



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΗΦΙΣΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWAT

ΦΩΤΕΙΝΗ ΠΛΑΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	x
ABSTRACT	xii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	1
1.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε	1
1.3 Υδρολογικά μοντέλα.....	2
1.4 Το ζήτημα των πλημμυρών	2
1.4.1 Γενικά για τις πλημμύρες.....	2
1.4.2 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/ΕΚ.....	3
1.4.3 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ.....	3
1.4.4 Το πλημμυρικό καθεστώς σε Ευρώπη και Ελλάδα.....	4
1.4.5 Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένων λεκανών απορροής.....	6
1.5 Πυρκαγιές	6
1.5.1 Χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών	6
1.5.2 Οι πυρκαγιές σε Μεσόγειο και Ελλάδα	7
1.5.3 Επίδραση πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής.....	8
1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	9
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	15
2.1 Λεκάνη απορροής Κηφισού	15
2.2 Λεκάνη απορροής περιοχής μελέτης	17
2.3 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά.....	20
2.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά	22
2.5 Δασική βλάστηση	24
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ- MONTELO SWAT.....	27
3.1 Γενικά	27
3.2 Υδρολογικός κύκλος του νερού.....	27
3.3 Υδρολογικές διεργασίες	28
3.3.1 Επιφανειακή απορροή.....	28
3.3.2 Διήθηση.....	29
3.3.3 Εξατμισοδιαπνοή	30
3.4 Συλλογή δεδομένων.....	32
3.5 Διαμόρφωση του μοντέλου	33
3.5.1 Προετοιμασία μοντέλου SWAT (SWAT Project Setup):.....	33
3.5.2 Οριοθέτηση Λεκάνης Απορροής (Watershed Delineator):.....	33
3.5.3 Δημιουργία Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU Analysis):.....	37

3.5.4 Προσδιορισμός Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU Definition)	44
3.5.5 Εισαγωγή δεδομένων καιρού	45
3.6 Προσομοίωση (SWAT Simulation).....	49
3.7 Αρχεία αποτελεσμάτων SWAT.....	51
3.8 Αλλαγή στον Αριθμό Καμπύλης CN μετά την δασική πυρκαγιά.....	51
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	55
4.1 Υπάρχουσα κατάσταση.....	55
4.2 Μετά την πυρκαγιά.....	66
4.3 Σύγκριση.....	76
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	91
5.1 Συμπεράσματα	91
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93
Ελληνική βιβλιογραφία	93
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	95
Από το διαδίκτυο.....	96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου πλημμύρας στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής EL06.....	5
Εικόνα 2: Ποσοστό καμένων εκτάσεων στην Ευρώπη από το 2006-2022 (πηγή: EFFIS Statistics Portal)	8
Εικόνα 3: Αριθμός πυρκαγιών και καμένων εκτάσεων από αυτές στην Ελλάδα από το 2006-2023 (πηγή: EFFIS Statistics Portal).....	8
Εικόνα 4: Κατάταξη Υδρογραφικού Δικτύου Λεκανοπεδίου Αττικής (πηγή: Επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής, Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής, Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023).....	16
Εικόνα 5: Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες της λεκάνης απορροής Κηφισού ανάντη των Τριών γεφυρών (πηγή: Επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής, Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής, Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023) ..	17
Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής περιοχής μελέτης	18
Εικόνα 7: Χάρτης καμένης περιοχής λεκάνης απορροής.....	19
Εικόνα 8: Γεωλογικός χάρτης Πάρνηθας (πηγή: Μαριολάκος κ.α., 2001)	21
Εικόνα 9: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Κηφισού και του Ιλυσού ποταμού (πηγή: Κοταμπάση και Σκέντος, 2005).....	22
Εικόνα 10: Ομβροθερμικό διάγραμμα Τατοΐου περίοδος 1956-2010 (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)	23
Εικόνα 11: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού (Neitsch et al., 2011).....	28
Εικόνα 12: Προετοιμασία μοντέλου SWAT.....	33
Εικόνα 13: Πολύγωνο περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth)	34
Εικόνα 14: Οριοθέτηση λεκάνης απορροής	35
Εικόνα 15: Οριοθέτηση λεκάνης απορροής-Υπολεκάνες	35
Εικόνα 16: Υπολεκάνες λεκάνης απορροής	36
Εικόνα 17: Χρήσεις γης.....	38
Εικόνα 18: Χάρτης χρήσεων γης CLC2018	39
Εικόνα 19: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης της λεκάνης απορροής στις χρήσεις γης του SWAT	41
Εικόνα 20: Τύποι Εδαφών-Soil Data.....	42
Εικόνα 21: Εδαφικοί τύποι λεκάνης απορροής.....	43
Εικόνα 22: Κλίσεις εδάφους-Slope	44
Εικόνα 23: Προσδιορισμός HRU.....	45
Εικόνα 24: Αίτηση για τα δεδομένα καιρού από την ιστοσελίδα W3S-Water.....	46
Εικόνα 25: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων	46
Εικόνα 26: Αρχείο wgen με τους σταθμούς μέτρησης των βροχοπτώσεων	47
Εικόνα 27: Μορφή αρχείου txt που περιέχει τις βροχοπτώσεις ενός μετεωρολογικού σταθμού	47
Εικόνα 28: Αρχείο txt με τον σταθμό μέτρησης των θερμοκρασιών	48
Εικόνα 29: Μορφή αρχείου txt που περιέχει τις θερμοκρασίες ενός μετεωρολογικού σταθμού	48
Εικόνα 30: Write SWAT Input tables	49
Εικόνα 31: Προσομοίωση μοντέλου SWAT	49
Εικόνα 32: Αποτελέσματα μοντέλου SWAT.....	50
Εικόνα 33: Έλεγχος μοντέλου SWAT	50
Εικόνα 34: Διάγραμμα εύρεσης αριθμού καμπύλης CN (πηγή: Goodrich et al.2005).....	52
Εικόνα 35: Αλλαγή τιμής CN	53

Εικόνα 69: Σύγκριση απορροής των υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	78
Εικόνα 70: Σύγκριση απορροής της υπολεκάνης 1 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	78
Εικόνα 71: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 1 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	79
Εικόνα 72: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 2 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	80
Εικόνα 73: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 2 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	80
Εικόνα 74: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 3 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	81
Εικόνα 75: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 3 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	82
Εικόνα 76: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 4 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	82
Εικόνα 77: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 4 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	83
Εικόνα 78: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 5 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	84
Εικόνα 79: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 5 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	84
Εικόνα 80: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 6 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	85
Εικόνα 81: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 6 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	86
Εικόνα 82: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 7 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης.....	86
Εικόνα 83: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 7 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης.....	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κλιματολογικά χαρακτηριστικά του σταθμού Τατοΐου στις 3 Αυγούστου 2021 (πηγή: Meteosearch).....	24
Πίνακας 2: Αρχείο txt-Look Up Table.....	38
Πίνακας 3: Μετατροπή χρήσεων γης CLC2018 σε χρήσεις γης του SWAT.....	40
Πίνακας 4: Χρήσεις γης SWAT.....	40
Πίνακας 5: Αρχείο txt-Look up Table.....	42
Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών στις 18/2/2011.....	88
Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών πριν και μετά την πυρκαγιά τον Φεβρουάριο του 2011.....	88
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών στις 1/8/2011.....	89
Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών τον Αύγουστο του 2011.....	89

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλειο Τσιχριντζή για την προθυμία του και την ευγένεια του να αναλάβει την διπλωματική μου εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Κούρτη, για την βοήθεια του σε οποιοδήποτε δυσκολία προέκυψε καθώς και στην άμεση ανταπόκριση του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής τον κύριο Ιωάννη Ναλμπάντη και τον κύριο Χαρίλαο Βαγγέλη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στη μελέτη και την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την ενθάρρυνση τους όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αλλαγές των χρήσεων γης δημιουργούν μεγάλες αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς των λεκανών απορροής, προκαλώντας διάβρωση του εδάφους και πλημμυρικά φαινόμενα, λόγω της αύξησης της απορροής. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η υδρολογική προσομοίωση ενός τμήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού Κηφισού μετά από δασική πυρκαγιά, με το υδρολογικό μοντέλο Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Πιο συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής της Βαρυμπόμπης, έκτασης περίπου 59 km², της οποίας μεγάλο μέρος δασικής έκτασης κάηκε μετά την πυρκαγιά του 2021. Το λογισμικό SWAT υπολογίζει την επιφανειακή απορροή, την διήθηση, την εξατμισοδιαπνοή και την κατείδυση στα υπόγεια νερά. Για την υδρολογική προσομοίωση με το λογισμικό SWAT τα απαραίτητα δεδομένα είναι: το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model-DEM), οι χρήσεις γης, τα δεδομένα εδάφους και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Αναλυτικότερα, με την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, πραγματοποιείται διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής και εξαγωγή του υδροκρίτη της υπό εξέταση λεκάνης απορροής. Επιπλέον, με το λογισμικό SWAT χωρίζεται η λεκάνη απορροής σε υπολεκάνες και δημιουργείται το υδρογραφικό δίκτυο. Στη συνέχεια, με την εισαγωγή των χρήσεων γης, των δεδομένων εδάφους και των κλίσεων δημιουργούνται οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrologic Response Units-HRUs), κάθε μία από τις οποίες έχουν ένα μοναδικό συνδυασμό χρήσεων γης, εδάφους και κλίσεων. Τέλος, με την εισαγωγή των βροχοπτώσεων, των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών εισάγονται όλα τα δεδομένα που απαιτούνται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για την χρονική περίοδο από την 1/1/2001 έως και την 31/12/2019, με περίοδο προθέρμανσης του μοντέλου τα 4 πρώτα χρόνια. Στη συνέχεια, μετά την πυρκαγιά του 2021 οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής μεταβλήθηκαν και για το λόγο αυτό επαναπροσδιορίστηκε ο αριθμός καμπύλης (Curve Number-CN). Για τον επαναπροσδιορισμό του αριθμού καμπύλης χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα το οποίο προτάθηκε από τους Goodrich et. al (2005), όπου συσχετίζεται ο αριθμός καμπύλης CN με το ποσοστό της λεκάνης που δεν κάηκε και την υδρολογική κατηγορία του εδάφους. Έτσι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε ξανά με διαφορετικό CN. Το τελικό αποτέλεσμα της εργασίας, είναι η δημιουργία υδρογραφημάτων απορροής στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά τόσο σε ημερήσιο όσο και σε μηνιαίο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Επίσης, δημιουργήθηκαν υδρογραφήματα επιφανειακής απορροής για κάθε υπολεκάνη πριν και μετά την πυρκαγιά, τόσο σε ημερήσιο όσο και σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Τέλος, έλαβε χώρα σύγκριση της απορροής πριν και μετά την πυρκαγιά και παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση. Συγκεκριμένα, η μέγιστη απορροή στην έξοδο της λεκάνης, η οποία είναι στις 18/11/2011, είχε τιμή πριν την πυρκαγιά 27.69 m³/s και μετά την πυρκαγιά έφτασε 36.43 m³/s, δηλαδή παρουσίασε αύξηση 31.56%. Παράλληλα από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων για κάθε υπολεκάνη, βγήκε το συμπέρασμα ότι τη μεγαλύτερη μεταβολή της επιφανειακής απορροής είχε η υπολεκάνη 5, στην οποία βρισκόταν το μεγαλύτερο ποσοστό δασικής έκτασης. Παράλληλα η επιφανειακή απορροή τους ξηρούς μήνες βρέθηκε ιδιαίτερα χαμηλή, όπως φάνηκε από τον Αύγουστο του 2011, με την υπολεκάνη 6 να έχει τη μεγαλύτερη μεταβολή επιφανειακής απορροής. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι οι μεγάλες δασικές πυρκαγιές επηρεάζουν σημαντικά το υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής, ειδικότερα στις μεσογειακές χώρες, όπως η Ελλάδα που λόγω του κλίματος αλλά και της βλάστησης της είναι ευάλωτες στις δασικές πυρκαγιές.

ABSTRACT

Land use changes create major changes in the hydrological regime of watersheds, causing soil erosion and flooding phenomena, due to increased runoff. The aim of this thesis is the hydrological simulation of a part of the Kifisos river basin after a forest fire, with the use of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model. More specifically, the study area, Varympompi catchment, is about 59 km², much of which was deforested after the 2021 fire. The SWAT software calculates surface runoff, infiltration, evapotranspiration and percolation to groundwater. For hydrological simulation with SWAT software the necessary data are: the Digital Elevation Model (DEM), land uses, soil data and meteorological data. More specifically, the digital elevation model is used for catchment discretization and the watershed of the basin under consideration is extracted. In addition, SWAT software divides the watershed into subbasins and develops the streaming network. Then, the land uses, soil data and slopes, are used to define Hydrologic Response Units (HRUs). Each HRU comprises a unique combination of land uses, soil and slopes. In this thesis, the simulation was carried out for the time period from 1/1/2001 to 12/31/2019, with a warm-up period of the model in the first 4 years. Then, for simulating the effect of the 2021 fire on the hydrological regime, because of the changes of the land uses of the watershed, the Curve Number-CN was redefined. To redefine the curve number, the diagram proposed by Goodrich et al. (2005), which correlates the CN curve number with the percentage of the basin that is not burned and the soil hydrologic class utilized. The simulation was then repeated using the redefined CN values. The final result of the work is the creation of hydrographs at the outlet of the basin before and after the fire in both daily and monthly simulation steps. Surface runoff hydrographs were also generated for each subbasin before and after the fire for daily and monthly simulation time steps. Runoff hydrographs before and after the fire were compared. It appears that the runoff after the fire increased significantly. Specifically, the maximum runoff at the outlet of the basin had a value before the fire of 27.69 m³/s and after the fire it reached 36.43 m³/s, so it showed an increase of 31.56%. At the same time, from the comparison of the hydrographs for each subbasin, it was concluded that subbasin 5, in which the largest percentage of forest area was located, had the greatest change in surface runoff. Furthermore, surface runoff in the dry months, as seen in August 2011, is particularly low, with subbasin 6 having the largest change in surface runoff. The final conclusion is that large forest fires significantly affect the hydrological regime of watersheds, especially in Mediterranean countries, like Greece, which due to its climate and vegetation are vulnerable to forest fires.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί ένα πολύ επίκαιρο ζήτημα τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας ανησυχία σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι αυξανόμενες ανάγκες σε νερό για άρδευση καθώς και η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων προκύπτουν από την αύξηση του πληθυσμού (Τσιχριντζής, 2021). Η έντονη αστικοποίηση και η εντατική γεωργία, πέρα από την μεγάλη ζήτηση σε νερό οδηγούν και στην μεγάλη παραγωγή ρύπων των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, μειώνοντας έτσι περισσότερο τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους (Τσιχριντζής, 2021).

Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον υδρολογικό κύκλο του νερού προκαλώντας ακραία φαινόμενα, όπως πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πλημμύρες (Τσιχριντζής, 2021). Ειδικότερα στις Μεσογειακές χώρες, λόγω του ξηρού κλίματος και των καυσώνων που έχουν προκληθεί από την κλιματική αλλαγή, τους καλοκαιρινούς μήνες ο κίνδυνος των δασικών πυρκαγιών προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά (Τσιχριντζής, 2021). Όλα τα παραπάνω συντελούν στην αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων και της ξηρασίας. Οι πλημμύρες και οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν τις δυο συχνότερες φυσικές καταστροφές, δημιουργώντας τεράστιες επιπτώσεις τόσο σε κοινωνικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο (Βαρσάμη, 2014). Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ζήτημα των πλημμυρών, θεσπίστηκε η Οδηγία πλαίσιο 2007/60/EK, η οποία αξιολογεί και διαχειρίζεται τους κινδύνους πλημμύρας.

Επιπλέον, για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις που επιφέρουν τα ακραία φυσικά φαινόμενα πρωτίτως στις ανθρώπινες ζωές και δευτερευόντως στην ασφάλεια των υποδομών κρίνεται απαραίτητη η σωστή πρόγνωση των φυσικών φαινομένων ώστε να υπάρχει έγκαιρη προειδοποίηση του πληθυσμού (Λάμπρου, 2021). Οι δασικές πυρκαγιές μεταβάλλουν τις χρήσεις γης των λεκανών απορροής από δασωμένο σε γυμνό έδαφος με συνέπεια αυτές να μη μπορούν να συγκρατήσουν μεγάλα ύψη βροχόπτωσης και να δημιουργούνται πλημμυρικά φαινόμενα (Βαρσάμη, 2014).

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Κηφισού ποταμού και συγκεκριμένα το κομμάτι που περιλαμβάνει την περιοχή της Βαρυμπόμπης, η οποία επλήγη ύστερα από την πυρκαγιά που ξέσπασε το καλοκαίρι του 2021. Η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Soil and Water Assessment Tool (SWAT) με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Λόγω των αλλαγών που προήλθαν στις χρήσεις γης μετά την πυρκαγιά χρειάστηκε να επαναπροσδιοριστεί ο αριθμός καμπίλης CN και να διενεργηθεί ξανά η προσομοίωση. Τέλος, συγκρίνοντας τα υδρογραφήματα που δημιουργήθηκαν τόσο στην έξοδο της λεκάνης όσο και για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά πριν και μετά την πυρκαγιά εξετάστηκε αν προήλθε μεταβολή στο υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης απορροής μετά την δασική πυρκαγιά.

1.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας είναι τα εξής:

- ArcGIS 10.5.1 (Geographic Information System)- Environmental Systems Research Institute (ESRI): Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών για απεικόνιση, επεξεργασία και ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων.
- SWAT model (Soil and Water Assessment Tool)- United States Department of Agriculture (USDA)
- MWSWAT 2012
- Map Window GIS
- Google Earth
- Microsoft Office 2007
- Notepad++

1.3 Υδρολογικά μοντέλα

Υδρολογικό μοντέλο (ή μοντέλο βροχής-απορροής) είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν (κατά προσέγγιση) το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 2013). Ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ., τα υδρολογικά μοντέλα ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες. Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες μοντέλων είναι (Τσακίρης, 2013):

- Τα μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και τα συνεχή μοντέλα.
- Τα ενιαία (lumped) και τα κατανεμημένα (distributed) μοντέλα.

Το μοντέλο ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος περιλαμβάνει ως είσοδο ένα μεμονωμένο γεγονός βροχής και ως έξοδο ένα υδρογράφημα απορροής. Αντίθετα, το συνεχές μοντέλο περιλαμβάνει ως είσοδο μια ή περισσότερες χρονοσειρές παρατηρήσεων μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών (Τσακίρης, 2013). Τα ενιαία μοντέλα βασίζονται στην ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου και εξόδου. Αντίθετα, τα κατανεμημένα μοντέλα βασίζονται στη χωρική κατανομή των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής, δηλαδή στην διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες, δηλαδή σε τμήματα με ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά (Τσακίρης, 2013).

Επιπλέον τα συνεχή μοντέλα ταξινομούνται και ως εξής (Τσακίρης, 2013):

α) με κριτήριο το είδος των εξισώσεων. Πιο συγκεκριμένα τα μοντέλα ταξινομούνται σε φυσικά (physically-based), παραμετρικά ή εννοιολογικά (conceptual) και μοντέλα μαύρου κουτιού (black box).

β) με κριτήριο το αν λαμβάνεται υπόψη η τυχαιότητα των φυσικών διεργασιών. Έτσι τα μοντέλα ταξινομούνται σε προσδιοριστικά και στοχαστικά.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο SWAT, το οποίο είναι ένα συνεχές και ημικατανεμημένο μοντέλο φυσικής βάσης.

1.4 Το ζήτημα των πλημμυρών

1.4.1 Γενικά για τις πλημμύρες

Ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες δεν είναι καλυμμένο από νερό. Περιλαμβάνονται πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς

χείμαρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύνανται δε να εξαιρούνται πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης (Οδηγία 2007/60/EK, Άρθρο 2). Η γενεσιουργός αιτία των πλημμυρών είναι το υψηλό περίσσειμα βροχής.

Οι πλημμύρες είναι ένας υπαρκτός κίνδυνος. Μπορούν να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημιές στο περιβάλλον και να θέσουν σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη μιας περιοχής. Είναι αδύνατον να προληφθούν, ωστόσο η συνεχής επέκταση της δόμησης στις πεδινές και παράκτιες περιοχές και η συσσώρευση του πληθυσμού στις ζώνες αυτές, δημιουργεί συνθήκες άμεσης πρόκλησης πλημμυρών τις λεγόμενες αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods). Οι αιφνίδιες πλημμύρες εκδηλώνονται σε μικρό χρόνο σε σχέση με την έναρξη της βροχόπτωσης, όμως είναι δύσκολο να προβλεφθούν και ακόμη δυσκολότερο να αντιμετωπιστούν. Οι πιο ευάλωτες περιοχές που κινδυνεύουν από τις πλημμύρες είναι αυτές με χαμηλό υψόμετρο δίπλα ή κοντά σε ρέματα, ποταμούς ή λίμνες (Οδηγία 2007/60/EK). Τέλος, δύο ακόμη παράγοντες που συμβάλλουν στον κίνδυνο πλημμύρας είναι η μείωση της φυσικής ικανότητας του εδάφους να συγκρατεί το νερό ανάλογα με τη χρήση γης και η αλλαγή του κλίματος.

1.4.2 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK

Με την Οδηγία 2000/60/EK δημιουργείται το ευρωπαϊκό πλαίσιο που θεσπίζει την κοινοτική δράση στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Πιο συγκεκριμένα ο βασικότερος στόχος αυτής της οδηγίας είναι η προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων, η οποία θα αποτρέψει την περαιτέρω υποβάθμιση των υδατικών πόρων και θα συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες. Παράλληλα συνδυάζει ποιοτικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία και την διαχείριση των υδατικών πόρων, οι οποίοι θα εφαρμοστούν στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών. Τέλος, η Οδηγία 2000/60/EK προβλέπει την ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού.

1.4.3 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε σε ισχύ την Οδηγία 2007/60/EK, προκειμένου να θεσπιστεί ένα πλαίσιο, το οποίο θα αξιολογεί και θα διαχειρίζεται τους κινδύνους των πλημμυρών. Η Οδηγία 2007/60 αποτελεί συμπλήρωμα της Οδηγίας Πλαίσιο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων 2000/60 και έχει στόχο τη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στις χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Τσακίρης, 2013). Πιο συγκεκριμένα στοχεύει στη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες (Άρθρο 1, Οδηγία 2007/60/EK).

Τα τρία στάδια της Οδηγίας είναι τα εξής:

1^ο Στάδιο: Προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής των ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες (Άρθρο 4 και 5).

2^ο Στάδιο: Κατάρτιση Χαρτών Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας για τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (Άρθρο 6).

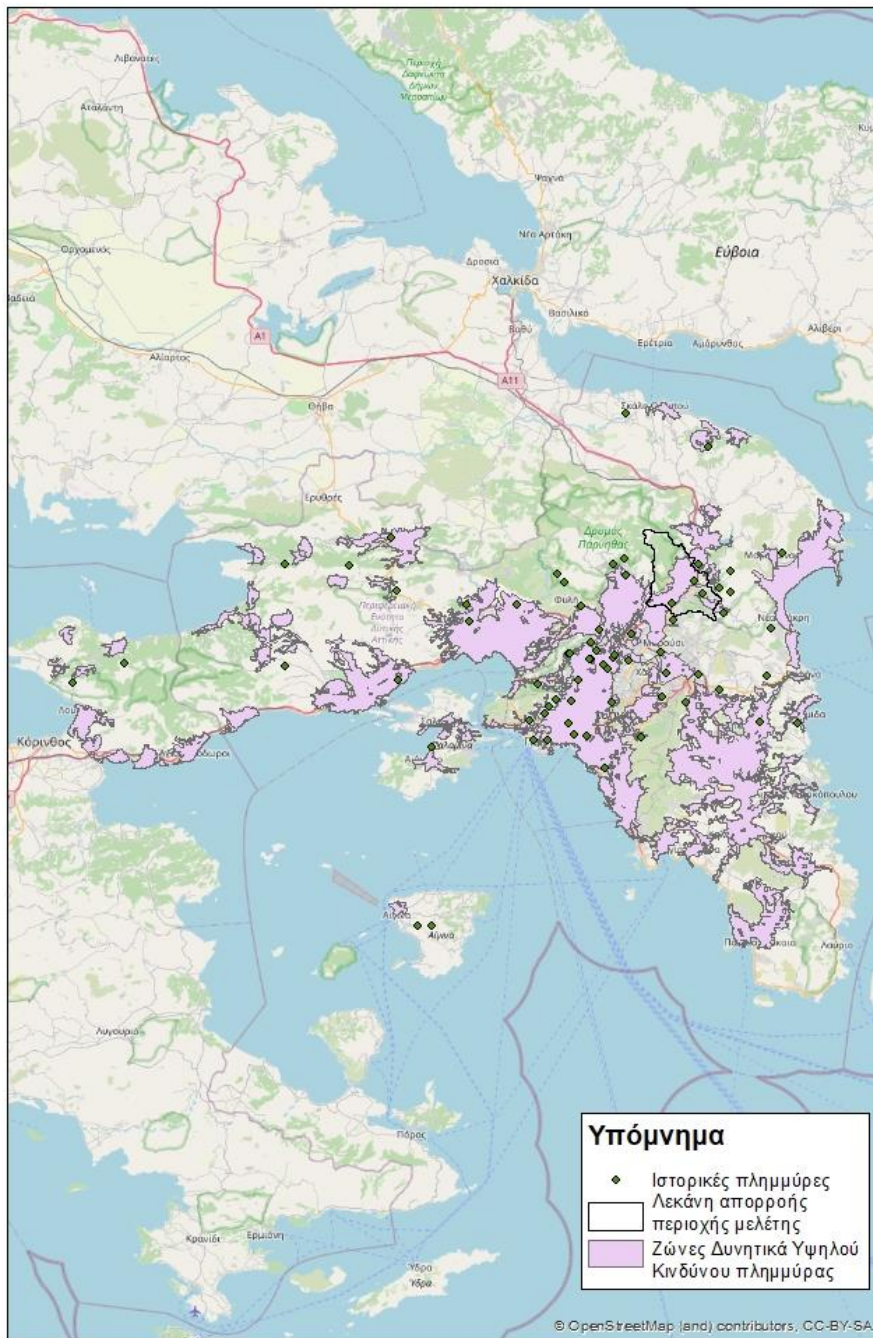
3^ο Στάδιο: Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (Άρθρο 7).

Για να επιτευχθεί η ολοκληρωμένη διαχείριση της λεκάνης απορροής ποταμών, το πλαίσιο της οδηγίας 2000/60/EK που περιλαμβάνει την ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμού πρέπει να συντονιστεί με το πλαίσιο της οδηγίας 2007/60/EK που περιλαμβάνει την ανάπτυξη των σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας.

1.4.4 Το πλημμυρικό καθεστώς σε Ευρώπη και Ελλάδα

Η περίοδος 1998-2002, ήταν ιδιαίτερα δύσκολη για την Ευρώπη καθώς έλαβαν χώρα 100 καταστροφικές πλημμύρες, οι οποίες προκάλεσαν 700 θανάτους, 500.000 άτομα αναγκάστηκαν να μετατοπιστούν και υπήρξαν οικονομικές απώλειες τουλάχιστον 25 δισεκατομμυρίων ευρώ (Βαχαβιάλος, 2011). Από το 1980 μέχρι σήμερα έχουν γίνει σχεδόν 1500 πλημμύρες στην Ευρώπη, πάνω από 4300 άνθρωποι έχασαν την ζωή τους ενώ οι οικονομικές καταστροφές είναι πάνω από 170 δισεκατομμύρια ευρώ σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, 2023). Παράλληλα, τις επόμενες δεκαετίες αναμένεται μεγαλύτερος κίνδυνος πλημμυρών στην Ευρώπη λόγω της κλιματικής αλλαγής, των αλλαγών χρήσεων γης του εδάφους λόγω δασικών πυρκαγιών και την αύξηση του πληθυσμού ιδίως σε πλημμυροπαθείς ζώνες (Βαρσάμη, 2014).

Η γεωμορφολογική εικόνα της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και ανεπτυγμένη ακτογραμμή, γι' αυτό το λόγο υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα στα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά καθώς και στα υδρολογικά και κλιματικά. Η οροσειρά της Πίνδου που διασχίζει τη χώρα από βορειοδυτικά προς νότια παίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες βροχόπτωσης και απορροής στην Ελλάδα (Πάνου, 2006). Η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1,800 mm στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας ενώ στις ανατολικές περιοχές της χώρας η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμη και στα 400 mm (Πάνου, 2006). Οι δυο πιο αντιπροσωπευτικές περιοχές που είναι ευαίσθητες στις πλημμύρες είναι γενικά η Αττική και η Θεσσαλία. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας για το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής EL06 καθώς και τα ιστορικά πλημμυρικά συμβάντα, τα οποία βρέθηκαν από την ιστοσελίδα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας και συγκεκριμένα από την 1^η Αναθεώρηση της Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας, σε αρχείο shapfile. Επίσης, στην Εικόνα 1 απεικονίζεται και η λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, όπου διακρίνονται οι ευάλωτες περιοχές που κινδυνεύουν από πλημμύρα, οι οποίες είναι κυρίως η Βαρυμπόμπη και το Κρουνέρι.



Εικόνα 1: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου πλημμύρας στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής EL06

Η Αθήνα είναι επιρρεπής στις πλημμύρες λόγω του ξηρού της κλίματος, με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 400 mm και του υψηλού ρυθμού εξάτμισης (Πάνου, 2006). Στην Αθήνα λόγω των καταστροφικών πλημμυρών υπάρχουν μεγάλες απώλειες ανθρώπινων ζώων σε σχέση με άλλες περιοχές της Ελλάδας. Παρά τη γενική αίσθηση πως οι σεισμοί είναι η βασική απειλή για την

ανθρώπινη ζωή, τα θύματα από πλημμυρικά γεγονότα είναι περισσότερα από οποιαδήποτε άλλη φυσική καταστροφή (Βαχαβιώλος, 2011). Οι πλημμύρες στην Ελλάδα οφείλονται κυρίως στις έντονες βροχοπτώσεις και όχι στα μέσα ετήσια ύψη βροχής. Οι περισσότερες έντονες βροχοπτώσεις παράγονται από το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών, που συνήθως συνοδεύονται από ψυχρά μέτωπα και καταφθάνουν από τα δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά (Βαρσάμη, 2014). Εκτός από τα φυσικά αίτια που προκαλούν μια πλημμύρα, έχουν συμβάλλει σε αυτές και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις. Η έντονη αστικοποίηση και η μείωση των δασικών εκτάσεων επιφέρουν μεγάλο κίνδυνο για πλημμύρες. Ταυτόχρονα η αποδάσωση και η διάβρωση του εδάφους αποτελούν ένα ακόμα σοβαρό ζήτημα. Η αποδάσωση οφείλεται στις δασικές πυρκαγιές που κατακαίνε την χώρα κάθε καλοκαίρι. Είναι γεγονός ότι πλέον η δασική έκταση της Ελλάδας καλύπτει μόνο το 18% της συνολικής της έκτασης, ενώ στις αρχές του 19^{ου} αιώνα κάλυπτε περίπου το 40% (Πάνου, 2006).

1.4.5 Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένων λεκανών απορροής

Η δασική βλάστηση μιας λεκάνης απορροής συμβάλλει τόσο στη συγκράτηση και αποθήκευση σημαντικού ποσοστού βροχής ενός επεισοδίου, όσο και στην προστασία του εδάφους από διάβρωση (Μπαλούτσος κ.α., 2001). Συνεπώς η ύπαρξη δασικής βλάστησης μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο πλημμύρας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η απορροή αυξάνεται σημαντικά. Την μεγαλύτερη διήθηση της βροχόπτωσης από τα διάφορα είδη βλάστησης σε μια λεκάνη απορροής, την προσφέρει το δάσος.

Η επίδραση της βλάστησης στις πλημμύρες σήμερα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την αριθμητική έκφραση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης. Αυτές οι διεργασίες είναι (Μπαλούτσος κ.α., 2001): α) η συγκράτηση από τη δασική βλάστηση, τη φυλλάδα και το χούμο, β) η διήθηση της βροχής στο έδαφος, γ) η επιφανειακή και η υπεδάφια απορροή, δ) η μόνιμη και παροδική συγκράτηση ενός μέρους της βροχής από το έδαφος υπό μορφή υγρασίας, και ε) η διάβρωση του εδάφους.

1.5 Πυρκαγιές

1.5.1 Χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών

Τα είδη των δασικών πυρκαγιών ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσης τους είναι (Northwest Fire Science Consortium, 2019):

α) Οι πυρκαγιές εδάφους: Συμβαίνουν σε περιοχές με μεγάλες συσσωρεύσεις νεκρής βλάστησης με την πάροδο του χρόνου, όπως ο χούμος και η τύρφη. Κινούνται αργά κάτω από το επιφανειακό έδαφος και είναι δύσκολο να φανούν από ψηλά. Η κατάσβεσή τους μπορεί να είναι πολύ δύσκολη αν υπάρχει μεγάλη ποσότητα ξηρής καύσιμης ύλης. Σε περιόδους μεγάλης ξηρασίας, αυτές οι πυρκαγιές μπορούν να συνεχίσουν να σιγοκαίουν υπόγεια όλο τον χειμώνα και να αναζωπυρωθούν ξανά πάνω από το έδαφος την άνοιξη.

β) Οι πυρκαγιές επιφανείας: Καίνε πευκοβελόνες που έχουν πέσει στο έδαφος, βρύα, λειχήνες, ποώδη βλάστηση, θάμνους, μικρά δέντρα και δενδρύλλια που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους. Πρόκειται για το πιο συνηθισμένο είδος πυρκαγιάς, το οποίο εξαπλώνεται εύκολα αλλά και η κατάσβεση της είναι εύκολη.

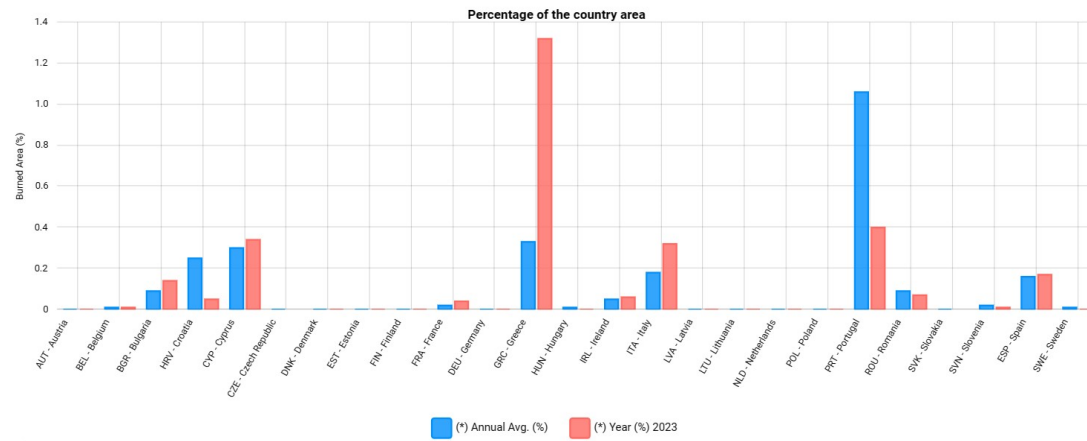
γ) Οι πυρκαγιές κόμης: Πρόκειται για τις πιο επικίνδυνες πυρκαγιές, αφού καίνε την κόμη των δέντρων. Καίνε σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και εξαπλώνονται πολύ γρήγορα μέσα από

τα κλαδιά των δέντρων. Επίσης, η κατάσβεση τους είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επιφέρει μεγάλες καταστροφές δασών.

Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να ξεκινήσουν είτε από ένα φυσικό φαινόμενο όπως ένας κεραυνός είτε από ανθρωπογενή αίτια όπως ένας εμπρησμός. Οι πυρκαγιές είναι μια χημική αντίδραση τριών συνδυασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά διαμορφώνουν το λεγόμενο «τρίγωνο της φωτιάς» και είναι το οξυγόνο, η θερμότητα και η καύσιμη ύλη (National Geographic Society, 2023). Όμως πολύ σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς παίζουν οι καιρικές συνθήκες. Παράλληλα ο άνεμος, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι μικρές βροχοπτώσεις δημιουργούν την κατάλληλη συνθήκη για πυρκαγιά καθώς αφήνουν δέντρα, θάμνους, πεσμένα φύλλα, και κλαδιά να ξεραθούν και να αποτελούν καύσιμη ύλη (National Geographic Society, 2023). Ακόμα σημαντικό ρόλο έχει και η τοπογραφία της περιοχής καθώς η πυρκαγιά εξαπλώνεται πιο γρήγορα στην ανηφόρα παρά στην κατηφόρα. Συμπερασματικά η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης, τις καιρικές συνθήκες και τις τοπογραφικές συνθήκες (National Geographic Society, 2023).

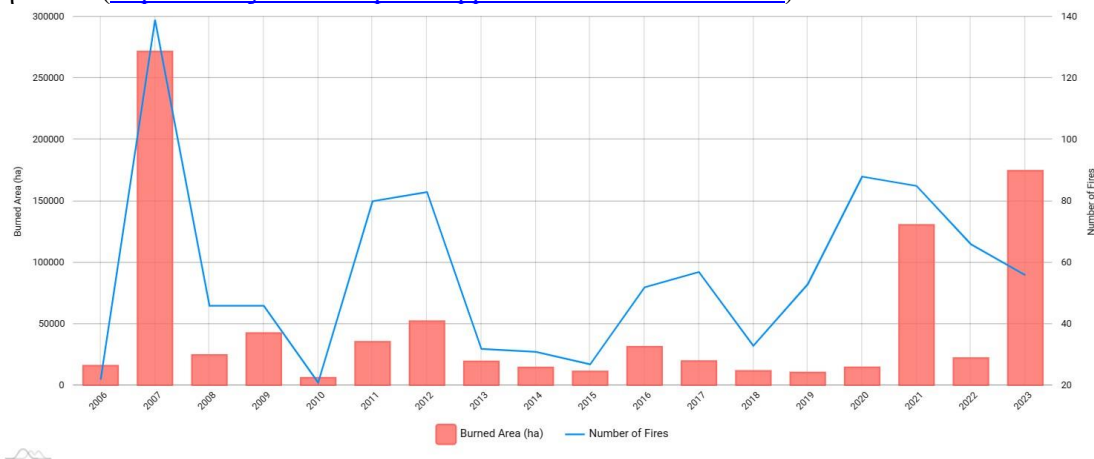
1.5.2 Οι πυρκαγιές σε Μεσόγειο και Ελλάδα

Το κλίμα και η βλάστηση των μεσογειακών περιοχών δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για την εκδήλωση σφοδρών πυρκαγιών, που αποτελούν αναπόσπαστη διαταραχή στα μεσογειακά οικοσυστήματα (Βαρσάμη, 2014). Τα τελευταία χρόνια οι δασικές πυρκαγιές έχουν γίνει μάλιστα καθώς καίγονται τεράστιες δασικές εκτάσεις κάθε χρόνο κατά τους θερινούς μήνες, ενισχύοντας έτσι το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το ποσοστό των καμένων εκτάσεων των δασικών πυρκαγιών που έλαβαν χώρα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 2006 έως το 2022 (ροζ χρώμα στήλης), που βρέθηκε από την ιστοσελίδα Effis Statistics Portal (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates>). Η στήλη με το μπλε χρώμα είναι το ποσοστό των καμένων εκτάσεων των δασικών πυρκαγιών των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2023. Παρατηρείται ότι η Ελλάδα κατέχει την πρώτη θέση καμένων εκτάσεων από τις πυρκαγιές του 2023, ενώ για τις χρονιές 2006 έως και 2022 την δεύτερη θέση μετά την Πορτογαλία. Από τη συνολική έκταση της Ελλάδας που είναι περίπου 13,275,480 εκτάρια, το 2023 κάηκαν 174,773 εκτάρια (1.32% της συνολικής έκτασης) ενώ τις χρονιές 2006-2022 ο ετήσιος μέσος όρος είναι τα 43489.76 εκτάρια (0.33%). Τις μεγαλύτερες καταστροφές από πυρκαγιές έχει η Πορτογαλία, που βρίσκεται στη πρώτη θέση για τις χρονιές 2006-2022 ενώ για το έτος 2023 βρίσκεται στη δεύτερη θέση.



Εικόνα 2: Ποσοστό καμένων εκτάσεων στην Ευρώπη από το 2006-2022 (πηγή: EFFIS Statistics Portal)

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται αναλυτικά για όλες τις χρονιές από το 2006 έως το 2023 τόσο η καμένη έκταση από τις δασικές πυρκαγιές (ροζ στήλη) καθώς και ο αριθμός των πυρκαγιών που ξέσπασαν ανά έτος (μπλε γραμμή). Το έτος 2007 ήταν το πιο καταστροφικό για την Ελλάδα, μέχρι και σήμερα, αφού έκαψε 271.715 εκτάρια (2.05% της συνολικής έκτασης) γης και ο συνολικός αριθμός των πυρκαγιών ήταν 139. Το 2021 που ήταν και η χρονιά που ξέσπασε η φωτιά στην περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, ήταν ένα πολύ δύσκολο καλοκαίρι για την Ελλάδα καθώς κάηκαν 130.744 εκτάρια (0.98%) γης και ο αριθμός των πυρκαγιών σε όλη τη χώρα έφτασε τις 85. Ακόμα δυσκολότερο ήταν και το καλοκαίρι του 2023 αφού κάηκαν 174.773 εκτάρια (1.32%) γης ξεπερνώντας και το έτος 2021 ενώ οι πυρκαγιές σε όλη τη χώρα ήταν 56 (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates>).



Εικόνα 3: Αριθμός πυρκαγιών και καμένων εκτάσεων από αυτές στην Ελλάδα από το 2006-2023 (πηγή: EFFIS Statistics Portal)

1.5.3 Επίδραση πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής

Οι πυρκαγιές έχουν άμεσες επιπτώσεις στο υδρολογικό καθεστώς των λεκανών απορροής, ειδικότερα αν ακολουθήσουν έντονες βροχοπτώσεις (Μπαλούτσος κ.α., 2001). Καθοριστικό ρόλο έχει και η σφοδρότητα της πυρκαγιάς, δηλαδή η ένταση και η διάρκεια της. Το υδρολογικό καθεστώς των λεκανών απορροής μεταβάλλεται περισσότερο τον πρώτο χρόνο μετά την

πυρκαγιά. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά το έδαφος επηρεάζονται οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του, η ικανότητα του να συγκρατεί το νερό καθώς και γενικότερα η κατανομή της βροχής στο έδαφος. Έτσι εμφανίζεται επιφανειακή απορροή και διάβρωση του εδάφους, στη συνέχεια αυξάνεται η παροχή στα υδατορεύματα και δημιουργούνται πλημμύρες (Μπαλούτσος κ.α., 2001). Αναλυτικά, οι μεταβολές που επιφέρει μια πυρκαγιά στο υδρολογικό καθεστώς μιας λεκάνης απορροής είναι (Μπαλούτσος, 2001):

- Σχηματισμός υδρόφοβου στρώματος εντός του εδάφους από την καύση οργανικής ουσίας και διείδυση χημικών στο έδαφος, με συνέπεια την μείωση της διαπερατότητας και την αύξηση της επιφανειακής απορροής.
- Το ύψος βροχής αυξάνεται λόγω της έλλειψης της βλάστησης για συγκράτηση νερού.
- Συγκράτηση λιγότερης υγρασίας λόγω της καύσης των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων (φυλλάδας, χούμου κ.λπ).
- Κατακερματισμός τους εδάφους λόγω βροχής και μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής σε αυτό λόγω έμφραξης των πόρων του.
- Δημιουργία επιφανειακής απορροής στις πλαγιές της λεκάνης.
- Μειώνεται η αντίσταση του εδάφους στην παράσυρση από την επιφανειακή απορροή.
- Το έδαφος διαβρώνεται και παρασύρεται από τις πλαγιές της λεκάνης προς τα κατάντη και τις κοίτες των υδατορευμάτων.
- Σημαντική και απότομη αύξηση της υδατοστερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων.
- Διάβρωση του πυθμένα και των πρανών της κοίτης των υδατορευμάτων και μεταφορά των υλικών προς τα κατάντη.
- Υπερχείλιση της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος.
- Πιθανή επιδείνωση της κατάστασης αν υπάρξει ανθρώπινη παρέμβαση.
- Δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στην πεδινή γεωργική και κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.

1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Batelis and Nalbantis (2014) εξέτασαν την επίδραση μεγάλης κλίμακας δασικών πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς φυσικών λεκανών απορροής, με σκοπό: (α) την ποσοτική έκφραση της επίδρασης αυτής σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (μηνιαία, ετήσια), και (β) την απεικόνιση της χρησιμότητας του μοντέλου SWAT στην μελέτη της επίδρασης αυτής. Επιλέχθηκε μια τυπική μεσογειακή λεκάνη απορροής, αυτή του Ενιπέα στην Θεσσαλία και χρησιμοποιήθηκαν: το λογισμικό SWAT, ο υδρολογικός δείκτης ξηρασίας Streamflow Drought Index (SDI) καθώς και τρία σενάρια πυρκαγιάς. Στο πρώτο σενάριο πυρκαγιάς θεωρείται ότι έχει καεί το νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής που αποτελείται από σκληρόφυλλη βλάστηση και μικρά κομμάτια πλατύφυλλων δέντρων. Στο δεύτερο σενάριο πυρκαγιάς θεωρείται πως έχει καεί το ανατολικό τμήμα της λεκάνης, το οποίο περιλαμβάνει κυρίως δάση από κωνοφόρα δέντρα και θεωρείται το θερμότερο τμήμα της λεκάνης. Το τρίτο σενάριο, όπου είναι και το δυσμενέστερο, περιλαμβάνει τις καμένες περιοχές και των δύο προηγούμενων σεναρίων, μαζί με μια μικρή ενδιάμεση περιοχή μεταξύ των καμένων εκτάσεων. Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου έδειξαν μικρές αλλαγές στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της άμεσης απορροής και στη μείωση της διήθησης. Επίσης, τα προσομοιωμένα πλημμυρογραφήματα πριν και μετά την πυρκαγιά έδειξαν μικρές αυξήσεις για υψηλές ροές και μειώσεις για χαμηλές ροές. Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου έδειξαν επίσης μικρές αλλαγές στην απορροή και τα προσομοιωμένα πλημμυρογραφήματα πριν και μετά την

πυρκαγιά έδειξαν μικρές αυξήσεις για υψηλές ροές και μειώσεις για χαμηλές ροές, αλλά αυξημένες σε σχέση με του πρώτου σεναρίου. Στο τρίτο σενάριο οι αλλαγές στην απορροή πριν και μετά την πυρκαγιά ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με τα δυο προηγούμενα σενάρια, κυρίως για υψηλές ροές. Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι η ετήσια ροή του ρέματος δεν αλλάζει σημαντικά από μεγάλες δασικές πυρκαγιές αλλά μπορεί να παρατηρηθούν υψηλές αυξήσεις στους όγκους μηνιαίας ροής κυρίως τους μήνες με την υψηλότερη βροχόπτωση.

Οι Boithias et al. (2017) αξιολόγησαν την ικανότητα του λογισμικού SWAT να προσομοιώσει μια αιφνίδια πλημμύρα (flash flood) λεκάνης απορροής με ωριαίο χρονικό βήμα. Η περιοχή μελέτης ήταν η μεσογειακή παράκτια λεκάνη του ποταμού Têt στη νότια Γαλλία. Αρχικά έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της απορροής από την προσομοίωση με μετρήσεις απορροών με ημερήσιο και ωριαίο χρονικό βήμα. Έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της απορροής από την προσομοίωση χρησιμοποιώντας μικρές και μεγάλες περιοχές οριοθέτησης υπολεκανών (1 και 15 km²). Επίσης, έγινε εφαρμογή του μοντέλου SWAT σε μια μικρότερη υπολεκάνη χωρίς υποδομές. Έγινε σύγκριση της απόδοσης του λογισμικού SWAT με την απόδοση του μοντέλου MARINE χρησιμοποιώντας 6 γεγονότα απότομης πλημμύρας και με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό πριν και μετά την πλημμύρα. Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι πρώτον ότι σε απότομες πλημμύρες το μοντέλο MARINE προσομοιώνει καλύτερα την μέγιστη απορροή και την χρονική στιγμή της εμφάνισής της, ενώ το μοντέλο SWAT προσομοιώνει καλύτερα την απορροή μετά την μέγιστη απορροή (peak discharge) και τον όγκο νερού που εξάγεται. Δεύτερον η απόδοση και των δύο μοντέλων επηρεάζεται κυρίως από τα δεδομένα που έχουμε για τις βροχοπτώσεις και το έδαφος και όχι από τον τρόπο βαθμονόμησης και επαλήθευσης των μοντέλων ή από την χρήση στο SWAT μικρού χρονικού βήματος (επιπέδου ώρας) και μικρού μεγέθους υπολεκανών. Επειδή το μοντέλο SWAT μπορεί να προσομοιώσει σωστά τον όγκο του νερού που εξάγεται σε μια πλημμύρα, θα μπορούσε μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί στην έρευνα και άλλων υδρολογικών διαδικασιών με προσομοίωση σε χρονική βαθμίδα μικρότερη της μίας ημέρας, όπως τον υπολογισμό της μεταφοράς αιωρούμενων ιζημάτων.

Οι Koltsida et al. (2021) αξιολόγησαν την απόδοση του λογισμικού SWAT σε προσομοίωση απορροής με χρήση τόσο ημερησίων όσο και ωριαίων υδρολογικών δεδομένων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για την πειραματική λεκάνη απορροής στο ανώτερο τμήμα του ποταμού Κηφισού στην Αττική. Το μοντέλο SWAT έχει δυο μεθόδους για να υπολογίζει την επιφανειακή απορροή. Η πρώτη μέθοδος είναι η SCS Curve Number (CN), η οποία χρησιμοποιεί ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης. Η δεύτερη μέθοδος είναι η Green and Ampt Mein Larson infiltration (GAML), η οποία χρησιμοποιεί ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης. Έγινε σύγκριση των δυο σειρών προσομοιώσεων με μετρήσεις απορροής στην πειραματική λεκάνη. Η σύγκριση κατέδειξε ότι το ημερήσιο μοντέλο απέδωσε καλύτερα από το ωριαίο μοντέλο στην πρόβλεψη της επιφανειακής απορροής και ότι οι παράμετροι του μοντέλου που σχετίζονται με την ροή των υπόγειων υδάτων επηρεάζονται περισσότερο από τα ημερήσια δεδομένα ενώ οι παράμετροι που σχετίζονται με την διόδευση (channel routing) επηρεάζονται περισσότερο από τα ωριαία δεδομένα. Η μέθοδος SCS-CN παρήγαγε υψηλότερες παροχές αιχμής από την GAML και ήταν πιο κοντά με τις παρατηρούμενες τιμές. Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι το λογισμικό SWAT αποτελεί ένα πολύ αξιόπιστο εργαλείο για τις προβλέψεις των απορροών για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Οι Nalbantis and Lymperopoulos (2012) αξιολόγησαν τη συχνότητα πλημμυρών μετά από μια δασική πυρκαγιά σε μια μικρή λεκάνη απορροής στο χείμαρρο Γιαννούλας στην Αττική. Πιο συγκεκριμένα, ανέπτυξαν μια νέα μεθοδολογία για την κατασκευή καμπυλών συχνότητας

πλημμυρών πριν και μετά από δασικές πυρκαγιές σε λεκάνες απορροής, για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις. Αρχικά, εφάρμοσαν την μέθοδο Derived Distribution Approach (DDA) για την κατασκευή των καμπυλών συχνότητας πλημμύρας και χρησιμοποίησαν την προσομοίωση Monte Carlo για την ετήσια μέγιστη βροχόπτωση, η οποία ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα ορισμένων μεταβλητών. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS-CN για την μετατροπή της βροχόπτωσης σε περίσσειμα βροχόπτωσης και η ορθολογική μέθοδος για την μετατροπή του ύψους περισσεύματος βροχής σε αιχμή άμεσης απορροής. Στην περίπτωση πριν την πυρκαγιά υπήρξε αβεβαιότητα στον αριθμό καμπύλης ενώ μετά την πυρκαγιά πρέπει να μετρηθεί η στάθμη του νερού στην αιχμή της πλημμύρας στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Παράλληλα για την αξιολόγηση των ποσοστών πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος Sequential Latin Hypercube Sampling και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με την επίδραση του μεγέθους του δείγματος και το ποσό αβεβαιότητας. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν τα 100 έτη για τη σύγκριση των καμπυλών συχνότητας πλημμύρας πριν και μετά την πυρκαγιά, καθώς λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας τους θεωρήθηκε ασφαλέστερο για την σύγκριση. Τα τελικά συμπεράσματα της έρευνας ήταν ότι η μέτρηση της στάθμης του νερού στην αιχμή της πλημμύρας στην έξοδο της λεκάνης απορροής μετά την πυρκαγιά αξιολόγησε σωστά τον αριθμό καμπύλης. Επίσης, η μεθοδολογία επιτρέπει την κατασκευή καμπυλών συχνότητας πλημμύρας και για κανονικές υδρολογικές συνθήκες μη πυρκαγιάς και είναι απλή στη χρήση αφού χρησιμοποιεί κατανομές οι οποίες επιτρέπουν την χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo. Τέλος, η μέθοδος SCS-CN, η ορθολογική μέθοδος και το Μοναδιαίο Υδρογράφημα αποτελούν μοντέλα βροχόπτωσης που είναι εύκολα στην χρήση τους.

Οι Basso et al. (2019) αξιολόγησαν την ικανότητα του μοντέλου SWAT να προσομοιώσει τις επιπτώσεις στο υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης απορροής του ποταμού Zêzere της Πορτογαλίας καθώς και την ποιότητα του νερού μετά την πυρκαγιά του 2017. Προκειμένου να προσομοιωθεί ο αντίκτυπος της δασικής πυρκαγιάς στη διάβρωση του εδάφους και στην ποιότητα των υδάτων χρειάστηκε να τροποποιηθούν κάποιοι παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί ήταν ο συντελεστής K για την διάβρωση του εδάφους, ο παράγοντας φυτικής βλάστησης C για τις καλλιέργειες και ο αριθμός καμπύλης CN για την επιφανειακή απορροή υδάτων ή την διήθηση. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν σε επίπεδο υπολεκάνης, έδειξαν ότι οι πυρκαγιές ενισχύουν την υδρολογική απόκριση και την ποσότητα ιζημάτων και θρεπτικών στοιχείων (αζώτου, φωσφόρου) στα ύδατα. Επίσης, σε επίπεδο λεκάνης απορροής οι πυρκαγιές επηρεάζουν αρκετά την παροχή αιχμής καθώς και τη βασική ροή, ενώ η συνολική ετήσια ροή αυξάνεται ελάχιστα μετά την πυρκαγιά. Τέλος, τα αποτελέσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι το μοντέλο SWAT είναι ένα ικανό εργαλείο, το οποίο μπορεί να αξιολογεί γρήγορα τις επιπτώσεις που προκαλούνται από τις αλλαγές χρήσεων γης.

Οι Goodrich et al. (2005) αξιολόγησαν την υδρολογική απόκριση λεκάνης απορροής του Sabino Canyon στο Aspen βόρεια του Tuscon στην Αριζόνα μετά την πυρκαγιά του 2003 με το υδρολογικό μοντέλο Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA). Το AGWA είναι ένα εργαλείο που βασίζεται σε περιβάλλον GIS και λειτουργεί σε συνδυασμό με ένα από τα δύο άλλα μοντέλα το SWAT και το KINEROS2 (KINematic Runoff and EROSION Model). Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει τον όγκο απορροής τροποποιώντας τον αριθμό καμπύλης CN μετά την πυρκαγιά. Η κάλυψη του εδάφους και η αρχική τιμή του αριθμού καμπύλης (CN) συμβάλλουν στην εκτίμηση των αλλαγών των CN μετά την πυρκαγιά. Οι τιμές των CN μετά την πυρκαγιά είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούν οι ομάδες BAER (Burned Area Emergency Response), όμως είναι πιο κοντά στις παρατηρούμενες αλλαγές στον όγκο

απορροής. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν ότι το εργαλείο AGWA αξιολογεί γρήγορα τη λεκάνη απορροής μετά από πυρκαγιά και θα βοηθούσε πολύ τους διαχειριστές πόρων και τις ομάδες BAER να αντιμετωπίσουν προβλήματα πιθανών πλημμυρών και διάβρωσης.

Οι Baltas et al. (2007) προσδιόρισαν την αναλογία των αρχικών απωλειών (initial abstraction ratio) της μεθόδου SCS-CN με δεδομένα από μια πειραματική λεκάνη απορροής (15 km²) στην ανατολική πλευρά του όρου Πεντέλης στην Αττική. Για το λόγο αυτό αναλύθηκαν δεκαοχτώ καταγιγίδες διαφόρων εντάσεων βροχόπτωσης, με χρονικό βήμα ανάλυσης τα τριάντα λεπτά. Βρέθηκε ότι η μέση αναλογία I_a/S (initial abstraction I_a -potential maximum retention S), για ολόκληρη την λεκάνη, είναι 0.014 ενώ για μια βορειότερη υπολεκάνη της αρχικής είναι 0.037. Ενώ οι δυο λεκάνες έχουν τις ίδιες υδρολογικές συνθήκες οι τιμές της αναλογίας είναι διαφορετικές. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορετικών χρήσεων γης και των αδιαπέρατων γεωλογικών σχηματισμών που βρέθηκαν στο νότιο τμήμα. Η απορροή από τις αδιαπέρατες περιοχές φτάνει στην έξοδο της λεκάνης στην αρχή της καταιγίδας και έτσι η αναλογία αρχικών απωλειών είναι χαμηλή. Αντίθετα, στη βόρεια υπολεκάνη λόγω της έλλειψης αδιαπέρατων περιοχών η αναλογία των αρχικών απωλειών είναι μεγαλύτερη. Η αναλογία των αρχικών απωλειών είναι ανάλογη της συγκράτησης του νερού (S), έτσι όταν η συγκράτηση αυξάνει αυξάνεται και η αναλογία των αρχικών απωλειών. Οι τιμές που βρέθηκαν για την αναλογία των αρχικών απωλειών είναι κοντά στην προτεινόμενη αναλογία 0.05 (Hawkins et al., 2002).

Οι Parathanasiou et al. (2012) αναφέρουν πως οι πλημμύρες είναι φυσικές καταστροφές που αποτελούν σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη ζωή και τις ιδιοκτησίες τους. Ακόμα σοβαρότερες είναι οι πλημμύρες των ποταμών μετά από δασικές πυρκαγιές, καθώς εντείνεται και επιταχύνεται ο όγκος αιχμής της πλημμύρας προκαλώντας έτσι υπερχειλίση του ποταμού. Στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής της Ραφήνας στην περιοχή Μεσόγεια της ανατολικής Αττικής, με σκοπό την διερεύνηση των αλλαγών στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής μετά από μια δασική πυρκαγιά. Πρόκειται για μια περιαστική περιοχή, η οποία γνώρισε ταχεία αστική ανάπτυξη που προκάλεσε μεγάλες αλλαγές στις χρήσεις γης της περιοχής. Την ριζική αλλαγή των χρήσεων γης επηρέασαν και οι μεγάλες φωτιές, κυρίως του 2009, μετατρέποντας τις δασικές εκτάσεις σε καμένη γη. Η περιοχή παρακολουθείται μέσω ενός πυκνού υδρομετεωρολογικού δικτύου. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πυρκαγιάς Geographic Fire Management Information System (G.FMIS) και τρία υποθετικά σενάρια πυρκαγιάς (χαμηλής, μέσης και υψηλής σοβαρότητας) καθώς και η πραγματική πυρκαγιά του 2009. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-HMS για την αξιολόγηση της υδρολογικής απόκρισης της υπό εξέταση λεκάνης για τα διάφορα σενάρια πυρκαγιάς καθώς και έξι γεγονότα βροχόπτωσης, τρία πριν και τρία μετά την πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα του G.FMIS έδειξαν ότι η καμένη επιφάνεια αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και όχι με την υγρασία της καμένης περιοχής (fuel humidity). Σε όλα τα σενάρια η φωτιά επεκτάθηκε ακανόνιστα στη λεκάνη απορροής κι αυτό αποδίδεται στην μεγάλη ποικιλία χρήσεων γης της περιοχής. Οι μεταβολές των τιμών του αριθμού καμπύλης CN, των αρχικών απωλειών και του χρόνου υστέρησης μετά την πυρκαγιά είναι αυτές που αξιολογούν τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς. Οι αλλαγές στις τιμές CN μετά τα σενάρια πυρκαγιάς και την πραγματική πυρκαγιά του 2009 δείχνουν την έκταση της καμένης περιοχής. Η σημαντική επίδραση της πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση της περιοχής παρατηρήθηκε μέσω της σύγκρισης του ποσοστού καμένης έκτασης με την μέγιστη απορροή της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα και για τα έξι γεγονότα βροχόπτωσης πριν και μετά την πυρκαγιά η αυξημένη επιφάνεια των καμένων εκτάσεων είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη απορροή στην έξοδο των υπολεκανών. Υπάρχει δηλαδή γραμμική συσχέτιση των δυο αυτών παραμέτρων, με τον

συντελεστή συσχέτισης να κυμαίνεται από 0.95-0.98. Τέλος, σε γεγονότα βροχόπτωσης με παρόμοια ύψη βροχής βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ένταση της βροχόπτωσης οδηγεί σε υψηλότερη απορροή και όχι το ύψος της βροχόπτωσης.

Η Βαρσάμη (2014) πραγματοποίησε υδρολογική προσομοίωση μιας δασικής λεκάνης απορροής με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS και εξετάστηκε η μεταβολή της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης σε ενδεχόμενο πυρκαγιάς. Η προσομοίωση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για δύο μεμονωμένα γεγονότα βροχής στο ελατόδασος Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας έκτασης 1.45 km². Τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης αναλύθηκαν με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Η συγκεκριμένη εργαλειοθήκη, αποτελεί extension του λογισμικού Arc-GIS και προσφέρει στο χρήστη την δυνατότητα να δημιουργήσει και τα αρχεία εισόδου για την προσομοίωση η οποία λαμβάνει χώρα με το λογισμικό HEC-HMS. Η εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών έγινε με τη χρήση του αριθμού καμπύλης απορροής (CN) της Soil Conservation Service (SCS), για την προσομοίωση της άμεσης απορροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS και για την αναπαράσταση της βασικής απορροής εφαρμόστηκε το πρότυπο της εκθετικής μείωσης. Στο μοντέλο ενσωματώθηκε και πρότυπο για την εκτίμηση των απωλειών παρεμπόδισης, λόγω του δασικού χαρακτήρα της λεκάνης. Στη συνέχεια έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου με τον δείκτη Nash-Sutcliffe καθώς και η επαλήθευση του μοντέλου. Για την διερεύνηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής κατασκευάστηκε ένα σενάριο πυρκαγιάς, έτσι ώστε να αναλυθεί η μεταβολή της απορροής μετά τη φωτιά. Κρίνεται απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός των υδρολογικών παραμέτρων του αριθμού καμπύλης CN, των αρχικών απωλειών και του χρόνου υστέρησης μετά την πυρκαγιά, λαμβάνοντας υπόψη μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας με αντίστοιχα αποτελέσματα καθώς και τις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής. Συμπερασματικά από τα υδρογραφήματα της προσομοίωσης μετά την πυρκαγιά, διαπιστώνεται μεγάλη αύξηση στην πλημμυρική αιχμή και στον πλημμυρικό όγκο (δεκαπλασιάζονται) ενώ ο χρόνος εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής μειώνεται κατά 45 λεπτά. Ταυτόχρονα, το υδρογράφημα μετά την πυρκαγιά έχει πιο απότομη κλίση, γεγονός που αιτιολογείται λόγω της απώλειας φυτοκάλυψης και της δημιουργίας αδιαπέρατης επιφάνειας. Όλα τα παραπάνω δείχνουν την μεγάλη επίδραση των καμένων εκτάσεων στην υδρολογική απόκριση της υπό εξέταση λεκάνης απορροής.

Ο Τσιχριντζής (2021), στην διπλωματική του εργασία, μελέτησε την επίδραση των αλλαγών χρήσεων γης σε ένα μέρος της δασικής λεκάνης του ποταμού Eel στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο SWAT και τα αρχεία εισόδου ήταν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) ώστε να οριοθετηθεί η λεκάνη απορροής, οι χρήσεις γης, οι τύποι εδάφους και οι κλίσεις για να δημιουργηθούν οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs). Η προσομοίωση έλαβε χώρα για την περίοδο 01-01-2011 έως και 31-12-2020 με μηνιαίο βήμα και τα δυο πρώτα χρόνια αγνοήθηκαν για την καλύτερη λειτουργία του μοντέλου. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με μετρημένες τιμές παροχών από χαρακτηριστικούς σταθμούς της Αμερικανικής Γεωλογικής υπηρεσίας (United States Geological Survey-USGS) για την περίοδο 01-01-2013 έως 31-12-2017. Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τον συντελεστή Nash-Sutcliffe (NSE) και χρησιμοποιήθηκαν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE), η Κανονικοποιημένη συνάρτηση στόχου (NOF) και το ποσοστό BIAS για περαιτέρω εξέταση των αποτελεσμάτων. Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε την περίοδο 01-01-2018 έως 31-12-2020. Μετά την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια αλλαγής χρήσεων γης και πιο συγκεκριμένα έγιναν τέσσερις υποθέσεις για πυρκαγιά, δυο για υλοτομία και δυο για φύτευση κωνοφόρου δάσους

σε θέσεις βοσκοτόπων. Για όλα τα σενάρια χρειάστηκε να αλλάξει ο αριθμός καμπύλης CN με βάση με την υδρολογική κατηγορία εδάφους (A,B,C,D) και την μετατροπή της εκάστοτε χρήσης γης σε γυμνό έδαφος. Επιπλέον, όλα τα σενάρια αλλαγής χρήσεων γης εξετάστηκαν με χρήση του στατιστικού ελέγχου Student t-test και στατιστικά σημαντική διαφορά θεωρήθηκε όταν η τιμή p-value ήταν κάτω από 0.05. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν ότι κανένα σενάριο αλλαγής χρήσεων γης δεν είχε στατιστική σημαντικότητα στις απορροές.

Ο Λάμπρου (2021) πραγματοποίησε μια συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων SWAT και LISFLOOD στον άνω ρου του Πηνειού ποταμού. Η περιοχή μελέτης ήταν η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού ανάντη και δυτικά της πόλης των Τρικάλων. Λόγω της έλλειψης πραγματικών μετρήσεων παροχής στην περιοχή χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του Joint Research Center (JRC), το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο LISFLOOD για να κάνει την προσομοίωση της λεκάνης απορροής. Η βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT πραγματοποιήθηκε σε τρεις θέσεις ενδιαφέροντος (Καλαμπάκα, Πύλη και Τρίκαλα). Για να γίνει η βαθμονόμηση χρειάστηκε να αλλάξουν τιμή οι παράμετροι που επηρεάζουν την απορροή (π.χ. CN) και μεταβάλλονται τόσο όσο να βελτιωθεί ο στατιστικός δείκτης NSE και συμπληρωματικά οι R^2 και PBIAS που χρησιμοποιούνται στην βαθμονόμηση. Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία δεν υπήρχαν πραγματικές μετρήσεις πεδίου, τα αποτελέσματα του LISFLOOD χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την βαθμονόμηση, η οποία πραγματοποιήθηκε από τον Σεπτέμβριο του 1991 έως και τον Σεπτέμβριο του 1996. Τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών στις τρεις θέσεις ενδιαφέροντος για την περίοδο της βαθμονόμησης διέφεραν πάρα πολύ στα δεδομένα βροχής που προσομοίωναν τα δυο μοντέλα και γι' αυτό τον λόγο η σύγκριση των δυο μοντέλων δεν ήταν ασφαλής. Ακόμα περισσότερο απέκλιναν τα αποτελέσματα των παροχών στην επαλήθευση που πραγματοποιήθηκε, καθιστώντας αναξιόπιστη την βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT με την χρήση των τιμών του JRC. Τέλος, βρέθηκαν κάποια δεδομένα πεδίου και έγινε μια ακόμη σύγκριση με τα δεδομένα των μέσων ετήσιων απορροών για 4 υπολεκάνες της περιοχής. Οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στη σύγκριση είναι ο συντελεστή απορροής (C) και η μονάδα ειδικής απορροής E. Το τελικό συμπέρασμα βγήκε μετά από ανάλυση των υδρολογικών παραμέτρων των δυο μοντέλων και προέκυψε ότι το μοντέλο SWAT είναι καλύτερο σε σχέση με το JRC, με βάση στον συντελεστή απορροής C και την ειδική απορροή E.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Λεκάνη απορροής Κηφισού

Με τον όρο «Λεκάνη Απορροής ποταμού» ορίζεται η εδαφική έκταση από την οποία αποστραγγίζεται το σύνολο της απορροής μιας περιοχής, μέσω του υδρογραφικού δικτύου της και παροχετεύεται στη θάλασσα μέσω της εκβολής ποταμού σύμφωνα με την 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (ΕΛ06) (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2017).

Η Ζώνη του Λεκανοπεδίου Αττικής αποτελείται από τέσσερις μεγάλες λεκάνες απορροής:

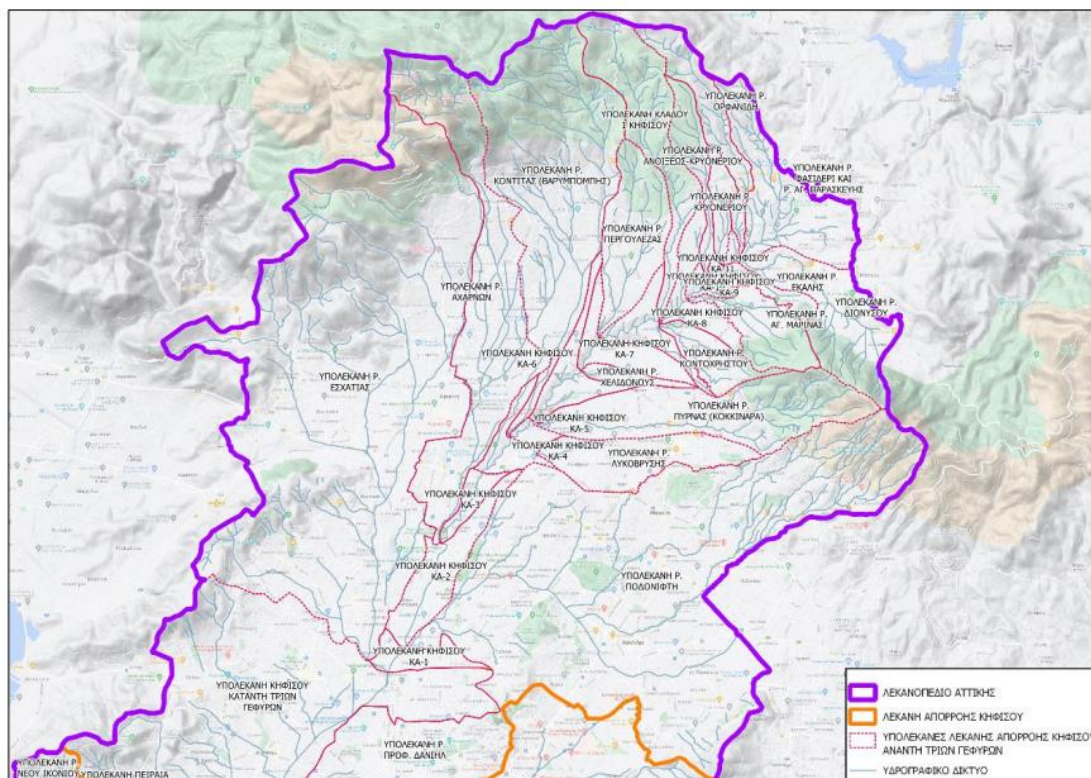
- i. Λεκάνη απορροής Κηφισού
- ii. Λεκάνη απορροής Ιλισού
- iii. Λεκάνη απορροής ρεμάτων Νοτίων Προαστίων
- iv. Λεκάνη απορροής Πειραιά-Περάματος

Η μεγαλύτερη λεκάνη απορροής είναι αυτή του Κηφισού, μέρος της οποίας αποτελεί και η περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας. Το 70% των νερών του Λεκανοπεδίου παροχετεύεται από τον Κηφισό ποταμό, ο οποίος είναι ο κύριος αποδέκτης του Λεκανοπεδίου καθώς και αποδέκτης πολλών άλλων κλάδων. Οι βασικότεροι κλάδοι από τα δυτικά είναι το ρέμα Εσχατιάς, το ρέμα Αχαρνών (Καναπίτσα), το ρέμα Κοντίτας (Βαρυμπόμπης) ενώ από τα ανατολικά τα ρέματα Ποδονίφτη, Σαψούς (Αμαρουσίου), Χαλανδρίου και Προφήτη Δανήλ σύμφωνα με την Επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής, Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο του Λεκανοπεδίου Αττικής. Η λεκάνη απορροής του Κηφισού ξεκινάει από το βόρειο όριο της Ζώνης και οριοθετείται από τις ανατολικές πλαγιές της Πάρνηθας, το όρος Αιγάλεω στα νοτιοδυτικά, την Πεντέλη στα βορειοανατολικά και τον υδροκρίτη του Ιλισού στα ανατολικά. Ο Κηφισός αναβλύζει από την Οροσειρά της Πάρνηθας, στον Εθνικό Δρυμό και εκβάλλει στον Φαληρικό Όρμο. Έχει συνολικό μήκος 22 χιλιόμετρα, όπου τα 14 χιλιόμετρα από αυτά βρίσκονται εντός αστικής περιοχής ενώ τα υπόλοιπα εκτός. Από την συνολική επιφάνεια της λεκάνης η οποία είναι 381.10 km², τα 244 km² δηλαδή περίπου το 64% της έκτασης περιλαμβάνει δομημένες εκτάσεις, για τις οποίες πλέον γίνεται λόγος ότι καλύπτουν πάνω από το 70% (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Όσον αφορά στις υπόλοιπες χρήσεις γης, οι ανάντη ορεινές περιοχές καλύπτονται από δάση, θαμνώδεις εκτάσεις και περιοχές βιομηχανικής χρήσης (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Λόγω των πυρκαγιών που ξεσπάνε ανά έτη, όπως για παράδειγμα στις δασικές εκτάσεις της Πεντέλης στα ανατολικά όρια της λεκάνης απορροής, η δασοκάλυψη μειώνεται σημαντικά, η οποία όμως λόγω των συχνών αναδασώσεων έχει αναπτυχθεί σε ένα βαθμό (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Πολύ σημαντικό είναι να αναφερθεί η μεγάλη καταστροφή που προκάλεσε η δασική πυρκαγιά τον Αύγουστο του 2021 όπου έκαψε τις περιοχές Βαρυμπόμπη, Ιπποκράτειο Πολιτεία και Κρυονέρι, οι οποίες αποτελούν και την περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας.



Εικόνα 4: Κατάταξη Υδρογραφικού Δικτύου Λεκανοπεδίου Αττικής (πηγή: Επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής, Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής, Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023)

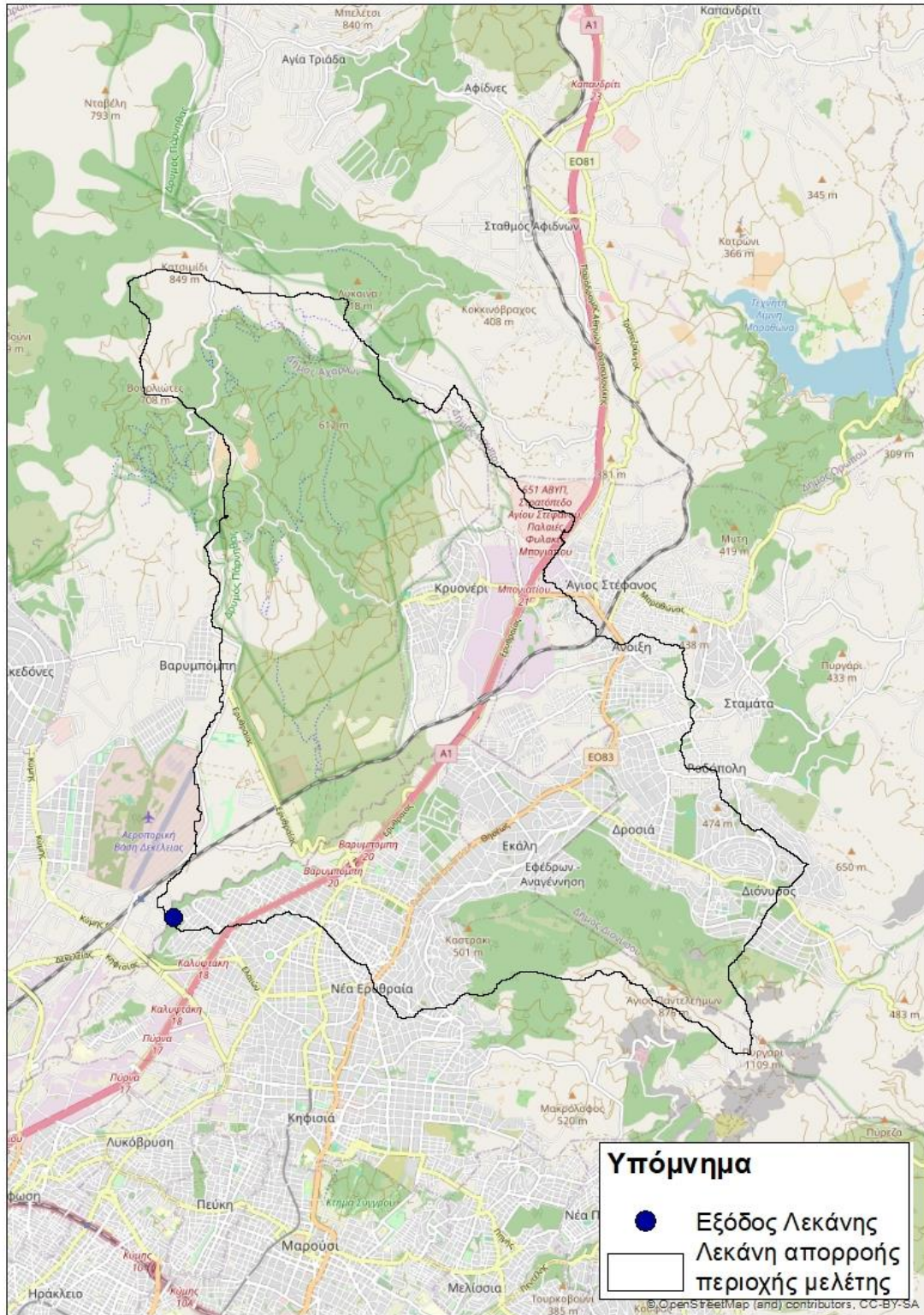
Ένα ακόμα σημαντικό και επίκαιρο θέμα που πρέπει να αναφερθεί είναι το «μπάζωμα» πολλών ρεμάτων που περνάνε από κατοικημένες περιοχές καθώς και η διεύθετηση των βασικών τους κλάδων με κλειστές ανεπαρκείς διατομές. Η διεύθετηση του ποταμού Κηφισού ολοκληρώθηκε με το οδικό έργο του 2007 ενώ κράτησε για δεκαετίες (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Λόγω οδικών έργων που γινόντουσαν σταδιακά, η κατασκευή των έργων έγινε αποσπασματικά και δεν ξεκίνησε από τα κατάντη. Αυτό συντέλεσε στο να μην διευθετηθούν κάποια ρέματα μέχρι και σήμερα. Πιο αναλυτικά, δεν έχει διευθετηθεί μέρος των ρεμάτων στην ανοικτή διαδρομή του ποταμού, ανάντη των Τριών Γεφυρών και κατάντη της Αγ. Άννης μέχρι την εκβολή του ποταμού. Επίσης, έχουν εκτραπεί προς την λεκάνη ρέματος Ραφήνας και στον όρμο Περάματος μέρη των λεκανών Ποδονίφη και Νίκαιας αντίστοιχα (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023). Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται οι υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής Κηφισού ανάντη των Τριών Γεφυρών.



Εικόνα 5: Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες της λεκάνης απορροής Κηφισού ανάντη των Τριών γεφυρών (πηγή: Επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής, Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής, Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2023)

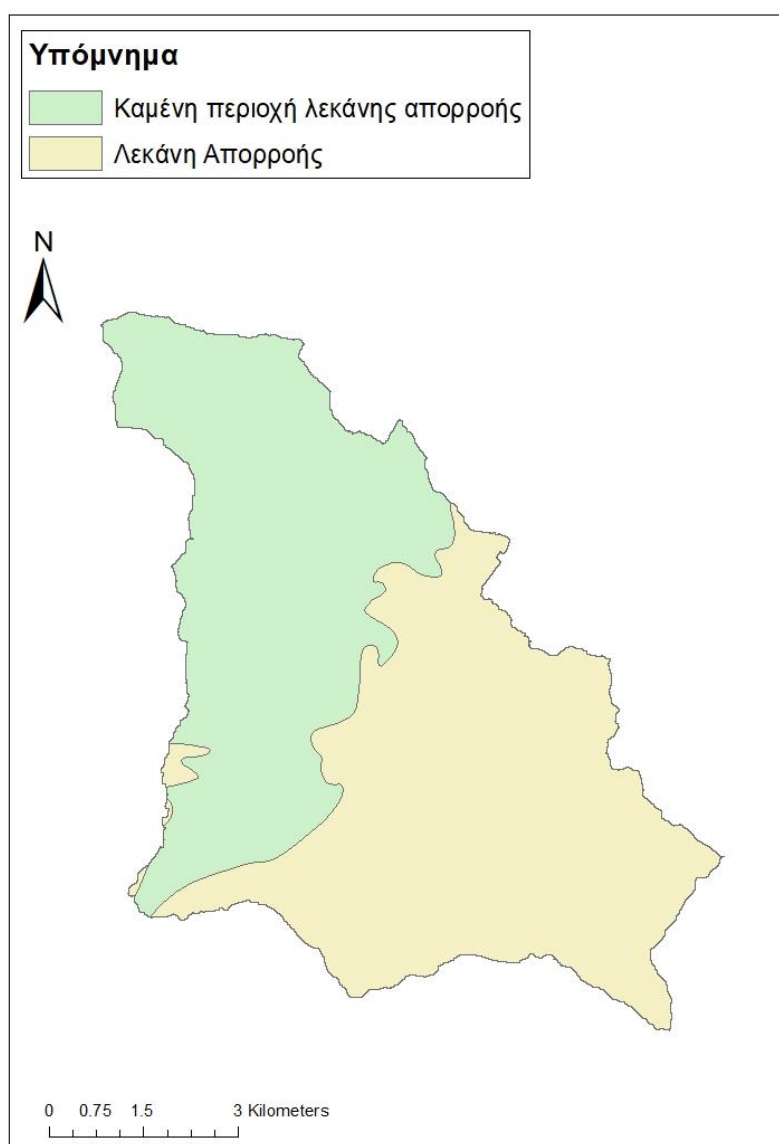
2.2 Λεκάνη απορροής περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης της εργασίας αποτελεί τμήμα της λεκάνης απορροής του Κηφισού ποταμού και συγκεκριμένα της περιοχής της Βαρυμπόμπης που κάηκε μετά την δασική πυρκαγιά τον Αύγουστο του 2021. Η Βαρυμπόμπη βρίσκεται στην βορειοανατολική Αττική, στους πρόποδες της Πάρνηθας και υπάγεται στον Δήμο Αχαρνών-Θρακομακεδόνων. Συνορεύει στα δυτικά με τους Θρακομακεδόνες ενώ στα ανατολικά με τα βόρεια προάστεια. Το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής βρίσκεται κοντά στην περιοχή Δεκέλεια στο ρέμα Χελιδονούς όπου εκβάλλει στον Κηφισό ποταμό. Ο Κηφισός ποταμός εκβάλλει στο δυτικό άκρο του Φαληρικού Όρμου. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης είναι 58.78 km², το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι 409.39 m, το μέγιστο υψόμετρο 1,087 m, ενώ το υψόμετρο στην έξοδο της υπολεκάνης είναι 189 m όπως βρέθηκε από το ArcGIS. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ο χάρτης της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης και η έξοδος της λεκάνης της συγκεκριμένης εργασίας με υπόβαθρο το Open Street Map.



Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής περιοχής μελέτης

Μετά την δασική πυρκαγιά του 2021 οι χρήσεις γης άλλαξαν, οπότε έπρεπε να βρεθεί το ποσοστό της καμένης έκτασης της λεκάνης απορροής. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της ιστοσελίδας European Forest Fire Information System-EFFIS (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/data.request.form/>), όπου παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες για τις πυρκαγιές για όλη την Ευρώπη. Τα δεδομένα που χρειάστηκαν ήταν ένας χάρτης καμένης περιοχής (Burnt area map), όπου λήφθηκε από την παραπάνω ιστοσελίδα. Χρειάστηκε να συμπληρωθεί μια αίτηση για τον τύπο δεδομένων που επιθυμεί ο χρήστης να λάβει τον χάρτη, την χώρα της περιοχής μελέτης καθώς και την ημερομηνία που έλαβε χώρα η πυρκαγιά. Ο χάρτης ήταν σε αρχείο shapefile για όλη την Ευρώπη και με την εντολή “clip” κόπηκε με βάση την λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης που δημιουργήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Διαπιστώθηκε ότι από το εμβαδό ολόκληρης της λεκάνης, το οποίο είναι 58.78 km² κάηκαν τα 26.81 km², δηλαδή περίπου το 46% της έκτασης.



Εικόνα 7: Χάρτης καμένης περιοχής λεκάνης απορροής

2.3 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εντοπίζονται στο Λεκανοπέδιο της Αττικής είναι οι αλπικοί και οι μεταλπικοί. Οι αλπικοί σχηματισμοί βρίσκονται στους ορεινούς όγκους και στα εσωτερικά τους ενώ οι μεταλπικοί αναπτύσσονται στο εσωτερικό και στα πρηνή των ορεινών όγκων (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005).

Οι αλπικοί σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται στις εξής ενότητες (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005):

- Στην Ενότητα Αττικής
- Στην Υποπελαγονική Ενότητα

Οι μεταλπικοί σχηματισμοί του λεκανοπεδίου διακρίνονται σε νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι νεογενείς διακρίνονται σε ηπειρωτικούς σχηματισμούς (λιμναίες και λιμνοχερσαίες αποθέσεις), οι οποίοι βρίσκονται στα βόρεια του λεκανοπεδίου ενώ οι τεταρτογενείς αποθέσεις διακρίνονται σε θαλάσσιους σχηματισμούς (θαλάσσιες, παράκτιες και παράλιες αποθέσεις) που εμφανίζονται στα νότια του λεκανοπεδίου (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005).

Όσον αφορά τους θαλάσσιους νεογενείς σχηματισμούς αποτελούνται από τους πλειοκαινικούς και τους άνω μειοκαινικούς, οι οποίοι με την σειρά τους χωρίζονται στην κλαστική σειρά που υπόκειται και τους ανθρακικούς σχηματισμούς που υπέρκεινται (Κοταμπάση και Σκέντος 2005).

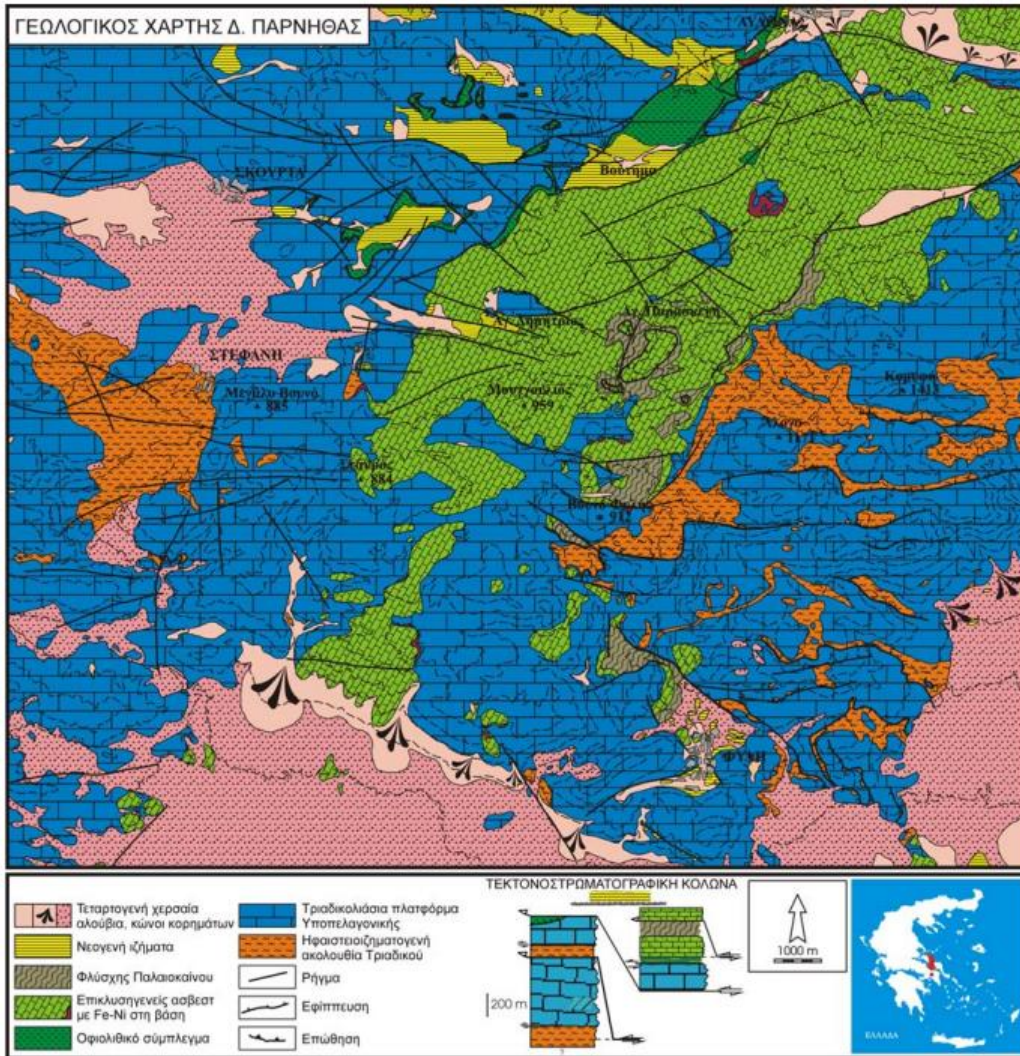
Οι ηπειρωτικοί σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται στους πλειοκαινικούς και τους άνω μειοκαινικούς. Οι περιοχές Μεταμόρφωση, Αχαρνές, Φιλοθέη, Μαρούσι και Χαλάνδρι που είναι κοντά στην περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας εμφανίζουν πλειοκαινικές αποθέσεις και συγκεκριμένα άμμο και άργιλο (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005).

Επίσης, εμφανίζονται ριτίδια στους πρόποδες των ορεινών όγκων και κατά μήκος του άνω ρου του Κηφισού, που ανήκουν στους τεταρτογενείς ηπειρωτικούς σχηματισμούς (Παπανικολάου κ.α 2004).

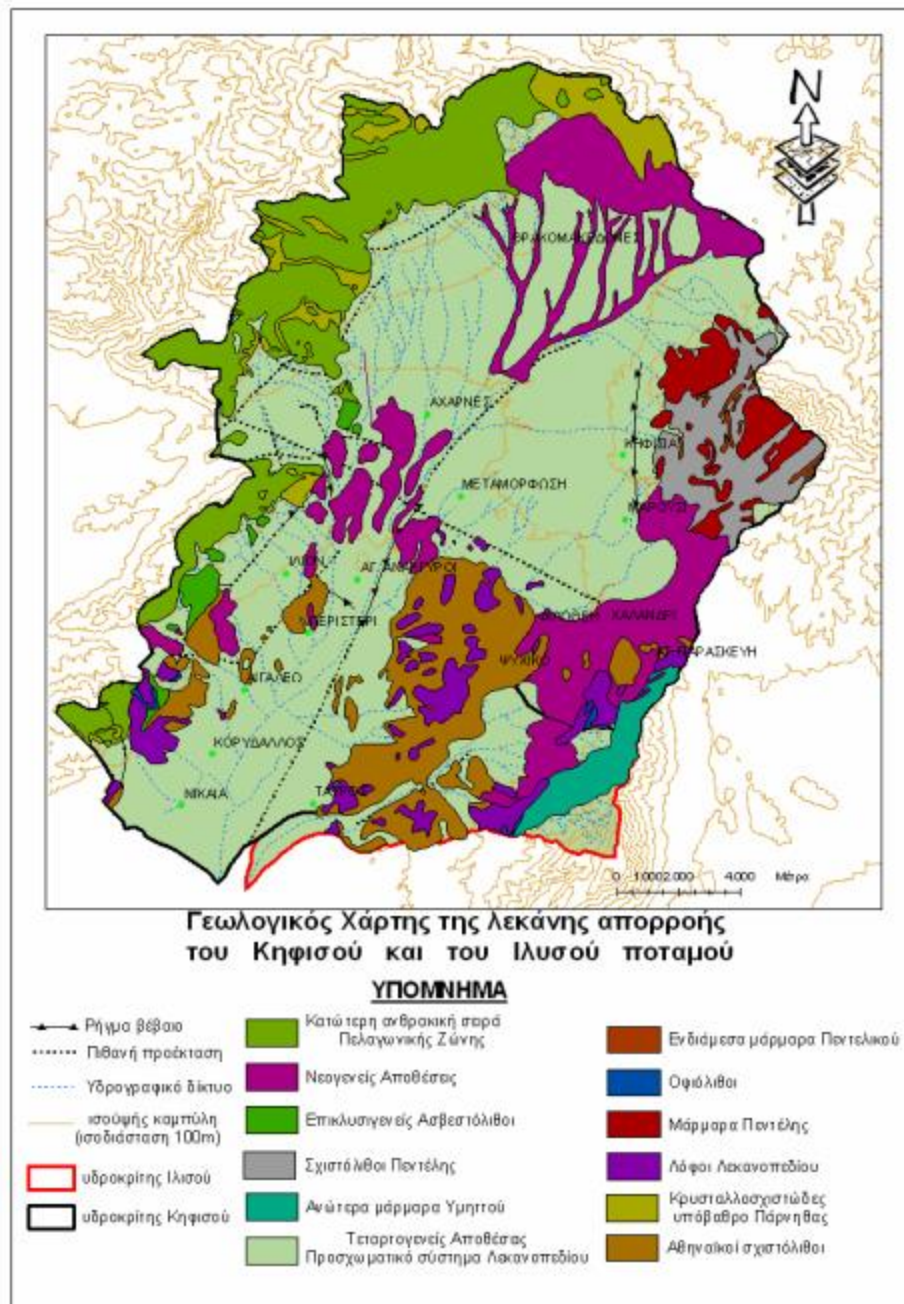
Παράλληλα οι αλπικοί και οι μεταλπικοί σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται και ως εξής (Αντωνίου, 2002):

- Περαιοί σχηματισμοί: Όπως μάρμαρα, ασβεστόλιθοι και ψαμμίτες
- Περαιοί έως ημιπεραιοί σχηματισμοί: Όπως οι χαλαροί έως ημισυνεκτικοί τεταρτογενείς και νεογενείς σχηματισμοί
- Ημιπεραιοί σχηματισμοί: Όπως οι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι και οι οφιόλιθοι
- Αδιαπέραιοι σχηματισμοί: Όπως οι σχιστόλιθοι

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται ο γεωλογικός χάρτης της Πάρνηθας ενώ στην Εικόνα 9 απεικονίζεται ο γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής Κηφισού, όπου διακρίνονται αναλυτικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί της κάθε περιοχής.



Εικόνα 8: Γεωλογικός χάρτης Πάρνηθας (πηγή: Μαριολάκος κ.α., 2001)



Εικόνα 9: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Κηφισού και του Ιλισού ποταμού (πηγή: Κοταμπάση και Σκέντος, 2005)

2.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το κλίμα στο Λεκανοπέδιο της Αττικής είναι μεσογειακό, εκτός από τις περιοχές που έχουν υψηλότερο υψόμετρο και χαρακτηρίζεται ως ορεινό. Ο χειμώνας είναι ήπιος και βροχερός ενώ τα καλοκαίρια θερμά και ξηρά (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005). Η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται στα 350 mm μέχρι 1.000 mm στα ορεινότερα σημεία, όπως η Πάρνηθα (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005). Οι μέρες βροχόπτωσης ανά έτος κυμαίνονται από 50 μέχρι 100. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 °C έως 18 °C ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005). Οι υψηλότερες θερμοκρασίες

παρατηρούνται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, ενώ αντίθετα οι χαμηλότερες σε περιοχές των βορείων προαστίων (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005). Ο πιο κρύος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος ενώ ο πιο ζεστός ο Ιούλιος. Τους μήνες Οκτώβρη έως Απρίλιο το κλίμα είναι βροχερό ενώ από το Μάιο έως το Σεπτέμβρη ξηρό (Κοταμπάση και Σκέντος, 2005). Τα παραπάνω απεικονίζονται και γραφικά από το ομβροθερμικό διάγραμμα του σταθμού Τατοΐου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) για τα έτη 1956-2010 (Εικόνα 10). Τα τελευταία χρόνια, λόγω της κλιματικής αλλαγής τα καλοκαίρια εμφανίζονται καύσωνες με την θερμοκρασία να φτάνει ή και να υπερβαίνει τους 40 °C (Ζυμαράκη, 2023). Παράλληλα παρατηρούνται και εντονότερες χιονοπτώσεις τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο στα βόρεια ενώ στις παράκτιες περιοχές είναι σπάνιες (Ζυμαράκη, 2023).



Εικόνα 10: Ομβροθερμικό διάγραμμα Τατοΐου περίοδος 1956-2010 (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)

Ειδικότερα τον Αύγουστο του 2021, οι πρώτες πέντε ημέρες, όπου και έλαβε χώρα η τεράστια δασική πυρκαγιά, αποτέλεσαν περίοδο με ένα από τα σημαντικότερα επεισόδια καύσωνα των τελευταίων 35 ετών από άποψη διάρκειας (28/7/2021-5/8/2021) αλλά και υπέρβασης των απολύτως μεγίστων τιμών θερμοκρασίας κατά τόπους, όπως βρέθηκε από το Κλιματικό Δελτίο του Αυγούστου 2021 από την ιστοσελίδα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας-ΕΜΥ (http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_month). Χρειάστηκε να συμπληρωθεί ο μήνας και το έτος που επιθυμεί ο χρήστης ώστε να κατεβάσει το αντίστοιχο Κλιματικό Δελτίο που επιθυμεί. Παράλληλα, όπως βρέθηκε από την ιστοσελίδα Meteosearch (<https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm>) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, για τον σταθμό Τατοΐ στις 3 Αυγούστου 2021, η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 41.8 °C στις 15:00 το μεσημέρι και η χαμηλότερη 26.6 °C στις 3:20 το πρωί. Η μέγιστη σχετική υγρασία ήταν 47%, ενώ η ελάχιστη 10% και το ύψος βροχής ήταν μηδενικό. Η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 10 km/h ενώ η μέγιστη έφτασε 40.2 km/h στις 18:10 το απόγευμα. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κλιματικές συνθήκες του μετεωρολογικού σταθμού Τατοΐου με υψόμετρο 275 m τις πρώτες πέντε μέρες του Αυγούστου του 2021. Για να ληφθούν τα παραπάνω δεδομένα χρειάστηκε να δημιουργηθεί λογαριασμός με τα στοιχεία του χρήστη στην ιστοσελίδα του Meteosearch, ώστε να ληφθούν τα δεδομένα που επιθυμεί.

Πίνακας 1: Κλιματολογικά χαρακτηριστικά του σταθμού Τατοΐου στις 3 Αυγούστου 2021 (πηγή: Meteosearch)

ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΥΓΟΥΣΤΟ 2021												
Όνομα: Βαρυμπόμπη			Υψόμετρο: 275 m		Γεωγραφικό πλάτος: 38° 6'			Γεωγραφικό μήκος: 23° 48'				
Θερμοκρασία (° C)				Βροχόπτωση (mm)				Ταχύτητα του αέρα (km/hr)				
Ημέρα	Μέση θερμοκρασία	Μέγιστη θερμοκρασία	Ώρα	Ελάχιστη θερμοκρασία	Ώρα	Μέγιστη υγρασία	Ελάχιστη σχετική υγρασία	Βροχόπτωση	Μέση ταχύτητα ανέμου	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου	Ώρα	Διεύθυνση ανέμου
01	31.5	39.1	15:50	24.3	5:10	45	22	0	9.2	33.8	14:00	BBA
02	33.1	41.2	14:30	24.8	3:10	51	18	0	5.9	27.4	13:00	BA
03	34.8	41.8	15:00	26.6	3:20	47	10	0	10	40.2	18:10	BBA
04	32.9	40.3	14:50	25.7	4:20	41	15	0	5.8	29	16:30	ABA
05	32.6	40.3	15:30	24.5	6:50	48	19	0	4.7	29	14:20	NNA

2.5 Δασική βλάστηση

Κατά την πυρκαγιά που ξέσπασε στις 3 Αυγούστου 2021 στη Βαρυμπόμπη, κάηκε ένα μεγάλο μέρος των βασιλικών κτημάτων Τατοΐου, στους πρόποδες της Πάρνηθας. Η Πάρνηθα έχει ανακηρυχθεί Εθνικός Δρυμός και το δάσος Τατοΐου αποτελεί τμήμα του Εθνικού Δρυμού Πάρνηθας, το οποίο βέβαια αποτελεί ξεχωριστή ενότητα λόγω των ιστορικών και ιδιοκτησιακών του ιδιομορφιών όπως βρέθηκε από το έντυπο «Δημόσιο Δάσος Τατοΐου» της ιστοσελίδας (https://parnitha.net/?page_id=65). Το Δημόσιο Δάσος Τατοΐου εκτείνεται σε 42.000 στρέμματα δασικής γης στους πρόποδες της Πάρνηθας, και είναι ένα οργανωμένο κτήμα, με πάρκο, κήπους, δάσος αλλά και αγρούς για ποικίλες καλλιέργειες και τόπους βοσκής. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης του κυριαρχείται από το δάσος Χαλεπίου Πεύκης (https://parnitha.net/?page_id=65). Επίσης, στην περιοχή υπάρχουν θαμνώδεις εκτάσεις αειφυλλων-πλατύφυλλων (σχίνος, πουρνάρι, κουμαριά, σπάρτο κλπ.), μεμονωμένα και διάσπαρτα άτομα δρυός, κουτσουπιάς, κεφαλληνιακής ελάτης, κυπαρισσιών, πλατάνου, ιτιάς, λεύκης, καθώς και σπάνια ενδημικά φυτά όπως κυκλάμινα, κρόκο, καμπανούλα κλπ. (https://parnitha.net/?page_id=65).

Γενικά στην Πάρνηθα διακρίνονται τρεις ζώνες βλάστησης, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με το υψόμετρο όπως βρέθηκε από την Μ.Δ. Εθνικών Πάρκων Πάρνηθας, Σχοινιά και Προστατευόμενων Περιοχών Σαρωνικού Κόλπου και είναι οι εξής (Ο.ΦΥ.ΠΕ.Κ.Α., 2021):

- Η πρώτη ζώνη εκτείνεται από τα 400 έως τα 1,000 m περίπου. Σε αυτή τη ζώνη κυριαρχούν τα δάση (Χαλεπίου πεύκης) *Pinus halapensis*, οι σχηματισμοί με *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*, *Arbutus unedo* και *Arbutus andrachne*, καθώς και φρυγανικά οικοσυστήματα. Στα ανώτερα της ζώνης αυτής, η Χαλέπιος πεύκη (*Pinus halapensis*) σχηματίζει μικτό δάσος με την Κεφαλληνιακή ελάτη (*Abies cephalonica*).
- Η δεύτερη ζώνη εκτείνεται από τα 1,000 m περίπου στις νότιες εκθέσεις του βουνού (από τα 600-700 m στις βόρειες εκθέσεις) μέχρι τα 1,400 m και κυριαρχείται από δάσος Κεφαλληνιακής ελάτης (*Abies cephalonica*). Υπάρχουν επίσης συστάδες με *Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus*, καθώς και κάποια λιβαδικά είδη στα οροπέδια. Λόγω αναδασωτικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν τα έτη 1950-1970, το δάσος Κεφαλληνιακής ελάτης δεν είναι αμιγές, αλλά σε αρκετά σημεία αναμιγνύεται με Μαύρη Πεύκη (*Pinus nigra*), η οποία δεν είναι αυτόχθονη της περιοχής.

- Η τρίτη ζώνη βλάστησης παρατηρείται στις υψηλότερες κορυφές του βουνού. Αυτή η ζώνη είναι υποπλασμένη και περιλαμβάνει μικρούς αγκαθωτούς, μαξιλαρόμορφους θάμνους, μαζί με αρκετά ενδημικά και σπάνια είδη. Αυτός ο τύπος βλάστησης πιθανόν έχει προκύψει από την υποβάθμιση του δάσους Κεφαλληνιακής ελάτης και επομένως, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αυθεντική υποαλπική ζώνη.

Η Πάρνηθα έχει υποστεί μεγάλες φυσικές καταστροφές από τις δασικές πυρκαγιές τόσο του 2007, του 2021 όσο και του 2023.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ- ΜΟΝΤΕΛΟ SWAT

3.1 Γενικά

Το λογισμικό SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αποτελεί ένα υδρολογικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικής Έρευνας του Υπουργείου Γεωργίας (United States Department of Agriculture) των ΗΠΑ. Είναι ένα καταναμημένο και συνεχούς χρόνου μοντέλο, το οποίο λειτουργεί σε επίπεδο λεκάνης απορροής τόσο με ημερήσιο όσο και με μηνιαίο χρονικό βήμα. Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί προσομοίωση ακόμη και με ωριαίο χρονικό βήμα. Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον ArcGIS και QGIS. Σκοπός του λογισμικού είναι να προβλέψει την επίδραση της χρήσης γης στο νερό, στα ιζήματα και στη συγκέντρωση χημικών ουσιών σε μεγάλες λεκάνες απορροής (Καπερώνης, 2016). Χρησιμοποιεί άμεσα διαθέσιμα δεδομένα συνήθως από κρατικούς φορείς και δίνει τη δυνατότητα για προσομοιώσεις μεγάλων λεκανών απορροής σε μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρει το μοντέλο είναι ότι μπορεί να χωρίζει τη λεκάνη απορροής σε υπολεκάνες. Έτσι περιοχές της λεκάνης απορροής που καλύπτονται από ανόμοιες χρήσεις γης και εδάφη, μπορούν να διαχωριστούν σε υπολεκάνες με κοινά χαρακτηριστικά. Έπειτα γίνεται ο διαχωρισμός των υπολεκανών σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs- Hydrologic Response Units), όπου πρόκειται για μικρές ομαδοποιημένες περιοχές με συνδυασμούς χρήσης γης, τύπο εδάφους και κλίσης εδάφους.

3.2 Υδρολογικός κύκλος του νερού

Ο υδρολογικός κύκλος που προσομοιώνεται στο μοντέλο SWAT και απεικονίζεται στην Εικόνα 11 ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση υδατικού ισοζυγίου (Neitsch et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

όπου:

SW_t - η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

SW_0 - η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

t - ο χρόνος σε ημέρες

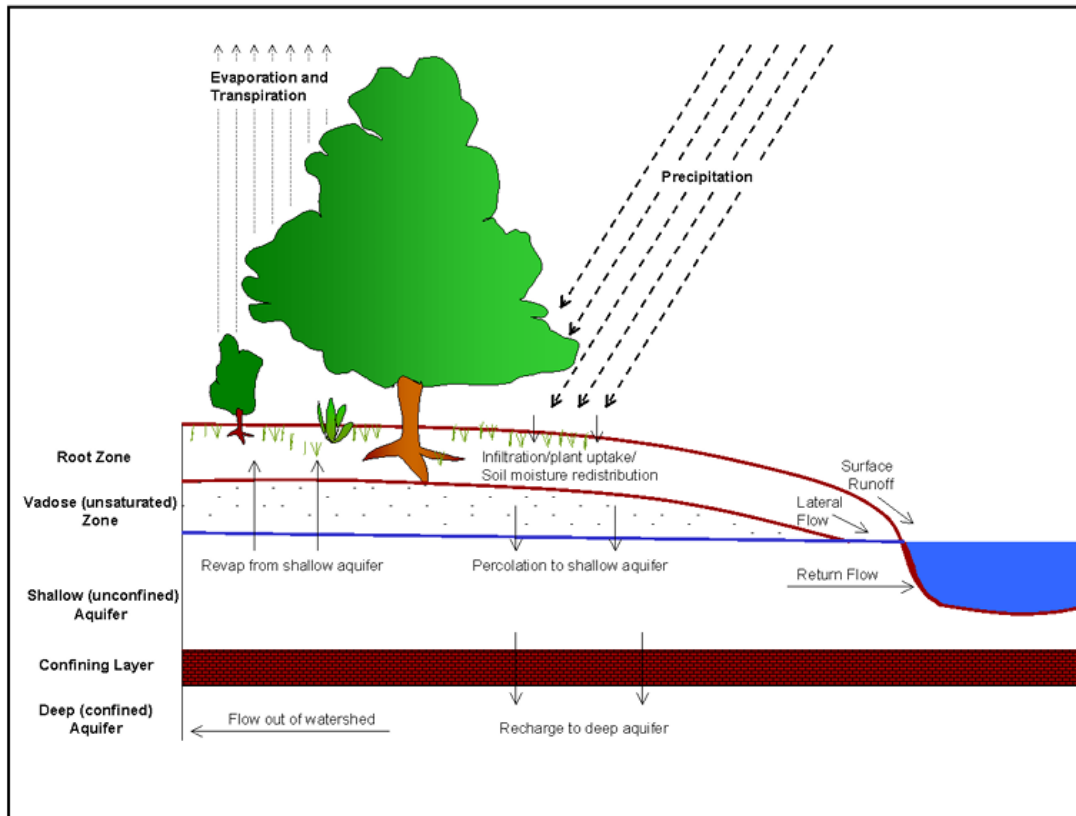
R_{day} - η ημερήσια βροχόπτωση

Q_{surf} - η ημερήσια απορροή (mm)

E_a - η εξατμισοδιαπνοή (mm)

W_{seep} - η διήθηση (mm)

Q_{gw} - η υπόγεια ροή (mm)



Εικόνα 11: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού (Neitsch et al., 2011)

3.3 Υδρολογικές διεργασίες

3.3.1 Επιφανειακή απορροή

Η επιφανειακή απορροή εμφανίζεται στα εδάφη, όταν η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στην επιφάνεια των εδαφών ξεπερνάει την ποσότητα που μπορούν να απορροφήσουν (Neitsch et al., 2011). Οι δύο μέθοδοι που παρέχει το μοντέλο SWAT για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής είναι οι εξής (Neitsch et al., 2011):

- Η μέθοδος του Αριθμού Καμπύλης (Curve Number) της SCS (1972), και
- Η μέθοδος διήθησης Green & Ampt (1911)

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS-CN, καθώς πρόκειται για μια αξιόπιστη μέθοδο, η οποία αποτέλεσε προϊόν μελέτης τουλάχιστον 20 ετών. Επίσης, για την εκτίμηση της απορροής χρησιμοποιούνται δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης και δίνεται η δυνατότητα διαφορετικών χρήσεων γης και εδαφικών τύπων. Η εξίσωση του Αριθμού Καμπύλης της SCS που περιγράφει την επιφανειακή απορροή είναι (Neitsch et al., 2011):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (3.2)$$

όπου:

Q_{surf} - η επιφανειακή απορροή (mm)

R_{day} - η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

I_a - οι αρχικές απώλειες (mm)

S -παράγοντας κατακράτησης (mm)

Ο παράγοντας κατακράτησης ορίζεται ως:

$$S = 25.4 \left(\frac{1,000}{CN} - 10 \right) \quad (3.3)$$

όπου:

CN - ο αριθμός καμπύλης για την ημέρα

Ο αριθμός καμπύλης CN εξαρτάται από την κατηγορία του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους και προκύπτει από αντίστοιχους πίνακες. Η μέθοδος της SCS ταξινομεί τα εδάφη σε τέσσερις υδρολογικές κατηγορίες (A, B, C, D) με βάση την διήθηση των εδαφών. Οι αρχικές απώλειες υπολογίζονται από την σχέση $I_a = 0.2 \times S$ και έτσι η τελική εξίσωση που περιγράφει την επιφανειακή απορροή γίνεται:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (3.4)$$

όπου:

Q_{surf} - η επιφανειακή απορροή (mm)

R_{day} - η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

S -παράγοντας κατακράτησης (mm)

3.3.2 Διήθηση

Το μοντέλο SWAT υπολογίζει την διήθηση για κάθε στρώμα του εδάφους. Εάν η ποσότητα του νερού υπερβαίνει την αποθηκευτικότητα του κάθε στρώματος και το κατώτερο στρώμα δεν είναι κορεσμένο τότε λαμβάνει χώρα η διήθηση του νερού στον υπόγειο υδροφόρο (Neitsch et al., 2011).

Ο όγκος νερού που μπορεί να διηθηθεί σε κάθε εδαφικό στρώμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Neitsch et al., 2011):

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (3.5)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly}$$

όπου:

$SW_{ly,excess}$ – ο όγκος νερού που διηθείται από ένα στρώμα σε μια μέρα (mm)

SW_{ly} – ο διαθέσιμος όγκος νερού που προϋπάρχει στο εδαφικό στρώμα την ίδια μέρα (mm)

FC_{ly} – η χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος σε νερό (mm)

Η ποσότητα του νερού που μετακινείται από το ένα στρώμα στο άλλο υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση (Neitsch et al., 2011):

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (3.6)$$

όπου:

$W_{perc,ly}$ - η ποσότητα του νερού που διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα (mm)

Δt - το χρονικό βήμα (hrs)

TT_{perc} - ο χρόνος μέχρι να ολοκληρωθεί η διήθηση του νερού στο επόμενο στρώμα (h)

Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να ολοκληρωθεί η διήθηση υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε εδαφικό στρώμα από τον τύπο:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (3.7)$$

όπου:

SAT_{ly} - η ποσότητα του νερού στο εδαφικό στρώμα όταν είναι πλήρως κορεσμένο (mm)

K_{sat} - κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού στρώματος (mm/h)

3.3.3 Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες στην ατμόσφαιρα, με τις οποίες το νερό μετατρέπεται σε υδρατμούς (Neitsch et al., 2011). Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λπ. και αποτελεί τον κύριο μηχανισμό με τον οποίο απομακρύνεται το νερό από μια λεκάνη απορροής. Έχει υπολογιστεί ότι η εξατμισοδιαπνοή καλύπτει περίπου το 62% των βροχοπτώσεων παγκοσμίως (Neitsch et al., 2011). Το μοντέλο SWAT περιλαμβάνει τρεις μεθόδους που υπολογίζουν την εξατμισοδιαπνοή: α) την μέθοδο Penman-Monteith, β) την μέθοδο Priestley-Taylor και γ) την μέθοδο Hargreaves.

Η μέθοδος Penman-Monteith απαιτεί ως δεδομένα την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία του αέρα, την σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Η μέθοδος Priestley-Taylor απαιτεί την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία του εδάφους και την σχετική υγρασία, ενώ η μέθοδος Hargreaves απαιτεί μόνο την θερμοκρασία του αέρα. Στην περίπτωση που επιλεγεί η μέθοδος Penman-Monteith τότε η εξίσωση για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής είναι η παρακάτω (Neitsch et al., 2011):

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{air} c_p [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (3.8)$$

όπου:

λE - η πυκνότητα ροής θερμότητας ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

E - το ποσοστό βάθους εξάτμισης (mm d^{-1})

Δ - η κλίση της καμπύλης πίεσης ατμού-θερμοκρασίας ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

H_{net} - η καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G - η πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

ρ_{air} - η πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3})

c_p - η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

e_z^0 - η κορεσμένη πίεση ατμών του αέρα σε ύψος z (kPa)

e_z - η πίεση υδρατμών του αέρα σε ύψος z (kPa)

r_a - η αεροδυναμική αντίσταση (s m^{-1})

γ - η ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

r_c - η αντίσταση του φυτού (s m^{-1})

Το μοντέλο υπολογίζει ξεχωριστά την εξάτμιση από τα εδάφη και τη διαπνοή από τα φυτά. Έτσι η διαπνοή υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$E_t = \frac{E'_0 LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (3.9)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3.0$$

όπου:

E_t - η μέγιστη διαπνοή σε μια ημέρα (mm)

E'_0 - η πιθανή εξατμισοδιαπνοή προσαρμοσμένη για την εξάτμιση του ελεύθερου νερού στα φυτά

LAI - δείκτης φυλλωμάτων

Η δυνητική εξάτμιση του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E_s = E'_0 cov_{sol} \quad (3.10)$$

όπου:

E_s - η μέγιστη εξάτμιση του εδάφους σε μια μέρα (mm)

cov_{sol} - ο δείκτης κάλυψης του εδάφους

Ο δείκτης κάλυψης του εδάφους υπολογίζεται από την σχέση:

$$cov_{soil} = \exp(-5.0 \times 10^{-5} CV) \quad (3.11)$$

όπου:

CV – υπέργεια βιομάζα και υπολείμματα (kg/ha)

Η μέγιστη ποσότητα εξάτμισης του εδαφικού νερού μειώνεται σε περιόδους υψηλής χρήσης του από τα φυτά με την παρακάτω σχέση:

$$E'_s = \min \left(E_s, \frac{E_s E'_0}{E_s + E_t} \right) \quad (3.12)$$

3.4 Συλλογή δεδομένων

Το πρώτο βήμα για να γίνει η προσομοίωση του μοντέλου SWAT είναι η συλλογή των απαραίτητων γεωχωρικών και κλιματικών δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Δηλαδή το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ, Digital Elevation Model-DEM), οι χρήσεις γης, οι εδαφικοί τύποι και οι κλίσεις του εδάφους. Έπειτα, απαραίτητη είναι η συλλογή των υδρομετεωρολογικών δεδομένων από κοντινούς σταθμούς της περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα βροχόπτωσης και δεδομένα θερμοκρασίας. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι:

- Το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM): Πρόκειται για ένα αρχείο TIFF σε raster μορφή, το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες για το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και αποτελεί την βάση ώστε να γίνει η υδρολογική μελέτη. Στη συγκεκριμένη εργασία το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ελήφθη από το Ελληνικό Κτηματολόγιο.
- Οι Χρήσεις Γης (Land Use): Πρόκειται για ένα χάρτη που απεικονίζει τις διαφορετικές χρήσεις γης που καλύπτουν την λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, σε μορφή shapefile. Οι χρήσεις γης αποτελούν μια από τις τρεις συνιστώσες των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs). Ελήφθησαν από το Copernicus Land Monitoring Service, Corine Land Cover 2018 σε vector μορφή για όλη την Ευρώπη.
- Τα Δεδομένα Εδάφους (Soil): Αποτελεί ένα χάρτη που περιέχει όλες τις πληροφορίες για το έδαφος και το υπέδαφος της λεκάνης απορροής. Είναι η δεύτερη συνιστώσα για την δημιουργία των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs). Ο χάρτης των εδαφών λήφθηκε από το Food and Agriculture Organization of the United States, Digital Soil Map of the World για όλο τον κόσμο σε vector μορφή και σε αρχείο shapefile (<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>).
- Οι Κλίσεις (Slope): Οι κλίσεις αποτελούν την τελευταία συνιστώσα για την δημιουργία των HRUs. Δημιουργήθηκαν 2 κλίσεις με τη βοήθεια του ArcGIS, οι οποίες υπολογίστηκαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.

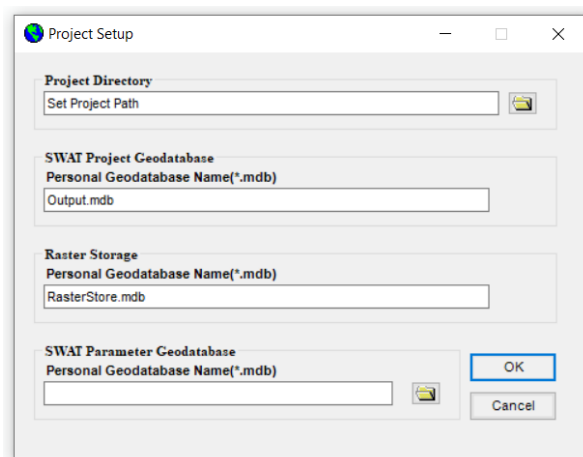
- Τα μετεωρολογικά δεδομένα (Weather data): Με την ολοκλήρωση των HRUs, πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο τα δεδομένα καιρού. Τα δεδομένα καιρού λήφθηκαν από το site του SWAT, το οποίο παραπέμπει στη σελίδα του University of Guelph, W3S-Water (<https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/>). Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης από 6 σταθμούς μέτρησης για 19 χρόνια και από έναν σταθμό μέτρησης για τις θερμοκρασίες. Στις θερμοκρασίες απαιτούνται οι μέγιστες και οι ελάχιστες. Άλλα δεδομένα που ίσως χρειαστεί να εισαχθούν είναι η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου.

3.5 Διαμόρφωση του μοντέλου

Επόμενο βήμα αφού ολοκληρωθεί η συλλογή των δεδομένων είναι να διαμορφωθεί το μοντέλο σύμφωνα με τα πέντε στάδια που πρέπει να γίνουν ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Η έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε είναι το ArcSWAT 2012 10.5.24 που είναι συμβατό με το ArcGIS 10.5.1.

3.5.1 Προετοιμασία μοντέλου SWAT (SWAT Project Setup):

Η δημιουργία του project αποτελεί το πρώτο βήμα για την διαμόρφωση του μοντέλου. Αρχικά ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τον φάκελο εργασίας του, όπου θα αποθηκεύσει το project του (Εικόνα 12). Είναι πολύ σημαντικό να αποθηκευτούν σε αυτόν τον φάκελο όλα τα αρχεία που θα χρειαστούν για την ολοκλήρωση του project, καθώς δεν επιτρέπεται η επιλογή αρχείων από άλλο φάκελο. Ταυτόχρονα στην Εικόνα 12 φαίνεται και η βάση δεδομένων όπου θα λαμβάνονται τα αρχεία. Σε αυτό το βήμα δίνεται η δυνατότητα είτε δημιουργίας νέου project, είτε αποθήκευσης, αντιγραφής και διαγραφής του.

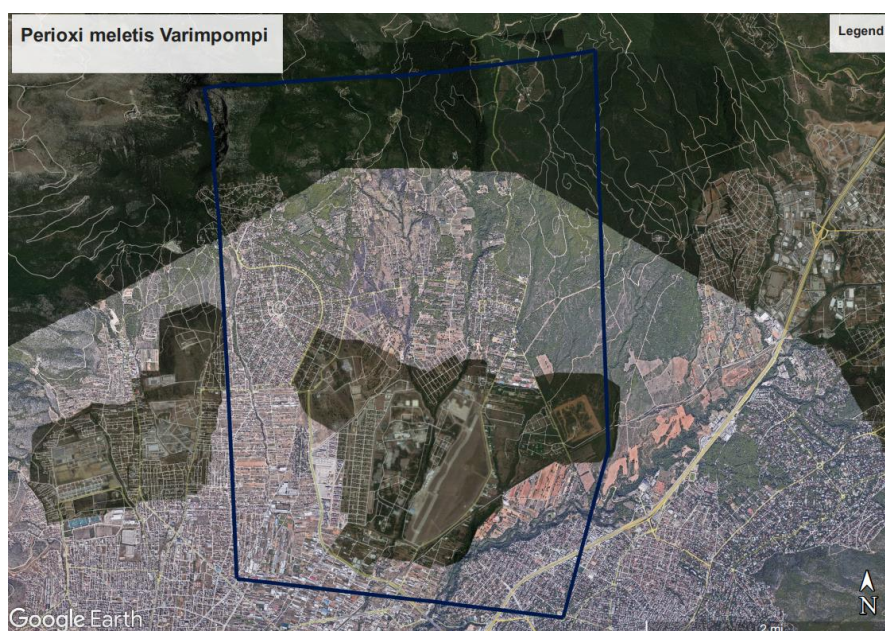


Εικόνα 12: Προετοιμασία μοντέλου SWAT

3.5.2 Οριοθέτηση Λεκάνης Απορροής (Watershed Delineator):

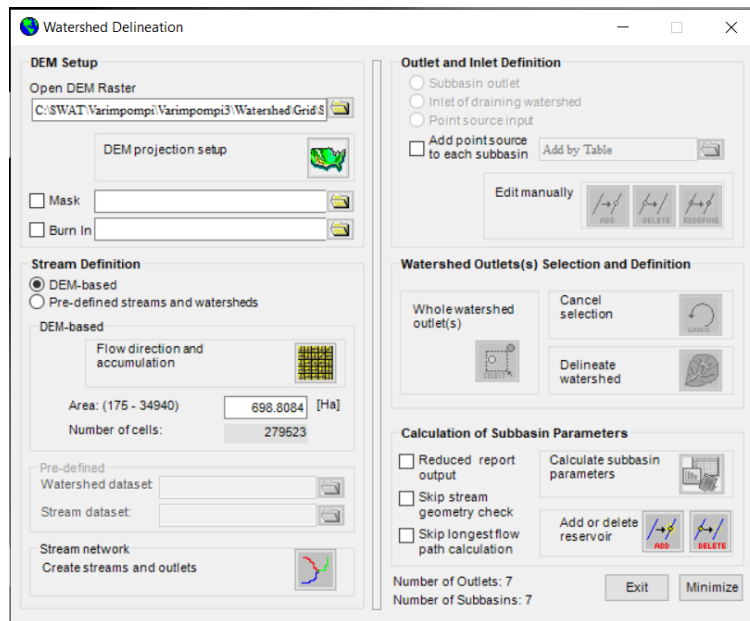
Για να χαραχθεί ο υδροκρίτης της λεκάνης απορροής πρέπει πρώτα να εισαχθεί στο λογισμικό SWAT το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM). Πρώτο βήμα για να δημιουργηθεί το Ψηφιακό

Μοντέλο Εδάφους ήταν η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης. Στο Google Earth δημιουργήθηκε το παρακάτω πολύγωνο (Εικόνα 13), το οποίο απεικονίζει την ευρύτερη περιοχή μελέτης. Το πολύγωνο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των πινακίδων του ΨΜΕ.

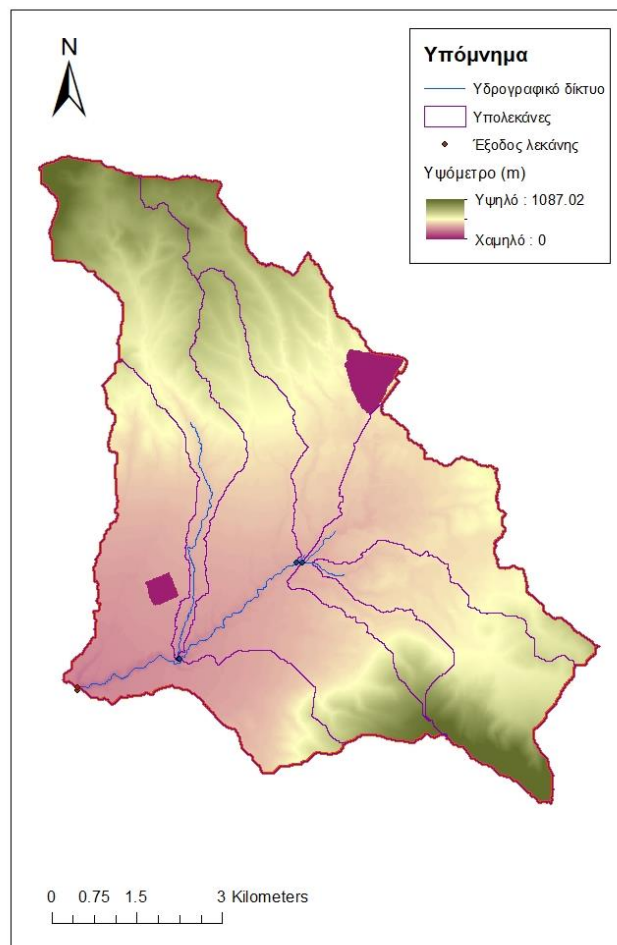


Εικόνα 13: Πολύγωνο περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth)

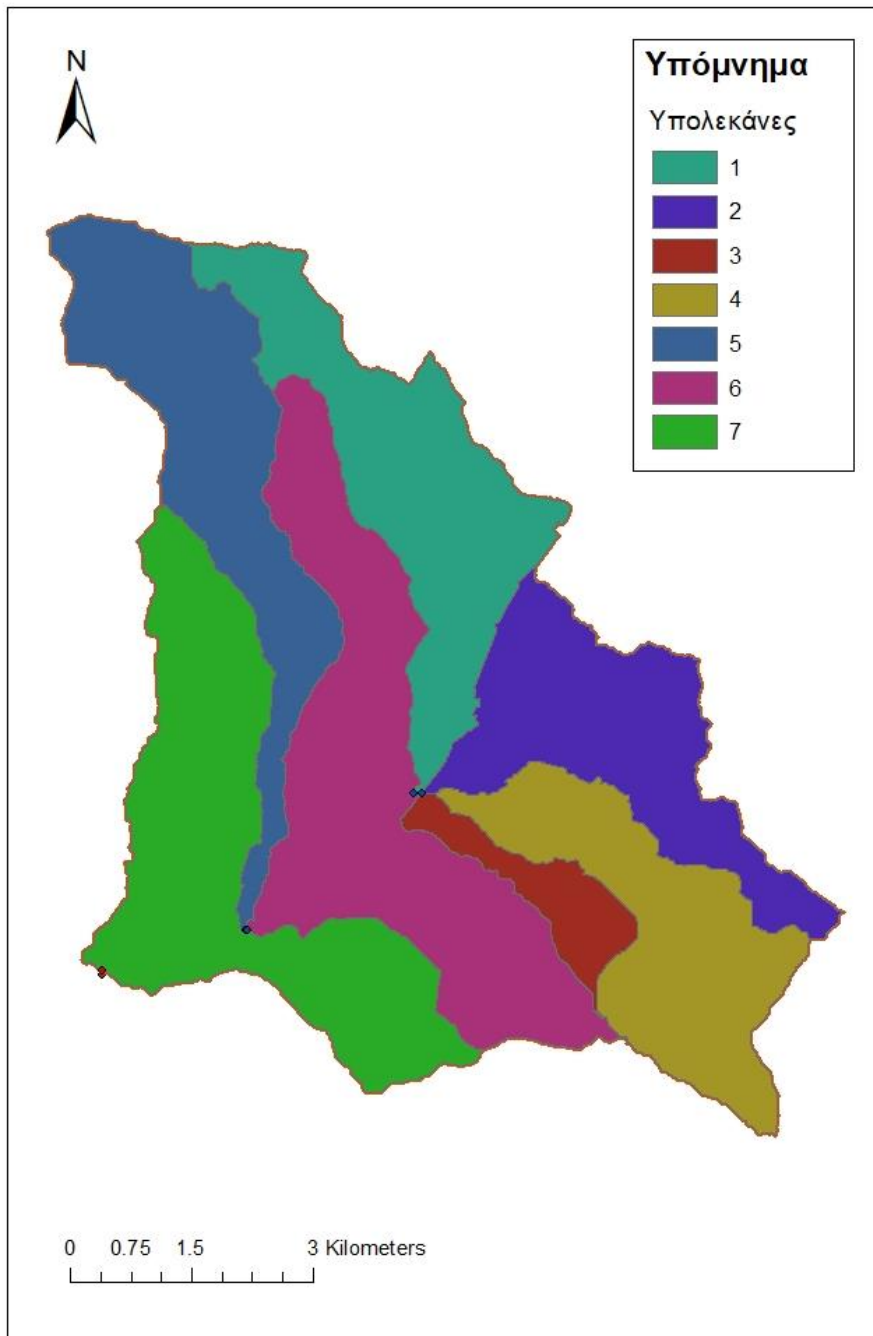
Με βάση το πολύγωνο που δημιουργήθηκε λήφθηκαν εικόνες-αρχεία TIFF της περιοχής μελέτης από το Ελληνικό Κτηματολόγιο διαστάσεων 5x5m, οι οποίες όμως πρέπει να ενωθούν σε μια εικόνα. Σε περιβάλλον ArcGIS και με την βοήθεια της εντολής “Mosaic to New Raster” γίνεται η ενοποίηση των εικόνων σε μια τελική εικόνα, που περιέχει την περιοχή μελέτης σε ένα τελικό αρχείο DEM. Είναι σημαντικό να οριστεί πρώτα το σωστό σύστημα συντεταγμένων τόσο για τα αρχεία εισόδου TIFF όσο και για το τελικό DEM. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το προβολικό σύστημα συντεταγμένων και με την βοήθεια της εντολής “Define Projection” ορίζεται συγκεκριμένα σε Greek Grid (ΕΓΣΑ '87). Στην ενότητα “Watershed Delineation” εισάγεται το DEM (DEM Setup) και ορίζεται η μονάδα μέτρησης των υψών (DEM projection setup) σε μέτρα (m) (Εικόνα 14). Στην συνέχεια μέσω του DEM προσδιορίστηκε η διεύθυνση της ροής των υδάτων και η συσσώρευσή τους (Flow direction and accumulation). Έπειτα ορίζοντας το κατώφλι σχεδιάστηκε το υδρογραφικό δίκτυο (Stream Network) και τα σημεία εξόδου. Στη συνέχεια εισήχθη στο μοντέλο το σημείο εξόδου ολόκληρης της λεκάνης απορροής (Whole Watershed Outlet) και έτσι η λεκάνη χωρίστηκε σε 7 υπολεκάνες και χαράχθηκε και ο υδροκρίτης. Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται ο χάρτης της οριοθέτησης της λεκάνης απορροής και στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι υπολεκάνες με την αρίθμηση τους.



Εικόνα 14: Οριοθέτηση λεκάνης απορροής



Εικόνα 15: Οριοθέτηση λεκάνης απορροής-Υπολεκάνες



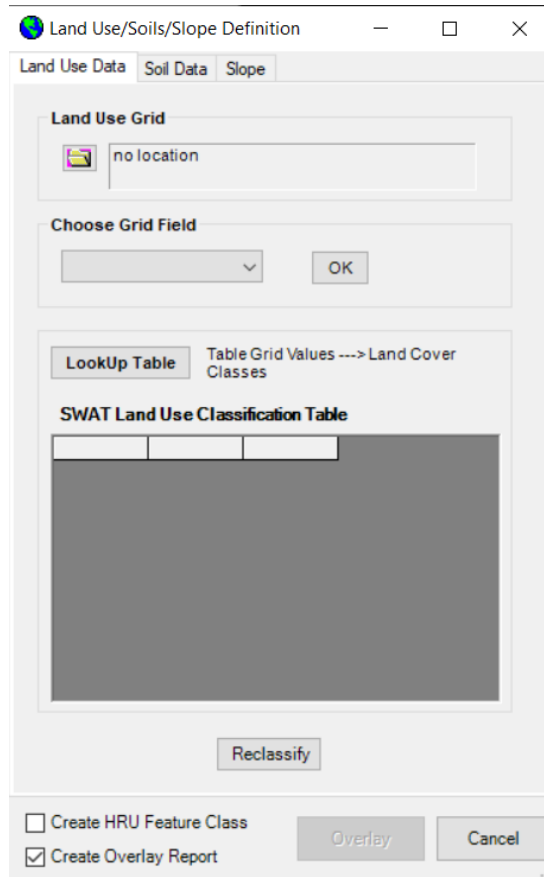
Εικόνα 16: Υπολεκάνες λεκάνης απορροής

3.5.3 Δημιουργία Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU Analysis):

Ένα πολύ σημαντικό βήμα αποτελεί η δημιουργία των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs). Οι Μονάδες Υδρολογικής απόκρισης είναι μοναδικοί συνδυασμοί χρήσεων γης, εδαφικού τύπου και κλίσεων εδάφους σε κάθε υπολεκάνη. Όπως και για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έτσι και κατά την εισαγωγή των χρήσεων γης και των εδαφικών τύπων πρέπει τα δεδομένα να βρίσκονται στο σωστό σύστημα συντεταγμένων.

Χρήσεις γης (Land Use):

Οι χρήσεις γης λήφθηκαν από το Corine Land Cover 2018 για όλη την Ευρώπη. Συνεπώς ο χάρτης του Corine πρέπει να κοπεί σε ένα νέο GIS project με βάση το πολύγωνο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια της εντολής clip και στη συνέχεια με την εντολή “raster to polygon” οι χρήσεις γης μετατρέπονται σε πολύγωνο όπου μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο SWAT (Εικόνα 17). Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία η περιοχή μελέτης είναι εκτός ΗΠΑ, πρέπει να δημιουργηθεί ένα “Look Up Table” ώστε να αντιστοιχίζονται οι χρήσεις γης του Corine με τους κωδικούς στη βάση δεδομένων του SWAT. Επειδή η ακριβής αντιστοίχιση δεν μπορεί να επιτευχθεί, γίνεται ομαδοποίηση των κατηγοριών Corine με κοινά χαρακτηριστικά σε κατηγορίες του SWAT όπως φαίνεται στον Πίνακα 3 και στον Πίνακα 4. Η επιλογή “Choose Grid Field” είναι “Values” και στην επιλογή Look Up Table εισάγεται το αρχείο txt που δημιουργήθηκε (Πίνακας 2). Ύστερα με την εντολή “Reclassify”, δημιουργούνται 8 χρήσεις γης της λεκάνης απορροής. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ο χάρτης χρήσεων γης κατά Corine και στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ο τελικός χάρτης χρήσεων γης μετά την κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης του Corine στις κατηγορίες του μοντέλου SWAT.



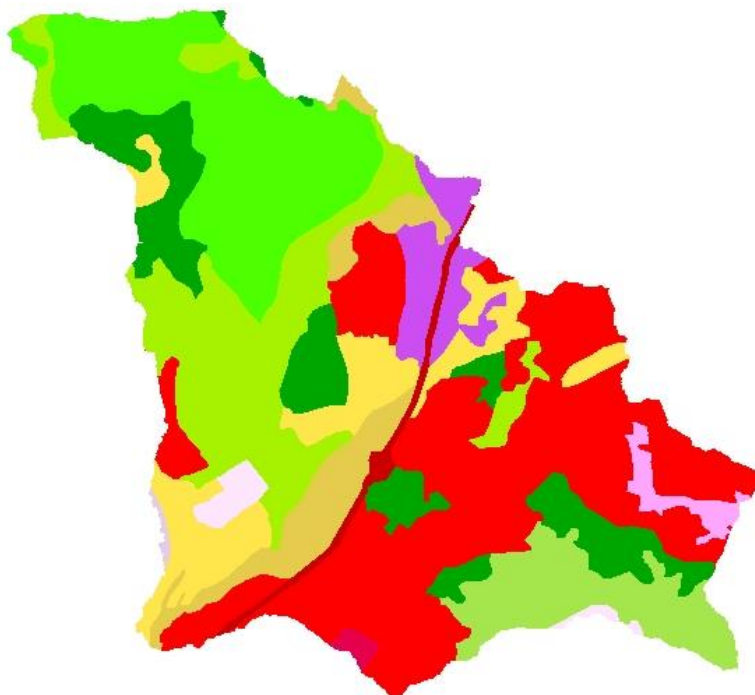
Εικόνα 17: Χρήσεις γης

Πίνακας 2: Αρχείο txt-Look Up Table

"Value",	"Landuse"
1,	URBN
2,	URBN
3,	URBN
4,	UTRN
5,	UTRN
6,	URBN
7,	URBN
8,	AGRL
9,	AGRL
10,	FRSD
11,	FRSE
12,	FRST
13,	RNGE
14,	RNGB

Υπόμνημα Κωδικός Corine 2018

- 111: Συνεχής αστικός ιστός
- 112: Ασυνεχής αστικός ιστός
- 121: Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες
- 122: Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφή γη
- 124: Αεροδρόμια
- 141: Πράσινες αστικές περιοχές
- 142: Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις
- 242: Πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας
- 243: Γη που καταλαμβάνεται κυρίως από τη γεωργία, με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
- 311: Πλατύφυλλο δάσος
- 312: Δάσος κωνοφόρων
- 313: Μικτό δάσος
- 323: Σκληρόφυλλη βλάστηση
- 324: Μεταβατικό δάσος- Θάμνος



0 0.75 1.5 3 Kilometers

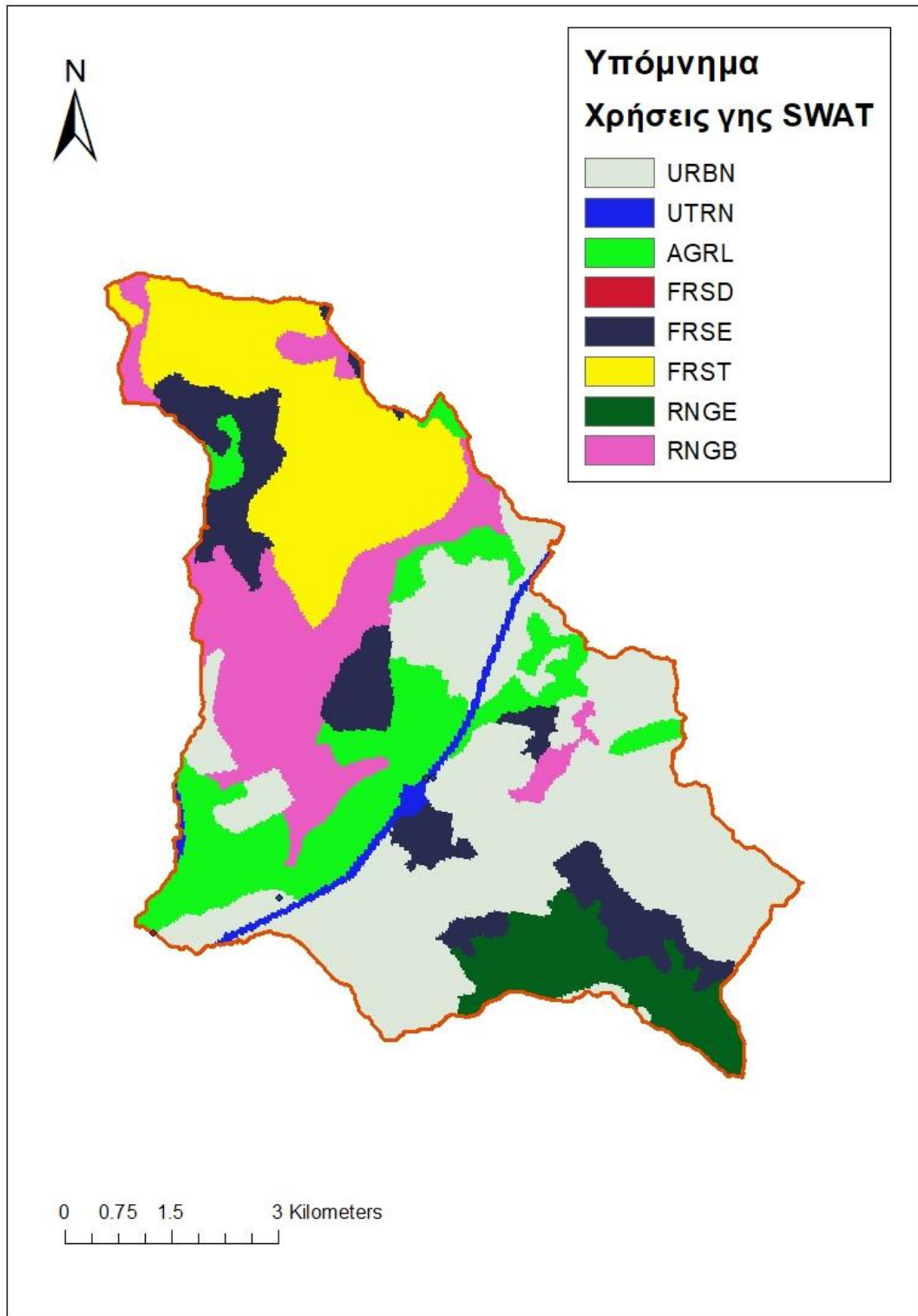
Εικόνα 18: Χάρτης χρήσεων γης CLC2018

Πίνακας 3: Μετατροπή χρήσεων γης CLC2018 σε χρήσεις γης του SWAT

Κατηγορίες κατά Corine	Κωδικός Corine 2018	Έκταση(km ²)	Έκταση-%	Χρήσεις γης SWAT
Συνεχής αστικός ιστός	111	0.23	0.39%	URBN
Ασυνεχής αστικός ιστός	112	17.18	29.20%	
Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	121	2.16	3.68%	
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφή γη	122	0.84	1.44%	UTRN
Αεροδρόμια	124	0.10	0.17%	
Πράσινες αστικές περιοχές	141	0.78	1.33%	URBN
Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις	142	0.71	1.20%	
Πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας	242	4.99	8.48%	AGRL
Γη που καταλαμβάνεται κυρίως από τη γεωργία, με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	243	3.22	5.47%	
Πλατύφυλλο δάσος	311	0.01	0.01%	FRSD
Δάσος κωνοφόρων	312	6.43	10.93%	FRSE
Μικτό δάσος	313	9.54	16.21%	FRST
Σκληρόφυλλη βλάστηση	323	3.96	6.74%	RNGE
Μεταβατικό δάσος-θάμνος	324	8.68	14.75%	RNGB

Πίνακας 4: Χρήσεις γης SWAT

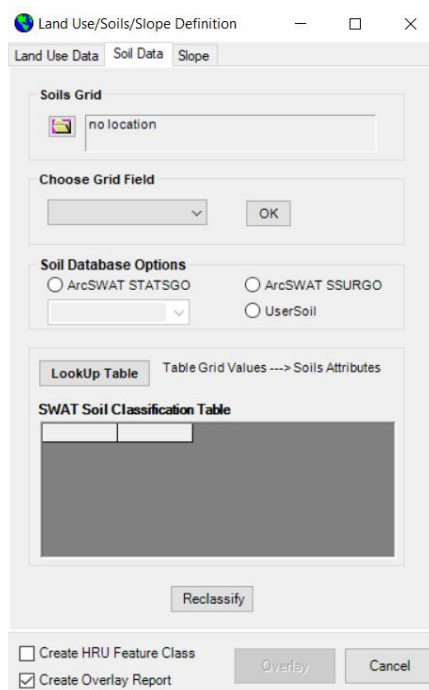
Χρήσεις γης SWAT	Χρήσεις γης	Έκταση %
URBN	Αστικός ιστός	35.8
UTRN	Μεταφορά	1.59
AGRL	Αγροτική γη	13.93
FRSD	Φυλλοβόλο δάσος	0.01
FRSE	Αειθαλές δάσος	10.97
FRST	Μικτό δάσος	16.23
RNGE	Βοσκότοποι	6.7
RNGB	Θάμνοι	14.77



Εικόνα 19: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης της λεκάνης απορροής στις χρήσεις γης του SWAT

Δεδομένα Εδάφους

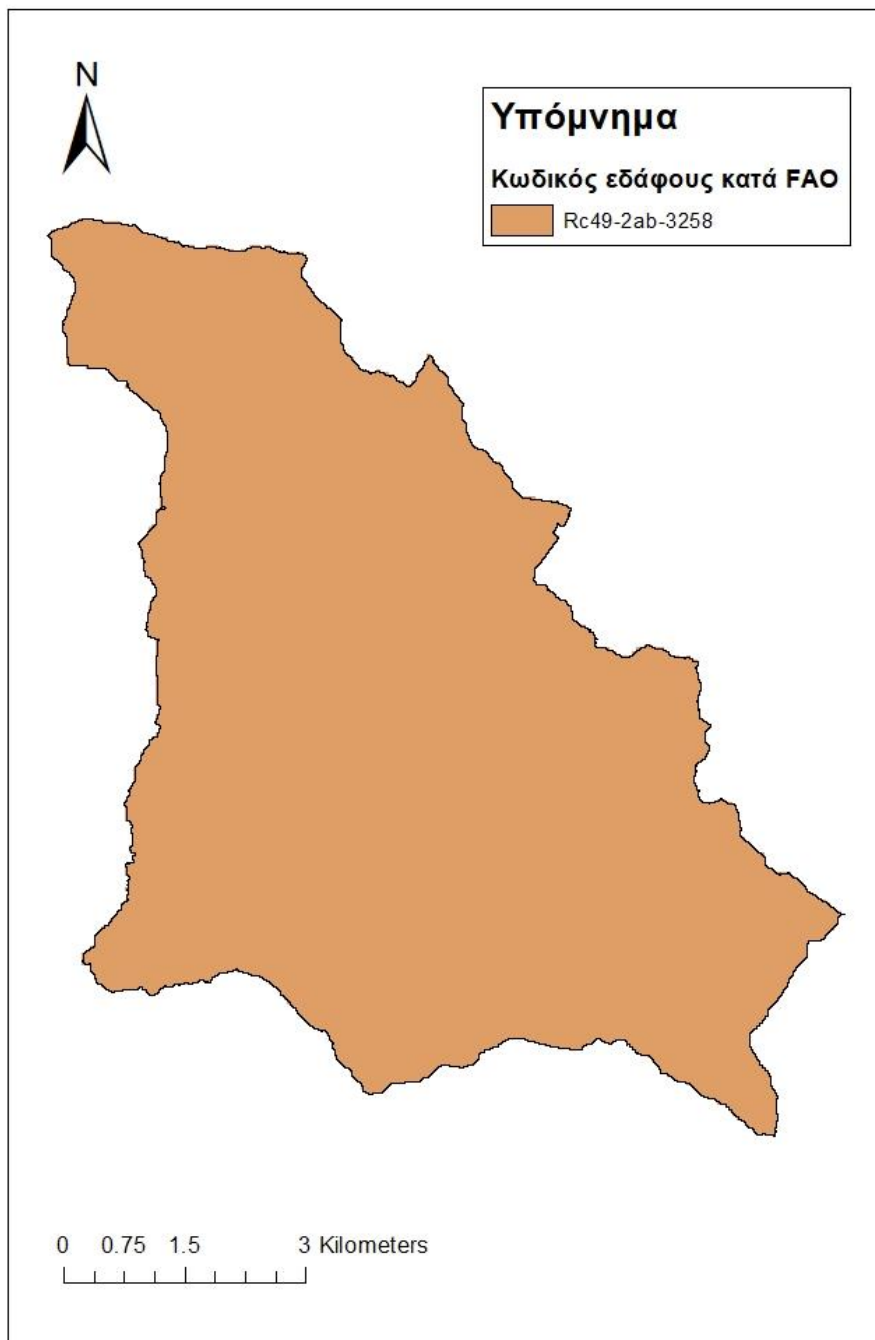
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο χάρτης των εδαφών λήφθηκε από την ιστοσελίδα του Food and Agriculture Organization of the United States, Digital Soil Map of the World (<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>) για όλο τον κόσμο. Συνεπώς ο εδαφικός χάρτης του FAO πρέπει να κοπεί σε ένα νέο GIS project με βάση το πολύγωνο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης. Αυτό έλαβε χώρα με την βοήθεια της εντολής clip και στη συνέχεια με την εντολή “raster to polygon” οι εδαφικοί τύποι μετατράπηκαν σε πολύγωνο με σκοπό να εισαχθούν στο λογισμικό SWAT. Όπως και με τις χρήσεις γης, έτσι και με τα δεδομένα εδάφους για περιοχές εκτός των ΗΠΑ πρέπει να γίνει μια διεργασία ώστε η βάση δεδομένων του SWAT να μπορεί να αντιστοιχίσει τα δεδομένα εισαγωγής της περιοχής μελέτης. Έτσι αντικαταστάθηκε η βάση δεδομένων του SWAT, που περιέχει δεδομένα εδάφους σύμφωνα με τα αμερικάνικα δεδομένα, με τα παγκόσμια δεδομένα εδάφους που περιέχει η βάση δεδομένων FAO Soil Database. Αυτό επιτεύχθηκε με τη βοήθεια των λογισμικών Map Window και MWSWAT 2012. Το MWSWAT 2012 διατίθεται ελεύθερα από την σελίδα του SWAT και αποτελεί ένα plugin του Map Window. Η επιλογή “Choose Grid Field” είναι “Values”. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα αρχείο txt (Πίνακας 5), όπου με την εισαγωγή του στην εντολή Look Up Table πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχιση των εδαφών. Ύστερα με την εντολή “Reclassify”, εμφανίστηκαν οι εδαφικοί τύποι της λεκάνης απορροής (Εικόνα 20). Στη συγκεκριμένη εργασία υπάρχει μόνο ένας τύπος εδαφικού σχηματισμού που καλύπτει το 100% της λεκάνης απορροής, όπως φαίνεται παρακάτω στον χάρτη που δημιουργήθηκε (Εικόνα 21). Ο κωδικός του εδαφικού σχηματισμού κατά FAO είναι ο Rc49-2ab-3258, όπου πρόκειται για τύπο αργιλοπηλώδους (clay loam) εδάφους και ανήκει στην υδρολογική κατηγορία D.



Εικόνα 20: Τύποι Εδαφών-Soil Data

Πίνακας 5: Αρχείο txt-Look up Table

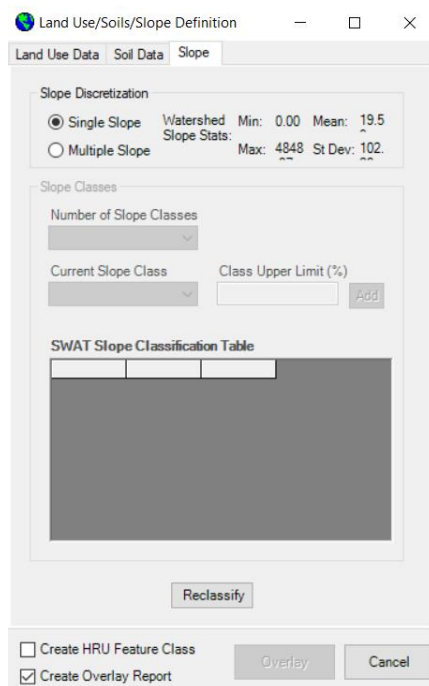
"Value",	"Name"
1,	Rc-2ab-3258



Εικόνα 21: Εδαφικοί τύποι λεκάνης απορροής

Κλίσεις εδάφους (Slope)

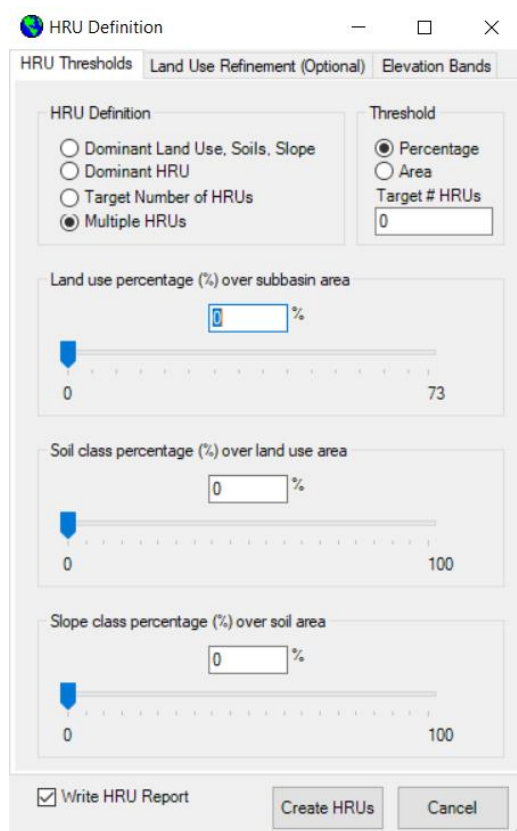
Για τις κλίσεις επιλέχθηκε η εντολή Multiple Slope (Εικόνα 22). Το μοντέλο δίνει την δυνατότητα επιλογής από μία μέχρι πέντε κλίσεις. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν 2 κλάσεις κλίσεων του εδάφους. Στην εντολή “Current Slope Class”, επιλέχθηκε η πρώτη κλίση και στην εντολή “Class Upper Limit (%)” επιλέχθηκε ως ανώτερο όριο κλίσης το 1%. Συνεπώς με την εντολή “Reclassify” δημιουργήθηκαν 2 κλίσεις, η πρώτη από 0-1 % και η δεύτερη από 1-9999 %, δηλαδή πάνω από 1%. Με την εντολή “Overlay” δημιουργούνται τελικά οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs).



Εικόνα 22: Κλίσεις εδάφους-Slope

3.5.4 Προσδιορισμός Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU Definition)

Με την εισαγωγή των δεδομένων χρήσεων γης, εδαφικών τύπων και κλίσεων στο λογισμικό SWAT, επιτεύχθηκε ο διαχωρισμός των υπολεκανών σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός των HRUs. Σε αυτό το βήμα ο χρήστης πρέπει να επιλέξει για κάθε υπολεκάνη, το ελάχιστο ποσοστό που επιθυμεί να καλύπτουν οι χρήσεις γης, οι εδαφικοί τύποι και οι κλίσεις, ώστε να δημιουργηθεί ένα HRU (Εικόνα 23). Όσον αφορά στις χρήσεις γης το ελάχιστο ποσοστό που επιλέχθηκε για τον ορισμό των HRU ήταν το 5%, για τα δεδομένα εδάφους 20% και για τις κλίσεις 20% επίσης. Τελικά, δημιουργήθηκαν 26 μονάδες υδρολογικής απόκρισης για την περιοχή μελέτης. Πολύ χρήσιμο εργαλείο αποτελεί το HRU Analysis reports που δημιουργεί το λογισμικό μετά τον διαχωρισμό των υπολεκανών σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης.



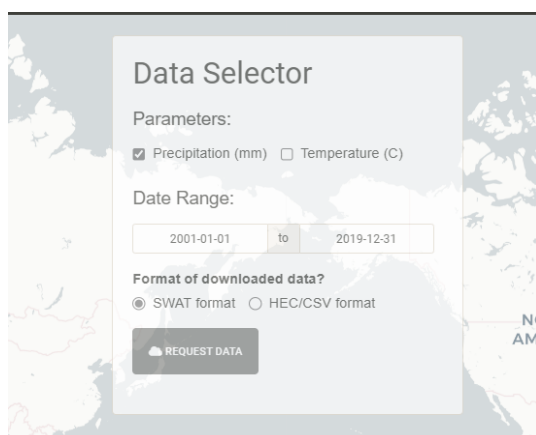
Εικόνα 23: Προσδιορισμός HRU

3.5.5 Εισαγωγή δεδομένων καιρού

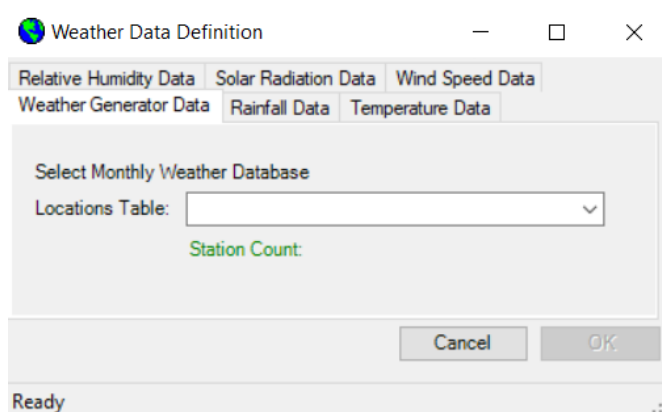
Τα τελευταία δεδομένα εισαγωγής ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη εργασία λήφθηκαν από την ιστοσελίδα του SWAT (<https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/>), όπου πρόκειται για μια ελεύθερη ιστοσελίδα του University of Guelph. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μια πλατφόρμα Data as a Service (DaaS) που ονομάζεται και World Weather for Water Data Service, που επιτρέπει στους χρήστες της εφαρμογής να κατεβάζουν μετεωρολογικά δεδομένα (βροχόπτωση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία) μιας προκαθορισμένης περιοχής εντός οποιαδήποτε λεκάνης απορροής στον κόσμο. Τα δεδομένα καιρού μπορούν να ληφθούν σε πολλές μορφές συμβατές με τα υδρολογικά μοντέλα όπως το SWAT αλλά και σε γενική μορφή CSV για άλλα υδρολογικά μοντέλα. Για να γίνει η αίτηση των δεδομένων καιρού, ο χρήστης πρέπει πρώτα να επιλέξει την γεωγραφική περιοχή που θέλει είτε φτιάχνοντας ένα πολύγωνο στο χάρτη με αυτή είτε ανεβάζοντας ένα συμπιεσμένο αρχείο shapfile με το πολύγωνο της περιοχής. Για την ολοκλήρωση της αίτησης πρέπει να δοθεί και το email του χρήστη, όπου έτσι δίνεται και η δυνατότητα επεξεργασίας και παρακολούθησης της αίτησης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, επιλέχθηκε το πολύγωνο της περιοχής μελέτης, τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασιών για μια σειρά 19 ετών και δίνεται η επιλογή του format των αρχείων ανάλογα με το υδρολογικό μοντέλο που δουλεύει ο χρήστης. Ένα πλεονέκτημα της ιστοσελίδας είναι, πως εκτός από τα δεδομένα καιρού που παρέχει από τους κοντινότερους σταθμούς, δημιουργεί τα αρχεία txt στο format που αναγνωρίζει το λογισμικό SWAT σε αρκετά σύντομο χρόνο (είτε κάποιων ωρών είτε ημερών). Πιο συγκεκριμένα δημιουργεί το απαραίτητο αρχείο της μορφής wgen. Το αρχείο wgen με τις βροχοπτώσεις (Εικόνα 26) περιέχει τα ονόματα των 6 σταθμών όπου λήφθηκαν οι βροχοπτώσεις, το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος

και τα υψόμετρα τους. Επίσης, περιέχει 6 διαφορετικά αρχεία με τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης για κάθε σταθμό μέτρησης από 01/01/2001 μέχρι 31/12/2019. Στην Εικόνα 27 απεικονίζεται ένα αρχείο txt ενός από τους 6 μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, ο οποίος περιέχει όλα τα δεδομένα με τις βροχοπτώσεις. Όσον αφορά στις θερμοκρασίες, λήφθηκε το αρχείο wgen, το οποίο περιέχει έναν μόνο σταθμό μέτρησης. Πιο συγκριμένα, το αρχείο wgen για τις θερμοκρασίες περιέχει το όνομα του σταθμού μέτρησης, το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο του σταθμού (Εικόνα 28). Επιπλέον περιέχεται και το αρχείο με τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες από τον έναν σταθμό μετρήσεων από 01/01/2001 μέχρι 31/12/2019 (Εικόνα 29). Με την εντολή “Write Input Tables” και συγκεκριμένα στο “Weather Stations” θα εισαχθούν τα αρχεία που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό SWAT (Εικόνα 25). Αφού επιλεγθεί στο “Weather Generator Data” το “WGEN user” επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή του αρχείου wgen των βροχοπτώσεων στο “Rainfall Data” και το αρχείο wgen των θερμοκρασιών στο “Temperature Data”. Μια σημαντική λεπτομέρεια προτού εισαχθούν τα wgen αρχεία στο λογισμικό SWAT είναι να φτιαχτεί πριν τα ονόματα των σταθμών μια στήλη με τα ID. Όλα τα αρχεία θα πρέπει να έχουν αποθηκευτεί στον ίδιο φάκελο ώστε τα αρχεία wgen να βρίσκουν μέσω των ονομάτων των σταθμών μέτρησης τα αντίστοιχα αρχεία του κάθε σταθμού μέτρησης που περιέχει τα δεδομένα των βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών. Όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, στην σχετική υγρασία και στην ταχύτητα του ανέμου, αυτά δημιουργούνται αυτόματα από το μοντέλο καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.



Εικόνα 24: Αίτηση για τα δεδομένα καιρού από την ιστοσελίδα W3S-Water



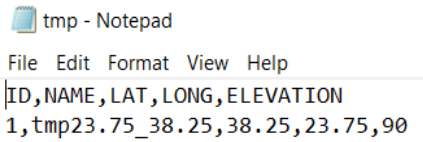
Εικόνα 25: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων


```
pcp - Notepad
File Edit Format View Help
ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION
1,pcp23.85_38.15,38.15,23.85,192
2,pcp23.85_38.05,38.05,23.85,175
3,pcp23.75_38.15,38.15,23.75,436
4,pcp23.75_38.05,38.05,23.75,69
5,pcp23.65_38.15,38.15,23.65,411
6,pcp23.65_38.05,38.05,23.65,67
```

Εικόνα 26: Αρχείο wgen με τους σταθμούς μέτρησης των βροχοπτώσεων

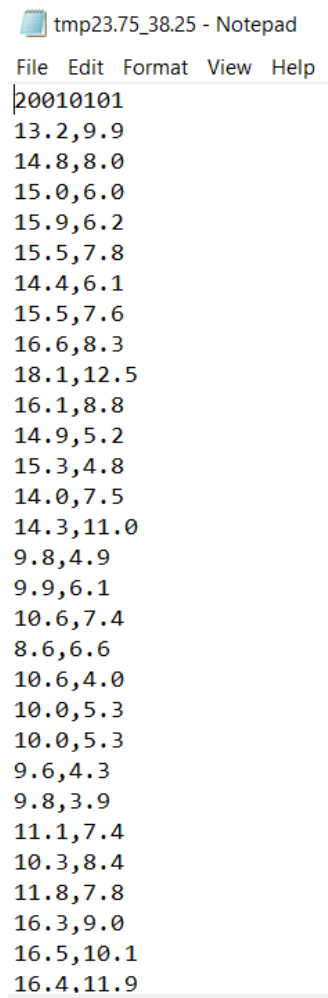
```
pcp23.65_38.05 - Notepad
File Edit Format View Help
|20010101
2.1
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.9
0.0
0.0
0.4
4.4
46.3
2.2
0.2
0.0
0.0
0.0
0.1
0.2
0.0
1.2
0.3
0.4
0.1
0.8
3.9
0.3
<
```

Εικόνα 27: Μορφή αρχείου txt που περιέχει τις βροχοπτώσεις ενός μετεωρολογικού σταθμού



```
tmp - Notepad
File Edit Format View Help
ID,NAME,LAT, LONG,ELEVATION
1,tmp23.75_38.25,38.25,23.75,90
```

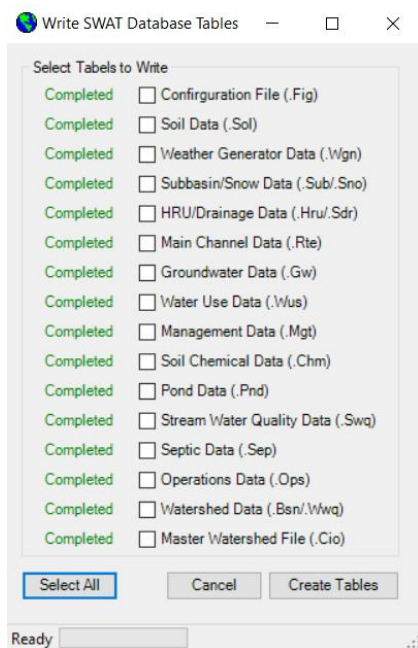
Εικόνα 28: Αρχείο txt με τον σταθμό μέτρησης των θερμοκρασιών



```
tmp23.75_38.25 - Notepad
File Edit Format View Help
20010101
13.2,9.9
14.8,8.0
15.0,6.0
15.9,6.2
15.5,7.8
14.4,6.1
15.5,7.6
16.6,8.3
18.1,12.5
16.1,8.8
14.9,5.2
15.3,4.8
14.0,7.5
14.3,11.0
9.8,4.9
9.9,6.1
10.6,7.4
8.6,6.6
10.6,4.0
10.0,5.3
10.0,5.3
9.6,4.3
9.8,3.9
11.1,7.4
10.3,8.4
11.8,7.8
16.3,9.0
16.5,10.1
16.4,11.9
```

Εικόνα 29: Μορφή αρχείου txt που περιέχει τις θερμοκρασίες ενός μετεωρολογικού σταθμού

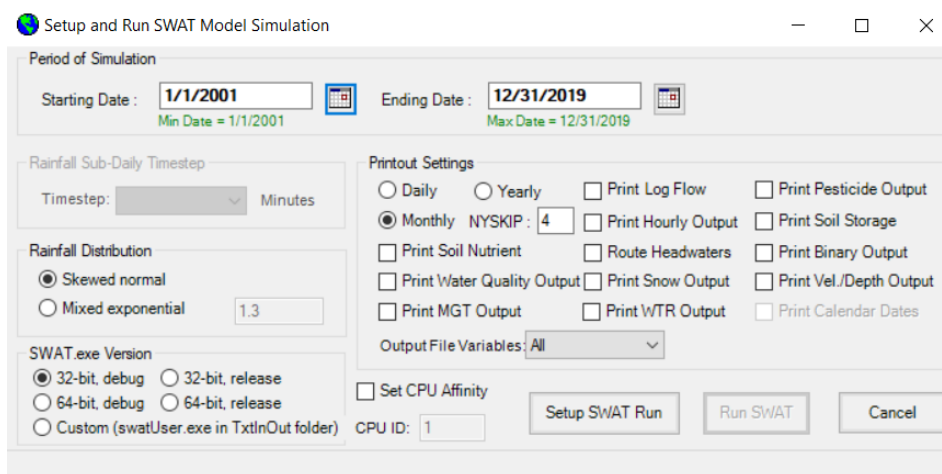
Έπειτα με την εντολή “Write SWAT Database Tables” δημιουργούνται πίνακες που περιέχουν όλα τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο (Εικόνα 30). Σε περίπτωση λάθους δίνεται η επιλογή “Edit SWAT Input” όπου επιτρέπει την αλλαγή κάποιου δεδομένου.



Εικόνα 30: Write SWAT Input tables

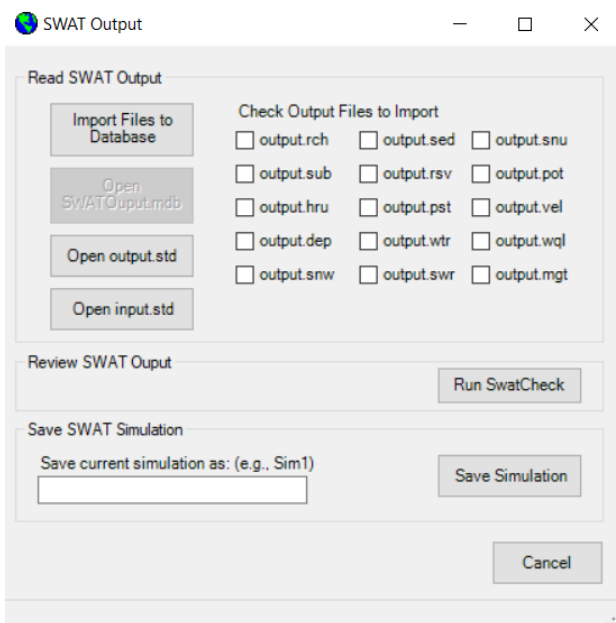
3.6 Προσομοίωση (SWAT Simulation)

Το τελευταίο στάδιο πριν λάβει χώρα η προσομοίωση με το λογισμικό SWAT είναι η επιλογή της χρονικής περιόδου της προσομοίωσης (Εικόνα 31). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα από την 01/01/2001 μέχρι και 31/12/2019 δηλαδή για 19 χρόνια με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Η επιλογή “NYSKIP”, η οποία αφορά στην περίοδο «προθέρμανσης» του μοντέλου (Warm up period) επιλέχθηκε να είναι 4 έτη. Η περίοδος προθέρμανσης του μοντέλου είναι σημαντική καθώς γίνονται οι αρχικοί υπολογισμοί του υδρολογικού κύκλου ή αποκατάσταση των μόνιμων συνθηκών.



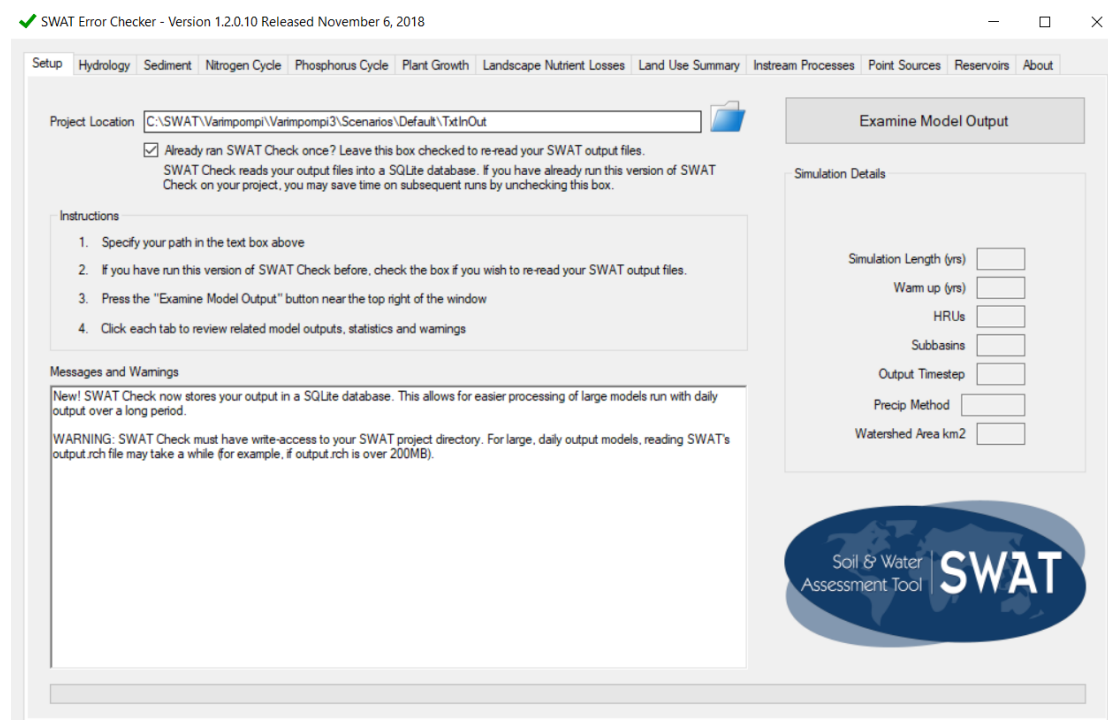
Εικόνα 31: Προσομοίωση μοντέλου SWAT

Μόλις πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, πατώντας το “Read SWAT Output” ο χρήστης μπορεί να δει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 32). Μάλιστα πατώντας το “Save Simulation” η προσομοίωση μπορεί να αποθηκευτεί στο φάκελο εργασίας.



Εικόνα 32: Αποτελέσματα μοντέλου SWAT

Τέλος, με την εντολή “Run SWAT Check” το μοντέλο ελέγχει αν η προσομοίωση έγινε σωστά και δίνει κάποιες λεπτομέρειες της προσομοίωσης (Εικόνα 33).



Εικόνα 33: Έλεγχος μοντέλου SWAT

3.7 Αρχεία αποτελεσμάτων SWAT

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32, το μοντέλο SWAT παράγει πολλά αρχεία αποτελεσμάτων, εκ των οποίων ο χρήστης είτε μπορεί να διαλέξει και να εισάγει (Import Files to Database) στη βάση δεδομένων το συγκεκριμένο αρχείο είτε να αποθηκεύσει όλο το project που δημιούργησε. Τα σημαντικότερα αρχεία αποτελεσμάτων που θα χρειαστούν ώστε να αξιολογηθεί και η συγκεκριμένη εργασία είναι τα εξής:

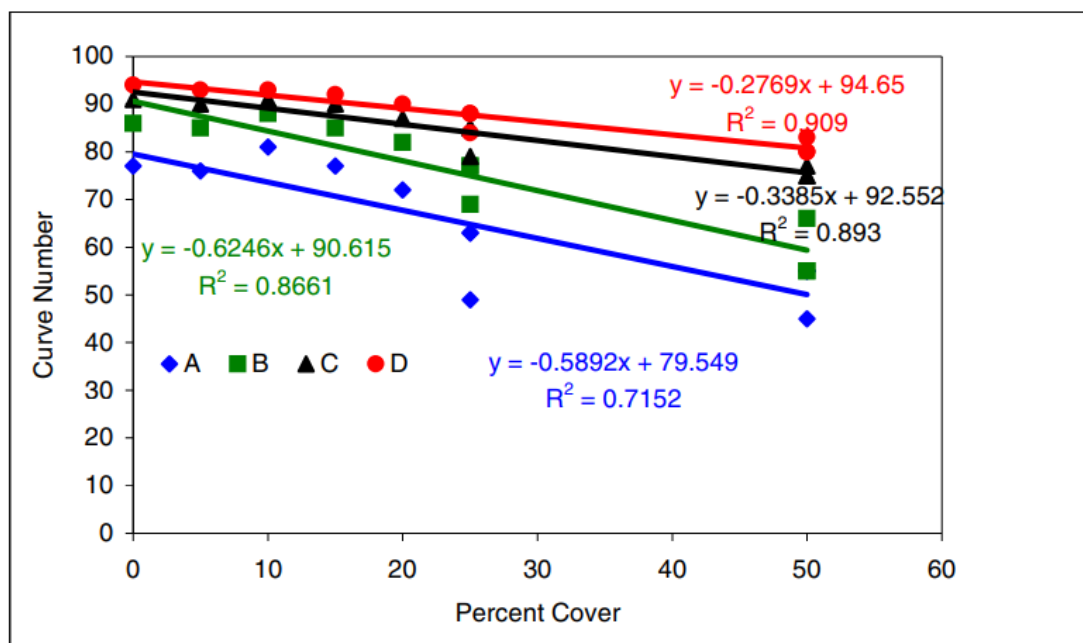
- Αρχείο output.std: Αυτό το αρχείο περιέχει πληροφορίες σχετικά με την προσομοίωση στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Αυτές οι πληροφορίες αφορούν το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής, τα φερτά υλικά και τα θρεπτικά στοιχεία (άζωτο, φωσφόρος). Επίσης, με βάση αυτό το αρχείο πραγματοποιείται ένας πρώτος έλεγχος των αποτελεσμάτων.
- Αρχείο output.rch: Αυτό το αρχείο περιέχει πληροφορίες για το υδατικό ισοζύγιο των υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής. Πιο συγκεκριμένα περιέχει τις παροχές στην είσοδο και στην έξοδο κάθε υδατορεύματος, τα ιζήματα που εισέρχονται και εξέρχονται στα υδατορεύματα καθώς και το άζωτο, τον φωσφόρο και τα παρασιτοκτόνα. Είναι πολύ χρήσιμο αρχείο καθώς μέσω αυτού θα γίνουν τα τελικά υδρογραφήματα της λεκάνης απορροής.
- Αρχείο output.sub: Αυτό το αρχείο περιέχει πληροφορίες για κάθε μια από τις υπολεκάνες της λεκάνης απορροής. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται η συνεισφορά κάθε υπολεκάνης στο υδατικό ισοζύγιο του εκάστοτε υδατορεύματος. Η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή, τα υπόγεια νερά και τα ιζήματα είναι οι πιο χρήσιμοι παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου που περιέχονται σε αυτό το αρχείο.
- Αρχείο output.hru: Αυτό το αρχείο περιέχει πληροφορίες για κάθε μια από τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής. Ο χρήστης κατανοεί καλύτερα τον ρόλο που παίζουν οι χρήσεις γης και οι τύποι εδάφους στον καθορισμό των HRUs και έπειτα στα αποτελέσματα.

Όλα τα αρχεία εξόδου είναι γραμμένα σε μορφή txt αρχείου και υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς τους σε υπολογιστικό φύλλο excel.

3.8 Αλλαγή στον Αριθμό Καμπύλης CN μετά την δασική πυρκαγιά

Οι δασικές πυρκαγιές εκτός του ότι καταστρέφουν την βλάστηση και μετατρέπουν τις χρήσεις γης σε γυμνό έδαφος δημιουργούν και σοβαρό πρόβλημα στον υδρολογικό κύκλο του νερού, καθώς η βλάστηση δεν μπορεί πια να συγκρατήσει το νερό. Η παράμετρος του μοντέλου SWAT που συνδέεται με τις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής είναι ο αριθμός καμπύλης CN. Συνεπώς, μετά την δασική πυρκαγιά, ο αριθμός καμπύλης CN πρέπει να επαναπροσδιοριστεί.

Υπάρχουν δυο μέθοδοι που καθορίζουν την τιμή του αριθμού CN μετά την δασική πυρκαγιά. Η πρώτη μέθοδος είναι βασισμένη στην εμπειρία των επιστημόνων, όπου επιλέγουν τιμή χωρίς να έχουν αξιολογήσει τα αποτελέσματα της πυρκαγιάς και η δεύτερη είναι αυτή των Goodrich et al. (2005). Επιλέχθηκε η μέθοδος των Goodrich et al. (2005). Η συγκεκριμένη μέθοδος συνδέει τον αριθμό καμπύλης CN με το ποσοστό της χρήσης γης που δεν κάηκε. Πιο αναλυτικά ο αριθμός καμπύλης CN ανάλογα με την υδρολογική κατηγορία του εδάφους (A, B, C, D) και το ποσοστό της χρήσης γης που δεν κάηκε, μέσω των εξισώσεων που φαίνονται στην Εικόνα 34, εκτιμά τον αριθμό καμπύλης CN μετά την δασική πυρκαγιά.

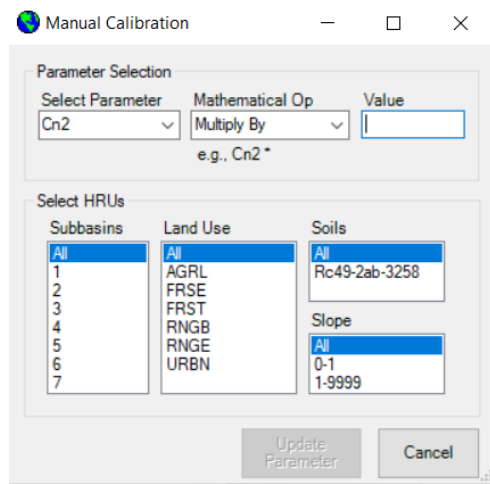


Εικόνα 34: Διάγραμμα εύρεσης αριθμού καμπύλης CN (πηγή: Goodrich et al. 2005)

Ο αριθμός καμπύλης CN πριν την πυρκαγιά είχε την τιμή 83.13 και το ποσοστό της λεκάνης που δεν κάηκε είναι 54%. Όπως έχει αναφερθεί και σε παραπάνω κεφάλαιο, η υδρολογική κατηγορία του εδάφους είναι η D άρα η εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί είναι η:

$$y = -0.2769x + 94.65 \text{ για } x = 0.54 \quad (3.13)$$

Συνεπώς, η νέα τιμή του αριθμού καμπύλης CN μετά την πυρκαγιά είναι 94.5. Άρα πρόκειται για μια αύξηση 14%. Στη γραμμή εργαλείων του SWAT στην ενότητα “SWAT Simulation” με την εντολή “Manual Calibration Helper” ο χρήστης επαναπροσδιορίζει την τιμή του CN με την εντολή “Multiply By” και στην τιμή “Value” εισάγει το 1.14 (Εικόνα 35). Η προσομοίωση πρέπει να ξανά τρέξει με την νέα τιμή του CN.



Εικόνα 35: Αλλαγή τιμής CN

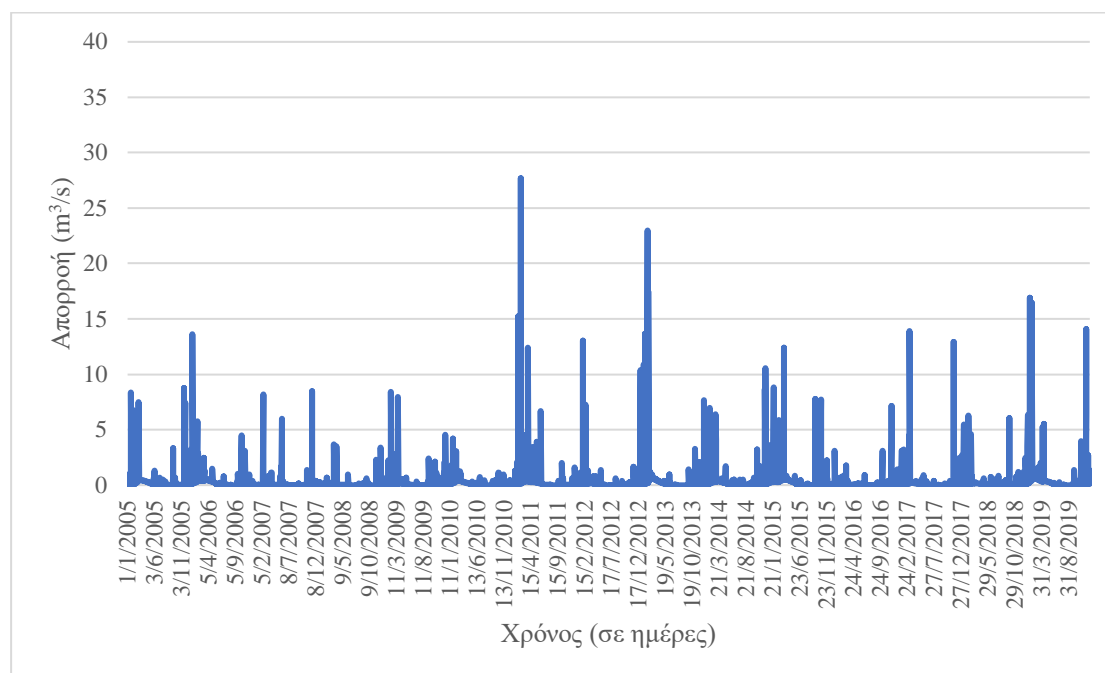
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Υπάρχουσα κατάσταση

Τελικό βήμα είναι η δημιουργία των υδρογραφημάτων της προσομοίωσης για την αρχική κατάσταση (πριν τη πυρκαγιά) στην έξοδο της λεκάνης απορροής για ημερήσια και μηνιαία δεδομένα με το λογισμικό Microsoft Excel. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε από την 01/01/2001 μέχρι και 31/12/2019 δηλαδή για 19 χρόνια, με περίοδο προθέρμανσης του μοντέλου τα πρώτα 4 χρόνια. Επομένως, τα υδρογραφήματα της υπάρχουσας κατάστασης δημιουργήθηκαν για την περίοδο από την 01/01/2005 έως και την 31/12/2019.

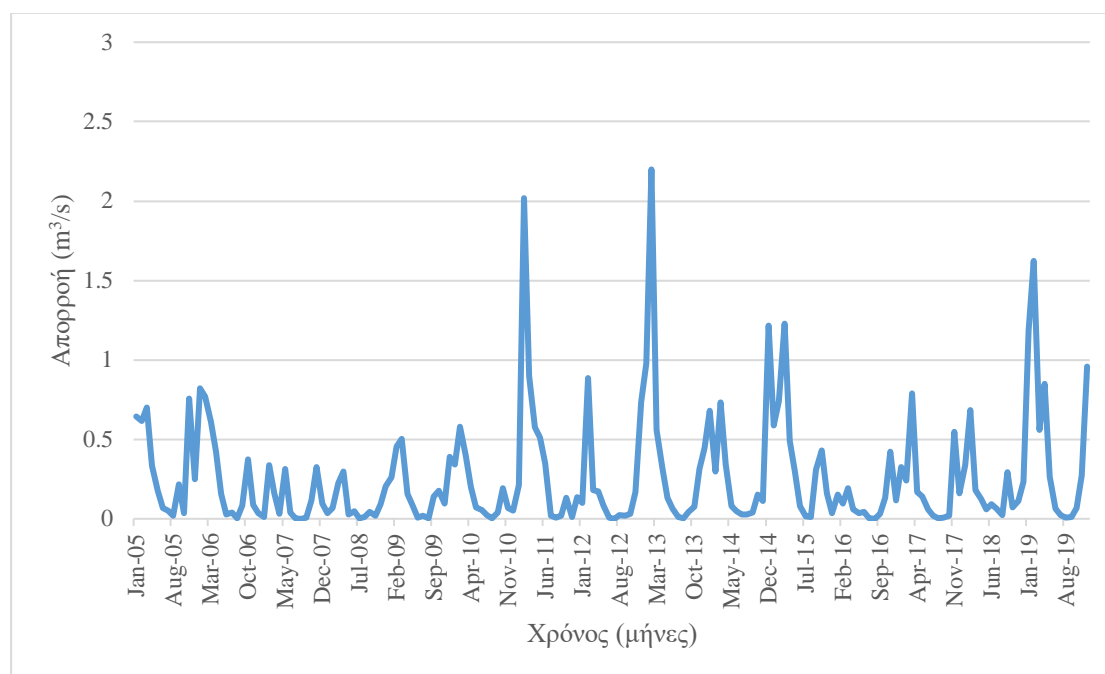
Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης το λογισμικό SWAT δημιούργησε αρκετά αρχεία αποτελεσμάτων εκ των οποίων, για την δημιουργία των υδρογραφημάτων, χρησιμοποιήθηκαν το output.rch και το output.sub. Τα αποτελέσματα είναι σε αρχεία μορφής .txt, τα οποία μεταφέρθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο excel για την οπτικοποίηση. Το αρχείο output.rch περιείχε τις παροχές στην είσοδο και στην έξοδο όλων των υδατορευμάτων και με χρήση κατάλληλου φίλτρου απομονώθηκε η απορροή στην έξοδο του υδατορεύματος 7, όπου βρίσκεται η έξοδος της λεκάνης απορροής.

Το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής της υπάρχουσας κατάστασης με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 36. Η μέγιστη απορροή στην έξοδο της λεκάνης για την περίοδο προσομοίωσης είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 27.69 m³/s. Η δεύτερη μεγαλύτερη απορροή της προσομοίωσης είναι στις 7/2/2013 και ισούται με 22.98 m³/s. Επίσης, μεγάλη απορροή παρατηρείται στις 25/1/2019 με τιμή 16.91 m³/s και στις 5/2/2019 με τιμή 16.45 m³/s.



Εικόνα 36: Υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

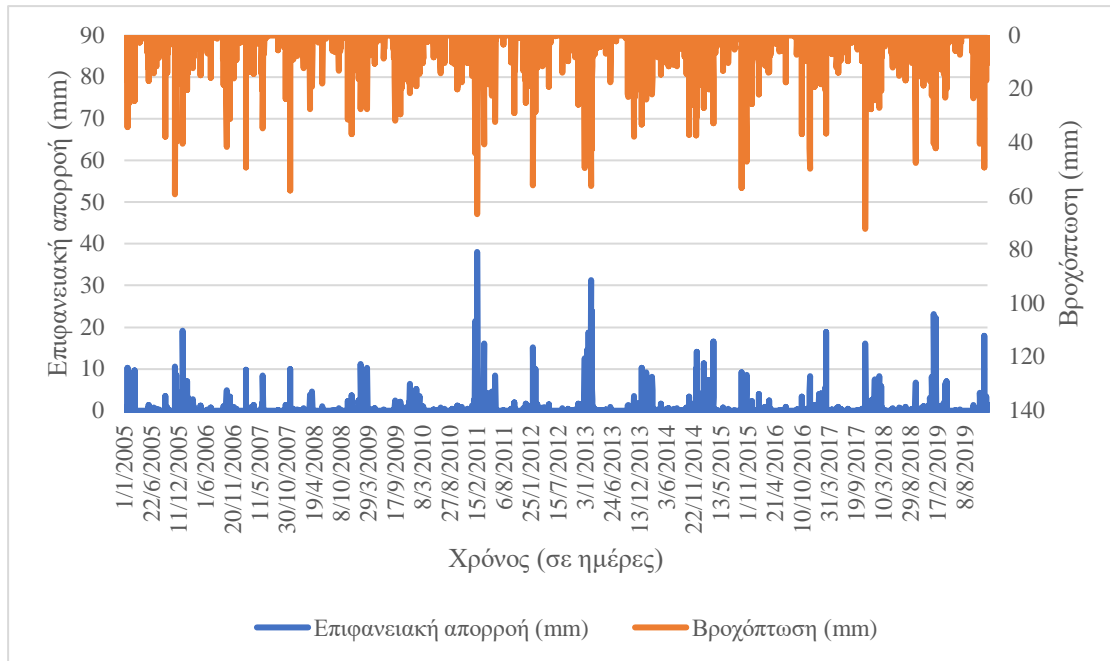
Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη απορροή λαμβάνει χώρα τον Φεβρουάριο του 2013 και ισούται περίπου με $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Η δεύτερη μεγαλύτερη απορροή είναι τον Φεβρουάριο του 2011 και ισούται περίπου με $2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ και έπεται ο Φεβρουάριος του 2019 με απορροή $1.63 \text{ m}^3/\text{s}$.



Εικόνα 37: Υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

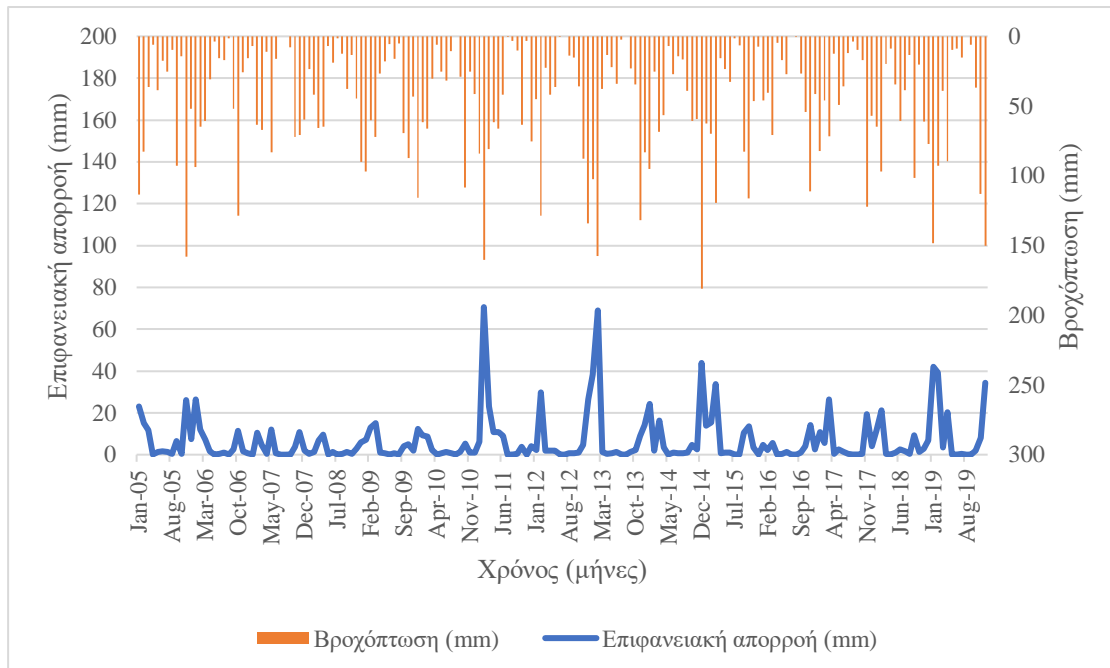
Στην συνέχεια από το αρχείο output.sub δημιουργήθηκαν υδρογραφήματα για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά τόσο για ημερησία όσο για μηνιαία δεδομένα. Τα υδρογραφήματα των υπολεκανών είναι συναρτήσεις της επιφανειακής απορροής με τον χρόνο, όπου θα αναδειχθεί καλύτερα ποια υπολεκάνη κινδυνεύει περισσότερο από κάποια πιθανή πλημμύρα.

Στην Εικόνα 38 παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 είναι στις 18/2/11 και ισούται με 38.1 mm ενώ η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.6 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή είναι στις 7/2/13 και ισούται με 31.3 mm και το ύψος της βροχόπτωσης ισούται με 56.3 mm. Στις 25/1/2019 η επιφανειακή απορροή ισούται με 23.1 mm ενώ η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 40.4 mm. Η μεγαλύτερη βροχόπτωση έλαβε χώρα στις 16/11/2017 και ισούται με 72.3 mm ενώ η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 16.1 mm. Μεγάλο ύψος βροχής παρατηρείται και στις 17/2/2005 με τιμή 59.2 mm ενώ η επιφανειακή απορροή ισούται με 19.2 mm.



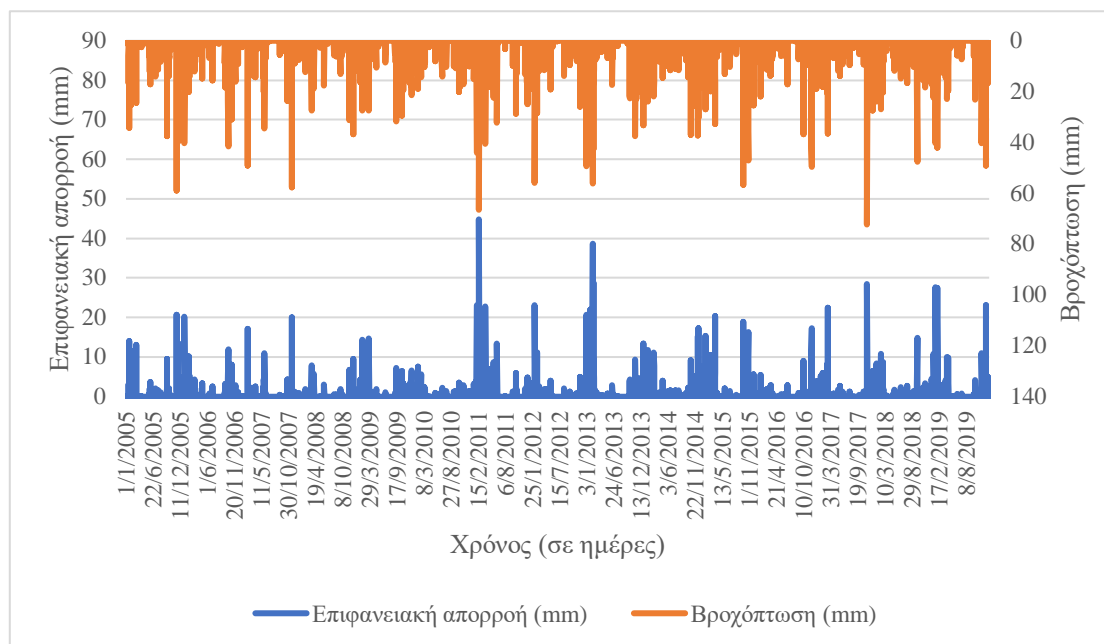
Εικόνα 38: Υδρογράφημα υπολεκάνης 1 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 39, φαίνεται ότι ο μήνας με την μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 είναι ο Φεβρουάριος του 2011, όπου αγγίζει τα 70.54 mm και το ύψος βροχόπτωσης είναι 160.36 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή ισούται με 68.95 mm και η βροχόπτωση με 157.57 mm. Η μεγαλύτερη βροχόπτωση, η οποία ισούται με 180.92 mm είναι τον Δεκέμβριο του 2014 ενώ η τιμή της επιφανειακής απορροής φτάνει τα 43.75 mm. Τον Ιανουάριο του 2019 η επιφανειακή απορροή ισούται με 42.06 mm και η βροχόπτωση με 148.58 mm.



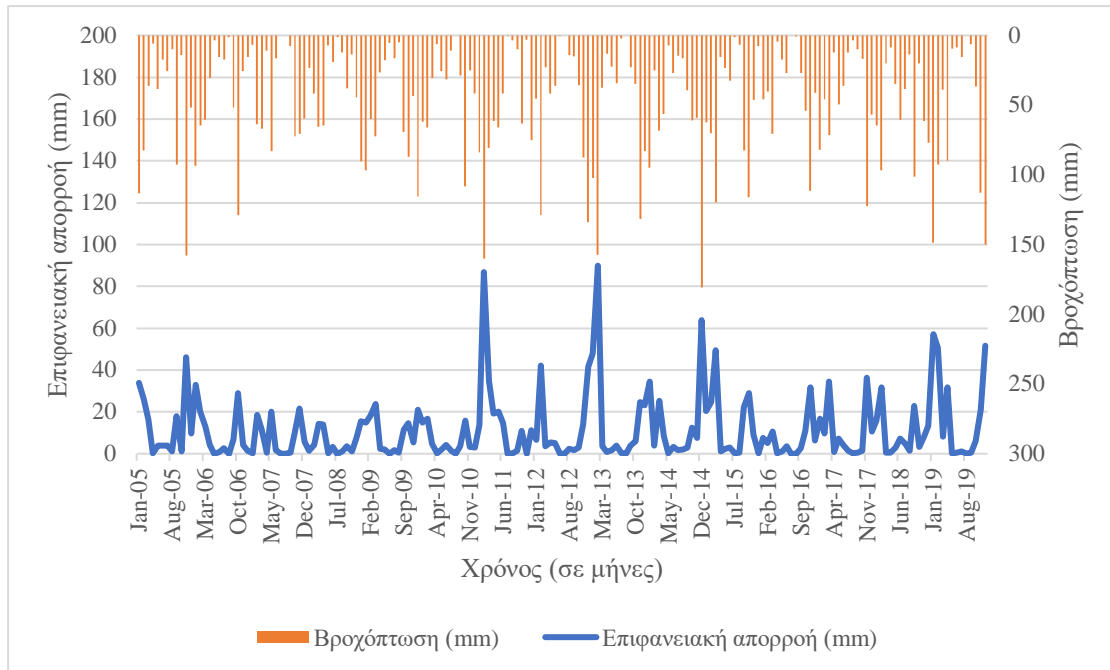
Εικόνα 39: Υδρογράφημα υπολεκάνης 1 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 40, η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 ισούται με 44.8 mm στις 18/2/2011 και το ύψος βροχόπτωσης ισούται με 66.5 m. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή ισούται με 38.6 mm στις 7/2/2013 και η τιμή της βροχόπτωσης ισούται με 56.2 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται στις 16/11/2017 με τιμή 28.5 mm και ύψος βροχόπτωσης 72.3 mm. Παρατηρείται αύξηση της μέγιστης επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 2 σε σχέση με την υπολεκάνη 1.



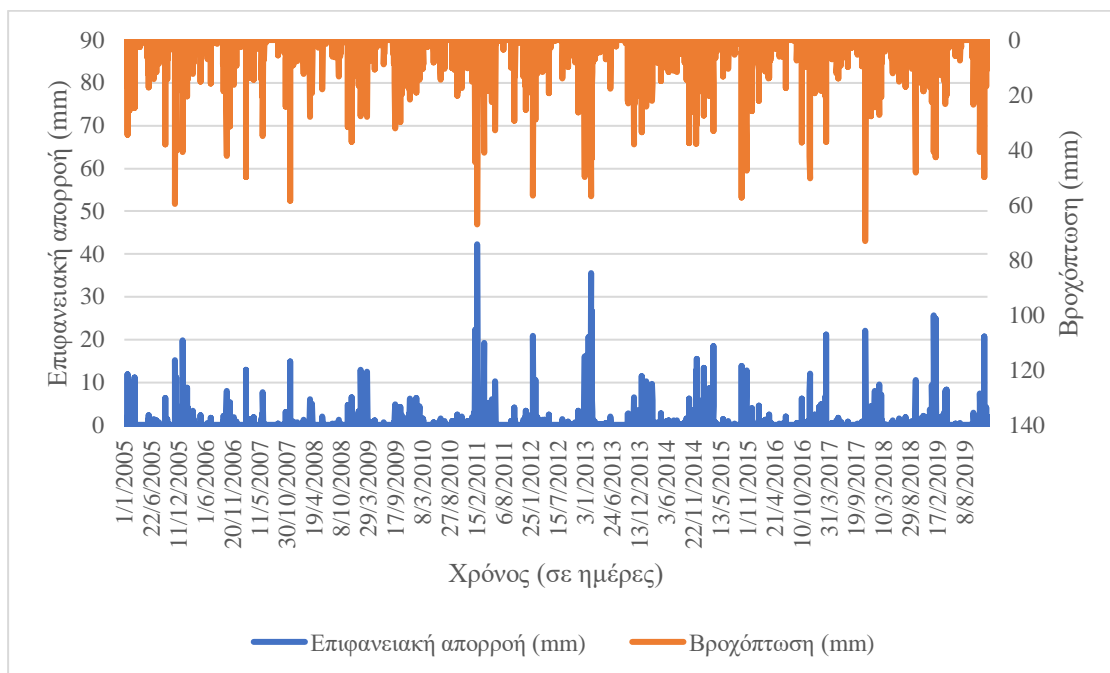
Εικόνα 40: Υδρογράφημα υπολεκάνης 2 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 41, η μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 είναι τον Φεβρουάριο του 2013 που ισούται με 89.9 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 157.45 mm. Η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή είναι τον Φεβρουάριο του 2011 που ισούται με 86.82 mm και το ύψος βροχόπτωσης με 160.24 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 63.85 mm και η βροχόπτωση αυτόν τον μήνα ισούται με 180.78 mm. Μεγάλο ύψος βροχόπτωσης παρατηρείται τον Νοέμβριο του 2005 με τιμή 157.94 mm και τιμή επιφανειακής απορροής 46.24 mm.



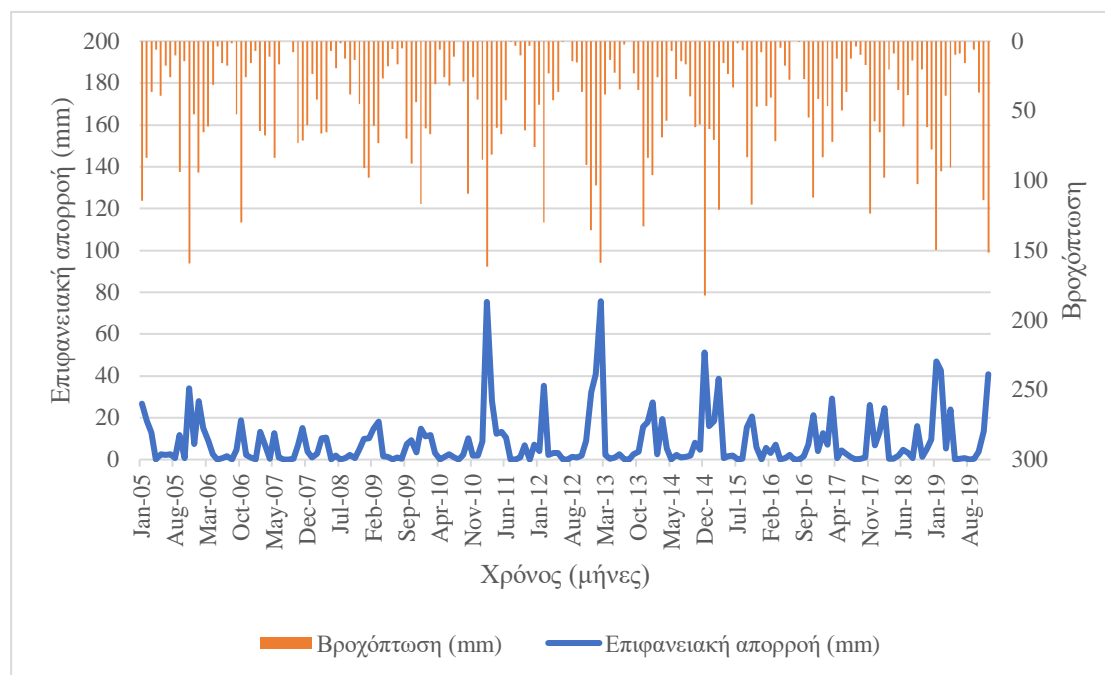
Εικόνα 41: Υδρογράφημα υπολεκάνης 2 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 42, διακρίνεται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 3 είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 42.2 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 67.1 mm. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή είναι 35.5 mm και η αντίστοιχη βροχόπτωση είναι 56.8 mm. Στις 25/1/2019 η τιμή της επιφανειακής απορροής ισούται με 27.5 mm και η τιμή της βροχόπτωσης με 40.8 mm. Στις 16/11/2017 η βροχόπτωση έχει τιμή 73.0 mm και η επιφανειακή απορροή ισούται με 22.1 mm. Η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 3 είναι μικρότερη από αυτή της υπολεκάνης 2 και μεγαλύτερη από αυτή της υπολεκάνης 1.



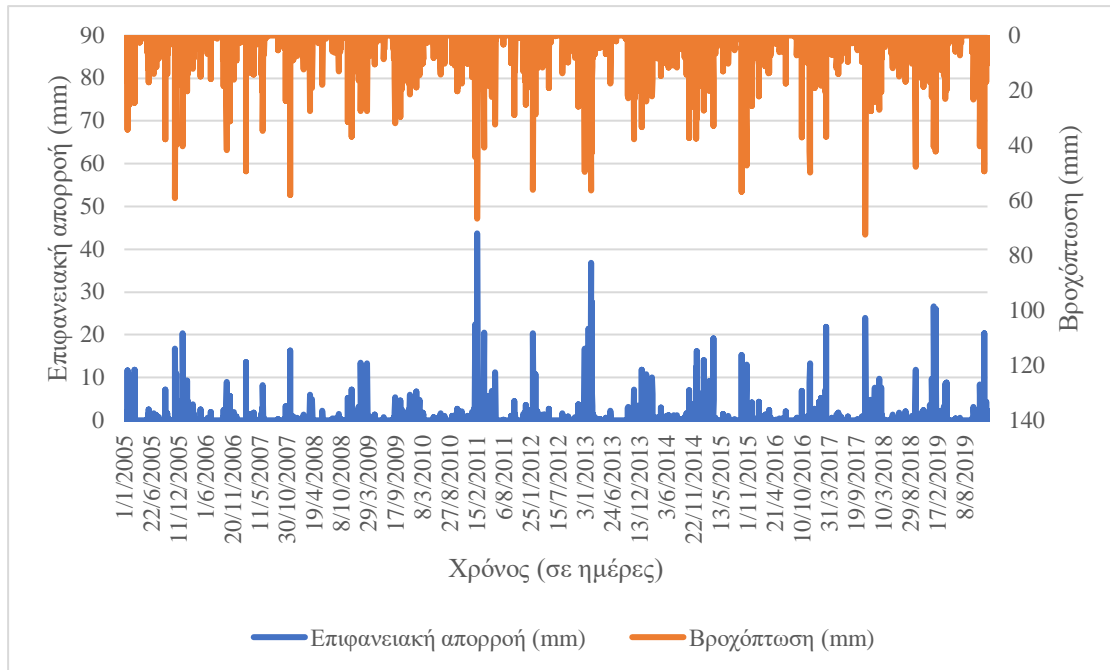
Εικόνα 42: Υδρογράφημα υπολεκάνης 3 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται το υδρογράφημα της υπολεκάνης 3 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Η μέγιστη μηνιαία επιφανειακή απορροή είναι τον Φεβρουάριο του 2013 και ισούται με 75.68 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 158.89 mm. Ο Φεβρουάριος του 2011 έχει τιμή επιφανειακής απορροής 75.40 mm και τιμή της βροχόπτωσης είναι 161.71 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή ισούται με 51.14 και η βροχόπτωση με 182.44 mm.



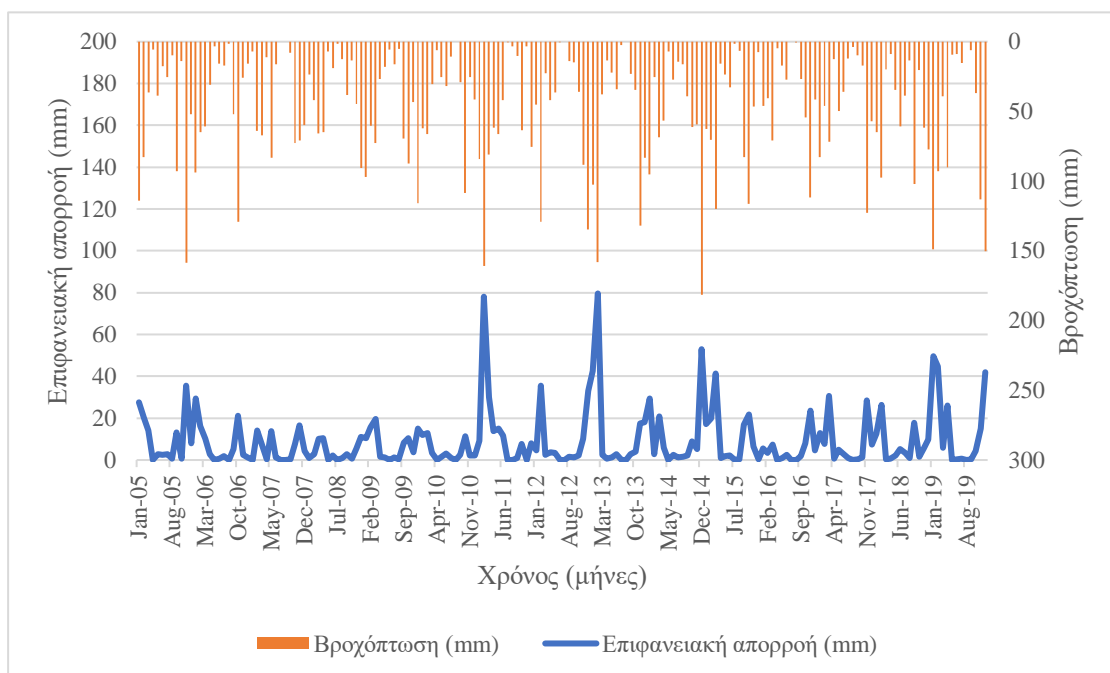
Εικόνα 43: Υδρογράφημα υπολεκάνης 3 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Όσον αφορά στην υπολεκάνη 4 (Εικόνα 44), η μέγιστη επιφανειακή απορροή της είναι στις 18/2/2011 με τιμή 43.7 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.7 mm. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή ισούται με 36.9 mm και η βροχόπτωση με 56.4 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή 26.6 mm παρατηρείται και στις 25/1/2019 με τιμή βροχόπτωσης 40.5 mm. Στις 16/11/2017 η βροχόπτωση έχει τιμή 72.5 mm και η επιφανειακή απορροή 24.0 mm. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 4 είναι μικρότερη από αυτή της υπολεκάνης 2 και μεγαλύτερη από αυτές των υπολεκανών 1 και 3.



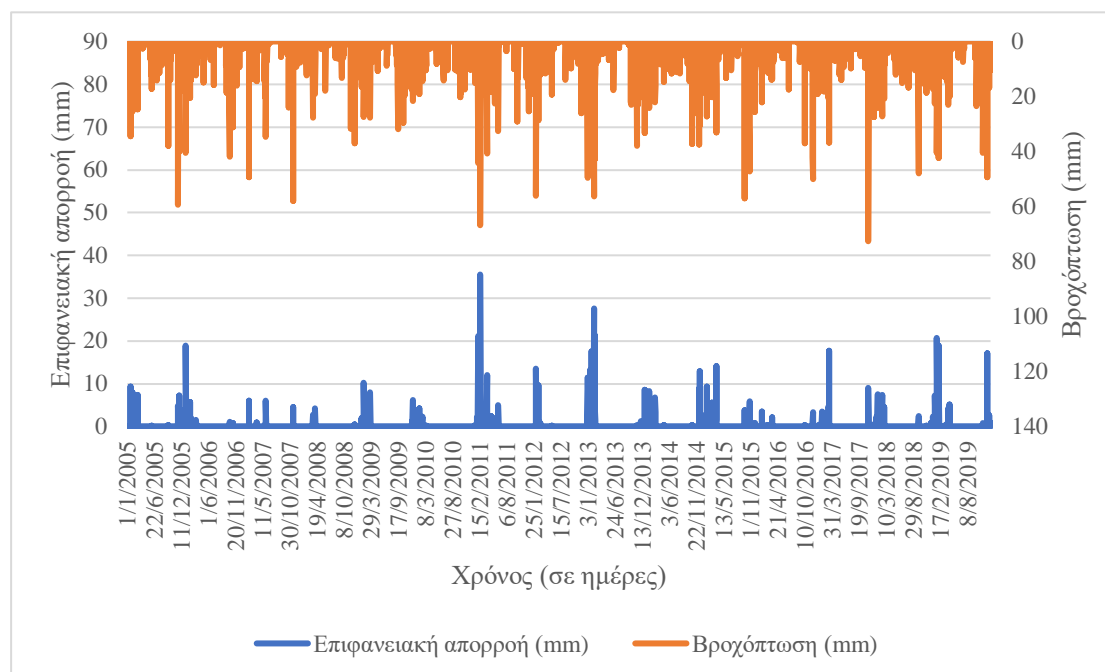
Εικόνα 44: Υδρογράφημα υπολεκάνης 4 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 45, παρατηρείται ότι ο μήνας με την μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 4 είναι ο Φεβρουάριος του 2013 με τιμή 79.63 mm και βροχόπτωση 158.00 mm. Την δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή έχει ο Φεβρουάριος του 2011 με τιμή 78.03 mm και τιμή βροχόπτωσης 160.80 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή ισούται με 53.07 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 181.42 mm.



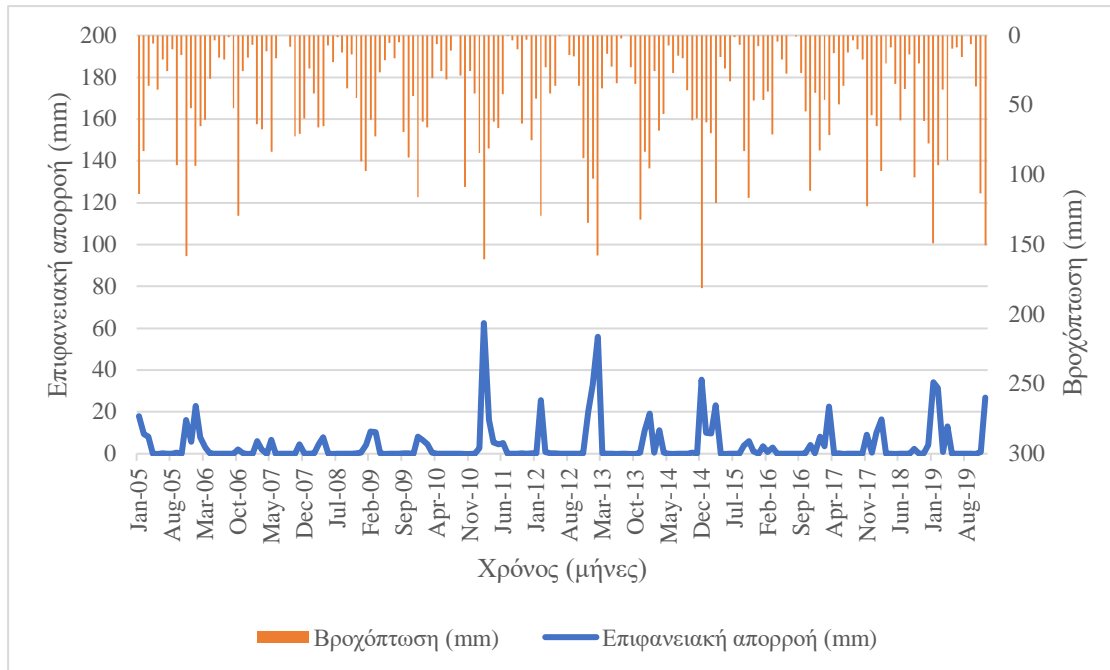
Εικόνα 45: Υδρογράφημα υπολεκάνης 4 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην υπολεκάνη 5 (Εικόνα 46), η μέγιστη επιφανειακή απορροή είναι 35.6 mm στις 18/2/2011 και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.7 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή είναι στις 7/2/2013 και ισούται με 27.6 mm ενώ η τιμή της βροχόπτωσης είναι 56.4 mm. Επίσης, στις 25/1/2019 η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 20.8 mm και ύψος βροχόπτωσης 40.5 mm. Μεγάλη τιμή βροχόπτωσης παρατηρείται στις 16/11/2017, η οποία ισούται με 72.5 mm ενώ η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 9.03 mm. Η υπολεκάνη 5 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή μέγιστης επιφανειακής απορροής από τις προηγούμενες τέσσερις υπολεκάνες.



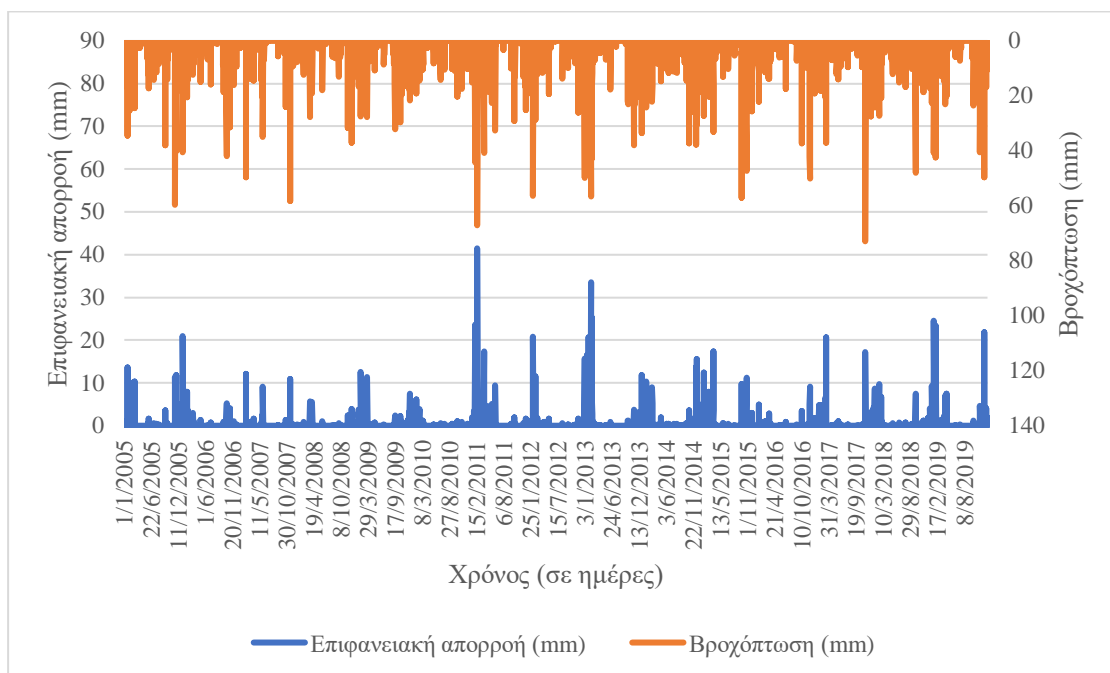
Εικόνα 46: Υδρογράφημα υπολεκάνης 5 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Όπως προκύπτει από το υδρογράφημα της Εικόνας 47, ο μήνας με την μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 5, η οποία ισούται με 62.47 mm είναι ο Φεβρουάριος του 2011 και η τιμή της βροχόπτωσης ισούται με 160.72 mm. Ο Φεβρουάριος του 2013 έχει τιμή επιφανειακής απορροής 55.79 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 157.96 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η τιμή της επιφανειακής απορροής είναι 35.39 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 181.37 mm.



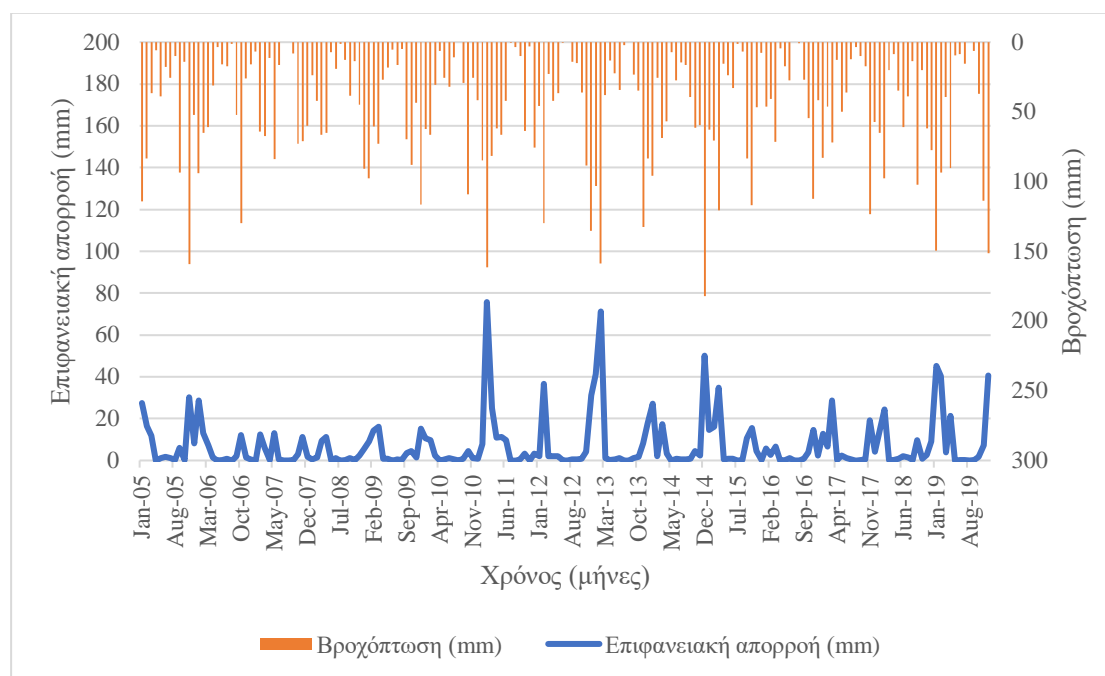
Εικόνα 47: Υδρογράφημα υπολεκάνης 5 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 48 απεικονίζεται το υδρογράφημα της υπολεκάνης 6 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 στις 18/2/2011 είναι 41.4 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 67.00 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή είναι στις 7/2/2013 και ισούται με 33.5 mm ενώ η τιμή της βροχόπτωσης είναι 56.7 mm. Στις 25/1/2019 η επιφανειακή απορροή είναι 24.5 mm και η βροχόπτωση 40.7 mm. Μεγάλη βροχόπτωση ύψους 72.9 mm παρατηρείται στις 16/11/2017 με τιμή επιφανειακής απορροής 17.2 mm. Η υπολεκάνη 6 έχει μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή σε σχέση με την υπολεκάνη 1 και 5 και μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες υπολεκάνες.



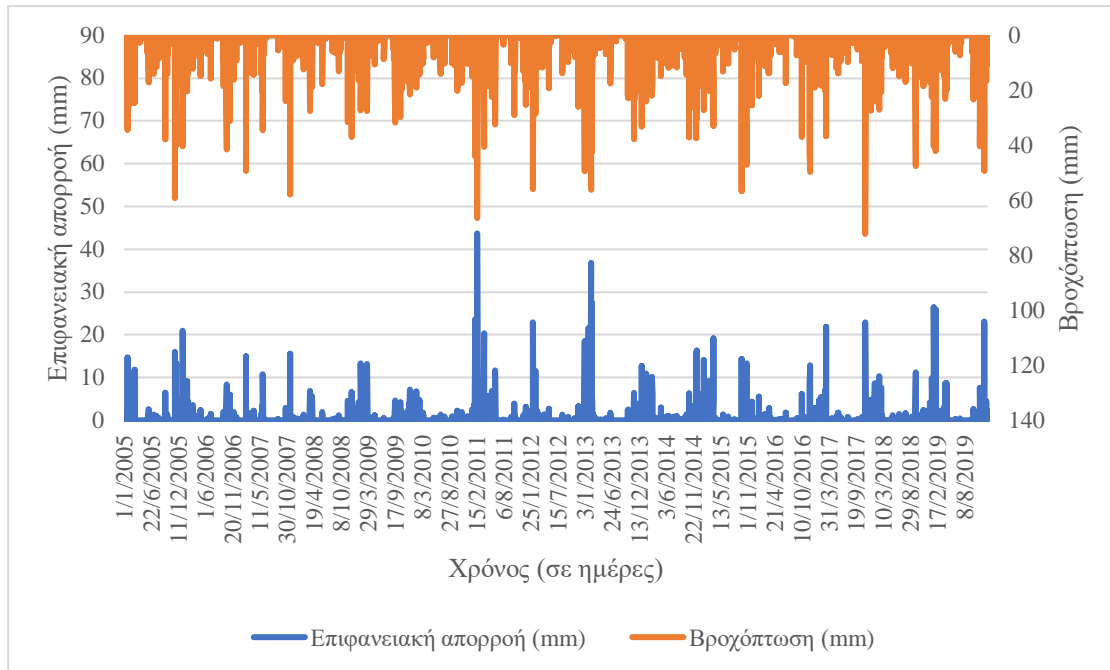
Εικόνα 48: Υδρογράφημα υπολεκάνης 6 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Η μέγιστη μηνιαία επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 (Εικόνα 49) ισούται με 75.74 mm τον Φεβρουάριο του 2011 και η τιμή της βροχόπτωσης που την προκάλεσε ισούται με 161.51 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013, η επιφανειακή απορροή ισούται με 71.29 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε έχει τιμή 158.70 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 50.26 mm και η βροχόπτωση είναι 182.22 mm.



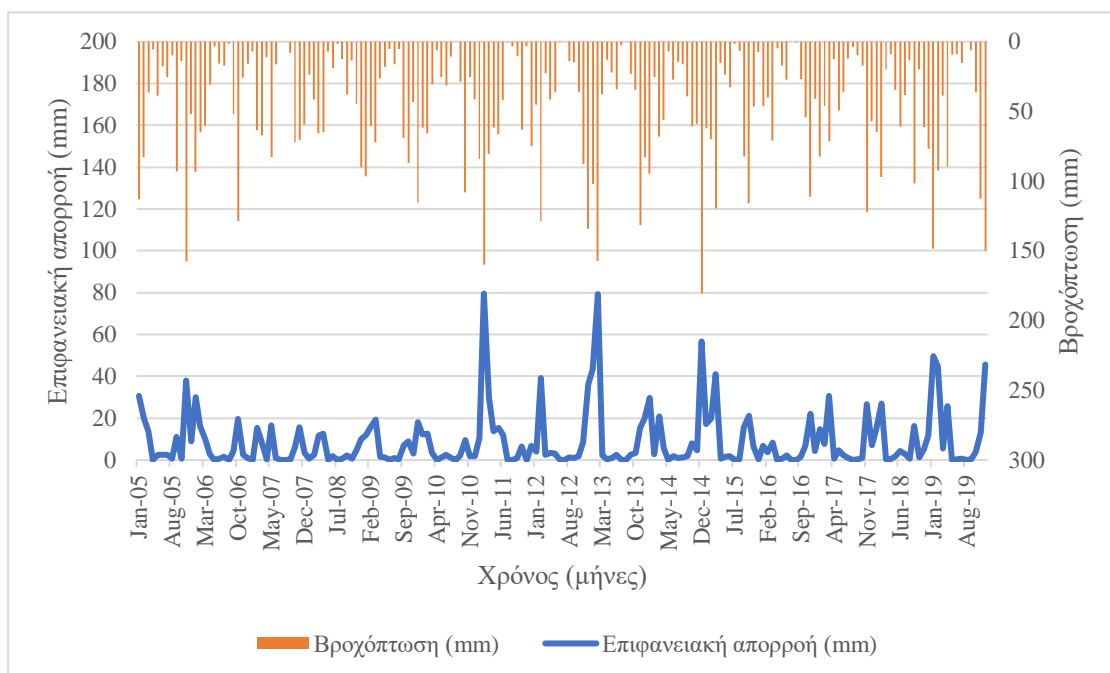
Εικόνα 49: Υδρογράφημα υπολεκάνης 6 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 50 απεικονίζεται το υδρογράφημα της υπολεκάνης 7 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7 είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 43.7 mm ενώ η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.5 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή παρουσιάζεται στις 7/2/2013 όπου ισούται με 36.8 mm και η αντίστοιχη βροχόπτωση έχει τιμή 56.2 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή με τιμή 26.5 mm εμφανίζεται στις 25/1/2019 ενώ η τιμή της βροχόπτωσης είναι 40.4 mm. Η υπολεκάνη 7 έχει ίδια τιμή μέγιστης επιφανειακής απορροής με την υπολεκάνη 4 ενώ από όλες τις άλλες υπολεκάνες έχει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης επιφανειακής απορροής εκτός από την υπολεκάνη 2 που έχει την υψηλότερη τιμή.



Εικόνα 50: Υδρογράφημα υπολεκάνης 7 με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Τέλος, όπως διακρίνεται από το υδρογράφημα (Εικόνα 51), η μέγιστη απορροή της υπολεκάνης 7 είναι τον Φεβρουάριο του 2011 με τιμή 79.53mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε φτάνει τα 160.11 mm. Επίσης,, τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7 είναι 79.38 mm με τιμή βροχόπτωσης 157.32 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 56.53 mm και η βροχόπτωση 180.63 mm.

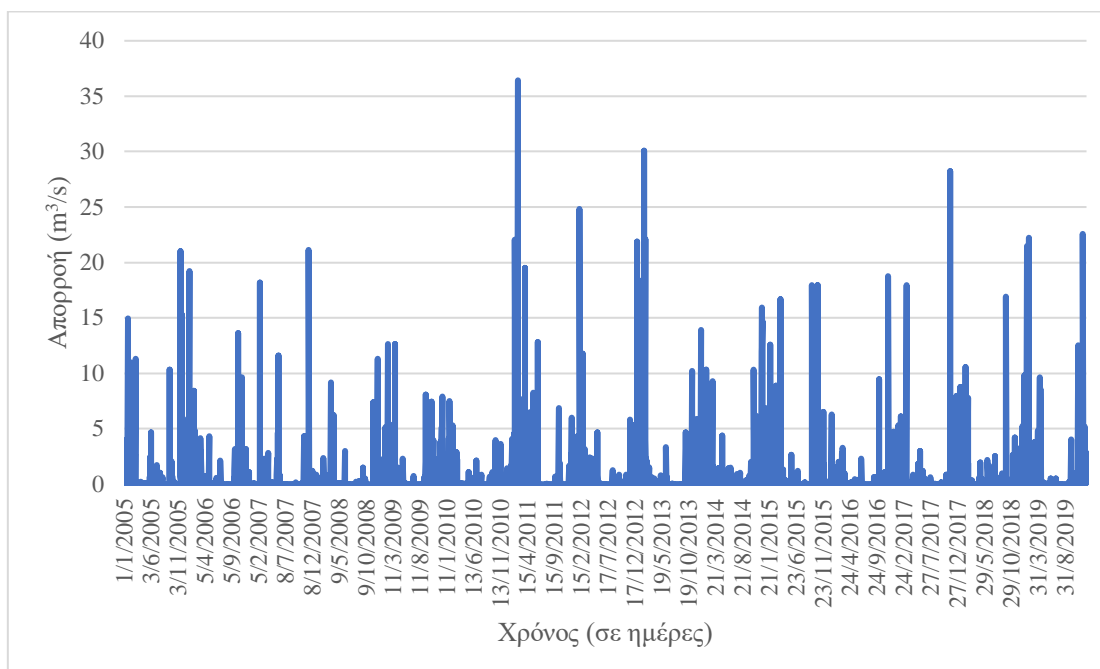


Εικόνα 51: Υδρογράφημα υπολεκάνης 7 με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

4.2 Μετά την πυρκαγιά

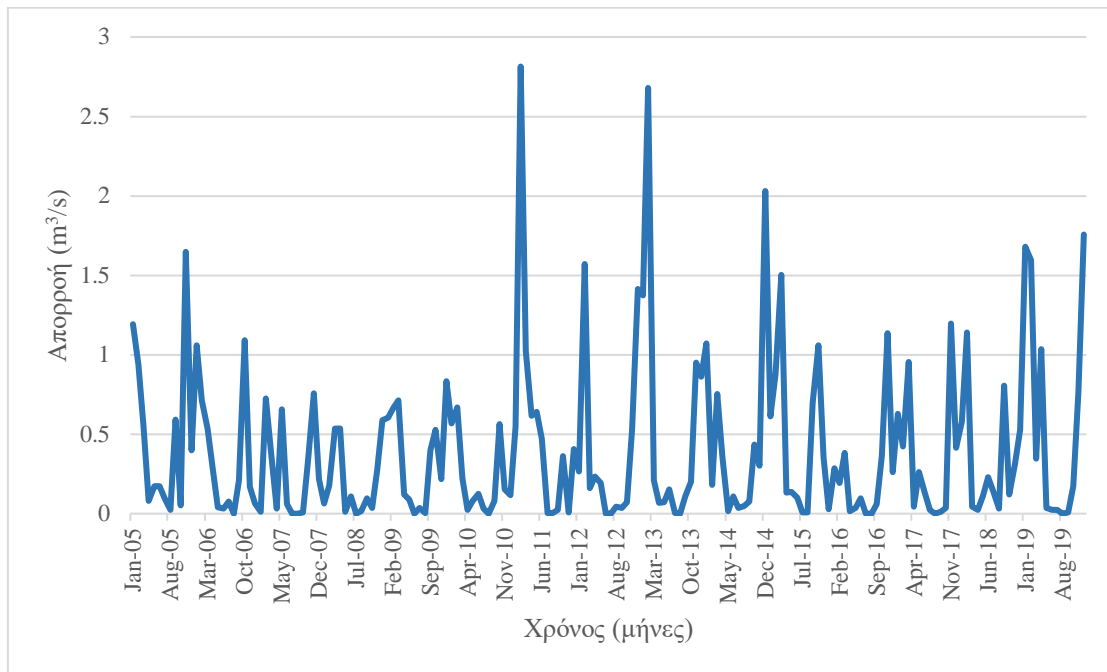
Μετά την δασική πυρκαγιά, οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής άλλαξαν όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Έτσι χρειάστηκε να αλλάξει ο αριθμός καμπύλης CN, όπως προσδιορίστηκε παραπάνω και η προσομοίωση να διενεργηθεί ξανά. Όπως και στην υπάρχουσα κατάσταση, έτσι και για την κατάσταση μετά την πυρκαγιά δημιουργήθηκαν υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης για ημερήσια και μηνιαία δεδομένα από την 1/1/2005 έως την 31/12/2019. Επίσης, δημιουργήθηκαν υδρογραφήματα για την κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά για ημερήσια και μηνιαία δεδομένα από την 1/1/2005 έως την 31/12/2019.

Στην Εικόνα 52 παρουσιάζεται το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης απορροής μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Η μέγιστη απορροή παρατηρείται στις 18/2/2011 και ισούται με $36.43 \text{ m}^3/\text{s}$. Η δεύτερη μεγαλύτερη απορροή είναι στις 7/2/2013 με τιμή $30.07 \text{ m}^3/\text{s}$. Ενώ πολύ υψηλή απορροή παρουσιάζεται και στις 16/11/2017 με τιμή $28.24 \text{ m}^3/\text{s}$.



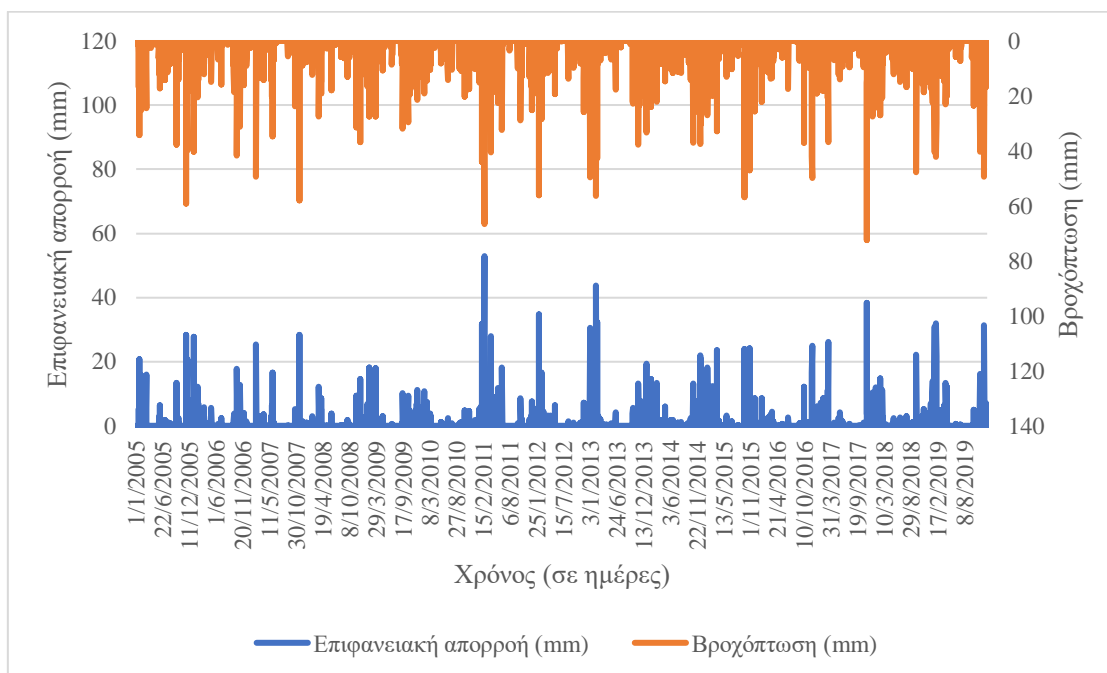
Εικόνα 52: Υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 53 παρουσιάζεται το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται από το υδρογράφημα, ο μήνας με την μεγαλύτερη απορροή είναι ο Φεβρουάριος του 2011 με απορροή $2.81 \text{ m}^3/\text{s}$, στην συνέχεια ακολουθεί ο Φεβρουάριος του 2013 με απορροή $2.68 \text{ m}^3/\text{s}$ και έπεται ο Δεκέμβριος του 2014 με απορροή $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$.



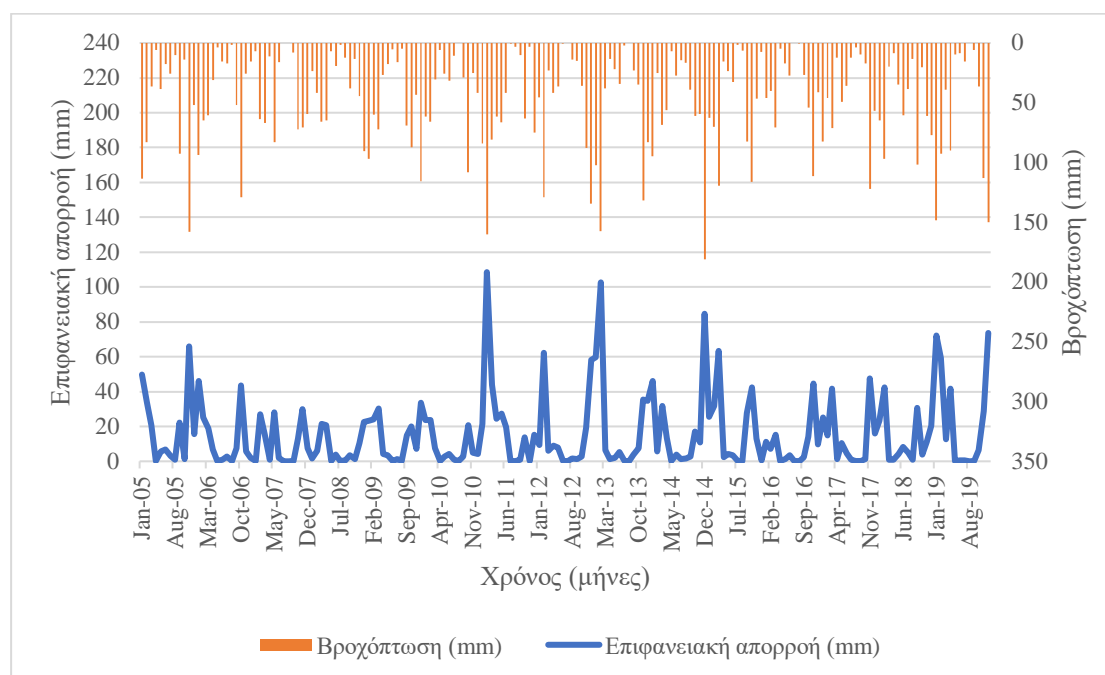
Εικόνα 53: Υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην συνέχεια παρατίθενται τα υδρογραφήματα για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά. Στην Εικόνα 54, η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 μετά την πυρκαγιά είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 52.9 mm ενώ η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.6 mm. Στις 7/2/2013 παρατηρείται η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή με τιμή 43.7 mm και βροχόπτωση 56.3 mm. Η επιφανειακή απορροή στις 16/11/2017 ισούται με 38.3 mm και η βροχόπτωση με 72.3 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή είναι 34.7 mm και η βροχόπτωση 56.00 mm.



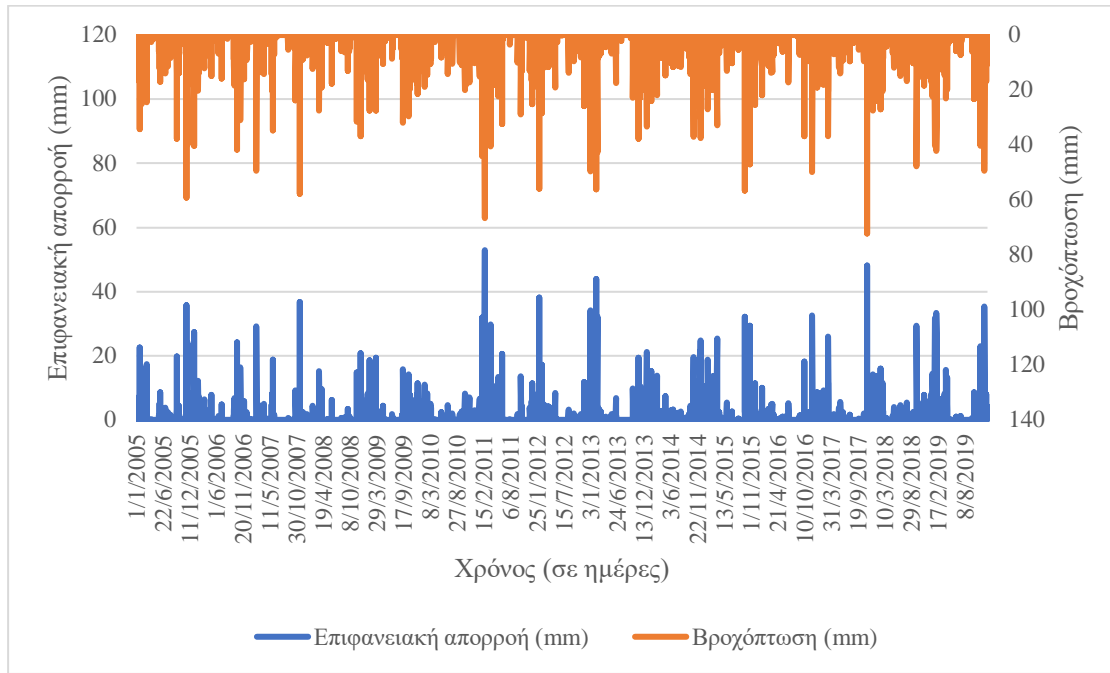
Εικόνα 54: Υδρογράφημα υπολεκάνης 1 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 55 απεικονίζεται η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Τον Φεβρουάριο του 2011 η υπολεκάνη 1 έχει την μέγιστη επιφανειακή απορροή με τιμή 108.53 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 160.36 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 102.77 mm και βροχόπτωση 157.57 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 84.74 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε 180.92 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται και τον Δεκέμβριο του 2019 με τιμή 73.78 mm και τιμή βροχόπτωσης 150.08 mm.



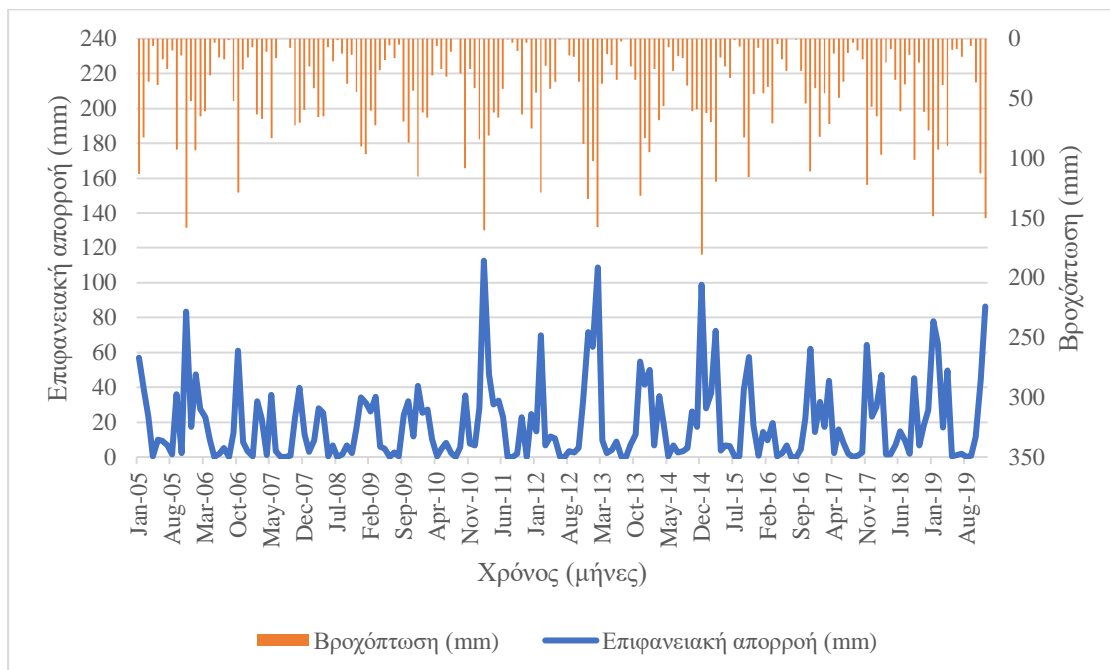
Εικόνα 55: Υδρογράφημα υπολεκάνης 1 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται το υδρογράφημα της υπολεκάνης 2 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 είναι στις 18/2/2011 με τιμή 52.9 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 66.5 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 είναι στις 16/11/2017 με τιμή 48.2 mm και βροχόπτωση 72.3 mm. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή είναι 44.0 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε είναι 56.2 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή έχει στις 6/2/2012 με τιμή 38.10 mm και η αντίστοιχη βροχόπτωση είναι 55.9 mm.



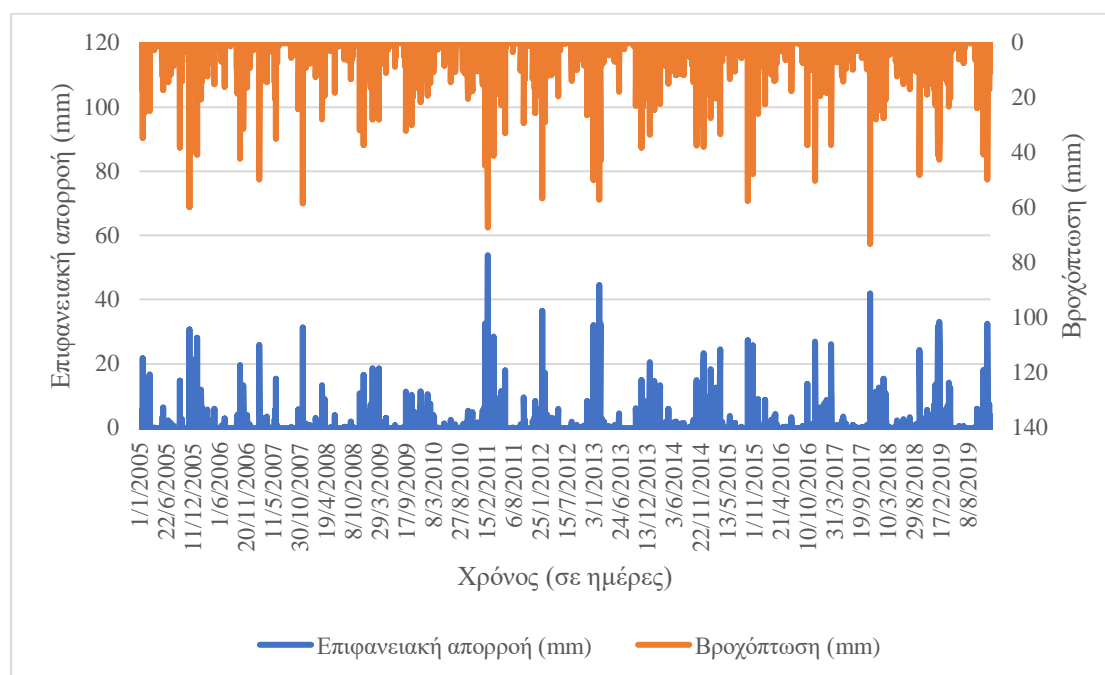
Εικόνα 56: Υδρογράφημα υπολεκάνης 2 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 57, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 μετά την πυρκαγιά είναι 112.63 mm τον Φεβρουάριο του 2011 και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 160.24 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή είναι 108.76 mm και η τιμή της βροχόπτωσης είναι 157.45 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 98.9 mm και η βροχόπτωση ισούται με 180.78 mm. Επίσης, τον Δεκέμβριο του 2019 η τιμή της επιφανειακής απορροής ισούται με 86.42 mm και η τιμή της βροχόπτωσης με 149.97 mm.



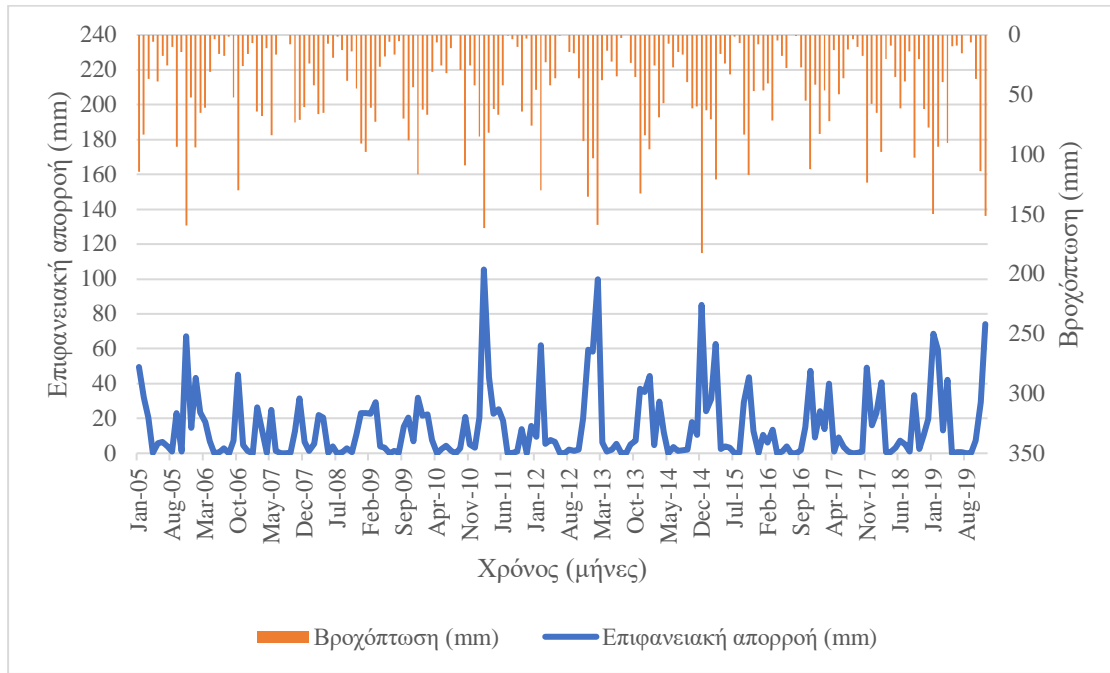
Εικόνα 57: Υδρογράφημα υπολεκάνης 2 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στο υδρογράφημα της υπολεκάνης 3 (Εικόνα 58) η μέγιστη επιφανειακή απορροή είναι 53.9 mm στις 18/2/2011 και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 67.10 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της επιφανειακής απορροής είναι στις 7/2/2013 και ισούται με 44.4 mm και η βροχόπτωση είναι 56.8 mm. Στις 16/11/2017 η επιφανειακή απορροή είναι 41.8 mm και η βροχόπτωση είναι 73.0 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή ισούται με 36.4 mm και η τιμή της βροχόπτωσης με 56.5 mm. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 3 είναι μεγαλύτερη από τις δυο προηγούμενες υπολεκάνες.



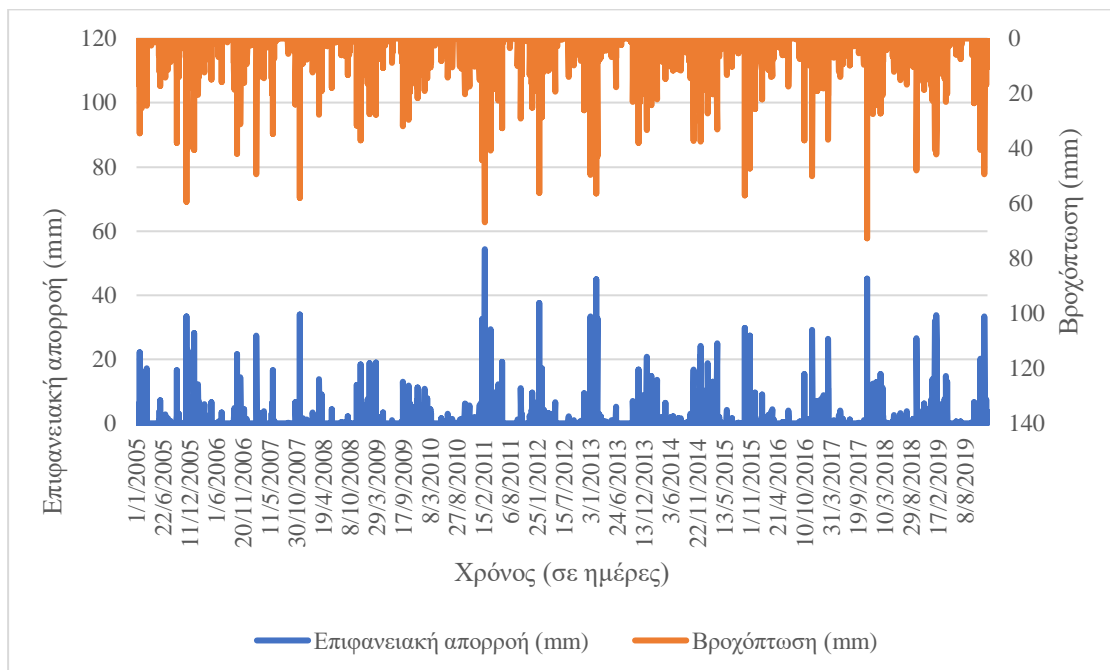
Εικόνα 58: Υδρογράφημα υπολεκάνης 3 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Όπως φαίνεται από το υδρογράφημα της υπολεκάνης 3 (Εικόνα 59), ο Φεβρουάριος του 2011 είναι ο μήνας με την μέγιστη επιφανειακή απορροή, η οποία ισούται με 105.44 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε έχει τιμή 161.71 mm. Ακολουθεί ο Φεβρουάριος του 2013 με επιφανειακή απορροή 99.96 mm και βροχόπτωση 158.89 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 85.27 mm και η βροχόπτωση ισούται με 182.44 mm. Τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή ισούται με 74.09 mm και η βροχόπτωση ισούται με 151.35 mm.



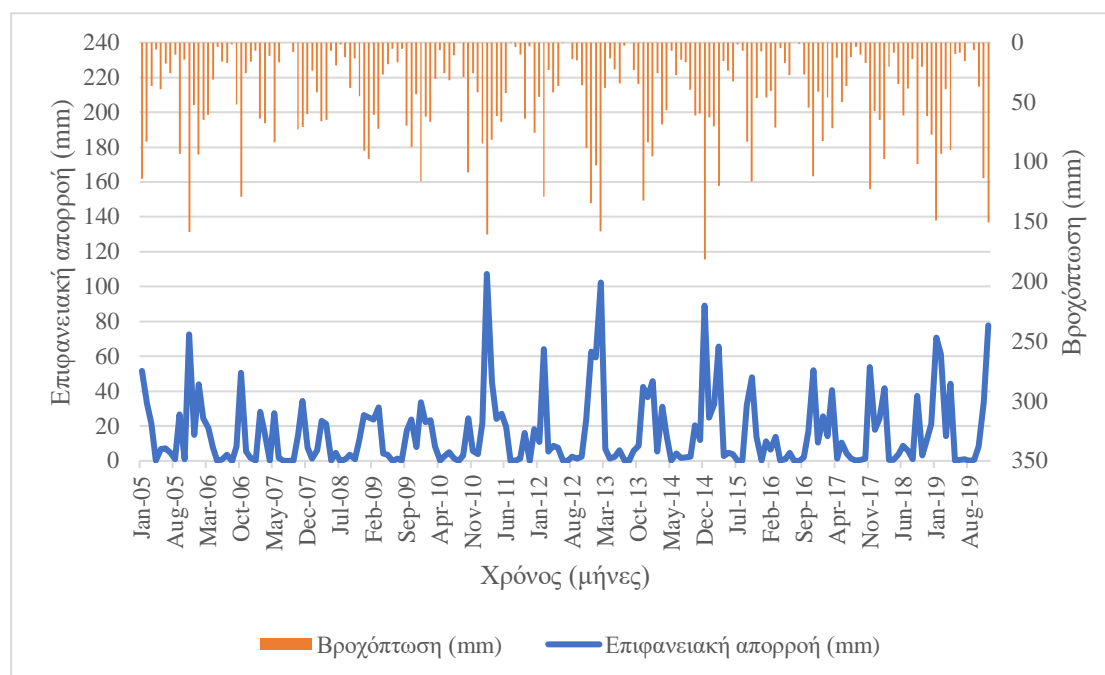
Εικόνα 59: Υδρογράφημα υπολεκάνης 3 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Όσον αφορά στην υπολεκάνη 4 (Εικόνα 60), στις 18/2/2011 έχει την μέγιστη επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά με τιμή 54.4 mm και τιμή βροχόπτωσης 66.7 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη τιμή του υδρογραφήματος είναι στις 16/11/2017 με την επιφανειακή απορροή 45.2 mm και την βροχόπτωση 72.5 mm. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή είναι 45.0 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 56.4 mm. Στις 6/2/2012 η τιμή της επιφανειακής απορροής ισούται με 37.7 mm και η βροχόπτωση με 56.1 mm. Η υπολεκάνη 4 έχει την μεγαλύτερη τιμή μέγιστης επιφανειακής απορροής από τις προηγούμενες υπολεκάνες.



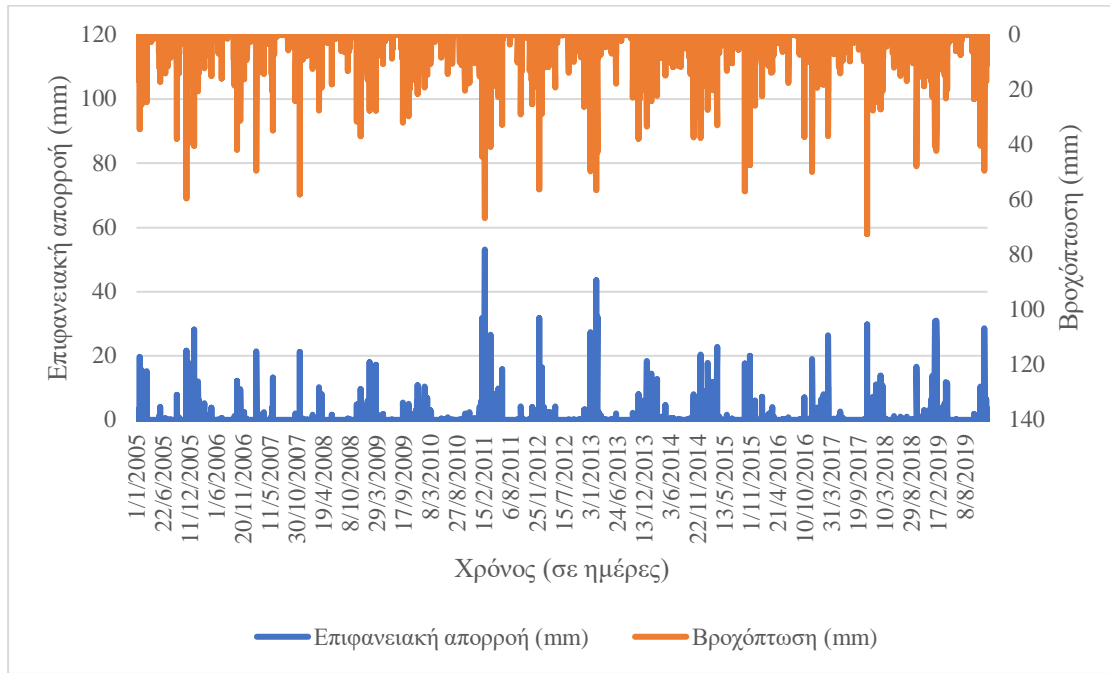
Εικόνα 60: Υδρογράφημα υπολεκάνης 4 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Ο μήνας με την μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 4 (Εικόνα 61), είναι ο Φεβρουάριος του 2011 με τιμή 107.28 mm και τιμή βροχόπτωσης 160.80 mm. Ακολουθεί ο Φεβρουάριος του 2013 με επιφανειακή απορροή 102.29 mm και βροχόπτωση 158.00 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 89.01 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε 181.42 mm. Τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή ισούται με 77.56 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε με 150.50 mm.



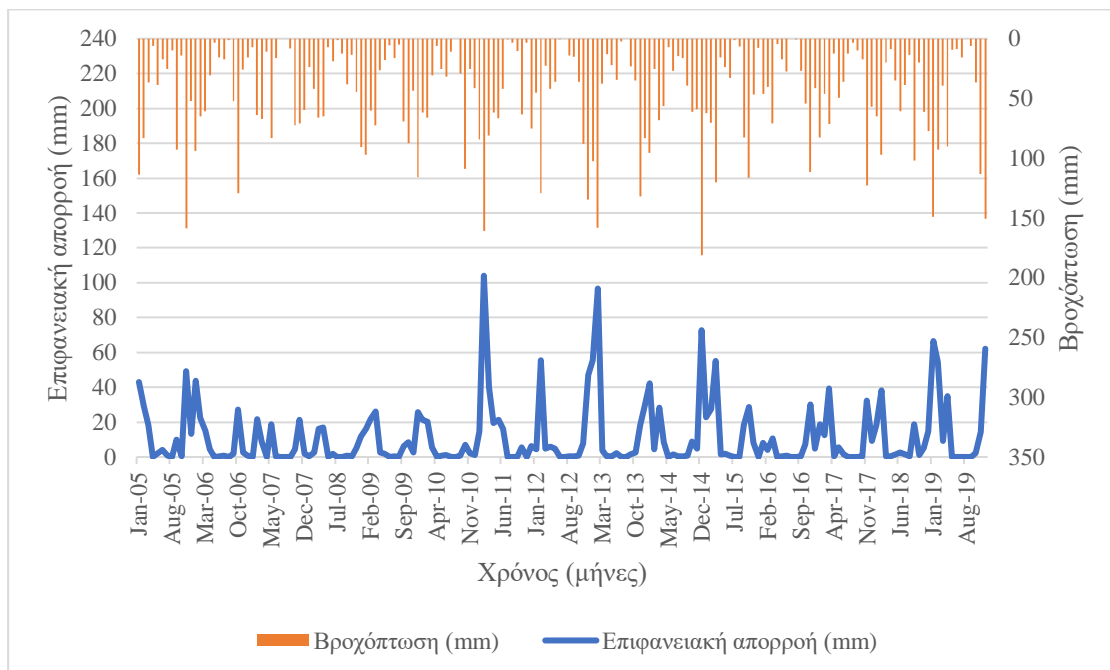
Εικόνα 61: Υδρογράφημα υπολεκάνης 4 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Η υπολεκάνη 5 έχει μέγιστη επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά στις 18/2/2011 με τιμή 53.2 mm και βροχόπτωση που την προκάλεσε 66.7 mm (Εικόνα 62). Επίσης, στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 5 ισούται με 43.5 mm και η τιμή της βροχόπτωσης με 56.4 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή είναι 31.7 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 56.1 mm. Στις 5/2/2019 η επιφανειακή απορροή ισούται με 31.00 mm και η βροχόπτωση με 42.2 mm. Η υπολεκάνη 5 έχει μικρότερη μέγιστη επιφανειακή απορροή από τις υπολεκάνες 3 και 4 και μεγαλύτερη από τις υπολεκάνες 1 και 2.



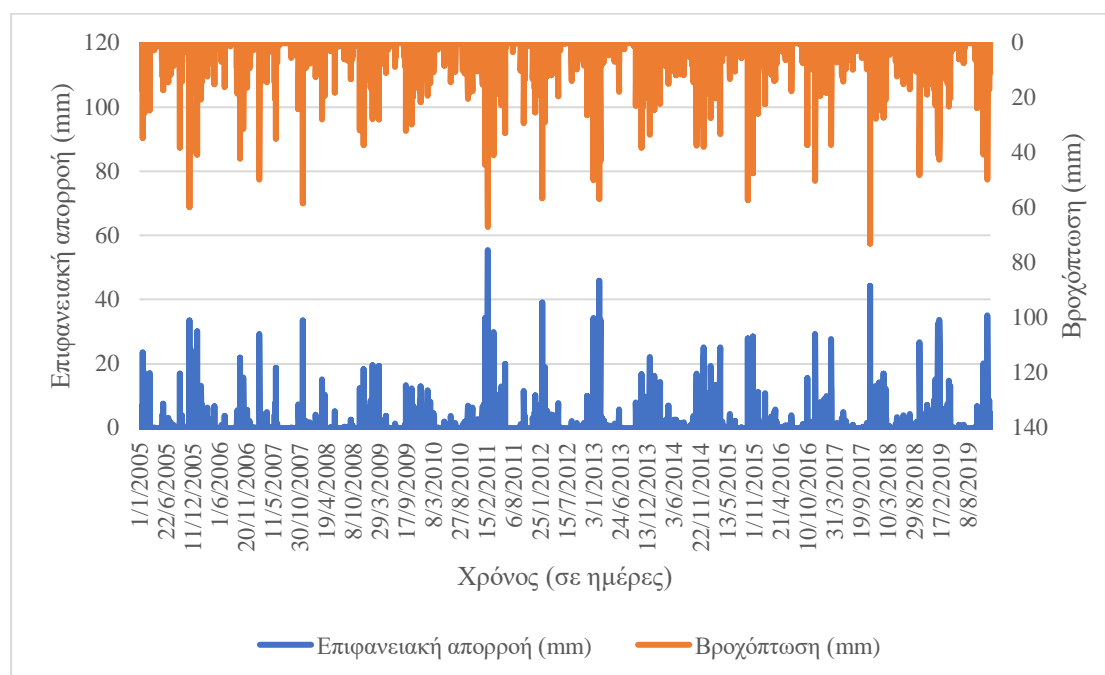
Εικόνα 62: Υδρογράφημα υπολεκάνης 5 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Ο μήνας με την μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 5 (Εικόνα 63) είναι ο Φεβρουάριος του 2011 με τιμή 104.02 mm. Η βροχόπτωση που προκάλεσε την μέγιστη απορροή ισούται με 160.76 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή ισούται με 96.7 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 157.96 mm. Επίσης, τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή ισούται με 72.8 mm και η βροχόπτωση με 181.37 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται τον Ιανουάριο του 2019 με την επιφανειακή απορροή να ισούται με 66.49 mm και την βροχόπτωση να είναι 148.96 mm.



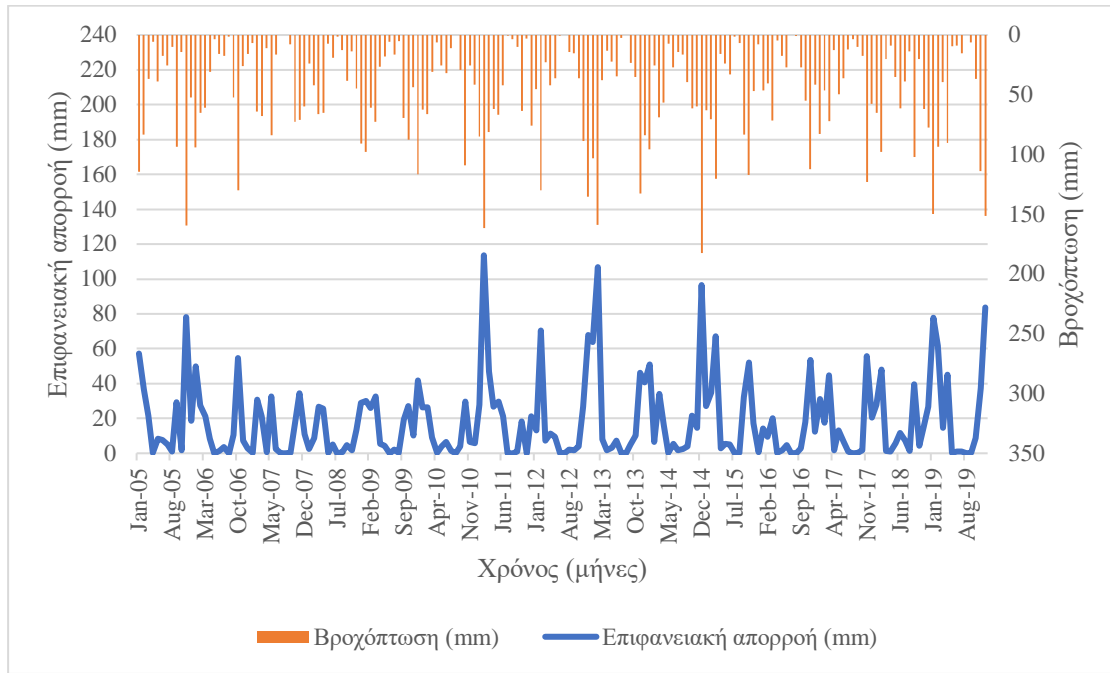
Εικόνα 63: Υδρογράφημα υπολεκάνης 5 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 64, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 μετά την πυρκαγιά είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 55.4 mm ενώ η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 67.0 mm. Η δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της επιφανειακής απορροής είναι στις 7/2/2013 και ισούται με 45.8 mm και η βροχόπτωση ισούται με 56.7 mm. Στις 16/11/2017 η τιμή της επιφανειακής απορροής είναι 44.2 mm και της βροχόπτωσης είναι 72.9 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται και στις 6/2/2012 με τιμή 39.1 mm και τιμή βροχόπτωσης 56.4 mm.



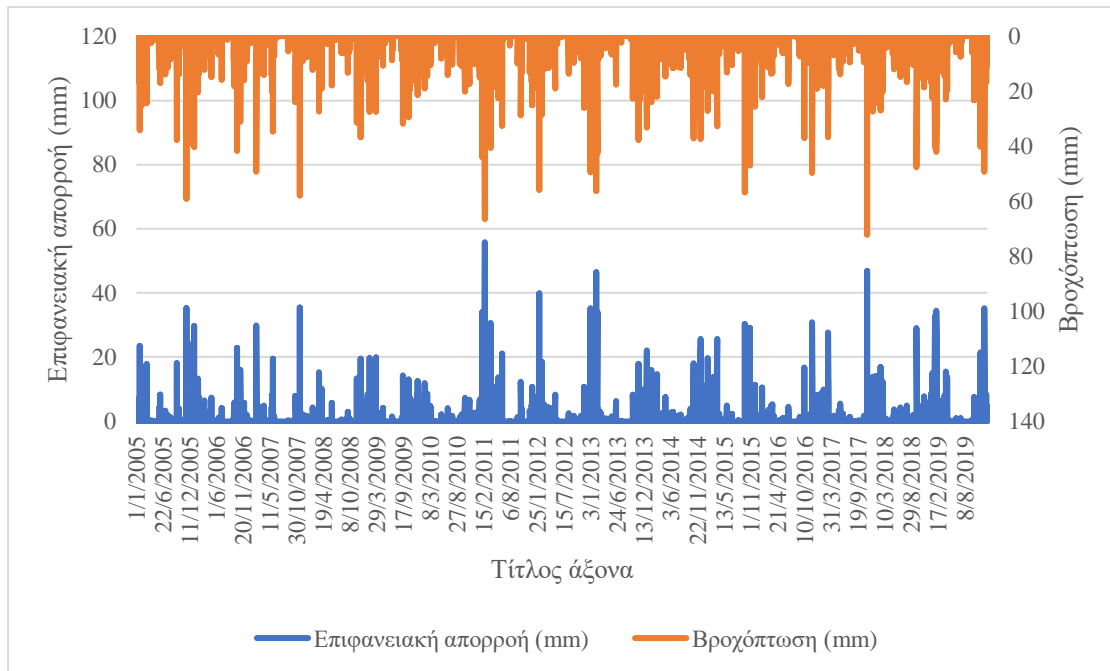
Εικόνα 64: Υδρογράφημα υπολεκάνης 6 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στη συνέχεια στην Εικόνα 65, όπως διακρίνεται από το υδρογράφημα, ο μήνας με την μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 είναι ο Φεβρουάριος του 2011 με τιμή 113.6 mm. Παράλληλα η βροχόπτωση που προκάλεσε την μέγιστη απορροή ισούται με 161.51 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή ισούται με 106.66 mm και η βροχόπτωση ισούται με 158.70 mm. Ο Δεκέμβρης του 2014 έχει επιφανειακή απορροή 96.62 mm και τιμή βροχόπτωσης 182.22 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται και τον Δεκέμβριο του 2019 με τιμή επιφανειακής απορροής 83.64 mm και τιμή βροχόπτωσης 151.16 mm.



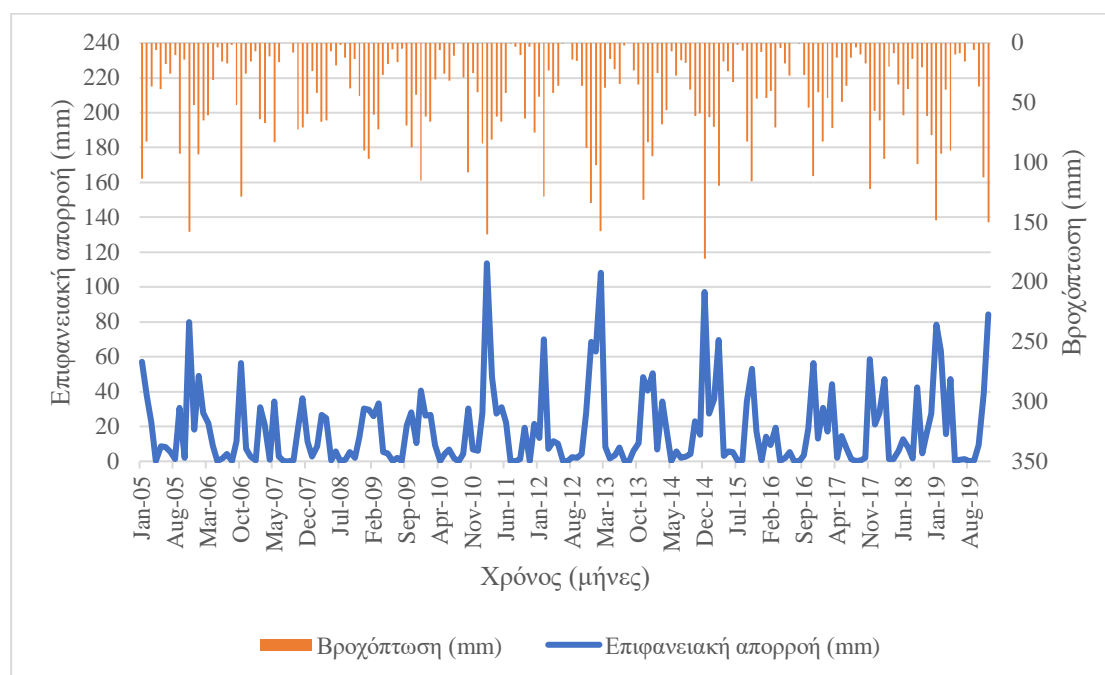
Εικόνα 65: Υδρογράφημα υπολεκάνης 6 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Τέλος, στην Εικόνα 66 η μέγιστη επιφανειακή απορροή στις υπολεκάνης 7 είναι στις 18/2/2011 και ισούται με 55.9 mm ενώ η τιμή της βροχόπτωσης που την προκάλεσε ισούται με 66.5 mm. Στις 16/11/2017 παρατηρείται η δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή με τιμή 46.8 mm και τιμή βροχόπτωσης 72.2 mm. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 46.4 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 56.2 mm. Επίσης, στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή ισούται με 39.8 mm και η βροχόπτωση που την προκάλεσε ισούται με 55.9 mm.



Εικόνα 66: Υδρογράφημα υπολεκάνης 7 μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

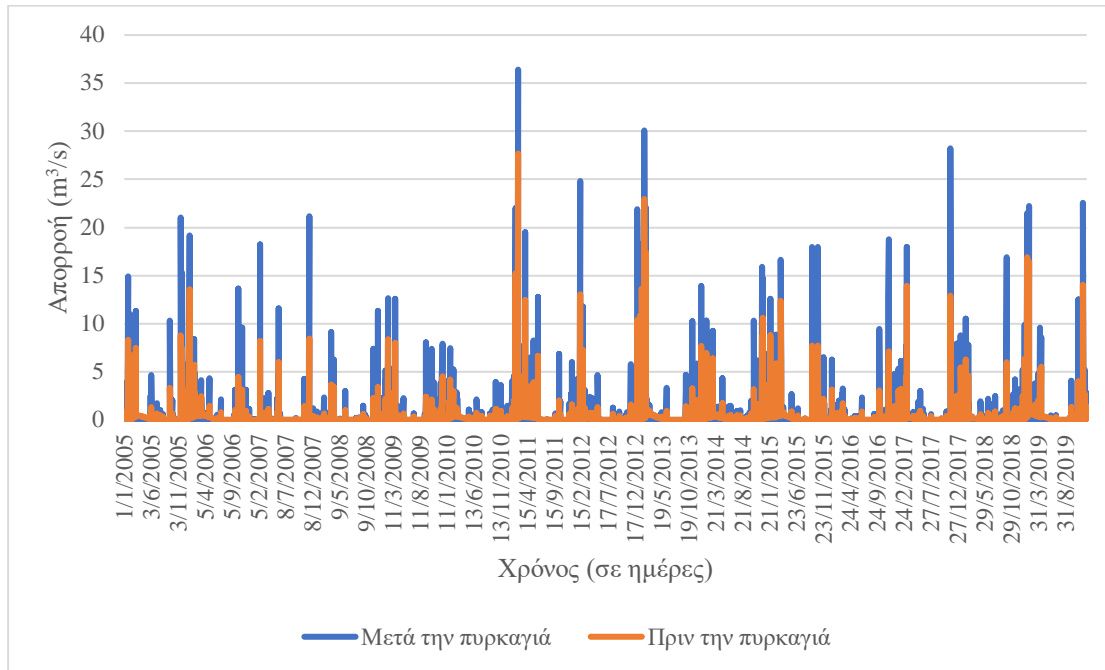
Στην Εικόνα 67, τον Φεβρουάριο του 2011 η υπολεκάνη 7 μετά την πυρκαγιά έχει μέγιστη επιφανειακή απορροή 113.59 mm. Ταυτόχρονα, η βροχόπτωση που προκάλεσε την μέγιστη επιφανειακή απορροή ισούται με 160.11 mm. Τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή ισούται με 108.08 mm και η βροχόπτωση ισούται με 157.32 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή είναι 97.13 mm και η βροχόπτωση είναι 180.63 mm. Μεγάλη επιφανειακή απορροή παρατηρείται και τον Δεκέμβριο του 2019 με τιμή 84.25 mm και τιμή βροχόπτωσης 149.85 mm.



Εικόνα 67: Υδρογράφημα υπολεκάνης 7 μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

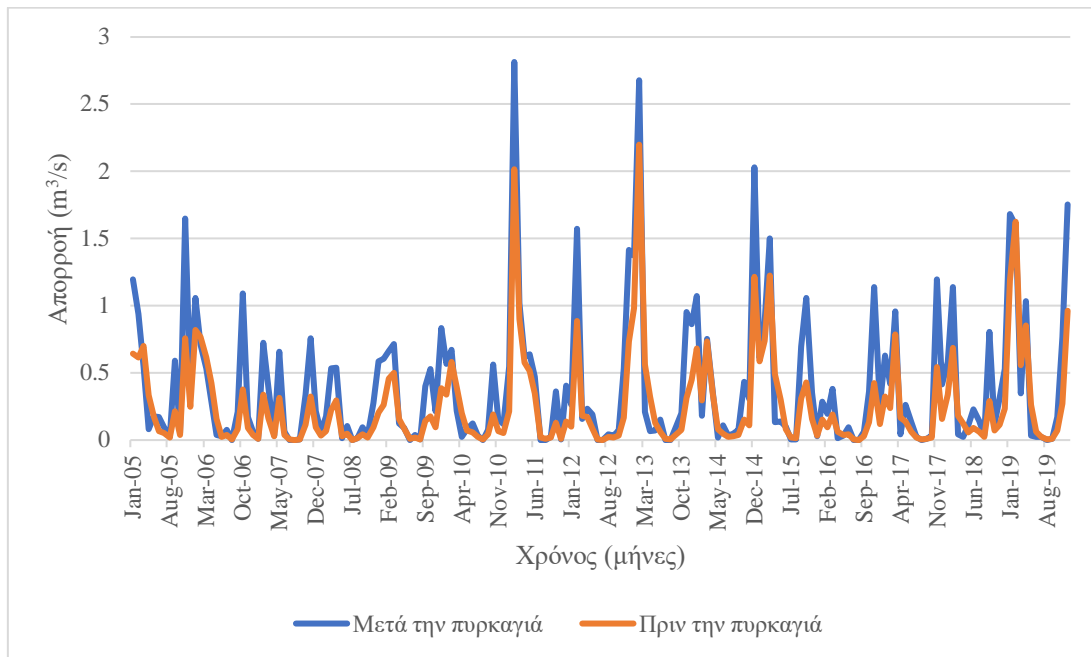
4.3 Σύγκριση

Τελευταίο βήμα είναι να γίνει η σύγκριση των υδρογραφημάτων πριν και μετά την δασική πυρκαγιά, ώστε να εξεταστεί η μεταβολή στο υδρολογικό καθεστώς τόσο στην έξοδο της λεκάνης απορροής όσο και σε επίπεδο υπολεκάνης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 68, είναι φανερό ότι η απορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής μετά την πυρκαγιά αυξήθηκε πολύ. Η απορροή πριν την πυρκαγιά στις 18/2/2011, η οποία αποτελεί και την μέγιστη απορροή της λεκάνης είναι $27.69 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ αντίστοιχα μετά την πυρκαγιά η απορροή εκτιμάται σε $36.43 \text{ m}^3/\text{s}$. Συνεπώς παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 31.56 %. Επίσης, στις 7/2/2013 η απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν $22.98 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ μετά την πυρκαγιά είναι $30.07 \text{ m}^3/\text{s}$. Στις 25/1/2019 πριν την πυρκαγιά παρατηρείται η τρίτη μεγαλύτερη απορροή πριν την πυρκαγιά με τιμή $16.91 \text{ m}^3/\text{s}$, η οποία μετά την πυρκαγιά είναι $21.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Στις 16/11/2017 η απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν $12.94 \text{ m}^3/\text{s}$ και μετά την πυρκαγιά είναι $28.24 \text{ m}^3/\text{s}$. Αύξηση παρατηρείται και στις 20/1/2005, τον πρώτο μήνα που ξεκίνησε η προσομοίωση με την απορροή πριν την πυρκαγιά να είναι $8.34 \text{ m}^3/\text{s}$ και μετά την πυρκαγιά να φτάνει $14.93 \text{ m}^3/\text{s}$.



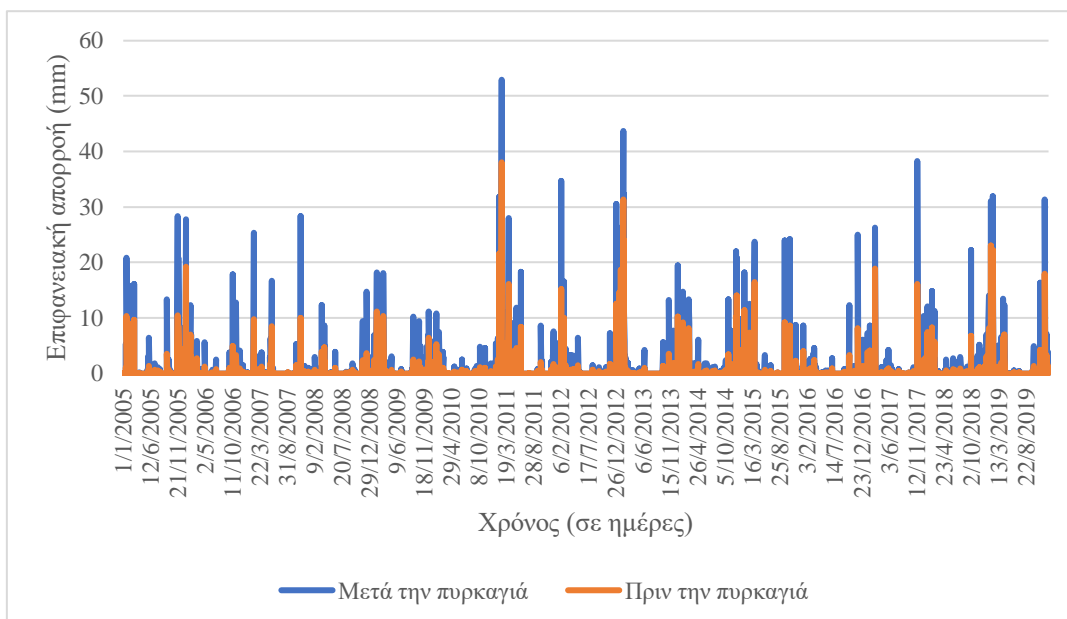
Εικόνα 68: Σύγκριση απορροής των υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 69 γίνεται η σύγκριση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Η απορροή μετά την πυρκαγιά έχει αυξηθεί σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά. Η μέγιστη απορροή είναι αυτή του Φεβρουαρίου του 2011 όπου η απορροή πριν την πυρκαγιά είναι $2.017 m^3/s$ και μετά την πυρκαγιά πήγε $2.81 m^3/s$, δηλαδή παρουσιάζει αύξηση 39.32%. Επίσης, ο Φεβρουάριος του 2013 είχε απορροή $2.2 m^3/s$ πριν την πυρκαγιά και μετά την πυρκαγιά έφτασε $2.68 m^3/s$. Παράλληλα, η απορροή τον Δεκέμβριο του 2014 ήταν $1.22 m^3/s$ και μετά την πυρκαγιά πήγε $2.03 m^3/s$. Τον Δεκέμβριο του 2019 η απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν $0.96 m^3/s$ ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε $1.76 m^3/s$. Τον Μάρτιο του 2015 η απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν $1.23 m^3/s$ ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε $1.5 m^3/s$. Επιπλέον τον Νοέμβριο του 2005 η απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν $0.76 m^3/s$ και μετά την πυρκαγιά έχει τιμή $1.65 m^3/s$. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται και τον Ιανουάριο του 2005, καθώς η απορροή από $0.64 m^3/s$ πριν την πυρκαγιά έφτασε $1.19 m^3/s$, δηλαδή διπλασιάστηκε.



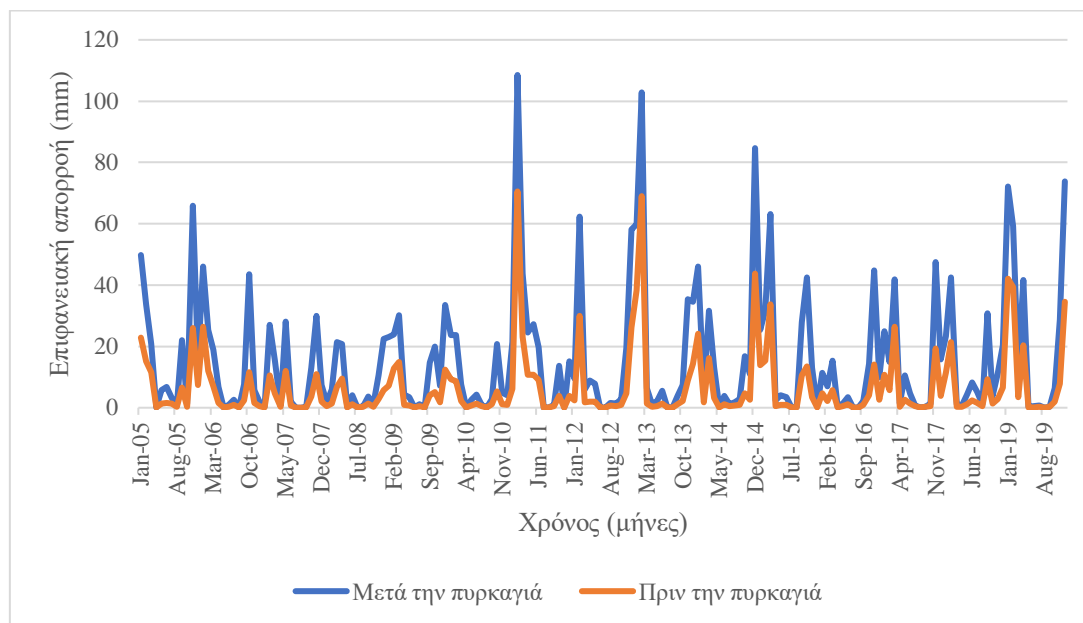
Εικόνα 69: Σύγκριση απορροής των υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην συνέχεια θα μελετηθεί η μεταβολή της απορροής σε επίπεδο υπολεκάνης πριν και μετά την πυρκαγιά για ημερήσιο και μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Στην Εικόνα 70, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 πριν την πυρκαγιά είναι στις 18/2/2011 με τιμή 38.1 mm ενώ μετά την πυρκαγιά φτάνει 52.9 mm, παρουσιάζει αύξηση 38.85%. Επίσης, στις 7/2/2013 από 31.3 mm η τιμή της επιφανειακής απορροής έφτασε 43.7 mm. Στις 16/11/2017 από 16.1 mm η τιμή της επιφανειακής απορροής μετά την πυρκαγιά έφτασε 38.3 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 15.2 mm ενώ μετά έφτασε 34.7 mm. Στις 17/11/2007 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά είχε τιμή 10.00 mm ενώ μετά έφτασε 28.4 mm.



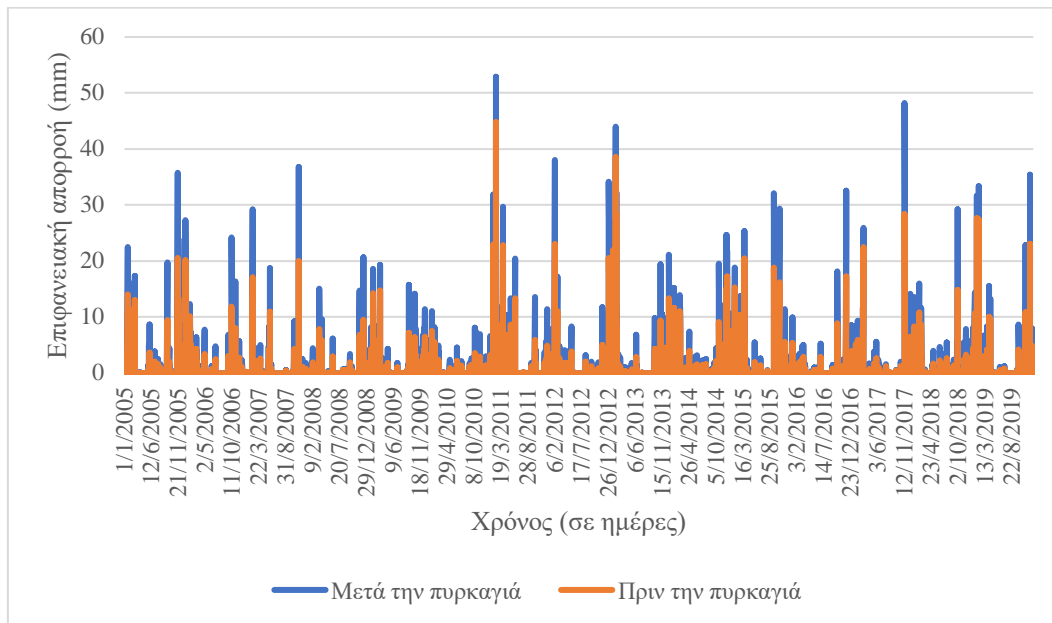
Εικόνα 70: Σύγκριση απορροής της υπολεκάνης 1 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 71, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 είναι τον Φεβρουάριο του 2011 με τιμή πριν την πυρκαγιά 70.55 mm και μετά την πυρκαγιά 108.53 mm. Σημειώνει δηλαδή αύξηση 53.8 %. Επίσης, τον Φεβρουάριο του 2013, η υπολεκάνη 1 έχει την δεύτερη μεγαλύτερη τιμή επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά, η οποία είναι 68.95 mm και μετά την πυρκαγιά φτάνει 102.77 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014, η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 1 είναι 43.75 mm και μετά την πυρκαγιά 84.74 mm. Τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή ήταν 34.46 πριν την πυρκαγιά ενώ μετά έφτασε 73.78 mm. Μεγάλη μεταβολή παρατηρείται τον Νοέμβριο του 2005 όπου η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 25.97 mm και μετά άγγιξε τα 65.8 mm.



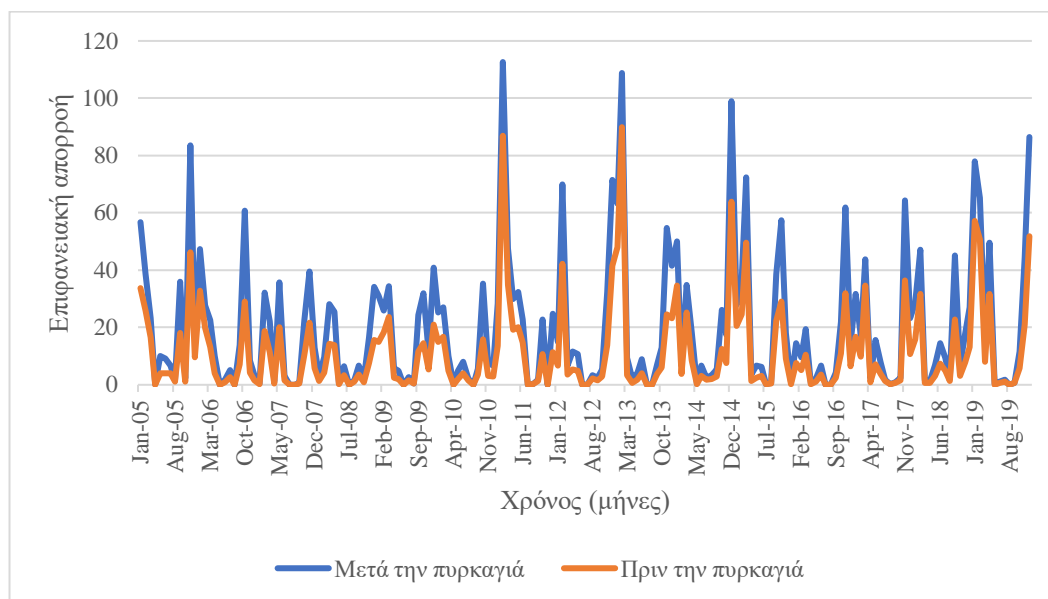
Εικόνα 71: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 1 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Από το υδρογράφημα στην Εικόνα 72, διακρίνεται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 πριν την πυρκαγιά είναι 44.8 mm και μετά την πυρκαγιά 52.9 mm στις 18/2/2011. Παρουσιάζει δηλαδή αύξηση 18.08%. Στις 16/11/2017 πριν την πυρκαγιά η επιφανειακή απορροή ήταν 28.5 mm και μετά την πυρκαγιά αυξάνεται σε 48.2 mm. Παράλληλα στις 7/2/2013 πριν την πυρκαγιά η επιφανειακή απορροή ήταν 38.6 mm και μετά την πυρκαγιά αυξάνεται σε 44 mm. Στις 17/11/2007 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 20.0 mm ενώ μετά έφτασε 36.8 mm.



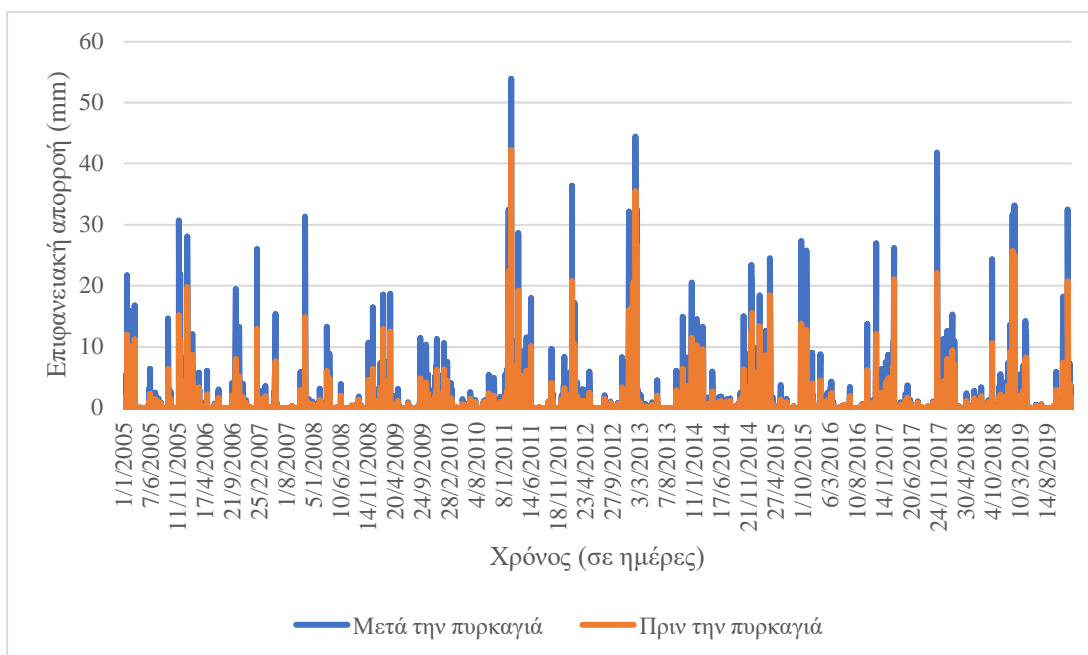
Εικόνα 72: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 2 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Ο μήνας με την μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 2 είναι ο Φεβρουάριος του 2011. Όπως διακρίνεται από το υδρογράφημα της Εικόνας 73, η μέγιστη επιφανειακή απορροή του Φεβρουαρίου 2011 ήταν 86.82 mm πριν την πυρκαγιά ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε τα 112.63 mm, δηλαδή αύξηση 29.72%. Παράλληλα τον Φεβρουάριο του 2013 από 89.89 mm πριν την πυρκαγιά η επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά έφτασε 108.76mm. Μεγάλη μεταβολή παρατηρείται και τον Δεκέμβριο του 2014 με τιμή επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά 63.85 mm και μετά την πυρκαγιά 98.89 mm. Τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 51.76 mm ενώ μετά την πυρκαγιά αυξάνεται σε 86.42 mm. Τον Νοέμβριο του 2005 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά έχει τιμή 46.24 και μετά την πυρκαγιά φτάνει τα 83.54 mm.



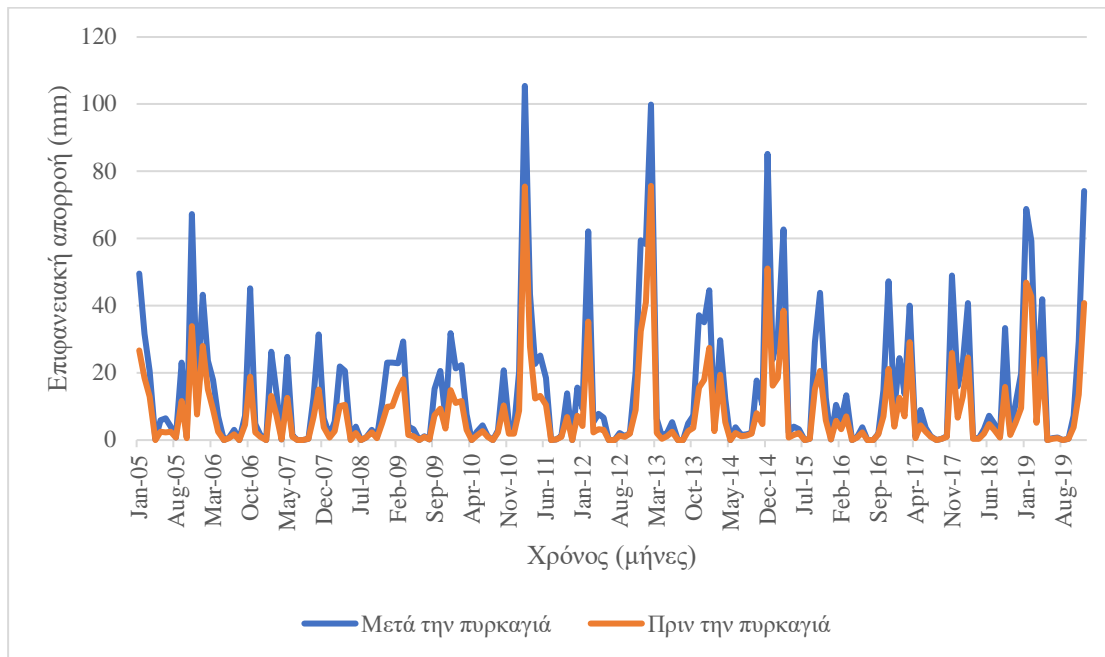
Εικόνα 73: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 2 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Όσον αφορά στην υπολεκάνη 3 (Εικόνα 74), η μέγιστη επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν στις 18/2/2011 με τιμή 42.2 mm και μετά την πυρκαγιά άγγιξε τα 53.9mm, δηλαδή παρουσίασε αύξηση 27.72%. Επιπλέον στις 7/2/2013 η τιμή της επιφανειακής απορροής ήταν 35.5 mm πριν την πυρκαγιά ενώ μετά από την πυρκαγιά αυξήθηκε στα 44.4 mm. Μεγάλη μεταβολή σημειώνεται και στις 16/11/2017 με τιμή επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά 22.1 mm και μετά 41.8 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 20.8 mm ενώ μετά έφτασε 36.4 mm. Επίσης, στις 17/11/2007 πριν την πυρκαγιά η τιμή της επιφανειακής απορροής ήταν 14.9 mm ενώ μετά αυξάνεται σε 31.3 mm.



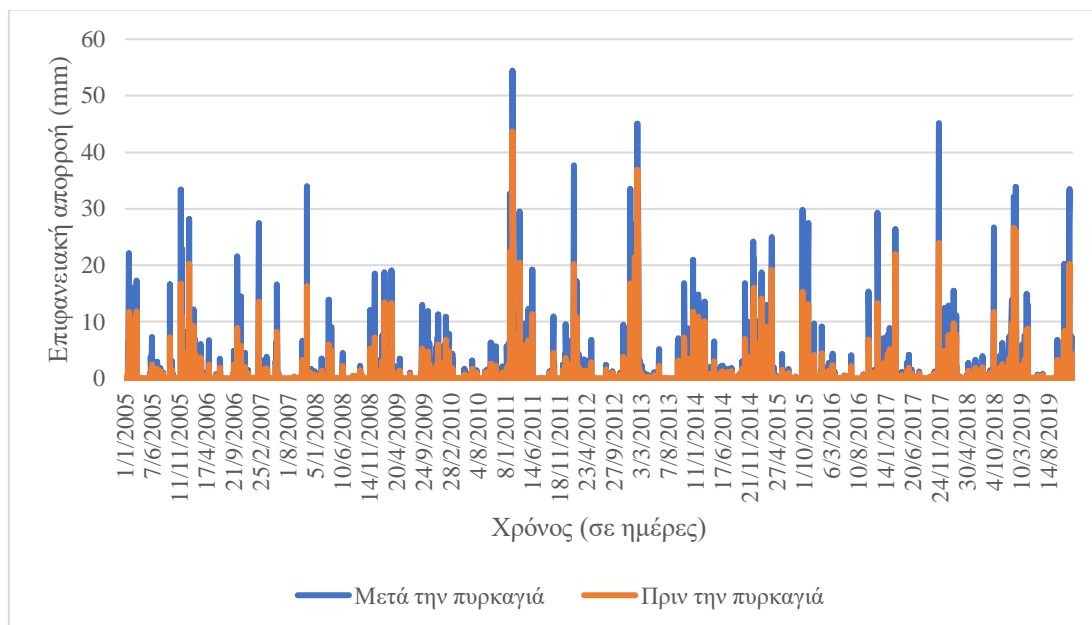
Εικόνα 74: Σύγκριση της επιφανειακής απορροητικής υπολεκάνης 3 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 75, διακρίνεται ότι τον Φεβρουάριο του 2011 η υπολεκάνη 3 είχε μέγιστη επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά 75.39 mm και μετά την πυρκαγιά έφτασε 105.44 mm, υπήρξε δηλαδή αύξηση 39.86%. Τον Φεβρουάριο του 2013 η υπολεκάνη 3 παρουσιάζει επιφανειακή απορροή 75.68 mm ενώ τον ίδιο μήνα μετά την πυρκαγιά αυξάνεται σε 99.96 mm. Παράλληλα τον Δεκέμβριο του 2014 η τιμή της επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά είναι 51.14 mm ενώ μετά φτάνει 85.27 mm. Επιπλέον, τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή από 40.79 mm μεταβάλλεται μετά την πυρκαγιά στα 74.09 mm. Η επιφανειακή απορροή τον Νοέμβριο του 2005 από 33.99 mm μεταβάλλεται μετά την πυρκαγιά στα 67.23 mm.



Εικόνα 75: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 3 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Η υπολεκάνη 4, όπως φαίνεται στην Εικόνα 76 έχει μέγιστη επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά 43.7 mm ενώ μετά την πυρκαγιά φτάνει 54.4 mm. Συνεπώς έχει αύξηση 24.48%. Παράλληλα στις 16/11/2017 παρατηρείται μεγάλη μεταβολή της επιφανειακής απορροής καθώς πριν την πυρκαγιά είχε τιμή 24 mm και μετά την πυρκαγιά έχει 45.2 mm. Στις 7/2/2013 η τιμή της επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά ήταν 36.9 mm και μετά φτάνει 45 mm. Επίσης στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 20.3 mm ενώ μετά έφτασε 37.7 mm. Παράλληλα στις 17/11/2007 πριν την πυρκαγιά η επιφανειακή απορροή είχε τιμή 16.3 mm και μετά αυξάνεται σε 34.0 mm.



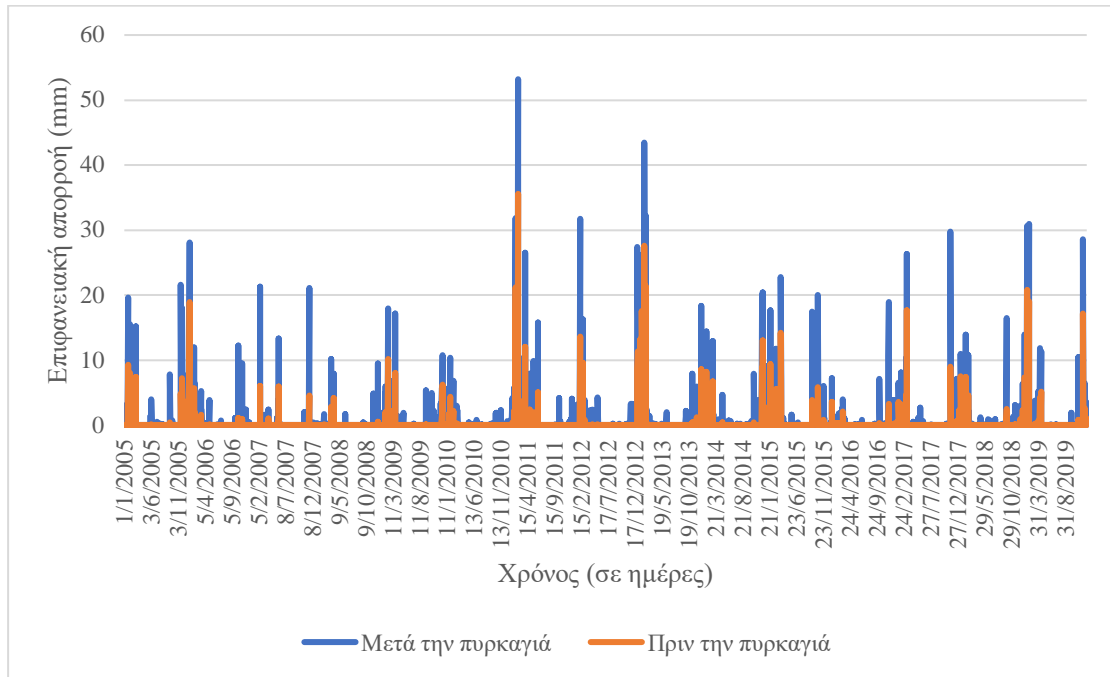
Εικόνα 76: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 4 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 77, παρατηρείται ότι ο μήνας με την μέγιστη επιφανειακή απορροή είναι ο Φεβρουάριος του 2011 με τιμή πριν την πυρκαγιά 78.03 mm και μετά την πυρκαγιά 107.28 mm, αύξηση δηλαδή 37.49%. Παράλληλα τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά έχει τιμή 79.63 mm ενώ μετά την πυρκαγιά φτάνει 102.29 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή έχει τιμή 53.07 mm και μετά την πυρκαγιά αυξάνεται στα 89 mm. Τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 77.56 mm ενώ μετά έφτασε 77.56 mm. Επιπλέον τον Νοέμβριο του 2005 η τιμή της επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά ήταν 35.62 mm και μετά αυξάνεται σε 72.48 mm.



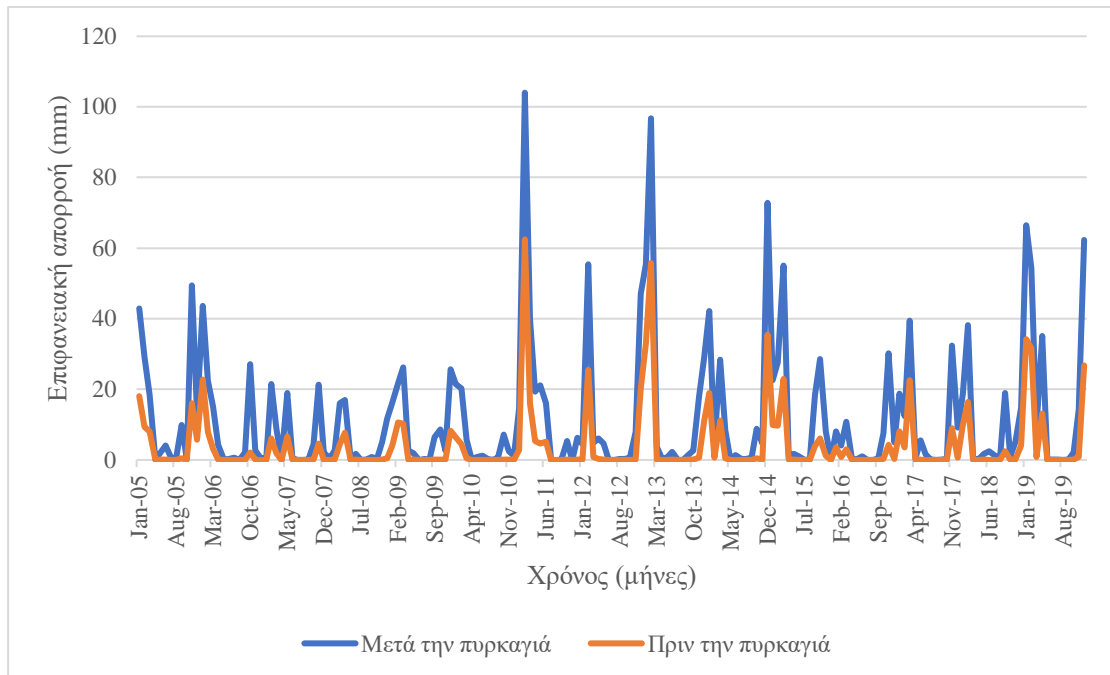
Εικόνα 77: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 4 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 78, η υπολεκάνη 5 παρουσιάζει την μέγιστη επιφανειακή απορροή στις 18/2/2011 με τιμή 35.6 mm πριν την πυρκαγιά και 53.2 mm, δηλαδή αύξηση 49.44% μετά την πυρκαγιά. Επιπλέον, μεγάλη μεταβολή της επιφανειακής απορροής παρατηρείται και στις 7/2/2013 με τιμή πριν την πυρκαγιά 27.6 mm και μετά την πυρκαγιά 43.5 mm. Στις 13/2/2013 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 21.4 mm ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε 32.2 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 13.6 mm ενώ μετά έφτασε 31.7 mm. Επίσης, στις 16/11/2017 η τιμή της επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά ήταν 9.03 mm και μετά αυξήθηκε σε 29.8 mm.



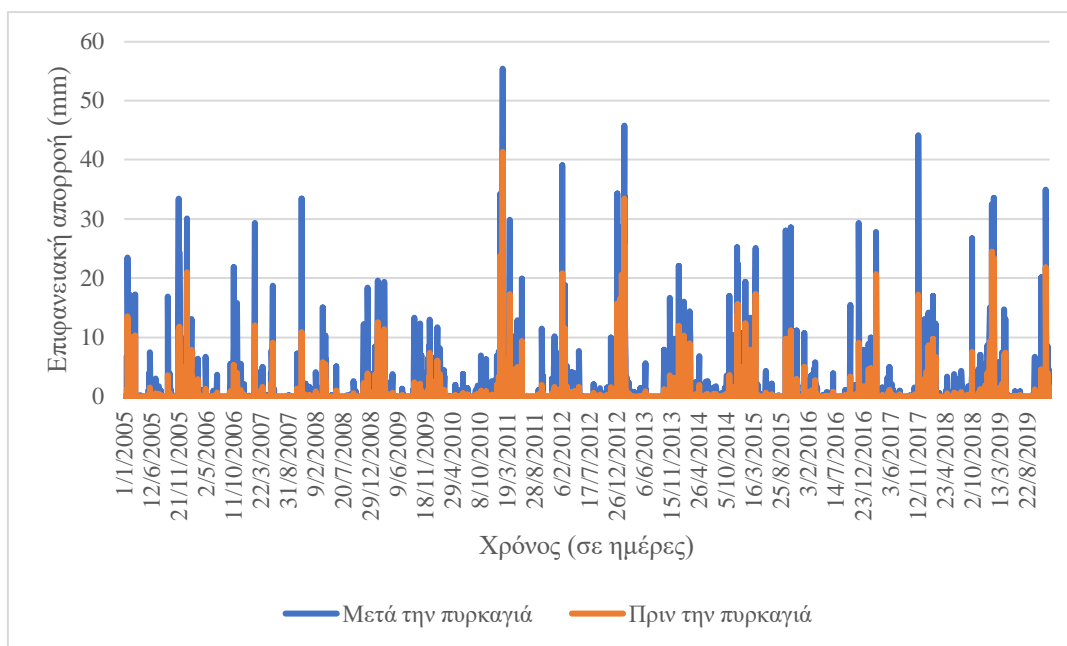
Εικόνα 78: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 5 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 5 (Εικόνα 79) εμφανίζεται τον Φεβρουάριο του 2011 με τιμή 62.47 mm πριν την πυρκαγιά και 104.02 mm μετά την πυρκαγιά. Συνεπώς παρουσιάζει αύξηση 66.5%. Επιπλέον τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή ήταν 55.79 mm ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε 96.7 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 σημειώθηκε πριν την πυρκαγιά επιφανειακή απορροή 35.39 mm και μετά την πυρκαγιά αυξήθηκε στα 72.8 mm. Επίσης, τον Ιανουάριο του 2019 η επιφανειακή απορροή από 34.2 mm έφτασε 66.49 mm.



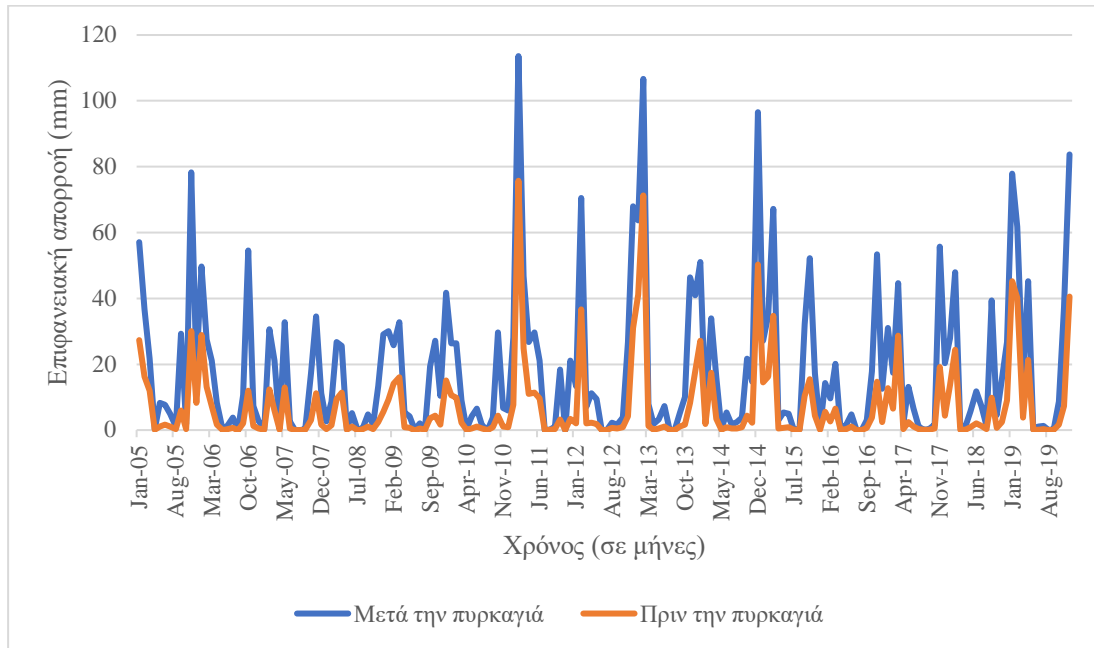
Εικόνα 79: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 5 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 80, η υπολεκάνη 6 παρουσιάζει την μέγιστη επιφανειακή απορροή στις 18/2/2011 με τιμή 41.4 mm πριν την πυρκαγιά και 55.4 mm μετά την πυρκαγιά, δηλαδή αύξηση 33.82%. Στις 7/2/2013 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 5 ήταν 33.5 mm πριν ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε 45.8 mm. Επίσης, στις 16/11/2017, σημειώθηκε μεγάλη αύξηση της επιφανειακής απορροής με τιμή πριν την πυρκαγιά 17.2 mm ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε 44.2 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή ήταν 20.8 mm ενώ μετά την πυρκαγιά αυξήθηκε σε 39.1 mm. Επίσης, στις 17/11/2007 από 10.9 mm που ήταν η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά έφτασε 33.5 mm μετά.



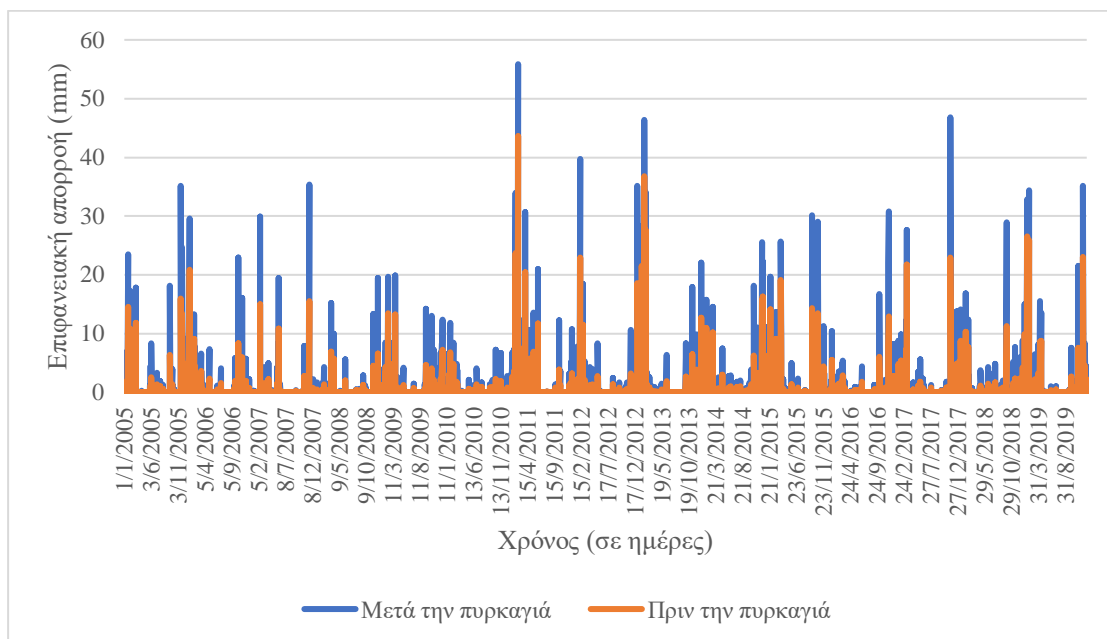
Εικόνα 80: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 6 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 81, διακρίνεται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 είναι τον Φεβρουάριο του 2011 με τιμή 75.74 mm πριν την πυρκαγιά ενώ μετά την πυρκαγιά αυξάνεται σε 113.6 mm, παρουσιάζει δηλαδή αύξηση 49.97%. Ακόμη, τον Φεβρουάριο του 2013 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 6 πριν την πυρκαγιά ισούται με 71.29 mm ενώ μετά την πυρκαγιά έχει τιμή 106.66 mm. Τον Δεκέμβριο του 2014 πριν την πυρκαγιά η τιμή της επιφανειακής απορροής ισούται με 50.26 mm και μετά την πυρκαγιά ισούται με 96.62 mm. Επιπλέον, τον Δεκέμβριο του 2019 η επιφανειακή απορροή ήταν 40.56 mm και μετά την πυρκαγιά άγγιξε τα 83.64 mm. Τέλος, η επιφανειακή απορροή τον Νοέμβριο του 2005 ήταν 0.09 mm και μετά την πυρκαγιά έφτασε 78.25 mm.



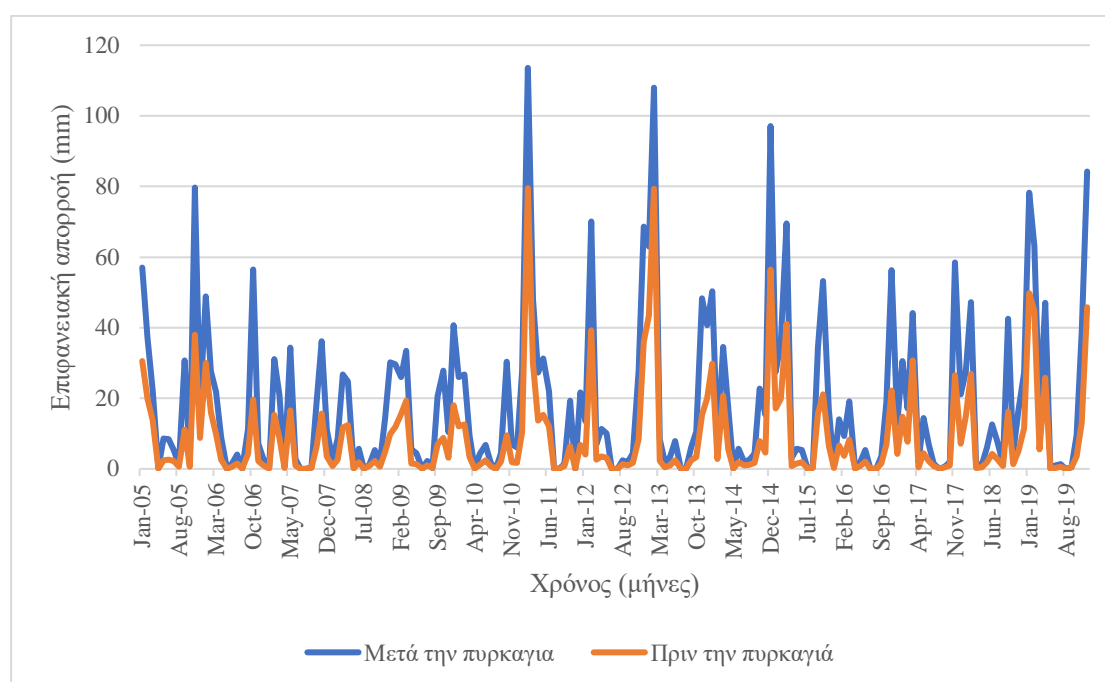
Εικόνα 81: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 6 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 82, παρατηρείται ότι η μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7 πριν την πυρκαγιά είναι στις 18/2/2011 με τιμή 43.7 mm ενώ μετά την πυρκαγιά φτάνει 55.9 mm, παρουσιάζει αύξηση 27.92%. Στις 16/11/2017 η τιμή της επιφανειακής απορροής παρουσίασε μεγάλη μεταβολή, αφού πριν την πυρκαγιά είχε τιμή 22.9 mm και μετά την πυρκαγιά έφτασε 46.8. Επίσης, στις 7/2/2013 από 36.8 mm, η τιμή της επιφανειακής απορροής μετά την πυρκαγιά έφτασε 46.4 mm. Στις 6/2/2012 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 22.9 mm ενώ μετά έφτασε 39.8 mm. Στις 17/11/2007 η επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά ήταν 15.5 mm ενώ μετά έφτασε 35.4 mm.



Εικόνα 82: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 7 πριν και μετά την πυρκαγιά με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης

Στην Εικόνα 83, διαπιστώνεται ότι ο Φεβρουάριος του 2011 είναι ο μήνας με τη μέγιστη επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7, όπου έχει τιμή 79.53 mm πριν την πυρκαγιά και 113.59 mm μετά την πυρκαγιά. Συνεπώς, παρουσιάζει αύξηση 42.83%. Παράλληλα, τον Φεβρουάριο του 2013 η τιμή της επιφανειακής απορροής πριν την πυρκαγιά ισούται με 79.38 mm ενώ μετά την πυρκαγιά ισούται με 108.08 mm. Έπειτα, τον Δεκέμβριο του 2014 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7 πριν την πυρκαγιά είναι 56.53 mm ενώ μετά την πυρκαγιά είναι 97.13 mm. Τον Νοέμβριο του 2005 η επιφανειακή απορροή της υπολεκάνης 7 πριν την πυρκαγιά ήταν 37.93 mm ενώ μετά την πυρκαγιά έφτασε 79.77 mm. Τέλος, τον Δεκέμβρη του 2019 η τιμή της επιφανειακής απορροής από 45.75 mm πήγε 84.25 mm μετά την πυρκαγιά.



Εικόνα 83: Σύγκριση της επιφανειακής απορροής της υπολεκάνης 7 πριν και μετά την πυρκαγιά με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης

Στον Πίνακα 6, παρατίθεται η μέγιστη επιφανειακή απορροή όλων των υπολεκανών στις 18/2/2011 πριν και μετά την πυρκαγιά καθώς και το ποσοστό της μεταβολής τους. Παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη μεταβολή στο υδρολογικό καθεστώς της έχει πρώτα η υπολεκάνη 5 και μετά η υπολεκάνη 1, η υπολεκάνη 6, η υπολεκάνη 7, η υπολεκάνη 3, η υπολεκάνη 4 και τελευταία η υπολεκάνη 2. Το παραπάνω δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην υπολεκάνη 5, υπήρχε το μεγαλύτερο ποσοστό σε επιφάνεια δασικής έκτασης (99.78 %), του οποίου μεταβλήθηκε η χρήση γης μετά την πυρκαγιά, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6 στη στήλη με το ποσοστό της καμένης επιφάνειας. Στις υπολεκάνες 2,3 και 4 ενώ δεν κάρηκαν παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης επιφανειακής απορροής επειδή πιθανώς επηρεάζονται από το μεγάλο ποσοστό καμένης επιφάνειας των γειτονικών υπολεκανών τους.

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών στις 18/2/2011

Γεγονός 18/2/2011	Μέγιστη επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά (mm)	Μέγιστη επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά (mm)	Μεταβολή (%)	Ποσοστό καμένης επιφάνειας (%)
Υπολεκάνη 1	38.1	52.9	38.85	62.54
Υπολεκάνη 2	44.8	52.9	18.08	0.00
Υπολεκάνη 3	42.2	53.9	27.72	0.00
Υπολεκάνη 4	43.7	54.4	24.48	0.00
Υπολεκάνη 5	35.6	53.2	49.44	99.78
Υπολεκάνη 6	41.4	55.4	33.82	42.58
Υπολεκάνη 7	43.7	55.9	27.92	59.38

Τα παραπάνω αποτελέσματα επαληθεύονται και από τον Πίνακα 7, όπου παρατίθεται η μέγιστη μηνιαία επιφανειακή απορροή όλων των υπολεκανών πριν και μετά την πυρκαγιά καθώς και το ποσοστό μεταβολής το μήνα Φεβρουάριο του 2011.

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της μέγιστης επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών πριν και μετά την πυρκαγιά τον Φεβρουάριο του 2011

Φεβρουάριος 2011	Μέγιστη επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά (mm)	Μέγιστη επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά (mm)	Μεταβολή (%)
Υπολεκάνη 1	70.55	108.53	53.80
Υπολεκάνη 2	86.82	112.63	29.72
Υπολεκάνη 3	75.39	105.44	39.86
Υπολεκάνη 4	78.03	107.28	37.49
Υπολεκάνη 5	62.47	104.02	66.50
Υπολεκάνη 6	75.74	113.59	49.97
Υπολεκάνη 7	79.53	113.59	42.83

Στον Πίνακα 8 παρατίθεται και μια ξηρή ημέρα του ίδιου έτους, συγκεκριμένα η 1/8/2011. Παρατηρείται ότι η επιφανειακή απορροή όλων των υπολεκανών είναι πολύ χαμηλή, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται το καλοκαίρι αλλά και της χαμηλής βροχόπτωσης. Την μεγαλύτερη μεταβολή επιφανειακής απορροής έχει η υπολεκάνη 6 και ύστερα οι υπολεκάνες 1, 7 και 2. Στις υπολεκάνες 3,4 και 5 το ποσοστό της μεταβολής της επιφανειακής απορροής είναι 0%.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών στις 1/8/2011

Γεγονός 1/8/2011	Επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά (mm)	Επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά (mm)	Μεταβολή (%)
Υπολεκάνη 1	0.05	0.06	9.72
Υπολεκάνη 2	0.17	0.17	4.22
Υπολεκάνη 3	0.12	0.12	0.00
Υπολεκάνη 4	0.13	0.13	0.00
Υπολεκάνη 5	0.00	0.00	0.00
Υπολεκάνη 6	0.05	0.06	15.48
Υπολεκάνη 7	0.11	0.11	6.60

Παράλληλα, στον Πίνακα 9, τον Αύγουστο του 2011 η επιφανειακή απορροή όλων των υπολεκανών παραμένει χαμηλή και την μεγαλύτερη μεταβολή κατέχει πρώτα η υπολεκάνη 6 και ύστερα οι υπολεκάνες 1, 7 και 2. Οι υπολεκάνες 3, 4 και 5 έχουν ποσοστό μεταβολής επιφανειακής απορροής 0%.

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μεταβολή της επιφανειακής απορροής όλων των υπολεκανών τον Αύγουστο του 2011

Αύγουστος 2011	Επιφανειακή απορροή πριν την πυρκαγιά (mm)	Επιφανειακή απορροή μετά την πυρκαγιά (mm)	Μεταβολή (%)
Υπολεκάνη 1	0.06	0.07	8.20
Υπολεκάνη 2	0.18	0.19	3.91
Υπολεκάνη 3	0.12	0.12	0.00
Υπολεκάνη 4	0.13	0.13	0.00
Υπολεκάνη 5	0.00	0.00	0.00
Υπολεκάνη 6	0.05	0.06	16.00
Υπολεκάνη 7	0.11	0.11	6.54

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η υδρολογική προσομοίωση τμήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού Κηφισού και πιο συγκεκριμένα η περιοχή της Βαρυμπόμπης, πριν και μετά από την δασική πυρκαγιά του έτους 2021. Η υδρολογική προσομοίωση έλαβε χώρα με το λογισμικό SWAT. Τα δεδομένα για την καμένη έκταση ελήφθησαν από την ιστοσελίδα European Forest Fire Information System (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/data.request.form/>), όπου παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες για τις πυρκαγιές για όλη την Ευρώπη. Από τη συνολική έκταση της λεκάνης που είναι περίπου 59 km², κάηκαν τα 27 km², συνεπώς κάηκε περίπου το 46% της λεκάνης. Λόγω του μεγάλου ποσοστού καμένης έκτασης, οι χρήσεις γης της λεκάνης μεταβλήθηκαν σημαντικά. Αναλυτικότερα, η μέγιστη απορροή στην έξοδο της λεκάνης, η οποία στις 18/11/2011 είχε τιμή πριν την πυρκαγιά 27.69 m³/s, μετά την πυρκαγιά ενδέχεται να αυξηθεί στα 36.43 m³/s, δηλαδή αύξηση 31.56%. Επίσης, από τα υδρογραφήματα της επιφανειακής απορροής που εξήχθησαν για τις 7 υπολεκάνες, που διαχωρίστηκε ολόκληρη η περιοχή μελέτης, ανάγεται το συμπέρασμα ότι την μεγαλύτερη μεταβολή της επιφανειακής απορροής είχε η υπολεκάνη 5, στην οποία βρισκόταν το μεγαλύτερο ποσοστό καμένης δασικής έκτασης. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν μέτρα προστασίας της περιοχής μελέτης από κάποια πιθανή πλημμύρα, ιδίως στην συγκεκριμένη περιοχή. Είναι πολύ σημαντικό να γίνουν αντιπλημμυρικά και αντιδιαβρωτικά έργα στη περιοχή μελέτης, τόσο για την προστασία των κατοίκων της περιοχής από πλημμύρες αλλά και για την προστασία του εδάφους από την διάβρωση και τη σταδιακή μετατροπή των χρήσεων γης στην αρχική τους κατάσταση.

Όσον αφορά στο υδρολογικό μοντέλο SWAT, πρόκειται για ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, το οποίο προσφέρει πολλές δυνατότητες στον χρήστη. Ωστόσο, τόσο το λογισμικό SWAT όσο και το ArcGIS χρειάζονται αρκετό χρόνο ώστε να εξοικειωθεί ο χρήστης.

Παρακάτω θα αναφερθούν κάποιες δυσκολίες που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας:

- Μια αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία ήταν αυτή της συλλογής των δεδομένων. Πρώτη προσπάθεια ώστε να ληφθούν τα μετεωρολογικά δεδομένα ήταν από το Υδροσκόπιο. Όμως δεν υπήρχαν δεδομένα για μεγάλες χρονικές περιόδους και υπήρχαν μεγάλα κενά μεταξύ τους. Επίσης, το λογισμικό SWAT, απαιτεί συγκεκριμένη μορφή αρχείων wgen, οπότε η συγγραφή τους στον κώδικα του SWAT θα ενείχε μεγάλη πιθανότητα λαθών. Έτσι τα μετεωρολογικά δεδομένα βρέθηκαν μέσω της ιστοσελίδας του SWAT.
- Επιπλέον, δυσκολία αντιμετωπίστηκε και στην εύρεση των εδαφολογικών δεδομένων και στη μετατροπή της βάσης δεδομένων ώστε το λογισμικό SWAT να αναγνωρίζει περιοχές και εδαφολογικά δεδομένα εκτός των ΗΠΑ.
- Ένα ακόμα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε είναι ότι η πρώτη προσομοίωση που έγινε έβγαλε σφάλμα καθώς τα αρχεία rte που αφορούσαν τα υδατορεύματα ήταν κενά. Χρειάστηκε να ξανά γίνει νέο project και να εισαχθούν ξανά τα αρχεία ώστε να τρέξει σωστά.
- Τέλος, το σημαντικότερο πρόβλημα που προέκυψε ήταν η έλλειψη δεδομένων μετρημένης απορροής. Γι' αυτό το λόγο, δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση και

επαλήθευση του μοντέλου και να γίνει σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών με πραγματικές μετρημένες τιμές της απορροής.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πολύ χρήσιμο θα ήταν να πραγματοποιηθεί υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης με κάποιο άλλο υδρολογικό μοντέλο, με σκοπό να διερευνηθεί ποιο μοντέλο προσομοιώνει καλύτερα το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης. Ταυτόχρονα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SWAT και σε λεκάνες απορροής με διαφορετικές συνθήκες βλάστησης, ώστε να αναπτυχθεί παραπάνω η χρήση του και να διορθωθούν τυχόν αστοχίες.

Παράλληλα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής της συγκεκριμένης εργασίας μελλοντικά, δηλαδή από το 2020 και μετά, είτε σε μεγάλες χρονοσειρές όπως πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία με περίοδο προσομοίωσης 2005-2019, είτε σε επίπεδο επεισοδίου βροχόπτωσης προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της λεκάνης με την πάροδο των χρόνων από την πυρκαγιά του 2021.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Αντωνίου Β. (2002) Το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον του λεκανοπεδίου Αθηνών. 6^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Τόμος II, 311-318.

Βαρσάμη Γ. (2014) Προσομοίωση υδρολογικής απόκρισης πριν και μετά από πυρκαγιά στην πειραματική λεκάνη Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διαπιστημονικό- Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία υδατικών πόρων».

Βαχαβιάλος Θ. (2011) Μεθοδολογία προσδιορισμού ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες σύμφωνα με την οδηγία 2007/60. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Εγκεκριμένο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (EL06) ΦΕΚ 2693 Β/ 06.07.2018.

Ζυμαράκη Μ. (2023) Προσομοίωση υδρολογική 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 και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.

Καπερώνης Σ. (2016) Μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού με χρήση του μοντέλου SWAT και προτάσεις διαχείρισης για την μείωση των εξαγόμενων ρύπων. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.

Κοταμπάση Χ. και Σκέντος Α. (2005) Γεωμορφολογική ανάλυση της υδρογραφικής λεκάνης απορροής του Κηφισού ποταμού και ανθρώπινες επεμβάσεις. Πτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας.

Λάμπρου Σ. (2021) Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων SWAT και LISFLOOD στον Άνω Ρου του Πηνειού ποταμού. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Λυμπερόπουλος Σ. (2008) Επίδραση δασικών πυρκαγιών στο πλημμυρικό καθεστώς λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ρέματος Γιαννούλα στην Πάρνηθα. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών.

Μαριολάκος Η., Φουντούλης Ι., Σιδέρης Χ., Χατούπης Θ. (2001) Μορφονοτεκτονική δομή του όρους Πάρνηθα Αττικής. Πρακτικά 9^{ου} Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας με έμφαση στη συμβολή των γεωεπιστημών στην ανάπτυξη, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τόμος XXXIV/1 σελ.183-190.

Μπαλούτσος Γ., Οικονόμου Α. και Καούκης Κ. (2001) Ο κίνδυνος πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά: Ανάλυση του προβλήματος και άμεσα μέτρα μείωσης των επιπτώσεων. Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων.

Μπατέλης Σ. (2012) Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο

Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Έργων Υποδομής & Αγροτικής Ανάπτυξης, Εμβάθυνση Διαχείρισης Υδατικών Πόρων.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L 327/1, 22 Δεκεμβρίου 2000.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης L 288/27, 6 Νοεμβρίου 2007.

Πάνου Ε. (2006) Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα- διαχείριση πλημμυρών στα πλαίσια της οδηγίας πλαίσιο 2000/60: η περίπτωση του Πηνειού Θεσσαλίας. Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό- Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».

Παπανικολάου Δ., Μπάση Ε., Κράνης Χ. και Δανάμος Γ. (2004) Παλαιογραφική εξέλιξη του Λεκανοπεδίου Αθηνών από το Άνω Μειόκαινο έως σήμερα. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

Τσακίρης Γ. (2013) Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων. Εκδόσεις Συμμετρία.

Τσιχριντζής Α. (2021) Εφαρμογή του μοντέλου SWAT στη λεκάνη απορροής του ποταμού Eel (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) κάτω από συνθήκες αλλαγής χρήσεων γης. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2017) 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (EL06).

Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών (2023) επικαιροποίηση master plan αντιπλημμυρικών έργων Αττικής - Παραδοτέο 8: Ζώνη Λεκανοπέδιο Αττικής.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., Haney E.B., Neitsch S.L. (2012) Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation. Texas Water Resources Institute No. 439.

Basso M., Vieira D., Ramos T., Mateus M. (2019) Assessing the adequacy of SWAT model to simulate postfire effects on the watershed hydrological regime and water quality. *Wiley, Land Degrad Dev.* 2020;31:619-631. <https://doi.org/10.1002/ldr.3476>.

Baltas E.A., Dervos N.A., and Mimikou M.A. (2007) Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1825-1829. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1825-2007>.

Batelis S.C, Nalbantis I. (2014) Potential Effects of Forest Fires on Streamflow in the Enipeas River Basin, Thessaly, Greece. *Environ.Process.* 1, 73-85. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0004-z>.

Boithias L., Sauvage S., Lenica A., Roux H., Abbaspour K., Larnier K., Dartus D., and Sánchez-Pérez J. (2017) Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water*, 9, 929. <https://doi.org/10.3390/w9120929>.

Goodrich D.C, Canfield H., Burns I., Semmens D.J., Miller S.N., Hernandez M., Levick L.R., Guertin D.P., Kepner W.G. (2005) Rapid Post Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GIS-based Hydrologic Modeling Tool. [https://doi.org/10.1061/40763\(178\)44](https://doi.org/10.1061/40763(178)44).

Koltsida E., Mamassis N., Kallioras A. (2021) Hydrological modeling using the SWAT Model in urban and peri-urban environments: The case of Kifissos experimental sub-basin (Athens, Greece). *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-482>.

Nalbantis I. & Lympelopoulous S. (2012) Assessment of flood frequency after forest fires in small ungauged basins based on uncertain measurements. *Hydrological Sciences Journal*, 57:1, 52-72. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.637041>.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R (2009) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.

Papathanasiou C., Alonistioti D., Kasela A., Makropoulos C., 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 Journal*, Vol 14, No 3, 294-302. <https://doi.org/10.30955/gnj.000877>

Από το διαδίκτυο

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ) , Κλιματικό Δελτίο Αύγουστος 2021
http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_month (Ημερομηνία πρόσβασης:
Ιανουάριος 2024)

Ο.ΦΥ.ΠΕ.Κ.Α. (2021), Μ.Δ Εθνικών Παρκών Πάρνηθας, Σχοινιά και Προστατευόμενων
Περιοχών Σαρωνικού Κόλπου <https://necca.gov.gr/mdpp/m-d-ethnikon-parkon-parnithas-schoinia-kai-prostatevomenon-periochon-saronikou-kolpou/> (Ημερομηνία πρόσβασης:
Ιανουάριος 2024)

Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας <https://floods.ypeka.gr/sdkp-lap/prelim-eval-2round/> (Ημερομηνία πρόσβασης: Δεκέμβριος 2023)

Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Δρυμού Πάρνηθας, Έντυπο Δημόσιο δάσος Τατοΐου
https://parnitha.net/wp-content/uploads/2020/10/2.-%CE%94%CE%AC%CF%83%CE%BF%CF%82-%CE%A4%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%AF%CE%BF%CF%85_compressed.pdf
(Ημερομηνία πρόσβασης: Δεκέμβριος 2023)

Copernicus Land Monitoring Service, Corine Lan Cover 2018
<https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover> (Ημερομηνία πρόσβασης: Μάρτιος
2023)

EFFIS- European Forest Fire System <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/data.request.form/>
(Ημερομηνία πρόσβασης: Μάρτιος 2023)

EFFIS STATISTICS PORTAL <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/> (Ημερομηνία
πρόσβασης: Δεκέμβριος 2023)

European Commission (2023), Floods
https://environment.ec.europa.eu/topics/water/floods_en (Ημερομηνία πρόσβασης:
Δεκέμβριος 2023)

Food and Agriculture Organization of the United States, Digital Soil Map of the World
<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8> (Ημερομηνία πρόσβασης: Ιούνιος 2023)

Meteosearch <https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm> (Ημερομηνία πρόσβασης:
Δεκέμβριος 2023)

National Geographic Society (2023), Wildfires, National Geographic
<https://education.nationalgeographic.org/resource/wildfires/> (Ημερομηνία πρόσβασης:
Δεκέμβριος 2023)

Northwest Fire Science Consortium (2019), NWFSC Fire Facts: What Are? Types of Fire
<https://www.nwfirescience.org/sites/default/files/publications/Types%20of%20Fire.pdf>
(Ημερομηνία πρόσβασης: Δεκέμβριος 2023)

W3S-Water <https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/> (Ημερομηνία πρόσβασης: Ιούνιος 2023)