με αύξηση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 14.6 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 89.7 mm.



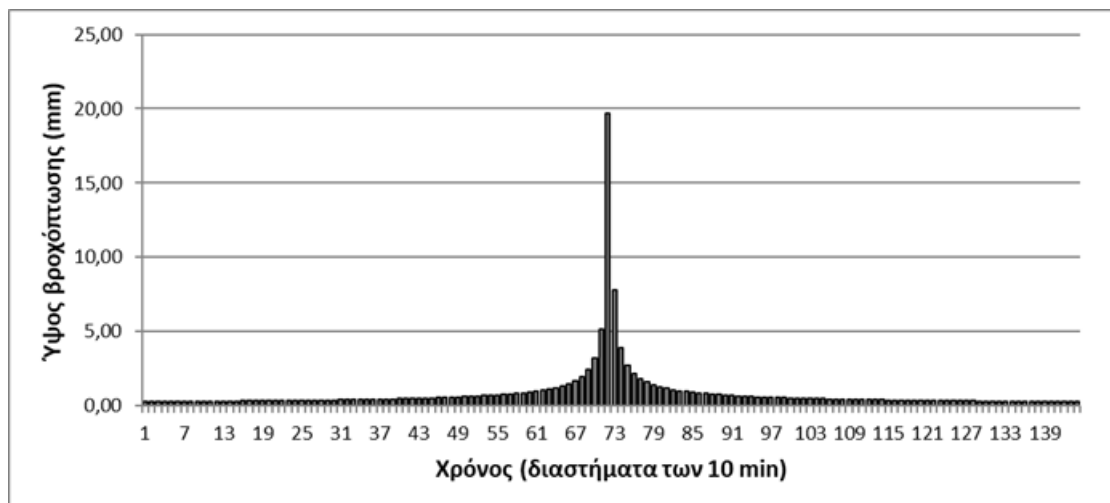
Εικόνα 4.6: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.7 απεικονίζεται το υετόγραμμα με αύξηση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 16.67 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 103.0 mm.



Εικόνα 4.7: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

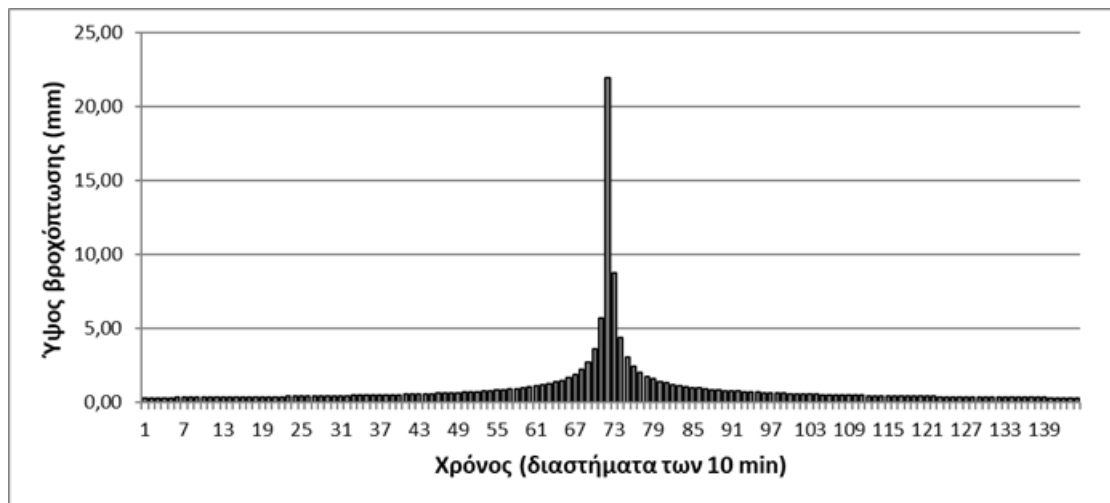
Στην Εικόνα 4.8 απεικονίζεται το υετόγραμμα με αύξηση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 19.67 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 120.9 mm.



Εικόνα 4.8: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

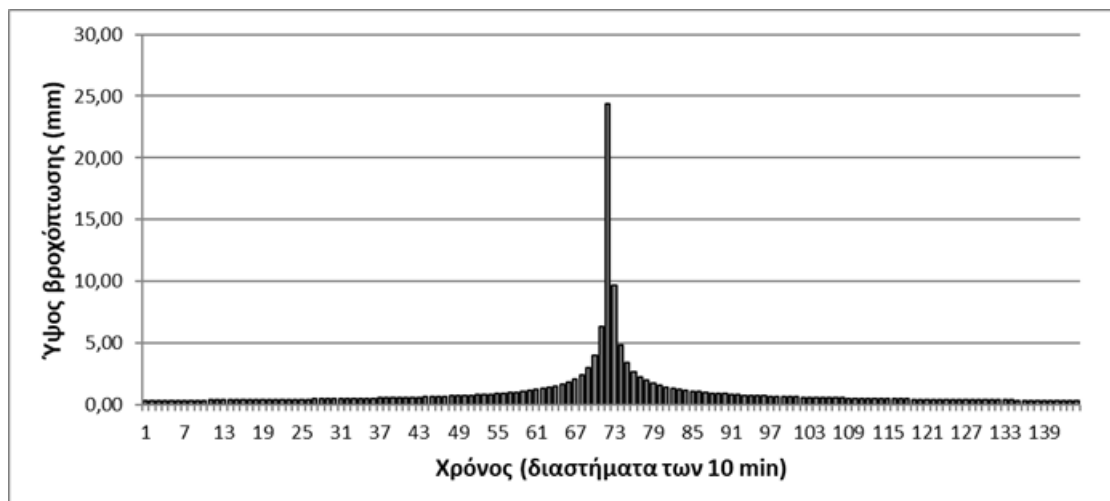
Στην Εικόνα 4.9 απεικονίζεται το υετόγραμμα με αύξηση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη

λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 21.97 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 135.1 mm.



Εικόνα 4.9: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

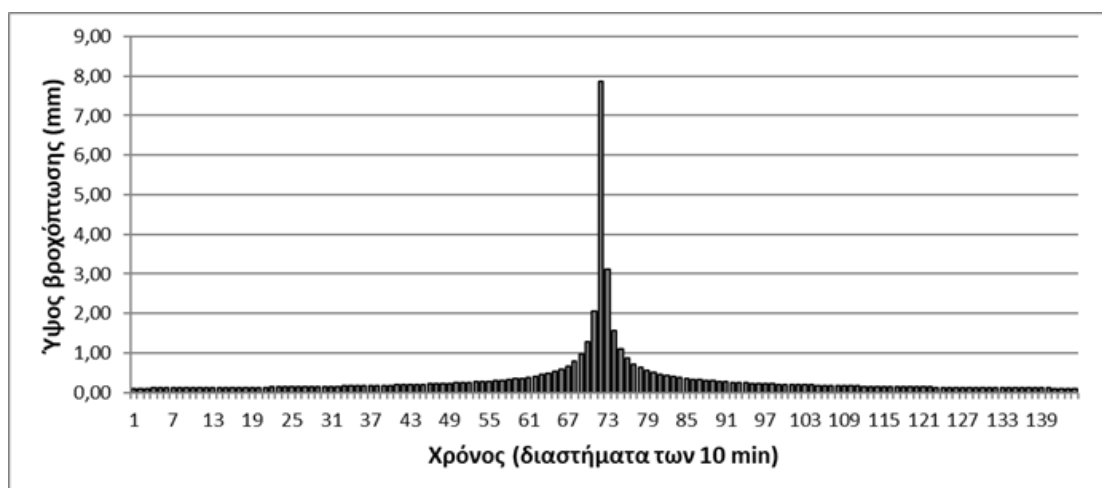
Στην Εικόνα 4.10 απεικονίζεται το υετόγραμμα με αύξηση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 24.37 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 149.8 mm.



Εικόνα 4.10: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

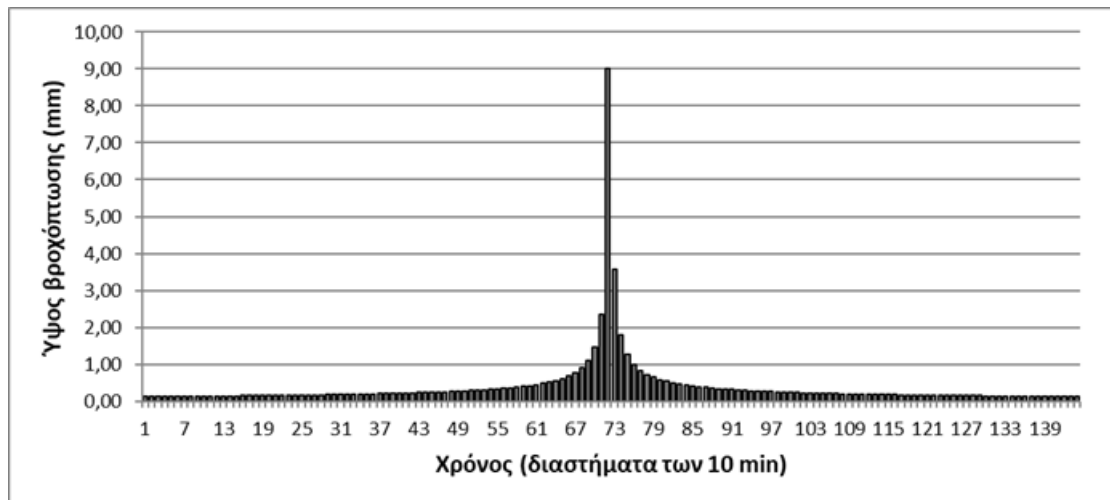
Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογράμματα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού 5 ετών (Εικόνα 4.11), 10 ετών (Εικόνα 4.12), 25 ετών (Εικόνα 4.13), 50 ετών (Εικόνα 4.14), 100 ετών (Εικόνα 4.15), για διάρκεια βροχόπτωσης 24 h με μείωση 30% που πραγματοποιήθηκε στο πρώτο σενάριο. Τα υετογράμματα για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 25, 50, και 100 έτη και για διάρκειες βροχόπτωσης $t = 6$ ώρες και 12 ώρες με μείωση 30% παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π21 έως Εικόνα Π30).

Στην Εικόνα 4.11 απεικονίζεται το υετόγραμμα με μείωση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 7.86 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 48.3 mm.



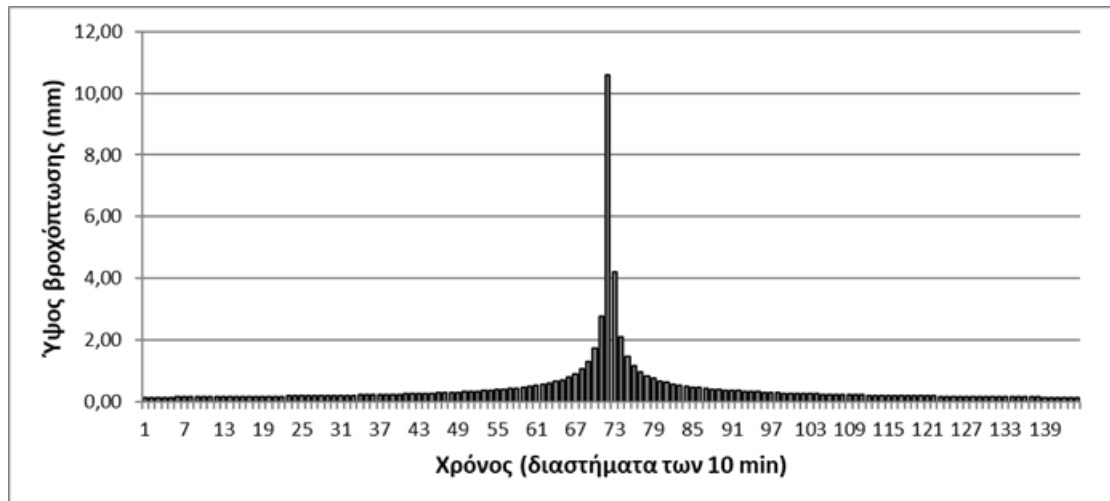
Εικόνα 4.11: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.12 απεικονίζεται το υετόγραμμα με μείωση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 9.02 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 55.5 mm



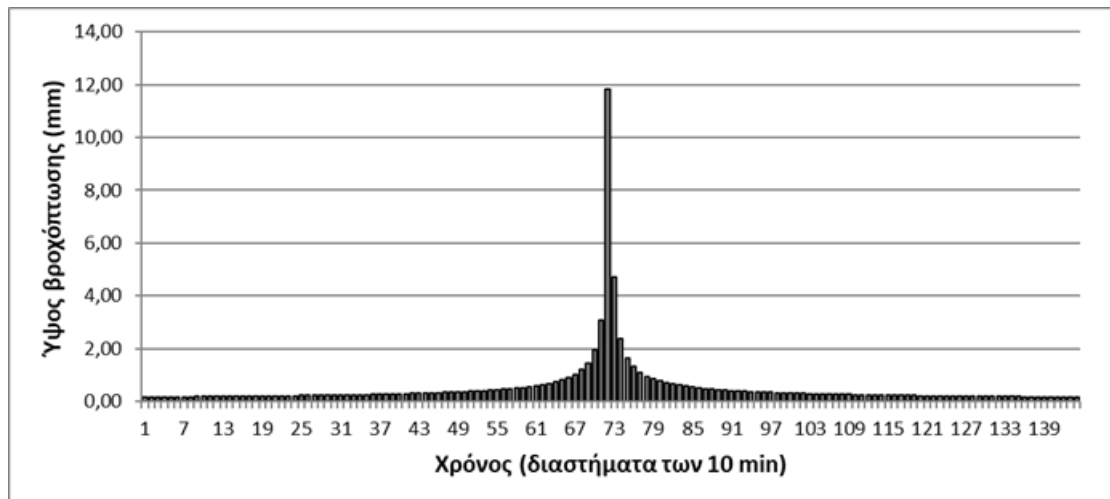
Εικόνα 4.12: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.13 απεικονίζεται το υετόγραμμα με μείωση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 10.59 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 65.1 mm.



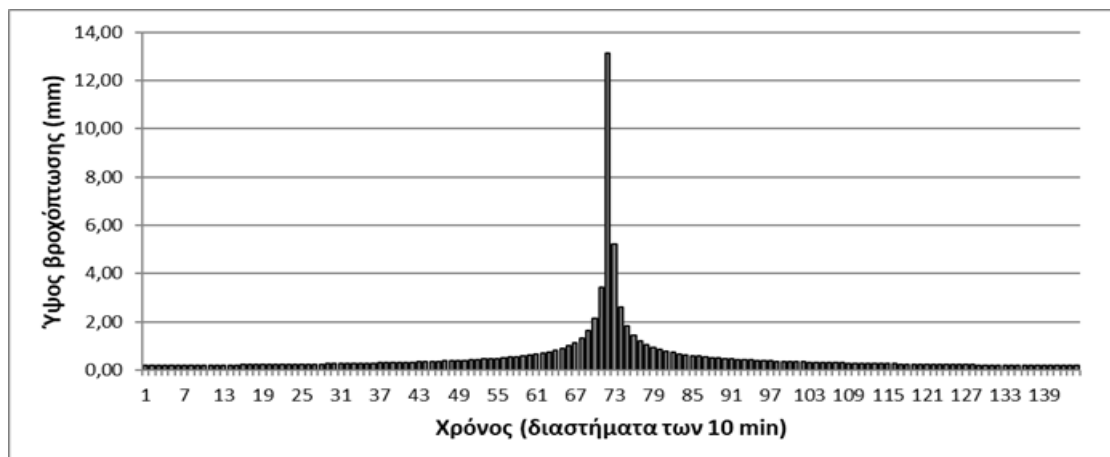
Εικόνα 4.13: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.14 απεικονίζεται το υετόγραμμα με μείωση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 11.83 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 72.7 mm.



Εικόνα 4.14: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

Στην Εικόνα 4.15 απεικονίζεται το υετόγραμμα με μείωση βροχόπτωσης 30% με περίοδο επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βενέτικου. Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης είναι 13,12 mm και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης είναι 80.7 mm.



Εικόνα 4.15: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 30% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ωρών, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου.

Στο Παράρτημα (Εικόνες Π1 έως Π30) παρατίθενται τα υετογράμματα για διάρκειες βροχόπτωσης $t = 6$ και 12 ώρες και για περιόδους επαναφοράς $T = 5$,

10, 25, 50, και 100 έτη καθώς επίσης και τα υετογράμματα για διάρκειες βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες και για περιόδους επαναφοράς $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη με αύξηση βροχόπτωσης 10% και 20% και με μείωση της βροχόπτωσης 10% και 20%, αντίστοιχα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 13 και 14.

Πίνακας 13: Μέγιστο και συνολικό ύψος βροχόπτωσης για $t = 6, 12$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη με αύξηση βροχόπτωσης 10% και 20% και με μείωση της βροχόπτωσής 10% και 20%.

T(έτη)	5	10	25	50	100
t (ώρες)	Μέγιστο ύψος βροχόπτωσης (mm)				
6	11.23	12.89	15.13	16.90	18.75
12	11.23	12.89	15.13	16.90	18.75
t (ώρες)	Συνολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)				
6	44.38	54.1	59.8	66.8	74.1
12	55.4	63.6	74.7	83.4	92.5

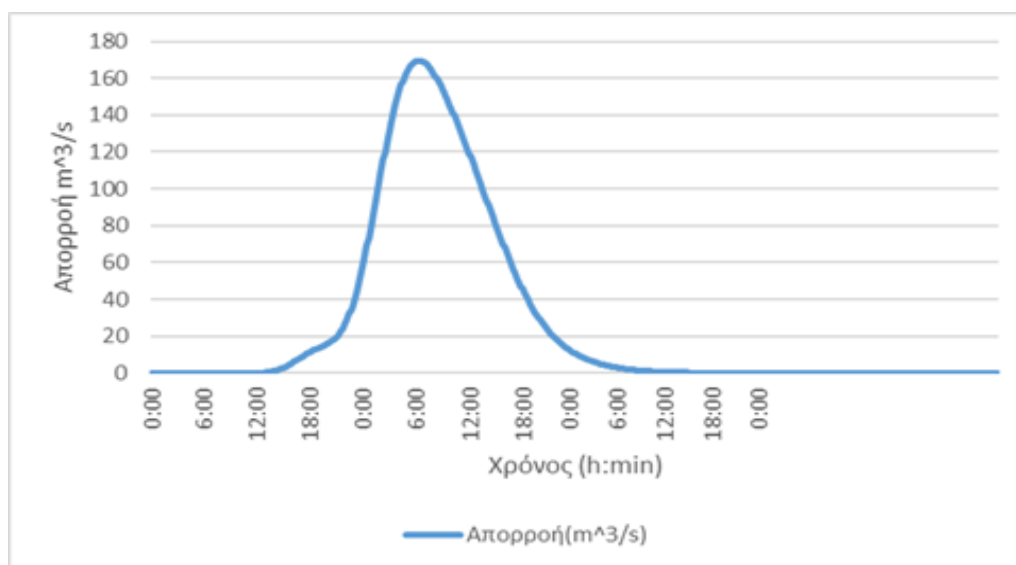
Πίνακας 14: Μέγιστο και συνολικό ύψος βροχόπτωσης για $t = 24$ ώρες και $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη με αύξηση βροχόπτωσης 10% και 20% και με μείωση της βροχόπτωσής 10% και 20%.

Μέγιστο ύψος βροχόπτωσης (mm)					
T	5	10	25	50	100
+10%	12.35	14.18	15.13	16.90	18.75
+20%	13.47	15.47	18.16	20.28	22.50
-10%	10.10	11.60	13.62	15.21	16.87
-20%	8.98	10.31	12.11	13.52	15.00
Συνολικό ύψος βροχόπτωσης(mm)					
T	5	10	25	50	100
+10%	75.9	87.2	102.3	114.3	126.8
+20%	82.8	95.1	111.6	124.7	138.3
-10%	62.1	71.3	83.7	93.5	103.7
-20%	55.2	63.4	74.4	83.1	92.2

4.2. Πλημμυρογραφήματα των αποτελεσμάτων του HEC-HMS

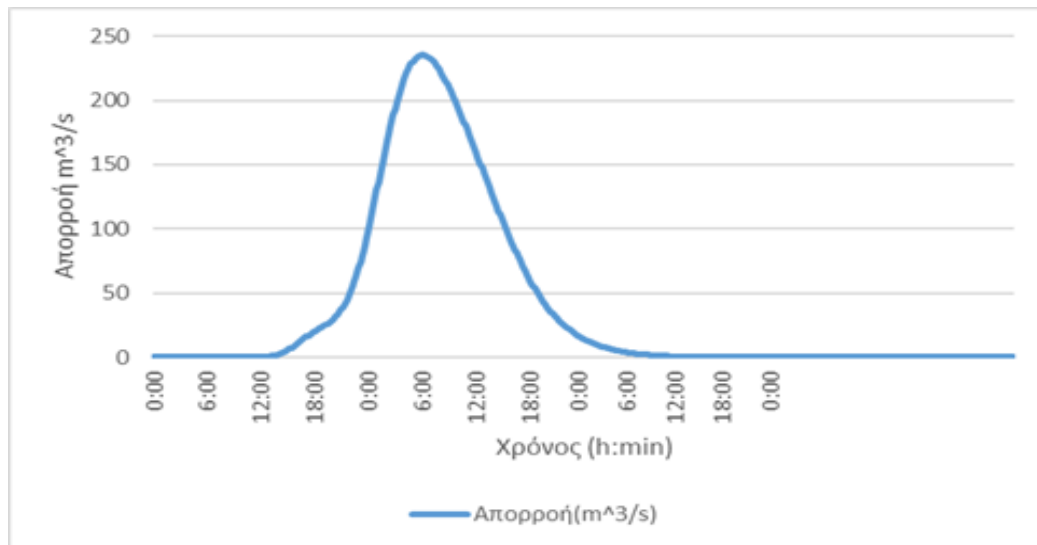
Παρακάτω παρατίθενται για κάθε περίοδο επαναφοράς και πιο συγκεκριμένα για $T = 5, 10, 25, 50,$ και 100 έτη) και για διάρκεια βροχόπτωσης 24 ώρες, τα

αντίστοιχα πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Βενέτικου. Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 5$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $165.7 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 30 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής και ο πλημμυρικός όγκος είναι 10.54 mm .



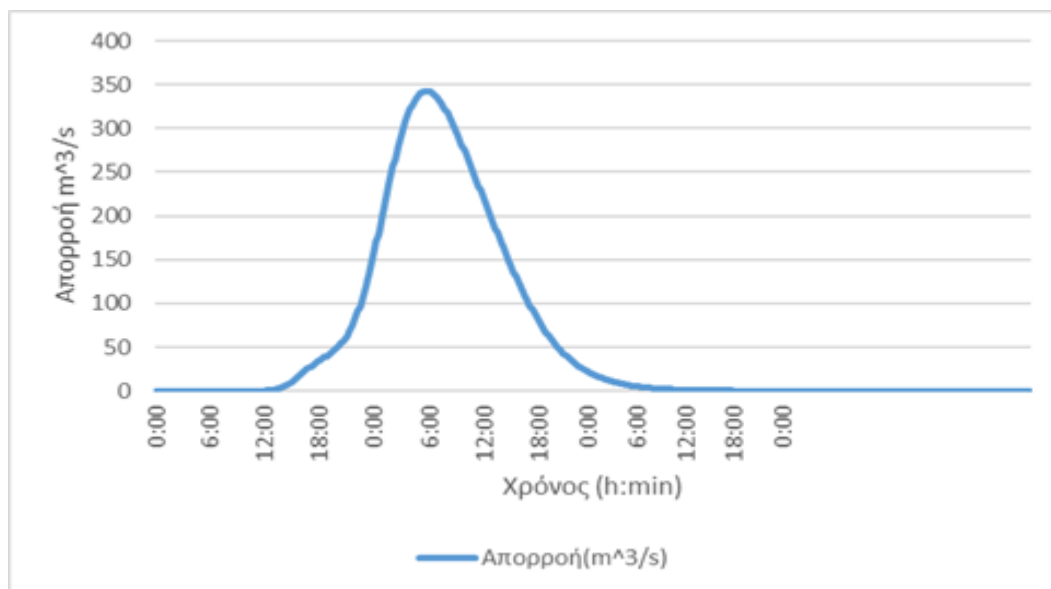
Εικόνα 4.16: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες

Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 10$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $235.2 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 50 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 14.92 mm .



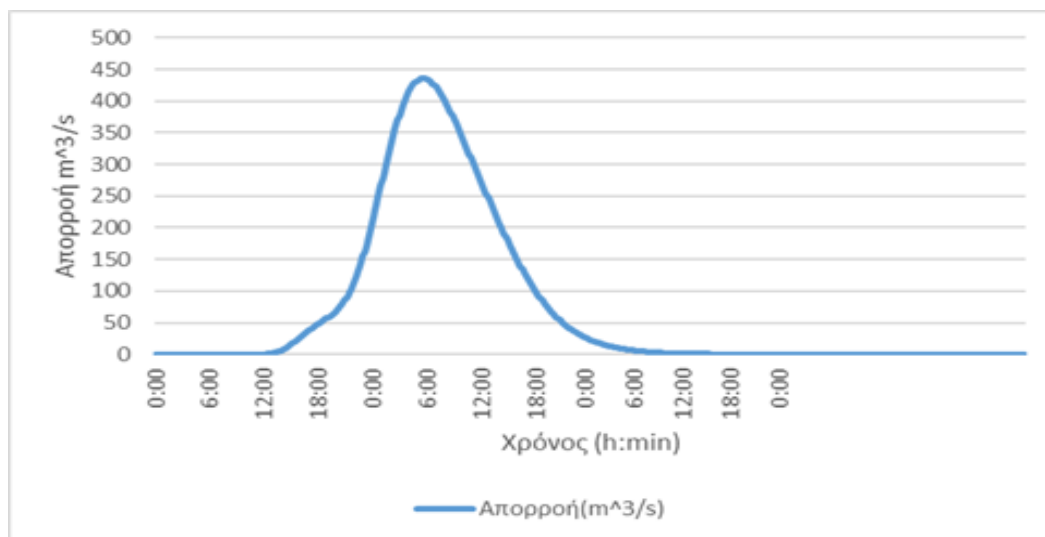
Εικόνα 4.17: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες

Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 25$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $342.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 40 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 21.65 mm .



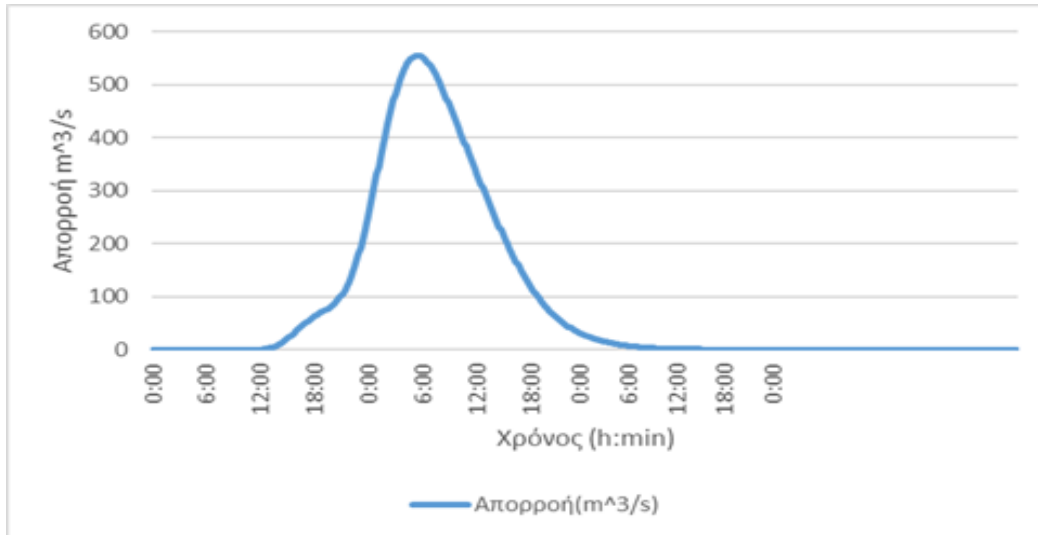
Εικόνα 4.18: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες

Στην Εικόνα 4.19 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 50$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $435.85 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 30 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 27.53 mm .



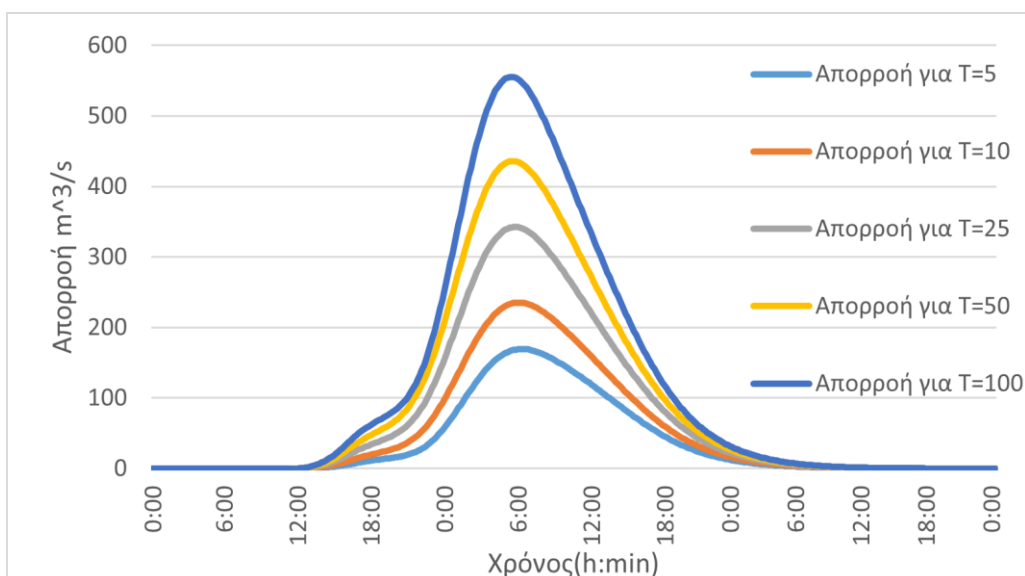
Εικόνα 4.19: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες

Στην Εικόνα 4.20 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 100$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $541.4 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 20 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 34.18 mm .



Εικόνα 4.20: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες

Στην Εικόνα 4.21 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για κάθε περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη παροχή αιχμής παρουσιάζεται για περίοδο επαναφοράς 5 ετών ($165.7 \text{ m}^3/\text{s}$) και η μέγιστη για περιόδος επαναφοράς 100 ετών ($541.45 \text{ m}^3/\text{s}$), γεγονός που είναι λογικό καθώς όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς τόσο αυξάνεται και η απορροή.



Εικόνα 4.21: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες

Στο Παράρτημα (Εικόνες Π31 έως Π40) της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται και τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης για διάρκειες βροχόπτωσης t = 6 και 12 ώρες για περιόδους επαναφοράς T = 5, 10, 25, 50 και 100 έτη με τα δεδομένα της παροχής αιχμής, του χρόνου αιχμής από την αρχή του επεισοδίου βροχόπτωσης και του πλημμυρικού όγκου που φαίνονται στον Πίνακα 15 και Πίνακα 16.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για t= 6 ώρες και T= 5, 10, 25,50 και 100 έτη.

t=6 h	Παροχή αιχμής (m³/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	60.5	20 ώρες και 20 λεπτά	2.92
10	92.1	20 ώρες και 10 λεπτά	4.52
25	144.1	20 ώρες και 0 λεπτά	7.18
50	192.4	19 ώρες και 50 λεπτά	9.68
100	249.3	19 ώρες και 50 λεπτά	12.65

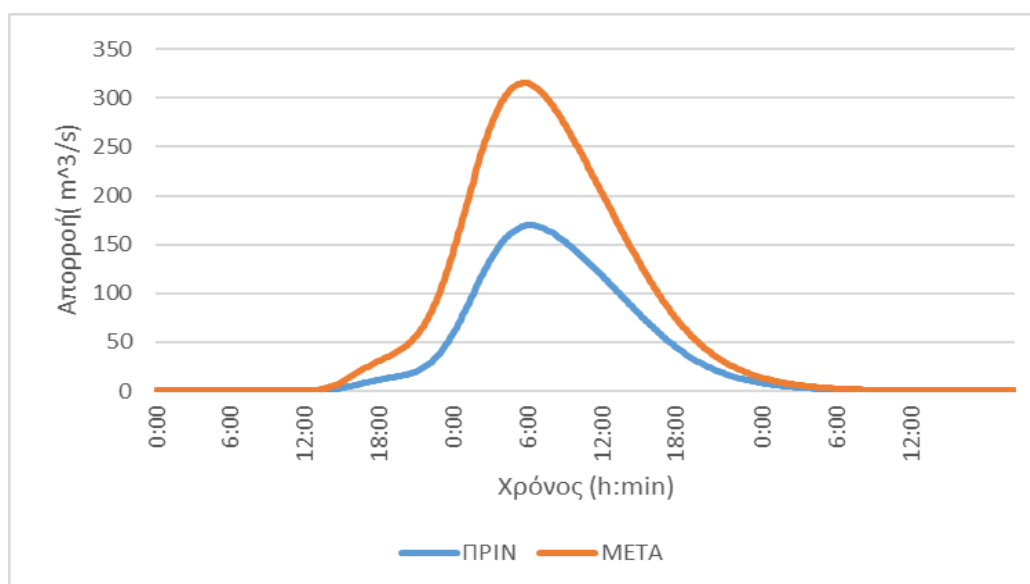
Πίνακας 16: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για t= 12 ώρες και T= 5, 10, 25,50 και 100 έτη.

t=12 h	Παροχή αιχμής (m³/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	66.3	24 ώρες και 0 λεπτά	5.78
10	99.5	23 ώρες και 40 λεπτά	8.51
25	153.5	23 ώρες και 30 λεπτά	12.89
50	203.4	23 ώρες και 20 λεπτά	16.84
100	261.8	23 ώρες και 10 λεπτά	21.39

Στην συνέχεια παρατίθενται για κάθε περίοδο επαναφοράς (T =5, 10, 25, 50, 100 έτη) και για διάρκεια βροχόπτωσης 24 ώρες, συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την εφαρμογή του πρώτου σεναρίου και πιο συγκεκριμένα την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%.

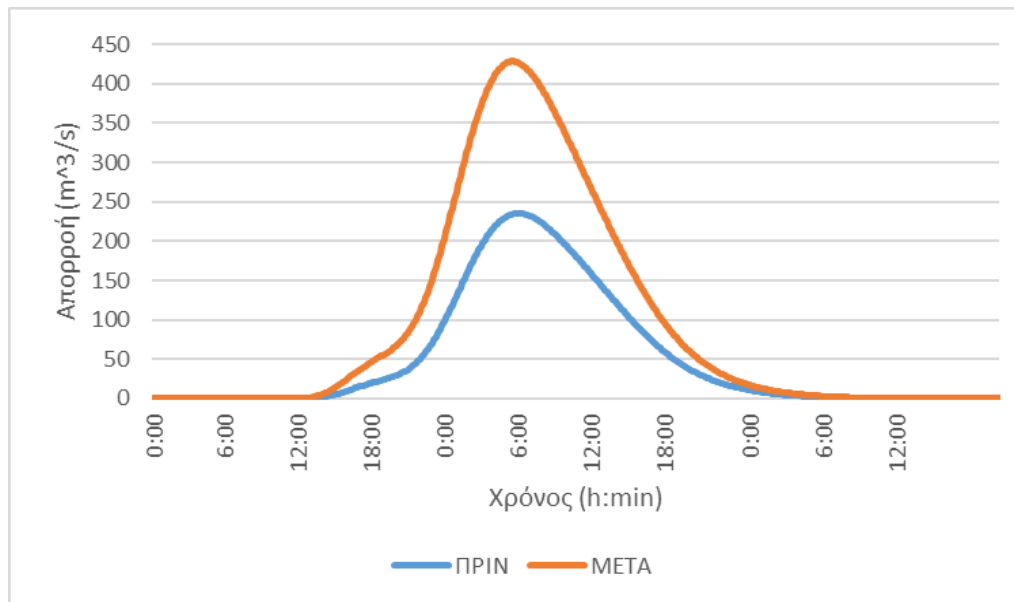
Στην Εικόνα 4.22 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου

επιαναφοράς $T = 5$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $315.42 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 86% αύξηση και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 40 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 40 λεπτά νωρίτερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 19.95 mm δηλαδή έχει αυξηθεί κατά 89.2% σε σχέση με το αρχικό σενάριο.



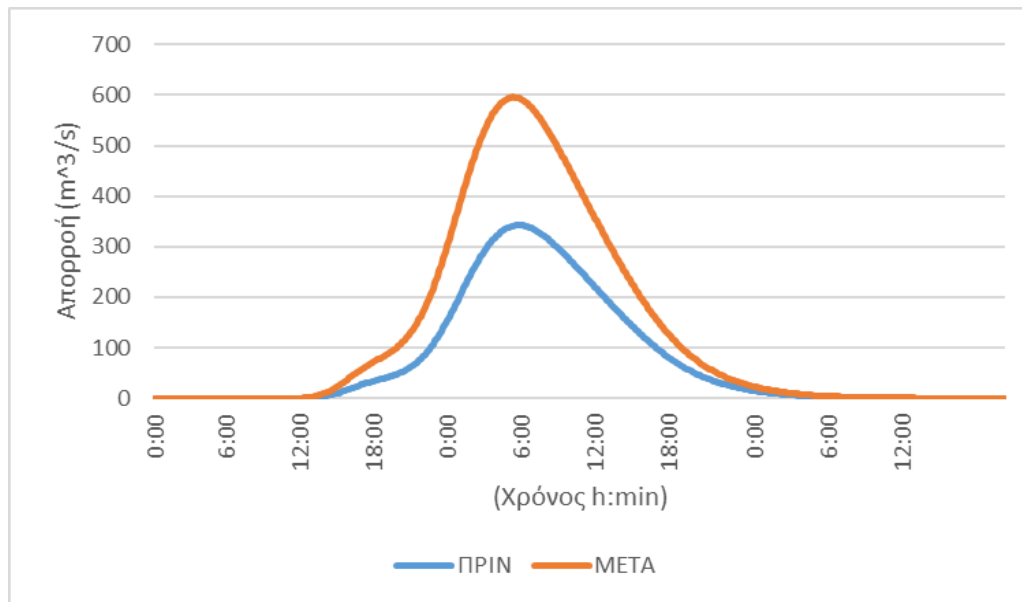
Εικόνα 4.22: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επιαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.23 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επιαναφοράς $T = 10$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $428.48 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 82.1% αύξηση και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 30 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 20 λεπτά νωρίτερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 27.06 mm δηλαδή 81.4% αύξηση.



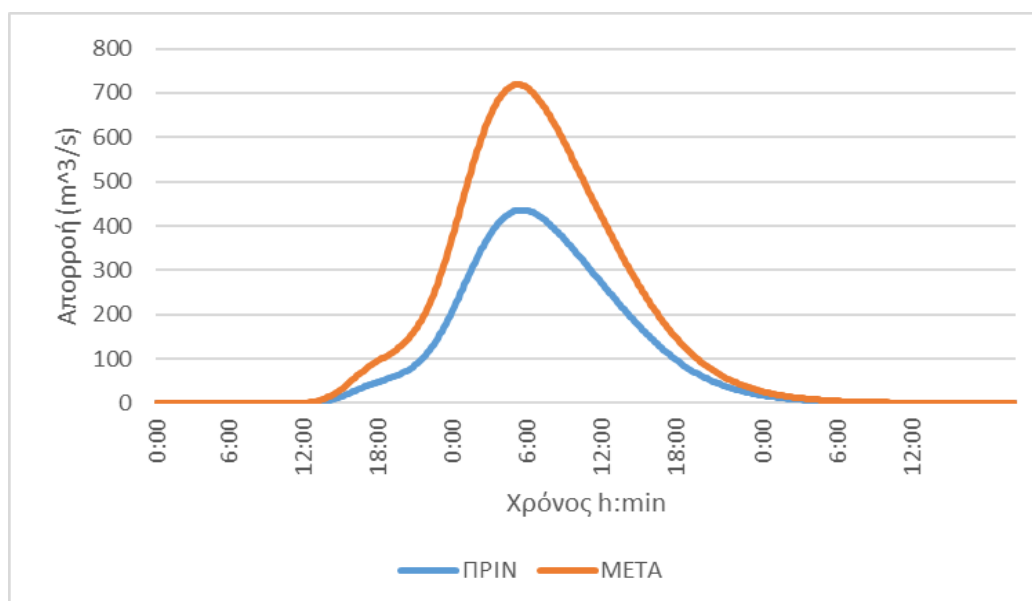
Εικόνα 4.23: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%.

Στην Εικόνα 4.24 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 25$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $595.98 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 74% αύξηση και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 30 λεπτά νωρίτερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 37.62 mm δηλαδή 73.7% αύξηση.



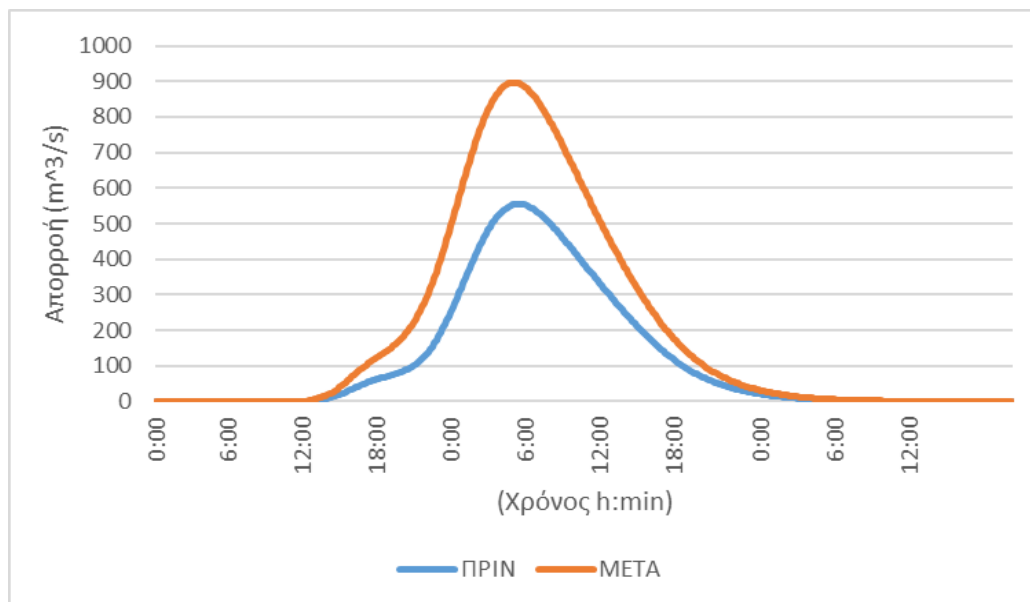
Εικόνα 4.24: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.25 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 50$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $719.19 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 65% αύξηση και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 20 λεπτά νωρίτερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 45.37 mm δηλαδή 64% αύξηση.



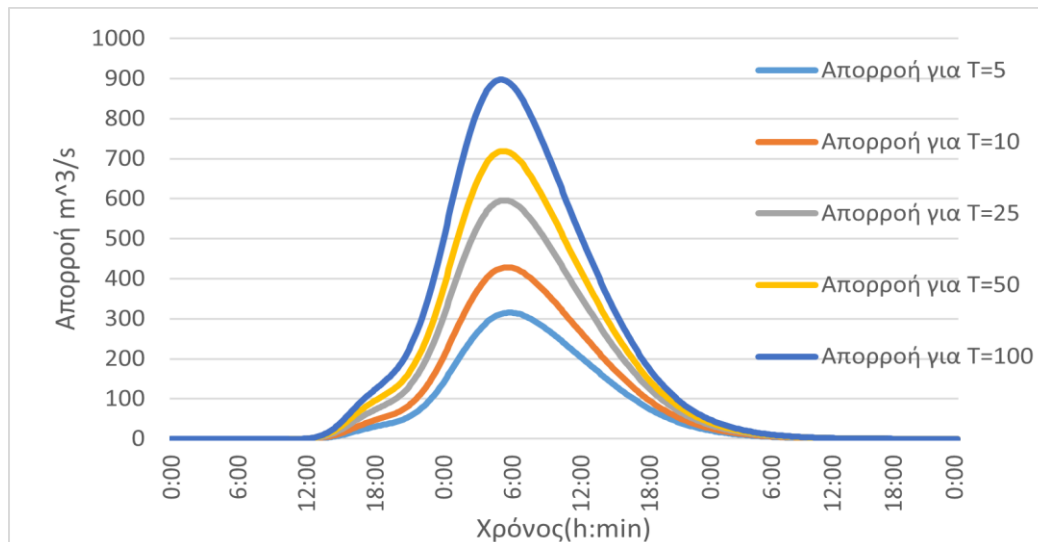
Εικόνα 4.25: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.26 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 100$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $897.2 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 61.3% αύξηση και παρουσιάζεται στις 28 ώρες και 50 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 30 λεπτά νωρίτερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 56.62 mm δηλαδή 62.3% αύξηση.



Εικόνα 4.26: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%

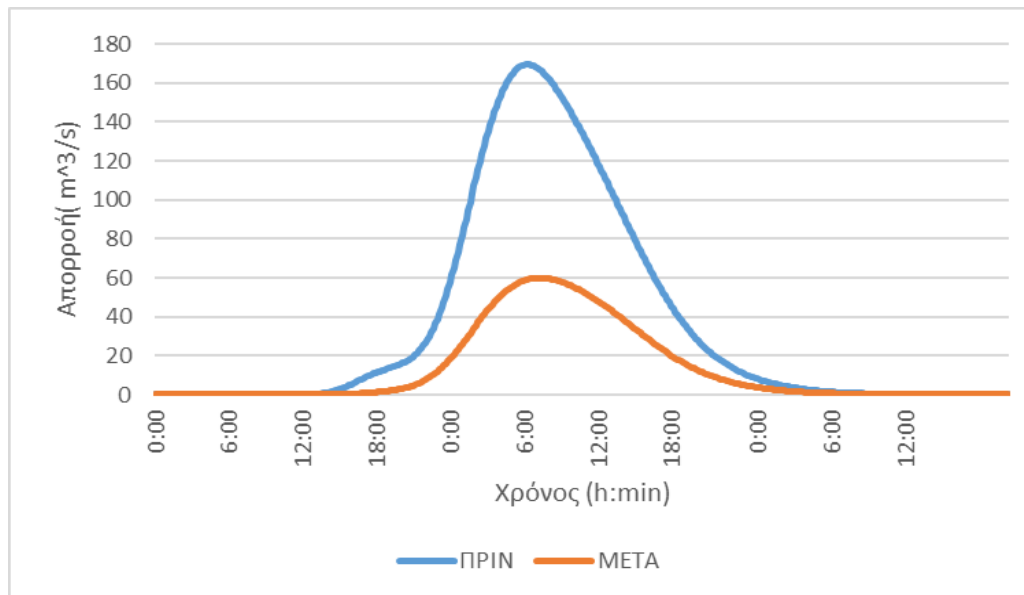
Στην Εικόνα 4.27 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για κάθε περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24 \text{ h}$ μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη παροχή αιχμής παρουσιάζεται για περίοδο επαναφοράς 5 ετών ($315,42 \text{ m}^3/\text{s}$) και η μέγιστη για περίοδος επαναφοράς 100 ετών ($897.2 \text{ m}^3/\text{s}$), γεγονός που είναι λογικό καθώς όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς τόσο αυξάνεται και η απορροή.



Εικόνα 4.27: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες μετά την αύξηση στην βροχόπτωση κατά 30%

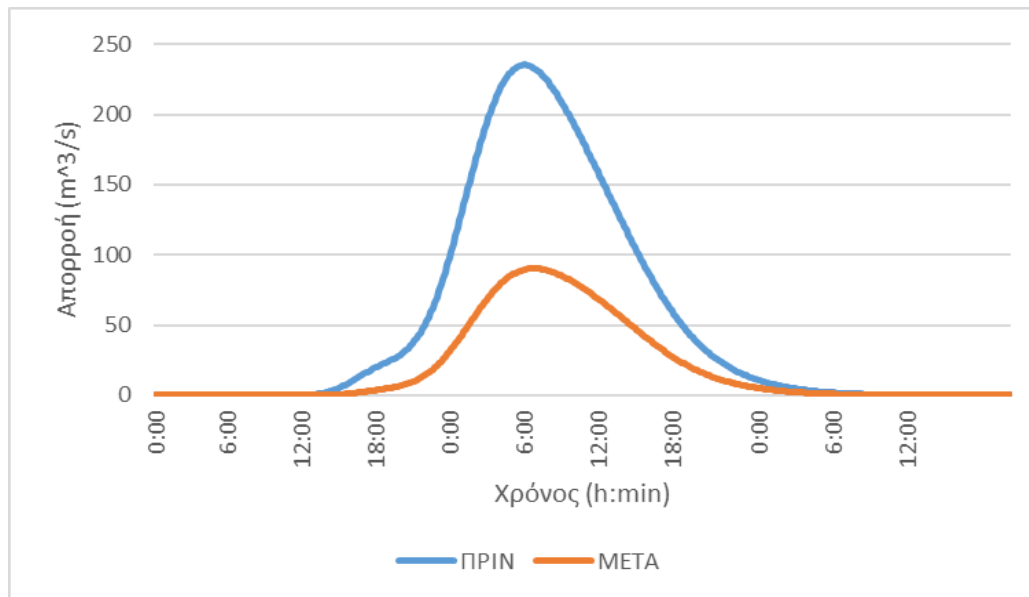
Στην συνέχεια παρατίθενται για κάθε περίοδο επαναφοράς (T =5, 10, 25, 50, 100 έτη) και για διάρκεια βροχόπτωσης 24 ώρες, τα συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την εφαρμογή του πρώτου σεναρίου και πιο συγκεκριμένα την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%.

Στην Εικόνα 4.28 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς T = 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης t = 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με 59.89 m³/s δηλαδή 64.6% μειωμένη και παρουσιάζεται στις 31 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 1 ώρα αργότερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 3.68 mm δηλαδή 65% μείωση.



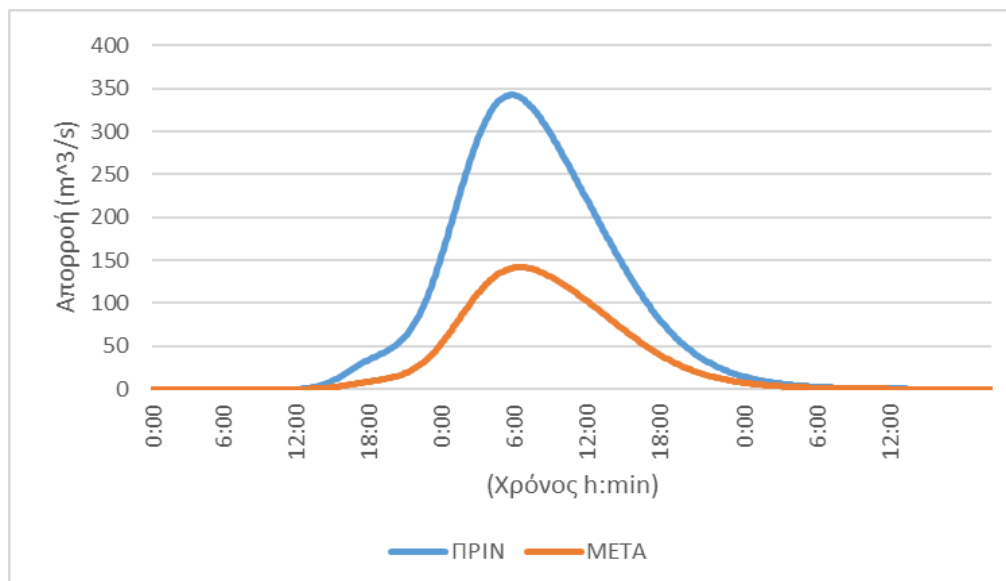
Εικόνα 4.28: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.29 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 10$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $90.28 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 61.6% μείωση και παρουσιάζεται στις 30 ώρες και 40 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 50 λεπτά αργότερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 5.8 mm δηλαδή 61.1% μείωση.



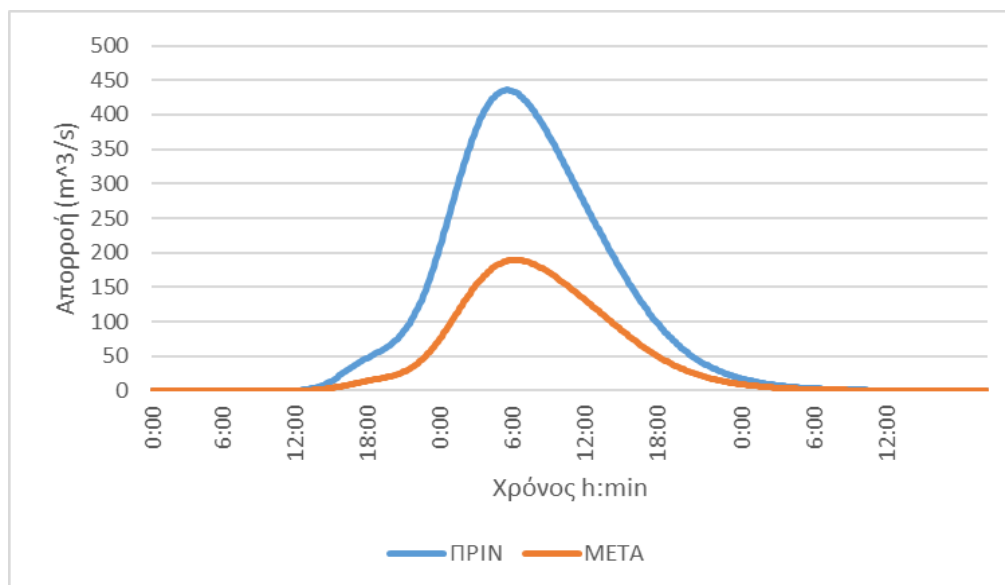
Εικόνα 4.29: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.30 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 25$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $141.79 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 58.6% μείωση και παρουσιάζεται στις 30 ώρες και 20 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 40 λεπτά αργότερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 9.05 mm δηλαδή 58.1% μείωση.



Εικόνα 4.30: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%

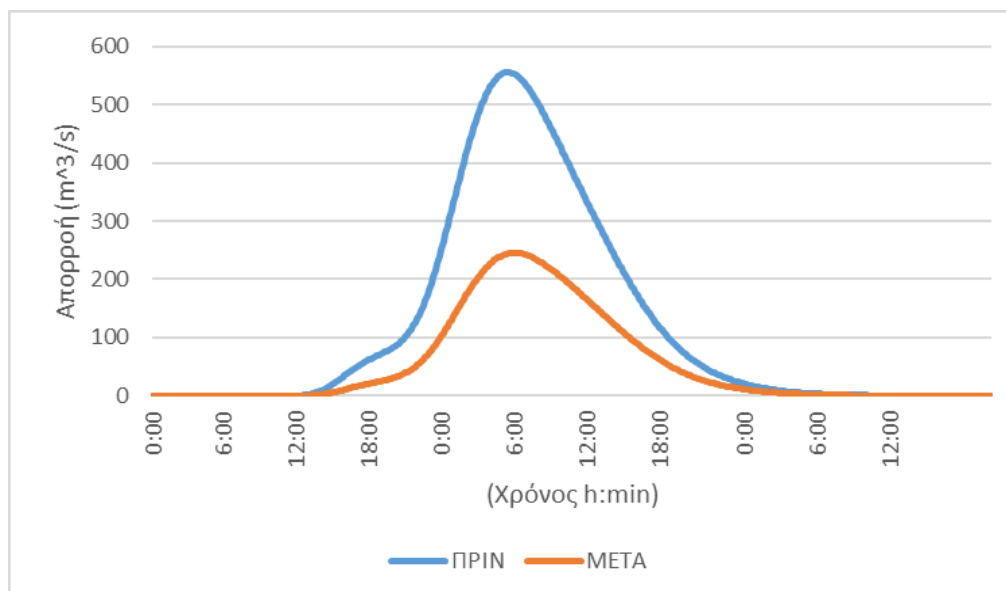
Στην Εικόνα 4.31 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 50$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $189.5 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 56.5% μείωση και παρουσιάζεται στις 30 ώρες μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 30 λεπτά αργότερα. Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 12.05 mm δηλαδή 56.2% μείωση.



Εικόνα 4.31: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%

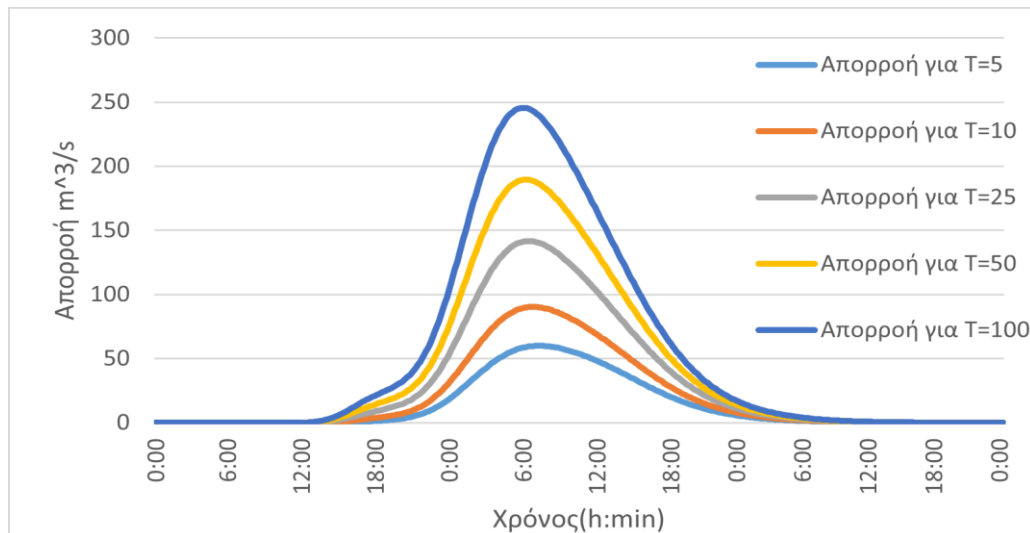
Στην Εικόνα 4.32 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 100$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η νέα παροχή αιχμής είναι ίση με $245.46 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή 55.78% μείωση και παρουσιάζεται στις 29

ώρες και 50 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής δηλαδή 30 λεπτά αργότερα . Ο νέος πλημμυρικός όγκος είναι 15.56 mm δηλαδή 54.5% μείωση.



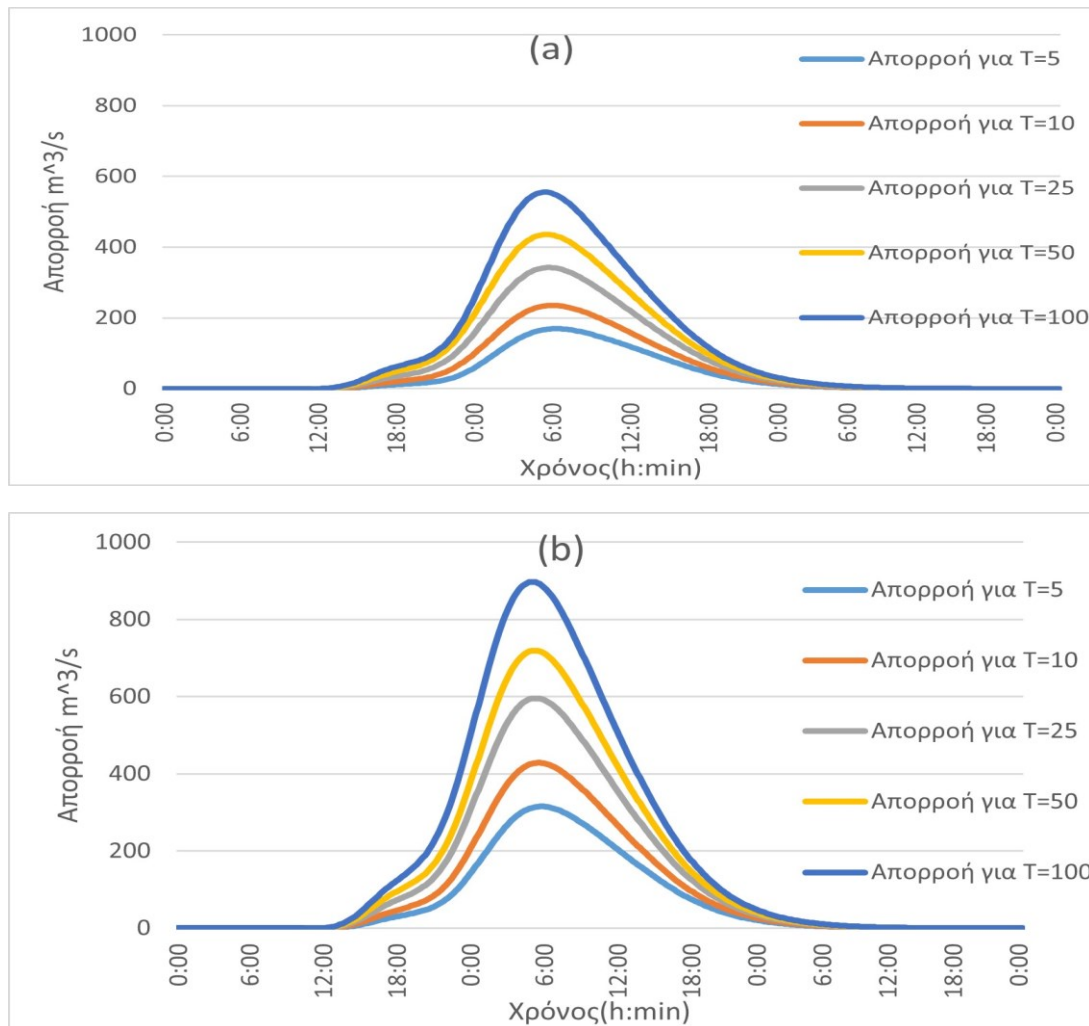
Εικόνα 4.32: Συγκριτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%

Στην Εικόνα 4.33 παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για κάθε περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη παροχή αιχμής παρουσιάζεται για περίοδο επαναφοράς 5 ετών ($59.89 \text{ m}^3/\text{s}$) και η μέγιστη για περίοδος επαναφοράς 100 ετών ($245.46 \text{ m}^3/\text{s}$), γεγονός που είναι λογικό καθώς όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς τόσο αυξάνεται και η απορροή.



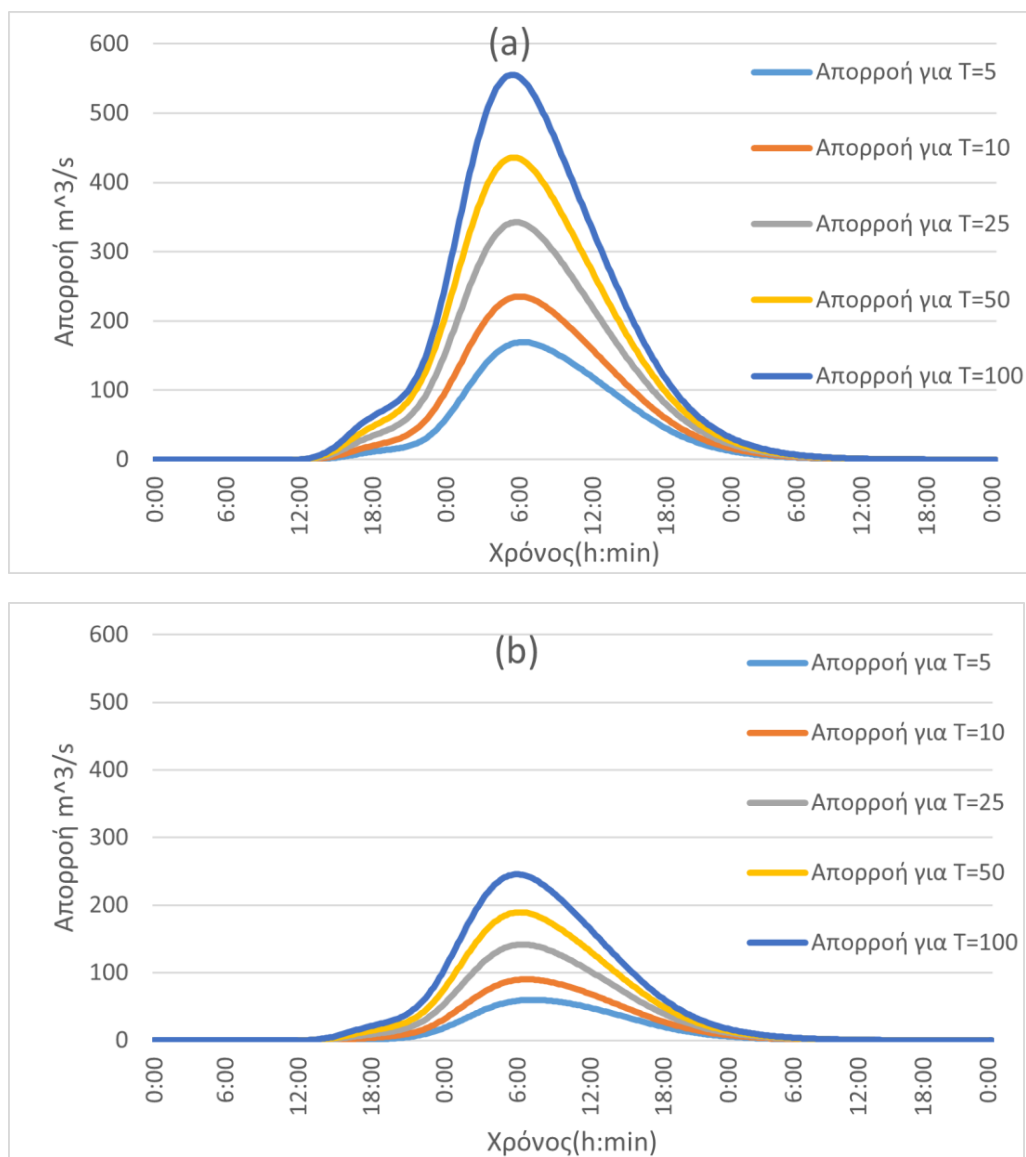
Εικόνα 4.33: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες μετά την μείωση στην βροχόπτωση κατά 30%

Με σκοπό την πιο αποτελεσματική σύγκριση στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης παρατίθενται τα συγκεντρωτικά πλημμυρογραφήματα (Εικόνα 4.34) για περίοδο επαναφοράς T = 2, 5, 10, 25, 50 και 100 έτη και για διάρκεια βροχόπτωσης t = 24 h που αφορούν την περίοδο πριν και μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 30%.



Εικόνα 4.34: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες πριν (a) και μετά (b) την αύξηση στην βροχόπτωση κατά 30%

Ομοίως με σκοπό την πιο αποτελεσματική σύγκριση στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης παρατίθενται τα συγκεντρωτικά πλημμυρογραφήματα (Εικόνα 4.35) για περίοδο επαναφοράς T = 5, 10, 25, 50 και 100 έτη και για διάρκεια βροχόπτωσης t = 24 ώρες που αφορούν την περίοδο πριν και μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 30%.



Εικόνα 4.35: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες πριν (a) και μετά (b) την μείωση στην βροχόπτωση κατά 30%

Στο Παράρτημα (Εικόνες Π41 έως Π60) της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται και τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης για διάρκειες βροχόπτωσης t = 24 ώρες για περιόδους επαναφοράς T = 5, 10, 25, 50, 100 έτη μετά την αύξηση και μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% και 20% με τα δεδομένα της παροχής αιχμής, του χρόνου αιχμής από την αρχή του επεισοδίου βροχόπτωσης και του πλημμυρικού όγκου που φαίνονται στους Πίνακα 17, Πίνακα 18, Πίνακα 19 και Πίνακα 20.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t= 24$ ώρες και $T= 5, 10, 25,50$ και 100 έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%

t=24 h	Παροχή αιχμής (m³/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	211.7	30 ώρες και 0 λεπτά	13.44
10	295.2	29 ώρες και 40 λεπτά	18.67
25	342.5	29 ώρες και 40 λεπτά	21.65
50	435.8	29 ώρες και 30 λεπτά	27.53
100	541.4	29 ώρες και 20 λεπτά	34.18

Πίνακας 18: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t= 24$ ώρες και $T= 5, 10, 25,50$ και 100 έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%

t=24 h	Παροχή αιχμής (m³/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	261.7	29 ώρες και 50 λεπτά	16.57
10	359.5	29 ώρες και 30 λεπτά	22.72
25	506.6	29 ώρες και 20 λεπτά	31.99
50	633.7	29 ώρες και 10 λεπτά	39.98
100	774.3	29 ώρες και 0 λεπτά	48.86

Πίνακας 19: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t= 24$ ώρες και $T= 5, 10, 25,50$ και 100 έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%

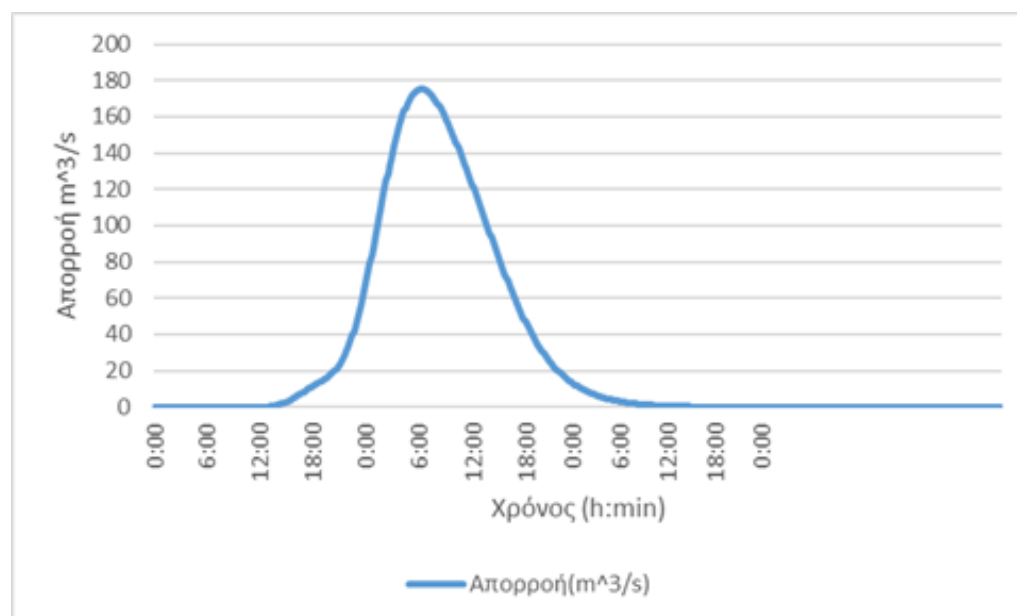
t=24 h	Παροχή αιχμής (m³/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	124.3	30 ώρες και 30 λεπτά	7.96
10	180.7	30 ώρες και 10 λεπτά	11.49
25	268.7	29 ώρες και 50 λεπτά	17.01
50	346.4	29 ώρες και 40 λεπτά	21.90
100	434.0	29 ώρες και 30 λεπτά	27.42

Πίνακας 20: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για $t=24$ ώρες και $T=5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%

$t=24$ h	Παροχή αιχμής (m^3/s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	89.0	30 ώρες και 40 λεπτά	5,72
10	131.9	30 ώρες και 20 λεπτά	8.43
25	201.4	30 ώρες και 0 λεπτά	12.79
50	264.0	29 ώρες και 50 λεπτά	16.72
100	336.0	29 ώρες και 40 λεπτά	21.24

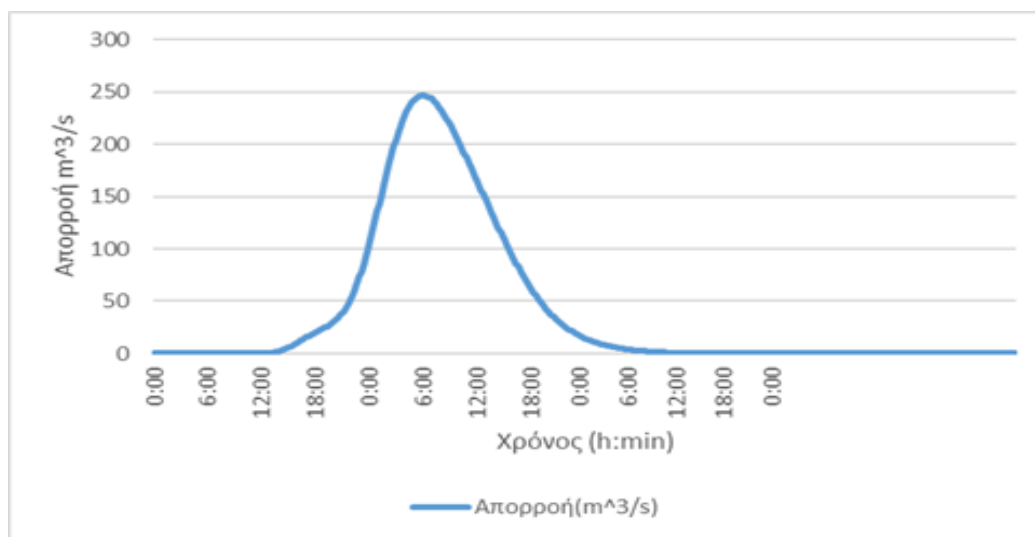
Παρακάτω παρατίθενται για κάθε περίοδο επαναφοράς ($T=5, 10, 25, 50, 100$) και για διάρκεια βροχόπτωσης 24 h, τα αντίστοιχα πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης μετά την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου δηλαδή την αύξηση του αστικού ιστού.

Στην Εικόνα 4.36 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=5$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t=24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $175.1 m^3/s$ και παρουσιάζεται στις 30 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι $11.08 mm$.



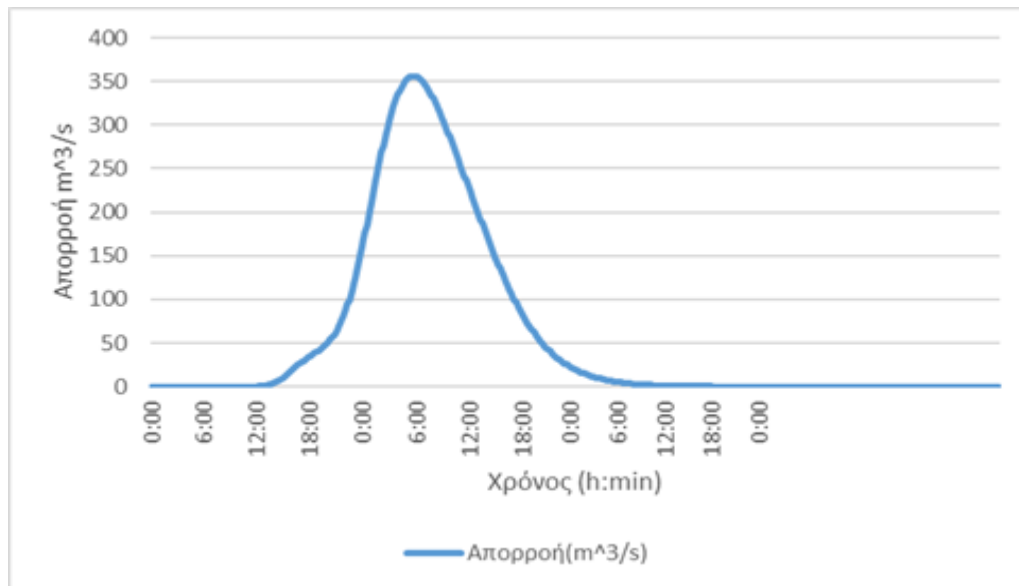
Εικόνα 4.36: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού

Στην Εικόνα 4.37 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 10$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $246,6 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 50 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 15.54 mm



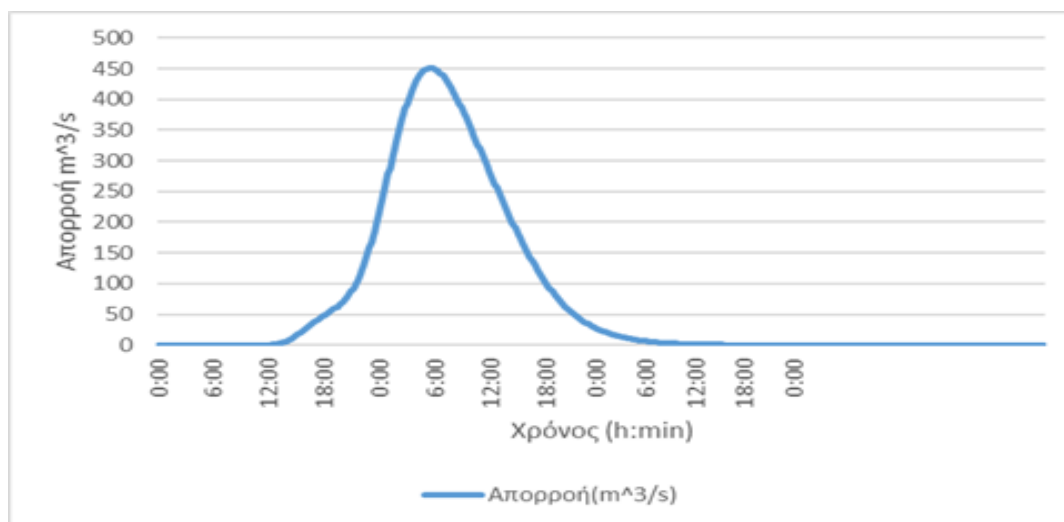
Εικόνα 4.37: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού

Στην Εικόνα 4.38 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 25$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $356.1 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 20 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 22.40 mm



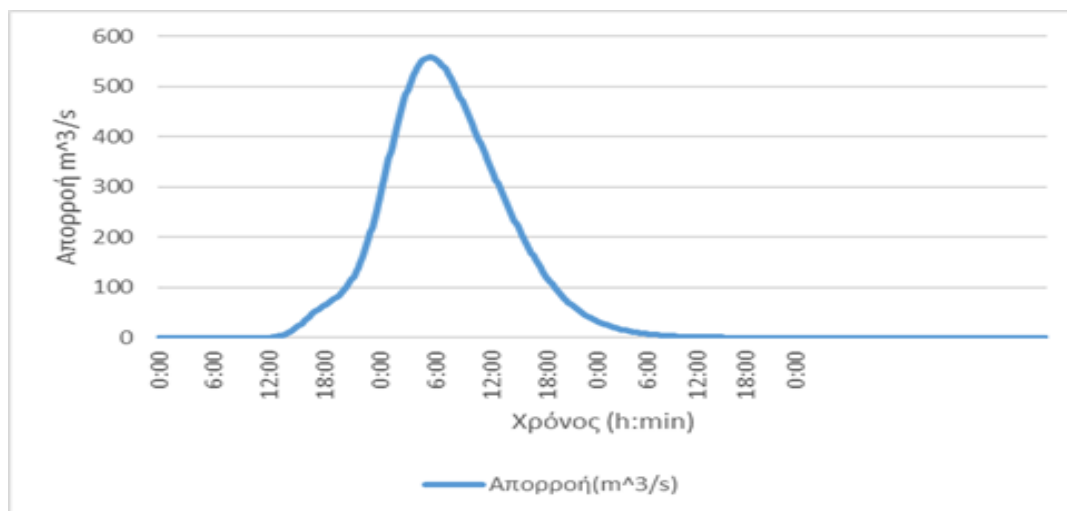
Εικόνα 4.38: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

Στην Εικόνα 4.39 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 50$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $451.1 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 20 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 28.37 mm .



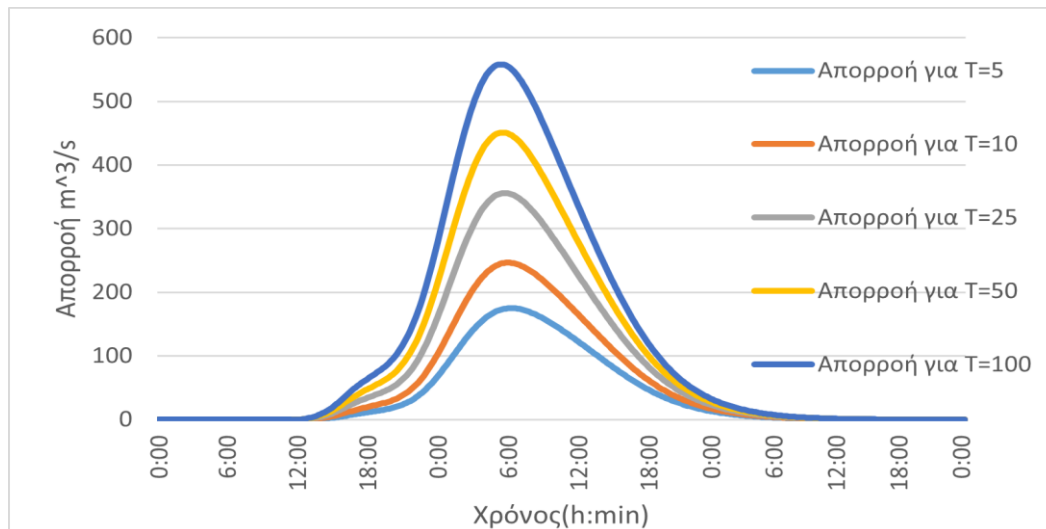
Εικόνα 4.39: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού

Στην Εικόνα 4.40 παρουσιάζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T = 100$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Ιστού Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής είναι ίση με $558.3 \text{ m}^3/\text{s}$ και παρουσιάζεται στις 29 ώρες και 10 λεπτά μετά την έναρξη της βροχής. Ο πλημμυρικός όγκος είναι 35.10 mm .



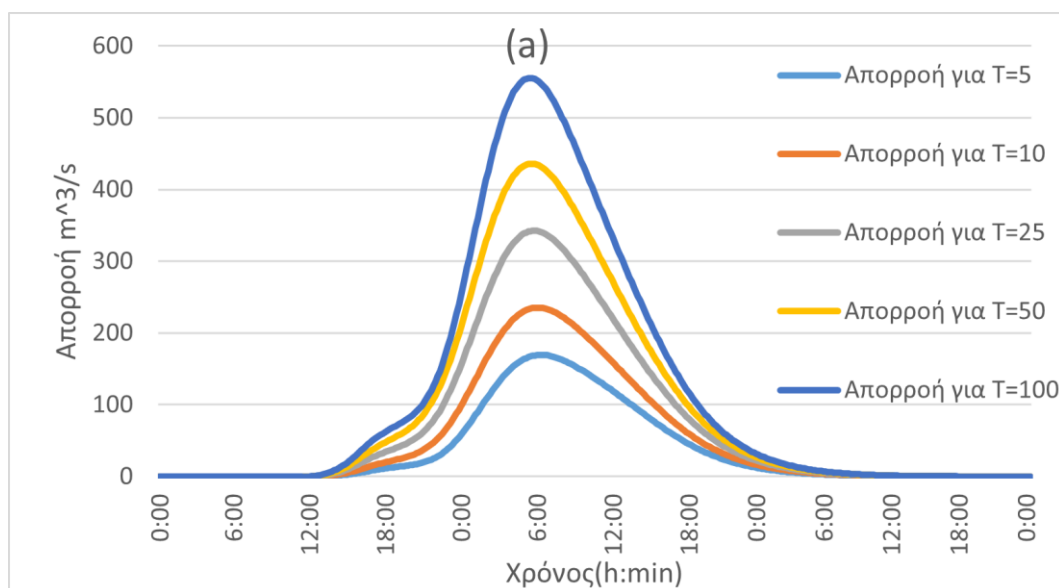
Εικόνα 4.40: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 έτη και διάρκειας βροχόπτωσης 24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

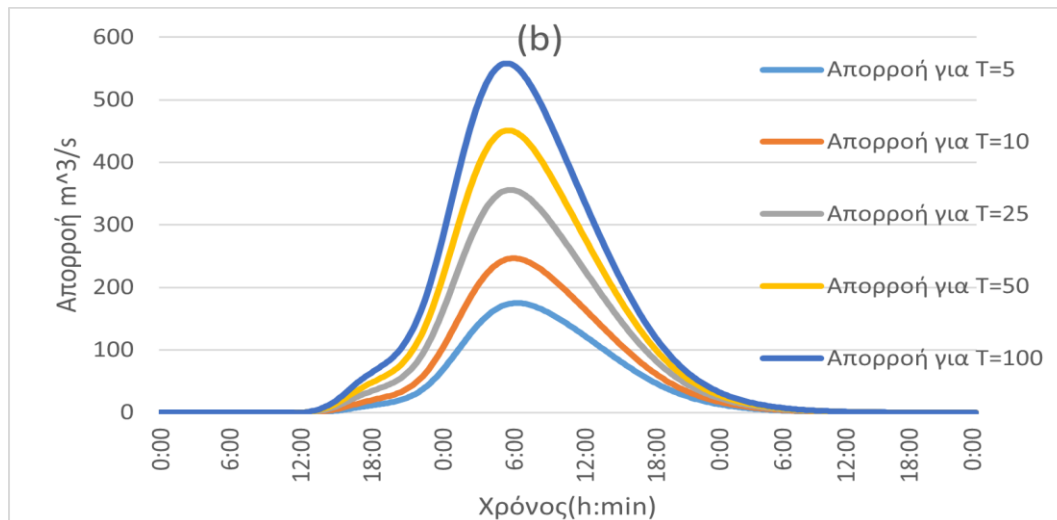
Στην Εικόνα 4.41 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής για κάθε περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24 \text{ h}$ μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη παροχή αιχμής παρουσιάζεται για περίοδο επαναφοράς 5 ετών ($175.1 \text{ m}^3/\text{s}$) και η μέγιστη για περίοδος επαναφοράς 100 ετών ($558.3 \text{ m}^3/\text{s}$), γεγονός που είναι λογικό καθώς όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς τόσο αυξάνεται και η απορροή



Εικόνα 4.41: Συγκεντρωτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

Με σκοπό την πιο αποτελεσματική σύγκριση στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής στην περιοχή μελέτης παρατίθενται τα συγκεντρωτικά πλημμυρογραφήματα (Εικόνα 4.42) για περίοδο επαναφοράς T = 2, 5, 10, 25, 50 και 100 έτη και για διάρκεια βροχόπτωσης t = 24 h που αφορούν την περίοδο πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση της παροχής αιχμής τουλάχιστον κατά 5,6% ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος επαναφοράς η αύξηση της παροχής αιχμής μειώνεται στο 3,1%





Εικόνα 4.42: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για T= 5, 10, 25, 50, 100 ετών και t=24 ώρες πριν (a) και μετά (b) την αύξηση τους αστικού ιστού

Στο Παράρτημα (Εικόνα Π61 έως Εικόνα Π70) της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται και τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης για διάρκειες βροχόπτωσης t = 6 και 12 ώρες για περιόδους επαναφοράς T = 5, 10, 25, 50 και 100 έτη μετά την αύξηση του αστικού ιστού με τα δεδομένα της παροχής αιχμής, του χρόνου αιχμής από την αρχή του επεισοδίου βροχόπτωσης και του πλημμυρικού όγκου που φαίνονται στον Πίνακα 21 και Πίνακα 22.

Πίνακας 21: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για t= 6 ώρες και T= 5, 10, 25,50 και 100 έτη μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

t=6 h	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
T (έτη)			
5	66.3	20 ώρες και 10 λεπτά	3.2
10	99.5	20 ώρες και 10 λεπτά	4.78
25	153.5	20 ώρες και 0 λεπτά	7.62
50	203.4	19 ώρες και 50 λεπτά	10.19
100	261.8	19 ώρες και 50 λεπτά	13.24

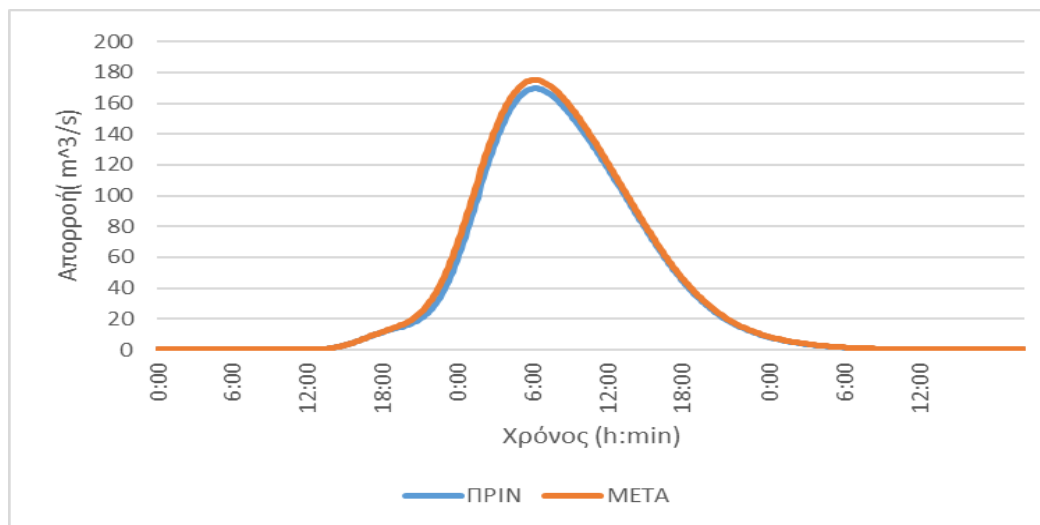
Πίνακας 22: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης για t= 12 ώρες και T= 5, 10, 25,50 και 100 έτη μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

t=12 h			

T (έτη)	Παροχή αιχμής (m ³ /s)	Χρόνος εμφάνισης αιχμής μετά την έναρξη της βροχής	Πλημμυρικός όγκος (mm)
5	117.1	23 ώρες και 50 λεπτά	6.17
10	169.1	23 ώρες και 40 λεπτά	8.99
25	251.1	23 ώρες και 30 λεπτά	13.47
50	324.3	23 ώρες και 20 λεπτά	17.50
100	407.7	23 ώρες και 10 λεπτά	22.13

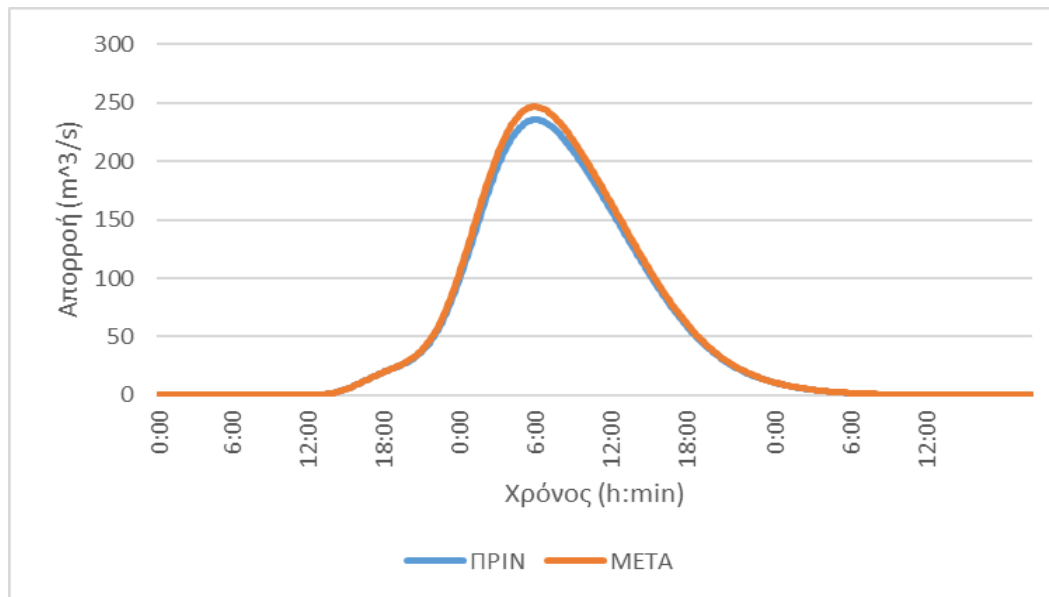
Μετά την αύξηση του αστικού ιστού η απορροή είναι μεγαλύτερη. Για να προσδιοριστεί όμως και το ποσοστό διαφοράς της απορροής σε σχέση με την αρχική κατάσταση δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα για κάθε περίοδο επαναφοράς και για διάρκεια βροχόπτωσης $t=24h$.

Στην Εικόνα 4.43 παρατίθεται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα για περίοδο επαναφοράς $T = 5$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες για τις περιόδους πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση στην απορροή της τάξης του 5.6 %.



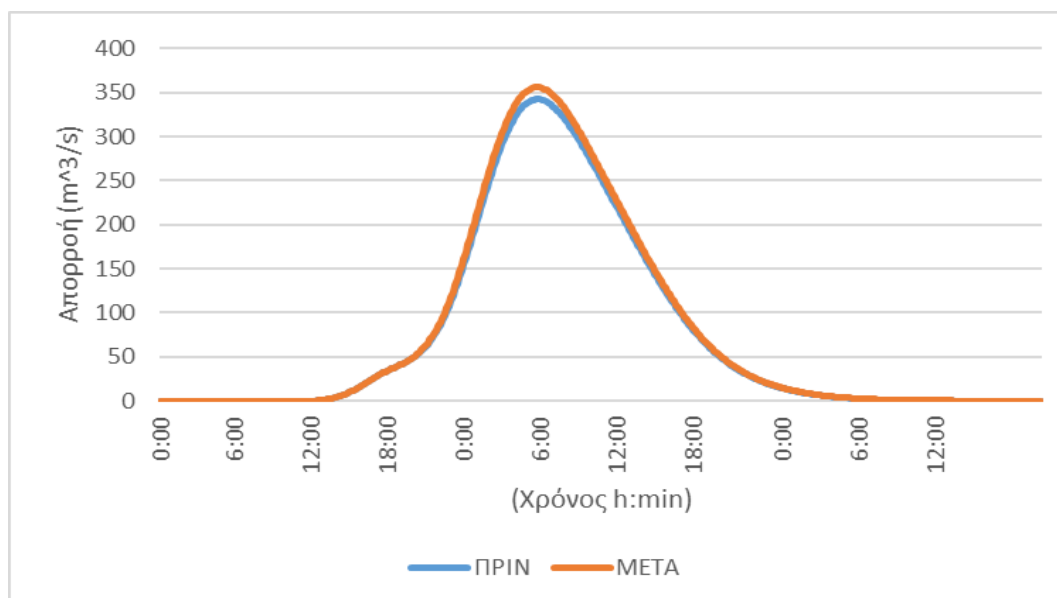
Εικόνα 4.43: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T= 5$ έτη και $t=6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού

Στην Εικόνα 4.44 παρατίθεται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα για περίοδο επαναφοράς $T = 10$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες για τις περιόδους πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση στην απορροή της τάξης του 4.8 %.



Εικόνα 4.44: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T = 10$ έτη και $t = 6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού

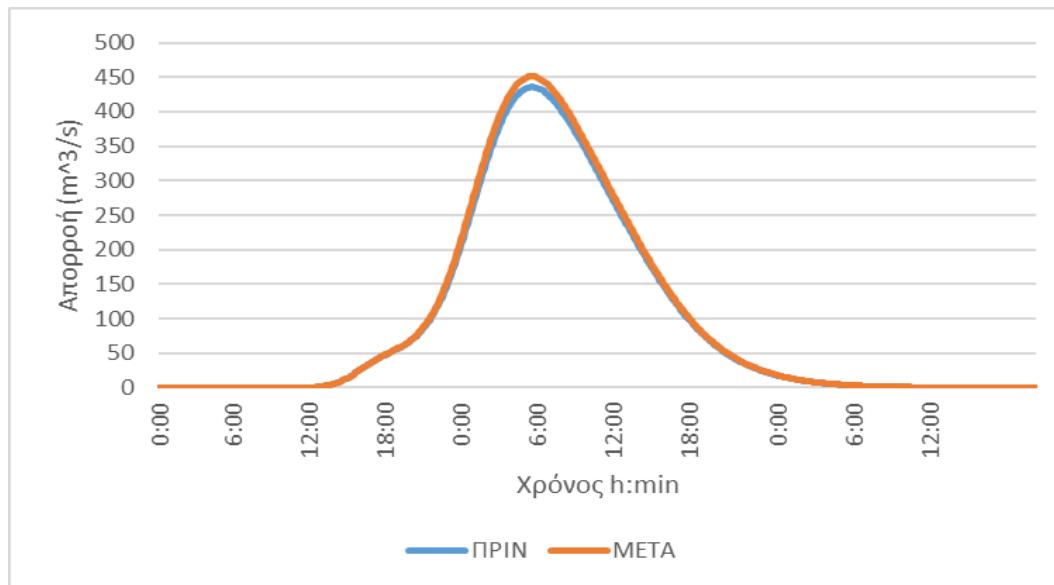
Στην Εικόνα 4.45 παρατίθεται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα για περίοδο επαναφοράς $T = 25$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες για τις περιόδους πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση στην απορροή της τάξης του 4.1%.



Εικόνα 4.45: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T = 25$ έτη και $t = 6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

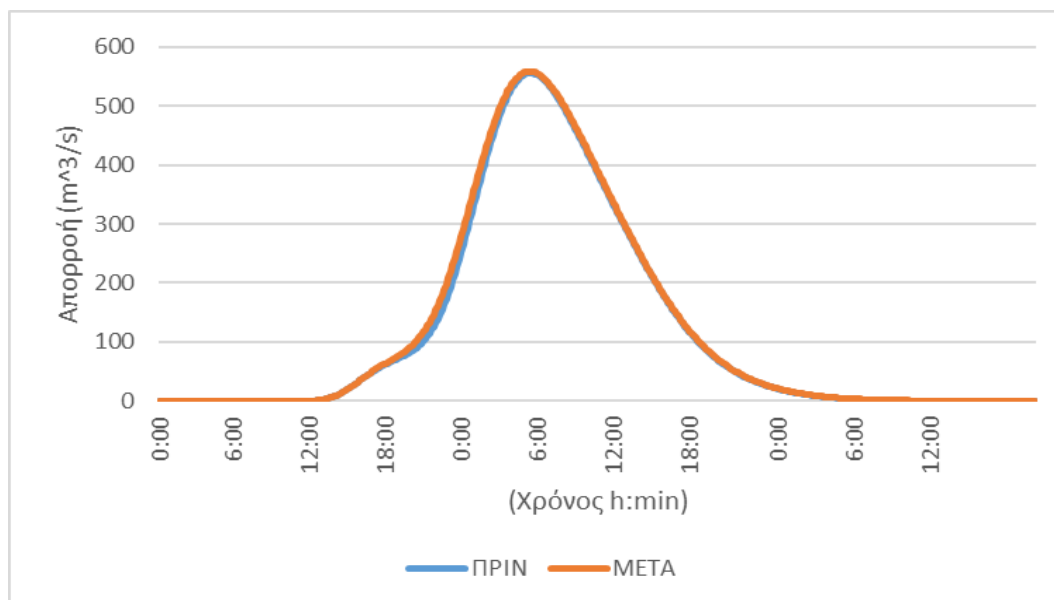
Στην Εικόνα 4.46 παρατίθεται συγκριτικά τα πλημμυρικά υδρογραφήματα για περίοδο επαναφοράς $T = 50$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες για τις

περιόδους πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση στην απορροή της τάξης του 3.5 %.



Εικόνα 4.46: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T = 50$ έτη και $t = 6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού.

Στην Εικόνα 4.47 παρατίθεται το συγκριτικό πλημμυρικό υδρογράφημα για περίοδο επαναφοράς $T = 100$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t = 24$ ώρες για τις περιόδους πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού. Παρατηρείται αύξηση στην απορροή της τάξης του 3.1 %.



Εικόνα 4.47: Συγκεντρωτικά πλημμυρικά υδρογραφήματα για $T = 100$ έτη και $t = 6$ ώρες πριν και μετά την αύξηση του αστικού ιστού

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερη αύξηση στην συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στα επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα, όπως μια έντονη καταιγίδα, που προκύπτουν συχνότερα πλέον λόγω της κλιματικής αλλαγής αλλά και της αύξησης της αστικοποίησης. Η σημασία της εκτίμησης των πλημμυρικών κατακλύσεων μιας περιοχής είναι μεγάλη, ιδίως αν αυτή φιλοξενεί ανθρώπινες δραστηριότητες, γι' αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη της μελέτης και της υδρολογικής απόκρισης περιοχών με έντονα προβλήματα πλημμυρών.

Το λογισμικό HEC-HMS αποτελεί ένα ελεύθερο λογισμικό και σχετικά απλό λογισμικό για την δημιουργία υδρολογικών προσομοιώσεων. Από τις διαδικασίες που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, το HEC-HMS είναι εύκολο στην χρήση, παρέχεται αναλυτικό εγχειρίδιο χρήσης με παραδείγματα που καθιστούν την εκμάθηση του απλή και σε σύντομο χρονικό διάστημα και τέλος ενσωματώνει, μέσω των επιλογών που παρέχονται στο λογισμικό, ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες.

Τέλος, στην περιοχή μελέτης είναι σαφές ότι και με την εφαρμογή των δύο σεναρίων δηλαδή την αύξηση και μείωση της βροχόπτωσης αλλά και την αύξηση του αστικού ιστού, η υδρολογική απόκριση της λεκάνης αλλάζει, όπως ήταν αναμενόμενο. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο της αύξησης της αστικοποίησης οι αλλαγές είναι μικρές, κυμαίνονται από 3,1% έως 5,6% αύξηση όσον αφορά την παροχή αιχμής. Οι μικρές αυτές μεταβολές οφείλονται στην έκταση της λεκάνης, η οποία είναι σχετικά μεγάλη, για τα Ελληνικά δεδομένα, και την σχετικά μικρή, αύξηση του αστικού ιστού. Το αποτέλεσμα είναι να έχουν μικρή επίδραση στην υδρολογική συμπεριφορά της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Αντίθετα, για το σενάριο της αύξησης ή μείωσης της βροχόπτωσης παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης που καθιστούν σαφές ότι η μια έντονη καταιγίδα μπορεί να έχει σοβαρό αντίκτυπο στην περιοχή και να προκαλέσει έντονα πλημμυρικά φαινόμενα. Οι αλλαγές αυτές κυμαίνονται από 64.6% μείωση έως και 85% αύξηση την παροχή αιχμής.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της παρούσας εργασίας

Οι πλημμύρες αποτελούν μια φυσική διαδικασία και μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στους ανθρώπους, το περιβάλλον και την οικονομία. Η εκτίμηση των πλημμυρικών κινδύνων σε μια περιοχή είναι ουσιώδης για την

ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών πρόληψης και διαχείρισης. Συνεπώς, μια πιθανή πρόταση μετεξέλιξης της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι:

- Ανάπτυξη της ίδιας μεθοδολογίας σε παρόμοιες λεκάνες απορροής, για την αντιστοίχιση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.
- Εφαρμογή όλων των μεθόδων που περιέχει το HEC-HMS για την υδρολογική προσομοίωση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Χρήση του λογισμικού HEC-RAS για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης και εκπόνηση χαρτών πλημμύρας.
- Σύγκριση των συνεπειών, στην ίδια περιοχή μελέτης, πριν και μετά από ένα επεισόδιο φωτιάς.
- Ανάπτυξη της ίδιας μεθοδολογίας και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου.
- Η επιλογή συγκεκριμένων ιστορικών επεισοδίων βροχής, της περιοχής μελέτης με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης.

BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Βαρσάμη Γ., (2014). Προσομοίωση υδρολογικής απόκρισης πριν και μετά από πυρκαγιά στην πειραματική λεκάνη Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό- Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων"

Γιαννόπουλος, Σ., Γιαννοπούλου, Ι., Ντούλας, Α., Πέτκου, Ο., (2008). "Αξιολόγηση και Διαχείριση των Κινδύνων Πλημμύρας στην Ευρωπαϊκή Ένωση σύμφωνα με τις Οδηγίες 2000/60/ΕΚ και 2007/60/ΕΚ", Υδρογαία (τιμητικός τόμος στον καθηγητή Χ. Τζιμόπουλο), τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ.

Γιάννου, Π., (2015). Ανάλυση πλημμυρικού κίνδυνου στην πόλη του Ρέθυμνου Κρήτης Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό- Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων"

Γκιόκας Ε., (2009). Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμυράς. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό- Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων"

Εγκεκριμένο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Μακεδονίας (ΕΛ09) ΦΕΚ 2693 Β/ 6.07.2018

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ευστρατιάδης, Α. και Μαμάσης, Ν., (2017). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα.

Ζυμαράκη Μ.Ε. (2023). Προσομοίωση υδρολογικής απόκρισης πριν και μετά από πυρκαγιά σε τμήμα της λεκάνης απορροής του Κηφισού στην περιοχή της Βαρυμπόμπης Αττικής Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Και Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων Και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Κουρουπάκη Ε., (2021). Η επίδραση της αστικοποίησης στην υδρολογική λεκάνη του Στάλου με την χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS. Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Λαζάρου Θ., (2019). Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου SWMM και εφαρμογή στο παντοροικό δίκτυο της Αθήνας. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Και Τοπογράφων Μηχανικών- Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων Και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Λέκκας, Ε., (2009). Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές - Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης στελεχών τοπικής αυτοδιοίκησης, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Μαμάσης, Ν., (2012). Πλημμύρες, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.

Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ. (2013). Υδρολογική ανάλυση ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον ΓΣΠ, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, ΔΠΜΣ “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, ΕΜΠ, Αθήνα.

Τσακίρης Γ., (1995). Γ. Υδατικοί Πόροι 1, Τεχνική Υδρολογία και Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τσακίρης Γ., (2013). Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία και Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσακστάρας Δ., (2019). Υδρολογική διερεύνηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Βενέτικου. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού περιβάλλοντος.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Amadio P., Mancini M., Menduni G., Rabuffetti D., Ravazzani G.,(2003). A real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds working on the Arno Watershed: definition and reliability analysis, In: Proceedings of the 5th EGS Plinius Conference held at Ajaccio, Corsica, France.

Chow P. ,(1959). V. T. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company.

European Environment Agency, (2018). Catastrophic floods cause human tragedy, endanger lives and heavy economic losses.

Giandotti M., (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua - Memorie e studi idrografici. Milan: Servizio Idrografico Italiano.

Gleick H., (1996). Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water international*, Vol. 21, No 3, pp. 83-92.

Goodell C.R., (2005). Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs — A Case Study Using HEC-RAS and HEC-HMS, *World Water and Environmental Resources Congress*. Vol. 5, No 8, pp. 321-339.

Gül G. O., Harmancıoğlu N., Gül A. (2015). A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures, *Natural Hazards*, Vol. 3, No 3, pp. 84-89.

Gumindoga W, Rwasoka D. T., Nhapi I., Dube T., (2017). Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model, *University of Zimbabwe, Dept of Civil Engineering*, Vol. 100, No 3, pp. 371-382.

Knebl M. R., Yang Z. L., Hutchisonb K., Maidment D.R., (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. Vol. 8, No 7, pp. 325-336.

McCarthy, G.T., (1938). *The unit Hydrograph and flood routing*. New London: Conference of North Atlantic Division, US Army corps of Engineers.

Papathanasiou, C., Alonistioti, D., Kasella, A., Makropoulos, C. and Mimikou, M., (2012). “The impact of forest fires on the vulnerability of peri-urban catchments to flood events (The case of the Eastern Attica region)”. *Global NEST*, Vol. 14, No 3, pp. 294-302.

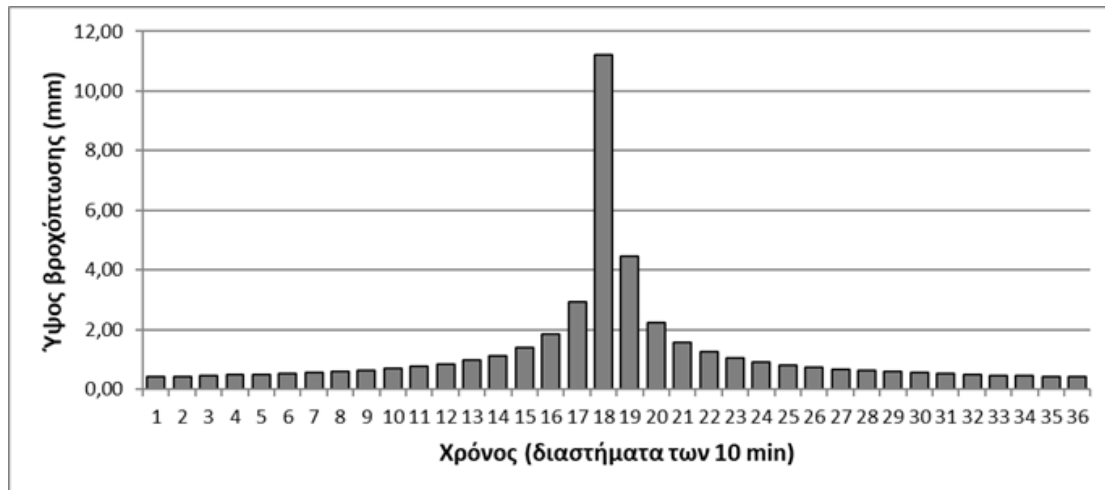
Paprotny, D., Morales-Nápoles, O., Jonkman, D.,(2018). “HANZE: a pan-European database of exposure to natural hazards and damaging historical floods since 1870”, Vol. 10, No 1, pp. 565–581.

Witt, G., Siegel, H., (2000). The Consequences of the Oder Flood in 1997 on the Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Oder River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 01, No 40, pp.1124-1131.

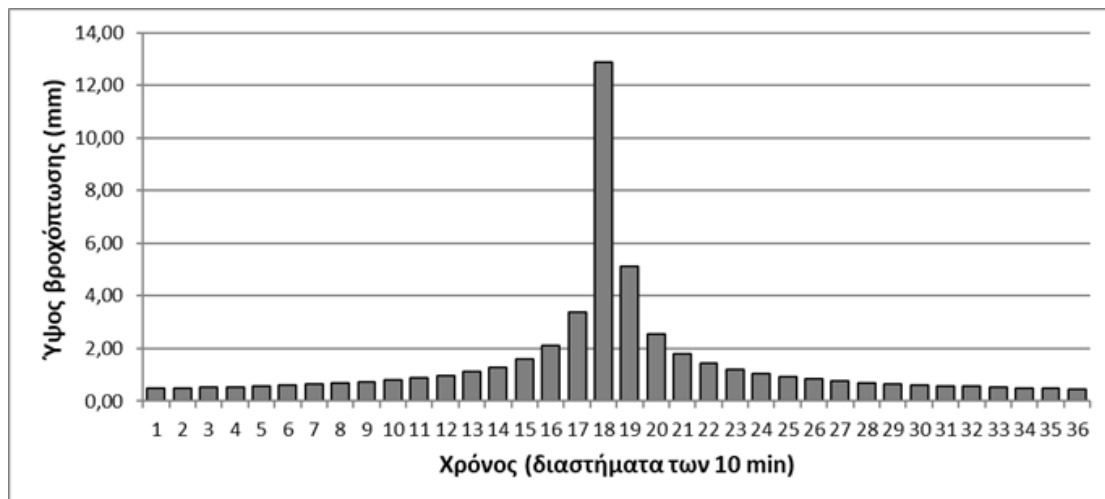
Zarris, D., Lykoudi E.,(2007). Sediment yield estimates in north-western greece and analyses with hydrologic and geomorphologic factors, Vol. 01, No 40, pp. 157–159.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

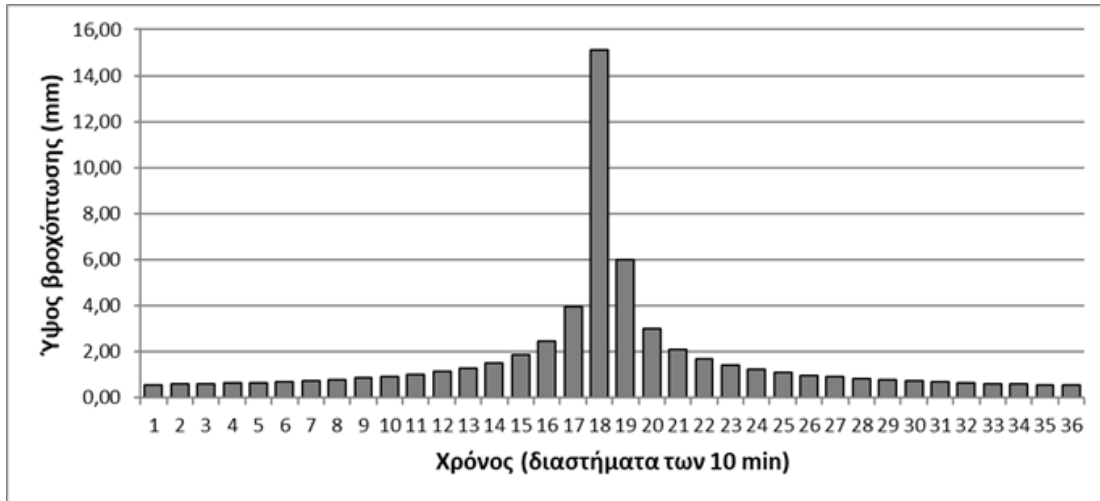
Υετογράμματα για $t=6$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη



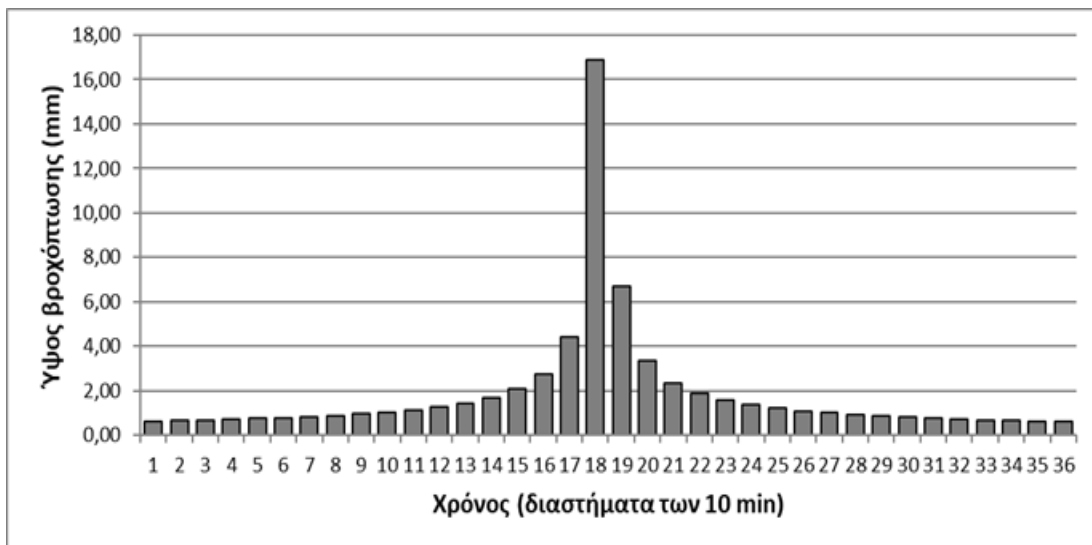
Εικόνα Π1: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



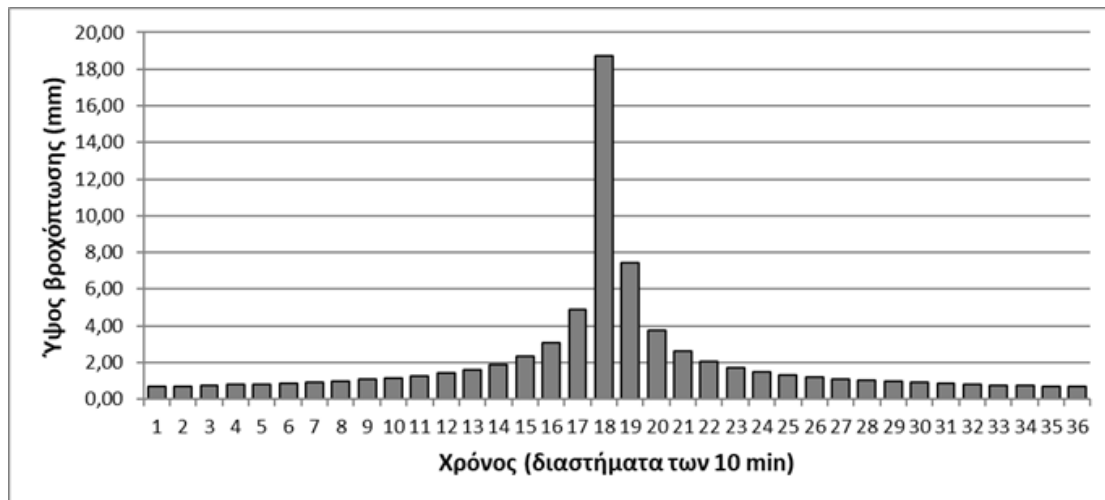
Εικόνα Π2: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π3: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

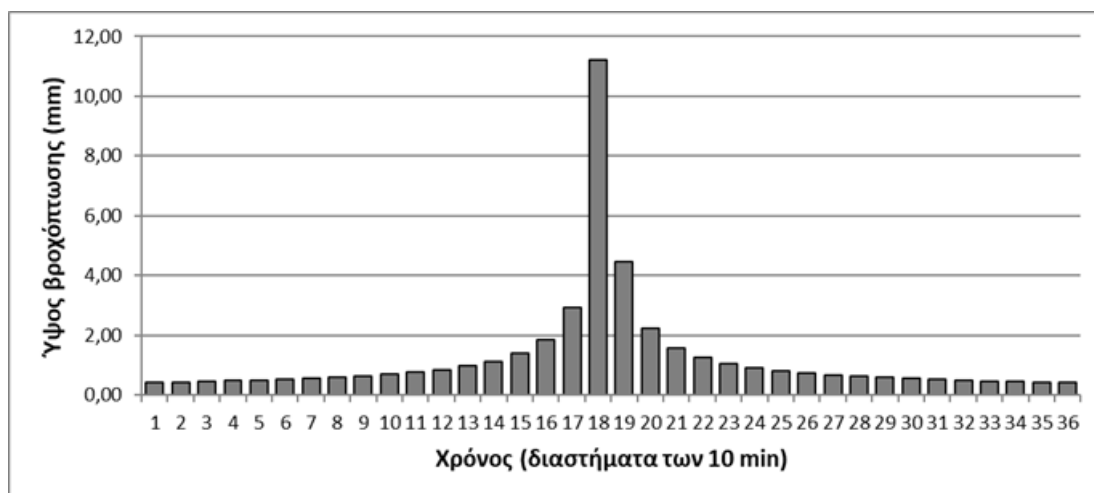


Εικόνα Π4: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

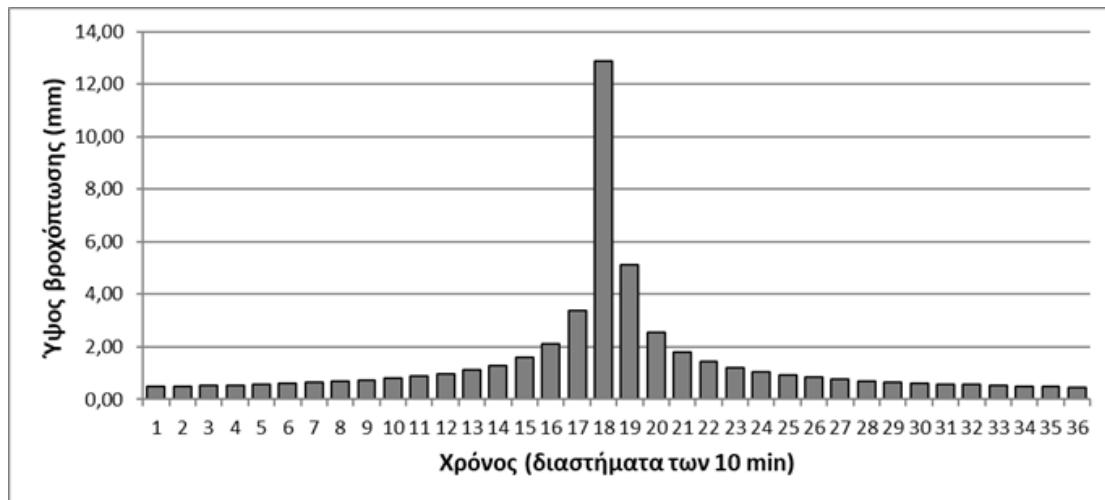


Εικόνα Π5: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 6 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

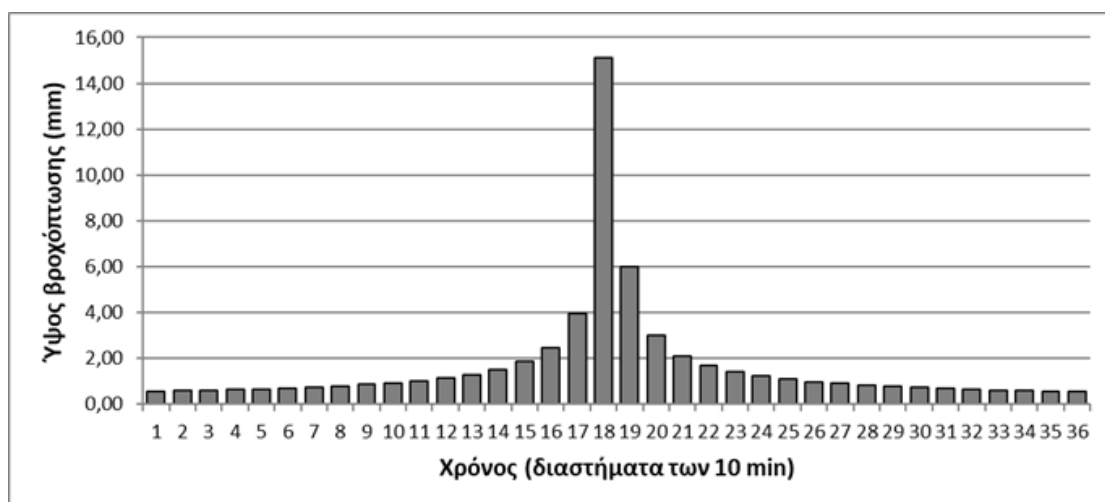
Υετογράμματα για $t=12$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη



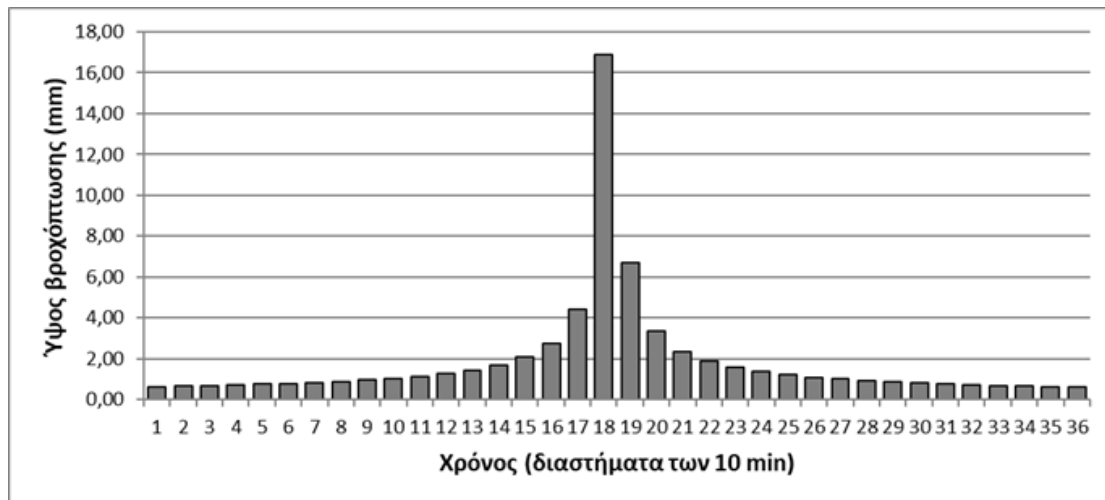
Εικόνα Π6: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



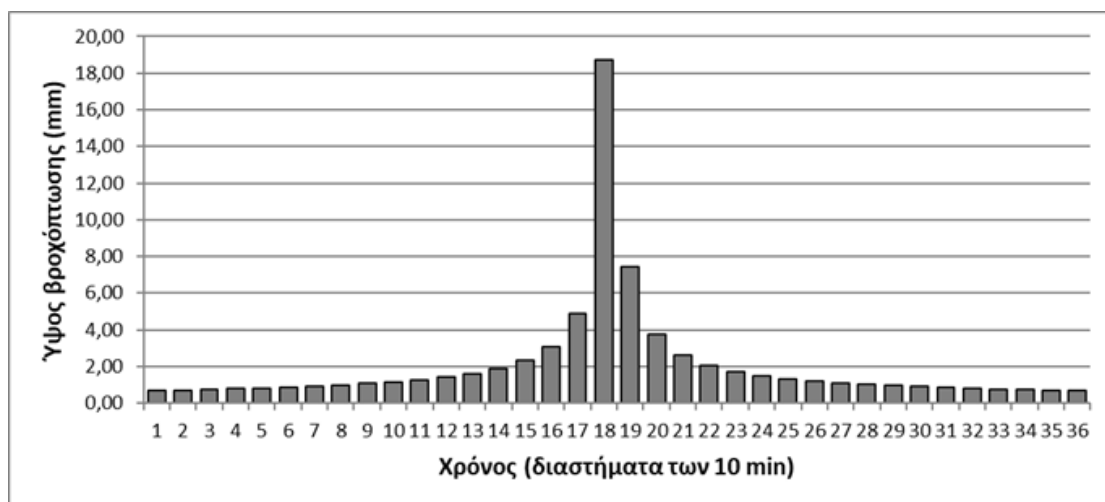
Εικόνα Π7: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π8: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

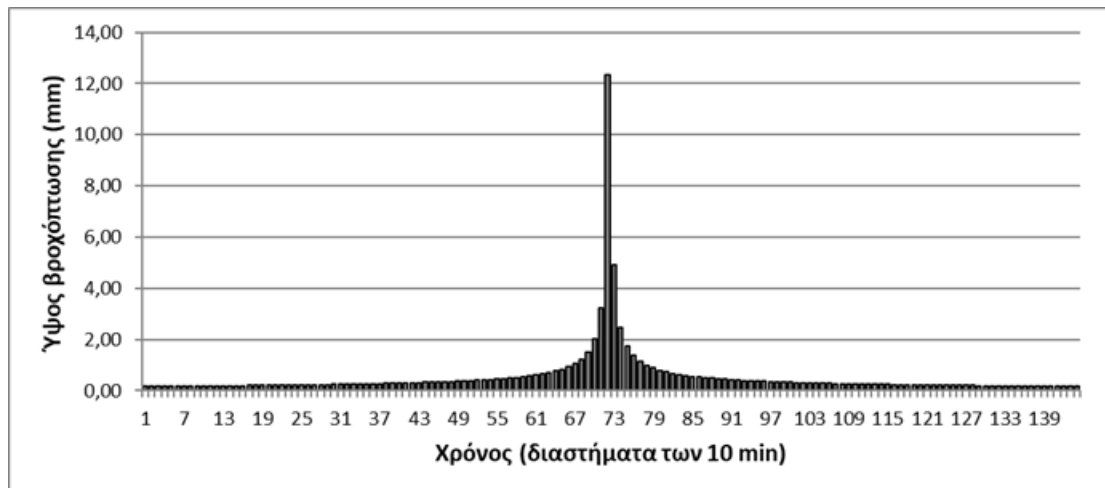


Εικόνα Π9: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

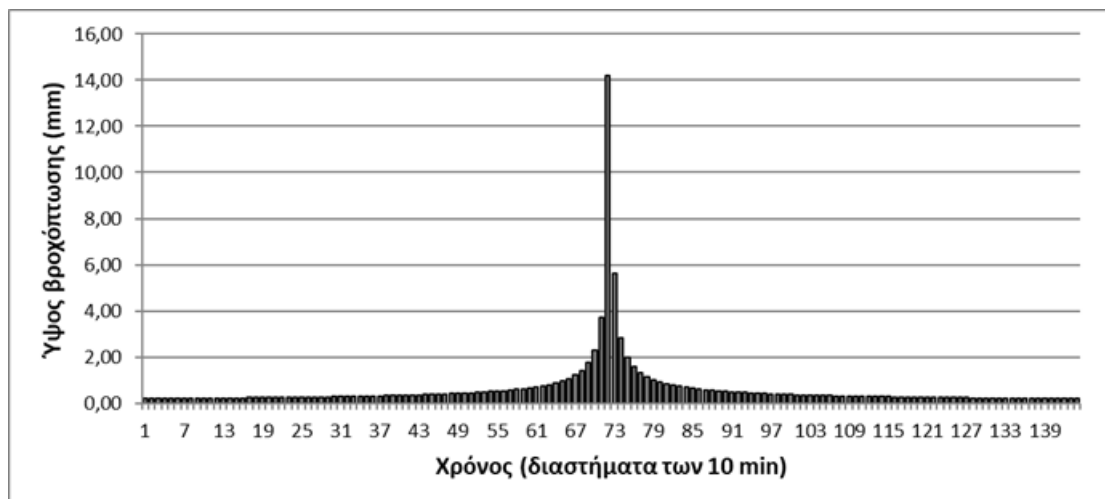


Εικόνα Π10: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 12 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

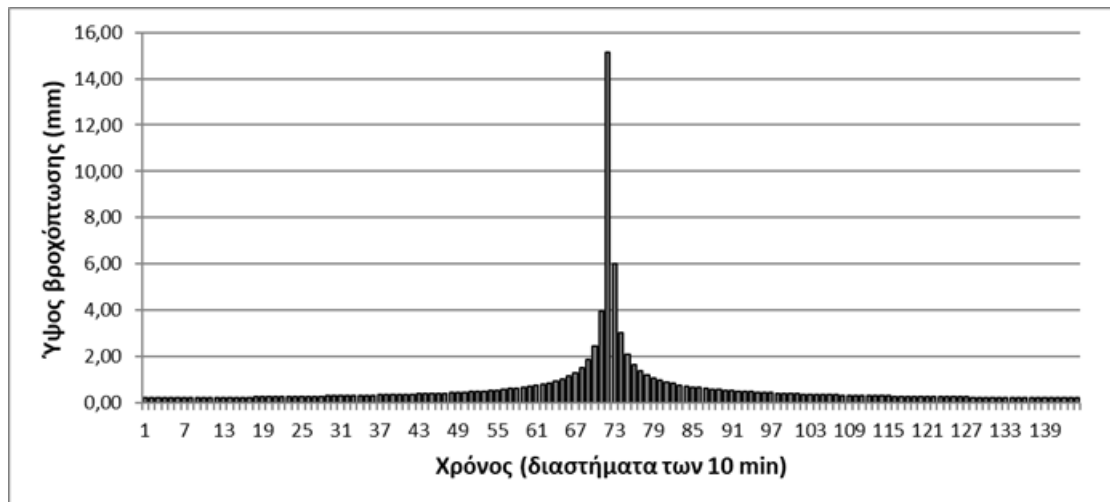
Υετογράμματα για $t=24$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη(Με αύξηση της βροχόπτωσης 10%)



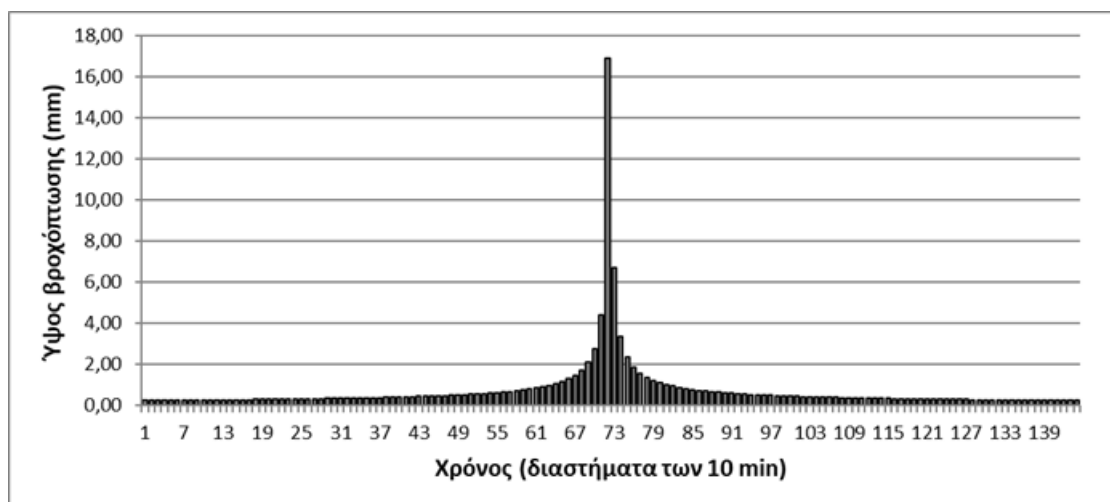
Εικόνα Π11: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



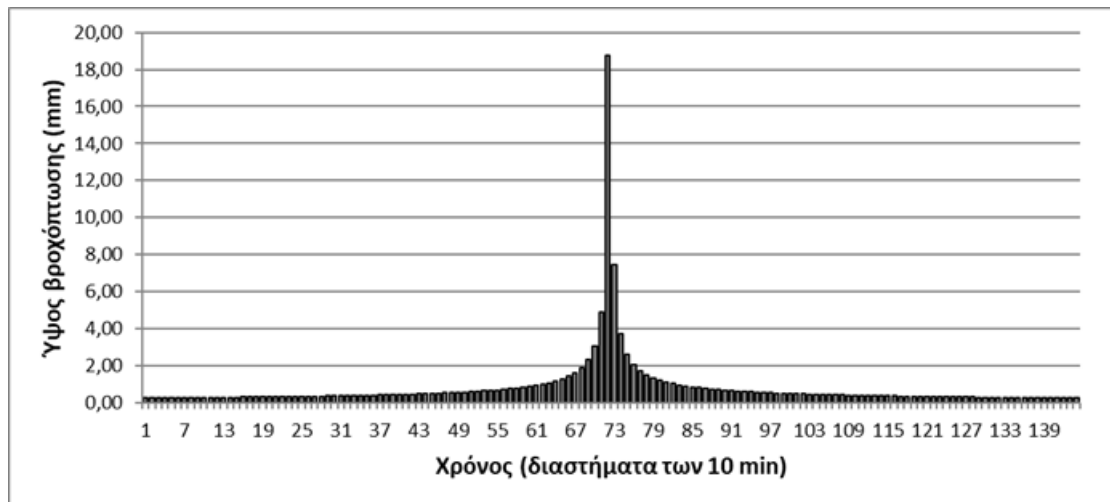
Εικόνα Π12: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π13: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

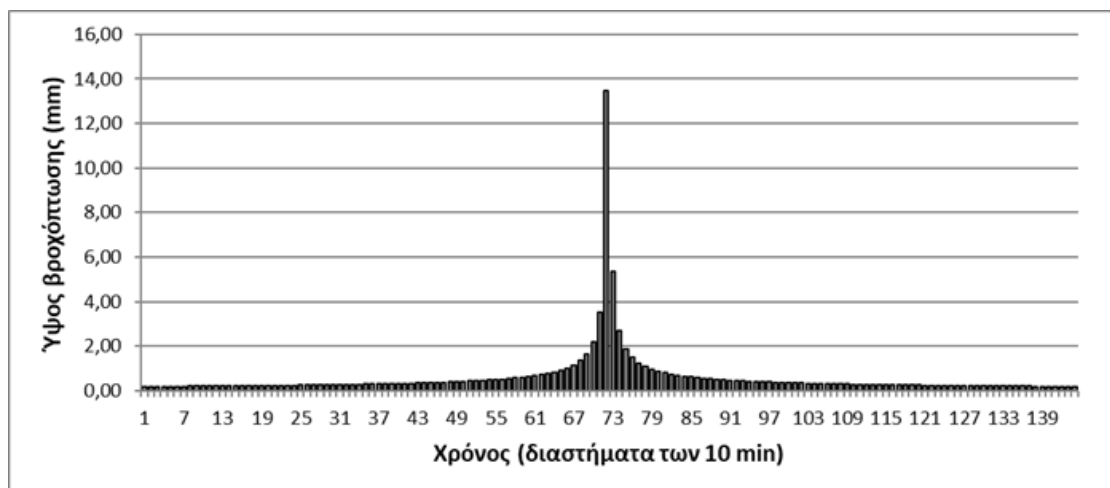


Εικόνα Π14: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

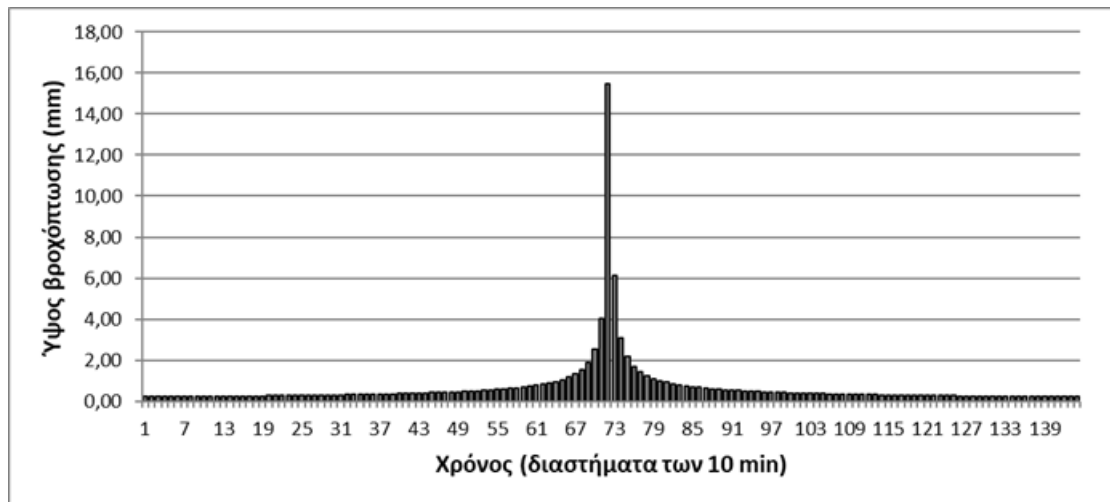


Εικόνα Π15: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

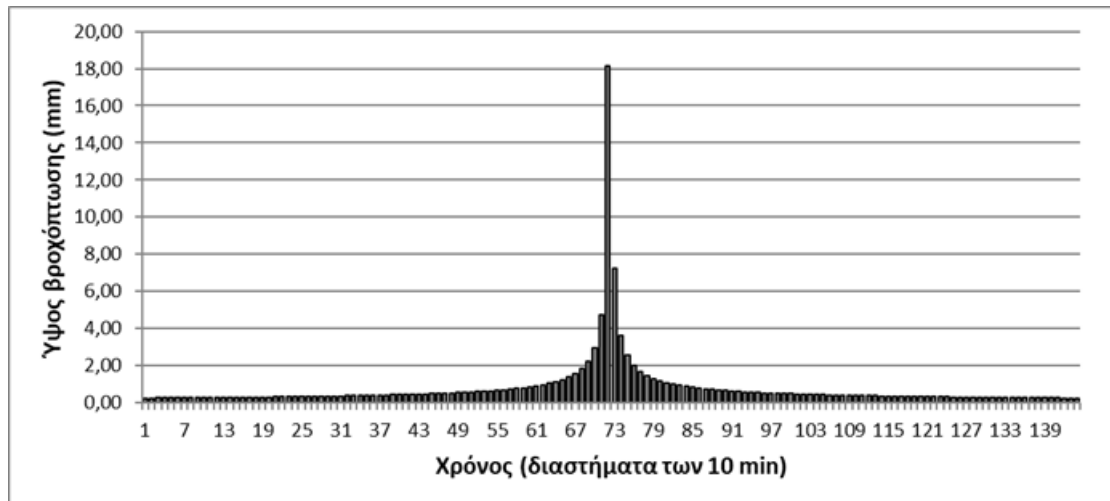
Υετογράμματα για $t=24$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη(Με αύξηση της βροχόπτωσης 20%)



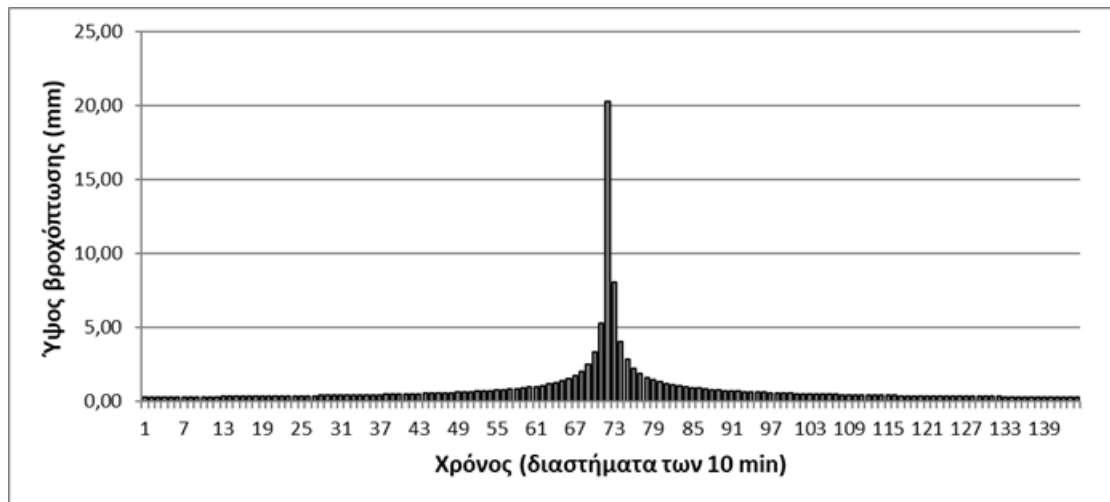
Εικόνα Π16: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



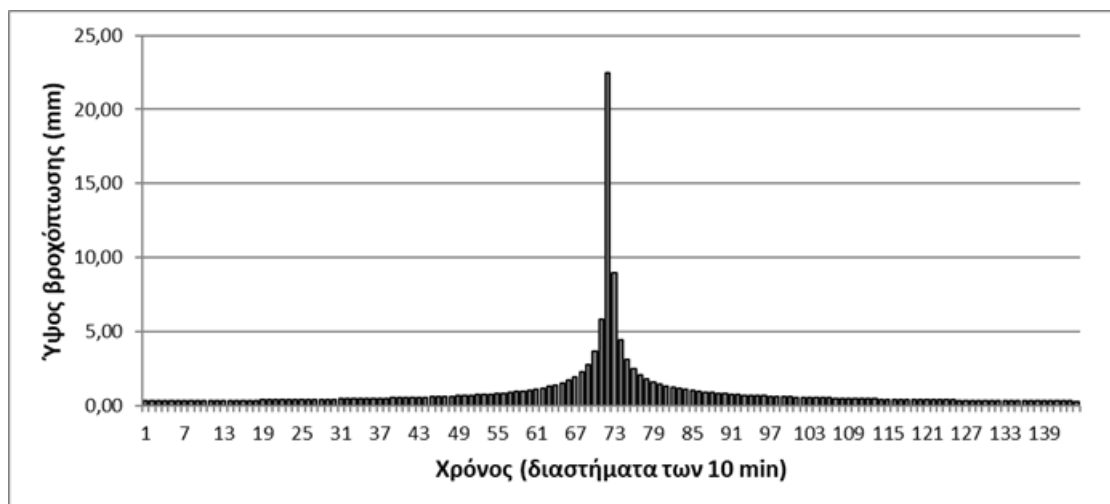
Εικόνα Π17: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π18: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

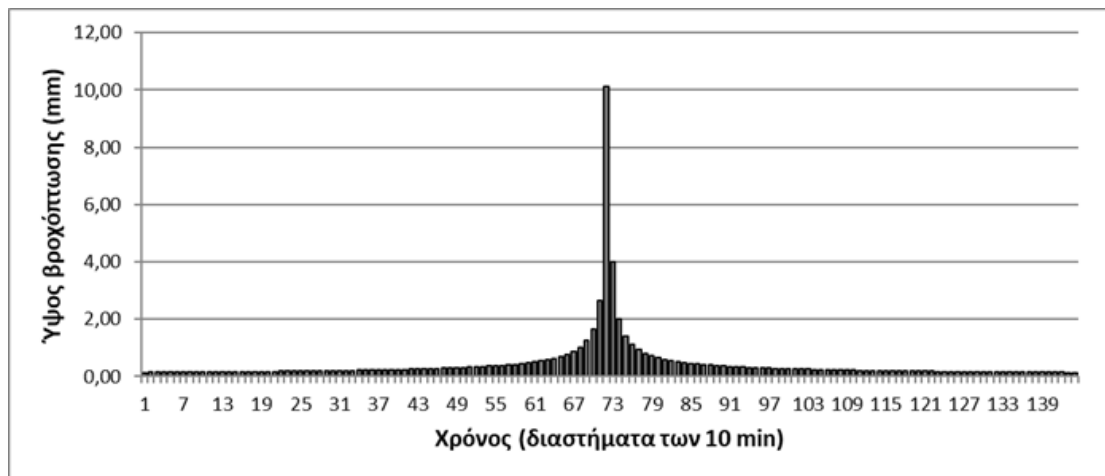


Εικόνα Π19: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

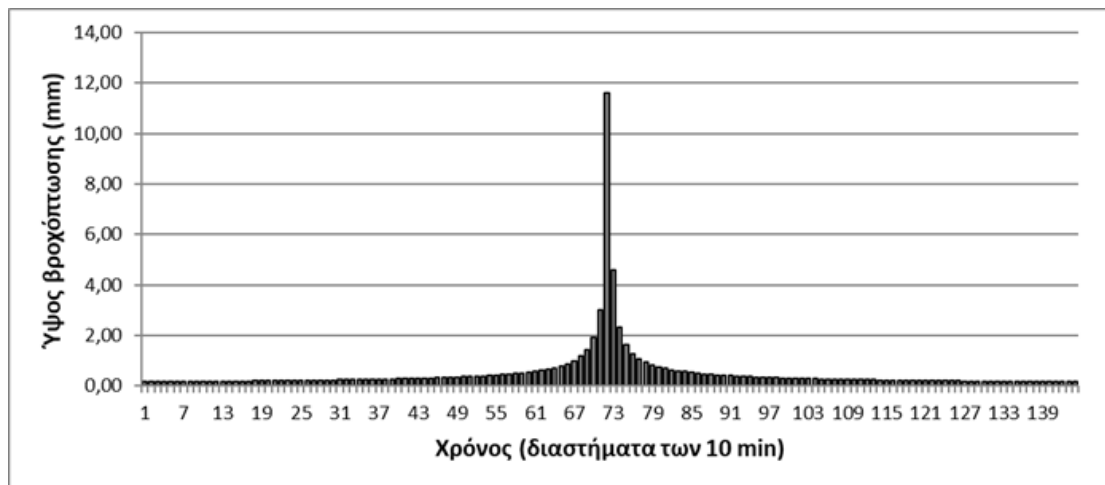


Εικόνα Π20: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% αύξηση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

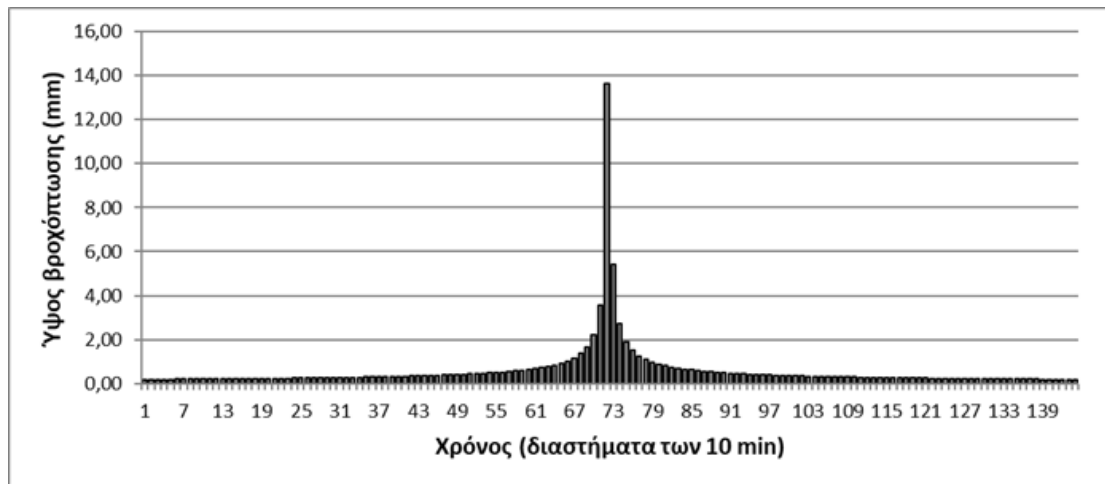
Υετογράμματα για $t=24$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη(Με μείωση της βροχόπτωσης 10%)



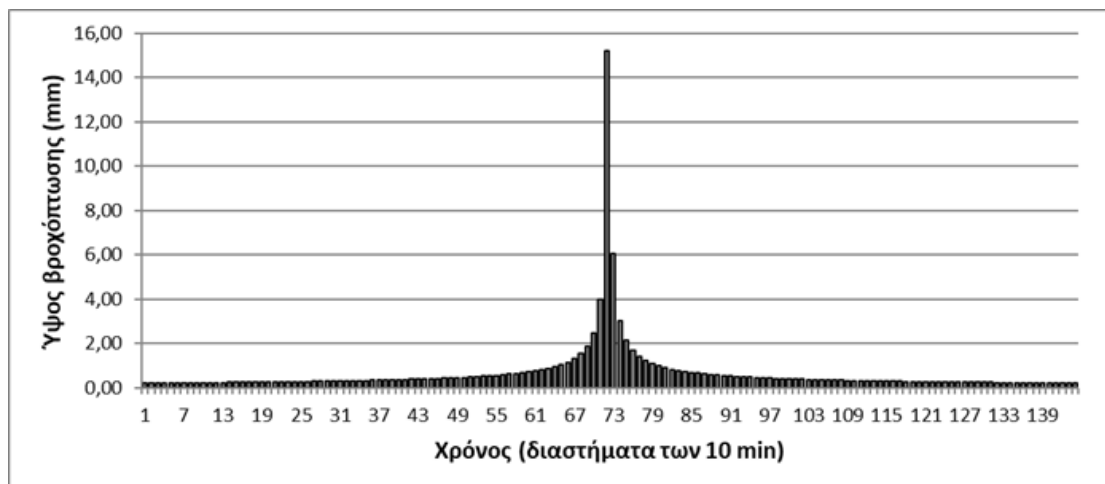
Εικόνα Π21: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



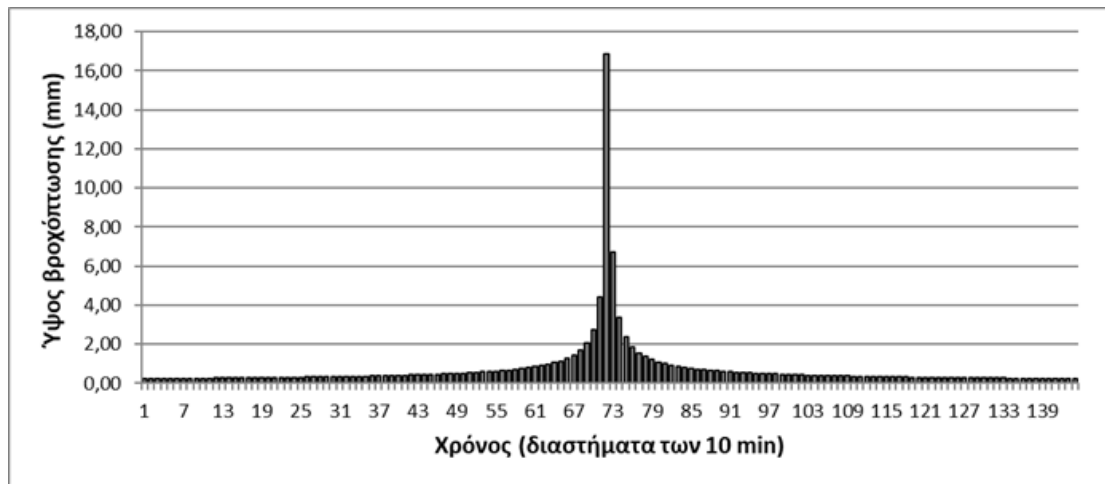
Εικόνα Π22: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π23: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

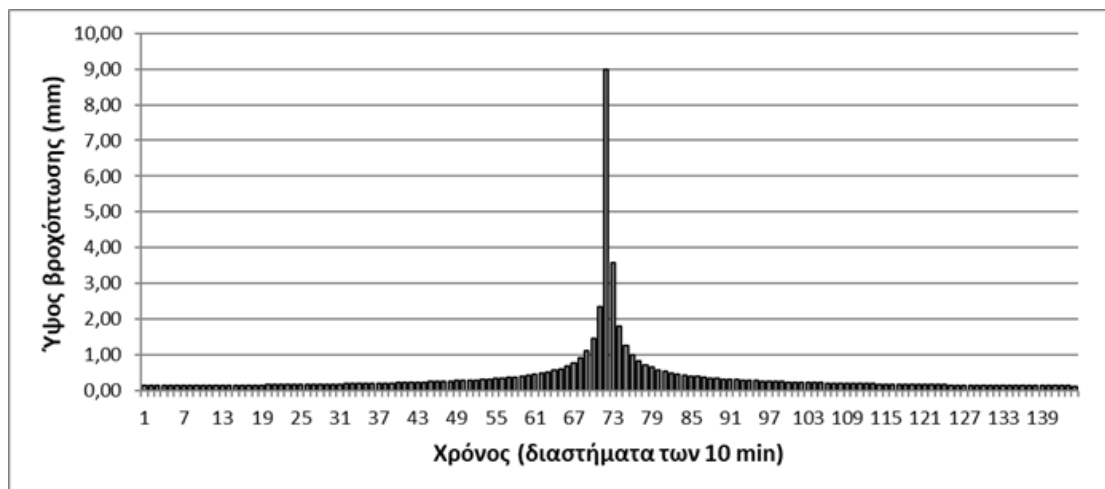


Εικόνα Π24: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

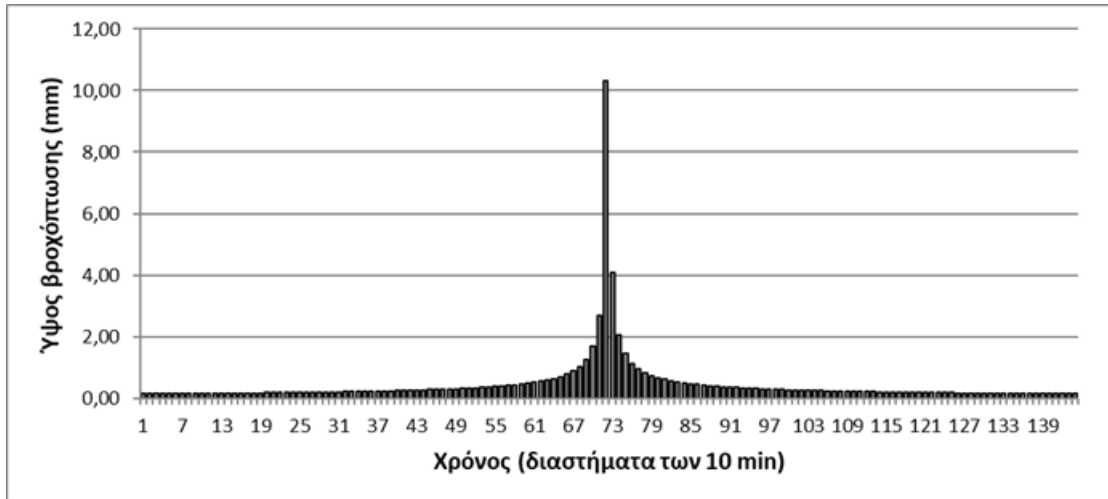


Εικόνα Π25: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 10% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

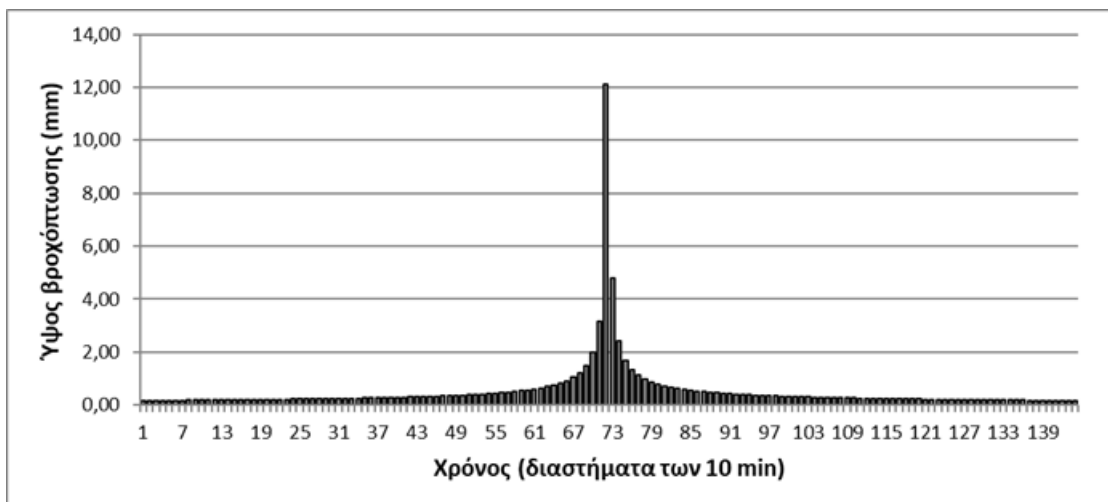
Υετογράμματα για $t=24$ ώρες και $T= 5, 10, 25, 50, 100$ έτη(Με μείωση της βροχόπτωσης 20%)



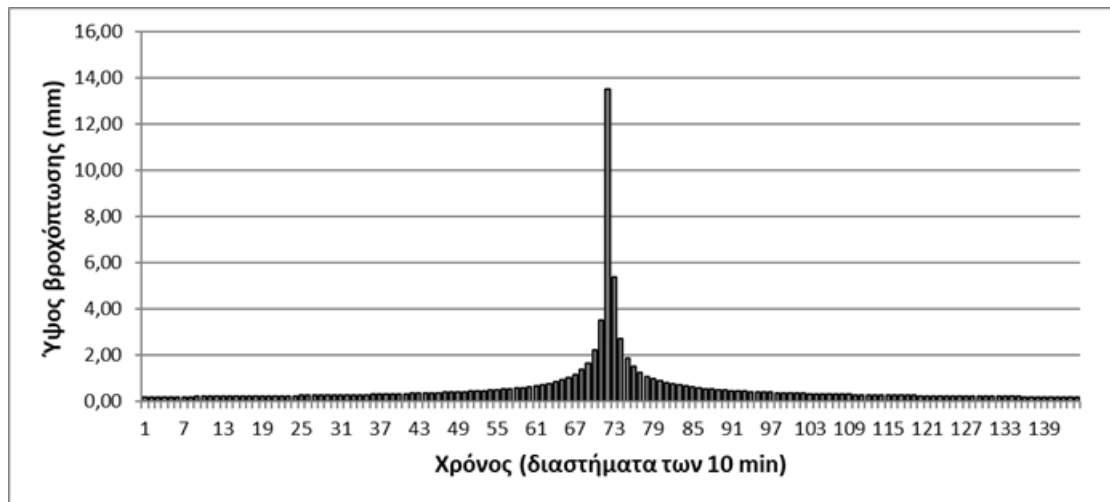
Εικόνα Π26: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



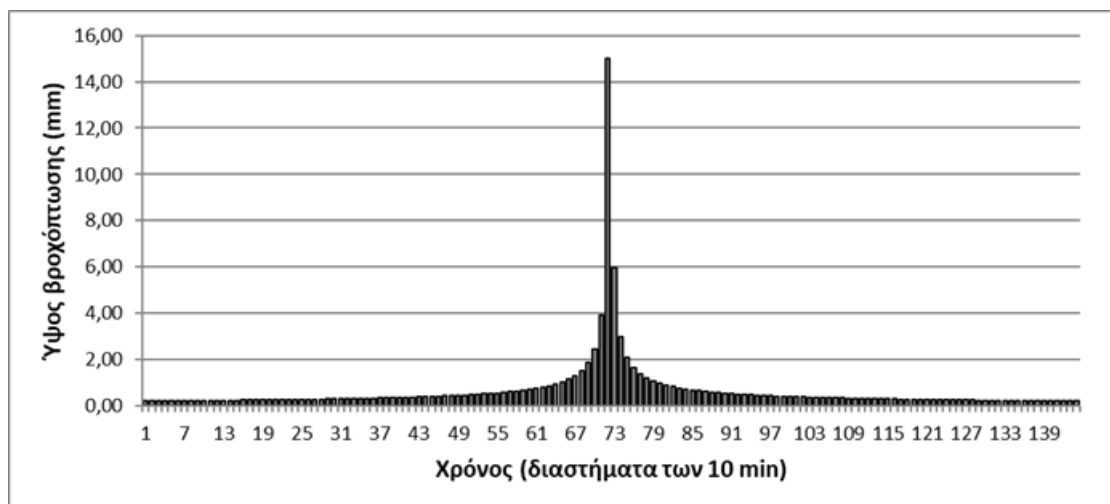
Εικόνα Π27: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου



Εικόνα Π28: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 25 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

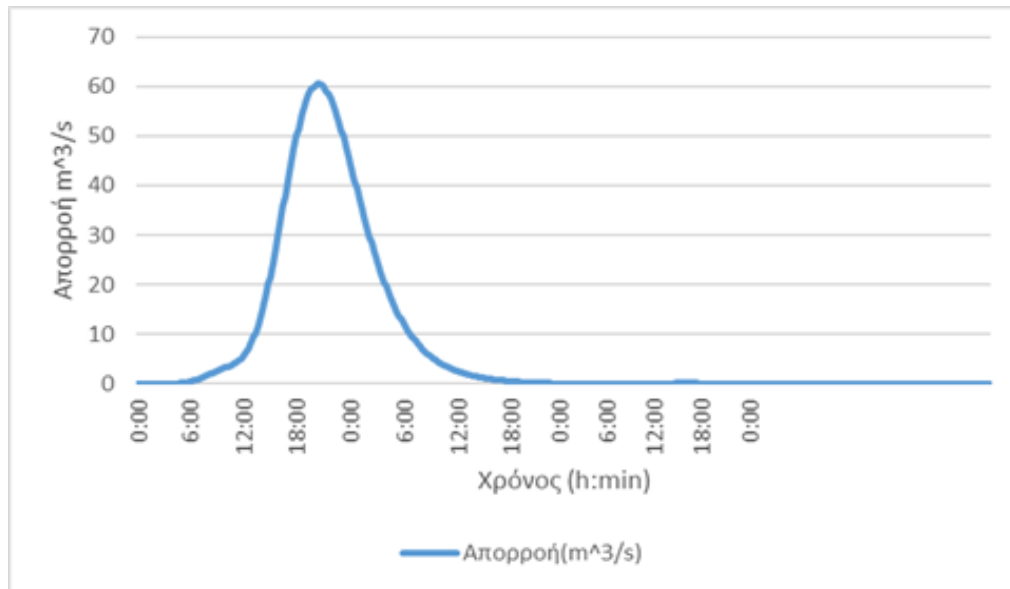


Εικόνα Π29: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 50 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

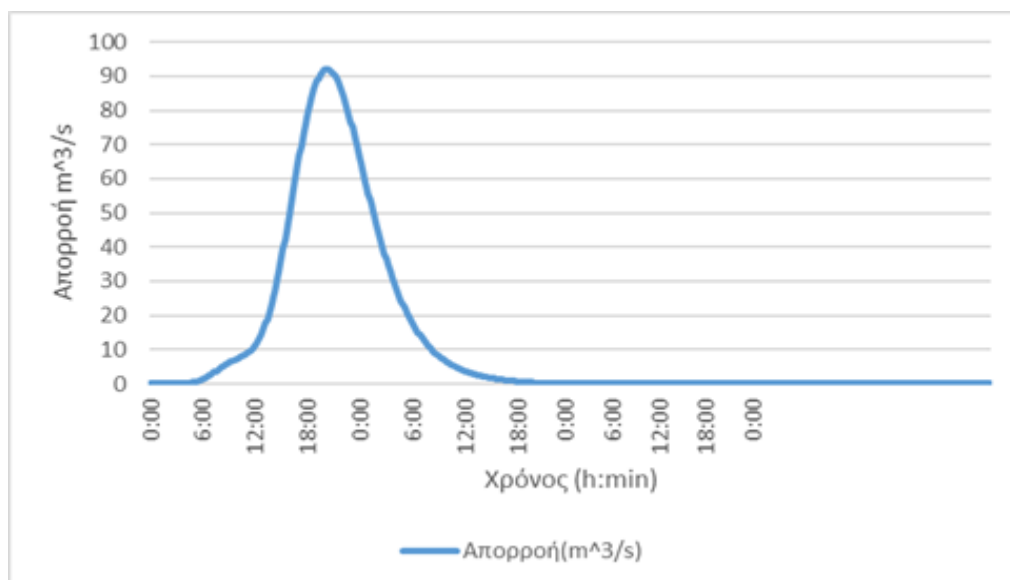


Εικόνα Π30: Υετόγραμμα συνολικής βροχόπτωσης με 20% μείωση στην βροχόπτωση για γεγονός σχεδιασμού επαναφοράς 100 ετών και διάρκειας βροχόπτωσης 24 h, για τη λεκάνη απορροής του Βενέτικου

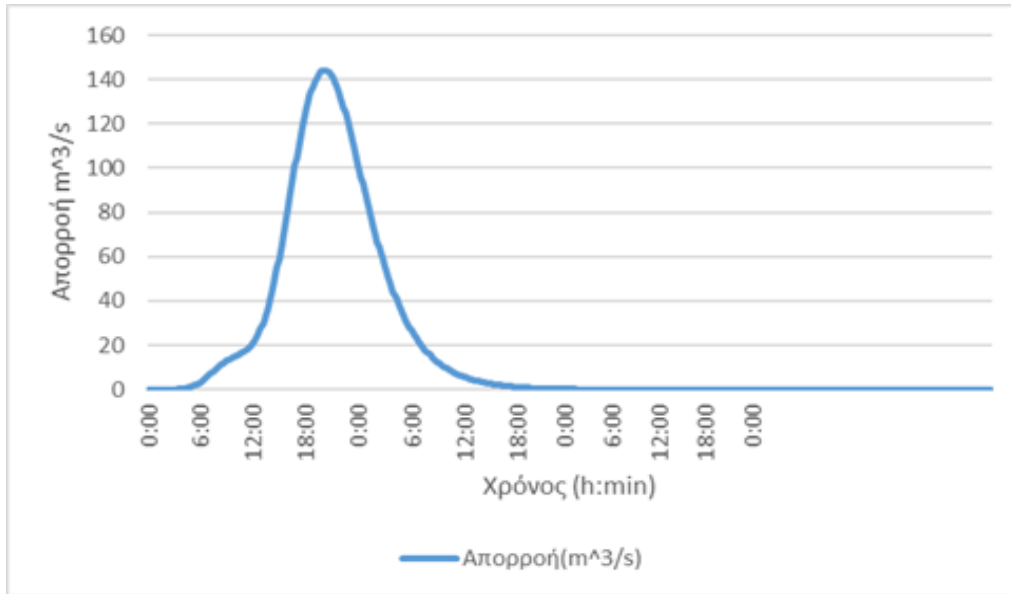
Για $t=6$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη



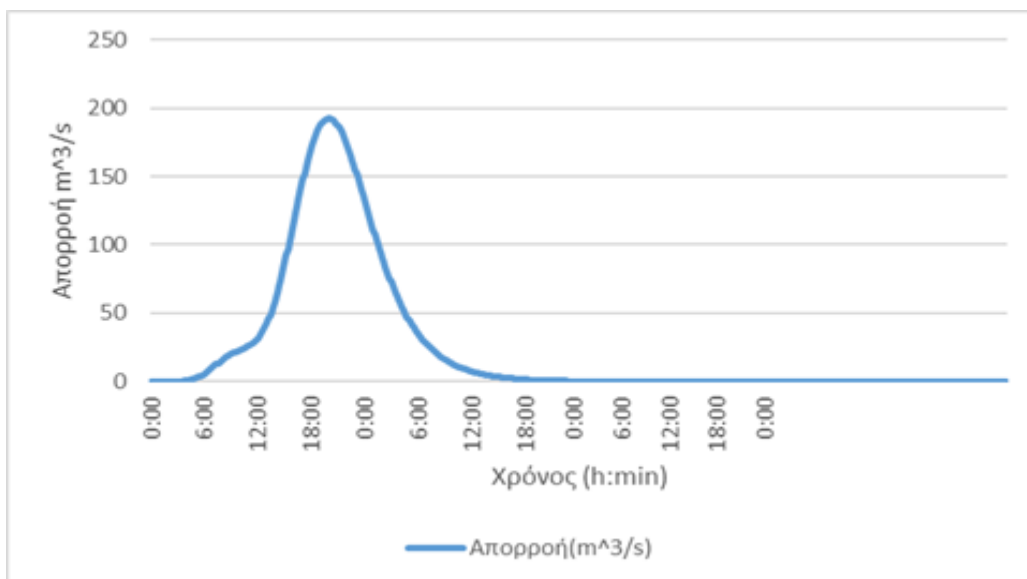
Εικόνα Π31: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h



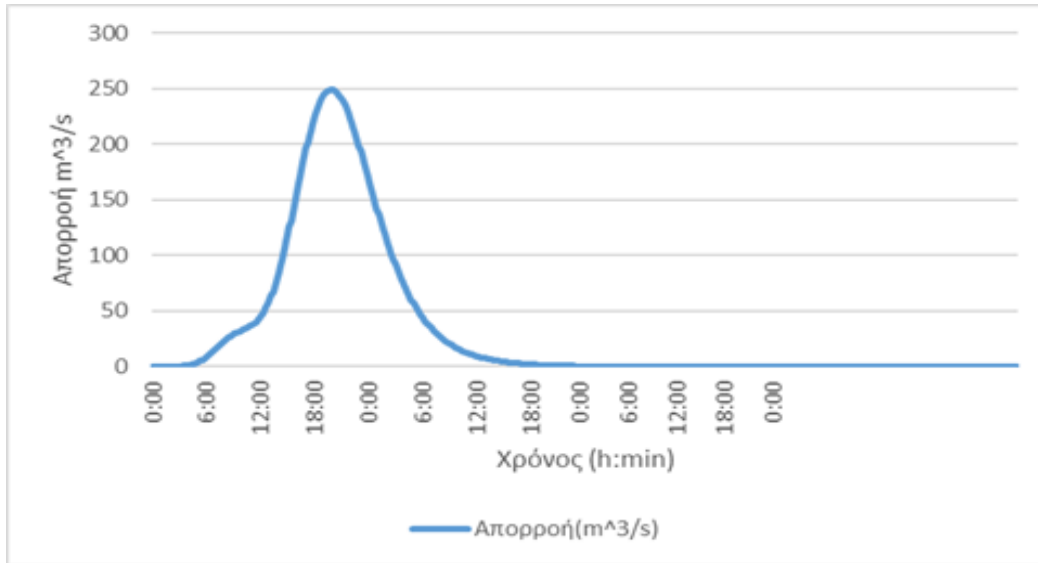
Εικόνα Π32: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h



Εικόνα Π33: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h

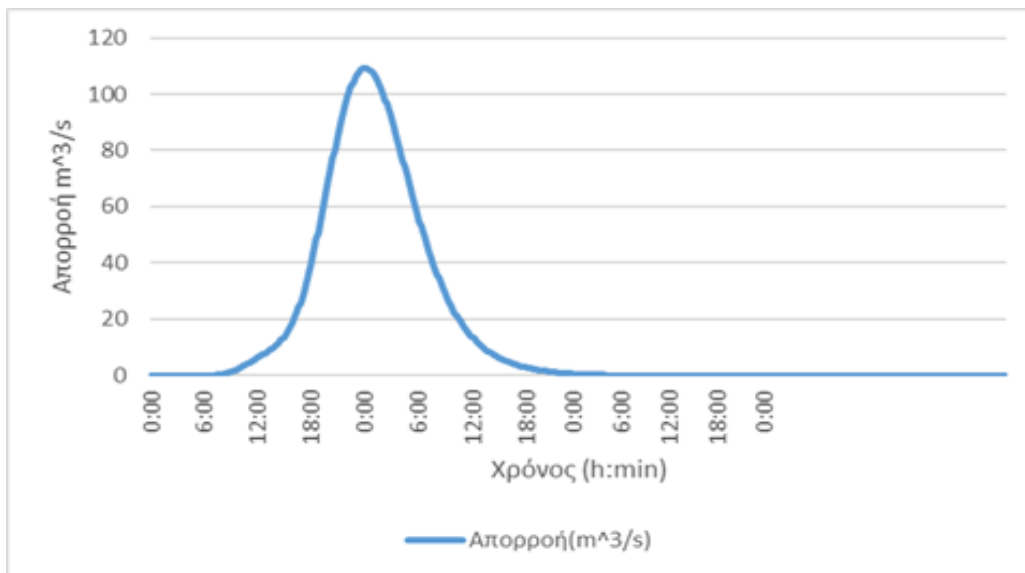


Εικόνα Π34: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h

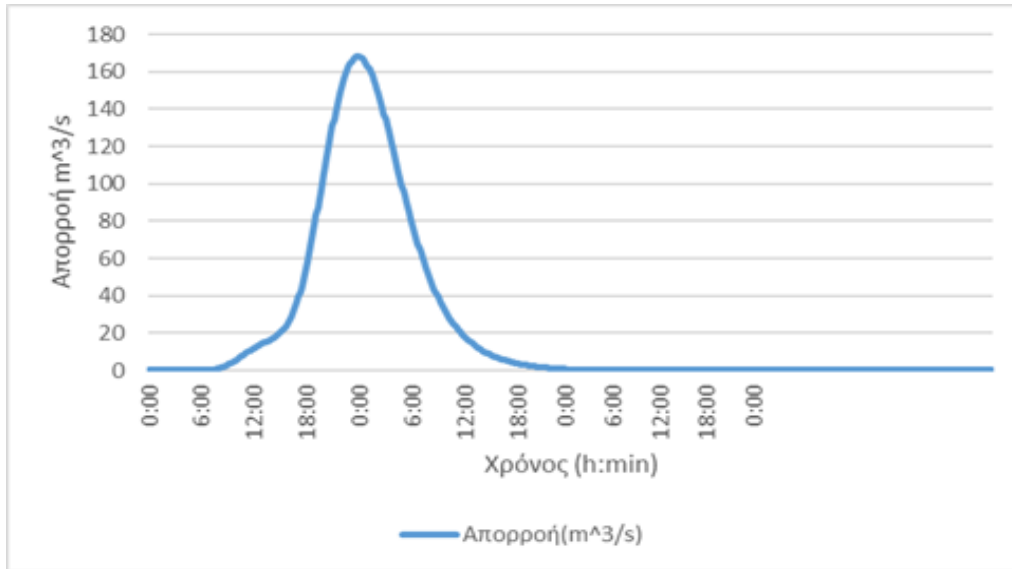


Εικόνα Π35: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h

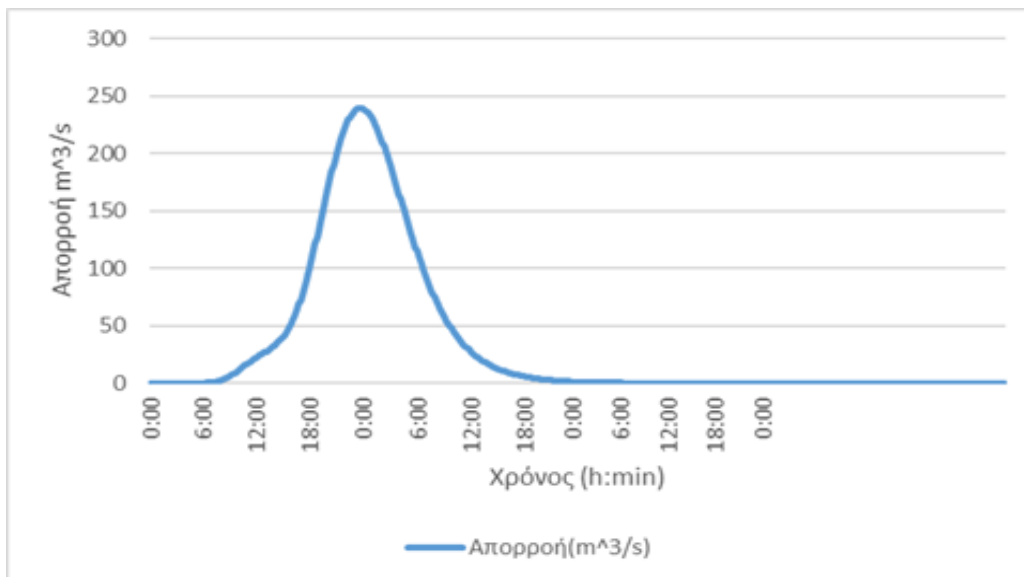
Για $t=12$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη



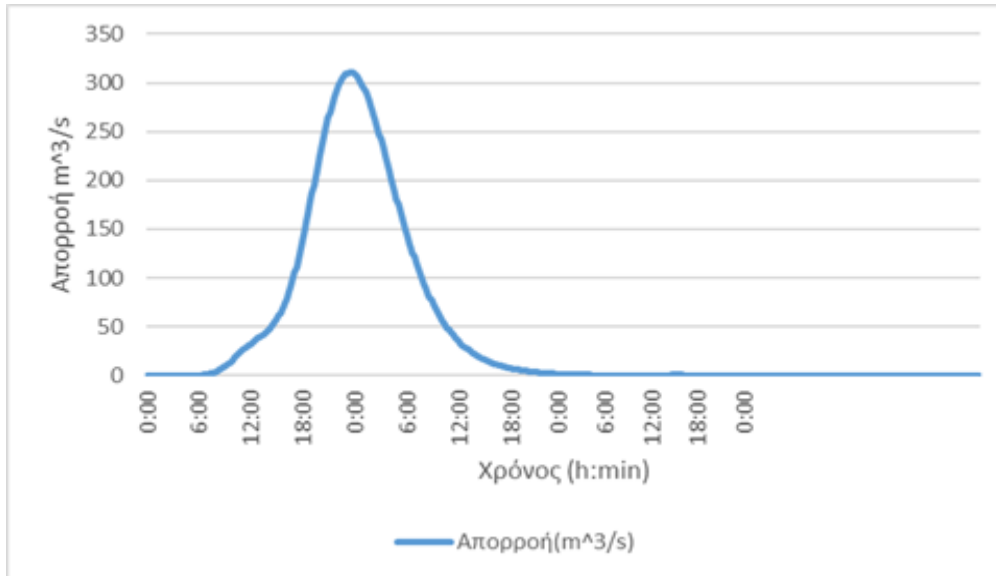
Εικόνα Π36: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h



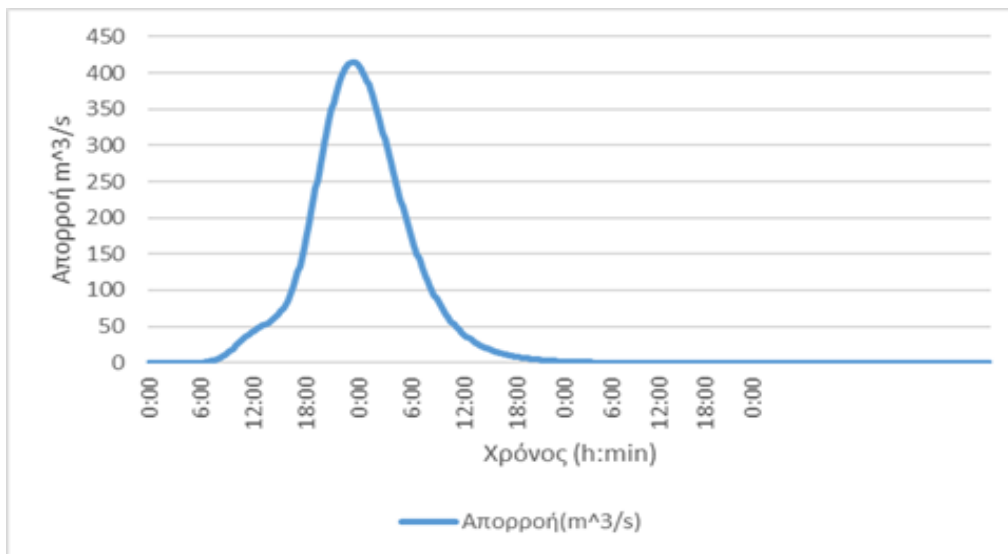
Εικόνα Π37: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h



Εικόνα Π38: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h

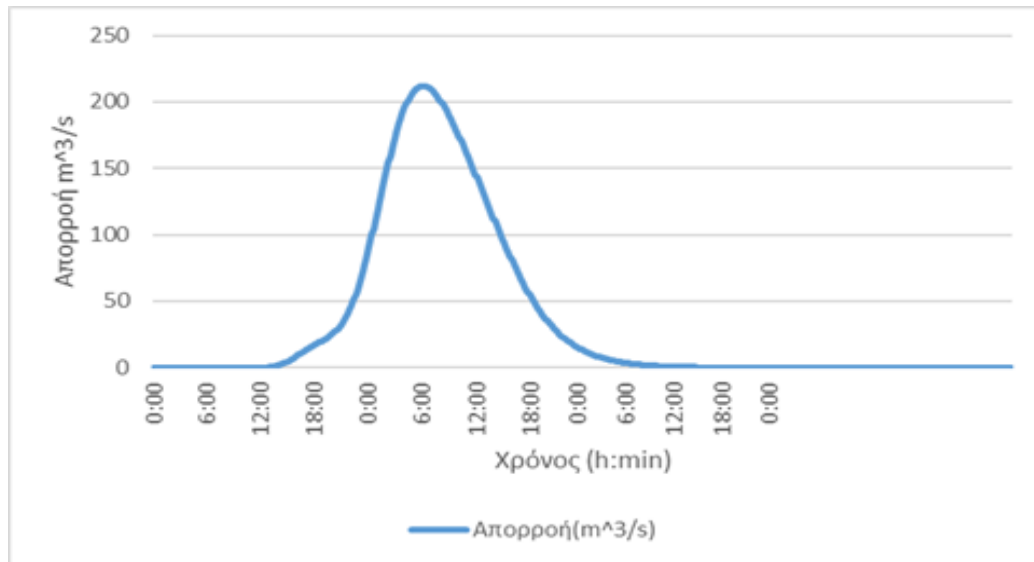


Εικόνα Π39: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h

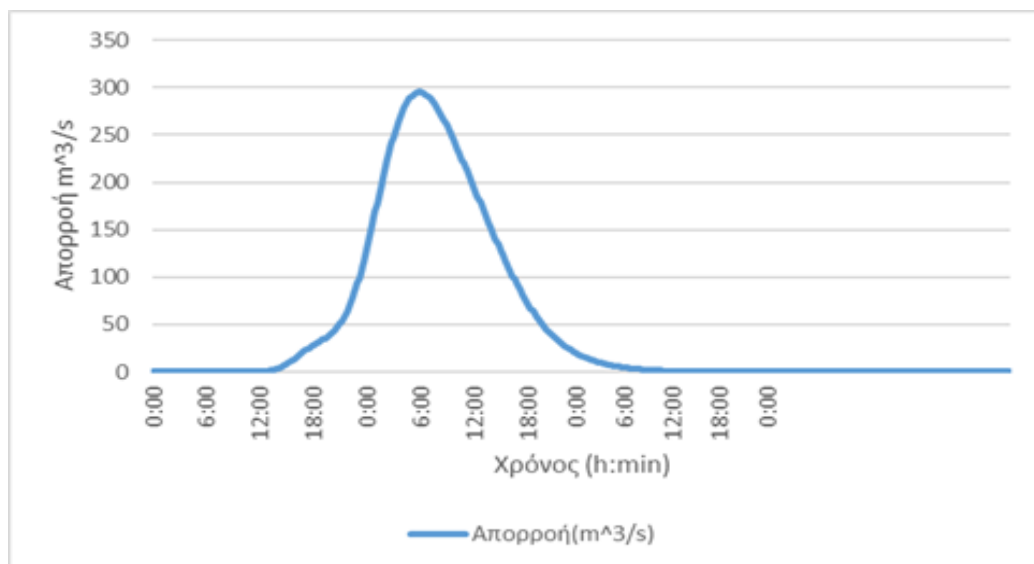


Εικόνα Π40: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h

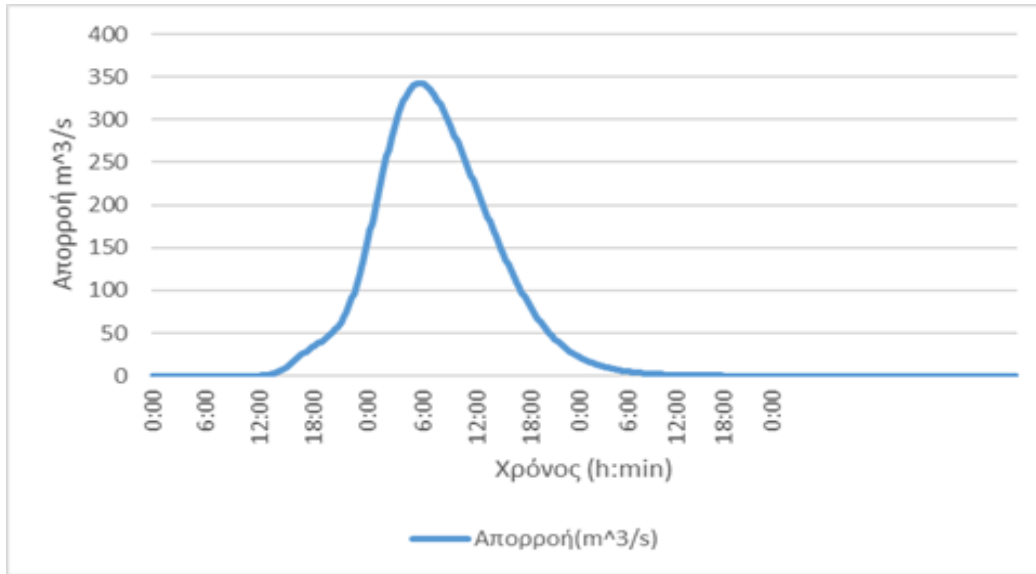
Για $t=24$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης 10%



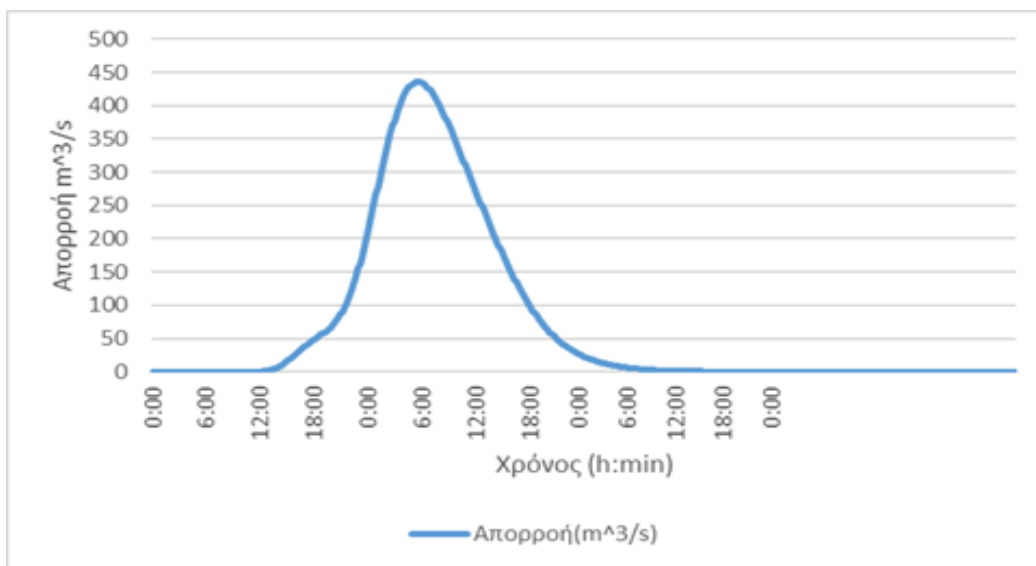
Εικόνα Π41: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%



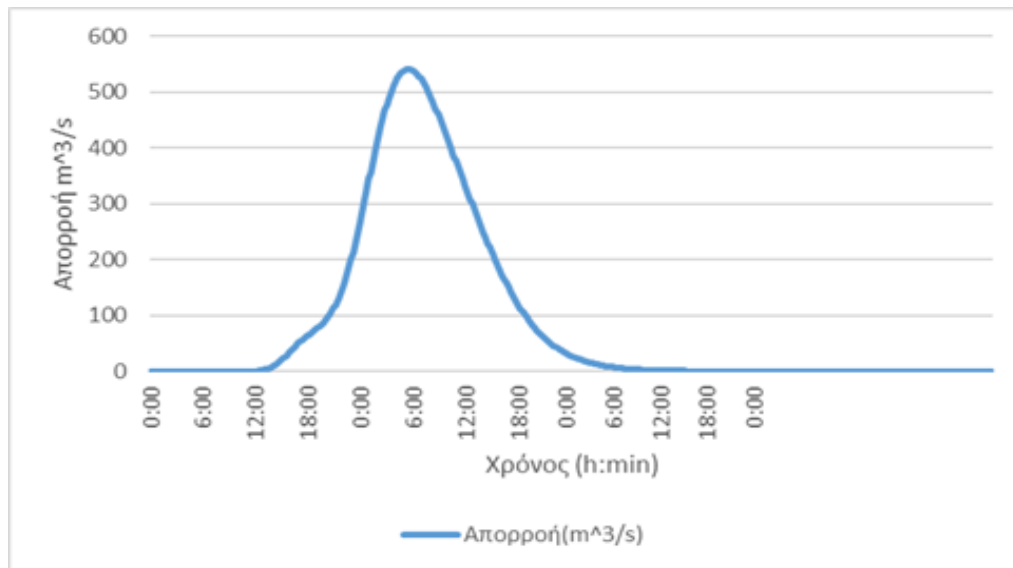
Εικόνα Π42: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%



Εικόνα Π43: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%

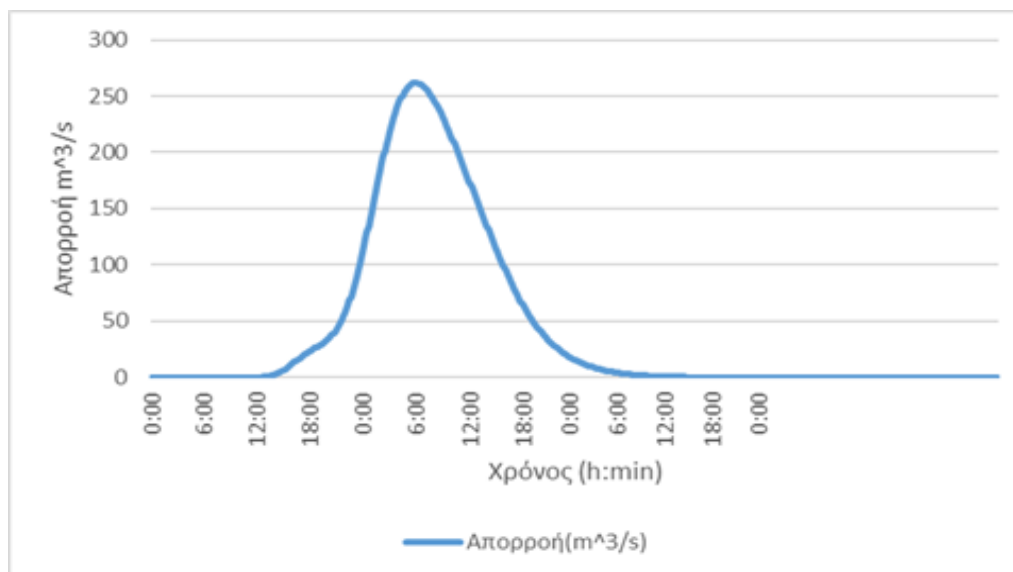


Εικόνα Π44: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%

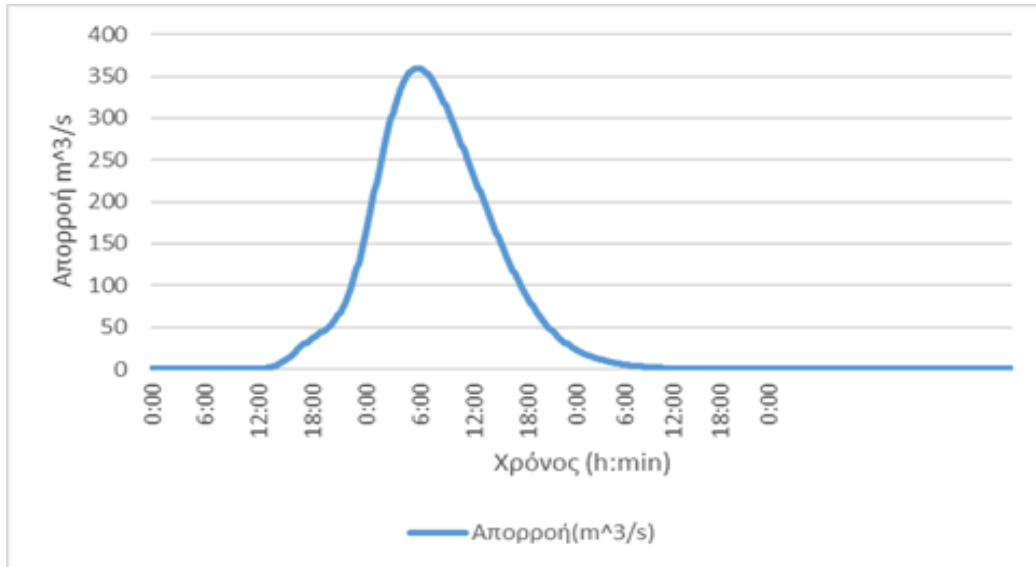


Εικόνα Π45: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 γ και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 10%

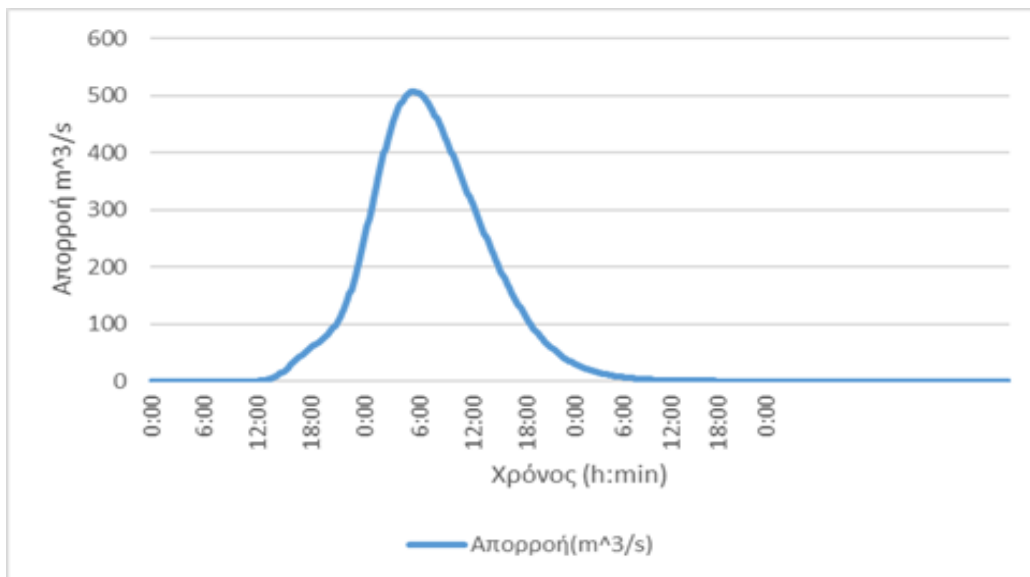
Για $t=24$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη μετά την αύξηση της βροχόπτωσης 20%



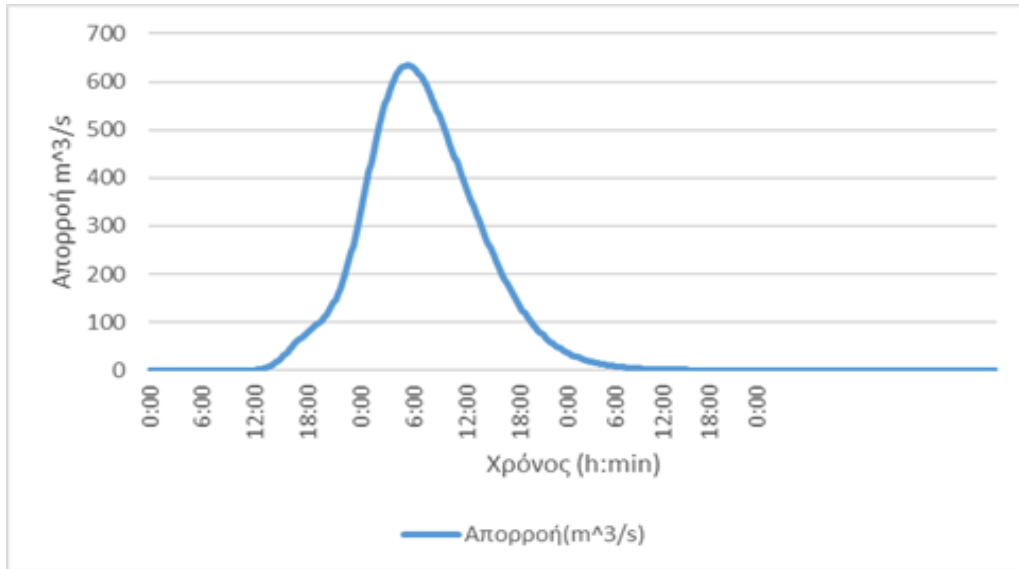
Εικόνα Π46: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 γ και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%



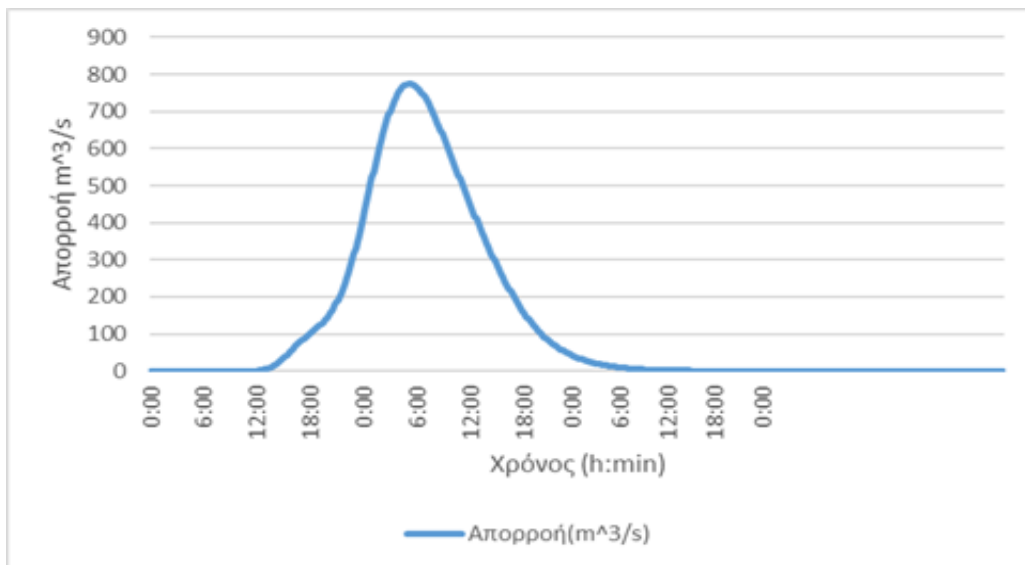
Εικόνα Π47: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%



Εικόνα Π48: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%

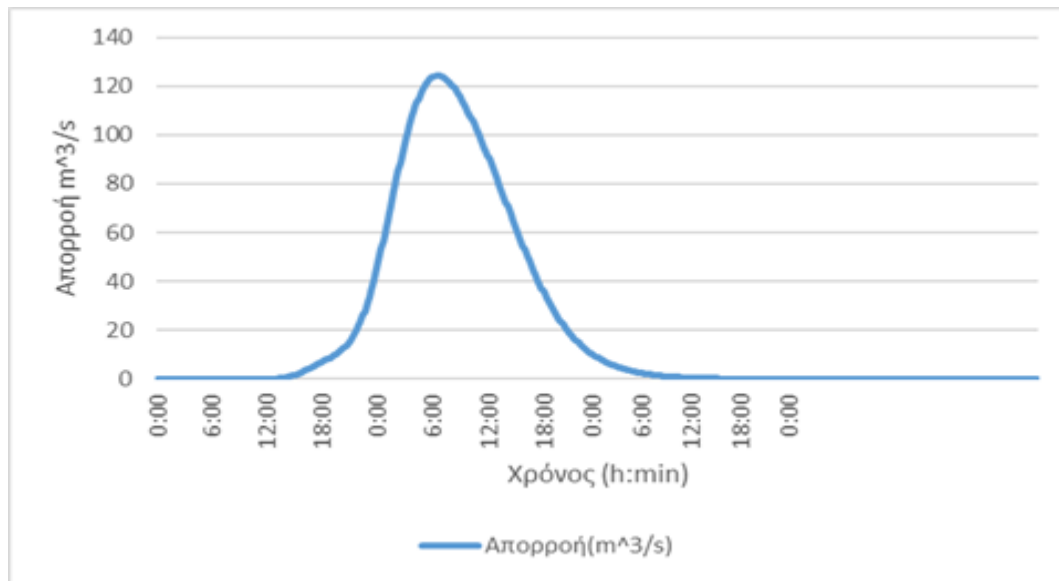


Εικόνα Π49: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%

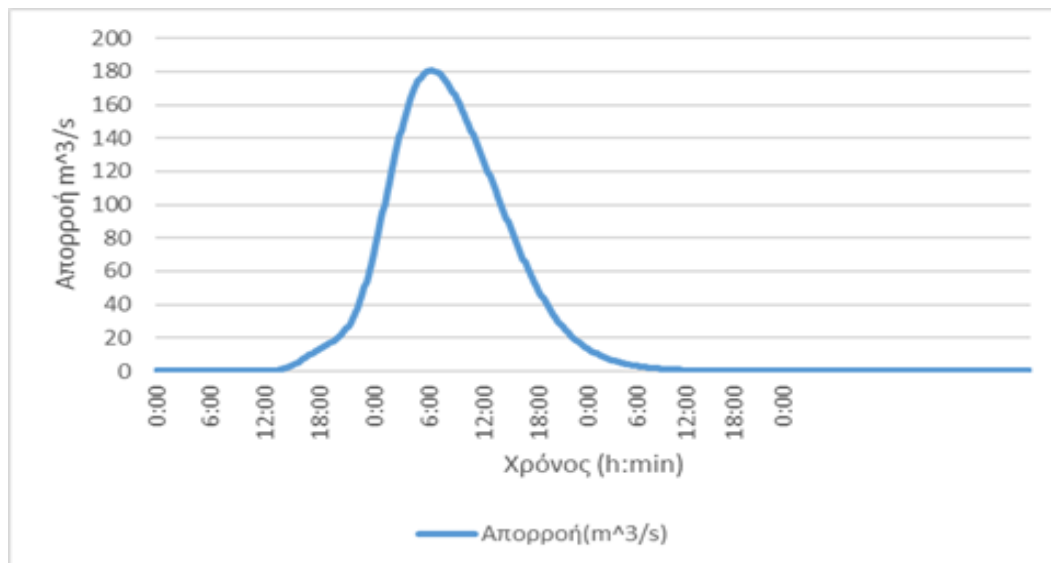


Εικόνα Π50: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την αύξηση της βροχόπτωσης κατά 20%

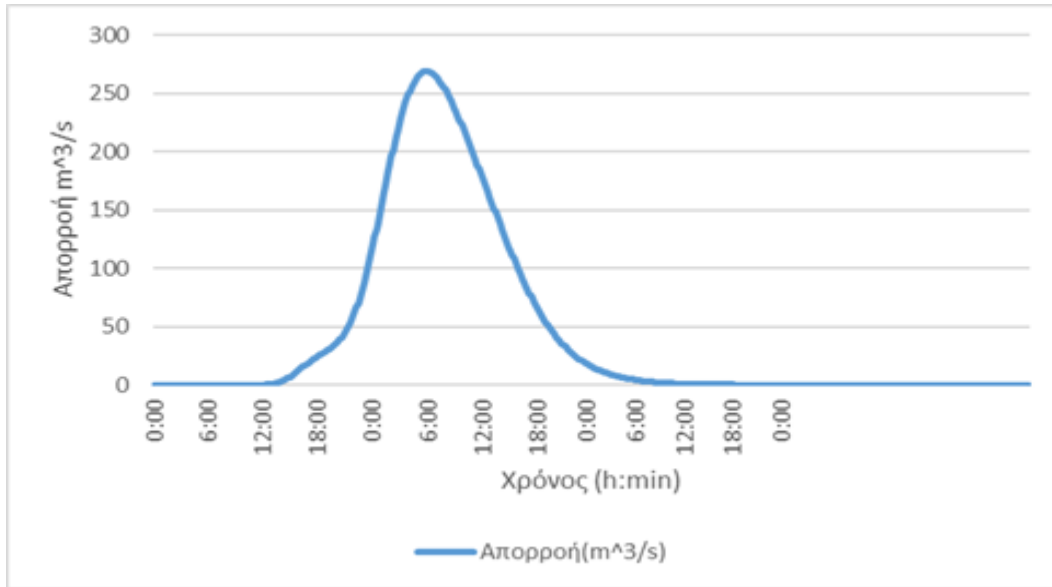
Για $t=24$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης 10%



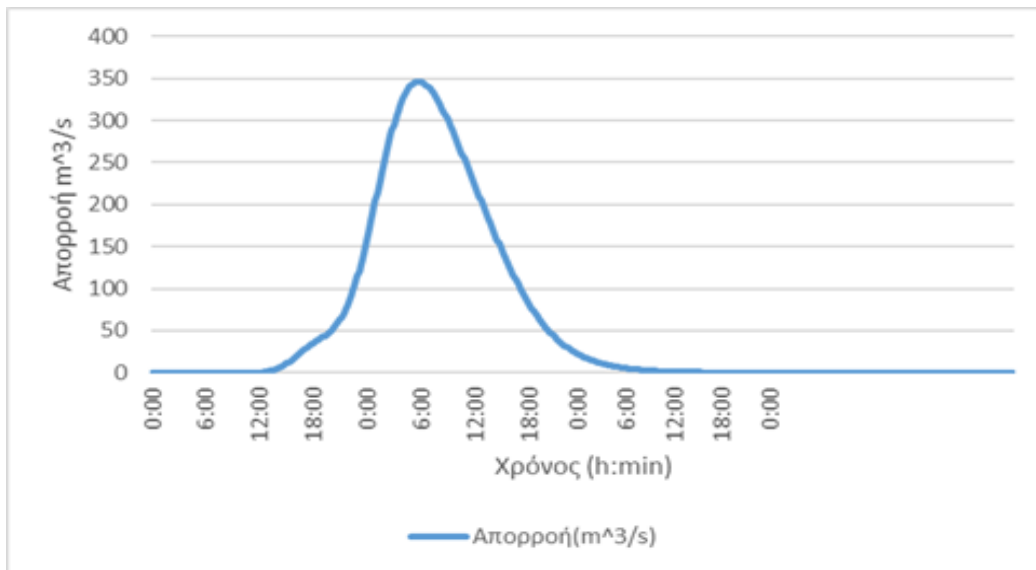
Εικόνα Π51: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%



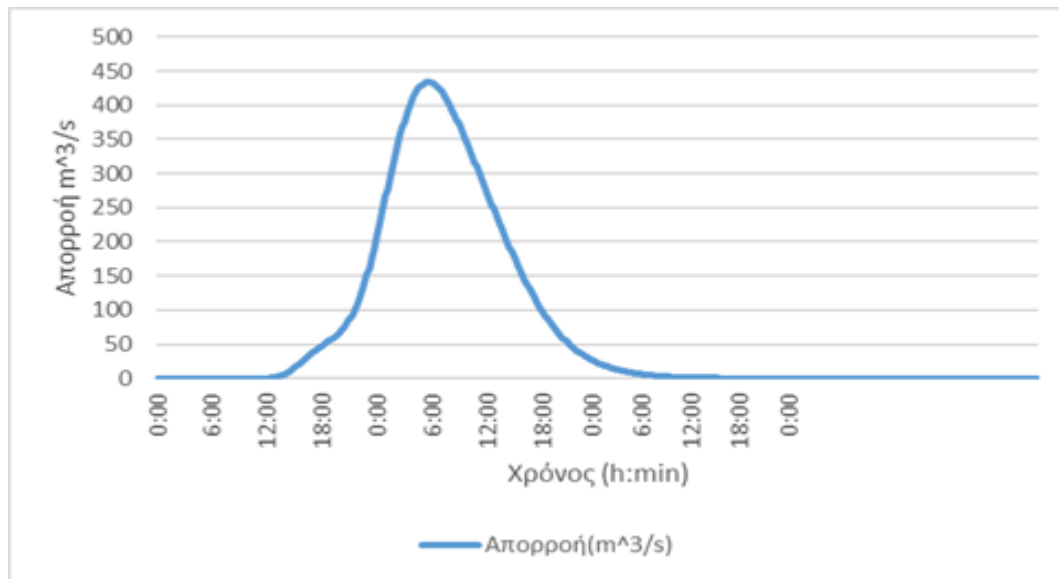
Εικόνα Π52: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%



Εικόνα Π53: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%

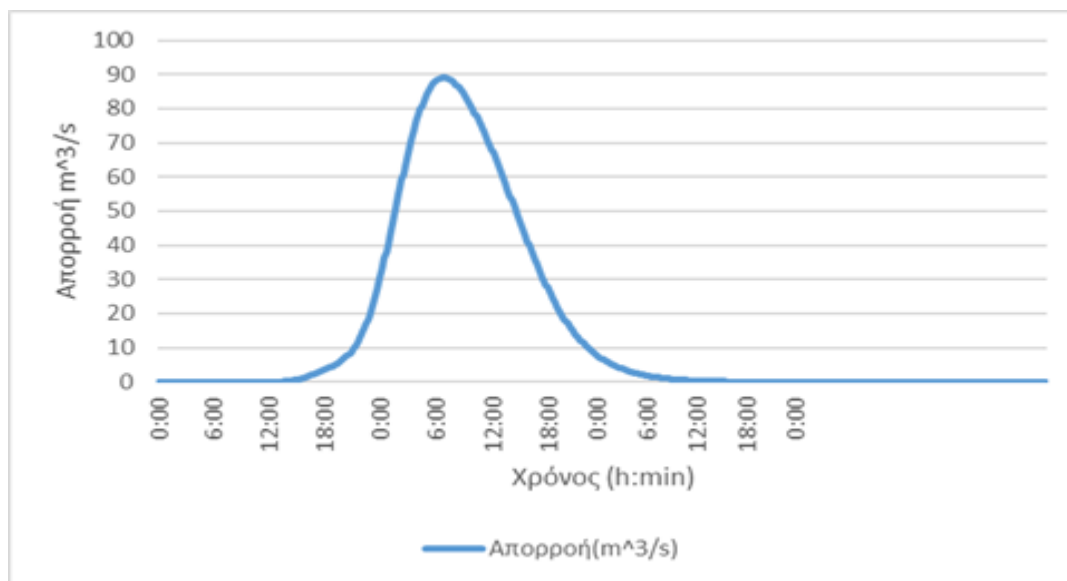


Εικόνα Π54: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%

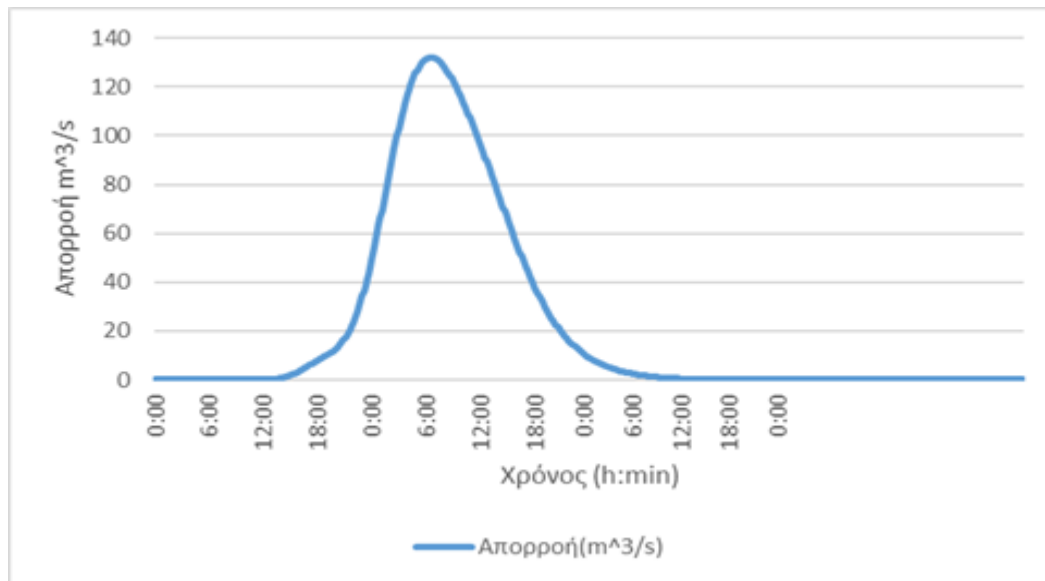


Εικόνα Π55: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%

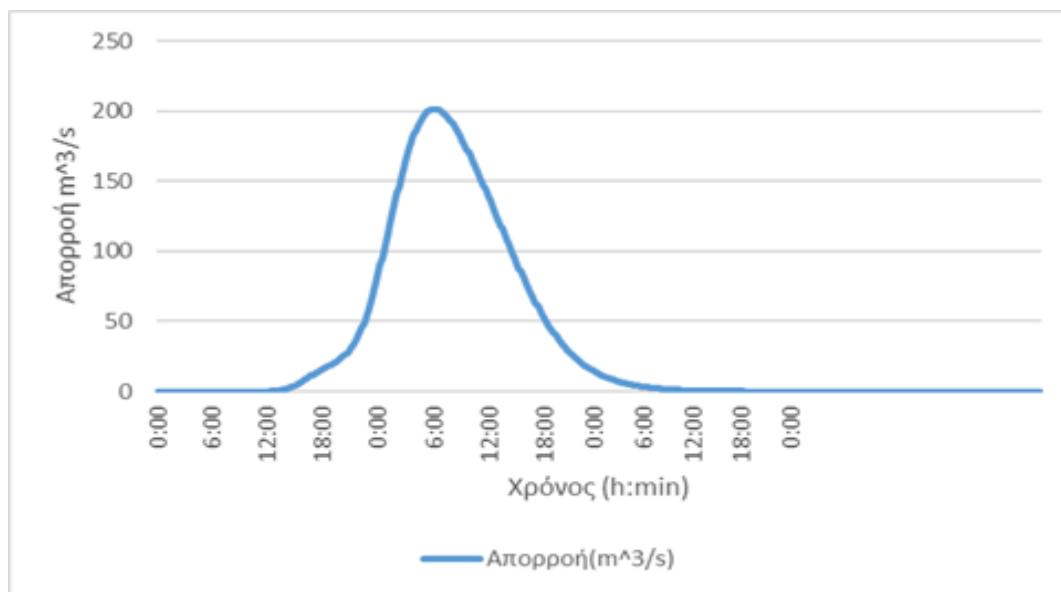
Για $t=24$ ώρα και $T=5, 10, 25, 50, 100$ έτη μετά την μείωση της βροχόπτωσης 20%



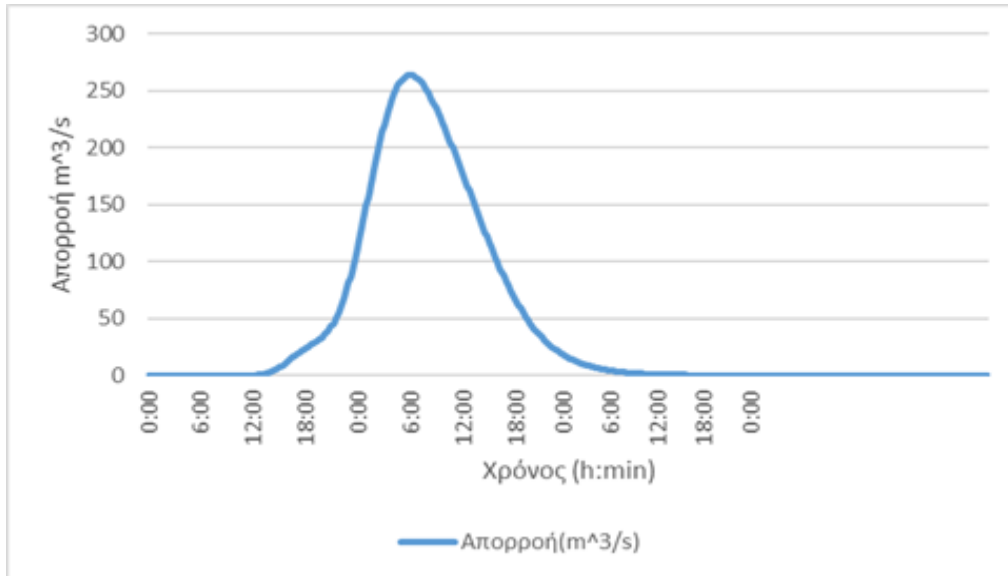
Εικόνα Π56: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%



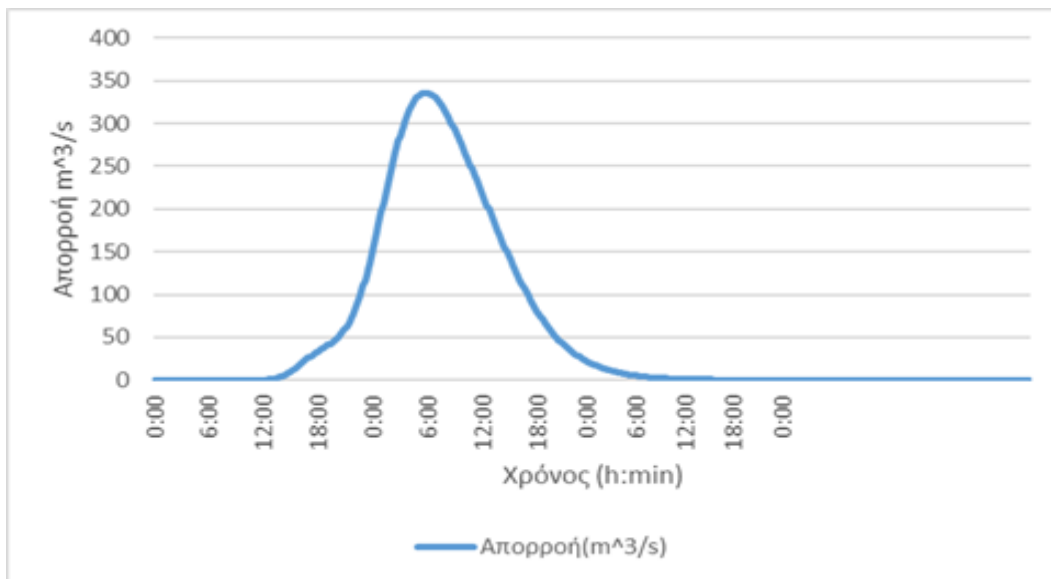
Εικόνα Π57: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%



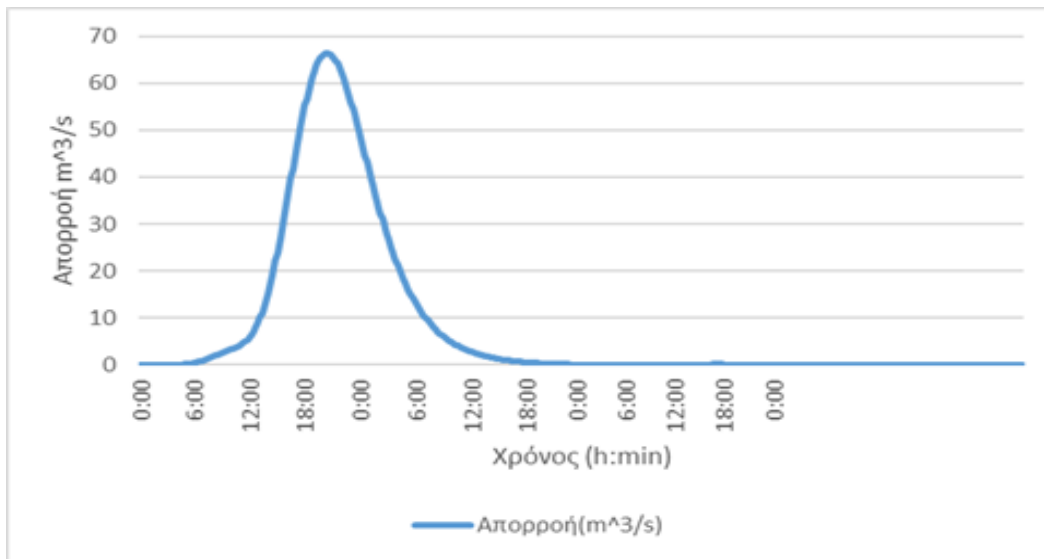
Εικόνα Π58: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%



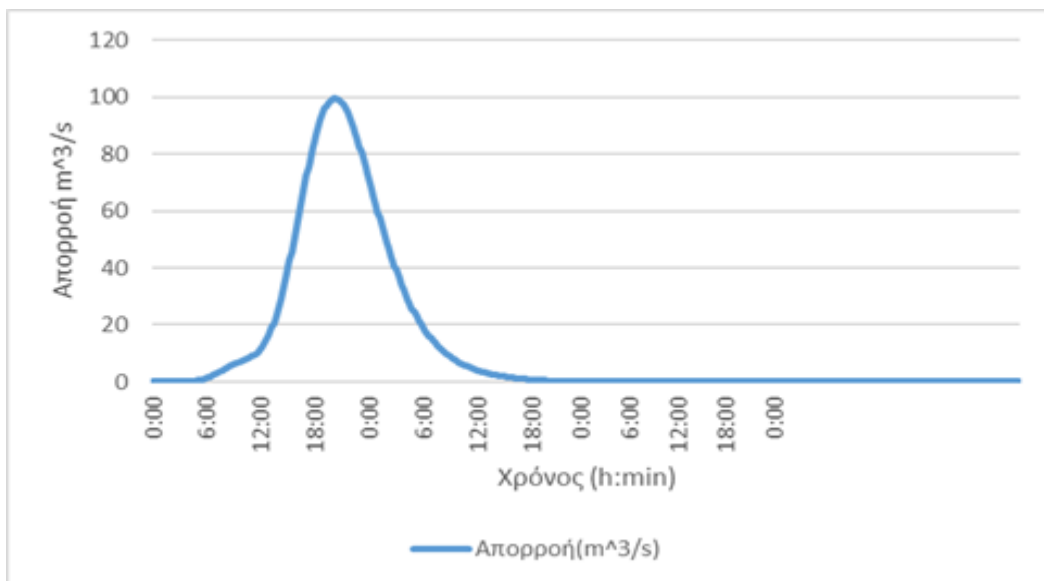
Εικόνα Π59: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%



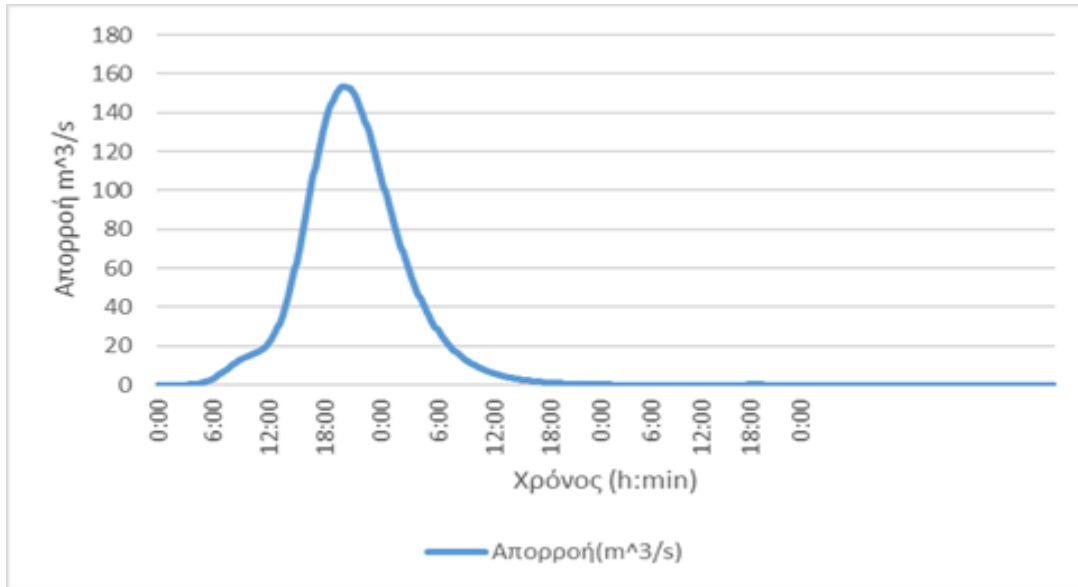
Εικόνα Π60: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 24h μετά την μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%



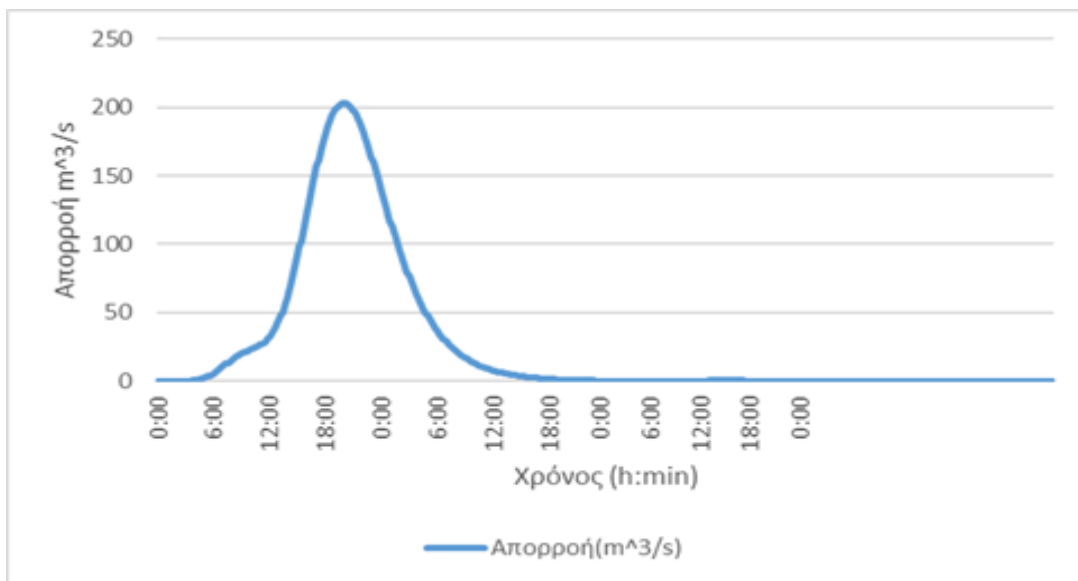
Εικόνα Π61: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



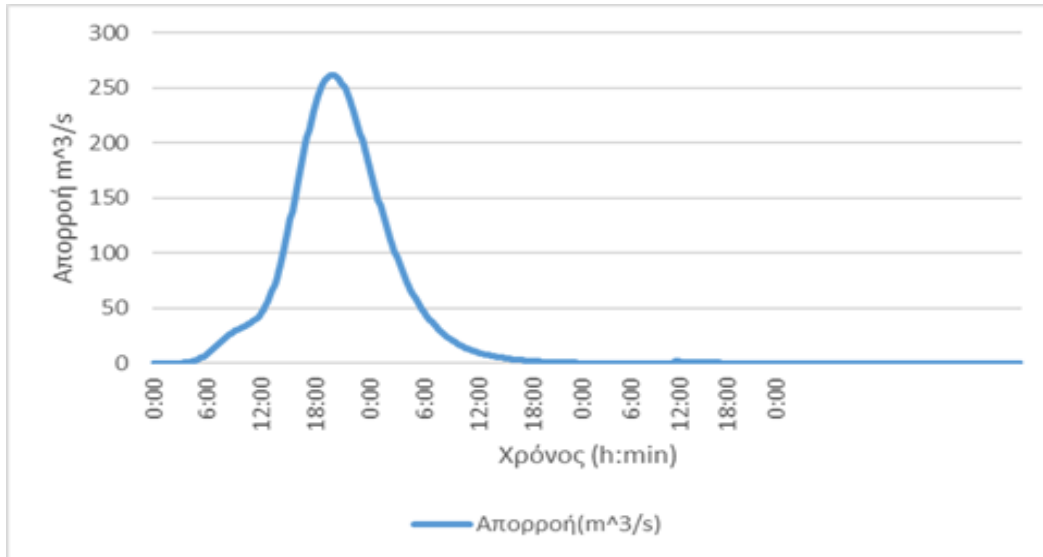
Εικόνα Π62: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



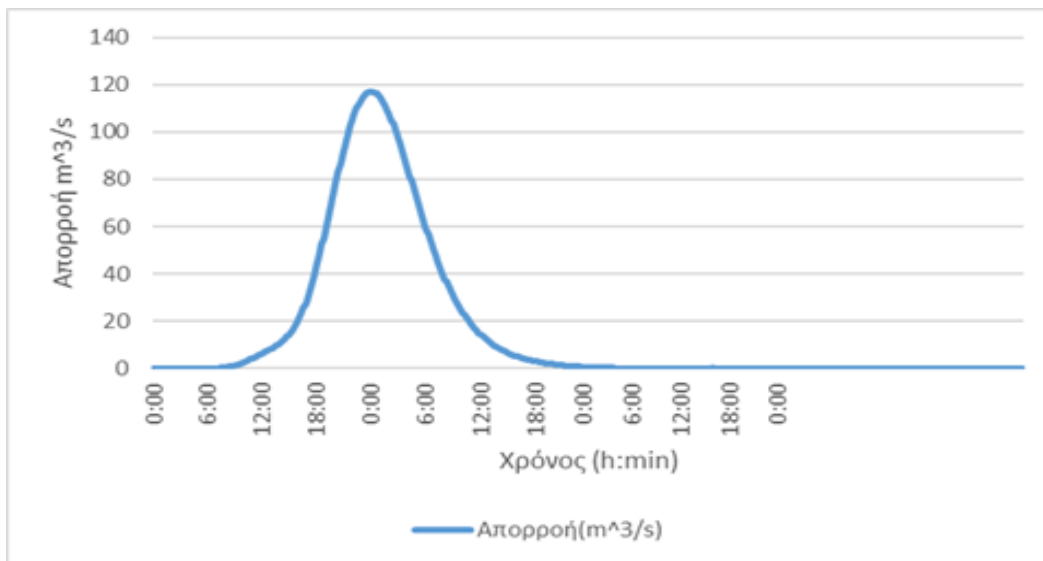
Εικόνα Π63: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



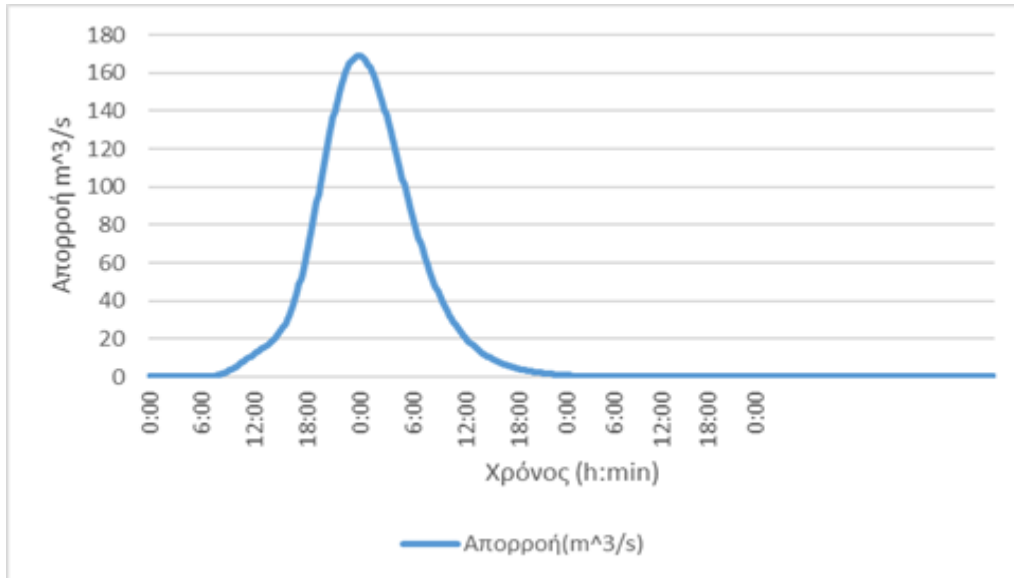
Εικόνα Π64: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



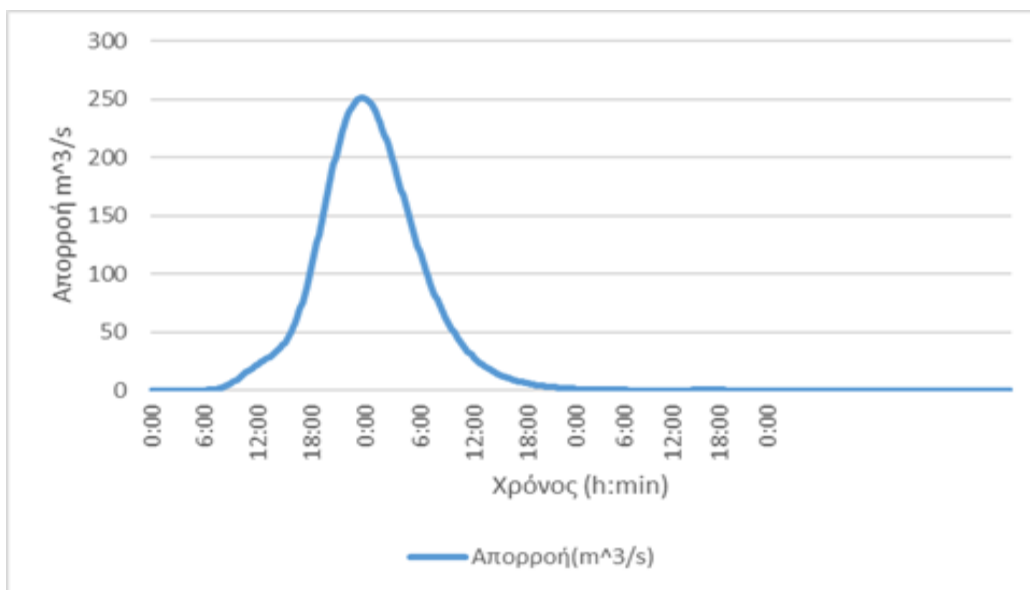
Εικόνα Π65: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 6h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



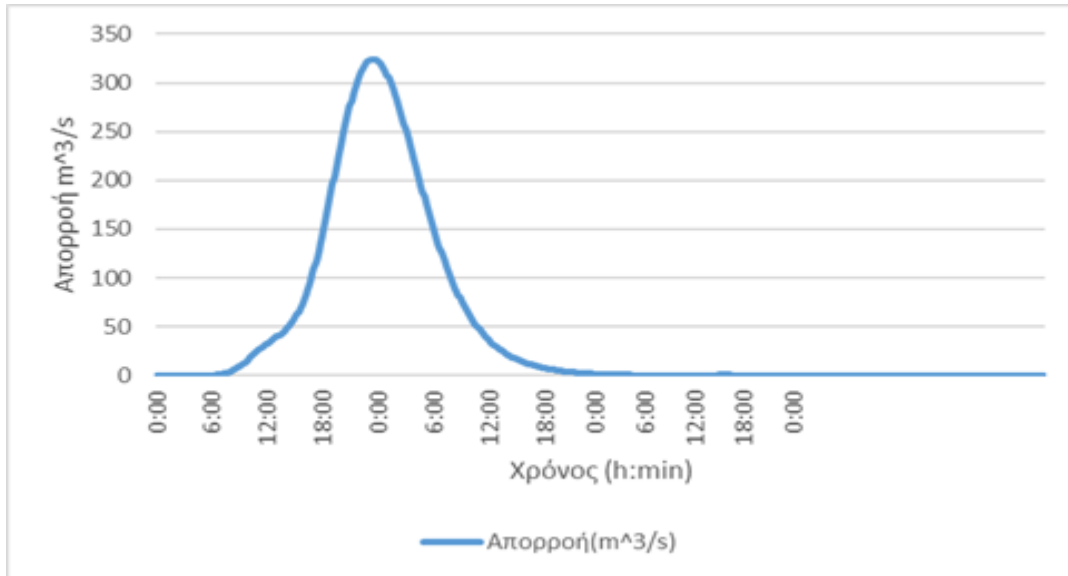
Εικόνα Π66: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



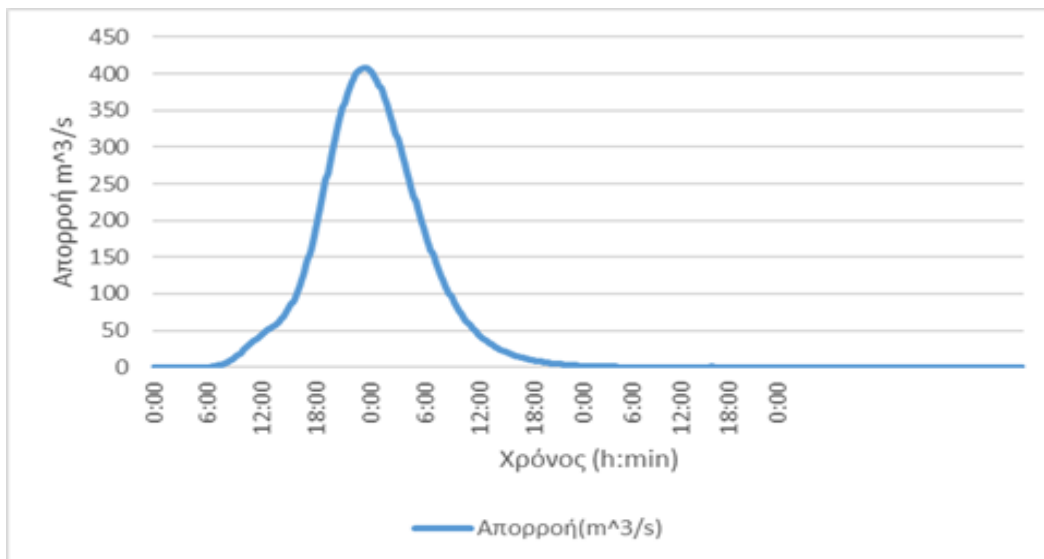
Εικόνα Π67: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



Εικόνα Π68: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 25 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



Εικόνα Π69: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού



Εικόνα Π70: Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενδιαφέροντος για γεγονός σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 y και διάρκειας βροχόπτωσης 12h μετά την αύξηση του αστικού ιστού