



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**Σύγκριση μοντέλων γεγονότος και συνεχούς
προσομοίωσης για την εκτίμηση πλημμυρικών
μεγεθών. Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέδοντα**

Χρήστος Π. Ζωγάκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Μαμάσης,

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2013

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη &
Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

**Σύγκριση μοντέλων γεγονότος και συνεχούς προσομοίωσης για
την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών. Εφαρμογή στη λεκάνη
του Νέδοντα**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Χρήστος Π. Ζωγάκης
Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός
ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Αθήνα, Μάρτιος 2013

*Στους Φίλους, Αδερφούς
Κολλητούς...*

Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Μαμάση, για την άμεση αποδοχή της επίβλεψης της και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Οι γνώσεις που μου παρείχε σαν καθηγητής στα δύο εξάμηνα ήταν απαραίτητες για την ολοκλήρωση της εργασίας

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, για την επίβλεψη της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και για την καθημερινή υποστήριξη και καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Η βοήθεια του ήταν πολύτιμη και ουσιαστική.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνη Κουκουβίνο, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό, για το καθημερινό ενδιαφέρον του, τις συμβουλές και τη βοήθεια του σε καίρια ζητήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο Παναγιώτη Κοσσιέρη για την παρέα και την βοήθεια του, τους τελευταίους έξι μήνες όπως επίσης και όλο το παρεάκι που καθημερινά ανανεωνόταν στο (207) «Ελληνικό Ινστιτούτο Υδρολογίας».

Ευχαριστώ τον κ. Ευάγγελο Ρόζο, Πολιτικό Δρ. Μηχανικό για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε και τον κ. Σπυρίδωνα Λυκούδη για την άμεση βοήθεια που μας παρείχε για τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Μου είναι αδύνατο να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου Νίκο, Νίκο, Γιώργο και Ψηλό που αν και από μακριά ήταν και θα είναι «οι κολλητοί» όπως επίσης και τις φίλες μου Βάσω και Θοδώρα που περάσαμε άλλο ενάμισι χρόνο μαζί στην Αθήνα! Θα ήταν άδικο να μην ευχαριστήσω και την Βάσω μου, που ήταν το τελευταίο μισό χρόνο «δίπλα μου» είτε από κοντά είτε από μακριά.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω και την οικογένεια μου, που μου παρέχει ό,τι χρειαστώ και με στηρίζει σε ό,τι κάνω όλα αυτά τα χρόνια.

Χρήστος Ζωγάκης

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	iii
Ευρετήριο Διαγραμμάτων.....	vii
Ευρετήριο Σχημάτων	vii
Ευρετήριο Πινάκων	x
Ευρετήριο Φωτογραφιών.....	xi
Ευρετήριο Εικόνων.....	xii
Περίληψη	xiii
Extended Abstract.....	xv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1. Εισαγωγή	1
1.1. Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2. Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε	2
1.3. Δομή της εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
2. Υδρολογικά Μοντέλα	5
2.1. Γενικά	5
2.1.1. Μοντέλα γεγονότος.....	5
2.1.2 Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης.....	6
2.2. Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων	8
2.3. Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	11
3. Περιοχή Μελέτης.....	11
3.1. Εισαγωγή	11

3.2.	Γενική Περιγραφή Λεκάνης Απορροής Νέδοντα.....	12
3.3.	Χωρικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης.....	15
3.3.1.	Τοπογραφία.....	16
3.3.2.	Κάλυψη Γής.....	19
3.3.3.	Γεωλογία.....	22
3.3.4.	Υδρογεωλογία.....	26
3.4.	Θέσεις Εξοπλισμού.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		33
4.	Επεξεργασία Υδρολογικών Δεδομένων.....	33
4.1.	Εισαγωγή	33
4.2.	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού Συλλογής Δεδομένων	34
4.2.1.	Αυτόματοι Μετεωρολογικοί Σταθμοί.....	34
4.2.1.1.	Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Νέδουσας	36
4.2.1.2.	Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Νέδοντα –Λατομείο Μπάκα	37
4.2.1.3.	Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Τουριστικός Ταυγέτου	37
4.2.1.4.	Συμπλήρωση τιμών θερμοκρασίας	38
4.2.2.	Αυτόματοι Σταθμημετρικοί Σταθμοί	40
4.2.2.1.	Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Νέδοντα – Λατομείο Μπάκα.....	44
4.2.2.2.	Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Καρβελιώτη	46
4.2.2.3.	Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Αλαγονίας.....	47
4.3.	Σχέση στάθμης – παροχής.....	50
4.4.	Επιφανειακή ολοκλήρωση και υψομετρική αναγωγή σημειακών δεδομένων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης	53
4.4.1.	Επιφανειακή Ολοκλήρωση με την μέθοδο των Πολυγώνων Thiessen	53
4.4.2.	Υψομετρική αναγωγή	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	61
5. Μοντέλα Υδρολογικής Προσομοίωσης – HEC-HMS.....	61
5.1. Το μοντέλο HEC-HMS.....	61
5.2. Ανάλυση της λεκάνης στο HEC -GeoHMS	63
5.2.1. Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου για το HEC-HMS.....	66
5.3. Περιβάλλον HEC-HMS.....	68
5.3.1. Μοντέλο λεκάνης απορροής.....	68
5.3.1.1.Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης	70
5.3.1.2.Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας	71
5.3.1.3.Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής.....	72
5.3.1.4.Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής.....	80
5.3.1.5.Πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής.....	81
5.3.1.6.Πρότυπο διόδευσης και απώλειες στο υδατόρευμα.....	82
5.3.2. Μετεωρολογικό Μοντέλο.....	84
5.3.3. Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων	85
5.3.4. Εισαγωγή χρονοσειρών.....	86
5.3.5. Προσομοίωση – βαθμονόμηση Μοντέλου	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	91
6. Μοντέλα Υδρολογικής Προσομοίωσης – HYDROGEIOS.....	91
6.1. Το μοντέλο HYDROGEIOS.....	91
6.2. Ανάλυση της λεκάνης στο MapWindow	92
6.3. Περιβάλλον HYDROGEIOS.....	98
6.3.1. Δομή επιφανειακού συστήματος	99
6.3.2. Δομή υπόγειου συστήματος.....	101
6.3.3. Μετεωρολογικό μοντέλο	103

6.3.4. Εισαγωγή χρονοσειρών.....	104
6.3.5. Μεταβλητές ελέγχου – Αρχικές συνθήκες.....	105
6.3.6. Συνάρτηση Στόχου – Κριτήρια καλής προσαρμογής	107
6.4. Βαθμονόμηση Μοντέλου.....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	113
7. Παρουσίαση - Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	113
7.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων συνεχούς προσομοίωσης	114
7.1.1. Θέση υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας	114
7.1.2. Θέση υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη	118
7.1.3. Θέση υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα – έξοδος λεκάνης.....	123
7.1.4. Υδατικά ισοζύγια λεκάνης.....	128
7.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων επεισοδίων	133
7.2.1. Επεισόδιο Ιανουαρίου 2012.....	133
7.2.2. Επεισόδιο Φεβρουαρίου 2012	137
7.2.3. Επεισόδιο Απριλίου 2012	140
7.2.4. Εύρος τιμών παραμέτρων στο HEC-HMS	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	153
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	153
8.1. Συμπεράσματα.....	153
8.2. Προτάσεις.....	155
Βιβλιογραφία	157

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

<i>Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης θερμοκρασιών Νέδουσας – Τουριστικού Ταυγέτου.....</i>	39
<i>Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης θερμοκρασιών Λατομείου Μπάκα – Καλαμάτας – Νησάκι.....</i>	40
<i>Διάγραμμα 4.3: Μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης για εύρεση θερμοβαθμίδας για την περιοχή ελέγχου.....</i>	8
<i>Διάγραμμα 4.4: Μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης για εύρεση βροχοβαθμίδας για την περιοχή ελέγχου. Δεν βρέθηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.....</i>	59
<i>Διάγραμμα 5.1: Διαδικασία Υδρολογικής Προσομοίωσης της Λεκάνης με HEC-HMS.....</i>	63
<i>Διάγραμμα 5.2: Βήματα προπεξεργασίας Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων.....</i>	64
<i>Διάγραμμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης με HEC-HMS.....</i>	70
<i>Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων του λογισμικού HYDROGEIOS (Ευστρατιάδης, 2008).....</i>	91
<i>Διάγραμμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής επιφανειακού υδατικού ισοζυγίου του μοντέλου HYDROGEIOS.....</i>	99
<i>Διάγραμμα 7.1: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ωριαίο βήμα στο HEC-HMS.....</i>	129
<i>Διάγραμμα 7.2: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ημερήσιο βήμα στο HEC-HMS.....</i>	130
<i>Διάγραμμα 7.3: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ωριαίο βήμα στο HYDROGEIOS.....</i>	131
<i>Διάγραμμα 7.4: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ημερήσιο βήμα στο HYDROGEIOS.....</i>	132

Ευρετήριο Σχημάτων

<i>Σχήμα 3.1: Ονομασίες των επτά υπολεκανών της λεκάνης απορροής του Νέδοντα.....</i>	15
<i>Σχήμα 3.2: Τοπογραφικό ανάγλυφο της ευρύτερης λεκάνης απορροής Νέδοντα και οι θέσεις μέτρησης των υδρολογικών και μετεωρολογικών μεγεθών.....</i>	17
<i>Σχήμα 3.3: Κλίσεις εδάφους λεκάνης απορροής Νέδοντα.....</i>	18
<i>Σχήμα 3.4: Ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000.....</i>	20
<i>Σχήμα 3.5: Ομαδοποίηση Ψηφιακού μοντέλου χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000 με χρήση Arcmap για το HEC-hms.....</i>	21

<i>Σχήμα 3.6: Ομαδοποίηση Ψηφιακού μοντέλου χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000 με χρήση Map Window για την Υδρογείο.....</i>	22
<i>Σχήμα 3.7: Γεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με τις γεωτεκτονικές ενότητες σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME).....</i>	24
<i>Σχήμα 3.8: Γεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με τις ηλικίες των πετρωμάτων του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (IGME).....</i>	26
<i>Σχήμα 3.9: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με την κατάταξη των εδαφών από την SCS για τις ανάγκες του προγράμματος HEC-hms.....</i>	27
<i>Σχήμα 3.10: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί για τις ανάγκες της Υδρογείου.....</i>	28
<i>Σχήμα 4.1: Κώνος διασποράς δέσμης και επιφάνεια μέτρησης σταθμήμετρου υπερήχων.....</i>	41
<i>Σχήμα 4.2: Δείκτης ποιότητας σήματος στον σταθμό Αλαγονίας.....</i>	42
<i>Σχήμα 4.3: Συνθήκες ροής στο σημείο μέτρησης της στάθμης.....</i>	51
<i>Σχήμα 4.4:Παροχές για τον σταθμημετρικό σταθμό Λατομείο Μπάκα.....</i>	53
<i>Σχήμα 4.5: Πολύγωνα Thiessen για την περιοχή μελέτης.....</i>	55
<i>Σχήμα 5.1 ,5.2: Στα αριστερά απεικονίζεται το αρχικό υδρογραφικό δίκτυο και δεξιά το κύριο υδρογραφικό δίκτυο ύστερα από τον ορισμό κατωφλίου 10 km².....</i>	65
<i>Σχήμα 5.3 ,5.4: Στα αριστερά απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο κατηγοριοποιημένο και δεξιά οι υπολεκάνες που δημιουργήθηκαν από αυτό.....</i>	66
<i>Σχήμα 5.5 ,5.6: Στα αριστερά απεικονίζονται τα σημεία ελέγχου και τα όρια της νέας περιοχής και δεξιά η τελική σχηματοποίηση της λεκάνης.....</i>	67
<i>Σχήμα 5.7: Λεκάνη απορροής Νέδοντα στο λογισμικό HEC-HMS.....</i>	69
<i>Σχήμα 5.8 ,5.9: Στα αριστερά απεικονίζονται οι παράμετροι μιας υπολεκάνης για την δεξαμενή κατακράτησης και δεξιά για την δεξαμενή εδαφικής επιφάνεια.....</i>	72
<i>Σχήμα 6.1: Οι υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο με τους υδρομετρικούς σταθμούς δημιουργημένο σε περιβάλλον MapWindow.....</i>	94
<i>Σχήμα 6.2: Τα υπόγεια κύτταρα και το υδρογραφικό δίκτυο με τις θέσεις των πηγών σε περιβάλλον MapWindow.....</i>	96
<i>Σχήμα 6.3: Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU) της Λεκάνης.....</i>	97
<i>Σχήμα 6.4: Σχηματική απεικόνιση δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος μεταξύ γειτονικών δεξαμενών (Ρόζος 2010).....</i>	102
<i>Σχήμα 7.1: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.....</i>	114
<i>Σχήμα 7.2: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HYDROGEIOS.....</i>	115

<i>Σχήμα 7.3: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ημερήσιο βήμα.....</i>	116
<i>Σχήμα 7.4: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.....</i>	117
<i>Σχήμα 7.5: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HYDROGEIOS.....</i>	117
<i>Σχήμα 7.6: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα.....</i>	118
<i>Σχήμα 7.7: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS.....</i>	119
<i>Σχήμα 7.8: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HYDROGEIOS.....</i>	120
<i>Σχήμα 7.9: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτη σε ημερήσιο βήμα.....</i>	120
<i>Σχήμα 7.10: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS.....</i>	121
<i>Σχήμα 7.11: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HYDROGEIOS.....</i>	122
<i>Σχήμα 7.12: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτη σε ωριαίο βήμα.....</i>	122
<i>Σχήμα 7.13: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	124
<i>Σχήμα 7.14: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HYDROGEIOS.....</i>	125
<i>Σχήμα 7.15: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ημερήσιο βήμα.....</i>	125
<i>Σχήμα 7.16: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	126
<i>Σχήμα 7.17: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HYDROGEIOS.....</i>	127
<i>Σχήμα 7.18: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα.....</i>	127
<i>Σχήμα 7.19: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS.....</i>	134

<i>Σχήμα 7.20: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	135
<i>Σχήμα 7.21: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτης σε ωριαίο βήμα.....</i>	136
<i>Σχήμα 7.22: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα.....</i>	136
<i>Σχήμα 7.23: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.....</i>	138
<i>Σχήμα 7.24: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	138
<i>Σχήμα 7.25: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα.....</i>	139
<i>Σχήμα 7.26: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα.....</i>	141
<i>Σχήμα 7.27: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.....</i>	140
<i>Σχήμα 7.28: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS.....</i>	142
<i>Σχήμα 7.29: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	142
<i>Σχήμα 7.30: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα.....</i>	143
<i>Σχήμα 7.31: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτης σε ωριαίο βήμα.....</i>	144
<i>Σχήμα 7.32: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα.....</i>	144
<i>Σχήμα 7.33: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS.....</i>	150
<i>Σχήμα 7.34: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.....</i>	150

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Εμβαδά των υπολεκανών όπως υπολογίστηκαν από τα δύο Σ.Γ.Π.....	15
---	----

Πίνακας 3.2 Υψόμετρα και κλίσεις των υπολεκανών.....	18
Πίνακας 4.1: Απόσταση σε μέτρα από τον αναβαθμό και το αντίστοιχο βάθος σε εκατοστά.....	50
Πίνακας 4.2: Συντελεστές βάρους <i>Thiessen</i> για τις υπολεκάνες της λεκάνης του Νέδοντα.....	56
Πίνακας 4.3: Συντελεστές υψομετρικής αναγωγής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για κάθε υπολεκάνη.....	60
Πίνακας 5.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής.....	68
Πίνακας 5.2: Κατάταξη εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητά τους σύμφωνα με SCS.....	74
Πίνακας 5.3: Τύποι προηγούμενων συνθηκών υγρασίας.....	75
Πίνακας 5.4: Τυπικές τιμές του CN για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου II.....	76
Πίνακας 5.5: Ομαδοποίηση χρήσεων γης.....	77
Πίνακας 5.6: Αριθμός CN για κάθε δυνατή περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα.....	77
Πίνακας 5.7: Τελικές τιμές του CN για κάθε υπολεκάνη.....	78
Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU) λεκάνης.....	98
Πίνακας 7.1: Μέτρα επίδοσης των μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης	128
Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων	132
Πίνακας 7.3 Σταθερές τιμές σε όλες τις προσομοιώσεις.....	145
Πίνακας 7.4: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W120.....	146
Πίνακας 7.5: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W170.....	146
Πίνακας 7.6: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W180.....	147
Πίνακας 7.7: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W60.....	147
Πίνακας 7.8: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W70.....	148
Πίνακας 7.9: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W90.....	148
Πίνακας 7.10: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W130.....	149
Πίνακας 7.11: Μέτρα επίδοσης των μοντέλων στην προσομοίωση των επεισοδίων	151

Ευρετήριο Φωτογραφιών

Φωτογραφία 3.1, 3.2: Μετεωρολογικός σταθμός Νέδουσα.....	30
Φωτογραφία 3.3: Θέση μετεωρολογικού σταθμού Αλαγονίας.....	30
Φωτογραφία 3.4: Θέση μετεωρολογικού σταθμού Τουριστικού Ταυγέτου αντίστοιχα.....	31
Φωτογραφία 4.1, 4.2: Βροχόμετρο Γέφυρας Καρβελίου. και βροχόμετρο Νέδοντα (λατομείο Μπάκα) αντίστοιχα.....	35
Φωτογραφία 4.3: Σύστημα τηλεμετρίας στον σταθμημετρικό σταθμό Αλαγονίας.....	44
Φωτογραφία 4.4: Σταθμημετρικός σταθμός Νέδοντα (λατομείο Μπάκα).....	46

<i>Φωτογραφία 4.5: Σταθμημετρικός σταθμός Γέφυρας.....</i>	48
<i>Φωτογραφία 4.6: Σταθμημετρικός σταθμός Αλαγονίας (Νερόμυλος Ρεντίφη).....</i>	50

Ευρετήριο Εικόνων

<i>Εικόνα 3.1:Οι δύο κοίτες του Νέδοντα. Με μωβ οροθετείται το ιστορικό κέντρο της Καλαμάτας με κόκκινο το κάστρο της πόλης και με γαλάζιο η περιοχή «Νησάκι».....</i>	13
<i>Εικόνα 3.2: Λεκάνης απορροής Νέδοντα και η θέση της στο χάρτη των υδατικών διαμερισμάτων της Ελλάδας.....</i>	14
<i>Εικόνα 5.1 ,5.2: Στα αριστερά απεικονίζονται οι παράμετροι μιας υπολεκάνης για την δεξαμενή κατακράτησης και δεξιά για την δεξαμενή εδαφικής επιφάνεια.....</i>	72
<i>Εικόνα 5.3: Παράμετροι της μεθόδου απωλειών εδαφικής υγρασίας</i>	79
<i>Εικόνα 5.4: Παράμετροι της μεθόδου βασικής απορροής για την προσομοίωση επεισοδίου βροχής.....</i>	81
<i>Εικόνα 5.5: Παράμετροι της μεθόδου βασικής απορροής για την συνεχή προσομοίωση.....</i>	82
<i>Εικόνα 5.6, 5.7: Παράμετροι της μεθόδων διόδευσης πλημμύρας και απωλειών αντίστοιχα στο υδατόρευμα.....</i>	83
<i>Εικόνα 5.8: Μέση μηνιαία εξατμοδιαπνοή για μία υπολεκάνη.....</i>	85
<i>Εικόνα 5.9, 5.10 5.11: Τα χρονικά διαστήματα προσομοιώσεων επεισοδίων.....</i>	86
<i>Εικόνα 5.12, 5.13: Στα αριστερά είναι ένας γενικός πίνακας αποτελεσμάτων και αριστερά ο πίνακας των τιμών που βελτιστοποιούνται.....</i>	88
<i>Εικόνα 5.14, 5.15: Στα αριστερά είναι το παρατηρημένο και υπολογισμένο υδρογράφημα και δεξιά ο πίνακας της τιμής του σφάλματος κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης.....</i>	89
<i>Εικόνα 6.1: Η υπολογιστική διαδικασία στο άρθρωμα MWHydrogeios.....</i>	93
<i>Εικόνα 6.2: Το περιβάλλον HYDROGEIOS 2.1.....</i>	99
<i>Εικόνα 6.3, 6.4: Στα αριστερά είναι η χρονοσειρά βροχόπτωσης και δεξιά της δυνητικής εξατμοδιαπνοής όπως αυτές εισάγονται στο μοντέλο HYDROGEIOS.....</i>	105
<i>Εικόνα 6.5: Καρτέλα για τμήμα υδατορεύματος (w90) στο μοντέλο HYDROGEIOS. στο κόκκινο κύκλο φαίνεται ο ορισμός του χρόνου διόδευσης και με τον κίτρινο ο συντελεστής διήθησης.....</i>	106
<i>Εικόνα 6.6: Στα αριστερά είναι το παρατηρημένο και υπολογισμένο υδρογράφημα και δεξιά ο πίνακας της τιμής του σφάλματος κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης.....</i>	112

Περίληψη

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση και σύγκριση δύο κατηγοριών ευρέως χρησιμοποιούμενων υδρολογικών μοντέλων, των μοντέλων γεγονότος και των μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης, με τη βοήθεια εφαρμογής τους στη λεκάνη απορροής του ποταμού Νέδοντα. Η λεκάνη επιλέχθηκε αφού σε αυτή διατίθενται διαδικτυακά, σε πραγματικό χρόνο, δεδομένα βροχόπτωσης και στάθμης.

Τα βασικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι από την μία τα προγράμματα HEC-HMS 3.5 και Arc-GIS 10, ενώ από την άλλη, τα προγράμματα HYDROGEIOS και MapWindow 4.7. Τα HEC-HMS και HYDROGEIOS χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης και τα Arc-GIS και MapWindow για την επεξεργασία των χωρικών δεδομένων και την οπτικοποίηση του τελικού σχηματισμού της υπό μελέτη λεκάνης απορροής

Η περιοχή που εξετάστηκε, είναι η λεκάνη απορροής του Νέδοντα στο νομό Μεσσηνίας με έκταση 120 km^2 . Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν χωρικά δεδομένα (ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, χρήσεις γης και γεωλογία), βροχομετρικά δεδομένα από τέσσερις σταθμούς (Καλαμάτα- Νησάκι, Λατομείο Μπάκα, Νέδουσα, Τουριστικός Ταυγέτου), με χρονικό βήμα 15 min και σταθμημετρικά δεδομένα από τρεις σταθμούς (Λατομείο Μπάκα, Αλαγονία, Καρβελιώτης) με χρονικό βήμα επίσης 15 min.

Η συνεχής προσομοίωση ήταν για το χρονικό διάστημα ενός έτους ($1^{\text{η}}$ Σεπτεμβρίου 2011 έως $31^{\text{η}}$ Αυγούστου 2012) σε ημερήσιο και ωριαίο βήμα ενώ η προσομοίωση γεγονότος εφαρμόστηκε σε τρία επεισόδια ένα τον Ιανουάριο, ένα τον Φεβρουάριο και ένα τον Απρίλιο. Για την προσομοίωση η λεκάνη χωρίστηκε σε υπολεκάνες στις συμβολές των υδατορευμάτων και ανάντη των σταθμών μέτρησης απορροής. Υπολογίστηκαν υδρογραφήματα σε κάθε υπολεκάνη και στην έξοδο της λεκάνης και για τα τρία επεισόδια που επιλέχθηκαν. Ακολούθησε βαθμονόμηση των δύο υδρολογικών μοντέλων στις θέσεις όπου υπήρχαν παρατηρημένα υδρογραφήματα.

Τέλος καταρτίστηκαν τα υδρολογικά ισοζύγια των λεκανών απορροής και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων (HEC-HMS και HYDROGEIOS)

χρησιμοποιώντας τον δείκτη αποτελεσματικότητας (efficiency). Τα αποτελέσματα των επεισοδίων του HEC συγκρίθηκαν με τα ωριαία αποτελέσματα του HYDROGEIOS και έγινε προσπάθεια επαλήθευσης των παραμέτρων του ενός επεισοδίου στο άλλο.

Extended Abstract

Introduction - Aim

In the framework of this master thesis, named as, “Comparison of event-based and continuous simulation models for the assessment of floods - Implementation in the river basin of Nedontas”, two widely used types of hydrologic models, are investigated and compared. An event-based and a continuous hydrologic model were applied in the catchment of Nedontas River, in order to assess their effectiveness in simulating the various hydrological processes. The selection of this basin is based on the fact that rainfall and runoff data are available at a real-time basis.

Tools

The software used for the implementation of this project is the following:

- HEC-HMS, hydrological by the engineer corps of the U.S. Army
- HEC-DSSVue by the engineer corps of the U.S. Army
- HYDROGEIOS hydrological by the research team ITIA.
- Hydrognomon application for the analysis and processing of hydrological data, by the research team ITIA.
- ArcGIS program group is managing geographic information systems of ESRI.
- Map Window is a program for managing geographic information systems.
- Microsoft Office 2007 (word, excel, power point, picture manager)

It is worth mentioning that the above mentioned software packages are free and available on Internet (apart from ArcGIS and Microsoft Office). In this master thesis, the following versions were used: HEC-HMS 3.5, HEC-DSSVue 2.1, HYDROGEIOS 2.1, Hydrognomon 4 and MapWindow 4.7. In addition, for the preparation of various data at Geographic Information System (G.I.S), author used HEC-GeoHMS for ArcGis 10 and MWHydrogeios for MapWindow 4.7

Structure of the thesis

The methodology developed, throughout the thesis is summarized as follows:

- Overview of theoretical base concerning hydrologic model
- Presentation of study area and meteorological-hydrometric equipment.
- Processing of raw data and editing with softwares Hydrognomon 4 and HEC-DSSVue 2.1.
- Processing of watershed's digital elevation model in ArcGIS 10 environment using HEC-GeoHMS library.
- Processing of watershed's digital elevation model in MapWindow 4.7 environment using MWHydrogeios library.
- Processing of hydrologic response for each sub-basin and hydrographs' configuration, using HEC-HMS 3.5.
- Hydrologic model calibration with the use of stage measurements, using HEC-HMS 3.5.
- Processing of hydrologic response of each sub-basin and configuration of hydrographs', using HYDROGEIOS 2.1.
- Hydrologic model calibration with the use of stage measurements, using HYDROGEIOS 2.1.
- Presentation of results and comparison between the two models examined
- Conclusions and proposals for future research.

Case study

The under investigation area, comprises the Nedonta river basin located at Messinias' prefecture, covering 120 km². During the implementation, geospatial data (digital elevation model, land use and geological characteristics) in combination with a 15 min time step rainfall data from four gauges (Kalamata-Nisaki, Latomeio-Mpaka, Nedousa, Touristikos-Taygetos), were used. Additionally, for simulation purposes, stage data from three gauge stations with a time step of 15 min (Latomeio-Mpaka, Alagonia, Karveliotis) were also used.

Simulation - Calibration of hydrologic model

The continuous simulation was implemented for one year (from 1st of September 2011 until the 31st of August 2012) at daily and hourly time scale, whereas the event-based simulation was focused on three representative hydrologic events (January, February and April). Basin was splitted into sub-basins at the confluences of the streams and the runoff gauges. The hydrographs was conducted not only for each sub-basin but also at the output of the river basin (figure 1, 2) for all three chosen hydrologic episodes. Thereafter, the calibration of the two hydrologic models was applied at the positions of measured data.

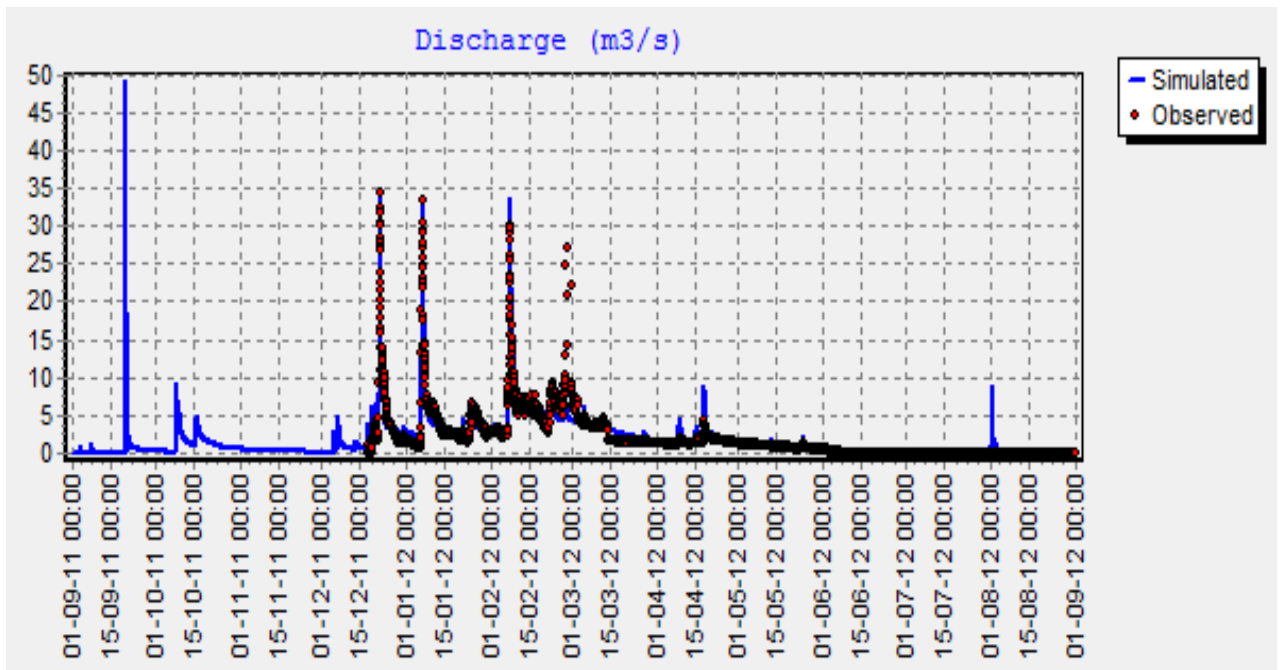


Figure 1: Hydrograph at river basin outlet for one year simulation (HYDROGEIOS model)

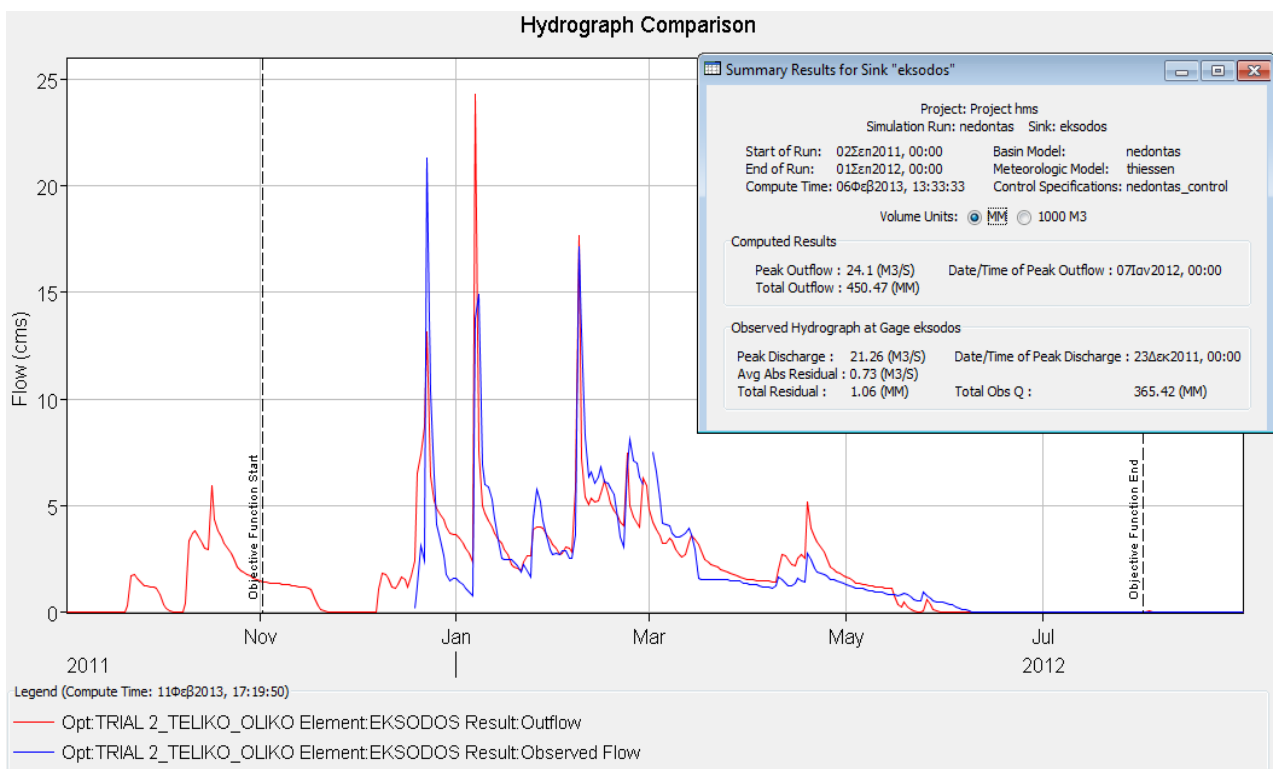


Figure 2: Hydrograph at river basin outlet for one year simulation (HEC-HMS model)

Comparison

Water balances of the three sub-basins where stage data were available were computed and the results of two simulation models (HEC-HMS and HYDROGEIOS) were compared, using the efficiency index (*figure 3*).

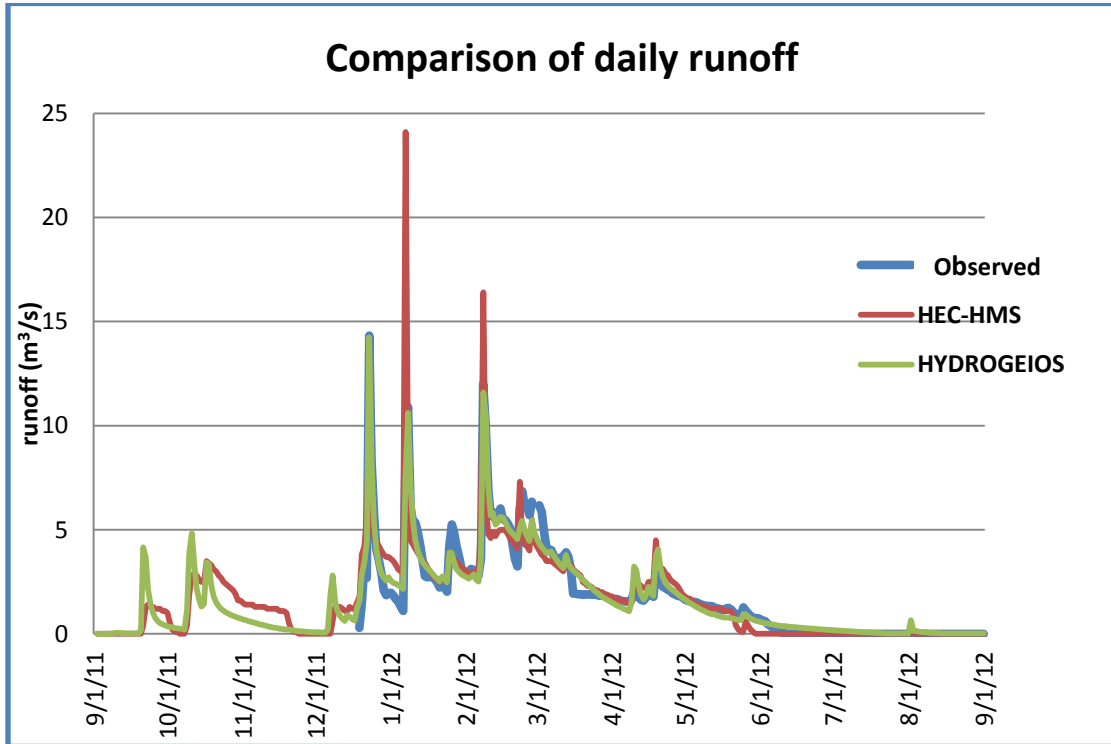


Figure 3: Comparison of the floodplain inundation for the two rainfall events.

The results concerning the three episodes, derived from HEC-HMS model, were compared with the results from HYDROGEIOS model. Following, a summarizing table is presented to perform the efficiency ratio of the models, to each position, for all the rainfall episodes. It is worthwhile to refer that HYDROGEIOS is performed better than HEC-HMS in two first episodes, at the gauge “Latomeio – Mpaka”.

Table: Efficiency ratio in the three gauges for both models

Month	Model	Latomeio Mpaka	Karveliotis	Alagoniaa
January	HEC-HMS	0.89	0.95	-
	HYDROGEIOS	0.90	0.70	-
February	HEC-HMS	0.84	-	0.77
	HYDROGEIOS	0.88	-	-1.25
April	HEC-HMS	0.86	0.84	0.69
	HYDROGEIOS	-9.63	0.45	0.38

We also tried to apply the parameters of each episode to the others (*figure 4*). Moreover, for the episode of April, the CN numbers are retained stable for each sub-basin. Consequently the CN numbers weren't used in the process of calibration. Following, we validated the others episodes with these CN values. The results weren't satisfactory. Therefore, in the two other episodes, the CN numbers were considered as a parameter of each sub-basin, so it is used in the calibration.

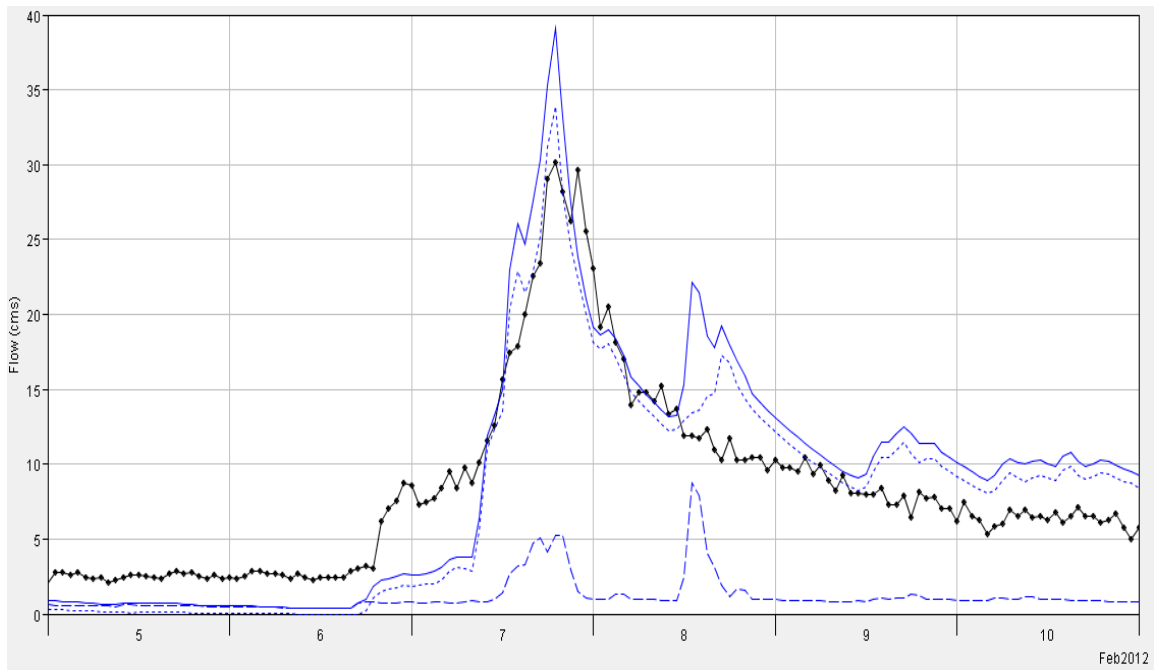


Figure 4: Apply the parameters of January episode to the February episode

Evaluation of the study

We have to stress how important is the continuous measurement of hydrologic variables, as it happens in the watershed of Nedonta. Many measurements, in many locations enhance the interpretation of the hydrosystem and reduce the operations' uncertainties. It is certain, that we will gain better results in the future, if we have reliable hydrological information.

Under some conditions, such as very large series of data, using stochastic timeseries, small time steps and appropriate hydrological models, the continuous simulation models, such as HYDROGEIOS, can simulate accurately rainfall episodes.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, έγκειται αρχικά στην διερεύνηση και σύγκριση δύο κατηγοριών ευρέως χρησιμοποιούμενων υδρολογικών μοντέλων. Οι κατηγορίες αυτές, είναι τα μοντέλα γεγονότος και τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης. Έπειτα, γίνεται εφαρμογή των μοντέλων με ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης υδρολογικής μελέτης, η οποία έχει στόχο την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών για μία συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.

Η περιοχή που εξετάστηκε, είναι η λεκάνη απορροής του Νέδοντα στο νομό Μεσσηνίας με έκταση 120 km². Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν χωρικά δεδομένα (ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, χρήσεις γης και γεωλογία), βροχομετρικά δεδομένα (από τέσσερις σταθμούς, με χρονικό βήμα 15 min) και σταθμημετρικά δεδομένα (από τρεις σταθμούς, με χρονικό βήμα επίσης 15 min).

Οι βασικοί στόχοι προς επίτευξη αυτής της εργασίας είναι δύο. Η συνεχής υδρολογική προσομοίωση, ενός έτους αρχικά σε ημερήσιο βήμα και στη συνέχεια σε ωριαίο και με τα δύο λογισμικά, αλλά και η προσομοίωση τριών μεμονωμένων επεισοδίων βροχής σε τρεις διαφορετικούς μήνες, σε ωριαίο βήμα με το μοντέλο HEC-HMS και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με την συνεχή προσομοίωση του μοντέλου HYDROGEIOS. Υπολογίστηκαν υδρογραφήματα σε κάθε υπολεκάνη και στην έξοδο της λεκάνης και για τα τρία επεισόδια που επιλέχτηκαν. Ακολούθησε βαθμονόμηση των δύο υδρολογικών μοντέλων στις θέσεις όπου υπήρχαν παρατηρημένα υδρογραφήματα.

1.2. Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας είναι τα εξής προγράμματα:

- HEC-HMS, κατασκευάστηκε από το μηχανικό σώμα του Αμερικανικού Στρατού
- HEC-DSSVue, κατασκευάστηκε από το μηχανικό σώμα του Αμερικανικού Στρατού
- HYDROGEIOS, κατασκευάστηκε από την ερευνητική ομάδα ΙΤΙΑ.
- Hydrognomon, κατασκευάστηκε από την ερευνητική ομάδα ΙΤΙΑ.
- ArcGIS, είναι ομάδα προγραμμάτων διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών της ESRI.
- Map Window, είναι πρόγραμμα διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών.
- Microsoft Office 2007 (word, excel, power point, picture manager).

Τα προγράμματα αυτά διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο (εκτός από το ArcGIS και το Microsoft Office) και έτσι κάθε ενδιαφερόμενος μπορεί να τα χρησιμοποιήσει . Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι εκδόσεις HEC-HMS 3.5, HEC-DSSVue 2.1, HYDROGEIOS 2.1, Hydrognomon 4, Map Window 4.7. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε βοηθητικό λογισμικό για την προετοιμασία των δεδομένων στα προγράμματα διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών. Το HEC-GeoHMS για το ArcGIS 10 και το MWHydrogeios. για το Map Window 4.7.

1.3. Δομή της εργασίας

Συνοπτικά, η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στα ακόλουθα κεφάλαια διαρθρώνεται ως εξής:

- Παρουσίαση θεωρητικού υποβάθρου υδρολογικών μοντέλων.
- Παρουσίαση περιοχής και μετεωρολογικού - υδρομετρικού εξοπλισμού.

- Επεξεργασία πρωτογενών υδρολογικών δεδομένων και προετοιμασία τους για εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα με τα λογισμικά Hydrognomon 4, HEC-DSSVue 2.1.
- Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων της περιοχής μελέτης. Ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS 10 και χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.
- Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων της περιοχής μελέτης. Ανάλυση σε περιβάλλον Map Window 4.7 και χρήση της εργαλειοθήκης MWHydrogeios.
- Υπολογισμός υδρολογικής απόκρισης κάθε υπολεκάνης και κατάρτιση υδρογραφημάτων. Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-HMS 3.5.
- Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου με τη χρήση παρατηρήσεων στάθμης. Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-HMS 3.5.
- Υπολογισμός υδρολογικής απόκρισης κάθε υπολεκάνης και κατάρτιση υδρογραφημάτων σε κάθε μία. Ανάλυση σε περιβάλλον HYDROGEIOS 2.1
- Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου με τη χρήση παρατηρήσεων στάθμης. Ανάλυση σε περιβάλλον HYDROGEIOS 2.1.
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων και σύγκριση μοντέλων.
- Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Υδρολογικά Μοντέλα

2.1. Γενικά

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών, που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά δύσκολο να μετρηθούν στο πεδίο. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν (Ευστρατιάδης, 2008):

- Μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, όπου η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), στις οποίες αγνοούνται οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν ενδιαφέρουν στη μελέτη, όπως η εξάτμιση και η διήθηση.
- Τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας, όπου η διαδικασία διέπεται, εν μέρει από κάποιο φυσικό υπόβαθρο και χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης, μέσω των οποίων αναπαρίστανται οι κύριες τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού.

Στη συνέχεια, επιχειρείται συνοπτική επισκόπηση των υδρολογικών μοντέλων πλημμυρών, με βάση της διάκριση σε μοντέλα γεγονότος και μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης.

2.1.1. Μοντέλα γεγονότος

Το μοντέλα γεγονότος υπολογίζουν μονοσήμαντα το υδρογράφημα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς. Αν και αποτελεί την προσφορότερη

προσέγγιση μηχανικού, η έννοια της προσομοίωσης γεγονότος περιλαμβάνει αρκετές αυθαίρετες υποθέσεις, οι επιπτώσεις των οποίων είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Οι κυριότερες αφορούν στο απλοποιημένο σχήμα του υδρογραφήματος, στην έννοια της κρίσιμης διάρκειας βροχής, στην αβεβαιότητα που διέπει τον ορισμό των συνθηκών υγρασίας, καθώς και στη θεμελιώδη υπόθεση της εξίσωσης της περιόδου επαναφοράς της καταιγίδας σχεδιασμού και του παραγόμενου υδρογραφήματος (Grimaldi et al., 2012a). Επιπλέον, η υποκειμενική διάκριση της απορροής σε πλημμυρική και βασική, καθιστά αρκετά προβληματική τη βαθμονόμηση των μοντέλων γεγονότος, ιδιαίτερα σε λεκάνες με σημαντική βασική ροή (Boughton and Droop, 2003). Είναι κοινά αποδεκτό ότι το βασικότερο μειονέκτημα των μοντέλων γεγονότος είναι η υπόθεση συγκεκριμένων αρχικών συνθηκών υγρασίας κατά την έναρξη της καταιγίδας, ενώ στην πραγματικότητα οι συνθήκες αυτές μεταβάλλονται, με συνέπεια από το ίδιο προφίλ καταιγίδας να μπορεί να παραχθεί πληθώρα πλημμυρικών υδρογραφημάτων (Berthet et al., 2009 Pathiraja et al., 2012).

Για παράδειγμα, στη μέθοδο SCS-CN (Soil Conservation Service, 1972) λαμβάνεται μια τυπική τιμή του CN (συνήθως για μέσες συνθήκες υγρασίας, ήτοι τύπου II), με συνέπεια να έχει επικρατήσει η εντύπωση πως η εν λόγω παράμετρος αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της κάθε υπολεκάνης, ενώ πρόκειται για μεταβλητή (Ευστρατιάδης 2012), η οποία μάλιστα όπως αποδεικνύεται στην παρούσα μελέτη είναι και μεγάλης μεταβλητότητας.

2.1.2 Μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η πιθανότητα των ακραίων πλημμυρών είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί ταυτόχρονα μια στατιστικά συνεπής περιγραφή των φορτίσεων (βροχόπτωση) και μια ρεαλιστική αναπαράσταση των μηχανισμών απορροής. Όπως αναφέρθηκε, συνήθως η μοντελοποίηση των πλημμυρών αντιμετωπίζεται με εργαλεία γεγονότος, τα οποία χρησιμοποιούν ντετερμινιστικές καταιγίδες σχεδιασμού και εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης και του μετασχηματισμού της σε απορροή. Ωστόσο υπάρχουν πολλές αδυναμίες στις προσεγγίσεις αυτές, ειδικά όταν εφαρμόζονται σε μεγάλης κλίμακας λεκάνες.

Οι ευρέως εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες κατασκευής καταγίδων σχεδιασμού αδυνατούν να περιγράψουν σωστά τη μεταβλητότητα της βροχόπτωσης, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τις χρονικές και χωρικές συσχετίσεις των ιστορικών δειγμάτων. Για παράδειγμα, θεωρείται ότι οι καταγίδες εισόδου όλων των υπολεκανών αντιστοιχούν στην ίδια περίοδο επαναφοράς.

Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα γεγονότος δεν επιτρέπουν την ερμηνεία της πλημμυρικής διακινδύνευσης ως συνδυασμένης πιθανότητας όλων των διεργασιών που επηρεάζουν και αλληλεπιδρούν στην παραγωγή της απορροής, μεταξύ των οποίων οι αρχικές συνθήκες υγρασίας αλλά και η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης (Efstratiadis and Papalexίου, 2010).

Τα σχήματα συνεχούς προσομοίωσης βασίζονται στη σύζευξη ενός μοντέλου βροχής-απορροής για την παραγωγή χρονοσειρών παροχών. Μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν στη σύζευξη ενός στοχαστικού μοντέλου, για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών παροχών. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα αναφορών σε τέτοιες προσεγγίσεις, καθώς η συνεχής προσομοίωση βρίσκεται στην αιχμή της έρευνας (π.χ. Boughton and Droop, 2003· Haberlandt *et al.*, 2008· Moretti and Montanari, 2007, 2008· Blazkova and Beven, 2009· Calver *et al.*, 2009· Viviroli *et al.*, 2009· Grimaldi *et al.*, 2012c).

Από τη στατιστική ανάλυση των προσομοιωμένων αποκρίσεων του υδρολογικού μοντέλου προκύπτει το υδρογράφημα σχεδιασμού (ή η παροχή αιχμής), που αντιστοιχεί στη ζητούμενη περίοδο επαναφοράς (Pramanik *et al.*, 2010· Serinaldi and Grimaldi, 2011). Προφανώς, ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς. Για την ανάλυση εξαιρετικά ακραίων γεγονότων, της τάξης των 1000 ετών, απαιτούνται συνθετικές χρονοσειρές μήκους χιλιάδων ετών, προκειμένου να εξαχθούν ικανοποιητικά ακριβή στατιστικά συμπεράσματα. Το γεγονός αυτό καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την επιχειρησιακή εφαρμογή τέτοιων μοντέλων, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις ο υπολογιστικός φόρτος της προσομοίωσης καθίσταται απαγορευτικός.

Τα στοχαστικά μοντέλα αναπαριστούν τη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου, επιδιώκοντας τη διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης σε

λεπτές χρονικές κλίμακες (με τυπική κλίμακα την ώρα). Οι συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο, το οποίο αναπαριστά τις υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης για όλο το διάστημα της προσομοίωσης, και όχι απλά στην κλίμακα του ίδιου του πλημμυρικού επεισοδίου. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την ανάλυση των πλημμυρών αλλά βρίσκουν ευρύτερη εφαρμογή σε μελέτες υδρολογίας και διαχείρισης υδατικών πόρων. Με το παραπάνω σκεπτικό, οποιοδήποτε από τα γνωστά υδρολογικά μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο παραπάνω πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης, με εξαίρεση τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που λειτουργούν σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (πχ. μηνιαίο).

Γενικά, η ωριαία κλίμακα είναι η πλέον πρόσφορη για τη μελέτη πλημμυρικών φαινομένων, ενώ σε μεγάλες λεκάνες, αδρομερείς εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν και με τη χρήση ημερήσιων μοντέλων. Επισημαίνεται ότι όσο αυξάνει η χρονική διακριτότητα του μοντέλου, τόσο περιορίζεται ο χρονικός φόρτος της προσομοίωσης, γεγονός που είναι κομβικής σημασίας όταν το μοντέλο εφαρμόζεται για στοχαστική προσομοίωση (Ευστρατιάδης 2012)

Τέλος, τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης χρησιμοποιούνται και ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1989)

2.2. Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα κατατάσσονται σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα και με το πεδίο εφαρμογής τους, τη χωρική τους κλίμακα, τη μαθηματική τους δομή και τη χρονική διακριτότητα.

Αναλυτικότερα, τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται με βάση:

- Το πεδίο εφαρμογής
 - Λεκάνη απορροής
 - Υδροφορέας

- Συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών

- Τη χωρική κλίμακα
 - Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική
 - Ημικατανεμημένη
 - Ημιαδιαμέριστη
 - Κατανεμημένη

Ανάλογα με τη χωρική τους διακριτοποίηση, τα υδρολογικά μοντέλα είτε εκτιμούν απευθείας την επιφανειακή απορροή που φτάνει στην έξοδο της λεκάνης (αδιαμέριστα μοντέλα) είτε υπολογίζουν την απορροή που παράγεται από επιμέρους χωρικές ενότητες της λεκάνης, ήτοι υπολεκάνες ή άλλες μικρότερες ενότητες (ημικατανεμημένα ή πλήρως κατανεμημένα μοντέλα). Επίσης, στη χωρική κλίμακα, όσο πιο αδρομερής είναι η σχηματοποίηση της λεκάνης τόσο πιο ταχεία είναι η προσομοίωση. Βεβαίως, η χωρική κλίμακα εξαρτάται από τη ίδια τη δομή του μοντέλου, με τα εννοιολογικά αδιαμέριστα μοντέλα να υπερτερούν, ενώ, αντίθετα, τα κατανεμημένα σχήματα είναι πρακτικά ανέφικτο να χρησιμοποιηθούν για στοχαστική προσομοίωση.

- Τη μαθηματική δομή
 - Μοντέλα φυσικής βάσης
 - Εννοιολογικά
 - Στατιστικά-Στοχαστικά
 - « Μαύρου Κουτιού»

- Τη χρονική Διακριτότητα
 - Μεγάλη κλίμακα
 - Μικρή κλίμακα

Στην παρούσα μελέτη δίνεται έμφαση στην αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών, που αναφέρονται σε μικρές χρονικές κλίμακες (ωριαίες και ημερήσιες) αφού οι αποκρίσεις της λεκάνης της εφαρμογής είναι της τάξεως των μερικών ωρών.

2.3. Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων

Η ανάπτυξη ενός υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Ευστρατιάδης, 2008):

1. Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση (perceptual model)
2. Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model)
3. Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας (procedural model)
4. Υπολογισμός παραμέτρων (model calibration)
5. Αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας – Επαλήθευση (model validation)

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι απαιτήσεις των δύο πρώτων βημάτων, που συνιστούν τη μαθηματική δομή του μοντέλου, καλύπτονται από κάποιον υφιστάμενο κώδικα (βήμα 3). Ωστόσο, είναι συνηθισμένο να επιβάλλεται η εκ του μηδενός ανάπτυξη της δομής του μοντέλου, δεδομένου ότι τα κριτήρια επιλογής διαφέρουν, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Ευστρατιάδης, 2008):

1. Τον σκοπό της μελέτης
2. Την εμπειρία του μελετητή
3. Τα διαθέσιμα δεδομένα

Η ποσότητα αλλά και η ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων αποτελεί, συχνά, τον κύριο περιοριστικό παράγοντα σε μια μελέτη, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, η οποία θεωρητικά εξασφαλίζεται από τη χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων, που είναι απαραίτητα για την κατάστρωση και σχηματοποίηση του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Περιοχή Μελέτης

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Για την σύγκριση των δύο μοντέλων προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέδοντα ή Νέδωνα που βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Μεσσηνίας και συγκεκριμένα ανάντη της πόλης της Καλαμάτας. Ο λόγος για την επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Είναι μια σχετικά μικρή σε έκταση λεκάνη, εκατόν είκοσι περίπου τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το αντιπροσωπευτικό τοπίο αυτής της περιοχής διαμορφώθηκε από ασβεστόλιθους με βαθιές διαβρώσεις, που εντοπίζονται κατά μήκος της κύριας χαράδρας, καθώς επίσης και των παραποτάμων. Η πλημμυρική απορροή της περιοχής είναι κυρίως επιφανειακή, υπάρχει ένα καλά διαμορφωμένο κύριο υδατόρευμα σχεδόν σε όλη την έκταση της λεκάνης και κυρίως έχει σχετικά ευθύγραμμες διατομές στις θέσεις μέτρησης της στάθμης κάτι που είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της παροχής. Επιπλέον, στη περιοχή αυτή δεν υπάρχουν εκτροπές του υδατορεύματος, φράγματα, λιμνοδεξαμενές ή οποιοδήποτε άλλο έργο που θα μπορούσε να διαταράξει σημαντικά την υδρολογική διαίτα της λεκάνης και να την καταστήσει ακατάλληλη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Όλα τα παραπάνω, αλλά κυρίως εγκατεστημένο μετρητικό δίκτυο, που αποτελείται από τέσσερις (ο ένας υπό κατασκευή) υδρομετρικούς σταθμούς και άλλους έξι τουλάχιστον μετεωρολογικούς (δύο υπό κατασκευή) κάνουν την λεκάνη αυτή ιδανική για την πραγματοποίηση της μελέτης. Επιπροσθέτως, οι μετρήσεις είναι εύκολα προσβάσιμες σε πραγματικό χρόνο στο διαδίκτυο και δίνουν δεδομένα ανά 15 min για όλα τα απαραίτητα μετεωρολογικά και υδρολογικά μεγέθη (στάθμη, βροχόπτωση, θερμοκρασία κ.α.).

Η περιοχή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για πλημμυρική διερεύνηση διότι ο ποταμός Νέδοντας διασχίζει την πόλη της Καλαμάτας η οποία βρίσκεται ακριβώς κατάντη της περιοχής που εξετάζεται (Κουκουβίνος κ.α. 2012).

3.2. Γενική Περιγραφή Λεκάνης Απορροής Νέδοντα

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλευρά του υδατικού διαμερίσματος της Δυτικής Πελοποννήσου (GR01). Όλη η ανατολική πλευρά της λεκάνης του Νέδοντα συνορεύει με το υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Πελοποννήσου (GR03). Ο Νέδοντας αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο ποταμό στην Περιφερειακή Ενότητα Μεσσηνίας μετά τον Πάμισο. Το υδατόρευμα, αφού διευθετηθεί, διασχίζει την πόλη της Καλαμάτας και εκβάλλει στο Μεσσηνιακό κόλπο δυτικά του λιμανιού της πόλης. Η λεκάνη περικλείεται από την οροσειρά του Ταυγέτου και έχει έκταση 120 km², μέσο υψόμετρο 770 m ενώ το υψηλότερο σημείο βρίσκεται σε υψόμετρο 1715 m και το χαμηλότερο στα 93 m όπου βρίσκεται και η έξοδος της λεκάνης. Η κλίση του εδάφους κυμαίνεται από 0° έως 70° ενώ η μέση κλίση της υπολογίστηκε στις 13°.



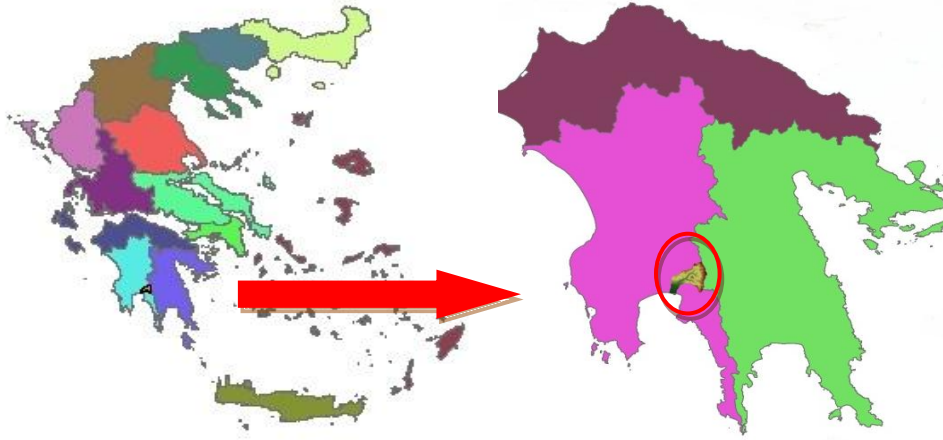
Εικόνα 3.1: Οι δύο κοίτες του Νέδοντα. Με μωβ οροθετείται το ιστορικό κέντρο της Καλαμάτας με κόκκινο το κάστρο της πόλης και με γαλάζιο η περιοχή «Νησάκι»

Καθώς τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής επηρεάζονται κατά μεγάλο βαθμό από τα κλιματικά – μετεωρολογικά στοιχεία, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του κλίματος της Μεσσηνίας. Όσον αφορά την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, οι ανώτατες ετήσιες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 18°C έως 21°C και σημειώνονται στην πεδινή περιοχή που εκτείνεται βόρεια του Μεσσηνιακού κόλπου, ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσσήνης. Το κλίμα χαρακτηρίζεται εύκρατο.

Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος στη περιοχή ελέγχου κυμαίνεται από 13°C έως 19°C, ενώ ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία 26.4°C και ο ψυχρότερος ο Ιανουάριος με 10.2°C αντίστοιχα, όπως προκύπτει από την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από σταθμό της περιοχής του αεροδρομίου που βρίσκεται 6 km δυτικά της πόλης. Οι βροχοπτώσεις κυμαίνονται από 600 mm στα νότια του Νομού (Φοινικούντα-Μεθώνη) μέχρι τα 150 mm πιο ορεινά και στα 800-1200 mm στις κεντρικές και βόρειες πεδινές και ημιορεινές περιοχές.

Ο Νέδοντας πηγάζει από τις δυτικές κλιτύες του Ταΰγετου και δημιουργείται κυρίως από τρεις παραπόταμους αλλά και από πηγές. Ο πρώτος βρίσκεται στην περιοχή της

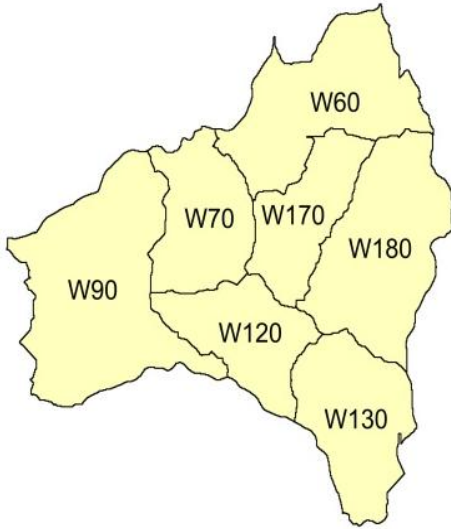
Νέδουσας, ο δεύτερος στην Αλαγονία και ο τρίτος στο Καρβέλι. Ο άνω ρους του Νέδοντα σχηματίζεται από την ένωση της απορροής της Νέδουσας και της Αλαγονίας αλλά και από πηγές των περιοχών αυτών και ενώνεται με τον κάτω ρου (Καρβελιώτης) που προέρχεται από την περιοχή Καρβέλι. Το συνολικό μήκος του υδατορεύματος είναι περίπου 26 km



Εικόνα 3.2: Λεκάνης απορροής Νέδοντα και η θέση της στο χάρτη των υδατικών διαμερισμάτων της Ελλάδας

Για τις ανάγκες καλύτερης προσέγγισης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής, έγινε ο διαχωρισμός της σε 7 υπολεκάνες, οι οποίες προέκυψαν με πολύ μικρές διαφορές, (της τάξης του 0.2 έως 0.3 km² από τα δύο συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν (Arcgis, Map Window). Η έξοδος της λεκάνης ορίστηκε ανάντη της αστικής περιοχής σε σημείο όπου υπάρχει μέτρηση της στάθμης (σταθμός Νέδοντα - Λατομείο Μπάκα). Η μη επιλογή όλης της λεκάνης οφείλεται στο ότι αυτό το τμήμα μόνο βρίσκεται σε φυσική κατάσταση. Τελικά προέκυψε η σχηματοποίηση που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται τα εμβαδά της κάθε υπολεκάνης όπως αυτά υπολογίστηκαν από τα δυο προγράμματα καθώς και η ονομασία της κάθε υπολεκάνης.

Πίνακας 3.1: Εμβαδά των υπολεκανών όπως υπολογίστηκαν από τα δύο Σ.Γ.Π.



Κωδικός υπολεκάνης	Εμβαδόν(km^2) GEO-hms	Εμβαδόν (km^2) MWHydrogeios
W60	19,7	19,5
W70	12,8	12,5
W90	28,1	28
W120	12	11,8
W130	15,2	15
W170	10,9	10,9
W180	21	20,7
Σύνολο	120	119

Σχήμα 3.1: Υπολεκάνες απορροής

3.3. Χωρικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης

Χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω πρωτογενή δεδομένα για την περιοχή που προέρχονται από ερευνητικό έργο του Τομέα Υδατικών Πόρων του Ε.Μ.Π (Κουκουβίνος 2012):

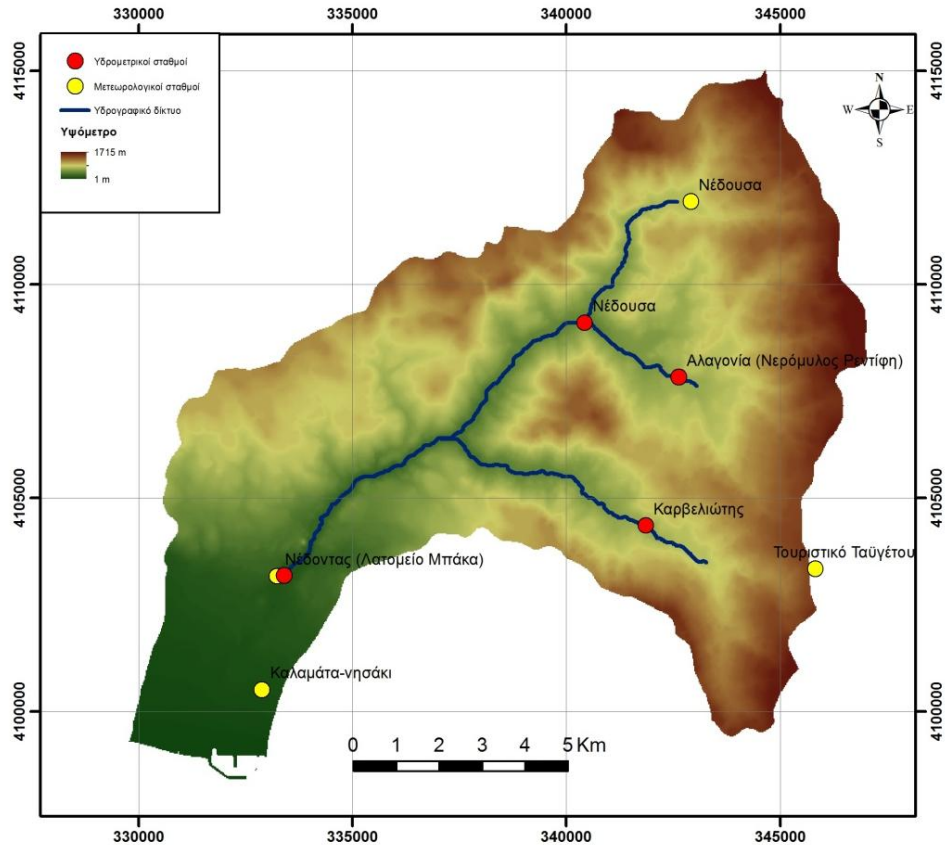
- ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Digital Elevation Model) 25 x 25 m
- Ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης (Corine 2000)
- Ψηφιακό μοντέλο λεπτομερούς γεωλογικού υποβάθρου
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Θέσεις υδρομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών

Ο τρόπος επεξεργασίας των παραπάνω δεδομένων θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στην συνέχεια

3.3.1. Τοπογραφία

Όπως προαναφέρθηκε, η λεκάνη απορροής του ποταμού Νέδοντα έχει κύριο ορειογραφικό άξονα την οροσειρά του Ταϋγέτου, η οποία και περικλείει την περιοχή σε όλο το ορεινό της τμήμα. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο ποταμός εκβάλλει στη θάλασσα, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι πρόκειται για μία περιοχή με μεγάλο εύρος τιμών των υψομέτρων. Αξίζει να αναφερθεί πως το υψηλότερο σημείο στη λεκάνη είναι στα 1715 m ενώ το χαμηλότερο συμπίπτει με την στάθμη της θάλασσας στην ευρύτερη λεκάνη και 93 m στην περιοχή μελέτης.

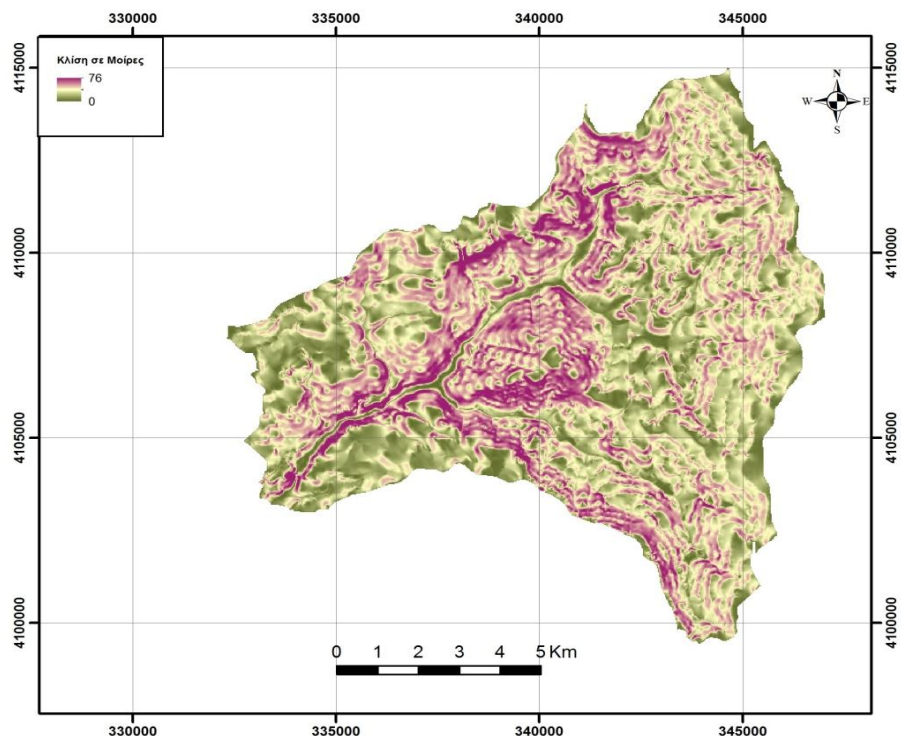
Στη συνέχεια ακολουθεί ο χάρτης της περιοχής, στον οποίο παρουσιάζονται τα όρια και το ανάγλυφο της, οι θέσεις των υδρομετρικών σταθμών, των μετεωρολογικών αλλά και το υδρογραφικό δίκτυο. Τα ορεινά σημεία της λεκάνης διακρίνονται με το καφέ χρωματισμό ενώ τα πιο πεδινά με το πράσινο. Το υδατόρευμα συνεχίζει την πορεία του και εκβάλλει στη θάλασσα. Το γεγονός ότι δεν απεικονίζεται, οφείλεται στο ότι η περιοχή ενδιαφέροντος σταματά στον σταθμό «Νέδοντα – Λατομείο Μπάκα». Από εκεί και κάτω ο ποταμός είναι διευθετημένος και διασχίζει την πόλη της Καλαμάτας.



Σχήμα 3.2: Τοπογραφικό ανάγλυφο της ευρύτερης λεκάνης απορροής Νέδοντα και οι θέσεις μέτρησης των υδρολογικών και μετεωρολογικών μεγεθών.

Η κλίση του εδάφους όπως αναμενόταν, έχει ιδιαίτερη μεγάλη διακύμανση. Ξεκινά από 0° κυρίως στις πεδινές αλλά και στις παραποτάμιες περιοχές και φθάνει έως τις 76° στις απότομες ορεινές πλαγιές. Η μέση κλίση υπολογίστηκε στις 22° με τυπική απόκλιση 11.35.

Η καλή γνώση της τοπογραφίας μιας περιοχής για την πραγματοποίηση μια υδρολογικής μελέτης είναι πρωτεύουσας σημασίας για τον μελετητή. Έτσι, ένα καλής ποιότητας ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρίς έντονα βυθίσματα και αστοχίες κατά την ψηφιοποίηση, γίνεται σημαντικό εργαλείο στην εξαγωγή ενός ρεαλιστικού υδρογραφικού δικτύου το οποίο είναι και το βασικότερο στοιχείο για την υλοποίηση της μελέτης.



Σχήμα 3.3: Κλίσεις εδάφους λεκάνης απορροής Νέδοντα

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα υψόμετρα και τις κλίσεις της λεκάνης ενδιαφέροντος.

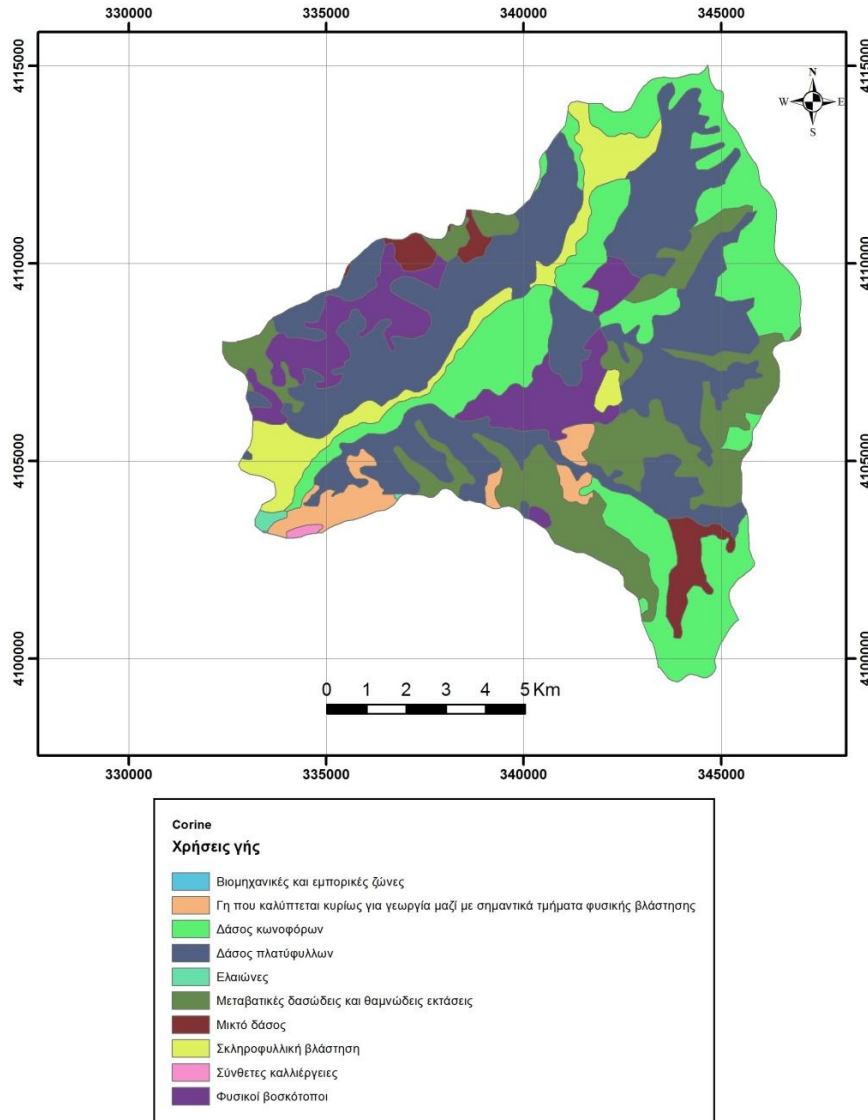
Πίνακας 3.2: Υψόμετρα και κλίσεις των υπολεκανών

Κωδικός λεκάνης	Υψόμετρο (m)				Κλίση(°)			
	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέσο	Τυπική απόκλιση	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέσο	Τυπική απόκλιση
W60	1605.37	398.75	1008.92	256.81	56.66	0.01	23.06	11.37
W70	1300.41	297.39	741.93	260.37	63.59	0	26.97	11.63
W90	1292.90	92.96	654.85	261.64	75.46	0	18.41	11.50
W120	1387.58	297.39	710.09	208.50	58.17	0	25.87	12.20
W130	1603.40	595.07	1096.47	219.12	56.16	0	21.17	9.90
W170	1303.01	397.77	739.39	178.81	53.58	0	20.25	10.96
W180	1714.64	595.69	1092.38	263.95	49.29	0	18.26	8.96

3.3.2. Κάλυψη Γής

Είναι γνωστό πως το είδος της κάλυψης του εδάφους της λεκάνης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υδρολογική απόκριση αυτής. Όπως προαναφέρθηκε, η πληροφορία αυτή προήλθε από το ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) που προήλθε από πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης το έτος 2000 (πηγή: <http://www.eea.europa.eu/el/pressroom/newsreleases/CLC2000-el>), γνωρίζοντας πως στην λεκάνη δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές, όπως για παράδειγμα εκτεταμένη ανοικοδόμηση, πυρκαγιές κ.α., δεν υπήρχε πρόβλημα για την χρησιμοποίησή του. Το ψηφιακό μοντέλο προήλθε από το Image2000, ένα σύνολο εικόνων από τις οποίες εμπειρογνώμονες από όλη την Ευρώπη κατάρτισαν λεπτομερείς χάρτες που εμφανίζουν 44 διαφορετικούς τύπους κάλυψης γης όπως ο «συνεχής αστικός ιστός», οι «βοσκότοποι», το «δάσος» και η «μη αρδευόμενη καλλιεργήσιμη γη».

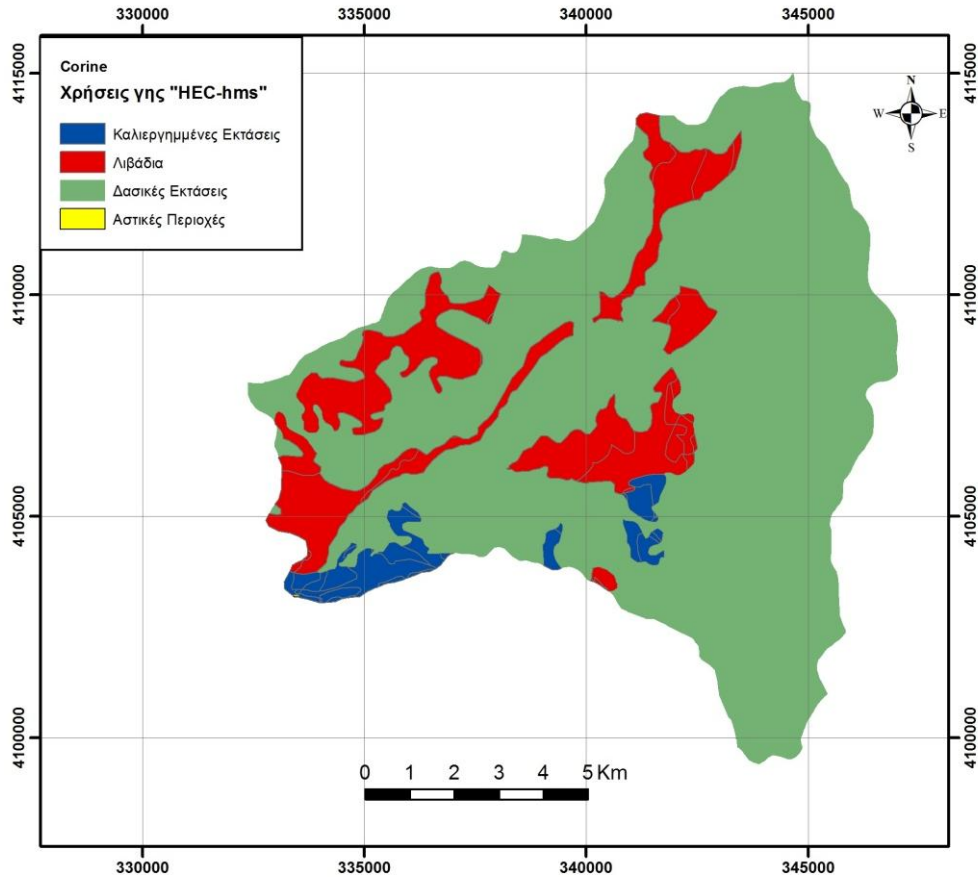
Γενικά, η φυτοκάλυψη δρα προς την κατεύθυνση της μείωσης του όγκου άμεσης απορροής και της επιβράδυνσης και εξομάλυνσης των ρυθμών της, με τελική συνέπεια τη μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Επιπλέον η χλωρίδα μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού εδαφικού στρώματος (από τη δράση των ριζών αλλά και των φυλλωμάτων που πέφτουν), με τρόπο τέτοιο ώστε να αυξάνεται η διηθητική ικανότητα του εδάφους και συνακόλουθα να μειώνεται η απορροή (Ευστρατιιάδης κ.α. 2012)



Σχήμα 3.4: Ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000

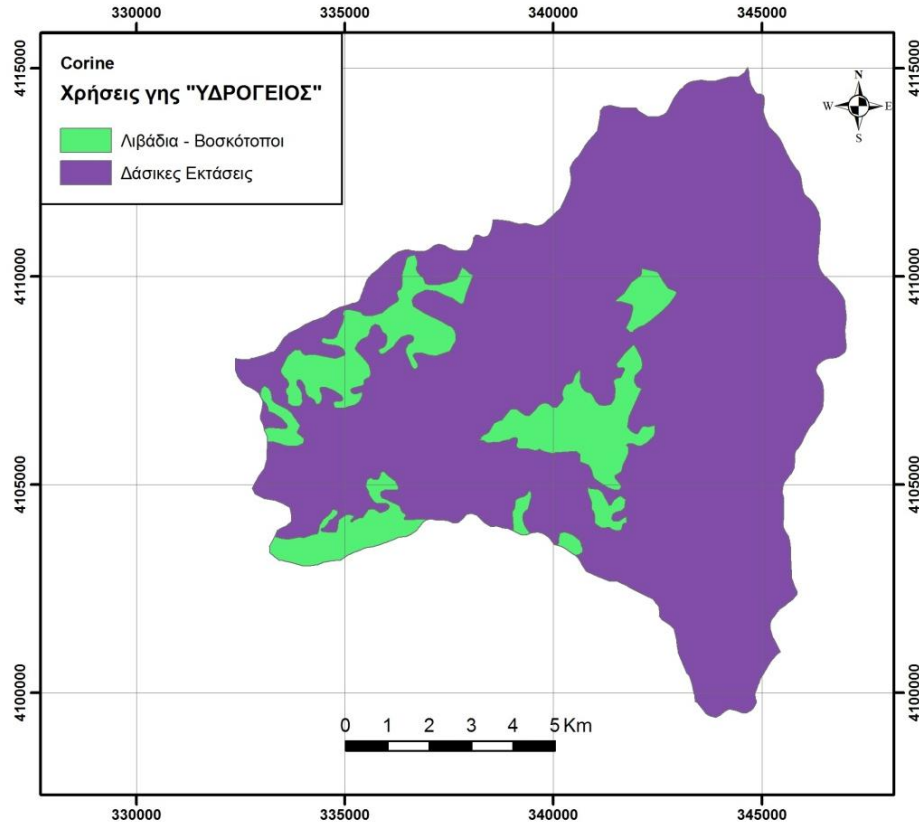
Στην παρούσα εργασία κρίθηκε αναγκαία η ομαδοποίηση των κατηγοριών ώστε αφενός να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμες και αφετέρου διότι δεν έχουν ουσιαστική χρήση στην παρούσα μελέτη. Όπως διαπιστώνεται και στους παρακάτω χάρτες, για τις ανάγκες του υδρολογικού λογισμικού HEC-hms, έγινε ομαδοποίηση των χρήσεων γης από τις 10 που υπάρχουν στην περιοχή σε 4 κατηγορίες: «αστική περιοχή», «λιβάδια», «καλλιεργήσιμη έκταση» και «δάση». Για το πρόγραμμα Υδρόγειος, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει διαχωρισμός σε 2 κύριες και επικρατέστερες κατηγορίες: «δάσος» και «λιβάδια».

βοσκότοποι» για λόγους που θα εξηγηθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Είναι φανερό πως το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης καλύπτεται από δασική έκταση ενώ η αστική ή η βιομηχανική περιοχή λείπει σχεδόν παντελώς και αυτό είναι κάτι πολύ λογικό αν σκεφτεί κανείς πως πρόκειται για μία αρκετά ορεινή – ημιορεινή λεκάνη.



Σχήμα 3.5: Ομαδοποίηση Ψηφιακού μοντέλου χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000)

λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000 με χρήση Arcmap για το HEC-hms



Σχήμα 3.6: Ομαδοποίηση Ψηφιακού μοντέλου χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) λεκάνης απορροής Νέδοντα το έτος 2000 με χρήση Map Window για την Υδρόγειο

3.3.3. Γεωλογία

Τα δεδομένα για τη γεωλογία της περιοχής καθώς και τα τεκτονικά και λιθολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής, έχουν προέλθει από τους γεωλογικούς χάρτες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) και συγκεκριμένα από τα φύλλα Καλαμάτας και Σπάρτης κλίμακας 1:50000. Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής που αφορά τη σύσταση, την ηλικία και την γεωτεκτονική ενότητα στην οποία ανήκουν.

Συγκεκριμένα, η λεκάνη του Νέδοντα περιλαμβάνει γεωλογικούς σχηματισμούς των γεωτεκτονικών ενοτήτων Τρίπολης και Πίνδου καθώς και στρώματα Τύρου, Μεταλγικά Ιζήματα και Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά.

Όσον αφορά τις ηλικίες των πετρωμάτων, η ζώνη Τρίπολης, η οποία κατέχει το μεγαλύτερο ημιορεινό και πεδινό τμήμα της λεκάνης όπως διαπιστώνεται και από τον χάρτη αποτελείται από:

- Κρητιδικό,
- Ανώτερο Τριαδικό – ανώτερο Ιουρασικό,
- Κατώτερο – ανώτερο Τριαδικό,
- Κατώτερο Ηώκαινο – Ολικοκαινο,
- Ανώτερο Κρητιδικό – Παλαιοκαινο.

Η ζώνη Πίνδου, που καταλαμβάνει μια πολύ μικρή περιοχή στη νοτιοδυτική πλευρά της λεκάνης αποτελείται από:

- Ανώτερο Κρητιδικό – Παλαιόκαινο.

Τα στρώματα Τύρου, που εντοπίζονται σε μία μικρή ζώνη ανάμεσα από τη ζώνη Τρίπολης και την Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά και αποτελούνται από:

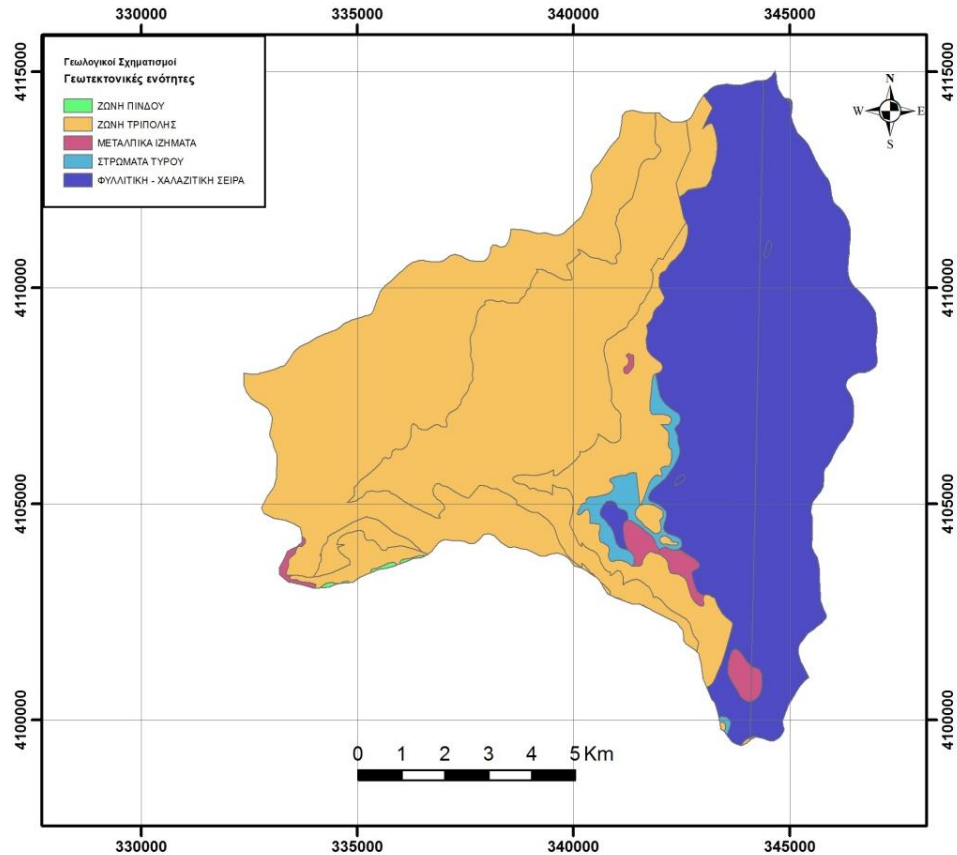
- Λιθανθρακοφόρο – ανώτερο Τριαδικό.

Τα Μεταλγικά Ιζήματα, βρίσκονται και αυτά ανάμεσα στη ζώνη Τρίπολης και την Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά αλλά και διάσπαρτα μέσα στις 2 αυτές ενότητες, αποτελούνται από:

- Τεταρτογενές
- Ολόκαινο
- Πλειόκαινο

Τέλος, η Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά που καταλαμβάνει όλο το ορεινό μέτωπο της λεκάνης και μαζί με την ζώνη της Τρίπολης σχεδόν το σύνολο της λεκάνης αποτελείται από:

- Πέρμιο – κατώτερο Τριαδικό.



Σχήμα 3.7: Γεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με τις γεωτεκτονικές ενότητες σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ)

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων ηλικιών των πετρωμάτων που υπάρχουν στη λεκάνη αυτή (Κώτσιαρα 2012).

Κρητιδικό: Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι. τέφροι, λίγο βιτουμενιούχοι, μέσο- έως παχυστρωματώδεις, με φλέβες ασβεσίτη. Στους κατώτερους ορίζοντες επικρατούν ενστρώσεις λατυποπαγών ασβεστόλιθων και έχουν πάχος περίπου 300 μέτρα.

Κατώτερο – Ανώτερο Τριαδικό: Δολομιτικοί ασβεστόλιθοι- δολομίτες. Στα ανώτερα μέλη επικρατούν δολομιτικοί ασβεστόλιθοι ενώ στα κατώτερα δολομίτες. Ο τεκτονισμός είναι εντονότατος. Υπάρχει σχετική κίνηση τους πάνω στην υποκείμενη ηφαίστειο-ιζηματογενή σειρά. Το πάχος τους είναι περίπου 450 m.

Πέρμιο – Κατώτερο Τριαδικό: Περμική σειρά ανθρακικών ιζημάτων. Μικριτικοί ασβεστόλιθοι, βιτουμενιούχοι, λεπτοστρωματώδεις εναλλασσόμενοι με αργιλικούς

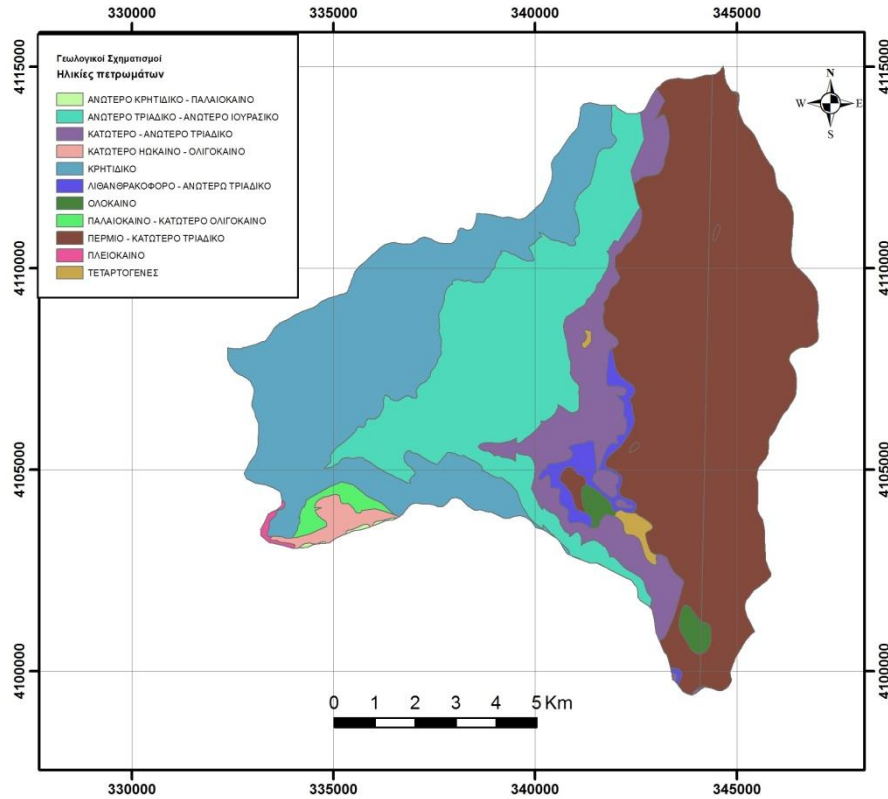
σχιστόλιθους. Υπάρχουν φλέβες γεμάτες με ασβεστίτη. Στην περιοχή του χωριού Καρβέλι παρατηρούνται στη βάση τους τεκτονικής προέλευσης εμφανίσεις γύψου. Το πάχος τους κυμαίνεται από 50 μέχρι 80 μέτρα.

Κατώτερο Ηωκανιο – Ολικοκαινο: Φλύσχης αδιαίρετος. Εναλλαγές τεφρών μαργών, ψαμμιτών με ενστρώσεις ή φακούς ασβεστολιθικών και κροκαλοπαγών με πάχος περίπου 450 m.

Ανώτερο Ιουρασικό: Ασβεστόλιθοι ανοικτοτεφροι, ραδόχρωμοι, μέσο-έως παχυστρωματώδεις δολομιτικοί, κρυσταλλικοί (μέχρι μάρμαρα). Στα ανώτερα μέρη έχουμε ενστρώσεις λατυποπαγών ασβεστολίθων. Παρατηρούνται φλέβες γεμάτες ασβεστίτη. Το πάχος τους είναι περίπου 250 m και η ηλικία τους είναι Λιάσιο.

Τεταρτογενές Ολόκαινο: Αλλουβιακές αποθέσεις, κυρίως κροκάκλες, χαλίκια και κατά θέσεις αμμούχες άργιλοι και πλευρικά κορήματα χαλαρά έως συνεκτικά από λατύπες κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, με ανθρακικό συνδετικό υλικό και ερυθρές άργιλοι,

Τεταρτογενές Πλειόκαινο: Θαλάσσιοι σχηματισμοί. Στη βάση τους επικρατούν τα κροκαλοπαγή πάχους 3-4 μέτρα. Πιο πάνω αναπτύσσονται οι τυπικές ανοικτότεφρες μάργες με διασταυρωμένες στρώσεις. Στα ανώτερα μέλη τους επικρατούν τέφρες έως κιτρινότεφρες ψαμμιτικές μάργες. Κατά θέσεις εμφανίζονται μαργαϊκοί έως ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι και τράπεζες ή ορίζοντες «κοκογχυλιάτης λίθου» με πάχος 130 m περίπου.

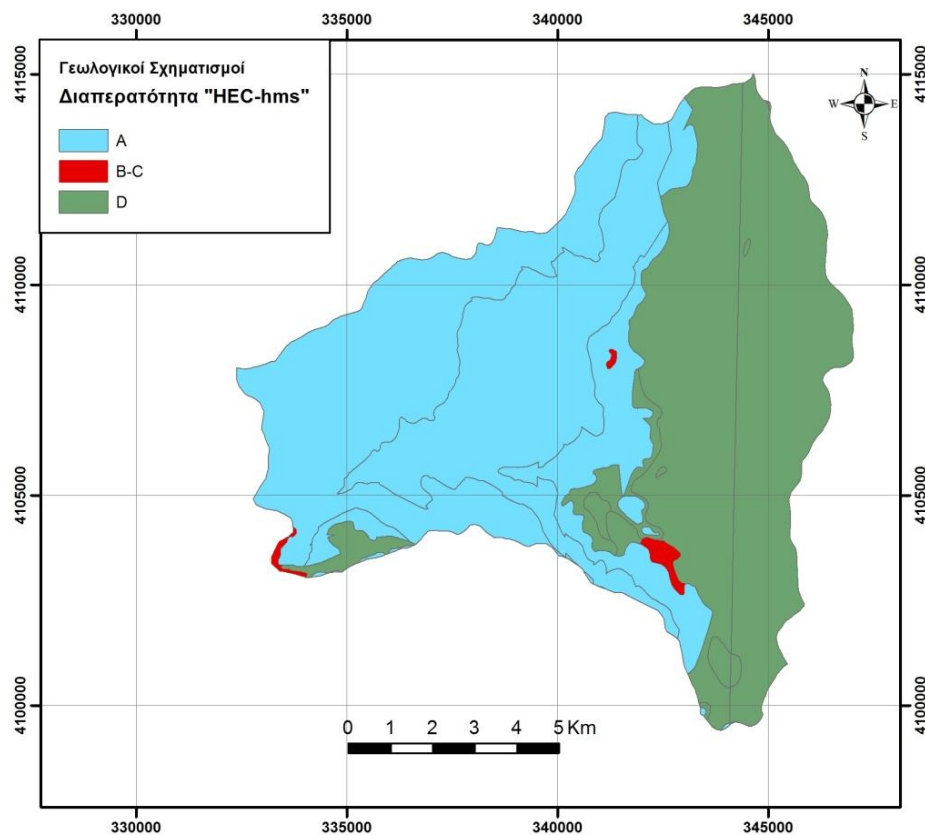


Σχήμα 3.8: Γεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με τις ηλικίες των πετρωμάτων του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ)

3.3.4. Υδρογεωλογία

Ο Ταύγετος αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικά πετρώματα και μάρμαρα εναλλασσόμενα με κρυσταλλικό σχιστόλιθο. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα είναι πορώδη και στο πέρασμα των αιώνων τα νερά της βροχής και του χιονιού τα διαβρώνουν ολοένα και περισσότερο δημιουργώντας έτσι πολλά αξιόλογα σπήλαια με πλούσιο διάκοσμο από σταλαγμίτες, σταλακτίτες και άλλες καρστικές γεωμορφές (σπήλαιο Βλυχάδας, Δυρού). Έτσι τα νερά, αυτά που διεισδύουν τα διαπερατά και καρστικοποιημένα πετρώματα, αφενός σχηματίζουν πηγές σε πολλά σημεία στον ορεινό όγκο, αφετέρου βρίσκουν διέξοδο στη θάλασσα ως υποθαλάσσιες εκβολές και είναι οι αποκαλούμενοι ανάβολοι. Μέχρι σήμερα έχουν καταμετρηθεί 116 τέτοιοι ανάβολοι και 22 υπόγειοι ποταμοί.

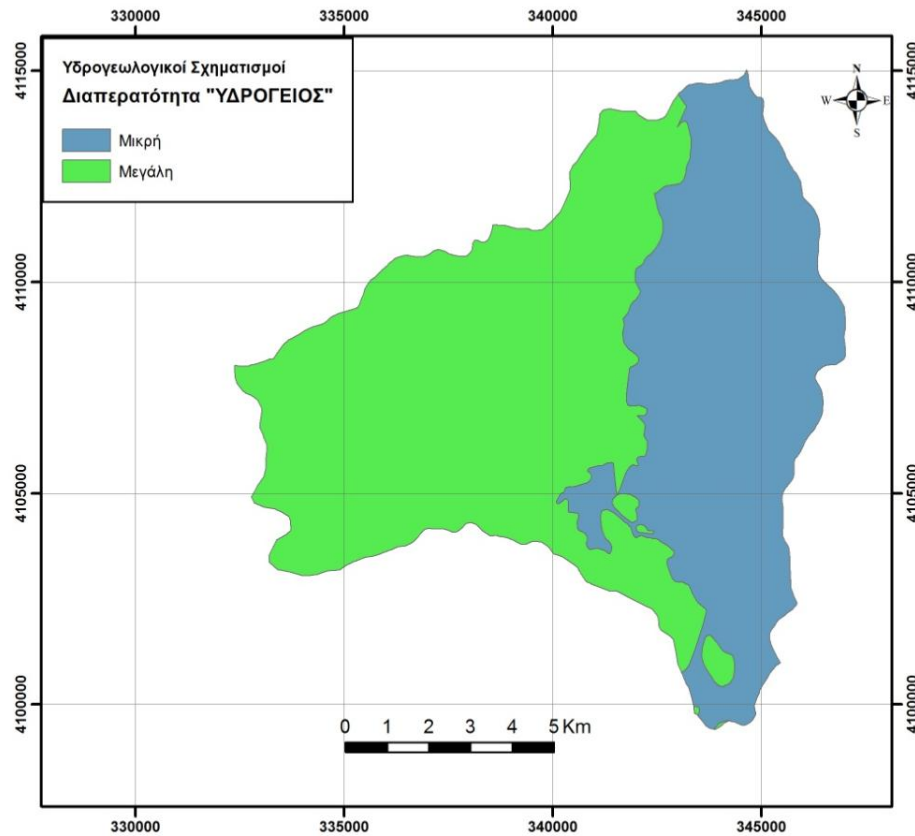
Στη συνέχεια παρατίθεται ο χάρτης του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών με τους υδρογεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής όπως αυτοί προέκυψαν από την κατάταξη των εδαφών με την μέθοδο SCS (Soil Conservation Service, 1972) για τις ανάγκες του υδρολογικού λογισμικού HEC-hms, η ανάλυση της οποίας θα παρατεθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Τα εδάφη κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες (A,B,C,D) σύμφωνα με τους ρυθμούς διήθησης ξεκινώντας με υψηλούς (A) και καταλήγοντας σε πολύ μικρούς (D). Λόγω της πολύ μικρής έκτασης που καλύπτουν οι περιοχές B, C ενοποιήθηκαν για να γίνουν ορατές στον χάρτη.



Σχήμα 3.9: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί σύμφωνα με την κατάταξη των εδαφών από την SCS για τις ανάγκες του προγράμματος HEC-hms

Για το πρόγραμμα Υδρόγειος, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει διαχωρισμός μόνο στις δύο κύριες και επικρατέστερες κατηγορίες διήθησης (Μικρή, Μεγάλη) και τα αποτελέσματα φαίνονται στον χάρτη που ακολουθεί.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, οι δύο χάρτες είναι παρόμοιοι. Η διαφορά τους έγκειται σε δύο πολύ μικρές περιοχές όπου βρισκόταν οι κατηγορίες Β, C. Η περιοχή Β εντάθηκε στην κατηγορία «Μεγάλη» διήθηση και αντίστοιχα η C στην κατηγορία «Μικρή» διήθηση.



Σχήμα 3.10: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί για τις ανάγκες της Υδρογείου

3.4. Θέσεις Εξοπλισμού

Για την περιγραφή του πεδίου βροχής στην λεκάνη του Νέδοντα, αξιοποιούνται οι μετεωρολογικοί σταθμοί και αισθητήρες στο χωριό Αλαγονία (πλήρης σταθμός ιδιοκτησία ΔΕΥΑΚ, φιλοξενία Ξενώνας Ορεινή Φιλοξενία), στην Γέφυρα Καρβελίου (βροχόμετρο, ΕΑΑ), στο Τουριστικό Ταϋγέτου (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία Ι.Καραμήτσου), στο χωριό Νέδουσα (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία Ι. Καραμήτσου,

φιλοξενία στο Κοινοτικό Κατάστημα), πλησίον του υδρομετρικού σταθμού Νέδοντα στο λατομείο Μπάκα (βροχόμετρο, ΕΑΑ) και στο εργοστάσιο βιολογικού καθαρισμού Καλαμάτας (πλήρης σταθμός, ιδιοκτησία ΔΕΥΑΚ). Οι μετεωρολογικοί σταθμοί Νέδουσας και Τουριστικού Ταυγέτου και το βροχόμετρο Καλαμάτας είναι εγκατεστημένοι σε χαμηλούς ιστούς (έως 2 m) πάνω σε στέγες και οι περιβάλλοντες χώροι είναι ελεύθεροι εμποδίων. Οι σταθμοί Αλαγονίας και Βιολογικού Καθαρισμού θα εγκατασταθούν στο έδαφος, σε ιστούς ύψους 5 m. Τέλος το βροχόμετρο Καρβελιώτη είναι τοποθετημένο σε ιστό ύψους 2.5 m, στερεωμένου στο βάθρο της γέφυρας. Θερμαντικό στοιχείο για το βροχόμετρο έχει μόνο ο σταθμός του Τουριστικού, ενώ ενδέχεται να τοποθετηθεί και στο σταθμό Αλαγονίας.

Οι υδρομετρικοί σταθμοί έχουν εγκατασταθεί: στο ρέμα της Αλαγονίας σε χαμηλό αναβαθμό στον Νερόμυλο Ρεντίφη, περίπου 250 m κατάντη της συμβολής των ρεμάτων Αλαγονίας και Πηγών και περίπου 60 m κατάντη της συμβολής του μικρού ρέματος Αρτεμισίας (φιλοξενείται στην ιδιοκτησία Δ. Γιαννόπουλου), στο ρέμα Καρβελιώτη κοντά στο χωριό Καρβέλι, στο κέντρο οχετού με αναβαθμό κάτω από την γέφυρα της επαρχιακής οδού μεταξύ των χωριών Καρβέλι και Λαδάς, και στον κάτω ρου του Νέδοντα, σε αναβαθμό, την στέψη του οποίου επισκεύασε η εταιρία Ε.Τ.ΜΕ Πέππας & Συνεργάτες, στην περιοχή του λατομείου Μπάκα (πλησίον του σταθμού των ΚΤΕΛ Καλαμάτας). Επιπλέον θα εγκατασταθεί σταθμήμετρο στον άνω ρου του Νέδοντα, μετά την συμβολή των ρεμάτων της Νέδουσας και της Αρτεμισίας, κάτω από την γέφυρα που βρίσκεται κοντά στη συμβολή της οδού Καλαμάτας-Σπάρτης και της επαρχιακής οδού προς στο χωριό Νέδουσα, σε αναβαθμό που θα κατασκευάσει η ΔΕΥΑΚ (Κούσης κ.α., 2012).

Οι θέσεις εγκατάστασης των μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών παρουσιάζονται σε παραπάνω χάρτη (Σχήμα 3.2) ενώ στην συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες των μετεωρολογικών και σταθμημετρικών σταθμών.



Φωτογραφία 3.1, 3.2: Μετεωρολογικός σταθμός Νέδουσας



Φωτογραφία 3.3: Θέση μετεωρολογικού σταθμού Αλαγονίας



Φωτογραφία 3.4: Θέση μετεωρολογικού σταθμού Τουριστικού Ταϊγέτου αντίστοιχα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Επεξεργασία Υδρολογικών Δεδομένων

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η ανάλυση ενός σημαντικού μέρους της μελέτης αυτής, που είναι αρχικά η συλλογή και μετέπειτα η επεξεργασία των πρωτογενών υδρολογικών δεδομένων. Είναι σχεδόν απίθανη η πραγματοποίηση μιας ρεαλιστικής υδρολογικής μελέτης χωρίς την ύπαρξη μετρήσεων στην περιοχή. Η διαδικασία αυτή, είναι ένα πολύ κομβικό σημείο διότι όλη η προσομοίωση και εν τέλει η εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων βασίζεται κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό στις αρχικές μετρήσεις. Έτσι, από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε συλλογή βροχομετρικών δεδομένων και θερμοκρασιών τετάρτου και από τους υδρομετρικούς σταθμούς, σταθμημετρικών δεδομένων τετάρτου.

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτέλεσε μια, επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία ολοκληρώθηκε και με αρκετή δόση αβεβαιότητας στις τελικές τιμές των δεδομένων και κυρίως στις τιμές των παροχών. Παρόλα αυτά, έγινε προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή επεξεργασία των μετρήσεων στάθμης ώστε οι τιμές να είναι όσο το δυνατόν κοντύτερα στην πραγματικότητα και να αντιπροσωπεύουν όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται την διαίτα του υδατορεύματος. Μεγάλο πρόβλημα αποτέλεσε η μικρή χρονικά διάρκεια λειτουργίας των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν, όπως επίσης οι πολλές ελλείψεις τιμών κατά την διάρκεια λειτουργίας τους για λόγους που ποικίλουν και θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στην συνέχεια. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως υπήρχαν στοιχεία από μια υδρομέτρηση στην περιοχή τα όποια και παρατίθενται παρακάτω όμως λόγω της μη ύπαρξης αρκετού νερού και της ταυτόχρονης μικρής περιόδου λειτουργίας των σταθμών στην επαναληπτική υδρομέτρηση δεν εξήχθησαν πολλά συμπεράσματα. Παρόλα αυτά, οι υδρομετρήσεις ήταν αρκετά χρήσιμες και απαραίτητες για τον ορθό υπολογισμό των παροχών αλλά και για να υπάρχει μια γενικότερη εποπτεία στην λεκάνη απορροής.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως έγινε μια παραδοχή κατά ένα μήνα νωρίτερα για την διάρκεια του υδρολογικού έτους και χρησιμοποιήθηκε η περίοδος από 1^η Σεπτεμβρίου 2011 έως 31^η Αυγούστου 2012. Η έναρξη επεξεργασίας των δεδομένων ξεκίνησε στις αρχές Σεπτεμβρίου του 2012 και θα έπρεπε να καθυστερήσει για ένα μήνα αν χρησιμοποιούνταν σαν περίοδος ελέγχου ένα υδρολογικό έτος.

4.2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού Συλλογής Δεδομένων

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή του εξοπλισμού και των τεχνικών χαρακτηριστικών των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μετρήσεων.

4.2.1. Αυτόματοι Μετεωρολογικοί Σταθμοί

Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν μετρήσεις βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης, ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Όπως προαναφέρθηκε στην λεκάνη του Νέδοντα βρίσκονται 6 τέτοιοι σταθμοί από τους οποίους κατά την εκπόνηση της εργασίας μόνον 4 βρίσκονταν σε λειτουργία (Νέδουσας, Τουριστικός Ταυγέτου, Καλαμάτας-«Νησάκι», Νέδοντα-«Λατομείο Μπάκα»). Οι σταθμοί στην Αλαγονία και στη γέφυρα του Καρβελιού ήταν υπό κατασκευή. Από τους 4 εν ενεργεία χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη οι 3 (Νέδουσας, Τουριστικός Ταυγέτου, Νέδοντα-«Λατομείο Μπάκα») που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης. Ο σταθμός Καλαμάτα-«Νησάκι» βοήθησε στην συμπλήρωση των τιμών της βροχής όπου αυτό ήταν απαραίτητο για την ύπαρξη τιμών για ένα ολόκληρο υδρολογικό έτος στο σταθμό Νέδοντα-«Λατομείο Μπάκα».

Για την καταγραφή της βροχόπτωσης χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό βροχόμετρο τύπου ανατρεπόμενου δοχείου (tipping bucket), ενώ η μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα γίνεται με χρήση μηχανικά αεριζόμενης ασπίδας ακτινοβολίας. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται με κυπελλοφόρο ανεμόμετρο και η διεύθυνση του, με ποτενσιομετρικό ανεμοδείκτη. Όπως προαναφέρθηκε τα όργανα

είναι τοποθετημένα στο πεδίο σε ιστούς ύψους δύο η πέντε μέτρων αντίστοιχα (Φωτογραφία 4.1, 4.2). Οι σχετικές μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω αναλογικο-ψηφιακού μετατροπέα, τροφοδοτούμενου από φωτοβολταϊκό στοιχείο με εφεδρική μπαταρία, τοποθετημένου σε υδατοστεγή θήκη μαζί με ψηφιακό πομποδέκτη, ο οποίος μεταδίδει συνεχώς τις λαμβανόμενες μετρήσεις στο σταθμό βάσης ο οποίος είναι τοποθετημένος σε κλειστό χώρο με παροχή ρεύματος και εφεδρική τροφοδοσία με μπαταρίες. Ο σταθμός βάσης συμπεριλαμβάνει οθόνη για την παρουσίαση των στιγμιαίων μετρήσεων, τους αισθητήρες μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας το καταγραφικό δεδομένων και θύρα επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Φωτογραφία 4.1, 4.2: Βροχόμετρο Γέφυρας Καρβελίου. και βροχόμετρο Νέδοντα (λατομείο Μπάκα) αντίστοιχα.

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί προγραμματίζονται μέσω κατάλληλου λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή σε ό,τι αφορά τις χρησιμοποιούμενες μονάδες μέτρησης, τυχόν διορθωτικούς συντελεστές ή συντελεστές βαθμονόμησης των αισθητήρων και βέβαια την συχνότητα καταγραφής των λαμβανόμενων μετρήσεων και τηλεμετρικής αποστολής τους. Η τηλεμετρική λειτουργία των σταθμών υλοποιείται μέσω σύνδεσης στο διαδίκτυο. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα διαδικτυακής σύνδεσης και τις γενικότερες συνθήκες λειτουργίας, ο σταθμός βάσης συνδέεται στο διαδίκτυο είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή είτε μέσω προσαρμογέα RS232-EEthernet. Σε κάθε περίπτωση

η διαχείριση της διαδικασίας ρυθμίζεται από τον χρήστη με κατάλληλα, διαφορετικά για κάθε επιλογή, λογισμικά εργαλεία και τελικά οι λαμβανόμενες μετρήσεις εμφανίζονται σε συγκεκριμένου τύπου ιστοσελίδες, μία για κάθε σταθμό, οι οποίες φιλοξενούνται από το ΕΑΑ, και την βάση δεδομένων ΕΝΥΔΡΙΑΣ (Κούσης κ.α. 2012).

Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση των δεδομένων των σταθμών Νέδουσας και Τουριστικού Ταυγέτου γίνεται ανά 10 λεπτά μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με διαδικτυακή σύνδεση, σταθερή για το Τουριστικό και κινητής τηλεφωνίας για τη Νέδουσα. Η μετάδοση των δεδομένων των σταθμών Αλαγονίας και Βιολογικού Καθαρισμού γίνεται ανά 10 λεπτά με χρήση προσαρμογέα RS232- Ethernet και σταθερή διαδικτυακή σύνδεση, χωρίς τη μεσολάβηση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα δεδομένα από τα βροχόμετρα Καρβελιώτη και Νέδοντα (Λατομείο Μπάκα) συλλέγονται και καταγράφονται μαζί με τα δεδομένα των αντίστοιχων σταθμημετρικών σταθμών. Έτσι και η συχνότητα ανανέωσης της ιστοσελίδας είναι της τάξης των 10 min. Με αυτή τη συχνότητα καταγραφής, το καταγραφικό δεδομένων είναι ικανό να αποθηκεύσει μετρήσεις 17 ημερών, παρέχοντας επαρκή χρόνο για αποκατάσταση τυχόν βλαβών στην παροχή διαδικτυακής σύνδεσης (Κούσης κ.α. 2012).

4.2.1.1. *Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Νέδουσας*

Ο σταθμός αυτός βρίσκεται όπως φαίνεται και στις εικόνες (*Φωτογραφία 3.2, 3.3*) μέσα στο χωριό Νέδουσα και σε υψόμετρο 712 m. Ο σταθμός τέθηκε σε λειτουργία στις 4 Δεκεμβρίου 2011 και δίνει δεδομένα μέχρι και σήμερα με εξαίρεση την περίοδο από 1 Ιανουαρίου 2012 έως 31 Ιανουαρίου 2012 και 23 Ιουλίου 2012 έως τέλος Σεπτεμβρίου. Οι ελλείψεις αυτές για τον συγκεκριμένο σταθμό αλλά και για όλους τους υπόλοιπους, συμπληρώθηκαν αφού ζητήθηκαν από τον κύριο Σπυρίδωνα Λυκούδη, ερευνητή του ΕΑΑ (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

Έτσι, είναι προφανές πως υπήρχε έλλειψη μετρήσεων για την χρονική περίοδο από την αρχή της περιόδου ελέγχου (1^η Σεπτεμβρίου 2011) μέχρι και την έναρξη λειτουργίας του σταθμού. Οι τιμές αυτές συμπληρώθηκαν χρησιμοποιώντας τους δύο γειτονικούς σταθμούς της λεκάνης (Λατομείο Μπάκα και Τουριστικό Ταυγέτου). Ως τιμή για την

βροχόπτωση λήφθηκε ο μέσος όρος των 2 σταθμών. Η επιλογή του μέσου όρου έγινε έπειτα από σύγκριση των βροχοπτώσεων για το διάστημα όπου υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις. Διαπιστώθηκε πως η βροχόπτωση είναι περίπου όση η μέση τιμή τους ενώ και υψομετρικά η Νέδουσα βρίσκεται περίπου στη μέση (712 m) έναντι 1320 m του Ταϋγέτου και 80 m του Λατομείου Μπάκα.

4.2.1.2. *Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Νέδοντα – Λατομείο Μπάκα*

Ο σταθμός αυτός αποτελεί το πιο πεδινό σημείο της περιοχής μελέτης (με υψόμετρο 80m). Ταυτόχρονα βρίσκεται και στην έξοδο της λεκάνης σε σημείο όπου βρίσκεται και υδρομετρικός σταθμός. Ο σταθμός τέθηκε σε λειτουργία στις 18 Δεκεμβρίου 2011 και δίνει δεδομένα μέχρι και σήμερα χωρίς να έχει μεγάλες περιόδους ελλείψεων.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, από 1 Σεπτεμβρίου 2011 μέχρι την αρχή λειτουργίας του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού ήταν αναγκαία η συμπλήρωση των τιμών της βροχόπτωσης. Σε αυτό τον σταθμό η διαδικασία αυτή έγινε λαμβάνοντας τις τιμές από τον γειτονικό σταθμό Καλαμάτα – Νησάκι. Οι μετρήσεις λήφθηκαν όπως ήταν αφού οι δύο σταθμοί είναι σε μικρή σχετικά απόσταση, με σχεδόν το ίδιο υψόμετρο και έπειτα από σύγκριση των τιμών βροχόπτωσης για τις ίδιες περιόδους τα χιλιοστά βροχής ήταν σχεδόν ίδια με μια απόκλιση της τάξης των ± 4 mm.

4.2.1.3. *Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός Τουριστικός Ταϋγέτου*

Ο σταθμός αυτός βρίσκεται στο ορεινό τμήμα της λεκάνης (1320 m) πολύ κοντά στον υδροκρίτη. Είναι προφανές πως καταγράφει τα μεγαλύτερα συνήθως ύψη βροχής και τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο σταθμός αυτός λόγω του ότι είναι ιδιωτικός, λειτουργεί εδώ και αρκετά χρόνια αλλά εντάχθηκε στο πρόγραμμα ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (www.deucalionproject.gr) στις 7 Φεβρουαρίου 2012 και οι μετρήσεις του βρίσκονται

στο διαδίκτυο μέχρι και σήμερα. Ο κ. Λυκούδης ερευνητής του ΕΑΑ φρόντισε για την εύρεση και αποστολή των μετρήσεων που δεν υπήρχαν στο διαδίκτυο. Έτσι για τον σταθμό αυτό υπήρχαν πλήρεις χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Εξαίρεση αποτελεί ένα διάστημα 10 ημερών τον Ιούνιο που βγήκε εκτός λειτουργίας αλλά την περίοδο εκείνη δεν υπήρξαν βροχοπτώσεις στην περιοχή.

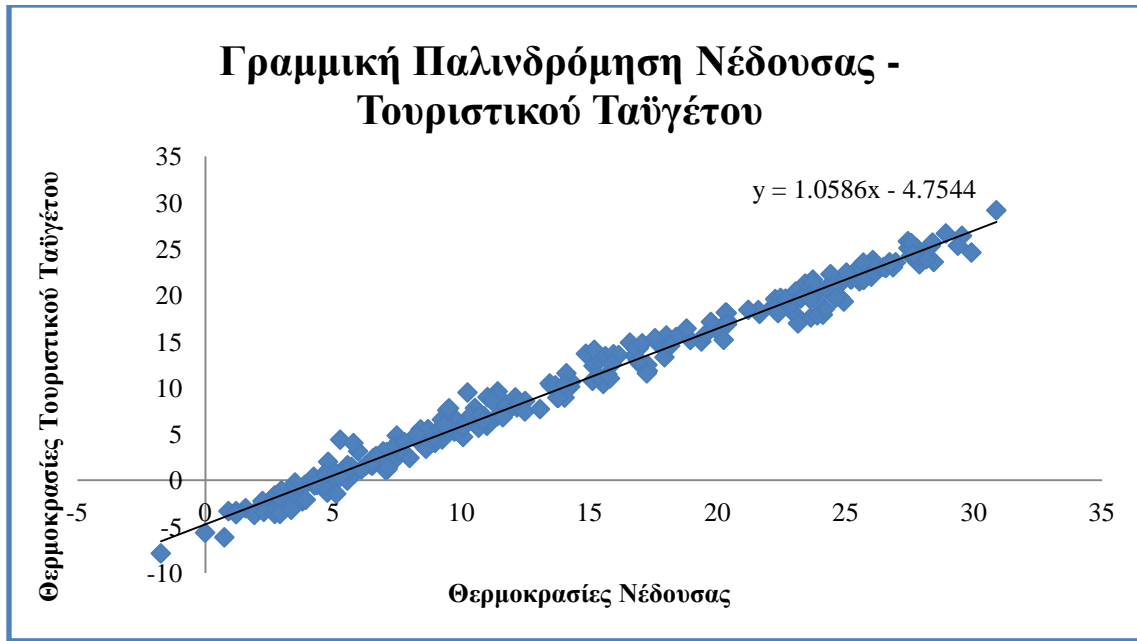
4.2.1.4. Συμπλήρωση τιμών θερμοκρασίας

Όσον αφορά στη συμπλήρωση των τιμών της θερμοκρασίας για τους δύο σταθμούς (Νέδουσας και Λατομείου Μπάκα), ακολουθήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, διαφορετική διαδικασία από αυτή για τις βροχοπτώσεις. Η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια στατιστική μεθοδολογία που χρησιμοποιεί τη σχέση μεταξύ δυο ή περισσότερων ποσοτικών μεταβλητών έτσι ώστε η μια να μπορεί να προβλεφθεί από την άλλη ή τις άλλες. Η εξίσωση που την αντιπροσωπεύει στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι της μορφής:

$$Y = \alpha X + \beta \quad (4.1)$$

και παρέχει μία εκτίμηση της μέσης τιμής της τυχαίας μεταβλητής Y . Όπου α και β συντελεστές της εξίσωσης ευθείας.

Αποτυπώθηκαν γραφικά οι τιμές της θερμοκρασίας για τις ημερομηνίες που υπήρχαν μετρήσεις ταυτόχρονα και στους δύο πιο κοντινούς μεταξύ τους σταθμούς. Ως εκ τούτου τα ζευγάρια σταθμών που δημιουργήθηκαν λόγω γειτνίασης είναι Νέδουσας με Τουριστικός Ταυγέτου και Καλαμάτας-Νησάκι με Νέδοντα-Λατομείο Μπάκα. Με χρήση των κλίσεων των γραμμών τάσης που προέκυψαν από τα δύο διαγράμματα (Διάγραμμα 4.1, 4.2) συμπληρώθηκαν οι άγνωστες τιμές (X) της θερμοκρασίας στους σταθμούς Νέδουσας και Νέδοντα-Λατομείο Μπάκα από τις γνωστές τιμές (Y) των σταθμών Τουριστικός Ταυγέτου και Καλαμάτας-Νησάκι. Τα α (δείχνει την κλίση της ευθείας) και β (μετατόπιση της ευθείας στον άξονα y) είναι οι συντελεστές της εξίσωσης ευθείας.



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης θερμοκρασιών Νέδουσας –
Τουριστικού Ταΰγέτου



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης θερμοκρασιών Λατομείου Μπάκα –
Καλαμάτας – Νησάκι.

4.2.2. *Αυτόματοι Σταθμημετρικοί Σταθμοί*

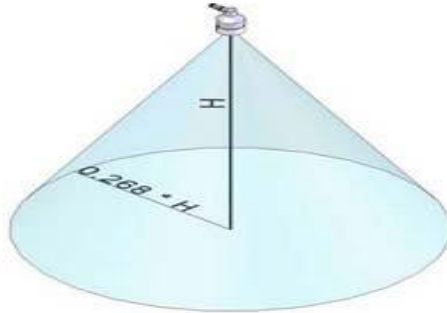
Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν μετρήσεις στάθμης. Η εκτίμηση της παροχής από μετρήσεις στάθμης, είναι μια λύση χαμηλού κόστους σε σύγκριση με την περισσότερο προφανή διαδικασία εκτίμησης από μετρήσεις στάθμης και ταχυτήτων ροής. Για την υλοποίηση των μετρήσεων ήταν αναγκαία η κατασκευή αναβαθμών- υπερχειλιστών σε κάθε σημείο όπου τοποθετήθηκαν οι σταθμοί, για να δημιουργηθούν οι συνθήκες υδραυλικού ελέγχου επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση της παροχής μέσω μετρήσεων στάθμης και υδραυλικών υπολογισμών.

Η στάθμη μετράται με αισθητήρες υπερήχων και η θερμοκρασία αέρα με θερμομέτρα (type 107), εκτός από την Αλαγονία όπου χρησιμοποιείται αισθητήρας 4480 (Κούσης κ.α. 2012). Οι μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα στους σταθμημετρικούς σταθμούς Αλαγονίας και Νέδοντα γίνεται δίπλα στο κιβώτιο του μετρητικού/καταγραφικού συστήματος με λευκές ασπίδες προστασίας από αλουμίνιο, μη αεριζόμενες, λευκού χρώματος με περσίδες. Στον Καρβελιώτη η θερμοκρασία μετράται εντός του οχετού, δίπλα στο σταθμήμετρο με γκρι πλαστική ασπίδα προστασίας για προφύλαξη από τον άνεμο.

Δεδομένης της φυσικής διαμόρφωσης των υπό μελέτη ποταμών και χειμάρρων, επιλέχθηκε η χρήση αισθητήρων ακουστικών παλμών για την μέτρηση της στάθμης καθώς αυτοί παρείχαν μεγαλύτερη ασφάλεια από φερτές ύλες. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες στάθμης χρησιμοποιούν παλμούς υπερήχων (50 kHz) για τον καθορισμό της απόστασης του αισθητήρα από τον στόχο. Ο αισθητήρας αποστέλλει μια δέσμη παλμών και εν συνεχεία αναμένει την λήψη της ηχούς από την ανάκλαση των παλμών στην επιφάνεια του νερού. Η απόσταση καθορίζεται από τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ αποστολής του παλμού και λήψης της ηχούς του, και την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, η οποία όμως εξαρτάται από τη θερμοκρασία αέρα. Η ανωτέρω διαδικασία μέτρησης επιβάλλει την ύπαρξη μιας ελάχιστης απόστασης που μπορεί να μετρηθεί με αισθητήρες τέτοιου τύπου.

Η εκπεμπόμενη δέσμη υπερήχων παρουσιάζει διασπορά κατά την απομάκρυνσή της από τον αισθητήρα με αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ηχώ να μην προέρχεται από ένα σημείο

αλλά από την τομή της επιφάνειας του στόχου με το κώνο διάδοσης της δέσμης. Η γωνία διασποράς είναι 30° οπότε για τον καθορισμό της απόστασης ενός στόχου σε απόσταση H , λαμβάνεται υπόψη η ηχώ από όλους τους πιθανούς στόχους εντός ακτίνας $0.268 * H$ από το ίχνος του αισθητήρα στο επίπεδο του στόχου (Σχήμα 4.1)

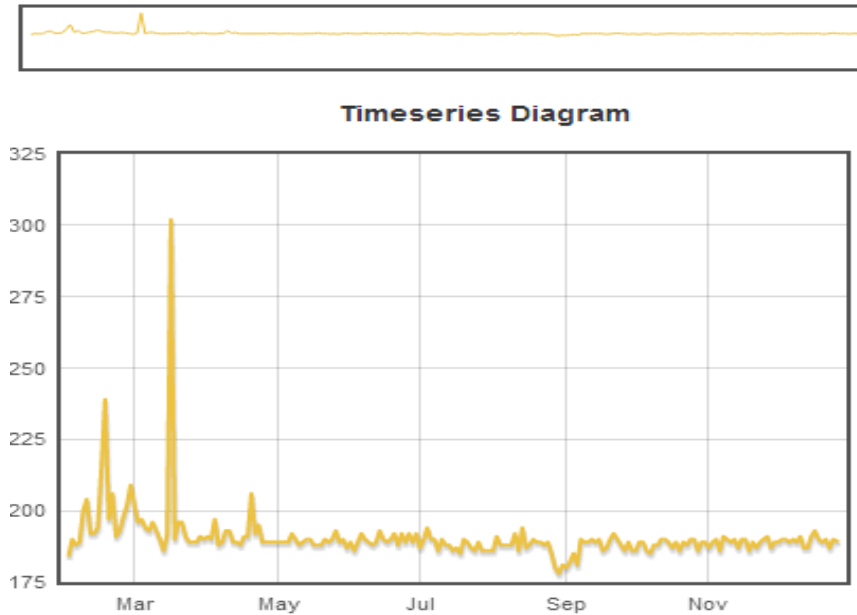


Σχήμα 4.1: Κώνος διασποράς δέσμης και επιφάνεια μέτρησης σταθμήμετρου υπερήχων.

Πηγή : (Κούσης κ.α. 2012)

Εξ αιτίας των ανωτέρω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μέτρηση στάθμης είναι λιγότερο ακριβής όσο η μετρούμενη απόσταση γίνεται μεγαλύτερη από 2.5 m καταβλήθηκε προσπάθεια οι αισθητήρες να τοποθετηθούν σε ύψος μικρότερο από 2.5 m από τον πυθμένα, διατηρώντας ταυτόχρονα τη μέγιστη αναμενόμενη στάθμη τουλάχιστον 0.5 m χαμηλότερα από τον αισθητήρα (όσο δηλαδή η ελάχιστη μετρούμενη απόσταση).

Επιπλέον, η ποιότητα των λαμβανόμενων μετρήσεων επηρεάζεται από την απορρόφηση και σκέδαση των εκπεμπόμενων υπερήχων εντός του κώνου διάδοσης, είτε από την επιφάνεια του στόχου (π.χ. λόγω κυματισμών) είτε από εμπόδια που παρεμβάλλονται στην πορεία, όπως έντονη βροχή ή χιονόπτωση. Για το σκοπό αυτό, μαζί με την απόσταση της επιφάνειας του νερού, καταγράφεται και ένας δείκτης της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Τιμές του δείκτη μεταξύ 152 και 210 υποδεικνύουν αξιόπιστες μετρήσεις, τιμές μεταξύ 210 και 300 μειωμένη ισχύ, ενώ τιμές δείκτη άνω του 300 υψηλή αβεβαιότητα μετρήσεων. Τέλος, μηδενικές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν αδυναμία μέτρησης, π.χ. λόγω υπερβολικής προσέγγισης του στόχου στον αισθητήρα.



Σχήμα 4.2: Δείκτης ποιότητας σήματος στον σταθμό Αλαγονίας.

Δεδομένης της εξάρτησης της ταχύτητας του ήχου στο αέρα από τη θερμοκρασία του, για την ορθή εκτίμηση της απόστασης του στόχου απαιτείται επιπλέον μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα με τη χρήση, φυσικά, κατάλληλης ασπίδας προστασίας σε περίπτωση που ο αισθητήρας είναι εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία ή τον άνεμο. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες στάθμης είναι ρυθμισμένοι να υπολογίζουν την απόσταση με την ταχύτητα του ήχου στους 0°C , οπότε, για θερμοκρασία αέρα T_a ($^{\circ}\text{C}$), ο απαιτούμενος διορθωτικός συντελεστής είναι: $[(T_a + 273.15)/273.15]^{1/2}$. Η ονομαστική ακρίβεια όλων των αισθητήρων είναι 1 cm και αν υποθέσει κανείς άλλο 1 cm ως τυχαίο σφάλμα οφειλόμενο στην διόρθωση που εφαρμόζεται για τη θερμοκρασία του αέρα, συνολικά το σφάλμα μέτρησης δεν αναμένεται να ξεπερνά τα 1.5 με 2 cm.

Οποιαδήποτε "περίεργη" τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτό το σφάλμα πρέπει να θεωρηθεί ως σταθερό σφάλμα μέτρησης το οποίο πιθανόν να οφείλεται σε κακή μέτρηση της απόστασης αισθητήρα - κοίτης ή σε κάποιο ηλεκτρονικό θόρυβο που παρεμβάλλεται στο σήμα του αισθητήρα .

Η μετάδοση δεδομένων γίνεται μέσω κινητής τηλεφωνίας για τους σταθμούς Καλαμάτας και Αλαγονίας (Φωτογραφία 4.3), ενώ στο σταθμό Καρβελιώτη αν και υπάρχει, η

τηλεμετρία δεν λειτουργεί λόγω έλλειψης σήματος, οπότε η συλλογή γίνεται χειροκίνητα με επιτόπου επίσκεψη. Τα μετρητικά-καταγραφικά έχουν προγραμματιστεί για λήψη και καταγραφή μίας μέτρησης ανά 15 min, ώστε να εξοικονομείται ενέργεια, ενώ με τη ρύθμιση αυτή έχουν επαρκή μνήμη για αποθήκευση δεδομένων τριών τουλάχιστον μηνών.



Φωτογραφία 4.3: Σύστημα τηλεμετρίας στον σταθμημετρικό σταθμό Αλαγονίας

Επιπλέον, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών εγκατέστησε δύο ακόμη βροχόμετρα, ίδιου τύπου με τα χρησιμοποιούμενα στους μετεωρολογικούς σταθμούς του έργου, στους υδρομετρικούς σταθμούς του Νέδοντα στην Καλαμάτα και στη Γέφυρα Καρβελίου. Τα βροχόμετρα αυτά συνδέθηκαν στα μετρητικά-καταγραφικά των σταθμημετρικών σταθμών και καταγράφουν, επίσης, ανά 15 min, ενώ βαθμονομήθηκαν και ρυθμίστηκαν κατά την εγκατάστασή τους (Κούσης κ.α. 2012).

4.2.2.1. *Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Νέδοντα –
Λατομείο Μπάκα*

Ο σταθμός αυτός βρίσκεται στην ίδια περιοχή, πολύ κοντά στον μετεωρολογικό, στη θέση Λατομείο Μπάκα και τέθηκε σε λειτουργία στις 18 Δεκεμβρίου 2011 και δίνει δεδομένα μέχρι και σήμερα. Ο αισθητήρας "βλέπει" πάνω στον αναβαθμό το πλάτος του οποίου μετρήθηκε 19.5 m στο χείλος και 18 m στον αισθητήρα. Διαπιστώθηκε ότι κάτω από την αισθητήρα και κατά την πορεία της ροής (ελαφρώς διαγώνια ως προς τον αναβαθμό) το νερό έχει διαβρώσει το τσιμέντο και υπάρχει βύθισμα 2.6 cm (αισθητήρας) έως 3.8 m (20 -30 cm πριν το χείλος του αναβαθμού). Επιπρόσθετα, ο αναβαθμός βρίσκεται ψηλότερα από την κανονική κοίτη δηλαδή εμφανίζει σκαλοπάτι κατά 4 έως 10cm κοντά στον αισθητήρα.

Το καλοκαίρι συνήθως δεν υπάρχει ροή σε όλο το μήκος του αναβαθμού παρά μόνον σε ένα μικρό σημείο δίπλα στην όχθη πλησίον της οποίας βρίσκεται ο αισθητήρας. (Ο κύριος Ν. Κάππος (προσωπική επικοινωνία) που επισκέφθηκε το σταθμό μέσα Ιουλίου επιβεβαιώνει ότι δεν υπήρχε ροή). Ο αναβαθμός παρουσιάζει μικρή κλίση προς αυτή την όχθη.

Στον σταθμημετρικό σταθμό πραγματοποιήθηκαν δύο υδρομετρήσεις από τον κ. Λυκούδη (προσωπική επικοινωνία). Η πρώτη έγινε τον Μάρτιο του 2012 όπου στο ίχνος του αισθητήρα ο οποίος βρισκόταν σε ύψος 1.588 m μετρήθηκε βάθος 17-18 cm και ταχύτητα ροής 1.66 m/s ενώ 2 m προς το κέντρο της ροής μετρήθηκε βάθος 15-16 cm και ταχύτητα 1.65 m/s. Η δεύτερη απόπειρα υδρομέτρησης έγινε στις 20 Οκτωβρίου 2012 όμως δεν υπήρχε ροή στο σημείο αυτό του υδατορεύματος. Ο αισθητήρας έδειχνε περίπου στάθμη 2.5-3.0 cm λίγη ώρα πριν τη μέτρηση. Γι' αυτό τον λόγο ξαναμετρήθηκε το ύψος του (1.545 m) όπου και διαπιστώθηκε μια διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση. Δεδομένου ότι η μέτρηση της απόστασης αισθητήρα - κοίτης έγινε με στάθμη περίπου 15 cm τον Μάρτιο, το 1.545 m κρίθηκε ποιο αξιόπιστο.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει σε αυτόν τον σταθμό είναι ότι οι ενδείξεις του μετρητή τους καλοκαιρινούς μήνες είναι σταθερά 2-3 cm. Κανονικά, και σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, θα αναμενόταν μηδενικές τιμές και όχι 2-3 cm. Εάν χρησιμοποιηθεί το

νέο ύψος αυτό θα γίνει περίπου 1.5 cm. Το 0.5 cm από το οποίο ίσως οφείλεται στη θερμοκρασία η οποία χρησιμοποιείται για τη διόρθωση και μπορεί να διαφέρει (είναι υψηλότερη 1 – 2 °C) από αυτή στο σημείο μέτρησης καθώς μετράται περίπου 25 m ψηλότερα σε ταράτσα.

Τα σφάλματα αυτά λήφθηκαν υπόψη και έγινε προσπάθεια να διορθωθούν. Λόγω του ότι ο σταθμός αυτός αποτελεί και την έξοδο της λεκάνης και είναι ο ποίο σημαντικός, έγιναν πολλές δοκιμές για την ορθότερη προσέγγιση της πραγματικότητας. Τελικά κρίθηκε σκόπιμο να αφαιρεθούν στο συγκεκριμένο σταθμό 3 mm (και όχι 2 mm όπως συνέβη στους άλλους δύο σταθμούς) και αυτό γιατί τους καλοκαιρινούς μήνες που δεν υπήρχε νερό, το σταθμήμετρο κατέγραφε 3 mm.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα στον σταθμό αυτό είναι οι καθημερινές ελλείψεις του μετρητή και ένα με δύο δεκαπεντάλεπτα που εμφανίζονται κυρίως τις μεσημεριανές ώρες. Μπορεί να μην δημιουργούν ουσιαστικό πρόβλημα στο αποτέλεσμα αλλά κάνουν την επεξεργασία των μετρήσεων πολύ δυσκολότερη και δημιουργούν μεγάλες καθυστερήσεις στους υπολογισμούς. Επίσης εντοπίζονται και αρνητικές καταγραφές στον μετρητή οι οποίες και αυτές χρειάζεται να αφαιρεθούν.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως το σταθμήμετρο άλλαξε θέση και πήγε λίγα μέτρα πιο κάτω στα όρια της πόλης της Καλαμάτας πάνω σε αναβαθμό δίπλα στο Λατομείο Μπάκα στις 14 Μαρτίου 2012 (*Φωτογραφία 4.4*).



Φωτογραφία 4.4: Σταθμημετρικός σταθμός Νέδοντα (λατομείο Μπάκα).

4.2.2.2. Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Καρβελιώτη

Ο αυτόματος Σταθμημετρικός σταθμός βρίσκεται τοποθετημένος στην γέφυρα Καρβελίου (Φωτογραφία4.5). Ξεκίνησε την λειτουργία του στις 16 Δεκεμβρίου 2011 αλλά σταμάτησε από τις 31 Ιανουαρίου μέχρι και τις 15 Μαρτίου λόγω τεχνικού προβλήματος. Από τις 10 Ιουλίου μέχρι και σήμερα οι μετρήσεις του σταθμήμετρου δεν εμφανίζονται στο διαδίκτυο. Είναι φανερό πως τα διαθέσιμα δεδομένα για αυτόν τον σταθμό εκτός από λίγα είναι και ελλιπή.

Ο Καρβελιώτης έχει σταθερά νερό ακόμα και το καλοκαίρι με στάθμη 4-5cm στα μέσα Ιουλίου (Κάππος προσωπική επικοινωνία). Στο σημείο υπάρχει διαρκώς κυματισμός λόγω της μη ομαλής επιφάνειας του τσιμέντου της κοίτης. Ο αισθητήρας βρίσκεται στο κέντρο του οχετού στην άκρη του οποίου βρίσκεται ο αναβαθμός ο οποίος, όπως είναι προφανές, δεν "βλέπει" πάνω στον αναβαθμό. Λόγω της συσσώρευσης φερτών υλικών όπως χώματα και πέτρες, η πραγματική κοίτη στο σημείο του αισθητήρα είναι λίγο μικρότερη κατά 1 με 1.5 m για στάθμες γύρω στα 8 cm και ελαφρώς περισσότερο για μικρότερες στάθμες.

Όπως συνέβη και στον προηγούμενο σταθμό, πραγματοποιήθηκαν και εδώ δυο υδρομετρήσεις τις ίδιες περιόδους (Μάρτιο και Οκτώβριο 2012) από το Ε.Α.Α.. Στην πρώτη χρονικά, μετρήθηκε το ύψος του αισθητήρα 2.065 m, η διατομή του οχετού είχε

πλάτος 7 m. Κάτω από τον αισθητήρα το βάθος ήταν 12 με 13 cm και η ταχύτητα ροής του υδατορεύματος 2.25 με 2.30 m/s. Στην δεύτερη υδρομέτρηση λόγω έλλειψης μεγάλης ποσότητας νερού μετρήθηκε πιο αξιόπιστο ύψος αισθητήρα (2.059 m), το πλάτος ροής ήταν 3 m, το βάθος 0.4 έως 2.4 cm σε ακτίνα 30 cm από το ίχνος του αισθητήρα. Ο αισθητήρας έδειχνε περίπου 1.5 με 2.5 cm λίγη ώρα πριν τη μέτρηση. Δεν μπορούσε να γίνει μέτρηση ταχύτητας για τους προφανείς λόγους πολύς μικρής ποσότητας νερού.

Τελικά και υστέρη από αρκετές δοκιμές, αποφασίστηκε να γίνει μια μείωση των τιμών στάθμης του καταγραφικού γι' αυτόν τον σταθμό κατά 2 mm. Οι τιμές που ήτανε κάτω από 2 mm όπως επίσης και οι αρνητικές καταγραφές πήραν όλες την τιμή 0.



Φωτογραφία 4.5: Σταθμημετρικός σταθμός Γέφυρας Καρβελιώτη

4.2.2.3. Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός Αλαγονίας

Στην Αλαγονία, το σταθμήμετρο (Φωτογραφία 4.6) βρίσκεται στο Νερόμυλο Ρεντίφη. Ο σταθμός αυτός λειτουργεί από τις 2 Φεβρουαρίου 2012 μέχρι και σήμερα χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα παρά μόνο ένα πενθήμερο στις αρχές Μαΐου, όπου λόγω

τεχνικού προβλήματος δεν καταγράφηκαν οι μετρήσεις και κατά την διάρκεια του καλοκαιριού καταγράφονται αρνητικές τιμές.

Λόγω του περιορισμένου πλάτους του αναβαθμού, ο οποίος έχει μικρότερο πλάτος από τον κώνο μέτρησης του αισθητήρα, ο τελευταίος "βλέπει" πίσω από τον αναβαθμό. Οι αρνητικές τιμές που παρατηρούνται στις μετρήσεις οφείλονται κυρίως στο ότι σαν απόσταση αισθητήρα-κοίτης έχει ληφθεί η απόσταση αισθητήρα-αναβαθμού και στο ότι το καλοκαίρι η στάθμη είναι χαμηλότερη από τον αναβαθμό. Εν τούτοις, επειδή στα μέσα Ιουλίου ο κ. Κάππος ανέφερε ότι υπήρχε ροή ενώ οι μετρούμενες στάθμες είναι αρνητικές (2 - 3 cm) υπάρχει και κάποιο σφάλμα στην εκτίμηση της απόστασης αισθητήρα-κοίτης/αναβαθμού. Επίσης, οι αρνητικές στάθμες οφείλονται και στο ότι ο αναβαθμός παρουσιάζει κλίση προς την απέναντι όχθη όπου και υπάρχει καθίζηση και θραύση του. Αυτή ξεκινά στα 3/5 περίπου του μήκους του αναβαθμού. Η ροή διέρχεται από εκείνο το σημείο και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μέτρηση γίνεται περίπου 50 cm ανάντη του αναβαθμού έχει τις αρνητικές τιμές ως αποτέλεσμα. Το βάθος του νερού στο τμήμα του αναβαθμού που έχει ροή φτάνει τα 14 cm.

Στις δύο υδρομετρήσεις που και σε αυτό τον σταθμό έγιναν, παρατηρηθήκαν τα εξής: Τον Μάρτιο στο ίχνος του αισθητήρα καταγράφηκε βάθος 34 cm και ταχύτητα ροής 1.41 m/s που όμως αναφερόταν σε βάθος 20cm. Στο ίχνος του σημείου μέτρησης επί του αναβαθμού περίπου 50 cm από τη βάση στήριξης και 15 m από την όχθη το βάθος μετρήθηκε 13cm με ταχύτητα 1.50 m/s , ενώ το ύψος του αισθητήρα ήταν 1.582 m. Στην επόμενη υδρομέτρηση του Οκτωβρίου έγιναν μετρήσεις στάθμης περίπου 1 m ανάντη του αναβαθμού (Πίνακας 4.1). Λόγω χαμηλής στάθμης δεν μετρήθηκε η ταχύτητα όμως εκτιμάται σε περίπου 0.5 m/s στο βαθύτερο σημείο και το ύψος του αισθητήρα καταγράφηκε 1.541 m. Υπήρχε ροή στα 2/5 του αναβαθμού προς την απέναντι από τον αισθητήρα όχθη. Ο αισθητήρας έδειχνε περίπου 1.2 cm λίγη ώρα πριν τη μέτρηση. Εάν χρησιμοποιήσουμε το νέο ύψος αυτό θα γίνει περίπου 5.3 cm Η στάθμη στο σημείο της διατομής που μετρά ο αισθητήρας ήταν 4.8 cm, επειδή όμως ο αναβαθμός σχηματίζει φρύδι 0,6 cm ανάντη, η πραγματική στάθμη ήταν 4.2 cm.

Η προκύπτουσα διαφορά μεταξύ μετρούμενης και πραγματικής στάθμης είναι 1.1 cm. Περίπου το 0.5 cm οφείλεται στη θερμοκρασία η οποία χρησιμοποιείται για τη διόρθωση και μπορεί να διαφέρει (είναι υψηλότερη 1-2°C) από αυτή στο σημείο μέτρησης καθώς μετράται περίπου 50 m πιο μακριά σε πιο ανοικτό σημείο με περισσότερο ηλιασμό.

Τελικά και υσττέρα από αρκετές δοκιμές, αποφασίστηκε να γίνει μια μείωση των τιμών στάθμης του καταγραφικού γι' αυτόν τον σταθμό κατά 2 mm. Επίσης όσες τιμές ήταν αρνητικές και δεν ήταν χονδροειδές σφάλμα η καταγραφή αυτή (για παράδειγμα υπήρξε τιμή στάθμης του μήνα Μάρτιου -30 cm), αντικαταστάθηκαν με τιμή μηδενική. Οι υπόλοιπες απλά διαγράφηκαν χωρίς να αντικατασταθούν.

Πίνακας 4.1: Απόσταση σε μέτρα από τον αναβαθμό και το αντίστοιχο βάθος σε εκατοστά

Απόσταση (m)	Βάθος (cm)
0.0	9.9
0.5	9.4
1.0	11.9
1.5	9.8
2.0	10.9
2.5	12.9
3.0	11.2
3.5	4.9
4.0	1.0

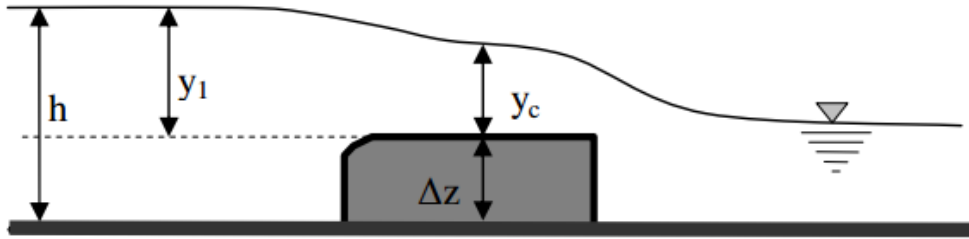


Φωτογραφία 4.6: Σταθμημετρικός σταθμός Αλαγονίας (Νερόμυλος Ρεντίφη).

4.3. Σχέση στάθμης – παροχής

Μετά τον έλεγχο και την διόρθωση των τριών χρονοσειρών στάθμης πρέπει να γίνει η μετατροπή τους σε παροχές που είναι και ο τελικός στόχος. Για να συμβεί αυτό πρέπει να είναι γνωστή η διατομή του υδατορεύματος στο σημείο που είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες. Και στους τρεις σταθμούς στο σημείο αυτό υπάρχουν αναβαθμοί. Εκτός από φωτογραφίες των αισθητήρων στο πεδίο, πληροφορία εξάχθηκε για την περιοχή και από τα εκτεταμένα τοπογραφικά διαγράμματα που είχαν γίνει πολύ πρόσφατα σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος (Μαχαίρας, 2012).

Στη περίπτωση και των τριών σταθμών, οι αναβαθμοί θεωρούνται ορθογωνικής διατομής πλάτους w και λειτουργούν σαν υπερχειλιστές ευρείας στέψης. Θεωρήθηκε ότι οι συνθήκες ροής ανάντη είναι τέτοιες που να μπορεί να αμεληθεί η κινητική ενέργεια καθώς και τυχόν απώλειες τριβών. Επειδή h είναι μεγάλο, κάπου πάνω στον υπερχειλιστή η ροή θα έχει κρίσιμο βάθος. Από την εξίσωση ενέργειας ($\Delta H=0$) στα ανάντη και επί του υπερχειλιστή (Σχήμα 4.2) αποδεικνύεται μια σχέση που δίνει την παροχή σαν συνάρτηση του βάθους ροής (Παπανικολάου.2012):



Σχήμα 4.3: Συνθήκες ροής στο σημείο μέτρησης της στάθμης.

$$Q = w \sqrt{g} \left(\frac{2}{3}\right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \left(\frac{3y_c}{2}\right)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (4.2)$$

Ύστερα από τις απαλοيفές προκύπτει η τελική σχέση στάθμης-παροχής:

$$Q = (y_c)^{\left(\frac{3}{2}\right)} w \sqrt{g} \quad (4.3)$$

Όπου: Q η παροχή, w το πλάτος του αναβαθμού και y_c η στάθμη.

Έτσι, για κάθε αναβαθμό αυτό που χρειάστηκε για τον υπολογισμό της παροχής είναι μόνο το ακριβές πλάτος και η διορθωμένη στάθμη του. Στην Αλαγονία το πλάτος είναι 7 m και στην γέφυρα Καρβελίου είναι 8 m. Παρόλα αυτά για αυτές τις διατομές, αποφασίστηκε στους υπολογισμούς των παροχών το πλάτος τους να μειωθεί κατά ένα μέτρο. Ο λόγος που συνέβη αυτό είναι το ότι οι διατομές δεν είναι απολυτά ευθύγραμμες (έχουν υποστεί διάβρωση, έχουν μικρές κλίσεις αλλά και λόγω της απόθεσης φερτών) και στις μικρές παροχές το ενεργό πλάτος του αναβαθμού δεν είναι όσο η μετρημένη διατομή αλλά πολύ μικρότερο. Έτσι χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέση λύση που είναι η μείωση του πλάτους του αναβαθμού στον υπολογισμό των παροχών. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν είναι η καλύτερη δυνατή λύση και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης ο τρόπος μετατροπής στάθμης σε παροχή, όπως συνέβη στο σταθμήμετρο κοντά στο Λατομείο Μπάκα, αλλά στην συγκεκριμένη μελέτη δεν ήταν αυτός ο πρωταρχικός στόχος.

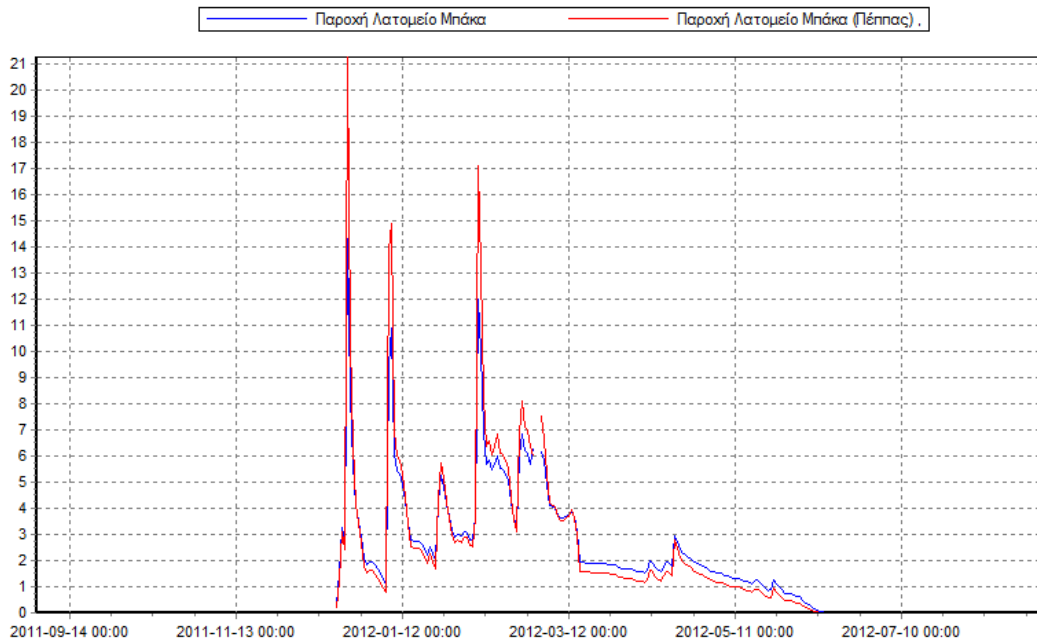
Τέλος, στο Λατομείο Μπάκα, ο αναβαθμός έχει πλάτος 18 m που είναι και ο μεγαλύτερος από τους τρεις της λεκάνης. Έγιναν και σε αυτόν τον σταθμό προσπάθειες για καλύτερο υπολογισμό των παροχών με τεχνητή μείωση του πλάτους του αναβαθμού αλλά δεν κρίθηκαν ικανοποιητικές. Έτσι η θεώρηση της ορθογωνικής διατομής που έγινε στους προηγούμενους σταθμούς απορρίφθηκε. Τελικά, έγινε επεξεργασία σε

εξειδικευμένο λογισμικό (Flow 3d) από μελετητική εταιρεία (ΕΤΜΕ: Πέππας & Συνεργάτες Ε.Ε.) όπου βρέθηκε η εκθετική εξίσωση:

$$y = 122,16 x^{1.933} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση αυτή μετατρέπει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις στάθμες σε παροχές σε m^3/s .

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.4) διακρίνονται οι διαφορές από τους δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού των παροχών. Η χρονοσειρά με το μπλε χρώμα δημιουργήθηκε με την μέθοδο που υπολογίστηκαν και οι παροχές στους άλλους δύο σταθμούς χρησιμοποιώντας για πλάτος αναβαθμού τα 18 m. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίστηκαν μεγάλες παροχές στις μικρές στάθμες ενώ ταυτόχρονα υποεκτιμούταν οι μεγάλες παροχές. Όπως βλέπουμε με την κόκκινη γραμμή η εκθετική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε, έδωσε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα και έλυσε εν μέρει το πρόβλημα αυτό.



Σχήμα 4.4: Παροχές για τον σταθμημετρικό σταθμό Λατομείο Μπάκα

4.4. Επιφανειακή ολοκλήρωση και υψομετρική αναγωγή σημειακών δεδομένων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης

Όπως είναι φανερό, το φαινόμενο της κατακρήμνισης αλλά και της θερμοκρασίας εξελίσσεται σε κάποια επιφάνεια με ρυθμό που μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά και στον χώρο. Παρόλα αυτά κρίνεται αναγκαίο να καταλήξουμε σε μια προσέγγιση της πληροφορίας λόγω του ότι τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη βασική συνιστώσα εισόδου σε όλα τα υδρολογικά μοντέλα.

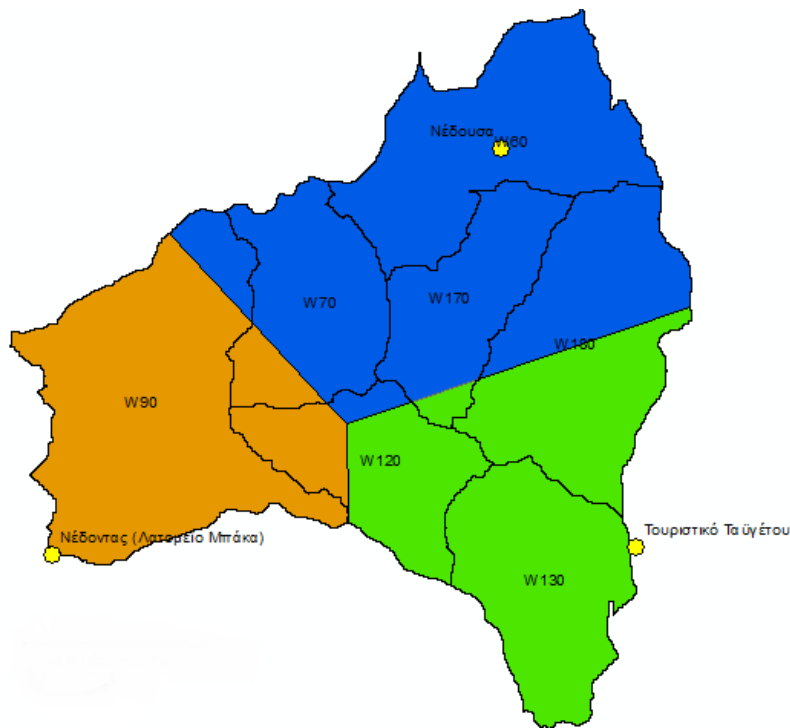
Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα μελέτη είναι η επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας και έπειτα η υψομετρική τους αναγωγή σύμφωνα με τα γεωγραφικά υψόμετρα των μετεωρολογικών σταθμών και τα μέσα υψόμετρα των υπολεκάνων. Η επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης γίνεται σε ωριαίο και ημερήσιο βήμα, ενώ της θερμοκρασίας μόνο σε ημερήσιο. Η μέθοδος που ακολουθείται είναι των πολυγώνων Thiessen η οποία ουσιαστικά είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί συντελεστές βάρους των σημειακών τιμών και η εφαρμογή της είναι απλή και γρήγορη σε σχέση με στατιστικές – στοχαστικές μεθόδους παρεμβολής που είναι πιο χρονοβόρες και πολύπλοκες (Kriging, CoKriging). Βεβαίως οι εκτιμήσεις της μεθόδου είναι τόσο καλύτερες όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των σταθμών.

4.4.1. Επιφανειακή Ολοκλήρωση με την μέθοδο των Πολυγώνων Thiessen

Η μέθοδος αυτή θέτει συντελεστές βάρους στους μετεωρολογικούς σταθμούς μίας περιοχής για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Η χάραξη των πολυγώνων Thiessen γίνεται με την χάραξη των μεσοκαθέτων στα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τους σταθμούς ανά δύο. Τα πολύγωνα ορίζονται κατά μοναδικό τρόπο σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο σταθμών λεκάνης απορροής. Έτσι, αφού δημιουργηθούν οι ζώνες επιρροής του κάθε μετεωρολογικού σταθμού για όλη τη λεκάνη, για κάθε υπολεκάνη, αντιστοιχεί ένα ποσοστό από κάθε σταθμό. Το ποσοστό αυτό προκύπτει ως πηλίκο της έκτασης του πολυγώνου προς την συνολική έκταση της κάθε

υπολεκάνης και μπορεί να πάρει τιμές από 0 (για την μη συμμετοχή ενός σταθμού σε μια υπολεκάνη) έως 1 (εξ' ολοκλήρου συμμετοχή του σταθμού αυτού).

Στη λεκάνη του Νέδοντα χρησιμοποιήθηκαν, όπως έχει περιγραφεί λεπτομερώς σε προηγούμενη ενότητα, τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί για την καταγραφή των θερμοκρασιών και των βροχοπτώσεων, άρα τα πολύγωνα είναι τα ίδια και στις δύο περιπτώσεις (θερμοκρασίες, βροχοπτώσεις). Κατασκευάστηκαν σε περιβάλλον ARC GIS 10 (Geographic Information System) χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ρουτίνα από το Arctoolbox (Analysis Tools >> Proximity >> Create Thiessen Polygons) (Σχήμα 4.3).










Σχήμα 4.5: Πολύγωνα Thiessen για την περιοχή μελέτης

Διαπιστώνεται ότι μόλις δύο υπολεκάνες (w60, w130) επηρεάζονται από έναν μόνο σταθμό ενώ ένας που βρίσκεται πιο κεντρικά (w120) επηρεάζεται από τις μετρήσεις και των τριών σταθμών. Στη συνέχεια παρατίθενται τα ποσοστά συμμετοχής των μετεωρολογικών σταθμών σε κάθε υπολεκάνη (Πίνακας 4.2). Τέλος, σημειώνεται ότι ο σταθμός Καλαμάτας-Νησάκι βρίσκεται εκτός λεκάνης και δεν έχει καμία συνεισφορά στην δημιουργία των πολυγώνων γι' αυτό και δεν απεικονίζεται. Χρησιμοποιήθηκε μόνο για την συμπλήρωση τιμών στον κοντινό του σταθμό (Λατομείο Μπάκα).

Τελικά, πολλαπλασιάζονται οι συντελεστές βάρους της κάθε υπολεκάνης με κάθε τιμή της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας από τον σταθμό που αντιστοιχούν και προσθέτονται τα γινόμενα αυτά για να προκύψουν οι τελικές τιμές. Με την δημιουργία νέων χρονοσειρών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη ολοκληρώνεται η επιφανειακή αναγωγή των τιμών αυτών.

Πίνακας 4.2: Συντελεστές βάρους *Thiessen* για τις υπολεκάνες της λεκάνης του Νέδοντα

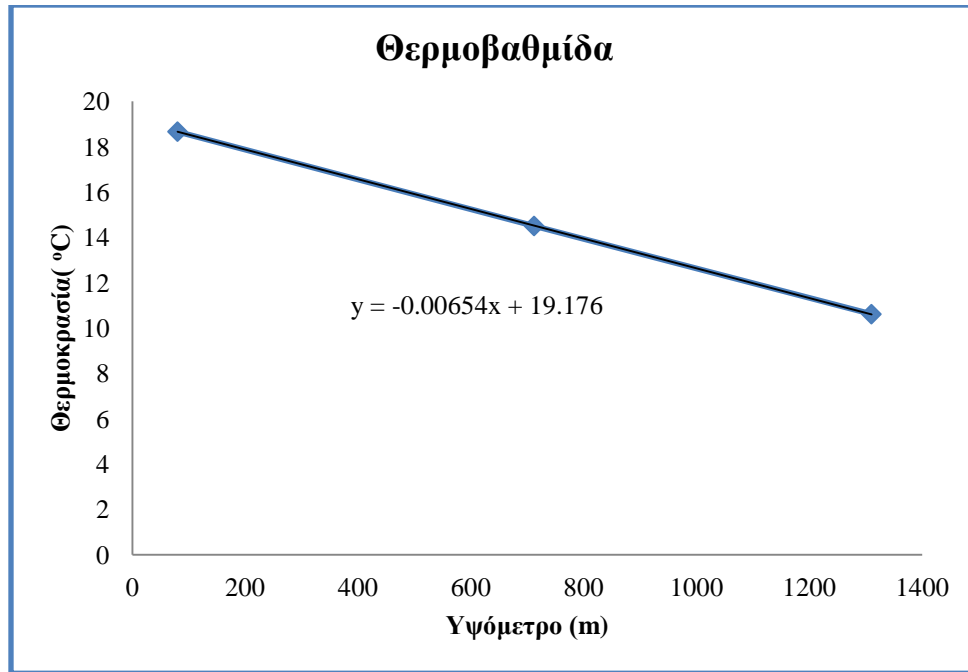
Υπολεκάνη w60		
Νέδουσα	1.000	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.000	
Λατομείο Μπάκα	0.000	
Υπολεκάνη w70		
Νέδουσα	0.826	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.000	
Λατομείο Μπάκα	0.174	
Υπολεκάνη w90		
Νέδουσα	0.078	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.000	
Λατομείο Μπάκα	0.922	
Υπολεκάνη w120		
Νέδουσα	0.076	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.626	
Λατομείο Μπάκα	0.297	
Υπολεκάνη w130		
Νέδουσα	0.000	
Τουριστικό Ταυγέτου	1.000	
Λατομείο Μπάκα	0.000	
Υπολεκάνη w170		
Νέδουσα	0.931	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.069	
Λατομείο Μπάκα	0.000	
Υπολεκάνη w180		
Νέδουσα	0.480	
Τουριστικό Ταυγέτου	0.520	
Λατομείο Μπάκα	0.000	

4.4.2. Υψομετρική αναγωγή

Εύκολα γίνεται σαφές πως τα σημειακά δεδομένα είναι αραιά παρατηρημένα και δεν αναπαριστούν τις επιφανειακές διαδικασίες επαρκώς, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές διότι υπάρχουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές ανάμεσα στους μετεωρολογικούς σταθμούς και το ανάγλυφο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση και την υπερεκτίμηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Για να ελαχιστοποιηθεί η μεροληψία του μοντέλου επιφανειακής ολοκλήρωσης λόγω του συστηματικού επιφανειακού σφάλματος, είναι απαραίτητη η υψομετρική αναγωγή των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν ορθότερες τιμές και ως προς την τοπογραφία της περιοχής.

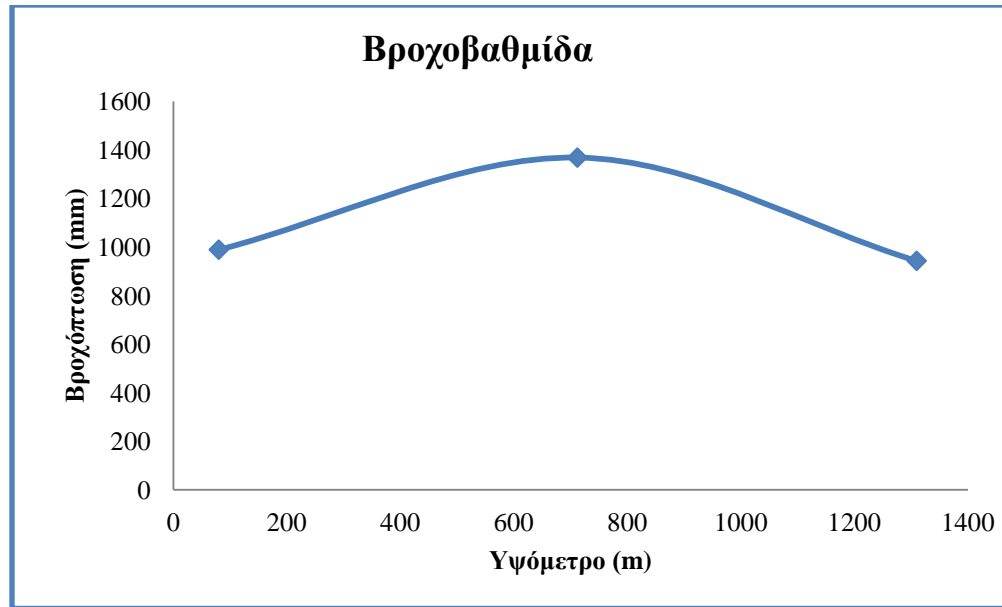
Η υψομετρική διόρθωση των τιμών της επιφανειακής ολοκλήρωσης γίνεται μέσω ενός συντελεστή λ . Για να υπολογιστεί όμως αυτός, πρέπει πρώτα να γίνει γνωστή η θερμοβαθμίδα και η βροχοβαθμίδα στην λεκάνη μελέτης, δηλαδή την μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχής ανά μονάδα υψομέτρου.

Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενη ενότητα. Για την θερμοβαθμίδα (Διάγραμμα 4.3), η συσχέτιση των σταθμών παρουσιάστηκε αρκετά ισχυρή και έτσι χρησιμοποιήθηκε. Η τιμή της, είναι η κλίση της ευθείας και ισούται με $-0.00654(^{\circ}\text{C}/\text{m})$



Διάγραμμα 4.3: Μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης για εύρεση θερμοβαθμίδας για την περιοχή ελέγχου.

Για την βροχόπτωση, το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης δεν έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται και παρακάτω (Διάγραμμα 4.4), δεν κατέστη εφικτό να βρεθεί γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στους σταθμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα βροχής ήταν μόνο από ένα υδρολογικό έτος. Γι' αυτό βρέθηκε από ιστορικά δεδομένα ότι η βροχοβαθμίδα στην περιοχή είναι 0.750 (mm/m).



Διάγραμμα 4.4: Μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης για εύρεση βροχοβαθμίδας για την περιοχή ελέγχου. Δεν βρέθηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο ζητούμενος συντελεστής υψομετρικής αναγωγής λ , δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (4.5)$$

Όπου z_s το μέσο υψόμετρο της λεκάνης και z_σ το μέσο σταθμημετρικό υψόμετρο των σταθμών και h_s το μέσο σταθμημετρικό επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής για τον υπολογισμό των βροχών και θερμοκρασίας για τις θερμοκρασίες αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές υψομετρικής αναγωγής βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για κάθε υπολεκάνη.

Υπολεκάνη	λ θερμοκρασίας	λ βροχόπτωσης
W60	0.866	1.163
W70	0.940	1.081
W90	0.813	1.386
W120	1.093	0.857
W130	1.132	0.830
W170	1.006	0.992
W180	0.964	1.045

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Μοντέλα Υδρολογικής Προσομοίωσης – HEC-HMS

5.1. Το μοντέλο HEC-HMS

Η υδρολογική προσομοίωση αποτελεί μια διαδικασία αναπαράστασης των υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής με σκοπό τον υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος της λεκάνης απορροής, για συγκεκριμένα επεισόδια βροχής αλλά και για ολόκληρες υδρολογικές περιόδους. Στη συγκεκριμένη εργασία όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η αναπαράσταση αυτή γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί με την χρήση δύο λογισμικών πακέτων του HEC-HMS και του HYDROGEIOS που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφαλαίο της εργασίας.

Το λογισμικό HEC-HMS δημιουργήθηκε από το τμήμα μηχανικού του Αμερικάνικου στρατού (www.hec.usace.army.mil) και είναι ουσιαστικά μια «υδρολογική πλατφόρμα» που δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να διαμορφώσει μόνος του το υδρολογικό μοντέλο που επιθυμεί. Βέβαια το μοντέλο δημιουργήθηκε και χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώνει μεμονωμένα επεισόδια βροχής, αλλά δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει και συνεχή προσομοίωση. Τα αποτελέσματα και των δύο διαδικασιών θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα παρακάτω.

Το υδρολογικό αυτό πρόγραμμα, είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο το οποίο σχεδιάστηκε για να προσομοιώνει την διαδικασία βροχής – απορροής σε λεκάνη δενδρικού τύπου και εφαρμόζεται τόσο σε μεγάλες λεκάνες όσο και σε μικρές αστικές και ημιαστικές. Το παραγόμενο αποτέλεσμα του μοντέλου, δηλαδή το υδρογράφημα της λεκάνης, χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που σχετίζονται με το νερό όπως σε μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων, πρόγνωσης πλημμυρών διευθέτησης περιοχής κατάκλισης πλημμύρας, σχεδιασμού υπερχειλιστών, κ.α. (William 2010).

Ο όρος «πλατφόρμα» υδρολογικών μοντέλων αναφέρεται στο γεγονός ότι το μαθηματικό μοντέλο του λογισμικού χωρίζεται σε τμήματα από τα οποία ο χρήστης μπορεί να

επιλέξει αυτό που ταιριάζει καλύτερα για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής που μελετά. Η επιλογή εξαρτάται από το επίπεδο γνώσης, εμπειρίας και κρίσης του χρήστη όπως επίσης και της γνώσης του φυσικού συστήματος των στόχων της υδρολογικής μελέτης και των δεδομένων που είναι διαθέσιμα στην περιοχή.

Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS κατ' αντιστοιχία με τις διαδικασίες που περιγράφει χωρίζονται σε:

- Πρότυπα εκτίμησης απωλειών βροχής
- Πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής
- Πρότυπα υπολογισμού άμεσης απορροής
- Πρότυπα διόδευσης πλημμυρογραφήματος

Οι επιλογές για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες θα παρουσιαστούν εκτενέστερα στη πορεία.

Για την λειτουργία του προγράμματος είναι απαραίτητα μία σειρά γεωμορφολογικών και υδρολογικών δεδομένων που συνήθως παράγονται σε περιβάλλον GIS (συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών) με τη βοήθεια της επέκτασης HEC-GeoHMS (HEC-GeoHMS User's Manual, 2010). Η λογική διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής που παρουσιάζει τα βήματα επεξεργασίας των δεδομένων.

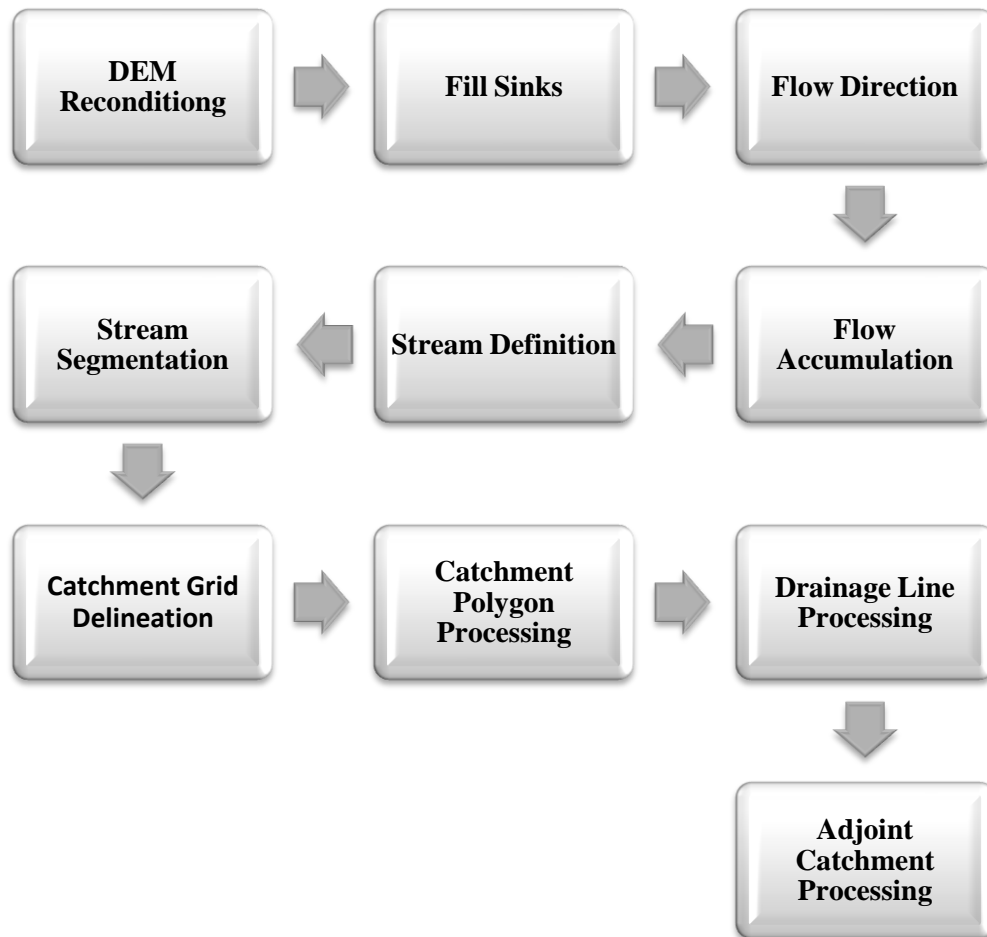


Διάγραμμα 5.1: Διαδικασία Υδρολογικής Προσομοίωσης της Λεκάνης με HEC-GeoHMS

5.2. Ανάλυση της λεκάνης στο HEC -GeoHMS

Το HEC-GeoHMS αποτελεί μια επέκταση του ArcMap και της εργαλειοθήκης ArcHydro της ESRI. Με τη βοήθεια του εργαλείου αυτού, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις λεκάνες και τα ρέματα και κατ' επέκταση να παράγει τα απαραίτητα αρχεία εισόδου που απαιτούνται στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS.

Τα αρχεία εισόδου στο HEC-GeoHMS αυτής της εργασίας, παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 και είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο υδρολιθολογικός χάρτης εδαφών, ο χάρτης χρήσεων γης καθώς και κάποια άλλα αρχεία χωρικών δεδομένων σε διανυσματική μορφή, δηλαδή του υδρογραφικού δικτύου και των θέσεων των σταθμών μέτρησης. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται συνοπτικά η διαδικασία των εντολών που ακολουθείται για την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου του προγράμματος HEC-HMS.



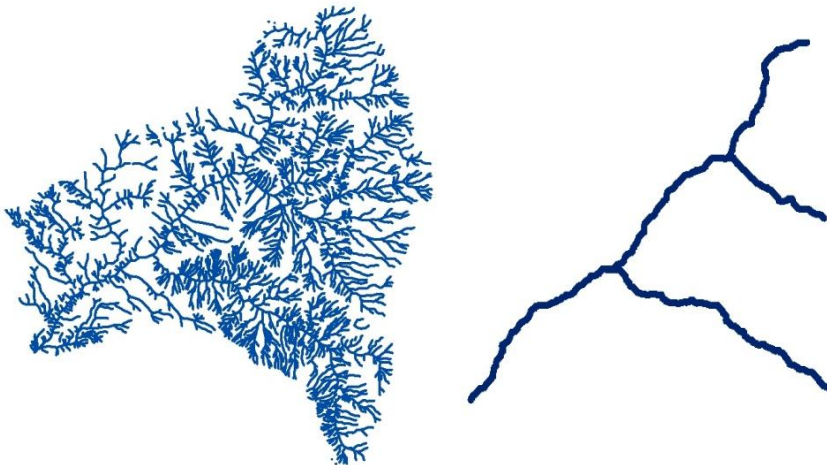
Διάγραμμα 5.2: Βήματα προεπεξεργασίας Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων. Πηγή:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

Αρχικά, διορθώνονται τα ελλιπή ή λανθασμένα υψόμετρα κατά μήκος των ρεμάτων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους με ανακατανομή των κυττάρων του καννάβου. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η ακριβέστερη αποτύπωση της κοίτης του ποταμού.

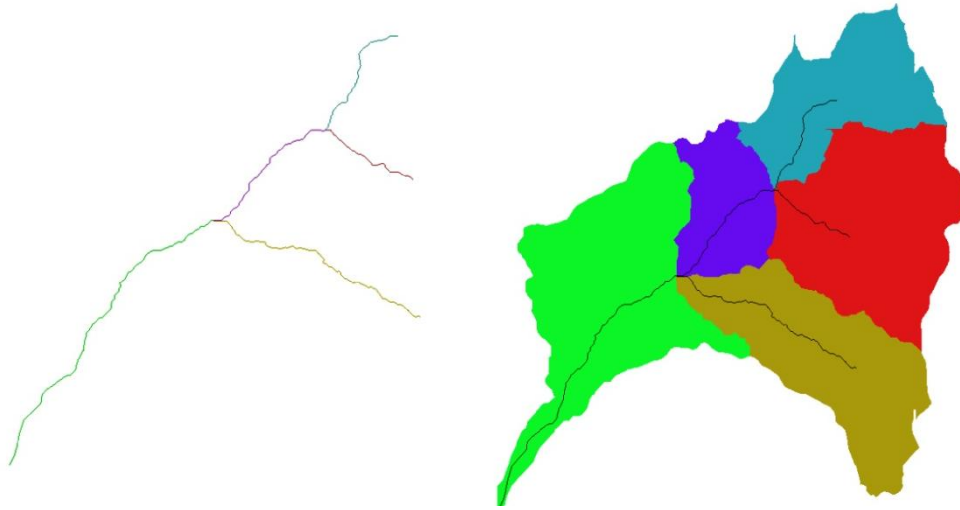
Έπειτα, διορθώνονται τα βυθίσματα στο ανάγλυφο. Στο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ενδέχεται να υπάρχουν κύτταρα με μικρότερη τιμή υψομέτρου από τα γειτονικά τους με αποτέλεσμα να μην ολοκληρώνεται η υδρολογική ανάλυση, αφού παρακωλύεται η ροή του νερού. Στη συνέχεια, δημιουργείται αρχείο που περιέχει την πληροφορία για την διεύθυνση της ροής του νερού με μαθηματικό τύπο που υπολογίζει κάθε φορά την μέγιστη κλίση και έτσι κατασκευάζεται στην συνέχεια ένας κάρναβος συγκεντρωτικής ροής της λεκάνης.

Σε αυτό το σημείο επεμβαίνει ο χρήστης που πρέπει να ορίσει ένα κατώφλι στην τιμή της συγκεντρωτικής ροής και με την παραδοχή ότι για τιμές μικρότερες αυτού δεν υφίσταται συγκεντρωτική ροή. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγει τα κύτταρα που έχουν συγκεντρωτική ροή μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή, που ο ίδιος ο χρήστης έχει θέσει. Έτσι απεικονίζεται ένα αποστραγγιστικό δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο. (Chang, 2003). Στη περιοχή ελέγχου, για της ανάγκες της συγκεκριμένης υδρολογικής μελέτης το κατώφλι που ορίστηκε είναι τα 16000 κύτταρα ή αλλιώς τα 10 km², δηλαδή να έχει συγκεντρωτική ροή από 16000 κύτταρα και πάνω για να θεωρηθεί μέρος του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 5.2) που εκφράζεται σε έκταση 10 km². Η τιμή αυτή επιλέχθηκε και για λόγους συμβατότητας με την Οδηγία 2000/60 της ΕΚ όπου ορίζεται σαν κατώφλι για τον ορισμό της ελάχιστης λεκάνης απορροής ποταμού.



Σχήμα 5.1 ,5.2: Στα αριστερά απεικονίζεται το αρχικό υδρογραφικό δίκτυο και δεξιά το κύριο υδρογραφικό δίκτυο ύστερα από τον ορισμό κατωφλίου 10 km².

Στη συνέχεια, το υδατόρευμα χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα με βάση την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 5.3)και έτσι στο επόμενο βήμα δημιουργούνται οι υπολεκάνες, μία για κάθε ένα τμήμα του υδατορεύματος. Στην λεκάνη του Νέδοντα, στη παρούσα φάση, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.4 δημιουργήθηκαν πέντε υπολεκάνες.



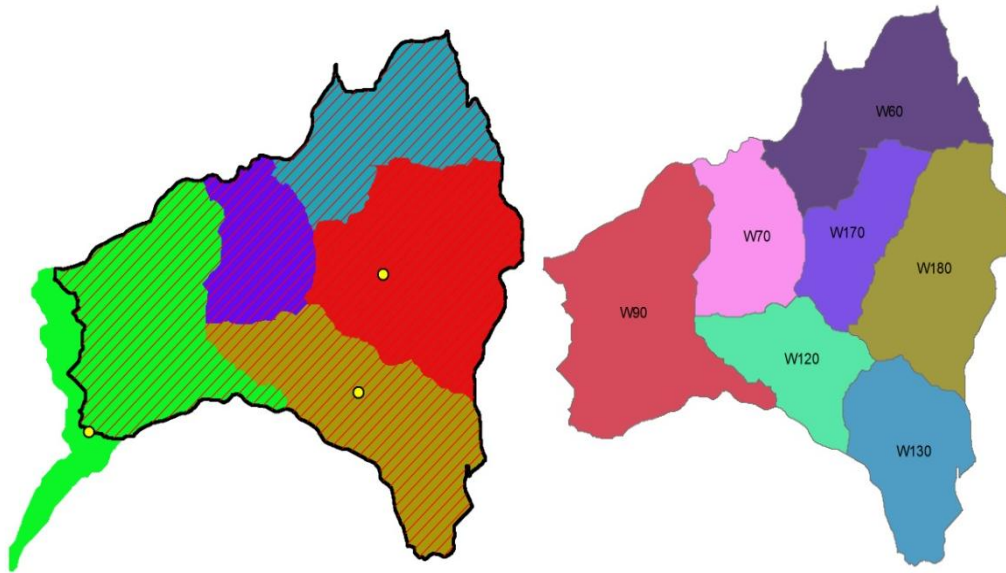
Σχήμα 5.3 ,5.4: Στα αριστερά απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο κατηγοριοποιημένο και δεξιά οι υπολεκάνες που δημιουργήθηκαν από αυτό

5.2.1. Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου για το HEC-HMS

Για την δημιουργία των αρχείων εισόδου χρησιμοποιείται η εργαλειοθήκη του HEC-GeoHMS στην οποία ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει ένα καινούργιο έργο (project). Αφού οριστεί η περιοχή μελέτης και τα σημεία ενδιαφέροντος, δίνεται η κατάλληλη ονοματολογία για την περιοχή και τα σημεία τα οποία είναι σημαντικά για την μελέτη. Τα σημεία αυτά είναι αρχικά η έξοδος της λεκάνης απορροής, τα σημεία όπου υπάρχει σταθμημετρικός σταθμός και τα σημεία που υπάρχει ένωση δύο κλάδων του υδατορεύματος.

Μετά από αυτή την διαδικασία το λογισμικό επανασχεδιάζει την λεκάνη δημιουργώντας υπολεκάνες στους σταθμούς μέτρησης απορροών και ξαναορίζει τα όρια της λεκάνης με

βάση το σημείο εξόδου. Με τον τρόπο αυτό, έχοντας μετρήσεις σε κάποιες εξόδους υπολεκανών μπορεί να γίνει έλεγχος αποτελεσμάτων του υδρολογικού μοντέλου και ως εκ τούτου καλύτερη προσομοίωση. Τελικά η σχηματοποίηση της περιοχής με τον τελικό αριθμό των υπολεκανών όπως επίσης και οι διαφορές της με την σχηματοποίηση πριν τον ορισμό των σημείων φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 5.5, 5.6). δημιουργήθηκαν δύο νέες υπολεκάνες και μίκρυναν ελαφρώς τα όρια της λεκάνης λόγω μετατόπισης της εξόδου αυτής.



Σχήμα 5.5 ,5.6: Στα αριστερά απεικονίζονται τα σημεία ελέγχου και τα όρια της νέας περιοχής και δεξιά η τελική σχηματοποίηση της λεκάνης.

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας για την δημιουργία των απαραίτητων αρχείων είναι η εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Με μία αυτοματοποιημένη ρουτίνα η εργαλειοθήκη αυτή υπολογίζει όλα τα απαραίτητα για το πρόγραμμα χαρακτηριστικά. Υπολογίζεται το μήκος και η μέση κλίση του ποταμού, το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής κάθε υπολεκάνης μέχρι την έξοδό της, το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης απορροής καθώς και το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της μέχρι την έξοδό της. Συνοπτικά παρουσιάζονται οι τιμές αυτές στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Όνομα λεκάνης	Όνομα υδατορεύματος	Μήκος υδατορεύματος	Κλίση υδατορεύματος (%)
W60	R10	4308	6.40
W70	R30	4894	2.05
W90	R50	5532	3.70
W120	R40	6075	4.90
W130	R140	1849	5.73
W170	R20	2842	6.97
W180	R190	500	0.60

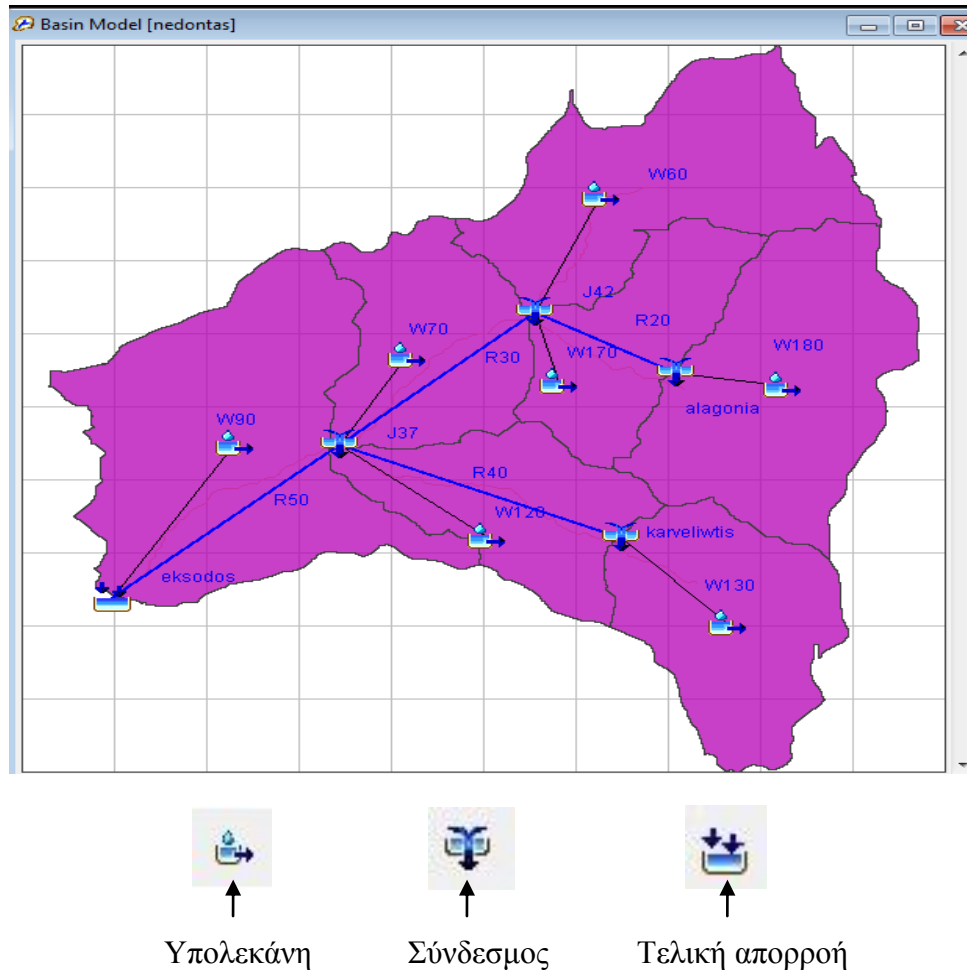
5.3. Περιβάλλον HEC-HMS

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να «τρέξει» η υδρολογική προσομοίωση πρέπει πρώτα να οριστούν τα τέσσερα μαθηματικά πρότυπα στα οποία χωρίζεται η πλατφόρμα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιλογές που έγιναν για κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες. Να σημειωθεί πως πραγματοποιήθηκαν δύο συνεχείς προσομοιώσεις ενός έτους, (μια με ωριαίο και μια ημερήσιο βήμα) και τρεις προσομοιώσεις επεισοδίων βροχής (Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Απρίλιος 2012). Όπως είναι φανερό, διαφορετικά μαθηματικά πρότυπα χρησιμοποιήθηκαν για τις συνεχείς προσομοιώσεις και διαφορετικά για τα επεισόδια. Παρακάτω θα γίνει εκτενής περιγραφή των επιλογών για κάθε κατηγορία προσομοίωσης.

5.3.1. Μοντέλο λεκάνης απορροής

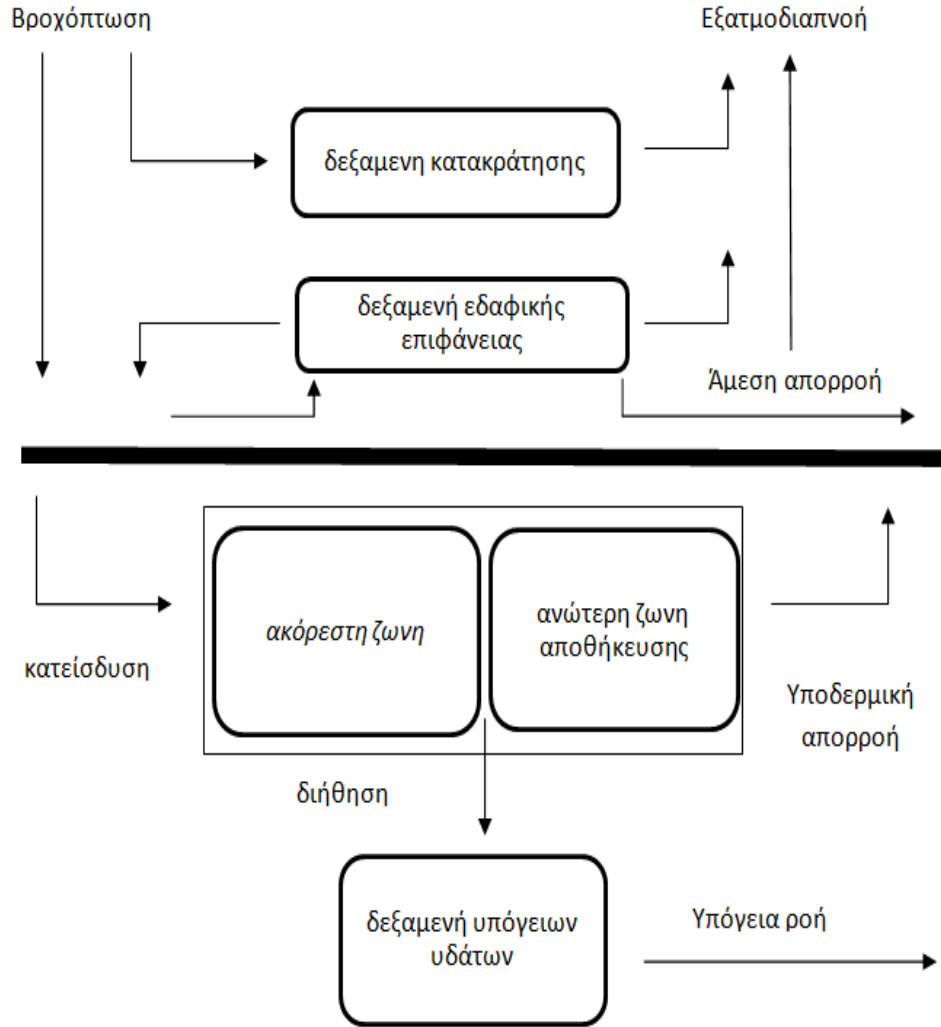
Μετά την δημιουργία του μοντέλου της λεκάνης απορροής που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του GIS (HEC-GeoHMS), στο στάδιο αυτό εισάγεται το μοντέλο αυτό στο HEC-HMS. Πλέον η λεκάνη απορροής και όλα τα σημεία της έχουνε άλλη μορφή

πιο περιγραφική (Σχήμα 5.7). Στο σημείο αυτό και σύμφωνα με τις επιλογές μεθόδων που θα γίνουν ουσιαστικά γίνεται η παραμετροποίηση της λεκάνης.



Σχήμα 5.7: Λεκάνη απορροής Νέδοντα στο λογισμικό HEC-HMS

Μετά την εισαγωγή του μοντέλου της λεκάνης απορροής, επόμενη ενέργεια, είναι να επιλεγθούν τα κατάλληλα πρότυπα υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης, δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, απωλειών βροχής, άμεσης απορροής, και βασικής ροής για κάθε μία από τις επτά υπολεκάνες, και διόδευσης πλημμύρας για τα τμήματα του υδατορεύματος. Ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου σχετίζεται άμεσα αρχικά από την επιλογή η μη προτύπων και έπειτα από την επιλογή της μεθόδου για κάθε πρότυπο. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά το τελικό μοντέλο που επιλέχθηκε στο λογισμικό HEC-HMS για την προσομοίωση του υδρολογικού έτους (Διάγραμμα 5.2).



Διάγραμμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης με HEC-HMS

5.3.1.1. Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης

Στην περίπτωση της προσομοίωσης επεισοδίου βροχής το πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί εισάγεται μέσα στη μέθοδο απωλειών βροχής που χρησιμοποιήθηκε (SCS).

Για την συνεχή προσομοίωση του υδρολογικού έτους, επιλέχθηκε η μέθοδος της απλής δεξαμενής κατακράτησης. Όσον αφορά το πρότυπο αυτό, η επιλογή της μεθόδου ήταν

ίδια για όλες τις υπολεκάνες με διαφορετικές όμως τιμές στις παραμέτρους για κάθε μία από αυτή. Αυτή η μέθοδος είναι μία απλή αναπαράσταση της επιφάνειας των φυτών. Όλη η βροχόπτωση παρεμποδίζεται έως ότου η χωρητικότητα αποθήκευσης των φυτών είναι γεμάτη. Από την δεξαμενή αυτή, πραγματοποιείται και η εξατμοδιαπνοή μέχρι να μην υπάρχει άλλο διαθέσιμο νερό. Σε περίπτωση που οι ανάγκες για εξατμοδιαπνοή δεν έχουν ολοκληρωθεί από αυτή την δεξαμενή τότε η διαδικασία αυτή συνεχίζεται στην δεξαμενή του εδάφους.

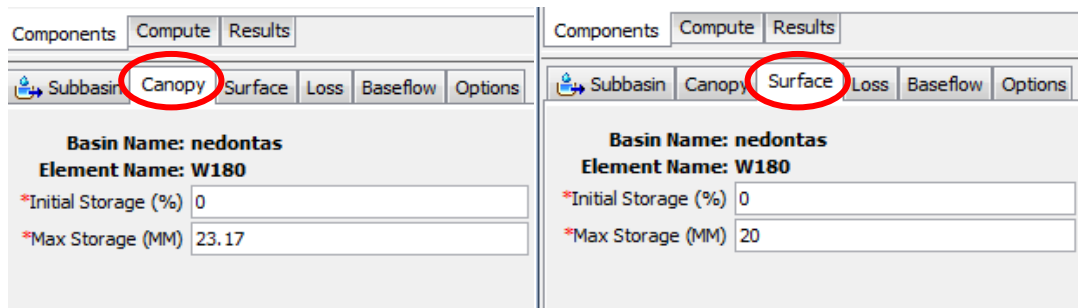
Η μέθοδος αυτή παραμετροποιείται με 2 τιμές, αυτής της αρχικής αποθήκευσης της δεξαμενής (σε ποσοστό επί τις εκατό) και στην μέγιστη δυνατή αποθήκευση της δεξαμενής κάθε υπολεκάνης (σε χιλιοστά). Το ποσοστό της αρχικής αποθήκευσης πήρε την μηδενική τιμή σε όλες τις υπολεκάνες διότι η προσομοίωση ξεκινάει τον μήνα Σεπτέμβριο ακριβώς δηλαδή μετά τους καλοκαιρινούς μήνες και ως εκ τούτου οι δεξαμενές θεωρούνται άδειες (Εικόνα 5.1).

5.3.1.2. Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας

Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτή την περίπτωση της προσομοίωσης επεισοδίου βροχής το πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί εισάγεται μέσα στη μέθοδο απωλειών βροχής που χρησιμοποιήθηκε (SCS).

Για την συνεχή προσομοίωση του υδρολογικού έτους, επιλέχθηκε η μέθοδος της απλής δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή είναι μια αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους. Όλες οι κατακρημνίσεις που φτάνουν στο έδαφος περιέχονται σε αυτή την δεξαμενή (κοιλότητες του φυσικού ανάγλυφου του εδάφους) μέχρι η χωρητικότητα της δεξαμενής να εξαντληθεί. Μόλις γίνει αυτό, τότε το νερό που περισσεύει δημιουργεί την άμεση απορροή. Νερό μπορεί να διηθείται κατά την διάρκεια της αποθήκευσης στην δεξαμενή όπως επίσης αν δεν αρκεί η εξατμοδιαπνοή από την δεξαμενή κατακράτησης μπορεί να συνεχίζεται από αυτή την δεξαμενή.

Όπως και στην προηγούμενη δεξαμενή, έτσι και σε αυτή η περιγραφή της γίνεται με δύο παραμέτρους για κάθε υπολεκάνη. Η πρώτη αφορά το ποσοστό επί τις εκατό της αρχικής αποθήκευσης νερού της δεξαμενής και η δεύτερη την μέγιστη δυνατή αποθήκευση της δεξαμενής κάθε υπολεκάνης σε χιλιοστά. Όπως ακριβώς και στην προηγούμενη δεξαμενή έτσι και σε αυτή το ποσοστό της αρχικής αποθήκευσης πήρε την μηδενική τιμή σε όλες τις υπολεκάνες ενώ οι τιμές της άλλης παραμέτρου ποικίλουν σε κάθε υπολεκάνη (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1 ,5.2: Στα αριστερά απεικονίζονται οι παράμετροι μιας υπολεκάνης για την δεξαμενή κατακράτησης και δεξιά για την δεξαμενή εδαφικής επιφάνειας

5.3.1.3. Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Για το υπολογισμό των απωλειών βροχής χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μεθοδολογίες για την συνεχή προσομοίωση και για την προσομοίωση επεισοδίων οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

Προσομοίωση επεισοδίων

Στην προσομοίωση των τριών επεισοδίων βροχής χρησιμοποιήθηκε η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων, η Soil Conservation Service (SCS) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

Η κατακράτηση του νερού και η διήθησή του στο έδαφος είναι δύο διαφορετικοί μηχανισμοί γένεσης υδρολογικών ελλειμμάτων που μπορούν να εκτιμηθούν χωριστά.

Μολαταυτά, η εκτίμηση των ελλειμμάτων στις υδρολογικές μελέτες, γίνεται συνήθως συνολικά.

Η Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service) του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής ανέπτυξε το 1972 την αναφερόμενη ως, μέθοδο SCS για τη συνολική εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών χρησιμοποιώντας, στην τελική της μορφή, μία μόνο παράμετρο. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται με τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και μπορεί να εκτιμηθεί είτε με χρήση δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής, είτε μέσω πινάκων που έχουν καταρτιστεί για το σκοπό αυτό.

Η μέθοδος SCS στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- Σε ένα αρχικό χρονικό διάστημα t_0 , όλη η πραγματική βροχόπτωση ύψους h_0 , μετατρέπεται σε έλλειμμα, χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Μετά το χρονικό διάστημα t_0 το μέγιστο ενεργό ύψος βροχόπτωσης h_e δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ($y = h - h_0$), όπου h το ολικό ακαθάριστο ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέρα του αρχικού h_0 , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος h , δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση.

Τελικά, η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής με την ακόλουθη σχέση, στην περίπτωση που υπάρχουν μετρήσεις απορροής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003):

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (5.1)$$

Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα τα παραπάνω, δηλαδή δεν υπάρχουν δεδομένα για την απορροή, ακολουθείται μια εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης του S . Συγκεκριμένα, η παράμετρος S συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο τη CN , οποία είναι γνωστή ως αριθμός καμπύλης απορροής. Οι δύο αυτές παράμετροι συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$S (mm) = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (5.2)$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 έως 100 και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσεις γης της λεκάνης απορροής, καθώς και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

Η μέθοδος SCS κατατάσσει τα εδάφη ανάλογα με τη διαπερατότητά τους στις ακόλουθες ομάδες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

Πίνακας 5.2: Κατάταξη εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητά τους σύμφωνα με SCS

Ομάδα A	Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
Ομάδα B	Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.
Ομάδα C	Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργυροπηλό, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
Ομάδα D	Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβρεχτούν, πλαστικές άργιλοι.

Επίσης, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας. Παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Πίνακας 5.3: Τύποι προηγούμενων συνθηκών υγρασίας

Τύπος I	Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού*). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος II	Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 mm και 38 mm (ή 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος III	Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

*Το σημείο μαρασμού ορίζεται εκείνη η εδαφική υγρασία που δεν επιτρέπει στα φυτά να απορροφήσουν νερό από το έδαφος.

Για συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει πίνακα με τις τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης.

Πίνακας 5.4: Τυπικές τιμές του CN για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου II. (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Περιγραφή χρήση γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62 - 72	71 - 81	78 - 88	81 - 91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30 - 68	58 - 79	71 - 86	78 - 89
Δάση		25 - 45	55 - 66	70 - 77	77 - 83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
Με κάλυψη από πράσινο > 75%		39	61	74	80
Με κάλυψη από πράσινο 50 – 75 %		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72 % αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ)	Ποσοστό διαπερατής επιφάνειας %				
≤ 0,5	65	77	85	90	92
1	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2	25	54	70	80	85
4	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
Με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων		98	98	98	98
Χαλικόστρωμα		76	85	89	91
Χωματόδρομοι		72	82	87	89

Ο αριθμός CN παίρνει τιμές από 35 (εδάφη με τη μεγαλύτερη διήθηση) μέχρι 98 (αδιαπέρατες επιφάνειες). Για λόγους απλότητας, οι χρήσεις γης στην παρούσα εργασία όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 κατηγοριοποιήθηκαν σε τέσσερις ομάδες και η κατάταξη εδαφών ανάλογα με τη διαπερατότητά σε τρεις γιατί λόγω της πολύ μικρής έκτασης που καλύπτουν οι περιοχές B, C ενοποιήθηκαν. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.5: Ομαδοποίηση χρήσεων γης

Τύπος	Περιγραφή εδάφους
1	καλλιεργημένες εκτάσεις
2	λιβάδια
3	δάση
4	αστικές περιοχές

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προηγούμενα εξήχθηκε ο εξής πίνακας:

Πίνακας 5.6: Αριθμός CN για κάθε δυνατή περίπτωση της λεκάνης του Νέδοντα

Περιγραφή εδάφους	A(περατά)	B-C(ημιπερατά)	D(αδιαπέρατα)
Καλλιεργημένες εκτάσεις	67	80	86
Λιβάδια	49	74	84
Δάση	35	68	80
Αστικές περιοχές	64	81	88

Κάθε υπολεκάνη όμως, δεν απαρτίζεται μόνο από ένα τύπο εδάφους και μία χρήση γης και έτσι ο μέσος αριθμός καμπύλης απορροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CN_{\text{τελικό}} = CN_i \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (5.3)$$

Ο υπολογισμός του αριθμού CN γίνεται με τη βοήθεια του GIS. Αρχικά έγινε ένωση του επιπέδου χρήσεων γης και του επιπέδου της γεωλογίας. Στον παραγόμενο νέο επίπεδο εισάγεται ένα πεδίο που περιέχει την τιμή του CN. Εκεί ανάλογα με την κατηγορία που ανήκει η κάθε περιοχή και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παίρνει μία τιμή CN.

Τέλος, οι περιοχές που απαρτίζουν μια υπολεκάνη και σύμφωνα με τα παραπάνω αθροίζονται και έτσι υπολογίζεται το τελικό CN της κάθε υπολεκάνης (Πίνακας 5.7)

Πίνακας 5.7: Τελικές τιμές του CN για κάθε υπολεκάνη

Υπολεκάνες	CN
W60	58.44
W70	36.53
W90	43.47
W120	49.58
W130	71.90
W170	64.16
W180	79.74

Αξίζει να σημειωθεί πως αυτές είναι η αρχικές τιμές του CN. Ο CN αποτελεί τελικά παράμετρο στο υδρολογικό μοντέλο και όχι δεδομένο. Έπειτα από την διαδικασία βαθμονόμησης οι τιμές αυτές άλλαξαν. Η μεταβολή τους θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά ο προσεκτικός αρχικός του ορισμός βοηθά στην μετέπειτα επεξεργασία.

Έχοντας καταλήξει στις παραπάνω τιμές, επόμενο βήμα είναι να ορισθούν άλλες δύο παράμετροι: το αρχικό έλλειμμα και ο συντελεστής (%) αδιαπερατότητας της λεκάνης. Το αρχικό έλλειμμα εάν δεν συμπληρωθεί το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης, κάτι στο οποίο βασίζεται και η σχέση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχής. Ο συντελεστής (%) αδιαπερατότητας της λεκάνης αναφέρεται σε περιοχές που είναι τελείως αδιαπέρατες (στέγες, δρόμοι, πεζοδρόμια, βράχοι κ.λπ.)

Συνεχής προσομοίωση

Στο HEC-HMS στην συνεχή προσομοίωση, για απώλειες βροχόπτωσης επιλέχθηκε η μεθοδολογία που ονομάζεται «απώλειες εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting

loss)». Η μέθοδος αυτή αντιπροσωπεύει την δυναμική κίνηση του νερού στο έδαφος. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος εκτός από την χρήση του λογισμικού για συνεχή προσομοίωση και την ύπαρξη των δύο δεξαμενών που περιγράφηκαν πιο πάνω, είναι απαραίτητη και η ύπαρξη υπόγειων υδάτων. Αποτελεί μια πολύ περιγραφική μέθοδο της κίνησης του νερού και γι' αυτόν τον λόγο χρειάζονται δεκατέσσερις παράμετροι για κάθε υπολεκάνη (Σχήμα 5.10)

Subbasin	Canopy	Surface	Loss	Baseflow	Options
Basin Name: nedontas					
Element Name: W180					
*Soil (%)	0				
*Groundwater 1 (%)	0				
*Groundwater 2 (%)	0				
*Max Infiltration (MM/HR)	3.67				
*Impervious (%)	1.6				
*Soil Storage (MM)	249.29				
*Tension Storage (MM)	4.49				
*Soil Percolation (MM/HR)	0.78				
*GW 1 Storage (MM)	14.65				
*GW 1 Percolation (MM/HR)	0.01				
*GW 1 Coefficient (HR)	23.06				
*GW 2 Storage (MM)	0				
*GW 2 Percolation (MM/HR)	0				
*GW 2 Coefficient (HR)	0				

Εικόνα 5.3: Παράμετροι της μεθόδου απωλειών εδαφικής υγρασίας.

Από τις δεκατέσσερις παραμέτρους, στη συγκεκριμένη λεκάνη χρησιμοποιήθηκαν οι δέκα γιατί δεν λήφθηκε υπόψη η βαθιά διήθηση που δημιουργεί και δεύτερη υπόγεια δεξαμενή. Επίσης οι δύο πρώτες παράμετροι που αναφέρονται στα αρχικά ποσοστά αποθήκευσης νερού στο έδαφος και στον υπόγειο υδροφορέα τέθηκαν και εδώ μηδέν σε όλες τις υπολεκάνες. Οι υπόλοιπες παράμετροι αναφέρονται κατά σειρά στην μέγιστη δυνατή κατείσδυση (σε χιλιοστά ανά ώρα), στις αδιαπέρατες περιοχές της κάθε υπολεκάνης(σε ποσοστό επί τις εκατό), στη μέγιστη αποθηκευτικότητα (σε χιλιοστά) νερού του εδάφους και της εφελκυόμενης ζώνης. Έπειτα ακολουθεί ο μέγιστος ρυθμός διήθησης από την ανώτερη ζώνη του εδάφους στο υπόγειο κύτταρο (σε χιλιοστά την ώρα) και η χωρητικότητα της υπόγεια δεξαμενής. Τέλος ακολουθούν δύο παράμετροι για τα υπόγεια ύδατα που αφορούν την διήθηση του υπόγειου υδροφορέα και ένας

συντελεστής σε ώρες που χρησιμοποιείται σαν χρονική υστέρηση των υπόγειων υδάτων σε ένα γραμμικό ταμιευτήρα ώστε να μετατραπεί το αποθηκευμένο νερό σε υπόγεια απορροή.

5.3.1.4. Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Η άμεση απορροή είναι φυσική συνέπεια της ενεργού βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής. Η ενεργός βροχόπτωση ισούται με τη συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος της άμεσης απορροής, όχι όμως και η χρονική του κατανομή. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν κάποια πρότυπα που να προσδιορίζουν το χρόνο, την τιμή της παροχής αιχμής, το χρόνο υστέρησης και τη διάρκεια της άμεσης απορροής.

Υπάρχουν δύο ειδών μοντέλα. Τα μοντέλα φυσικής βάσης όπως το πρότυπο κινηματικού κύματος, τα οποία στηρίζονται σε εξισώσεις υδραυλικής και τα μοντέλα που στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Ντοανίδης, 2007). Στην περίπτωση του Νέδοντα λόγω του ότι οι υπολεκάνες είναι άμεσης απόκρισης (της τάξεως των μερικών εκατοντάδων λεπτών), ο χρόνος υστέρησης θεωρήθηκε αμελητέος και μόνο σε μία σχετικά μεγάλη υπολεκάνη (w90) χρησιμοποιήθηκε μοντέλο άμεσης απορροής και στη προσομοίωση των επεισοδίων άλλα και την συνεχή προσομοίωση. Η διαπίστωση αυτή έγινε από τα σημεία που υπήρχε έλεγχος στάθμης και παρατηρήθηκε ότι η βροχή με την απορροή ταυτιζόταν χρονικά στις ανάντη μικρές υπολεκάνες εν αντιθέσει με την w90.

Στην υπολεκάνη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο (SCS unit Hydrograph). Το υδρογράφημα αυτό έχει μόλις μία παράμετρο που είναι ο χρόνος υστέρησης σε λεπτά και αναφέρεται στον χρόνο που χρειάζεται να διασχίσει το νερό από το κεντροειδές της λεκάνης μέχρι και την έξοδο αυτής. Ο χρόνος αυτός μπορεί να θεωρηθεί και ως το 60% του χρόνου συγκέντρωσης της υπολεκάνης.

5.3.1.5. Πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής

Αν και η βασική απορροή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο μηχανισμό υπόγειας ροής και δεν επηρεάζεται αισθητά κατά την διάρκεια των πλημμυρών, εκτός από την χρησιμοποίηση της στην προσομοίωση του υδρολογικού έτους στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε και στην προσομοίωση των επεισοδίων βροχής. Βέβαια για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι, κατάλληλες για την κάθε μία χωριστά.

Προσομοίωση επεισοδίων

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση γεγονότος βροχής είναι αυτή της εκθετικής μείωσης (recession method). Έχει σχεδιαστεί για να προσεγγίζει την τυπική συμπεριφορά που παρατηρείται στις λεκάνες απορροής όταν η ροή υποχωρεί εκθετικά μετά από μια έντονη βροχόπτωση.

Όπως διακρίνεται και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 5.10), για κάθε υπολεκάνη πρέπει να οριστεί αρχικά η παροχή του υδατορεύματος πριν στην έναρξη του επεισοδίου σε (m^3/s) (Initial Discharge), έπειτα ο σταθερός ρυθμός μείωσης της παροχής για την συγκεκριμένη υπολεκάνη (Recession Constant) και τέλος η παροχή στην οποία το υδατόρευμα μόλις την αποκτήσει, αρχίζει να έχει τις εκθετικές απώλειες.

Parameter	Value
Basin Name	nedontas_hourly
Element Name	W180
Initial Type	Discharge
*Initial Discharge (M3/S)	0.71
*Recession Constant	0.87617
Threshold Type	Threshold Discharge
*Flow (M3/S)	1.4

Εικόνα 5.4: Παράμετροι της μεθόδου βασικής απορροής για την προσομοίωση επεισοδίου βροχής

Συνεχής προσομοίωση

Όσον αφορά τώρα την συνεχή προσομοίωση, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο γραμμικός ταμιευτήρας. Αυτή η μοντελοποίηση της βασικής απορροής οδηγεί σε γραμμικές απώλειες της κάθε υπολεκάνης έπειτα από μία βροχόπτωση. Τρεις παράμετροι χρειάζονται για την περιγραφή της μεθόδου σε κάθε υπολεκάνη. Οι παράμετροι αφορούν αποκλειστικά τα υπόγεια ύδατα της λεκάνης. Η πρώτη από αυτές αφορά την αρχική αποθήκευση νερού στον υπόγειο υδροφόρα (GW 1 Initial). Η τιμή αυτή σε όλες τις υπολεκάνες είναι μηδενική γιατί δεν υπήρχαν στοιχεία για τον υπόγειο υδροφόρα και γιατί η προσομοίωση ξεκινά τον Σεπτέμβριο που τα αποθέματα νερού είναι συνήθως τα ελάχιστα δυνατά. Η δεύτερη παράμετρος είναι ο χρόνος σε ώρες απόκρισης του υπόγειου κυττάρου της υπολεκάνης. Και εδώ έγινε μία εκτίμηση και τέθηκε η ίδια τιμή των 12 ωρών για όλες τις υπολεκάνες. Η τελευταία παράμετρος αφορά τον αριθμό των ταμιευτήρων που έχει ο υπόγειος υδροφόρας κάθε υπολεκάνης. Σε όλες χρησιμοποιήθηκε ένας ταμιευτήρας γι' αυτό και στην τρίτη παράμετρο (GW 1 Reservoirs) η τιμή είναι ο αριθμός ένα (Σχήμα 5.11).

Basin Name: nedontas	
Element Name: W180	
Initial Type:	Discharge
*GW 1 Initial (M3/S)	0
*GW 1 Coefficient:	12
GW 1 Reservoirs:	1
GW 2 Initial (M3/S)	
GW 2 Coefficient:	
GW 2 Reservoirs:	1

Εικόνα 5.5: Παράμετροι της μεθόδου βασικής απορροής για την συνεχή προσομοίωση

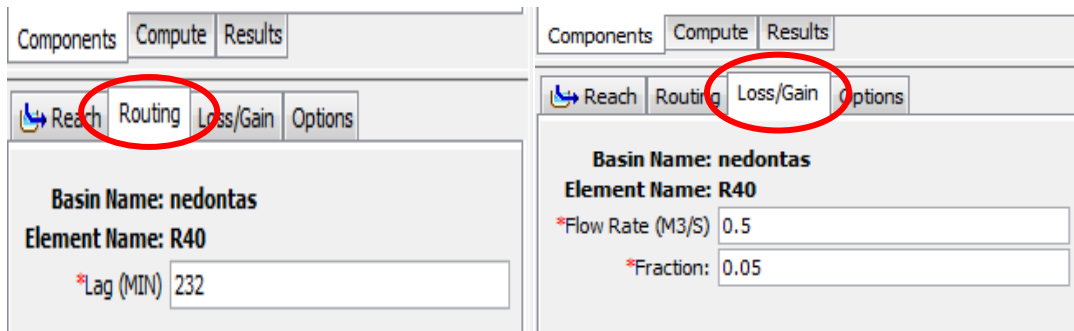
5.3.1.6. Πρότυπο διόδευσης και απώλειες στο υδατόρευμα

Το πρότυπο διόδευσης αποτελεί ουσιαστικά τη διέλευση του νερού ή μιας πλημμύρας μέσω ενός υδατορεύματος. Με την διαδικασία αυτή, παρατηρείται μείωση της αιχμής πλημμύρας που συνοδεύεται με μία χρονική καθυστέρηση. Το αποτέλεσμα

αυτό υποδηλώνει ότι στα φυσικά υδατορεύματα υπάρχει αποθηκευτικότητα που δημιουργεί αυτή την πτώση της αιχμής του υδρογραφήματος εκροής (Τσακίρης, 1995).

Για την περιγραφή της διόδευσης της πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης του χρόνου υστέρησης (Lag routing) σε όλες τις προσομοιώσεις. Εισάγεται στα τμήματα του ποταμού στη βάση του μοντέλου της λεκάνης. Η μέση ταχύτητα ροής του νερού προέκυψε από τις υδρομετρήσεις για τα σημεία που έγιναν μετρήσεις και για τα υπόλοιπα έγινε μια εκτίμηση ίση με 1.5 m/s. Έτσι δόθηκαν κάποιες αρχικές τιμές για όλα τα τμήματα του υδατορεύματος. Στα τμήματα που υπήρχε έλεγχος της στάθμης έγινε βελτιστοποίηση των τιμών με βάση τις παρατηρημένες τιμές όπως θα γίνει γνωστό σε επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης στα τέσσερα τμήματα του υδατορεύματος θεωρήθηκαν απώλειες προς τον υπόγειο υδροφόρα. Η πρώτη παράμετρος είναι ο ρυθμός ροής (flow rate) που προσδιορίζει το ποσό της ροής σε (m^3/s) που πρέπει να αφαιρείται από την εισροή και σε όλες τις λεκάνες έλαβε την τιμή 0.5. Η δεύτερη είναι το κλάσμα που χρησιμοποιείται για να μειώσει την εισροή γραμμικά προς τον ρυθμό ροής. Η σταθερή τιμή αφαιρείται από την εισροή, ενώ το υπόλοιπο πολλαπλασιάζεται με την τιμή: ένα μείον το κλάσμα. Το κλάσμα αυτό παίρνει τιμές από μηδέν μέχρι ένα. Στην περίπτωση του Νέδοντα πήρε τιμές από 0.01 μέχρι 0.5.



Εικόνα 5.6, 5.7: Παράμετροι της μεθόδου διόδευσης πλημμύρας και απωλειών αντίστοιχα στο υδατόρευμα

5.3.2. Μετεωρολογικό Μοντέλο

Στο μετεωρολογικό μοντέλο προσδιορίζονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που θα ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη και η μέθοδος με την οποία θα γίνει ο υπολογισμός της βροχόπτωσης. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μέθοδος βαρών Thiessen όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Στην περίπτωση της προσομοίωσης επεισοδίων ορίστηκαν σε κάθε υπολεκάνη η χρονοσειρά βροχόπτωσης σε ωριαίο βήμα που αντιστοιχεί στην κάθε μία έπειτα από την εφαρμογή των αναγωγών. Λόγω του ότι τα επεισόδια διαρκούν μόνο λίγες μέρες η εξατμοδιαπνοή αγνοήθηκε όπως και το λιώσιμο του χιονιού.

Στις συνεχείς προσομοιώσεις για κάθε υπολεκάνη εισήχθησαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές βροχής σε ημερήσια και έπειτα ωριαία κλίμακα. Το λιώσιμο του χιονιού αγνοήθηκε και η μέθοδος εξατμοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή της μέσης μηνιαίας.

Για να υπολογιστεί για όλους τους μήνες μία μέση εξατμοδιαπνοή σε (*mm/month*), για κάθε υπολεκάνη χρησιμοποιείται μια μέθοδος (Κουτσογιάννης 1997γ) που στηρίζεται στην εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης

$$E = \frac{\alpha S_0 - b}{1 - cT_a} \quad (5.4)$$

Όπου a , b και c εμπειρικοί συντελεστές που προσδιορίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας τα υπολογισμένα με τη μέθοδο Penman δεδομένα της εξάτμισης E (mm/d) και τα αντίστοιχα δεδομένα θερμοκρασίας T_a ($^{\circ}\text{C}$) και εξωγήινης ακτινοβολίας ($\text{KJ}/\text{m}^2\text{d}$). Βεβαίως, οι τιμές της εξωγήινης ακτινοβολίας προκύπτουν από αστρονομικούς τύπους ή πίνακες και δεν προϋποθέτουν μετρήσεις. Κατά συνέπεια, από τις μετρημένες τιμές της θερμοκρασίας όπως αυτές προέκυψαν μετά τις αναγωγές, μπορούν μέσω της (5.4) να εκτιμηθούν οι τιμές της εξατμοδιαπνοής.

Για την λεκάνη του Νέδοντα, η εξωγήινη ακτινοβολία προέκυψε ίση με 37^0 και $5'$, δηλαδή $S_0=37,08$ (KJ/m²d) έπειτα από την μετατροπή της σε δεκαδικό. Ο συντελεστής $a=0.000053$, ο $b=0.064$ και ο $c=0.0253$ άρα η σχέση (5.4) γίνεται:

$$E = \frac{0.00005 * 37.08 - 0.064}{1 - 0.0253T_a} \quad (5.5)$$

Έτσι αντικαθιστώντας την μέση μηνιαία θερμοκρασία για κάθε υπολεκάνη προκύπτει η μέση μηνιαία εξατμοδιαπνοή για κάθε μήνα του υδρολογικού έτους και εισάγεται στο πρόγραμμα (Σχήμα 5.14). Στο παρακάτω σχήμα ενδεικτικά παρατίθενται οι τιμές για την υπολεκάνη w180. Εκτός από την εξατμοδιαπνοή εισάγεται και ένας συντελεστής που πολλαπλασιάζεται με την δυνητική εξατμοδιαπνοή για κάθε μήνα. Ο συντελεστής συνήθως χρησιμοποιείται για να διορθώσει τα πραγματικά δεδομένα εξάτμισης της λεκάνης για να αντικατοπτρίζουν πιστότερα την χρήση του νερού από τα φυτά. Προτείνεται και χρησιμοποιείται η τιμή της τάξεως του 0.7

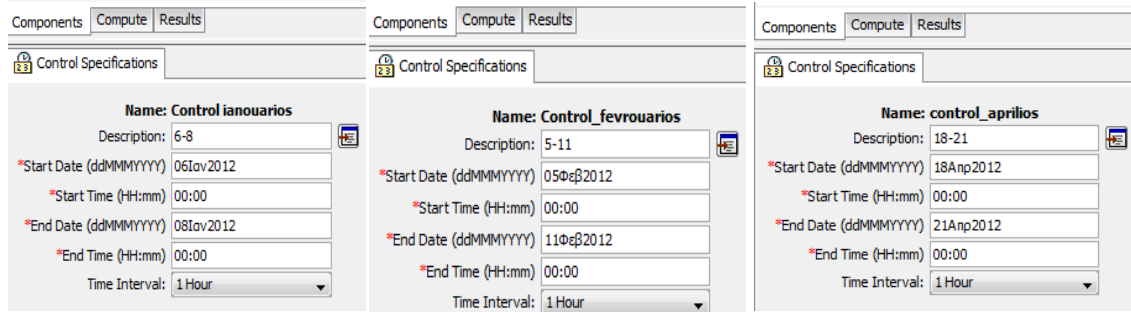
Evapotranspiration		
Met Name: thiessen		
Month	Rate (MM/MONTH)	Coefficient
January	32.22	0.7
February	39.04	0.7
March	63.08	0.7
April	85.49	0.7
May	115.91	0.7
June	175.46	0.7
July	223.02	0.7
August	185.19	0.7
September	116.37	0.7
October	62.27	0.7
November	40.75	0.7
December	33.79	0.7

Εικόνα 5.8: Μέση μηνιαία εξατμοδιαπνοή για μία υπολεκάνη

5.3.3. Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων

Πραγματοποιείται προσομοίωση τριών επεισοδίων στην παρούσα εργασία. Ο λόγος ήταν ότι οι τρεις σταθμημετρικοί σταθμοί λειτουργούσαν για μικρό χρονικό διάστημα

παράλληλα. Έτσι για να επιτευχθεί μία προσομοίωση όπου θα υπάρχει έλεγχος της στάθμης σε τρία σημεία, επιλέχθηκε ένα σχετικά μικρό επεισόδιο βροχής τον μήνα Απρίλιο. Τα άλλα δύο επεισόδια όπως φαίνονται και παρακάτω είναι τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο στα οποία μόνο δύο σταθμοί λειτουργούν στο καθένα. Οι ημερομηνίες όπως επίσης το χρονικό βήμα και οι ακριβείς ώρες εκκίνησης και τερματισμού της προσομοίωσης φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα.



Εικόνα 5.9, 5.10, 5.11: Τα χρονικά διαστήματα προσομοιώσεων επεισοδίων

Στη συνεχή προσομοίωση το διάστημα προσομοίωσης όπως έχει αναφερθεί είναι ένα έτος από Σεπτέμβριο του 2011 μέχρι Αύγουστο του 2012 όσο και το μήκος της χρονοσειράς βροχόπτωσης.

5.3.4. Εισαγωγή χρονοσειρών

Η εισαγωγή των χρονοσειρών βροχόπτωσης αλλά και στάθμης γίνεται σε αυτή την καρτέλα του προγράμματος και είναι απαραίτητο βήμα πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Η εισαγωγή έγινε μέσω ενός άλλου βοηθητικού προγράμματος επεξεργασίας δεδομένων της HEC το HEC-DSSVue 2.0.1. Εκεί ορίζεται το είδος της χρονοσειράς και δημιουργείται η μορφή του αρχείου που δέχεται και αναγνωρίζει το HEC. Οι ωριαίες χρονοσειρές στάθμης και βροχόπτωσης εισήχθησαν για την συνεχή ωριαία προσομοίωση αλλά και για τα επεισόδια βροχής ενώ οι ημερήσιες μόνο για την συνεχή.

5.3.5. Προσομοίωση – βαθμονόμηση Μοντέλου

Αφού έχουν ετοιμαστεί όλα τα αρχεία εισόδου στο HEC-HMS, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει την προσομοίωση και να εξάγει τα αρχικά αποτελέσματα σύμφωνα με τις αρχικές τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους. Είναι πολύ σημαντικό οι αρχικές τιμές να βρίσκονται κοντά στις πραγματικές ώστε η βαθμονόμηση που θα ακολουθήσει να μπορεί να τις εντοπίσει ευκολότερα. Τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο είναι το υδρογράφημα της λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, εξατμοδιαπνοής, απωλειών, απορροής και όλων των παραμέτρων.

Με τον όρο βαθμονόμηση υποδηλώνεται εκείνη η συστημική διαδικασία εκτίμησης των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου, με τέτοιο τρόπο ώστε οι έξοδοι ή αποκρίσεις του μοντέλου, ως προς ένα σύνολο παρατηρημένων εισόδων να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο ένα αντίστοιχο σύνολο παρατηρημένων αποκρίσεων του μαθηματικού συστήματος που αναπαριστά το μοντέλο.

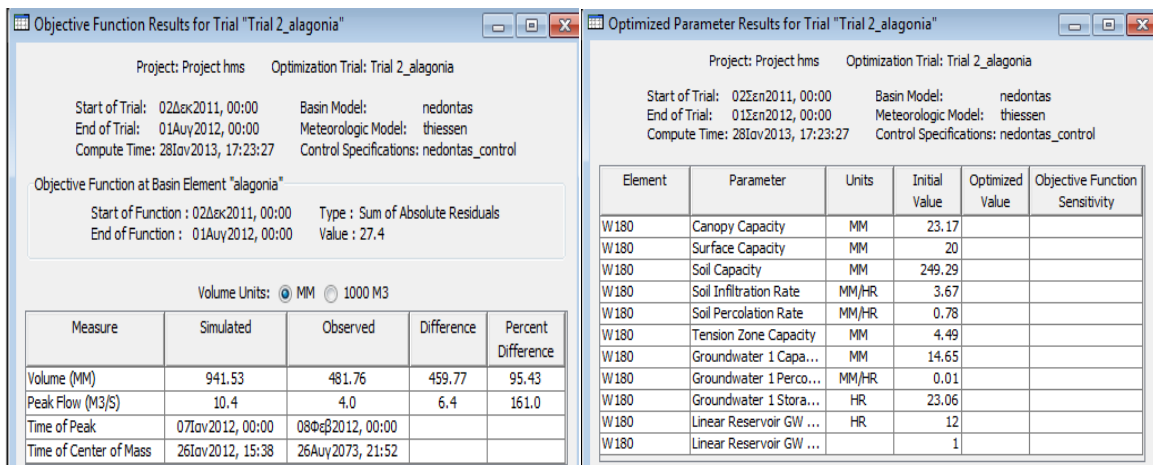
Αξίζει να σημειωθεί πως μετά το αρχικό τρέξιμο του μοντέλου και μέχρι να λειτουργήσει ουσιαστικά η αυτόματη βελτιστοποίηση χρειάστηκαν πολλές χειροκίνητες αλλαγές των παραμέτρων μέχρι να βρεθεί η σωστή τάξη μεγέθους για κάθε ομάδα παραμέτρων. Η διαδικασία αυτή μέχρι να εντοπιστούν οι σωστές τάξεις των τιμών διήρκησε αρκετό καιρό και απαιτούσε μεγάλη εξοικείωση με τις παραμέτρους της λεκάνης αλλά και καλή γνώση υδρολογίας. Άλλωστε ο όγκος των παραμέτρων στη συνεχή προσομοίωση ήταν πολύ μεγάλος (132) οι οποίες αντιστοιχούν σε 17 για κάθε υπολεκάνη (18 για την w90 λόγω της άμεσης απορροής) και άλλες 12 για τα 4 τμήματα του υδατορεύματος (3 στο καθένα). Από αυτές οι 4 από κάθε υπολεκάνη δεν συμμετείχαν στην βελτιστοποίηση γιατί ήταν μηδενικές και άλλες 3 ήταν ίδιες για όλες. Επίσης από τις 12 του υδατορεύματος οι 4 ήταν ίδιες και δεν βελτιστοποιήθηκαν. Τελικά η αυτόματη βελτιστοποίηση έγινε για 78 παραμέτρους και ήταν μια διαδικασία πολύ χρονοβόρα και επίμονη.

Στην βελτιστοποίηση των επεισοδίων η διαδικασία ήταν πιο απλή και γρήγορη και όπως είναι λογικό με καλύτερα αποτελέσματα όπως θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν 5 παράμετροι για κάθε υπολεκάνη (6 για την w90 λόγω της άμεσης

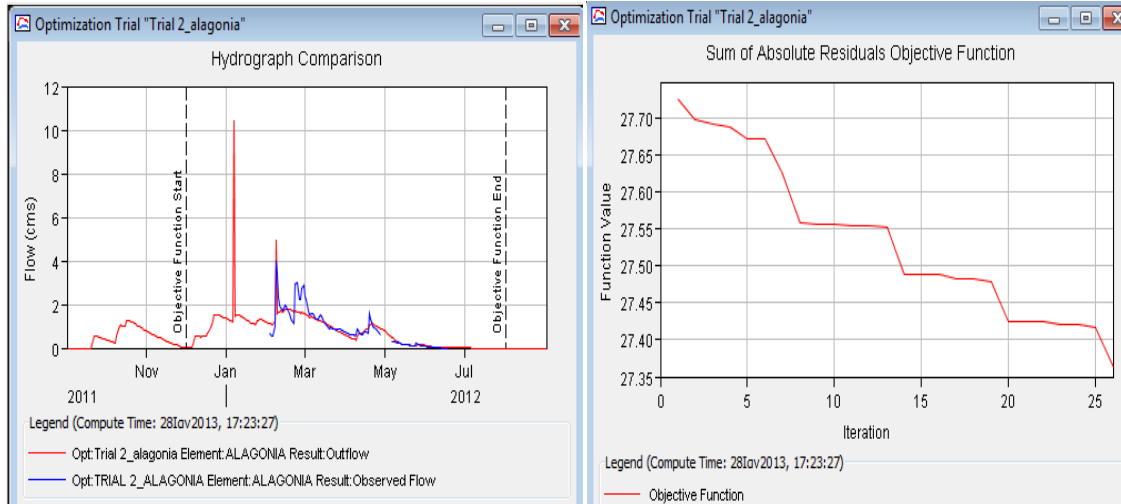
απορροής). Οι παράμετροι για το υδατόρευμα δεν βελτιστοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από την συνεχή προσομοίωση. Άρα έγινε βελτιστοποίηση με 36 παραμέτρους.

Η μέθοδος αυτόματης βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η μονοπαραγοντική κλίση (Univariate gradient) η οποία αξιολογεί και ρυθμίζει μια παράμετρο τη φορά, κρατώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές. Για κάθε μία από τις παραμέτρους ορίστηκε το διάστημα μέσα στο οποίο μπορεί να είναι η τελική τιμή. Η συνάρτηση στόχου της βελτιστοποίησης είναι η Peak-Weighted RMS Error. Η συνάρτηση αυτή είναι μια τροποποίηση του μέσου τετραφωνικού σφάλματος που δίνει σημαντικό βάρος στις υψηλές παροχές και λιγότερο στις χαμηλές κάτι που είναι και το ζητούμενο στις περισσότερες υδρολογικές εργασίες.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει στη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι το ότι δεν μπορεί ο αλγόριθμος να βελτιστοποιεί με πολλά σημεία ελέγχου ταυτόχρονα. Γι' αυτόν τον λόγο για τους σταθμούς Καρβελιώτη και Αλαγονία έγιναν διαφορετικές βελτιστοποιήσεις και τα αποτελέσματα τους χρησιμοποιήθηκαν για την ολική βελτιστοποίηση με σημείο ελέγχου την έξοδο της λεκάνης (Λατομείο Μπάκα). Έτσι ουσιαστικά έγιναν τρεις ξεχωριστές βελτιστοποιήσεις για κάθε προσομοίωση. Μερικές από τις πληροφορίες που δίνει κάθε βελτιστοποίηση φαίνονται στα παρακάτω σχήματα



Εικόνα 5.12, 5.13: Στα αριστερά είναι ένας γενικός πίνακας αποτελεσμάτων και αριστερά ο πίνακας των τιμών που βελτιστοποιούνται



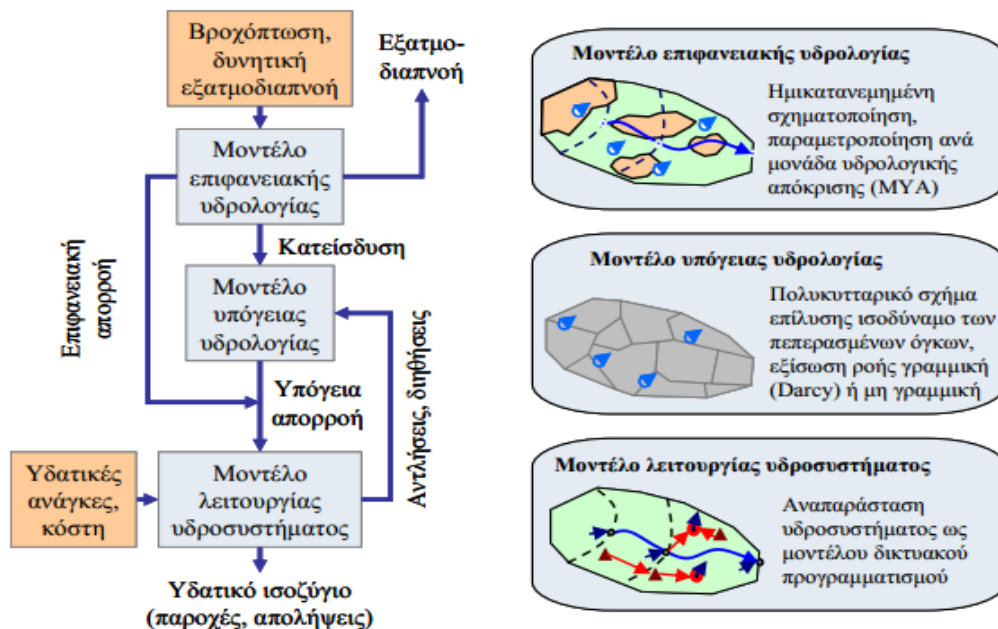
Εικόνα 5.14, 5.15: Στα αριστερά είναι το παρατηρημένο και υπολογισμένο υδρογράφημα και δεξιά ο πίνακας της τιμής του σφάλματος κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Μοντέλα Υδρολογικής Προσομοίωσης – HYDROGEIOS

6.1. Το μοντέλο HYDROGEIOS

Το λογισμικό HYDROGEIOS δημιουργήθηκε από την ερευνητική ομάδα ΙΤΙΑ το 2007 με μια πιλοτική έκδοση και το 2009 με την επιχειρησιακή (Ευστρατιάδης κ.ά., 2010). Είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.



Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων του λογισμικού HYDROGEIOS (Ευστρατιάδης, 2008)

Ως προς τη χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών, το μοντέλο βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, εκτιμώντας το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο χρησιμοποιεί μηνιαίο, ημερήσιο ή ωριαίο χρονικό βήμα μετά και την ενσωμάτωση των διαδικασιών διόδευσης. Το μοντέλο εκτός από χρονική κλίμακα υιοθετεί και εννοιολογική μαθηματική δομή επιχειρώντας παράλληλα μια προσέγγιση φυσικής βάσης (δεδομένου ότι η σχηματοποίηση του συστήματος γίνεται με χρήση κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας) της λεκάνης απορροής και συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (MapWindow) για την παραγωγή των δεδομένων εισόδου με γεωαναφορά (θεματικά επίπεδα). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και εν δυνάμει διαχειριστικά δεδομένα εισόδου, για την προσαρμογή του στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος (βαθμονόμηση παραμέτρων). Για τον σκοπό αυτό, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια σφάλματος και έναν εύρωστο αλγόριθμο ολικής βελτιστοποίησης (Ευστρατιάδης, 2008)

Η ειδοποιός διαφορά αυτού του μοντέλου σε σχέση με τα συνήθη ημικατανεμημένα σχήματα που εφαρμόζουν διαφορετικές παραμέτρους για κάθε υπολεκάνη, (π.χ. HEC-HMS), είναι το ότι η παραμετροποίηση του γίνεται στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (MYA) ήτοι σε ακανόνιστες χωρικές ενότητες που προσδιορίζονται με βάση τις φυσικές ιδιότητες του. Η διαδικασία δημιουργίας των MYA όπως επίσης και η τελική τους μορφή για την παρούσα λεκάνη θα παρουσιαστούν παρακάτω.

6.2. Ανάλυση της λεκάνης στο MapWindow

Η κατασκευή, επεξεργασία και οπτικοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων του μοντέλου, γίνεται με το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow και την υποστήριξη της ειδικής εφαρμογής (άρθρωμα, plug-in) MWHydrogeios. Με τα παραπάνω, διαμορφώνεται μια δικτυακή σχηματοποίηση των φυσικών και τεχνητών συνιστωσών της περιοχής μελέτης (λεκάνη απορροής), τα οποία εντάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες θεματικών επιπέδων:

- Επιφανειακό σύστημα
- Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU)
- Υπόγειο σύστημα
- Σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων

Στην παρούσα εργασία για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα, δεν έγινε διαχειριστική μελέτη, ως εκ τούτου το σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων απουσιάζει ενώ τα άλλα θεματικά επίπεδα συνδέονται μέσω του υδρογραφικού δικτύου και των πηγών (επιφανειακό – υπόγειο σύστημα). Τα γεωγραφικά δεδομένα που απαιτούνται για τη λειτουργία της εφαρμογής για την συγκεκριμένη λεκάνη είναι τα ακόλουθα:

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (hdr)
- Έξοδος λεκάνης (outlet)
- Υπολεκάνες (Sub basin)
- Υδρογραφικό Δίκτυο (River)
- Υπόγειοι Υδροφορείς (Groundwater)
- Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRU)
- Πηγές (Spring)
- Κόμβοι υδροσυστήματος (HydroJunction)

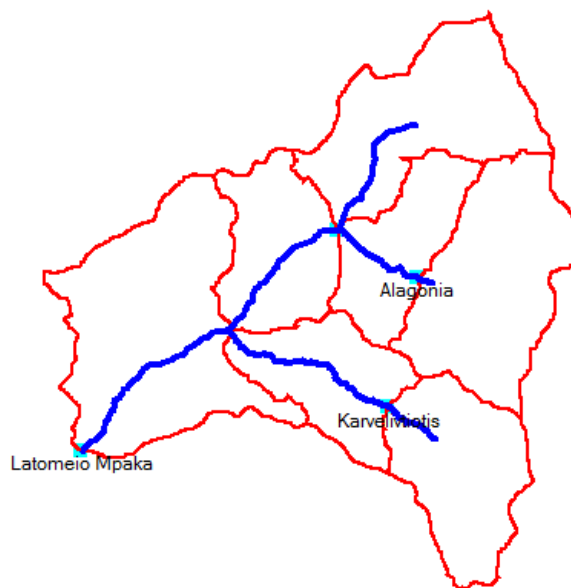
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να διατηρείται η ονοματολογία και να αποθηκεύονται όλα τα αρχεία στον ίδιο φάκελο. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν φαίνονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 6.1).



Εικόνα 6.1: Η υπολογιστική διαδικασία στο άρθρωμα MWHydrogeios

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, οι υπολεκάνες που κατασκευάστηκαν στο άρθρωμα αυτό ήταν σχεδόν ίδιες με αυτές του HEC-GeoHMS. Έτσι, το πρώτο βήμα και εδώ ήταν η χάραξη του αρχικού υδρογραφικού δικτύου και των λεκανών απορροής (delineate watershed) που έγινε με το ίδιο κατώφλι όπως και στο HEC-GEOhms, δηλαδή τα 16000 κύτταρα ή αλλιώς τα $10km^2$ και το ίδιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Στη συνέχεια δημιουργείται το θεματικό επίπεδο που περιέχει τα πλέον κατάντη σημεία όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου όπως και την έξοδο της λεκάνης. Στο σημείο αυτό ορίστηκαν και τα δύο επιπλέον σημεία όπου υπήρχαν σταθμημετρικοί σταθμοί και δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον υπολεκάνες. Η σχηματοποίηση που προέκυψε είναι ίδια με την εφαρμογή στο HEC-HMS κάτι που επιδιώχθηκε ώστε τα δύο μοντέλα να είναι συγκρίσιμα (Σχήμα 6.2). Τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου αποτελούνε η έξοδος της λεκάνης, οι θέσεις συμβολής των κλάδων του υδατορεύματος καθώς και οι θέσεις υδρομέτρησης. Σε κάθε κόμβο θεωρείται ότι συγκεντρώνεται ακαριαία όλη η απορροή των ανάντη υδατορευμάτων. Πέντε κόμβοι δημιουργήθηκαν, οι ίδιοι ακριβώς με το HEC-GeoHMS.

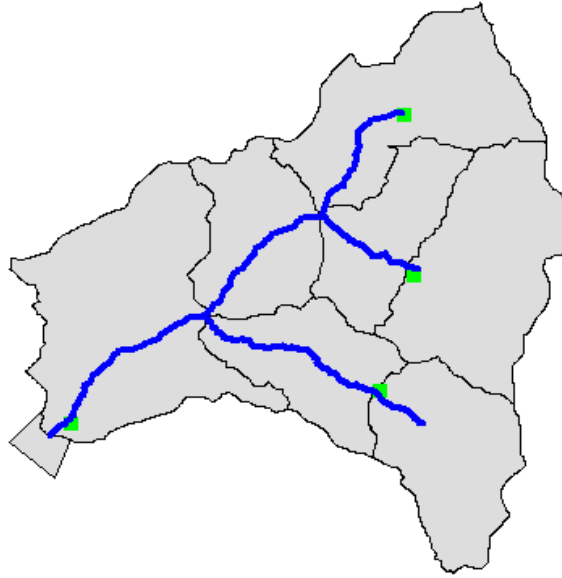


Σχήμα 6.1: Οι υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο με τους υδρομετρικούς σταθμούς δημιουργημένο σε περιβάλλον MapWindow

Έπειτα, το πρόγραμμα δημιουργεί όλα τα αρχεία γεωγραφικών δεδομένων και δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ο χρήστης αυτά που χρειάζεται για την εκάστοτε μελέτη. Στη συγκεκριμένη εργασία ορίστηκαν μόνο οι πηγές (πέντε), τρεις στις ανάντη υπολεκάνες μία στην υπολεκάνη κατάντη της Νέδουσας και μία στην έξοδο. Αυτό συνέβη διότι στην αρχική φάση της βαθμονόμησης ορισμένα κύτταρα συσώρευαν σημαντικές ποσότητες νερού, γεγονός που ήταν ένδειξη απουσίας πηγών που θα αναρρύθμιζαν το υπόγειο μοντέλο.

Οι πηγές δίνονται από τον χρήστη ως σημειακό επίπεδο πληροφορίας και αποτελούν τη σύνδεση ανάμεσα στο επιφανειακό και υπόγειο σύστημα. Κάθε πηγή συνδέεται και με το αντίστοιχο υπόγειο κύτταρο και αποτελεί ένα σύστημα επιφανειακών εκφορτίσεων με υψόμετρο το μέσο υψόμετρο του συστήματος στο οποίο ανήκει. Η επιλογή των θέσεων έγινε και με το σκεπτικό ότι εκεί διατίθενται μετρήσεις παροχών και μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν χρονοσειρές ελέγχου στη διαδικασία της βαθμονόμησης.

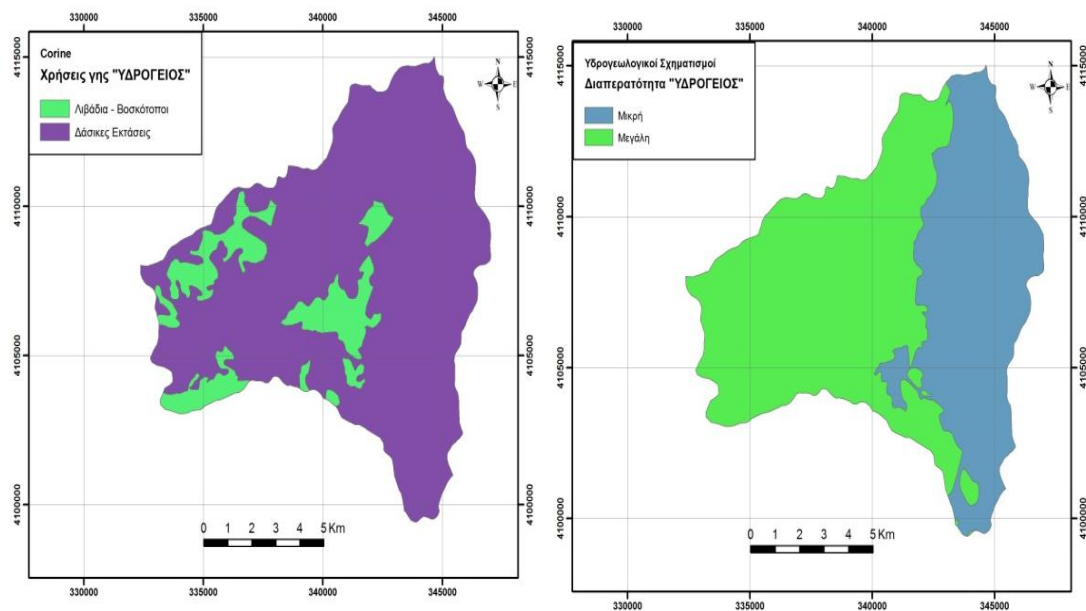
Το τέταρτο βήμα ήταν η δημιουργία του υπόγειου υδροφορέα. Λόγω έλλειψης στοιχείων και κυρίως πιεζομετρικών χαρτών, σχεδιάστηκαν υπόγεια κύτταρα ακριβώς με την ίδια γεωμετρία με τα επιφανειακά και με τα γεωγραφικά όρια της περιοχής. Δημιουργήθηκε και ένα επιπλέον κύτταρο μετά την έξοδο της λεκάνης το οποίο λειτουργεί ως συλλεκτήριο όλων των υπόγειων διαφυγών και είναι εικονικό (Σχήμα 6.3).



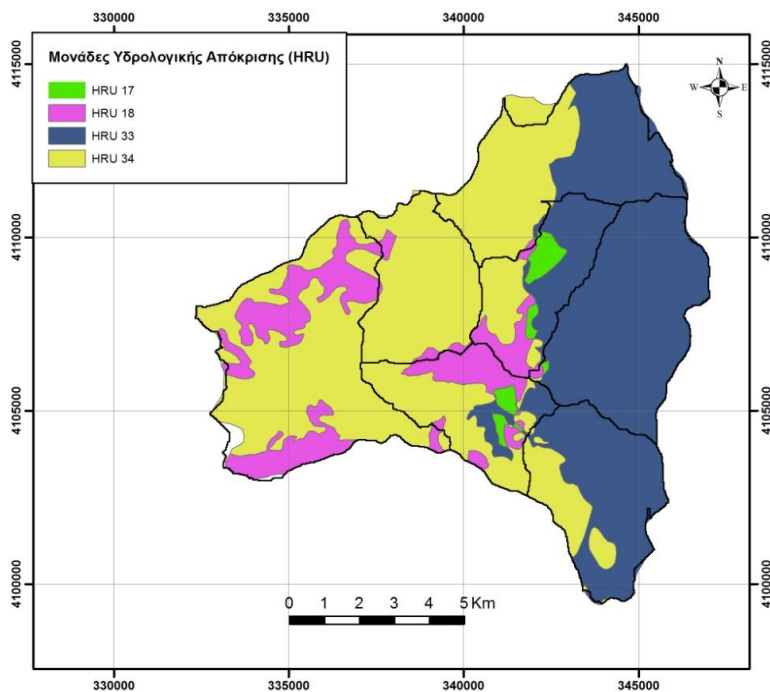
Σχήμα 6.2: Τα υπόγεια κύτταρα και το υδρογραφικό δίκτυο με τις θέσεις των πηγών σε περιβάλλον MapWindow

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU) της οποίας εμπνευστής είναι ο Wolfgang Albert Flügel (1995). Στο μοντέλο HYDROGEIOS, οι (HRU) υποδηλώνουν τύπους εδάφους και υπεδάφους με κοινά γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά. Ο μηχανισμός των υδρολογικών διεργασιών θεωρείται ενιαίος οπότε και θεωρούνται κοινές παράμετροι σε όλη την έκταση που καλύπτει η συγκεκριμένη λεκάνη. Στις υπολεκάνες πλέον αναφέρονται μόνο οι χρονοσειρές (βροχόπτωση και θερμοκρασίας) και οι κλάδοι του υδατορεύματος και όχι οι παράμετροι του μοντέλου.

Έτσι, πρακτικά η δημιουργία τους γίνεται με την τομή της φυτικής κάλυψης που έχει δύο κύριες κατηγορίες (λιβάδια-βοσκότοποι και δάση) και της διαπερατότητας της λεκάνης η οποία και αυτή έχει δύο κατηγορίες (μεγάλη και μικρή διαπερατότητα). (Σχήμα 6.4). Με την διαδικασία αυτή όπως είναι φανερό προκύπτουν τέσσερις μονάδες υδρολογικής απόκρισης οι οποίες στη συνέχεια συσχετίζονται με τις υφιστάμενες επτά υπολεκάνες της περιοχής.



Σχήμα 3.7, 3.11: Η τομή αυτών των δύο θεματικών επιπέδων δημιουργεί τις τέσσερις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης



Σχήμα 6.3: Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (HRU) της Λεκάνης

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU) λεκάνης

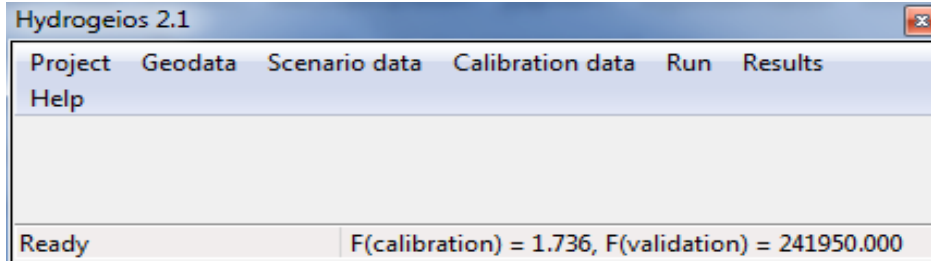
Όνομα HRU	Διαπερατότητα	Κάλυψη Γης	Έκταση (km ²)
HRU 17	Μικρή	Λιβάδια-Βοσκότοποι	1.9
HRU 18	Μεγάλη	Λιβάδια-Βοσκότοποι	14.1
HRU 33	Μικρή	Δασικές Εκτάσεις	48.2
HRU 34	Μεγάλη	Δασικές Εκτάσεις	53.7

Στο έκτο βήμα του αρθρώματος, εκτελούνται όλες οι απαραίτητες χωρικές πράξεις στα δεδομένα και προκύπτουν παράγωγα επίπεδα. Ο χρήστης δεν έχει την δυνατότητα επέμβασης σε αυτό το βήμα προετοιμασίας των δεδομένων για την Υδρόγειο.

Μετά και την δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης, τελικό στάδιο της επεξεργασίας είναι η δημιουργία θεματικού επιπέδου με τους κόμβους της μελέτης για να εισαχθούν στο πρόγραμμα και η κατασκευή της τελικής τοπολογίας του δικτύου του υδροσυστήματος οπότε μπορεί να κληθεί η κύρια εφαρμογή Υδρόγειος.

6.3. Περιβάλλον HYDROGEIOS

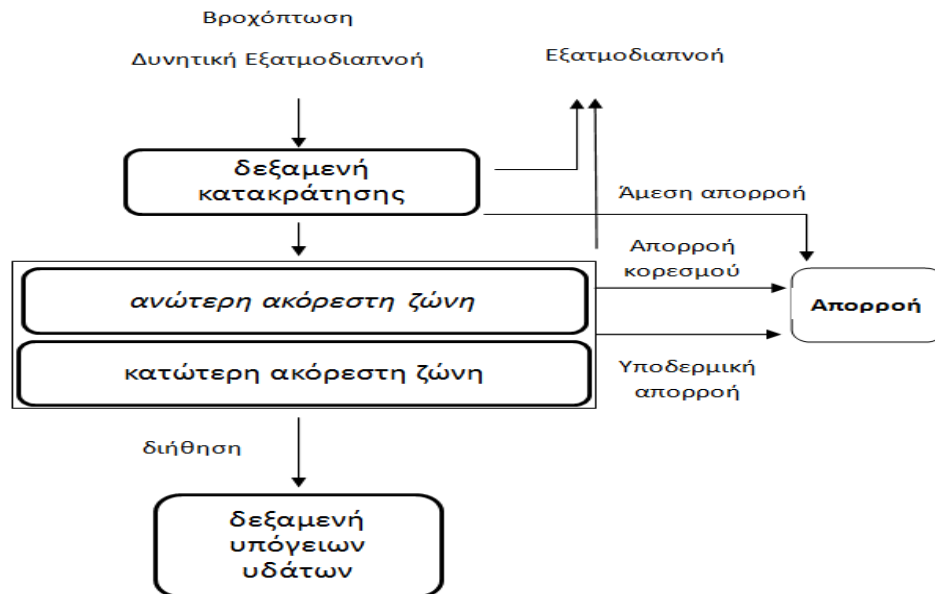
Όπως προαναφέρθηκε, στο υδρολογικό αυτό μοντέλο έγινε συνεχής προσομοίωση ενός έτους σε ωριαίο και ημερήσιο βήμα. Σε αντίθεση με το HEC-HMS, η Υδρόγειος δεν αποτελεί πλατφόρμα υδρολογικών υπολογισμών αλλά υδρολογικό μοντέλο με συγκεκριμένη δομή επιφανειακού και υπόγειου συστήματος του οποίου ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει τις διεργασίες. Αρχικά έγινε προσπάθεια να περιγραφούν οι υδρολογικές διαδικασίες μόνο με το επιφανειακό σύστημα αλλά γρήγορα η προσπάθεια εγκαταλείφτηκε γιατί η συμμετοχή των υπόγειων υδάτων αποδείχθηκε σημαντική όπως και η διαφαινόμενη ύπαρξη πηγών στη λεκάνη.



Εικόνα 6.2: Το περιβάλλον HYDROGEIOS 2.1

6.3.1. Δομή επιφανειακού συστήματος

Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών σε ένα εδαφικό στοιχείο μοναδιαίας επιφάνειας πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας, κατάλληλου για χρονικές κλίμακες από ημερήσια έως ωριαία. Το μοντέλο αποτελεί γενίκευση της κλασικής προσέγγισης του Thornthwaite, η οποία θεωρείται επαρκής μόνο για απλές υδρολογικές λεκάνες χειμαρρικής διαίτας, χωρίς αξιόλογη υπόγεια αποθήκευση (Dingman, 1994, pp. 299-301 Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 236-243).



Διάγραμμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής επιφανειακού υδατικού ισοζυγίου του μοντέλου HYDROGEIOS

- Η δεξαμενή κατακράτησης αναπαριστά τις διεργασίες πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή την κατακράτηση της βροχής, την επιφανειακή εξάτμιση και την διήθηση που τροφοδοτεί το έδαφος (ακόρεστη ζώνη)
- Η δεξαμενή συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας περιέχει δύο περιοχές (ανώτερη ακόρεστη ζώνη και κατώτερη ακόρεστη ζώνη) οι οποίες διαχωρίζονται από το ριζόστρωμα που οριοθετεί την διαφοροποίηση του μηχανισμού εξατμοδιαπνοής. Η δεξαμενή αυτή παρέχει την δυνατότητα εκροής προς το έδαφος λόγω υπερχειλίσης, πλευρικής εκροής διαμέσου του υπεδάφους από οπή που βρίσκεται στο όριο των δύο ζωνών και τέλος κατακόρυφης εκροής λόγω διήθησης.
- Η συνολική απορροή επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες. Αρχικά στην άμεση απορροή που εκφράζει την ποσότητα της βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος (π.χ. απορροή που οφείλεται στην ύπαρξη αδιαπέρατων επιφανειών). Έπειτα στην ροή λόγω κορεσμού που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία και τέλος στην υποδερμική ροή, που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση
- Στην ημερήσια και ωριαία κλίμακα χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη δομή του παραπάνω μοντέλου, ώστε να αποτυπώνονται πιο ρεαλιστικά οι υδρολογικές διεργασίες και, κυρίως, η εδαφική εξατμοδιαπνοή. Για το σκοπό αυτό εισάγεται μία επιπλέον παράμετρος με διαστάσεις χωρητικότητας η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα της εδαφικής υγρασίας που είναι πλήρως διαθέσιμη για την πραγματοποίηση της εξατμοδιαπνοής. Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου, ήτοι η αποθήκευση υγρασίας στην ανώτερη και την κατώτερη ζώνη, είναι πλέον διακριτές, καθώς θεωρούνται δύο ξεχωριστές δεξαμενές, με διαφορετικές χωρητικότητες (Ευστρατιάδης κ.ά. 2009)

Όπως έχει προαναφερθεί, οι χρονοσειρές εισόδου διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη, ενώ οι παράμετροι του μοντέλου εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης, η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται θεωρώντας μια σύνθετη γεωγραφική οντότητα, που προκύπτει από την ένωση των δύο θεματικών επιπέδων. Πρόκειται για τον συνδυασμό υπολεκάνης – ΜΥΑ, που αποτελεί την ελάχιστη χωρική

ενότητα του επιφανειακού συστήματος. Το στοιχείο που προκύπτει δέχεται κοινές φορτίσεις (βροχόπτωση, δυναμική εξατμοδιαπνοή) και περιγράφεται από κοινές παραμέτρους. Ο μέγιστος αναμενόμενος αριθμός ενώσεων (unions) είναι $7*4 = 28$ ενώ τελικά προέκυψαν 22.

Σε κάθε χρονικό βήμα, και για κάθε τέτοιο συνδυασμό, υπολογίζονται τα διάφορα υδρολογικά μεγέθη (επιφανειακή απορροή, πραγματική εξατμοδιαπνοή, κατείσδυση), που στη συνέχεια ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης. Στην επιφανειακή απορροή προστίθεται η εκροή όλων των πηγών της υπολεκάνης, δηλαδή η βασική ροή (έστω ότι είναι γνωστή από την επίλυση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας), και το σύνολο της απορροής μεταφέρεται ως εισροή στον κόμβο εξόδου. Από την εισροή αφαιρούνται οι απώλειες νερού λόγω διήθησης, όπως αυτές εκφράζονται μέσω του σχετικού συντελεστή του υδατορεύματος που διατρέχει τη συγκεκριμένη υπολεκάνη.

6.3.2. Δομή υπόγειου συστήματος

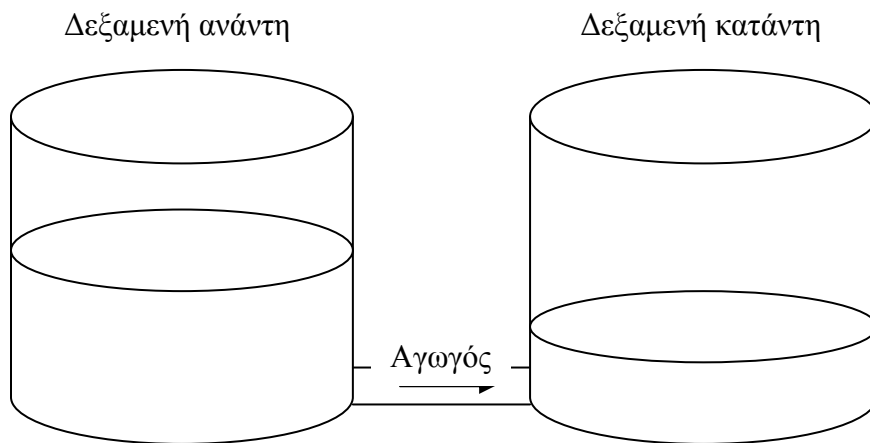
Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979), την οποία συνδέει με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Rozos and Koutsoyiannis, 2005). Σύμφωνα με αυτή, το πεδίο ροής διακριτοποιείται με τη μορφή πολυγωνικών κυττάρων.

Η τοπολογία του δικτύου ροής ορίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους των κυττάρων, το μήκος πραγματοποίησης της ροής μεταξύ των γειτονικών κυττάρων και το μήκος της κοινής τους ακμής. Οι διεργασίες κάθε κυττάρου αναπαρίστανται από εννοιολογικές δεξαμενές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού (Σχήμα 6.6). Το δίκτυο των δεξαμενών μπορεί να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ανάλογο της διακριτής αναπαράστασης του υδροφορέα (Ρόζος, 2010). Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής είναι το εμβαδόν της βάσης, οι στάθμες της οροφής και του πυθμένα, καθώς και το ύψος νερού στην αρχή της προσομοίωσης (αρχική συνθήκη). Οι δεξαμενές τροφοδοτούνται από την κατείσδυση των υπερκείμενων στρωμάτων, και η μεταβολή της στάθμης τους απεικονίζει τη μεταβολή της πιεζομετρίας στον υδροφορέα. Η ροή του

νερού πραγματοποιείται από τις δεξαμενές υψηλότερης προς τις δεξαμενές χαμηλότερης στάθμης.

Η εκφόρτιση του υδροφορέα αναπαρίσταται με ειδικούς τύπους δεξαμενών, που αντιπροσωπεύουν είτε σημειακές εξόδους νερού στην επιφάνεια (πηγές) είτε περιοχές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού που βρίσκονται εκτός της λεκάνης (π.χ., υποθαλάσσιες εκφορτίσεις). Και στις δύο περιπτώσεις θεωρούνται εικονικές δεξαμενές πολύ μεγάλης βάσης, έτσι ώστε η στάθμη τους να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Οι εν λόγω δεξαμενές δεν δέχονται κατείσδυση και δεν τροφοδοτούν γειτονικές τους δεξαμενές. Τέτοια είναι και η δεξαμενή του σχήματος 6.3 που βρίσκεται μετά την έξοδο.

Οι δεξαμενές υπόγειου νερού δέχονται τριών ειδών φορτίσεις. Αρχικά την επιφανειακή κατείσδυση της εδαφικής υγρασίας, έπειτα τη γραμμική διήθηση νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και τέλος τη σημειακή άντληση νερού από τις γεωτρήσεις του υδροσυστήματος κάτι που βέβαια στην παρούσα εργασία δεν υπάρχει. Η κατανεμημένη κατείσδυση από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – ΜΥΑ ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των κυττάρων. Οι απώλειες λόγω διήθησης στα υδατορεύματα επιμερίζονται στα υποκείμενα κύτταρα, αναλογικά με το μήκος ανάπτυξης κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 6.4: Σχηματική απεικόνιση δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος μεταξύ γειτονικών δεξαμενών

- Η στάθμη του νερού στη δεξαμενή αποτελεί μεταβλητή κατάσταση του συστήματος και αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος νερού στην περιοχή του κυττάρου.
- Σε συνθήκες υδροφορέα η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ ανώτατης και κατώτατης στάθμης. Όταν ξεπεραστεί η οροφή της δεξαμενής τότε ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος
- Η ροή γίνεται από την ανάντη δεξαμενή προς την κατάντη μέσω ενός εννοιολογικού αγωγού που χαρακτηρίζεται από τρία μεγέθη. Την κεντροβαρική απόσταση μεταξύ των υπόγειων κυττάρων, το εμβαδόν της κορεσμένης διατομής και την υδραυλική του αγωγιμότητα (εκφράζει την μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό η οποία θεωρείται σταθερή και προκύπτει από τον συνδυασμό των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως το χρονικό βήμα της επίλυσης του υπόγειου μοντέλου γίνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα από την χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης.

6.3.3. Μετεωρολογικό μοντέλο

Στο μετεωρολογικό μοντέλο προσδιορίζονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που θα ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη και η μέθοδος με την οποία θα γίνει ο υπολογισμός της βροχόπτωσης. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μέθοδος βαρών Thiessen όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο πρόγραμμα ήταν απαραίτητη η είσοδος και της χρονοσειράς δυνητικής εξατμοδιαπνοής στο ίδιο βήμα με την προσομοίωση. Η δυνητική εξατμοδιαπνοή υπολογίστηκε σε μηνιαία κλίμακα. Έτσι, έγινε αναγωγή από μηνιαίο σε ημερήσιο και έπειτα σε ωριαίο βήμα. Για την μετατροπή από μηνιαίο σε ημερήσια δυνητική εξατμοδιαπνοή γίνεται με τον εξής ημιεμπειρικό τύπο:

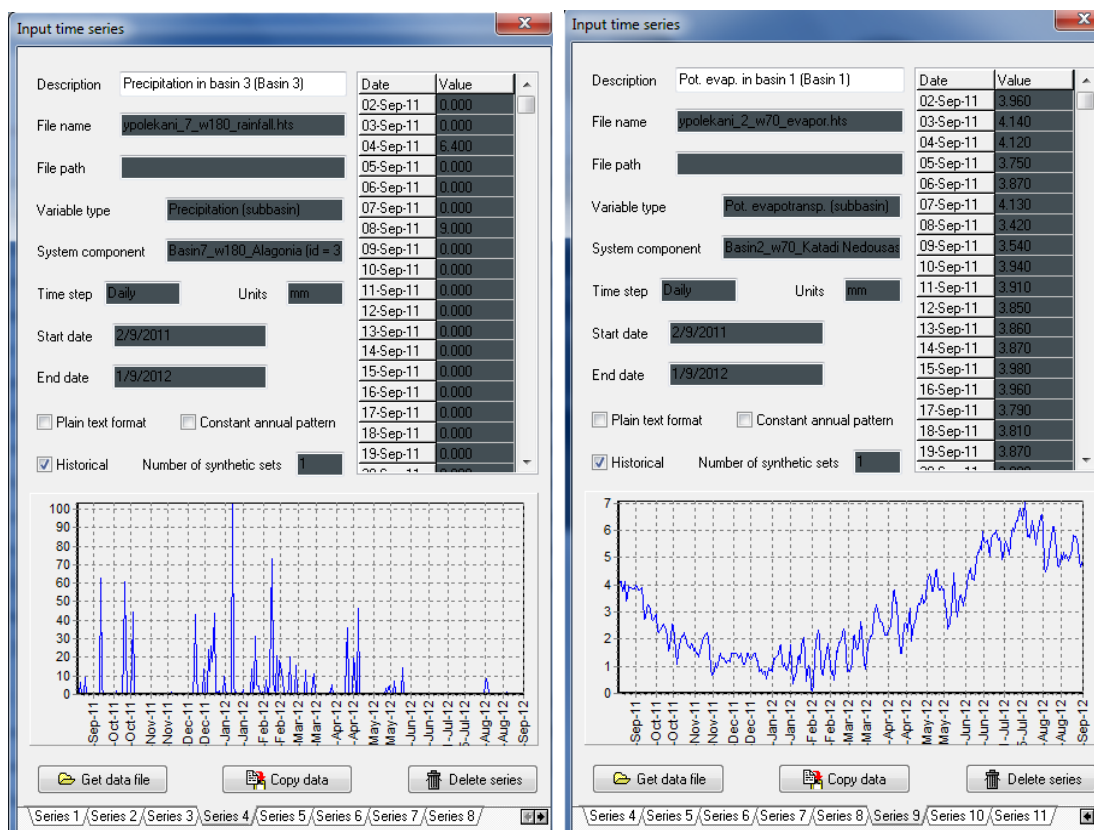
$$PET_{day} = \frac{(PET_{month} * T_{day})}{(N * T_{month})} \quad (6.1)$$

Όπου PETday είναι η ημερήσια δυνητική εξατμοδιαπνοή, PETmonth η μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή, Tday η ημερήσια θερμοκρασία, N ο αριθμός ημερών κάθε μήνα και Tmonth η μέση μηνιαία θερμοκρασία.

Αξίζει να σημειωθεί πως για τις μέρες που η θερμοκρασία είναι κάτω του μηδενός, η δυνητική εξατμοδιαπνοή θεωρείται μηδενική. Η ίδια παραδοχή γίνεται και στο μηνιαίο βήμα. Για το ωριαίο βήμα έγινε μία απλή διαμέριση της ημερήσιας τιμής. Η διαδικασία δεν αποτελεί την ιδανικότερη γιατί δεν λαμβάνει υπόψη την ηλιοφάνεια αλλά η επιρροή της στο τελικό αποτέλεσμα είναι πολύ μικρή και έτσι οι τιμές της κρίθηκαν ικανοποιητικές για την συγκεκριμένη μελέτη.

6.3.4. Εισαγωγή χρονοσειρών

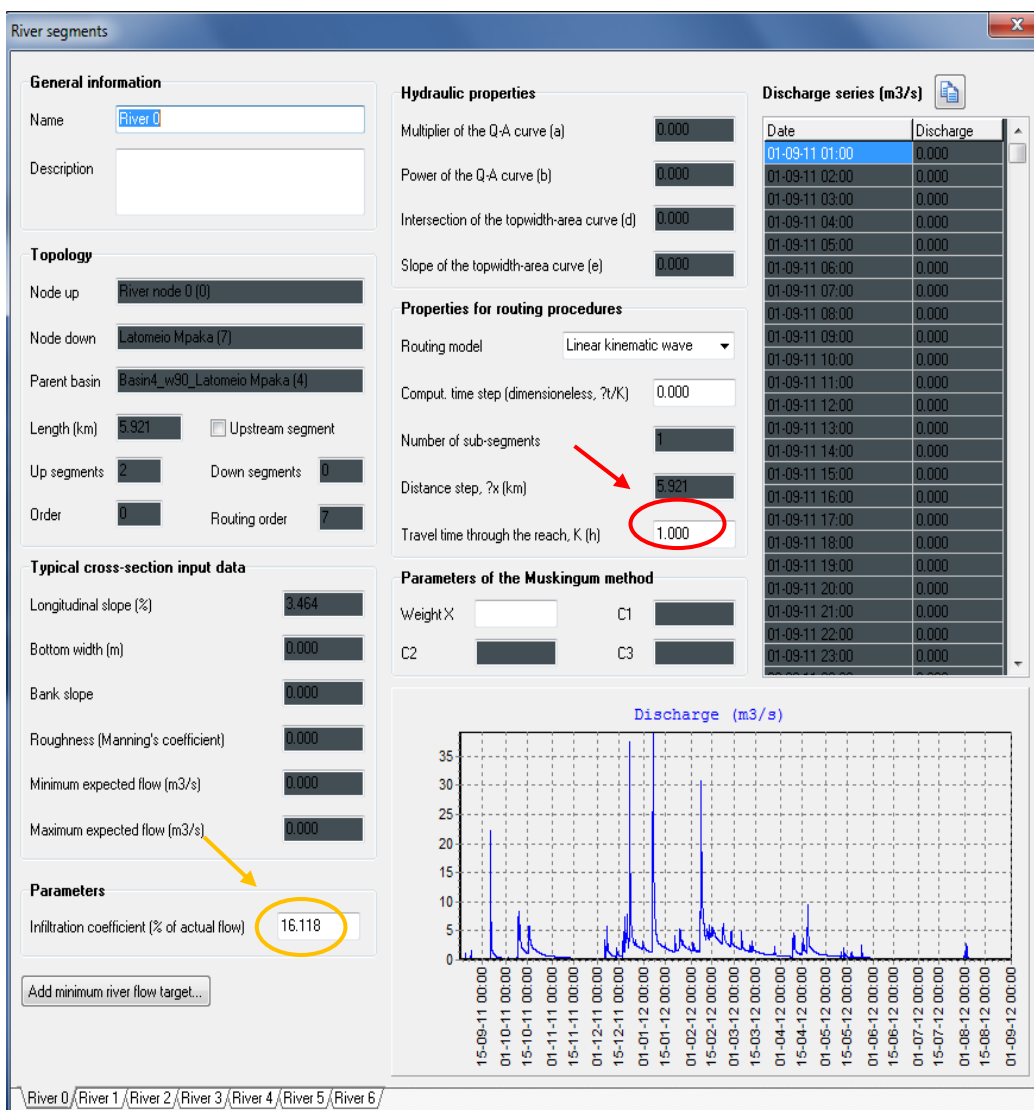
Για την εισαγωγή των χρονοσειρών βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής αλλά και στάθμης στο πρόγραμμα HYDROGEIOS προηγήθηκε η επεξεργασία και αποθήκευση τους μέσω του προγράμματος επεξεργασίας υδρολογικών δεδομένων HYDROGNOMON (Κοζάνης κ.α., 2010). Οι χρονοσειρές ήταν ακριβώς οι ίδιες που εισάχθηκαν και στο HEC-HMS. Οι αρχικές μετρήσεις τετάρτου και δεκαλέπτου, μετατράπηκαν σε ωριαίες και στη συνέχεια σε ημερήσιες χρονοσειρές στάθμης και βροχόπτωσης και εισήχθησαν για την συνεχή προσομοίωση. Στην προσομοίωση το διάστημα είναι ένα έτος από Σεπτέμβριο του 2011 μέχρι Αύγουστο του 2012 όσο και το μήκος της χρονοσειράς βροχόπτωσης.



Εικόνα 6.3, 6.4: Στα αριστερά είναι η χρονοσειρά βροχόπτωσης και δεξιά της δυνητικής εξατμοδιαπνοής όπως αυτές εισάγονται στο μοντέλο HYDROGEIOS

6.3.5. Μεταβλητές ελέγχου – Αρχικές συνθήκες

Αφού εισήχθησαν όλες οι χρονοσειρές στο πρόγραμμα και πριν ξεκινήσει η προσομοίωση όπως ακριβώς και στο HEC-HMS ορίζονται στα τμήματα του υδατορεύματος (για τις υπολεκάνες w70, w120, w90) η μέθοδος διάδευσης (Linear kinematic wave) στις ίδιες υπολεκάνες με πριν και με προσεγγιστικό χρόνο υστέρησης μία ώρα.



Εικόνα 6.5: Καρτέλα για τμήμα υδατορεύματος (w90) στο μοντέλο HYDROGEIOS. στο κόκκινο κύκλο φαίνεται ο ορισμός του χρόνου διάδευσης και με τον κίτρινο ο συντελεστής διήθησης

Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος αναφέρονται στις προς βελτιστοποίηση παραμέτρους του μοντέλου. Συνολικά, το μοντέλο έχει 68 παραμέτρους για το σύνολο των υπολεκανών που είναι:

- οι $7 \times 4 = 28$ παράμετροι του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας (7 για κάθε μία από τις 4 μονάδες υδρολογικής απόκρισης)
- οι 7 συντελεστές διήθησης των υδατορευμάτων

- οι 7 παράμετροι γραμμικού ταμειυτήρα για την μεταφορά του νερού από την λεκάνη στο υδατόρευμα (7 για κάθε μία από τις υπολεκάνες)
- οι $2 \times 13 = 26$ παράμετροι του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες των 8 κυττάρων (7 κυττάρων, 1 εικονικό) και των 5 πηγών

Τελικά, οι 28 παράμετροι του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας ομαδοποιήθηκαν σε 14 γιατί οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης από 4 συνενώθηκαν σε 2 λαμβάνοντας υπόψη μόνο την διαπερατότητα και όχι τις χρήσεις γης. Επίσης συντελεστής διήθησης υπάρχει μόνο σε ένα τμήμα του ποταμού (w90). Έτσι τελικά οι παράμετροι που βελτιστοποιήθηκαν και στις δύο προσομοιώσεις ήταν 48.

Αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αναφέρονται στην αρχική εδαφική υγρασία των δεξαμενών συσσώρευσης του επιφανειακού υδρολογικού μοντέλου, και στην αρχική στάθμη των δεξαμενών υπόγειου νερού. Η αρχική εδαφική υγρασία, η οποία διαφοροποιείται για κάθε συνδυασμό λεκάνης και μονάδας υδρολογικής απόκρισης, θεωρήθηκε παντού μηδενική, δεδομένου ότι η προσομοίωση ξεκινά τον Σεπτέμβριο, που είναι κοντά στο πέρας της ξηρής περιόδου. Όσον αφορά στις αρχικές στάθμες των δεξαμενών, λόγω έλλειψης πιεζομετρικών χαρτών λήφθηκε προσεγγιστικά ως αρχική τιμή το χαμηλότερο υψόμετρο της κάθε υπολεκάνης.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης προϋποθέτει τον ορισμό ενός επιτρεπόμενου εύρους διακύμανσης των τιμών των μεταβλητών ελέγχου. Ο καθορισμός τους βασίστηκε αρχικά στη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων, ωστόσο, κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, τα όρια αυτά μεταβλήθηκαν πολλές φορές, με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη διερεύνηση του χώρου αναζήτησης για την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης.

6.3.6. Συνάρτηση Στόχου – Κριτήρια καλής προσαρμογής

Για την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών παραμέτρων με τη χρήση τεχνικών ολικής βελτιστοποίησης, απαιτείται η διατύπωση ενός μέτρου επίδοσης, το

οποίο αντιστοιχεί στην συνάρτηση στόχου του προβλήματος. Επειδή ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου είναι αρκετά μεγάλος, κρίθηκε αναγκαίος ο ταυτόχρονος έλεγχος πολλών κριτηρίων καλής προσαρμογής, κάτι που είναι σύμφωνο με την πρακτική που ακολουθείται διεθνώς (Wagener et al., 2001).

Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε μια σύνθετη συνάρτηση στόχου, με τις ακόλουθες συνιστώσες:

- δείκτες αποτελεσματικότητας (Efficiency) των υδρογραφημάτων στις τρεις θέσεις μέτρησης της στάθμης (Αλαγονία, Λατομείο Μπάκα, Καρβελιώτης) με συντελεστή βάρους (1)
- δείκτες αποτελεσματικότητας (Efficiency) των πηγών σε δύο θέσεις (Αλαγονία, Καρβελιώτης) με συντελεστή βάρους (0.1)
- μέτρα ποινής για την αναπαραγωγή τάσης (Trend penalty) των πέντε πηγών και των υπόγειων κυττάρων με συντελεστή βάρους (1)

Όπως είναι φανερό τα μεγέθη σταθμίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην αναπαραγωγή των παροχών, που είναι και το βασικό κριτήριο ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου.

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας (Efficiency) είναι ένα τυπικό στατιστικό μέτρο καλής προσαρμογής υδρολογικών μοντέλων, που ορίζεται ως:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.1)$$

που x_i είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά, \bar{x} η μέση τιμή της, y_i η προσομοιωμένη χρονοσειρά και n ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου. Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Προφανώς, κάτι τέτοιο δεν είναι ποτέ εφικτό για ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπαριστά φυσικές διεργασίες και, ως εκ τούτου, υπόκειται τόσο σε δομικά σφάλματα όσο και σε σφάλματα μετρήσεων. Εφόσον $R < 0$ η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση παρατηρημένη τιμή \bar{x} .

Τα μέτρα ποινής για την αναπαραγωγή τάσης (Trend penalty) είναι ένας συνδυασμός μεθόδων για τον έλεγχο της στάθμης των υπόγειων κυττάρων. Ελέγχει κατά την διάρκεια του υδρολογικού έτους η μεταβολή της στάθμης η οποία πρέπει σχεδόν να ταυτίζεται με την αρχική στο τέλος του έτους. Η αναπαραγωγή αυτής της φυσικής συμπεριφοράς των υπόγειων κυττάρων για τα οποία δεν υπήρχαν μετρήσεις, γίνεται και με τη χρήση ενός αριθμητικού μέτρου ελέγχου της τάσης, που βασίζεται στη δοκιμή Mann- Kendall όπως περιγράφεται από τον Kottegoda (1980, p. 32-34). Η δοκιμή αυτή υλοποιείται ως εξής: Για μια δεδομένη χρονοσειρά $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, υπολογίζεται η τυποποιημένη κανονική μεταβλητή:

$$T = \frac{r}{\sqrt{\sigma_x^2}} \quad (6.2)$$

Όπου:

$$r = \frac{4p}{n(n-1)} \quad (6.3)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{2(2N+5)}{[(9N(N-1))]} \quad (6.4)$$

και P ο αριθμός όλων των ζευγών $\{x_i, x_j, j > i\}$ με $x_i < x_j$. Θεωρώντας αμφίπλευρο έλεγχο (δηλαδή τόσο για θετική όσο και για αρνητική τάση) και επίπεδο σημαντικότητας α , απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση μη ύπαρξης τάσης εφόσον $|T| < Z_{\alpha/2}$. Με βάση τον παραπάνω έλεγχο, και με θεώρηση επιπέδου σημαντικότητας $\alpha = 95\%$, οπότε $Z_{\alpha/2} = 1.96$, εισάγεται ένα εμπειρικό μέτρο, για την εισαγωγή ποινής στα κύτταρα εκείνα των οποίων η μηνιαία στάθμη εμφανίζει στατιστικά σημαντική τάση. Το μέτρο αυτό υπολογίζεται από την σχέση:

$$e_T = \max(0, |T| - 1.96) \quad (6.5)$$

Επισημαίνεται ότι το παραπάνω σφάλμα δεν έχει νόημα να χρησιμοποιείται για το εικονικό κύτταρο που αντιπροσωπεύει συγκέντρωση των υπόγειων διαφυγών προς τη θάλασσα, το οποίο εξ ορισμού παρουσιάζει θετική τάση, όπως και για τα κύτταρα που

αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία πηγών. Ομοίως, δεν έχει νόημα η χρήση του σε κύτταρα που επικοινωνούν με το τελευταίο, η δίαιτα των οποίων μπορεί να ελεγχθεί με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία από παρατηρημένα υδρογραφήματα (Ευστρατιάδης, Ρόζος, Κουκουβίνος, 2009).

6.4. Βαθμονόμηση Μοντέλου

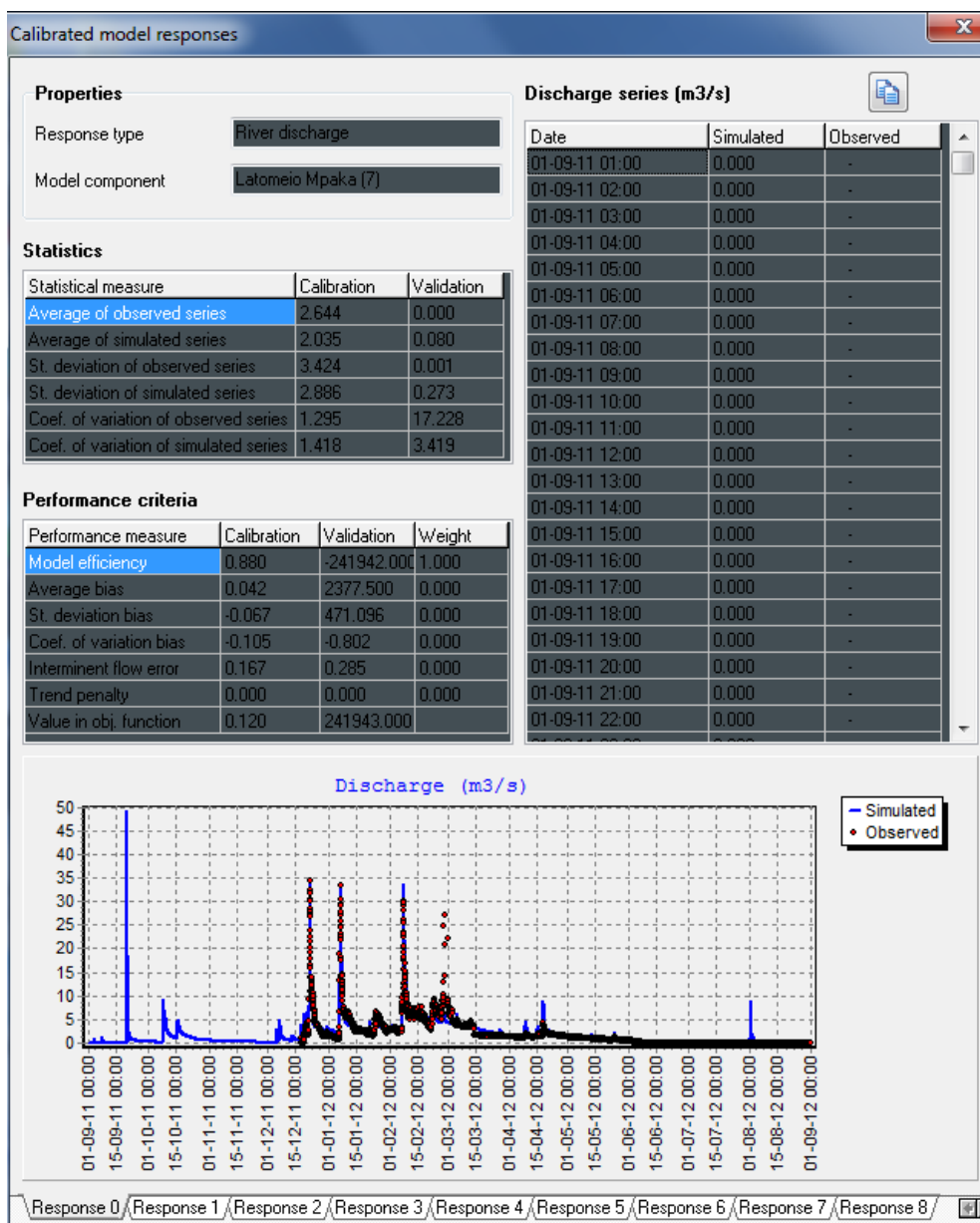
Το μοντέλο HYDROGEIOS χρησιμοποιεί τον εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτησης-απλόκου (multiobjective evolutionary annealing-simplex, MEAS) (Ευστρατιάδης, 2001·Efstatiadis and Koutsogiannis, 2002· Rozos et al., 2004 Ευστρατιάδης, 2008). Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου είναι μια πιθανοτική ευρετική τεχνική ολικής βελτιστοποίησης που συνδυάζει ιδέες από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, εμπλουτίζοντάς τες με πρωτότυπα στοιχεία.

Η κύρια σύλληψη βασίζεται σε ένα σχήμα ελεγχόμενης τυχαίας αναζήτησης, στο οποίο γίνεται σύζευξη μιας γενικευμένης μεθοδολογίας κατερχόμενου απλόκου με μια διαδικασία προσομοιωμένης ανόπτησης. Ο αλγόριθμος συνδυάζει την ευρωστία της προσομοιωμένης ανόπτησης σε τραχέα προβλήματα βελτιστοποίησης, με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων κλίσης σε απλούς χώρους αναζήτησης. Η επαναληπτική διαδικασία αναζήτησης βασίζεται σε ένα σχήμα απλόκου. Το άπλοκο αναμορφώνεται σε κάθε γενιά, αναρριχόμενο ή κατερχόμενο σύμφωνα με ένα πιθανοτικό κριτήριο. Στην πρώτη περίπτωση μετακινείται προς την κατεύθυνση του υποψήφιου τοπικού ελαχίστου βάσει μιας γενικευμένης στρατηγικής Nelder-Mead, ενώ στη δεύτερη περίπτωση εκτείνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, έτσι ώστε να διαφύγει από το τρέχον τοπικό ακρότατο. Σε όλες τις δυνατές κινήσεις του απλόκου, εφαρμόζεται ένας συνδυασμός από προσδιοριστικούς και πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης (Ευστρατιάδης, 2008).

Όπως και στο HEC-HMS, έτσι και στο HYDROGEIOS η διαδικασία βαθμονόμησης είναι η ίδια. Ακολουθείται η λογική της ημιαυτόματης βαθμονόμησης, δηλαδή κατά την διάρκεια της αυτόματης βαθμονόμησης ο χρήστης επεμβαίνει μεταβάλλοντας τα

κριτήρια και τις υποθέσεις, κατευθύνοντας έτσι την αναζήτηση των βέλτιστων τιμών με βάση τις ανάγκες του προβλήματος και των γνώσεων του. Η διαδικασία αυτή υπερτερεί από την αυτόματη γιατί μπορεί ο χρήστης να διακρίνει τις καλύτερες από πολλές ισοδύναμες μαθηματικά λύσεις, και να επιλέξει χειρότερες λύσεις αν οι τιμές τους δίνουν πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα των δύο βαθμονομήσεων που έγιναν στο συγκεκριμένο πρόγραμμα θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι καρτέλες αποτελεσμάτων που δίνει το μοντέλο HYDROGEIOS. Για κάθε κριτήριο καλής προσαρμογής που έχει οριστεί στις δύο προσομοιώσεις, υπάρχει και μία καρτέλα σαν αυτή του επόμενου σχήματος (Σχήμα 6.10). Σε αυτή παρατίθενται η παρατηρημένη (αν υπάρχει) χρονοσειρά όπως επίσης και αυτή που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα. Οι χρονοσειρές αποτυπώνονται και γραφικά στο κάτω μέρος της καρτέλας και στην αριστερή πλευρά της δίνονται πληροφορίες για τον τύπο της χρονοσειράς, την υπολεκάνη στην οποία βρίσκεται και όλα τα στατιστικά μεγέθη σε σχέση με τα κριτήρια καλής προσαρμογής για την περίοδο βαθμονόμησης και επαλήθευσης.



Εικόνα 6.6: Στα αριστερά είναι το παρατηρημένο και υπολογισμένο υδρογράφημα και δεξιά ο πίνακας της τιμής του σφάλματος κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως για την συγκεκριμένη μελέτη δεν υπήρξε περίοδος επαλήθευσης. Αυτό συνέβη γιατί οι μετρήσεις απορροής ήταν πολύ λίγες και δεν υπήρχε περιθώριο να μοιραστούν σε δύο κομμάτια ώστε να γίνει σωστή βαθμονόμηση αλλά και στη συνέχεια επαλήθευση του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. Παρουσίαση - Σύγκριση αποτελεσμάτων

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ώστε οι διεργασίες των δύο μοντέλων να είναι συγκρίσιμες, θα χρησιμοποιηθεί ως μέτρο επίδοσης και στα δύο μοντέλα ο δείκτης αποτελεσματικότητας (Efficiency). Τον δείκτη αυτό, χρησιμοποιεί το μοντέλο HYDROGEIOS αλλά όχι το HEC-HMS. Έτσι υπολογίζεται και για αυτό, και παρουσιάζεται παρακάτω. Επίσης έγινε προσπάθεια να εξαχθούν τα υδατικά ισοζύγια και να συσχετιστούν με την φυσική τους σημασία στη λεκάνη. Υπενθυμίζεται πως η περίοδος συνεχούς προσομοίωσης είναι

από 01/09/2011, έως 31/8/2012,

ενώ περίοδος επαλήθευσης δεν υπάρχει στην συγκεκριμένη εργασία.

Για την προσομοίωση των τριών επεισοδίων που έγινε στο μοντέλο HEC-HMS θα γίνει σύγκριση με τις ίδιες ημερομηνίες από την συνεχή ωριαία προσομοίωση του μοντέλου HYDROGEIOS ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν αυτή η διαδικασία είναι εφικτή. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί το εύρος τιμών της κάθε παραμέτρου για τα τρία επεισόδια.

Υπενθυμίζεται πως τα επεισόδια αναφέρονται στις εξής ημερομηνίες:

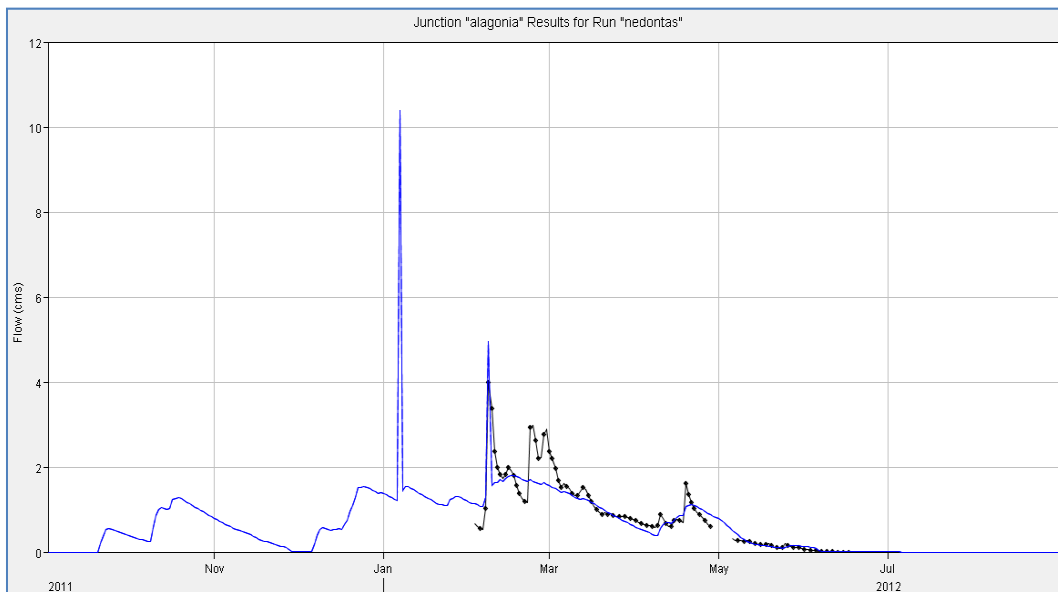
- Από 06/01/2012 στις 00:00, έως 08/01/2012 στις 00:00
- Από 05/02/2012 στις 00:00, έως 11/01/2012 στις 00:00
- Από 18/04/2012 στις 00:00, έως 21/01/2012 στις 00:00

7.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων συνεχούς προσομοίωσης

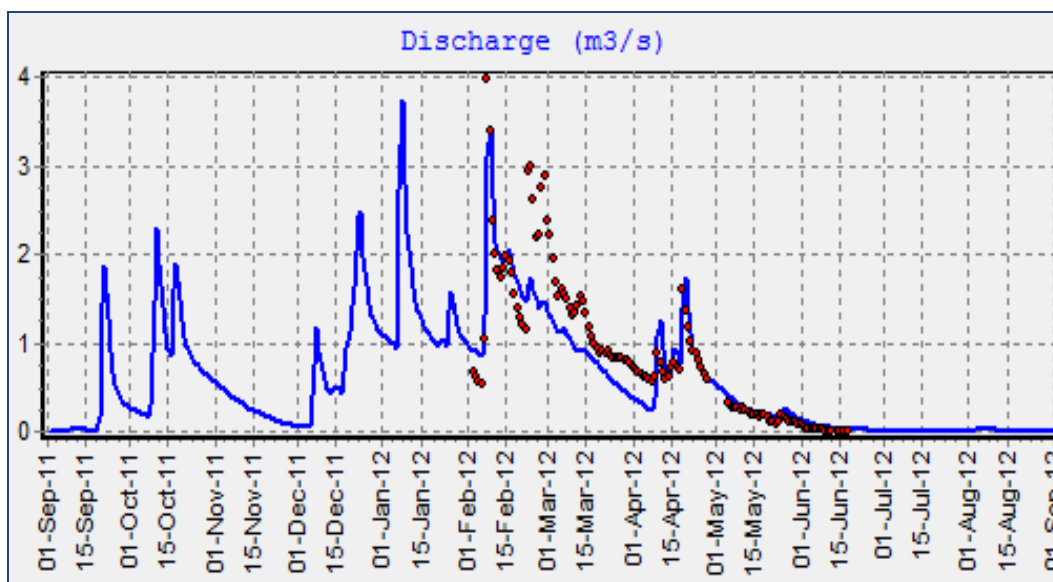
7.1.1. Θέση υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας

Ημερήσιο χρονικό βήμα

Στο ημερήσιο βήμα της συνεχούς προσομοίωσης τα δύο μοντέλα στην συγκεκριμένη θέση είχαν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά. Καθόλη τη διαδικασία βελτιστοποίησης τα αποτελέσματα στον υδρομετρικό σταθμό έδειχναν μεγάλη σταθερότητα ανεξάρτητα από τις παραμέτρους του μοντέλου που επιλέγονταν για βαθμονόμηση. Για το HEC-HMS ο δείκτης αποτελεσματικότητας είναι $r=0.79$ (Σχήμα 7.1) ενώ για το HYDROGEIOS $r=0.78$ (Σχήμα 7.2.)

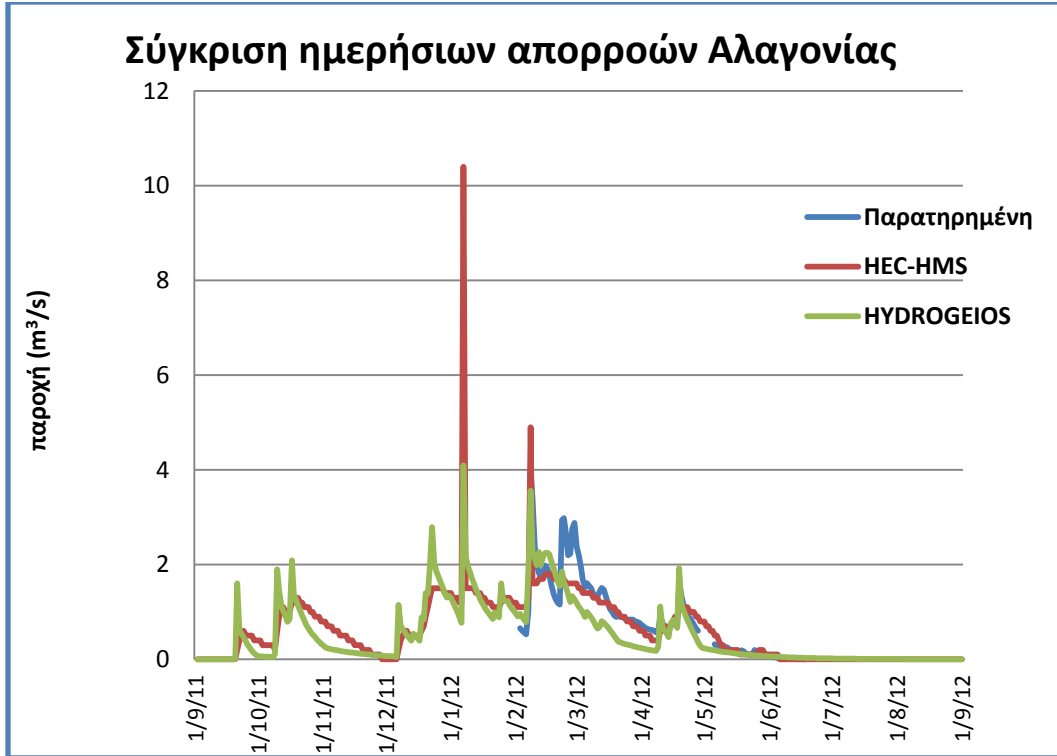


Σχήμα 7.1: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS.



Σχήμα 7.2: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HYDROGEIOS.

Παρόλο που οι δείκτες αποτελεσματικότητας για τα δύο μοντέλα είναι πολύ κοντά όσον αφορά τις τιμές τους, όπως διαπιστώνεται και στο επόμενο σχήμα, τα δύο μοντέλα έχουνε πολύ διαφορετικά υδρογραφήματα. Το HEC-HMS υπερεκτιμά τις αιχμές αλλά προσομοιώνει με καλή προσαρμογή τις χαμηλές παροχές ενώ το HYDROGEIOS είναι κοντά στις παρατηρημένες αιχμές και επιτυγχάνει ακριβώς την αιχμή του Φεβρουαρίου που είναι και η μεγαλύτερη μετρημένη παροχή, αλλά υποεκτίμα τις χαμηλές παροχές.

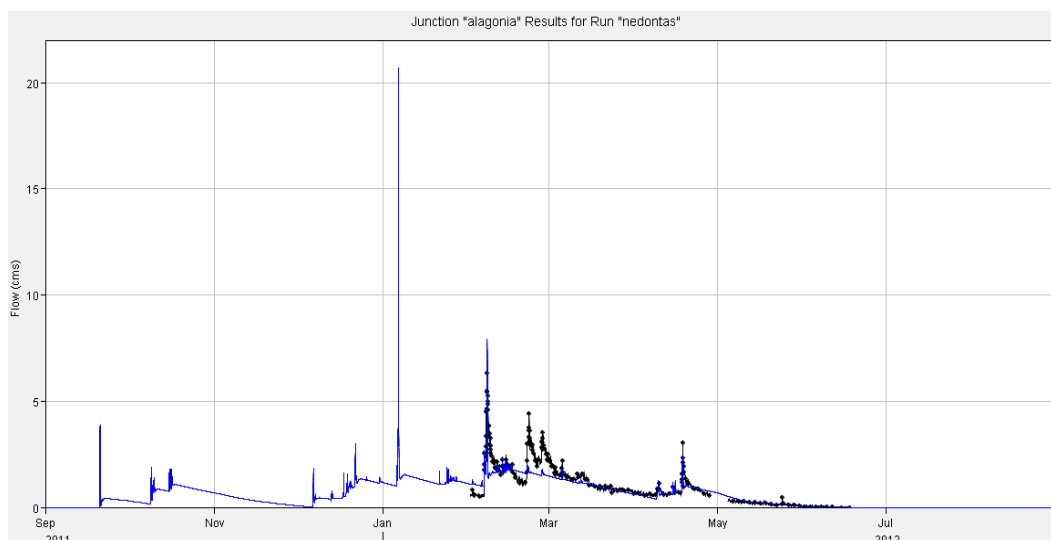


Σχήμα 7.3: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ημερήσιο βήμα

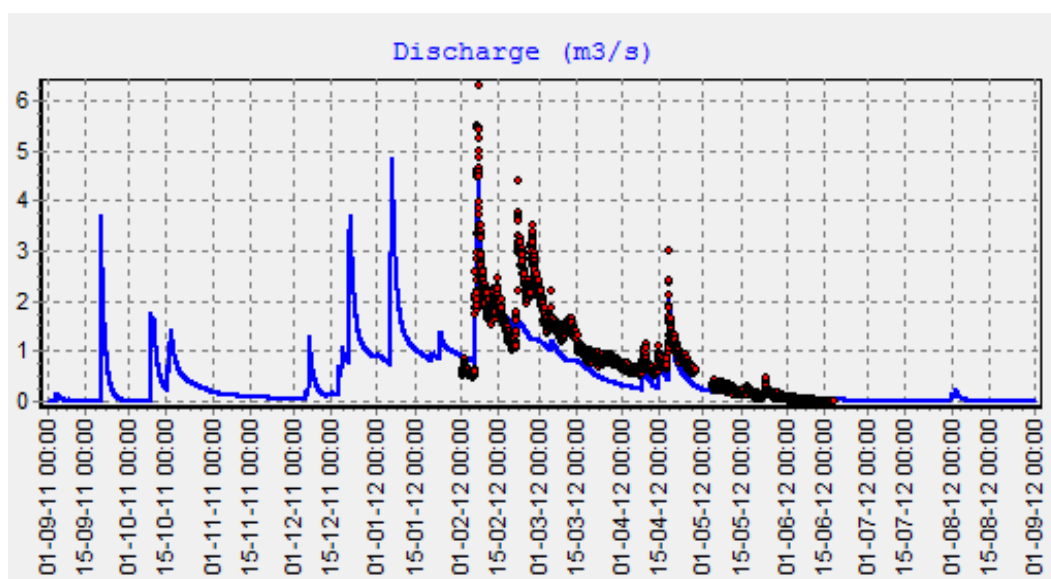
Ωριαίο χρονικό βήμα

Στο ωριαίο χρονικό βήμα τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν άλλαξαν όσον αφορά τον δείκτη αποτελεσματικότητας. Το HEC-HMS έδωσε τιμή $r=0.79$ και εδώ ενώ το HYDROGEIOS ανεπαίσθητα μειωμένο με τιμή $r=0.77$. Όπως προαναφέρθηκε οι δείκτες έδειχναν μεγάλη σταθερότητα και αυτό οφείλονταν και στο γεγονός πως πάνω από τα μισά δεδομένα ήταν τους καλοκαιρινούς μήνες όπου η στάθμη ήταν μηδενική και τα μοντέλα αποκρίνονταν σωστά στις μηδενικές τιμές.

Αξίζει να σημειωθεί πως εδώ το μοντέλο HEC-HMS υπερεκτιμά τις αιχμές (7.9 έναντι $6.3 \text{ m}^3/\text{s}$) ακόμα περισσότερο σε σχέση με την προσομοίωση στο ημερήσιο βήμα (4.9 έναντι $4 \text{ m}^3/\text{s}$) (Σχήμα 7.4). Το μοντέλο HYDROGEIOS από την άλλη, συνεχίζει να υποεκτιμά τις παροχές καθόλη τη διάρκεια προσομοίωσης (Σχήμα 7.5).



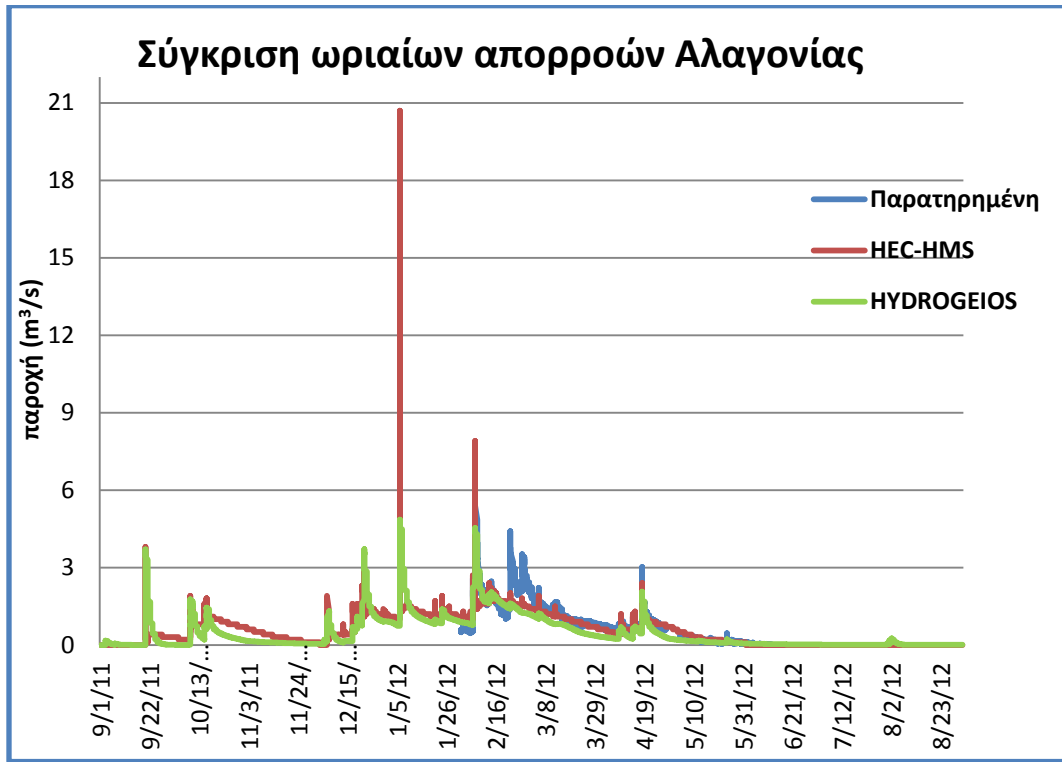
Σχήμα 7.4: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS



Σχήμα 7.5: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HYDROGEIOS

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως για τον σταθμό Αλαγονίας, λόγω των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι παροχές έχουνε μεγάλη αβεβαιότητα για το κατά πόσο αντικατοπτρίζουνε την πραγματικότητα.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται συγκριτικά οι απορροές των δύο μοντέλων σε σχέση με την παρατηρημένη απορροή. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το παρατηρημένο επεισόδιο στα τέλη Φεβρουαρίου κανένα από τα δύο μοντέλα δεν καταφέρνει να το προσομοιάσει. Αυτό αποτελεί μια επιπλέον ένδειξη αβεβαιότητας των τιμών της στάθμης στον υδρομετρικό αυτό σταθμό.



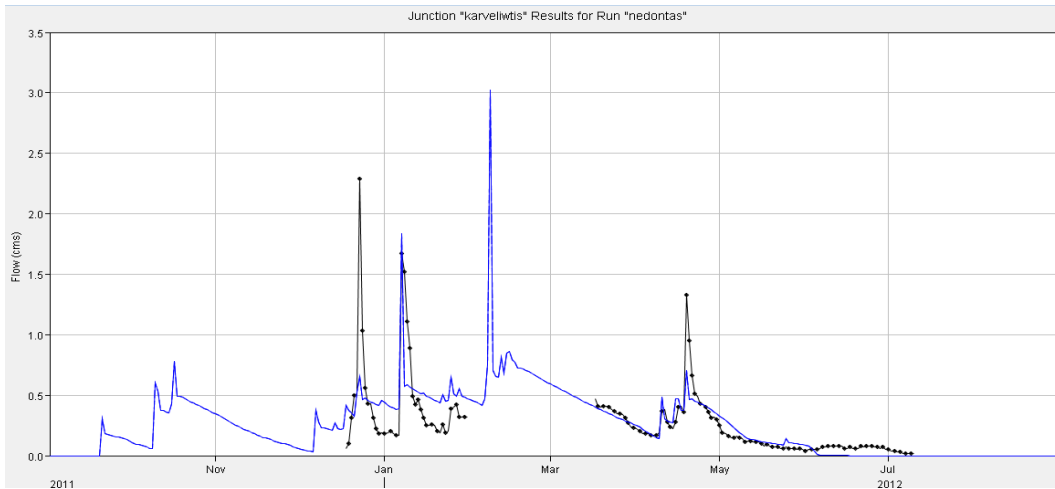
Σχήμα 7.6: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα

7.1.2. Θέση υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη

Ημερήσιο χρονικό βήμα

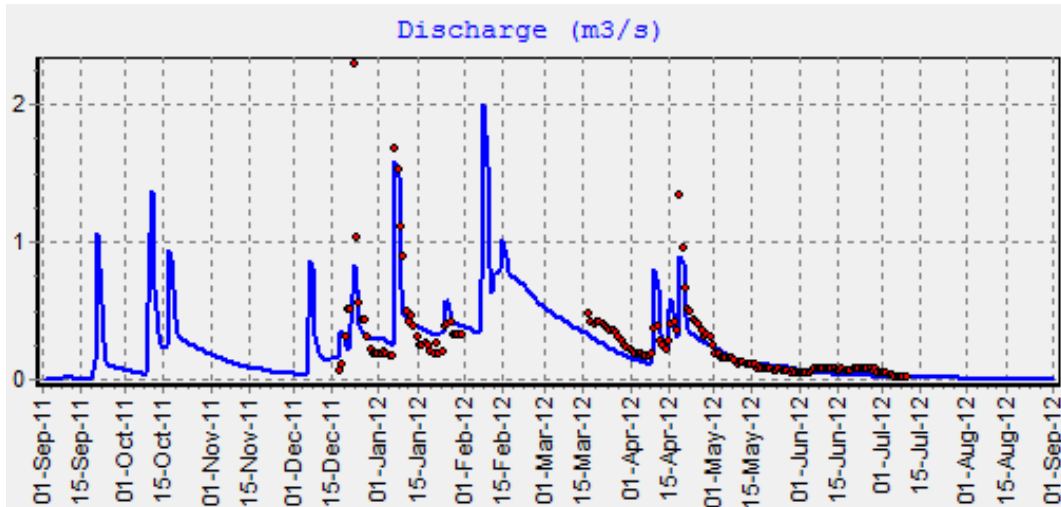
Τα πρωτογενή δεδομένα στη θέση αυτή είναι σε δύο περιόδους. Η πρώτη περίοδος είναι από τέλη Δεκεμβρίου μέχρι αρχές Φεβρουαρίου και η δεύτερη από μέσα Μαρτίου μέχρι τέλη Ιουλίου όπου και η στάθμη έχει σχεδόν μηδενιστεί. Ο δείκτης αποτελεσματικότητας στο ημερήσιο βήμα για το HEC-HMS ήταν αρκετά χαμηλός

$r=0.55$. Έγιναν αρκετές προσπάθειες χωρίς να πετυχαίνεται ουσιαστική βελτίωση του αποτελέσματος. Στην πρώτη περίοδο. Το μοντέλο πετυχαίνει την προσομοίωση ενός από τα δύο μεγάλα επεισόδια βροχής ενώ υπερεκτιμά τις χαμηλές στάθμες. Στη δεύτερη περίοδο, καταφέρνει να διορθώσει το πρόβλημα αυτό αλλά υποεκτιμά το επεισόδιο του Απριλίου (Σχήμα 7.7).

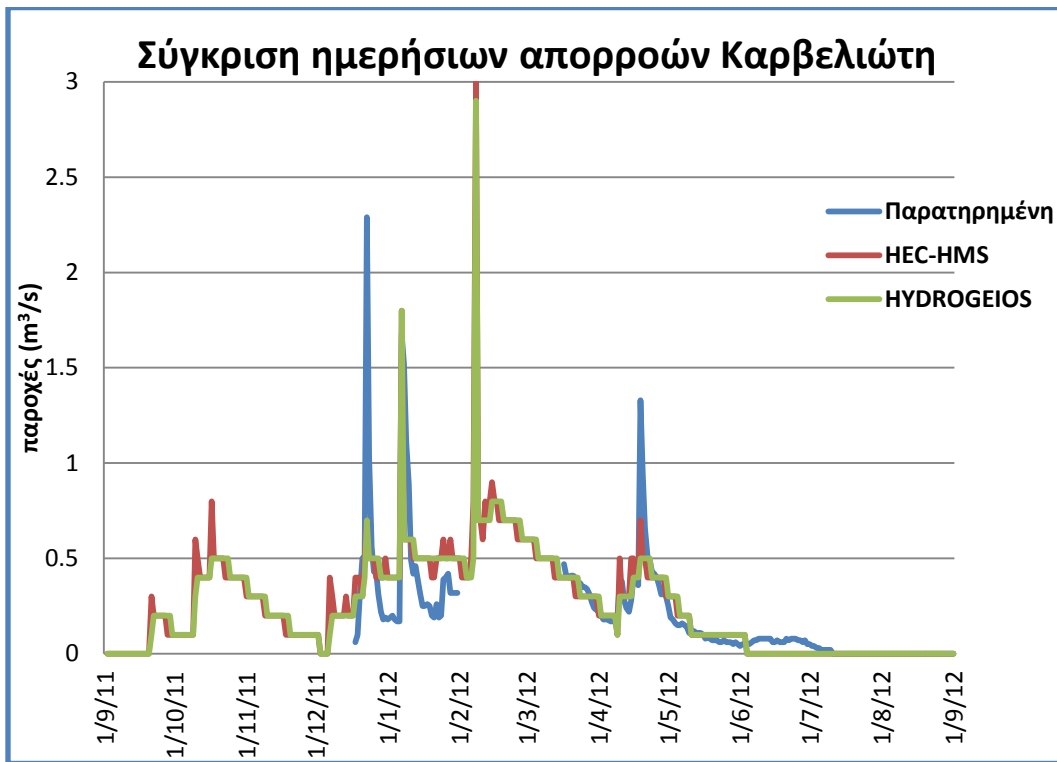


Σχήμα 7.7: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS

Το μοντέλο HYDROGEOIOS, επιτυγχάνει καλύτερη προσαρμογή με τιμή $r=0.72$ χωρίς βέβαια και αυτή να είναι ιδανική. Έχει και αυτό την ίδια περίπου συμπεριφορά με το HEC-HMS ως προς τα επεισόδια με την διαφορά πως όλες οι τιμές είναι πιο κοντά στις παρατηρούμενες (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HYDROGEIOS.

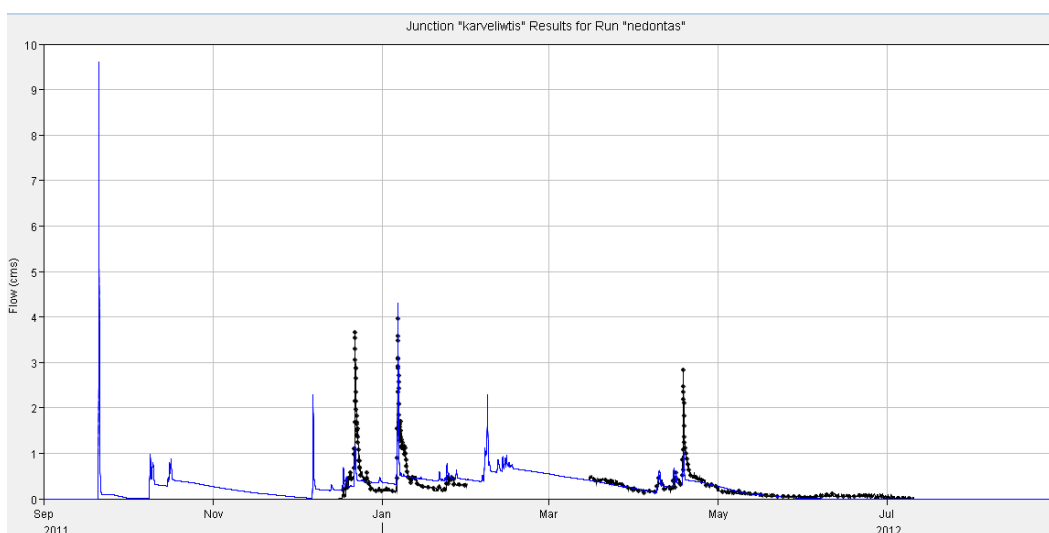


Σχήμα 7.9: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτη σε ημερήσιο βήμα

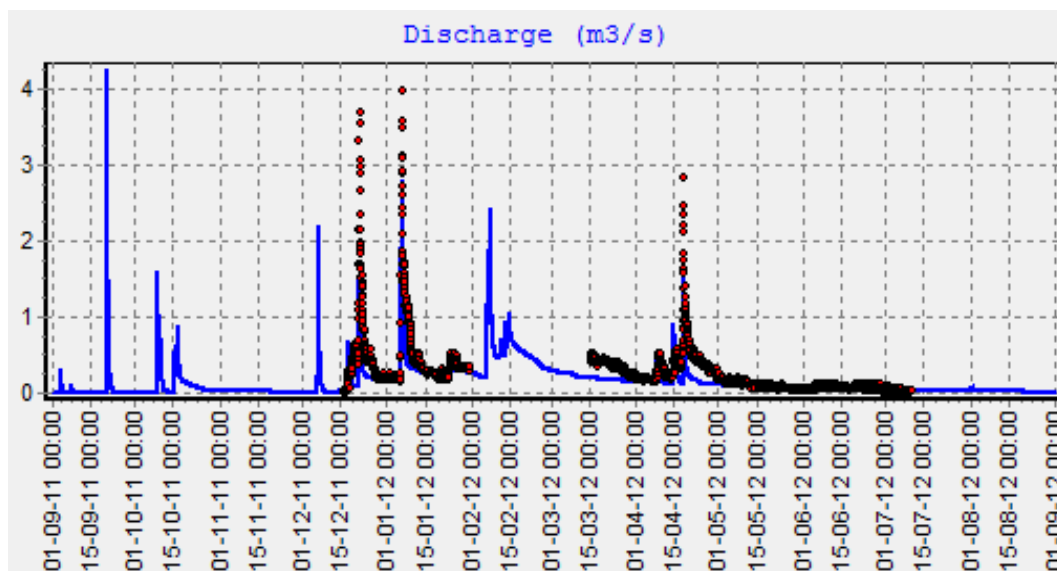
Ωριαίο χρονικό βήμα

Στο ωριαίο χρονικό βήμα, το μοντέλο HEC-HMS έχει δείκτη αποτελεσματικότητας $r=0.58$ ελαφρώς βελτιωμένο σε σχέση με το ημερήσιο σε αντίθεση με αυτόν του μοντέλου HYDROGEIOS του οποίου η προσαρμογή χειροτέρευσε $r=0.59$ και έφτασε στα επίπεδα του HEC-HMS. Έτσι η προσαρμογή σε ωριαίο βήμα κρίνεται μέτρια και για τα δύο μοντέλα.

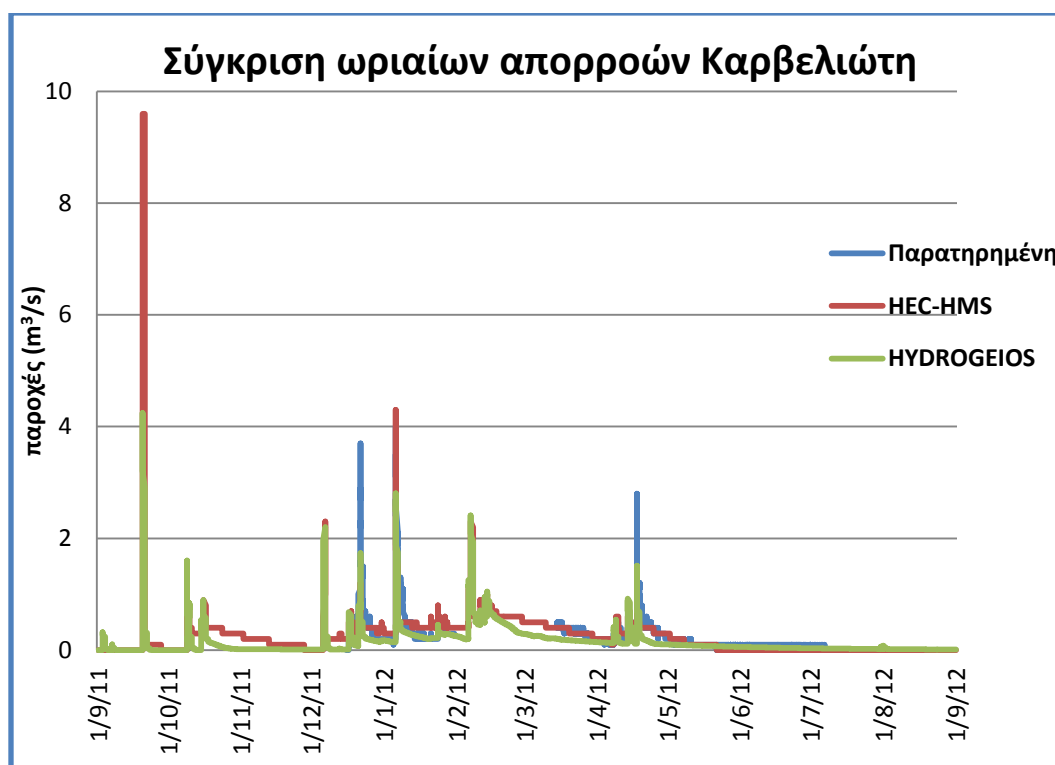
Στην συνέχεια παρατίθενται τα δύο υδρογραφήματα των μοντέλων και διαπιστώνεται σχηματικά η προσαρμογή τους στις παρατηρημένες παροχές και ακολουθεί η συγκριτική τους παρουσίαση όπου μπορούν να διακριθούν οι διαφορές τους.



Σχήμα 7.10: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS



Σχήμα 7.11: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HYDROGEIOS



Σχήμα 7.12: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτη σε ωριαίο βήμα

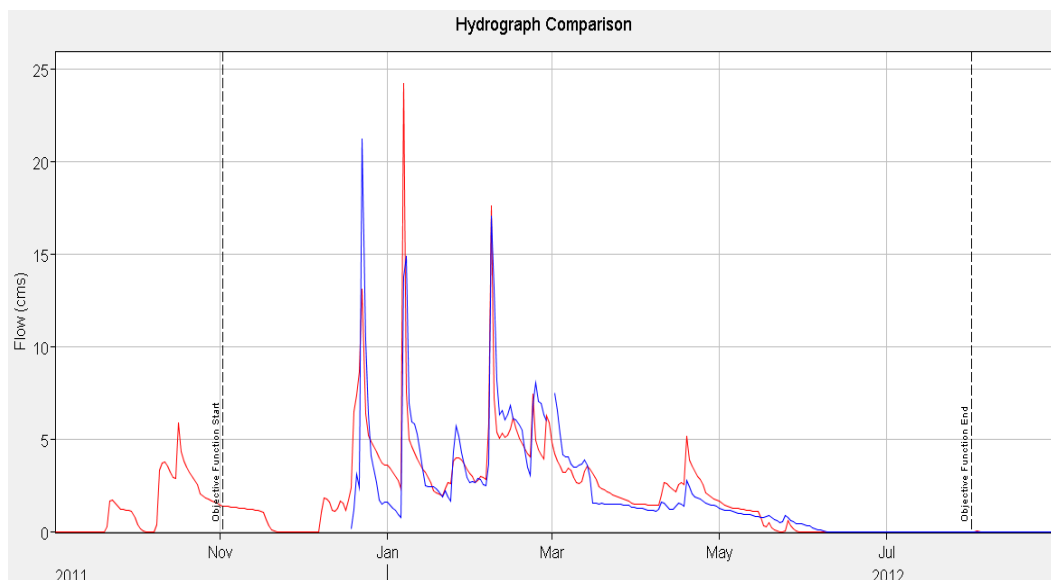
7.1.3. Θέση υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα – έξοδος λεκάνης

Ο υδρομετρικός σταθμός του Λατομείου Μπάκα είναι και ο σημαντικότερο σταθμός της λεκάνης γιατί αποτελεί και την έξοδο αυτής. Στο σημείο αυτό, συγκεντρώνονται οι απορροές από όλες τις υπόλοιπες λεκάνες και γι' αυτό δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα σε σχέση με τους άλλους δύο υδρομετρικούς σταθμούς που βρίσκονται στις πιο ανάντη λεκάνες και συγκεντρώνουν απορροή μόνο από την λεκάνη στην οποία βρίσκονται.

Για τον λόγο αυτό, οι συγκεκριμένες στάθμες όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουν δεχτεί ιδιαίτερη επεξεργασία για να γίνουν παροχές από κατάλληλο λογισμικό. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα αποτελέσματα να χαρακτηρίζονται από μικρότερη αβεβαιότητα.

Ημερήσιο χρονικό βήμα

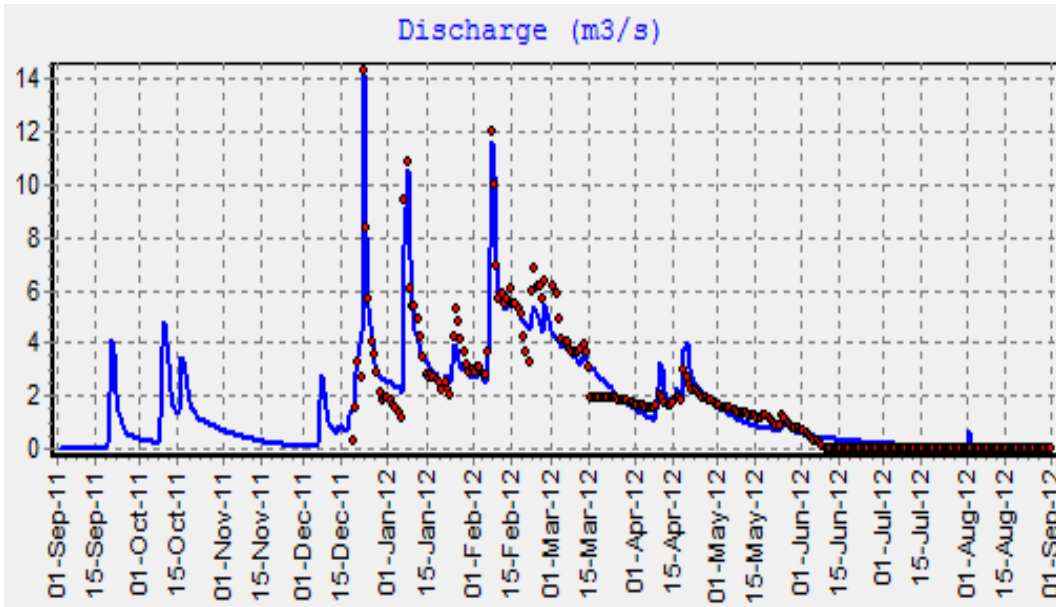
Στο ημερήσιο βήμα, το μοντέλο HEC-HMS έχει προσαρμογή που φτάνει την τιμή $r=0.69$. Στο μοντέλο αυτή, η τιμή αποτελεί την δεύτερη καλύτερη μετά την Αλαγονία. Το κύριο πρόβλημα της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι οι δύο πρώτες μεγάλες αιχμές του υδρογραφήματος τις οποίες υποεκτιμά και υπερεκτιμά αντίστοιχα (Σχήμα 7.13).



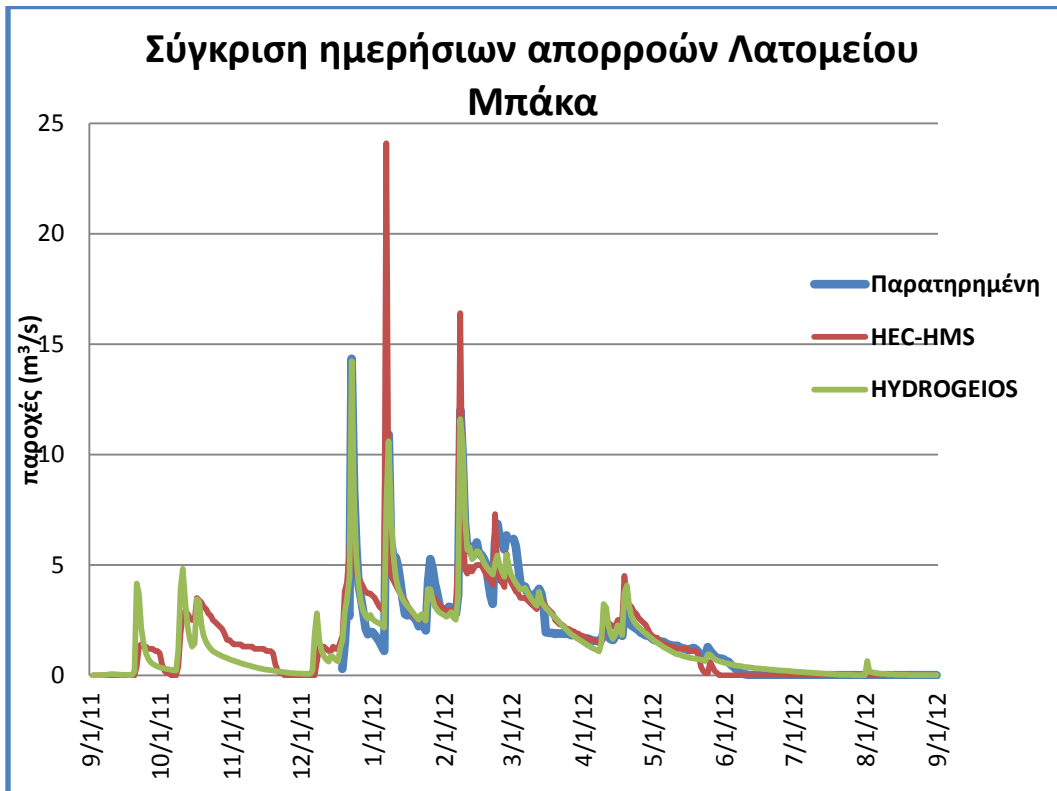
Σχήμα 7.13: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS

Στο ημερήσιο βήμα, το μοντέλο HYDROGEIOS έχει την καλύτερη προσαρμογή που επετεύχθη στην συγκεκριμένη μελέτη με τιμή $r=0.95$. Το μοντέλο αποκρίνεται ιδανικά και στις αιχμές και στις χαμηλές ροές. Η διαφορές είναι μικρότερες του μισού κυβικού ακόμα και στις υψηλότερες παροχές και θεωρείται η πλέον αξιόπιστη προσομοίωση (Σχήμα 7.14).

Όπως διαπιστώνεται και στο συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 7.15), αν και οι παροχές του HEC-HMS βρίσκονται κοντά με την παρατηρημένη χρονοσειρά στις χαμηλές ροές, το μόνιμο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ότι υπερεκτιμά τις αιχμές. Εν αντιθέσει με το μοντέλο HYDROGEIOS που έχει καλή προσαρμογή σε όλο το μήκος της χρονοσειράς.



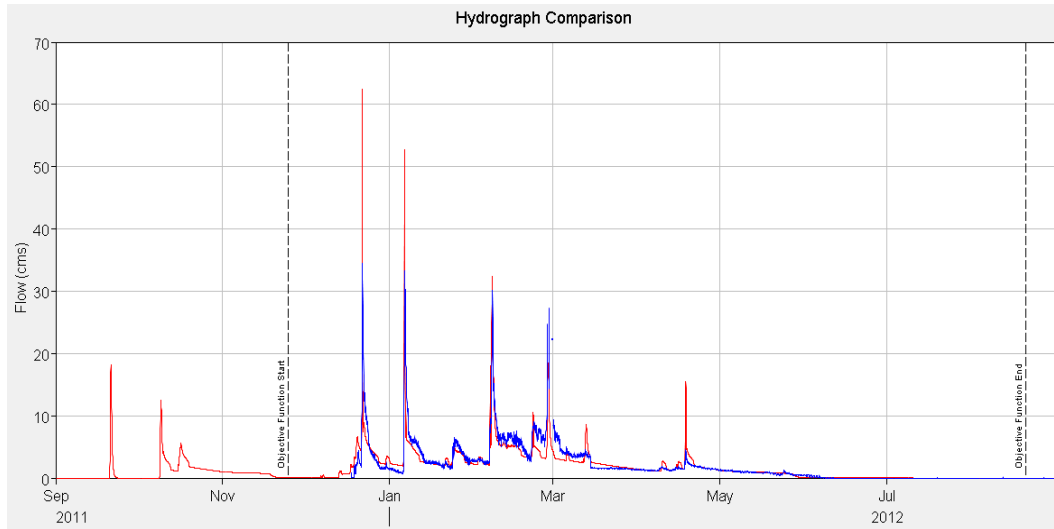
Σχήμα 7.14: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HYDROGEIOS.



Σχήμα 7.15: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ημερήσιο βήμα

Ωριαίο χρονικό βήμα

Στο ωριαίο χρονικό βήμα, η τιμή του δείκτη έμεινε σχεδόν ίδια για το HEC-HMS ενώ για το μοντέλο HYDROGEIOS μειώθηκε. Συγκεκριμένα η προσαρμογή του HEC-HMS είναι $r=0.73$. το πρόβλημα των πολύ υψηλών αιχμών παραμένει ενώ η υπόλοιπη προσαρμογή του υδρογραφήματος είναι αρκετά ικανοποιητική (Σχήμα 7.16).

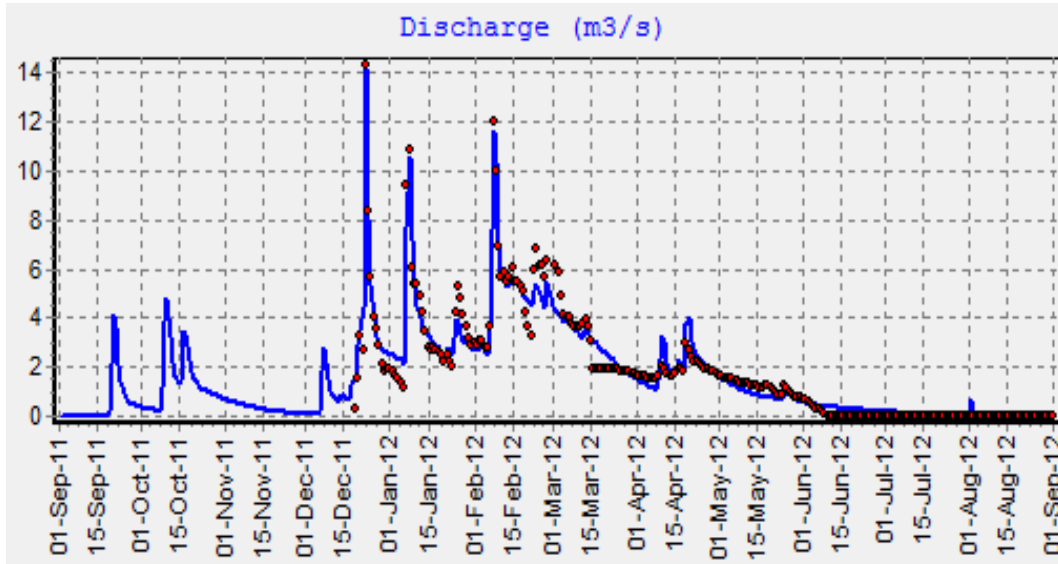


Σχήμα 7.16: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS

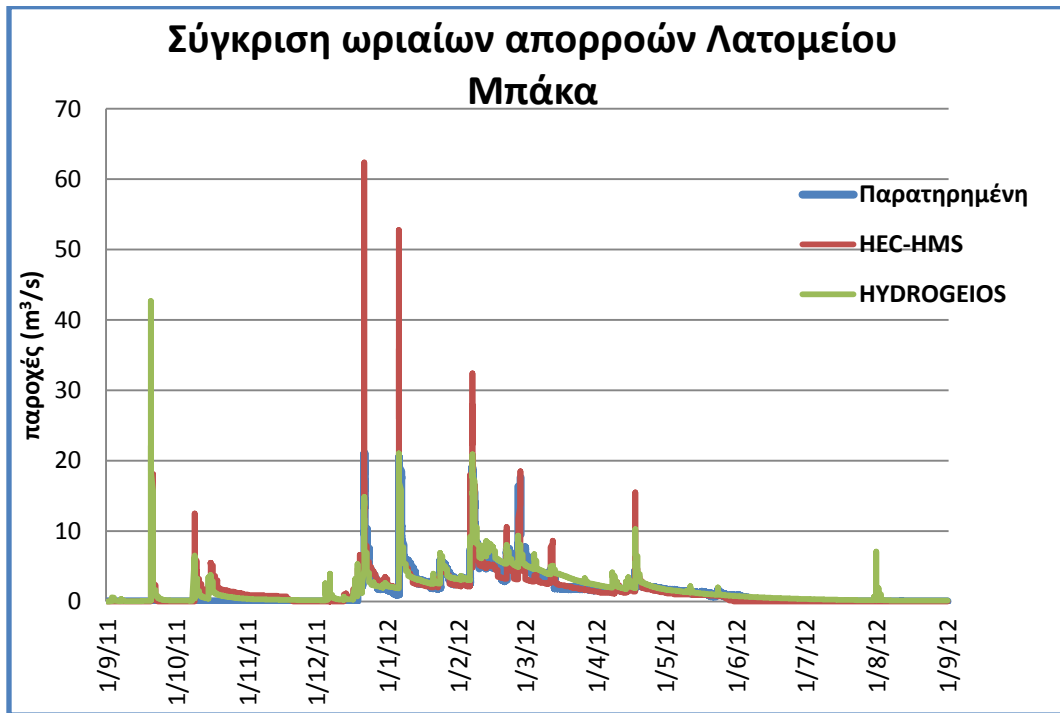
Από τη άλλη πλευρά, στο HYDROGEIOS, με τιμή $r=0.83$, έχει μια πολύ καλή προσαρμογή. Ο δείκτης αποτελεσματικότητας είναι κατά 0.12 μειωμένος και αυτό οφείλεται κυρίως στο διάστημα από μέσα Φεβρουαρίου μέχρι τις αρχές Μαρτίου όπου η προσαρμογή μετά από αρκετά μεγάλο επεισόδιο βροχόπτωσης δεν είναι τόσο καλή όσο στο υπόλοιπο υδρογράφημα.

Αξίζει να σημειωθεί πως την περίοδο αυτή, απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο των δεδομένων κάποιες μετρήσεις στάθμης διότι δεν συμβάδιζαν με τις υπόλοιπες πράγμα που φανερώνει την αμφιβολία για τις μετρήσεις του οργάνου εκείνο το διάστημα. Επίσης, οι συγκεκριμένες παροχές που τελικά παρουσιάζονται, έδωσαν πολύ καλύτερη προσομοίωση από την αρχική προσπάθεια που έγινε με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και στους άλλους σταθμούς και περιγράφηκε σε προγενέστερο κεφάλαιο.

Στο σχήμα 7.18 διαπιστώνονται οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα και στην παρατηρημένη χρονοσειρά στάθμης που μετατράπηκε σε παροχή.



Σχήμα 7.17: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινα σημεία) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HYDROGEIOS



Σχήμα 7.18: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα

7.1.4. Υδατικά ισοζύγια λεκάνης

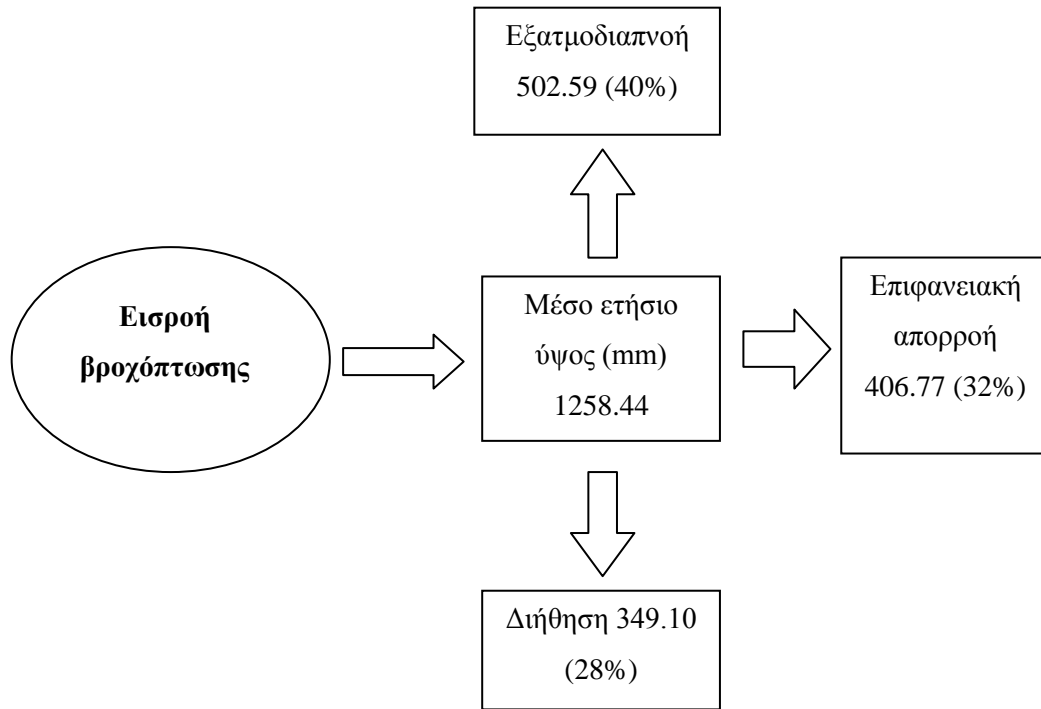
Πριν παρουσιαστούν τα υδατικά ισοζύγια κρίθηκε σκόπιμο να γίνει η σύνοψη των αποτελεσμάτων της συνεχούς προσομοίωσης όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 7.1: Μέτρα επίδοσης των μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης

Χρονικό βήμα	Μοντέλο	Έξοδος – Λατομείο Μπάκα	Καρβελιώτης	Αλαγονία
Ημερήσιο	HEC-HMS	0.69	0.55	0.79
	HYDROGEIOS	0.95	0.72	0.78
Ωριαίο	HEC-HMS	0.73	0.58	0.79
	HYDROGEIOS	0.83	0.59	0.77

HEC-HMS

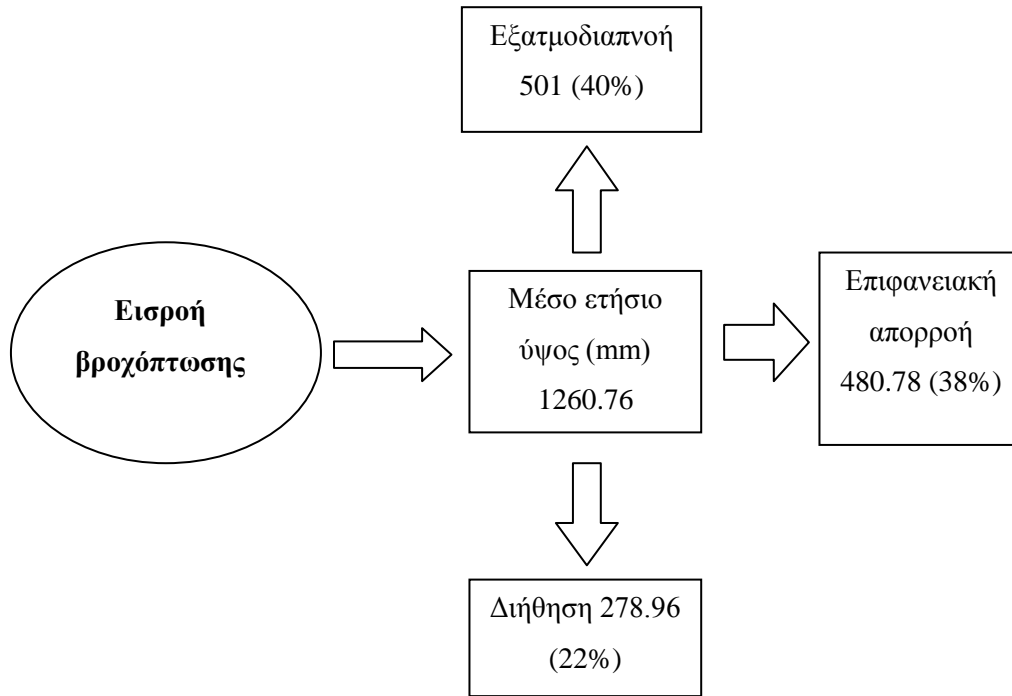
Στο HEC-HMS, η εξαγωγή υδατικού ισοζυγίου για όλη την λεκάνη είναι μία δύσκολη διαδικασία αφού το μοντέλο δίνει αναλυτικές πληροφορίες για όλα τα υδρολογικά στοιχεία σε επίπεδο υπολεκάνης και όχι για το σύνολο της λεκάνης. παρόλα αυτά έγινε μια προσπάθεια να υπολογιστεί το ισοζύγιο αυτής σε ωριαίο αλλά και σε ημερήσιο βήμα.



Διάγραμμα 7.1: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ωριαίο βήμα στο HEC-HMS

Από το 28% (349.10 mm) της διήθησης, τα 303.4 mm γίνονται υπόγεια απορροή ενώ τα υπόλοιπα 45.7 mm βαθιά διήθηση. Η συνολική δηλαδή απορροή ανέρχεται στα 710.15 mm. Η τιμή της απορροής είναι αρκετά μεγάλη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο σχεδιασμό αυτού του μοντέλου δεν λήφθηκαν υπόψη πηγές. Η εξατμοδιαπνοή έχει λογική τιμή και από τα 501 mm τα 66 mm προέρχονται από το έδαφος και τα υπόλοιπα από την δεξαμενή κατακράτησης.

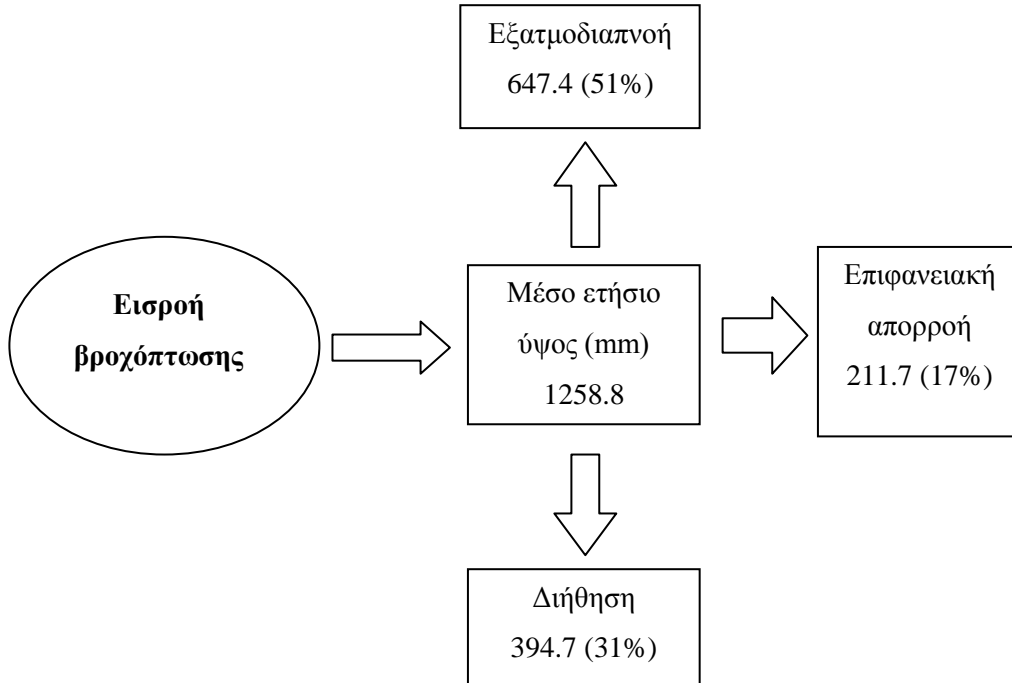
Στην ημερήσια προσομοίωση στο HEC-HMS (Διάγραμμα 7.2), η εξατμοδιαπνοή είναι σχεδόν ίδια με αυτή του ωριαίου μοντέλου αφού το ίδιο μετεωρολογικό μοντέλο εισήχθη και στις δύο περιπτώσεις. Η επιφανειακή απορροή είναι το 38% (480.78 mm) της συνολικής βροχόπτωσης, ενώ η διήθηση περιορίζεται στο 22% (278.96 mm). Από αυτά, τα 246.2 mm γίνονται υπόγεια απορροή ενώ τα υπόλοιπα 32.76mm βαθιά διήθηση. Η συνολική δηλαδή απορροή ανέρχεται στα 747.22 mm.



Διάγραμμα 7.2: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ημερήσιο βήμα στο HEC-HMS

HYDROGEIOS

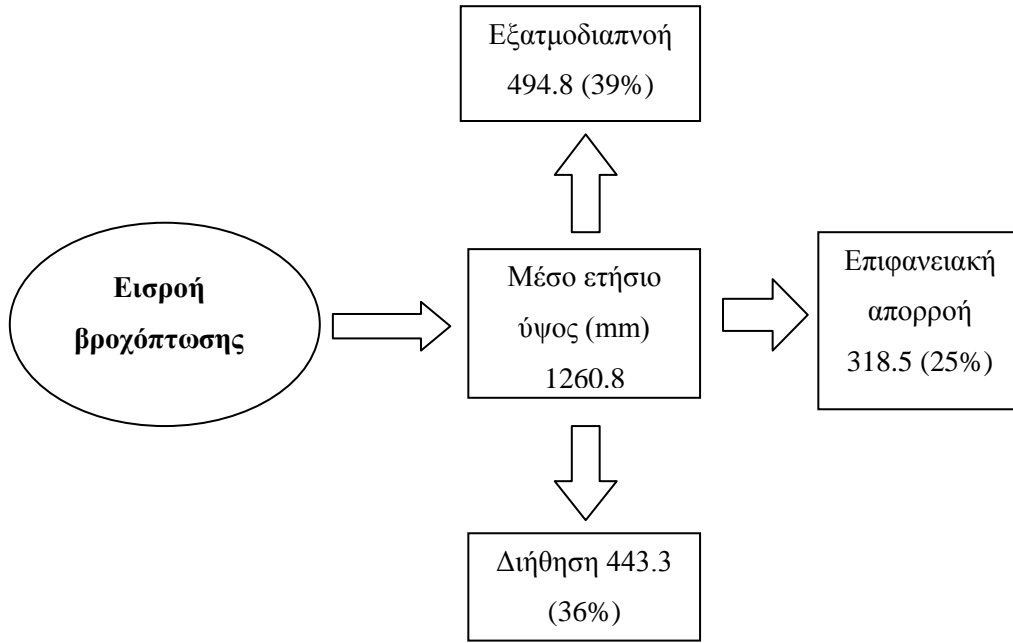
Η εξαγωγή του υδατικού ισοζυγίου στο HYDROGEIOS αποτελεί μια πιο απλή διαδικασία γιατί το μοντέλο υπολογίζει όλες τις υδρολογικές διαδικασίες και για το σύνολο της λεκάνης. Έτσι και εδώ υπολογίστηκαν τα υδρολογικά ισοζύγια σε ωριαίο και ημερήσιο βήμα και τα αποτελέσματα έχουν αρκετές διαφορές με αυτά του HEC-HMS.



Διάγραμμα 7.3: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ωριαίο βήμα στο HYDROGEIOS

Στο διάγραμμα 7.3 παρουσιάζεται το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης στο ωριαίο χρονικό βήμα. Η επιφανειακή απορροή είναι εμφανώς μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη του HEC-HMS. Η τιμή είναι το 17% (211.7 mm) της βροχόπτωσης ενώ η συνολική απορροή μαζί με την υπόγεια (51.2 mm) και τις πηγές (323 mm) ανέρχεται στα 483.3 mm. Από την συνολική διήθηση, εκτός από της πηγές και την υπόγεια απορροή, υπάρχουν απώλειες της τάξεως των 137.9 mm. Η εξατμοδιαπνοή έχει σημαντικά αυξημένη τιμή που αποτελεί το 51% της βροχόπτωσης. Η τιμή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονοσειρά της εξατμοδιαπνοής για να μετατραπεί από ημερήσια σε ωριαία απλά μοιράστηκε σε 24 ώρες. Μια διαδικασία που είναι προσεγγιστική.

Το επόμενο διάγραμμα αναφέρεται στην ημερήσια συνεχή προσομοίωση του μοντέλου HYDROGEIOS (Διάγραμμα 7.4). Σε αυτό το ισοζύγιο, οι τιμές εξατμοδιαπνοής (39%), επιφανειακής απορροής (25%) και διήθησης (35%) έχουν λογικές τιμές. Η συνολική απορροή την λεκάνης ανήλθε στα 436.8 mm από τα οποία τα 318 mm είναι η επιφανειακή, τα 269 mm είναι οι πηγές και τα 153 mm είναι η υπόγεια απορροή. Στη λεκάνη υπάρχουν απώλειες 378.4 mm από τα 443.3 που είναι η συνολική διήθηση της λεκάνης.



Διάγραμμα 7.4: Ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης για ημερήσιο βήμα στο **HYDROGEIOS**

Όπως διαπιστώνεται, υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα αλλά και ανάμεσα στις διαφορετικές προσομοιώσεις του ίδιου μοντέλου. Όπως είναι φανερό, τα ισοζύγια του μοντέλου HYDROGEIOS, έχουνε πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις και από φυσικής σημασίας (αν εξαιρεθεί η περίπτωση της αυξημένης εξατμοδιαπνοής στο ωριαίο βήμα). Οι απορροές είναι της τάξεως των 450 mm και όχι 720 mm. Αυτό βέβαια οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην παρουσία πηγών στο συγκεκριμένο μοντέλο. Τέλος, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας όλων των ισοζυγίων της λεκάνης

Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων

Χρονικό βήμα	Μοντέλο	Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Εξατμοδιαπνοή (mm)	Διήθηση (mm)	Επιφανειακή απορροή (mm)
Ημερήσιο	HEC-HMS	1260.76	501.0 (40%)	278.96 (22%)	480.78 (38%)
	HYDROGEIOS	1260.8	494.8 (39%)	443.3 (36%)	318.5 (25%)
Ωριαίο	HEC-HMS	1258.44	502.96 (40%)	349.10 (28%)	406.77 (32%)
	HYDROGEIOS	1258.8	647.4 (51%)	394.7 (31%)	211.7 (17%)

7.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων επεισοδίων

Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις τριών διαφορετικών επεισοδίων βροχής στο μοντέλο του HEC-HMS. Το μοντέλο, σε αντίθεση με την συνεχή προσομοίωση, έχει μόνο 6 ομάδες παραμέτρων για κάθε υπολεκάνη ($6*7=42$) και μία ομάδα για τα τμήματα των υδατορευμάτων(5), συνολικά 47. Οι δύο ομάδες από αυτές, είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το ανάγλυφο της κάθε υπολεκάνης (αδιαπέρατη επιφάνεια) και από το τμήμα του υδατορεύματος που την διασχίζει (χρόνος υστέρησης) και έτσι έμειναν ίδιες οι τιμές τους με αυτές που προέκυψαν από την συνεχή προσομοίωση. Οι υπόλοιπες πέντε παράμετροι είναι οι εξής:

- Ο αριθμός CN
- Το αρχικό έλλειμμα
- Η αρχική παροχή
- Ο σταθερός ρυθμός μείωσης της παροχής
- Η παροχή από την οποία ξεκινούν οι απώλειες

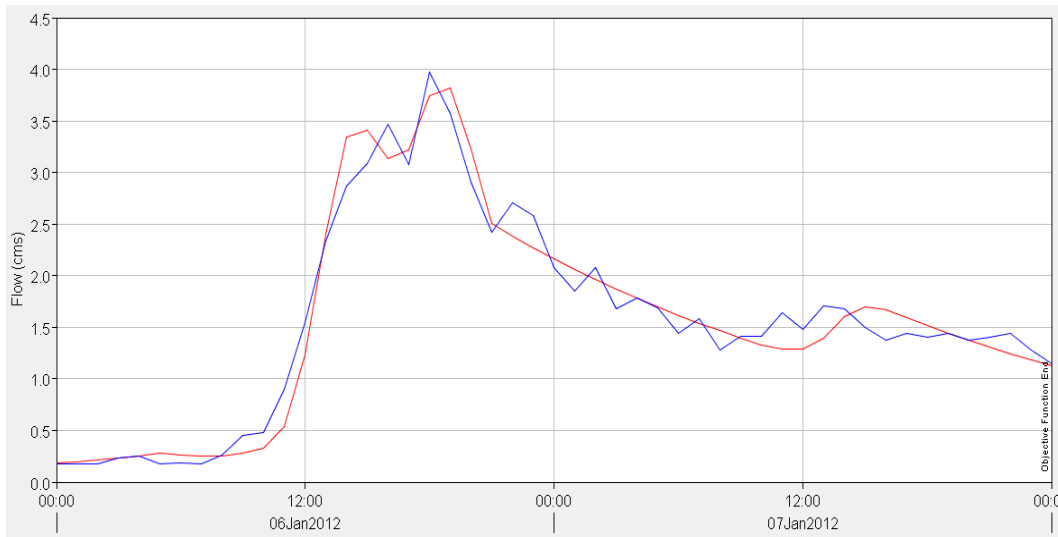
Πραγματοποιείται σύγκριση των παραμέτρων του HEC-HMS για όλα τα επεισόδια και παρουσιάζεται ένα που προκύπτει από τις τρεις αυτές προσομοιώσεις. Έπειτα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με την συνεχή ωριαία προσομοίωση του προγράμματος HYDROGEIOS ώστε να ελεγχθεί αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνεχής προσομοίωση και για προσομοίωση μεμονωμένων επεισοδίων.

7.2.1. Επεισόδιο Ιανουαρίου 2012

Το επεισόδιο αυτό αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα της χρονιάς. Την περίοδο εκείνη βρισκόταν εκτός λειτουργίας ο σταθμός της Αλαγονίας και υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις μόνο από τους άλλους δύο σταθμούς. Στο μοντέλο έγιναν δύο διαφορετικές ημιαυτόματες βελτιστοποιήσεις. Μία για τον σταθμό του Καρβελιώτη και χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτής της υπολεκάνης, βελτιστοποιήθηκε και η έξοδος της λεκάνης μαζί με τις υπόλοιπες υπολεκάνες. Το επεισόδιο αυτό διήρκησε δύο μέρες από τις 6 Ιανουαρίου στις 12πμ μέχρι τις 8 του ίδιου μήνα και πάλι στις 12πμ.

Θέση υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη

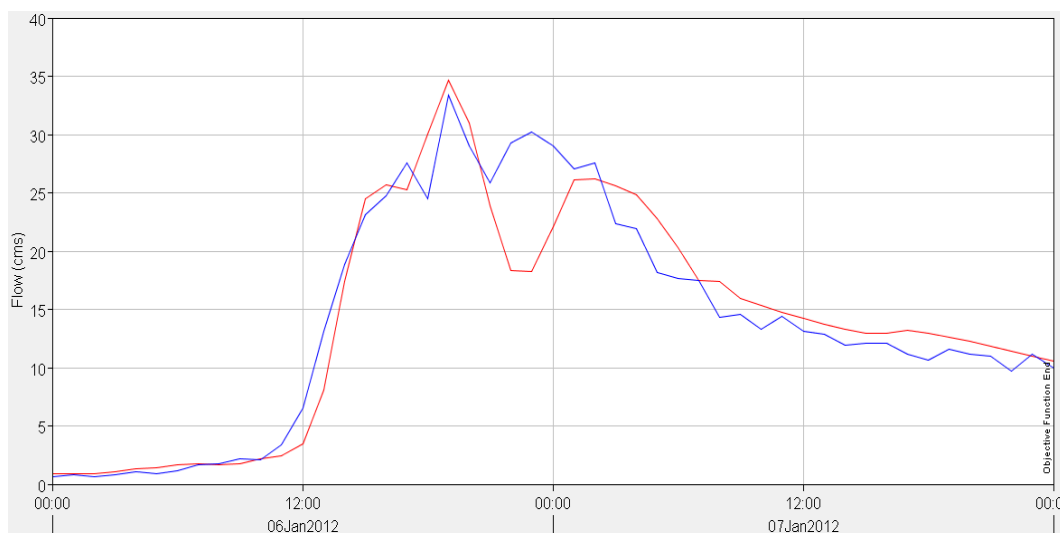
Για την θέση αυτή από τις επτά παραμέτρους της ουσιαστικά βελτιστοποιήθηκαν οι τέσσερις. Όπως προαναφέρθηκε οι δύο (αδιαπέρατη επιφάνεια, χρόνος υστέρησης) έχουν γνωστές τιμές από την συνεχή προσομοίωση αλλά γνωστή θεωρείται για τις υπολεκάνες όπου υπάρχουν μετρημένες στάθμες η αρχική παροχή πριν το επεισόδιο. Η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται ιδανική αφού σε αυτή τη θέση ο δείκτης έχει τιμή $r=0.95$ (Σχήμα 7.19).



Σχήμα 7.19: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS

Θέση υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα – έξοδος λεκάνης

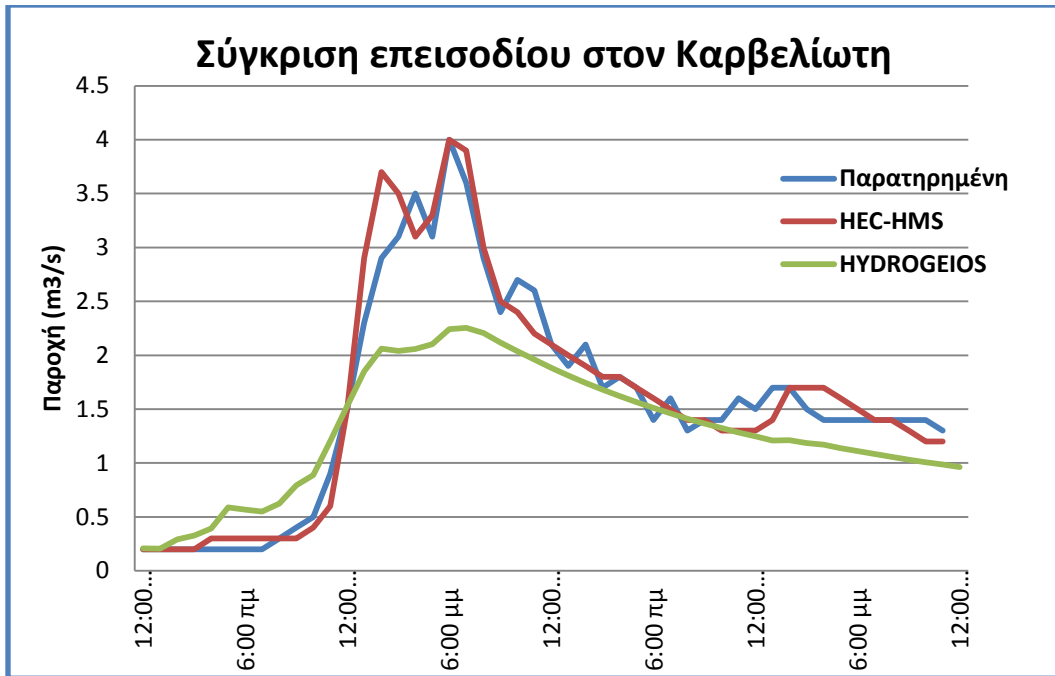
Στην θέση Λατομείο Μπάκα που αποτελεί και έξοδο της λεκάνης του Νέδοντα βελτιστοποιούνται 30 παράμετροι. Η προσαρμογή του μοντέλου και στην θέση αυτή θεωρείται πολύ καλή, με τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας $r=0.89$ (Σχήμα 7.20). το μοντέλο εντοπίζει ακριβώς την αιχμή αλλά στην συνέχεια υπολογίζει λίγο μεγαλύτερες απώλειες από ότι στην πραγματικότητα συνέβη. Τέλος ο ρυθμός εκτόνωσης του φαινομένου επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό.



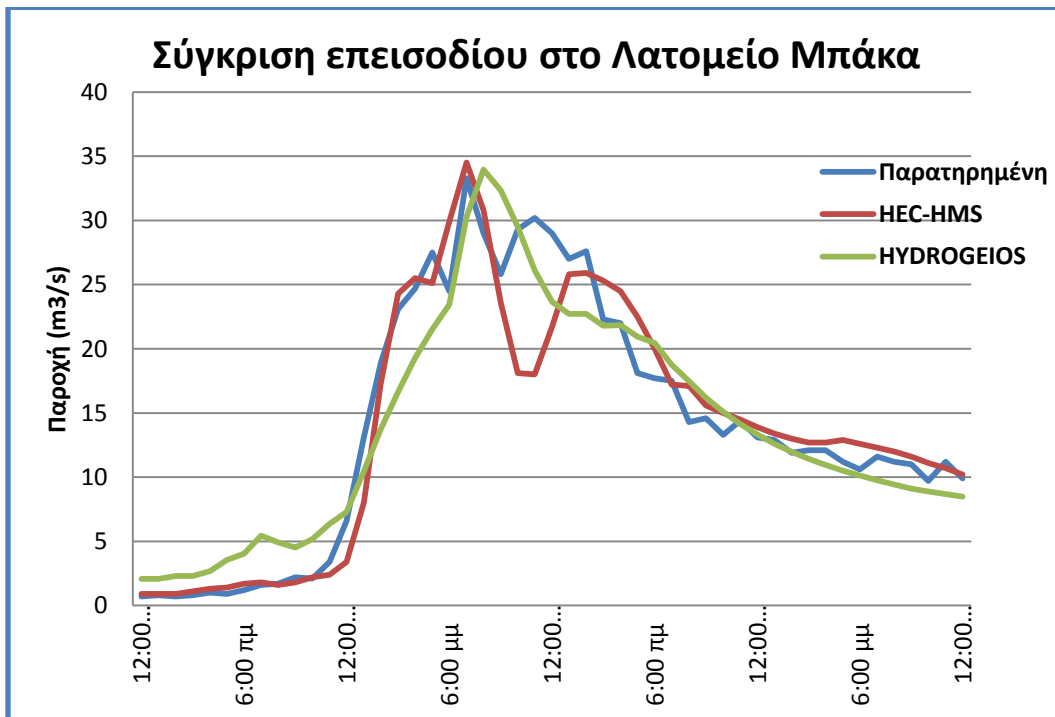
Σχήμα 7.20: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS

Σύγκριση HYDROGEIOS - HEC-HMS

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των μοντέλων απομονώθηκε από το μοντέλο HYDROGEIOS το τμήμα τις αντίστοιχης περιόδου από τις χρονοσειρές απορροής και των δύο σταθμών και τοποθετήθηκαν στα επόμενα διαγράμματα. Όπως διαπιστώνεται, το μοντέλο, αν και πραγματοποιεί προσομοίωση όλου του υδρολογικού έτους, δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα με την προσομοίωση του επεισοδίου κυρίως στην έξοδο της λεκάνης όπου ο δείκτης αποτελεσματικότητας έχει τιμή $r=0.90$. Στον Καρβελιώτη η τιμή είναι μειωμένη σε σχέση με το HEC-HMS και η προσαρμογή χειρότερη με τιμή $r=0.70$ άλλα χαρακτηρίζεται ικανοποιητική (Σχήμα 7.21, Σχήμα 7.22).



Σχήμα 7.21: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτης σε ωριαίο βήμα



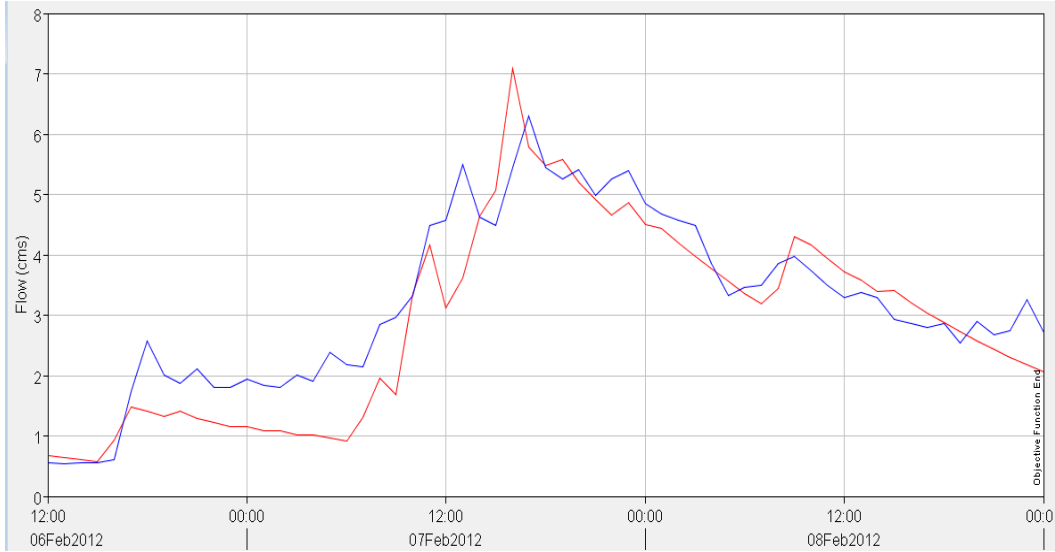
Σχήμα 7.22: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείου Μπάκα σε ωριαίο βήμα

7.2.2. Επεισόδιο Φεβρουαρίου 2012

Το επεισόδιο αυτό αποτελεί ένα από τα τρία μεγαλύτερα της χρονιάς αφού η μέση ωριαία παροχή έφτασε στην έξοδο πάνω από $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Την περίοδο εκείνη, βρισκόταν εκτός λειτουργίας ο σταθμός του Καρβελιώτη και υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις μόνο από τους άλλους δύο σταθμούς. Στο HEC-HMS έγιναν και εδώ δύο διαφορετικές ημιαυτόματες βελτιστοποιήσεις. Μία για τον σταθμό της Αλαγονίας και χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτής της υπολεκάνης, βελτιστοποιήθηκε και η έξοδος της λεκάνης μαζί με τις υπόλοιπες υπολεκάνες. Το επεισόδιο αυτό διήρκησε δύομιση μέρες από τις 6 Φεβρουαρίου στις 12μμ μέχρι τις 9 Φεβρουαρίου 12πμ.

Θέση υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας

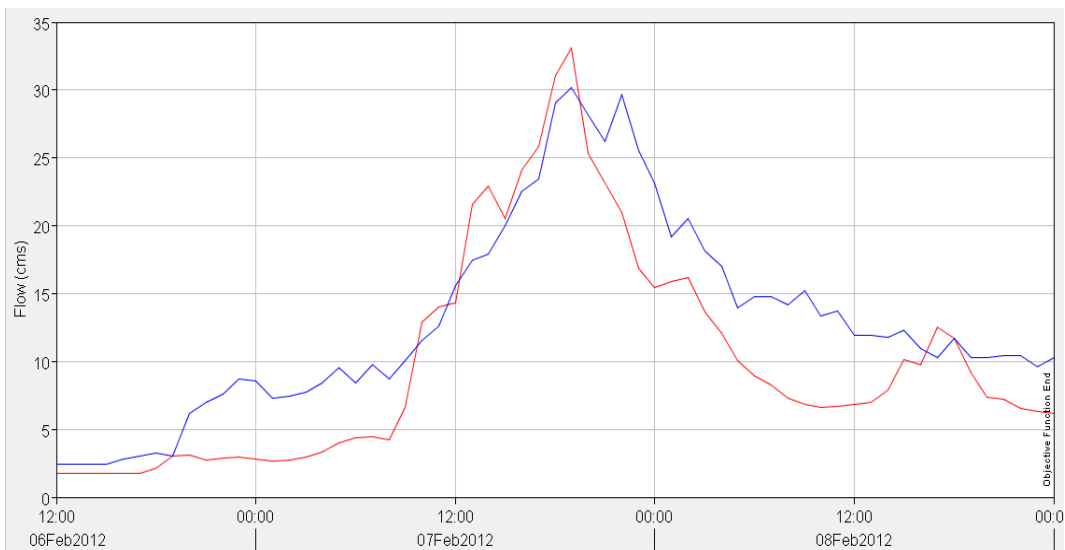
Στο επεισόδιο αυτό, υπάρχει η ιδιαιτερότητα πως η στάθμη που κατέγραφε ο σταθμός είχε μεγάλη μεταβλητότητα καθόλη την διάρκεια του επεισοδίου κάτι που έκανε την προσομοίωση του δυσκολότερη. Αυτός ήταν και ένας από τους λόγους που η προσαρμογή του μοντέλου κυμάνθηκε σε μέτρια επίπεδα με τιμή $r=0.77$. όπως διαπιστώνεται και από το παρακάτω σχήμα η τιμή είναι μειωμένη γιατί το μοντέλο δεν ήταν δυνατόν να «αντιληφθεί» την συνεχή μικρή διακύμανση στην παροχής. Επίσης, η αιχμή υπερεκτιμάται κατά περίπου $1 \text{ m}^3/\text{s}$ όπως διακρίνεται και από το σχήμα 7.23 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.23: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS

Θέση υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα – έξοδος λεκάνης

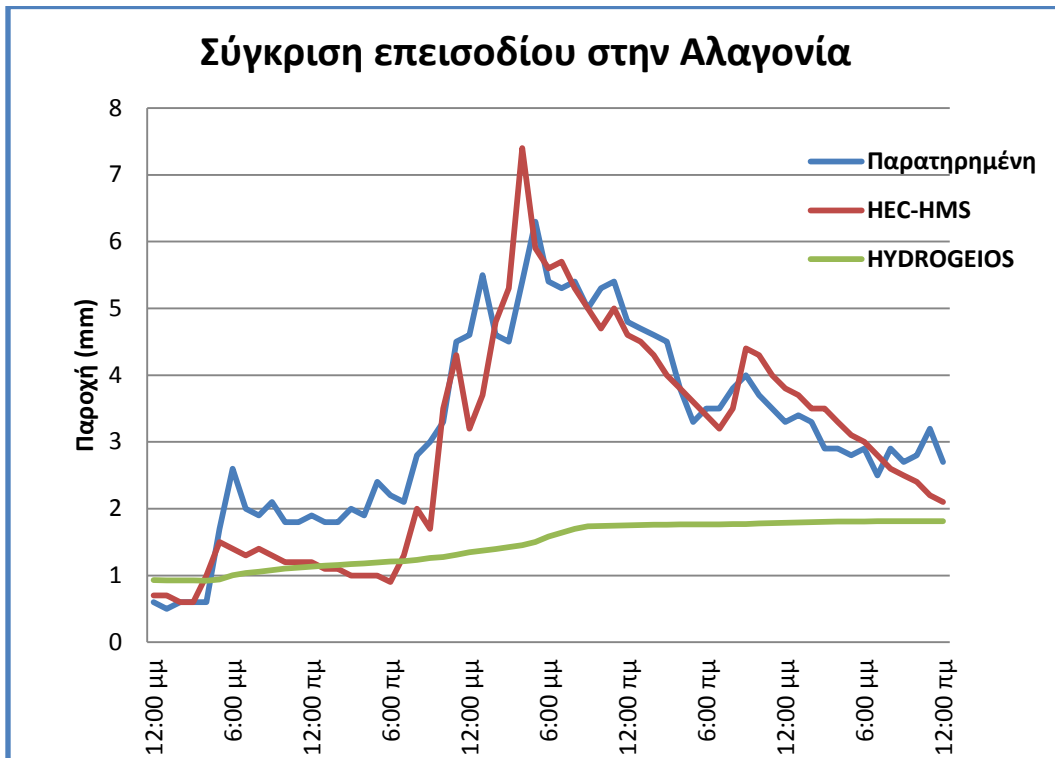
Στην έξοδο της λεκάνης, η προσαρμογή εμφανίζεται ελαφρώς βελτιωμένη και η τιμή της είναι $r=0.84$. Η αιχμή του υδρογραφήματος και εδώ υπερεκτιμάται καθώς η υπολογισμένη υπερβαίνει για περίπου $3 \text{ m}^3/\text{s}$ αυτήν που έχει παρατηρηθεί (Σχήμα 7.24).



Σχήμα 7.24: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS

Σύγκριση HYDROGEIOS - HEC-HMS

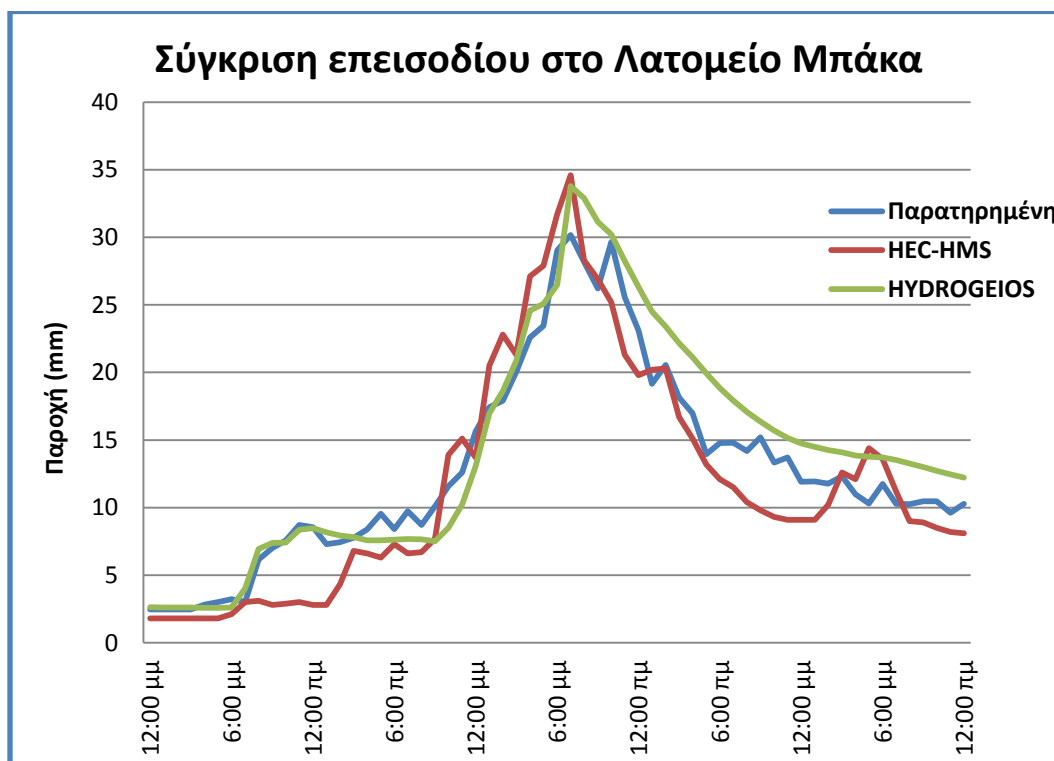
Στο συγκεκριμένο επεισόδιο, το μοντέλο HYDROGEIOS είχε τελείως διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε ένα από τους σταθμούς ελέγχου. Στον σταθμό Αλαγονίας δεν κατάφερε να προσομοιώσει την μεταβολή της στάθμης λόγω της έντονης βροχόπτωσης. Είχε αρνητικό δείκτη προσαρμογής ($r=-1.25$) και το μόνο που καταφέρνει είναι να προσεγγίζει, είναι την παροχή πριν και μετά το επεισόδιο (Σχήμα 7.25).



Σχήμα 7.25: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα

Σε αντίθεση με τον σταθμό της Αλαγονίας όμως, το μοντέλο HYDROGEIOS έχει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην έξοδο της λεκάνης. Η προσαρμογή του στο σημείο αυτό είναι εξαιρετική και καλύτερη όπως διαπιστώνεται στο σχήμα 7.26 και από αυτή του HEC-HMS που παραμετροποιείται ειδικά για αυτό το επεισόδιο. Η επίδοση του είναι $r=0.88$ η οποία υπερτερεί από το $r=0.84$ του HEC-HMS. Πέραν αυτού, φαίνεται καθαρά στο σχήμα πως ο ανοδικός κλάδος του HYDROGEIOS περιγράφεται με μεγάλη ακρίβεια και η αιχμή αν και υπερεκτιμημένη, είναι πιο κοντά στην παρατηρημένη σε

σχέση με το HEC-HMS. Ο καθοδικός κλάδος είναι ελαφρώς υπερεκτιμημένος σε αντίθεση με το HEC-HMS είναι πιο κοντά στη μετρημένη παροχή. (Σχήμα 7.26). Πάντως κανένα από τα δυο μοντέλα δεν μπορούν να προσομοιώσουν τις δύο αιχμές που εντοπίζονται σε αυτή την θέση.



Σχήμα 7.26: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείο Μπάκα σε ωριαίο βήμα

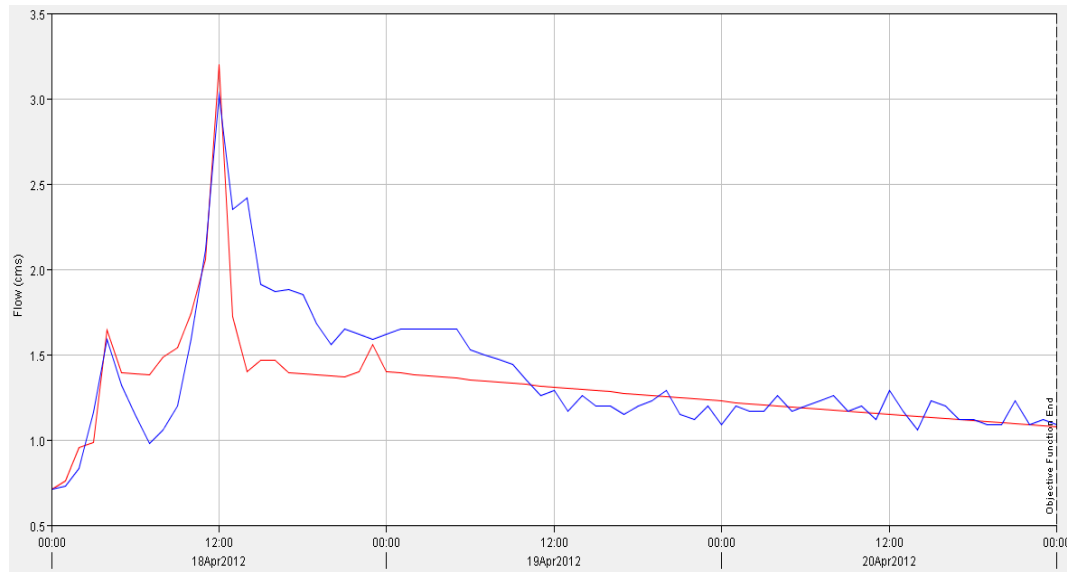
7.2.3. Επεισόδιο Απριλίου 2012

Το επεισόδιο αυτό δεν αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα του έτους, αλλά επιλέχθηκε να προσομοιωθεί γιατί την συγκεκριμένη ημερομηνία υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης και στους τρεις σταθμούς τις λεκάνης. Το επεισόδιο διαρκεί τρεις μέρες.

Θέση υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας

Η αιχμή στη συγκεκριμένη θέση προσομοιώνεται με μεγάλη ακρίβεια. Η συνολική όμως προσαρμογή χαρακτηρίζεται μέτρια με τιμή $r=0.69$. Το πρόβλημα εντοπίζεται

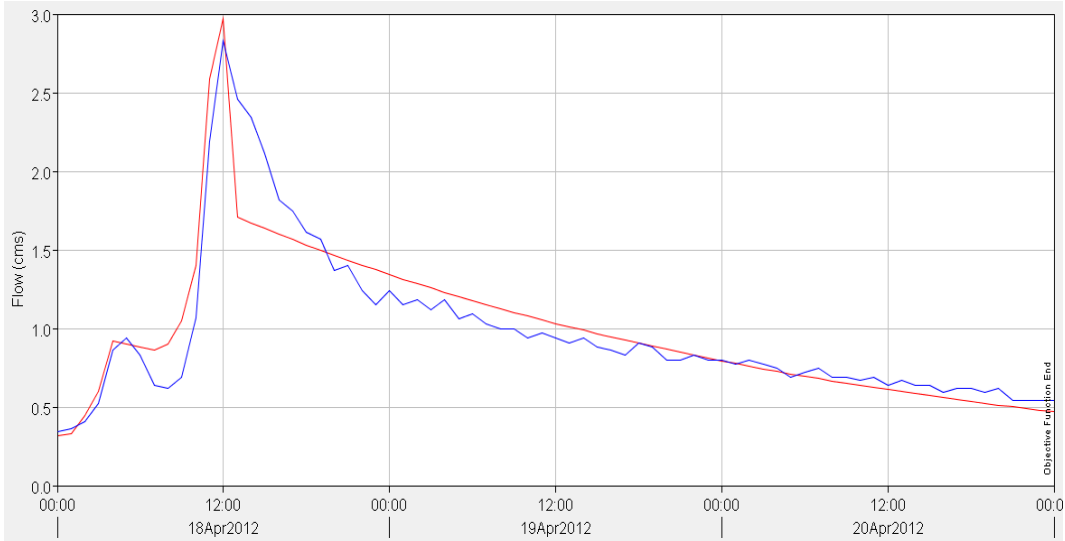
κυρίως στην διάρκεια εκτόνωσης του φαινομένου όπου το μοντέλο επανέρχεται χρονικά πιο γρήγορα από την πραγματικότητα (Σχήμα 7.27).



Σχήμα 7.27: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS

Θέση υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη

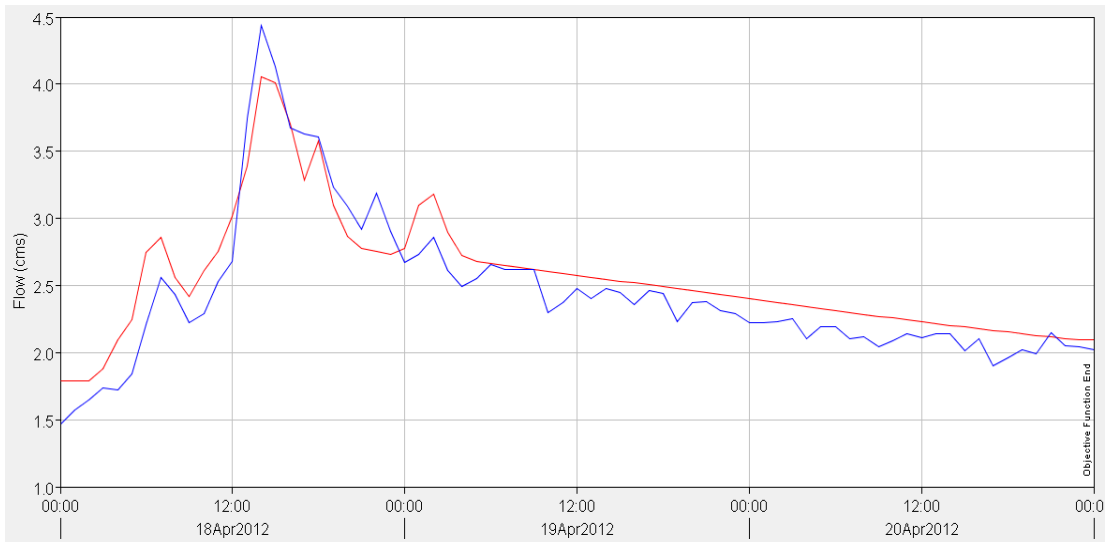
Αν και η προσαρμογή στην συγκεκριμένη θέση είναι αρκετά καλή με τιμή $r=0.84$, το πρόβλημα είναι ακριβώς το ίδιο και με τον προηγούμενο σταθμό δηλαδή η γρήγορη εκτόνωση του φαινομένου που υπολογίζει το μοντέλο. Ο ρυθμός απωλειών και η αιχμή προσομοιώνονται ικανοποιητικά (Σχήμα 7.28).



Σχήμα 7.28: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Καρβελιώτη στο HEC-HMS

Θέση υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα – έξοδος λεκάνης

Στην έξοδο της λεκάνης, η προσαρμογή του μοντέλου για το συγκεκριμένο επεισόδιο είναι η καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις, με τιμή $r=0.86$. Παρόλα αυτά, η αιχμή υποεκτιμάται κατά περίπου $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, σε αντίθεση με τον ανοδικό κλάδο που είναι σταθερά λίγο υπερτιμημένος.

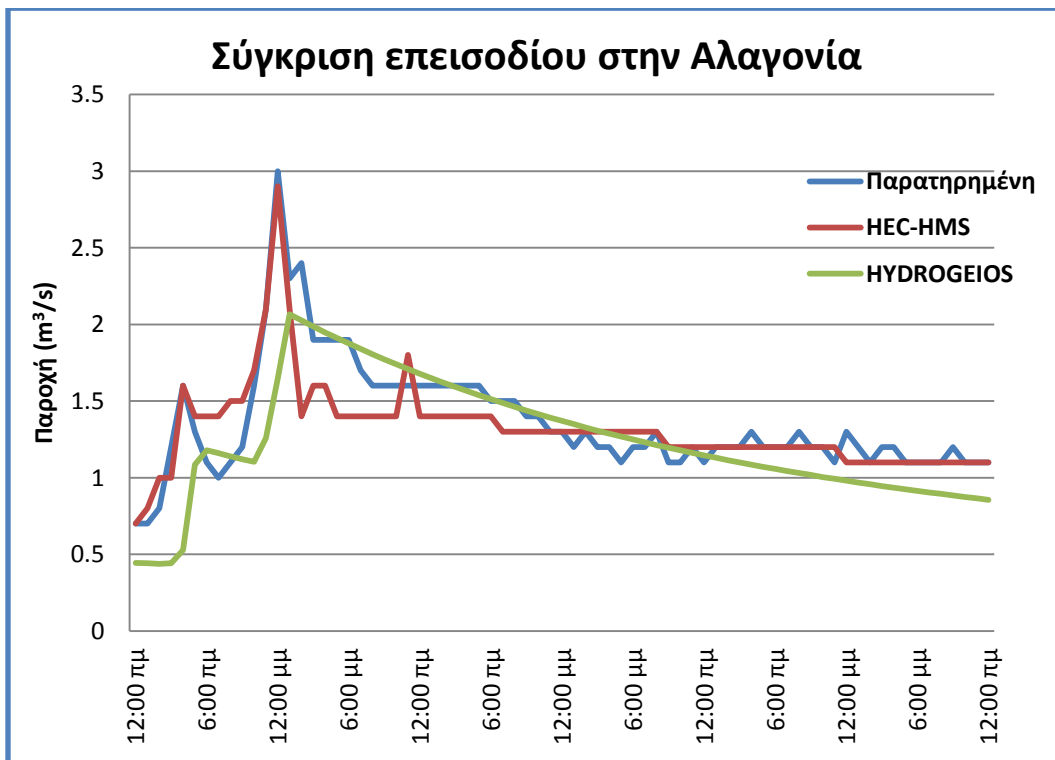


Σχήμα 7.29: Μετρημένη (μπλε γραμμή) και προσομοιωμένη (κόκκινη γραμμή) απορροή σε ωριαίο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείου Μπάκα στο HEC-HMS

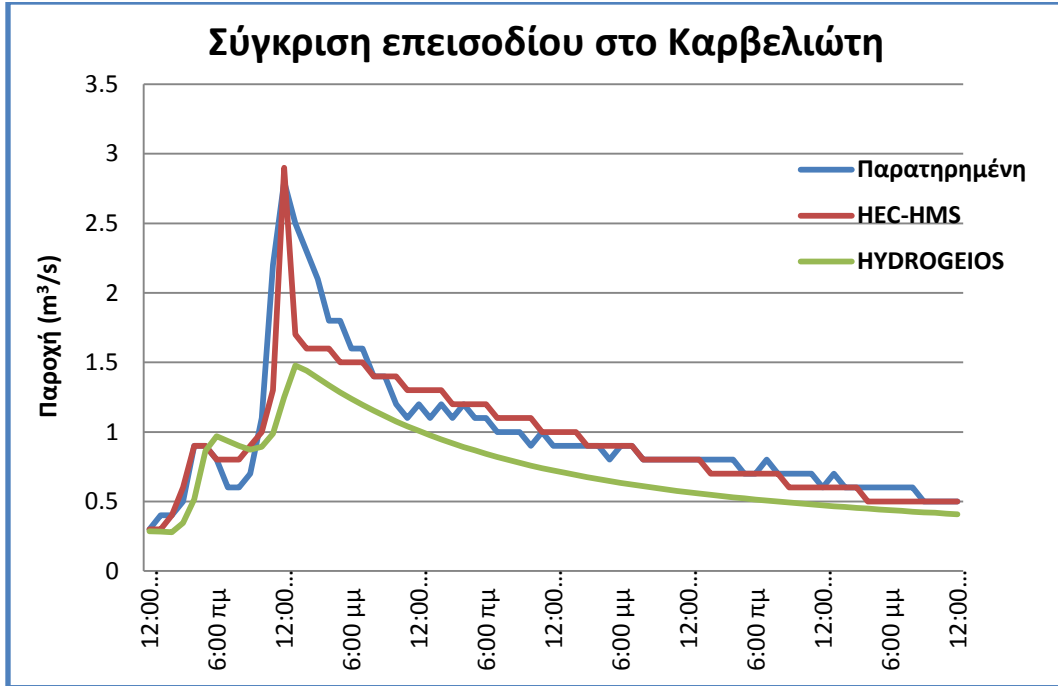
Σύγκριση HYDROGEIOS - HEC-HMS

Σε αυτό το επεισόδιο, το μοντέλο HYDROGEIOS δεν είχε καθόλου καλή προσαρμογή. Και στους τρεις σταθμούς, οι επιδόσεις του δείκτη αποτελεσματικότητας είναι από κακές έως πολύ κακές. Στη θέση Αλαγονία η τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας είναι $r=0.38$ και στον Καρβελιώτη $r=0.45$. Στις δύο αυτές θέσεις, οι αντιδράσεις του μοντέλου στη βροχόπτωση είναι σωστές χρονικά, αλλά σχετικά υποτιμημένες (Σχήμα 7.30, Σχήμα 7.31).

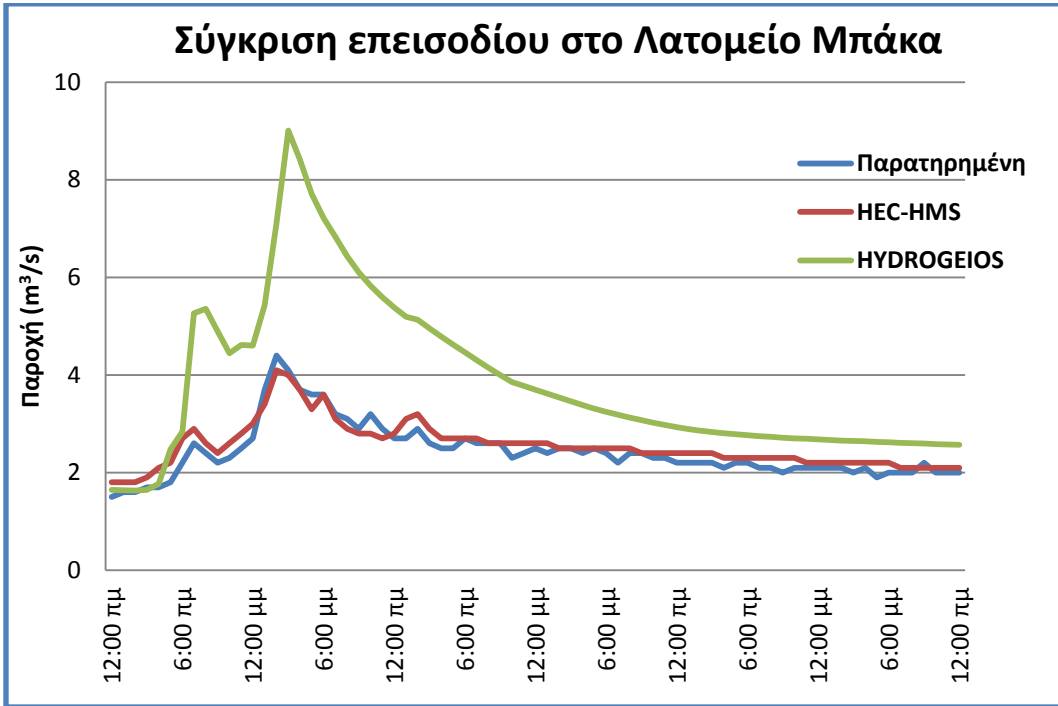
Όσον αφορά την έξοδο, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο(Σχήμα 7.32). Το μοντέλο, σε σύγκριση και με τον HEC-HMS και με την παρατηρημένη παροχή σχεδόν διπλασιάζει τις παροχές του επεισοδίου και αυτό αποδεικνύεται και από το δείκτη που έχει τιμή $r=-9.63$.



Σχήμα 7.30: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Αλαγονίας σε ωριαίο βήμα



Σχήμα 7.31: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Καρβελιώτης σε ωριαίο βήμα



Σχήμα 7.32: Σύγκριση απορροών των μοντέλων με την παρατηρημένη στο σταθμό Λατομείο Μπάκα σε ωριαίο βήμα

7.2.4. Εύρος τιμών παραμέτρων στο HEC-HMS

Έπειτα από την προσομοίωση των τριών επεισοδίων, κρίθηκε αναγκαίο να παρατεθούν οι τρεις τιμές για την κάθε παράμετρο, ώστε να παρουσιαστεί το εύρος των τιμών που καλύπτουν. Αυτό γίνεται διότι δεν κατέστη δυνατό να διατηρηθούν ίδιες οι τιμές σε όλα τα επεισόδια.

Η πρώτη προσομοίωση έγινε για τον μήνα Απρίλιο, όπου ο αριθμός CN κάθε υπολεκάνης κρατήθηκε σταθερός και ίσος με τις τιμές που υπολογίστηκαν με την μέθοδο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, δεν λήφθηκε ως παράμετρος αλλά ως δεδομένο της κάθε υπολεκάνης και βελτιστοποιήθηκαν μόνο οι υπόλοιπες μεταβλητές με τα αποτελέσματα που μόλις πριν παρουσιάστηκαν.

Για τα άλλα δύο όμως επεισόδια, έγινε γρήγορα κατανοητό πως ο αριθμός CN δεν αποτελεί δεδομένο αλλά παράμετρο. Όσο και αν έγινε προσπάθεια, δεν κατέστη δυνατό να επέλθει καλή προσαρμογή χωρίς την αλλαγή αυτής της παραμέτρου και τελικά βελτιστοποιήθηκε. Οι μόνες τιμές που έμειναν σταθερές είναι οι εξής:

Πίνακας7.3: Σταθερές τιμές σε όλες τις προσομοιώσεις

Υπολεκάνη	Ποσοστό (%) αδιαπέρατης επιφάνειας	Χρόνος υστέρησης στη λεκάνη (λεπτά)	Υδατορεύματα	Χρόνος υστέρησης
W120	1.1		R20	66
W170	1.1		R30	38
W180	1.6		R40	232
W60	1.1		R50	122
W70	1.1			
W90	1.2	300		
W130	1.6			

Βέβαια, η αδιαπέρατη επιφάνεια δεν αποτελεί παράμετρο αλλά δεδομένο για κάθε υπολεκάνη, ενώ ο χρόνος υστέρησης για την λεκάνη και για το υδατόρευμα προέκυψε από την συνεχή προσομοίωση.

Οι υπόλοιπες 5 ομάδες παραμέτρων για κάθε υπολεκάνη μεταβάλλονται και παρουσιάζονται παρακάτω. Με κόκκινο χρώμα είναι οι τιμές του CN όπως αυτές υπολογίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 7.4: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W120

W120	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	44	42.7	49.58	42.7-44
Αρχικό έλλειμμα (mm)	60	61.51	51.4	51.4-61.51
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.45	0.79	0.58	0.45-0.79
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.65	0.81	0.98	0.65-0.98
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	0.8	1.13	0.6	0.6-1.13

Πίνακας 7.5: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W170

W170	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	53	38	64.16	38-64.16
Αρχικό έλλειμμα (mm)	83.64	31.43	42.31	31.43-83.64
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.40	0.77	0.58	0.40-0.77
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.88	0.80	0.98	0.80-0.98
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	3.75	1.02	0.6	0.6-3.75

Πίνακας 7.6 Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W180

W180	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	65	44.29	79.74	44.29-79.74
Αρχικό έλλειμμα (mm)	58	61.66	41	41-61.77
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.45	0.64	0.71	0.45-0.71
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.25	0.25	0.88	0.25-0.88
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	4.77	5.8	1.4	1.4-5.8

Πίνακας 7.7: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W60

W60	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	54	36.20	49.58	36.20-54
Αρχικό έλλειμμα (mm)	57.82	67.2	51.4	51.40-67.20
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.40	0.81	0.58	0.40-0.81
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.56	0.82	0.98	0.56-0.98
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	3.75	0.57	0.6	3.75-0.57

Πίνακας 7.8: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W70

W70	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	35.28	35	36.53	35-36.53
Αρχικό έλλειμμα (mm)	84	24.47	40.25	24.47-84
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.45	0.77	0.59	0.45-0.77
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.43	0.80	0.98	0.43-0.98
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	2.94	1.02	0.60	0.60-2.94

Πίνακας 7.9: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W90

W90	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	38	55.9	43.47	43.47-55.9
Αρχικό έλλειμμα (mm)	55	37.95	40	37.95-55
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.7	1.21	0.80	0.70-1.21
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.64	0.81	0.97	0.64-0.97
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	0.88	1.01	1.01	0.88-1.01

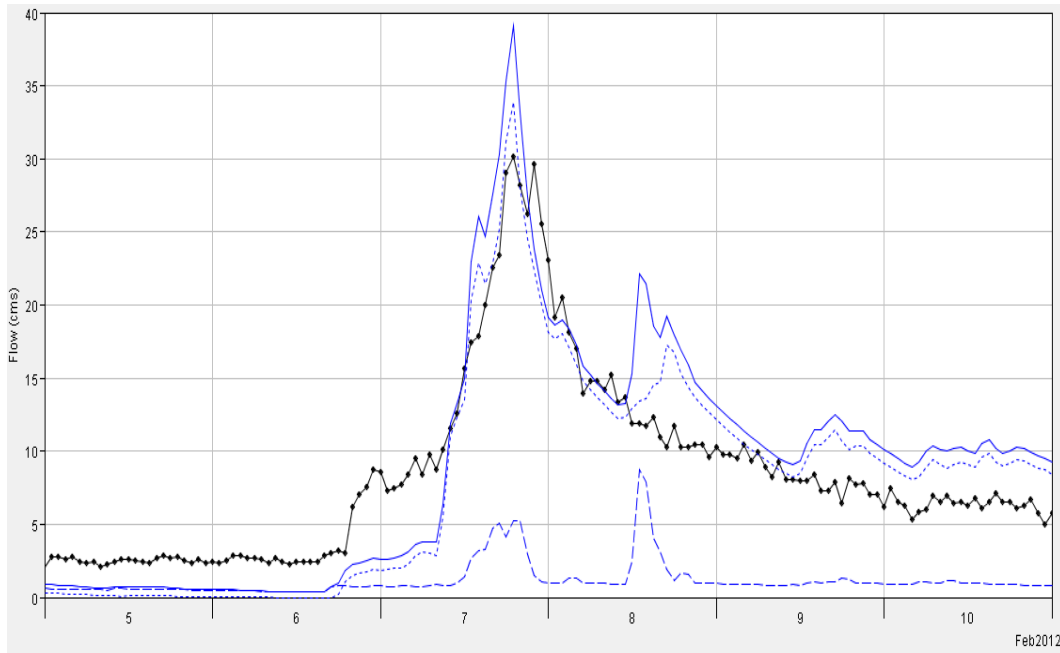
Πίνακας 7.10: Παράμετροι όλων των επεισοδίων για την υπολεκάνη W130

W130	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Απρίλιος	Εύρος
Αριθμός CN	62	44.53	71.9	44.53-71.90
Αρχικό έλλειμμα (mm)	24	48.35	26	24-48.35
Αρχική παροχή (m ³ /s)	0.19	0.60	0.32	0.19-0.60
Ρυθμός μείωσης παροχής	0.31	0.71	0.59	0.31-0.71
Κατώφλι απωλειών (m ³ /s)	2.54	1.70	1.69	1.69-2.54

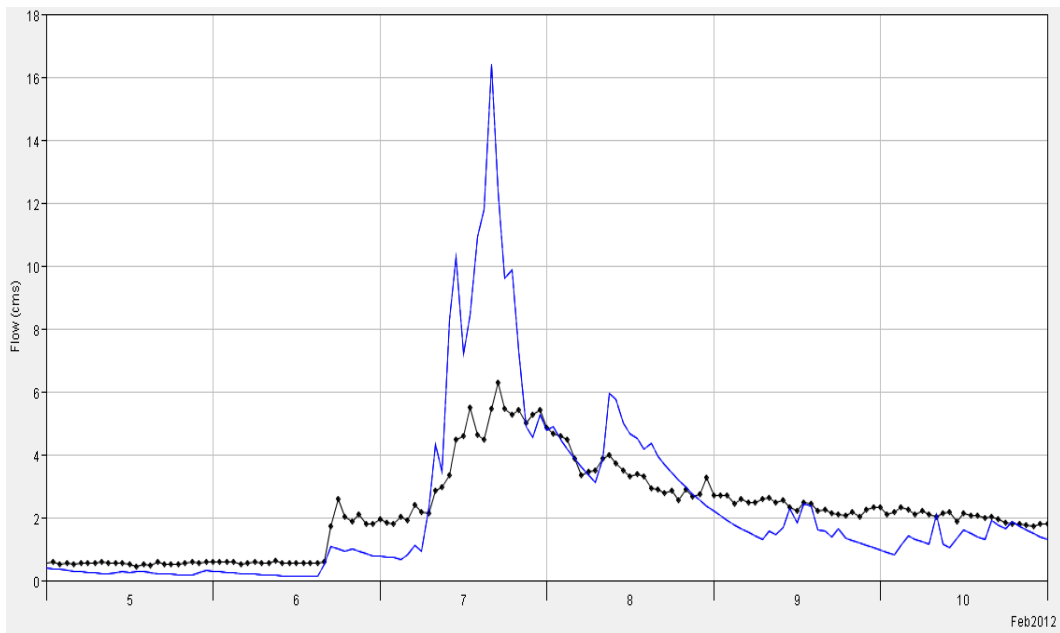
Όπως ήταν αναμενόμενο, τα εύρη τιμών των παραμέτρων είναι τις περισσότερες φορές πολύ μεγάλα για την ίδια υπολεκάνη, κάτι που δείχνει πως η παραμετροποίηση των επεισοδίων είναι μια διαδικασία που δεν αντιπροσωπεύει την λεκάνη αυτή καθαυτή αλλά το ίδιο το επεισόδιο.

Έγινε προσπάθεια επαλήθευσης του μοντέλου χρησιμοποιώντας την παραμετροποίηση του ενός επεισοδίου, για τα υπόλοιπα δύο και τα αποτελέσματα ήταν τελείως αποθαρρυντικά. Ένα παράδειγμα της διαδικασίας αυτής θα παρουσιαστεί παρακάτω, το οποίο αποτελεί και το καλύτερο από πλευράς προσαρμογής.

Σε αυτό το παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε η παραμετροποίηση του επεισοδίου του Ιανουαρίου για να επαληθευτεί το επεισόδιο του Φεβρουαρίου. Αξίζει να σημειωθεί πως τα επεισόδια αυτά μοιάζουν αρκετά ως προς την διάρκεια και την βροχόπτωση σε σχέση με αυτό του Απριλίου. Ο δείκτης προσαρμογής περιορίστηκε για την έξοδο της λεκάνης στο $r=0.57$ (Σχήμα 7.33) που είναι και η καλύτερη επίδοση που εντοπίστηκε στην διαδικασία επαλήθευσης ανάμεσα σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Στην θέση Αλαγονία το μοντέλο δεν έχει προσαρμογή με τιμή $r=-2.33$ (Σχήμα 7.34). Για το επεισόδιο του Απριλίου τα αποτελέσματα είναι χειρότερα, ενώ με την χρησιμοποίηση παραμέτρων άλλου μήνα η προσαρμογή είναι μηδενική.



Σχήμα 7.33: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Λατομείο Μπάκα στο HEC-HMS



Σχήμα 7.34: Μετρημένη (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένη (μπλε γραμμή) απορροή σε ημερήσιο βήμα του υδρομετρικού σταθμού Αλαγονίας στο HEC-HMS

Ειδικά για το επεισόδιο του Απριλίου στο οποίο διατηρήθηκαν οι αριθμοί CN σταθεροί για κάθε υπολεκάνη, πρέπει να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα στην διαδικασία της επαλήθευσης για τους άλλους δύο μήνες ήταν τα χειρότερα. Εκεί έγινε κατανοητό πως ο αριθμός CN δεν είναι δεδομένο της κάθε υπολεκάνης αλλά παράμετρος και γι' αυτό τον λόγο συμμετείχε κανονικά στην βαθμονόμηση των άλλων δύο επεισοδίων.

Τέλος, παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις επιδόσεις των μοντέλων σε όλες τις προσομοιώσεις των επεισοδίων και σε κάθε θέση σύμφωνα με τον δείκτη αποτελεσματικότητας (Efficiency).

Πίνακας 7.11: Μέτρα επίδοσης των μοντέλων στην προσομοίωση των επεισοδίων

Μήνας επεισοδίου	Μοντέλο	Έξοδος – Λατομείο Μπάκα	Καρβελιώτης	Αλαγονία
Ιανουάριος	HEC-HMS	0.89	0.95	-
	HYDROGEIOS	0.90	0.70	-
Φεβρουάριος	HEC-HMS	0.84	-	0.77
	HYDROGEIOS	0.88	-	-1.25
Απρίλιος	HEC-HMS	0.86	0.84	0.69
	HYDROGEIOS	-9.63	0.45	0.38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8. Συμπεράσματα – Προτάσεις

8.1. Συμπεράσματα

Αυτό που πρέπει να τονιστεί με έμφαση είναι η αξία της συνεχούς μέτρησης των υδρολογικών μεταβλητών όπως συμβαίνει στην λεκάνη του Νέδοντα. Πολλές μετρήσεις σε πολλές θέσεις βοηθούν στην ερμηνεία του υδροσυστήματος και μειώνουν τις αβεβαιότητες που διέπουν την λειτουργία του. Είναι βέβαιο ότι αν στο μέλλον υπάρξει περισσότερη και πιο αξιόπιστη υδρολογική πληροφορία, η προσαρμογή των μοντέλων θα είναι ακόμα καλύτερη.

Είναι εμφανές πως ο σχεδιασμός του μοντέλου HEC-HMS δεν έχει γίνει για τα ελληνικά δεδομένα των υδατορευμάτων. Ήταν αδύνατο οι αιχμές να μειωθούν στα επίπεδα των παρατηρημένων και αυτό διαπιστώθηκε σε όλους τους σταθμούς. Επίσης η παραμετροποίηση του ήταν πολύ μεγάλη σε σημείο που οι παράμετροι δεν ήταν εύκολα διαχειρίσιμες.

Το HEC-HMS δεν έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιεί ταυτόχρονα όλα τα σημεία στα οποία υπάρχει έλεγχος από μετρήσεις κάτι που κάνει την διαδικασία βελτιστοποίησης δυσκολότερη, πιο χρονοβόρα και τελικά μη ρεαλιστική.

Έπειτα από την προσομοίωση και βαθμονόμηση του μοντέλου HEC-HMS, έγινε κατανοητό πως εξ' αρχής έπρεπε να οριστούνε πηγές στην λεκάνη του Νέδοντα για να εξαχθεί ένα πιο ρεαλιστικό ισοζύγιο από το μοντέλο, κάτι που έγινε στο μοντέλο HYDROGEIOS και όπως αποδείχτηκε στα ισοζύγια που προέκυψαν.

Η προσομοίωση επεισοδίου δεν είναι χρήσιμη για την παραμετροποίηση της λεκάνης, αλλά του επεισοδίου του ίδιου και μόνο. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι ο αριθμός CN εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες υγρασίας και διαφοροποιείτε από επεισόδιο σε επεισόδιο για την ίδια υπολεκάνη, ακόμα και αν τα επεισόδια βρίσκονται στον ίδιο τύπο υγρασίας (συνήθως τύπος II).

Το μοντέλο HYDROGEIOS δημιουργήθηκε από επιστήμονες, γνώστες της ελληνικής υδρολογικής πραγματικότητας. Δηλαδή σε αντίθεση με το αμερικάνικο HEC-HMS, μπορεί να διαχειρίζεται καλύτερα τα ελληνικά υδατορεύματα, τα οποία έχουν χειμαρρικές ή και καθόλου απορροές η τους καλοκαιρινούς μήνες

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν μεγάλες και ουσιαστικές διαφορές με το HYDROGEIOS να υπερτερεί. Η μέθοδος του HEC-HMS βασίζεται σε παλαιότερες θεωρήσεις και δεν είναι καθόλου ευέλικτη. Αντίθετα, το μοντέλο HYDROGEIOS χρησιμοποιεί μια εξελιγμένη τεχνική βελτιστοποίησης, που εντοπίζει με σχετικά μικρό αριθμό δοκιμών τη βέλτιστη λύση σε έντονα μη γραμμικούς χώρους. Πρόκειται για ένα σημαντικό εργαλείο, που σε συνδυασμό με την παρέμβαση του χρήστη, βοηθά στην προσέγγιση μιας λύσης που εξασφαλίζει ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου για το σύνολο των κριτηρίων που έχουν τεθεί.

Το μοντέλο HYDROGEIOS «τρέχει» πιο γρήγορα την προσομοίωση από το HEC-HMS. Μπορεί η διαφορά να είναι μικρή σε λεκάνες σαν αυτή που μελετήθηκε, αλλά σε περιπτώσεις με πολλά δεδομένα η διαφορά στους χρόνους μάλλον θα είναι σημαντική.

Κάτω από κάποιες προϋποθέσεις (πολύ μεγάλες χρονοσειρές πρωτογενών δεδομένων, χρήση στοχαστικών χρονοσειρών, μικρά χρονικά βήματα, κατάλληλα υδρολογικά μοντέλα) τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης, όπως είναι και το μοντέλο HYDROGEIOS, μπορούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια και τα οποιαδήποτε επεισόδια βροχής, κάτι που έγινε φανερό και στα δύο από τα τρία επεισόδια (Ιανουάριος, Φεβρουάριος) όπου στην έξοδο της λεκάνης το HYDROGEIOS είχε καλύτερη προσαρμογή από το HEC-HMS.

Τα υδρολογικά ισοζύγια του HYDROGEIOS από πλευράς της φυσικής σημασίας των παραμέτρων, εμφανίζονται καλύτερα από αυτά του HEC-HMS.

Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του φυσικού συστήματος, την ανεπάρκεια των μετρήσεων καθώς και τα σφάλματα σε αυτές, επετεύχθη ικανοποιητική προσαρμογή των μοντέλων, σε ένα απαιτητικό πρόβλημα ελέγχου μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Οι παράμετροι που προέκυψαν για το επιφανειακό και υπόγειο μοντέλο είναι, σε γενικές γραμμές, συμβατές με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος και στα δύο

προγράμματα. Με το μοντέλο HYDROGEIOS πάντως να χρησιμοποιεί πολύ λιγότερες παραμέτρους. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό, δεδομένου ότι πρόκειται για μοντέλα φυσικής βάσης

Τέλος, ήταν φανερό σε όλη τη διαδικασία ότι η χρήση των υδρολογικών μοντέλων από μόνη της δεν αρκεί αλλά ούτε μπορεί να υποκαταστήσει την επιστημονική εμπειρία και κρίση, η οποία είναι απαραίτητη τόσο κατά την σχηματοποίηση του υδροσυστήματος όσο και κατά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του.

8.2. Προτάσεις

Προτείνεται η επανάληψη των διαδικασιών προσομοίωσης με μεγαλύτερες χρονοσειρές πρωτογενών δεδομένων για την καλύτερη βαθμονόμηση τους αλλά και για να πραγματοποιηθεί η επαλήθευση των μοντέλων κάτι που στην συγκεκριμένη εργασία δεν κατέστη δυνατό λόγω έλλειψης δεδομένων.

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην εργασία, τα πρωτογενή δεδομένα στάθμης για να μετατραπούν σε παροχές είναι μία περίπλοκη διαδικασία η οποία σε καμία περίπτωση δεν εξαντλήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη. Χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και προτείνεται να πραγματοποιηθεί με ειδικά υδραυλικά λογισμικά.

Έπειτα από την πραγματοποίηση της υδρολογικής μελέτης, θα μπορούσε να ακολουθήσει η μελέτη με μία πιο ολιστική προσέγγιση σε επίπεδο διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης με το πρόγραμμα HYDROGEIOS που παρέχει αυτήν την δυνατότητα.

Θα μπορούσε επίσης να ερευνηθεί εκτενέστερα ο υπόγειος υδροφορέας της περιοχής του Νέδοντα και να βρεθούν πληροφορίες που θα ενταχθούν στο μοντέλο. Άλλωστε είναι γνωστή η ύπαρξη σημαντικού υπογείου υδροφορέα και πηγών στην περιοχή.

Περιθώριο βελτίωσης των αποτελεσμάτων υπάρχει και στην μέθοδο υπολογισμού της εξατμοδιαπνοής. Στη συγκεκριμένη μελέτη, υπολογίστηκε ικανοποιητικά η εξατμοδιαπνοή αλλά σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Προτείνεται να ερευνηθεί ποια είναι η ιδανική μέθοδος για την παραγωγή ημερήσιας και ωριαίας χρονοσειράς εξατμοδιαπνοής, η οποία αποτελεί δεδομένο εισόδου στο μοντέλο HYDROGEIOS

Βιβλιογραφία

Γκιόκας, Α., *Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Εφαρμογή στον νομό Αρκαδίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 152 σελίδες, Αθήνα 2009.

Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, και Σ.Μ. Παπαλεξίου, Περιγραφή μεθοδολογίας ανάλυσης ισχυρών επεισοδίων βροχής, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 55 σελίδες, Νοέμβριος 2012.

Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 115 σελίδες, Οκτώβριος 2012.

Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης - Θεωρητική τεκμηρίωση, *Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας»*, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2009.

Ευστρατιάδης, Α., 2008. *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4), *Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας»*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 173 σελίδες, Αθήνα, Ιούνιος 2010.

Κούσης, Α. Δ., Σ. Λυκούδης, και Γ. Καραβοκυρός, Τεχνική έκθεση περιγραφής μετρητικού συστήματος τηλεμετάδοσης – επεξεργασίας δεδομένων, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 77 σελίδες, Μάρτιος 2012

Κουκουβίνος, Α., Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 36 σελίδες, Μάρτιος 2012

Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1999.

Κώτσιαρη, Α. Χ., *Γεωμορφολογική Μελέτη της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Νέδοντα*, Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 68 σελίδες, Αθήνα, Φεβρουάριος 2012.

Μακρόπουλος, Χ., και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις μαθήματος *Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων και Υδροπληροφορικής*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο, Αθήνα 2012.

Μαμάσης, Ν., Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο, Αθήνα 2012.

Μιμίκου, Μ. και Μπαλτάς, Ε., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.

Ντοανίδης, Λ., *Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC-HMS σε ενιαία και ημικατανεμημένη μορφή στη λεκάνη του ποταμού Καλαμά*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.

Παπαλεξίου, Σ. Μ., και Α. Ευστρατιάδης, Τελική έκθεση, *Εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων και πιθανοτικών μεθόδων*, 116 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2009.

Παγάνα, Β., *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 129 σελίδες, Μάρτιος 2012.

Παπαδημητράκη, Α., *Η επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της βροχοπτώσης στην προσαρμογή υδρολογικών μοντέλων - Εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού*, Διπλωματική εργασία, 130 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2012.

Παπανικολάου, Π., Σημειώσεις μαθήματος *Υδραυλική – Ανοικτοί Αγωγοί*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, 2008.

Παπανικολάου, Π., Σημειώσεις μαθήματος *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αύγουστος 2012.

Ρόζος, Ε., *Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.

Σωτηροπούλου, Κ., *Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών σύμφωνα με την οδηγία 2007/60/ΕΕ. Εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 122 σελίδες, Ιούλιος 2012

Τέγος, Α., *Απλοποίηση της εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής στην Ελλάδα*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.

Τέγος, Α., *Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.

Τουτζιάρη, Μ., *Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 129 σελίδες, Μάρτιος 2012.

Bear, J., *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979

Berthet, L., V. Andréassian, C. Perrin, and P. Javelle, *How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments*, Hydrology and Earth System Sciences, 13, 819–831, 2009

Beven, K. J., *Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models*, Journal of Hydrology, 105, 157-172, 1989

Boughton, W., and O. Droop, *Continuous simulation for design flood estimation – a review*, Environmental Modelling and Software, 18(4), 309–318, 2003

Giandotti, M., *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Memorie e Studi Idrografici, Ministero dei Lavori Pubblici, Roma, 1934

Grimaldi, S., A. Petroseli, and F. Serinaldi, *Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach*, Hydrological Processes, 26(20), 3124–3134, 2012a.

Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, *Time of concentration: A paradox in modern hydrology*, Hydrological Sciences Journal, 57(2), 217–228, 2012b.

Grimaldi, S., A. Petroselli, and F. Nardi, *A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall–runoff modeling in small ungauged basins*, Hydrological Sciences Journal, 57(1), 2012c.

Kottegoda, N. T., *Stochastic water resources technology*, McMillan Press, Honk Kong, 1980.

Nalbantis, I., A. Efstratiadis, E. Rozos, M. Kopsiafti, and D. Koutsoyiannis, *Holistic versus monomeric strategies for hydrological modeling of human-modified hydrosystems*, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 743–758, 2011.

Nelder, J. A., and R. Mead, *A simplex method for function minimization*, Computer Journal, 7(4), 308-313, 1965.

Pathiraja, S., S. Westra, and A. Sharma, *Why continuous simulation? The role of antecedent moisture in design flood estimation*, Water Resources Research, 48, W06534, 2012.

Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, *Application of the Integrated Finite Difference Method in groundwater flow*, European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, Vienna, 00579, European Geosciences Union, 2005.

Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook, section 4*, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1972.

William, A., Fleming, M., *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Technical Reference Manual, 2010.

Διαδικτυακοί Τόποι

<http://itia.ntua.gr/el/>

<http://deucalionproject.gr/software.html>

<http://kalamatanews.blogspot.gr/2011/11/1.html>

<http://www.scribd.com/doc/61528813/Hms-Technical>

<http://www.eea.europa.eu/el/pressroom/newsreleases/CLC2000-el>

<http://www.minenv.gr/1/12/121/12103/viotopoi/g2550001.html>

<http://www.kalamata.gr/default.asp?static=190>

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>