ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΡΕΜΑΤΟΣ ΡΑΦΗΝΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ HEC-HMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ραγκούσης Ευθύμιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Σπύρος Γιακουμάκης,

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΡΕΜΑΤΟΣ ΡΑΦΗΝΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ HEC-HMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ραγκούσης Ευθύμιος

Εξεταστική επιτροπή:

Γιακουμάκης Σ., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Τσακίρης Γ., Καθηγητής ΕΜΠ

Ναλμπάντης Γ., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Στην αρχή αυτής της εργασίας και ολοκληρώνοντας την φοίτησή μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχ., θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής αυτής κ. Γιακουμάκη Σ., Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ο οποίος με την επιλογή του θέματος, την πολύτιμη καθοδήγησή του και προσαρμοστικότητα σε διάφορες ιδέες που συζητήσαμε, συντέλεσε τα μέγιστα στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Η επιλογή ενός καινοτόμου προγράμματος για την εκτέλεση της εργασίας καθώς και η προσφορά σε δεδομένα, βιβλιογραφία και κατευθύνσεις βοήθησαν στην πλήρη κάλυψη του θέματος που μας απασχόλησε.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Τσακίρη Γ., Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Ναλμπάντη Γ., Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για τις καίριες παρατηρήσεις τους.

Θέλω να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Αλεξάκη Δ., Ε.ΔΙ.Π. ο οποίος με βοήθησε με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αρχή της εργασίας και στην αλλαγή και τελική κατάληξη του θέματος, την Ινώ Παπαγεωργίου, υποψήφια διδάκτορα, για τις άμεσες απαντήσεις στα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν και τον Δρ. Κολοκούση Π., Ε.Ε.ΔΙ.Π., από το τμήμα φωτοερμηνείας ο οποίος με βοήθησε πολύ στην διαδικασία επεξεργασίας της γεωχωρικής πληροφορίας.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω την φίλη και συνάδελφο Κωσταντίνου Ε. χωρίς την παρότρυνση της οποίας, σε όλα τα στάδια της εργασίας, αλλά και την ανταλλαγή γνώσεων σε όλους τους τομείς, η παρούσα εργασία μάλλον θα βρισκόταν ακόμα σε επίπεδο σκέψεων. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την Ροσολύμου Ε., για την βοήθειά της στην δημιουργία των περιεχομένων αλλά και γενικότερα.

Επιπλέον, πρέπει να αναφερθώ στο πολιτικό σχήμα ΑΡΑΧΤΟ-ΕΑΑΚ το οποίο αποτέλεσε συστατικό κομμάτι της ζωής μου στην Σχολή. Επίσης ευχαριστώ όλους τους φίλους και συναδέλφους με τους οποίους συνεργαστήκαμε και περάσαμε καλά κατά τη διάρκεια της φοίτησής μας αλλά και εκτός Σχολής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γιάννη και Γιολάνδα και τον αδερφό μου Θάνο που με υποστήριξαν υλικά, ηθικά και πνευματικά στην μακρά διαδικασία της ολοκλήρωσης των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη i

Extended Abstract iii

1. Εισαγωγή 1

1.1. Αντικείμενο της εργασίας 1

1.2. Λογισμικό 1

1.3. Διάρθρωση της εργασίας 2

2. Θεωρητικό μέρος 4

2.1. Υδρολογικός Κύκλος και Αντικείμενο της Υδρολογίας 4

2.2. Οι πλημμύρες και το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα και την Ευρώπη . 5

2.2.1. Πλημμύρες και αντιπλημμυρική προστασία 5

2.2.2. Οι πλημμύρες στην Ελλάδα 7

2.2.3. Η Οδηγία για το υδάτινο περιβάλλον 60/2000 9

2.3. Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας 11

3. Η Περιοχή Μελέτης 11

3.1. Εισαγωγή - Γενικά Στοιχεία 11

3.2. Η Λεκάνη Απορροής του Ρέματος Ραφήνας 16

3.2.1. Γενικά Χαρακτηριστικά (ανάγλυφο-γεωγραφία-κλίσεις) 16

3.2.2. Γεωλογική Ανάλυση 18

3.2.3. Ανάλυση των χρήσεων γης 18

3.2.4. Εξοπλισμός στην περιοχή μελέτης (σταθμοί παροχής - βροχομετρικοί) 23

3.3. Προσομοίωση γεωχωρικής πληροφορίας 24

3.3.1. Γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν (dem, σχήμα λεκάνης, ρεμάτων) 25

3.4. Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους - preprocessing 26

3.4.1. Ανάλυση διαδικασίας εντολών 27

3.4.2. Επεξεργασία για τη δημιουργία στοιχείων εισόδου 32

3.4.3. Προετοιμασία για την εξαγωγή αρχείων εισόδου 34

3.4.4. Παρατηρήσεις στην χρήση και την λειτουργία του HEC-GeoHMS 36

4. Υδρολογική Προσομοίωση 33

4.1. Το πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης Hec-HMS 33

4.1.1. Το μοντέλο της λεκάνης 33

4.1.2. Οι χρονοσειρές δεδομένων 37

4.1.3. Εισαγωγή βροχογραφικών δεδομένων 37

4.1.4. Εισαγωγή δεδομένων παροχής 38

4.1.5. Το μετεωρολογικό μοντέλο 39

4.1.5.1. Εφαρμογή της μεθόδου βαρών Thiessen 40

4.1.5.2. Υπολογισμός συντελεστών Thiessen 41

4.2. Προσδιορισμός Control Specifications, χρονολογικού ελέγχου 42

4.3. Εισαγωγή απωλειών λεκανών 43

4.3.1. Υπολογισμός απωλειών με την μέθοδο SCS 43

4.4. Υπολογισμός άμεσης απορροής 47

4.4.1. Το μοναδιαίο υδρογράφημα 48

4.4.2. Το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα Σχεδιασμού SCS (SCS Unit Hydrograph) 50

4.5. Πρότυπο Υπολογισμού Διόδευσης (Routing) 52

5. Αποτελέσματα 52

5.1. Προσομοίωση γεγονότων και αποτελέσματα 52

5.1.1. Επεισόδιο 1 – 03/02/2011 52

5.1.2. Επεισόδιο 2-22/12/2012 54

5.1.3. Επεισόδιο 3- 28/01/2014 56

5.2. Παρουσίαση Βαθμονόμησης 58

5.2.1. Αυτοματοποιημένη Βελτιστοποίηση για το Επεισόδιο 1 – 03/02/2011 59

5.2.2. Προσαρμογή των αριθμών καμπύλης απορροής 61

5.3. Επίδραση Φράγματος Ανάσχεσης 63

5.3.1. Γενικά στοιχεία 63

5.3.2. Εισαγωγή του φράγματος στο HEC-HMS 65

5.3.3. Αποτίμηση της λειτουργίας του φράγματος 70

5.3.4. Παρούσες συνθήκες στην περιοχή μελέτης 71

6. ΣΥΝΟΨΗ 73

Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4-1: Εμβαδόν λεκάνης απορροής 36
Πίνακας 4-2: Υπολογισμός συντελεστών Thiessen για τις υπολεκάνες 41
Πίνακας 4-3: Υπολογισμός συντελεστών Thiessen για το επεισόδιο 28/01/2014 42
Πίνακας 4-4: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους 44
Πίνακας 4-5: Υδρολογική κατάταξη εδαφών 45
Πίνακας 4-6: Πίνακας CN απλοποιημένων χρήσων γης 46
Πίνακας 4-7: Απόδοση αριθμών CN στις υπολεκάνες 47
Πίνακας 4-8: Δεδομένα υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης 51
Πίνακας 4-9: Υπολογισμός δεδομένων διόδευσης υδατορευμάτων 54
Πίνακας 5-1: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης του πρώτου επεισοδίου 52
Πίνακας 5-2: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης για το δεύτερο επεισόδιο 54
Πίνακας 5-3: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης για το τρίτο επεισόδιο 56
Πίνακας 5-4: Μείωση των συντελεστών CN 61
Πίνακας 5-5: Συνάρτηση παροχής- αποθηκευτικότητας για στέψη στα +64μ 66
Πίνακας 5-6: Συνάρτηση παροχής-αποθηκευτικότητας για στεψη στα +65μ 67
Πίνακας 5-7: Διόδευση υδατορευμάτων με φράγμα ανάσχεσης 67
Πίνακας 5-8: Χρονολογικό διάγραμμα σύγκρισης πλημμυρογραφημάτων για φράγμα με στέψη στα +64m 69
Πίνακας 5-9: Χρονολογικό διάγραμμα σύγκρισης πλημμυρογραφημάτων για φράγμα με στέψη στα +65m 70

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Ο Υδρολογικός Κύκλος (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999) .5
Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της επιφάνειας μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (Πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ) 8
Εικόνα 2.3: Χάρτης των ιστορικών πλημμυρών στην περιοχή της Αττικής (Πηγή: ΙΓΜΕ, Ινστιτούτο Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών) 9
Εικόνα 2.4: Χάρτης της επαναφοράς πλημμυρικού κινδύνου της περίοδο 1987-2002 (Πηγή: European Spatial Planning Observation Network) 10
Εικόνα 2.5: Φωτογραφία του σταθμού μετρήσεων του Υδρολογικού Παρατηρητήριου Αττικής (Πηγή:http://hoa.ntua.gr/info/) 13
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των καμένων περιοχών από την πυρκαγιά του 2009 σε συνάρτηση με την λεκάνη απορροής.....21
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση των ΨΜΕ πριν την εκτέλεση δημιουργίας μωσαϊκού 25
Εικόνα.3.3 Η εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS 26
Εικόνα 3.4: Το διάγραμμα ροής της επεξεργασία του ΨΜΕ για την εξαγωγή του μοντέλου 27
Εικόνα 3.5: Η επίδραση της εντολής DEM Reconditioning στην επιφάνεια της ΨΜΕ (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης HEC-GeoHMS) 27
Εικόνα 3.6: Αποτελέσματα της εντολής DEM Reconditioning 29
Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα της εντολής Fill Sinks.....29
Εικόνα 3.8: Απεικόνηση των χαρτών συγκέντρωσης και Κατεύθυνσης της ροής 30
Εικόνα 3.9: Αποτέλεσμα των εντολών καθορισμού και κατάτμησης της ροής.....30
Εικόνα 3.10: Απεικόνιση οριοθέτησης των υπολεκανών σε πλεγμα και σε διανυσματική μορφή 31
Εικόνα 3.11: Το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή και συσσωμάτωση των υπολεκανών.....31
Εικόνα 3.12: Το μενού δημιουργίας καινούριου Project.....32
Εικόνα 3.13: Μενού σύνδεσης δεδομένων εισαγωγής.....32
Εικόνα 3.14: Μοντέλο υπολεκανών και υδρογραφήματος σε διανυσματική μορφή 33
Εικόνα 3.15: Το μενού επεξεργασίας των χαρακτηριστικών των υπολεκανών.....34

Εικόνα 3.16: Μενού επιλογής υδρολογικής προσομοίωσης και άλλων στοιχείων....35
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση του μοντέλου εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS 34
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση του απλοποιημένου μοντέλου της λεκάνης απορροής.....35
Εικόνα 4.3: Απεικόνιση μενού υπολεκάνης 36
Εικόνα 4.4: Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων βροχόπτωσης στο HEC-HMS.....38
Εικόνα 4.5: Διαδικασία εισαγωγής παρατηρημένης παροχής στο HEC-HMS 39
Εικόνα 4.6: Απεικόνιση των πολυγώνων Thiessen στη λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας.....41
Εικόνα 4.7: Εισαγωγή δεδομένων των συντελεστών Thiessen στο HEC-HMS.....42
Εικόνα 4.8: Εισαγωγή χρονικού παράθυρο και βήματος προσομοίωσης 43
Εικόνα 4.9: Κατάταξη εδαφών με βάση το κριτήριο υδατοπερατότητας.....46
Εικόνα 4.10: Η αρχή της αναλογίας του ΜΥΓ 49
Εικόνα 4.11: Η αρχή της επαλληλίας του ΜΥΓ 49
Εικόνα 4.12: Συνάρτηση ενεργού βροχής και άμεσης απορροής.....50
Εικόνα 4.13: Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης.....52
Εικόνα 4.14: Εισαγωγή δεδομένων διόδευσης υδατορεύματος στο HEC-HMS.....55
Εικόνα 5.1: Απεικόνιση της παροχής στον κόμβο Ραφήνα (ανάντη).....53
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της παροχής για το επεισόδιο-2 55
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση της παροχής για το επεισόδιο-3 57
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση της επιλογής παραμέτρου βελτιστοποίησης 58
Εικόνα 5.5: Απεικόνιση μενού επίδρασης στις παραμέτρους 59
Εικόνα 5.6: Απεικόνιση αποτελεσμάτων διαδικασίας βελτιστοποίησης 60
Εικόνα 5.7: Υδρογραφήματα μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης 60
Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης στο πλημμυρογράφημα 60
Εικόνα 5.9: Αποτελέσματα υπολογισμού του μοντέλου με τους μειωμένους συντελεστές 62
Εικόνα 5.10: Συνάρτηση επιφάνειας χωρητικότητας ταμιευτήρα.....66
Εικόνα 5.11: Προσαρμοσμένο μοντέλο λεκάνης με φράγμα ανάσχεσης.....68

Ευρετήριο Χαρτών

Χάρτης 3.1: Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους της λεκάνης απορροής του Ρέματος της Ραφήνας……17

Χάρτης 3.2: Χάρτης κλίσεων του εδάφους της λεκάνης απορροής του Ρέματος της Ραφήνας……17

Χάρτης 3.3: Ψηφιοποιημένος υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής του Ρέματος της Ραφήνας……18

Χάρτης 3.4: Χάρτης απεικόνισης των χρήσεων γης σύμφωνα με το αρχείο του Corine Land Cover 2000……..22

Χάρτης 3.5: Απεικόνιση των επικαιροποιημένων χρήσεων γης με βάση την παρούσα κατάσταση στην περιοχή μελέτης……..22

Χάρτης 3.6: Απλοποιημένες χρήσεις γης με βάση των αριθμό CN ως κριτήριο ομαδοποίησης……..23

Χάρτης 3.7: Οι Βροχομετρικοί και σταθμηγραφικοί σταθμοί του Υδρολογικού Παρατηρητήριου Αθηνών……..24

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ρέματος της Ραφήνας με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Η περιοχή της Ραφήνας παρουσιάζει έντονο υδρολογικό ενδιαφέρον καθώς οι αλλαγές στις χρήσεις γης και η αλλαγή του φυσικού τοπίου, την καθιστούν περιοχή πλημμυρικού κινδύνου. Πιο συγκεκριμένα, η σημαντική αύξηση της ασυνεχούς αστικής δόμησης και η καταστροφή των δασών από πυρκαγιές με τελευταία αυτήν του 2009 αλλά και η σημαντική παρουσία των καλλιεργειών στην πεδιάδα των Σπάτων, δημιουργούν συνεχώς εναλλασσόμενες συνθήκες για την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες. Στην περιοχή μελέτης δρα το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών (ΥΠΑ), του οποίου στοιχεία όπως βροχομετρικά και πλημμυρογραφικά δεδομένα συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Για την γεωχωρική προσομοίωση της περιοχής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGis 10.1 στην προέκταση ArcMap με την επιπλέον προσθήκη της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Μέσω αυτών δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποιώντας το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) και το προϋπάρχον συνθετικό υετόγραμμα και σχήμα λεκάνης απορροής, να εξάγουμε το υδρολογικό μοντέλο της περιοχής. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής είναι μια γεωγραφικά καθορισμένη λεκάνη απορροής με προσδιορισμένο σχήμα, υψόμετρα, μέγιστα μήκη ροής, αριθμό υπολεκανών (δημιουργήθηκαν πέντε υπολεκάνες) και υδρογράφημα. Στην συνέχεια το μοντέλο εισήχθη στο πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS, όπου με την εισαγωγή των δεδομένων του ΥΠΑ προσομοιώθηκαν επεισόδια βροχής διαφορετικών εντάσεων και διαρκειών. Ο υπολογισμός των απωλειών των υπολεκανών έγινε με την μέθοδο της SCS όπου προσδιορίστηκαν οι συντελεστές Curve Numbers (CN) για την κάθε υπολεκάνη. Για την προσομοίωση εισήχθησαν επίσης δεδομένα υπολογισμού του χρόνου συρροής των υπολεκανών (SCS Transform) αλλά και του μοντέλου διόδευσης των υδατορευμάτων (Muskingum). Τέλος, το συνθετικό υετόγραμμα σχεδιασμού SCS χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής. Στην συνέχεια προσομοιώθηκε πειραματικά μια διαδικασία βελτιστοποίησης του μοντέλου με εξαρτημένες παραμέτρους τους

αριθμούς CN των υπολεκανών όπου και επιλέχθηκε η μείωση τους κατά 10% με στόχο την καλύτερη προσομοίωση στα μετρημένα πλημμυρογραφικά δεδομένα.

Στην συνέχεια προσομοιώθηκε υδρολογικά ένα φράγμα ανάσχεσης στην περιοχή της κοιλάδας των Σπάτων. Για την δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε σαν θέση αυτή που είχε προσδιοριστεί από τους Λαζαρίδη και Ναλμπάντη και σαν συνάρτηση αποθήκευσης-παροχής αυτή που έχει χρησιμοποιηθεί από την Μ. Κοψιαύτη. Για την καλύτερη εκτέλεση της προσομοίωσης έγινε επαναπροσδιορισμός του μοντέλου ώστε να συμπεριλάβει την διόδευση μέσω ταμιευτήρα του τμήματος ανάντη του φράγματος. Επανυπολογίστηκαν δηλαδή τόσο οι χρόνοι συρροής όσο και τα δεδομένα της διόδευσης των υδατορευμάτων.

EXTENDED ABSTRACT

The main purpose of this diploma thesis is the hydrologic simulation of the Rafina river basin in eastern Attica, with the use of HEC-HMS software.

The region is a complex terrain with frequent changes concerning land use, influencing so the hydrologic regime of the area. Urbanization, forest fires, lack or inadequacy of flood protection measures, have caused flooding in spite of the comparatively low level of rainfall.

The region of eastern Attica suffered from serious flood incidents through the past few years and for this, one can mention a number of reasons. The constant urbanization in the area has resulted to a mass rise of discharge due to the rise of urban waste, the trespassing of streams and thus, the reduction of their natural sections. Adding to that, the severe reduction of the natural forestry of the area the last thirty years, due to several incidents of fire and the inadequate reforestation of the burnt areas, increased the discharge in the area.

Analyzing the area of interest, the Rafina river basin has a size of 126 km^2 and is bounded by Mt. Penteli to the North and Northeast and Mt. Immitos to the South. Geologically it is composed mostly of river and torrent depositions and to the North of clay and marbles.

The area of interest is equipped with rainfall and discharge stations installed by the Hydrologic Observatory of Athens (HOA) and the relevant data has been used for the hydrologic simulation via the HEC-HMS model.

The programs used for the geospatial simulation of the area were ArcGis 10.1 and the HEC produced toolbox HEC-GeoHMS. The simulation process included the reconditioning of the Digital Elevation Model (DEM) using the already existing synthetic drainage line created by M. Kopsiafti, the creation of the hydrologic DEM and the production of flow direction and accumulation, streams definition and segmentation and finally, river basin's digital maps. The results of the process were the vector version of the drainage line and the sub-basins network.

Following to this, was the import of the digital land data to HEC-HMS (Hydrologic Modelling System). For the simulation, four different incidents of rainfall were chosen and their time-series were inserted to the program. Observed discharge was also included to the data for optimization and results testing.

Determining the model parameters, SCS Curve Numbers, SCS Unit Hydrograph, Muskingam Routing method were chosen for the rainfall losses, transform method and channel flow routing of the model respectively. For the extraction of the CN, simplified maps of land use and geology were used in the process of the automated GeoHMS environment.

Experimentation with the process of model optimization, through the use of different parameters and objective functions, has resulted to a suggested reduction of curve numbers by 10%. This resulted to better simulation of the observed peak flow and discharge volume but differences in the peak time. The new results were considered better and so, the reducted curve numbers model was chosen for the rest of the simulation.

The last part of the thesis comprises the simulation of a soil dam in the region of Spata valley, as it was proposed by Lazaridis and Nalbantis in 2004. The storage-discharge data was the same as that used by M. Kopsiafti in 2006. The Spata sub-basin was divided in two parts: upstream and downstream the dam and the parameters of both sub-basins were calculated. In accordance to the changes in the sub-basins, the routing loss and lag times of the sub-basins were altered to match the new routing of the upstream area through the dam.

The production of a geospatial model of the area of interest and the hydrologic simulation and optimization of the hydrologic parameters for several rainfall events, are the main results of the current thesis. Considering also as a flood protection measure the construction of a dam in the area of Spata valley, simulations were carried out for two different dam levels.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την επικαιροποίηση της αντιπλημμυρικής προστασίας στη λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνας. Βασική βιβλιογραφική πηγή ήταν η ΔΕ της Μ. Κοψιαύτη, ιδιαίτερα στο κεφάλαιο που αφορά στην υδρολογική προσομοίωση ενός προτεινόμενου φράγματος ανάσχεσης. Η βασική της διαφοροποίηση έγκειται στην επιλογή του λογισμικού υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS.

Η λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνας είναι μια περιοχή που κατέστη ευάλωτη σε πλημμύρες, ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια, που η γοργή αστικοποίηση και η καταστροφή του φυσικού δασικού πλούτου της περιοχής λόγω πυρκαγιών, είχε ως συνέπεια την δραματική αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου.

Πρέπει να αναφερθεί ότι για την εκπόνηση της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής ακρίβειας 30m, καθώς και βροχομετρικά και σταθμηγραφικά δεδομένα από τους σταθμούς του Υδρολογικού Παρατηρητήριου της Αθήνας, τα οποία διατίθενται σε χρονοσειρές με βήμα δέκα λεπτών.

1.2. Λογισμικό

Χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω προγράμματα Η/Υ στις αντίστοιχες εκδόσεις:

ArcGis 10.1: ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για εργασίες με χάρτες και άλλα γεωγραφικά στοιχεία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και την χρήση χαρτών, για την σύνθεση γεωγραφικών δεδομένων και την διαχείριση βάσεων δεδομένων GIS.

HEC-GeoHMS: πρόκειται για μία επέκταση της υδρολογικής μοντελοποίησης η οποία αναπτύχθηκε ως εργαλειοθήκη γεωχωρικής υδρολογίας. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία των στοιχείων εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS, είναι κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center –

HEC) του Μηχανικού Σώματος του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

HEC-HMS: πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης (hydrology modeling system) παραγωγής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Μηχανικού Σώματος του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

Hydrognomon: πρόγραμμα επεξεργασίας της πληροφορίας των βροχομετρικών και πλημμυρογραφικών σταθμών του Υδρολογικού Παρατηρητήριου, παραγωγής του ITIA.

Microsoft Office 2013 (Word, Excell, Power Point).

Google Earth: πρόγραμμα απεικόνισης της χωρικής πληροφορίας.

1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία ακολουθεί την παρακάτω ροή:

- Οι πλημμύρες και το πλημμυρικό καθεστώς
- Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο της Αθήνας
- Περιγραφή της περιοχής μελέτης
- Ανάλυση της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας
- Παρουσίαση των θέσεων του μετρητικού εξοπλισμού
- Παρουσίαση της διαδικασίας προσομοίωσης της γεωχωρικής πληροφορίας
- Προεπεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS
- Εισαγωγή των γεωχωρικών δεδομένων στο HEC-HMS
- Τρέξιμο της προσομοίωσης και παρουσίαση των αποτελεσμάτων
- Παρουσίαση πειραματισμού με την διαδικασία βελτιστοποίησης-βαθμονόμησης
- Διόρθωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης
- Εισαγωγή του φράγματος ανάσχεσης και προσαρμογή του μοντέλου
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης με το φράγμα ανάσχεσης

- Συμπεράσματα

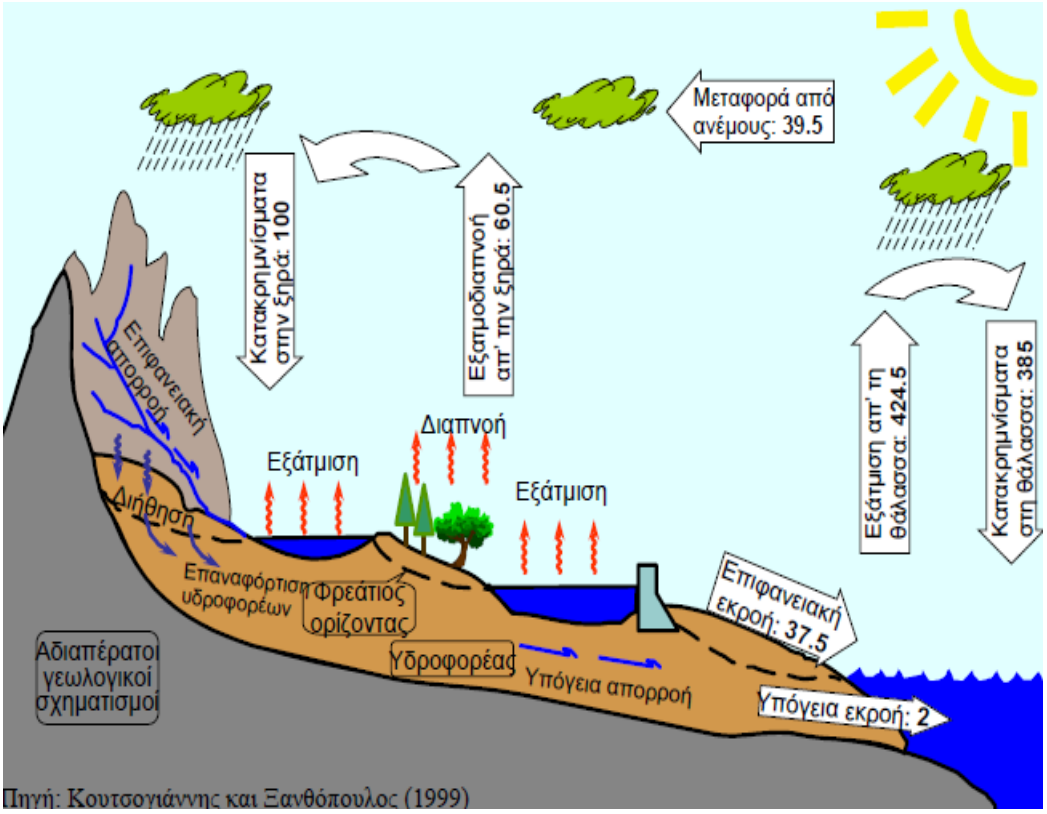
2. **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

2.1. Υδρολογικός Κύκλος και Αντικείμενο της Υδρολογίας

Ο Υδρολογικός κύκλος αποτελεί την σχηματική περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ θαλάσσας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σ' αυτή την αλυσίδα των εμφανίσεων το νερό παρουσιάζεται μ' όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο, στερεό.

Η σειρά εμφανίσεων του νερού στη φύση δεν έχει πρακτικά αρχή και τέλος. Όμως η αρχή θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με τη μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κλπ.

Αντικείμενο της υδρολογίας είναι η ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων και ερμηνειών για τις διάφορες διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα για την χωροχρονική εξέλιξη των φαινομένων. Είναι γεγονός ότι οι διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου εμπεριέχουν παραμέτρους και διαδικασίες πολλές φορές αλληλεξαρτώμενες. Μερικές μάλιστα απ' αυτές ερευνώνται από άλλες επιστήμες (Τσακίρης, 1995).



Εικόνα 2.1: Ο Υδρολογικός Κύκλος (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

2.2. Οι πλημμύρες και το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα και την Ευρώπη

2.2.1. Πλημμύρες και αντιπλημμυρική προστασία

Σύμφωνα με την Οδηγία 2000|60|ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000, η οποία στοχεύει στην διατήρηση και βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος στην Κοινότητα, οι πλημμύρες ορίζονται ως εξής:

Μία **πλημμύρα** είναι η υπερχείλιση του επιπλέον νερού που καλύπτει τη ξηρά. Η οδηγία της ΕΕ για τις πλημμύρες ορίζει μια πλημμύρα ως προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Κατά η έννοια του «ρέοντος νερού», μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στην εισροή της παλίρροιας. Οι πλημμύρες μπορεί να προκύψουν από τον όγκο νερού μέσα σε ένα σώμα του ύδατος, όπως ένα ποτάμι ή λίμνη, η οποία υπερχειλίζει ή σπάει τα αναχώματα, με αποτέλεσμα το νερό να διαφύγει από τα συνήθη όριά του, ενώ το

μέγεθος της λίμνης ή άλλου φορέα του νερού που ποικίλλει ανάλογα με τις εποχιακές αλλαγές στις βροχοπτώσεις και στα χιόνια που λιώνουν, δεν είναι μια σημαντική πλημμύρα εκτός αν τέτοιες διαρροές νερού θέσουν σε κίνδυνο τις εκτάσεις που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο σαν ένα χωριό, πόλη ή άλλη κατοικημένη περιοχή.

Οι πλημμύρες μπορεί επίσης να εμφανιστούν στα ποτάμια, όταν ροή υπερβαίνει την χωρητικότητα του καναλιού του ποταμού, ιδίως σε στροφές ή μαιάνδρους. Οι πλημμύρες συχνά προκαλούν ζημιές σε σπίτια και επιχειρήσεις, εφόσον έχουν τοποθετηθεί σε φυσικές περιοχές κατάκλυσης των ποταμών. Ενώ οι ζημίες από τις πλημμύρες μπορεί να έχουν σχεδόν εξαλειφθεί με την απομάκρυνση του ανθρώπου από τους ποταμούς και άλλους φορείς του νερού, δεδομένου ότι ανέκαθεν, οι άνθρωποι έχουν ζήσει και εργαστεί κοντά το νερό για να αναζητήσουν τροφή και να αξιοποιήσει τα οφέλη της φθηνής και εύκολης μετακίνησης και το εμπόριο με το να είναι κοντά νερό. Ότι οι άνθρωποι συνεχίζουν να κατοικήσουν περιοχές που απειλούνται με ζημίες από πλημμύρες είναι απόδειξη ότι η αξία του να ζουν κοντά στο νερό υπερβαίνει το κόστος των επαναλαμβανόμενων περιοδικών πλημμύρων.

(πηγή: http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=F1AF2ARLHmo%3d&tabid=248&language=el-GR)3)

Η εμφάνιση των πλημμυρών αποτελεί ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο στο οποίο υπεισέρχονται διάφορες και πολύπλοκες φυσικές και τεχνικές διεργασίες όπως είναι η δημιουργία των ραγδαίων βροχών, η διήθηση και η επιφανειακή απορροή, η διάβρωση και η μεταφορά των στερεών υλικών από το νερό, η ασταθής και ανομοιόμορφη ροή του νερού δια μέσου του συστήματος των φυσικών υδατορευμάτων, με γενικά μεταβλητή διατομή κατά την διάρκεια του φαινομένου κ.α. Η πλήρης προστασία από πλημμυρικό γεγονός σε μια περιοχή ειναι συνήθως τεχνικά ή οικονομικά ανέφικτη. Γι’ αυτό η αντιπλημμυρική προστασία έγκειται κυρίως στην πρόληψη των ζημιών από πλημμύρες μικρού ή μεσαίου μεγέθους και στην ελάττωση των ζημιών από πλημμύρες μεγάλου μεγέθους. Για τους ανωτέρω λόγους, όταν γίνεται αναφορά στην αντιπλημμυρική προστασία προτιμάται ο όρος «μετρίαση πλημμύρας».

Ως εκ τούτου, σε μακροχρόνια βάση λυσιτελής αντιπλημμυρική προστασία μιας περιοχής είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνον εφ' όσον το φαινόμενο της πλημμυρικής απορροής αντιμετωπισθεί στο σύνολό του, ήτοι από την έναρξη της δημιουργίας της απορροής μέχρι την κατάληξη των υδάτων στον φυσικό αποδέκτη τους, λίμνη ή θάλασσα (Σακκάς, 2004).

2.2.2. Οι πλημμύρες στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι ένας τόπος με έντονο ανάγλυφο και ακτογραμμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τόσο τα τοπογραφικά και εδαφολογικά της χαρακτηριστικά, όσο και τα υδρολογικά και κλιματικά να μεταβάλλονται.

Η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρικών επεισοδίων δε σχετίζεται με τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης, αλλά με την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτωσεων. Στην Ελλάδα μάλιστα, οι πλημμύρες συχνά οφείλονται σε επεισόδια βροχής μεγάλης έντασης που παράγονται συνήθως από χαμηλά βαρομετρικά προερχόμενα από δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά. (Παγάνα, 2012)

Η χώρα μας, για πολλούς γνωστούς λόγους (όπως : απρογραμμάτιστη αστικοποίηση, αυθαίρετη δόμηση, αποψίλωση δασών, πυρκαγιές, μπαζώματα ρεμάτων, καταπατήσεις, έλλειψη αναγκαίων αντιπλημμυρικών έργων και ανεπάρκεια των κατασκευασμένων κλπ), δεν διαθέτει σήμερα ικανοποιητική θωράκιση αντιπλημμυρικής προστασίας, με επακόλουθο, πολλές περιοχές της να πλήττονται συχνά από καταστροφικές πλημμύρες με ανυπολόγιστες ζημιές, υποβάθμιση του περιβάλλοντος και ανθρώπινα θύματα ακόμα και σε σχετικά μικρής εντάσεως και διάρκειας βροχοπτώσεις. (Νικολόπουλος, 2007)

Περιοχές όπου συμβαίνουν συχνά πλημμυρικά φαινόμενα παρουσιάζουν δυσκολίες στον σχεδιασμό και προγραμματισμό των αντιπλημμυρικών έργων καθώς δημιουργούνται προβλήματα σε συνδυασμό με τις νέες βροχοπτώσεις και την κλιματική αλλαγή με αποτέλεσμα:

- Να διαβρωθούν και να παρασυρθούν τα εδάφη από τις γυμνές πλέον καμένες περιοχές με επακόλουθο να μειωθούν ή και να μηδενιστούν οι δυνατότητες φυσικής ή και τεχνητής αναδημιουργίας των καμένων δασών και των δενδροκαλλιεργειών, με κατάληξη ενδεχομένως την ερήμωση.

- Να προκληθούν ανεξέλεγκτες καταστροφικές πλημμύρες με ανυπολόγιστες ζημιές, υποβάθμιση του περιβάλλοντος και ανθρώπινα θύματα στις κατάντη αστικές και γεωργικές περιοχές, στις τουριστικές εγκαταστάσεις, στα έργα υποδομής και πολιτιστικής κληρονομιάς.

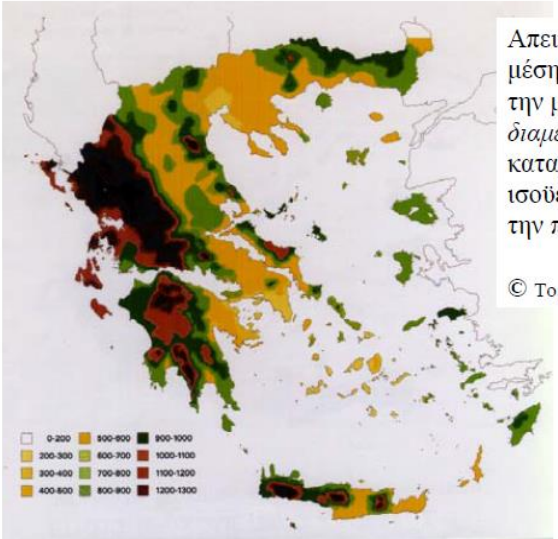
- Να προκληθούν κατολισθήσεις που θα επηρεάσουν σημαντικά κατοικημένες περιοχές, τα υφιστάμενα και προγραμματισμένα έργα υποδομής, και γενικά στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Επισημαίνεται ότι στις κλιματικές αλλαγές που έχουν ήδη αρχίσει να εκδηλώνονται, σε πολλά σημεία του πλανήτη, οφείλονται μεταξύ των άλλων σε μεγάλο βαθμό και οι καταστροφικές πυρκαγιές του φετινού καλοκαιριού στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες της Μεσογείου. (Νικολόπουλος , 2007)

Στην ημερίδα για την Αντιπλημμυρική Προστασία του 2007 επισημαίνεται επίσης ότι:

Η αντιπλημμυρική Προστασία του Λεκανοπεδίου της Αττικής πρέπει να γίνεται προγραμματισμένα λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προγραμματισμένες αλλαγές των χρήσεων γης αλλά και συντονισμένα από τους εμπλεκόμενους φορείς σε μια συστηματικά ελεγχόμενη επέκταση της πόλης. (Στάμου, 2007)

Η κατανομή των βροχοπτώσεων στον Ελλαδικό χώρο παρουσιάζεται παρακάτω:

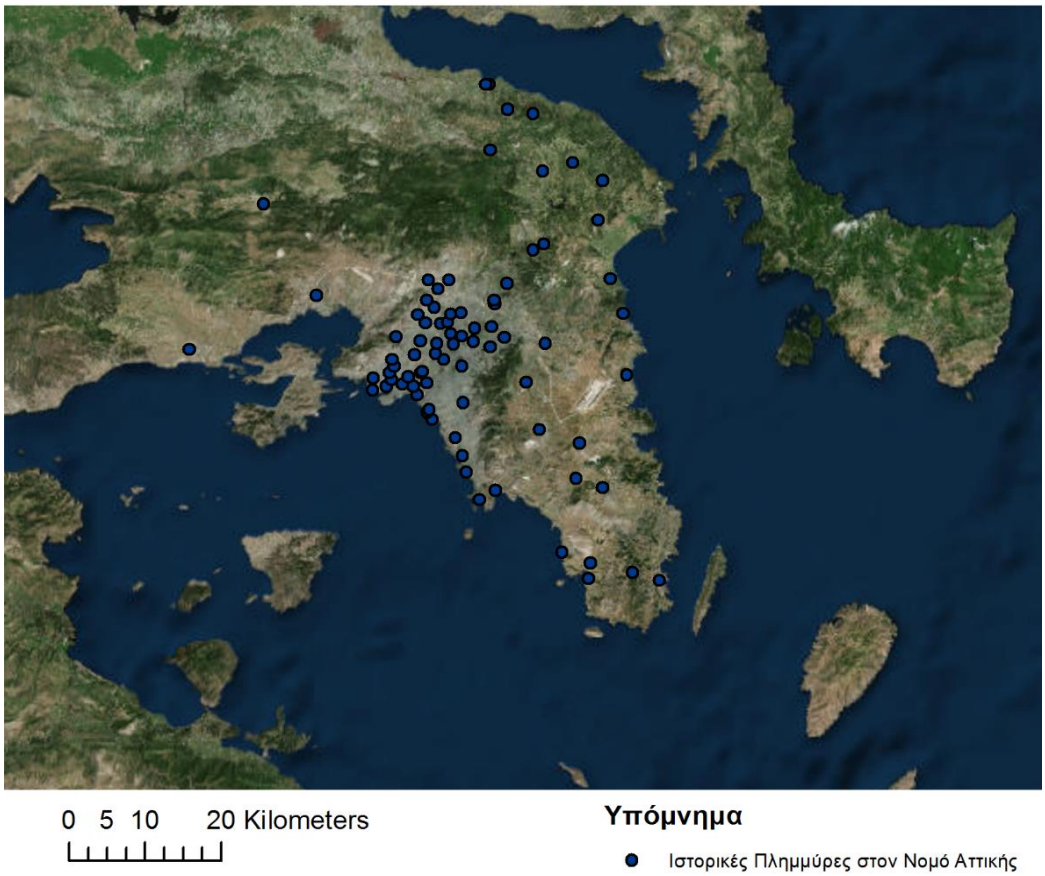


Απεικόνιση της επιφάνειας μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, με την μέθοδο της *ψηφιδωτής διαμέρισης*. Η επιφάνεια καταρτίστηκε με βάση τις ισοϋέτιες καμπύλες της ΔΕΗ για την περίοδο 1950-74.

© Τομέας Υδατικών Πόρων

Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της επιφάνειας μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (Πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ)

Η καταγραφή των ιστορικών πλημμυρών στο λεκανοπέδιο της Αττικής παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 2.3: Χάρτης των ιστορικών πλημμυρών στην περιοχή της Αττικής (Πηγή: ΙΓΜΕ, Ινστιτούτο Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών)

2.2.3. Η Οδηγία για το υδάτινο περιβάλλον 60/2000

Αναλύοντας την οδηγία 60/2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρουσιάζονται οι βασικοί στόχοι και η νέα θεώρηση της αντιμετώπισης των υδατικών πόρων:

Βασικός Στόχος:

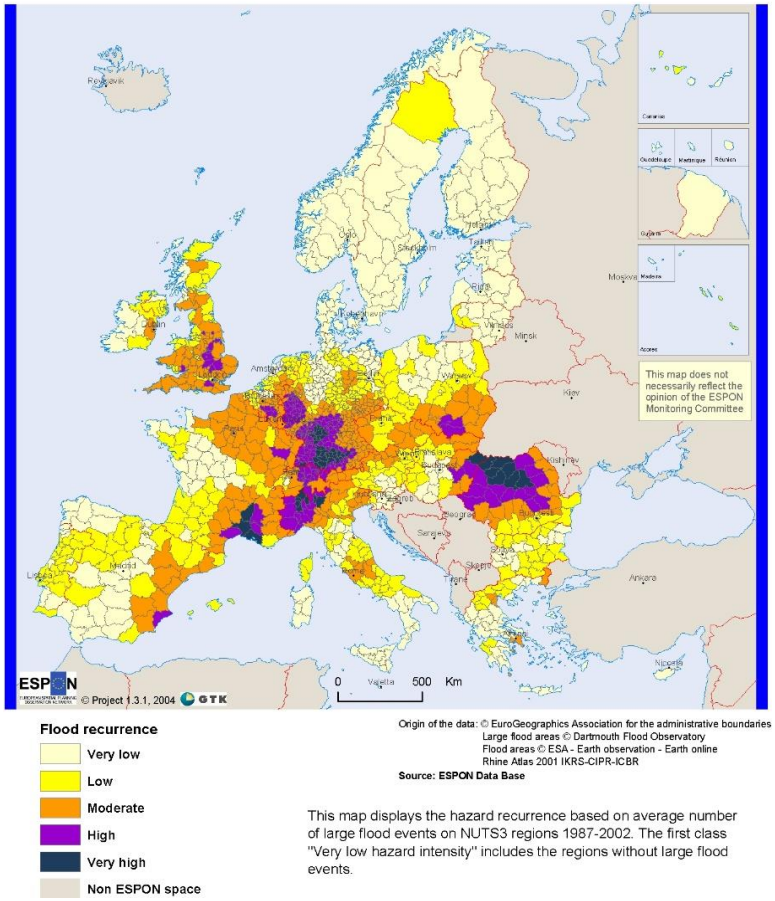
Επίτευξη μέχρι το 2015 της καλής κατάστασης για όλα τα επιφανειακά και υπόγεια νερά της Ευρώπης, μέσω της κατάρτισης ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.

Νέα θεώρηση στη διαχείριση των υδατικών πόρων

- Διαχείριση ανά λεκάνη ή ομάδα λεκανών απορροής
- Ενιαία θεώρηση όλων των τύπων υδατικών σωμάτων
- Διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών
- Πλήρης καταμερισμός του συνολικού κόστους χρήσης του ύδατος κατά τομείς

  δραστηριότητας και ανάκτησή του, με βάση την αρχή ο ρυπαίνων και ο χρήστης πληρώνουν
- Εξασφάλιση της ενεργού συμμετοχής όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων των μη κυβερνητικών οργανώσεων και των τοπικών κοινοτήτων, στις δραστηριότητες διαχείρισης των υδάτων
- Διασφάλιση και ενίσχυση της συμμετοχής του κοινού στη λήψη αποφάσεων

(Μίχας, Μαμάσης 2010)



Εικόνα 2.4: Χάρτης της επαναφοράς πλημμυρικού κινδύνου της περίοδο 1987-2002

(Πηγή: European Spatial Planning Observation Network)

Ο χάρτης παρουσιάζει την επαναφορά πλημμυρικού κινδύνου βασισμένου σε έναν μέσο αριθμό μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων στις περιοχές NUTS3 την περιοδο 1987-2002. Παρατηρούμε ότι η περιοχή της Αττικής είναι μέτριου επιπέδου ίδιου όμως με περιοχές όπως ο ευρύτερος νομός Θεσσαλονίκης αλλά και ο Έβρος.

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν ευρύτερα στην Κοινότητα διαδικασίες οι οποίες έχουν σαν στόχο την προστασία διατήρηση και ανάπτυξη των υδατικών πόρων και θεωρείται αναγκαίο και η Ελλάδα να προσαρμόσει τις διαδικασίες υδρολογικού σχεδιασμού σε αυτές.

2.3. Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας

Κατά την εκτέλεση της εργασίας τα δεδομένα των χρονοσειρών που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από τον ιστότοπο του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθήνας. Κρίνεται επομένως απαραίτητο να γίνει μια σύντομη παρουσίαση του και των σταθμών μέτρησης.

Το ΥΠΑ παρέχει υδρολογική πληροφορία και λειτουργεί από το ΕΜΠ. Πρόκειται για την εξέλιξη του υδρομετεωρολογικού δικτύου ΜΕΤΕΟΝΕΤ και προσφέρει πρόσβαση σε μια μοναδική βάση δεδομένων, η οποία σταδιακά θα ενσωματώσει επιπλέον σταθμους και υδρολογικές μετρήσεις συμπεριλαμβανομένων και αυτών της Πειραματικής Λεκάνης της Αθήνας- XBasin. Μας σίνεται η δυνατότητα να προσδιορίσουμε τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς στον διαδραστικό χάρτη, να κατεβάσουμε ιστορικές χρονοσειρές και να χρησιμοποιήσουμε εξελιγμένες εφαρμογές για την στατιστική ανάλυση των επιλεγμένων υδρολογικών δεδομένων.

Το Δίκτυο υδρολογικής παρακολούθησης του ΕΜΠ λειτουργεί από το 2005 και αποτελείται από πάνω από 10 σταθμούς τοποθετημένους στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής και οι οποίοι μετρούν περιβαλλοντικές παραμέτρους υδρομετεωρολογικού ενδιαφέροντος, όπως το ύψος βροχής, την θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, την εξατμισοδιαπνοή, την πίεση του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία και διάρκεια και την κατεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου.

Για την επιλογή τοποθέτησης των σταθμών ακολουθήθηκαν τα παρακάτω κριτήρια:

Κριτήριο υψομέτρων, προκειμένου να αποφευχθούν αποκλίσεις από την πραγματική ποσότητα κατακρήμνισης

Ασφάλεια, την ευκολία των κριτηρίων πρόσβασης και των υποδομών, έτσι ώστε κάθε σταθμός να τοποθετείται κοντά σε καλά φυλαγμένα δημόσια κτίρια

Τοπογραφικά κριτήρια, όπως ορίζεται από τις απαιτήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας - WMO

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του WMO, για την παρακολούθηση των καιρικών φαινομένων σε τοπική κλίμακα (π.χ. καταιγίδες), η τοποθέτηση των σταθμών θεωρείται μείζονος σημασίας, δεδομένου ότι η ανακρίβεια των μετρήσεων που οφείλονται σε ανεπαρκή αντιπροσωπευτικότητα, μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αναμενόμενη από κάθε σταθμό χωριστά. Ως εκ τούτου, το εύρος του κάθε σταθμού δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 10 km στο μέγιστο.

Όλοι οι σταθμοί τοποθετούνται στο έδαφος με λείες πλαγιές, καλυμμένοι με γκαζόν, ή μια επιφάνεια αντιπροσωπευτική της γειτονικής περιοχής, και περιβάλλεται από περίφραξη, προκειμένου να αποφευχθούν καταπατήσεις.

Οι θέσεις επιλέχθηκαν ώστε να είναι μακριά από τα δέντρα, κτίρια, τοίχους ή άλλα εμπόδια στο παρόν, καθώς επίσης και στο μέλλον. Η απόσταση από όλα τα εμπόδια από τα βροχόμετρα επιλέχθηκε να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το ύψος του εμποδίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του WMO.

Εκτός από τα βροχόμετρα, όλοι οι άλλοι αισθητήρες τοποθετούνται σε ένα ανοξείδωτο ιστό 6 μέτρων, που υπολογίζει ταχύτητες ανέμων έως και 150 κόμβων και με το απαραίτητο, από τις ελληνικές διατάξεις, σύστημα προστασίας απο αστραπές.

Για την εύρυθμη λειτουργία του κάθε σταθμού, η απαιτούμενη τροφοδοσία παρέχεται μέσω ενός ηλιακού πάνελ, το οποίο είναι εγκατεστημένο στον ιστό. Με αυτό, κάθε σταθμός έχει παροχή για περίοδο τουλάχιστον 15 ημέρες με εντελώς συννεφιασμένο καιρό.

Ένας καταγραφέας δεδομένων είναι εγκατεστημένος σε κάθε σταθμό. Η μονάδα καταγράφει σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων, που συνδέονται με αυτό και τις αποθηκεύει προσωρινά. Μέσω κινητής τηλεφωνίας, όλες οι μετρήσεις διαβιβάζονται στην κεντρική βάση δεδομένων.

Η γενική διάταξη των αισθητήρων των σταθμών είναι ως εξής:

1.Ανεμόμετρο.

2.Μετρητής Ηλιοφάνειας

3.Πυρανόμετρο

4.Ηλιοσυλλέκτης

5.Θερμογράφος

6.Ραδιόμετρο

7.Συνδεση δεδομένων

8.Δευτερεύων Βροχομετρητής

9.Πρωτεύων Βροχομετρητής

Εικόνα 2.5: Φωτογραφία από σταθμό μετρήσεων του Υδρολογικού Παρατηρητήριου Αττικής (Πηγή:http://hoa.ntua.gr/info/)

3. **Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

3.1. Εισαγωγή - Γενικά Στοιχεία

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Περιφέρεια Αττικής και πιο συγκεκριμένα στην Ανατολική Αττική. Περιλαμβάνει τους Δήμους Ραφήνας- Πικερμίου, Παλλήνης, το ανατολικό τμήμα του Δήμου Πεντέλης, και το βορειοδυτικό τμήμα του Δήμου Σπάτων-Αρτέμιδος. Υδρογραφικά το δίκτυο της Ανατολικής Αττικής ανήκει στις παρακάτω περιοχές:

- τη λεκάνη απορροής του ρέματος Ερασίνος που εκβάλλει στον όρμο Βραυρώνας,
- τη λεκάνη απορροής του ρέματος Οινόης στην περιοχή Μαραθώνα και
- τη λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας που εκβάλλει στον όρμο Ραφήνας.

Εκτός από τα προαναφερόμενα ρέματα και το πλήθος των παραρεμάτων τους, υπάρχουν και αρκετά μικρότερα που εκβάλλουν κατευθείαν στη θάλασσα των περιοχών Νέας Μάκρης, Ματιού, Ζούμπερι και Πόρτο – Ράφτη, καθώς και στον όρμο Βάρης στο Σαρωνικό, όπως τα ρέματα Κόρμπι και Κίτσι. (Οργανωτική Επιτροπή Ημερίδας «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής» Τ.Ε.Ε., 2004).

Πρόκειται για μια διαρκώς αναπτυσσόμενη περιοχή, όπως δείχνουν και τα στοιχεία του πρόσφατου απολογισμού, καθώς και η απόδοση των χρήσεων γης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μεγάλη αύξηση των αστικών και ημιαστικών περιοχών, ιδιαίτερα στα περιοχές της Ραφήνας, της Αρτέμιδας και του Ντραφιού.

Η περιοχή παρουσιάζει συχνά προβλήματα με πλημμύρες. Η αντιπλημμυρική προστασία συνεχίζει να βρίσκεται σε κακό επίπεδο, και η συνεχής επέκταση των αστικών περιοχών όπως και οι σημαντικές πυρκαγιές που έπληξαν την περιοχή το 1995, 1998, 2005 και πιο πρόσφατα την πυρκαγιά που έπληξε την βορειοανατολική Αττική το 2009 εντείνουν το πρόβλημα. Οι καταιγίδες προξενούν ολοένα και μεγαλύτερες πλημμύρες λόγω της συνεχούς οικοδόμησης της πόλης, διότι αυξάνει ο συντελεστής απορροής και μικραίνουν οι χρόνοι συγκέντρωσης.

Στο πρόβλημα συντελεί και η αχρήστευση των φυσικών απορροών και των αποδεκτών ομβρίων. Αυτό συμβαίνει είτε με μπαζώματα για το μετέπειτα χτίσιμο, είτε με την κάλυψη των ρεμάτων για πολεοδομικούς και κυκλοφορικούς λόγους.

Αναλύοντας περισσότερο τους λόγους που οδηγούν στο αποχετευτικό πρόβλημα της περιοχής μελέτης μπορούμε να τους χωρίσουμε στους εξής:

Αύξηση της δόμησης στην περιοχή μελέτης:

Η περιοχή της Ανατολικής Αττικής έχει αυξημένη οικοδομική δραστηριότητα τα τελευταία 30 χρόνια. Ιδιαίτερα με την διεξαγωγή των Ολυμπιακών αγώνων το 2004 και την κατασκευή των μεγάλων τεχνικών έργων του Αεροδρομίου Σπάτων, της Αττικής Οδού και του προαστιακού η περιοχή απέκτησε μεγαλύτερη ελκυστικότητα ως τόπος κατοικίας αλλά και εργασίας. Παρατηρείται επομένως μεγάλη αύξηση της αστικής και ημιαστικής δόμησης, καθώς η Ραφήνα αλλά και περιοχές όπως η Παλλήνη και το Πικέρμι εξελίσσονται σε αστικά κέντρα από περιοχές παραθεριστικής και μη μόνιμης κατοικίας, αυξάνοντας έτσι τις παροχές τους. Επιπλέον, περιοχές όπως το Ντράφι, η Διώνη και η Καλλιτεχνούπολη είναι πλέον μόνιμης κατοικίας με αυξημένο αριθμό κατοίκων. Στις συγκεκριμένες περιοχές αλλά και ευρύτερα στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής συνεχίζεται η πρακτική της αυθαίρετης δόμησης, με αποτέλεσμα δασικές καταπατήσεις, μπαζώματα ρεμάτων κ.ά. Ταυτόχρονα και η νόμιμη αστική δόμηση δημιουργεί μια υφιστάμενη κατάσταση η οποία δυσκολεύει την εφαρμογή των ρυμοτομικών σχεδίων και κατ' επέκταση των υδρολογικών μελετών.

Περιορισμός δασικών εκτάσεων:

Η περιοχή της Ανατολικής Αττικής έχει πληγεί τα τελευταία 30 χρόνια αρκετές φορές από καταστροφικές πυρκαγιές, με τελευταία αυτήν στην ΒΑ Αττική το 2009. Άλλες περιπτώσεις σημαντικών πυρκαγιών στην περιοχή συνέβησαν το 1995, 1998 αλλά και το 2005. Το WWf σε συνεργασία με το ΑΠΘ, έκανε μελέτη για την οικολογική αποτίμηση και την αλλαγή στις χρήσης γης της περιοχής και κατέγραψε τα εξής:

«(…)Στην ευρύτερη περιοχή της Β.Α. Αττικής παρατηρούνται πολύ σημαντικές αλλαγές, καθώς στο διάστημα των τελευταίων είκοσι ετών η πλειοψηφία των

δασών έχει χαθεί. Στην περιοχή αυτή και ειδικότερα στην Πεντέλη, τα περισσότερα

από αυτά τα δάση μετατράπηκαν σε περιοχές που καλύπτονται από θάμνους ή και από πιο χαμηλή, χορτολιβαδικού τύπου, βλάστηση γεγονός που αντανακλά κυρίως επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές στο Νομό. Την ίδια περίοδο οι οικισμοί του Νομού επεκτάθηκαν κατά 191.924 στρέμματα, περίπου μισά εκ των οποίων αφορούν επέκταση πάνω σε φυσικές εκτάσεις (δάση, δασικές και χορτολιβαδικές εκτάσεις). (…)Παρατηρούμε ότι περιμετρικά του Πεντελικού όρους και κυρίως στις ανατολικές εκθέσεις που αντικρίζουν τη θάλασσα έχουν αναπτυχθεί νέοι - ή έχουν επεκταθεί σημαντικά - παλαιότεροι οικισμοί. Χαρακτηριστικότερα είναι τα παραδείγματα στην Αγία Μαρίνα, την Καλλιτεχνούπολη, τη Διώνη, και το Ντράφι. (…)»

(«Πυρκαγιά της Β.Α. Αττικής – Αύγουστος 2009: Αλλαγές στην κάλυψη γης του Νομού και οικολογικός απολογισμός της φωτιάς», WWF Ελλάς, Αθήνα: Σεπτέμβριος 2009)

Από υδρολογικής άποψης, μπορούμε να πούμε ότι οι πυρκαγιές υποβαθμίζουν το φυσικό περιβάλλον, αυξάνοντας τον συντελεστή απορροής, την τιμή πλημμυρικής

αιχμής, αλλά και τον χρόνο εμφάνισης της στα ρέματα της περιοχής. Η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων στις περιοχές που επλήγησαν έγινε συχνότερη χωρίς η ένταση και η διάρκεια των βροχοπτώσεων να είναι απαραίτητα μεγαλύτερες.

Η αγροτική δραστηριότητα:

Η Ανατολική Αττική και ειδικότερα η περιοχή των Μεσογαίων διατηρεί ακόμα τις αγροτικές χρήσεις παρά την έντονη αστικοποίηση των κέντρων, και αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στην νότια πλευρά της Αττικής Οδού και στην κατάντη περιοχή. Η αγροτική αυτή παραγωγή αποτελεί όμως πηγή μόλυνσης για την περιοχή με προϊόντα αζώτου και φωσφορικά στοιχεία που βρίσκονται στα λιπάσματα, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του νερού. Η χρήση γεωτρήσεων κατά τους θερινούς μήνες ως εφεδρικές για την ενίσχυση του υδρευτικού δικτύου δημιουργεί εστίες μόλυνσης με νιτρικά αλλά και βαρέα μέταλλα.

Κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων και αλληλεπίδραση τους με τα αντιπλημμυρικά έργα της περιοχής:

Την περίοδο από το 2004 και μετά δεν είχαμε την αντίστοιχη οικοδομική δραστηριότητα όπως πριν απ' αυτήν, με την κατασκευή δηλαδή των μεγάλων τεχνικών έργων στην Ανατολική Αττική για τους Ολυμπιακούς αγώνες. Τα ήδη υπάρχοντα έργα δημιουργούσαν προβλήματα στο σχεδιασμό της αντιπλημμυρικής προστασίας της περιοχής μελέτης: ο Αερολιμένας Σπάτων δημιουργεί παροχές που απορρέουν στον ποταμό Ερασινό, η κατασκευή της Αττικής Οδού τέμνει κάθετα τις φυσικές ροές, και δεδομένου του μεγέθους τους τα έργα αυτά επηρεάζουν σημαντικά την απορροή των ομβρίων υδάτων στις γύρω περιοχές είτε ανακόπτοντας τη ροή τους προς τους φυσικούς τους αποδέκτες είτε επιβαρύνοντας την πλημμυρική παροχή των γύρω ρεμάτων διοχετεύοντας στην κοίτη τους τα όμβρια ύδατα που συγκεντρώνονται στην επιφάνειά τους.

Ελλείψεις στην αντιπλημμυρική προστασία:

Οι πρόσφατες πλημμύρες στην περιοχή της Ραφήνας και τα Μεσόγεια απόδειξαν ότι η αντιπλημμυρική προστασία στην περιοχή δεν έχει προχωρήσει σχεδόν καθόλου σήμερα, δέκα χρόνια μετά την ημερίδα για την αντιπλημμυρική προστασία της Αττικής. Στον απολογισμό δράσης για την αντιπλημμυρική προστασία της Αττικής για το 2012, η περιφέρεια Αττικής αναφέρει για τα υδατορέματα:

«-Μετατροπή πολλών υδατορεμάτων σε οχετούς ανεπαρκούς διατομής, εγκιβωτισμός τους με στόχο την κατάληψή τους από έργα οδοποιίας (λόγω του περιορισμού των αδόμητων εκτάσεων)

- Μετατροπή των ελεύθερων εκτάσεων σε οικοδομικά τετράγωνα με αποτέλεσμα τη μείωση του φυσικού εδάφους η οποία αφενός μειώνει την απορροφητικότητα αφετέρου αυξάνει την ταχύτητα απορροής προς τους αποδέκτες με αποτέλεσμα να καθίστανται ανεπαρκείς. Με απλά λόγια όταν έχουμε τσιμεντοστρωμένες ή ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες, επιταχύνεται η απορροή από τις ανάντη προς τις κατάντη με αποτέλεσμα ο χρόνος συρροής σε μια αστική λεκάνη να είναι μικρότερος όταν αυτή είναι πυκνά δομημένη, οδηγώντας τακτικότερα σε υψηλότερες αιχμές άρα σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα»

Επίσης αποτίμησε: «έργα περίπου **15 εκ €** στους Δήμους : Διονύσου, Γέρακα, Παλλήνης, Ωρωπού, Δροσιάς – Διονύσου, Κρωπίας , Παιανίας και Αχαρνών», ενώ αναφέρει ότι εκτελούνται «έργα περίπου **40 εκ €** στους Δήμους : Παιανίας, Ωρωπού, Βάρης Βούλας Βουλιαγμένης, Παλαιάς Φώκαιας, Σαρωνίδας, Άνοιξης».

(Από την εισήγηση του περιφερειάρχη Αττικής Γιάννη Σγουρού)

Επιπλέον, σημαντική καθυστέρηση υπάρχει στον καθαρισμό των ρεμάτων από φερτά υλικά.

Πρόσφατα έργα στην περιοχή μελέτης:

Τα έργα τα οποία έχουν ανακοινωθεί προς κατασκευή και, ως ένα σημείο, επηρεάζουν την περιοχή μελέτης είναι τα Κέντρα Επεξεργασίας Λυμάτων που έχουν

χωροθετηθεί στις περιοχές της Παιανίας, του Μαρκόπουλου και στα Βόρεια Μεσόγεια, δηλαδή μεταξύ Ραφήνας, Λούτσας και Αρτέμιδας.

Επιπλέον, έγινε ανακατασκευή και βελτίωση της Επαρχιακής Οδού 40 (ΕΟ 40 Παιανία-Σπάτα-Λούτσα), καθώς και της αποχέτευσης ομβρίων της οδού.

Ανακοινώθηκε η συνέχεια και ολοκλήρωση του έργου κατασκευής οδικού τμήματος κόμβος Ιππικού Κέντρου- Καλύβια- Λαγονήσι- Ανάβυσσος. Τέλος έχει υπογραφεί σύμβαση κατασκευής έργου αντιπλημμυρικής προστασίας του Δήμου Παιανίας.

Ανακοινώθηκαν επίσης «Εργασίες Άρσης Καταπτώσεων Πρανών Ρεμάτων Περιφερειακής Ενότητας Ανατολικής Αττικής προϋπολογισμού € 1.000.000. Πρόκειται για στοχευμένες εργασίες που θα πραγματοποιηθούν σε επικίνδυνα σημεία ρεμάτων, στα οποία έχουν δημιουργηθεί καταπτώσεις πρανών (κυρίως από τις πλημμύρες του προηγούμενου χειμώνα) σε τη χρήση σαρζανέτ, ώστε να αποτραπεί περαιτέρω επιδείνωση της υπάρχουσας κατάστασης.»

(Από την ανακοίνωση της Αντιπεριφερειάρχη Ανατολικής Αττικής με θέμα: Έργα που εντάχθηκαν στον προϋπολογισμό του 2014, στο διαδίκτυο: http://www.patt.gov.gr/main/index.php?option=com_content&view=article&id=8473%3A------2014&catid=285%3A2012-05-24-10-38-03&Itemid=301&lang=el)

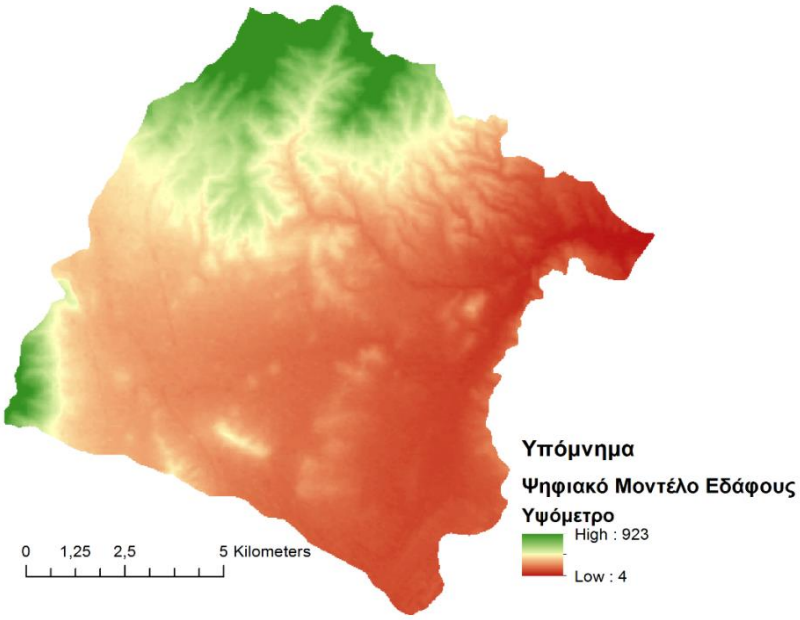
Η συνεχής αναγκαιότητα για καθαρισμούς, αποκαταστάσεις πρανών και αντιπλημμυρικών μέτρων καταδεικνύει το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η περιοχή και αυξάνει την αναγκαιότητα μόνιμων και κεντρικοποιημένων λύσεων.

3.2. Η Λεκάνη Απορροής του Ρέματος Ραφήνας

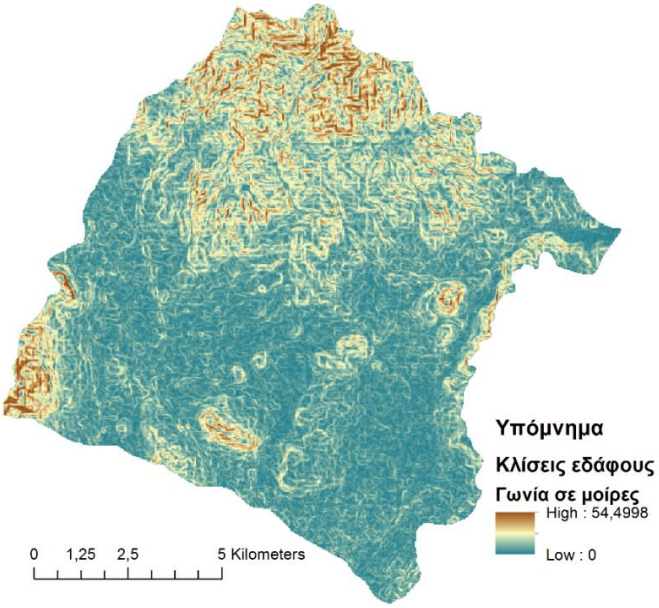
3.2.1. Γενικά Χαρακτηριστικά (ανάγλυφο-γεωγραφία-κλίσεις)

Η λεκάνη απορροής του ρέματος οριοθετείται βόρεια από το Πεντελικό όρος (950m)και στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (400m) . Στα νοτιότερα η ροή καθορίζεται από λόφους μικρότερων υψομέτρων όπως ο λόφος Μπούρα(300m) ,

Έτος και η Πετροκορφή (167m). Το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι 227m και οι κλίσεις κυμαίνονται από 0-54,5%. Παρακάτω παρατίθενται ψηφιακοί χάρτες του ανάγλυφου και των κλίσεων.



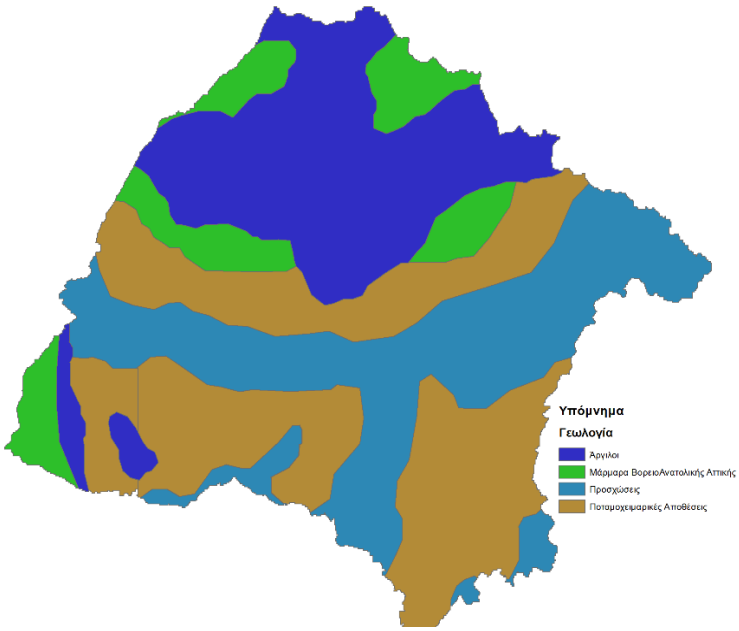
Χάρτης 3-1 Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους της λεκάνης απορροής του Ρέματος της Ραφήνας



Χάρτης 3-2 Χάρτης κλίσεων του εδάφους της λεκάνης απορροής του Ρέματος της Ραφήνας

3.2.2. Γεωλογική Ανάλυση

Μετά την ψηφιοποίηση του υδρογεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, η γεωλογία της περιοχής παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη:



Χάρτης 3-3 Ψηφιοποιημένος υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής του Ρέματος της Ραφήνας (Πηγή πρωτεύοντος χάρτη: ΙΓΜΕ, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών)

Στην περιοχή στα βόρεια παρουσιάζονται άργιλοι που έχουν πολύ χαμηλή υδατοπερατότητα ενώ στην ίδια περιοχή παρουσιάζονται σποραδικές περιοχές με μάρμαρα της Βορειοανατολικής Αττικής. Κυρίως πάντως, κατά μήκος του ρέματος και της λεκάνης απορροής του ρέματος παρουσιάζονται ποταμοχειμαρρικές αποθέσεις και προσχώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις άμεσες και έμμεσες ροές του ρέματος.

3.2.3. Ανάλυση των χρήσεων γης

Για την κατασκευή του χάρτη χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGis και πιο συγκεκριμένα το ArcMap στην τελευταία trial έκδοση 10.2. Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος παρουσίασε αρκετά προβλήματα συμβατότητας

ειδικότερα με το Hec-GeoHMS το οποίο δεν έχει ακόμα αντίστοιχη έκδοση. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το ArcGis 10.1.

Το shapefile που εισήχθη στο ArcGis προήλθε από το site http://geodata.gov.gr/ και για την δημιουργία της χρωματικής παλέτας με βάση τα πρότυπα του Corine ελήφθη το αρχείο .lyr από το εργαστήριο Φωτοερμηνείας. Μέσω της εντολής symbology συνδέθηκε το layer αρχείο με το shapefile.

Ως υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκε η νέα εντολή του ArcMap, «add Basemap». Πιο συγκεκριμένα, από το site της esri ενημερωνόμαστε ότι πρόκειται για χάρτη με ανάλυση ενός μέτρου, και ότι περιέχει εικόνες με ανάλυση 15m TerraColor για μικρές και μεσαίες κλίμακες και 2.5m Spot για τον κόσμο. Με κατάλληλη προσαρμογή στο Σύστημα Αναφοράς (εντολή Arcgis), το shapefile και το υπόβαθρο συνέπεσαν. Η χρήση του basemap βοήθησε πολύ στην εργασία καθώς πρόκειται για interactive χάρτη εναλλασσόμενης ακρίβειας με βάση το zoom.

Αναλύοντας την εξαγωγή των χρήσεων, οι κυριότερες αλλαγές είναι η επέκταση του αστικού ιστού και η μείωση των δασικών εκτάσεων.

Επέκταση αστικού ιστού:

Στις περιοχές Διώνη και Ντράφι, έγινε αλλαγή της χρήσης γης μιας και στο Corine 2000 ήταν περασμένες ως construction areas. Με βάση το φωτοερμηνευτικό κλειδί: «Ένα ποσοστό 30-80% της συνολικής επιφάνειας θα πρέπει να είναι αδιαπέρατο. Η διάκριση μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αστικού ιστού καθορίζεται από την παρουσία βλάστησης που είναι ορατή στις δορυφορικές εικόνες που δείχνουν είτε μεμονωμένες οικίες με κήπο ή διάσπαρτες πολυκατοικίες με πράσινο μεταξύ τους.».

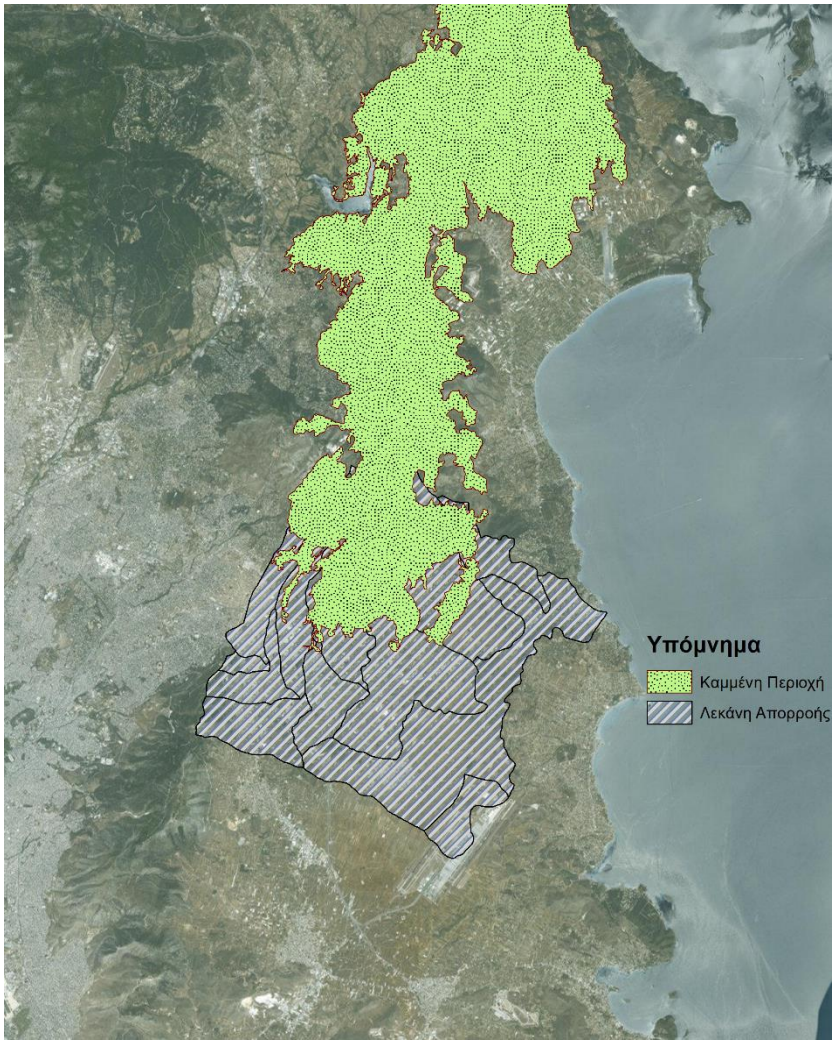
(πηγή: http://147.102.106.42/rs/wiki/index.php/1.1.2._Discontinuous_urban_fabric)

Θεωρήθηκε επομένως ότι μία περιοχή μόνιμης πλέον κατοικίας θα έπρεπε να ανήκει στην συγκεκριμένη κλάση του Corine.

Επίσης, διορθώθηκαν τα περιγράμματα των αστικών περιοχών όπως της Ραφήνας, της Καλλιτεχνούπολης, της Παλλήνης και της Αρτέμιδας.

Η μείωση των δασικών εκτάσεων:

Επί της ουσίας, οι χρήσεις γης που είναι περασμένες στο Corine 2000 λαμβάνουν υπόψιν τους τις πυρκαγιές του 1995 και 1998, επομένως οι καμένες περιοχές είναι περασμένες ως περιοχές με σκληροφυλλική βλάστηση είτε μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις, περιοχές δηλαδή όπου σύμφωνα και με την ορνιθολογική εταιρία το δάσος αναγεννιέται ή έχει αναδασωθεί. Θεωρήθηκε επιπλέον σκόπιμο να ληφθεί υπόψιν και την πυρκαγιά του 2009 μιας και στις συγκεκριμένες περιοχές οι χρήσεις γης είναι πιο υποβαθμισμένες από τις μεταβατικές δασικές εκτάσεις. Θα μπορούσαμε δηλαδή να τις θεωρήσουμε απογυμνωμένες ή αποτεφρωμένες εκτάσεις. Στο σχήμα παρατηρούμε την επίδραση της φωτιάς του 2009 στην λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας:



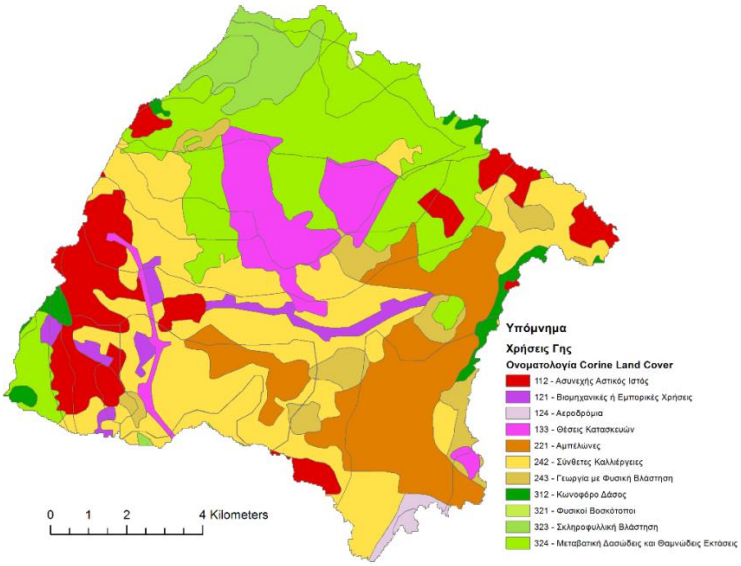
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των καμένων περιοχών από την πυρκαγιά του 2009 σε συνάρτηση με την λεκάνη απορροής (Πηγή: Οικολογικός απολογισμός της πυρκαγιάς του Ιουνίου 2012 στην Νοτιοανατολική Αττική, Κορακάκη, Κορδοπάτης, Καζάνη, 2012)

Γενικότερα, πλέον οι δασικές εκτάσεις μικρό ρόλο θα παίξουν στην εξαγωγή των συντελεστών CN μιας και είναι η μικρότερη σε έκταση χρήση γης. Αντίθετα οι δασικές περιοχές αντικαθίστανται με χορτολιβαδικές εκτάσεις ή περιοχές ποώδους και σκληροφυλλικής βλάστησης.

Η τρίτη κατηγορία χρήσης γης η οποία εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης χωρίς να έχει ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις κατά τη διάρκεια των ετών, είναι η αγροτική γη. Πρόκειται για καλλιέργειες ελιών, αμπελιών αλλά και για σύνθετα συστήματα καλλιέργειας δηλαδή μωσαϊκό από διάφορα είδη ετήσιων και μόνιμων καλλιεργειών, λιβαδιών και άλλων.

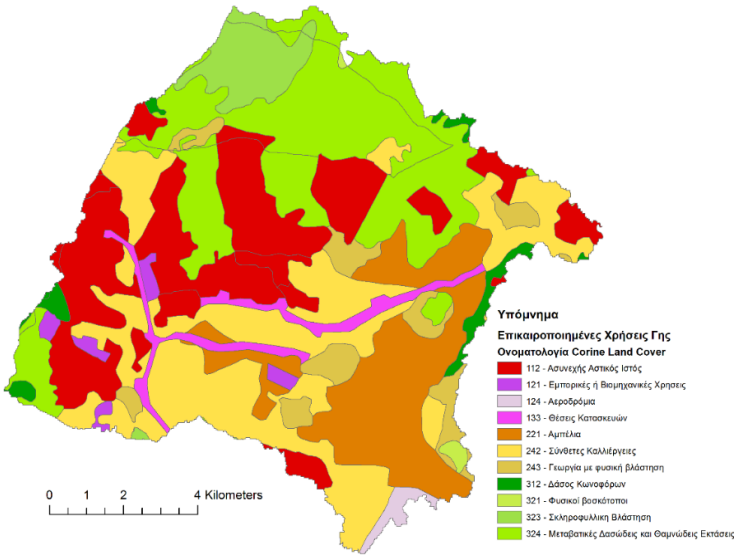
(πηγή: περιγραφή των τύπων κάλυψης γης, Ορνιθολογικής εταιρίας)

Οι χρήσεις γης πριν από τις αλλαγές:



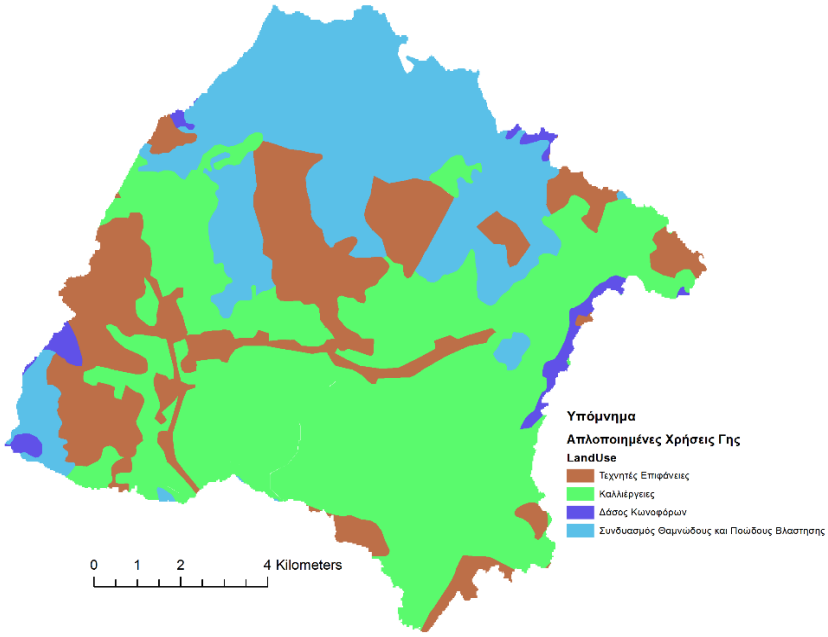
Χάρτης 3-4 Χάρτης απεικόνισης των χρήσεων γης σύμφωνα με το αρχείο του Corine Land Cover 2000

Οι χρήσεις γης μετά τις αλλαγές:



Χάρτης 3-5 Απεικόνιση των επικαιροποιημένων χρήσεων γης με βάση την παρούσα κατάσταση στην περιοχή μελέτης με χρήση του υποβάθρου basemap του ArcGIS

Για την εξαγωγή των συντελεστών CN, και με βάση τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των αριθμών καμπύλης, ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας απλοποιημένος χάρτης των χρήσεων γης της περιοχής για τον οποίο οι τάξεις μειώθηκαν σε τέσσερις και πιο συγκεκριμένα: τεχνητές επιφάνειες, καλλιέργειες, δασικές εκτάσεις και θαμνώδεις και ποώδεις εκτάσεις. Ο χάρτης παρατίθεται παρακάτω:



Χάρτης 3-6 Απλοποιημένες χρήσεις γης με βάση τον αριθμό CN ως κριτήριο ομαδοποίησης

3.2.4. Εξοπλισμός στην περιοχή μελέτης (σταθμοί παροχής - βροχομετρικοί)

Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται εγκατεστημένοι σταθμοί μέτρησης της βροχόπτωσης αλλά και των παροχών από το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών στων οποίων τα δεδομένα υπάρχει πρόσβαση μέσω του ιστότοπου «hoa.ntua.gr». Παρέχονται χρονοσειρές δεδομένων καθώς και γίνεται καταγραφή των γεγονότων βροχής.

Επιπλέον, από το πρόγραμμα Fladar υπάρχουν εγκαταστημένοι σταθμηγραφικοί σταθμοί από τους οποίους συλλέχθηκαν δεδομένα παροχών για τα γεγονότα

βροχής και μετέπειτα χρήσης τους για τον έλεγχο και το καλιμπράρισμα του μοντέλου.

Χάρτης 3-7 Οι Βροχομετρικοί και σταθμηγραφικοί σταθμοί του Υδρολογικού Παρατηρητήριου Αθήνας

3.3. Προσομοίωση γεωχωρικής πληροφορίας

Στην παρούσα εργασία για την δημιουργία του μοντέλου εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GeoHMS από την εργαλειοθήκη επεξεργασίας γεωχωρικής υδρολογικής προσομοίωσης.

Μέσω της εργαλειοθήκης αυτής ο χρήστης εισάγει το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) καθώς και τον γεωλογικό χάρτη και τον χάρτη χρήσεων γης και μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα με στόχο την εξαγωγή της υδρολογικής δομής δεδομένων που αποτελεί το υδρολογικό δίκτυο.

Σύμφωνα και με το εγχειρίδιο χρήσης, έχουμε την δυνατότητα επεξεργασίας της χωρικής πληροφορίας, την καταγραφή των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και την οριοθέτηση υπολεκανών και ρεμάτων.

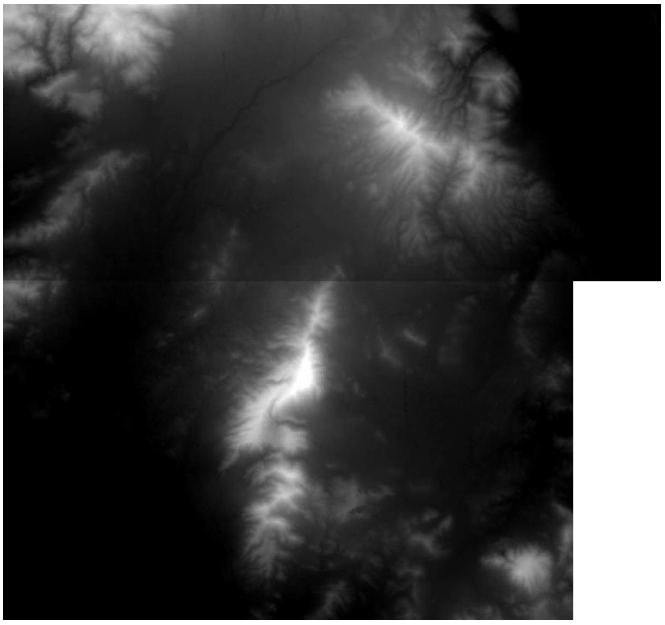
3.3.1. Γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν (dem, σχήμα λεκάνης, ρεμάτων)

Σαν αρχείο εισόδου στο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ- DEM) της SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) το οποίο διατίθεται σε ανάλυση 30m.

Επειδή η περιοχή ενδιαφέροντος εμφανίζεται σε τρεις διαφορετικές απεικονίσεις, ήταν απαραίτητη η χρήση της εντολής mosaic dataset του ArcMap με στόχο τη δημιουργία ενός ενιαίου και άρα ευκολότερα επεξεργάσιμου μωσαϊκού ΨΜΕ.

Στη συνέχεια, ήταν απαραίτητο να απομονωθεί η λεκάνη απορροής του ρέματος με στόχο στην μελέτη να μην περιληφθούν άσχετα με την λεκάνη ρέματα και υποδομές. Σ' αυτή την διαδικασία μεγάλη χρησιμότητα είχε η ήδη ψηφιοποιημένη λεκάνη απορροής της μελέτης των Λαζαρίδη, Ναλμπάντη καθώς και το ψηφιοποιημένο συνθετικό υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής από την προηγούμενη μελέτη. Χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο οντότητες σαν μάσκες εξαγωγής, προκύπτει το ΨΜΕ με το οποίο ξεκινάει η διαδικασία επεξεργασίας με το Geo-HMS.

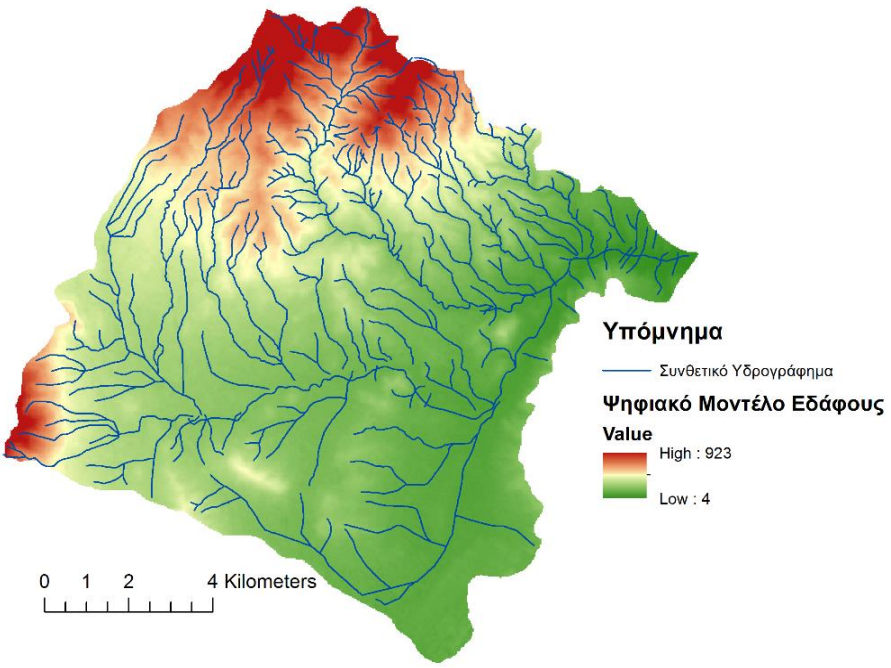
Τα ΨΜΕ όπως παρέχονται από την SRTM:



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση των ΨΜΕ πριν την εκτέλεση δημιουργίας μωσαϊκού

Στην εικόνα φαίνονται και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών ΨΜΕ.

Το ΨΜΕ μετά την εισαγωγή των ψηφιοποιημένων στοιχείων και την εξαγωγή με μάσκα:



Χάρτης 3-8 Το εξαγόμενο ΨΜΕ και το υδρογραφικό δίκτυο

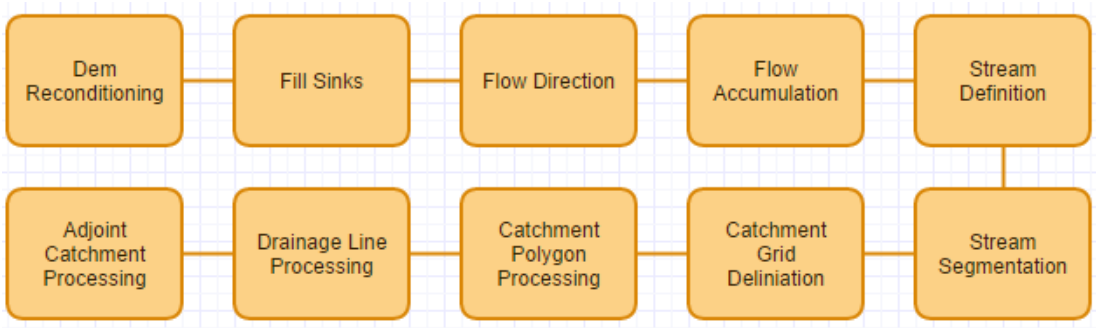
3.4. Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους - preprocessing

Για την εισαγωγή των στοιχείων στο Hec-HMS η διαδικασία ξεκινάει από την επιλογή του preprocessing στο αντίστοιχο μενού του GeoHMS.

Εικόνα.3.3 Η εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS

Έτσι δίνεται η δυνατότητα επεξεργασίας του ΨΜΕ με στόχο την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, με μια σειρά εντολών η διαδικασία των οποίων παρουσιάζεται στο διάγραμμα.

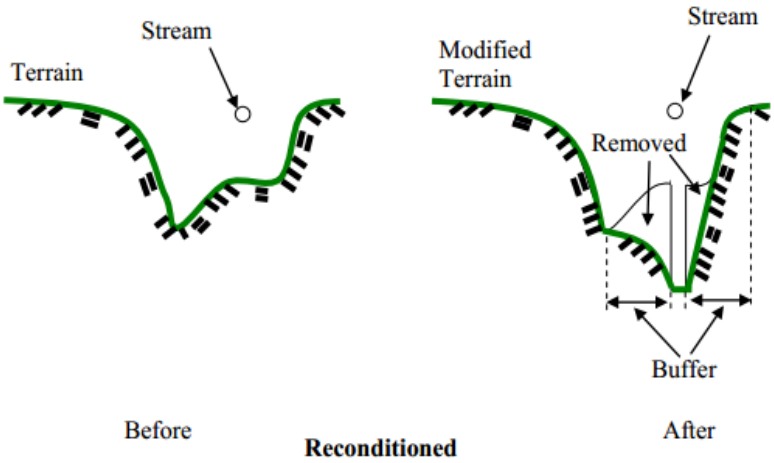
3.4.1. Ανάλυση διαδικασίας εντολών



Εικόνα 3.4: Το διάγραμμα ροής της επεξεργασία του ΨΜΕ για την εξαγωγή του μοντέλου

Η κάθε εντολή θα επεξηγηθεί σύντομα καθώς τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα παρακάτω:

Dem Reconditioning: Πρόκειται για την επιβολή ενός ήδη σχεδιασμένου συνθετικου υδρογραφήματος πάνω στο ΨΜΕ με στόχο καλύτερα αποτελέσματα κατά την διαδικασία. Πρόκειται για ένα «κάψιμο» των στοιχείων με σκοπό την διόρθωση τυχόν υψομετρικών λαθών. Η επίδραση στο ΨΜΕ φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.5: Η επίδραση της εντολής DEM Reconditioning στην επιφάνεια της ΨΜΕ (Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης HEC-GeoHMS)

Fill Sinks: Δημιουργεί ένα νέο ΨΜΕ το επονομαζόμενο και υδρολογικό ΨΜΕ στο οποίο έχουν διορθωθεί τυχόν κοιλώματα και τάφροι με βάση το υψόμετρο των περιβάλουσων περιοχών.

Flow Direction: Καθορίζει την κατεύθυνση της καθόδου με την μεγαλύτερη κλίση για κάθε φατνίο της επιφάνειας.

Flow Accumulation: Καθορίζει τον αριθμό των ανάντη φατνίων που ρέουν σε ένα συγκεκριμένο κελί.

Stream Definition: Κατηγοριοποιεί τα κελιά με συγκέντρωση ροής μεγαλύτερη του κατωφλίου που καθορίζει ο χρήστης ως τμήματα του δικτύου ροών.

Stream Segmentation: Διαχωρίζει το δίκτυο ροών σε τμήματα. Τμήματα ή σύνδεσμοι θεωρούνται τα τμήματα ενός υδατορεύματος που συνδέουν δύο κόμβους.

Catchment Grid Deliniation: Δημιουργεί μια υπολεκάνη για κάθε υδατόρευμα.

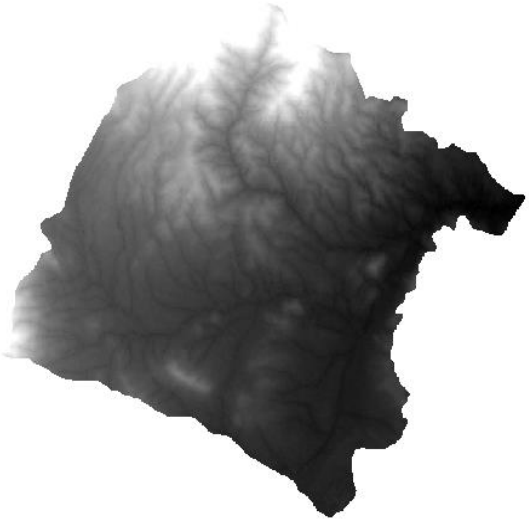
Catchment Polygon Processing: Μετατρέπει το πλέγμα του προηγούμενου βήματος σε διανυσματική μορφή

Drainage Line Processing: Δημιουργεί την διανυσματική μορφή των υδατορευμάτων.

Adjoint Catchment Processing: συναθροίζει τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε διακλάδωση.

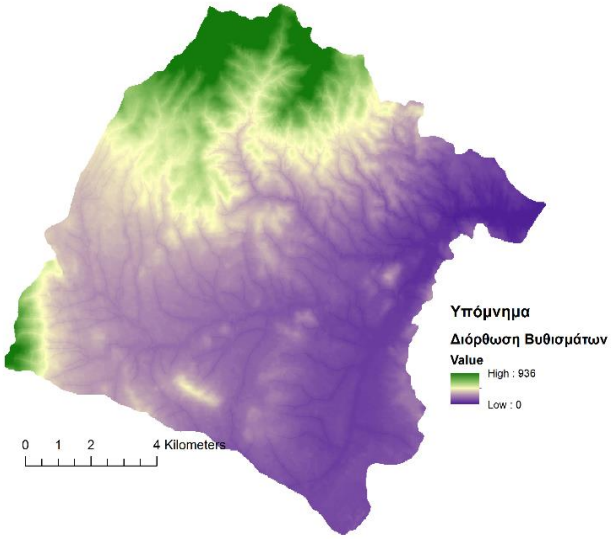
Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

- DEM Reconditioning:



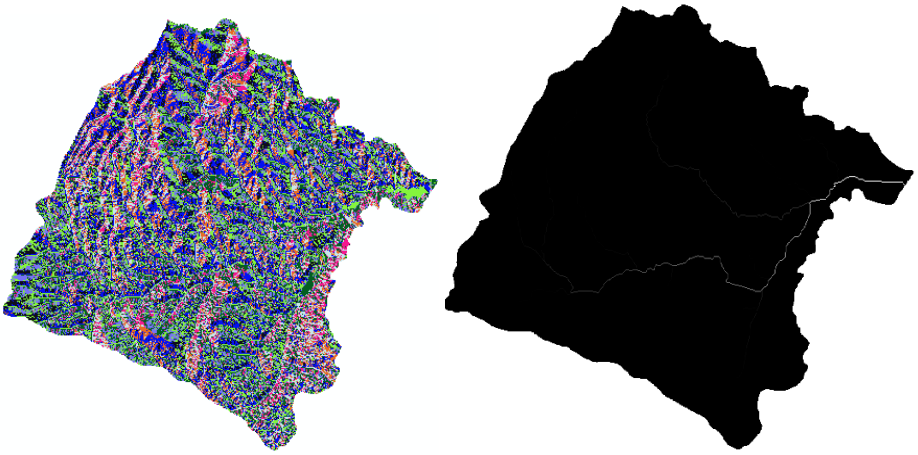
Εικόνα 3.6: Αποτελέσματα της εντολής DEM Reconditioning

- Διόρθωση Βυθισμάτων:



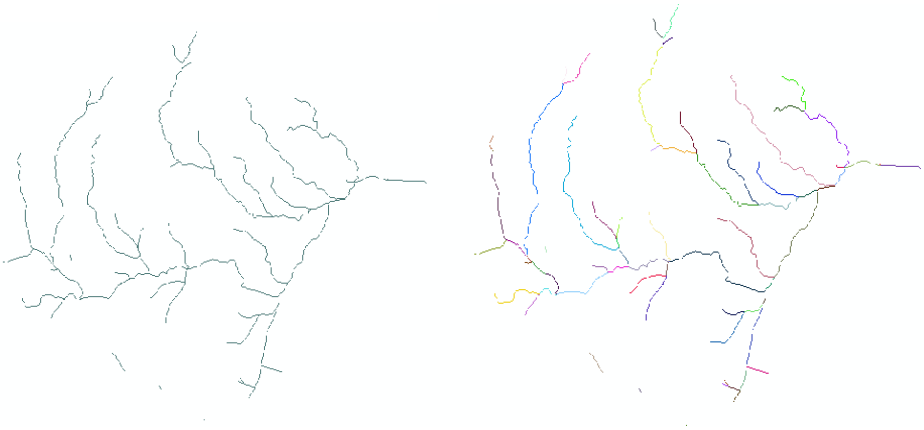
Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα της εντολής Fill Sinks

- Συγκέντρωση και Κατεύθυνση Ροής:



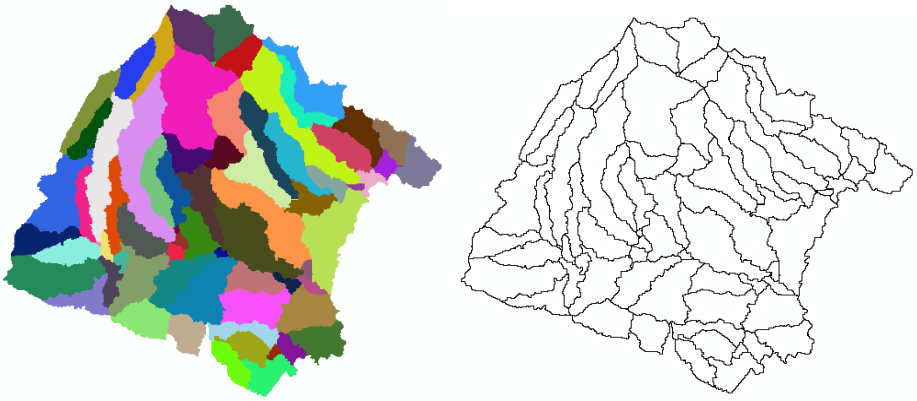
Εικόνα 3.8: Απεικόνηση των χαρτών συγκέντρωσης και Κατεύθυνσης της ροής

- Ορισμός και Κατάτμηση υδατορευμάτων:



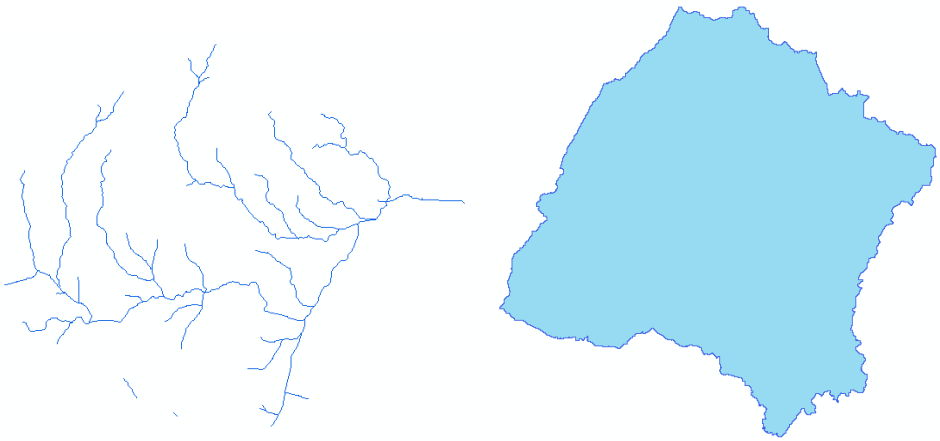
Εικόνα 3.9: Αποτέλεσμα των εντολών καθορισμού και κατάτμησης της ροής

- Οριοθέτηση υπολεκανών σε μορφή πλέγματος και σε διανυσματική μορφή:



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση οριοθέτησης των υπολεκανών σε πλεγμα και σε διανυσματική μορφή

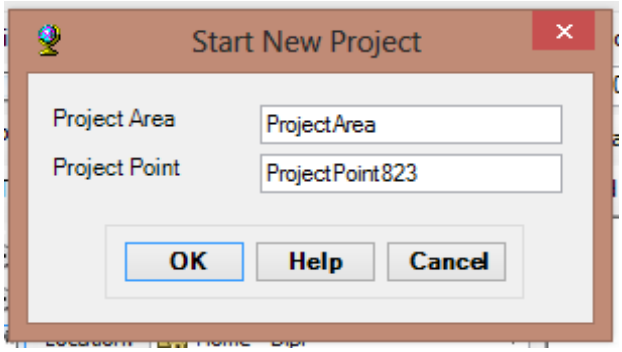
- Υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή και συσσωμάτωση υπολεκανών:



Εικόνα 3.11: Το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή και συσσωμάτωση των υπολεκανών

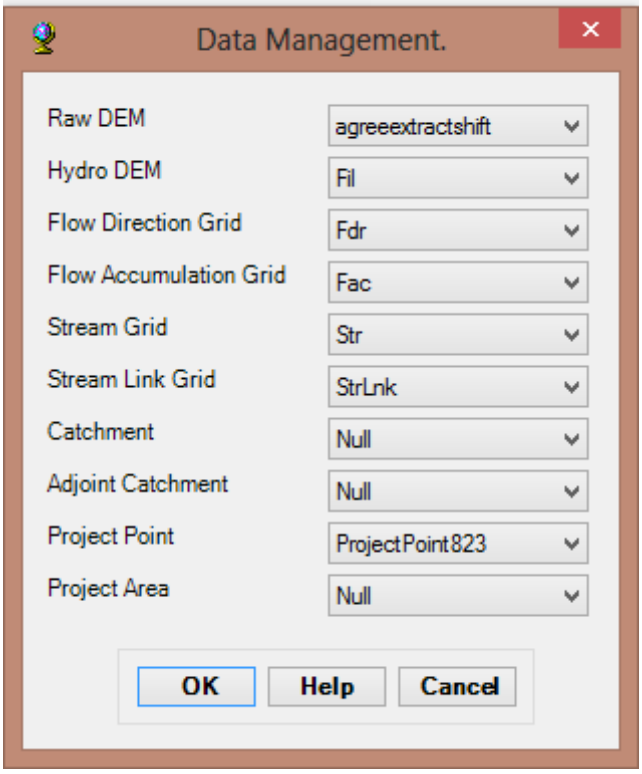
3.4.2. Επεξεργασία για τη δημιουργία στοιχείων εισόδου

Για να δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου του Hec-HMS επιλέγεται το μενού Project Setup και την εντολή Start New Project όπως φαίνεται και στο σχήμα:



Εικόνα 3.12: Το μενού δημιουργίας καινούριου Project

Στη συνέχεια ορίζονται οι συνδέσεις μεταξύ δεδομένων και στοιχείων εισαγωγής όπως φαίνεται και στο παρακάτω μενού:

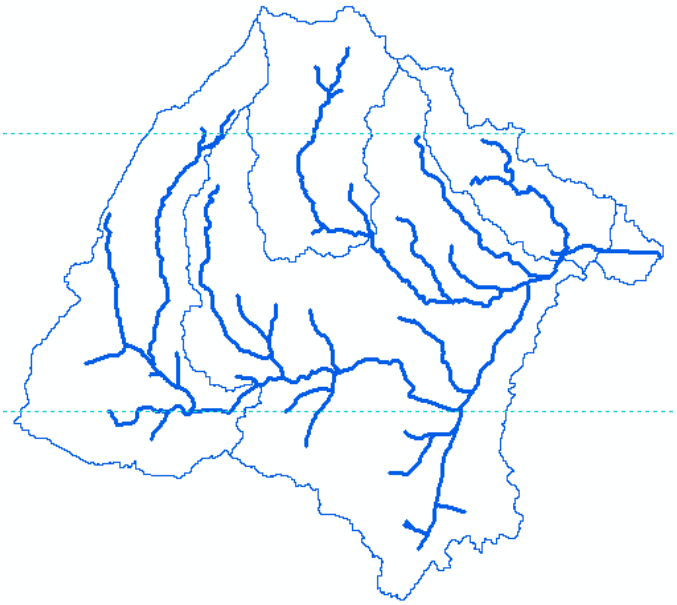


Εικόνα 3.13: Μενού σύνδεσης δεδομένων εισαγωγής

Στη συνέχεια εισάγεται το σημείο εξόδου της λεκάνης (outlet) μέσω της εντολής "add project point" και τέλος εκτελείται η εντολή Generate Project η οποία ζητά να επιβεβαιώσουμε την περιοχή μελέτης και δημιουργεί ένα καινούριο project που περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία για την εισαγωγή στο πρόγραμμα.

Τα αρχεία που δημιουργούνται είναι τα Subbasin και River με μια αυτόματη κωδική ονομασία η οποία στην περίπτωση μας ήταν 823.

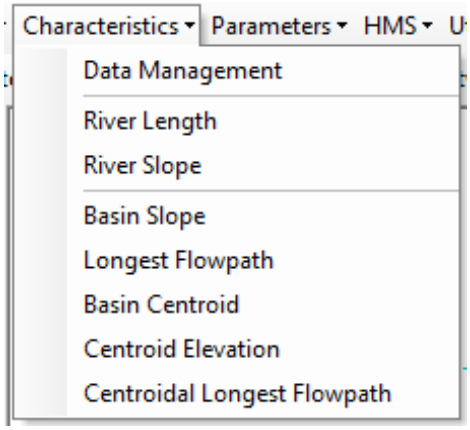
Στη συνέχεια προκειμένου να απλοποιηθεί το μοντέλο των υπολεκανών χρησιμοποιείται η εντολή Subbasin Merge με την οποία επιλέγοντας δυο υπολεκάνες τις συνενώνουμε σε μία ενιαία. Στην περίπτωση αυτή, μέσω της εργαλειοθήκης ArcHydro χρησιμοποιήθηκε η εντολή Batch Subwatershed Processing, κατά την οποία επιλέγοντας συγκεκριμένα σημεία (Batch Points) δημιουργούνται συσσωματώσεις των ανάντη υπολεκανών. Για την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν σημεία όπου υπάρχει μετρημένη ροή με στόχο τον μετέπειτα ευκολότερο έλεγχο του μοντέλου. Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο των υπολεκανών:



Εικόνα 3.14: Μοντέλο υπολεκανών και υδρογραφήματος σε διανυσματική μορφή

Δημιουργία χαρακτηριστικών λεκάνης

Μέσω του μενού Characteristics, αποδίδουμε γεωμετρικά χαρακτηριστικά στη λεκάνη και στο υδρογράφημα.

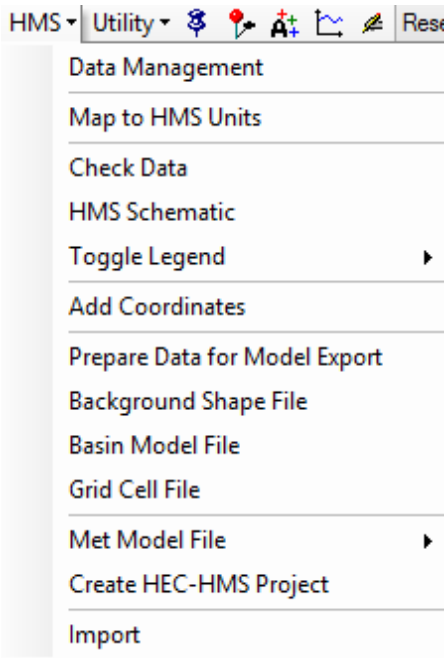


Εικόνα 3.15: Το μενού επεξεργασίας των χαρακτηριστικών των υπολεκανών

Υπολογίζεται δηλαδή το μήκος και την κλίση του κύριου ποταμού, το μεγαλύτερο μήκος ροής για την λεκάνη και τις υπολεκάνες, το κέντρο βάρους των υπολεκανών και της λεκάνης και τέλος το υψόμετρο των κεντρών βάρους και το μεγαλύτερο μήκος ροής με βαση το κέντρο βάρους (θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στον προσδιορισμό θέσης των υπολεκανών από το υπόβαθρο του Hec-HMS)

3.4.3. Προετοιμασία για την εξαγωγή αρχείων εισόδου

Τελευταίο βήμα στην εξαγωγή του μοντέλου βρίσκεται στο μενού HMS στο οποίο επιλέγεται το πρότυπο υδρολογικής προσομοίωσης και δημιουργούμε τα στοιχεία σχήματος και υπομνήματος του προγράμματος.



Εικόνα 3.16: Μενού επιλογής υδρολογικής προσομοίωσης και άλλων στοιχείων

Συνοπτικά οι εντολές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Map to HMS Units: Μετατρέπει τις μονάδες του χάρτη σε συμβατές με το HMS δηλαδή σε μετρικό σύστημα (SI).
- Check Data: Ελέγχει την ορθότητα των δεδομένων του μοντέλου
- HMS Schematic: Αποτύπωση του δικτύου και της συνδεσιμότητας των κόμβων
- Toggle Legend: Επιλογή εμφάνισης ή όχι στον χάρτη του υπομνήματος του HMS ως σημείο ή σαν εικονίδια.
- Add Coordinates: Εισαγωγή συντεταγμένων στο μοντέλο.
- Prepare Data for Model Export: Συγκρότηση του μοντέλου λεκάνης
- Background Shapefile: Δημιουργεί το υποβάθρο που θα χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα δηλαδή την υπολεκάνη και το υδρογράφημα.
- Basin Model File: Δημιουργεί το αρχείο του μοντέλου σαν σύνολο.
- Create HEC-HMS Project: Δημιουργεί το project που θα λειτουργήσει στο πρόγραμμα.

3.4.4. Παρατηρήσεις στην χρήση και την λειτουργία του HEC-GeoHMS

Κατά την διαδικασία χρήσης του προγράμματος παρουσιάστηκαν αρκετά προβλήματα συμβατότητας μεταξύ ArcGIS και HEC-GeoHMS και ειδικότερα στην συμβατότητα μεταξύ των γεωγραφικών και προβολικών συστημάτων που απαιτούν τα προγράμματα. Η παρουσίαση του χάρτη στο προβολικό σύστημα Greek Grid (ΕΓΣΑ87) δημιουργούσε συστημικά προβλήματα στην εκτέλεση των εντολών οπότε έγινε προβολή μέσω των εντολών Define Projection και Project στο γεωγραφικό σύστημα WGS 1984 το οποίο δεν παρουσίαζε προβλήματα. Παρόλαυτα, ήταν απαραίτητη η προβολή και πάλι του μοντέλου σε προβολικό σύστημα για την εισαγωγή στο HEC-HMS. Γενικότερα, αποτιμάται ότι απαιτείται αρκετή εξοικείωση με το πρόγραμμα ArcMap προκειμένου να αποφευχθούν καθυστερήσεις που οφείλονται σε απειρία και έρευνα σε εξειδικευμένες ιστοσελίδες των προγραμμάτων που πολλές φορές δεν περιείχαν λύσεις.

Τελικά, θεωρώ ότι η χρήση του προγράμματος διευκολύνει σημαντικά την διαδικασία εξαγωγής του μοντέλου λεκάνης καθώς προσφέρει σημαντικά εργαλεία προσδιορισμού χαρακτηριστικών που εναλλακτικά θα έπρεπε να προσδιοριστούν χειροκίνητα, ενώ ταυτόχρονα δίνει μεγάλη ελευθερία στην μετέπειτα επίδραση στις παραμέτρους του μοντέλου. Η χρήση και η ανάλυση των δυνατοτήτων και των εντολών του HEC-GeoHMS θα συνεχιστεί και στα επόμενα κεφάλαια καθώς χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των συντελεστών CN καθώς και κατά την διαδικασία διόδευσης του πλημμυρικού γεγονότος.

4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

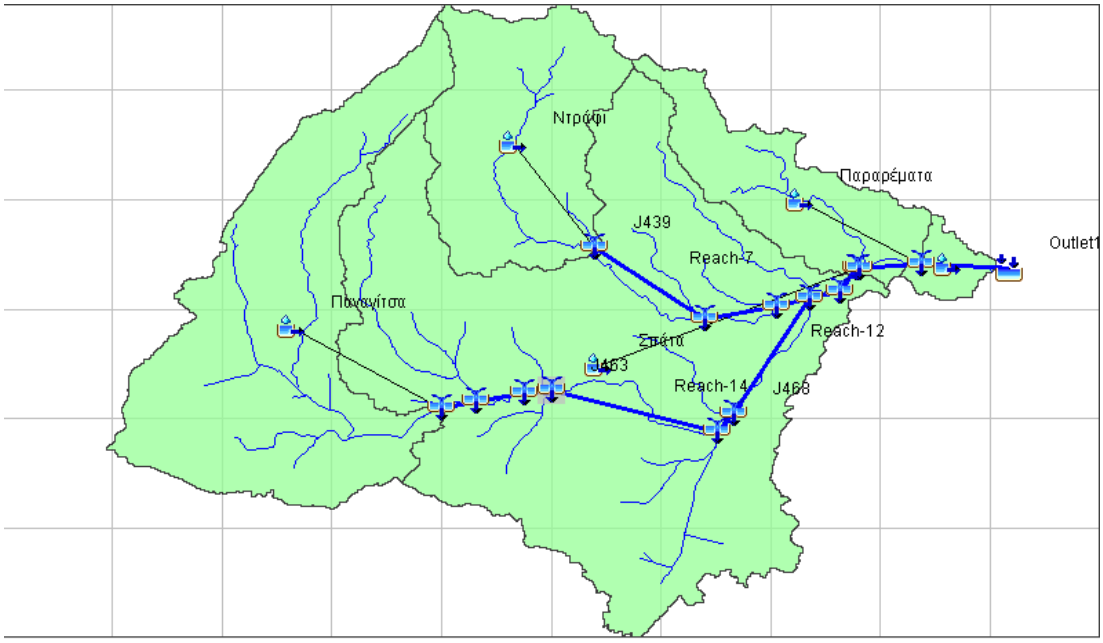
4.1. Το πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης Hec-HMS

Το πρόγραμμα HEC-HMS σχεδιάστηκε από τον Αμερικάνικο στρατό και διατίθεται δωρεάν στον αντίστοιχο ιστότοπο. Είναι σχεδιασμένο ώστε να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχόπτωσης–παροχών δενδριτικών συστημάτων λεκανών. Είναι ακόμη σχεδιασμένο ώστε να είναι εφαρμόσιμο σε ένα μεγάλο εύρος γεωγραφικών περιοχών, λύνοντας έτσι το μεγαλύτερο δυνατό εύρος προβλημάτων. Αυτό περιλαμβάνει τόσο μεγάλες λεκάνες ποταμών, όσο και μικρές αστικές παροχές. Τα υδρογραφήματα που παράγονται από το πρόγραμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας ή σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά για μελέτες διαθεσιμότητας υδάτων, αστικών αποχετεύσεων, πρόβλεψης ροών, επίδρασης της μελλοντικής αστικοποίησης, σχεδιασμού υπερχειλιστή φράγματος, μείωσης ζημιών πλημμύρας, διευθέτησης περιοχών κατάκλυσης και εφαρμογής συστημάτων.

Πρόκειται για ένα γενικευμένο πρόγραμμα μοντελοποίησης με δυνατότητα να παρουσιάζει πολλές διαφορετικές λεκάνες απορροής. Το μοντέλο της λεκάνης δημιουργείται χωρίζοντας τον υδρολογικό κύκλο σε επεξεργάσιμα τμήματα και δημιουργώντας όρια γύρω από την λεκάνη ενδιαφέροντος. Κάθε μάζα ή ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να παρουσιαστεί ως μαθηματικό μοντέλο και το πρόγραμμα μας δίνει αρκετές επιλογές μοντέλων. (Schafferberg and Flemming, 2010)

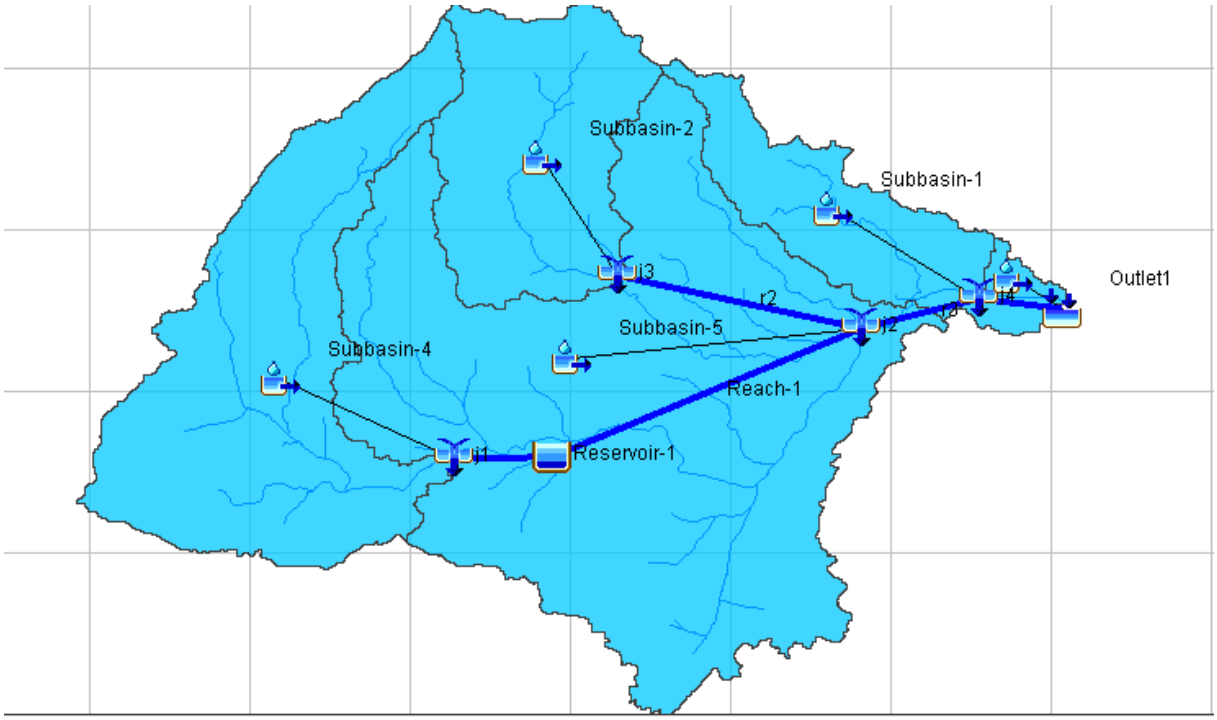
4.1.1. Το μοντέλο της λεκάνης

Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής ξεκινάει με την εισαγωγή του μοντέλου λεκάνης στο οποίο θα γίνει η εργασία. Στο μενού «File-Import-Basin Model» με την επιλογή του κατάλληλου αρχείου .basin το οποίο και είχαμε εξάγει από το GeoHMS εισάγουμε στο πρόγραμμα το μοντέλο όπως το σχεδιάσαμε στο προηγούμενο στάδιο.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση του μοντέλου εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS

Παρατηρείται ότι η περιεχόμενη πληροφορία είναι πολύ περισσότερη απ' όση χρειαζόμαστε περιέχοντας παραπάνω συνδέσμους και συνδέσεις. Έτσι εκτελέστηκε μια απλοποίηση του μοντέλου με στόχο την ευκολότερη διαχείριση των δεδομένων, την μείωση των συντελεστών επιρροής στο μοντέλο και την διευκόλυνση του χρήστη. Παρακάτω παρουσιάζεται το απλοποιημένο μοντέλο καθώς και η επεξήγηση των στοιχείων του.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση του απλοποιημένου μοντέλου της λεκάνης απορροής

Τα εικονίδια ερμηνεύονται ως εξής:

Υπολεκάνη

Δημιουργία συνδέσμου

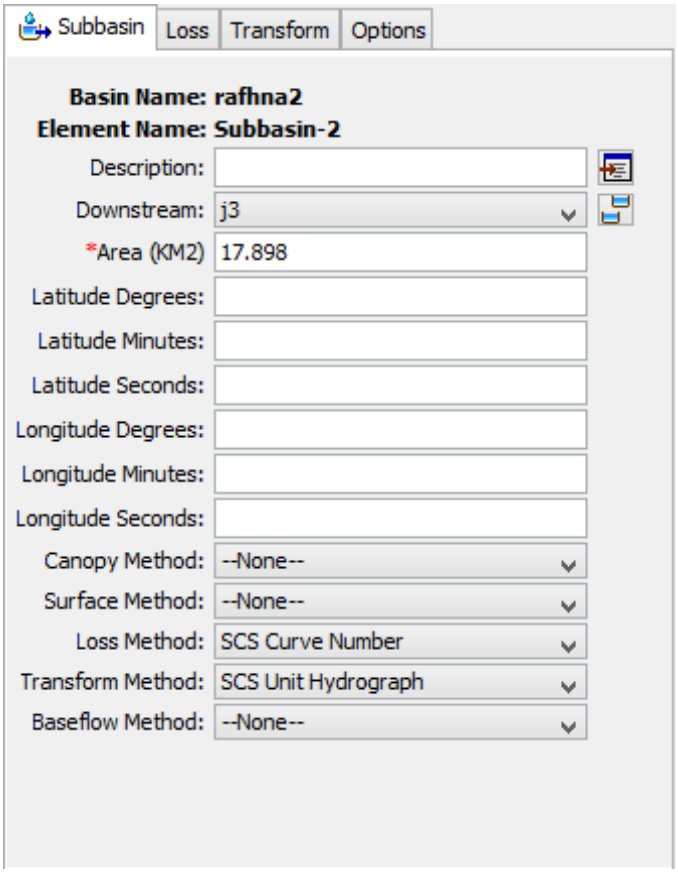
Έξοδος Υπολεκάνης

Θέση λεκάνης αποθήκευσης, λίμνης ή λίμνης φράγματος

Δημιουργία σύνδεσης μεταξύ κόμβων

Θα πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι τα εικονίδια σηματοδοτούν νοητές και όχι γεωγραφικές θέσεις καθώς τα γεωγραφικά τους στοιχεία περιέχονται στου πίνακες των χαρακτηριστικών τους, επομένως η μετακίνηση τους για διευκόλυνση

του χρήστη δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Παρακάτω φαίνεται ένας από τους πίνακες των υπολεκανών:



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση μενού υπολεκάνης

Οι υπολεκάνες όπως εισήχθησαν στο μοντέλο έχουν εμβαδόν όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-1: Εμβαδόν λεκάνης απορροής

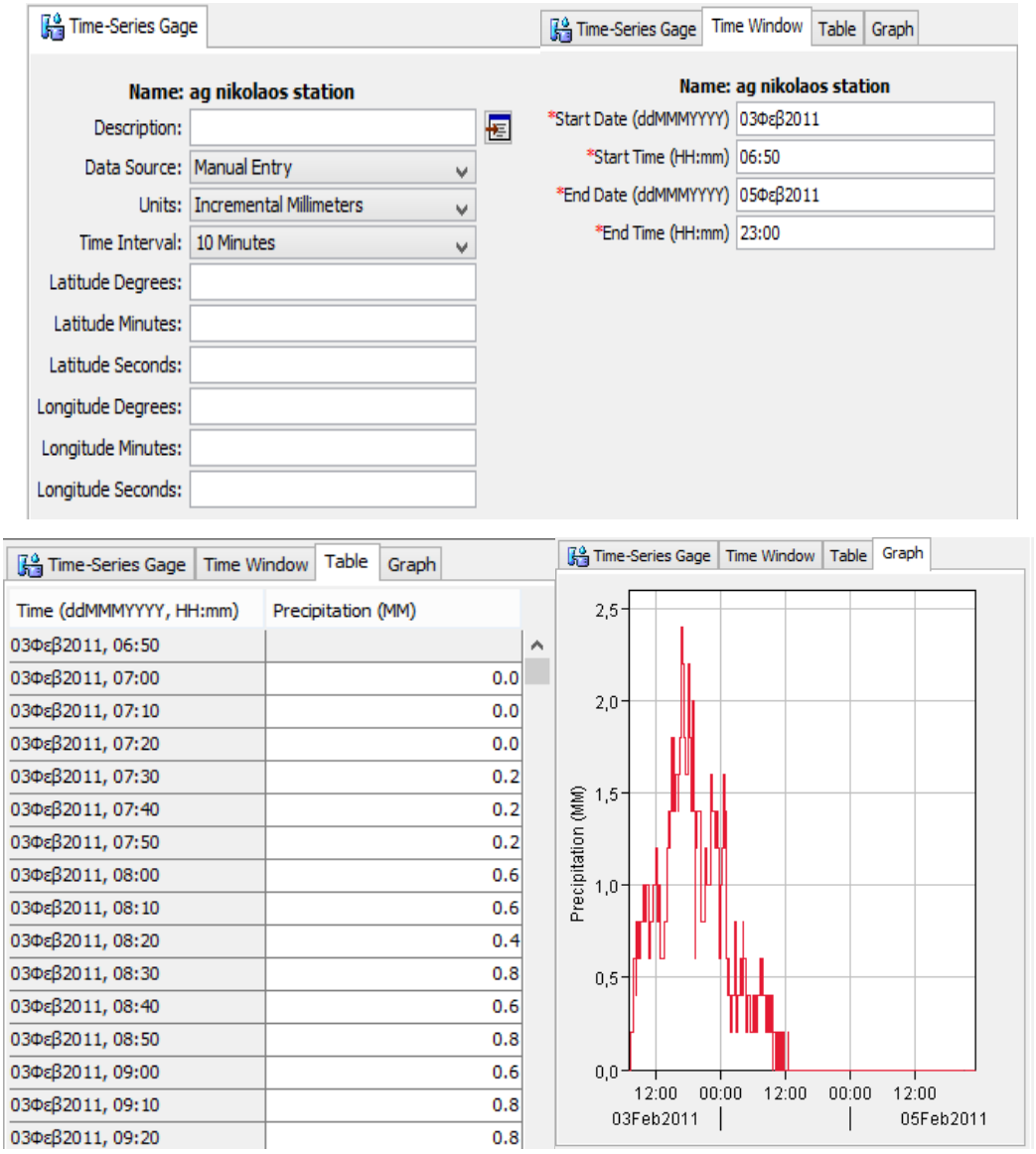
Όνομα Υπολεκάνης	Εμβαδόν (m^2)
Subbasin-1	10.684
Subbasin-2	17.898
Subbasin-3	1.90
Subbasin-4	31.602
Subbasin-5	67.944
Σύνολο	128.128

4.1.2. Οι χρονοσειρές δεδομένων

Στο manual του προγράμματος προτείνεται να συνεχίσουμε με την δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου. Παρ' όλ' αυτά επιλέχθηκε η υδρολογική προσομοίωση να γίνει με την εισαγωγή των χρονοσειρών δεδομένων καθώς από την εμπειρία προκύπτει σωστότερο. Έτσι μέσω της ιστοσελίδας «hoa.ntua.gr» προσδιορίστηκαν οι βροχομετρικοί και σταθμοί καταγραφής παροχής που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των γεγονότων πλημμύρας. Για την επαρκή καταγραφή των γεγονότων αλλά και την απλοποίηση του προβλήματος επιλέχθηκαν οι βροχομετρικοί σταθμοί Αγ. Νικόλαος, Πεντέλη- Διάβαση Μπάλας και ο μετεωρολογικός σταθμός του Πικερμίου, ενώ για την παροχή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους σταθμούς του Πικερμίου και της Ραφήνας στην θέση όπου υπάρχει ο Fladar σταθμός.

4.1.3. Εισαγωγή βροχογραφικών δεδομένων

Για την εισαγωγή των βροχογραφικών δεδομένων δημιουργήθηκαν αρχικά τρεις Precipitation Gages από το μενού Components-Time Series Data-New-Precipitation Gages. Ορίζουμε επίσης τις επιλογές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, δηλαδή τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων, τον τύπο των στοιχείων καθώς και το χρονικό βήμα της καταγραφής. Επιπλέον, εισάγοντας την χρονολογική περίοδο του γεγονότος, προσθέτουμε τα δεδομένα βροχόπτωσης μέσω των οποίων δημιουργείται η γραφική της συνάρτηση:

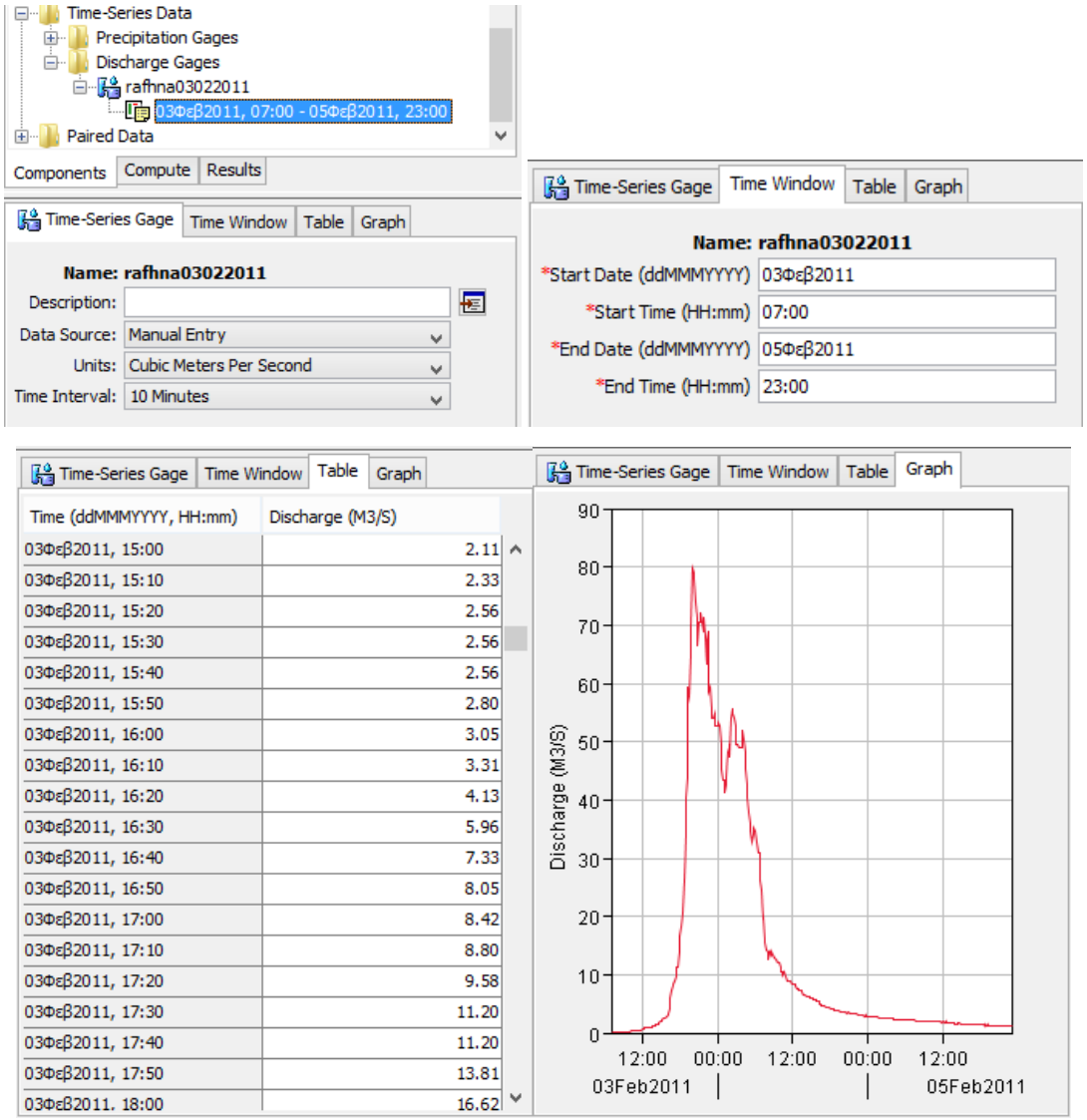


Εικόνα 4.4: Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων βροχόπτωσης στο HEC-HMS

4.1.4. Εισαγωγή δεδομένων παροχής

Αντίστοιχα με τα βροχομετρικά δεδομένα εισάγονται και τα δεδομένα της παρατηρημένης παροχής. Στην συγκεκριμένη εργασία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους σταθμούς Ραφήνα και Πικέρμι. Από το αντίστοιχο αρχείο καταγραφής της παροχής εισήχθησαν τα στοιχεία για ένα συγκεκριμένο γεγονός πλημμύρας μέσω του μενού Components-Time Series Data-Discharge Gages.

Στη συνέχεια, συνδέθηκε η μετρημένη παροχή με έναν κόμβο που προσομοιώνει τον σταθμό παροχής όπου καταγράφηκαν τα δεδομένα, στην περίπτωσή μας ο κόμβος J453 όπου και θεωρούμε ότι βρίσκεται ο μετρητικός σταθμός της Ραφήνας



Εικόνα 4.5: Διαδικασία εισαγωγής παρατηρημένης παροχής στο HEC-HMS

4.1.5. Το μετεωρολογικό μοντέλο

Επόμενο βήμα στη διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου είναι αυτή του προσδιορισμού του μετεωρολογικού μοντέλου τα περιοχής. Μέσω του μενού Components-Meteorologic Model εισάγουμε και ονοματίζουμε το μοντέλο. Η εισαγωγή των χρονοσειρών στο μοντέλο σε πρώτη προτεραιότητα έγινε διότι με την δημιουργία του εισάγονται σαν στοιχεία οι μετεωρολογικοί σταθμοί αυτόματα στο μετεωρολογικό μοντέλο.

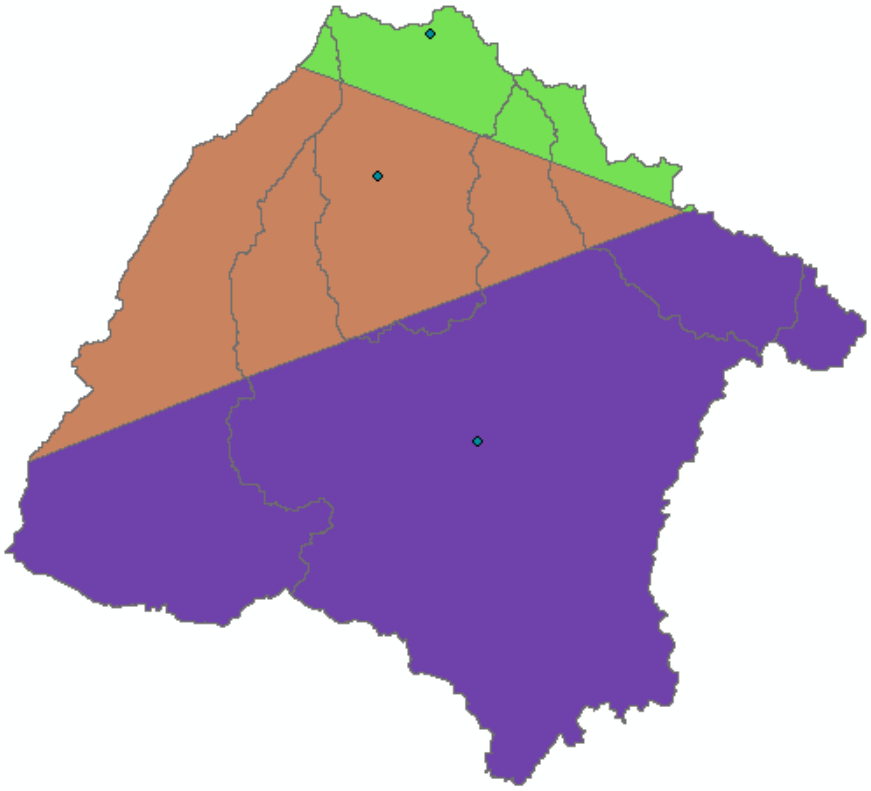
Σε σχέση με την μέθοδο που επιλέχθηκε για την προσομοίωση του μετεωρολογικού μοντέλου τα πολύγωνα Thiessen ήταν η επιλογή με τα λιγότερα απαιτούμενα στοιχεία μετρήσεων και διευκόλυνε κατά πολύ την διαδικασία.

Τα γεγονότα που επιλέχθηκαν για την εκτέλεση της προσομοίωσης ήταν στις 03/02/2011 για λόγους αναφορικότητας με τις άλλες εργασίες, στις 22/11/2012 ως πρώτο γεγονός που προσομοιώθηκε και το οποίο έδωσε ακανόνιστα αποτελέσματα λόγω δυο πλημμυρικών αιχμών στις 22/12/2012 και στις 28/01/2014.

4.1.5.1. Εφαρμογή της μεθόδου βαρών Thiessen

Για την εκτέλεση της μεθόδου βαρών Thiessen επαναχρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GIS και συγκεκριμένα η κανονική διαδικασία εξαγωγής πολυγώνων και όχι η αυτοματοποιημένη του HEC-GeoHMS.

Πιο συγκεκριμένα αναλύοντας την διαδικασία, δημιουργήθηκε ένα νέο στοιχείο στην λεκάνη απορροής το οποίο αποτυπώνει τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή και με δεδομένες τις συντεταγμένες τους σε ΕΓΣΑ87. Για την δημιουργία πολυγώνων για όλη την λεκάνη χρειάστηκε να τροποποιηθούν τα processing extents της εντολής Create Thiessen Polygons του ArcMap ενώ για την εξαγωγή της πληροφορίας με βάση το σχήμα της λεκάνης και των υπολεκανών χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές Clip του Geoprocessing καθώς και Intersect προκειμένου τα στοιχεία να αποκτήσουν δεδομένα για κάθε λεκάνη απορροής χωρισμένης με βάση το πολύγωνο. Η απεικόνιση των σταθμών έχει γίνει και παραπάνω ενώ η απεικόνιση των πολυγώνων Thiessen παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση των πολυγώνων Thiessen στη λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας

4.1.5.2. Υπολογισμός συντελεστών Thiessen

Ο υπολογισμός των συντελεστών Thiessen έγινε σε περιβάλλον Excel μιας και μετά την εκτέλεση της εντολής intersect ήταν πολύ εύκολη η εξαγωγή της πληροφορίας του ποσοστού του πολυγώνου επί της συνολικής επιφάνειας της υπολεκάνης.

Πιο αναλυτικά οι συντελεστές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-2: Υπολογισμός συντελεστών Thiessen για τις υπολεκάνες

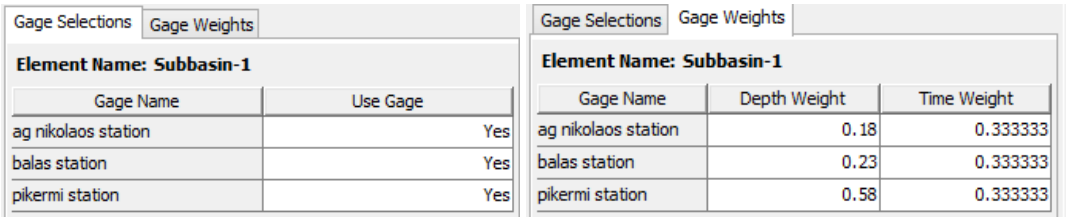
Συντελεστές	Μπάλας	Αγ. Νικόλας	Πικέρμι	Σύνολο
Subbasin-1	0,23	0,18	0,58	1
Subbasin-2	0,31	0,66	0,04	1
Subbasin-3	_	_	1	1
Subbasin-4	0,01	0,45	0,53	1
Subbasin-5	0,02	0,15	0,84	1

Για το γεγονός στις 28/01/2014 δεν υπήρχαν δεδομένα για τον σταθμό Αγ. Νικόλαος, οπότε με κατάλληλη προσαρμογή των πολυγώνων Thiessen οι συντελεστές προκύπτουν ως εξής:

Πίνακας 4-3: Υπολογισμός συντελεστών Thiessen για το επεισόδιο 28/01/2014

Υπολεκάνη	Μπάλας	Πικέρμι	Σύνολο
Subbasin-1	0,42	0,58	1
Subbasin-2	0,96	0,04	1
Subbasin-3	_	1	1
Subbasin-4	0,47	0,53	1
Subbasin-5	0,16	0,84	1

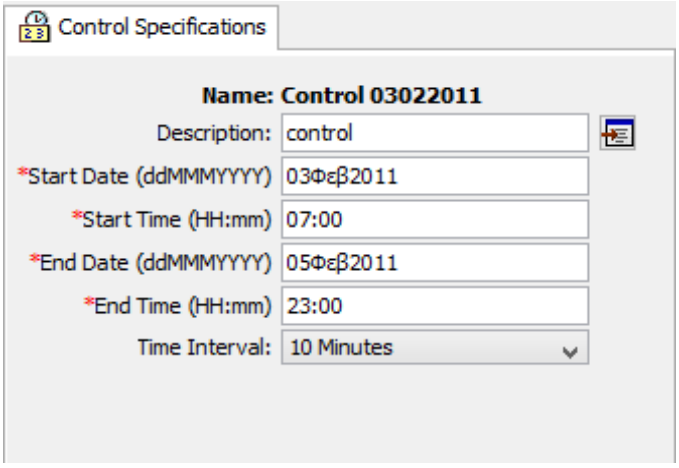
Στη συνέχεια τα δεδομένα που εξήγαμε από το ArcMap εισάγονται στο HecHMS το οποίο μας δίνει την δυνατότητα, αφού εισάγουμε το μοντέλο της λεκάνης και τις υπολεκάνες, να επιλέξουμε ποιοι μετεωρολογικοί σταθμοί επηρεάζουν και σε τι ποσοστό την κάθε υπολεκάνη. Μας δίνεται επίσης η δυνατότητα να επιδράσουμε στο χρονικό βάρος του κάθε σταθμού για την υπολεκάνη όμως στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η ισόποση κατανομή των χρονικών βαρών. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής των βαρών:



Εικόνα 4.7: Εισαγωγή δεδομένων των συντελεστών Thiessen στο HEC-HMS

4.2. Προσδιορισμός Control Specifications, χρονολογικού ελέγχου

Στο συγκεκριμένο βήμα επιλέγεται η χρονική διάρκεια και οι χρονικές λεπτομέρειες με τις οποίες το πρόγραμμα θα εκτελέσει την προσομοίωση. Είναι ένα πολύ χρήσιμο και σημαντικό βήμα και μπορεί αν εκτελεστεί πρώτο στην σειρά καθώς στη συνέχεια διευκολύνεται η εισαγωγή των χρονικών παραθύρων και για την διαδικασία των χρονοσειρών.



Εικόνα 4.8: Εισαγωγή χρονικού παράθυρο και βήματος προσομοίωσης

4.3. Εισαγωγή απωλειών λεκανών

Μετά το σχηματισμό και την πτώση της βροχής και πριν τη δημιουργία της απορροής, αρχίζουν διάφορες διαδικασίες που συντελούν σ' αυτό που ονομάζεται απώλειες της βροχής.[…] Μετά την αφαίρεση από το συνολικό ύψος βροχής των αρχικών απωλειών συγκράτησης και των απωλειών διήθησης και εφ' όσον η βροχή συνεχίζεται παρατηρείται συγκέντρωση του νερού σε επιφανειακές κοιλότητες του ανάγλυφου. Ακολουθεί η επιφανειακή αποθήκευση. Το νερό που συγκεντρώνεται σε αυτές τις κοιλότητες ή στην επιφάνεια εξατμίζεται ή διηθείται αργότερα και επομένως αποτελεί επίσης απώλεια (Τσακίρης, 1995)

Στην αναζήτηση μας επομένως για τον προσδιορισμό του ενεργού ύψους βροχής είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε τον όγκο αυτών των απωλειών.

4.3.1. Υπολογισμός απωλειών με την μέθοδο SCS

Στην παρούσα εργασία και με βάση τα δεδομένα που διατίθενται επιλέχθηκε η μέθοδος SCS για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής. Με δεδομένο ότι για την εκτέλεση της απαιτείται ο επικαιροποιημένος χάρτης χρήσεων γης και ο γεωλογικός χάρτης προσδιορίστηκε ο συντελεστής CN (Curve Number) για την κάθε υπολεκάνη.

Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες η εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής αποτελεί ουσιαστικά δύσκολο πρόβλημα. Η υπηρεσία Soil Conservation Service των ΗΠΑ παρουσίασε μια μέθοδο υπολογισμού του ύψους περισσεύματος της βροχής από μια δεδομένη βροχή με τη

βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και του υδρολογικού σύμπλοκου εδάφους καλύμματος (SCS 1972). Η μέθοδος SCS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής η την εκτίμηση της συνολικής άμεσης απορροής που προήλθε από βροχή συγκεκριμένης διάρκειας.

Σύμφωνα με την μέθοδο SCS έγινε η εκτίμηση ότι οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξάτμισης είναι 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ βροχής (h_r) και περισσεύματος βροχής $(h_1 R$).

Σύμφωνα με την μέθοδο:

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

Εκφράζοντας τις συνολικές απώλειες με μια παράμετρο, γνωστή ως αριθμός καμπύλης CN, με την εξίσωση:

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

μπορεί να προκύψει η σχέση μεταξύ h_R και h_r. (Τσακίρης, 1995)

Με βάση το συνολικό υψος των προηγούμενων πέντε ημερών τα εδάφη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση

υγρασίας του εδάφους:

Πίνακας 4-4: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους

Κατηγορία	**Συνολικό ύψος βροχής 5 προηγουμενων ημερών**	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος Βλάστησης
I	< 13	< 35
II	13 - 28	35 - 53
III	> 28	> 53

Από υδρολογική άποψη τα εδάφη κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας 4-5: Υδρολογική κατάταξη εδαφών

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

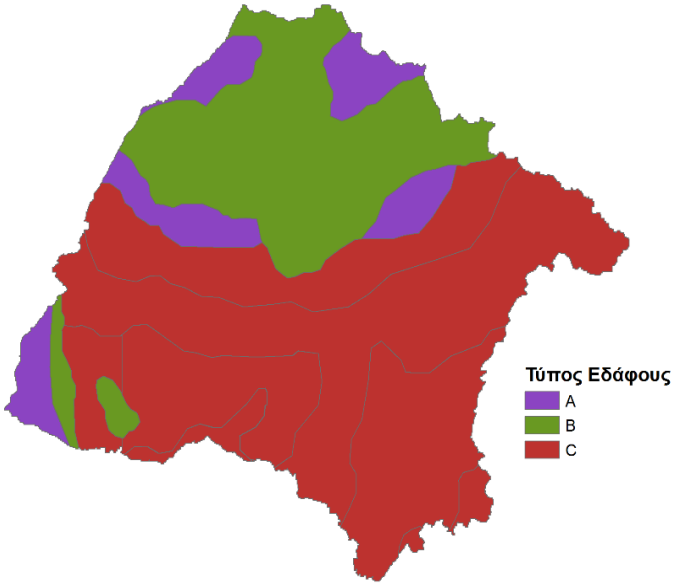
Το σύμπλοκο εδάφους φυτοκάλυψης που αντιπροσωπεύει τον τύπο του εδάφους από υδρολογική άποψη και την κατηγορία φυτοκάλυψης και χρήσης γης μπορεί να εκφραστεί με τον αριθμό καμπύλης απορροής CN που προκύπτει για την κατηγορία της αρχικής υγρασίας. (Τσακίρης, 1995)

Στην περίπτωση της εργασίας με στόχο τον καλύτερο συνδυασμό των δεδομένων και χρησιμοποιώντας τόσο την ονοματολογία του Corine Land Cover 2000 αλλά και της κατάταξης Wanielista προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αναφοράς καμπύλων CN για κάθε χρήση που συναντάμε εντός της λεκάνης απορροής μας. Με βάση και την απλοποίηση η οποία ήταν απαραίτητο να γίνει και μετά από διαδικασία διορθώσεων προκειμένου να προκύψουν λογικά αποτελέσματα:

Πίνακας 4-6: Πίνακας CN απλοποιημένων χρήσων γης

Απλοποιημένες Χρήσεις Γης	CN			
	A	B	C	D
Αστική Δόμηση	72	82	88	91
Καλλιέργειες	62	74	82	85
Δάση Κωνοφόρων	35	58	73	80
Ποώδης και Θαμνώδης Βλάστηση-Χέρσες Περιοχές	76	85	90	93

Με βάση την κατάταξη των εδαφών σε επίπεδα υδατοπερατότητας και χρησιμοποιώντας τον υδρογεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ ο χάρτης αναφοράς της γεωλογίας για την περιοχή προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 4.9: Κατάταξη εδαφών με βάση το κριτήριο υδατοπερατότητας

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη διαδικασία εξαγωγής των αριθμών CN που υπάρχει στο HEC-GeoHMS, έτσι ήταν απαραίτητη η δημιουργία του χάρτη που περιέχει πληροφορία τόσο των χρήσεων γης όσο και της γεωλογία μέσω της εντολής Instersect του ArcMap. Στην συνέχεια μέσω της εντολής Create Table

δημιουργήθηκε σε περιβάλλον GIS ο παραπάνω πίνακας αντιστοίχισης μεταξύ συμπλόκου και αριθμού CN και με την εκτέλεση της εντολής Utility-Generate CN Grid δημιουργείται ένα Raster αρχείο που περιέχει την πληροφορία. Στην συνέχεια και επειδή τεχνικό πρόβλημα εμπόδιζε την εφαρμογή της εντολής Parameters-Subbasin Parameters from Raster χρησιμοποιήθηκε η εντολή του ArcMap, Zonal Statistics from Raster στην οποία εισήχθησαν σαν δεδομένα το raster με τα CN και το σχήμα των υπολεκανών με αποτέλεσμα να υπολογισθεί ο CN ως εξής:

Πίνακας 4-7: Απόδοση αριθμών CN στις υπολεκάνες

Υπολεκάνη	CN
Subbasin-1	83
Subbasin-2	85
Subbasin-3	85
Subbasin-4	81
Subbasin-5	82

Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε να μην υπολογιστούν οι αρχικές απώλειες οι οποίες και συμπληρώνονται από το πρόγραμμα αυτόματα στα 20mm καθώς και το ποσοστό αδιαπέρατων καθώς θεωρείται αρκετά χαμηλό ώστε να επηρεάσει τις παροχές των ούτως ή άλλως υψηλών CN που προκύπτουν από την διαδικασία.

4.4. Υπολογισμός άμεσης απορροής

Υδρογράφημα θεωρείται γενικά η γραφική παράσταση της απορροής σε μια διατομή ενός ρεύματος ως συνάρτηση του χρόνου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό των υδραυλικών έργων παρουσιάζουν τα υδρογραφήματα των πλημμυρών, δηλαδή των απορροών που αποτελούνται κυρίως από επιφανειακή ροή.

Ακριβέστερα πλημμύρα είναι το γεγονός κατά το οποίο η άμεση απορροή (επιφανειακή και ταχεία υπεδάφια) είναι τόσο σημαντική ώστε η συνολική παροχή να υπερβαίνει την διοχετευτική ικανότητα του υδατορεύματος και να κατακλύζει τις γύρω περιοχές με όλες τις δυσμενείς συνέπειες που ακολουθούν.[…]

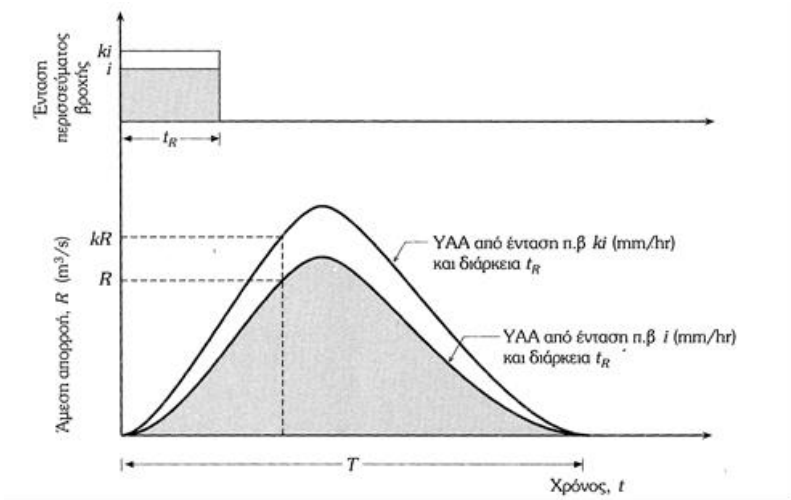
[…]Πριν την ανάπτυξη μεθόδων συνθετικού προσδιορισμού του ΜΥΓ χρησιμοποιούνταν απλές εμπειρικές εξισώσεις για να περιγράψουν τα κρίσιμα μεγέθη της πλημμύρας όπως η αιχμή της και ο χρόνος που συμβαίνει. Λόγω της ευκολίας στη χρήση αυτών των μεθόδων για την μελέτη έργων αποχέτευσης οικισμών, γηπέδων, αεροδρομίων και εργων αποστράγγισης γεωργικών εκτάσεων οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται και σήμερα σε μεγάλη έκταση.(Τσακίρης, 1995)

4.4.1. Το μοναδιαίο υδρογράφημα

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα μιας βροχής διάρκειας περισσεύματος t_R ομοιόμορφα κατανεμημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσευμα βροχής $h_R = 1cm$. Το μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥΓ) είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στη συγκεκριμένη διάρκεια περισσεύματος βροχής. Για κάθε δηλαδή διάρκεια περισσεύματος υπάρχει και ένα διαφορετικό ΜΥΓ το οποίο αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισσεύματος της ίδιας διάρκειας.

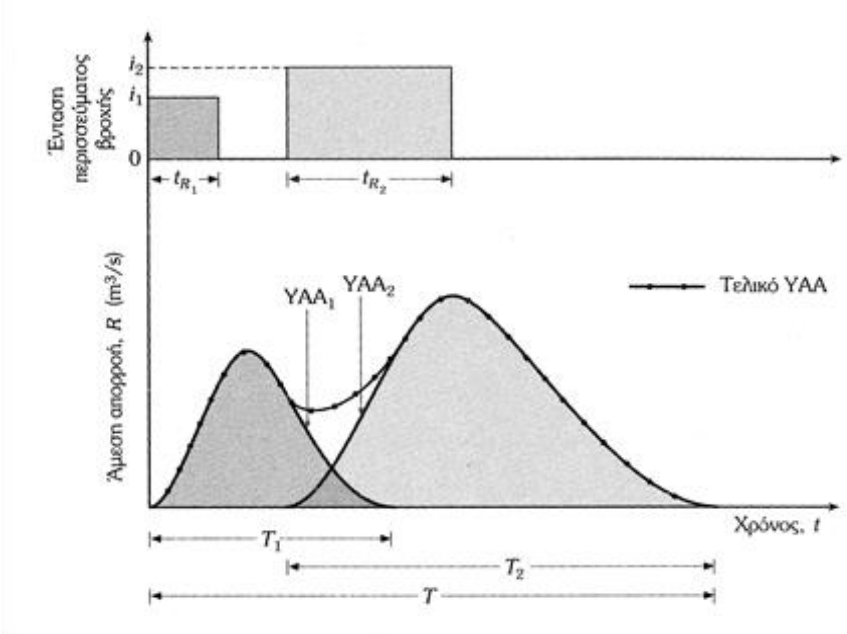
Οι αρχές που στηρίζεται η μέθοδος του ΜΥΓ είναι οι ακόλουθες:

- Αρχή της Αναλογίας: Σύμφωνα με αυτή την αρχή δύο βροχές με περίσσευμα βροχόπτωσης ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισσεύματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με τον λόγο των εντάσεων.



Εικόνα 4.10: Η αρχή της αναλογίας του ΜΥΓ

- Αρχή της Επαλληλίας: Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό ΥΑΑ που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των ΥΑΑ των επιμέρους βροχοπτώσεων.

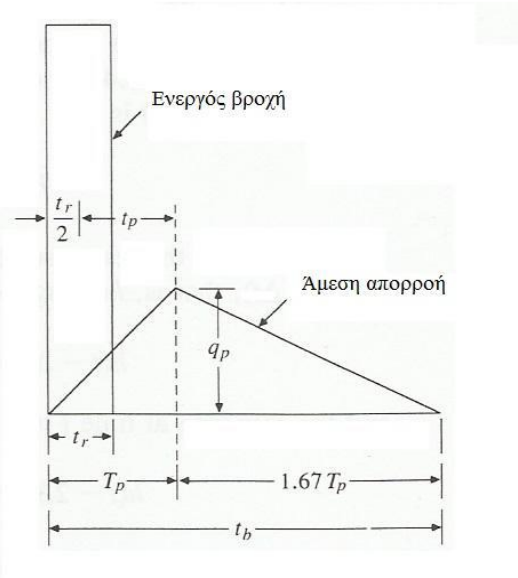


Εικόνα 4.11: Η αρχή της επαλληλίας του ΜΥΓ

4.4.2. Το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα Σχεδιασμού SCS (SCS Unit Hydrograph)

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα Σχεδιασμού SCS. Σύμφωνα με μελέτες πολλών γεγονότων και υδρογραφημάτων για μέσες λεκάνες απορροής έχει επικρατήσει η άποψη Άγγλων και Αμερικάνων ερευνητών (USDA,1972) ότι ο κατιών κλάδος μπορεί να παίρνεται ίσως με 1.67t_c .(Τσακίρης, 1995)

Με δεδομένα την παροχή αιχμής και το χρόνο συρροής για γνωστή διάρκεια ενεργού βροχοπτώσεως, δύναται να υπολογιστεί το συνθετικό αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα για τη δεδομένη λεκάνη απορροής. (Τσακίρης, 1995)



Εικόνα 4.12: Συνάρτηση ενεργού βροχής και άμεσης απορροής

Μετά από επεξεργασία μεγάλου αριθμού ΜΥ, η SCS προτείνει ως χρόνο καθόδου του υδρογραφήματος ίσο με 1.67Tp. Η περιοχή κάτω από το ΜΥ είναι ίση με την άμεση απορροή ισοδύναμης ενεργούς βροχής ύψους 1cm και ο χρόνος ανόδου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου υστέρησης tp. Έτσι μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι:

$$q_p = \frac{CA}{T_p}$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

όπου C = 2,08 (ή 483,4 στο Αγγλικό σύστημα μονάδων)

και A = το εμβαδόν τη λεκάνης απορροής σε km2

Επιπλέον , μελέτη ΜΥ από μεγάλες έως μικρές αγροτικές λεκάνες απορροής, υποδεικνύει ότι η χρονική υστέρηση της λεκάνης ισούται με

Όπου Tc = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης

Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος υπολογισμού της SCS ενώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν αρκετοί εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του χρόνου αυτού. Ο τύπος παρουσιάζεται παρακάτω:

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{7700\ H^{0.38}}$$

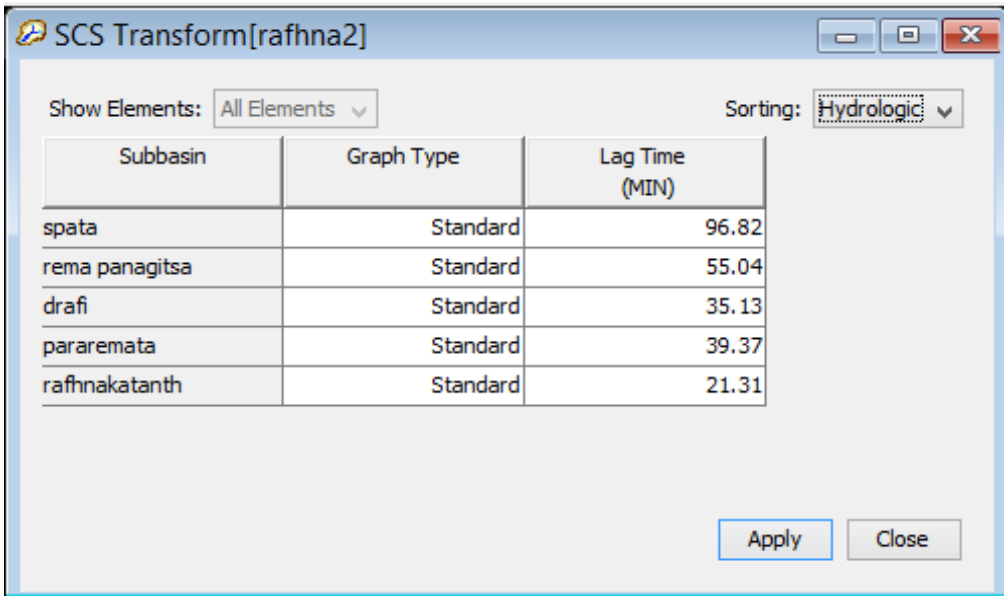
Επισημαίνεται ότι το t_c υπολογίζεται σε ώρες και τόσο το μήκος του ποταμού L όσο και το H δηλαδή η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου εξόδου της λεκάνης και ου μέσου υψομέτρου της λεκάνης υπολογίζονται σε πόδια (ft).

Για την εισαγωγή των δεδομένων στο HEC-HMS χρησιμοποιείται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4-8: Δεδομένα υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης

Υπολεκάνες	L(ft)	K(ft)	tc(hr)	tp(min)
Subbasin-1	33366,14	2286,75	1,093473	39,36503
Subbasin-2	28097,11	1833,52	0,975937	35,13372
Subbasin-3	8248,032	167,323	0,592054	21,31393
Subbasin-4	46483,92	2582,02	1,528843	55,03834
Subbasin-5	67847,77	1833,99	2,689579	96,82485

Ενώ η εισαγωγή των χρόνων συγκέντρωσης σαν στοιχείο στις υπολεκάνες γίνεται μέσω της παρακάτω εντολής:



Εικόνα 4.13: Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης

4.5. Πρότυπο Υπολογισμού Διόδευσης (Routing)

Διόδευση ονομάζεται η τεχνική που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης μια πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα (π.χ. υδατόρευμα, ταμιευτήρας, τμήμα υδρογραφικού δικτύου.

Η τεχνική της διόδευσης αποτελεί σημαντικό τμήμα των μοντέλων μετασχηματισμού των βροχοπτώσεων σε απορροές στην περίπτωση έλλειψη στοιχείων απορροής. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών απορροής από τη θέση ενός υδρομετρικού σταθμού στη θέση που μας ενδιαφέρει.

Οι μεθοδολογίες διόδευσης είναι δύο

- Η Υδρολογική βασίζει την πρόβλεψη της εξέλιξης της πλημμύρας στην εξίσωση της συνέχειας και σε μια συνάρτηση της χωρητικότητας του συστήματος. Αν ο φορέας διαμέσου του οποίου γίνεται η διόδευση είναι ταμιευτήρας απαιτείται επιπλέον και μια συνάρτηση που συνδέει την παροχή εκροής με την αποθήκευση του υδροφορέα.

  Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν δεδομένα πλημμύρας εισόδου και προβλέπουν τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας εξόδου. Οι μέθοδοι αυτές δε δίνουν πληροφορίες για την πλήρη χωροχρονική εξέλιξης πλημμύρας και δεν απαιτούν γνώσεις των χαρακτηριστικών του φορέα.

- Η Υδραυλική βασίζει την μαθηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της πλημμύρας στην χρησιμοποίηση εξισώσεων ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς (εξισώσεις Saint Venant)

  Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας δίνουν όλες τις πληροφορίες κατά την διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιούν όμως στοιχεία που σπάνια είναι γνωστά και οι παραδοχές που γίνονται για την απλοποίηση και επίλυση των εξισώσεων, ανατρέπουν σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μεθόδων αυτών.(Τσακίρης, Μπέλος)

Η υδρολογική διόδευση πλημμύρας διαμέσου τμήματος ποταμού η μέθοδος Muskingum χρησιμοποιεί την απλοποιημένη εξίσωση συνέχειας σε ένα τμήμα ποταμού (McCarthy, 1938):

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$

Όπου:

I : είναι η εισροή στο τμήμα ποταμού

Q : είναι η εκροή

S: είναι η αποθήκευση σε ένα τμήμα ποταμού

t: είναι ο χρόνος

Συνεπώς η διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής σε ένα διάστημα dt είναι ίση με τη μεταβολή της αποθήκευσης στο τμήμα για το αντίστοιχο διάστημα dt.

Η σχέση αποθήκευσης με την εισροή και εκροή εκφράζεται μετά από απλοποίηση με μια γραμμική σχέση:

$$S = K[xI + (1 - x)Q]$$

Όπου:

x: είναι το βάρος συμμετοχής της εισροής και 1-x το βάρος συμμετοχής της εκροής στην αποθήκευση του τμήματος. Το x είναι μεταξύ 0 και 1 (αδιάστατο)

K: είναι σταθερά που προσεγγίζεται από το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του τμήματος (σε μονάδες χρόνου).

Εισαγωγή δεδομένων διόδευσης στο HEC-HMS

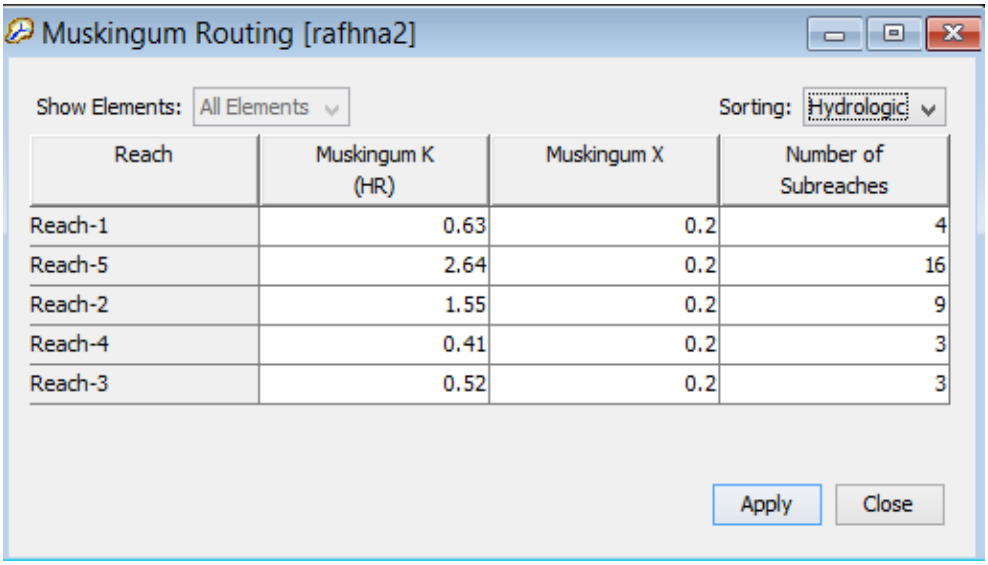
Η περιοχή μελέτης έχει απλοποιηθεί ώστε να περιέχει τέσσερα κύρια υδατορεύματα. Για να γίνει η μετέπειτα εισαγωγή του φράγματος ανάσχεσης στη θέση του φράγματος έχει τοποθετηθεί ένας επιπλέον κόμβος χωρίζοντας έτσι την βασική ροή του ρέματος Ραφήνας σε δυο τμήματα. Για τον υπολογισμό της διόδευσης εισάγονται το μήκος των τμημάτων και η ταχύτητα ροής. Για τον υπολογισμό του μήκους των υδατορευμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcMap όπου υπολογίστηκε το μήκος από κατάντη των λεκανών μέχρι την θέση του κόμβου ενώ για την ταχύτητα ροής επιλέχθηκε η v=1m/s για διευκόλυνση των υπολογισμών. Η παράμετρος x προτείνεται από την βιβλιογραφία στην τιμή 0.2.

Για τον υπολογισμό του αριθμού των Sub-Reaches ο οποίος είναι απαραίτητος, σύμφωνα με το manual χρήσης του HEC-HMS προσεγγίζεται ως ο λόγος του μήκους προς το γινόμενο της ταχύτητας επί το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, που στην εργασία είναι 10 λεπτά.

Πίνακας 4-9: Υπολογισμός δεδομένων διόδευσης υδατορευμάτων

Υδατόρευμα	L(m)	K(hr)	x	Subreaches
reach1	2269	0,63	0,2	4
reach5	9515	2,64	0,2	16
reach2	5596	1,55	0,2	9
reach3	1895	0,53	0,2	3
reach4	1491	0,41	0,2	3

Η εισαγωγή των δεδομένων στο HEC-HMS γίνεται μέσω του μενού:



Reach	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
Reach-1	0.63	0.2	4
Reach-5	2.64	0.2	16
Reach-2	1.55	0.2	9
Reach-4	0.41	0.2	3
Reach-3	0.52	0.2	3

Εικόνα 4.14: Εισαγωγή δεδομένων διόδευσης υδατορεύματος στο HEC-HMS

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι το πρόγραμμα μας δίνει επιπλέον επιλογές όσον αφορά το πρότυπο βασικής απορροής του μοντέλου αλλά και επιλογές για την εισαγωγή παραμέτρων σε σχέση με την φυτοκάλυψη, στο τύπο της επιφάνειας (συνεχής ή σε πλέγμα) αλλά και των εισροών/απωλειών των διοδεύσεων. Στην συγκεκριμένη εργασία λόγω της επιθυμίας απλοποίησης του μοντέλου και της έλλειψης μεγάλης εμπειρίας και στοιχείων επιλέχθηκε να μην συμπληρωθούν οι συγκεκριμένες παράμετροι.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

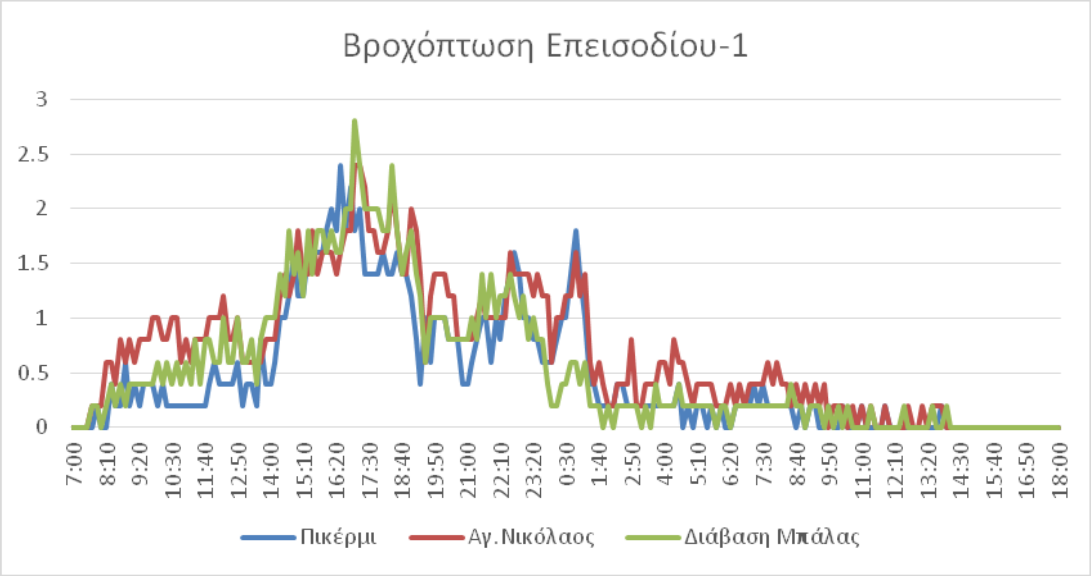
5.1. Προσομοίωση γεγονότων και αποτελέσματα

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα γεγονότα που επιλέχθηκε να προσομοιωθούν, οι γραφικές παραστάσεις των βροχοπτώσεων για όλους τους σταθμούς καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε σύγκριση με τις μετρημένες παροχές στην θέση Ραφήνα (ανάντη).

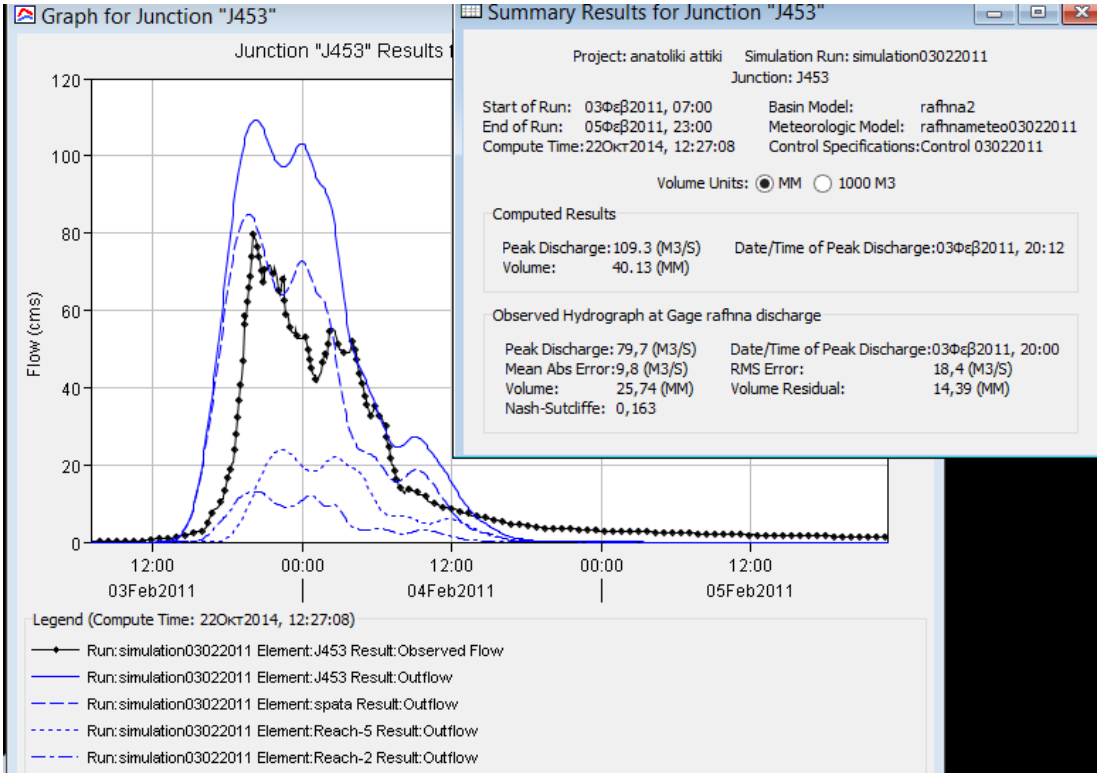
5.1.1. Επεισόδιο 1 – 03/02/2011

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται το ύψος βροχής που υπολογίστηκε από τους τρεις σταθμούς που λάβαμε υπ' όψιν μας καθώς και η χρονική διάρκεια του επεισοδίου

Πίνακας 5-1: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης του πρώτου επεισοδίου



Επιπλέον παρουσιάζεται το αποτέλεσμα από την προσομοίωση του μοντέλου ταυτόχρονα με την μετρημένη παροχή του σταθμού Ραφήνα ανάντη ο οποίος έχει προσομοιωθεί στην θέση J453 του μοντέλου:



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση της παροχής στον κόμβο Ραφήνα (ανάντη)

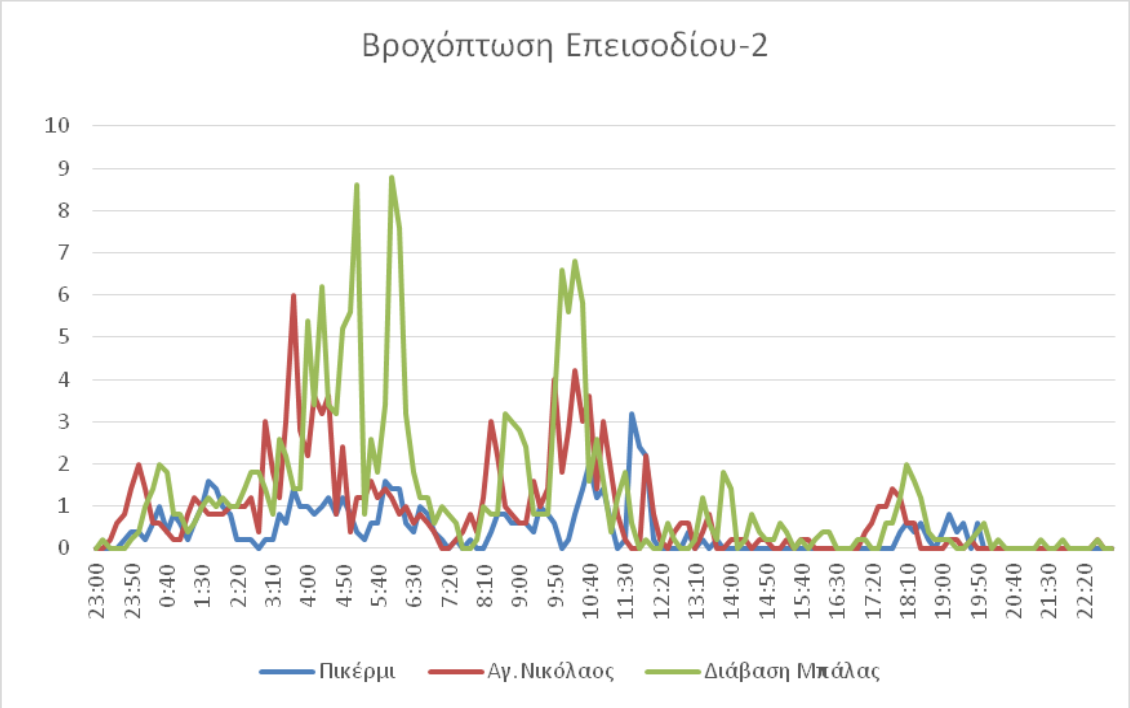
Παρατηρούμε ότι με βάση τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί η παροχή αιχμής που υπολογίζεται είναι 109.3 m3/s ενώ από την παρατηρημένη παροχή έχουμε παροχή αιχμής 79.7m3/s. Ταυτόχρονα παρατηρούνται διαφορές στον όγκο της πλημμύρας μιας και το προσομοιωμένο αποτέλεσμα είναι 47.129.000m3 ενώ το παρατηρηθέν 30.228.000m3. Παρατηρούμε όμως μια σωστή προσομοίωση του σχήματος της μετρημένης παροχής από το αδιάστατο ΜΥΓ της SCS καθώς και μια επιβεβαίωση των χρόνων συρροής, αφού οι χρόνοι εκδήλωσης της αιχμής της πλημμύρας επί της ουσίας ταυτίζονται.

Υποθέτουμε επομένως ότι η εξαγωγή των υψηλών τιμών του CN από το μοντέλο είναι αυτή η οποία δημιουργεί πολύ μεγαλύτερες παροχές προσομοίωσης για το μοντέλο.

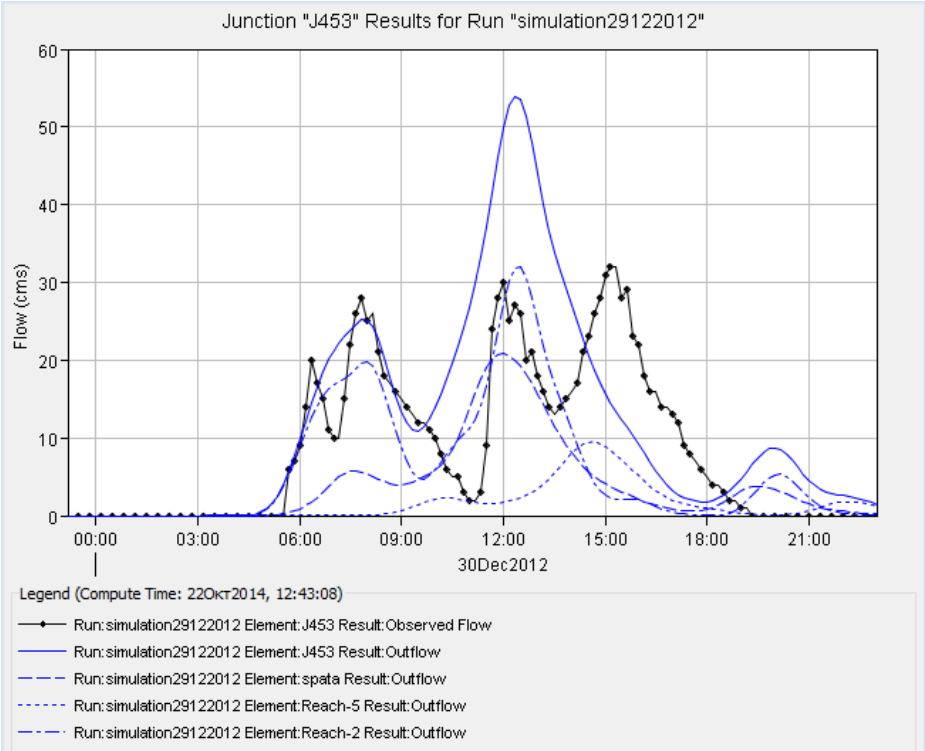
5.1.2. Επεισόδιο 2-22/12/2012

Το διάγραμμα του ύψους βροχόπτωσης παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 5-2: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης για το δεύτερο επεισόδιο



Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης τα αποτελέσματα από το μοντέλο στην θέση Ραφήνα (ανάντη) παρουσιάζονται παρακάτω:



Project: anatoliki attiki Simulation Run: simulation29122012
Junction: J453

Start of Run:	29Δεκ2012, 23:10	Basin Model:	rafhna2
End of Run:	30Δεκ2012, 23:00	Meteorologic Model:	rafhnameteo03022011
Compute Time:	22Οκτ2014, 12:43:08	Control Specifications:	control29122012

Volume Units: ○ MM ◉ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:	54.0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	30Δεκ2012, 12:20
Volume:	1019.5 (1000 M3)		

Observed Hydrograph at Gage rafhna discharge

Peak Discharge:	32,0 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	30Δεκ2012, 15:10
Mean Abs Error:	6,7 (M3/S)	RMS Error:	10,6 (M3/S)
Volume:	742,2 (1000 M3)	Volume Residual:	277,3 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe:	-0,146		

Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της παροχής για το επεισόδιο-2

Παρατηρούμε ότι πρόκειται για ένα μικρότερης έντασης επεισόδιο από το πρώτο, καθώς οι παρατηρούμενη παροχή αιχμής είναι 32 m3/s και ο όγκος του υδρογραφήματος 7.420.200m3. Οι προσομοιωμένες παράμετροι είναι 54m3/s για την παροχή αιχμής και 10.195.000m3 για τον όγκο. Βλέπουμε πως η χρόνος της παροχής αιχμής έχει μια απόκλιση τριών περίπου ωρών μεταξύ παρατηρούμενου και προσομοιωμένου.

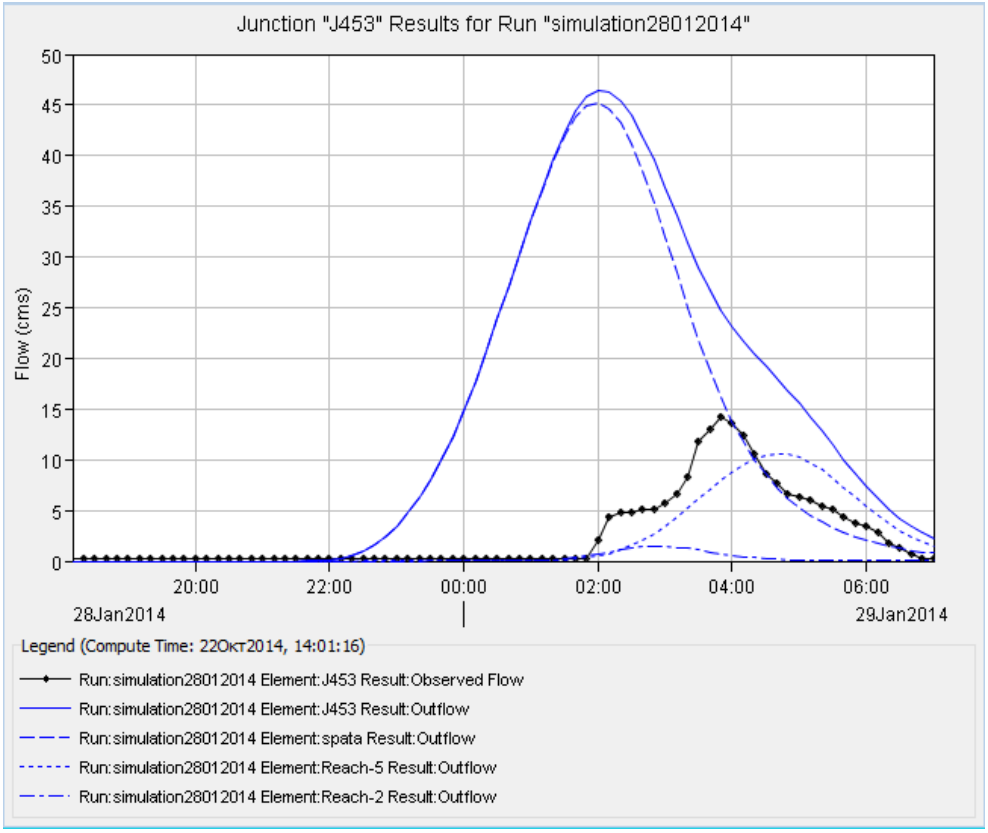
Όπως φάνηκε και από την προσομοίωση άλλων γεγονότων που δεν παρουσιάζονται στην εργασία, το μοναδιαίο υδρογράφημα SCS παρουσιάζει αδυναμίες στην προσομοίωση γεγονότων με πάνω από μία αιχμές στην παροχή. Έτσι παρατηρούμε μια λάθος εκτίμηση του χρόνου αιχμής γι'αυτό το μοντέλο. Δεν παρατηρούνται όμως σημαντικές αποκλίσεις στην εκτίμηση της παροχής αιχμής και του όγκου, παραπάνω δηλαδή από τις αναμενόμενες με δεδομένο τον υψηλό αριθμό των CN.

5.1.3. Επεισόδιο 3- 28/01/2014

Για λόγους πειραματισμού επιλέχθηκε να προσομοιωθεί και ένα γεγονός το οποίο να μην περιέχει όλους τους βροχομετρικούς σταθμούς. Έτσι με δεδομένο ότι δεν είχαμε πληροφορία για τον σταθμό Αγ. Νικόλαος στην περίοδο του γεγονότος και με τις κατάλληλες προσαρμογές στο μοντέλο, παρατηρήθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

Πίνακας 5-3: Χρονολογική εξέλιξη της βροχόπτωσης για το τρίτο επεισόδιο

Ενώ μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης τα αποτελέσματα προκύπτουν ως εξής:



Project: anatoliki attiki Simulation Run: simulation28012014
Junction: J453

Start of Run:	28Ιαν2014, 18:10	Basin Model:	rafhna2
End of Run:	29Ιαν2014, 07:00	Meteorologic Model:	meteo28012014
Compute Time:	22Οκτ2014, 14:01:16	Control Specifications:	Control28012014

Volume Units: (●) MM ( ) 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:	46.4 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	29Ιαν2014, 02:00
Volume:	5.60 (MM)		

Observed Hydrograph at Gage rafhna discharge

Peak Discharge:	14,3 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	29Ιαν2014, 03:50
Mean Abs Error:	11,7 (M3/S)	RMS Error:	18,5 (M3/S)
Volume:	1,00 (MM)	Volume Residual:	4,60 (MM)
Nash-Sutcliffe:	-23,228		

Εικόνα 5.3: Απεικόνιση της παροχής για το επεισόδιο-3

Παρατηρούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ προσομοιωμένου μοντέλου και μετρημένων στοιχείων τόσο στην αιχμή της παροχής όσο και στον πλημμυρικό όγκο ο οποίος προκύπτει 6.577.000m3, ενώ στην πραγματικότητα έχει μετρηθεί στα 1.170.000 m3. Θεωρούμε ότι στην περίπτωση αυτή η διαμόρφωση του

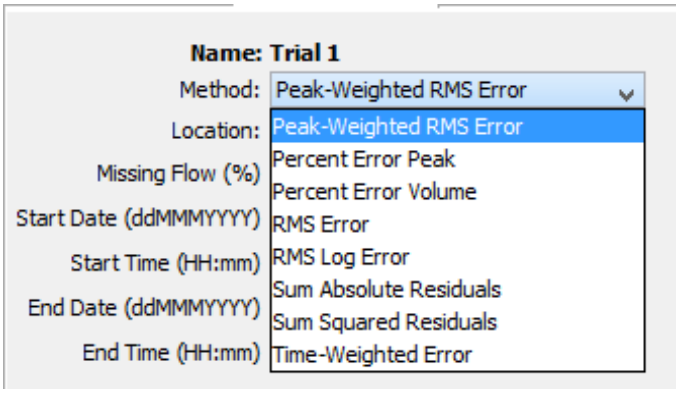
μετεωρολογικού μοντέλου και ιδιαίτερα τα ποσοστά που προκύπτουν από τα πολύγωνα Thiessen στην υπολεκάνη-5 δηλαδή την μεγαλύτερη υπολεκάνη του μοντέλου, είναι αυτά που επί της ουσίας επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αν επιδράσουμε στον αριθμό CN αλλά και στα παραπάνω ποσοστά θεωρώ ότι τα αποτελέσματα θα είναι καλύτερα.

5.2. Παρουσίαση Βαθμονόμησης

Στα πλαίσια του πειραματισμού με τις δυνατότητες του προγράμματος διενεργήθηκαν μερικές προσπάθειες εκτέλεσης βελτιστοποιήσεων στο μοντέλο. Για την εκτέλεση αυτών των διαδικασιών ο χρήστης θα πρέπει να δημιουργήσει ένα Optimization Trial μέσω του μενού Compute-Optimization Trial Manager.

Η διαδικασία του Optimization πρόκειται για την δημιουργία ενός μοντέλου αυτόματων υπολογισμών όπου ο χρήστης επιλέγει το μοντέλο λεκάνης και μετεωρολογίας που έχει δημιουργήσει καθώς και έναν κόμβο όπου υπάρχουν παρατηρημένα στοιχεία παροχής. Με την εισαγωγή αυτού του κόμβου, όλα τα ανάντη στοιχεία του μοντέλου, οι κόμβοι, οι σύνδεσμοι και οι ποταμοί εισάγονται στην προετοιμασία του Optimization Trial.

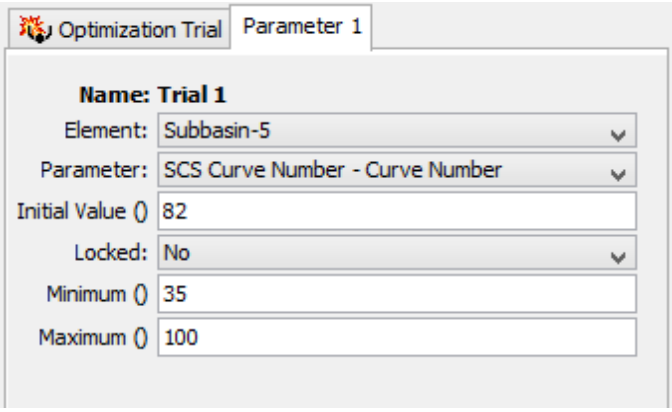
Στην συνέχεια ο χρήστης προσδιορίζει την βασική συνάρτηση με την οποία θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση του μοντέλου. Οι επιλογές παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση της επιλογής παραμέτρου βελτιστοποίησης

Στην συνέχεια ο χρήστης καλείται να εισάγει τις παραμέτρους με βάση τις οποίες θα γίνει η βελτιστοποίηση. Καλείται δηλαδή να ξεκλειδώσει τις μεταβλητές των

στοιχείων των μοντέλων με βάση αυτήν η οποία θεωρεί ότι πρέπει να προσαρμοστεί. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η επιλογή της παραμέτρου Subbasin-5 με επιλεγμένη σαν μεταβλητή την αρχική τιμή του CN της λεκάνης.

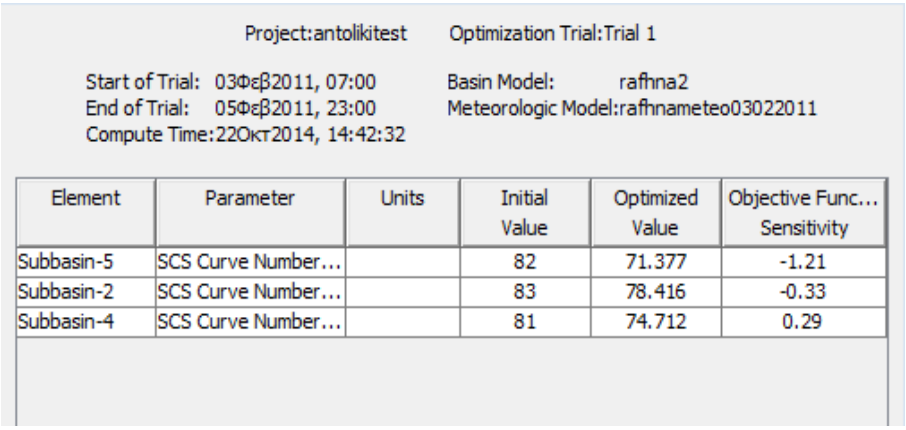


Εικόνα 5.5: Απεικόνιση μενού επίδρασης στις παραμέτρους

Κάθε χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής όσο και των υδατορευμάτων μπορούν να ξεκλειδωθούν και να βελτιστοποιηθούν.

5.2.1. Αυτοματοποιημένη Βελτιστοποίηση για το Επεισόδιο 1 – 03/02/2011

Για λόγους παρουσίασης αλλά και πειραματισμού παρουσιάζεται παρακάτω μια προσπάθεια αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης για το επεισόδιο στις 03/02/2011 όπου η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η Peak-Weighted RMS Error, η οποία έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υπ' όψιν τόσο το βάρος όσο και την χρονική θέση της παροχής αιχμής, και οι Παράμετροι που επιλέχθηκαν για επίδραση είναι τα CN των ανάντη υπολεκανών Subbasin-2,4,5. Τα αποτελέσματα της αλλαγής στους συντελεστές παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



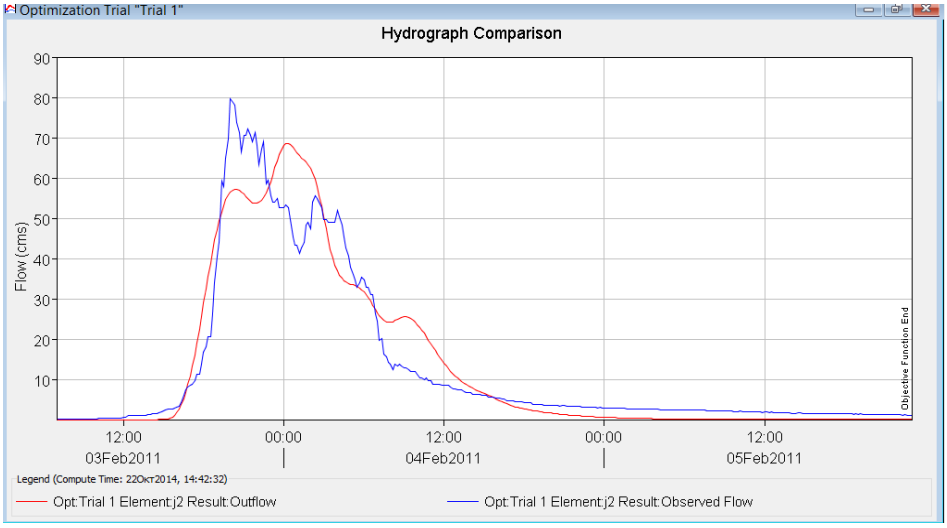
Project:antolikitest Optimization Trial:Trial 1

Start of Trial: 03Φεβ2011, 07:00 Basin Model: rafhna2
End of Trial: 05Φεβ2011, 23:00 Meteorologic Model:rafhnameteo03022011
Compute Time:22Οκτ2014, 14:42:32

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Func... Sensitivity
Subbasin-5	SCS Curve Number...		82	71.377	-1.21
Subbasin-2	SCS Curve Number...		83	78.416	-0.33
Subbasin-4	SCS Curve Number...		81	74.712	0.29

Εικόνα 5.6: Απεικόνιση αποτελεσμάτων διαδικασίας βελτιστοποίησης

Και τα υδρογραφήματα μετά την βελτιστοποίηση παρουσιάζονται ως εξής:



Εικόνα 5.7: Υδρογραφήματα μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης

Επιπλέον για τα στοιχεία του πλημμυρογραφήματος καταγράφονται τα παρακάτω:

Project:antolikitest Optimization Trial:Trial 1

Start of Trial: 03Φεβ2011, 07:00 Basin Model: rafhna2
End of Trial: 05Φεβ2011, 23:00 Meteorologic Model:rafhnameteo03022011
Compute Time:22Οκτ2014, 14:42:32

Objective Function at Basin Element "j2"

Start of Function:03Φεβ2011, 07:00 Type: Peak-Weighted RMS Error
End of Function: 05Φεβ2011, 23:00 Value:9,71

Volume Units: (•) MM ( ) 1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	25,77	25,74	0,03	0,13
Peak Flow (M3/S)	68,6	79,7	-11,1	-13,9
Time of Peak	04Φεβ2011, 00:20	03Φεβ2011, 20:00		
Time of Center of Mass	04Φεβ2011, 02:04	04Φεβ2011, 03:24		

Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης στο πλημμυρογράφημα

Παρατηρούμε ότι τόσο ο όγκος της προσομοίωσης όσο και η αιχμή της πλημμύρας έχουν προσαρμοστεί στα παρατηρημένα μεγέθη ενώ ο χρόνος παρατήρησης της αιχμής είναι διαφοροποιημένος από τον πραγματικό λόγω της μεθόδου βελτιστοποίησης αλλά και του συνθετικού υδρογραφήματος.

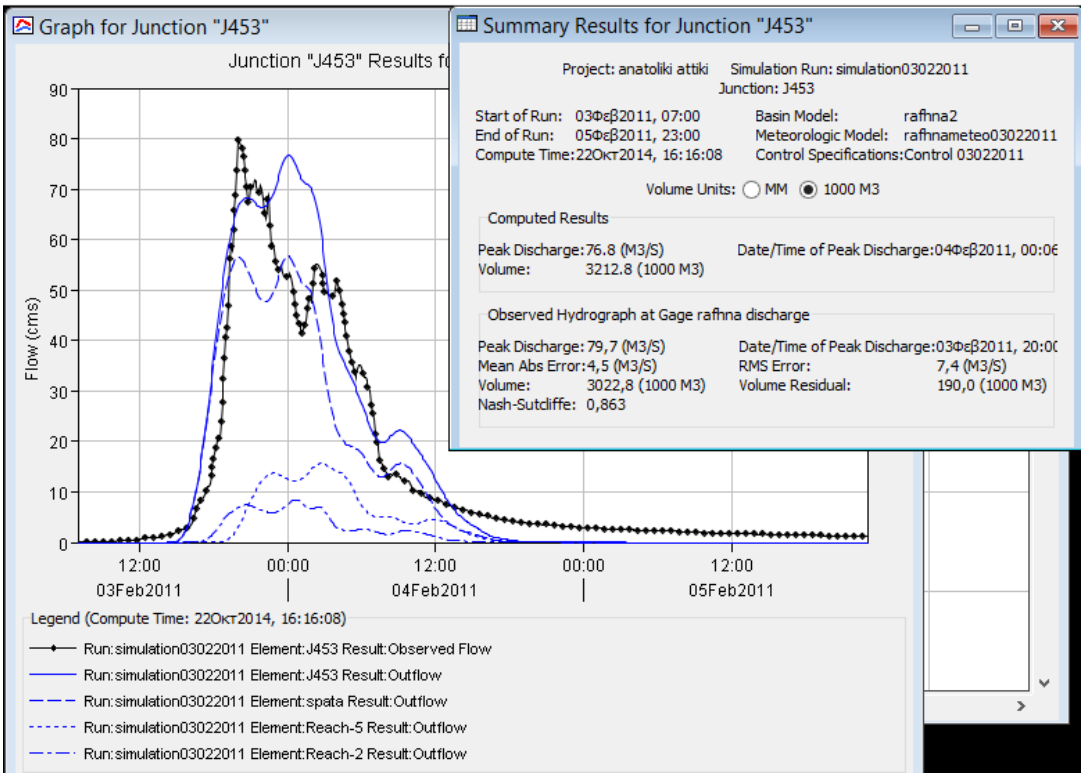
5.2.2. Προσαρμογή των αριθμών καμπύλης απορροής

Μετά την εκτέλεση αρκετών βελτιστοποιήσεων σε επίπεδο δοκιμής και με στόχο την καλύτερη προσομοίωση στο επόμενο κεφάλαιο αποφασίστηκε η μείωση των συντελεστών CN κατά 10% ώστε τα αποτελέσματα να έχουν καλύτερη επαφή με τα παρατηρημένα. Άλλωστε οι αριθμοί CN υπολογίζονται αρκετά συχνά μεγαλύτεροι με στόχο την καλύτερη προστασία από πλημμυρικά επεισόδια. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των CN όπως προβλέφθηκαν από την αρχική ανάλυση και μετά την μείωση κατά 10%:

Πίνακας 5-4: Μείωση των συντελεστών CN

Υπολεκάνη	CN	CN'
Subbasin-1	83	75
Subbasin-2	85	77
Subbasin-3	85	77
Subbasin-4	81	73
Subbasin-5	82	74

Για το γεγονός της 03/02/2011 η προσομοίωση δίνει μετά την μείωση τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 5.9: Αποτελέσματα υπολογισμού του μοντέλου με τους μειωμένους συντελεστές

Παρατηρούμε ότι τόσο η αιχμή όσο και ο όγκος της παροχής είναι πολύ κοντά στα παρατηρημένα. Η προσαρμογή αυτή θα έχει βοηθητικά αποτελέσματα στην διαδικασία εισαγωγής του φράγματος ανάσχεσης.

5.3. Επίδραση Φράγματος Ανάσχεσης

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του τρίτου κεφαλαίου της εργασίας αυτής, το λογισμικό HEC-HMS έχει την δυνατότητα προσομοίωσης μιας δεξαμενής ανάσχεσης πλημμυρικών υδάτων, είτε αυτή είναι φυσική λίμνη, είτε λίμνη φράγματος. Το HEC-HMS μοντελοποιεί την δεξαμενή αυτή με βάση την συνάρτηση αποθήκευσης-παροχής. Το πρόγραμμα μας δίνει επίσης την δυνατότητα να προσομοιώσουμε το φράγμα με συναρτήσεις υψομέτρου-επιφάνειας-παροχής και υψομέτρου-αποθήκευσης-παροχής.

5.3.1. Γενικά στοιχεία

Από τον υπολογισμό της παροχής σχεδιασμού του ρέματος Ραφήνας προκύπτει ότι αν οι συνθήκες που επικρατούν στη λεκάνη απορροής (περιβαλλοντικές, κοινωνικοοικονομικές και μορφομετρικά χαρακτηριστικά) παραμείνουν σταθερές, η παροχή αιχμής με την πάροδο των ετών θα συνεχίσει να αυξάνεται. Επιπλέον, τα υφιστάμενα αντιπλημμυρικά έργα δεν είναι ικανά να διοχετεύσουν τον όγκο πλημμύρας στη θάλασσα χωρίς υλικές, στην καλύτερη των περιπτώσεων, ζημιές, ενώ η σταδιακή μετατροπή των περιοχών γύρω από αυτά σε αστική, δυσκολεύει την ανακατασκευή τους με μεγαλύτερες διαστάσεις, καθώς προαπαιτούνται απαλλοτριώσεις υψηλού κόστους. Έτσι, οι λύσεις αναζητήθηκαν στη δυνατότητα κατασκευής έργων ανάσχεσης της πλημμύρας στις πιο απομακρυσμένες από την εκβολή θέσεις του ρέματος Ραφήνας, τα οποία μπορούν να καθυστερήσουν την εκδήλωση της πλημμυρικής αιχμής.

Ένα από τα έργα που προτάθηκαν είναι η κατασκευή χωμάτινου φράγματος στη Χ.Θ.6+850, στην περιοχή της πεδιάδας των Σπάτων, σε θέση όπου η συγκέντρωση των υδάτων δεν θα δημιουργεί πρόβλημα στη Μονή Θεοτόκου που βρίσκεται κατάντη, (Κοψιαύτη, 2006)

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου διόδευσης διαμέσου ταμιευτήρα, οι υπολογισμοί βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας:

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$, (Τσακίρης, 1995) όπου: (5.1)

$I(m^3/s)$: η εισροή στο φράγμα

$Q(m^3/s)$: η εκροή από το φράγμα

$S(m^3)$: η αποθήκευση στο φράγμα

t: ο χρόνος

Η διαφορική εξίσωση (5.1) με τη μορφή πεπερασμένων διαφορών γράφεται:

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad \Leftrightarrow \quad S_2 + \frac{\Delta t}{2} Q = S_2 + \frac{\Delta t}{2}(I_1 + I - Q)$$

(5.2)

$$\Leftrightarrow \quad N_2 = N_1 + (\bar{I}_{1,2} - Q_1)$$, όπου: (5.3)

με $$\bar{I}_{1,2} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$ (5.4)

Ο όρος N επιλέγεται για να διευκολύνει την εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας που ορίζει η σχέση (5.3) για τον υπολογισμό της παροχής εκροής Q μέσω του υπερχειλιστή μεταξύ των χρονικών στιγμών t1, t2 που απέχουν κατά Δt. Όπου γενικά:

$$N = \frac{S}{\Delta t} + \frac{Q}{2} \quad (5.5)$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης (5.3) είναι:

$$N_{i+1} = N_i + (\bar{I}_{i,i+1} - Q_i) \quad (5.6)$$

Στη σχέση (5.6) το δεύτερο μέλος είναι γνωστό, αφού για την εφαρμογή είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η σχέση εκροής από τον ταμιευτήρα και αποθήκευσης.

Συνήθως η αποθήκευση υδάτων S στον ταμιευτήρα (όγκος ανάσχεσης) δίνεται συναρτήσει της στάθμης νερού πάνω από τη στάθμη στέψης του υπερχειλιστή, από μια συνάρτηση της μορφής:

$$S = f(H) \quad (5.7)$$

όπου H (m): ύψος (φορτίο) υπερχείλισης, (Μουτάφης, 2004, σ. 46).

5.3.2. Εισαγωγή του φράγματος στο HEC-HMS

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο εκδοχές με υψόμετρα στέψης του υπερχειλιστή του φράγματος στα +64 και +65 μέτρα.

Η σχέση στάθμης – παροχής εκροής (από τον υπερχειλιστή) που τελικά χρησιμοποιήθηκε είναι η ακόλουθη:

$$Q = 1.7 * L * (Z - Z_0)^{\frac{3}{2}} \qquad (5.8)$$

Όπου:

Q (m^3/s): η παροχή εκροής

L (m): το μήκος στέψης του υπερχειλιστή ίσο με 100m (το ίδιο με αυτό που πρότεινε η μελέτη της ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗΣ).

Z (m): στάθμη νερού στον ταμιευτήρα

Zo(m): στάθμη στέψης του υπερχειλιστή (+64 m, +65 m).

Η διαφορά (Z – Zo) ισούται με το ύψος (φορτίο) υπερχείλισης H.

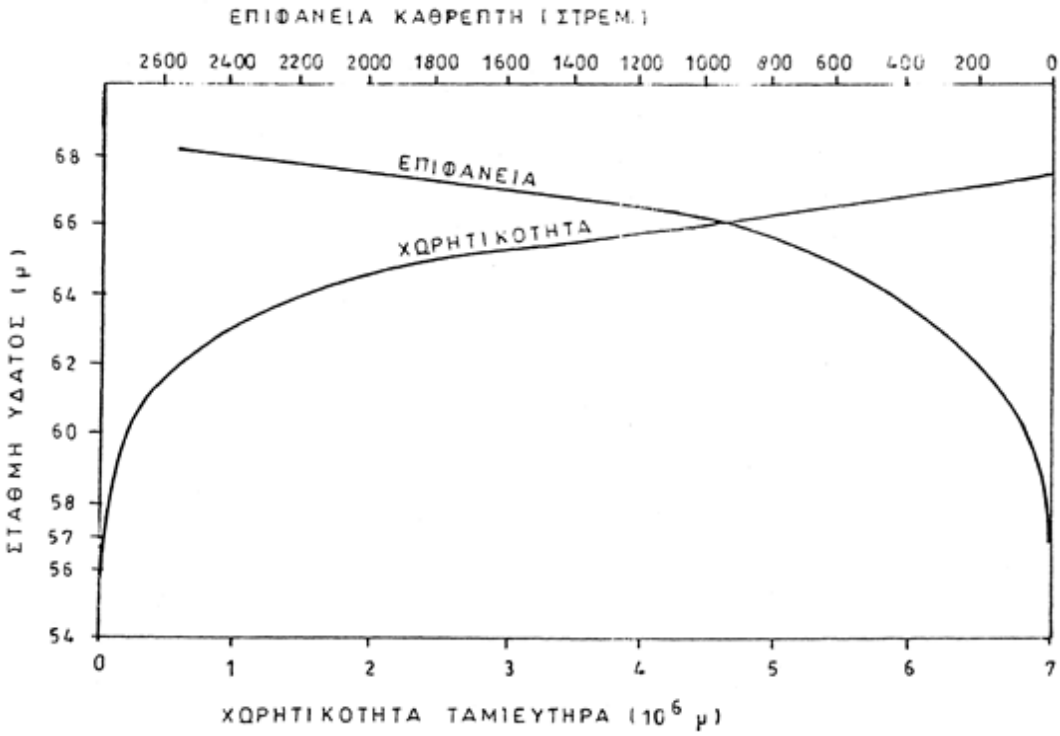
Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η βοηθητική καμπύλη N=N(Q), (εξ. 5.5).

Ως S (m^3): η αποθήκευση στον ταμιευτήρα επάνω από τη στάθμη Zo.

Δt (s): το χρονικό βήμα ίσο με 0,5 hr = 1800 s (ίδιο με αυτό του πλημμυρογραφήματος εισροής στον ταμιευτήρα).

Για τον υπολογισμό της αποθήκευσης στον ταμιευτήρα στις διάφορες στάθμες νερού χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα στάθμης – χωρητικότητας που υπολογίστηκε από τη «Μελέτη διευθέτησης ρέματος Ραφήνας – Γενική διάταξη προτεινόμενων έργων» (ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Ε.Ε. κ.ά., 1999), (Σχήμα 5.10). Η χρήση του διαγράμματος για τον υπολογισμό της αποθήκευσης επάνω από την στάθμη στέψης του υπερχειλιστή έγινε ως εξής: υπολογίστηκε η τιμή της χωρητικότητας S για στάθμη νερού Zo (+64 m και +65 m) και στη συνέχεια αφαιρέθηκε η τιμή αυτή για κάθε στάθμη νερού επάνω από την Zo. Η διαφορά που προέκυψε είναι αυτή που εισήχθη στον τύπο της βοηθητικής καμπύλης N. Επίσης, για τον υπολογισμό των τιμών της παροχής εκροής Q (εξ. 5.8) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο διάγραμμα για

την επιλογή διαφόρων υψομέτρων στάθμης Z. Με τις τιμές του όρου N συναρτήσει της παροχής εκροής Q σχεδιάζεται η αντίστοιχη καμπύλη, (Κοψιαύτη, 2006).



Εικόνα 5.10: Συναρτήσεις επιφάνειας-στάθμης και χωρητικότητας-στάθμης προτεινόμενου ταμ. πλημμυρικής ανάσχεσης, (ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ Ε.Ε. κ.ά., 1999).

Από την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων προκύπτουν οι σχέσεις παροχής-αποθήκευσης που εισάγουμε στο πρόγραμμα.

Για στέψη υπερχειλιστή φράγματος Ζο στα +64μ:

Πίνακας 5-5:Παροχή εκροής- αποθήκευση για στέψη υπερ/στή φράγματος στα +64μ

Υψόμετρο στάθμης υδάτων z **(m)**	**Παροχή εκροής** Q **(** m^3/s **)**	**Αποθήκευση** S **πάνω από το επίπεδο Ζο (** $*10^6 m^3$ **)**
64,0	0,0	0,00
64,5	60,1	0,45
65,0	170,0	1,05
65,5	312,3	1,90
66,0	480,8	2,95

66,5	672,0	3,80
67,0	883,3	4,75
67,5	1113,1	5,40

Για στέψη υπερχειλιστή φράγματος Ζο στα +65μ:

Πίνακας 5-6: Παροχή εκροής-αποθήκευση για στέψη υπερ/στη φράγματος στα +65μ

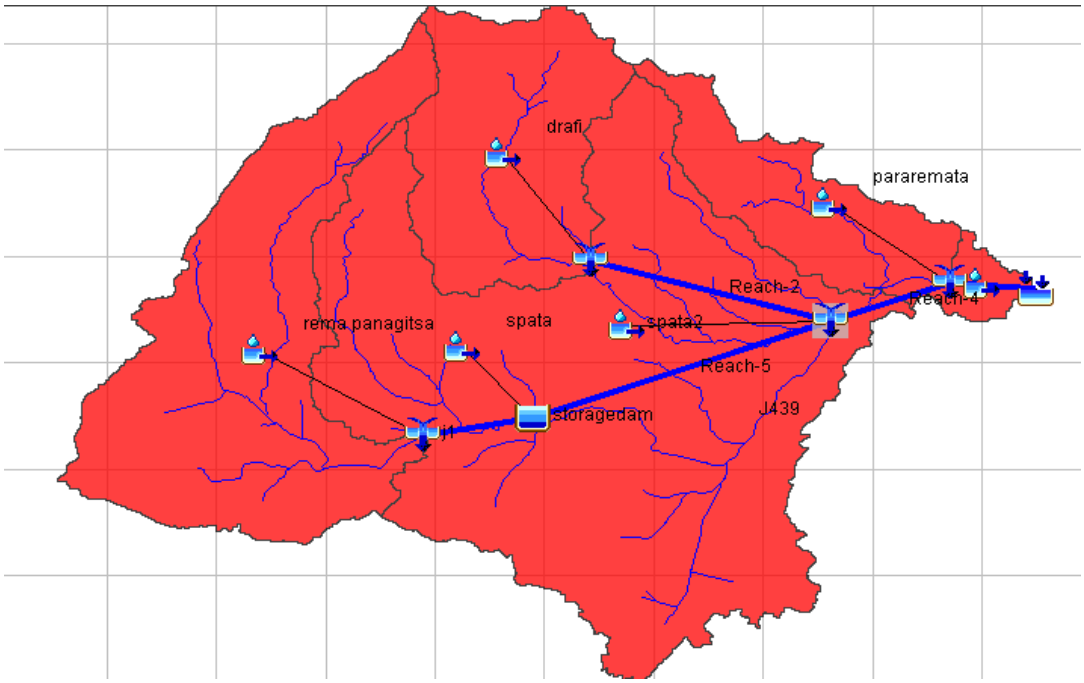
Υψόμετρο στάθμης υδάτων z **(** m **)**	**Παροχή εκροής** Q **(** m^3/s **)**	**Χωρητικότητα** S **πάνω από το επίπεδο Ζο (** $*10^6 m^3$ **)**
65,0	0,0	0,00
65,5	60,1	0,85
66,0	170,0	1,90
66,5	312,3	2,75
67,0	480,8	3,70
67,5	672,0	4,35

Επιπλέον, με βάση την θέση που προτείνεται για το φράγμα προκύπτουν οι παρακάτω αλλαγές για το routing (διόδευση) στα υδατορεύματα:

Πίνακας 5-7: Διόδευση υδατορευμάτων με φράγμα ανάσχεσης

reaches	L(m)	K(hr)	X	Subreaches
reach1	8320	2,31	0,2	14
reach5	3464	0,96	0,2	6
reach2	5596	1,55	0,2	9
reach3	1895	0,53	0,2	3
reach4	1491	0,41	0,2	2

Θα πρέπει επίσης να προσαρμόσουμε την ανάντη προς το φράγμα υπολεκάνη ώστε η παροχή της να διέρχεται πρώτα από το φράγμα ανάσχεσης, ενώ η υπόλοιπη λεκάνη να δημιουργεί τις απαιτούμενες απορροές. Για λόγους ευκολίας η Subbasin-5 χωρίστηκε σε 2 τμήματα με βάση υπολογισμούς στο ArcMa και το lag time χωρίστηκε σε 2 ίσα τμήματα για λόγους ευκολίας. Η νέα μορφή του μοντέλου λεκάνης απορροής με θεώρηση του φράγματος ανάσχεσης, παρουσιάζεται παρακάτω:



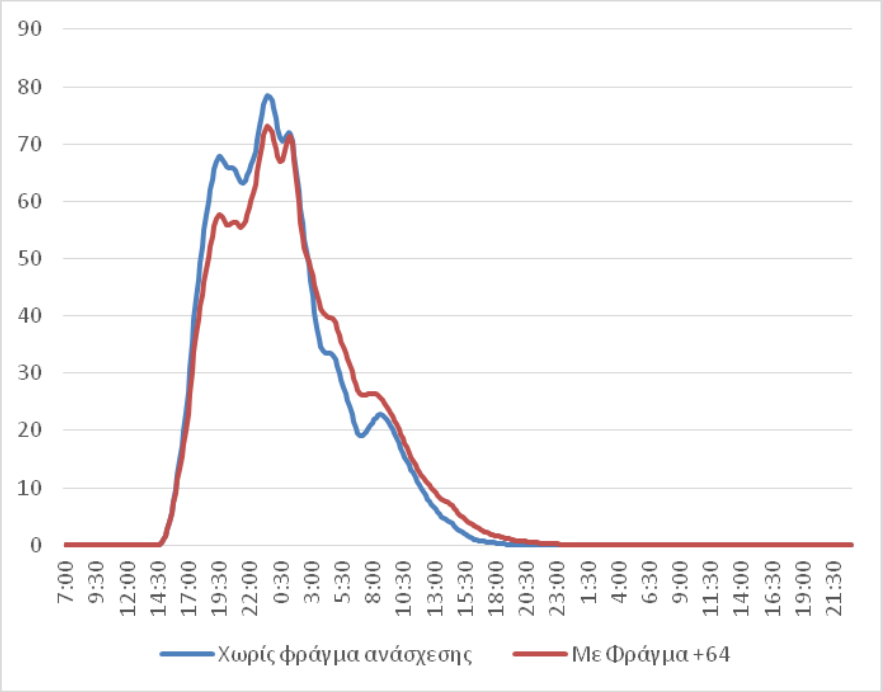
Εικόνα 5.11: Προσαρμοσμένο μοντέλο λεκάνης με φράγμα ανάσχεσης

Παρατηρούμε ότι η χιλιομετρική θέση προσομοιώνεται ως μέγεθος του υδατορεύματος. Η διορθωμένη λεκάνη μετά από την εκτέλεση της προσομοίωσης, δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την αρχική, οπότε θεωρούμε αξιόπιστα τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρώντας την ύπαρξη του φράγματος ανάσχεσης.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων αποθήκευσης-παροχής και διόδευσης, το πλημμυρογράφημα για το δυσμενέστερο επεισόδιο βροχής που εκδηλώθηκε στις 03/02/2011 αποκτά την μορφή:

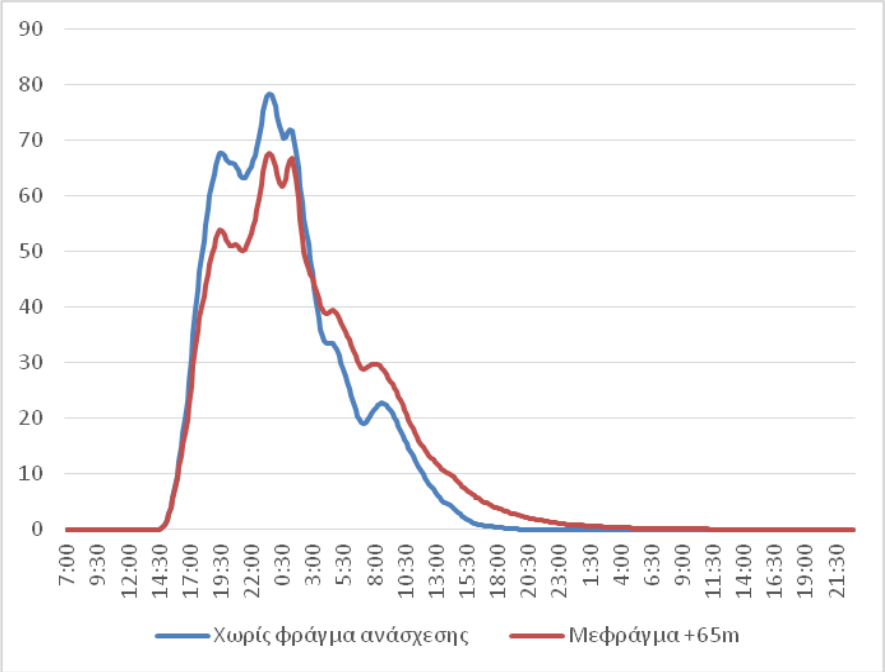
- Με στέψη υπερχειλιστή στα +64m:

Πίνακας 5-8: Χρονολογικό διάγραμμα σύγκρισης πλημμυρογραφημάτων για φράγμα με στέψη υπερ/στή στα +64m



- Με στέψη υπερχειλιστή στα +65m:

Πίνακας 5-9: Χρονολογικό διάγραμμα σύγκρισης πλημμυρογραφημάτων για φράγμα με στέψη υπερ/στή. στα +65m



5.3.3. Αποτίμηση της λειτουργίας του φράγματος

Η προσομοίωση μέσω του μοντέλου HEC-HMS ενός φράγματος ανάσχεσης πλημμύρας όπως είχε προβλεφθεί από την μελέτη της ΥΔΡΟΕΞΥΓΕΙΑΝΤΙΚΗΣ, δίνει αποτελέσματα τα οποία έχουν επίδραση στις πλημμυρικές απορροές. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η μείωση της πλημμυρικής αιχμής κατά 11% για στέψη υπερχειλιστή φράγματος στα +65 m και η καθυστέρησή της κατά ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, πράγμα που επιβεβαιώνει κατ' αρχάς την επίδρασή του στο πλημμυρικό φαινόμενο αλλά και δημιουργεί συνθήκες περαιτέρω έρευνας.

Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται ο καλύτερος σχετικός προσδιορισμός του φράγματος ανάσχεσης στην θέση του μοντέλου μέσω της σωστότερης προσαρμογής του μεγέθους των υπολεκανών και των υδατορευμάτων, καθώς και

της συνάρτησης αποθήκευσης-παροχής. Θεωρείται ότι το πρόγραμμα HEC-HMS μας δίνει την δυνατότητα πλήρους υδρολογικής προσομοίωσης της λίμνης ενός φράγματος αλλά και σύγκρισης με τις παρατηρημένες συνθήκες, που λόγω έλλειψης χρόνου, δεν ερευνήθηκαν πλήρως σ' αυτή την εργασία.

5.3.4. Παρούσες συνθήκες στην περιοχή μελέτης

Στο κεφάλαιο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά στις πρόσφατες εξελίξεις στην περιοχή του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας, καθώς στην τελευταία Μελέτη της διευθέτησης του Ρέματος και πιο συγκεκριμένα στην Προμελέτη Διευθέτησης του τμήματος Β προτείνονται 3 διαφορετικές λύσεις.

«Προτείνεται καταρχήν η «κύρια λύση» η οποία εξασφαλίζει την αντιπλημμυρική προστασία της πεδιάδας έναντι κατακλύσεων, άλλα έχει ως συνεπακόλουθο τη δημιουργία μεγαλύτερου μεγέθους έργων στα κατάντη και στην εκβολή με καταβιβασμό της στάθμης πυθμένα και εισχώρησης της θάλασσας. Στην κύρια λύση προβλέπεται καθολική θωράκιση όλης της τεχνητής κοίτης με συρματοκιβώτια ή και σκυρόδεμα.»

Ως εναλλακτική προτείνεται: «Στις άλλες λύσεις που εξετάζονται προβλέπονται είτε μικρότερες τραπεζοειδείς διατομές ανεπένδυτες σε μεγάλο ποσοστό, με αναβαθμούς ή όχι και περιοδικές κατακλύσεις στην πεδιάδα»

Ενώ τέλος εξετάζεται και η περίπτωση κατασκευής ενός φράγματος ανάσχεσης για την οποία η προμελέτη αναφέρει:

«Η συνολική εναλλακτική λύση με την κατασκευή του φράγματος ανάσχεσης ουσιαστικά μπορεί να διαφοροποιήσει την παροχή στη σήραγγα εκτροπής από 300 σε 154 m3/s που αντιστοιχεί σε μείωση της διαμέτρου της σήραγγας από 7.40 στα 5.60 m. Η λύση όμως αυτή του φράγματος απαιτεί έκταση απαλλοτρίωσης στην περιοχή της πεδιάδας των Σπάτων μεγαλύτερη των 400 στρεμμάτων και ένα σημαντικό κόστος κατασκευής του φράγματος και των υπόλοιπων έργων που το συνοδεύουν. Με την εκτίμηση του κόστους της λύσης αυτής, φαίνεται ότι η λύση αυτή είναι οικονομικά δυσμενέστερη σε σχέση με τη λύση χωρίς την κατασκευή του φράγματος. Κυρίαρχο όμως ρόλο για τη μη αποδοχή της λύσης του φράγματος, πέρα από το δυσμενές οικονομικό αποτέλεσμα, είναι το ιδιαίτερα υψηλό κοινωνικό

κόστος για την περιοχή που θα απαλλοτριωθεί. Είναι γνωστή και δεδομένη η αντίθεση των κατοίκων της περιοχής σε τέτοιες λύσεις και εκτιμάται ότι, λόγω αυτής της αντίθεσης, θα δημιουργηθούν αξεπέραστες δυσκολίες στην υλοποίηση του έργου διευθέτησης του ρ. Ραφήνας.»

(πηγή: "Μελέτη Διευθέτησης Ρέματος Ραφήνας-Υδραυλική Προμελέτη" (ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΧΑΙΡΑ, ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ, ΥΔΩΡ-ΝΟΤΑΡΑΣ, ΜΕΤΕΡ, 2009))

6. **ΣΥΝΟΨΗ**

1. Μέσω της χρήσης προγραμμάτων επεξεργασίας της γεωχωρικής πληροφορίας προέκυψαν στοιχεία για την λεκάνη απορροής τόσο σε σχέση με το σχήμα, την υψομετρία και το μέγεθος της, όσο και σε σχέση με υδρολογικού ενδιαφέροντος δεδομένα. Επίσης δημιουργήθηκαν ψηφιακοί χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας. Πιο συγκεκριμένα, από την εργασία αυτή προέκυψαν σε ψηφιακή μορφή το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής αλλά και το πλέγμα των υπολεκανών της ευρύτερης λεκάνης απορροής. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν χάρτες κατεύθυνσης και συγκέντρωσης της ροής αλλά και το υδρολογικό ΨΜΕ της περιοχής. Τέλος, με βάση τις σημερινές χρήσεις γης επιλέχθηκαν κατ' αρχάς οι συντελεστές CN (αριθμοί καμπύλης απορροής).

2. Με την χρήση του προγράμματος HEC-HMS στην υπόψη λεκάνη απορροής εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για διάφορα επεισόδια βροχής και έγινε σύγκριση με τα παρατηρημένα δεδομένα της παροχής. Επειδή αρχικά οι προσομοιωμένες παροχές υπερεκτιμούν τις μετρηθείσες, χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα βελτιστοποίησης του μοντέλου με μείωση των αρχικών τιμών των συντελεστών CN, ώστε το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα να προσαρμόζεται καλύτερα στο μετρηθέν. Αυτό καταδεικνύει ότι η επιλογή των συντελεστών CN επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου και ότι όταν δεν υπάρχουν μετρημένες τιμές της παροχής, καλό είναι οι CN να εκτιμώνται συντηρητικά (δηλαδή με τιμές κατά τι μικρότερες από τις συνιστώμενες βιβλιογραφικά για τις αντίστοιχες χρήσεις γης, συνθήκες υγρασίας και εδαφικό τύπο).

3. Έγινε ακόμη προσομοίωση ενός φράγματος ανάσχεσης της πλημμυρικής αιχμής στην υπολεκάνη των Σπάτων για το δυσμενέστερο επεισόδιο βροχής. Με στέψη υπερχειλιστή φράγματος στα +64 m η αιχμή του πλημμυρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης απορροής δεν επηρεάζεται σημαντικά (3.5% μείωση). Αντίθετα, με στέψη στα +65 m η πλημμυρική αιχμή μειώνεται κατά 11%.

Βιβλιογραφία – Ιστογραφία

1. Γιακουμάκης Σ., *Ανοικτοί Αγωγοί & Υδραυλικές Κατασκευές*, Σημειώσεις, 55 σελίδες, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων – Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000α.
2. Γιακουμάκης Σ., *Διευθετήσεις Υδατορευμάτων – Συμπληρωματικές Σημειώσεις*, 32 σελίδες, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων – Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000β.
3. Κοψιαύτη Σ., *Αντιπλημμυρική προστασία του Ρέματος της Ραφήνας,* Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
4. Γραφείο Μαχαίρα Ε.Π.Ε., *Οριστική μελέτη διευθετήσεως ρέματος Ραφήνας*, Διεύθυνση Δ3 Υπουργείου Δημοσίων Έργων, Αθήνα, 1984.
5. "Μελέτη Διευθέτησης Ρέματος Ραφήνας-Υδραυλική Προμελέτη", Γραφείο Μαχαίρα , Υδροεξυγειαντική, Υδωρ-Νοταράς, Μέτερ 2009
6. Τσακίρης Γεώργιος, Υδατικοί Πόροι 1, Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995
7. Λαζαρίδης Λ., Ναλμπάντης Ι., Αντιπλημμυρική προστασία λεκάνης ρέματος Ραφήνας, 14 σελίδες, *Ημερίδα «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής»*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Επαγγελματικής Ανάπτυξης, Γραφείο Παραγωγής Έργων, Αθήνα, 2004
8. Μπενσασσών Α., Παπαλεξόπουλος Β., Αντιπλημμυρική προστασία λεκανοπεδίου ρέματος Ερασίνου, 13 σελίδες, *Ημερίδα «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής»*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Επαγγελματικής Ανάπτυξης, Γραφείο Παραγωγής Έργων, Αθήνα, 2004
9. Νικολόπουλος Α., Γενικός σχεδιασμός – Ιστορική αναδρομή, 14 σελίδες, *Ημερίδα «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής»*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Επαγγελματικής Ανάπτυξης, Γραφείο Παραγωγής Έργων, Αθήνα, 2004
10. Μπαριαμής Ν., *Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του Ρέματος Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή

εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012.

11. Παγάνα Β., *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας,* Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012.
12. Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη *Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων,* Επίσημη Εφήμερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L327/1, 22 Δεκεμβρίου 2000.
13. Σακκάς, Ι.Γ., *Τεχνική Υδρολογία*, Τόμος Ι , Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, 2η έκδοση, Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη, 2004.
14. Γ. Τσακίρης, Μεθοδολογική προσέγγιση της Αντιπλημμυρικής Προστασίας στο πλαίσιο της νέας οδηγίας, Ημερίδα «Αντιπλημμυρικός σχεδιασμός / Διαχείριση κινδύνου πλημμυρών: υφιστάμενη κατάσταση – νέα δεδομένα**»,** ΤΕΕ, Αθήνα, 5 Δεκεμβρίου, 2007.
15. Α. Νικολόπουλος, Γενικές κατευθύνσεις και προτάσεις για το σχεδιασμό έργων αντιπλημμυρικής προστασίας και τη διαχείριση των πλημμύρων, Ημερίδα «Αντιπλημμυρικός σχεδιασμός / Διαχείριση κινδύνου πλημμυρών: υφιστάμενη κατάσταση – νέα δεδομένα**»,** ΤΕΕ, Αθήνα, 5 Δεκεμβρίου, 2007.
16. Α. Στάμου, Αντιπλημμυρική προστασία του Λεκανοπεδίου Αθηνών, Ημερίδα «Αντιπλημμυρικός σχεδιασμός / Διαχείριση κινδύνου πλημμυρών: υφιστάμενη κατάσταση – νέα δεδομένα**»,** ΤΕΕ, Αθήνα, 5 Δεκεμβρίου, 2007.
17. Ν. Μαμάσης, Ο Υδρολογικός Κύκλος, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
18. Πυρκαγιά της Β.Α. Αττικής – Αύγουστος 2009: Αλλαγές στην κάλυψη γης του Νομού και οικολογικός απολογισμός της φωτιάς», WWF Ελλάς, Αθήνα: Σεπτέμβριος 2009.
19. Τζάλη Μ., Προμπονάς Ν., Fric J., Τα πουλιά των υγροτόπων της Αττικής. Πρόγραμμα παρακολούθησης ορνιθοπανίδας στους υγροτόπους της Αττικής. Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία, Αθήνα, σελ.69, 2012
20. D. Alexakis, Diagnosis of stream sediment quality and assessment of toxic element contamination sources in East Attica, Greece. Athens, 2010.

21. Fleming, M.J., Doan, J.H. , *HEC – GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 5.0, 2010.*
22. Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J., *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 3.5, August 2010.*
23. Merwade, V., Creating SCS Curve Number Grid using HEC-GeoHMS, School of Civil Engineering, Purdue University, 2012.
24. Merwade, V., Hydrologic Modeling using HEC-HMS, School of Civil Engineering, Purdue University, 2012.

Ιστολόγια – Διαδικτυακοί τόποι

1. Υ.Π.Ε.Κ.Α. – www.ypeka.gr
2. ArcGIS Resources Forum - http://forums.arcgis.com/
3. European Commission - http://ec.europa.eu/index_en.htm
4. Hydrological Observatory of Athens – http://www.hoa.ntua.gr
5. Google Maps – http://maps.google.com
6. Wikimapia - http://wikimapia.org/
7. Περιφέρεια Αττικής - http://www.patt.gov.gr/main/
8. Δημόσια, Ανοικτά Δεδομένα - http://geodata.gov.gr/